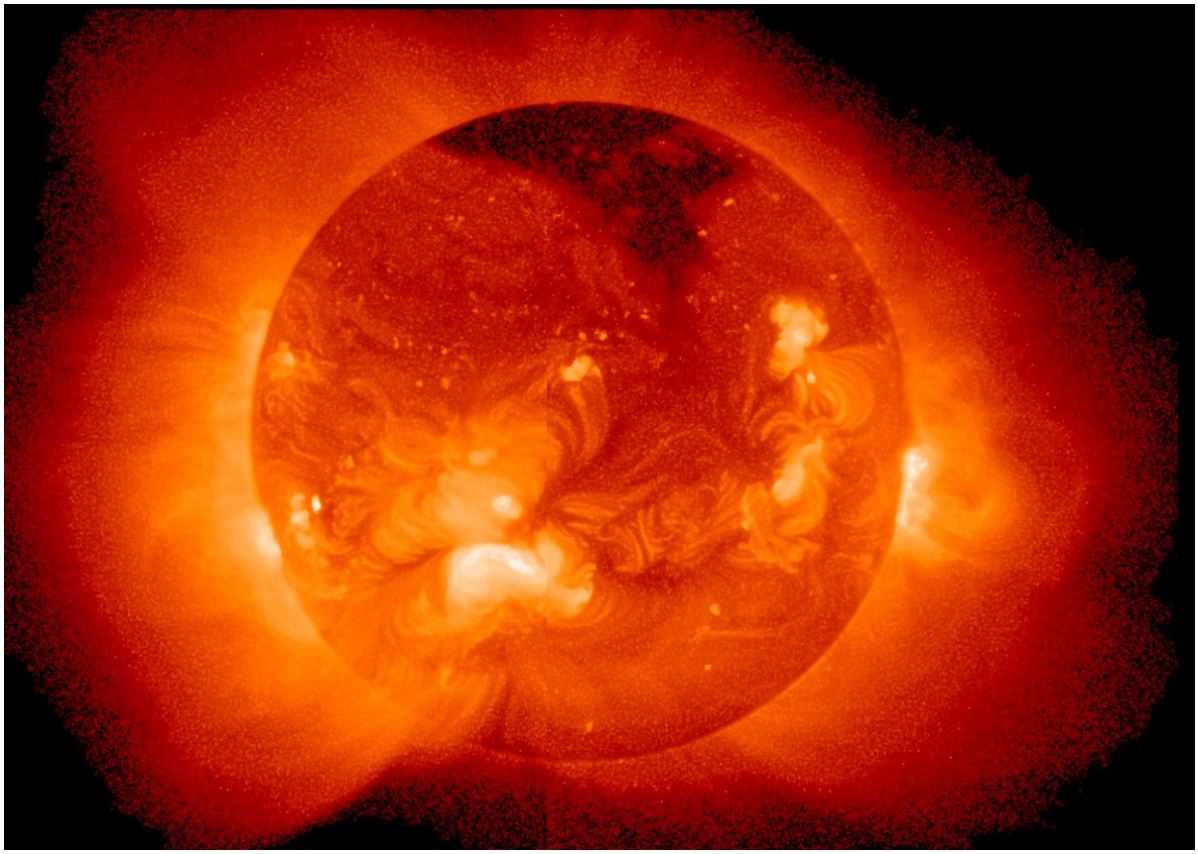
Václav Vaněk

Bez jádra to nepůjde



Obsah

ÚVOD 4

1.0 STRUČNÁ HISTORIE MÍROVÉHO VYUŽÍVÁNÍ JADERNÉ ENERGIE 5

2.0 JADERNÁ ENERGIE A RADIOAKTIVNÍ ZÁŘENÍ 8

2.1 Měření aktivity 8

2.2 Přírodní a umělé zdroje záření 9

2.2.1 Přírodní zdroje záření 10

2.2.2 Umělé zdroje záření 11

2.3 Výpočet vlastní dávky záření 12

3.0 ZDRAVOTNÍ RIZIKA IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ 13

3.1 Bezprahová lineární teorie 14

3.2 Radiační hormeze 15

4.0 VZÁJEMNÉ POROVNÁVÁNÍ ZDROJŮ K VÝROBĚ ELEKTŘINY 17

4.1 Výkonová hustota energetických zdrojů 17

4.2 Energetické zdroje Země a jejich životnost 19

4.3 Měrná potřeba surovin, materiálů a plochy při výstavbě a provozu elektráren 23

4.4 Spotřeba paliva k výrobě elektrické energie 25

4.5 Produkce odpadů při výrobě elektrické energie 25

4.6 Způsob likvidace odpadů vznikajících při výrobě elektrické energie 28

4.7 Ekonomické aspekty výroby elektřiny v elektrárnách různých typů 33

4.7.1 Náklady na výstavbu různých typů elektráren 33

4.7.2 Náklady na výrobu elektřiny v různých typech elektráren 35

4.7.3 Externí náklady při výrobě elektřiny 38

4.7.4 Náklady na konečnou demontáž jaderných elektráren 39

4.8 Vliv elektráren na životní prostředí 39

4.8.1 Emise oxidu uhličitého při výrobě elektřiny 39

4.9 Zdravotní a jiná civilizační rizika 42

5.0 ENERGETICKÉ VYUŽITÍ JADERNÉ ENERGIE 46

5.1 Výroba elektřiny a tepla 46

5.1.1 Jaderné energetické reaktory 46

5.1.2 Výroba elektřiny 49

5.1.3 Kombinovaná výroba elektřiny a tepla 50

5.1.4 Zkušenosti z provozu jaderných elektráren 51

5.2 Výroba vodíku 57

5.2.1 Výroba vodíku z fosilních paliv 57

5.2.2 Výroba vodíku z vody 58

5.2.3 Výroba vodíku s využitím jaderné energie 58

5.2.4 Předpoklady pro realizaci vodíkového hospodářství 60
5.3 Odsolování mořské vody 61
5.3.1 Technologie odsolování 61
5.3.2 Jaderná energie a odsolování 62
5.3.3 Jaderné reaktory vhodné k odsolování 62
5.3.4 Národní programy jaderného odsolování 63
5.3.5 Odsolovací zařízení na plovoucích plošinách 63
5.4 Pohon dopravních prostředků 65
5.4.1 Jaderný pohon vojenských plavidel 65
5.4.2 Jaderný pohon civilních lodí 66
5.4.3 Jaderný pohon jiných dopravních prostředků 67
5.5 Využití jaderné energie ve výzkumu kosmu 68
5.5.1 Jaderná zařízení pro dodávku elektřiny a tepla 68
5.5.2 Jaderný pohon pro výzkum kosmu 71
5.5.3 Reaktor pro dlouhodobý pobyt kosmonautů na Měsíci 72

6.0 NEENERGETICKÉ VYUŽITÍ JADERNÉ ENERGIE 74
6.1 Některé aplikace ve zdravotnictví 77
6.2 Některé aplikace v průmyslu 78
6.2.1 Nedestruktivní zkoušení 78
6.2.2 Radiační vulkanizace a ošetření polymerů 78
6.3 Jaderná technika a ochrana životního prostředí 79
6.4 Využití jaderné vědy a techniky v zemědělství 80
6.4.1 Mutační šlechtění rostlin s využitím záření 81
6.4.2 Radiační sterilizace hmyzích škůdců 82
6.4.3 Zlepšování zdravotního stavu dobytka 84
6.4.4 Biologická hnojiva 84
6.4.5 Produktivní využití zasolených půd 85
6.5 Radiační ošetřování potravin 87

7.0 ZDRAVOTNÍ NÁSLEDKY ČERNOBYLSKÉ HAVÁRIE 90
7.1 Výsledky Mezinárodního projektu Černobyl z roku 1991 90
7.2 Hodnocení zdravotních následků Černobylu po 10, 15 a 20 letech 91

8.0 PROTIJADERNÉ HNUTÍ VE SVĚTĚ A V ČR 94
8.1 Protijaderné hnutí v ČR 95
8.2 Hlavní argumenty proti jaderné energii v ČR 96
8.3 Odpovědi na některé argumenty proti jaderné energii 98
8.4 Jaderná energie a média 101
8.5 Ekologové - budoucí propagátoři jaderné energie 102

9.0 VZTAH NĚKTERÝCH ZEMÍ K JADERNÉ ENERGII 105
9.1 Stav jaderné energetiky v jednotlivých zemních 105

10.0 PERSPEKTIVY JADERNÉ ENERGETIKY 118
10.1 Mezinárodní spolupráce při vývoji zdokonalených reaktorů 118

10.1.1 Mezinárodní fórum generace IV (GIF) 119
10.1.2 Mezinárodní projekt INPRO 122
10.1.3 Mezinárodní spolupráce při vývoji rychlých reaktorů 123
10.2 Některé podmínky pro další rozvoj jaderné energetiky 123
10.3 Koncepce a projekty zdokonalených reaktorů 124
10.3.1 Zdokonalené reaktory malých a středně velkých výkonů 125
10.3.2 Zdokonalené reaktory velkých výkonů 127
10.4 Globální „stmívání“ a jaderná energie 128

Úvod

Pravdu v názvu knihy již znali sedláci, když potřebovali silné koně živené jadrným krmivem k tahání těžkých nákladů, a souhlasí s ní i odborníci z energetiky a situace znalí ekonomové a příznivci udržitelného rozvoje, když hodnotí především budoucí situaci v oblasti energetiky, demografie, ekologie a ekonomiky.

Tato publikace se pokusí na konkrétních údajích prokázat pravdivost názvu, aniž by zacházela do přílišných teoretických podrobností. Měla by poskytnout celkový přehled o všestranných možnostech energetického i neenergetického využití jaderné vědy a techniky, z nichž se některé aplikace realizují již dnes, ale další a ještě v širším měřítku se budou využívat v několika příštích desetiletích, aby pomohly světu řešit nejnaléhavější problémy spojené se zajišťováním dostatku energie, pitné vody a potravin při současném omezování znečišťování životního prostředí a globálního oteplování. Jaderná energie ale není všelékem, a proto se musí rozvíjet v kombinaci se všemi reálně dostupnými energetickými zdroji a technickými možnostmi.

Publikace začíná stručnou historií mírového využívání jaderné energie, která ale bohužel navazuje na dřívější vojenské použití nového perspektivního energetického zdroje. Nebylo to ale poprvé, kdy byl nový vědecký objev využit i pro vojenské účely. Zpočátku přehnaný optimismus vkládaný do nového zdroje energie byl časem vystřídán stejně přehnaným pesimismem. Rozvoj jaderné energetiky však pokračoval, i když ne tak rychlým tempem, jak se původně očekávalo. Druhá kapitola se snaží osvětlit základní charakteristický rys jaderné energie, kterým je ionizující záření a jeho dva hlavní druhy, tj. přírodní a umělé, člověkem vytvořené zdroje záření. Čtenář si může sám s pomocí tabulky vypočítat radiační dávku, kterou obdrží v průběhu roku. Kapitola tři shrnuje údaje týkající se zdravotních rizik ionizujícího záření. Jsou zde uváděny důsledky používání velmi konzervativní bezprahové lineární teorie a problematika nízkých dávek záření včetně, tzv. radiační hormeze. Čtvrtá kapitola porovnává různé zdroje energie k výrobě elektřiny z celé řady hledisek, počínaje výkonovou hustotou, zpracováním odpadů a vlivem na zdraví a životní prostředí konče. Kapitola pět se týká energetického využití jaderné energie. Jednotlivé podkapitoly si všímají výroby elektřiny a tepla, výroby vodíku, odsolování mořské vody, pohonu dopravních prostředků a využití jaderné energie ve výzkumu kosmu. Šestá kapitola uvádí přehled o neenergetickém využívání jaderné vědy a techniky ve zdravotnictví, průmyslu, zemědělství, při ošetřování potravin a v ochraně životního prostředí. Sedmá kapitola přináší zejména informace o zdravotních následcích Černobylské jaderné elektrárny, a to na základě výsledků šetření různých mezinárodních organizací, jako je Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE), organizace OECD, Světová zdravotnická organizace (SZO) a Vědecký výbor OSN pro účinky atomového záření (UNSCEAR). Kapitola osm si všímá protijaderného hnutí ve světě a v České republice a uvádí na pravou míru některé informace protijaderných organizací.
V deváté kapitole jsou stručné informace o stavu jaderné energetiky v pětadvaceti hospodářsky vyspělých i rozvojových zemích. Kapitola deset pojednává hlavně o mezinárodní spolupráci při vývoji další generace zdokonalených reaktorů malých, středních i velkých výkonů nutných k zajištění větší bezpečnosti, vyšší ekonomické efektivnosti, vyšší provozní spolehlivosti, snižování produkce radioaktivních odpadů a omezení rizika šíření jaderných zbraní. Zvláštní význam bude mít další rozvoj rychlých reaktorů k zabezpečení dlouhodobých dodávek jaderného paliva a vývoj vysokoteplotních reaktorů jako předpoklad výroby vodíku ve velkém měřítku. Závěrečná podkapitola přináší informace o vztahu globálního stmívání, globálního oteplování a jaderné energie. V závěru každé kapitoly je seznam pramenů informací, hlavně ze zahraničních odborných časopisů.

1.0

Stručná historie mírového využívání jaderné energie

Dne 8. prosince 2003 uplynulo 50 let od vystoupení prezidenta USA D.Eisenhowera na Valném shromáždění OSN, kde přednesl svůj projev „Atomy pro mír“ s heslem „Překovejme meče v pluhy“. Ve svém projevu mimo jiné zdůraznil, že největší destruktivní síla v dějinách může být přeměněna ve prospěch celého lidstva. Atomová věda by podle něj měla sloužit především v zemědělství, medicíně, k výrobě elektřiny a k dalším mírovým účelům. Bylo to v době, kdy byly závody v jaderném zbrojení na svém vrcholu a kdy lidé měli ještě v paměti atomové bombardování Hirošimy a Nagasaki. Je proto možno říci, že to paradoxně byla hrozba jaderné války, která otevřela dveře mírovému využívání jaderné energie. /1/

Prezident Eisenhower však nebyl první, kdo navrhoval mírové využívání jaderné energie. První zmínku o této možnosti učinil prezident USA H. Truman v projevu v americkém kongresu 3. října 1945.Tehdy navrhoval zřízení komise, která by řídila jaderný výzkum a zabezpečila kontrolu nad materiály potřebnými k rozvoji jaderné energie pro vojenské i civilní účely. V té době měly ještě Spojené státy americké monopol na jaderné zbraně. V polovině července 1946 byla zřízena Komise pro atomovou energii USA (US Atomic Energy Commission - US AEC). Jejím hlavním úkolem byl zpočátku vývoj jaderných zbraní, ale byl již zahájen i výzkum a vývoj zkušebních jaderných reaktorů v národních laboratořích v Los Alamos, Oak Ridge a Argonne. V roce 1947 byly schváleny projektové práce na vývoji reaktorů pro pohon ponorek a letadlových lodí. Alvin Weinberg a E. Vigner navrhli tlakovodní reaktor PWR (Pressurised Water Reactor), určený pro pohon první jaderné ponorky Nautilus. Spolu s varným reaktorem BWR (Boiling Water Reactor) se tyto typy reaktorů staly základem budoucího rozvoje jaderné energetiky v USA. Na vývoji jaderných zbraní se mimo jiné podílely společnosti Westinghouse, General Electric, Monsalto a Union Carbide. Tyto a další společnosti měly velký zájem o využití získaných zkušeností z vojenského výzkumu v civilních aplikacích. V červenci 1953 podaly společnosti Westinghouse a Duquesne Lighting žádost o povolení výstavby první jaderné elektrárny v USA. Jednalo se o jadernou elektrárnu Shippingport o výkonu 60 MWe /2/.

Vývojem se rovněž zabývaly zejména bývalý SSSR, Spojené království a Kanada. Koncem prosince 1946 se ruskému vědci I.V. Kurčatovovi a jeho spolupracovníkům podařilo uvést do provozu uran-grafitový reaktor F1 a byly získány první mikrogramy plutonia. Rychlým tempem vznikaly v Sovětském svazu výzkumné, projektové a konstrukční organizace, které umožnily vznik vojenského jaderného průmyslového komplexu. V něm pracovali nejlepší vědci a technici v čele s 3 K - Kurčatov, Koroljov, Keldyš. 29. srpna 1949 skončil jaderný monopol USA, když se Sovětskému svazu podařilo uskutečnit výbuch první atomové bomby /3/. O čtyři roky později oznámil Sovětský svaz odpálení první vodíkové bomby, pouze 9 měsíců od uskutečnění výbuchu vodíkové bomby Američany. Nastalo dlouhé období horečného jaderného zbrojení /2/.

Britská vláda založila v roce 1945 Výzkumný ústav atomové energie v Harwellu a koncem 40. let zde byly vybudovány první reaktory. V roce 1950 a 1951 byly spuštěny jaderné reaktory pro výrobu plutonia (tzv. produkční reaktory) ve Windscale. V roce 1954 byl ustaven Úřad pro atomovou energii Spojeného království (UK AEA - United Kingdom Atomic Energy Agency). Ve stejném roce bylo založeno středisko pro výzkum a vývoj rychlých množivých reaktorů v Dounreay. Experimentální rychlý reaktor DFR (Dounrey Fast Reactor) byl spuštěn v roce 1959 a v roce 1961 byly zahájeny práce na vývoji prototypu rychlého reaktoru PFR (Prototype Fast Reactor), který dosáhl plného výkonu v roce 1977. Britští vědci a technici vyvinuly reaktory typu Magnox a pokročilý grafitový reaktor AGR (Advanced Grafite Reactor), které se staly základem rozvoje jaderné energetiky ve Spojeném království. Výstavba prvního reaktoru AGR byla zahájena v roce 1957, plného výkonu bylo dosaženo v roce 1963. V říjnu 1957 vznikl požár v jednom z produkčních reaktorů ve Windscale a došlo k uvolnění radioaktivních materiálů do atmosféry. Jedním z protiopatření byl dočasný zákaz konzumace mléka z této oblasti. Druhý produkční reaktor v této lokalitě byl z preventivních důvodů uzavřen. V důsledku havárie byl vytvořen Inspektorát pro jaderná zařízení jako nezávislý regulátor kontrolující výběr lokalit, projektování, výstavbu a provoz jaderných zařízení. /4/

V roce 1954 byl v USA novelizován atomový zákon z roku 1946. Byla odtajněna některá jaderná tajemství a bylo dovoleno předávat jaderné materiály a technologie spřáteleným zemím formou dohod o jaderné spolupráci. Novela zákona umožnila elektrárenským společnostem stavět, financovat a

provozovat jaderné elektrárny. Ve stejném roce navrhly Spojené státy uspořádat mezinárodní konferenci o mírovém využívání jaderné energie pod záštitou Organizace spojených národů. Konference se konala v srpnu 1955 a zúčastnilo se jí na 25 000 delegátů z celého světa. Byl zde podán návrh na vytvoření mezinárodní organizace v rámci OSN, která by podporovala rozvoj jaderné energie. Státy zainteresované na vzniku nové organizace se sešly v roce 1956 v Ženevě a koncem roku přijaly statut organizace s názvem Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE) se sídlem ve Vídni. Anglický název je International Atomic Energy Agency (IAEA). Oficiálně byla tato organizace založena v roce 1957. Úkolem MAAE je kromě podpory rozvoje jaderné vědy a techniky pro mírové účely také zabránění jejího zneužití pro vojenské účely. První velká mezinárodní konference o mírovém využívání jaderné energie se konala v roce 1958 v Ženevě /2/.

President Dwight D. Eisenhower v r. 1953 oslovil generální shromáždění Organizace spojených národů projevem Atoms for Peace, kterým vyzýval světové představitele k mírovému využívání jaderných technologií.

Nadšení veřejnosti i politiků z možností mírového využívání jaderné energie bylo veliké a trvalo až do konce 70. let. V období atomové euforie se téměř vše plánovalo na jaderný pohon a tímto směrem se orientoval i výzkum a vývoj jaderné techniky s jejím možným využitím na zemi, v atmosféře, ve vodě i v kosmickém prostoru, a to jak v USA, tak i v SSSR. Vědci a média postupně informovali o projektech reaktorů pro pohon letadel, ponorek, automobilů, obřích vzducholodí, vznášedel, ledoborců, letadlových lodí, křižníků, námořních obchodních lodí, leteckých motorů, raketových motorů a jaderně energetických zařízení pro výzkum kosmu. Plánovala se výstavba jaderných elektráren pro výrobu elektřiny a dodávku tepelné energie pro odsolování mořské vody a výrobu vodíku, uvažovalo se o využití podzemních jaderných výbuchů k budování přístavů, podzemních zásobníků zemního plynu, ke změně toku sibiřských řek, plánovala se výstavba tak zvaných nuplexů, tj. zemědělsko průmyslových komplexů soustředěných kolem velké jaderné elektrárny, atd. /2,3/. Mnohé z těchto projektů se realizovaly, jiné zůstaly jen na rýsovacích prknech.

S postupem doby se ale původní nadšení veřejnosti a politiků začalo vytrácet. Přispěla k tomu řada faktorů, ale nejzávažnější událostí byla nehoda v americké jaderné elektrárně Three Mile Island-2 (TMI-2), která se stala koncem března 1979. I když při této nehodě došlo k tavení aktivní zóny reaktoru, nebyl zaznamenán žádný únik radioaktivních látek mimo elektrárnu, neboť bezpečnostní systémy, zejména ochranná obálka (kontejnment), fungovaly podle projektu. Nebylo zaznamenáno ani jedno úmrtí vlivem radioaktivního záření. Ironií je to, že největší dávky radioaktivního záření obdrželi novináři, kteří do Harrisburgu přiletěli letadly (a to z přírodního kosmického záření), ale svými články přispěli ke stresování obyvatel. Ještě větší účinek na veřejné mínění měla havárie čtvrtého bloku

Černobylské jaderné elektrárny koncem dubna 1986. Vlivem těchto událostí se slovo atom změnilo z něčeho velice nadějného v to nejhrozivější. Politici odmítali o atomu vůbec hovořit a velká část veřejnosti chtěla jednoduše zapomenout. Nikdo se nechtěl po dlouhou dobu zmiňovat ani o nesporných výhodách mírového využívání jaderné energie. Pozice ovládlo protijaderné hnutí. /1/.

Mírové využívání jaderné energie v jejích nejrůznějších formách je nesporným přínosem pro celé lidstvo. Je ovšem také pravdou, že program Atomy pro mír umožnil některým zemím získat přístup k jaderným technologiím, které ale zneužily k vývoji vlastních jaderných zbraní. Díky mírovému programu získala jaderné zbraně například Indie. Když se zavázala, že své jaderné aktivity využije jen pro civilní účely, poskytla Kanada Indii v roce 1955 výzkumný reaktor a USA dodaly těžkou vodu. Indie díky tomu získala určité množství plutonia a jeho část použila ke zkoušce jaderné zbraně v roce 1974 /2/.

Rozvoj jaderné energetiky je po celá desetiletí provázen několika kontrasty:
1) Obavy ze šíření jaderných zbraní často zastiňují široké humanitární přínosy mírových aplikací jaderné techniky.
2) Produkci relativně malého množství vyhořelého paliva a radioaktivních odpadů se věnuje více pozornosti než ekologickým a jiným přínosům jaderné energie.
3) Velký pokrok, kterého bylo dosaženo v oblasti jaderné a radiační bezpečnosti elektráren je stále zatemňován vzpomínkami na nehody v TMI-2 a v Černobylu /1/.

Svět na začátku 21. století je ale jiný, než tomu bylo v polovině 50. let minulého století. Světová populace se zdvojnásobila na více než 6 miliard lidí, je mnohem více rozvinutých zemí, roste spotřeba primární energie a elektřiny, přírodní zdroje se rychle vyčerpávají, zdroje kapalných a plynných paliv se dostávají do popředí mezinárodní politiky, ceny ropy a zemního plynu výrazně rostou, zvyšuje se zájem o ochranu životního prostředí, rostou obavy z globálního oteplování, projevuje se nedostatek pitné vody, atd. Všechny tyto a další okolnosti činí dnes z jaderné energie ještě cennější a důležitější energetický zdroj než tomu bylo kdykoliv dříve. Energetické a neenergetické aplikace jaderné vědy a techniky přinášejí zkvalitnění života milionům lidí na celém světě. Například jaderné elektrárny patří dnes mezi nejekonomičtější zdroje k výrobě elektřiny v základním zatížení, v mnoha zemích světa přispívají ke spolehlivosti a stabilizaci elektrických sítí, k čistějšímu životnímu prostředí, k energetické nezávislosti a ke stabilitě ceny elektřiny /1/. Velkého pokroku bylo dosaženo i v oblasti neenergetického využití jaderné techniky. Ionizující záření a radioizotopy se používají v rostlinné a živočišné výrobě, v ovocnářství, v medicíně, průmyslu, při ošetřování potravin, ve vodním hospodářství, ve výzkumu kosmu, atd., atd. Dnes prakticky neexistuje žádný obor lidské činnosti, v němž by se nějakým způsobem nevyužívala jaderná věda a technika.

Prameny:
/1/ Nuclear News, 2003, č. 12, s. 42 - 44
/2/ Bulletin of the Atomic Scientists, 2003, č. 6, s. 34 - 45
/3/ Atomnaja eněrgija, 82, 1997, č. 5, s. 331 - 334
/4/ Nuclear Energy, 1999, č. 5, s. 291 - 295

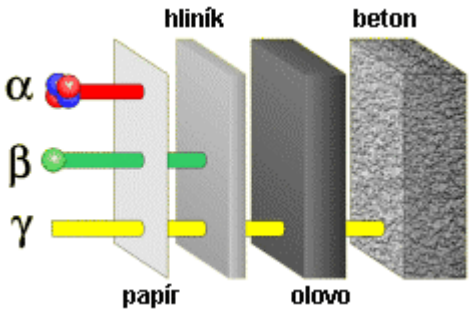
2.0

Jaderná energie a radioaktivní záření

Průvodním jevem využívání reakce štěpení uranu je ionizující záření, které je lidskými smysly nezjistitelné. Je to takové záření, jehož vlivem se mění fyzikální stav atomů - atomy se stávají elektricky nabitými, ionizovanými. Ionizující záření vzniká při přeměně nestabilních atomů, a to jak přírodních tak i uměle vytvořených. Nestabilní atomy, které produkují záření, nazýváme radionuklidy.

Existuje několik druhů ionizujícího záření, které se v řadě charakteristik liší:

- Záření alfa - je tvořeno stejnými částicemi jako jádro hélia a má kladný elektrický náboj. Je vyzařováno například těžkými prvky, jako je uran, thorium a radium.
- Záření beta - je proudem elektronů se záporným elektrickým nábojem nebo proudem pozitronů s kladným nábojem a provází řadu radioaktivních přeměn přírodních i umělých radionuklidů.
- Záření gama – je proudem fotonů, kvant elektromagnetického záření, jejich vyzářením se vyrovnávají energetické rozdíly mezi různými energetickými stavy atomového jádra.
- Záření X (rentgenové záření) - je známější formou elektromagnetického záření než je záření gama.
- Neutrony - jsou proudem nenabitých jaderných elementárních částic, které vyvolávají ionizaci atomů pouze nepřímým způsobem. Zdrojem neutronů je například štěpná reakce uranu, která se využívá k získávání energie v jaderných reaktorech /1/.



Obr. 2.1: Záření alfa lze odstínit listem papíru, záření beta tenkým hliníkovým plechem nebo několikacentimetrovou vrstvou vody. Stínění proti záření gama musí být mohutnější. Používá se olovo nebo tlustá vrstva betonu. Neutrony se účinně odstíní vodou, lehkými materiály nebo betonem /1/.

2.1 Měření aktivity

Jednotkou aktivity je becquerel (Bq), na počest francouzského vědce Henry Becquerela, jenž byl kolegou manželů Marie a Pierre Curieových. Definice této jednotky je jednoduchá, neboť jeden becquerel znamená jednu jadernou přeměnu za sekundu. Jestliže se v sudu s jaderným materiálem stane 10 000 přeměn jader za sekundu, říkáme, že obsah aktivity v tomto sudu je 10 000 Bq. Jestliže úroveň kontaminace nějaké potraviny je 200 Bq na kilogram (Bq/kg), znamená to, že se uskuteční 200 jaderných přeměn za sekundu v každém kilogramu dané potraviny. Aktivita lidského těla je několik tisíc Bq. Normální hodnota u mořské vody je 15 000 Bq/m^3 a u půdy 30 000 Bq/ t a u stavebních materiálů se pohybuje v rozmezí 50 000 až 200 000 Bq/m^3. Protože bequerel je nepatrná jednotka, všechny údaje o aktivitě vypadají velké - číslice před jednotkou je vysoká. Tato okolnost působí „zmatek“ při dialogu mezi jadernými experty a širokou neinformovanou veřejností, což dovedně využívají protijaderné organizace. Veřejnost například těžko pochopí, že následující obě dvě věty jsou současně pravdivé:

- Oponent jaderné energie prohlásí: „Výpustě odpadních plynů z jaderné elektrárny jsou 20 000 Bq/s!“
- Informační pracovník z elektrárny uvede: „Odpadní plyny neobsahují více aktivity než vzduch v našich obydlích.“

Další příklad: Expert chce veřejnosti sdělit, že „výpustě kontaminované vody nepředstavují žádné riziko, protože koncentrace aktivity je pouze několik milionů becquerelů na m^3“. Normální reakce na

tuto větu by byla taková, že je to „strašně vysoká“ hodnota. Přitom se jedná o vodu, která je klasifikována jako voda pitná.

Všechny druhy potravin a nápojů, které konzumujeme, obsahují různě velkou aktivitu, jak je patrné z následujících příkladů:

Mléko	50 Bq/l	Brambory	100 - 150 Bq/kg
Olej na smažení	180 Bq/l	Soja	440 Bq/kg
Ryby	100 Bq/kg	Čaj	740 Bq/kg

Abychom porozuměli zdravotním účinkům záření, musíme použít jinou jednotku než je becquerel. Zdravotní účinky totiž nemohou být vyjádřeny s pomocí becquerelů, protože stejné množství becquerelů může člověka usmrtit nebo nemusí způsobit žádnou újmu na zdraví. Záleží na tom, kde bude emitovaná radioaktivní energie absorbována a o jaký typ záření jde. Energie absorbovaná kilogramem tkáně se nazývá absorbovanou dávkou. Jestliže tuto dávku vynásobíme faktorem, který bere v úvahu relativní biologický účinek různých druhů záření, hovoří se o efektivním dávkovém ekvivalentu nebo jen o „dávce“ Jednotkou radiační dávky je sievert (Sv) na počest švédského odborníka v radiační ochraně Rolfa Sieverta. Jednotka sievert je ale příliš velkou jednotkou, proto se v běžném životě používá její tisícina - milisievert (mSv). K vyjádření intenzity záření byla zavedena veličina „příkon dávkového ekvivalentu“ za časovou jednotku, například za hodinu. Měří se v milisievertech nebo mikrosievertech za hodinu. Jestliže údaj v mSv/h vynásobíme počtem hodin v roce, t.j. 8 760 hodinami, získáme roční radiační dávku /2/.

2.2 Přírodní a umělé zdroje záření /3/

Člověk je vystaven ionizujícímu záření od samotného svého vzniku, a to bez ohledu na existenci či neexistenci jaderné energetiky. Zdroje záření můžeme rozdělit podle původu na přírodní zdroje (označované také jako přírodní pozadí) a umělé, člověkem vytvořené. Podle Vědeckého výboru OSN pro účinky atomového záření (UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) obdrží každý obyvatel planety v průměru za rok radiační dávku 2,69 mSv, a to v tomto složení:

Přírodní zdroje záření (mSv/rok)

- Kosmické záření 0,39
- Gama záření ze Země 0,46
- Vnitřní ozáření z přírodních radionuklidů v těle 0,23
- Radon 1,30

Umělé zdroje záření (mSv/rok)

- Lékařské aplikace 0,30
- Spad po zkouškách jaderných zbraní 0,007
- Průmysl vč. jaderné energetiky 0,008
- Profesionální ozáření personálu 0,002
- Ostatní emise 0,001
- Výrobky 0,0005

Celkem v průměru za rok 2,69

V procentním vyjádření se jednotlivé zdroje podílejí na celoroční radiační dávce takto:

Radon	48,3 %
Gama záření Země	17,1 %
Kosmické záření	14,5 %
Lékařské aplikace	11,2 %
Vnitřní ozáření	8,6 %
Spad	0,3 %

Ostatní 0,1 %

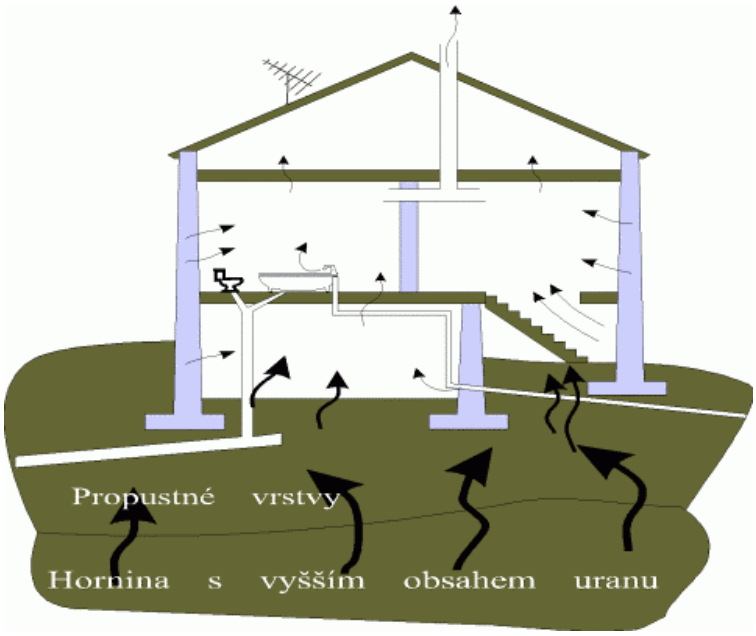
2.2.1 Přírodní zdroje záření

Kosmické záření: Dostává se k nám zemskou atmosférou ze Slunce, z naší galaxie i prostoru mimo ni. Roční radiační dávka, kterou lidé obdrží, roste s nadmořskou výškou. Dávka při mořské hladině je 0,03 mSv, ve výšce 6700 m 1 mSv, ve výšce 10 000 m 5 mSv.

Gama záření: Zemská kůra je tvořena materiály, které jsou přirozeně radioaktivní. Například uran je v malých koncentracích rozmístěn v horninách a půdách a podobně i thorium a draslík-40. Téměř všechny emitují gama záření, které ozařuje celé tělo více či méně stejnoměrně. Protože stavební materiály jsou dobývány ze země, jsou rovněž mírně radioaktivní a tak jsou lidé ozařováni i uvnitř budov a mimo ně. Úroveň gama záření kolísá od místa k místu. Například v Indii jsou oblasti, kde překračuje běžné úrovně více než stokrát. (V této oblasti jsou velké zásoby thoriové rudy.) /1/.

Vnitřní ozáření: Protože se radioaktivní materiály vyskytují všude v přírodě, nutně se dostávají i do pitné vody a potravin a přispívají k průměrné roční dávce každého jedince. Hlavním zdrojem vnitřního ozáření je draslík-40. Množství draslíku-40 v těle kolísá v závislosti na množství svaloviny, takže jeho obsah je dvojnásobně vyšší u mladých mužů než u starších žen. Některé potraviny, například korýši a brazilské ořechy, koncentrují radioaktivní materiály, takže lidé konzumující velké množství těchto potravin mohou obdržet vyšší dávky než je obvyklé.

Radon: Radon je přírodní radioaktivní plyn, který je dceřiným produktem uranu. Je emitován z hornin a půdy v blízkosti zemského povrchu a rozptyluje se v atmosféře. Pokud se dostane do domu, postupně se zde koncentruje. Radon se rozpadá na jiné radioaktivní atomy, které se po vdechnutí mohou dostat do plic a ozařovat tkáně. Globální roční dávka z radonu je 1,3 mSv. V oblastech se zvýšeným obsahem radonu mohou být ale mnohonásobně větší. Snížení radiační dávky v budovách lze docílit zabráněním pronikání radonu. O nepříznivém vlivu radonu se začalo diskutovat zejména po první ropné krizi v roce 1974, kdy se zaváděla úsporná opatření v energetické oblasti, mimo jiné i utěsňování oken a dveří a omezování větrání. V důsledku těchto opatření se zvyšovala koncentrace radonu v domech a bytech a byla až osmkrát větší než ve volné přírodě. Ukázalo se, že snaha o zlepšení situace v jedné oblasti (šetření energií) může znamenat zhoršení stavu v jiné oblasti (zdravotní rizika). Ve většině bytů v České republice je hladina radonu nízká, asi 55 Bq/m^3, přičemž přípustná koncentrace podle mezinárodních norem je 200 Bq/m^3.



Obr. 2.2: Obrázek ukazuje, jakými cestami se radon může dostávat do domu.

2.2.2 Umělé zdroje záření

Dávky z umělých zdrojů záření jsou u většiny obyvatel Země menší než dávky z přírodního pozadí, ale i tak se podstatně liší. Na rozdíl od přírodních zdrojů záření jsou v podstatě kontrolovatelné.

Lékařské aplikace: Lékařské aplikace záření mají dvě formy: Záření se používá k diagnostikování nemocí a poranění a k ničení rakovinových buněk. Používání paprsků X je tak cenné, že se uskutečňují miliony vyšetření na celém světě. Jedno vyšetření plic přispívá dávkou 0,1 mSv. Rakovinové stavy se řeší radioterapií, kdy se používají svazky paprsků X o vysoké energii nebo gama paprsky z kobaltového nebo obdobného zdroje. Tyto zdroje cíleně ničí nemocnou tkáň a omezují dávku pro okolní zdravou tkáň. Lékařské aplikace záření tvoří zdaleka největší zdroj umělého záření.

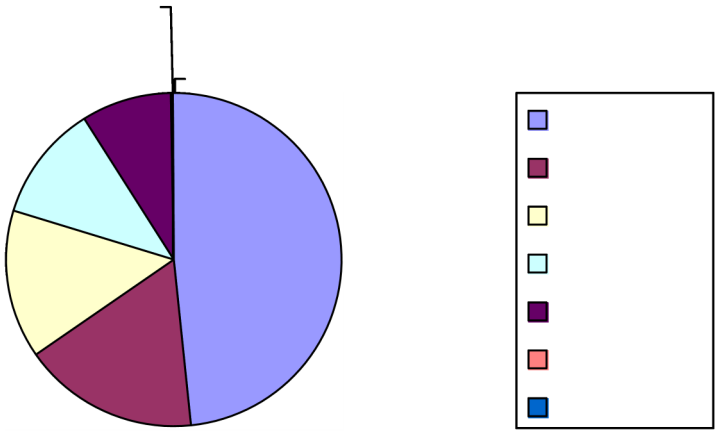
Spad po zkouškách jaderných zbraní: Radioaktivní materiály jsou rovněž obsaženy v atmosféře i v důsledku zkoušek atomových zbraní a jiných aktivit. Mohou vést k ozáření lidí několika cestami vnějšího ozáření z radioaktivních materiálů deponovaných na půdě, inhalací vzdušné radioaktivity a požitím radioaktivních materiálů potravou a vodou. Kolektivní dávky obyvatelstvu však klesly z relativně vysokých hodnot z počátku 60. let na velmi nízké dávky v současné době.

Jaderný a jiný průmysl: Jaderný a další průmysl, jakož i nemocnice a univerzity, vypouštějí do životního prostředí malá množství radioaktivních materiálů. V případě jaderného průmyslu jsou vypouštěna malá množství širokého spektra radioaktivních materiálů v rámci každé etapy palivového cyklu. Za normálního provozu vypouštějí jaderné elektrárny tak nepatrné množství radioaktivních látek, že je lze jen obtížně zjistit i tou nejdokonalejší přístrojovou technikou /1/. Roční celosvětové průměrné dávky z jaderné energetiky pro veřejnost jsou asi 0,008 mSv. Větší dávkou přispívají závody na přepracování vyhořelého paliva. Ta může být u nejvíce exponovaných osob až 0,4 mSv, ale pro většinu obyvatel je mnohem menší.

Profesionální ozáření: Odhaduje se, že ve světě pracují na 4 miliony osob, které jsou vystaveny umělým zdrojům záření při své práci a které obdrží průměrnou celoroční dávku 1 mSv. Dalších 5 milionů osob (většinou v civilním letectví) obdrží průměrnou roční dávku 1,7 mSv.

Ostatní emise: Radioaktivní emise produkuje i nejaderný průmysl, například průmysl těžby a zpracování fosforečných rud. Fosforečné rudy obsahují radium, které se může dostat do kapalných odpadů. Také uhelné elektrárny vypouštějí přírodní radioaktivní materiály obsažené v uhlí. Tyto odpady, vypouštěné do vzduchu, se potravním řetězcem dostávají k obyvatelstvu. Radiační dávky jsou ale obvykle nízké, 0,001 mSv v průměru za rok nebo ještě nižší.

Výrobky: Nízké radiační dávky získávají lidé z umělých zdrojů obsažených ve spotřebním zboží, jako jsou detektory kouře, hodinky se svítícím ciferníkem, sledování televize, lety ve vysokých výškách.



Obr. 2.3: Podíl jednotlivých zdrojů na celkové radiační dávce

2.3 Výpočet vlastní dávky záření

Díky znalostem o přírodních a umělých zdrojích záření si každý může vypočítat dávku, kterou za rok obdrží. K tomu poslouží údaje v tabulce:

Přírodní zdroje záření		**Roční dávka v mSv**
Kosmické záření: při mořské hladině		0,3
ve výšce 300 m nad mořem		0,325
ve výšce 600 m nad mořem		0,375
ve výšce 1000 m nad mořem		0,45
Potraviny a nápoje:		0,35
Záření z půdy a radon		1,35
Bydlíte-li v dřevěném domku, odečtěte	-	0,135
Bydlíte-li ve stanu, odečtěte	-	0,27
Bydlíte-li v žulovém domě, přičtěte	+	1,35
Pokud nevětráte, přičtěte	+	1,35
Umělé zdroje záření		
Spalování uhlí		0,04
Spad po zkouškách jaderných zbraní		0,01
Používání hodinek s luminofory		0,01
Každá hodina sledování televize		0,002
Cesta letadlem ve výšce 10 000 m na vzdálenost 4000 km		0,25
Bydlení na hranici jaderné elektrárny		0,0002
Rentgenové vyšetření plic		0,08
Rentgenové vyšetření trávicího a zažívacího traktu		4,0
Radiofarmaceutické vyšetření		0,3

Prameny:

/1/ Jiří Marek: Jaderná energie, s. 36 - 40. Vydal ČEZ, a. s., Sekce komunikace v roce 2000

/2/ Speaking of Nuclear Energy, MAAE, s. 33 - 39. Publikace MAAE, podzim 1992. IAEA/P1/A36E, 92-02835

/3/ Radiation Safety, 1996, s. 1 - 9. (Publikace MAAE - Division of Public Information)

3.0

Zdravotní rizika ionizujícího záření

Protože od samotného počátku mírového využívání jaderné energie bylo známo, že ionizující záření je pro lidské zdraví nebezpečné, byla již předem přijímána přísná a nákladná opatření, aby se radioaktivní materiály nedostaly k člověku. Proto také až dvě třetiny investičních nákladů při výstavbě jaderných elektráren přímo nebo nepřímo souvisí se zajištěním bezpečnosti personálu a široké veřejnosti před účinky radioaktivního záření. V minulosti se bezpečnostní a nápravná opatření u technologií přijímala až dodatečně, až se projevily negativní důsledky. Byl to jaderný průmysl, který jako první začal ještě před vlastní výstavbou civilních jaderných zařízení vypracovávat rozsáhlé předběžné a závěrečné bezpečnostní zprávy o jejich vlivu na člověka a životní prostředí. Kdyby se taková přísná bezpečnostní opatření začala v předstihu realizovat i u jiných technologií, nemuselo by znečištění životního prostředí dosáhnout takového rozsahu jako je tomu dnes. Díky velké pozornosti věnované jaderné a radiační bezpečnosti jsou na tom pracovníci v jaderném průmyslu z hlediska úrazovosti, nemocnosti a úmrtnosti lépe než pracovníci v jiných průmyslových odvětvích.Tento závěr potvrzují i nezávislé světové organizace, jako je Světová zdravotnická organizace (WHO) nebo Vědecký výbor OSN o účincích atomového záření (UNSCEAR).

Podle současných poznatků se první příznaky onemocnění v důsledku ozáření začínají projevovat při dávce 1000 mSv, což je přibližně 400 krát větší dávka, než je průměrná celoroční dávka na jednoho obyvatele a asi milionkrát větší než z emisí radioaktivních látek z jaderné energetiky. K obdobnému závěru dospěla v roce 1997 i Rada prezidentů vědeckých společností, zahrnující na 50 vědeckých pracovníků, kteří prohlásili, že ozáření pod 1000 mSv nepředstavuje jasné riziko vzniku rakoviny u dospělých osob. Tito vědci se shodli na tom, že zvýšené riziko vzniku rakoviny vzniká po celotělovém ozáření dávkou kolem 1000 mSv a že odhady rizika při nižších expozicích nejsou spolehlivé vzhledem k vysokému spontánnímu výskytu rakoviny z ostatních příčin /1/. Také podle /2/ do dávky 1000 mSv (1 Gray) nevznikají časná zdravotní rizika a teprve od této hodnoty závažnost zdravotních potíží roste s velikostí dávky. Pokud jde o dědičné účinky, nebyly zaznamenány žádné při jakkoliv vysoké dávce. Uvedené závěry potvrzují i údaje z vojenských zařízení Sovětského svazu, kde byl personál vystavován dávkám 500 až 1000 mSv za rok. Ukazuje se, že lidské tělo je schopné přežít i vysoké radiační dávky, jestliže jsou získávány po dlouhou dobu a nikoliv jednorázově, jak tomu bylo v Hirošimě a Nagasaki.

Mnoho vědců se domnívá, že živé buňky, které byly po miliony let vystavovány přírodnímu záření, se adaptovaly takovým způsobem, že nízké radiační dávky jim nepůsobí žádné nebo jen malé poškození. A stále více vědců se dnes přiklání k názoru, že nízké dávky záření jsou pro lidský organismus dokonce prospěšné. Jsou to zastánci tak zvané radiační hormeze /3/.

Desítky studií uveřejněných v USA, Německu, Spojeném království, Francii, Japonsku a na Slovensku potvrdily, že jaderné elektrárny nezvyšují riziko vzniku rakoviny nebo leukémie, protože emise radioaktivních látek jsou příliš nízké. K tomu, aby se objevila leukémie u dvaceti procent ozářených osob jsou zapotřebí dávky vyšší než 5000 mSv, tedy až pětmilionkrát větší než jsou průměrné roční dávky z jaderných elektráren. Při dávkách kolem 1000 mSv je riziko vzniku leukémie asi u 2 % krátkodobě ozářených osob /2/.

V Bělorusku byla vypracována studie o výskytu dětské leukémie v období před a po černobylské havárii, tj. za období 1979 až 1985 a 1986 až 1990. Před havárií připadlo na 1 milion obyvatel 40,7 případů, po havárii 41,3 případů dětské leukémie. Tyto závěry potvrdila i Světová zdravotnická organizace, která k sedmiletému výročí havárie konstatovala, že do té doby nebyl zaznamenán zvýšený výskyt dětské leukémie v nejvíce postižených oblastech Ruska, Běloruska a Ukrajiny /3/.

Díky výzkumu mezi 86 572 obyvateli přeživšími atomové bombardování Hirošimy a Nagasaki bylo možno dospět k závěru, že radiací vyvolaná rakovina je velice řídký fenomén. V období 1950 až 1990 bylo u zmíněného počtu obyvatel zaznamenáno 7 578 úmrtí na rakovinu a 249 případů úmrtí na leukémii. Z celkového počtu úmrtí na rakovinu bylo možno připsat na účet záření 421 případů a u leukémie 87 případů /3/.

Po bombardování Hirošimy a Nagasaki nebyly pozorovány škodlivé účinky u osob ozářených dávkou do přibližně 400 mSv a nebyly zjištěny ani žádné dědičné účinky u potomků obětí nebo u jiné ozářené populace /4/. Americký National Cancer Institute (NCI) uveřejnil v roce 1991 studii, která analyzovala více než 900 000 úmrtí na rakovinu v průběhu 34 let. V závěru bylo konstatováno, že nebylo zaznamenáno zvýšené riziko úmrtí na žádný druh rakoviny u obyvatel žijících v blízkosti jaderných zařízení /5/.

Ve zprávě UNSCEAR pro Valné shromáždění OSN za rok 2000 bylo uvedeno, že kromě dokumentovaného zvýšení případů rakoviny štítné žlázy u dětí nebyly zjištěny žádné zdravotní účinky černobylské havárie. Pokud jde o rakovinu štítné žlázy u dětí, bylo zaznamenáno 1800 případů, ale další se mohou vyskytnout v průběhu příštích desetiletí /6/.

3.1 Bezprahová lineární teorie

Současné limity ozáření profesionálních pracovníků a jedinců z veřejnosti doporučované Mezinárodní komisí pro radiologickou ochranu (ICRP) a ověřované organizací UNSCEAR jsou stanoveny na mnohonásobně nižší úrovni než jsou radiační dávky, při nichž se objevují první příznaky zdravotních problémů. Pro profesionální pracovníky je tento limit v průměru 20 mSv/rok v průběhu pěti let po sobě následujících nebo 50 mSv v každém jednotlivém roce. U jednotlivců z veřejnosti činí limit 1 mSv za rok nebo ve zvláštních případech 5 mSv za rok, pokud v následujících pěti letech nepřekročí v průměru 1 mSv/rok /7/.

Uvedené limity byly stanoveny podle „bezprahové lineární teorie“ (LNT - Linear Non-threshold Theory), založené na následujících velmi konzervativních předpokladech:

- Neexistuje prahová úroveň záření, pod níž nevznikají zdravotní účinky.
- Nebere se v úvahu, že při dlouhodobém ozařování se tělo dokáže přizpůsobit nízkým dávkám záření.
- Byla přijata koncepce kolektivní dávky, která se aplikuje na velké populace, které získávají nízké individuální dávky záření. Individuální dávky se sčítají a z nich se predikují zdravotní účinky pro celou skupinu /2/.

Bezprahovou lineární teorii pro případ kolektivní dávky lze dobře osvětlit na příkladu z farmaceutického průmyslu, pokud by i zde byla přijata stejná hypotéza kolektivní dávky. Je známo, že jestliže si vezmete jednorázově 100 tabletek aspirinu, způsobí vám to vážné poškození zdraví. Předpokládejme, že by tato dávka byla smrtelná. Podle bezprahové lineární teorie by každodenní braní jednoho aspirinu po dobu 100 dní bylo rovněž smrtelné. Tato teorie je z bezpečnostního hlediska tak konzervativní, že neuznává ani vliv časového faktoru, ani skutečnost, že se tělo dokáže nízkým dávkám přizpůsobit /2/.

Velmi konzervativně přijatý nízký dávkový limit je nyní předmětem kritiky mnoha vědců. Velkým zastáncem zmírnění těchto limitů v radiační ochraně je například Theodor Rockwell, který své názory vyjádřil v /8/. Tento vědec se domnívá, že příliš nízké limity mohou způsobit a také již způsobují škody v několika oblastech:

- Miliardy dolarů se utrácejí zbytečně.
- Uplatňované předpisy snižují věrohodnost vědy a vlád.
- Vytváří se destruktivní strach ze záření.

Současné předpisy například definují „radioaktivně kontaminovaný materiál“ jako materiál, který uvolňuje méně záření než je přírodní pozadí, v němž lidé zdravě žijí po mnoho generací. V USA se každoročně vynakládá 5 miliard dolarů na čištění kontaminovaných lokalit ministerstva energetiky na úroveň pod 5 % přírodního pozadí, ačkoliv jeho úroveň mnohonásobně kolísá bez účinků na zdraví lidí. I skladování nízkoaktivních odpadů vyžaduje mnohamilionové výdaje a existují groteskní scénáře o atomech migrujících mnoho kilometrů pouští, aby kontaminovaly možný zdroj vody ve vzdálené budoucnosti, tj. vodu, jejíž přírodní aktivita bude vyšší než mytický kontaminant /8/.

Opakovaná tvrzení, že každé záření je škodlivé, vytvořila ve veřejnosti strach i z nepatrného záření.

Tento strach pak brání prospěšnému využívání jaderné technologie tam, kde by již mohla zmírňovat některé závažné společenské problémy:

- Miliony onemocnění z potravin vedou k úmrtí mnoha tisíc lidí ročně z patogenní nákazy z hovězího masa, drůbeže, vajec a mořských potravin - to vše by mohlo být učiněno nezávadným s pomocí radiačního ošetřování potravin.
- Strach ze záření brání tomu, aby jaderná technologie mohla významněji řešit celosvětové problémy, jako je globální oteplování, znečišťování atmosféry, vody a půdy.
- Jsou starosti se zajištěním dostatku pitné vody, přitom by jaderné technologie pomohly řešit i tento problém.
- Po černobylské havárii zvolilo přes sto tisíc evropských žen umělé přerušení těhotenství pod vlivem nepodloženého strachu, že přivedou na svět jaderného mutanta /8/.

Na vyvolávání strachu ze záření se v České republice podílely a stále ještě podílejí i protijaderné organizace, které ve svých propagačních materiálech a letácích uvádějí mimo jiné i tyto zkreslené a strach vyvolávající informace:
Radioaktivita z jaderných zařízení zvyšuje onemocnění leukémií. (Greenpeace ČR)
Radioaktivita poškozuje lidské zdraví v jakémkoliv množství, neexistuje žádná neškodná dávka. (Greenpeace ČR)
Stanovení povoleného limitu je jen souhlas s vědomým zabíjením lidí. (Greenpeace ČR)
Radioaktivní záření ohrožuje budoucnost lidstva. (Jihočeské matky)
Radioaktivní látky působí tisíce let. (Jihočeské matky)
Jaderné elektrárny září i za normálního provozu. (Jihočeské matky)

3.2 Radiační hormeze

Lze jen doufat, že nové vědecky podložené poznatky povedou ke změně názoru na současnou bezprahovou lineární teorii a ke snížení strachu z vlivu nízkých dávek záření na lidské zdraví. Přispějí k tomu patrně i další poznatky o radiační hormezi. Názory o příznivých účincích nízkých dávek záření byly po řadu desetiletí záměrně potlačovány, odmítány a kritizovány jako nepravděpodobné /9/. Nyní se však nahromadilo takové množství informací potvrzujících radiační hormezi, že je již nelze ignorovat. Desítky významných vědců z oblasti radiologie z celého světa přednesli své názory na toto téma na 14. výročním zasedání Americké nukleární společnosti (ANS) a vytvořili novou mezinárodní organizaci Radiation, Science and Health Inc. (RSH), která shromažďuje, analyzuje a interpretuje relevantní údaje a dává je k dispozici politickým orgánům a veřejnosti /8/.

O radiační hormezi existuje za více než 100 let přes 1000 vědeckých prací zahrnujících výzkumy na zvířatech i epidemiologické studie. Má se za to, že nejlepší epidemiologickou studií o radiační hormezi je studie zahájená v roce 1980 na britské univerzitě veřejného zdraví J. Hopkinse. Výzkum týkající se 74 000 dělníků pracujících v britských docích vyrábějících lodě s jaderným pohonem a ukončený v roce 1991, ukázal, že pracovníci, kteří obdrželi dávky o více než 5 mSv nad přírodní pozadí, měli o 24 % nižší úmrtnost na leukémii a rakovinu lymfatických žláz než tomu bylo u kontrolního vzorku obyvatel, kteří neobdrželi žádné radiační dávky nad přírodní pozadí /10/.

V roce 1998 citoval emeritní profesor Dr. Myron Pollycove z kalifornské univerzity v San Francisku nejméně 8 nejnovějších studií, které potvrzovaly příznivé účinky radiační hormeze ve sledované populaci. Profesor ale poznamenal, že výzkumníci v mnoha případech ignorovali hormetické účinky, které jejich výzkumy vykazovaly, a dodal, že tato data byla bohužel potlačována a zpochybňována jako neracionální, nepravděpodobná a neplatná /10/.

Po prostudování výsledků experimentů souvisejících s radiační hormezí dospěl japonský vědec S.M.Mortazavi z Kjótské univerzity k názoru, že existují tři potenciální mechanismy podporující příznivé účinky hormeze:

- Nízké dávky záření vedou k produkci zvláštních proteinů, které urychlují reparační procesy v DNA.
- Nízké dávky záření mohou ozářené buňky učinit odolnějšími vůči poškození z další radiace.
- Nízké dávky záření mohou stimulovat funkci imunitního systému /10/.

Všechny uvedené mechanismy jsou podle něj pravděpodobné a jsou již částečně pochopeny. Vědecká základna ve prospěch radiační hormeze se nadále buduje a bude stále obtížnější jednoduše odepsat epidemiologické studie, které jako první poukázaly na příznivý účinek nízkých dávek záření /10/.

Při regulaci radiační expozice v jaderných elektrárnách vychází americká jaderná regulační komise (US NRC) a úřady v jiných zemích z padesát let staré bezprahové lineární hypotézy, že i ty nejmenší dávky záření jsou pro živé organismy škodlivé. V této souvislosti polský profesor Zbygniew Jaworowski z Ústřední laboratoře radiologické ochrany ve Varšavě poznamenal, že výdaje na hypotetické zachránění jednoho člověka implementací norem US NRC dosahují až 2,5 miliardy USD a jsou proto z morálního hlediska pochybné. Studie radiační hormeze podle něj naznačují, že takové výdaje jsou zbytečné a ve skutečnosti mají opačný výsledek na zdraví populace /10/. Zbigniew Jaworowski je již několik desítek let členem organizace UNSCEAR a v roce 1999 uvedl v časopise Physics Today, že bezprahová lineární teorie stojí svět zbytečné miliardy dolarů a že je jedním z největších vědeckých skandálů 20.století /11/. Na zachránění života jedince se vynakládají různě velké prostředky. Například vakcína, která zachrání život afrického dítěte může stát několik desítek dolarů. Výdaje na zachránění života před zářením podle teorie LNT a kolektivní dávky stojí podle předpisů americké regulační komise NRC stovky milionů dolarů. Zdá se proto být zcela logické a vysoce humánní, kdyby se alespoň část peněz vynakládaných na dodržování těchto zbytečně přísných předpisů vynaložila na efektivnější metody pro záchranu života v rozvojových zemích. Podle profesora Jaworovskeho se zbytečně vynakládají velké prostředky ve snaze snížit již tak minimální rizika /11/. Radiační dávky z přírodního pozadí ve světě kolísají od méně než 1 mSv až po více než 50 mSv za rok. Například v indickém státě Kerala je radiační dávka 70 mSv/rok a v iránském Ramsaru 260 mSv/rok, aniž zde byly zaznamenány nepříznivé zdravotní potíže u obyvatel v důsledku ozáření. Opak je spíše pravdou, a to díky radiační hormezi. Zdá se však, že většina epidemiologických studií (nikoliv ale všechny) je zaměřena spíše na zkoumání škodlivých účinků než na zkoumání účinků příznivých. Lineární bezprahová teorie má řadu dalších nepříznivých vlivů /11/
.

- Je chybný názor, že neexistuje bezpečná dávka záření.
- Existuje neochota pacientů podstoupit lékařské radiační postupy, které by byly pro ně přínosné.
- Existence zbytečně přísných předpisů při odstraňování radioaktivní kontaminace vede k následnému plýtvání omezených prostředků.
- Vznikají zcela zbytečná duševní muka u ozářených osob, jako tomu bylo například u lidí evakuovaných po černobylské havárii.
- Zcela neadekvátní byla opatření přijatá po černobylské havárii, z nichž některá nadělala více škody než užitku.
- Jako nevhodná se projevila aplikace kolektivní dávky jako míra kolektivního rizika (malé dávky násobené velkým počtem obyvatelstva).
- Stále přetrvává mýtus, že jaderná energie je hrozbou pro životní prostředí, i když neprodukuje skleníkové plyny, nezpůsobuje kyselé deště a zabírá minimální plochu.
- Poskytuje neobhajitelnou základnu pro protijadernou propagandu.

Prameny

/1/ Nuclear News, 1998, č. 6, s. 50 - 51
/2/ Kniha: A.E.Waltar: America the Powerless, kapitola 4, s. 61 - 78
/3/ Radiation in Perspective, 1997, s. 51 - 56. Publikace NEA/OECD
/4/ Speaking of Nuclear Energy, podzim 1992, s. 33 - 39. Publikace MAAE, Public information regional seminars . IAEA/PI/A36E. 92-02835
/5/ Power Engineering, 2000, č. 8, s. 32
/6/ Nuclear Engineering International, 2000, č. 555, s. 9
/7/ Radiation Safety, IAEA Division of Public Information, duben 1996, s.9-11
/8/ Nuclear News, 1997, č. 7, s. 28 - 32
/9/ Nuclear News, 1997, č. 7, s. 34 - 37
/10/ Power Engineering, 2004, č. 2, s. 26
/11/ Nuclear News, 2000, č. 10, s. 33 - 35

4.0

Vzájemné porovnávání energetických zdrojů k výrobě elektřiny

Pokud bychom měli věřit protijaderně zaměřeným organizacím, které zásobují sdělovací prostředky senzačními, emociálně laděnými, zkreslenými nebo i nepravdivými a strach vyvolávajícími informacemi, pak je jaderná energie neperspektivní, nebezpečná pro zdraví lidí a životní prostředí, neekonomická a tedy odsouzená k postupnému zániku. Vzájemným porovnáváním různých energetických zdrojů z nejrůznějších hledisek snadno zjistíme, zda protijaderné organizace mají pravdu či nikoli. Při vzájemném porovnávání energetických zdrojů je třeba vzít v úvahu celou řadu faktorů, z nichž jsou některé příznivé, jiné nepříznivé pro ten který energetický zdroj. Každý energetický zdroj nějakým způsobem ovlivňuje zdraví lidí nebo životní prostředí, ale v současné energetické, ekologické, ekonomické a demografické situaci ve světě je třeba využívat všechny reálně dostupné energetické zdroje a bylo by proto chybou, kdybychom některý z nich odmítali z ideologických nebo politických důvodů.

Při hodnocení energetických zdrojů bude nutno zodpovědět celou řadu otázek. Bude nás například zajímat:

- Jaká je výkonová hustota energetického zdroje.
- Jak velké jsou zásoby paliva a na jak dlouho postačí krýt rostoucí světovou poptávku po energii, zejména elektřiny.
- Jak velká je spotřeba materiálů k výstavbě různých typů elektráren.
- Jak velkou plochu zaujímají různé typy elektráren srovnatelného výkonu.
- Jaká je spotřeba energie při výstavbě a provozu elektráren za celou jejich životnost ve srovnání s tím, kolik energie za celou životnost poskytnou ve formě užitečné energie?
- Jak velká je roční spotřeba paliva u elektráren srovnatelného výkonu?
- Jaké množství odpadů vzniká při výrobě elektřiny v elektrárnách srovnatelného výkonu?
- Jakým způsobem se řeší problematika odpadů při výrobě elektřiny?
- Jak vysoké jsou investiční náklady na výstavbu elektráren různých typů?
- Jaké jsou náklady na výrobu elektřiny v různých typech elektráren?
- Jaká jsou zdravotní a jiná rizika a vztah k životnímu prostředí při využívání různých zdrojů energie?

4.1 Výkonová hustota energetických zdrojů

V historii lidstva byly postupně využívány energetické zdroje o vyšší výkonové hustotě, protože ta nabízela lepší ekonomiku, vyšší účinnost a pohodlnější způsob použití. Proto se v průběhu staletí přešlo od dříví k uhlí, potom k ropě a zemnímu plynu a nakonec k uranu. Výkonovou hustotu můžeme zjistit podle toho, kolik kilowatthodin elektřiny se vyrobí z jednoho kilogramu paliva /1,2/:

z 1 kg dříví se vyrobí	1 kWh
z 1 kg uhlí se vyrobí	3 kWh
z 1 kg topného oleje se vyrobí	4 kWh
z 1 kg uranu pro JE Temelín se vyrobí	350 000 kWh
z 1 kg plutonia se vyrobí	6 000 000 kWh

Pokud porovnáme fosilní paliva a uran podle obsahu energie v megawattdnech na tunu (MWd/t), získáme tyto údaje:

■ dřevo - 72 ■ uhlí - 172 ■ ropa - 288 ■ zemní plyn - 216 ■ uran - 1 000 000 /3/.

Malé množství uranu má stejný energetický obsah jako stovky tisíc litrů benzínu, miliony kilogramů uhlí a miliony m^3 zemního plynu. (Ze zprávy představitelů amerických a ruských jaderných laboratoří prezidentu Bushovi a Putinovi.) /4/.

Obnovitelné zdroje energie k výrobě elektřiny mají menší výkonovou hustotu než fosilní paliva /2/.

Biomasa	0,003	kW/m^2
Sluneční energie v našich podmínkách	0,12	kW/m^2
Větrná energie	0,1 - 1	kW/m^2
Vodní energie	0,5	kW/m^2

Naproti tomu palivový článek jaderné elektrárny 650 kW/m^2.

Větrná a sluneční energie a biomasa jsou nevyčerpatelné zdroje, ale jejich přeměna na elektřinu vyžaduje vysokou potřebu pozemků a materiálů a spolehlivost dodávky elektřiny je závislá na denních, sezónních a náhodných výkyvech.

Pokud budeme uvažovat energetický potenciál různých energetických zdrojů v přepočtu na tuny měrného paliva (tmp), získáme tyto hodnoty:

1 tuna černého uhlí	1
1 tuna ropy	1,48
1 tuna hnědého uhlí	0,3 - 0,5
1 tuna rašeliny	0,2 - 0,3
1 tuna vody padající z výšky 1000 m	0,003
1 tuna uranu v lehkovodním reaktoru	30 000
1 tuna uranu v rychlém množivém reaktoru	1 800 000
1 tuna thoria	300 t uranu

Z těchto údajů je patrné, že i při dnešním nízkém využití potenciální energie uranu menším než 1 %, nahradí jedna tuna uranu 30 000 tun černého uhlí a v budoucích rychlých množivých reaktorech dokonce 1 800 000 tun černého uhlí. V budoucnu se rovněž bude využívat thorium, jehož energetický obsah je 300 krát větší než u uranu. V současné době má reálné plány na využívání thoria zejména Indie, která má velké zásoby suroviny k výrobě thoria.

K problematice výkonové hustoty energie se v roce 1976 vyjádřil ruský akademik P. Kapica ve svém článku v časopisu New Scientist, 1976, č. 1021, s. 10 - 12. Dospěl v něm k závěru, že nízká výkonová hustota energie u většiny obnovitelných zdrojů je dána fyzikálními zákony a že ignorování této skutečnosti povede až k plýtvání prostředků určených na realizaci projektů, které do budoucna mnoho neslibují. Z tohoto důvodu se vyslovil pro podporu jaderné energie. Zdá se, že jeho slova potvrzují i údaje z USA, kde byly v období 1976 až 1985 vynaloženy z veřejných prostředků 4 miliardy dolarů na výzkum a vývoj obnovitelných zdrojů energie (OZE), z toho na větrnou energii 800 milionů, na fotovoltaické systémy 1,7 miliardy a na přímé využití sluneční energie 1,5 miliardy dolarů. Přitom se větrná energie v roce 1996 podílela v USA na výrobě elektřiny jen 0,09 % a sluneční energie 0,02 %. Ve stejném období bylo na celém světě vynaloženo na výzkum a vývoj OZE 10 miliard dolarů, přesto se jejich podíl na celosvětové výrobě elektřiny představuje jen několik desetin procenta /5,6/.

Navzdory negativnímu hodnocení ruského akademika se ve světě zvyšuje zájem o využívání větrné a sluneční energie, jak o tom svědčí následující údaje /7,8,9,10,13, 21/:

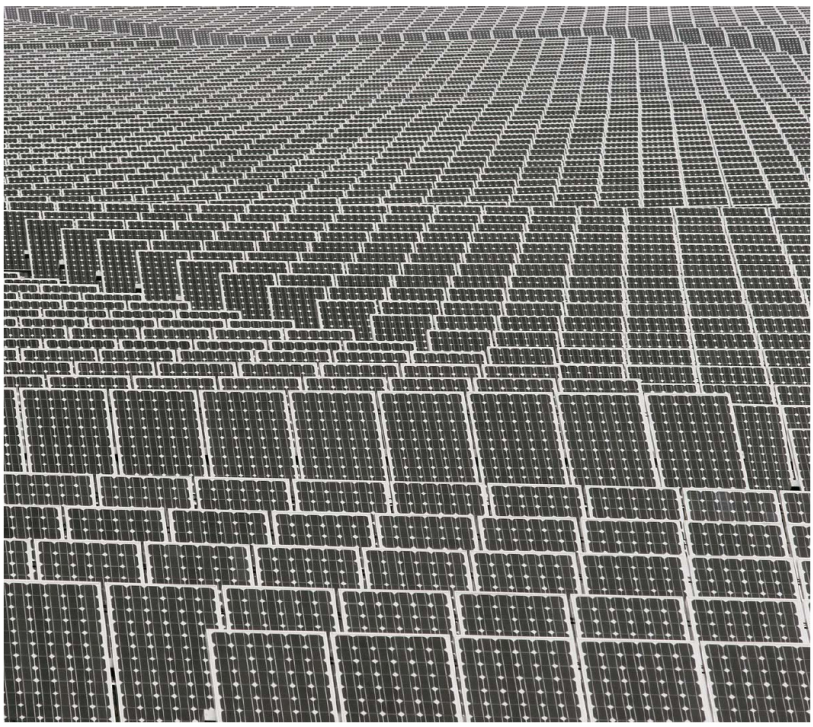
- Zatímco v roce 1991 byl výkon větrných elektráren ve světě přibližně 2 000 MWe, do roku 1996 vzrostl na 6 144 MWe, v roce 2002 byl 31 000 MWe a o rok později již 39 181 MWe. V roce 2005 dosáhl 59 000 a v roce 2006 dokonce 74 000 MWe a dále se zvyšuje.
- Rychlý rozvoj větrných elektráren byl zaznamenán v Evropě. V roce 1991 byl jejich výkon 643 MWe, ale do roku 1996 vzrostl na 3 514 MWe, v roce 1998 dosáhl 6 303 MWe a dále se zvyšuje. V roce 2006 činil přes 48 000 MWe
- Největší zájem o rozvoj větrných elektráren projevilo Německo, kde se výkon zvýšil z 90 MWe v roce 1991 na 1 552 MWe v roce 1996 a na 12 000 MWe v roce 2002. V roce 2006 byl již 20 621 MWe. V témže roce byl výkon větrných elektráren ve Španělsku 11 615 MWe a Dánsku 3 136 MWe.
- Rychlý byl i rozvoj výroby slunečních kolektorů. V Evropě se zvýšila jejich produkce z přibližně 2,5 milionů m^2 v roce 1988 na 5 milionů m^2 v roce 1998. Koncem roku 2001 byly v Evropské unii v provozu sluneční kolektory o ploše více než 11,8 milionů m^2, z toho 31 % v Německu,

25 % v Řecku, 20 % v Rakousku, 5 % ve Francii, 4 % ve Španělsku a 3 % v Dánsku. V roce 1998 bylo v USA instalováno 5 milionů m^2 a v Japonsku 6 milionů m^2 slunečních kolektorů. Nejrychlejší růst byl zaznamenán v Německu, kde se roční výroba zvýšila ze 150 000 m^2 v roce 1994 na 400 000 m^2 v roce 1998. Velký růst výroby slunečních kolektorů byl zaznamenán i v Rakousku.

- Rychlým tempem se zvyšovala i světová výroba fotovoltaických článků. V roce 1994 byl jejich výkon více než 400 MWp(peak) a do roku 1998 vzrostl na 880 MWp. Evropa se v roce 2001 podílela na celkovém výkonu fotovoltaických článků 185,3 MWp, přičemž německý podíl byl opět nejvyšší - 113,8 MWp. Do roku 2005 vzrostla na 5 000 MWp, tj. více než desetinásobně ve srovnání s rokem 1994.

Přes výrazný růst výkonů větrných elektráren byl ale jejich celosvětový podíl (včetně geotermálních elektráren) na spotřebě primární energie v roce 2003 jen 0,13 % a na výrobě elektřiny 0,61 %, což souvisí hlavně s nízkým časovým využitím výkonu těchto elektráren /6/. O něco vyšší podíl větrných elektráren na výrobě elektřiny (spolu s dalšími OZE s výjimkou vodní energie) byl v roce 2000 v Evropské unii, kde dosáhl 2,5 % /11/. V roce 2004 vzrostl podíl OZE na spotřebě primární energie na 0,48 % a na spotřebě elektřiny na 0,8 %, o tři roky později dosáhl 1%.

I když je v současné době příspěvek OZE malý, lze v budoucnu očekávat zvyšování jejich podílu díky novým technologiím a šetrnému chování k životnímu prostředí ve srovnání s elektrárnami spalujícími fosilní paliva. Podle některých odborníků patří budoucnost energetickému systému s obnovitelnými zdroji a jadernou energií, které se budou vzájemně doplňovat. Jak sluneční a větrná energie, tak i energie biomasy poskytují lokální možnosti využití, a proto musí pokračovat jejich výzkum a vývoj. Nelze ale žít v iluzi, že obnovitelné zdroje mohou zajistit velká množství energie, která budou zapotřebí v příštích desetiletích a že budou moci nahradit fosilní nebo jaderná paliva /1/.



4.2 Energetické zdroje Země a jejich životnost.

Lidstvo má k dispozici v podstatě dva druhy energetických zdrojů, a to obnovitelné a neobnovitelné. Mezi obnovitelné zdroje energie patří ty, které jsou odvozeny od Slunce a Měsíce. Sem patří energie větru, přímá sluneční energie, sluneční fotovoltaická energie, slapová energie, vodní energie, energie biomasy, energie mořského vlnění, energie teplotních rozdílů oceánů, geotermální energie, atd. Mezi neobnovitelné zdroje patří tuhá, kapalná a plynná fosilní paliva, paliva pro štěpné jaderné reaktory (uran, thorium a uměle vytvořené plutonium) a paliva pro termojaderné reaktory budoucnosti (těžká

voda (D_2O) a lithium). Paliva pro termojadernou energii jsou v podstatě nevyčerpatelná, protože těžkou vodu lze získávat z vody mořské. (Někdy se za obdobu energetického zdroje považují i úsporná opatření a účinnější způsoby využívání energie.)

Energetické zdroje mají své výhody, ale i nevýhody.
Výhodou obnovitelných zdrojů je jejich velký teoretický potenciál a obnovující se charakter. Jejich nevýhodou je zase nízká výkonová hustota a přetržitý charakter, který omezuje využívání ve velkém měřítku a vede k vysoké měrné spotřebě materiálů, energie a plochy. Výhodou fosilních paliv je jejich relativně snadné používání, nevýhodou vysoká náročnost na dopravu, negativní vliv na životní prostředí a konečná vytěžitelnost zásob. Výhodou jaderných paliv pro štěpné reaktory je vysoká výkonová hustota, nízké nároky na dopravu a skladování, dlouhá životnost zásob, jejich nevýhodou je produkce nebezpečných vysoce aktivních odpadů a možnost vzniku velkých havárií. Velký energetický potenciál paliv pro termojadernou fúzi nelze využít, dokud nebudou k dispozici termojaderné reaktory, které vyprodukují více energie než spotřebují. První komerčně využitelný termojaderný reaktor má být k dispozici za několik desetiletí. Určitou představu si lze učinit z tabulky 4.1:

Tabulka 4.1: Konečné vytěžitelné zdroje a ověřené zásoby fosilních paliv k 1.1.1993

Druh paliva	Vytěžitelné zásoby		Ověřené zásoby	
	Gtoe *	%	Gtoe	%
Černé uhlí a lignit	3 400	76	532	66
Konvenční ropa	200	5	138	17
Nekonvenční ropa (ropné písky)	595	14	?	
Zemní plyn	220	5	131	17
Celkem	4 400	100	801	100

* Gtoe = miliarda tun olejového ekvivalentu
Pramen: /14/, /15/

Z tabulky je zřejmé, že tři čtvrtiny vytěžitelných zásob představují černé uhlí a lignit a podobná situace je i u ověřených zásob fosilních paliv, u nichž dvě třetiny představují zásoby uhlí a lignitu. Pokud se vezme v úvahu neustále se zvyšující produkce fosilních paliv, pak se životnost uhlí odhaduje na několik století, ropy na zhruba 50 let a zemního plynu na víc než 65 let. I když je pravděpodobné, že se díky geologickému průzkumu objeví další velká ložiska a životnost paliv se prodlouží o další desetiletí, faktem zůstává, že se jedná o vyčerpatelné energetické zdroje.

Podle údajů WEC z roku 2007 jsou zásoby uhlí ve světě 847 Gtoe, zásoby konvenční ropy činily v roce 2000 přibližně 143 Gtoe a zásoby zemního plynu ve formě zkapalněného plynu 1 051 miliard barelů. /New Scientist, 2008, č.2639, s.39/

Podle /EVANS, R.L.: Fueling our future, s.56, Cambridge University Press, 2007/ se ověřené zásoby ropy v období 1984 až 2004 vyvíjely takto:

1984 …… 750 miliard barelů,
1994 …….. 1 010 miliard barelů,
2004 ……. 1 190 miliard barelů.

V případě zemního plynu byl podle stejného zdroje vývoj následující: 1984 ……..95 trilionů m^3
1994 …… 145 trilionů m^3
2004 …… 180 trilionů m^3

Deset největších světových producentů uhlí (2005)

Čína	2226 Mt	Rusko	222 Mt
USA	951 Mt	Indonésie	140 Mt
Indie	398 Mt	Polsko	98 Mt
Australie	301 Mt	Kazachstán	79 Mt
Jižní Afrika	240 Mt	Kolumbie	61 Mt

V roce 2007 bylo ve světě vytěženo celkem 6 000 milionů tun uhlí.

Země s největšími zásobami ropy (mld barelů), (2006)

Saudská Arábie	2643	Spojené Arabské Emiráty	98
Kanada	179	Venezuela	80
Irán	133	Rusko	60
Irák	115	Libye	39
Kuwait	102	Nigérie	36

Země s největšími zásobami zemního plynu (trilionů m^3), (2005)

Rusko	47,8	USA	5,5
Irán	26,7	Nigérie	5,2
Katar	25,8	Alžírsko	4,6
Saudská Arábie	6,9	Venezuela	4,3
Spojené Arabské Emiráty	6,0	Irák	3,2

Pokud vezmeme v úvahu roční těžbu a celkové zásoby, vyvíjela se životnost energetických zdrojů takto:

Životnost světových zásob zemního plynu v období 1980 – 2004 (roky) /Evans, s. 56/

1980	57	1994	68
1984	59	1998	66
1985	62	2002	70
1990	65	2004	66

Životnost světových zásob ropy v období 1980 – 2004 (roky) /Evans, s. 56/

1980	28	1994	42
1984	36	1998	40
1986	40	2002	43
1990	43	2004	41

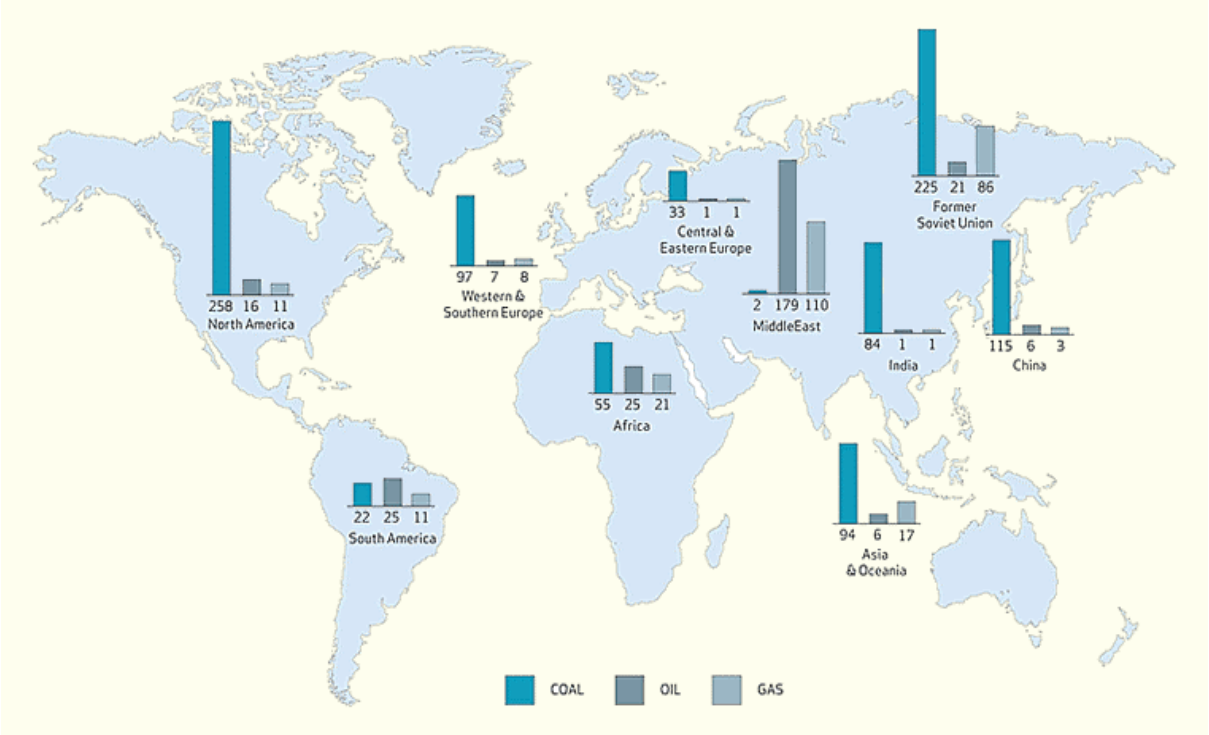
Životnost světových zásob uhlí v roce 2003 podle regionů (roky) /Evans, s. 58/

Svět celkem	190
Jižní a střední Amerika	350
Afrika a střední východ	230
Severní Amerika	250
Asie a Pacifik	110
Evropa	300

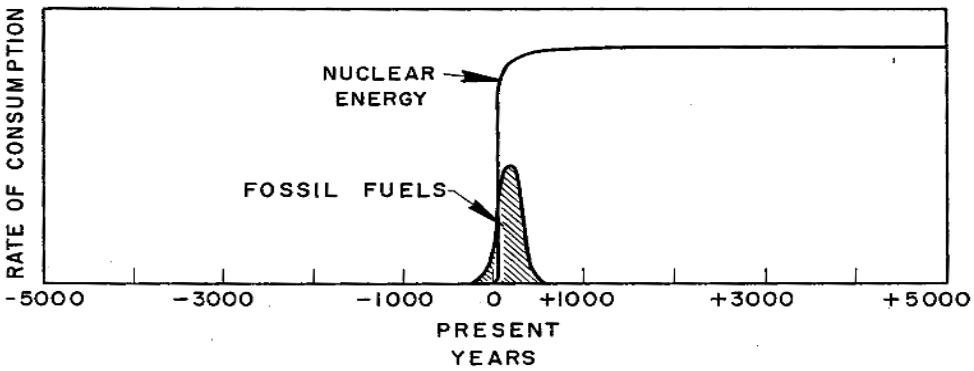
Pokud jde o zásoby jaderných paliv pro současné typy reaktorů, které využijí energetický potenciál uranu jen z méně než jednoho procenta, ty se odhadují jen na několik desetiletí, podobně jako je tomu u ropy a zemního plynu. V budoucích desetiletích bude ale nutno stavět rychlé množivé reaktory, které kromě výroby elektřiny budou jako vedlejší produkt získávat sekundární palivo - plutonium. Díky tomu se životnost jaderných paliv, včetně thoria, prodlouží na několik tisíciletí.
Podle „Red Book“ z roku 2007 se zásoby uranu do ceny 130 USD/kg U odhadují na 5,5 milionů tun, které by vystačily na sto let, a to při využívání současných typů reaktorů. Při využití zdokonalených reaktorů a palivových cyklů vystačí zásoby na tisíce let. Dosud neobjevené zásoby uranu podle geologických charakteristik se odhadují na 10,5 milionu t. /Nuclear News, 2008, č.8, s. 64/ Světové zásoby thoria z roku 2006 se udávají ve výši 1 166 tis. tun. Největší zásoby má Austrálie (300 tis.tun), Indie (250 tis.tun), Norsko (170 tis.tun), USA (160 tis.tun) a Kanada (100 tis.tun). /Nuclear Future, 2007, č. 2, s. 91-93/

Zásoby uhlí, ropy a zemního plynu jsou ve světě rozmístěny velmi nerovnoměrně. Například 93 % uhlí je pouze v sedmi zemích, 86 % ropy v devíti zemích a 74 % zásob zemního plynu v osmi zemích. 45 % světových zásob uhlí má Čína, 65 % ropy země Blízkého východu a 38 % zásob zemního plynu je v bývalém SSSR. Navíc, významné zásoby ropy jsou v politicky nestabilních oblastech. Zásoby fosilních paliv se obvykle nacházejí ve velké vzdálenosti od středisek spotřeby, takže je nutno dopravovat je na velké vzdálenosti, ať už se jedná uvnitř jednotlivých zemí (USA, Čína, Rusko) nebo v mezinárodním měřítku. Například Japonsko musí dovážet zkapalněný zemní plyn z Alžírska na vzdálenost 12 000 km, USA totéž palivo na vzdálenost 6 800 km. Evropské země dovážejí kvalitní černé uhlí až z Austrálie. Často se stává, že při přepravě ropy obřími tankery dochází k haváriím a ke znečišťování moře i pobřeží ropnými produkty. Při přepravě zemního plynu a ropy potrubími rovněž dochází k ohrožování lidských životů a přírody výbuchy a požáry.

Rozvoj světa na bázi úsporných opatření a OZE, propagovaný některými ekology a politiky je velkým klamáním lidí a společensky neodpovědným přístupem /16/. S postupným vyčerpáváním zásob fosilních paliv to bude patrně jaderná energie štěpení, která se díky vysoké výkonové hustotě energie, dlouhé životnosti zásob jaderných paliv, vysoké bezpečnosti a spolehlivosti provozu, ekonomice a přátelskému chování k životnímu prostředí stane mostem k překlenutí očekávaného nedostatku energie do doby, než se podaří v komerčním měřítku využít termojadernou energii /17/.



Obr. 4.1: Světové zásoby uhlí (coal), ropy (oil) a plynu (gas)



Obr. 4.2: Relativní velikost spotřeby fosilních paliv a jaderné energie viděná v časové perspektivě plus-minus 5 000 let.

4.3 Měrná potřeba surovin, materiálů, energie a plochy při výstavbě a provozu elektráren

Nízká výkonová hustota energie má za následek mimo jiné i to, že měrná spotřeba různých surovin, (například železné a měděné rudy a bauxitu), materiálů (železa, oceli, betonu, skla, umělých hmot, křemíku) i plochy potřebné k výstavbě a provozu za celou životnost elektrárny, je ve vztahu k vyrobené elektřině mnohem větší než v případě energetických zdrojů o vyšší výkonové hustotě. Dokládají to tabulky 4.2, 4.3, 4.4 a 4.5.

Tab. 4.2: Měrná potřeba surovin za celou životnost elektrárny připadající na vyrobenou gigawatthodinu el. (GWh el.) /18/.

Druh elektrárny	Železná ruda kg/GWh el	Měděná ruda kg/GWh el.	Bauxit kg/GWh el.
Sluneční fotovoltaická	4 162 – 40 569	218 - 514	257 - 4772
Vodní	1 510 – 2 768	10 - 13	16 - 19
Větrná *	5 155 – 10 798	91- 204	213 - 529
Černouhelná	2 509	19	50
Hnědouhelná	952	25	28
Plynová	1 813	12	33
Jaderná	501	2,3	29

* Střední rychlost větru 4,5 m/s

Tab.4.3: Měrná potřeba materiálů (beton, ocel, neželezné kovy, plasty, sklo, křemík) při výstavbě elektráren /2/.

Druh elektrárny	Potřeba materiálů v kg/MWh.r
Uhelná elektrárna	50
Plynová elektrárna	50
Jaderná elektrárna	90
Větrná elektrárna	255
Sluneční fotovoltaická elektrárna	355
Vodní elektrárna	535
Sluneční věžová elektrárna	715

Z čistě finančního hlediska se náklady na výstavbu a provoz elektráren porovnávají s příjmy z prodeje elektřiny a podle toho se přijímají rozhodnutí. Kromě tohoto ekonomického rozboru lze porovnávat energetické zdroje i z jiných hledisek. Jedním z nich je případ, kdy se měrnou jednotkou stává samotná energie a kdy se pokoušíme zjistit rozdíl mezi tím, kolik energie je zapotřebí při výstavbě a provozu elektrárny za celou životnost a kolik energie tato elektrárna vyrobí rovněž za celou životnost. Tato metoda rozboru se označuje anglickou zkratkou LCA (Lifecycle analysis) - rozbor celoživotního cyklu /20/.

Rozbory LCA se vypracovávají již celou řadu let a některé z nich dospěly k závěru, že jaderný palivový cyklus vyžaduje tak velké vstupy energie, že čistá výroba energie je velmi nízká a v extrémních případech dokonce negativní. Snahou bylo dokázat, že jaderná energie není udržitelným zdrojem energie a neměla by tudíž být součástí světové energetiky. Ve skutečnosti však celá řada studií včetně nedávné studie švédské společnosti Vatenfall na příkladu jaderné elektrárny Forsmark potvrdila, že vstupy energie při výstavbě a provozu jaderné elektrárny za celou životnost představují pouze 5 až
10 % z celkových výstupů /20/. Obnovitelné zdroje energie nejsou na tom při porovnání tohoto ukazatele dobře. Větrná a vodní energie mají vysokou spotřebu energie při výrobě potřebného betonu

a oceli a navíc mají nízké časové využití výkonu. U slunečních elektráren je zase vysoká spotřeba energie při výrobě skla a čistého křemíku a dalších materiálů, jak ukazují tabulky 4.2 a 4.3. Měrnou spotřebu energie uvádějí tabulky 4.4 a 4.5.
Výsledkem vysoké měrné potřeby vstupující energie je to, že trvá dlouho, nežli daná elektrárna uhradí energii, která byla spotřebována při výstavbě elektrárny. U obnovitelných zdrojů energie je doba úhrady v měsících mnohem delší než u jaderných elektráren nebo u elektráren spalujících fosilní paliva, jak je zřejmé z tabulky 4.4.

Tab. 4.4: Měrná potřeba primární energie za celou životnost elektrárny a doba její úhrady v měsících /18/.

Druh elektrárny	**Kumulovaná spotřeba primární** energie (kWh prim/kWh el)	**Doba úhrady spotřebované** energie (měsíce)
Fotovoltaická	0,62 - 0,84	61 - 88
Vodní	0,04 - 0,09	7 -13
Větrná *	0,11 - 0,17	8 -13
Černouhelná **	0,3	4
Hnědouhelná **	0,23	4
Plynová **	0,26	2
Jaderná **	0,07	3

* Střední rychlost větru 4,5 m/s
** Bez použití paliva v elektrárně

Tab. 4.5: Poměr mezi elektřinou vyrobenou a spotřebovanou za celou životnost elektrárny /19/.

Zdroj energie	**Poměr výstupy/vstupy**	**Podíl vstupů na výstupech v %**
Fotovoltaická zařízení	5	20
Zkapalněný zemní plyn	6	17
Větrná energie	6	17
Uhlí	17	6
Jaderná energie – difúzní obohacování	21	5
Zemní plyn	26	4
Jaderná energie – odstředivkové obohac.	59	2

Podle tohoto ukazatele je výhodnější elektrárna, která má vysoký poměr výstupy/vstupy a nízký podíl vstupů na výstupech.

Různé typy elektráren je možno porovnávat i podle toho, jakou měrnou plochu vyžaduje jejich výstavba ve vztahu k výkonu.Typické výkony elektráren ukazuje tabulka 4.6:

Tab. 4.6: Typické výkony elektráren v kWe

Sluneční fotovoltaická elektrárna	1	-	10
Větrná elektrárna	100	-	2 500
Malá vodní elektrárna	100	-	10 000
Velká vodní elektrárna	10 000	-	600 000
Plynová elektrárna	50 000	-	250 000
Uhelná elektrárna	300 000	-	800 000
Jaderná elektrárna	400 000	-	1 400 000

Park větrných elektráren o výkonu 1000 MWe vyžaduje plochu až 100 km^2, elektrárna spalující biomasu potřebuje 5 000 až 6 000 km^2 pro pěstování potřebných dřevin, zatímco uhelná nebo jaderná elektrárna potřebují jen asi 3,6 km^2, včetně zařízení palivového cyklu /2/. Kdyby fotovoltaické

zdroje měly nahradit výkon jaderné elektrárny 800 MWe, musely by zabrat plochu 300 krát větší. Jen samotné palivové články by zaujímaly plochu 140 km^2 a celá elektrárna 440 km^2. Přetržitost sluneční nebo větrné energie navíc zhoršuje ekonomiku i klasických elektráren, protože se musí složitě a nákladně řešit akumulace elektřiny v době, kdy slunce svítí nebo fouká vítr a dodávka elektřiny, když slunce nesvítí nebo je bezvětří /21/ .

4.4 Spotřeba paliva k výrobě elektrické energie

Nižší výkonová hustota fosilních paliv ve srovnání s jadernou energií má za následek vysokou spotřebu paliv k výrobě srovnatelného množství elektřiny nebo u srovnatelného výkonu elektrárny.
Hnědouhelná elektrárna o výkonu 1000 MWe potřebuje ročně více než 4 miliony tun uhlí, černouhelná elektrárna 2 miliony tun, olejová 11 milionů barelů ropy a plynová několik miliard m^3 zemního plynu. Ve srovnání s tím je to u jaderné elektrárny pouze asi 35 t obohaceného uranu za rok.
Pokud převedeme tyto údaje do názornějšího příkladu, pak uhelná elektrárna o výkonu 1000 MWe vyžaduje ročně 250 vlaků po sto vagonech, olejová elektrárna 11 obřích ropných tankerů, jaderná elektrárna jedno nákladní auto za měsíc /2, 22/. Kromě toho se při spalování fosilních paliv spotřebuje více než 6 milionů tun stále vzácnějšího kyslíku, zatímco při štěpení jaderných paliv žádný kyslík není zapotřebí.
Protože zásoby fosilních paliv jsou ve světě rozmístěny nerovnoměrně a většinou daleko od místa spotřeby, je třeba velká množství tuhých, kapalných a plynných paliv dopravovat na velké vzdálenosti po železnici, po moři nebo potrubími.

4.5 Produkce odpadů při výrobě elektrické energie

Při přeměně primární energie na elektřinu vznikají u každého energetického zdroje určité odpady a pokud chceme udržet nebo zvyšovat životní úroveň, musíme s tímto faktem počítat. Otázkou pouze zůstává, jak se podaří tyto odpady minimalizovat a jak zajistit, aby neškodily. Hlavní problém souvisící s odpady z elektráren spalujících fosilní paliva spočívá v tom, že vzhledem k jejich velkému objemu je nelze oddělit od životního prostředí a musí být ukládány na povrchu planety nebo vypouštěny do vzduchu. Naproti tomu jaderné odpady lze díky jejich malému objemu bezpečně uložit do zemské kůry, odkud byly původně vytěženy, a oddělit je od životního prostředí. Omezený objem bezpečně likvidovatelných radioaktivních odpadů je jednou z předností jaderné energetiky /1/. S tím ovšem nesouhlasí protijaderné organizace, které se domnívají, že likvidace radioaktivních odpadů není vyřešena a představuje ohrožení lidstva.

Vysoká spotřeba fosilních paliv k výrobě elektřiny vede k vysoké produkci plynných a pevných odpadů. Konkrétní představu o druzích odpadů z elektráren a jejich množství uvádějí tabulky 4.7 až 4.10. V tabulce 4.7 jsou měrné emise oxidu siřičitého (SO_2), oxidů dusíku (NOx) a oxidu uhličitého (CO_2) za celou životnost elektrárny a připadající na gigawatthodinu (GWh) vyrobené elektřiny. Z tab.

4.8 jsou patrné emise škodlivých látek při spalování paliv při provozu elektrárny a tabulka 4.9 porovnává množství odpadů při provozu uhelných a jaderných elektráren. Tabulka 4.10 ukazuje, že i při provozu uhelných elektráren se do životního prostředí dostávají radioaktivní látky, jejichž aktivita je dokonce větší než u elektráren jaderných, i když v obou případech v hranicích neškodnosti pro lidské zdraví.

Tab. 4.7 Měrné emise SO_2, NOx a CO_2 za celou životnost elektrárny (kg/GWh) /18/.

Druh elektrárny	Emise SO_2	Emise NOx	Emise CO_2
Sluneční fotovoltaická **	239 - 329	246 - 286	141 - 183
Vodní elektrárna **	20 - 36	31 - 56	12 - 20
Větrná elektrárna * **	64 - 104	47 - 92	24 - 39
Černouhelná elektrárna	755	728	844
Hnědouhelná elektrárna	795	686	1027
Plynová elektrárna	228	489	424
Jaderná elektrárna **	37	35	11

* Střední rychlost větru 4,5 m/s
** Jedná se o emise související s výstavbou.

Tab. 4. 8 Emise škodlivých látek při spalování paliv při provozu elektrárny /23/.

	kg CO_2	kg SO_2	kg NOx	kg CO	kg popela
Při spálení:					
1 toe uhlí vzniká	4800	6	11	4,5-20	220
1 toe oleje	3100	20	6	6,0-30	
1 toe zemního plynu ($1120\ m^3$)	2300		4	0,5-3	
Při štěpení uranu	0	0	0	0	0

1 toe = 1 tuna olejového ekvivalentu = 1,48 tun měrného paliva (tmp)

Porovnání odpadů z uhelné a jaderné elektrárny o výkonu 1000 MWe je v tabulce 4.9:

Tab. 4.9: Roční produkce odpadů v uhelné a jaderné elektrárně o výkonu 1000 MWe /24/

Druh odpadů	Uhelná elektrárna s čistícími zařízeními	Uhelná elektrárna bez čisticích zařízení	Jaderná elektrárna
SO_2 /t/	900	57 000	-
NO_x /t/	4 500	28 000	-
CO_2 /t/	6 500 000	6 500 000	-
Popel /t/	400 000 až 1 000 000		-
Vysoce aktivní odpady /t resp. m^3/		-	10 resp. 3
Středně aktivní odpady /t resp. m^3/		-	400 resp. 200
Nízko aktivní odpady /t resp. m^3/		-	600 resp. 500

Z tabulky 4.9 vyplývá, že v závislosti na kvalitě uhlí musí být uloženo až jeden milion tun popela, který obsahuje na 400 t toxických prvků, jako je arzen, kadmium, vanad, olovo, rtuť apod., které zůstávají trvale toxické. Tyto odpady obsahují i uran a thorium, přičemž efektivní dávkový ekvivalent pro obyvatelstvo je asi stokrát větší z uhelných elektráren než z jaderných. Tabulka 4.10 ukazuje, jaký je obsah uranu a thoria v uhlí a jaké byly emise těchto prvků v roce 1982 v USA a ve světě při výrobě

elektřiny v uhelných elektrárnách. Z tabulky je patrné, že se v celosvětovém měřítku dostalo do životního prostředí více než 3 600 tun uranu a téměř 9 000 tun thoria. 1 % bylo obsaženo v polétavém popílku a zbytek v pevných odpadech /25/.

Tab. 4.10: Obsah uranu a thoria v uhlí a jejich emise při provozu uhelných elektráren v roce 1982 v USA a ve světě /25/.

Ukazatel	Spotřeba uhlí (1982) /mil.tun/	Emise uranu /t/	Emise thoria /t/
Obsah uranu, 1,3 ppm/t			
Obsah thoria 3,2 ppm/t			
Spotřeba uhlí v USA	616		
Spotřeba uhlí ve světě	2 800		
Emise uranu a thoria v USA		801	1 971
Emise uranu a thoria ve světě		3 640	8 960

Z uvedeného vyplývá, že jaderné elektrárny při svém provozu produkují relativně malá množství nízko, středně a vysoce aktivních odpadů. Jaderné elektrárny ve světě v současné době ročně vyprodukují asi 12 000 t použitého paliva, které by zaplnilo jediné fotbalové hřiště do výše 1,5 m. (V České republice je to několik desítek tun.) Pokud se toto palivo přepracuje a získá se z něho nespotřebovaný uran a nově vzniklé plutonium, objem radioaktivních odpadů podstatně klesne a bude nutno trvale uložit jen asi jedno procento vysoce aktivních odpadů. O velmi malém objemu takto získaných vysoce aktivních odpadů vypovídá tento příklad: Kdyby se veškerá elektřina spotřebovaná jedním člověkem za celou dobu jeho života 70 let vyráběla jen v jaderných elektrárnách, vznikl by skleněný disk, který se vejde do dlaně (viz obrázek). Naproti tomu elektrárny spalující fosilní paliva vyprodukují v celosvětovém měřítku kromě až 28 miliard t oxidu uhličitého také miliony tun oxidů síry a dusíku, které přispívají ke globálnímu oteplování nebo tvorbě kyselých dešťů. Nezanedbatelná jsou rovněž velká množství popela obsahujícího toxické prvky, která je nutno ukládat na povrchu planety /26/.

Obr. 4.3: Množství vitrifikovaných vysokoaktivních odpadů, které by zbylo, kdyby člověk celý život spotřebovával jen elektřinu z jaderných elektráren.

Emise skleníkových plynů, ekvivalent v gramech CO_2/KWh

Zdroj	Minimum	Maximum
Uhelná	860	1290
Olej (ropa)	689	890
Plyn	460	1234
Vodní	16	410
Jaderná	9	30
Větrná	11	75
Solární (včetně FV)	30	279
Biomasa	37	116

Zdroj: IAEA

4.6 Způsob likvidace odpadů vznikajících při výrobě elektrické energie

V posledních desetiletích se zejména ve vyspělých zemích vynakládají velké prostředky na to, aby elektrárny spalující fosilní paliva podstatně omezily znečišťování životního prostředí emisemi škodlivých plynů a pevnými látkami. Proto jsou tyto elektrárny vybavovány drahými odsiřovacími a denitrifikačními zařízeními o vysoké účinnosti, která omezují emise oxidů síry a dusíku, a také filtry zadržujícími pevné látky. Díky chemickým reakcím vznikajícím při čištění spalných plynů a díky zachycování pevných složek lze vyrábět různé chemické látky a materiály využitelné v chemickém průmyslu, v zemědělství (umělá hnojiva), ve stavebnictví (například sádrokarton) apod. S pomocí investic do čisticích zařízení v uhelných elektrárnách se v České republice podařilo během necelého desetiletí výrazně omezit emise SO_2 a NO_x a přispět tak ke zlepšení životního prostředí. Nebylo to však zadarmo, neboť jen například akciová společnost ČEZ vynaložila na tyto účely přibližně 40 miliard Kč. Problém je ale v tom, že zatímco u SO_2 a NO_x je technicky a ekonomicky možné emise omezovat, v případě CO_2 tomu tak není, protože dosud neexistuje ekonomicky vhodná technologie.Teoreticky existuje několik možností, jak zachytit a likvidovat CO_2 - lze ho například čerpat do ropných a plynových vrtů ke zvýšení výtěžnosti ropy a zemního plynu, je možno ho skladovat v geologických formacích nebo ukládat na mořské dno. Potenciální náklady jsou však vysoké, jak je patrné ze zkušeností USA, kde vypracovali odhad těchto nákladů (viz tabulka 4.11).

Tab. 4.11: Odhad nákladů na zachycení a likvidaci CO_2 v USA /27/

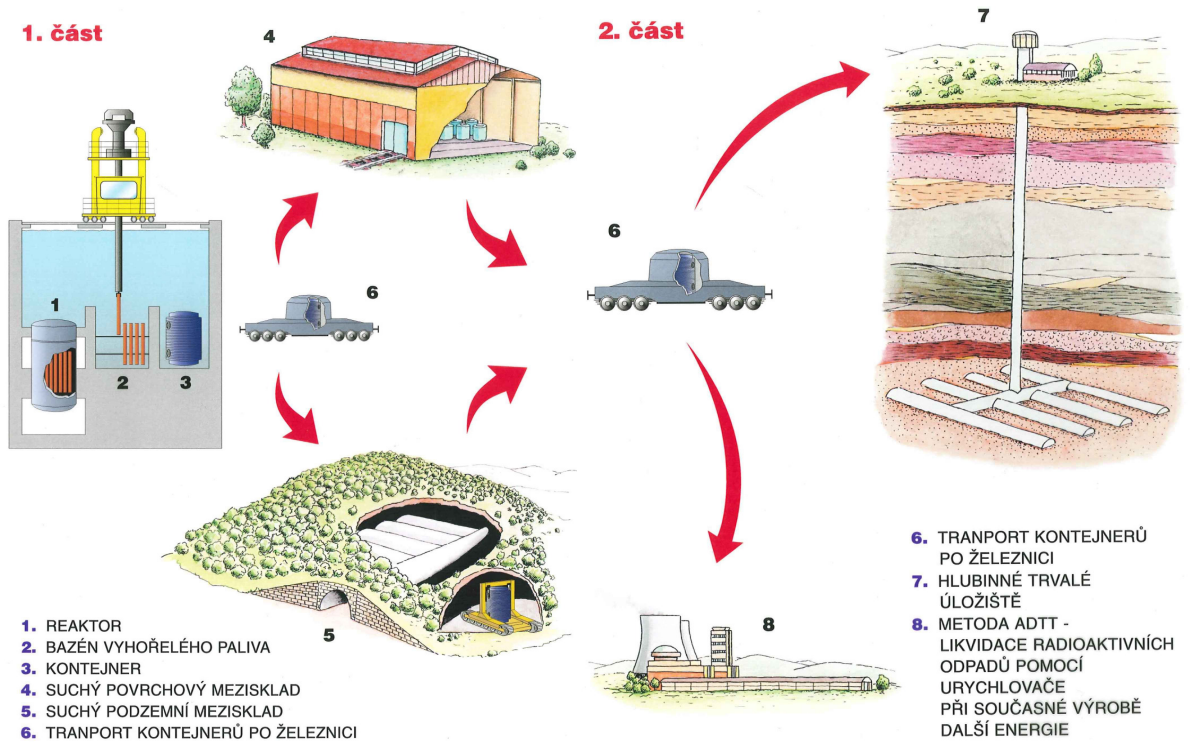
	Potenciální snížení emisí (mil. t CO_2)	**Potenciální náklady USD/ t CO_2**	
		nízké	vysoké
Zachycení a využití CO_2 ke zvýšení výtěžnosti těžby ropy a zemního plynu	50	10	45
Geologické uložení	900	31	91
Likvidace v oceánech	600	31	91

Někteří vědci a politici se přiklánějí k názoru, že emise CO_2 přispívají ke globálnímu oteplování a že se jeho projevy již začínají negativně projevovat v různých částech světa. Z toho důvodu je snaha využívat takové energetické zdroje, které tyto emise neprodukují. Proto se pozornost zaměřuje na obnovitelné zdroje energie a po několika desetiletích útlumu také na jadernou energii. Na několika příkladech lze dokumentovat, že v zemích, kde se elektřina vyrábí hlavně ze zdrojů neemitujících CO_2, jsou měrné emise CO_2 mnohem menší než v zemích, kde se elektřina vyrábí v elektrárnách, které spalují hlavně fosilní paliva. Například ve Francii, kde se v roce 1995 téměř 80 % elektřiny vyrábělo v jaderných elektrárnách, činily emise CO_2 na vyrobenou kilowatthodinu 61 gramů, zatímco ve Spojeném království, které se spoléhá zejména na uhlí a plyn a v menší míře na jadernou energii, byly emise CO_2 osmkrát větší - 478 g/kWh. Ve Švédsku, kde se ve stejném roce podílely vodní a jaderné elektrárny přibližně po padesáti procentech na celkové výrobě elektřiny, činily emise CO_2 pouze 22 g/kWh, zatímco v Dánsku, kde se elektřina vyrábí hlavně v uhelných elektrárnách, byly emise 33 krát větší a dosahovaly 733 g/kWh. Jen v roce 1995 zamezily evropské jaderné elektrárny emisím 700 milionů tun CO_2, což se rovnalo emisím, které vyprodukovaly všechny soukromé automobily v Evropě /28/.

Navzdory tomu protijaderné organizace neustále prohlašují, že jaderná energie je pro životní prostředí škodlivá a odvolávají se zejména na problém vyhořelého paliva, který je podle nich neřešitelný a nakonec povede k ústupu od jaderné energie. Navíc tvrdí, že současná generace přenechává budoucím generacím velmi složitý problém. Jaká je tedy situace kolem radioaktivních odpadů a zejména kolem vyhořelého paliva?

Jaderné elektrárny při svém provozu produkují nejrůznější druhy odpadů. Jednou kategorií jsou plynné, kapalné a pevné odpady, které mohou být nízko, středně a vysoce radioaktivní. Podle příslušných odborníků je z technického a ekonomického hlediska spolehlivě a bezpečně vyřešen způsob ukládání nízko a středně aktivních odpadů, a to díky velmi přísným národním a mezinárodním předpisům. Největší obavy se soustřeďují na vyhořelé (použité) palivo, které je po řadu let po vynětí z reaktoru vysoce aktivní. Po vyvezení z reaktoru je použité palivo nejprve několik let skladováno

v bazénu u reaktoru, kde se ochlazuje. V současné době existuje několik možností jak naložit s tímto palivem. Zaprvé je můžeme dočasně skladovat po dobu 40 - 50 nebo až sto let ve speciálních ocelových nebo betonových kontejnerech v otevřených hlídaných prostranstvích nebo v budovách připomínajících běžné průmyslové stavby. (Podobný mezisklad je vybudován v lokalitě jaderné elektrárny Dukovany – viz obr. 4.6).) Po uplynutí této doby lze použité palivové články trvale uložit do hlubokého geologického úložiště jako odpad a některé země s tímto řešením počítají. Jiné země ale nepovažují vyhořelé palivo za odpad, ale za energetický zdroj. Proto po několika letech po vynětí z reaktoru je vyhořelé palivo zpracováno ve speciálních přepracovacích závodech, kde se z něho získá nespotřebovaný uran, nově vytvořené plutonium a další radioizotopy k využití v průmyslu, vědě a medicíně. Do geologického úložiště se v tomto případě trvale uloží pouze vysoce aktivní štěpné produkty získané po přepracování použitých palivových článků. Vyhořelé jaderné palivo nelze totiž považovat za odpad, ale spíše za cenný zdroj energie. Použité palivo ještě obsahuje 95 % nespotřebovaného neštěpitelného izotopu uranu-238, 1 % izotopu uranu-235, 1 % nově vytvořeného štěpitelného plutonia-239 a další využitelné radioizotopy, takže jen asi 3 % z celkové hmotnosti lze považovat za skutečný odpad, který je ovšem vysoce aktivní, a proto nebezpečný. (Při provozu jaderné elektrárny o výkonu 1000 MWe je třeba každý rok vyměnit asi 30 tun vyhořelého paliva a z tohoto množství asi jen 1 tuna představuje skutečný odpad ve formě štěpných produktů). Energetický obsah získaného uranu a plutonia je tak velký, že by z něho bylo možno vyrobit 8 TWh elektřiny. K výrobě stejného množství elektřiny by bylo nutno spálit asi10 milionů tun černého uhlí a do životního prostředí by se dostala velká množství škodlivin. Proto na rozdíl od statisíců až milionů tun různých odpadů při spalování fosilních paliv by bylo nutno od životního prostředí bezpečně oddělit jen malá množství vysoce aktivních odpadů. Přepracovací závody jsou v současné době v provozu ve Francii, Spojeném království a v Rusku, menší závod je také v Japonsku.



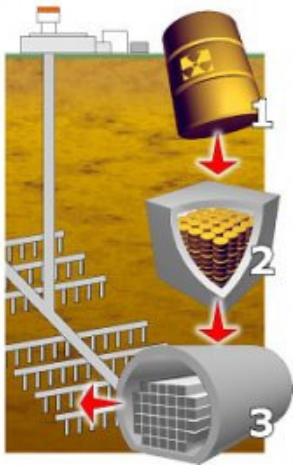
Obr. 4.4: Možné schéma likvidace použitého jaderného paliva

Protože vysoce aktivní odpady jsou pro člověka nebezpečné, realizují se přísná opatření, aby se radioaktivní látky nedostaly do životního prostředí člověka.

Řešení se skládá z několika kroků:
1/ Vysoce aktivní odpady se zalévají do skla nebo jemu podobných materiálů.
2/ Skleněný válec s odpady se vloží do ocelového kontejneru.
3/ Ocelový kontejner se opatří přebalem.

4/ Přebal se uloží do geologického úložiště v hloubce 300 až 1000 m, utěsní a prostor mezi přebalem a okolní horninou se zaplní vhodným materiálem.

Uvedené bariéry zabraňují tomu, aby se vysoce aktivní odpady dostaly do okolní horniny, která tvoří další, tentokrát přírodní bariéru. Schématické znázornění tohoto postupu je uvedeno na obrázku 4. 5. Za matrici pro fixaci vysoce aktivních odpadů bylo zvoleno sklo, protože je velmi stabilní i ve vodním prostředí. Jsou známy vzorky skla z Babylonie, které byly po dobu 3000 let ponořeny ve vodě a přesto zůstaly neporušené. Přitom se jednalo o sklo, vyrobené primitivní technologií. Proto lze konzervativně předpokládat, že zeskelněné odpady zůstanou neporušeny i ve vodním prostředí po dobu minimálně tisíc let /29/.



Obr. 4.5: Bariéry zaručující nemožnost šíření radionuklidů do životního prostředí.

Tento způsob uložení vysoce radioaktivních odpadů je bezpečný, což bylo mimo jiné potvrzeno i v přírodních podmínkách v uranovém ložisku Oklo v africkém státě Gabun. Podle vědců zde před dvěma miliardami let probíhala po dobu asi 500 000 let řetězové reakce v přírodních „reaktorech“. V této lokalitě bylo v okruhu přibližně 200 metrů zjištěno na 13 takových reaktorů a podle odhadu zde došlo ke štěpení asi 12 000 tun uranu. Navzdory teplotám vyšším než 600 stupňů Celsia a radiačnímu poškození okolních hornin a minerálů se ložisko Oklo chovalo jako přírodní sklad vyhořelého paliva. Odpadní produkty, jako plutonium, neptunium a thorium zůstaly buď tam, kde vznikly, nebo se přemístily na nepatrnou vzdálenost do okolní horniny. Ačkoliv u přírodního reaktoru neexistovaly nejrůznější technické bariéry proti úniku radioaktivních látek a protékala zde voda, nedostaly se vyprodukované štěpné produkty dále než do nejbližšího okolí svého vzniku. Proto několikanásobné technické bariéry a promyšlený systém konečného uložení vysoce aktivních odpadů dostatečně chrání biosféru před radioaktivním zamořením.

Obr. 4.6: Mezisklad použitého jaderného paliva v JE Dukovany

Příští generace zcela určitě raději přijmou relativně malá množství úhledně zabalených a bezpečně uložených radioaktivních odpadů než znečištěnou zeměkouli, zbavenou zdrojů uhlí, ropy a zemního plynu, ohroženou globálním oteplováním, následným stoupáním hladiny moří a oceánů a z toho pramenícími dalšími negativními důsledky pro život.

Přísné předpisy zajišťují i bezpečnou přepravu vyhořelého paliva v ocelových přepravních kontejnerech vážících až 120 tun, jež jsou vhodné i ke skladování vyhořelých palivových článků. Prototypy ocelových kontejnerů jsou vystaveny velmi náročným zkouškám, při nichž musí vyhovět mechanickým, tepelným a vodotěsným namáháním. Při zkouškách je kontejner:

- shozen z výšky jednoho metru na ocelový trn vysoký 15 a dlouhý 29 cm,
- shozen z výšky 9 metrů na nepoddajný betonový podklad,
- zavěšen nad nádrží s hořícím leteckým palivem a musí odolat žáru 800 stupňů Celsia po dobu 30 minut,
- ponořen do vody v hloubce 15 m po dobu osmi hodin.

Při všech těchto zkouškách nesmí dojít k porušení těsnosti kontejneru. Prototypy kontejnerů jsou ověřovány i v havarijních podmínkách. Například při zkouškách ve Spojeném království narazila dieselelektrická lokomotiva rychlostí 160 km/h na přepravní kontejner, který náraz vydržel bez poškození a zachoval si těsnost. V rámci speciální zkoušky narazil v USA automobil vezoucí kontejner pro přepravu vyhořelého paliva rychlostí 130 km/h do nepoddajné betonové stěny. Do kontejneru pak rychlostí 120 km/h narazila lokomotiva vážící 120 tun. Ani v jednom případě nebyla však narušena těsnost kontejneru. V Německu byla uskutečněna zkouška simulující pád letadla na kontejner TN-1300 firmy Transnuklear GmbH. Na těsnící systém víka kontejneru byl vystřelen 5 m dlouhý a tunu vážící projektil téměř rychlostí zvuku. Kontejner i při tomto nárazu zůstal těsný, jen žebrování bylo deformováno. Není proto překvapující, že při automobilové nebo železniční přepravě vyhořelého paliva nedošlo dosud při nehodě k uvolnění radioaktivních látek do životního prostředí.

Obr. 4.7: Kontejnery Castor v dukovanském skladu

Technologie používané při manipulaci s radioaktivními odpady jsou v souladu s obecnými zásadami pro průmyslové odpady a také v souladu s udržitelným rozvojem, ke kterému se hlásí i ekologické organizace. Jedná se hlavně o tyto zásady:

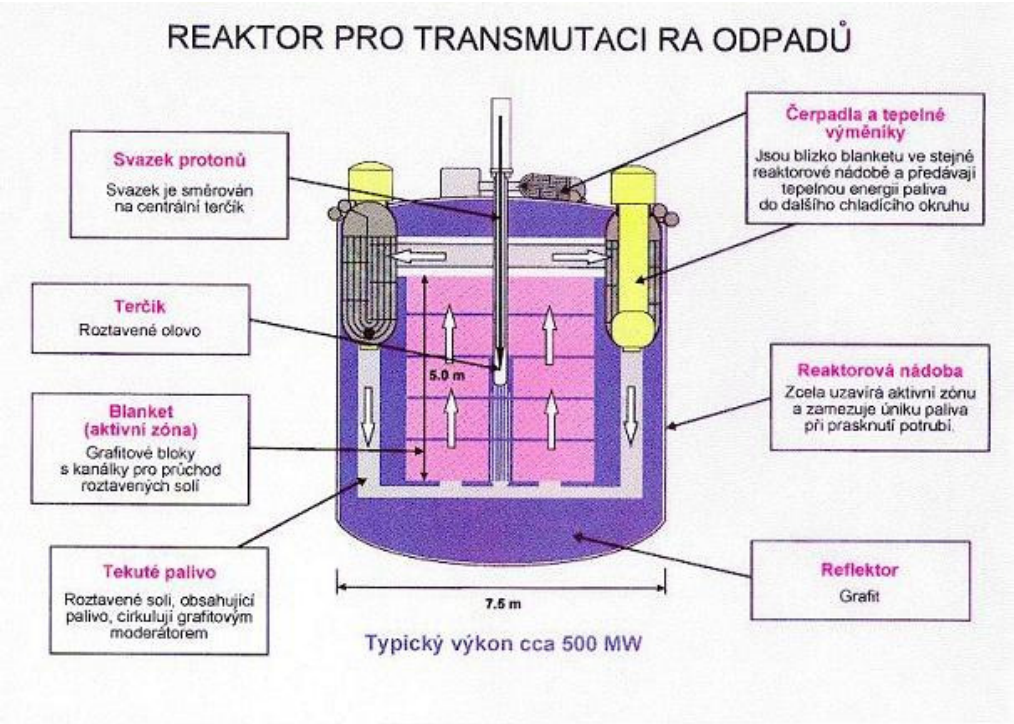
- uchovávat přírodní zdroje,
- maximálně recyklovat odpady,

- maximálně snižovat objem odpadů,
- trvale izolovat odpady od životního prostředí.

Transmutační technologie

Nové vědecké poznatky se nezastavily ani v oblasti hospodaření s použitým palivem. Bylo to také díky přerušení programu hvězdných válek prezidenta USA Ronalda Reagana v rámci jeho projektu strategické obranné iniciativy SDI (Strategic Defense Iniciative). Při výzkumu bylo vyvinuto protonové dělo, které mělo obíhat kolem Země a ještě ve stratosféře sestřelovat nepřátelské rakety. Po rozpadu sovětského bloku se hledalo využití zařízení pro mírové účely a američtí vědci z národních laboratoří v Los Alamos (LANL) spolu s vědci z dalších zemí se začali zabývat možností využití získaných poznatků. Výsledkem je vývoj kombinace urychlovače protonů s podkritickým jaderným reaktorem v rámci programu transmutace ADTT (Accelerator Driven Transmutation Technology) nebo ATW (Accelerator Driven Transmutation of Waste) /30/.

Podstatou transmutační technologie je spojení urychlovače protonů s podkritickým reaktorem o typickém výkonu 500 MWe. Urychlovač dodává svazek protonů, který je směrován na terčík z roztaveného olova (viz obrázek 4.8). V terčíku nastává spalace (tříštění) jádra a uvolňuje se velké množství neutronů. V reaktoru (blanketu) dochází k jaderným reakcím v palivu, které ve formě roztavených solí protéká kanály v grafitových blocích. Asi 10 až 20 % vyrobené elektřiny se spotřebuje v urychlovači částic. Jako palivo lze použít uran, thorium, vyhořelé palivo nebo vysoce obohacený uran a plutonium z vyřazených vojenských jaderných hlavic. Při použití vyhořelého paliva jsou v průběhu procesu vysoce aktivní štěpné produkty s dlouhým poločasem rozpadu transmutovány na štěpné produkty s krátkým poločasem rozpadu. Ty pak mohou být skladovány jen po dobu 30 - 50 let. Po této době jejich aktivita zmizí a bude stejná jako u jiných materiálů, které nás běžně obklopují.



Obr. 4.8: Možné uspořádání transmutačního reaktoru

Výhody transmutační technologie:

- Umožní postupně zlikvidovat světové zásoby plutonia z komerčních jaderných elektráren a z vyřazených vojenských jaderných hlavic a využít je k výrobě elektrické energie. Jedná se tedy i o přínos z hlediska nešíření jaderných zbraní.
- Umožní přeměnit vysoce aktivní prvky s dlouhým poločasem rozpadu na prvky s krátkou životností nebo dokonce na stabilní prvky a tak podstatně snížit požadavky na dlouhodobé skladování vysoce aktivních odpadů. Místo mnoha tisíců let skladování vysoce aktivních odpadů bude stačit několik desítek let skladovat odpady s krátkou životností.

- Umožní využít jak přírodní radioaktivní prvky, jako je uran a thorium, tak i vyhořelé palivo a plutonium k výrobě elektrické energie a uchovat zásoby fosilních paliv příštím generacím pro efektivnější využití v chemickém průmyslu.
- Technologie transmutace pracuje s podkritickým množstvím štěpitelných materiálů, takže odpadá řetězová reakce a je vyloučena možnost nekontrolovatelného rozvoje štěpné řetězové reakce, jak tomu bylo u 4. bloku Černobylské jaderné elektrárny.

Předběžné výpočty ukazují, že vyhořelé palivo z třicetiletého provozu jaderné elektrárny bude po oddělení uranu poskytovat palivo pro elektrárnu s urychlovačem na dalších 30 let provozu. Takto navržená elektrárna umožní plynulý přechod na thoriový palivový cyklus, kdy pro zásobování elektrárny o výkonu 1000 MWe bude stačit pouze jedna tuna thoria ročně a kdy bude odpad tvořen pouze štěpnými produkty s poločasem rozpadu do 30 let. Komerční aplikaci nové technologie však nelze očekávat dříve než za 10 - 20 let, protože bude nutno řešit celou řadu problémů.

Na realizaci technologie transmutace se podílejí vědecké instituce a vědci v USA, Francii, Rusku, Japonsku, Číně, Jižní Koreji, Itálii, Švédsku a také v České republice. Do výzkumu jsou zapojeny přední české organizace, jako je Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s., ŠKODA Jaderné strojírenství, a.s. Plzeň, Ústav jaderné fyziky Akademie věd ČR Řež a Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze /31/.

4.7 Ekonomické aspekty výroby elektřiny v elektrárnách různých typů

V konečné fázi to bude ekonomika výstavby a provozu elektráren, která rozhodne o tom, který energetický zdroj bude schopen vyrábět elektřinu nejlaciněji při současném splnění podmínek ve vztahu ke zdraví obyvatelstva a k životnímu prostředí. V rámci ekonomického hodnocení nás hlavně zajímá velikost investičních nákladů nutných k výstavbě elektráren různých typů a také celkové náklady na výrobu elektřiny v členění na investiční složku, palivo a provoz a údržbu. V posledních letech se do popředí dostávají i tak zvané externí náklady, které souvisejí s vlivem výroby elektřiny na zdraví lidí, životní prostředí a globální oteplování. Externí náklady nejsou dosud zahrnovány do ceny elektřiny a negativní důsledky výroby elektřiny hradí společnost jako celek. Externí náklady mohou v budoucnosti výrazně ovlivnit velikost výrobních nákladů a vztah veřejnosti k jednotlivým energetickým zdrojům.

Jednotlivé typy elektráren mají rozdílnou strukturu nákladů pokud jde o investiční složku, palivo a náklady na provoz a údržbu. Například investiční náklady elektráren spalující fosilní paliva jsou relativně nízké, zatímco náklady na palivo vysoké. U jaderných elektráren je tomu naopak: investiční náklady jsou vysoké, ale palivové náklady nízké. U elektráren na bázi obnovitelných zdrojů jsou investiční náklady rovněž vysoké, ale odpadají zde palivové náklady (s výjimkou elektráren spalujících biomasu).

4.7.1 Náklady na výstavbu různých typů elektráren

Určitou představu o velikosti nákladů na výstavbu elektráren z poloviny 90. let uvádějí tabulky:

Tab.4.12: Orientační měrné investiční náklady na výstavbu elektráren různých typů /32/

Druh elektrárny	Typický výkon /MWe/	Měrné investiční náklady /USD/kWe/
Jaderná elektrárna	1 200	1 500 - 2 400
Uhelná s práškovým uhlím	500	1 400
Uhelná s fluidním ložem	400	1 400
Elektrárna s plynovou turbínou	1 - 50	650 - 900
Plynová s kombinovaným cyklem	400	350 - 400
Vodní přečerpávací	300	1 200
Vodní konvenční	300	1 700

Větrná	0,7 - 1,5	1 200 - 1 500
Elektrárna s mikroturbínou	0,03 - 0,2	500 - 1 000
Sluneční fotovoltaická	0,001 - 0,1	1 000 - 6 000

Tab. 4.13: Průměrné měrné investiční náklady a jejich rozpětí podle databáze IIASA /CO2DB/ / 33/.

Druh elektrárny	**Měrné investiční náklady /USD/kWe/**	**Rozpětí nákladů /USD/kWe/**
Plynová se spalovací turbínou	500	250 - 750
Plynová s kombinovaným cyklem	800	450 - 1 200
Konvenční uhelná	1 500	1 200 - 1 700
Elektrárna na biomasu	1 650	1 000 - 2 300
Uhelná s kombinovaným cyklem	1 650	1 300 - 1 900
Jaderná elektrárna	2 000	1 500 - 2 600
Větrná elektrárna	1 700	750 - 2 650
Geotermální	2 300	650 - 4 000
Sluneční věžového typu	1 750	1 650 - 3 900
Sluneční fotovoltaická	3 600	800 - 6 100

Poznámky k tabulce 4.13: Uhelná elektrárna obsahuje zařízení na odstraňování SOx a NOx. Zralé technologie mají nižší měrné investiční náklady a menší rozpětí nákladů. Nové radikální technologie mají vyšší náklady a větší rozpětí, jsou málo ověřené a jejich potenciál pro snižování nákladů je nejistý. Jaderné elektrárny mají ve srovnání s elektrárnami spalujícími fosilní paliva vyšší investiční náklady, protože až dvě třetiny přímo nebo nepřímo souvisí se zajištěním jaderné a radiační bezpečnosti s cílem ochránit zdraví lidí a životní prostředí.Tato nevýhoda je vyrovnána nízkými palivovými náklady.

Orientační měrné investiční náklady podle tabulky 4.12 a 4.13 potvrzují i některé konkrétní projekty elektráren z poloviny 90. let.

Vodní elektrárny:

- Brazílie: Cana Brava, 450 MWe, 1667 USD/kWe
- Brazílie: Xingo, 3000 MWe, 1233 USD/kWe.
- Filipíny: San Roque, 345 MWe, 2029 USD/kWe.
- Kanada: Churchill Falls, 3200 MWe, 2625 USD/kWe.
- Turecko: Deriner, 670 MWe, 1060 USD/kWe.
- Uganda: Jinja, 250 MWe, 1800 USD/kWe.

Přečerpávací vodní elektrárny:

- USA, společnost Enron, 240 MWe, 1458 USD/kWe

Větrné farmy:

- Čína, ?, 40 MWe, 1000 USD/kWe
- Tunisko, Sidi Daoud, 10 MWe, 900 USD/kWe
- USA, Horseshoe Shoel, 420 MWe, 1667 USD/kWe.

Jaderné elektrárny:

- Indie, Kudankulam, 2000 MWe, 1250 - 1500 USD/kWe.
- Tchaj-van, Lungmen, 1356 MWe, 1327 USD/kWe. (zdokonalený varný reaktor)
- Rusko, BN-800, 800 MWe, 1625 USD/kWe. (rychlý reaktor)
- Finsko, pátý reaktor, 1600 MWe, 1375 USD/kWe.

- Čína, v roce 2005 byla zahájena výstavba 4 reaktorů s termínem dokončení v roce 2010. Měrné investiční náklady se udávají ve výši 1500 USD/kWe. V případě JE Daya Bay byly náklady 2000 USD/kWe. Uvažuje se o výstavbě dalších šesti jaderných elektráren za 8 miliard USD, kdy budou měrné investiční náklady kolem 1330 USD/kWe. (Nuclear News, 2003, č. 10, s. 17)

Geotermální:

- Guatemala, Zunil, 24 MWe, 2792 USD/kWe

Sluneční fotovoltaické:

- Řecko, Mires (Kréta), 5 MWe, 2000 USD/kWe.
- Španělsko, elektrárna Tudela, 1,2 MWe, 8 817 EUR/kWe.

(Elektrárna je v provozu od ledna 2003) (PEI, March, 2003, s. 24)

Vývoj technologií a rozvoj sériové výroby komponent elektráren vede ke snižování nákladů při výstavbě jak větrných a slunečních elektráren, tak i u elektráren spalujících fosilní paliva a u elektráren jaderných. Například cíle výzkumu a vývoje v Evropské unii do roku 2010 - 2020 v oblasti obnovitelných zdrojů energie jsou následující /37/:

- U fotovoltaické energie snížit investiční náklady na 1-1,5 EUR/Wp(peak) a současně zvýšit životnost z 15-20 let na 30 let a zvýšit účinnost z 10-15 % na 20-30 %.
- U větrných elektráren na souši snížit investiční náklady na 800-1000 EUR/kWe a u větrných elektráren na moři na 1670-2300 EUR/kWe.

V květnu 2002 vypracovali odborníci ze společnosti Westinghouse a řady elektrárenských společností USA a inženýrské společnosti Bechtel odhad měrných investičních nákladů u nově budovaných jaderných elektráren. Tyto náklady by měly u první dvoublokové jaderné elektrárny se zdokonaleným reaktorem AP-1000 dosáhnout méně než 1400 USD/kWe a po zkušenostech z výstavby dalších šesti, sedmi bloků by měly klesnout pod 1000 USD/kWe. Pak by byly srovnatelné s měrnými investičními náklady u jiných velkých elektráren provozovaných v základním zatížení /36/.

4.7.2 Náklady na výrobu elektřiny v různých typech elektráren

Agentura pro jadernou energii při OECD (NEA OECD) vypracovává přehledy o nákladech na výrobu elektřiny z různých zdrojů. Ze studie z počátku 90.let vyplynulo, že jaderné elektrárny byly při diskontní míře 5 %/rok ve většině zemí ekonomicky výhodnější než uhelné nebo plynové elektrárny. Totéž platilo i u diskontní míry 10 %/rok s výjimkou uhelných elektráren v USA a v Kanadě, které byly vybudovány přímo u uhelných dolů. Přehled o poměrných nákladech jaderných, uhelných a plynových elektráren uvádí tabulka 4.14. V tabulce 4.15 jsou konkrétní údaje z jednotlivých zemí ze začátku 90.a z pozdějších let.

Tab. 4.14: Poměrné náklady na výrobu elektřiny v jaderných, uhelných a plynových elektrárnách v roce 1992 při diskontní míře 5 a 10 %/rok /34/.

Země	**JE/UE**		**JE/PE**	
	5 % /rok	**10 %/rok**	**5 %/rok**	**10 %/rok**
Belgie	0,90	1,11	0,87	1,15
Kanada	0,88	1,15	0,57	0,88
Finsko	0,85	1,08	0,83	1,15
Francie	0,65	0,77	0,60	0,78
Německo 1/	0,65	0,83		
Německo 2/	0,78	0,98		
Japonsko	0,85	0,94	0,69	0,91
Maďarsko 3/	0,73	0,85	0,80	1,10
Maďarsko 4/	0,58	0,66		
Jižní Korea 5/	0,75	1,00		

Jižní Korea 6/	0,75	0,90		
Rusko	0,78	0,82		
USA - Středozápad	0,96	0,99	0,88	1,20
USA - Severovýchod	0,85	0,94	0,85	1,17

Poznámky: 1/ Domácí uhlí 2/ Dovážené uhlí 3/ Černé uhlí 4/ Lignit 5/ Reaktory PWR 6/ Reaktory CANDU.

Tab. 4.15: Příklady nákladů na výrobu elektřiny v různých zemích (nár. měna /kWh)

Země/rok	**Měna**	**Elektrárana**			
		Jaderná	**Uhelná**	**Plynová**	**Olejová**
Španělsko - 1990	Pesety	7,74	8,46	20,49	
1991		8,00	9,10	15,40	
Finsko - 1992	Pence	13,10	14,50	14,80	
2002	Eurocenty	0,24	0,32	0,30	
Francie - 1989	Centimy	21 - 22	27 - 32	28 - 43	
Jižní Korea - 1990	Wony	23,75	30,95	40,89	37,88
Japonsko - 1992	Jeny	9,14	10,94	10,69	11,51
Rusko - 1996	US centy	1,20	2,40		
USA - 1995	US centy	1,92	1,88	2,68	3,77
1999		1,83	2,07	3,52	3,18
2002		1,71	1,85	4,06	4,41
Kanada - 1992	Centy	4,82	5,04		
Spoj. království - 1999	Pence	1,2 - 1,3	2,2 - 2,6	1,8 - 2,1	
Tchaj-van - 1999	TWD	0,85	1,18	2,14	1,34

Švédsko (1994)
Švédské jaderné elektrárny vyráběly elektřinu za 0,10 SEK/kWh. Pokud by byly nahrazeny uhelnými nebo plynovými elektrárnami, zvýšily by se náklady na 0,35 SEK/kWh a při spalování biopaliv na 0,5 SEK/kWh. (Energy Economics, 1995, č. 162, s. 20)

Maďarsko (1993)
Jaderná elektrárna Paks vyráběla elektřinu za 0,35 - 0,40 forintů/kWh (včetně likvidace vyhořelého paliva a elektrárny po jejím dožití). Kdyby se elektřina vyráběla v uhelné elektrárně, činily by náklady 10 forintů /kWh. (NucNet,1994, News No 521)

Nizozemí (1999)
Jaderná elektrárna Borselle vyráběla elektřinu za méně než 2 USc/kWh, zatímco průměrné náklady u elektráren činily 4 USc/kWh. (Nucleonics Week, 2000, č. 12, s. 2)

USA
V roce 2007 byly průměrné náklady na výrobu elektřiny z JE v USA 1,68 c/kWh a tento rok byl již devátým rokem v řadě, kdy byly náklady nižší než 2 c/kWh a kdy jaderné elektrárny vyráběly elektřinu nejlaciněji ze všech zdrojů. /Power, 2008, č.3, s. 10/

Spojené království (2004)
V březnu 2004 uveřejnila Royal Academy of Engineering (RAE) studii o nákladech na výrobu elektřiny v nových elektrárnách a dospěla k výsledkům uvedeným v tabulce 4.16.

Tab. 4.16: Náklady na výrobu elektřiny v základním zatížení u nových elektráren ve Spojeném království (pence/kWh) /35/.

Elektrárna	**Náklady**	**Po zahrnutí nákladů na likvidaci CO_2**
Plynová turbína s kombinovaným cyklem	2,2	3,2 - 4,2
Jaderná elektrárna *	2,3	2,3
Uhelná s práškovým uhlím	2,5	4,5
Uhelná s cirkulujícím fluidním ložem	2,6	4,6
Uhelná s integrovaným zplyňováním	3,2	5,2

Plynová turbína s otevřeným cyklem ke krytí špičkové potřeby (využití 15 %)	6,2	7,2 - 8,2

* Včetně nákladů na demontáž elektrárny.

Ve stejné studii /35/ byly ve Spojeném království vyčísleny i náklady na výrobu elektřiny ve větrných elektrárnách (tabulka 4.17).

Tab. 4.17: Náklady na výrobu elektřiny ve větrných elektrárnách ve Spojeném království (pence/kWh) /35/.

	Bez záložních zdrojů	Se záložními zdroji
Pozemní větrná farma	3,7	5,4
Příbřežní větrná farma	5,5	7,2
Energie mořského vlnění	6,6	

Podle RAE je třeba u větrných farem budovat záložní výkony v rozsahu 65 - 80 % pro případ bezvětří, což snižuje jejich ekonomiku a nepříznivě ovlivňuje i konvenční zdroje, které musí vyrovnat výpadky elektřiny.

O zatím vyšších nákladech na výrobu elektřiny ve větrných a slunečních elektrárnách svědčí několik následujících příkladů:

- Náklady na výrobu elektřiny ve větrných elektrárnách německé společnosti E.ON byly v roce 2001 0,11 c/kWh, což bylo 3,5 až 4 krát více než u konvenčních elektráren. /Energie und Management, 2002, č. 17, s. 10/
- Výrobní náklady u větrných elektráren v USA byly v roce 2002 3 - 5 USc/kWh, včetně vládní podpory /Energetika, 2003, č. 12, s.405 - 407/
- Náklady na výrobu elektřiny ze slunečních tepelných systémů v Německu byly v roce 2001 0,12 EUR/kWh a byly třikrát vyšší než u konvenčních elektráren (0,04 EUR/kWh) /37/.
- Rovněž tak výrobní náklady ze slunečních tepelných systémů v Kalifornii byly v roce 2001 0,12 EUR/kWh a byly třikrát vyšší než z konvenčních elektráren /37/.
- Evropská unie plánuje v rámci svého programu výzkumu a vývoje snížit náklady na výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů do roku 2010 - 2020 tak, aby u fotovoltaických článků klesly až na 0,06 EUR/kWh, u větrných elektráren na souši na méně než 0,035 EUR/kWh a u větrných elektráren na moři na méně než 0,05 EUR/kWh /37/.

Rozvoj využívání obnovitelných zdrojů se neobejde bez vládní podpory, stejně jako tomu bylo u jaderné energie v počátečních fázích jejího vývoje. Vlády se snaží podporovat OZE různými způsoby. Například v souladu se zákonem z roku 1999 se ve Španělsku vyplácí speciální dotace na elektřinu z OZE. U biomasy činí 4,61 pesety/kWh, u větrných elektráren 4,79, u malých vodních elektráren 4,97 a u fotovoltaických zařízení do 5 kW 60 peset/kWh. V roce 1998 zvýšily dotace náklady na elektřinu o 80 miliard peset (cca 465 milionů USD). V Německu dosáhly finanční náklady na podporu větrných elektráren hrazené vládou podle zákona o obnovitelných zdrojích v roce 2002 1,1 miliardy EUR, v roce 2003 2,7 miliard EUR a do roku 2010 budou ročně činit až 5 miliard EUR. Dodatečné náklady nakonec zaplatí koneční spotřebitelé /38/. V USA činí dotace u elektřiny z větrných elektráren 1,8 USc/kWh. Původně měla být tato podpora ukončena koncem roku 2003, ale byla prodloužena a umožní pokračovat ve výstavbě větrných elektráren v hodnotě 2 miliard USD /39/.

Podobně, jako je tomu u jaderných elektráren, tak i v případě větrných a slunečních elektráren se výrobní náklady rychle snižují především díky sériové výrobě komponent a také díky novým technologiím. K výraznému snížení nákladů došlo v USA. V roce 2002 činily náklady u větrných elektráren 3 - 5 USc/kWh (včetně vládní podpory), ale v roce 1979 byly ještě zhruba desetkrát vyšší - 40 USc/kWh /40/. Velké snížení nákladů v USA bylo zaznamenáno i u sluneční fotovoltaické energie. V roce 1980 zde náklady dosahovaly až 100 USc/kWh, do roku 1999 klesly na 20 USc a v roce 2004 dokonce na 12 - 14 USc/kWh /41/.

V souvislosti s neustálým zvyšováním světových cen ropy a zemního plynu budou stále větší úlohu hrát při výrobě elektrické energie palivové náklady. V tomto ohledu budou tedy zvýhodněny jak obnovitelné zdroje, kde palivové náklady zcela odpadají, tak i jaderná energie. Zatímco palivové náklady se v jaderných elektrárnách pohybují kolem dvaceti procent, v případě uhelných, olejových a plynových elektráren dosahují padesáti až osmdesáti procent. I v případě, že by se ceny uranu

zdvojnásobily, výrobní náklady u jaderných elektráren by se zvýšily jen asi o 10 %, ale při zdvojnásobení ceny uhlí by náklady vzrostly až o 60 procent. Nízké palivové náklady v jaderných elektrárnách jsou tedy zárukou stability cen elektřiny, což nelze říci o uhelných a plynových elektrárnách. Ceny ropy na světovém trhu se v posledních měsících roku 2000 pohybovaly v rozmezí 30 - 33 USD/barel, ale začátkem roku 2005 vzrostly až na 50 USD/barel a koncem června téhož roku dosáhly hranice 60 USD/barel, ale v polovině roku 2008 se vyšplhaly až na více než 140 USD/barel. I když potom ceny klesaly, udržovaly se nad úrovní 100 USD/barel. Protože ceny zemního plynu se odvíjejí od ceny ropy, dochází i zde k rychlému růstu ceny zemního plynu. Například v USA se ceny zemního plynu v roce 2000 zvýšily oproti roku 1999 více než třikrát /42/ a tento růst pokračuje i nadále, což nepříznivě ovlivňuje perspektivy plynových elektráren, které ještě před deseti lety zaznamenávaly rychlý rozvoj v rámci výstavby tak zvaných obchodních elektráren (merchant plants), které budovali nezávislí investoři. V souvislosti s rychlým růstem cen zemního plynu však zájem o obchodní plynové elektrárny klesá a tyto elektrárny jsou se ztrátou prodávány.

Rychlý růst ceny zaznamenává i uhlí. V roce 1998 byla 28 USD/t, v roce 2005 už 80 USD/t, ale v roce 2008 dosáhla dokonce 130 USD/t. /New Scientist, 2008, č. 2639, s. 39/. K velkému výkyvu ceny dochází i u uranu. V roce 2005 se pohybovala kolem 20,5 až 36,50 USD/lb U_3O_8, v roce 2006 v rozmezí 36,5 až 72 USD/lb U_3O_8 a v polovině roku 2007 60 až 133 USD/lb. V prosinci 2007 klesla na 75 až 91 USD a v březnu 2008 se pohybovala v rozmezí 72 až 73,5 USD/lb U_3O_8. V květnu 2008 cena klesla na 60 USD/lb U_3O_8. /Nuclear News, 2008, č. 7, s. 75/

4.7.3 Externí náklady při výrobě elektřiny

Za externí náklady jsou považovány takové náklady, které by bylo nutno vynaložit na ochranu zdraví veřejnosti a životního prostředí a které souvisí s dalšími negativními vlivy při výrobě elektřiny. Zatím nejsou tyto náklady součástí ceny elektrické energie a hradí je společnost jako celek. Jsou sem zahrnovány například účinky znečištěného ovzduší na zdraví lidí, pokles hektarových výnosů, poškozování budov, staveb a konstrukcí, nemoci profesionálních pracovníků, nehody, důsledky globálního oteplování. Do externalit ale patří i takové faktory, jako je spolehlivost dodávek elektřiny, tvorba pracovních příležitostí, cenová stabilita, platební bilance státu, šetření zdrojů, rizika spoléhání se na dovoz ropy z nestabilních zemí, atd. Evropská komise odhaduje, že externí náklady při výrobě elektřiny (ale bez vlivu globálního oteplování, jehož důsledky lze obtížně ekonomicky vyhodnotit), představují 1 až 2 % hrubého domácího produktu zemí Evropské unie (15). Při uplatnění stejné metodiky představují externí náklady u silniční dopravy další 1-2 % HDP /43/.

Evropská unie zadala v roce 1995 vypracování studie ExternE s cílem analyzovat externí náklady za celou životnost elektráren při výrobě elektřiny v zemích EU. Rozborem údajů poskytnutých patnácti zeměmi EU se dospělo k těmto hlavním závěrům /43/:

- Průměrné externí náklady u jaderných elektráren byly 0,4 eurocentu/kWh.
- Nejvyšší externí náklady byly zjištěny u uhelných a olejových elektráren, které dosahovaly 4,1 až 7,3, respektive 4,4 až 7 eurocentu/kWh.
- U elektráren spalujících rašelinu to byly náklady 2,5 až 4,5 eurocentu/kWh.
- Externí náklady u plynových elektráren by celkové náklady zvýšily o 1,3 až 2,3 eurocentu/kWh.
- U vodních elektráren byly externí náklady vypočteny na 0,4 až 0,5 eurocentu/kWh.
- Nejnižší externí náklady byly vyhodnoceny u větrných elektráren, a to 0,1 až 0,2 eurocentu/kWh.

Externí náklady u jaderných elektráren jsou ve srovnání s elektrárnami spalujícími fosilní paliva nízké. Je tomu tak proto, že díky přísným normám v radiační ochraně a bezpečnosti je většina vlivů na zdraví obyvatelstva a ochranu životního prostředí již obsažena ve vnitřních nákladech, a tedy i v ceně elektřiny /44/. Průměrné náklady na výrobu elektřiny v zemích EU jsou bez uvažování externích nákladů 0,4 eurocentu/kWh.

Ekonomové argumentují tím, že by externí náklady měly být součástí ceny elektřiny, neboť jinak dochází k chybné alokaci zdrojů. V ideálním případě by začlenění externích nákladů mělo proběhnout formou zvýšení daní, aby byly kompenzovány náklady hrazené celou společností. To by ovšem podstatným způsobem změnilo mix energetických zdrojů ve prospěch těch, které mají nízké externí

náklady, tedy ve prospěch jaderné a vodní energie a obnovitelných zdrojů energie. Proti tomuto řešení ale existují silné politické bariéry /20/.

Při rozhodování o volbě toho kterého energetického zdroje je třeba zvažovat přijatelnost z hlediska nákladů, bezpečnosti a spolehlivosti a ekologických externalit. Světová energetická rada (WEC) vypracovala relativní charakteristiky primárních energetických zdrojů z hlediska uvedených klíčových faktorů pro rozhodování, jak je zřejmé z tabulky 4.18.

Tab. 4.18: Relativní charakteristiky primárních energetických zdrojů z hlediska klíčových faktorů pro rozhodování /20/.

	Uhlí	Olej	Plyn	Biomasa	Jádro	Voda	Vítr	Slunce
Přijatelnost z hlediska přímých nákladů	P	S	S	S	P	P	N	N
Přijatelnost z hlediska bezpečnosti a spolehlivosti	P	S	S	S	P	P	N	N
Přijatelnost z hlediska ekologických externalit	N	N	S	P	P	P	P	P

P = Přijatelná pozice S = Střední nebo neutrální pozice N = Nepříznivá pozice

Z uvedené tabulky je zřejmé, že nejpřijatelnější pozice podle uvedených hledisek mají vodní a jaderná energie.

4.7.4 Náklady na konečnou demontáž jaderných elektráren

Podle /45/ se náklady na konečnou demontáž jaderné elektrárny po skončení životnosti pohybují u jaderné elektrárny s lehkovodním reaktorem o výkonu 1000 MWe ve většině zemí v rozmezí 100 až 200 milionů USD /v cenách roku 1999/, což představuje 9 až 15 % z původně vynaložených investic. Náklady na likvidaci uhelných elektráren jsou podstatně nižší. Například v USA dosahovaly začátkem 90.let asi 30 milionů USD. Protože náklady na likvidaci jaderné elektrárny budou hrazeny ze zvláštního úročeného a zvyšujícího se fondu, do něhož přispívá provozovatel určitou finanční částkou z každé vyrobené kilowatthodiny, zvýší se náklady o méně než 5 %. Podle informací z roku 2007 se náklady na konečnou demontáž jaderných elektráren pohybují takto:

U reaktorů PWR ……. 200 – 500 USD/kWe

U reaktorů VVER ……. 330 USD/kWe

U reaktorů BWR …….. 300 – 550 USD/kWe

U těžkovodních reaktorů Candu … 270 – 430 USD/kWe

Náklady na konečnou demontáž jaderných elektráren, které se dnes staví, se udávají ve výši 9 – 15 % z původních investičních nákladů. Provozovatelé jaderných elektráren přispívají do fondu na likvidaci jaderných elektráren částkou 0,1 až 0,2 USc/kWh. /IAEA bulletin, 2007, č.2, s. 19/

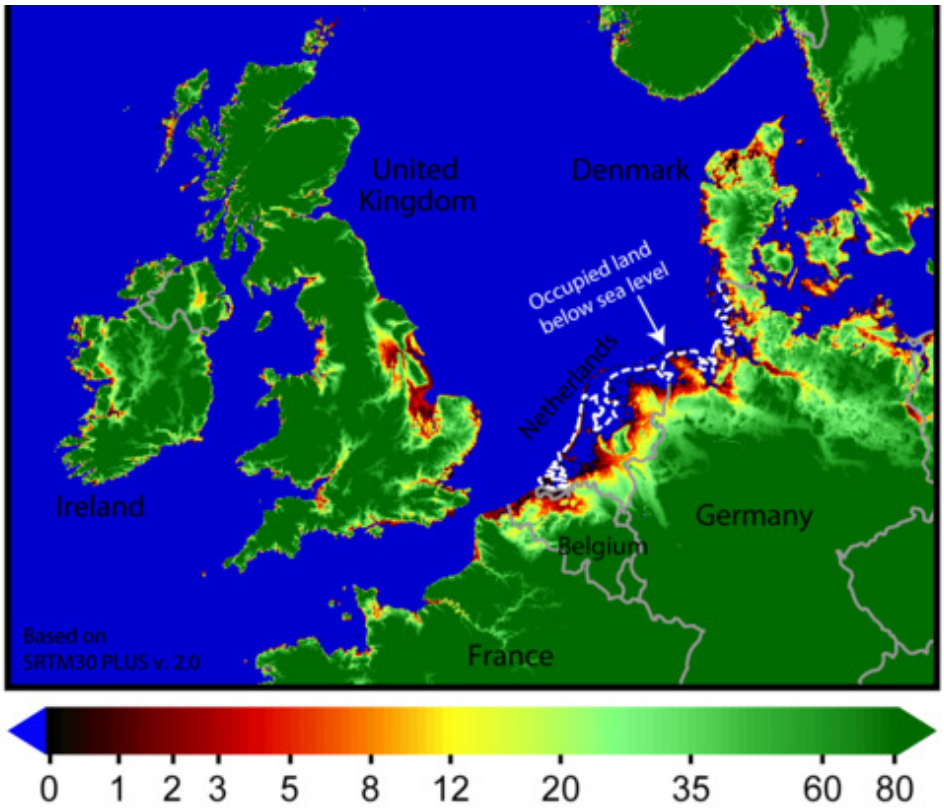
4.8 Vliv elektráren na životní prostředí

Každý způsob výroby elektřiny nějakým způsobem negativně ovlivňuje životní prostředí. Elektrárny spalující fosilní paliva znečišťují životní prostředí škodlivými exhalacemi, popelem a popílkem, přispívají ke vzniku kyselých dešťů a zvyšují riziko globálního oteplování, vodní elektrárny spolu s přehradami zabírají velké plochy území, často vyžadují evakuaci početného obyvatelstva, při tlení rostlin a stromů v zatopených oblastech je produkován oxid uhličitý, existuje riziko protržení přehrad nebo přelití vod nad přehradní hráz, geotermální elektrárny jsou zdrojem nepříjemného sirovodíku, větrné elektrárny přispívají k úhynu ptactva, narušují vzhled krajiny, způsobují hluk, jaderné elektrárny znepříjemňují život lidem v okolí při dlouholeté výstavbě vlivem rozsáhlé přepravy materiálů a zařízení, jsou zdrojem obav z radioaktivního záření, jaderných havárií a z přepravy radioaktivních materiálů a jejich skladování a likvidace.

4.8.1 Emise oxidu uhličitého - CO_2

Dnes existují četné ekologické problémy - globální oteplování, kyselé deště, smog, ozónová díra, odlesňování, rozšiřování pouští, atd. Industrializace sice přinesla větší bohatství a vyšší životní úroveň, ale na úkor životního prostředí. Kromě přírodních emisí CO_2 v důsledku tisíců požárů, k nimž neustále na zeměkouli dochází, se na růstu emisí CO_2 stále více podílejí antropogenní (lidskou činností způsobené) emise CO_2, a proto se stále více vědců a nyní i politiků přiklání k názoru, že riziko globálního oteplování související také s emisemi CO_2 je velmi reálné a je v posledních letech doprovázeno nebývalými povodněmi nebo naopak nebývale vysokými letními teplotami, táním ledovců, stále hrozivějšími hurikány, atd. Na antropogenních emisích CO_2 se výroba elektřiny v zemích OECD podílí asi 35 procenty.

V sedmdesátých a osmdesátých letech minulého století se ekologické obavy týkaly hlavně zhoršování životního prostředí v místních podmínkách, zejména s ohledem na emise SO_2 a NOx způsobujících kyselé deště. Tyto obavy přetrvávají i nadále, ale podařilo se vyvinout nákladné technologie odsiřování a denitrifikace, které výrazně omezují emise těchto plynů a přispívají ke zlepšení životního prostředí. Současné obavy se však soustřeďují hlavně na emise oxidu uhličitého CO_2. Přitom v současné době neexistuje technologie, která by dokázala tento skleníkový plyn ekonomickým způsobem likvidovat. Podle Mezivládního panelu o změnách klimatu (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) by narůstající emise CO_2 mohly v roce 2100 vést ke zvýšení celosvětové teploty o 1,5 až 3,5 stupně Celsia a ke zvýšení hladiny moří a oceánů až o 1 m. Pro nízko položené a ostrovní země by to mohlo znamenat katastrofu, neboť by mohly být zatopeny velké oblasti, jak znázorňuje obrázek. Podle revidovaných vědeckých odhadů se v příštích sto letech má globální teplota v roce 2100 zvýšit dokonce o 1,5 až 6 stupňů Celsia – viz obrázek 4.9 /48/.



Obr. 4.9: Potenciálně rizikové oblasti v případě zvyšování mořské hladiny (metry)

Za posledních sto let se neustále zvyšují emise skleníkových plynů související s lidskou činností, jako je oxid uhličitý, metan, oxidy dusíku a chlorofluorovodíky (CFC). Ze skleníkových plynů se velmi zvyšuje podíl zejména CO_2, který v atmosféře zůstává 50 až 500 let. A protože se má za to, že CO_2 přispívá více než padesáti procenty ke globálnímu oteplování, je hlavním předmětem obav vědců. Mezivládní panel o změnách klimatu z roku 1996 (IPPC-1996) dospěl k závěru, že kdyby se emise

CO_2 udržovaly na úrovni roku 1994, pak by se jeho atmosférické koncentrace zvyšovaly konstantní rychlostí po dobu dvou století a dosáhly by přibližně 500 ppm ve srovnání s 280 ppm před rokem 1750 /49/. Atmosférické aerosoly, jako jsou sulfáty a jemné částice produkované při spalování fosilních paliv, sice absorbují a odrážejí sluneční záření a částečně omezují proces oteplování, ale jejich životnost v atmosféře je krátkodobá a jejich koncentrace velmi kolísá z časového i regionálního hlediska, takže jejich ochlazovací účinek není z globálního hlediska rovnoměrný /49/.

Obsah antropogenního CO_2 v atmosféře neustále narůstá. Zatímco v roce 1860 bylo v celosvětovém měřítku vyprodukováno 0,7 miliardy tun CO_2, v roce 1900 to byly 2 miliardy a v roce 1997 téměř 23 miliardy tun a produkce se i nadále zvyšuje, navzdory ujednáním na mnohých mezinárodních konferencích a závazkům z konference v japonském Kjótu v roce 1997. V tabulce 4.19 se konstatuje, že 6 zemí se v roce 1995 podílelo téměř šedesáti procenty na emisích CO_2 ve světě.

Tab. 4.19: Emise CO_2 ve vybraných zemích v roce 1995 /46/.

Země	**Emise CO_2 /mil.t/**	**Emise CO_2 na obyv. /t/obyv./**	**Podíl na světových emisích /%/**
USA	5 229	19,88	23,7
Čína	3 067	2,51	13,6
Rusko	1 548	10,44	7,0
Japonsko	1 151	9,17	5,2
Německo	884	10,83	4,0
Indie	803	0,86	3,6
Svět	**22 038**		

V roce 2006 dosáhly emise CO_2 26 miliard tun a navzdory všem opatřením se dále zvyšují a do roku 2030 se mají zvýšit až na 40 miliard tun. USA by měly do roku 2012 snížit své emise $C0_2$ o 7 % ve srovnání s rokem 1990, tedy na 4 649 milionů tun z 5 000 milionů, ale emise stále rostou a v roce 2000 dosáhly 5 840 milionů tun, tj o 17 % více. / Kniha: Evans, R.L.: Fueling our future. s. 33. Cambridge University Press, 2007/.

Neustálý růst emisí skleníkových plynů byl hlavním předmětem mezinárodní konference v Kjótu v prosinci 1997. Bylo zde dosaženo kompromisu mezi stanovisky Evropy a USA. Evropa šla do Kjóta s tím, aby se do roku 2010 snížily emise skleníkových plynů o15 % oproti roku 1990, zatímco USA požadovaly, aby se emise v roce 2010 stabilizovaly na úrovni roku 1990. Na závěr konference bylo dohodnuto, aby se emise v období 2008 až 2012 snížily o 6 % oproti roku 1990 s tím, že budou existovat rozdíly mezi zeměmi. Například v zemích EU měly být sníženy o 8 %, v USA o 7 %, v Japonsku o 6 %. Některým zemím ale bylo dokonce povoleno emise zvýšit - Austrálii o 8 %, Norsku o 1 % /50/.

Spojené státy americké sice uznávají, že jsou největšími producenty CO_2, ale současně odmítaly podepsat protokol z Kjóta a odůvodňovaly to tím, že by jejich podpis byl příliš škodlivý pro jejich ekonomiku. Současně ale uvádějí, že vynakládají více prostředků než jiné země na způsoby omezování emisí. Například v rámci energetického programu prezidenta Bushe mají být v příštích letech jen na technologie čistého uhlí vynaloženy 2 miliardy USD, přičemž se na výdajích bude podílet jak vláda, tak průmysl. K omezení znečišťování životního prostředí má přispět i revitalizace jaderné energetiky, která se očekává v nejbližším desetiletí. Již dnes se americké jaderné elektrárny podílejí na omezování emisí SO_2, NO_x i CO_2. Například v letech 1990 až 1995 zamezil provoz jaderných elektráren v ročním průměru emisím 480 000 t SO_2, 170 000 t NO_x a 150 milionům t CO_2 /47/. Pokud použijeme jiné srovnání, pak provoz amerických jaderných elektráren v roce 1996 zamezil emisím skleníkových plynů v množství, které se rovná spálení 50 000 železničních vagonů uhlí nebo provozu téměř 100 milionů automobilů. Pokud by v USA nebyly v roce 1996 v provozu jaderné elektrárny, bylo by nutno navíc spálit 268 milionů tun uhlí, 27,8 miliardy m^3 zemního plynu a 9,9 milionů m^3 ropy a emise CO_2 by v tomto roce byly vyšší o více než 147 milionů tun, emise SO_2 o 5 milionů tun a emise NOx o 2,5 milionů tun /51/.

V polovině 90. let vyráběly jaderné elektrárny ve světě přes 2 200 TWh elektrické energie a zabránily emisím více než 2,2 miliard tun CO_2, což bylo asi 10 % z celosvětových emisí tohoto plynu. V roce 2007 vyrobily jaderné elektrárny ve světě 2 600 TWh a zamezily více než 2,6 miliardám tun CO_2. Také

evropské jaderné elektrárny přispívají k omezování škodlivých emisí z elektráren spalující fosilní paliva. Na konkrétním příkladu ze Spojeného království a Francie lze dokumentovat, jak se jaderné elektrárny podílejí na omezování emisí CO_2. Například v roce 1994 byl podíl uhelných elektráren na výrobě elektřiny ve Spojeném království 49 % a emise CO_2 na vyrobenou kilowatthodinu byly 0,63 kg. Naopak ve Francii, kde se jaderné elektrárny ve stejném roce podílely na výrobě elektřiny 75 procenty, představovaly emise CO_2 pouze 0,064 kg. Z toho je zřejmé, že rozvoj jaderných elektráren může přispět jak ke zvýšení výroby elektřiny, tak ke snižování emisí /1/.

4.9 Zdravotní a jiná civilizační rizika při výrobě elektřiny

Každá lidská činnost je spojena s určitými riziky. Obecně lze rizika rozdělit na dobrovolná, jimž se člověk dobrovolně vystavuje například při sportování, jízdě automobilem apod., a nedobrovolná, jimž je vystaven bez vlastního přičinění. Sem patří rizika související nejen s přírodními katastrofami, ale také se získáváním a využíváním energie a elektřiny.

Třebaže používání elektrické energie poskytuje mnoho výhod a užitku, je spojeno s jistými riziky jak pro pracovníky, tak pro obyvatelstvo. Rizika poranění, nemocnosti a úmrtí vznikají v celém energetickém cyklu od těžby a zpracování paliva a výstavbu elektráren, až po výrobu elektřiny, její používání a likvidaci odpadu. Rizika je však třeba porovnávat i s přínosy, které daná technologie přináší. Například riziko z nedostatku elektřiny by bylo mnohem větší než je riziko spojené s jejím využíváním. Stačí si například představit nemocnici bez elektřiny a celkový obraz bude zcela jasný.

Rozbor rizika musí být založen na měřitelných vědeckých údajích a nikoliv na citech. Jedním z často používaných ukazatelů při hodnocení rizika je „zkrácení očekávané délky života“, z anglického termínu „Loss-of-Life Expectancy - LLE“. Je to průměrná doba ve dnech, o kterou se zkrátí lidský život v důsledku specifického rizika. Jedním z největších rizik, jimž se člověk dobrovolně vystavuje, je kouření. Podle údajů z USA se u kuřáků délka života zkracuje o 2550 dní, tj. asi o 7 let, u kuřaček o 1530 dní, tj. o více než 4 roky. Nadměrná spotřeba alkoholu zkracuje život o 365 dní, automobilové nehody o 207 dní, zneužívání drog o 125 dní, atd. Pokud jde o nemoci, srdeční nemoci zde zkracují život o1607 dní, rakovina o1247 dní, nadváha (o 15 kg navíc) o 1020 dní, infarkt o 510 dní, zápal plic a chřipka o 105 dní. U dalších nedobrovolných rizik existují tyto údaje: veškeré nehody zkracují život o 366 dní, znečištěný vzduch o 77 dní, jedy a udušení o 52 dní, pády o 28 dní, utonutí o 24 dny, letecké katastrofy o 1den, údery blesku o 0,7 dne, hurikány o 0,3 dne /52/.

Pokud použijeme jiný ukazatel trvale existujících rizik a z nich vyplývající počty úmrtí, získáme následující údaje o dobrovolných i nedobrovolných rizicích z tabulky 4.20.

Tab. 4.20: Trvale existující rizika a z nich vyplývající počty úmrtí /53/.

Druh rizika	Počet úmrtí za rok na milion obyvatel
Přirozené nemoci	10 000
Nemoci kuřáků	2 000
Nehody všeho druhu	500
Dopravní nehody	300
Sebevraždy	200
Elektřina (nehody v průmyslu, službách a v domácnostech)	20
Tepelné elektrárny na fosilní paliva (emise oxidu siřičitého)	3
Přírodní katastrofy	1

Tato rizika vyjadřují skutečná úmrtí podle statistických údajů. Nás budou rovněž zajímat rizika úmrtí způsobená při výrobě elektřiny v různých typech elektráren. Pokud použijeme ukazatel zkrácení očekávané délky života, získáme tyto hodnoty:

Tab. 4.21: Zkrácení očekávané délky života ve dnech při výrobě elektřiny /52/.

Energetický zdroj	Zkrácení délky života ve dnech

Uhlí	23
Ropa	4
Zemní plyn	2,5
Jaderná energie (UCS) *	2
Sluneční energie	1
Vodní energie	0,2
Jaderná energie (US NRC)	0,05 (asi 1 hodina)

(UCS - Unie angažovaných vědců)*

Rizika úmrtí vyplývající z výroby elektřiny v uhelných elektrárnách jsou nejvyšší, a to v důsledku znečištěného ovzduší. Každý rok například předčasně umírá v USA z tohoto důvodu asi 10 000 lidí. Nejznámější katastrofa souvisící s uhelnými elektrárnami se stala v Londýně v roce 1952, kdy v důsledku znečištěného ovzduší zemřelo během několika dní o 3500 osob více než by bylo možno normálně očekávat. Tato okolnost vedla mimo jiné i k urychlenému rozvoji jaderných elektráren ve Spojeném království. Elektřina z olejových elektráren je méně riziková a zkracuje očekávanou délku života o 4 dny vlivem znečištěného ovzduší a požárů. Zemní plyn je na tom ještě lépe, ale četná úmrtí souvisí s požáry, výbuchy a udušením. Rizika vyplývající z výroby elektřiny v jaderných elektrárnách jsou podle americké jaderné regulační komise (US NRC) nejnižší ze všech porovnávaných rizik a ve srovnání s uhelnými elektrárnami jsou 400 krát nižší. K této hodnotě dospěla US NRC na základě rozsáhlé studie z poloviny 70.let, v níž se předpokládalo, že by veškerá elektřina v USA byla vyráběna v jaderných elektrárnách a nikoliv jen kolem 20 %, jak je tomu dnes. Navíc byly ve výpočtech použity ty nejhorší možné scénáře. Tuto studii kritizovala Unie angažovaných vědců, která tvrdila, že podle jejích výpočtů je riziko 40 krát větší než uvádí NRC, tedy nikoliv 0,05 dne, ale 2 dny. I kdyby byl výpočet UCS správný, patří rizika jaderné energetiky při výrobě elektřiny mezi nejnižší ze všech aktivit, s nimiž se v životě setkáváme /52/. Tento fakt potvrdila mimo jiné i francouzská národní lékařská akademie ve své zprávě z 1.7.2003, v níž konstatuje, že výroba elektřiny v jaderných elektrárnách má nejmenší vliv na zdraví obyvatelstva ve srovnání s výrobou elektřiny nejen v elektrárnách spalujících fosilní paliva, ale i ve větrných a slunečních elektrárnách a v elektrárnách spalujících biomasu. Akademie rovněž prohlásila, že není vědecky podložené odhadovat zdravotní důsledky nízkých dávek záření s použitím lineární bezprahové teorie /54/.

Při porovnávání rizika úmrtí u různých způsobů výroby elektřiny je třeba upozornit na jednu skutečnost. Ta souvisí s tím, že úmrtí u nejaderného způsobu výroby elektřiny jsou skutečná úmrtí podle statistických údajů, zatímco u rizik souvisících s jadernou výrobou elektřiny se většinou jedná o rizika vypočítaná a nikoliv skutečná. Výjimkou je havárie Černobylské jaderné elektrárny, při níž bezprostředně zemřelo 31 osob a další desítky zemřely v průběhu 20 let. K celé řadě úmrtí došlo rovněž při neodborném zacházení se zdroji ionizujícího záření mimo energetiku. Tabulka 4.22 uvádí přehled o vážných haváriích souvisejících s energií v období 1963 až 1989.

Tab. 4.22: Vážné havárie související s energií v letech 1963 až 1989 /55/.

Místo	Země	Rok/Událost	Okamžitá úmrtí
Uhlí			
Aberlan	Spojené království	1966 - sesuv haldy strusky	144
Yubari	Japonsko	1981 - výbuch důlního plynu	93
Natal	Jižní Afrika	1983 - výbuch metanu	63
Omuta	Japonsko	1984 - důlní požár	83
Mei Shan	Tchaj-van	1984 - důlní požár	121
Taipeh	Tchaj-van	1984 - exploze v dole	93
Hokkaido	Japonsko	1985 - důlní neštěstí	62
Ropa			
Piper Alpha	Spojené království	1988 - požár, exploze na ropné plošině	187
Amoco Cadiz	Francie	1978 - únik ropy z tankeru	
Exxon Valdez	USA	1989 - únik ropy z tankeru	
Cubatao	Brazílie	1964 - exploze a požár ropovodu	500
Zemní plyn			
San Juanico	Mexiko	1984 - požár a exploze skladu	přes 500

Ush-Ufa	Rusko - Ural	1969 - exploze plynovodu	přes 500
Hulmanquilla	Mexiko	1976 - prasknutí plynovodu	58
Gahri Ohoda	Pákistán	1984 - exploze plynovodu	80
Ural	Rusko	1989 - exploze plynovodu	650 - 800
San Carlos	Španělsko	1978 - exploze plynovodu	216
Xilatopec	Mexiko	1976 - exploze plynovodu	100
Vodní energie			
Vaiont	Itálie	1963 - přetečení hráze	1 989
Kolyona	Indie	1967	180
Canyon Lake	USA	1972	240
Macchu 2	Indie	1979	2 500
Gujarati	Indie	1979	15 000
Orissa	Indie	1980	1 000
Jaderná energie			
TMI-2	USA	1979	0
Černobyl	Ukrajina	1986	31

Poznámky: Při havárii tankeru Amoco Cadiz bylo znečištěno 367 km pobřeží a při havárii Exxon Valdez 1600 km pobřeží. Havárie jaderné elektrárny Three Mile Island-2 (TMI-2) znamenala obecný šok a dlouhodobý strach. Bylo evakuováno několik tisíc obyvatel, zejména těhotných žen. Havárie Černobylské jaderné elektrárny si vyžádala evakuaci 130 000 obyvatel a byly kontaminovány velké oblasti (viz samostatná kapitola).

I rozvoj jaderné energetiky je spojen s riziky. Rizika by ale byla mnohem větší, kdyby se jaderná energie nemohla podílet na světové výrobě elektřiny a v neenergetických oblastech. Bezpochyby by došlo k vyšší závislosti na fosilních palivech a k degradaci životního prostředí, zemědělství by bylo méně produktivní při zajišťování výroby potravin, chyběly by speciální léčebné postupy, došlo by k narušení světové ekonomiky a k politické nestabilitě ve světě.

Na snížení rizika úmrtí se v různých oblastech lidské činnosti vynakládají značné finanční prostředky, jak je patrné z tabulek 4.23 a 4.24, které uvádějí náklady v dolarech na zachránění jednoho života v dopravě, zdravotnictví a v oblasti záření podle údajů z USA.

Tab. 4.23: Dolary vynaložené na zachránění jednoho života v dopravě /52/

Ochranné opatření	**Náklady v USD**
Vzduchové polštáře	600 000
Zasunovací volant	290 000
Dělící bariéry	163 000
Zlepšení ochranných svodidel	101 000
Dokonalejší osvětlení	80 000
Zlepšení dopravních značek	31 000

Tab. 4.24: Dolary vynaložené na zachránění jednoho života ve zdravotnictví /52/

Ochranné opatření	**Náklady v USD**
Léčení vysokého krevního tlaku	150 000
Pravidelná kontrola rakoviny plic	130 000
Pravidelná kontrola rakoviny prsu	130 000
Pravidelná kontrola rakoviny tlustého střeva	20 000
Zvýšení jakosti vody	4 030
Léčení průjmových onemocnění	150

Prameny:

/1/ Nuclear News, 1997, č. 10, s.- 34 - 39
/2/ Energetika, 2002, č. 2, s. 41
/3/ Nuclear Engineering International, 2000, č. 577, s. 27
/4/ Nuclear News, 2004, č. 11, s. 52 - 53
/5/ Nuclear News, 1997, č. 12, s.12
/6/ Reference Data Series , N0 1, July 2004. IAEA Vienna
/7/ Brennstoff Waerme Kraft, 1998, č. 4, s. 77
/8/ Modern Power Systems, 2003, č. 4, s. 7
/9/ European Power News, 1999, č. 5, s. 33
/10/ Energy Policy, 2000, s. 625 - 640
/11/ Energetika, 2003, č. 11, s. 380
/12/ Reference Data Series No 1, 1999 Edition, s. 35. IAEA Vienna
/13/ Energie und Management, 2004, č. 7, s. 2
/14/ Nuclear Energy, 1994, č. 5
/15/ Energetika, 1995, č. 2, .s. 47 - 54
/16/ Nuclear News, 1997, č. 3, s. 58 - 60
/17/ Electra, 1996, č. 168, s. 15 - 23
/18/ Atomwirtschaft - Atomtechnik , 1999, č. 3, s. 169
/19/ Nuclear News, 2003, č. 3, s. 70 - 73
/20/ Nuclear Engineering International, 2004, č. 603, s. 12 - 14
/21/ Energetika, 2003, č. 12, s. 410 - 411
/22/ Magazín Energie, 2000, č. 7/8, s. 29 - 31
/23/ 15. zasedání Světové energetické rady (WEC) v roce 1992 v Madridu
/24/ Nuclear News, 1997, č. 30, s. 34 - 39
/25/ Nuclear News, 1995, č. 2, s. 57
/26/ IAEA Bulletin, 2004, č. 1, s. 5 - 8
/27/ Svět energetiky, COISE Praha, 1998, č. 5, s. 15
/28/ Atomwirtschaft Atomtechnik, 1999, č. 1, s. 46 - 48
/29/ Kniha: Waltar, A.E.: America the Powerless, 1995, kap. 6, s. 107 - 128
/30/ Svět energetiky, zvláštní číslo 1995, COISE Praha.
/31/ Energetika, 2000, č. 11, s. 373 - 375
/32/ Energy Sources, 1996, č. 4, s. 401
/33/ Energy Policy, 27, 1999, s. 247 - 280
/34/ NEA Newsletter, Fall 1993
/35/ The Nuclear Engineer, 2004, č. 3, s. 91
/36/ Nuclear Engineering International, 2003, č. 589, s. 15
/37/ Energetika, 2002, č. 11, s. 277-280
/38/ Nuclear Engineering International, 2004, č. 595, s. 40
/39/ Power, 2004, č. 11/12, s. 12
/40/ Energy World, 2000, č. 282, s. 11
/41/ Energetika, 2005, č. 2, s. 69 - 71
/42/ Power Enginering International, 2001, č. 11, s. 26 - 30
/43/ NucNet, 2001, Background No 10
/44/ NucNet, 1998, Background No 6
/45/ FT Energy Economist, 1999, č. 215, s. 12
/46/ Energy Economics, 1997, č. 193, s. 5
/47/ Nuclear News, 1999, č. 12, s. 26 - 32
/48/ NucNet, 2000, News. No 372
/49/ Environmental Manager (EM) 1997, February, s. 25 - 33
/50/ Energy World, 1998, č. 255, s. 2
/51/ Nuclear News, 1998, č. 8, s. 14 -15
/52/ Kniha: Waltar, A.E.: America the Powerless.Facing our nuclear energy dilemma. Kap. 8.
/53/ Marek, Jiří a kol.: Jaderná energetika, člověk a životní prostředí. Panorama, Praha 1987
/54/ Nuclear News, 2003, č. 10, s. 63
/55/ Safety Series No 75, INSAG 5. IAEA 1992

5.0

ENERGETICKÉ VYUŽITÍ JADERNÉ ENERGIE

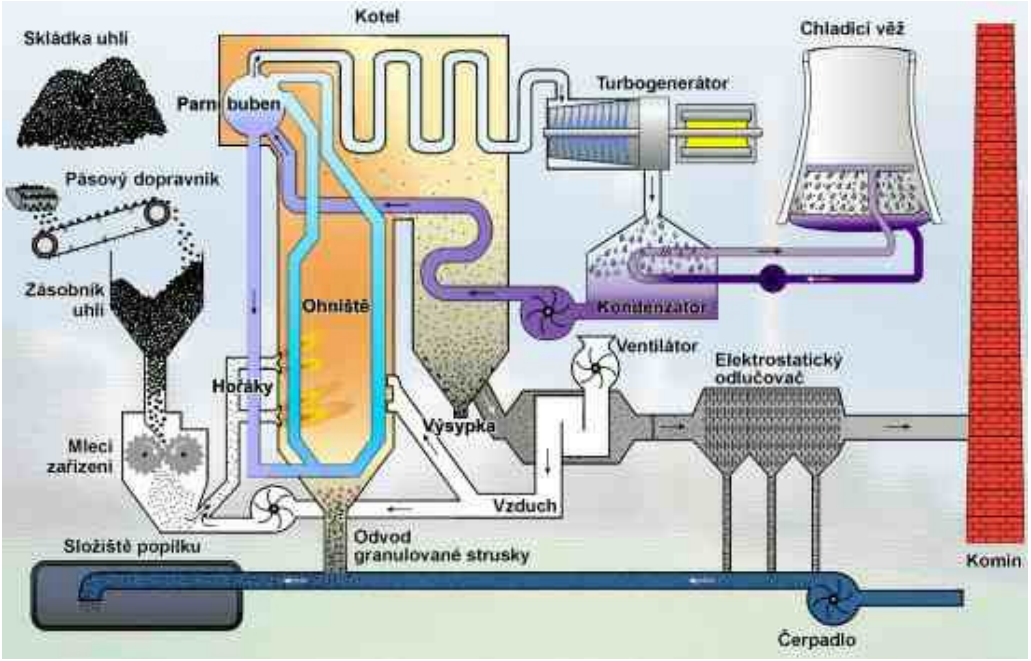
Díky univerzálnímu využití elektrické energie bude vědeckotechnický pokrok i nadále spjat s rozvojem elektrizace, na níž se bude podílet i jaderná energie. Využíváním jaderných reaktorů k výrobě elektřiny však přínos jaderné energie k řešení celosvětových energetických problémů nekončí, protože se elektřina na celkové spotřebě primární energie podílí asi jen jednou třetinou. Podstatně větší podíl připadá na získávání tepelné energie pro vytápění bytů, průmyslových a komerčních objektů, pro technologické účely, vytápění skleníků apod. A i zde může jaderná energie přispět a částečně již přispívá pro tyto účely. Největší přínosy lze však očekávat až v budoucnosti při získávání vodíku, při odsolování mořské vody pro zásobování měst a zemědělství, při výrobě chemikálií a metalurgických produktů, při zplyňování a zkapalňování hnědého a černého uhlí apod.

5.1 Výroba elektřiny a tepla

5.1.1 Jaderné energetické reaktory

V současné době je jaderná energie štěpení k výrobě elektřiny, případně tepelné energie, založena na využívání energetických reaktorů. Jsou to zařízení, kde vzniká a udržuje se řízená jaderná řetězová reakce. Část reaktoru, v níž tato reakce probíhá, se nazývá aktivní zónou. V ní se uvolňuje velké množství energie, které se chladivem přenáší do parních generátorů, kde slouží k výrobě páry. Tepelná energie páry se v parních turbínách přeměňuje v energii mechanickou, která se v turboalternátoru mění v energii elektrickou. K odvodu vyprodukovaného tepla se používají různá chladiva, jako je obyčejná lehká voda, těžká voda, oxid uhličitý, hélium, tekutý sodík, tekuté olovo, směs olovo-vizmut, anorganické soli.

Způsob výroby elektřiny v jaderné elektrárně a v elektrárně spalující uhlí je v podstatě shodný, až na to, že kotel klasické elektrárny je nahrazen jaderným reaktorem, jak je patrné z obrázku 5.1 a 5.2. Jaderný reaktor je ale ve srovnání s elektrárenským kotlem nesrovnatelně složitější zařízení, což souvisí s tím, že při štěpných reakcích vzniká nebezpečné radioaktivní záření a produkty štěpení a že je nutno zabránit jejich úniku z reaktoru a ohrožení zdraví obsluhujícího personálu a široké veřejnosti. Existuje celá řada bariér, které brání tomu, aby se radioaktivní látky dostaly mimo reaktor.



Obr. 5.1 Schéma uhelné elektrárny.

Obr. 5.2 Schéma jaderné elektrárny

Podle toho, jaké druhy neutronů se zúčastňují štěpné reakce, dělíme energetické reaktory do dvou základních skupin:
1/ na reaktory s pomalými (tepelnými) neutrony označované jako „tepelné“ reaktory a
2/ na reaktory s rychlými neutrony označované jako „rychlé“ reaktory.

Důležitým charakteristickým rysem rychlých reaktorů je to, že při svém provozu vyprodukují více jaderného paliva než kolik ho samy spotřebují, a to přeměnou neštěpitelného uranu-238 na štěpitelné plutonium-239. Odtud též pochází označení „rychlé množivé“ reaktory (RMR), anglicky Fast Breeder Reactors (FBR). Díky této schopnosti mohou RMR využít energii přírodního uranu až šedesátinásobně ve srovnání s tepelnými reaktory, které mohou energii uranu využít jen z necelého jednoho procenta.

Ze zkoumaných několika desítek tepelných reaktorů se dostalo do fáze komerčního využití jen několik hlavních typů, které ukazuje tabulka 5.1.

Tab. 5.1: Základní typy tepelných reaktorů

Typ reaktoru	**Chladivo**	**Označení podle MAAE**
Lehkovodní reaktor	obyčejná voda	Light Water Reactor (LWR)
Tlakovodní reaktor	obyčejná voda	Pressurized Water Reactor (PWR)
Varný reaktor	obyčejná voda	Boiling Water Reactor (BWR)
Plynem chlazený reaktor (GCR)	oxid uhličitý	Gas Cooled Reactor
Zdokonalený plynem chlazený		Advanced Gas Cooled Reactor (AGR)
Vysokoteplotní plynem chlazený	hélium	High Temperature Gas Cooled Reactor (HTGR)
Grafitový s tlakovými kanály RBMK)	obyčejná voda	Light Water Gas Cooled Reactor (LWGR,
Těžkovodní reaktor chlazený a moderovaný těžkou vodou	těžká voda	Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR)

Na celém světě jsou dnes nejrozšířenější lehkovodní reaktory (LWR), které se dělí na tlakovodní (PWR) a varné (BWR). Grafitové reaktory GCR a AGR jsou dnes v provozu jen ve Spojeném království. Grafitové reaktory s tlakovými kanály (LWGR) s ruským označením RBMK (Reaktor bolšoj moščnosti kanal´nyj) jsou v provozu v Rusku. (V tomto typu reaktoru bez ochranné obálky

(kontejnmentu) došlo koncem dubna 1986 k havárii v Černobylské jaderné elektrárně.) Těžkovodní reaktory (PHWR) jsou v provozu v Kanadě, Jižní Koreji, Indii, Pákistánu, Rumunsku, Číně a v Argentině. Vysokoteplotní plynem chlazené reaktory (HTGR) dosud nedosáhly komerční etapy vývoje a v provozu byly jen prototypové a demonstrační reaktory v Německu, USA a Rusku, ale byly již vyřazeny z provozu. Po několika desetiletích stagnace se dnes vysokoteplotní reaktory stávají opět předmětem zájmu v USA, Jihoafrické republice, Číně, Rusku a v Japonsku, a to především v souvislosti s perspektivní výrobou vodíku. Do komerční fáze využití se zatím nedostaly ani rychlé množivé reaktory. Jejich prototypové a demonstrační jednotky byly v provozu v USA, Německu, Spojeném království, ve Francii a v Kazachstánu. Dnes jsou rychlé množivé reaktory v provozu pouze ve Francii, Rusku a v Indii.

Různé možnosti uplatnění jednotlivých typů reaktorů závisí zejména na teplotě chladiva na výstupu z aktivní zóny. Rozsah teplot uvádí tabulka 5.2 a v tabulce 5.3 jsou pro porovnání uvedeny teploty potřebné pro různé výrobní technologie.

Tab. 5.2: Teplota a tlak chladiva u tepelných a rychlých reaktorů

Typ reaktoru	Teplota (°C).	Tlak (MPa)
Tlakovodní reaktor PWR	255 - 300	5 - 7,3
Varný reaktor BWR	280	6,8
Těžkovodní reaktor PHWR	250	4,0
Vysokoteplotní reaktor HTGR s parním cyklem	530	17 - 18
Vysokoteplotní reaktor s uzavřeným cyklem plynové turbíny	750 - 1000	4 - 4,9
Rychlý množivý reaktor chlazený tekutým sodíkem	485 - 513	10 - 18

Tab. 5.3: Rozsah teplot pro některé výrobní postupy

Výrobní postup	Rozsah teplot (°C)
Dálkové vytápění	90 - 160
Odsolování mořské vody	80 - 200
Zpracování ropy	300 - 530
Výroba aromatických sloučenin	400 - 650
Výroba etylénu	830 - 900
Pražení pyritu	820 - 980
Výroba vodíku štěpením vody	800 - 1000
Redukce železné rudy	700 - 1100
Zplyňování lignitu	850 - 1200
Zplyňování černého uhlí	1000 - 1200

Elektrický výkon současných typů reaktorů se pohybuje v rozmezí od asi 400 MWe do 1600 MWe. Jsou ale vyvíjeny i reaktory malých výkonů od několika desítek do 200 MWe. Vývoj počtu zemí provozujících jaderné reaktory, vývoj počtu reaktorů a jejich průměrných výkonů ukazuje tabulka 5.4.

Tab. 5.4: Vývoj počtu zemí, reaktorů a jejich průměrných výkonů od roku 1954.

Rok	Počet zemí	Počet reaktorů	Čistý výkon MWe	Průměrný výkon MWe
1954	1	1	5	-
1955	1	1	5	-
1956	2	2	55	-
1957	2	3	105	-
1958	2	10	755	75,5
1959	3	15	993	66,2
1960	4	18	1 281	71,2

1965	9	45	4 887	108,6
1970	14	81	16 290	171,9
1975	19	174	69 070	396,9
2004	31	441	367 496	833,0

Po nehodě v americké jaderné elektrárně Three Mile Island 2 (březen 1979) a zejména po černobylské havárii (duben 1986) se další výzkum a vývoj reaktorů zaměřil na zvýšení bezpečnosti současných reaktorů, na jejich modernizaci a později na vývoj zdokonalených reaktorů 3.a 4. generace.

5.1.2 Výroba elektřiny

Ke konci roku 2004 bylo ve světě v 31 zemích v provozu 441 energetických reaktorů o čistém elektrickém výkonu 367 496 MWe. Ve výstavbě bylo v devíti zemích 26 reaktorů o čistém výkonu 20 826 MWe a pevně naplánováno bylo 38 reaktorů o výkonu 35 352 MWe. Ve stejném roce vyrobily jaderné elektrárny ve světě 2 619 TWh elektřiny, což představovalo podíl 16 % z celkové výroby elektřiny. Bylo to takové množství elektřiny, které vyrobily všechny elektrárny na světě začátkem 60. let 20.století. Ke konci roku 2004 bylo z provozu vyřazeno celkem 107 reaktorů o výkonu 34 000 MWe. Kromě energetických reaktorů bylo ve světě v provozu na 300 různých výzkumných reaktorů / 1,2/.

Ke konci roku 2007 bylo v 31 zemích v provozu 439 reaktorů o hrubém výkonu 392 000 MWe a čistém výkonu 373 000 MWe. Ve výstavbě bylo 32 reaktorů o hrubém výkonu 27 96O MWe a čistém výkonu 26 400 MWe. / Atomwirtschaft, 2008, č. 1, s. 46/ Podle Agentury pro energii při OECD a podle MAAE se má výkon jaderných elektráren ve světě zvýšit na 509 000 až 663 000 MWe. /Nuclear News, 2008, č. 8, s. 64/. Největší programy rozvoje jaderné energie má Čína, která má mít v roce 2020 výkon 40 000 MWe, Indie plánuje 25 000 MWe v roce 2022 a Pákistán 8 600 MWe v roce 2030. Přehled o počtu reaktorů, jejich výkonu a výrobě elektřiny od roku 1970 ukazuje tabulka 5.5.

Tab. 5.5: Vývoj počtu reaktorů, čistého výkonu a výroby elektřiny od roku 1970 do roku 2004 /3/

Rok	Počet reaktorů	Čistý výkon MWe	Výroba elektřiny TWh	Podíl na výrobě el. %
1970	81	16 290	75,4	1,5
1975	167	72 863	351,0	5,4
1980	243	136 978	692,1	6,4
1985	365	254 255	1 402,0	14,3
1990	419	327 577	1 913,0	16,2
1995	435	346 743	2 130,0 *	17,0
2004	441	367 496	2 619,0	16,0

** 1994*

Z tabulky je patrné, že trvalo přibližně 20 let, než jaderné elektrárny dosáhly podílu kolem pěti procent na celosvětové výrobě elektřiny. Tabulka 5.6 ukazuje, jak se na celkovém výkonu jaderných elektráren podílely jednotlivé typy reaktorů.

Tab. 5.6: Podíl typů reaktorů na výkonu elektráren ve světě v roce 2004 /3/

Typ reaktoru	**Počet zemí**	**Počet reaktorů**	**Čistý výkon MWe**
Tlakovodní - PWR	17	214	204 745
Tlakovodní - VVER	8	53	35 890
Tlakovodní celkem	25	267	240 635
Varný - BWR	10	90	78 609
Zdokonalený varný - ABWR *	1	3	3 955
Grafitový plynem chlazený GCR**	2	8	2 284
Zdokonalený plynem chlazený - AGR **	1	14	8 380
Grafitový s tlakovými kanály - RBMK ***	2	16	11 404
Těžkovodní - PHWR	7	39	19 987
Rychlý reaktor - FBR ****	3	3	1 039

Celkem	**31**	**440**	**366 293**

* Japonsko, ** Spojené království a Japonsko, *** Rusko a Litva, **** Francie, Rusko, Indie

Z tabulky je zřejmé, že téměř dvě třetiny celkového výkonu tvoří tlakovodní reaktory. (VVER je ruské označení tlakovodního reaktoru - vodovoďannyj energetičeskij reaktor)

Tabulka 5.7 sleduje vývoj podílu jednotlivých elektráren na výrobě elektřiny ve světě od roku 1950 až do roku 2004.

Tab. 5.7: Podíl elektráren na celkové výrobě elektřiny ve světě / % / /1,4/

Rok	Klasické tepelné elektrárny	Vodní elektrárny	Jaderné elektrárny	Geotermální a větrné el.	Celkem
1950	64.3	35,6	-	0,1	100
1960	70,2	29,6	0,1	0,1	100
1970	74,8	23,5	1,6	0,1	100
1980	70,3	21,3	8,3	0,1	100
1990	65,3	18,7	15,7	0,3	100
1993	64,9	17,9	16,8	0,4	100
1998	64,5	19,2	16,3	0,4	100
2004	66,2	17,0	16,0	0,8	100

Z této tabulky vyplývá, že se klasické tepelné elektrárny spalující fosilní paliva stále ještě dvěma třetinami podílejí na světové výrobě elektřiny a že podíl vodních a jaderných elektráren spíše klesá a podíl geotermálních a větrných elektráren neustále roste.

5.1.3 Kombinovaná výroba elektřiny a tepla

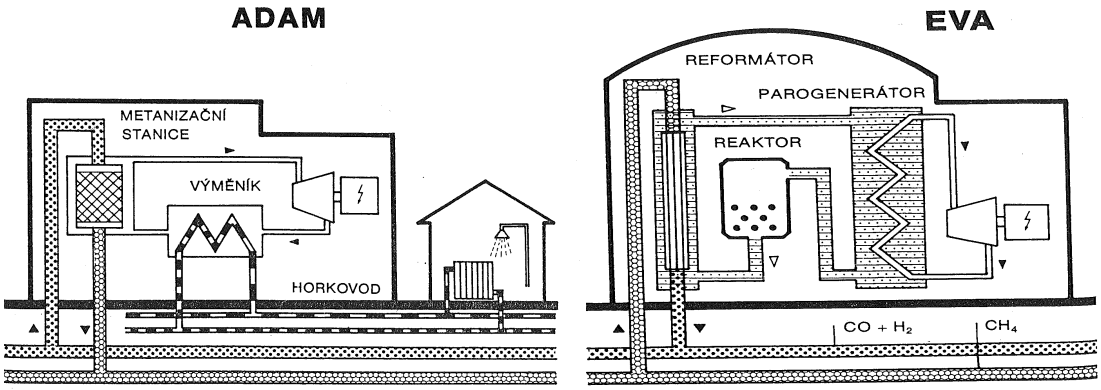
Současné jaderné elektrárny mohou dodávat nejen elektřinu, ale i tepelnou energii pro vytápění bytů, průmyslových objektů, administrativních budov, skleníků ap. Jaderné kogenerační elektrárny jsou provozovány v Bulharsku, Maďarsku, Rusku, Slovensku, Švýcarsku. Například bulharská JE Kozloduj dodává teplo pro město Kozloduj, maďarská JE Pakš vytápí město Pakš, slovenská JE Bohunice zásobuje teplem Trnavu a Piešťany. Nejrozvinutější systém jaderného dálkového vytápění mají v Rusku, kde Bělojarská, Balakovská, Kalininská, Kolská, Kurská a Petrohradská jaderná elektrárna dodává teplo do soustav dálkového vytápění měst s počtem obyvatel kolem 50 000, vzdálených 3 až 15 km od jaderné elektrárny. Tepelný výkon kolísá od 50 do 230 MWt. Kanadská JE Bruce dodává páru pro závod na výrobu těžké vody a do okolní průmyslové zóny a německá JE Stade zásobovala párou závod na rafinaci soli. Švýcarská JE Gosgen zásobuje párou závod na výrobu lepenky.

Je možno uvést i další příklady:

Švýcarský systém dálkového vytápění Refuna je napojen na JE Beznau a dodává teplo 11 obcím a asi 20 000 spotřebitelům.Voda se ohřívá na 120 stupňů Celsia a do sítě přichází o tlaku 13 bar. V roce 2004 byla délka místních sítí 130 km a roční dodávka tepla 133, 4 GW /5/. Bělojarská JE dodává teplo pro sídliště s 10 000 obyvateli, pro vlastní budovy, nemocniční pavilony a pro vyhřívání skleníků. Ruská kogenerační jaderná elektrárna Bilibino (4 x 12 MWe) na poloostrově Čukotka zásobuje elektřinou a teplem byty, průmyslové objekty a skleníky, v nichž se po celou zimu pěstuje zelenina a květiny. Výrobní náklady jsou zde o 30 až 80 % nižší než při použití fosilních paliv. Dobré zkušenosti s touto centrálou vedly úřady k tomu, že požadují vybudování dalších větších reaktorů, které by nahradily reaktory dosluhující. Od roku 1973 do roku 1998 byl na pobřeží Kaspického moře v provozu rychlý reaktor BN-350, který kromě elektřiny poskytoval i tepelnou energii pro odsolovací závod o denní kapacitě 150 000 t odsolené vody. Ve Švédsku byla v období 1964 až 1974 v provozu jaderná teplárna Agesta o tepelném výkonu 80 MW, která produkovala teplo pro předměstí Stockohlmu.V bývalém Sovětském svazu byla v letech 1983 a 1985 zahájena výstavba dvou jaderných výtopen s reaktory ATR-500, ale po černobylské havárii byly práce přerušeny. Po roce 1997 se pro oživení projektu vyslovily jak městské, tak regionální orgány /6/. Rychlý reaktor BOR-60 slouží jako zdroj tepla pro výzkumné středisko jaderných reaktorů (RIAR) v Dimitrovgradu /7/. Rovněž Ukrajina plánuje využívat teplo z jaderných elektráren k zásobování deseti velkých měst ze Záporožské, Chmelnické, Rovenské a Jihoukrajinské jaderné elektrárny.

Německý systém dálkového přenosu tepla EVA/ADAM /8/

V Německu byl po řadu let v provozu zkušební vysokoteplotní reaktor AVR-15, v němž byly dosahovány teploty na výstupu z aktivní zóny až 950 st.Celsia. Reaktor měl být použit i v rámci speciálního systému EVA/ADAM pro dálkový přenos tepla z jaderného reaktoru, který byl vyvíjen ve výzkumném jaderném středisku v Juelichu. Nejprve zde bylo vyvinuto poloprovozní zařízení EVA k ověření principu štěpení metanu vodní parou za vysoké teploty. Při reakci páry s metanem vzniká vodík a oxid uhelnatý - CO. V tomto směru je chemická reakce endotermická, v opačném případě, od vodíku k metanu je reakce exotermická. Hlavní surovinou je voda a zemní plyn, katalyzátorem je nikl. Zařízení EVA bylo spuštěno v roce 1972 a zdrojem potřebné vysoké teploty byla elektřina. Zařízení ADAM pro rekombinaci metanu na vodík bylo připojeno v roce 1979 za účelem dálkového přenosu energie. V budoucnu měl být zdrojem tepla vysokoteplotní reaktor. Tepelná energie z HTGR se měla přeměnit na energii chemicky vázanou ve formě vodíku a CO. Tato plynová směs by byla dopravována buď stávajícími plynovody na velké vzdálenosti nebo by byla přeměněna na hydridy kovů. V místech spotřeby se v energetických centrálách chemicky vázaná energie měla přeměnit na tepelnou energii, a to díky zpětné přeměny plynové směsi na výchozí metan. Uvolněné teplo lze využít k vytápění, k výrobě technologické páry nebo k výrobě elektřiny. Znovu vytvořený metan proudí zpět paralelním potrubím do reaktoru. Vyprodukovaný plyn může sloužit i jako syntézní plyn pro chemické procesy (například k výrobě metanolu) nebo jako redukční činidlo v železářském a ocelářském průmyslu.
Uvedená koncepce se ověřovala na zařízení EVA1/ADAM1. S pomocí elektricky ohřívaného hélia vzniká v zařízení EVA vodík a CO, které proudí potrubím do zařízení ADAM vzdáleného 20 m. Zde se za teploty 600 st. C vázané teplo opět uvolňuje za vzniku metanu. Konečným produktem zařízení ADAM je metan, který je veden zpět do zařízení EVA, kde slouží jako vstupní surovina a cyklus se uzavírá. Další vývoj systému EVA/ADAM byl přerušen, když bylo rozhodnuto zastavit provoz reaktoru AVR-15 a demonstračního vysokoteplotního reaktoru THTR-300 ve Schmehausenu.



Obr. 5.3: Přenos tepla „za studena“ z reformingové stanice EVA do metalizační stanice ADAM, která zásobuje město a průmysl čistým teplem a elektřinou.

5.1.4 Zkušenosti z provozu jaderných elektráren

Jaderné elektrárny jsou v mezinárodním měřítku vzájemně porovnávány s pomocí řady ukazatelů, které vypracovalo mezinárodní sdružení provozovatelů jaderných elektráren WANO (World Asssociation of Nuclear Operators). Toto sdružení bylo založeno v roce 1989 jako odezva mimo jiné i na černobylskou havárii. Jeho členem je každá organizace ve světě provozující jaderné elektrárny a hlavním jejím cílem je orientace na bezpečný provoz jaderných elektráren a na mezinárodní výměnu zkušeností. Od roku 1992 jsou prováděny prověrky jaderných elektráren na celém světě - do roku 2002 jich bylo uskutečněno na 200. Své pobočky má WANO v USA a v Rusku. WANO si dalo za cíl prověřit do roku 2005 všechny jaderné elektrárny ve světě.Typická prověrka zahrnuje oblasti organizace práce, provozu, údržby, radiologické ochrany, bezpečnosti, výcviku personálu, havarijního plánování atd. /9/

Předmětem porovnávání jsou zejména tyto ukazatele /10/:

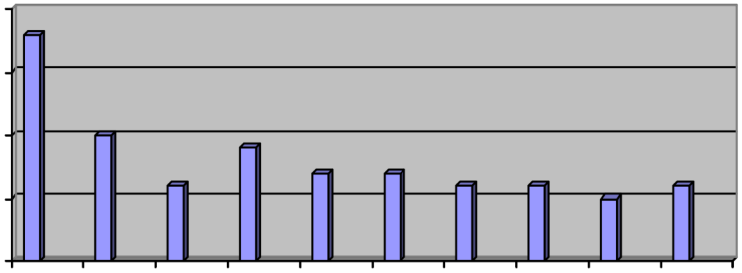
- Koeficient provozuschopnosti. Udává, kolik procent času elektrárna vyráběla elektřinu na plném

výkonu. Čím vyšší je hodnota, tím kvalitnější je organizace práce a spolehlivost zařízení.

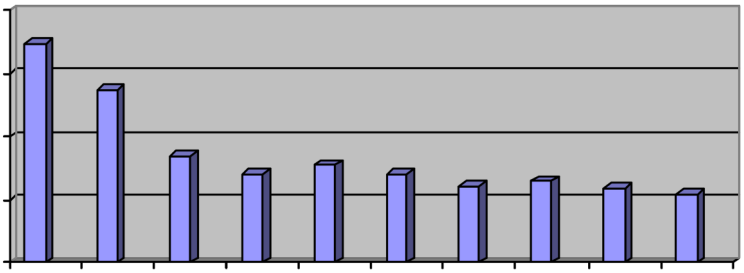
- Neplánovaná ztráta provozuschopnosti. Uvádí, kolik procent času elektrárna nevyráběla z důvodu technických závad.
- Četnost rychlých automatických odstavení reaktoru. Menší počet svědčí o vyšší úrovni bezpečnosti a o vyšší spolehlivosti zařízení.
- Pracovní úrazovost na 200 000 pracovních hodin.
- Kolektivní ozáření personálu za rok připadající na jeden blok.
- Provoz bezpečnostních systémů. Ukazatel sleduje disponibilitu 3 záložních bezpečnostních systémů.
- Chování paliva. Ukazuje procento bloků bez poruchy paliva. Cílem je dosáhnout provozu bez poruchy paliva.

Po havárii TMI-2 v březnu 1979 a po černobylské havárii v dubnu 1986 se velké úsilí vynaložilo a stále ještě vynakládá na zvyšování bezpečnosti a zlepšování provozních výsledků jaderných elektráren. Již během několika let se díky tomuto úsilí projevily kladné výsledky, jak to lze dokumentovat na příkladu údajů WANO sledovaných až u 420 reaktorů ve světě.

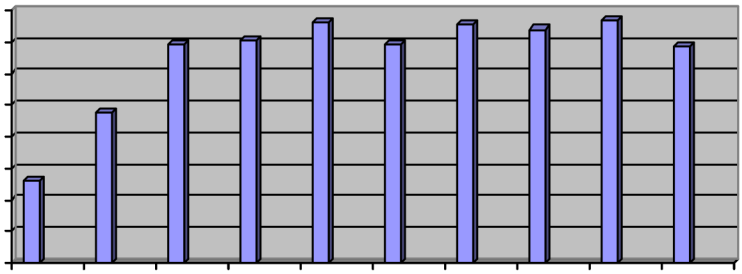
Neplánovaná automatická odstavení reaktoru na 7000 hodin provozu



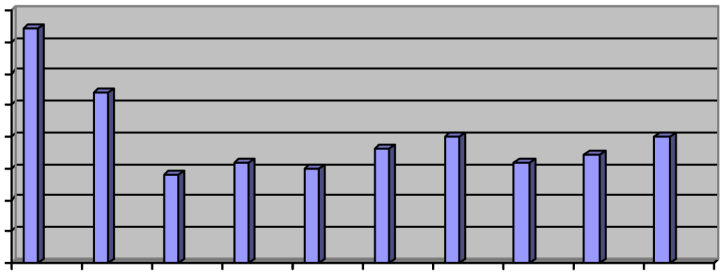
Kolektivní radiační dávka pro tlakovodní reaktory (Man – Sievert/reaktor)



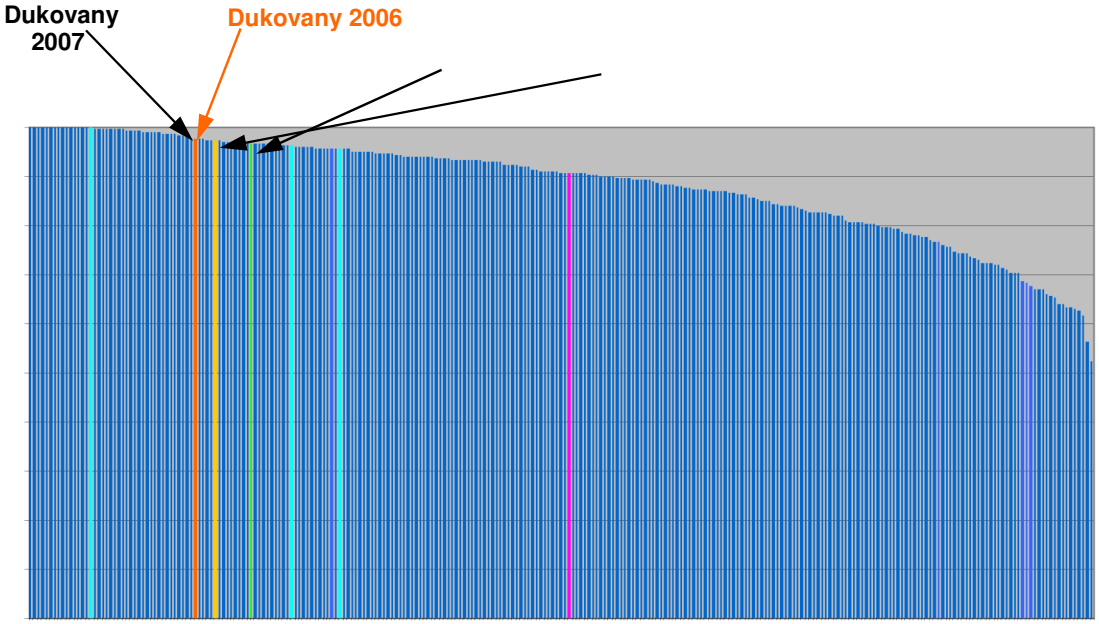
Faktor provozuschopnosti bloku (%)



Neplánovaná ztráta provozuschopnosti (%)



Ze zlepšujících se provozních výsledků lze konstatovat, že jaderné elektrárny dodávají více elektřiny s větší spolehlivostí a bezpečností, což jim umožňuje udržovat si konkurenční postavení na trhu elektřiny. Přitom je důležité poznamenat, že zlepšování provozních ukazatelů se neděje na úkor bezpečnosti provozu, ale jde ruku v ruce s jejím zvyšováním. Příznivé výsledky provozu jaderných elektráren nebyly sice publikovány v hromadných sdělovacích prostředcích, ale neunikly pozornosti investorů, kteří mají například velký zájem o prodlužování životnosti stávajících jaderných elektráren o dalších 20 let.



Obr. 5.4: Jaderná elektrárna Dukovany patří stabilně mezi nejlepší na světě. Sloupečky znázorňují kvalitu provozu jednotlivých jaderných bloků na světě, dukovanské bloky se drží mezi 20 % nejlépe provozovaných jaderných reaktorů.

Mezi opatření, která přispívají ke zvyšování efektivnosti jaderných elektráren patří zejména:

- Růst koeficientu provozuschopnosti.
  V USA se například od roku 1997 do roku 2002 podařilo tímto způsobem zvýšit výrobu elektřiny bez výstavby nových jaderných elektráren takovým způsobem, že se rovná uvedení do provozu 13 jaderných elektráren o výkonu po1000 MWe.Ve srovnání s rokem1990 se jedná dokonce o ekvivalent 20 velkých jaderných elektráren /13/. O významu zvyšování koeficientu provozuschopnosti svědčí i to, že jeho zlepšení o 1 % se v USA rovnalo uvedení do provozu JE o výkonu 1000 MWe /14/.
- Dodatečné zvyšování výkonu stávajících JE v rámci úprav a modernizace.
  Je to způsob, jakým lze při minimálních měrných investičních nákladech zvýšit výkon, a proto se realizuje ve velké míře všude ve světě. Americká společnost Entergy vynaložila 300 millionů USD k získání dodatečného výkonu 460 MWe, takže měrné investiční náklady byly pouze 650 USD/kWe a byly srovnatelné s výstavbou plynové elektrárny. V Německu se tímto způsobem podařilo zajistit konkurenční schopnost JE po zavedení deregulace energetiky /15/.
- Zkracování doby odstávky jaderné elektrárny pro výměnu paliva a údržbu. Zatímco v roce 1989 byla průměrná doba odstávky v USA 83 dní, do roku 1995 klesla na 52 dní, v posledních letech se ji podařilo zkrátit až na 40 a později na 26 dní, přičemž rekordní odstávky trvají jen 16 až 18 dní /16/.
- Prodlužování délky palivové kampaně.
  Z původních převážně 12 měsíců se palivová kampaň prodlužuje na 18 měsíců až 24 měsíců.
- Koncentrace jaderných elektráren do menšího počtu společností a zlepšená organizace práce a řízení. Tento efekt se projevil zejména v USA v souvislosti s deregulací energetiky. Deregulace zde představovala katalyzátor, který oživil jadernou energetiku. Došlo k výraznému snížení počtu společností provozujících jaderné elektrárny a vzrostl počet JE v rámci jedné organizace. To umožnilo zefektivnit řízení, sdílet nejlepší zkušenosti a využívat ekonomické výhody. Příkladem jsou společnosti Entergy a Amer Gen, které provozují celou řadu JE, které buď koupily nebo se dohodly s jinými vlastníky na provozování jejich elektráren /18/.

Obr.5.5: Kolektivní efektivní dávka – porovnání JE Dukovany se světem

Obr.5.6: Pracovní úrazovost na 200 000 hodin provozu - porovnání JE Dukovany se světem

Tabulka 5.8 ukazuje, že tlakovodní reaktory dodané společností Škoda nikterak nezaostávaly za předními dodavateli reaktorů ve světě pokud jde o kumulované využití koeficientu provozuschopnosti.

Tab. 5.8: Kumulované využití koeficientu provozuschopnosti tlakovodních reaktorů o výkonu do 600 MWe podle hlavních dodavatelů reaktorů.

Dodavatel	Počet reaktorů	Výkon (MWe)	Kumulovaný koeficient provozuschopnosti, %		
			Maximální	Průměrný	Minimální
Atomenergoexport	10	4 636	87,4	76,4	58,1
Combustion Engineering	1	514	69,6	69,6	69,6
KWU	2	838	79,8	78,8	77,9
Mitsubishi	7	3 908	82,4	75,8	56,9
Škoda	8	3 564	80,1	76,7	70,3
Westinghouse	13	5 914	86,0	74,6	46,0

Tabulka 5.9 uvádí jako zajímavost světové rekordy v délce nepřetržitého provozu jaderných reaktorů. Reaktory jsou zde členěny na ty, u nichž se výměna paliva uskutečňuje za provozu (tj. PHWR, GCR a AGR) a na reaktory, kde se výměna uskutečňuje při odstaveném reaktoru (tj. PWR a BWR).

Tab. 5.9: Světové rekordy v délce nepřetržitého provozu energetických reaktorů.

Jaderná elektrárna	Země	Typ reaktoru	Výkon, MWe	Délka provozu (dny)
Pickering-7	Kanada	PHWR	540	894
Oldbury-1	SK	GCR	230	714
Sizewell-A	SK	GCR	2x325	653
Bruce	Kanada	PHWR	904	475
Brunswick	USA	BWR	1 007	707
TMI-1	USA	PWR	890	668
Indian Point-2	USA	PWR	1 007	616
San Onofre	USA	PWR	1 127	552
Limerick-2	USA	PWR	1 192	533
Byron-1	USA	PWR	1 175	508

Celkový přehled o provozovaných jaderných elektrárnách v jednotlivých zemích v polovině roku 2008 udává tabulka 5.10.

Prameny:

/1/ Reference Data Series No 1, July 2005 Edition. IAEA Vienna
/2/ Nuclear Engineering Int., Ročenka 2005
/3/ Reference Data Series No 2, April 2005 Edition, IAEA Vienna
/4/ Reference Data Series No 1, 1994 Ed., 1998 Ed.,1999 Ed., IAEA Vienna
/5/ Euroheat and Power, 2004, č. 2, s. 12
/6/ Nuclear News 1998, č. 6, s. 49
/7/ Nuclear Engineering Int., 1995, č. 486, s. 14-15
/8/ Energie, 1979, č. 6, s.178 - 179
/9/ Nuclear News, 2003, č. 9, s. 136
/10/ Magazín Energie, 2000, č. 4, s. 30 - 31
/11/ Nuclear News, 2004, č. 9, s. 21 - 22
/12/ Nuclear News, 1999, č. 9, s. 98 - 99
/13/ Nuclear News, 2003, č. 3, s 24
/14/ Power Engineering, 2000, č. 10, s. 54
/15/ Nuclear Engineering Int. 2003, č. 592, s. 33
/16/ Nuclear Engineering Int. 2003, č. 583, s. 9
/17/ Nuclear Engineering Int. 2002, č. 573, s.29
/18/ Nuclear News 1999, č. 9, s. 28 - 29
/19/ Nuclear Engineeering Int., 2005, č. 613, s. 36

Tab. 5.10: Jaderné reaktory ve světě v srpnu 2008 (Zdroj: WNA, IAEA)

	Výroba elektřiny v JE v roce 2007		Reaktory v provozu Červenec 2008		Reaktory ve výstavbě Červenec 2008		Reaktory plánované Červenec 2008		Reaktory uvažované Červenec 2 008		Potřeba uranu 2008
	TWh	% e	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	tuny U
Argentina	6.7	6.2	2	935	1	692	1	740	1	740	123
Arménie	2.35	43.5	1	376	0	0	0	0	1	1000	51
Bangladéš	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2000	0
Bělorusko	0	0	0	0	0	0	2	2000	0	0	0
Belgie	46	54	7	5728	0	0	0	0	0	0	1011
Brazílie	11.7	2.8	2	1901	0	0	1	1245	4	4000	303
Bulharsko	13.7	32	2	1906	0	0	2	1900	0	0	261
Kanada*	88.2	14.7	18	12652	2	1500	3	3300	4	4400	1665
Čína	59.3	1.9	11	8587	7	6700	24	26320	76	62600	1396
ČR	24.6	30.3	6	3472	0	0	0	0	2	3400	619
Egypt	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1000	0
Finsko	22.5	29	4	2696	1	1600	0	0	1	1000	1051
Francie	420.1	77	59	63473	1	1630	0	0	1	1600	10527
Německo	133.2	26	17	20339	0	0	0	0	0	0	3332
Maďarsko	13.9	37	4	1826	0	0	0	0	2	2000	271
Indie	15.8	2.5	17	3779	6	2976	10	8560	9	4800	978
Indonesie	0	0	0	0	0	0	2	2000	2	2000	0
Írán	0	0	0	0	1	915	2	1900	1	300	143
Izrael	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1200	0
Japonsko	267	27.5	55	47577	2	2285	11	14945	1	1100	7569
Kazachstán	0	0	0	0	0	0	0	0	1	300	0
Korejská LDR	0	0	0	0	0	0	1	950	0	0	0
Jižní Korea	136.6	35.3	20	17533	3	3000	5	6600	0	0	3109
Litva	9.1	64.4	1	1185	0	0	0	0	2	3400	225
Mexiko	9.95	4.6	2	1310	0	0	0	0	2	2000	246
Nizozemí	4.0	4.1	1	485	0	0	0	0	0	0	98
Pákistán	2.3	2.34	2	400	1	300	2	600	2	2000	65
Rumunsko	7.1	13	2	1310	0	0	2	1310	1	655	174

	Výroba elektřiny v JE v roce 2007		Reaktory v provozu Červenec 2008		Reaktory ve výstavbě Červenec 2008		Reaktory plánované Červenec 2008		Reaktory uvažované Červenec 2 008		Potřeba uranu 2008
	TWh	% e	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	tuny U
Rusko	148	16	31	21743	7	4920	10	11960	25	22280	3365
Slovensko	14.2	54	5	2064	2	840	0	0	1	1200	313
Slovinsko	5.4	42	1	696	0	0	0	0	1	1000	141
Jižní Afrika	12.6	5.5	2	1842	0	0	1	165	24	4000	303
Španělsko	52.7	17.4	8	7442	0	0	0	0	0	0	1398
Švédsko	64.3	46	10	9016	0	0	0	0	0	0	1418
Švýcarsko	26.5	43	5	3220	0	0	0	0	3	4000	537
Thajsko	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4000	0
Turecko	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4500	0
Ukrajina	87.2	48	15	13168	0	0	2	1900	20	27000	1974
Spojené království	57.5	15	19	11035	0	0	0	0	0	0	2199
USA	806.6	19.4	104	99049	0	0	12	15000	20	26000	18918
Vietnam	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2000	0
Svět	**2608**	**16**	**439**	**371,989**	**36**	**29,958**	**93**	**101,395**	**219**	**195,875**	**64,615**
	TWh	**% e**	**No.**	**MWe**	**No.**	**MWe**	**No.**	**MWe**	**No.**	**MWe**	**tuny U**

5.2 Výroba vodíku

Vodík poskytuje lidstvu energii od objevení ohně, převážně ve spojení s uhlíkem ve formě uhlovodíků, jako je dřevo, uhlí, ropa nebo zemní plyn. I když vodík tvoří převážnou část hmoty vesmíru, zřídkakdy se objevuje v čisté formě. Protože je velmi reaktivní, rychle se slučuje s jinými atomy, zejména s uhlíkem a kyslíkem, proto se převážná část vodíku nalézá v uhlovodících a ve vodě. Protože vodík není primární palivo, nemůže být těžen nebo čerpán ze země jako uhlí nebo ropa, ale musí být z uhlovodíků nebo vody vyroben ve formě sekundárního paliva s pomocí technologií, které jsou energeticky velmi náročné.

Vodík je považován za ideální sekundární palivo budoucnosti:

- Z ekologického hlediska je čistým palivem, jehož odpadním produktem spalování je voda. Předpokladem ale je, aby byl vodík vyráběn s pomocí takových energetických zdrojů, které neznečišťují životní prostředí emisemi CO_2 a dalšími škodlivinami.
- Na rozdíl od elektřiny lze vodík skladovat v plynné a kapalné formě nebo ve formě kovových, organických nebo anorganických hydridů. Vodík je v plynném stavu do teploty 253 stupňů Celsia. Jeho zkapalnění je velmi energeticky náročné, neboť je k tomu zapotřebí asi 30 % energie v něm obsažené.
- Vodík má mnohostranné možnosti použití. Slouží jako základní surovina k výrobě celé řady produktů, jako jsou umělá hnojiva, palivo pro benzinové a naftové motory, palivo pro letadla, jako redukční činidlo v metalurgickém průmyslu, k rafinaci surové ropy, k získávání lehkých olejů a čistějších paliv odstraňováním síry a jiných nečistot. V menší míře se používá v palivových článcích k pohonu automobilů. Jeho budoucí uplatnění bude spočívat hlavně v náhradě benzínu a nafty v dopravních prostředcích, které se dnes výrazně podílejí na znečišťování atmosféry /1/.

Ve světě se dnes vyrobí asi 50 milionů tun vodíku. Kdyby se toto množství spálilo, rovnalo by se ekvivalentu elektráren o výkonu 200 000 MW_e. Převážná část (asi 50 %) se ho používá k výrobě umělých hnojiv a zbývající množství v ropných rafinériích. Jen asi 1 % slouží jako palivo pro kosmické lety /2/.

Vodík je možno získávat ze dvou hlavních surovin, a to z fosilních paliv nebo z vody. Jako zdroj energie lze použít fosilní paliva, obnovitelné zdroje energie nebo jadernou energii.

5.2.1 Výroba vodíku z fosilních paliv

Fosilní paliva obsahují různé podíly vodíku a přechod od používání dřeva k uhlí, ropě a zemnímu plynu byl způsoben i díky vyššímu obsahu vodíku. Dnes se vodík z fosilních paliv vyrábí hlavně parním reformingem metanu. Při tomto procesu reaguje zemní plyn s vodou za vysoké teploty a výsledným produktem je vodík a CO_2 /3/. Jestliže k výrobě vodíku z fosilních paliv použijeme jako zdroj energie opět fosilní paliva, povede to nevyhnutelně k emisím CO_2 a ostatních škodlivin. I když bude konečné užití vodíku čisté, jeho palivový cyklus povede ke znečišťování životního prostředí /1/. Jestliže se vodík bude vyrábět z fosilních paliv a k jeho získání použijeme opět fosilní paliva, pak bude spotřeba energie k jeho výrobě vyšší než energie, kterou získáme jeho spálením. Výroba vodíku z fosilních paliv při využití fosilních paliv vede tedy nejen ke znečišťování životního prostředí, ale také k vyčerpávání zásob uhlí, ropy a zemního plynu. Obdobná situace nastane, když budeme vyrábět čistá syntetická paliva zplyňováním nebo zkapalňováním uhlí a k tomu opět použijeme fosilní paliva jako zdroj energie. Při zkapalňování uhlí je třeba dodat 30 - 50 % dodatečné energie /4/.

Při výrobě vodíku za použití fosilních paliv se nesníží emise CO_2, ale jen se přesunou z jednoho místa (z automobilu) do výrobny vodíku. Proto se zkoumají možnosti vyrábět vodík nikoliv parním reformingem metanu, ale s pomocí obnovitelných zdrojů energie a jaderné energie. A zde je třeba odpovědět na dvě otázky:

1/ Existují dostatečné zdroje energie k tomu, aby bylo možno pokrýt poptávku po vodíku?
2/ Může úplný palivový cyklus výroby vodíku od využití energetických zdrojů až k výrobě vodíku, jeho distribuci a použití vyhovět standardům životního prostředí?

Pouze kladnými odpověďmi na tyto otázky vytvoříme efektivní strategii vodíku. K tomu využijeme příklad z USA. V roce 1997 zde dopravní prostředky ujely celkem 2600 miliard mil (jedna míle je 1609,3 m). Aby bylo možno zajistit dostatečné množství vodíkového paliva k náhradě benzínu a motorové nafty, bylo by zapotřebí 0,013 kg na jednu míli. Při výrobě vodíku elektrolýzou vody by bylo zapotřebí postavit elektrárny o celkovém výkonu 240 000 MW_e, což je téměř polovina elektrárenských kapacit v USA. Pokud požadujeme víc než pouze změnu místa vzniku emisí CO_2, je třeba hledat energetické zdroje, které neemitují CO_2. Mohou tento úkol splnit větrné a sluneční elektrárny a biomasa? Moderní větrná elektrárna o výkonu 1500 MW_e vyžaduje plochu 70 akrů (jeden akr se rovná 4 074 m^2). Na jednu čtvereční míli lze umístit 9 větrných elektráren, takže pro výkon 240 000 MW by bylo nutno postavit 640 000 větrných elektráren pracujících s časovým využitím 25 % a zajistit plochu 71 000 čtverečních mil. Je to téměř taková plocha, kterou zaujímají dohromady státy Indiana (35 000 čtverečních mil) a Ohio (40 000 čtverečních mil). Pokud jde o sluneční energii, jsou zapotřebí měrné investiční náklady ve výši 20 000 až 25 000 USD/kW_e, takže k vybudování potřebných elektráren by bylo nutno vynaložit 4,8 trilionu USD. Pokud jde o biomasu, museli by američtí farmáři vyprodukovat čtyřikrát více organické hmoty než dosud a přitom zajistit zásobování obyvatelstva potravinami.

Z uvedených údajů je patrné, že obnovitelné zdroje energie nebudou moci zajistit přechod od používání benzínu a nafty k vodíkovému hospodářství. Pro potřebu USA budou proto přicházet v úvahu jen uhlí a jaderná energie. Zásoby uhlí jsou sice dostatečně velké, aby mohly zásobovat vodíkové hospodářství po dobu několika století, problém je ale v emisích CO_2. Všechny dosud uvažované způsoby likvidace CO_2 jsou velmi nákladné a energeticky náročné. Jako logickou volbou proto zůstává jaderná energie. Je to bezpečný a spolehlivý domácí zdroj energie se zásobami na několik tisíc let. Není třeba se spoléhat na zahraniční dodavatele, kteří kontrolují zdroje ropy, nejsou zde emise skleníkových plynů nebo NO_x a je zde jen pomalý růst nákladů. Situace v USA je podobná jako v celé řadě jiných zemí OECD, kde je jaderná energie zavedeným průmyslovým odvětvím a důležitou součástí elektroenergetiky. Problém je v tom, že se veřejnost domnívá, že není vyřešena otázka jaderného odpadu. Ironií přitom je, že náklady na likvidaci tohoto odpadu jsou již dnes zahrnuty v ceně elektřiny z jaderných elektráren, zatímco u jiných elektráren tomu tak není. Má-li být ve světě dosaženo spolehlivého zásobování energií a ochrany životního prostředí, pak je jaderná energie nejlacinější a nejčistší variantou, která může uspokojit požadované aplikace / 3/.

5.2.2 Výroba vodíku z vody

Již v roce 1874 předpověděl Jules Verne ve své knize Tajuplný ostrov, že se voda bude jednou používat jako palivo, že se vodík a kyslík, který ji tvoří, budou využívat buď samostatně nebo společně a že voda bude představovat nevyčerpatelný zdroj tepla a světla /3/.

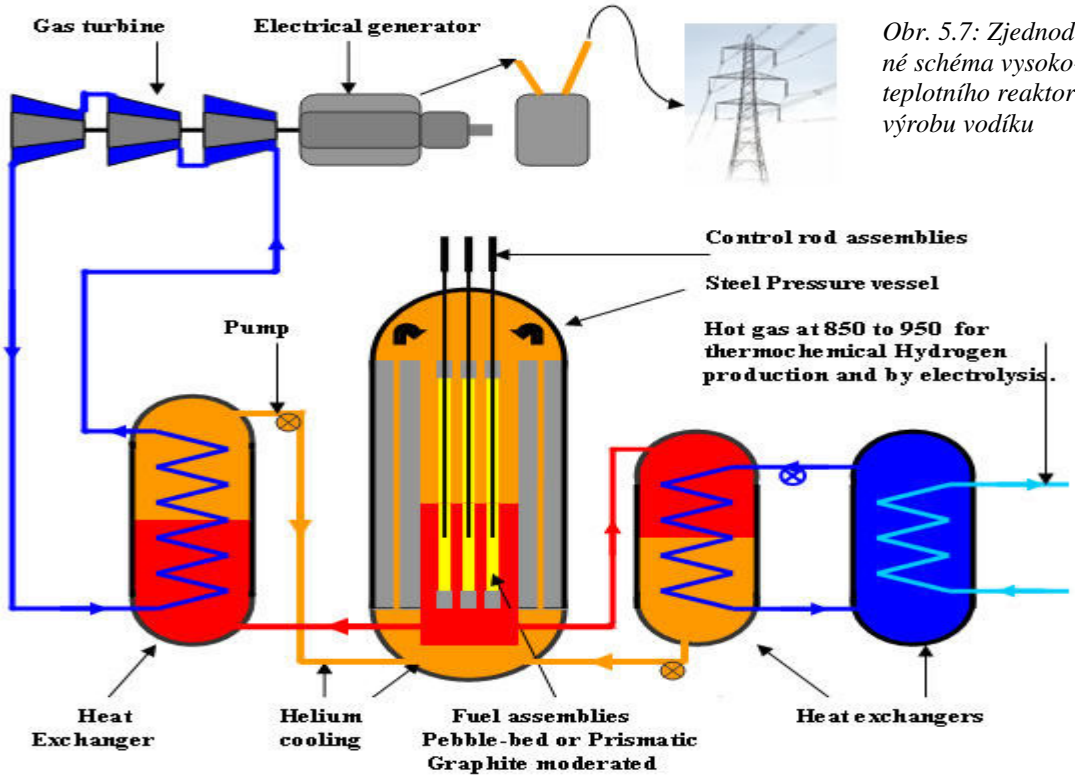
Existují dva hlavní způsoby získávání vodíku z vody. Je to elektrolýza vody s využitím elektrické energie a vysokoteplotní termochemické štěpení vody. Technologie elektrolýzy s pomocí elektřiny je známá již více než 100 let, nikdy ale nebyla použita ve velkém měřítku, i když její účinnost dosahuje 85 i více procent. Pokud k elektrolýze použijeme elektřinu vyráběnou s pomocí fosilních paliv, získáme sice čisté palivo, ale současně budou produkovány emise CO_2 a ostatní škodliviny a navíc spotřebujeme minimálně dvojnásobné množství energie z fosilních paliv než bude energie získaná při spálení vodíku /3/.

Přímé štěpení vody na vodík a kyslík v termochemickém procesu se zkoumá asi 4 desetiletí. Tato technologie vyžaduje teploty 700 až 900 stupňů Celsia a recyklovatelné chemické reagencie. Chemikálie neopouštějí technologický proces a doplňuje se jen voda. Účinnost procesu se udává na 40 - 50 %. Za nejnadějnější chemické cykly se považují procesy vápník - brom a síra-jod. Proces síra - jod se plánuje v Japonsku /3/.

5.2.3 Výroba vodíku s pomocí jaderné energie

Pro efektivní výrobu vodíku s využitím jaderné energie byly identifikovány 3 možné technologie:

1/ Parní reforming zemního plynu s využitím tepla z jaderného reaktoru. Jsou zapotřebí teploty až 900 stupňů Celsia. Díky využití jaderné energie se sníží objem zemního plynu, jehož část by se musela použít jako zdroj tepla. Tím se také omezí znečišťování životního prostředí.
2/ Elektrolýza vody k výrobě vodíku a kyslíku s pomocí elektřiny z jaderného reaktoru.
3/ Termochemické získávání vodíku, které používá řadu chemických reakcí a teplo o teplotě až 1000 stupňů Celsia k přímé přeměně vody na vodík a kyslík /6/



Obr. 5.7: Zjednodušené schéma vysokoteplotního reaktoru pro výrobu vodíku

Reaktory vhodné k výrobě vodíku

Z hlediska zralosti technologie pro výrobu vodíku ve velkém měřítku lze jaderné reaktory rozdělit do 3 kategorií /3/.

Do první kategorie patří reaktory, které se dnes podílejí komerčním způsobem na výrobě elektřiny ve světě, mají vysokou provozuschopnost, jsou provozně bezpečné a schopné ekonomické soutěže s jinými elektrárnami pracujícími v základním zatížení. Teploty chladiva na výstupu z reaktoru jsou maximálně 400 stupňů Celsia, takže se nehodí ani k parnímu reformingu metanu, ani k termochemickému štěpení vody. Mohou být ale využívány k elektrolýze vody s pomocí elektřiny, až se dostatečně otevře trh vodíku.
Druhou kategorii tvoří rychlé množivé reaktory chlazené tekutým sodíkem, které jsou schopné kromě výroby elektřiny a tepla také přeměňovat neštěpitelný uran-238 na štěpitelné plutonium-239 a díky tomu prodlužovat životnost zásob uranu a thoria z desítek let na tisíce let. Teplota chladiva na výstupu z aktivní zóny rychlých reaktorů je kolem 600 stupňů Celsia, takže rovněž nejsou vhodné pro štěpení vody, ale mohou být použity pro elektrolýzu vody. V Rusku je ve vývoji rychlý reaktor chlazený tekutým olovem, který bude dosahovat teploty 850 až 900 stupňů Celsia, takže již bude vhodný pro termochemické štěpení vody.
Do třetí kategorie lze zařadit vysokoteplotní plynem chlazené reaktory HTGR (High Temperature Gas-cooled Reactors), jejichž prototypy byly provozovány hlavně v Německu, USA a Rusku. Například německý reaktor AVR-15 již dosahoval teploty na výstupu z aktivní zóny až 950 stupňů Celsia. Díky vysokým teplotám plynného chladiva (například hélia) v rozsahu 900 - 1000 stupňů Celsia a vyšším budou moci být tyto reaktory využity pro přímé štěpení vody. Právě z tohoto důvodu se o vysokoteplotní reaktory v současné době projevuje zvýšený zájem zejména v USA, Jihoafrické republice, Rusku, Japonsku, Číně a ve Francii. Problém zatím spočívá v tom, že nejsou k dispozici komerční vysokoteplotní reaktory velkého výkonu, ale jen většinou experimentální nebo prototypové reaktory.

V rámci současného amerického programu vývoje reaktorů 4. generace bylo zkoumáno více než 100 reaktorových koncepcí. Z devatenácti životaschopných byl vybrán zdokonalený vysokoteplotní reaktor AHTR (Advanced High Temperature Reactor), který je určen hlavně k výrobě vodíku ve velkém měřítku. V aktivní zóně reaktoru se používá kulové palivo s pokrytými částečkami v grafitové matrici, umožňující dosahovat provozní teploty v rozmezí 750 až 1000 stupňů Celsia i vyšší. Místo héliového chladiva pracujícího při vysokých tlacích se použije chladivo na bázi roztavených fluoridových solí za atmosférického tlaku. Bod varu fluoridových solí je 1400 stupňů Celsia /6/.

Reaktor AHTR vychází ze tří technologií vyvinutých v minulosti:

- Jedná se o nízkotlaké chladivo pro vysoké teploty na bázi fluoridových solí, které bylo vyvinuto pro jaderný pohon letadel v 50. letech .
- V 60. letech bylo vyvíjeno chladivo pro rychlé množivé reaktory na bázi roztavených solí.
- V 70. letech bylo vyvíjeno kulové palivo s pokrytými částečkami v grafitové matrici pro plynem chlazené reaktory.
- V 80. letech byly vyvinuty pasivní bezpečnostní systémy pro reaktory chlazené tekutými kovy /6/.

Reaktor AHTR bude mít tepelný výkon 600 MW a výstupní teplotu chladiva 1000 stupňů Celsia.
K výrobě 40 milionů tun vodíku potřebných pro pohon 150 milionů automobilů v USA bude zapotřebí 200 reaktorů produkujících vodík elektrolýzou a 125 reaktorů získávajících vodík tepelně chemickými procesy. Celkový tepelný výkon reaktorů by měl dosáhnout 500 000 MW /7/.

5.2.4 Předpoklady pro realizaci vodíkového hospodářství

Přechod ke komerčnímu vodíkovému hospodářství s využitím jaderné energie bude dlouhodobý, vyžádá si 30 až 40 let a bude muset splňovat řadu předpokladů. Prvním z nich bude schopnost ekonomické soutěže s jinými zdroji k výrobě vodíku, dále bude nutno vybudovat infrastrukturu, zajistit bezpečné skladování, přepravu a používání vodíku a bude třeba získat i podporu veřejnosti pro další rozvoj jaderné energie.

Během uvažované doby budou k dispozici různé typy reaktorů s výstupními teplotami umožňujícími použít kteroukoliv metodu výroby vodíku ve velkém měřítku. Všechny společnosti vyrábějící

automobily mají velký zájem o využití vodíku k pohonu. Motory s vnitřním spalováním vodíku jsou již dnes srovnatelné s benzinovými nebo naftovými motory a lze očekávat, že v brzké době dosáhnou stejné úrovně i automobily používající k pohonu vodíkové palivové články. Podle energetického programu USA se předpokládá, že do roku 2020 bude k dispozici na trhu konkurenceschopný automobil poháněný vodíkovými palivovými články /5/.Pokud jde o náklady na výrobu vodíku s použitím různých metod, jsou k dispozici údaje v tabulce 5.11:

Tabulka 5.11: Orientační náklady na výrobu vodíku /1/

Metoda výroby	**Náklady /USD/GJ/**
Parní reforming metanu	5
Zplyňování uhlí	10
Elektrolýza vody s využitím elektřiny z vodních elektráren	12 *
Elektrolýza vody s využitím elektřiny z větrných elektráren	32
Elektrolýza vody s využitím elektřiny ze slunečních elektráren	39 - 52
Elektrolýza vody s využitím sluneční fotoelektrické energie	47 - 104
Zplyňování biomasy	13
Částečná oxidace olejů	9

**/ Elektřina z vodních elektráren za 0,01 USD/kWh.*

V případě, že by byla použita elektřina z jaderných elektráren k výrobě vodíku elektrolýzou vody za 2 - 3 USc/kWh, byly by náklady srovnatelné s cenou benzínu nebo nafty. Předpokládá se tepelná účinnost jaderné elektrárny 30 % a celková účinnost výroby vodíku kolem 25 % /3/.

Pokud jde o vztah veřejnosti, zdá se, že její obavy z jaderné energie klesají díky poznatkům získaným v nedávné minulosti a jejich začleněním do zvýšené bezpečnosti. Vize získání v podstatě nevyčerpatelného zdroje čisté energie ve formě vodíku by mohla sloužit jako katalyzátor dalšího rozvoje jaderné energetiky. Zvlášť významná bude otázka udržitelnosti jaderné výroby vodíku z hlediska vlivu na životní prostředí, neboť doprava se velmi podílí na jeho znečišťování. Celkový vliv by měl být neutrální. Uran se dostane do systému z geosféry a bude při energetických přeměnách recyklován až do úplného rozštěpení. Ze systému budou ve formě radioaktivního odpadu vyřazeny pouze štěpné produkty, které se dostanou zpět do geosféry, kde se nakonec rozpadnou na úroveň aktivity původně vytěžené uranové rudy. Voda se dostane do systému z atmosféry, vyrobí se z ní vodík a kyslík, přepraví do místa spotřeby, přemění v užitečnou energii a jako odpad se vrátí zpět do atmosféry ve formě vodní páry. Tohoto ekologicky neutrálního systému bude muset být během zhruba padesáti let dosaženo, má-li být dosavadní způsob života udržitelný po dlouhou dobu /3/.

Prameny:

/1/ Energy World, 1999, č. 272, s. 8 - 11
/2/ Nuclear News, 2001, č. 10, s. 41, 44 a 45
/3/ The Nuclear Engineer, 2002, č. 6, s. 169 - 175
/4/ Nuclear News, 1999, č. 12, s. 46 - 48
/5/ Modern Power Systems, 2003, č. 5, s. 5
/6/ Nuclear News, 2003, č. 2, s. 30 - 32
/7/ Nuclear Engineering International, 2004, č. 598, s. 2

5.3 Odsolování mořské vody

Ve světě existují četné oblasti s nedostatkem pitné vody, zejména v rozvojových zemích. Tento problém se bude ještě zhoršovat s předpokládaným růstem počtu obyvatel. Jednou z možností zmírňování nedostatku pitné vody je její odsolování. V současné době se odsolená mořská voda používá hlavně pro zásobování domácností a průmyslu, protože s ohledem na vysoké náklady ji nelze zatím používat k zavlažování zemědělské půdy. Budoucí význam odsolování je dán tím, že v 37 zemích světa jsou velké plochy příbřežních pouští, které by byly vhodné k pěstování zemědělských

plodin. Kdyby byl k dispozici dostatek vody, bylo by možno zde získávat 2 až 3 sklizně do roka a uživit další obyvatele planety.
Ve světě je již k dispozici mnoho odsolovacích závodů a jejich počet a kapacity se neustále zvyšují. V roce 1962 byla světová kapacita odsolování 75 000 m^3/d, do roku 1966 vzrostla na 370 000 m^3/d a v roce 1974 dosáhla 3,5 milionu m^3/d. Podle údajů International Desalination Association bylo kolem roku 2000 ve světě v provozu nebo ve výstavbě na 12 500 odsolovacích zařízení o celkové kapacitě 22,8 milionů m^3/d. Šedesát procent těchto zařízení je na Středním východě a v severní Africe, 20 % v Severní Americe, 8 % v Evropě a 10 % v Asii. Největší odsolovací závody o kapacitě 180 000 až 250 000 m^3/d jsou v provozu v Saudské Arábii, v Kuvajtu, ve Sjednocených arabských emirátech.
V zemích severní Afriky ale už existují odsolovací závody o denní kapacitě až 1 milionu m^3.
V Saudské Arábii představuje celková denní kapacita odsolování 4 miliony m^3 vody /1, 2/

5.3.1 Technologie odsolování

Odsolování mořské vody je proces, kdy se z mořské vody oddělují rozpuštěné solné složky a získává čerstvá voda o nízké salinitě, která je vhodná k pití. Asi z patnácti metod odsolování se do etapy komerčního využití dostaly po čtyřiceti letech výzkumu a vývoje pouze 3. Lze je rozdělit do dvou kategorií:

1/ Destilační procesy, které vyžadují zejména tepelnou energii a částečně i elektrickou k pohonu pomocných zařízení. V úvahu připadají hlavně dvě technologie, a to okamžitá vícestupňová destilace MSFD (Multi Stage Flash Distillation) a vícenásobná efektivní destilace MED (Multiple Effect Distillation).
2/ Membránové procesy, které vyžadují elektrickou energii. Jedná se hlavně o technologii reverzní osmózy RO (Reverse Osmosis).

Pro standardní mořskou vodu (25 stupňů Celsia, 34 500 ppm celkem rozpuštěných pevných částic) je teoreticky třeba k získání 1 m^3 čisté vody 0,73 kWh elektrické energie. U dnešních komerčních procesů je ale spotřeba elektřiny mnohem větší, a to zejména s přihlédnutím k tepelným ztrátám. V současné době je nejnižší spotřeba elektřiny u reverzní osmózy, kde činí 4 - 7 kWh/m^3 v závislosti na kvalitě čerstvé vody a salinitě vody mořské.

U destilačních procesů se mořská voda zahřívá a odpařená čistá voda kondenzuje. Zdrojem tepelné energie je většinou nízko potenciální pára z turbín elektráren. Termodynamická účinnost destilačních procesů je vyjadřována v kilogramech vody připadající na kilogram použité páry. Tento poměr je u dnešních komerčních odsolovacích závodů na bázi vícestupňové okamžité destilace MSFD 6 - 10 a u vícenásobné efektivní destilace MED 20. Odsolovací závody s technologií MSFD dosáhly zralosti a budují se závody o kapacitě do 60 000 m^3/d. Spotřeba tepelné energie a elektřiny se pohybuje od 45 do 120 kWh_t/m^3, resp. 3 až 6 kWh_e/m^3. Spotřeba tepelné energie a elektřiny u technologie MED je 30 až 120 kWh_t/m^3 , resp. 1,5 až 2,5 kWh_e/m^3.

5.3.2 Jaderná energie a odsolování

Možnosti využití jaderné energie k odsolování mořské vody se zkoumají již od 60. let, kdy převládal velký optimismus pokud jde o spojení obou moderních technologií. K jejich prvnímu praktickému využití došlo v roce1973, kdy byl v bývalém Sovětském svazu uveden do provozu rychlý množivý reaktor BN-350 v Ševčenku na pobřeží Kaspického moře (nyní je to Aktau v Kazachstánu). Tento reaktor kromě výroby elektrické energie dodával také tepelnou energii odsolovacímu závodu o denní kapacitě 150 000 m^3. Komplex byl v provozu až do roku 1998 (viz obr. 5.8).

Odsolování mořské vody s pomocí jaderné energie silně podporuje Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE) ve Vídni. V období 1964 až 2000 byla uveřejněna celá řada publikací zabývající se všemi aspekty propojení obou nových technologií. Na generální konferenci MAAE v roce 1989 byl přijata rezoluce požadující, aby byl vyhodnocen technický a ekonomický potenciál jaderného odsolování ve světle zkušeností získaných v posledních desetiletích, protože technologie odsolování se staly komerčně dostupnými a také jaderné reaktory dosáhly zralosti. Díky tomu se opět začíná projevovat zájem o obě technologie. Zájem je ještě posilován dalšími faktory, jako jsou obavy

o znečišťování atmosféry vlivem spalování fosilních paliv, nezbytnost diverzifikovat energetické zdroje, vývoj zdokonalených reaktorů malých a středních výkonů.

5.3.3 Jaderné reaktory vhodné k odsolování

V současné době mohou být pro účely odsolování používány všechny typy reaktorů, tj. lehkovodní, těžkovodní, plynem chlazené i rychlé množivé reaktory. Tyto reaktory mohou odsolovacím zařízením dodávat jak elektřinu, tak tepelnou energii. V rámci studií MAAE byly od potenciálních dodavatelů získány technické a ekonomické informace o dvaceti reaktorových koncepcích vhodných pro dodávku energie odsolovacím zařízením. Většinou se jednalo o reaktory malého a středního výkonu, které jsou vhodné zejména pro rozvojové země s malými elektrickými sítěmi. Uvádí se například, že jaderná elektrárna o výkonu 100 MW_e by mohla zásobovat energií odsolovací závod o denní kapacitě 500 000 m^3, který by stačil zásobovat pitnou vodou město se třemi až čtyřmi miliony obyvatel. Vyvíjejí se i malé jaderné reaktory pro použití na plovoucích plošinách, které mohou poskytnout energii pro odsolovací zařízení o kapacitě 20 000 až 120 000 m^3/d v případě technologie MED nebo o denní kapacitě až 250 000 m^3 u reverzní osmózy /2/.

Obr.5.8: Jaderné odsolovací zařízení Aktau v Kazachstánu

5.3.4 Národní programy jaderného odsolování

Národní programy jaderného odsolování existují v Argentině, Číně, Indii, Izraeli, Japonsku, Jižní Koreji, Kanadě, Maroku a Rusku. Argentina vyvíjí malý zdokonalený reaktor CAREM o tepelném výkonu
100 MW, který bude propojen s odsolovacím zařízením na bázi technologie RO. Kanada plánuje spojit těžkovodní reaktor CANDU s odsolovacím zařízením využívajícím rovněž reverzní osmózu. Od roku 1989 je v Číně v provozu malý reaktor o tepelném výkonu 5 MW, který dodává energii odsolovacím zařízením o kapacitě 3500 m^3/d. V městě Dalian byla již schválena výstavba reaktoru o tepelném výkonu 200 MW, který bude propojen s odsolovacím závodem o kapacitě 150 tisíc m^3/d /1/.
V izraelském Ashododu byl vybudován integrovaný závod určený pro spojení jaderné elektrárny s odsolovacím zařízením o denní kapacitě 17 400 m^3. Až do roku 1983 dodávala potřebnou energii olejová elektrárna. Projekt byl ale zastaven v důsledku vysoké cenu ropy /2/. V Bhabhově výzkumném středisku atomové energie (BARC) v Indii se uskutečňuje výzkum odsolování již od 70. let minulého století. Předmětem zájmu jsou hlavně technologie MSFD a reverzní osmózy. BARC plánuje vybudovat hybridní MSFD-RO odsolovací demonstrační závod o denní kapacitě 45 000 m^3 a odsolovací zařízení na bázi reverzní osmózy o kapacitě 1800 m^3/d. Projekt byl zahájen v roce 1998 a většina zařízení byla dodána v roce 2002, kdy byl koncem téhož roku zahájen zkušební provoz. Získané zkušenosti budou prostřednictvím MAAE předány i jiným zemím. Odsolovací zařízení budou propojena s těžkovodním reaktorem o výkonu 170 MWe v Kalpakkamu. Díky získaným zkušenostem mají být vyprojektovány standardní odsolovací závody o kapacitě 38 000 m^3/d. V Japonsku je v úspěšném provozu deset odsolovacích zařízení, která jsou napojena na tlakovodní reaktory. V Jižní Koreji se pracuje na projektu kogenerační jaderné elektrárny s reaktorem SMART o tepelném výkonu 330 MW, který bude dodávat energii odsolovacímu zařízení o kapacitě 40 000 m^3/d. Základní projekt reaktoru SMART (System-Integrated Advanced Reactor) byl zahájen v roce 1999 /3/. V roce 1998 se Čína a Maroko dohodly o spolupráci na výstavbě demonstračního reaktoru NHR-10 o tepelném výkonu 10 MW, který

bude dodávat energii odsolovacímu zařízení o denní kapacitě 8 000 m^3. Odsolovací zařízení má zásobovat pitnou vodou město Tan-Tan na pobřeží Atlantického oceánu. Reaktor NHR-10 je zvětšenou verzí čínského reaktoru NHR-5, který je od roku 1989 v provozu v čínském Ústavu jaderné technologie. Náklady na 1 m^3 odsolené vody mají být srovnatelné s náklady odsolování s využitím fosilních paliv, tj. kolem 2,7 USD/m^3 /4/.

Podle tříletého programu koordinovaného MAAE, který byl ukončen v roce 2006, je již jaderné odsolování ekonomicky výhodnější ve srovnání s jinými energetickými zdroji. Při použití technologie reverzní osmózy se náklady pohybují od 0,5 do 0,94 USD/m3, u vícenásobné efektivní destilace (MED) od 0,6 do 0,96 USD a u vícestupňové okamžité destilace (MSFD) od 1,18 do 1,48 USD/m^3. /Nuclear News, 2007, č. 5, s. 60-63/

5.3.5 Odsolovací zařízení na plovoucích plošinách

Nejdále pokročili v oblasti jaderného odsolování ruští vědci a technici. Ti vypracovali několik desítek projektů malých jaderných elektráren na plovoucích plošinách, které by mohly být víceúčelově využity, mimo jiné i k odsolování mořské vody. V nejpokročilejším stádiu vývoje je plovoucí jaderná elektrárna s reaktory KLT-40 S. (Dnes je v Rusku údajně poptávka asi po třiceti jaderných elektrárnách na plovoucích plošinách.) Reaktory KLT-40 byly původně vyvinuty pro pohon atomových ponorek a atomových ledoborců a provozně se velmi dobře osvědčily ve flotile atomových ledoborců. Reaktor KLT-40 S splňuje mezinárodní bezpečnostní standardy. Funkční prototyp reaktoru se staví v Severodvinsku v Archangelské oblasti. Plovoucí plošina bez vlastní pohonné jednotky bude ukotvena u Sevmaše, největší ruské loděnice. Na plošině budou umístěny dva reaktory KLT-40 se zařízeními pro přenos elektřiny. Celkový elektrický výkon bude 70 MWe a reaktory dodají 150 Gcal/h. Elektrárna zajistí loděnici elektřinu, tepelnou energii i pitnou vodu /5/. S ohledem na malé rozměry plovoucí jaderné elektrárny (výtlak 21 000 t) jsou tyto elektrárny vhodné pro většinu příbřežních oblastí Ruska. Reaktor může být nepřetržitě v provozu 3 roky, má životnost 40 let, vyžaduje výměnu paliva jednou za 4 roky a velkou údržbu jednou za 13 let /6/. Plovoucí jaderné elektrárny mají ve srovnání s obdobně velkými elektrárnami spalujícími topné oleje nebo uhlí tu výhodu, že ušetří 300 000 t paliva a zamezí výpustím 400 milionů m^3 CO_2. Investiční náklady mají být uhrazeny během deseti let provozu /7/. Ukončení výstavby této první plovoucí jaderné elektrárny se plánuje v květnu 2010. Investiční náklady se odhadují na 175 milionů EUR (225 milionů USD). Zájem o tyto elektrárny již projevila Čína, Malajsie, Indonésie, Chile, Vietnam, Austrálie, Jižní Korea a Saudská Arábie. Do roku 2015 má být vybudováno 7 plovoucích jaderných elektráren. /Nuclear Future, 2007, č. 1, s. 8/

V tabulce 5.11 jsou uvedeny hlavní charakteristiky první plovoucí jaderné elektrárny určené k odtažení do města Pevek na Čukotce. Investiční náklady se odhadovaly na téměř 280 milionů USD, včetně dotace na společenský rozvoj /8/. (Viz také obr. 5.9.)

Tab. 5.11 Hlavní charakteristiky plovoucí jaderné elektrárny na plovoucí plošině

	Bez skladu VP*	Se skladem VP
Délka plošiny, m	126	140
Šířka plošiny, m	30	30
Výška, m	10	10
Ponor, m	5,5	5,5
Výtlak, t	15 500	18 400
Typ reaktoru	KLT-40 S	
Počet reaktorů	2	
Tepelný výkon, MW	2 x 148	
Hrubý elektrický výkon, MWe	2 x 35	
Čistý elektrický výkon, MWe	2 x 30	
Produkce tepla, Gcal/h	2 x 25	

Obr. 5.9: Projekt plovoucí jaderné elektrárny

Prameny:

/1/ STI/DOC 10/400, IAEA 2000: Introducion of Nuclear Desalination
/2/ Kerntechnik, 1997, č. 5/6, s. 254 - 259
/3/ Nuclear Engineering International, 2002, č. 572, s. 36 - 37
/4/ NucNet, 1998, News No 478
/5/ Nuclear Engineering International, 2003, č. 593, s. 6
/6/ International Power Generation, 1998, č. 4, s. 26 - 27
/7/ Nuclear Engineering International, 2002, č. 572, s. 18 - 20
/8/ Nuclear Engineering International, 1997, č. 514, s. 31

5.4 Pohon dopravních prostředků

Pohon dopravních prostředků je další oblastí, v níž je obrovská spotřeba kapalných paliv. A je to jaderná energie, která i zde může v budoucnosti přispět k úsporám ropy, zejména v civilní námořní dopravě. Možnost využití jaderných reaktorů k pohonu lodí byla v praxi prokázána více než padesátiletým provozem několika set vojenských plavidel, jako jsou ponorky, letadlové lodě a křižníky a také provozem celé řady ruských atomových ledoborců a tří obchodních lodí.

Přitažlivost jaderného pohonu lodí spočívá například v úspoře ropy, ve větších vzdálenostech, které mohou lodi překonat bez doplňování paliva, ve snížení znečišťování atmosféry a vod moří a oceánů. Jeho další výhodou je i to, že při provozu reaktoru se nespotřebovává stále vzácnější kyslík. Jaderný pohon lodí je zvlášť výhodný pro ledoborce a lodě pro přepravu ropy a zkapalněného zemního plynu, kontejnerů, rud, uhlí, atd.

Podobně, jako tomu bylo a je v oblasti nových objevů a vynálezů, byla možnost jaderného pohonu nejdříve využita pro vojenské účely, a to k pohonu ponorek, letadlových lodí a křižníků. Reaktory pro pohon ponorek se staly základem vývoje reaktorů pro jaderné elektrárny v USA i v Sovětském svazu.

5.4.1 Jaderný pohon vojenských plavidel

Jaderné reaktory pro pohon vojenských ponorek a hladinových lodí byly jedinečným technickým úspěchem 20. století. Jejich vývojem se zabývaly všechny velmoci - USA, Sovětský svaz, Spojené království, Francie i Čína. V USA se vývoj námořních reaktorů NR (Naval Reactors) pod vedením admirála G. Rickovera stal nejlépe řízeným a nejúspěšnějším jaderným programem na světě. Reaktory byly vyvíjeny v rámci společného programu amerického námořnictva a ministerstva energetiky (DOE - Department of Energy). Program námořních reaktorů získal do roku 1998 provozní zkušenosti 5 000 reaktorových let bez havárie nebo uvolnění radioaktivity. Válečné námořnictvo USA dnes provozuje 95 reaktorů a zůstává největším centrálně řízeným jaderným programem na světě /1/.

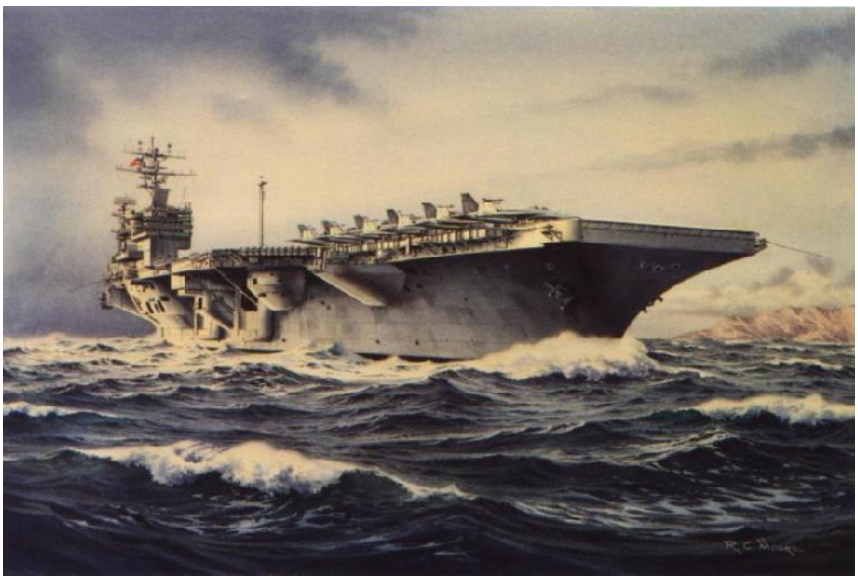
Obr. 5.10: Nejnovější britská jaderná ponorka ASTUTE

První americká jaderná ponorka Nautilus byla spuštěna na vodu 21.1.1954. Bylo to první plavidlo, které pod ledem dosáhlo geografického severního pólu. Druhá ponorka - Seawolf - byla uvedena do provozu v roce 1957 a vyznačovala se tím, že její reaktor byl chlazen tekutým kovem. Později byl tento reaktor nahrazen tlakovodním reaktorem, který měla i ponorka Nautilus. Nautilus byl vyřazen z provozu v roce 1980 a Seawolf v roce 1987. V červenci 1997 byla uvedena do provozu další řada ponorek nesoucí název Seawolf. První americká letadlová loď s jaderným pohonem Enterprise obeplula v roce 1964 celý svět bez doplňování paliva a bez logistické podpory. V roce 1994 zaznamenaly americké lodě s jaderným pohonem významný milník, když urazily 100 milionů námořních mil bez nehody s uvolněním radioaktivity. Po skončení studené války klesl počet lodí s jaderným pohonem ze 140 na 95. V důsledku omezení finančních prostředků byly nasazeny nové útočné ponorky NAS (New Attack Submarins), které jsou provozně levnější než ponorky typu Seawolf. /1/.

V Sovětském svazu bylo koncem 40. let navrženo vyprojektovat první ponorku s jaderným pohonem. Její stavba byla zahájena v červnu 1954 a v červenci 1958 byla spuštěna na vodu. Koncem 80. let bylo v SSSR ve službě na 450 atomových ponorek, což bylo téměř dvakrát tolik jako ve všech ostatních zemích /2/. Atomové ponorky postupně uváděly do provozu i Spojené království (1963), Francie (1971) a Čína (1974). Ve Spojeném království byla první atomovou ponorkou Dreadnought a poslední Vengeance, spuštěná v roce 1999. Celkem jich měla tato země 24 /3/. Kromě ponorek byly provozovány i atomové křižníky a letadlové lodě, zejména v USA a SSSR. Rusko má dnes ve službě 4 atomové křižníky a USA řadu letadlových lodí. V současné době se projektují atomové ponorky páté generace. Podle prezidenta Clintona lodě s jaderným pohonem významně přispěly národním zájmům USA.

Konec studené války vedl k velkému snížení počtu jaderných ponorek a v Rusku vznikl zájem o jejich možné civilní využití. Nabízejí se tyto možnosti:

1/ budování jaderných elektráren na plovoucích plošinách k dodávce elektřiny a tepla v oblastech bez centrálního zásobování energiemi,
2/ budování plovoucích jaderných bloků k odsolování mořské vody,
3/ využití ponorek k výzkumu oceánů, k vyhledávání potopených lodí, k dobývání železných a manganových nodulů a jiných minerálů na mořském dně /2/. Rostoucí ceny ropy vedou k tomu, že jaderný pohon lodí bude ekonomicky výhodný. Podle studie amerického námořnictva bude přelomovým bodem cena 178 USD/barel. /New Scientist, 2008, č. 2660, s. 24/



Obr. 5.11: Letadlové lodi jsou poháněny tlakovodními jadernými reaktory

5.4.2 Jaderný pohon civilních lodí

V polovině 50. let byl zahájen i vývoj lodí nevojenského charakteru s jaderným pohonem v USA, SSSR, NSR a v Japonsku. V USA byla postavena obchodní loď Savannah (1962), v Německu obchodní loď „Otto Hahn“ (1968) a v Japonsku experimentální loď „Mutsu“ (1974). Žádná z nich ale už není v provozu. Nejvíce zkušeností s provozem civilních lodí s jaderným pohonem získal bývalý Sovětský svaz díky své flotile atomových ledoborců. První atomový ledoborec „Lenin“ byl spuštěn na vodu v roce 1959 a efektivně pracoval po dobu třiceti let. Postupně byly do provozu uváděny další atomové ledoborce, například „Sibiř“, „Arktika“, „Rossija“, „Tajmyr“, „Vajgač“ a „Jamal“. V roce 1999 byly všechny tyto ledoborce v provozu a ruská vláda rozhodla o stavbě dalšího pod názvem „50. výročí vítězství“. Tento ledoborec má stát 92 milionů USD. V roce 1988 byla rovněž postavena velká nákladní kontejnerová loď s jaderným pohonem „Sevmorpuť“, která může plout jak na otevřeném moři, tak i na sibiřských řekách a zajišťovat zásobování těchto oblastí /4/. Flotila atomových ledoborců má pro Rusko velký význam, protože umožňuje celoroční provoz po Severní mořské cestě. Životnost reaktorů na atomových ledoborcích se zvýšila o 25 000 hodin, a to z původních 150 000 na 175 000 hodin. Efektivním se ukázal být i provoz kontejnerové lodě Sevmorpuť, která byla po dva roky v provozu na Dálném východě a potom zajišťovala přepravu mezi Murmaňskem a Norilskem. Při provozu uvedených lodí nebyla zaznamenána ani jedna havárie, která by ohrozila personál nebo životní prostředí /2/.

Díky zkušenostem s provozem japonské lodi Mutsu byl po roce 1991 ve výzkumném ústavu atomové energie JAERI zahájen vývoj dvou reaktorů pro pohon lodí. Projekty reaktorů jsou označovány jako MRX (Marine Reactor X) a DRX (Deep Sea Reactor). Reaktor MRX je určen pro pohon ledoborců a DRX bude pohánět námořní průzkumnou loď. Reaktor MRX se vyznačuje jak nízkou váhou, tak malými rozměry. Předpokládá se, že by japonské atomové ledoborce mohly rovněž plout po Severní mořské cestě. Pokud se týká ekonomiky provozu lodí s jaderným pohonem, pak podle hodnocení z roku 1999 nevyznívá ve prospěch jaderného pohonu ve srovnání s pohonem dieselelektrickým. Japonská agentura pro vědu a technologii se ale domnívá, že v první polovině 21. století budou

existovat lepší vyhlídky pro ekonomiku jaderného pohonu, a to vzhledem k vysokým cenám ropy a přísnějším ekologickým normám /5,6/.

5.4.3 Jaderný pohon jiných dopravních prostředků

V minulosti byl výzkum a vývoj jaderného pohonu zaměřen i na jiné dopravní prostředky, například letadla, obří vzducholodě, vznášedla, raketoplány, ale i automobily. Například v červnu 1952 byl v SSSR zadán úkol vyvinout letadlo s jaderným pohonem a byly zkoumány různé varianty reaktorů s tepelnými a rychlými neutrony. Byla vytvořena létající jaderná laboratoř v letadle TU-95 s reaktorem „Lastočka“ (Vlaštovka) na palubě. Výzkumné a vývojové práce prokázaly, že letadlo s jaderným pohonem je realizovatelné a že je schopné neomezeného doletu a doby letu. Vývoj byl ale přerušen, protože se nenašlo řešení pro bezpečnost letadel při vzniku těžké nehody /7/.

Sovětští vědci Koroljov, Kurčatov a Keldyš řídili i výzkum a vývoj rakety s jaderným pohonem. Pro zkoumání palivových článků reaktoru byl vyroben impulsní grafitový reaktor IGR. Byly zkoumány reaktory jak s pevnou, tak i s plynnou aktivní zónou. V další etapě byl zkonstruován reaktor IVG a stendy pro výzkum paliva pro jaderné raketové motory. V reaktoru IVG byly dosahovány teploty vodíku až 3100 stupňů Kelvina. V další etapě byla vyprojektována stendová varianta reaktoru IRGIT a tím byla otevřena cesta k vytvoření jaderného raketového motoru, bez kterého nebude možno realizovat cesty na Mars za rozumnou dobu /7/.

Výzkum jaderného raketového pohonu probíhal v USA od poloviny 50. let. Šlo například o projekty ORION a NERVA (Nuclear Engine for Rocket Vehicle Applications). Projekt NERVA se soustředil na pohon kosmické lodi s využitím reaktoru s grafitovou aktivní zónou, v níž měl být vodík ohříván na extrémní teplotu a tryskou ejektován vysokou rychlostí k dosažení velkého tahu. Do roku 1973, kdy byl projekt zastaven, bylo v Jackass Flat v Nevadě testováno 20 motorů NERVA. Projekt ORION byl založen na jiném principu. Myšlenka spočívala v tom, že by se pod spodní ochrannou částí kosmické lodi odpalovaly jaderné nálože, které by loď vynesly vysokou rychlostí do kosmického prostoru. Projektový tým vedený fyzikem T.Taylorem a F. Dysonem navrhl stínící systém, který by posádku chránil před zářením. Předpokládalo se, že by ochranná tlačná deska (push-plate) mohla vydržet stovky jaderných explozí, které by byly nutné pro cesty do hlubin vesmíru. Model tohoto motoru byl testován v Point Loma v Kalifornii s použitím konvenčních výbušnin. Zkouška s jadernou náloží nebyla ale nikdy uskutečněna a projekt byl v roce 1963 ukončen v souvislosti s částečným zákazem zkoušek jaderných zbraní /8/.

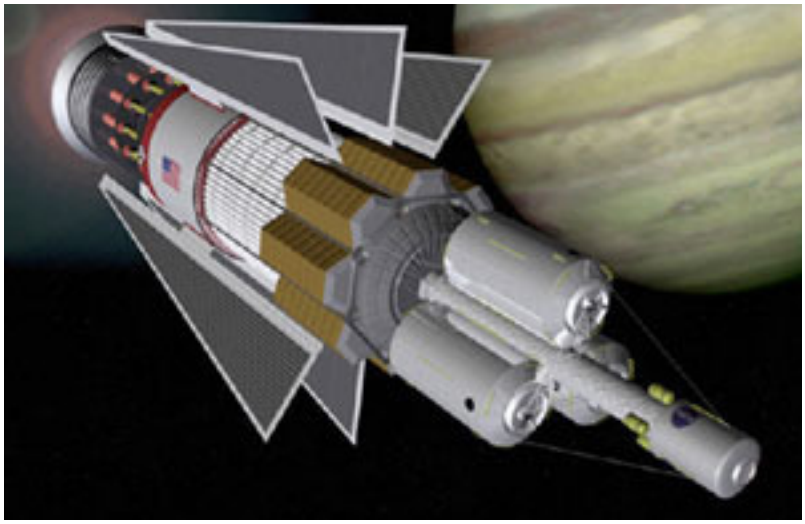
V Sovětském svazu byl vypracován i projekt obří vzducholodě s jaderným pohonem, která by mohla být využita buď jako nákladní pro přepravu nákladů do vzdálených oblastí nebo jako létající sanatorium pro 1800 osob. Existovaly rovněž plány na postavení obrovského vznášedla, které by mohlo uletět bez doplňování paliva 1,5 až 3 miliony kilometrů a mohlo se pohybovat jak po vodě, tak i po zemi, ledu, písku a bahně a nepotřebovalo by hluboké přístavy. Vznášedla s jaderným pohonem by mohla přispět k rozvoji průmyslu v blízkosti zdrojů surovin.
Prameny:

/1/ Nuclear News, 1998, č.11, s. 26 - 28
/2/ Atomnaja eněrgija, 83, 1997, č. 5, s. 315 - 319
/3/ The Nuclear Engineer, 2004, č. 3, s. 67
/4/ NucNet, Business News, 1999, č. 84
/5/ Atomnaja těchnika za rubežom, 2000, č. 10, s. 19 - 27
/6/ Daily Press Review, IAEA, 1992, s. 119
/7/ Atomnaja eněrgija, 82, 1997, č. 5, s. 331 - 334
/8/ Bulletin of the Atomic Scientists, 2003, č. 4, s. 9 - 11

5.5 Využití jaderné energie ve výzkumu kosmu

Mnoho dnešních technických objevů patřilo dříve do vědeckofantastické fikce, ale řada z nich se stává skutečností. K přeměně fikce do reality dochází i ve výzkumu kosmu, přičemž prakticky všechny pokročilé koncepce zahrnují nějakou formu využití jaderné energie. Jaderná energie již poskytuje jak

elektřinu, tak i tepelnou energii pro kosmická zařízení a vyvíjí se pohonné jednotky pro vypouštění kosmických lodí a jejich manévrování v kosmickém prostoru. Obecně se má za to, že bez jaderné energie se již neobejde výzkum naší sluneční soustavy a prostoru za ní. Mnohé kosmické mise v rámci sluneční soustavy již nemohou využívat sluneční energii vzhledem k velké vzdálenosti od Slunce a jaderná energie představuje zatím jedinou alternativu /1/. (Viz obr. 5.12.)



Obr. 5.12: Projekt rakety na jaderný pohon

5.5.1 Jaderná zařízení pro dodávku elektřiny a tepla

Výzkum možností využití jaderné energie k výrobě elektřiny a tepla pro zásobování kosmických zařízení byl v USA zahájen v polovině 50. let. Výsledkem vývoje byly radioizotopové termoelektrické generátory RTG (Radioisotope Thermoelectric Generator), které přímo přeměňují tepelnou energii v elektrickou. (Tento princip byl objeven v roce 1821 německým vědcem T. J. Seebechem.) Jako zdroj tepelné energie slouží například izotop plutonia-238, který nemá vojenské uplatnění. Byly rovněž vyvinuty radioizotopové vyhřívací jednotky RHU (Radioisotope Heating Units), které udržují elektronická zařízení v kosmických lodích nebo sondách na provozní teplotě. První dva radioizotopové generátory o výkonu 3 W byly instalovány na navigačních satelitech amerického námořnictva a byly vyneseny na oběžnou dráhu v červnu a listopadu 1961. Byly označovány jako SNAP-3 (System for Nuclear Auxiliary Power). Od roku 1963 poskytují veškerou elektřinu pro kosmická zařízení při letech kolem Země a Měsíce a byly použity i pro lety lodi Apollo a kosmických sond Viking, Pioneer, Voyager, Galileo, Ulysses, Cassini /2/. Například sonda Cassini, která odstartovala k Saturnu v polovině října 1997, je vybavena třemi generátory RTG k zajištění potřebné elektřiny a 117 vyhřívacími jednotkami RHU. Protože Saturn je desetkrát vzdálenější od Slunce než Země, použití slunečních článků by nebylo vhodné. Jejich plocha by musela být velká jako dvě tenisová hřiště, což by jednak komplikovalo kontrolu polohy sondy a způsobovalo elektromagnetické a elektrostatické poruchy u komunikačních zařízení a počítačů uvnitř sondy /3/. (Viz obr. 5.13 a 5.14.)

Zařízení RTG a RHU používají celkem 33 kg plutonia-238. Palivo je chráněno několika způsoby. Izotop plutonia-238 v keramické formě je nerozpustný a chemicky málo reaktivní, po porušení vytváří velké částice, které nelze vdechovat. Palivo je rozděleno do 18 malých nezávislých modulů s tepelným stíněním a ochranným krytem pro případ nárazu. Je rovněž chráněno mnoha vrstvami ochranných materiálů včetně iridiových a grafitových bloků. Iridiová slitina taje při teplotě 4 497 stupňů Kelvina, ale teplota sondy při jejím návratu na Zemi je jen 2 565 stupňů Kelvina /3/. Americký úřad pro letectví a kosmický výzkum (NASA) odhaduje, že i kdyby se veškeré plutonium dostalo do životního prostředí, způsobilo by radiační dávku menší než 0,01 mSv za padesát let života jedince. Přitom průměrný občan obdrží za stejné období dávku přibližně150 mSv z přírodního pozadí. Americké ministerstvo energetiky zajistilo radioizotopové zdroje pro 26 kosmických misí. Systémy RTG byly součástí i dalších misí, jako byl například společný projekt Ulysses, na kterém se podílely Evropská kosmická agentura, NASA a Jet Propulsion Laboratory. Sonda byla vypuštěna z raketoplánu Discovery

začátkem října 1990, obletěla Jupiter a v letech 1994 a 1995 jižní a severní pól Slunce. Začátkem července 1997 sonda Pathfinder úspěšně přistála na povrchu Marsu /2/.

Obr. 5.13: Radioisotopové jednotky zahřívají citlivé kosmické přístroje

Jaderně energetické zdroje jsou pro výzkum kosmu důležité z několika důvodů: /1/

- Mají dlouhou životnost a umožňují plánovačům predikovat hladinu energie, protože je známo, že hladina energie u RTG se ročně snižuje o 0,8 % vlivem rozpadu Pu-238.
- Jsou schopné pracovat v extrémních podmínkách a jsou odolné vůči kosmickému záření a prachovým bouřím na planetách.
- Jsou provozně nezávislé. Zařízení RTG dodávají energii přístrojům bez ohledu na to kde se na orbitě nacházejí nebo jak jsou orientovány ke Slunci. RTG začíná produkovat elektřinu, jakmile se radioizotopové palivo vloží do konvertoru, a proto může být použit pro kontrolu systémů kosmické lodě ještě před startem a při instalaci na odpalovací rampě.
- Jsou spolehlivé. Například dvě sondy Pioneer byly v provozu 20 let a NASA plánuje prodloužit misi sondy Voyager až na 40 let.
- Jsou bezpečné. Například při nezdařeném pokusu vypustit sondu Nimbus B-1 v květnu 1968 byl radioizotopový zdroj energie vytažen neporušený z hloubky 90 m u kalifornského pobřeží. Nedošlo k úniku Pu-238 a palivo bylo znovu použito u pozdější mise.

Začátkem 60. let byly v Sovětském svazu v celé řadě výzkumných a průmyslových podniků zahájeny práce na přímé přeměně tepelné energie z jaderného reaktoru na elektřinu pro aplikace v kosmu s pomocí termoelektrických a termoemisních konvertorů. Zájem o tyto práce byl vyvolán tím, že podobné metody podstatně zjednodušují jaderně energetický systém, vylučují mezietapy přeměny energie a umožňují vytvářet kompaktnější a lehčí energetická zařízení v rozsahu elektrického výkonu od několika kW do několika set kW. Přímé přeměny energie jsou nejperspektivnější v souvislosti s jaderným reaktorem, který při malém objemu aktivní zóny disponuje velkou zásobou tepelné energie pocházející ze štěpení, což je zvlášť výhodné pro aplikace v kosmickém prostoru. Díky předcházejícím výzkumům vysokoteplotních jaderných reaktorů s rychlými neutrony, paliva na bázi karbidu uranu apod., byly předloženy návrhy o možnosti konstrukčního řešení nového typu reaktorového systému - reaktoru s přímou přeměnou tepelné energie v elektrickou. U tohoto systému jsou obě složky uzavřeny v jednom bloku.V roce 1961 bylo rozhodnuto o výrobě a odzkoušení navrhovaného reaktoru-konvertoru, označovaného jako Romaška. Jaderně energetické zařízení Romaška se skládá z jaderného reaktoru, systému řízení a termoelektrického konvertoru.
Reaktor pracuje na bázi rychlých neutronů, má válcovitý tvar a jeho základní charakteristiky jsou následující:

Celková hmotnost bez regulačních tyčí	450 kg
z toho: hmotnost reaktoru	265 kg
hmotnost termoelektrického konvertoru	185 kg
Průměr aktivní zóny	241 mm
Výška aktivní zóny	351 mm

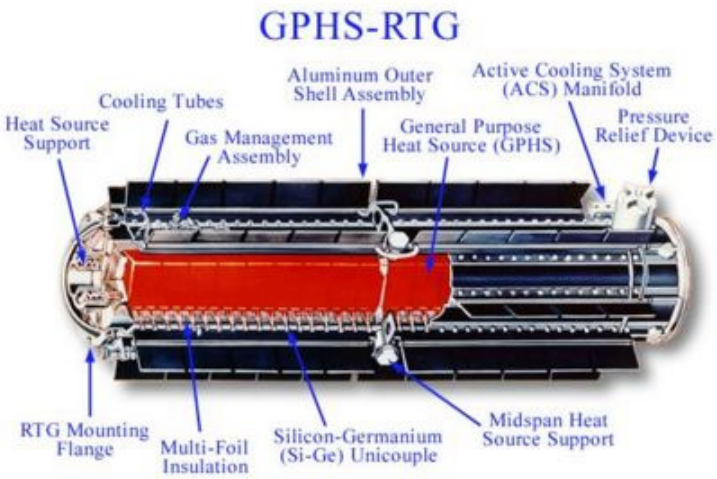
Efektivní tepelný výkon reaktoru	28,2 kW
Elektrický výkon začátkem provozu	460 - 475 W
Koeficient snížení výkonu po 15 000 provozních hodinách	0,8
Pracovní napětí	21 V
Maximální teplota v centru AZ	1900 °C

Palivem je UC_2 o obohacení 90 % U-235, hmotnost paliva je 49 kg. Zkoušky zařízení Romaška probíhaly od poloviny srpna 1964 do dubna 1966, celkem 15 000 hodin. Zařízení vyrobilo 6100 kWh elektrické energie.V roce 1969 bylo celé zařízení demontováno a prověřován jeho stav. Zkoušky prokázaly, že zařízení může pracovat bez obsluhy a že je velmi spolehlivé. Následné zkoušky také ukázaly, že by elektrický výkon mohl dosáhnout až 1 000 W při použití termoelektrického systému a 3 000 až 5 000 W při aplikaci termoemisního systému. Reaktory Romaška mohou být použity jako náhrada radioizotopových generátorů na vědeckých stanicích na Měsíci, Marsu nebo Venuši /4/. V období 1967 až 1988 uvedl Sovětský svaz na oběžnou dráhu 31 kosmických lodí s těmito reaktory na palubě /5/.

V roce 1969 byl v SSSR zadán úkol vyprojektovat kosmický objekt s využitím jaderného reaktoru, který by umožnil televizní vysílání do vzdálených oblastí země. Výsledkem vývoje byl reaktor Jenisej - TOPAZ s termoemisním systémem pro přímou přeměnu tepelné energie na elektrickou. Dne 26.3.1971 byl v sovětském deníku Pravda uveřejněn článek o úspěšných zkouškách tohoto reaktoru, který je zkratkou ruských slov termoemisionnyj, opytnyj, preobrazovatel v aktivnoj zóne. Jednalo se o rychlý reaktor o průměru aktivní zóny 260 mm a výšce 375 mm. Vsázku paliva tvoří 25 kg uranu obohaceného na 96 % U-235. Teplota chladiva na výstupu z aktivní zóny byla 550 stupňů Celsia. Technické zadání požadovalo elektrický výkon 6,8 kW a životnost v první fázi 1,5 roku a později 3 roky. Hmotnost měla být 1 000 kg. Kosmické těleso mělo tvar komolého kužele a bylo dlouhé 3 900 mm a maximální průměr byl 1 400 mm. Do roku 1988 proběhly potřebné zkoušky, ale vývojové práce byly v tomto roce zastaveny pro nedostatek finančních prostředků. O projekt projevily zájem Spojené státy americké a díky jejich finanční podpoře mohl výzkum pokračovat i v letech 1992 až 1996. Zájem USA o pokračování vývoje reaktoru Jenisej - TOPAZ byl tak velký, že ukončily vývoj svého reaktoru SP-100 o elektrickém výkonu 160 kW a soustředily se na spolupráci s Ruskem. V současné době se ruští vědci zaměřují na vývoj reaktoru TOPAZ druhé generace, který bude mít výkon od několika desítek do několika set kW a životnost 7 až 10 let.

Předpokládá se, že reaktor TOPAZ může být využit dvěma způsoby:
1/ k zásobování kosmických lodí nebo sond elektrickou a tepelnou energií po dobu deseti let,
2/ k napájení elektrických reaktivních motorů umožňujících kosmickému zařízení manévrovat v kosmickém prostoru.

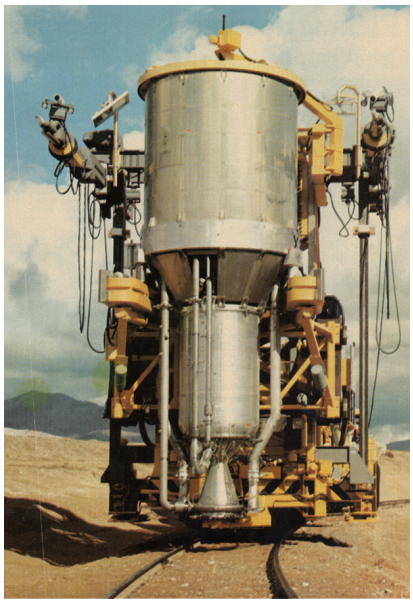
Bimodální jaderné zařízení umožňuje vyrábět elektřinu i vytvářet tah /6/. Pro manévrování kosmických sond ve vesmíru lze použít i radioizotopové pohonné systémy REP (Radioisotope Electric Populsion), které jsou navrhovány jako iontové pohonné jednotky o malém tahu, založené na radioizotopových elektrických generátorech a iontových pomocných motorech /7/.



Obr. 5.14: Radioisotopový termoelektrický generátor

5.5.2 Jaderný pohon pro výzkum kosmu

V USA vyvíjí jaderné pohonné jednotky Marshallovo středisko kosmických letů MSFC (Marshall Space Flight Center) spadající pod Národní úřad pro letectví a kosmický výzkum NASA (National Astronautical and Space Administration). Při soustředěném úsilí by mohl být jaderný motor vyvinut během deseti let, a to ve formě reálného motoru. Podle NASA by lidskou posádku na Mars měly dopravit 4 raketové motory odvozené z reaktoru NERVA (viz obr. 5.15) o tahu 15 000 liber (6 975 kg) a specifickém impulsu 900 s. (Účinnost raketového motoru se vyjadřuje jako specifický impuls, což je počet sekund, kdy motor může vyvinout tah 1 kg na 1 kg paliva. Standardní motory na chemická paliva mají specifický impuls asi 450 s, štěpný jaderný motor by tento limit překonal dvakrát až třikrát, zatímco perspektivní fúzní motor by dosáhl specifického impulsu až 130 000 s.) /8/.



Obr. 5.15: Jaderný motor NERVA

V únoru 2002 zahájil NASA svůj nový program Prometheus, zaměřený na vývoj jaderného pohonu a výrobu elektřiny pro kosmické účely. NASA věří, že jaderné technologie umožní kosmické mise, které by nebylo možno uskutečnit s využitím konvenčních technologií. Jedná se například o lety na Mars nebo o průzkum Pluta. Prezident Bush uvolnil na projekt do roku 2008 celkem téměř 3 miliardy USD a pro rok 2004 279 milionů dolarů. Z částky pro rok 2004 mělo připadnout na další vývoj RTG 186 milionů a 93 miliony na vývoj pohonných systémů na bázi jaderného štěpení. Pentagon přivedl jaderný motor k životu v roce 1988 v rámci tajného programu Timberwind, jehož cílem bylo vyvinout raketu s jaderným pohonem schopnou vynést na oběžnou dráhu těžká zařízení potřebná pro realizaci programu hvězdných válek prezidenta Reagana. Program byl ukončen v roce 1993. Nejnovější program Prometheus je zaměřen na průzkum 3 největších jupiterových měsíců Europa, Ganymede a Callisto a start kosmické lodi by se měl uskutečnit v příštích deseti letech. Výhodou jaderného pohonu bude například ztrojnásobení rychlosti kosmické lodi, což by umožnilo vykonat cestu na Mars a zpět za 1 měsíc. Další výhodou bude i zvětšení váhy nákladu z 29 tun u současných návratných lodí snad až na tisíce tun /5/.

5.5.3 Reaktor pro dlouhodobý pobyt kosmonautů na Měsíci

Jedním z cílů kosmického programu prezidenta Bushe je návrat člověka na Měsíc do roku 2020. Přibližně od roku 2008 budou na povrch Měsíce vysílány mise robotů, které prozkoumají a připraví

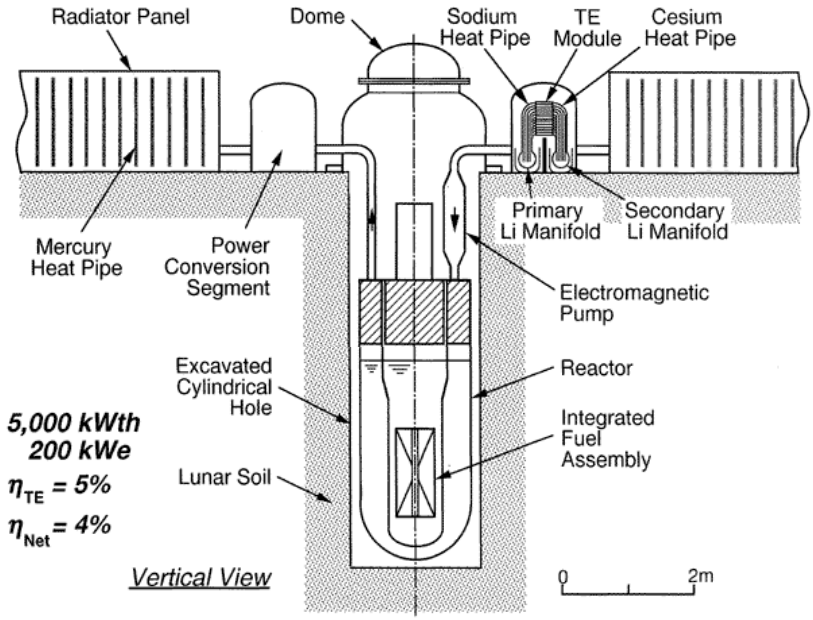
budoucí průzkum uskutečňovaný lidskou posádkou. Lidé by měli na Měsíci přistát v roce 2015 a postupně zde po stále delší dobu žít a pracovat. Pro tyto účely je vyvíjen reaktor RAPID-L (odvozený od koncepce rychlého reaktoru RAPID - Refuelling by All Pins Integrated Design), umožňující rychlou a jednoduchou výměnu paliva. Tepelný výkon reaktoru RAPID-L je 5 000 kW, hrubý elektrický výkon 240 kW, čistý elektrický výkon 200 kW. Palivem je obohacený nitrid uranu a jako chladivo slouží lithium, které má bod tavení 1 330 stupňů Celsia. Vstupní teplota lithia je 1030 stupňů C, výstupní teplota z reaktoru 1 100 stupňů C. Hlavní provozní charakteristiky reaktoru RAPID-L jsou:

Nominální tepelný výkon	5 000 kW
Výška aktivní zóny	0,6 m
Průměr aktivní zóny	0,6 m
Obohacení uranu-235 - vnitřní oblast	40 %
- vnější oblast	50 %
Projektová životnost aktivní zóny	10 let
Vnější průměr palivové tablety	8 mm
Počet palivových tablet	2 700
Špičkový lineární výkon	52 W/cm
Primární chladivo	lithium - 7/99,99 %
Průtočné množství chladiva	17,25 kg/s

Uspořádání je smyčkové, s reaktorovou nádobou o průměru 2 m a výšce 6,5 m. Od konvenčního bazénového typu reaktoru se liší tím, že aktivní zónu tvoří tzv. integrovaný palivový soubor, složený z 2 700 palivových tablet, podpěrné mříže aktivní zóny a několika distančních mřížek. Palivový soubor je umístěn v jakési „maxinábojnici“, která se při výměně paliva celá vyjímá z reaktorové nádoby, jak ukazuje obrázek 5.16. Reaktor nemá regulační tyče a místo nich používá tři moduly pro regulaci reaktivity: modul s expanzí lithia LEM (Lithium Expansion Module), modul pro vstřikování lithia pro konečné odstavení (LIM (Lithium Injection Module) a modul pro uvolnění lithia pro automatické nastartování reaktoru LRM (Lithium Release Module). Díky kombinaci modulů může reaktor pracovat automaticky bez výměny paliva až deset let. Je projektován tak, aby splnil bezpečnostní a provozní podmínky práce na povrchu Měsíce. Jeho provoz nevyžaduje kvalifikovanou obsluhu, může ho řídit kosmonaut. Ve dne, který na Měsíci trvá 14 dní, je teplota na povrchu vyšší než 200 stupňů C, v noci, trvající také 14 dní, klesá teplota pod nulu. Jednou z výhod reaktoru RAPID-L je to, že jeho výkon může být měněn změnou průtoku chladiva. Provozní nominální výkon u začínající aktivní zóny může být v rozmezí 45 až 108 %, u končící aktivní zóny 37 - 87 %. Okolo reaktoru jsou 4 tepelné výměníky (segmenty pro přeměnu energie), každý segment má smyčku pro odvod tepla propojenou s radiátory. Osm radiátorových panelů je uspořádáno kolem tepelných výměníků. Celková plocha radiátorů je 240 m^2. Každý segment je složen z 18 termoelektrických modulů, které jsou vybaveny polovodiči SiGe. Každý termoelektrický modul obsahuje 720 termoelektrických jednotek s dvanácti trubkami vyhřívanými sodíkem na horkých stranách a s třinácti trubkami vyhřívanými cesiem na chladných stranách.

Výměna paliva se uskuteční každých deset let. Koncepce reaktoru RAPID-L umožňuje rychlou a snadnou výměnu paliva již po dvou týdnech po odstavení reaktoru, kdy rozpadové teplo aktivní zóny je 10 kW. Při výměně je celá „maxinábojnice“ obsahující integrovaný palivový soubor s lithiem vyzvednuta z reaktorové nádoby a uložena do skladovacího kontejneru, který rovněž obsahuje lithium. Po uložení vyhořelého paliva do skladovacího kontejneru je na něj umístěn radiátor pro odvod rozpadového tepla. Kompletní skladovací kontejner je pak umístěn do vyhloubené válcové dutiny, aby se minimalizovala radiační dávka, kterou by mohl obdržet kosmonaut /9,10/.

I když je reaktor RAPID-L vyvíjen pro aplikace na Měsíci, může být použit i na Zemi - buď v městských oblastech vyspělých zemí pro výpomoc ve špičkách, nebo v rozvojových zemích v oblastech vzdálených od elektrických sítí, nebo tam, kde je ekonomicky výhodné zajistit místní výrobní kapacity. Může být využit i pro odsolování mořské vody /9,10/.



Obr. 5.16: Rychlý reaktor Rapid

Prameny:

/1/ Nuclear News, 1998, č. 11, s. 3
/2/ Nuclear News, 1999, č. 5, s. 26 - 34
/3/ Nuclear News, 1999, č. 10, s. 4
/4/ Atomnaja eněrgija, 88, 2000, č. 3, s. 176 - 183
/5/ Bulletin of the Atomic Scientists, 2003, č. 4, s. 9 - 11
/6/ Atomnaja eněrgija, 88, 2000, č. 2, s. 95 - 108
/7/ Nuclear News, 1999, č. 12, s. 34 - 40
/8/ Nuclear News, 2000, č. 3, s. 4
/9/ Nuclear Engineering International, 2002, č. 579, s.26 - 31
/10/ Nuclear Engineering International, 2004, č. 596, s. 24 - 25

6.0

Neenergetické využití jaderné energie

Dnes téměř neexistuje obor lidské činnosti, v němž by nějakým způsobem nebyla uplatněna jaderná věda a technika. Když se zeptáte lidí, proč jsou proti jaderné energii, obvykle poukáží na nebezpečné záření, na problematiku radioaktivních odpadů, na černobylskou havárii a jaderné zbraně. Příznivci jaderné energie zase zdůrazní, že nejsou vypouštěny skleníkové plyny, že radioaktivní odpady jsou bezpečně ukládány, apod. Nikdo se ale nezmiňuje o tom, že kromě výroby elektřiny se jaderná energie také využívá v nejrůznějších oblastech, medicínou počínaje a radiačním ošetřováním potravin konče.

Zařízení využívající jadernou techniku ve formě ionizujícího záření a radioizotopů pro nejrůznější neenergetické aplikace lze rozdělit do několika kategorií /1/.

- Analytická zařízení: Jejich účelem je provádět kvantitativní analýzy nebo sledovat složení vzorků. Patří sem například neutronová aktivační analýza, rentgenová fotoelektronová spektroskopie, rentgenová fluorescenční analýza, neutronová radiografie. Slouží například k určování elementárního složení vzorků, k vyhodnocení stavu životního prostředí, odpadů, v soudním lékařství. Tato technika byla mimo jiné použita i k analýze vzorků měsíční horniny.
- Měřicí zařízení: Typickou aplikací je měření vlhkosti a složení horniny, což je důležité při výstavbě silnic a jiných staveb. Uplatní se i při určování vlhkosti dřevěné drtě k výrobě papíru, tabákových listů, dále při měření úrovně hladiny kapalin v lahvích, konzervách, nádržích, vlhkosti půdy, atd.
- Zobrazovací zařízení: S pomocí zobrazovací techniky, například tomografické, radiografické nebo skenovací, lze sledovat vnitřní strukturu materiálů, konstrukcí a staveb. Používá se i při kontrole jakosti v průmyslu, například při výrobě trubek, které musí mít stejnoměrnou tloušťku stěny. Díky tomografii je možno tento požadavek splnit. Uvedené metody umožňují nedestruktivním způsobem odhalit skrytou korozi při údržbě letadel nebo při kontrole mostů a jiných staveb ohrožených korozí výztužných prvků. Zatímco dříve bylo nutno při zjišťování koroze demontovat celé části letadel, s použitím radiografické techniky bylo možno přesně lokalizovat korozi a ušetřit čas i peníze.
- Radiační procesy: Cílem je bombardovat daný vzorek zářením, bez ohledu na to, zda jde o potraviny, chirurgické nástroje nebo i jiné materiály a dosáhnout tak jejich sterilizaci nebo získání nových vlastností. Při radiačních procesech se používají dávky o různé velikosti, jak ukazuje následující přehled: /4/.

Aplikace	**Požadovaná dávka v kGy**
Desinfekce	0,25 - 1,0
Ošetřování potravin	1,00 - 25,0
Sterilizace v lékařství	20 - 30
Ošetřování nátěrů	20 - 50
Polymerizace	50 - 100
Křížení polymerů	100 - 300

- Stopovací technika: Při této metodě se používají radioaktivní částice nebo neradioaktivní aktivovatelné částice, které mohou být později aktivovány, aby sledovaly pohyblivé systémy, jako je tok řek, průtok kapalin čerpadlem, potrubím, ap. S použitím značených radioizotopů a detektorů lze zjistit netěsnosti jak potrubí, tak i opotřebení pístů motorů. Pro tyto účely se používají izotopy manganu-56, zlata-198 a sodíku-24, které mají poločas rozpadu kratší než 3 dny.

K využití jaderné techniky jsou k dispozici jak fixní zařízení (výzkumné reaktory, urychlovače částic, kobaltové ozařovače), tak přenosná zařízení (neutronové generátory, vlhkoměry).

Praktické aplikace jaderné techniky se neobejdou bez výroby nejrůznějších druhů radioizotopů.Ty jsou vyráběny hlavně ve výzkumných reaktorech nebo urychlovačích, jak ukazuje tabulka 6.1:

Tab. 6.1: Hlavní druhy radioizotopů (RI) produkované v reaktorech a urychlovačích /2/.

RI z reaktorů	**RI z urychlovačů**	**RI z vysokoenergetických urychlovačů**
Molybden-99	Thalium -201	Stroncium-82
Kobalt-60	Jod-123	Magnezium-28
Indium-192	Galium-67	Měď-97
Fosfor-32	Indium-111	Hliník-26
Fosfor-33	Rubidium-81	Křemík-32
Xenon-133	Sodík-22	Gadolinium-148
Jod-131	Kobalt-57	Hafnium-172
Jod-125	Paladium-103	Olovo-200
Stroncium-89	Fluor-18	

Uhlík-14	Uhlík-11
Kalifornium-251	Dusík-13
Síra-35	Kyslík-15
Zlato-198	
Chrom-51	
Thalium-204	
Samarium-153	
Gadolinium-159	
Železo-59	
Měď-64	

Tabulka 6.2 uvádí přehled o hlavních zařízeních ve světě, která produkují radioizotopy. (Stav kolem roku 1998.)

Tab 6.2: Zařízení produkující radioizotopy ve světě /2/.

Druh zařízení	**Počet**
Výzkumné reaktory	75
Reaktory s rychlými neutrony	2
Jaderné elektrárny produkující Co-60	méně než 10
Urychlovače:	
■ cyklotrony pro výrobu lékařských izotopů	48
■ cyklotrony pro pozitron emitující tomografii (PET)	130
■ ostatní urychlovače	10
Separační zařízení	21
Zařízení k výrobě těžkých stabilních izotopů	9

Radioizotopy se vyrábějí v celé řadě zemí. V západní a východní Evropě včetně bývalého SSSR je to 25 zemí, v Severní Americe 3 země, v Asii a Středním východě 12 zemí a v deseti dalších zemích světa. Téměř všechny země jsou závislé na dovozu alespoň některých radioizotopů, které samy neprodukují. Většina produkčních zařízení je v provozu v zemích OECD, které jsou současně největším spotřebitelem RI /2/.

Využívání radioizotopů a ionizujícího záření není nic nového, protože již začátkem 30. let 20.století použil George de Hevesy radioizotopy k výzkumu toho, jak zvířata využívají vápník a fosfor k tvorbě kostí a L.V. Stadler použil ionizující záření k vytvoření mutací u kukuřice a ječmene. To, co se za uplynulých desetiletí změnilo, je obrovský rozvoj těchto metod ve prospěch lidstva /3/. Radiační technologie zahrnující jak gama zářiče, tak urychlovače elektronů, přinášejí značné přínosy v průmyslu, dále ve zdravotnictví, potravinářství i ochraně životního prostředí. Například radiačně indukované polymerizace a modifikace polymerů, úpravy povrchů a křížení přidávají hodnotu produktům způsobem přátelským k životnímu prostředí a představují již průmysl s tržbami v miliardách dolarů. Aplikace radioizotopů v hospodářství USA v roce 2003 znamenala tržby ve výši 300 miliard USD a zaměstnanost asi 4 milionů osob /14/. Největší komerční aplikace při radiačním zpracování materiálů představuje využívání urychlovačů o vysokých energiích. Zde jsou některé jejich výhody /4/:

- žádané chemické změny jsou dosahovány při pokojové teplotě,
- získávají se mnohem čistší produkty, protože nejsou zapotřebí chemické katalyzátory, iniciátory, apod.
- dosahuje se vysoké energetické účinnosti.

Komerční využívání radiačních technologií bylo zahájeno sterilizací lékařských nástrojů a materiálů s použitím gama záření asi před padesáti lety. Díky vynaloženému úsilí ve výzkumu a vývoji a také díky požadavkům průmyslu, zejména při radiačním zpracování polymerů z hlediska větších kapacit, bylo nutno ve větším měřítku využívat urychlovače. Jen v oblasti radiační polymerizace a modifikace polymerů je dnes ve světě v provozu na 1 000 komerčních urychlovačů. Projevuje se stále větší snaha používat tato zařízení i v radiační sterilizaci a při ošetřování potravin.

Urychlovače lze podle jejich velikosti rozdělit do 3 kategorií /5/.

- Nízkoenergetické: 150 - 350 keV až 400 -700 keV. Hlavním využitím je ošetřování povrchů tenkým filmem, laminace, výroba antistatických, protimlžných filmů, povrchové nátěry dřeva apod.
- Středněenergetické: 1 - 5 MeV. Hlavní využití je při sterilizaci lékařských nástrojů a materiálů, omezené využívání při ošetřování potravin, modifikaci polymerů.
- Vysokoenergetické: 5 - 10 MeV. Hlavní využití spočívá v prodlužování skladovatelnosti potravin, ovoce, zeleniny atd., ve sterilizaci lékařských produktů, úpravě odpadních vod, modifikaci polymerů.

V roce 1998 bylo ve světě v provozu přes 13 000 urychlovačů v oblasti vědy, lékařství a průmyslu, jak je patrné z tabulky 6.3:

Tab. 6.3: Počet urychlovačů ve světě v roce 1998 /6/.

Kategorie	Počet
Urychlovače vysokých energií nad 1 GeV	112
Radioterapie	více než 4 500
Výzkumné urychlovače	cca 1 000
Výroba radioizotopů pro lékařské aplikace	cca 200
Radiační ošetřování včetně výzkumu a vývoje	1 000 - 1 500
Implantace iontů	cca 6 000
Synchrotronní radiační zdroje	cca 80
Celkem	13 400

Celkový ekonomický přínos používání radioizotopů a ionizujícího záření může být značný, jak dokládají údaje z USA a Japonska z roku 1997. V USA dosáhly tyto tržby celkem119 miliard USD a v Japonsku 52 miliard USD, z toho v průmyslu 39 miliard, u lékařských aplikací 12 miliard a v zemědělství
1 miliardu USD. Tabulka 6.4 uvádí ekonomické přínosy aplikací radioizotopů a ionizujícího záření v průmyslu USA a Japonska .

Tab.6.4: Aplikace radioizotopů a ionizujícího záření v průmyslu USA a Japonska v roce 1997 (miliardy USD) /7/.

Aplikace	USA	Japonsko
Sterilizace lékařských nástrojů a materiálů	4,8	2,3
Polovodiče	37,2	28,4
Radiografické zkoušení	0,65	0,26
Aplikace RI a radiační ochrana	-	0,54
Radiační ošetřování radiálních pneumatik	13,5	8,4

Podle /15/ jsou v Japonsku téměř všechny radiální pneumatiky radiačně ošetřeny při tržbách 9 miliard USD. V celosvětovém měřítku je tržní hodnota radiačně ošetřených pneumatik 35 miliard USD.

6.1 Některé aplikace ve zdravotnictví

Lékařská oblast je tou oblastí, kde jsou přínosy jaderné techniky nejzřejmější. Jaderná technika zde umožňuje lékaři dozvědět se, co se děje v těle pacienta neinvazivním způsobem, tj. bez řezání a operace. Lékařské aplikace spoléhají na dvě jedinečné charakteristiky radioaktivních materiálů:

- na schopnosti jaderných částic (obvykle gama paprsků) pronikat velkým množstvím materiálů,
- na možnosti detekovat malá množství jaderných materiálů a identifikovat druhy atomů v tomto materiálu.

Nejčastějšími aplikacemi jaderné techniky v lékařství je diagnostika a terapie. V diagnostice se nejčastěji používá technecium-99 m(Tc-99m). Tc-99m vzniká v reaktoru bombardováním jiných atomů neutrony. Je to nestabilní prvek, který se rozpadá během dvou hodin. Dalším používaným nestabilním prvkem je molybden-99, jehož poločas rozpadu jsou dva dny. Pokud jde o nukleární terapii, nemocná část těla je vystavena vysokým dávkám záření, které ničí nemocnou tkáň /8/.

Ve světě se každý den uskuteční na 50 000 postupů využívajících radioizotopy. To představuje ročně kolem 18 milionů procedur od diagnostiky až po terapii /9/. Dnes je ve světě přibližně 37 000 lékařských zařízení, která v různé formě využívají radioaktivní materiály, z toho je 6 700 zařízení v neuzavřené formě. Jedná se hlavně o radioizotopy s krátkou dobou rozpadu, které se brzy rozpadnou na úroveň přírodního pozadí. Výjimku tvoří C-14 a H3 s poločasem rozpadu 5 280 roků a 12,3 roků. Uzavřené zdroje se používají u teleterapie a brachyoterapie. Jen v USA se ročně uskuteční na 15 milionů diagnostických procedur a několik set tisíc terapeutických zásahů s využitím radioaktivních materiálů. Radioterapie se široce uplatňuje při léčení rakoviny ve více než 5 000 zdravotních střediscích ve světě a ročně pomáhá léčit miliony pacientů /14/.

Asi 70 % celosvětové poptávky po radioizotopech pro lékařské účely se vyrábí v kanadských výzkumných reaktorech NRU, které vyprojektovala, postavila a provozuje společnost AECL. Do celého světa dodala kolem 17 výzkumných reaktorů. Hlavním světovým dodavatelem radioizotopů pro lékařské účely je kanadská společnost MDS Nordion, která je dodává do 60 zemí světa. Jen v Severní Americe zásobuje více než 3 000 nemocnic požadovanými radioizotopy /9/.

Kanadská společnost AECL zrušila výstavbu dvou reaktorů MAPLE, určených k výrobě radioizotopů pro lékařské účely, protože se ani po dvanácti letech vývoje nepodařilo tyto reaktory uvést do provozu. Jejich vývoj byl zahájen v roce 1996, když největší světový výrobce RI, společnost MDS Nordian, uzavřel kontrakt s AECL na výstavbu dvou reaktorů MAPLE (Multipurpose Applied Physics Lattice, Experiment) o výkonu 10 MW. Rozhodnutí AECL nebude mít zatím vliv na dodávky RI, protože ty budou vyráběny v reaktoru NRU (National Research Universal), který má provozní licenci až do října 2011. /Nuclear News, 2008, č. 7, s.17/

Obr. 6.1: Leksellův Gamma nůž – ozařovací přístroj s 211 zářiči Co-60

6.2 Některé aplikace v průmyslu

Jaderná technika v různé formě má v průmyslu široké uplatnění. Používá se k výrobě detektorů kouře, k přesnému měření materiálů, ke kontrole svarů, pro účely datování, při detekci výbušnin, při nedestruktivním zkoušení materiálů, k testování léčiv, k radiačnímu ošetřování polymerů, k radiační úpravě nátěrových materiálů, k radiační vulkanizaci, k detekci stopových množství znečišťujících látek v životním prostředí, atd. Zmíníme se pouze o těch nejzávažnějších aplikacích.

6.2.1 Nedestruktivní zkoušení

Pro tyto účely se používá neutronová radiografie s využitím izotopu kalifornia-252. Moderní technika nedestruktivního zkoušení NDT (Nondestructive Testing) začínala radiografickým zkoušením brzy po objevení paprsků X v roce 1895.Velmi rychle se vyvíjela při kontrole jakosti zbraní a jiných vojenských výrobků během druhé světové války. V padesátých letech 20.století byl výzkum a vývoj většinou sponzorován jaderným a kosmickým průmyslem ve snaze nalézt inspekční technologie k zajištění vysoké bezpečnosti kritických komponent. Mezi nejvíce používané technologie patří zkoušky pronikáním barev, pronikání magnetickými částicemi, radiografické zkoušení (nejpopulárnější), zkoušení ultrazvukem a vířivými proudy (eddy-currents). Žádná země, která se snaží dostat na světový průmyslový trh se dnes neobejde bez techniky nedestruktivního zkoušení /10/. Tyto metody se používají v celé řadě důležitých průmyslových odvětví, jako je jaderný, letecký, kosmický, automobilový, železniční a elektronický průmysl. Například neutronová radiografie s využitím izotopu kalifornia-252 umožnila nedestruktivní zkoušení vojenských letadel, což zvýšilo efektivnost a důkladnost periodických zkoušek. Před zavedením této metody bylo prakticky nutno celé letadlo demontovat, ale po zavedení nové metody byla inspekce záležitostí pouze několika hodin /11/.

6.2.2 Radiační vulkanizace a ošetření polymerů

Při výrobě pneumatik se do gumy přidává síra a čím více se jí přidá, tím je pneumatika tvrdší. Vulkanizovaný produkt odolává vyšším teplotám, tlakům a mechanickým vlivům. Avšak vulkanizace s pomocí síry má stinné stránky ze zdravotního hlediska a také z hlediska ekologie a ekonomiky, protože k zahájení chemických reakcí jsou zapotřebí vysoké teploty, jsou emitovány zapáchající a toxické plyny, produkují se četná nežádoucí chemická rezidua. Všechny tyto nežádoucí vlivy odstraňuje ozařování gumy, umělých hmot a jiných polymerů gama zářením z kobaltového zdroje nebo svazkem elektronů. Proces se uskutečňuje při pokojové teplotě a je snadno regulován, neboť žádané vlastnosti se získávají změnou radiační dávky - dobou ozařování. Získané výrobky přitom nemají horší jakost než výrobky získané konvenční vulkanizací. Radiační vulkanizace je zvlášť výhodná pro asijské a pacifické země produkující přírodní latex, jako jsou Indie, Indonésie, Malajsie, Filipíny, Srí Lanka, Thajsko a Vietnam /10/.

Ozařování polymerů se uskutečňuje již od 50.let, kdy bylo zjištěno, že umělé hmoty mohou po ozáření získat nové vlastnosti. Radiací zpracované polymery získávají lepší tepelné, chemické a mechanické vlastnosti v pevném stavu, a to bez použití chemických katalyzátorů a za pokojové teploty. Proces ozařování je čistý, jednoduchý, rychlý a šetří energii /7/.

Mezi další aplikace jaderné techniky patří výroba izolace drátů, která je odolná vůči teplu a chemikáliím, výroba potrubí pro teplárenské systémy, výroba obalů pro potraviny, výroba ochranných materiálů proti korozi, výroba vysoce kvalitních pneumatik, výroba střešních krytin odolných vůči vlivům počasí, výroba izolace kabelů, ošetřování součástí automobilů odolných vůči teplu a chemikáliím, ošetřování povrchových nátěrů, atd. /7/. Ozářené materiály mají také vyšší pevnost a odolnost vůči nárazu a praskání pod napětím a jsou i odolnější vůči tečení.

Aplikace radiačně upravených nátěrů dřeva, oceli, umělých hmot, papíru i flopy disků ušetří miliony tun organických rozpouštědel na celém světě /8/. Důležitým úkolem byla ochrana kabelů v souvislosti s požadavkem přenášet jimi stále více energie, což vedlo ke zvyšování jejich teploty. Izolace kabelů se proto nesměla roztavit a oddělit od vodiče, což se podařilo vyřešit rovněž s pomocí záření /7/. V Japonsku ozařují vlákna karbidu křemíku (SiC) s pomocí urychlovače elektronů a získávají tak výrobky odolávající teplotám až 1 700 stupňů Celsia, zatímco konvenční materiály odolávají jen teplotám 1 200 stupňů C. Takto ozářené materiály jsou vhodné k výrobě turbínových lopatek, motorů, ozubených kol a materiálů pro ochranu kosmických lodí.

K prudkému rozvoji došlo v posledních dvou desetiletích. Například Van-de-Graffův urychlovač z 60. let je dnes instalován pouze jako muzeální kus.Toto zařízení poskytovalo energii 1 MeV a 250 W a bylo umístěno v místnosti o rozměrech 5 x 4 m. Dnes mají urychlovače 10 MeV a 200 kW a jsou umisťovány do budov o rozměrech 55 x 45 m, na jejichž výstavbu bylo spotřebováno na 115 tisíc m^3 betonu /7/.

Obr. 6.2: Průběžná radiační kontrola tloušťky a kvality ochranných panelů

6.3 Jaderná technika a ochrana životního prostředí

Radioizotopová technika se používá i při studiu změn v atmosféře a v globálních ekosystémech a k určení vlivu lidské činnosti na tyto systémy. Podrobně se těmito otázkami zabývalo mezinárodní sympozium o izotopové technice při studiu minulých a současných změn klimatu v hydrosféře a atmosféře, které se konalo ve Vídni ve dnech 14. až 18. dubna 1997 a jehož referáty byly uveřejněny v publikaci MAAE STI/PUB-1024, April 1998: Isotope technique in the study of environmental change. 932 stran.

Jaderná technika se uplatňuje i při čištění odpadních plynů s pomocí urychlovačů elektronů i při radiačním zpracování odpadních kalů z úpraven vod. Metoda čištění spalných plynů byla již vyzkoušena v Japonsku, Polsku, USA, Německu, Číně, Bulharsku, Brazílii a Malajsii. Bylo zjištěno, že jak SO_2, tak NO_x ve spalných plynech mohou být současně odstraněny ozařováním svazkem elektronů z urychlovače a že tímto způsobem lze odstranit téměř 90 % SO_2 a NO_x za použití dávky 1,2 - 1,7x10^4 Gy. Získaná kyselina sírová a dusičná je neutralizována amoniakem a následné produkty, jako je síran amonný a dusičnan amonný, jsou cenná umělá hnojiva. Při konvenčním způsobu čištění plynů vznikají odpadní vody, sádra a použité katalyzátory. Při aplikaci svazku elektronů dochází kromě výroby umělých hnojiv i ke snížení těkavých organických sloučenin /11/.

V Polsku je v provozu zařízení na čištění spalných plynů v uhelné elektrárně Dolna Odra o kapacitě 270 000 Nm^3/h, které zahrnuje 4 urychlovače 800 keV, 300 W. S energií svazku elektronů je toto zařízení největší na světě. Z provozních zkušeností vyplynulo, že účinnost odstranění SO_2 byla až 95 % (80 - 95 %), zatímco u NOx pouze 70 % (40 - 70 %) v závislosti na použité dávce 5 - 10 kGy. Zařízení bylo provozováno se dvěma urychlovači po dobu 3 000 hodin /12/. V čínské elektrárně Changdu pracuje zařízení o kapacitě 300 000 Nm^3/h při účinnosti odstranění SO_2 více než 80 % při použití dávky 3,2 kGy u plynů obsahujících 500 - 2 400 ppm SO_2. V Japonsku s podařilo odstranit

dioxiny ve spalovně odpadů v Takasaki na zařízení o kapacitě 1 000 m^3/h a s pomocí dávky 14 kGy se odstranilo více než 90 % dioxinů /7/.

Pokud jde o ozařování kalů z úpraven vody, je blízko Mnichova komerční ozařovna, která používá kobaltový zdroj. Výsledný produkt je využíván v zemědělství. Kaly z úpraven vody jsou silně kontaminovány patogeny včetně salmonely, a proto před jejich využitím je třeba provést jejich desinfekci. Velmi účinným prostředkem pro tyto účely je záření. V Japonsku se místo kobaltového zdroje používá urychlovač elektronů. Po ozáření následuje kompostování. Díky radiačnímu procesu je produkován hygieničtější a bezpatogenní kompost, zatímco konvenčním způsobem připravený kompost obsahuje 102 - 104 coliformních bakterií na gram. Náklady na přípravu kompostu ozařováním jsou srovnatelné s konvenčním způsobem /12/.

Prameny:

/1/ Nuclear News, 1999, č. 3, s. 24 - 28
/2/ Nuclear News, 1999, č. 9, s. 30 - 32
/3/ Speaking of Nuclear Energy, 1992, s. 45 - 54. (Highlights of Proceedings from IAEA Public Information Regional Seminars)
/4/ IAEA/TECDOC - 1386, s. 14 - 20 (Emerging Applications of Radiation Processing. Technical meeting 28.-30.4.2003, Vienna)
/5/ IAEA/TECDOC - 1386, s. 74
/6/ IAEA/TECDOC - 1386, s. 55
/7/ IAEA/TECDOC - 1386, s. 5 - 13
/8/ Speaking of Nuclear Energy, 1992, s. 25 - 32
/9/ Nuclear Enginering International, 2000, č. 557, s. 20 - 21
/10/ IAEA Bulletin, 1997, č. 1. Příloha s. 4 - 6
/11/ Nuclear News, 1998, č. 9, s. 36
/12/ Speaking of Nuclear Energy, 1992, s. 41 - 43
/13/ IAEA/TECDOC -1386, s. 153 - 160
/14/ Nuclear News, 2004, č. 13, s. 40
/15/ IAEA Bulletin, 2003, č. 2, s. 48 - 53

6.4 Využití jaderné vědy a techniky v zemědělství

Počet obyvatel na Zemi se neustále zvyšuje. Například v roce 1998 se narodilo 137 milionů dětí a 63 milionů lidí zemřelo, takže čistý přírůstek byl 84 miliony, což představuje jeden velký národ. Vzniká otázka, zda naše planeta je schopna uživit současných více něž 6 miliard lidí a další miliardy, které se narodí v následujících desetiletích. O schopnostech Země uživit obyvatelstvo se diskutuje již od dob Sokratových. Mnohokrát se předpokládalo, že naše planeta bude brzy přelidněna, což povede k hladomoru nevídaných rozměrů. Dosud se však tyto předpovědi nesplnily, včetně předpovědí novodobého následovníka T. Malthuse Paula Ehrlicha. Ten se v polovině 70. let domníval, že tehdejší počet 3,5 miliardy představuje limit a že uživit 6 miliard bude zcela nemožné. Dnes jsou však lidé dokonce lépe živeni než kdykoliv předtím. Koncem 60.let byla průměrná denní dávka potravin 2 360 kalorií, zatímco koncem 90.let to bylo 2 740 kalorií. Existuje zde ale nerovnoměrné rozdělení mezi obyvatelstvem různých zemí. Zatímco v západní Evropě to bylo 3 500 kalorií a v USA 3 700 kalorií, v Indii jen 2 200 a v subsaharské Africe 2 100 kalorií /1/. Přes dosažený pokrok ve výživě však přesto podle Organizace pro výživu a zemědělství (FAO) trpí ve světě hladem a chronickou podvýživou na 780 milionů lidí.

Světové zemědělství musí zjistit nejen dostatečnou výrobu potravin, ale musí omezit i posklizňové ztráty v rostlinné výrobě a omezit úhyn dobytka. Hmyzí škůdci způsobují ztráty na vyprodukovaných potravinách v rozsahu 25 až 35 % a nebezpečný hmyz napadá miliony kusů dobytka. V boji proti škůdcům se od poloviny 40. let používají pesticidy, které spolu s umělými hnojivy a zaváděním nových odrůd přispěly ke zvýšení produkce potravin pro zvyšující se počet obyvatel. K cílovému hmyzu se ale dostávalo jen asi 0,1 % pesticidů a přebytečné množství kontaminovalo půdu, vodu a biotu /2/. Mezi nejškodlivější hmyz patří octomilka ovocná (Mediterranean Fruit Fly), která napadá na 260 druhů ovoce a zeleniny v 82 zemích. Velké ztráty v živočišné výrobě, zejména v subsaharské oblasti, způsobuje moucha tse-tse, která přenáší spavou nemoc i na lidi. Miliony kusů dobytka ohrožuje

parazit Cochliomya hominivorax, který klade vajíčka do otevřených ran dobytka a jeho larvy se živí masem zvířat, která velmi trpí a často hynou /3/.

Uvedené problémy, spolu s obavami o zhoršování životního prostředí vlivem nadměrného používání pesticidů a umělých hnojiv, z odolnosti rostlin vůči pesticidům, z obav před chemickými rezidui v potravinách způsobujících rakovinu, ze snižování biodiverzity, ap., vedly k potřebě hledat nové strategie a technologie, které by byly méně závislé na pesticidech a umělých hnojivech. Východisko se nalezlo ve využívání jaderné vědy a techniky v rostlinné a živočišné výrobě a v potravinářství /3/.

Aplikace jaderné vědy a techniky v zemědělství se soustřeďuje do několika oblastí a tato činnost je v mezinárodním měřítku koordinována a podporována zejména dvěma mezinárodními organizacemi, a to Organizací pro výživu a zemědělství FAO (Food and Agricultural Organisation) a Mezinárodní agenturou pro atomovou energii (MAAE). Velký podíl na šíření nových metod má i laboratoř MAAE v Seibersdorfu v Rakousku.

Mezi hlavní metody využívání ionizujícího záření a radioizotopů v zemědělství a potravinářství patří zejména /3/:

- Indukování mutací v rostlinách k získání nových vlastností a rozšiřování genetické rozmanitosti druhů rostlin.
- Kontrola a likvidace hmyzích škůdců v rostlinné a živočišné výrobě ke zvýšení produkce plodin a zlepšení zdravotního stavu dobytka.
- Snižování posklizňových ztrát obilí, ovoce a zeleniny potlačováním klíčení a prodlužováním skladovatelnosti.
- Používání biologických hnojiv pro optimální využití půdy.
- Identifikace transferu pesticidů a agrochemikálií v životním prostředí a v potravním řetězci.
- Radiační ošetřování potravin.
- Využívání zasolených půd.

Dále se zmíníme o některých metodách využití ionizujícího záření a radioizotopů v zemědělství a potravinářství. Je třeba se ale vyvarovat toho, abychom nukleární metody považovali za všelék.Tyto metody mohou být doporučeny jen tehdy, jestliže jsou nejefektivnějším řešením daného problému. V zemědělství mohou být uvedené metody využívány jen ve spojení s jinými metodami a pracovníky důkladně seznámenými s příslušnou specializací.

6.4.1 Mutační šlechtění rostlin s využitím záření

Světová produkce potravin je založena na pěstování široké škály odrůd obilovin, ovoce, zeleniny a dalších plodin s pomocí konvenční metody křížení. Pěstitelé tak vyvinuli odrůdy, které rostou v různých typech půd, v odlišných klimatických podmínkách a v různých oblastech světa. Za posledních několik desítek let bylo vypěstováno více než 1800 mutantů rostlin, z toho většina byla získána s pomocí radiací indukovaných změn. Jsou součástí databáze vedené FAO a MAAE /4/. Při aplikaci této metody si příslušná odrůda ponechává všechny své původní vlastnosti, ale získává navíc jednu nebo dvě vlastnosti nové /5/.

Díky aplikaci ionizujícího záření se nové odrůdy pěstují na milionech hektarech půdy na celém světě. Všechny tyto druhy byly získány v rámci programů mutačního šlechtění, které byly realizovány v průběhu deseti až dvaceti let s pomocí FAO a MAAE. Po ozáření semen nebo jiných biologických materiálů ionizujícím zářením jsou k dispozici rostliny s vyššími výnosy, vyšší jakostí, odolnější vůči nemocem, teplu, mrazu, suchu nebo jiným stresovým podmínkám. Metoda radiačního mutačního šlechtění se používá jak u potravinářských a průmyslových plodin, tak i u okrasných rostlin, květin a trav /6/.

V Asii ovlivnila nová technologie zejména pěstování rýže, pšenice, bavlny, fazolí, podzemnice olejné, hrášku ap. Například produkce rýže se v období 1966 až 1990 zvýšila dvojnásobně z 257 milionů tun na 520 milionů tun. Čínský mutant rýže (Yuangfenzao) byl zaveden v roce 1975 a nyní se pěstuje na ploše 1,1 milionu hektarů na dolním toku řeky Jang-c´. Tato rýže dozrává o 3 týdny dříve než původní odrůda.V Pákistánu byl vyvinut mutant bavlny NIAB 78, který byl poprvé vyset v roce 1983 a nyní se pěstuje na šedesáti procentech ploch určených pro pěstování bavlny. V Indii se využívají mutanty

s cennými agrotechnickými vlastnostmi, jako jsou vysoké výnosy a odolnost vůči nemocem. Týká se to například rýže, fazolí, podzemnice olejné a hrášku /6/.

Radiační mutační šlechtění vedlo i jiných částech světa k vývoji nových druhů plodin. Například ječmen pěstovaný v Evropě a používaný k výrobě piva v České republice nebo skotské whisky pochází z mutantů vyvinutých přímo nebo nepřímo křížením s radiačně ošetřenými mateřskými osivy. Totéž se týká i 80 % rýže pěstované v Kalifornii a 60 % pšenice sklízené v Itálii k výrobě těstovin /6/. V Peru je zaváděn nový mutant ječmene (UNA La Molina 95), který je odolný vůči suchu, mrazu, má vysokou nutriční hodnotu, dříve dozrává a má dvojnásobné výnosy i v tvrdých vysokohorských podmínkách And /7/. Těchto několik příkladů svědčí o tom, že mutační šlechtění obilí a dalších plodin s pomocí záření pomáhá vyživovat miliony lidí na celém světě.

S pomocí radiačně indukovaných mutací lze vypěstovat i ovocné stromy, jako jsou datlovníky, jabloně, švestky, třešně, pomerančovníky, citrusovníky, atd. Stromy mají nízký vzrůst, vysokou plodnost a rychlý růst. Mutační šlechtění je zvlášť důležité při pěstování energetických rostlin nebo stromů určených pro papírenský průmysl. S pomocí gama záření se rovněž podařilo vypěstovat nový druh trávy pro golfová hřiště, který byl pod názvem Tif Eagle patentován ministerstvem zemědělství USA. Tato tráva je ověřována od roku 1995. Vyznačuje se hustým, rychle se rozvíjejícím kořenovým systémem, který vytlačuje plevele, takže není třeba používat tak velké množství herbicidů /8/.

V dnešní době existuje v Severní Americe přes 200 a v Evropě více než 100 komerčních společností, které uskutečňují ozařování semen rostlin a rozesílají je do zemí, které ozařovací zařízení nemají.

6.4.2 Radiační sterilizace hmyzích škůdců

Jinou aplikací jaderné techniky je ozařování hmyzích samečků a jejich masové vypouštění do přírody. Protože po ozáření jsou samečci sterilní, po spáření s divokými samičkami nevzniká nová generace daného hmyzu a po několika opakováních procesu je jeho výskyt pod kontrolou nebo zcela zlikvidován. Tato metoda je známa po anglickou zkratkou SIT (Sterile Insect Technique) a byla úspěšně vyzkoušena při likvidaci celé řady hmyzích škůdců na celém světě. (Viz obr. 6.3.)

Mezi nejdůležitější škůdce patří octomilka ovocná, moucha tse-tse a moucha druhu Cochliomyia hominivorax (C.h.). Octomilku se podařilo vyhubit v Kalifornii, na Floridě, v Austrálii, v Japonsku, Mexiku, v Texasu, na Mariánách a na Havaji a její šíření se podařilo zastavit v Itálii, Španělsku a v Tunisku /8/. O ekonomickém přínosu likvidace octomilky svědčí mimo jiné i tyto údaje: Mexický program vyhubení tohoto škůdce znamená roční přínosy ve výši 500 milionů USD a v Japonsku 60 - 70 milionů USD. Ekonomický přínos vyplývá například z toho, že se zvyšují výnosy a jakost ovoce a zeleniny, omezuje se používání insekticidů, zvyšuje se možnost exportu a vytvářejí se nové pracovní příležitosti /6/.

Radiační sterilizace hmyzích škůdců přináší značné výhody i v živočišné výrobě. Na Zanzibaru se s pomocí metody SIT podařilo zcela vymítit mouchu tse-tse. Od září 1996 se zde tato moucha neobjevila a dobytek, který byl dříve napadán spavou nemocí (trypanosmózou) v průměru 17 - 25 %, je dnes mnohem zdravější. Likvidace mouchy tse-tse probíhá i v subsaharské Africe o rozloze přes 10 milionů kilometrů čtverečních, kterou zamořuje na 22 druhů této mouchy. Moucha pustoší celá stáda dobytka přenášením spavé nemoci. Přímé ztráty způsobované touto nemocí se v Africe odhadují na 600 až 1200 milionů dolarů. Světová zdravotnická organizace navíc odhaduje, že v Africe je více než 300 000 lidí infikováno humánní spavou nemocí, která vede až ke smrti postiženého /9/.

Obr. 6.3: Zařízení na produkci radiačně sterilizovaných much Tse tse

Před rokem 1982 ničila stáda dobytka v USA a v Mexiku moucha C.h., která klade vajíčka do otevřených ran dobytka a larvy se pak živí jejich masem. Na Floridě byl zahájen program likvidace tohoto škůdce v roce 1957 a do roku 1966 byly USA prohlášeny za stát bez C.h. Tuto mouchu se podařilo zlikvidovat i v Mexiku, Belize, Hondurasu a Guatemale. Podle ministerstva zemědělství USA znamenalo vyhubení C.h. celkový ekonomický přínos 11,5 miliardy dolarů. Roční přínos se dnes odhaduje na 380 milionů USD, a to díky zvýšení živočišné produkce /6/. Ekonomický přínos likvidace parazitu C.h. v Mexiku se za 30 let odhadl na 3 miliardy USD a návratnost vynaložených prostředků se udává v poměru 10 : 1. V roce 1976 bylo v Mexiku otevřeno ozařovací zařízení, které za jeden týden dokázalo vyprodukovat na 500 milionů ozářených samečků C.h. Díky tomu se libyjské vládě ve spolupráci s FAO a MAAE podařilo zcela zlikvidovat tuto nebezpečnou mouchu /7/. Na mezinárodním sympoziu o dobytčím moru, který v roce 1997 zorganizovala MAAE a FAO, bylo konstatováno, že by toto onemocnění mělo být v Africe pod kontrolou během asi pěti let, čímž by se zamezilo nejenom velkým ztrátám dobytka a hladomoru, ale byl by umožněn i obchod s živými zvířaty a masnými produkty /7/. O významu nukleárních metod v živočišné výrobě, zejména v rozvojových zemích, svědčí velký počet chovaných domácích zvířat potenciálně ohrožených různými nemocemi (viz tabulka 6.5).

Tabulka 6.5 : Počet domácích zvířat chovaných v rozvojových zemích (miliony kusů) /10/.

Druh zvířat	Celkový počet	Podíl v % z celkového počtu ve světě
Buvoli	137,7	99,5
Hovězí dobytek	855,0	67,2
Kozy	463,2	94,1
Ovce	601,2	52,5
Osli	38,8	95,8
Velbloudi	17,2	98,9
Koně	42,6	65,4
Muly	14,7	97,4

Kolem roku 2006 se každý týden ve světě vyprodukovalo na 4 miiliardy sterilních samečků, z nichž 3,5 miliardy jsou samečci octomilky. V provozu je ve světě na 30 sterilizačních zařízení a nejnovější se budují v Bahii v Brazílii a ve Valencii ve Španělsku. V bohatších zemích se přínosy pro exportéry ovoce a zeleniny, národní hospodářství a zdravotnictví udávají na desítky miliard dolarů ročně.
V chudších zemích to znamená přežití farmářských rodin, které jsou závislé na domácích zvířatech a plodinách. /IAEA Bulletin, 2007, č. 2, s. 32-40/

6.4.3 Zlepšování zdravotního stavu dobytka

Jaderná technika ve formě radioizotopů může hrát významnou úlohu i při zlepšování zdravotního stavu dobytka, například u vodního buvola, tohoto nejdůležitějšího asijského domácího zvířete. Buvol je zde jak zdrojem mléka a masa, tak i tažné síly. V 70. letech byli buvoli v Indii a Indonésii krmeni rýžovou slámou a trávou. Toto krmení je špatně stravitelné a obsahuje málo proteinů a minerálních solí, které jsou zapotřebí k získání vyrovnané výživy. Nedostatečná výživa pak nepříznivě ovlivňuje produkci mléka, masa i tažnou sílu. Proto byl v Indii a Indonésii zahájen výzkumný program, jehož cílem bylo zjistit, jak buvoli tráví různé druhy lokálně dostupných krmiv přidáním materiálů značených izotopem uhlíku-14, fosforu-32 a dusíku-15. Díky získaným informacím byly pak do krmiv přidávány různé doplňky, které přispěly ke zvýšení produkce mléka a váhových přírůstků. V Indonésii musel buvol dříve zkonzumovat 55 kg trávy k získání 1 kg váhového přírůstku. Po přidání 150 g směsi melasy, močoviny a proteinů bylo zapotřebí zkonzumovat jen 10 kg trávy k získání stejného váhového přírůstku, což zvýšilo účinnost přeměny krmiva na maso. Úspěšné byly výsledky výzkumu i v Indii, kde se buvoli chovají hlavně pro mléko. Například v největším zemědělském družstvu v Anandu ve státě Gužarat se v roce 1989 produkce mléka zvýšila o 30 %, celkem asi o 50 milionu litrů. /6/

6.4.4 Biologická hnojiva

Dalším cenným přínosem pro zemědělství jsou i radioizotopy, s jejichž pomocí je umožněn pohled do životních pochodů rostlin. Lze zjistit, jak tyto pochody vznikají, odhalit faktory, které je ovlivňují a díky jejich pochopení vyvinout způsoby jak procesy změnit a maximalizovat rostlinnou a živočišnou výrobu. Jednou z možností využití radioizotopů je fixace atmosférického dusíku s využitím izotopu dusíku-15. Ve většině tropických a subtropických zemí chybí v půdě dusík a protože mnozí farmáři si nemohou dovolit dusík aplikovat, je růst plodin malý. Výjimku tvoří rostliny, které jsou schopné přímo přijímat dusík z atmosféry. Patří mezi ně například luštěniny, které mohou fixovat až 250 kg atmosférického dusíku na hektar a mohou být pěstovány i na méně kvalitních půdách /6/.

Mezinárodní organizace pro výživu a zemědělství ve spolupráci s Mezinárodní agenturou pro atomovou energii vyvinuly stopovací techniku, s jejíž pomocí lze identifikovat bakterie Rhizobia, které přímo fixují atmosférický dusík v kořenovém systému luštěnin a následných plodin. Jiným způsobem rostliny atmosférický dusík využít nemohou. Protože v přírodních podmínkách luštěniny tyto bakterie často nenacházejí, jsou semena uměle naočkována bakteriemi Rhizobia v kapalné formě. Bakterie stimulují tvorbu kořenových nodulů a fungují jako biologická továrna na dusíkaté hnojivo tím, že přeměňují atmosférický dusík na formu přímo využitelnou rostlinami. Tato jaderná technika se označuje jako biologická fixace dusíku - BNF (Biological Nitrogen Fixation). Zkoušky potvrdily, že naočkování semen biohnojivem zvýšilo průměrné hektarové výnosy soji více než dvojnásobně a mělo lepší výsledky než na polích s využitím standardního množství dusíkatého hnojiva. Návratnost vynaložených prostředků při použití naočkovaných semen byla přibližně 100 dolarů na 1 vynaložený dolar /8/. V Zimbabwe se díky biohnojivům podařilo zvýšit výnosy obilovin až pětinásobně. Laboratoř v Zimbabwe je schopná vyprodukovat za rok až 300 000 balíčků s bakteriemi Rhizobia, přičemž jeden balíček stačí na zpracování 50 kg semen. O využití této metody projevily zájem také v Keni, Senegalu, Tanzánii, Zambii a Bangladéši. V Bangladéši bylo prokázáno, že biologická fixace dusíku u podzemnice olejné může výnosy zdvojnásobit. Metoda má i další výhody, neboť může omezit používání umělých hnojiv znečišťujících spodní vody, zvyšujících riziko úniku chemikálií a zvyšujících obsah atmosférického oxidu dusíku, který je potenciálním skleníkovým plynem /8/. FAO a MAAE společně podporují na 30 projektů využívání biohnojiv v Bangladéši, Číně, Indii, Malajsii, Pákistánu, Thajsku, Vietnamu, na Filipínách a Srí Lance /7/.

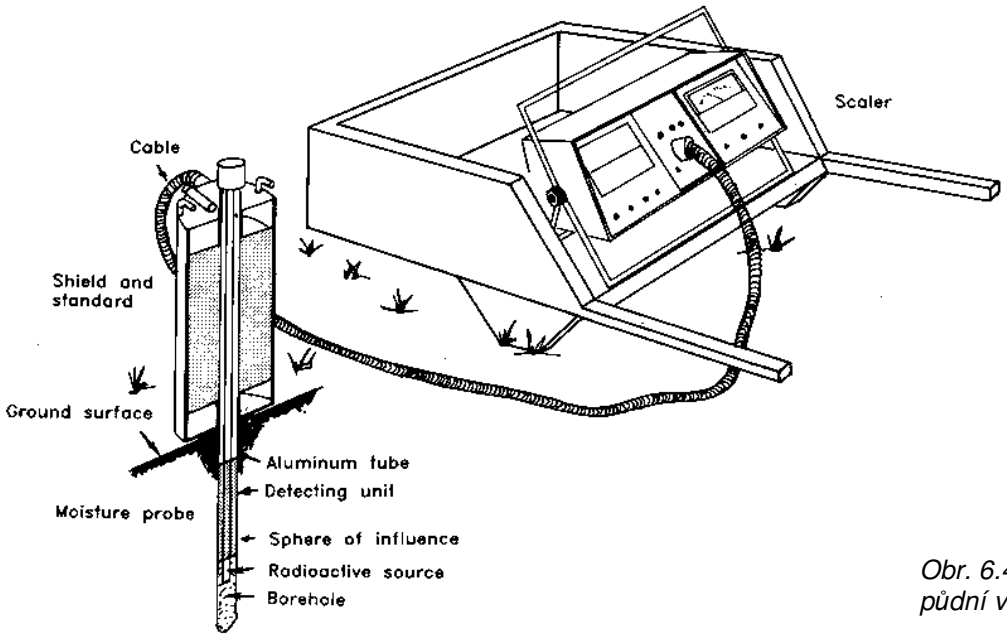
S pomocí umělých hnojiv značených izotopem dusíku-15 je možno kvantifikovat proces biologické fixace dusíku, což umožňuje určit, kolik dusíku získávají různé plodiny z půdy, umělých hnojiv a atmosféry. Díky tomu lze vypracovat strategii hnojení a vybrat plodiny, které nejefektivněji fixují dusík. FAO odhaduje, že každý dolar investovaný do biohnojiv se rovná přidání 100 kg dusíkatých hnojiv, což se při hodnotě dolaru v roce 1999 rovnalo 50 - 75 USD/ha /6/.

6.4.5 Produktivní využití zasolených půd

Asi 10 % povrchu Země je pokryto různými typy zasolených půd a žádný kontinent se tomu nevyhnul. Tyto půdy mají obecně sníženou produktivitu. Zasolování půdy je stále závažnější problém, neboť nesprávné využívání zavlažovaných oblastí, odlesňování, přemíra vypásání a jiné lidské činnosti mají za následek sekundární zasolování, zejména v suchých a polosuchých oblastech Asie, Afriky a Latinské Ameriky. Podle odhadu FAO způsobila lidská činnost zasolení asi 77 milionů ha půdy, z toho 45 milionů v zavlažovaných a 32 milionů v nezavlažovaných oblastech. Problém nastává hlavně v suchých a polosuchých oblastech, kde je jediným zdrojem pro zavlažování podzemní slaná voda. V průběhu vývoje se několik set druhů rostlin přizpůsobilo a roste i tam, kde je k dispozici jen slaná voda. Tyto rostliny, označované jako halofyty, představují široký rozsah forem od trav a keřů až po stromy. Mnohé z nich mají velký potenciál dalšího vývoje. Za posledních 30 let, kdy se nedostatek sladké vody stal zřetelným, se zvýšil zájem o využívání těchto soli tolerujících rostlin. Z hlediska potenciálního využití ve formě zdrojů potravy, píce, hnojiva nebo průmyslových surovin bylo hodnoceno několik set druhů halofytů. K využití dosavadních poznatků zahájila MAAE výzkumný program, v jehož rámci je využívána jaderná technika. Využívání rostlin tolerujících soli vyžaduje, aby zavlažování bylo řízeno takovým způsobem, který by vyhovoval rostlinám a který by zamezoval akumulaci soli v horních vrstvách půdy. Nová technologie se označuje anglickým termínem biosaline agriculture (biosolné zemědělství) a používá několik jaderných metod:

- Byla vyvinuta neutronová sonda pro měření vlhkosti půdy, která se vkládá do trubek, které jsou trvale instalovány v dvoumetrové horní vrstvě půdy. Profily vlhkosti jsou stanovovány každých 7 až 10 dní. Sondy poskytují informace o vypařování, o množství závlahové vody pronikající do půdy, o množství vody a soli pod kořenovou vrstvou. Tyto údaje jsou důležité pro monitorování zásob vody v půdě a následné plánování závlah.
- S pomocí izotopové techniky lze sledovat ve vzájemných interakcích vodu, půdu a rostliny. Pro dynamiku pohybu soli v půdě a její příjem a distribuci v rostlinách slouží radioizotopové stopovače (tracers).
- V polních podmínkách je důležité monitorovat celkovou hustotu půdy s pomocí gama paprsků. Příslušná sonda je vybavena uzavřeným zdrojem cesia a vkládá se do stejné trubky jako neutronový měřič vlhkosti. Tato metoda umožňuje nedestruktivním způsobem měřit hustotu půdy v závislosti na hloubce a následně vypočítat porozitu půdy.
- S pomocí izotopů lze vyhodnocovat kvalitu vody, velikost zásob vody, množství a původ nových zdrojů vody a dynamické vlastnosti půdy.

Z výsledků měření lze získat informace o původu podzemní vody a nových přítocích a nakonec vypočítat vodní bilanci.



Obr. 6.4: Neutronový půdní vlhkoměr

MAAE zahájila svůj meziregionální projekt „Udržitelné využívání slaných podzemních vod a pouští pro pěstování rostlin“ v roce 1997 v následujících zemích: v Egyptě, Íránu, Maroku, Pákistánu, Sýrii a Tunisku, později také v Alžírsku, Jordánsku a Sjednocených arabských emirátech (SAE). Cíle projektu byly následující:

- Vyzkoušet známé soli tolerující halofyty na desetihektarových demonstračních plochách zavlažovaných slanou podzemní vodou a vybrat ty, které jsou výhodné z hlediska přežití a ekonomiky.
- Použít jadernou i jinou techniku k řízení závlah a snížení akumulace soli.
- Monitorovat dynamiku podzemních vod s pomocí chemické a izotopové analýzy ke zjištění kvality a množství nových přítoků vody.
- Předat technologii konečným uživatelům k ekonomickému využití.

Projekt byl realizován ve dvou fázích. První fáze trvala dva roky a zahrnovala omezený počet farmářů. Po ukončení druhé fáze v roce 2002 měla většina účastnických zemí demonstrační plochy o výměře 10 i více hektarů. Bylo prokázáno, že je ekonomicky výhodné pěstovat užitečné pro soli tolerantní plodiny na pouštích s využitím podzemních slaných vod. Na demonstračních plochách bylo pěstováno 63 druhů rostlin. Rostliny byly voleny hlavně z hlediska jejich hodnoty jako potravy a píce a pro jejich užitečnost jako stabilizátorů půdy a zdroje organické hmoty pro zlepšování jakosti půdy a životního prostředí. Většina druhů pocházela z příslušné oblasti a byla dobře adaptována na místní podmínky. Bez zavlažování by ale nepřežila. Po aplikaci vody, i když slané, tyto druhy začaly prospívat a dávaly mnohem více biomasy. Ve většině případů stačilo rostliny zavlažovat podzemní slanou vodou bez přidávání umělých hnojiv, protože většina vybraných dřevnatých rostlin patří mezi rostliny, které fixují dusík. Byla potvrzena realizovatelnost a nízká nákladovost nové technologie a nyní je možno zaměřovat se na zvyšování hektarových výnosů s využitím organické hmoty vypěstované v místě.

Výsledky výzkumu prokázaly, že

- v zúčastněných zemích lze v pouštních podmínkách pěstovat užitečné druhy rostlin ekonomickým způsobem,
- potenciální výhody biosolného zemědělství získaly pozornost u vědecké komunity a vládních představitelů, jakož i u konečných uživatelů,
- téměř všechny zúčastněné země uvažují o rozšíření výsledků výzkumů do jiných oblastí a o přípravě celonárodních programů. Mezi nimi je na prvním místě Pákistán a dále Írán, Egypt, Jordánsko a SAE,
- bylo vytipováno 20 demonstračních lokalit o celkové ploše 441 hektarů v pouštích a 251 farmářů používá novou technologii na výměře 582 ha,
- účast MAAE je nezastupitelná: školila pracovníky, dodala základní zařízení, zajistila transfer technologie i semen a pomohla s financováním.

Díky příznivým poznatkům schválila MAAE nový meziregionální projekt zahrnující 10 zemí Asie, Afriky a Latinské Ameriky, který se snaží získat nové druhy rostlin tolerujících soli pro pěstování v extrémních podmínkách. V Pákistánu se uvažuje o tom, že biosolné zemědělství bude praktikováno na milionu hektarů pouští. S realizací nové technologie se budou moci rolníci opět vracet do míst, odkud je poušť vyhnala. Mezi plodiny, které zde tolerují soli patří krmný ječmen, divoké olivy a pšenice. Velký přínos z nové technologie zemědělství očekává i Sýrie, kde půda kolem Eufratu, na níž se v 60. letech začala pěstovat bavlna, dnes připomíná krajinu pokrytou sněhovým prašanem (a bez bavlny). Syrská komise pro atomovou energii ve spolupráci s ministerstvem zavlažování připravuje plány na využívání biosolného zemědělství /11/.

Ve světě jsou statisíce hektarů, kde rostou akáty, eukalypty a trávy zavlažované podzemní slanou vodou a kde nebyly zjištěny negativní účinky u zvířat, jejichž píce byla vyprodukovaná na zasolených půdách. Je třeba se ale vyhnout příliš slané vodě a zde může sehrát svou úlohu právě jaderná technika tím, že bude pečlivě monitorovat úroveň vlhkosti v půdě a pohyb slané vody. Jaderná technika je přesnější a někdy jediným prostředkem ke studiu půdních a vodních podmínek. Díky pěstování biomasy se bude půda postupně vylepšovat a přinášet větší výnosy, rostlinný kryt sníží erozi, poskytne stín, vytvoří organickou hmotu a biologickou aktivitu v půdě a přetvoří tak mrtvou půdu

v živý dynamický systém. Žádná země si nemůže dovolit plýtvat vodou nebo opouštět zasolenou půdu a jaderná technika zde může pomoci produktivním a ekonomickým způsobem využít jak zasolenou půdu, tak také podzemní zásoby slané vody /12/.

Není sporu o tom, že nukleární technika v zemědělství přispívá ke zvýšení rostlinné i živočišné výroby a kromě toho znamená i přínos v oblasti ochrany životního prostředí a v nezávadnosti a bezpečnosti potravin. V budoucnu budou tyto výsledky bezpochyby ještě větší./6/.

Prameny

/1/ National Geographic, 1998, říjen, s. 58 - 66
/2/ IAEA Bulletin, 1998, č. 3, s. 24 - 30
/3/ IAEA Bulletin, 1998, č. 2, s. 44 - 46
/4/ IAEA STI/PUB-972, s. 5 (Induced mutations and molecular techniques for crop improvement. Symposium 19.-23.5.1995
/5/ IAEA Bulletin, 1998, č. 3, s.37 - 39
/6/ Speaking of Nuclear Energy, 1992, s.45 -54 (Highlights of proceedings from IAEA public information regional seminars)
/7/ IAEA Bulletin, 1997, č. 1. Příloha s. 2 - 8
/8/ Nuclear News, 1998, č. 10,s. 48 - 52 a s.58 - 62
/9/ Nuclear News, 1998, č. 1, s. 55 - 60
/10/ STI/PUB - 823, s. 7.(Feeding strategies for improving productivity of ruminant livestock in developing countries. Symposium 13.-17.3.1989, IAEA Vienna)
/11/ IAEA Bulletin, 2003, č. 1, s. 47 - 53
/12/ IAEA Bulletin, 1997, č. 3. Příloha s. 1 - 3

6.5 Radiační ošetřování potravin

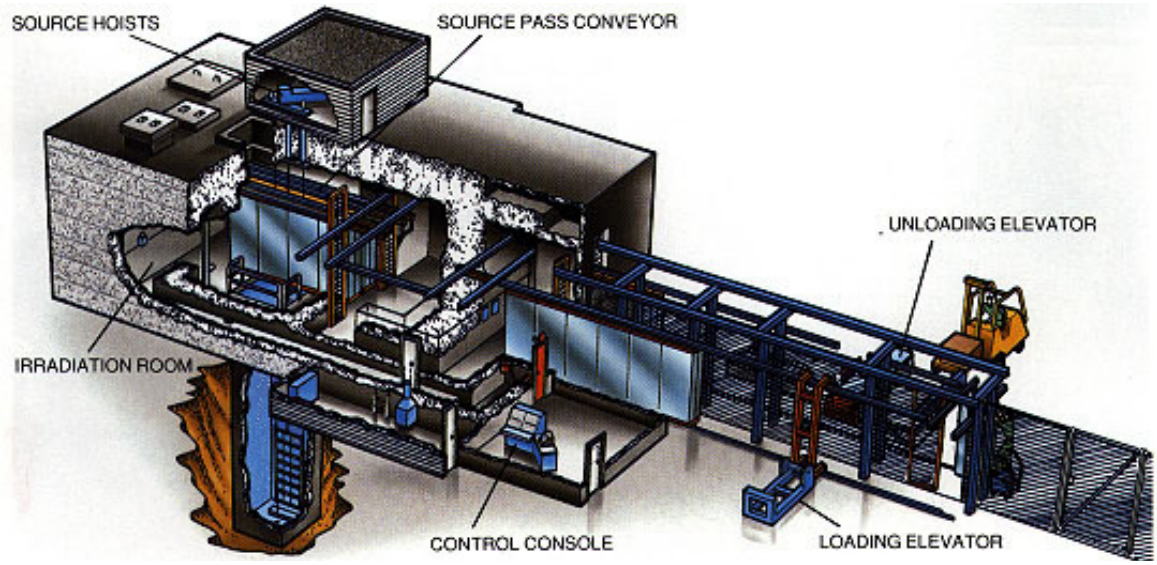
Jednou z nových moderních a dlouholetými výzkumy ověřených metod, zvyšující zdravotní nezávadnost potravin, snižující onemocnění z kontaminovaných potravin, prodlužující skladovatelnost potravin a zvyšující jejich jakost, je radiační ošetřování potravin s pomocí ionizujícího záření.

Výzkum a vývoj ozařování potravin se uskutečňuje v mnoha zemích v rámci národních programů. Při koordinaci a podpoře výzkumu a realizace hrají důležitou úlohu mezinárodní organizace, jako je Organizace pro výživu a zemědělství (FAO), Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE) a Světová zdravotnická organizace (WHO). Například MAAE poskytla rozvojovým zemím 40 ozařovacích zařízení na bázi kobaltu-60 /1/.

První patenty týkající se ozařování potravin byly uděleny již v roce 1918 v USA a v roce 1930 ve Francii, ale k jejich využití nedošlo, protože v té době nebyla k dispozici potřebná zařízení. Faktický výzkum radiačního ošetřování potravin byl zahájen v USA v rámci tehdejší komise pro atomovou energii (US AEC) a byl zaměřen hlavně na určení optimálních podmínek ozařování, jako je velikost radiační dávky, stupeň zralosti produktů, způsob balení a teplota a na různé způsoby využití, jako je sterilizace, pasterizace, hubení hmyzích škůdců, inhibice klíčení ap./1/
Výzkum podporovala americká armáda od roku 1953 a v roce 1961 - 1962 byla vybudována velká armádní laboratoř v Notticku ve státě Massachussetts, která se stala mezinárodně uznávaným střediskem ozařování potravin. Do konce 50. let měly výzkumné programy ozařování potravin také Kanada, Belgie, Francie, Nizozemí, SSSR, Polsko a Německo. Na prvním mezinárodním

sympoziu o ozařování potravin v roce 1966 v Karlsruhe hodnotili pokrok dosažený v této oblasti zástupci z 28 zemí. V roce 1970 byl ustaven Mezinárodní projekt ozařování potravin (IFIP), jehož cílem bylo uskutečnit celosvětový výzkumný program zdravotní nezávadnosti ozařování potravin. Poradcem byla Světová zdravotnická organizace. Po mnoha hodnotících zprávách expertů z FAO, MAAE a SZO bylo v roce 1980 konstatováno, že ozařování potravin do radiační dávky 10 kGy (1 Mrad) nepředstavuje toxikologické riziko a žádné nutriční nebo mikrobiální problémy. Tím byla aktivita tohoto projektu ukončena. V roce 1983 byla založena Mezinárodní poradní skupina pro ozařování potravin ICGF, v níž spolupracuje 46 členských zemí. Poradní skupina expertů dospěla k závěru, že na základě důkladných výzkumů do roku 1980 i po tomto roce je tato technologie dostatečně ověřena a bez škodlivých účinků na zdraví lidí. Na konferenci ve Washingtonu v roce 1998 bylo konstatováno, že radiačně ošetřené potraviny poskytují nezávadnou stravu vojákům v poli i astronautům a že jsou tyto potraviny vhodnější i pro pacienty v nemocnicích, kteří jsou po transplantacích a chirurgických zákrocích, neboť jsou lépe chráněni před patogeny než při použití standardního stravování /2/.
V roce 1983 byl přijat celosvětový standard pro ozářené potraviny Codex alimentarius. Komise, která ho vypracovala, reprezentuje 130 zemí.

Ozařování snižuje počet mikroorganismů tím, že je vystaví ionizujícímu záření. Jeho zdrojem mohou být gama paprsky emitované kobaltem Co-60 nebo cesiem-137 nebo svazek neutronů z urychlovače. Záření ničí patogeny napadáním jejich DNA. Genetický materiál uvnitř patogenní buňky je nenávratně poškozen zářením a buňka buď přestává růst, není schopna se rozmnožovat nebo umírá. Ozářené potraviny neobsahují zbytkovou radiaci, záření proniká do celého produktu, u některých druhů zeleniny (brambory, cibule) oddaluje klíčení, u ovoce a jiných produktů prodlužuje dobu skladovatelnosti, uchovává nutriční hodnotu a vitamíny. Bylo prokázáno, že záření významně nemění barvu, chuť, vůni ani strukturu potravin. Také hladina minerálů a nutriční hodnota proteinů v mase zůstává nezměněna /1/.



Obr. 6.5: Zařízení na ozařování potravin

Radiační ošetřování potravin bylo vzhledem ke své zdravotní nezávadnosti a dalším výhodám povoleno pro různé potraviny ve čtyřiceti zemích a je podporováno Světovou zdravotnickou organizací, lékařskými sdruženími a potravinářským průmyslem. První povolení bylo vydáno v USA v roce 1963 Úřadem pro potraviny a léky FDA (Food and Drug Authority) a týkalo se ničení hmyzích škůdců v pšenici a pšeničné mouce. Povolené radiační dávky byly v rozmezí 0,2 - 0,5 kGy. (1 gray (1 Gy) =1 joule/kg = jednotka pro energii absorbovanou ozářeným materiálem. 1 kGy = 1000 Gy).
V roce 1965 FDA povolil ozařovat brambory dávkou 0,05 - 0,15 kGy s cílem prodloužit dobu skladovatelnosti. V roce 1973 bylo povoleno ozařovat koření , v roce 1985 vepřové maso ke kontrole parazitů Trichionella spiralis použitím dávky 0,3 - 1 kGy. V roce 1986 bylo povoleno ozařovat některé druhy ovoce dávkami do 1 kGy k oddálení dozrávání. Pro ničení octomilky v ovoci byly povoleny dávky 0,25 kGy, které tohoto škůdce zcela zlikvidovaly /3/. V roce 1990 bylo vydáno povolení ozařovat drůbeží maso dávkou 3 kGy a koncem roku 1997 také čerstvé hovězí, jehněčí a vepřové maso a masné produkty s cílem zničit patogeny a prodloužit skladovatelnost /4/. V únoru 2000 povolilo

americké ministerstvo zemědělství používat záření k ošetření zmrazeného syrového masa a masných produktů dávkami 4,5 až 7 kGy /1/. Také v jiných zemích byly povoleny maximální dávky 10 kGy k ničení mikroorganismů v mase, masných výrobcích, sušeném hovězím mase nebo v drůbežím mase,

v ovocných džemech, sušené zelenině, dětské výživě, párcích, obilovinách, bramborových lupíncích a koření. FDA dospěl k závěru, že ozařování potravin přispívá ke zlepšení zdravotního stavu obyvatelstva snížením rizika onemocnění z konzumace potravin.

Tabulka uvádí přehled o některých rozvojových zemích, které mají ozařovací zřízení /5/.

Země	**Počet zařízení**	**Druh ozařovaných potravin**
Alžírsko	1	Brambory
Argentina	1	Koření, špenát, kakaový prášek
Bangladéš	1	Brambory, cibule, sušené ryby
Brazílie	3	Koření, sušená zelenina, ovoce, zelenina, obilí
Čína	11	Koření, zelenina, jablka, česnek, brambory, rýže, rajčata
Kuba	1	Brambory, cibule, fazole
Indie	2	Koření, cibule, brambory
Indonésie	2	Koření, rýže
Jižní Afrika	4	Koření, ovoce, trvanlivé potraviny

Nejčastějšími bakteriálními patogeny u masa a drůbeže jsou Campylobascter jejuni, Escherchia coli 0157:H7 (E.coli), Listeria monocytogenes, Salmonella a Staphylococus aurens. V případě E.coli se při aplikaci dávky 1 kGy zahubí 99,99 % patogenů a před dosažením dávky 2 kGy 99,99999 % patogenů. U Salmonelly je při dávce 1 kGy zničeno 99,5 % bakterií, při dávce 2 kGy 99,9997 % a před dosažením dávky 3 kGy 99,999999 % patogenů /6/.

Dnes se zvyšuje zájem o radiační ošetřování potravin mimo jiné proto, že roste počet případů onemocnění v důsledku požití závadných potravin. Americká střediska pro kontrolu nemocí a prevenci odhadují, že se v USA každoročně vyskytne na 80 milionů případů infekce z potravin a 9000 lidí umírá. V srpnu 1996 bylo například nutno vyřadit z trhu USA asi 12 milionů hamburgerů, protože byly kontaminovány mikroorganismy E.coli /7/. Od 1.1.2004 povolilo americké ministerstvo zemědělství používat radiačně ošetřené hovězí maso ve školních jídelnách. Potraviny jsou dány k dispozici v rámci federálního programu, který zdarma poskytuje obědy pro přibližně 25 milionů dětí. Ministerstvo podporuje snahy, aby studenti, učitelé, obsluhující personál, rodiče, zaměstnanci škol a pečovatelé byli dostatečně informováni o této nové technologii /8/.

Průzkumy ukázaly, že mezi spotřebiteli panují pochybnosti, neinformovanost a obavy ze všeho, co souvisí se zářením. Mnozí kritici radiačního ošetřování potravin se chovají stejně jako kritici z počátku 20. století, když byla uzákoněna pasterizace mléka. Tehdy byly vyjadřovány obavy, že sterilizace vážně znehodnocuje nutriční hodnotu a vede k tvorbě toxinů Potvrdilo se ale také, že když byli spotřebitelé podrobněji informováni, pak jich 90 % vyjádřilo zájem ozářené potraviny kupovat /4/.

Zájem vlád o radiační ošetřování potravin pramení ze tří hlavních důvodů /9/:
1/ Jsou vysoké posklizňové ztráty potravin způsobované hmyzími škůdci, kontaminací a kažením.
2/ Rostou obavy z onemocnění po konzumaci potravin.
3/ Rozvoj mezinárodního obchodu vyžaduje přísné karanténní požadavky na jakost ovoce, zeleniny a jiných potravin

Prameny:

/1/ Nuclear News, 2000, č. 5, s. 28 - 30
/2/ Nuclear News, 1998, květen, s. 27
/3/ Nuclear News, 1998, č. 13, s. 36 - 42
/4/ Nuclear News, 1998, č. 1, s. 55 - 56
/5/ IAEA, TECDOC-1386, s. 18. (Emerging applications of radiation processing, Technical meeting 28.-30.4.2003, Vienna)
/6/ Nuclear News, 1997, č. 7, s. 58 - 62
/7/ Nuclear News, 1997, č. 12, s. 52
/8/ Nuclear News, 2003, č. 8, s. 22
/9/ Nuclear News, 1998, č. 1, s. 26 - 27

7.0

Zdravotní následky černobylské havárie

Dne 26. dubna 1986 došlo ve čtvrtém bloku Černobylské jaderné elektrárny k dosud největší havárii jaderné elektrárny na světě. Příčinou bylo jak selhání lidského faktoru a nedodržení bezpečnostních a provozních postupů, tak skutečnost, že zde neexistovala ochranná stavba (kontejnment), která by zadržela radioaktivní materiály uvnitř jaderné elektrárny jak tomu bylo při havárii druhého bloku americké jaderné elektrárny Three Mile Island koncem března 1979. Do ovzduší se dostalo velké množství radioaktivních látek, které se působením povětrnostních vlivů objevily na území Ruska, Běloruska a Ukrajiny a v dalších evropských zemích. O havárii informovala veškerá média, která uveřejňovala často zkreslené a nepravdivé údaje z protijaderných zdrojů.

Protože obyvatelé Sovětského svazu nevěřili oficiálním údajům, obrátila se sovětská vláda na Mezinárodní agenturu pro atomovou energii ve Vídni, aby zorganizovala nezávislý rozbor následků havárie. Rozboru se v rámci „Mezinárodního projektu Černobyl“ /1/ zúčastnilo na 200 vědců příslušných specializací z 25 zemí a 7 mezinárodních organizací. Tým odborníků pracoval celý rok a vedl ho japonský profesor I.Šigematsu, ředitel nadace pro výzkum následků atomového bombardování Hirošimy a Nagasaki. Na projektu spolupracovaly Evropské společenství, Světová zdravotnická organizace, Světová meteorologická organizace, Organizace OSN pro výživu a zemědělství, Mezinárodní organizace práce, Vědecký výbor OSN pro účinky atomového záření a Mezinárodní agentura pro atomovou energii.

7.1 Výsledky „Mezinárodního projektu Černobyl“ z roku 1991

Hlavním cílem projektu bylo přezkoumat rozbory radiační a zdravotní situace a vyhodnotit opatření úřadů přijatá na ochranu veřejnosti. Po podrobném rozboru vzorků půdy, vody, vegetace, mléka, potravin a po lékařském vyšetření mnoha tisíc lidí z kontaminovaných i nekontaminovaných oblastí Ruska, Běloruska a Ukrajiny dospěli odborníci v květnu 1991 k následujícím hlavním závěrům:

- Radioaktivní kontaminace zdrojů pitné vody a potravin byla nižší než jsou mezinárodně přijímané zásahové úrovně, kdy je nutno přijímat ochranná opatření. Nemuselo tedy docházet k omezování spotřeby.
- Opatrný přístup při odhadování dávkových ekvivalentů byl v principu nevhodný a v rozporu se základními cíli zásahových opatření, i když byl uskutečňován v dobré víře ve prospěch obyvatelstva. Příliš opatrný přístup měl spíše negativní účinky, protože přispěl k dalšímu a zbytečnému strachu a vedl k tomu, že mnozí lidé byli přestěhováni zbytečně.
- Přijatá a plánovaná opatření byla všeobecně většího rozsahu než opatření, která by bylo nutno přijmout z čistě radiologického hlediska.
- Byly zjištěny zdravotní poruchy nesouvisící se zářením, a to jak v kontaminovaných, tak nekontaminovaných kontrolních oblastech. Nebyly prokázány zdravotní poruchy, které by bylo možno připsat na účet záření.
- Byl zjištěn velký počet lidí s vysokým krevním tlakem jak v kontaminovaných, tak kontrolních oblastech. Údaje však byly srovnatelné s hodnotami zjištěnými u obyvatel Moskvy a Petrohradu.
- Nebyl zjištěn zvýšený počet případů dětské leukémie nad její přirozený výskyt. Tým odborníků však nemohl vyloučit možný růst případů rakoviny štítné žlázy u dětí (což se také později potvrdilo).
- Havárie měla psychologické důsledky projevující se strachem a stresem, zejména mezi více než 130 000 evakuovaných lidí přestěhovaných z třicetikilometrové zakázané zóny a mezi 800 000 likvidátory, kteří prováděli vyčišťovací práce.
- Strach a stres byl ještě zvyšován senzačními, ale nepravdivými zprávami ve sdělovacích prostředcích a také nedostatečnými znalostmi o vlivu záření.

7.2 Hodnocení zdravotních následků Černobylu po deseti, patnácti a dvaceti letech.

Hlavní poznatky z roku 1991 uvedené v Mezinárodním projektu Černobyl byly později potvrzeny například studií Agentury pro jadernou energii při OECD (NEA-OECD) z počátku roku 1996. Uvádělo se v ní zejména:

- V důsledku havárie bezprostředně zemřelo 31 lidí, z toho 28 na akutní ozáření.
- Míra úmrtnosti mezi tak zvanými likvidátory v Rusku, Bělorusku a na Ukrajině byla stejná jako u běžného obyvatelstva a pohybovala se kolem 0,26 - 0,30 %.
- Francouzský ústav pro radiační bezpečnost dospěl k závěru, že mezi 140 000 ruskými likvidátory byla míra úmrtnosti ze všech příčin dokonce nižší než u kontrolního vzorku obyvatelstva. Tato úmrtnost ale nesouvisela s ozářením po havárii, jak bylo mylně uváděno protijadernými organizacemi.
- Sovětskými orgány byla přijímána ochranná opatření, která byla spíše nadmíru opatrná než založená na vědeckém a odborném hodnocení.
- Lékařská vyšetření obyvatelstva byla velmi komplexní a nebyly shledány zdravotní abnormality, které by bylo možno připsat na účet záření. Podobná situace byla jak v kontaminovaných, tak v kontrolních oblastech.
- Odhady absorbovaných radiačních dávek naznačují, že s výjimkou rakoviny štítné žlázy u tehdejších dětí je málo pravděpodobné, že by ozáření mohlo u obyvatelstva způsobit zjistitelné zdravotní účinky nad jejich přirozený výskyt.
- Projevil se reálný a zvýšený růst případů rakoviny štítné žlázy u dětí, který je možno připsat na účet záření. Podle SZO je dnes 90 - 95 % případů tohoto onemocnění vyléčitelných.
- Na základě důkladných vědeckých a lékařských výzkumů se nepodařilo zjistit zvýšený výskyt jiných druhů rakoviny, včetně leukémie nebo jiných nemocí, které by byly způsobeny ozářením po havárii.
- Byl zjištěn psychologický stres, který negativně ovlivnil zdravotní stav obyvatelstva. Na vznik stresu působila řada faktorů, například nedostatek informací o záření a jeho účincích, nedůvěra ve státní orgány, zhroucení tradičního způsobu života u evakuovaných osob, rozpad společenského a politického systému Sovětského svazu a systém kompenzací, který z příjemců učinil kategorii obětí. Kompenzace se totiž označovaly jako „pohřebné“.
- Strach ze záření (radiofobie), zesilovaný ještě nepravdivými a zkreslenými senzačními zprávami ve sdělovacích prostředcích, způsobil ještě větší zdravotní potíže než samotné záření. Tento poznatek potvrdila řada dalších odborníků, včetně japonského profesora Konda z Ósacké univerzity.

Při příležitosti desátého výročí černobylské havárie byla ve dnech 8.-12.dubna 1996 uspořádána ve Vídni mezinárodní konference, kterou zorganizovala Evropská komise, Světová zdravotnická organizace a MAAE. Byly na ní předneseny další konkrétní údaje o havárii a jejích následcích /2/.

- Na vyčišťovacích pracích se podílelo 600 000 až 800 000 likvidátorů z Ruska, Běloruska a Ukrajiny, z toho 200 000 v roce 1986 až 1987, kdy byly radiační expozice nejvyšší.
- V období od 27. dubna 1986 do poloviny srpna 1986 bylo evakuováno na 116 000 obyvatel.V okruhu do 30 km od elektrárny byla vytvořena zakázaná zóna o rozloze 4300 km^2.
- 200 000 likvidátorů obdrželo průměrnou dávku kolem 100 mSv, asi 10 % z nich dávku řádově 250 mSv a několik procent dávku vyšší než 500 mSv.
- Několik desítek lidí, kteří bezprostředně likvidovali následky havárie, obdrželo potenciálně smrtelné dávky několika tisíc mSv.
- Bylo ozářeno 116 000 evakuovaných osob. Méně než 10 % obdrželo dávky nad 50 mSv, méně než 5 % pak dávky nad 100 mSv.
- V nemocnicích bylo ošetřeno 257 osob s klinickým syndromem ozáření. U 134 z nich byl zjištěn akutní radiační syndrom. V průběhu 3 měsíců zemřelo na ozáření 28 osob.V období do deseti let po havárii pak dalších 14 pacientů, avšak jejich smrt není nutně připisována účinkům záření.
- Jediným jasným svědectvím kolektivního ozáření je zvýšený výskyt rakoviny štítné žlázy u osob, které byly v době havárie dětmi. Zvýšený výskyt tohoto onemocnění byl zjištěn v Bělorusku a v menší míře v Rusku a na Ukrajině. Do roku 1995 bylo zaznamenáno 800 případů štítné žlázy u

dětí do 15 let, z toho 400 případů v Bělorusku. Do roku 1995 zemřely na rakovinu štítné žlázy 3 děti.

Při příležitosti 15. výročí černobylské havárie prohlásil generální ředitel MAAE El. Baradei, že podle zprávy UNSCEAR pro Valné shromáždění OSN za rok 2000, vzrostl počet případů rakoviny štítné žlázy u těch, kteří byly v roce 1986 dětmi, na 1800. Nebyly však nalezeny žádné vědecké důkazy o růstu počtu jiných zdravotních následků /3/.

Tři ruská ministerstva (civilní obrany a mimořádných událostí, zemědělství a zdravotnictví) uveřejnila studii o hlavních ekologických a zdravotních důsledcích černobylské havárie po patnácti letech. Uvádí se v ní, že nehoda má přímé i nepřímé důsledky pro miliony obyvatel žijících v kontaminovaných oblastech nebo v oblastech postižených nápravnými opatřeními. Autoři rovněž kritizují převládající tendenci mnoha sdělovacích prostředků a protijaderných aktivistů ignorovat výsledky mezinárodních studií o reálných zdravotních důsledcích havárie. Objektivní názor ruských vědců sdílí všechny mezinárodní organizace, jejichž členy jsou vědci z oblasti radiačních účinků na lidské zdraví, jako je MAAE, SZO a UNSCEAR. V závěru se konstatuje že nezodpovědná prohlášení protijaderných organizací a médií zmiňující stovky tisíc až miliony obětí objektivně dezorientovali veřejnost /4/.

Mezinárodní organizace UNSCEAR v roce 2002 opět konstatovala, že kromě rizika výskytu rakoviny štítné žlázy u dětí nebyly zaznamenány žádné jiné zdravotní účinky, které by bylo možno připsat na účet záření. Původně existovaly velké obavy ze zvýšeného výskytu leukémie vzhledem ke krátké latentní době pěti až deseti let po ozáření. Avšak u žádné z ozářené skupiny osob, včetně likvidátorů, nebyl zaznamenán její zvýšený výskyt, a to navzdory skutečnosti, že asi 100 000 likvidátorů obdrželo v roce 1986 dávky v průměru 170 mSv, přičemž několik tisíc z nich mohlo obdržet dávky vyšší než 500 mSv. Více než 100 000 osob evakuovaných z nejvíce kontaminovaných oblastí Ukrajiny a Běloruska obdrželo v průměru efektivní dávku 30 resp. 40 mSv. Maximálně odhadovaná dávka u asi 1 500 osob, které nebyly evakuovány, dosáhla 250 mSv a v průměru 160 mSv. Je nutno zdůraznit, že nikdo z veřejnosti neutrpěl zdravotní újmu v důsledku ozáření po havárii, s výjimkou dětí vystavených dávkám štítné žláze.Vyskytly se ale zdravotní potíže v souvislosti s traumaty v důsledku evakuace velkého počtu lidí. Dnes se všeobecně má za to, že pro většinu z nich by bylo lépe, kdyby zůstali ve svých domovech nebo kdyby jim byl umožněn brzký návrat.

Pomník likvidátorům havárie

Mezinárodní organizace UNSCEAR v současné době harmonizuje statistické údaje o vlivu záření na lidské zdraví shromážděné Běloruskem, Ukrajinou a Ruskem, které byly nejvíce postiženy

černobylskou havárií. Cílem je přeskupit údaje tak, aby byla zajištěna jejich vzájemná srovnatelnost a aby vznikl soubor dat o větší statistické síle. Uvedené země vyhodnocovaly radiační dávky podle odlišných metodik, takže je obtížné provádět křížová srovnání. Ačkoliv se dozimetrické metody lišily, dospěly všechny země k přibližně stejným odhadům dávek. Spolupracovníci UNSCEAR zpracují data jednotným způsobem, aby mohla být provedena souhrnná analýza. Údaje budou sledovány v pětiletých intervalech před i po havárii a bude analyzováno 7 až 8 skupin obyvatel a několik druhů rakoviny. Díky různým kombinacím údajů bude možno získat více než 100 různých srovnávacích tabulek./7/. Je velmi pravděpodobné, že studie zpochybní katastrofické údaje, které se objevovaly ve sdělovacích prostředcích a dodávané protijadernými organizacemi.

MAAE a sedm dalších agentur OSN uspořádaly v září 2005 mezinárodní konferenci o dlouhodobých následcích černobylské havárie. Šestisetstránková zpráva studovala lékařské, psychologické, ekologické a ekonomické důsledky havárie. Ve zprávě se konstatovalo, že zdravotní důsledky nebyly tak závažné, jak se původně předpokládalo. Ve studii se dospělo k závěru, že do poloviny roku 2005 zemřelo na následky ozáření 59 osob, z nichž 9 bylo způsobeno pitím mléka od krav, které se pásly na kontaminované trávě v blízkosti elektrárny. Bylo zaznamenáno na 4000 případů rakoviny štítné žlázy, zejména u osob, které byly v době havárie dětmi a adolescenty. Míra přeživších u těchto osob byla 99 %. Zbývajících 50 úmrtí se týkalo pracovníků elektrárny a pracovníků provádějících vyčišťovací práce. Přibližně 1000 pracovníků elektrárny bylo první den po havárii ozářeno vysokou dávkou záření a v následujících několika měsících bylo ozářeno na 200 000 likvidátorů. Lékařští experti očekávají, že toto ozáření zapříčiní v budoucnu až 2200 úmrtí na ozáření. Protože se ale má za to, že téměř 50 000 osob z populace 200 000 lidí zemře na rakovinu nesouvisící s ozářením, bude možno jen velmi těžko statisticky ověřit, že dodatečných 2200 případů úmrtí bylo způsobeno zářením. Nebyl zjištěn ani růst vrozených poruch, které by bylo možno připsat na účet záření. /Power Enineeereing, 2006, č. 1, s. 6 /

Zajímavé poznatky přinesl Paul Thomson, který bydlí se západními kolegy v městě Slavutyč, které bylo postaveno pro pracovníky Černobylské jaderné elektrárny a obyvatele evakuované z města Pripjať. Západní experti jezdí auty, ale musí do elektrárny cestovat přes Bělorusko a přes kontrolované zóny, které byly stanoveny v okruhu 10 a 30 km od elektrárny. Mnozí považují kontrolované zóny za „jaderné pouště“. Tyto zóny však nejsou mrtvé a bez vegetace či obývané mutanty zvířat. Naopak, vypadají spíše jako ochranná pásma pro volně žijící zvířata. Venkovská krajina je plná zeleně a střídají se v ní lesy, s cestami lemovanými hlavně stříbrnými břízami a jehličnany, a většinou neobdělávané pastviny. Vyskytují se zde četné řeky a jezera, kam místní obyvatelé chodí chytat ryby. Ve zdejší přírodě je možno vidět velké obojživelníky pohybující se přes silnici, vysokou zvěř i rodinku divokých prasat. Jsou zde rovněž k vidění hadi, vlci, losi, orli a všudypřítomní čápi, kteří si stavějí hnízda na telegrafních sloupech a stožárech osvětlení. (Západní experti se zde podílejí na projektování nového suchého skladu vyhořelého paliva ISF-2). /The Nuclear Engineer 2003, č. 1, s. 13 – 15/

Není sporu o tom, že černobylská jaderná havárie byla až dosud největší havárií v historii jaderné energetiky ve světě a že k ní nemělo dojít. Když už ale k této katastrofě došlo, je třeba maximálně využít a vyhodnotit všechny získané poznatky. Odborníci tak mohou v přírodních podmínkách studovat změny, ke kterým dochází v důsledku záření ve všech složkách životního prostředí a které mohli dříve studovat jen v laboratorních podmínkách.

Prameny

/1/ International Chernobyl Project, 1991, IAEA Vienna
/2/ One Decade after Chernobyl. International Conference 8-12 April. Summary of the Conference Results. IAEA, July 1996.
/3/ NucNet, 2001, News No.147
/4/ NucNet, 2001, News No.192
/5/ Atomnaja těchnika za rubežom, 1998, č. 4, s. 10 - 12
/6/ The Nuclear Engineer, 2002, č. 5, s. 132 - 137
/7/ Nucler News, 2004, č. 6, s. 47 - 48

8.0

Protijaderné hnutí ve světě a v České republice

Výskyt protijaderného hnutí byl těsně spjat s ekologickým hnutím, které se objevilo v 60. letech nejprve v USA a odtud se šířilo do západní Evropy, ale civilní jaderná energetika nebyla zpočátku jeho hlavní součástí /1/. Ekologické hnutí zahajovalo svou činnost nejprve v rámci četných občanských iniciativ v USA, nejdříve proti zkouškám vodíkové bomby na Aljašce. V důsledku protestů veřejnosti byl prezident Nixon donucen zbývající zkoušky ukončit. To byl velký úspěch organizace Greenpeace, jejímž zakladatelem byl Patrick Moore. Členové Greenpeace rovněž úspěšně protestovali proti sovětským velrybářským lodím, které ve velkém zabíjely velryby u pobřeží Kalifornie. Díky jejich akcím bylo v roce 1979 zakázáno zabíjení velryb v Severním Pacifiku a později ve všech světových oceánech. Velmi známé jsou rovněž akce Greenpeace proti zkouškám jaderných zbraní v Pacifiku. Ekologické organizace a občanské iniciativy v USA rovněž úspěšně vystupovaly proti válce ve Vietnamu a do poloviny 80. let vyrostla organizace Greenpeace ve světové hnutí s ročními příjmy přes 100 milionů USD a s pobočkami v 21 zemích. Ročně se na celém světě pořádalo na sto protestních akcí, například proti likvidaci toxických odpadů, proti kyselým dešťům, apod./2/. Po skončení vietnamské války hledaly četné dobře organizované skupiny s vynikajícími vztahy s médii, které získaly při dřívějších protestních kampaních, další možnosti, jak využít svých zkušeností i v jiných oblastech. Obětního beránka objevily v rozvíjející se jaderné energii pro mírové účely. Tato technologie navazovala na jadernou technologii pro vojenské účely a byla tedy poznamenána „dědičným hříchem“ zničení Hirošimy a Nagasaki /3/.

Jaderná energetika představuje složité problémy, které jsou schopni řešit dobře fundovaní odborníci. Jedná se například o hodnocení rizika záření, pravděpodobnost vzniku těžkých havárií, řešení problematiky vyhořelého paliva a vysoce aktivních odpadů, přepracování jaderného paliva, možnosti zneužití pro vojenské účely, využívání plutonia apod. Když začaly pokusy s jadernými zbraněmi v atmosféře, začali se vědci zabývat jejich následky, zvláště vlivem stroncia-90, které se dostávalo do potravního řetězce. I když odborníci konstatovali, že se jedná o nízké koncentrace a zanedbatelné zdravotní účinky, zájem veřejnosti byl již díky sdělovacím prostředkům vyvolán. Předmětem zájmu odpůrců bylo vedle spadu z jaderných pokusů také umisťování jaderných elektráren v blízkosti měst a vliv nízkých dávek záření na obyvatelstvo. Vše se rodilo v USA díky otevřenému politickému systému, který odpůrcům umožňoval vystupovat při veřejném projednávání výstavby jaderných elektráren. U protijaderného hnutí stáli vědomě či nevědomě i vědci. Hnutí vědců za mír se proměnilo v kampaň za zákaz zkoušek jaderných zbraní, potom proti vietnamské válce. Když se tyto záležitosti vyřešily a opadl o ně zájem, začaly se zainteresované osoby a občanská hnutí angažovat i v jiných oblastech /1/.

Podobně jako je tomu i u jiných technologií, ani jaderná energetika nemůže zajistit stoprocentní bezpečnost, což dokumentovaly četné vědecké studie, které měli k dispozici i protijaderní aktivisté a obratně je využívali a zneužívali. Některé problémy byly navíc předmětem diskusí mezi samotnými vědci, což rovněž dodávalo ekologickým organizacím zbraň proti jaderné energii, takže mohly tvrdit „vidíte, ani samotní vědci se v mnoha věcech neshodnou“ /3/.

V 70. letech převzala většina evropských zemí technologii lehkovodních reaktorů z USA a zdejší kritici mohli převzít i protijadernou argumentaci z USA.Ve Švédsku se proti jaderné energii zapojil například fyzik H. Alfvén, laureát Nobelovy ceny, a našel podporu u politické strany. Začátkem 70. let po ropné krizi z období 1973 - 1974 se ve světě objevovaly plány velkého rozvoje jaderné energetiky k zabezpečení dostatečného zásobování obyvatelstva energií. Do popředí se dostávaly otázky související s rozvojem rychlých reaktorů, přepracováním vyhořelého paliva, s plutoniovým hospodářstvím, ukládáním radioaktivních odpadů, rozvojem těžby uranu, tepelnými emisemi z jaderných elektráren, rizikem šíření jaderných zbraní, apod. /1/. To všechno byla témata, která bylo možno využít k protijaderným kampaním. Ekologická hnutí a média záhy zjistila, že strašení veřejnosti a vyvolávání obav ze záření a z jaderné energie vůbec je pro ně výhodné. Negativní zprávy zvyšovaly sledovanost televize a rozhlasu, zvyšovaly počet výtisků novin a časopisů a tím přispívaly k růstu příjmů z reklamy. Současně se zvyšovaly i příjmy ekologických hnutí od různých sponzorů. Obě strany dobře věděly, že veřejnost má ráda hlavně senzace, a tak se z malých provozních událostí a nehod v jaderných elektrárnách vytvářely hororové příběhy /3/.

Díky podpoře médií se relativně malým, ale dobře organizovaným občanským iniciativám, zastupovaným dobře placenými právníky, podařilo u části veřejnosti a politiků vyvolat nedůvěru k jaderné energii. Politici se obávali veřejně vystupovat ve prospěch jaderné energie, protože by to byl konec jejich kariéry v příštích volbách. Populární filmy, televizní pořady a novinové články činily z jaderné energie zlověstnou sílu, proti níž bylo třeba bojovat. Občané byli přesvědčováni, že není třeba více elektřiny, že existují bezpečnější a ekologičtější zdroje než je jaderná energie, že energetickou situaci vyřeší úsporná opatření, obnovitelné zdroje energie a kombinovaná výroba elektřiny a tepla /2/.

Z počátku se objevovaly takové argumenty, že v okolí jaderných elektráren je zvýšená dětská úmrtnost a zvýšený výskyt leukémie u dětí, že spotřeba energie při výstavbě jaderných elektráren je větší než energie získaná při jejich provozu, že jaderné elektrárny nejsou ekonomicky výhodné. Když se příslušným odborníkům podařilo vyvrátit tyto argumenty, objevovaly se další a další, například o nemožnosti vyřešit problém ukládání radioaktivních odpadů. Odpor proti mírovému využívání jaderné energie se postupně šířil do hospodářsky vyspělých zemí západní Evropy a zesílil po nehodě v americké jaderné elektrárně Three Mile Island-2 (TMI-2) koncem března 1979 a zejména po černobylské havárii v dubnu 1986. Po změně režimů koncem 80. let byly protijaderným hnutím zasaženy i země střední a východní Evropy.

Proti rozvoji jaderné energie byly používány různé metody, od zdržování licenčního procesu až po konání referend a teroristických akcí. Díky najímání drahých právníků se dařilo neúměrně protahovat povolovací řízení neustálým předkládáním připomínek a žalobami u soudů. Cílem bylo zvyšovat finanční ztráty investorům, případně je od výstavby jaderných elektráren zcela odradit. V některých zemích vznikaly nové strany s výrazně protijaderným zaměřením, které pak prosazovaly své názory v koaličních vládách a v parlamentech. Například v Rakousku se v referendu v roce 1978 podařilo těsnou většinou jednoho procenta hlasů zakázat uvedení do provozu dokončené jaderné elektrárny ve Zwentendorfu, švédský parlament rozhodl v roce 1980 ukončit do roku 2010 provoz jaderných elektráren, v Itálii byl ukončen provoz všech jaderných elektráren, ve Švýcarsku bylo vyhlášeno moratorium na výstavbu nových jaderných elektráren, po vytvoření německé koaliční vlády sociální demokracie a strany Zelených v roce 1998 byla na popud Zelených přijata politika ústupu od jaderné energie s tím, že po vyčerpání povoleného limitu vyrobené elektřiny budou jaderné elektrárny trvale odstaveny během asi dvou desetiletí. V sedmdesátých letech se v Německu konaly rozsáhlé demonstrace proti jaderným elektrárnám, proti výstavbě přepracovacích závodů a později též proti přepravě vyhořelého paliva. Demonstrací se zúčastňovalo mnoho desítek tisíc lidí a vlaky přepravující vyhořelé palivo doprovázeli tisíce příslušníků ozbrojených složek. Na protijaderné hnutí se však nelze dívat jen z negativního hlediska, neboť svými akcemi také přispívalo ke zvýšení bezpečnosti jaderných elektráren

8.1 Protijaderné hnutí v České republice

Po roce 1990 přejímaly argumenty proti jaderné energii také československé a později české ekologické organizace, například Greenpeace ČR, Hnutí Duha, Calla, Děti Země, Jihočeské matky a mezinárodní občanské sdružení IBV. Česká organizace Greenpeace vznikla v roce 1992 a v roce 1994 byl její rozpočet 220 000 USD (asi 6,6 milionů Kč). Finanční prostředky byly získány z ústředí Greenpeace v Nizozemí. Jejím hlavním úkolem bylo zabránit výstavbě 1. a 2. bloku jaderné elektrárny Temelín (ETE), a to nejrůznějšími způsoby od vyvěšování obřích transparentů, pořádání demonstrací kolem Temelína až po vydávání letáků a propagačních materiálů /4,5/. Organizace používala zkreslené informace a navazovala mimo jiné i na názory rakouského spisovatele R. Jungka. Ten na demonstraci u Temelína v roce 1993 při příležitosti výročí černobylské havárie řekl: „Bude-li toho strachu ještě více, budeme-li vytrvalí, pak tohle monstrum zneškodníme vyvoláním odporu v okolních obcích proti jeho provozu. Je třeba strach, ještě více strachu“. Při tomto proslovu stál vedle spisovatele a souhlasně pokyvoval i bývalý ministr životního prostředí ČR Ing. Jan Dejmal /6/.
Hnutí Duha je rovněž financováno hlavně ze zahraničních zdrojů. V roce 1993 činil jeho rozpočet 700 000 Kč, o rok později 2 miliony Kč /7,8/. Aktivisté tohoto hnutí vystupovali v médiích, vydávali letáky a brožury a pořádali protestní akce u Temelína za přítomnosti novinářů a televize. Snažili se rovněž o zastavení výstavby ETE.
Vedoucím organizace Calla byl jaderný fyzik Dalibor Stráský, pozdější poradce ministra životního prostředí ČR, který za své protijaderné aktivity získal v roce 1996 cenu rakouské společnosti pro

životní prostředí s příspěvkem ve výši 30 000 ATS /9/. Roční rozpočet nadace 300 000 Kč uhradila Rockefellerova organizace.

Demonstrace sdružení Calla před Krajským úřadem v Českých Budějovicích v r. 2006

V roce 1997 bylo z popudu rakouského poslance Rudi Anschobera založeno Mezinárodní sdružení IBV se sídlem v Českých Budějovicích. Jeho cílem bylo dosáhnout obnovy schvalovacího procesu ETE a vypracovat ekonomickou a ekologickou studii, která měla prokázat nesmyslnost výstavby ETE /10/.

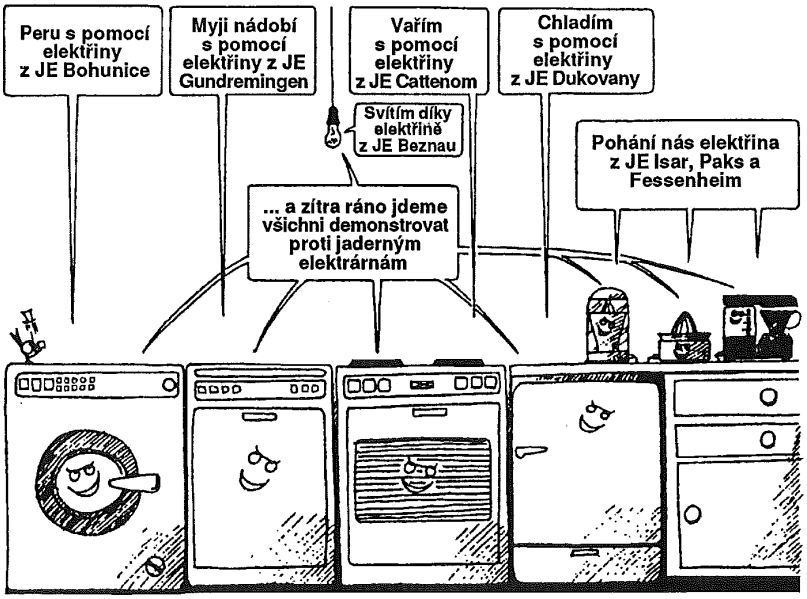
Demonstrací organizovaných protijadernými skupinami se zúčastňovali hlavně mladí lidé, kteří o jaderné energii většinou mnoho nevěděli. Při jedné z demonstrací na otázku proč protestují, odpovídali například takto: „Vždyť je to legrace a nás to baví“. Proč by je to nakonec nebavilo, když za účast dostali zaplaceno a ještě byli vidět v televizi.

8.2 Hlavní argumenty proti jaderné energii v ČR

V průběhu let 1990 až 1997 se v letácích a brožurách vydávaných ekologickými organizacemi, na demonstracích a ve sdělovacích prostředcích objevovaly nejrůznější argumenty proti jaderné energii, případně proti výstavbě ETE. Některé argumenty týkající se radioaktivního záření byly již uvedeny v kapitole 3.1 a odpovědět si na ně může pozorný čtenář sám.V následující části jsou uvedeny další argumenty ekologických organizací, případně politiků či novinářů.

- Atomová energie je nejnesmyslnější a nejnebezpečnější způsob jak ohřát vodu. (Greenpeace)
- Proud získaný z jaderné energie je nejdražší. (Greenpeace)
- Ukládání radioaktivních odpadů je experiment - experiment s lidskými životy a s celou budoucností lidstva. (Greenpeace)
- Ukládáním radioaktivních odpadů vytváříme velmi závažný ekologický, ekonomický a etický problém pro naše potomky. (Český svaz ochránců přírody)
- Mírové využívání jaderné energie je lež. (Jihočeské matky)
- Neexistují žádné bezpečné jaderné elektrárny ani na západě. (Jihočeské matky)
- Jaderná energie nás přivede nejenom k ekonomické, ale i k ekologické katastrofě. (Jihočeské matky)
- Proti skleníkovému efektu je možné bojovat jen realizací úsporných opatření. (Greenpeace)

- Existenci jaderné elektrárny považuji za životu nebezpečnou, ačkoliv někteří odborníci hovoří o naprosto zanedbatelném riziku (Pavel Rychetský).
- Jaderná elektrárna Temelín je břemeno pro vládu, stát, jihočeský region i občany. (Michael Žantovský)
- Počet obětí havárie Černobylské jaderné elektrárny odhaduje hnutí Greenpeace na 8000 mrtvých a 40 000 - 50 000 lidí předčasně zemře v důsledku ozáření. (Greenpeace, Rudé právo, 27.4.1994)
- Temelín není jen problémem bezpečnostním a ochrany životního prostředí, ale přinejmenším stejně tak problémem demokracie, respektive autoritářství. Jaderná energie se totiž dnes rozvíjí převážně v těch zemích, kde stát je silnější a občan slabší než v jiných zemích. Kde se stát rozpíná a občan rezignuje. (Petr Pitthart)
- Jaderná energetika je řešení špatné, protože dovršuje a do totální dokonalosti přivádí závislost lidí - a s námi i jiných tvorů - na lidském výtvoru. Bere nám poslední zbytky existenční autonomie, možnosti bránit se ohrožení a v tom smyslu nám bere to, co známá píseň pana Hutky označuje jako hodnotu největší - lidskou svobodu. Někde, kde mohou, se již jaderné energetiky na přání lidí zbavují a osvobozují se. (I. Kolebaba, novinář)
- Nikdo do nákladů nezapočítává částku na likvidaci jaderné elektrárny po skončení její životnosti a na uložení vyhořelého paliva. (Greenpeace)
- Dosud nejsou spolehlivě odhadnuty náklady na likvidaci elektrárny po třiceti letech provozu. (Petr Pitthart)
- Dosud nikdo nezapočítal náklady na skladování vyhořelého paliva a na likvidaci ozářeného tělesa elektrárny. I minimální rizika současných jaderných technologií jsou příliš velká na malou českou kotlinu a malý národ, který ji obývá. (Pavel Rychetský)
- Transport radioaktivních materiálů představuje další velké nebezpečí. Při nehodě se radioaktivita uvolňuje. (Jihočeské matky)
- Vláda zcela pominula otázku radioaktivního tritia v odpadních vodách, přestože je Vltava významný vodárenský zdroj pro Prahu a řadu středočeských měst. (Otevřený dopis nevládních ekologických organizací)
- Vyhořelé palivo není jediný odpad. Mimo další odpady se jedná především o tritium, jehož únikům nelze prakticky zabránit. (Hnutí Duha)
- Je prokázáno, že Praha bude každopádně pít radioaktivní vodu. (Pavel Seifer, poslanec)
- Nelze úplně zanedbat ani vlivy klimatické. O těchto věcech nebyla vůbec řeč. Můžeme být bez obav? ((Bedřich Moldan)
- Chybí hodnocení vlivu ETE na životní prostředí. (Děti Země)
- Vlivem odparu z jaderné elektrárny zcela jistě dojde ke zhoršení klimatických podmínek v regionu. (R. Lanč, Strana Zelených)
- Zvlášť nebezpečné je plutonium-239. Tento prvek je radiotoxický a nanejvýš rakovinotvorný. Kromě tohoto se používá k výrobě atomové bomby.(Jihočeské matky)



8.3 Odpovědi na některé argumenty proti jaderné energii

Pozorný čtenář najde odpovědi na část uvedených argumentů v přecházejících kapitolách, přičemž na některé z nich není snad nutné ani odpovídat. Přesto je nutno reagovat na ty argumenty, o nichž v předcházejících kapitolách nebyla zatím ani zmínka. Jde například o započítávání nákladů na vyřazování jaderné elektrárny z provozu a ukládání radioaktivních odpadů, o přepravě radioaktivních materiálů, o radioaktivním tritiu a kvalitě pitné vody, o klimatických vlivech ETE, o nebezpečnosti plutonia, o údajném počtu tisíců mrtvých v souvislosti s černobylskou havárií, ap.

Námitka: Nikdo do nákladů nezapočítává částku na likvidaci jaderné elektrárny po skončení jejího provozu a na uložení vyhořelého paliva.

Stručná odpověď: V zemích provozujících jaderné elektrárny, včetně České republiky, existují zákonná opatření požadující, aby provozovatelé zahrnovali do nákladů na výrobu elektřiny i příslušný podíl související s budoucí likvidací elektrárny a s ukládáním vyhořelého paliva a radioaktivních odpadů. Vychází se přitom ze zásady, že uvedené náklady mají hradit ti, kdo využívají výhody elektřiny z jaderných elektráren, tj. současní spotřebitelé. Prostředky získané z poplatků účtovaných buď na každou vyrobenou kilowatthodinu nebo stanovenou pevnou částkou se shromažďují na zvláštních fondech, jejichž správcem je jiná organizace než provozovatel jaderné elektrárny. Podle studie Agentury pro jadernou energii při OECD (NEA OECD) představují náklady na uložení vyhořelého paliva a radioaktivních odpadů jen několik procent z celkových nákladů jaderného palivového cyklu. Podle průzkumu uskutečněného ve dvanácti zemích se poplatky na uložení vyhořelého paliva a vysoce aktivních odpadů pohybovaly v rozmezí 0,76 až 1,8 mills/kWh a náklady na konečné vyřazení jaderné elektrárny z provozu ve výši 20 % původně vynaložených investičních prostředků. Je to částka, která není tak vysoká, aby byla příčinou ústupu od využívání jaderné energie. Podle informací z Japonska se předpokládá, že konečná likvidace jaderných elektráren bude představovat asi 1 % z hodnoty japonského trhu jaderných zařízení.

Námitka: Vyhořelé palivo není jediný odpad. Mezi další odpady se jedná hlavně o tritium, jehož únikům nelze prakticky zabránit. Vláda zcela pominula otázku radioaktivního tritia, přestože je Vltava důležitý vodárenský zdroj pro Prahu a pro řadu středočeských měst.

Odpověď: Pokud jde o tritium, uvedlo ministerstvo zdravotnictví ČR ve svém sdělení HEM-330, 19. 3. 1993 tyto údaje:

- Na celém světě se tritium z chladicí vody organizovaným způsobem vypouští do vodotečí a moří, neboť je to z ekonomického hlediska i z hlediska ochrany před zářením optimální varianta řešení.

- Tritium patří mezi málo radiotoxické nuklidy s poločasem rozpadu 12,6 let. Je to izotop vodíku, který se v přírodě nevyskytoval a nyní se nachází ve stopových množstvích téměř všude jako pozůstatek pokusů s jadernými zbraněmi. Současná kontaminace vod tritiem se pohybuje kolem 4 Bq/l.
- Nařízení vlády ČR č. 171/1990 Sb. Stanoví jako přípustný limit množství tritia pro vodárenské toky hodnotu 700 Bq/l a pro ostatní povrchové vody hodnotu 5000 Bq/l. Tento limit je ještě přísnější než je tomu v Kanadě, kde platí pro pitnou vodu limit 7000 Bq/l.
- Tritiové vody budou ze dvou bloků ETE vypouštěny do Vltavy u Kořenska a očekávané objemové aktivity tritia za Kořenskem budou v průměru 120 Bq/l a ve špičkách maximálně 500 Bq/l. Na dalším toku bude aktivita tritia klesat a při průchodu Prahou se očekává celková průměrná aktivita okolo 12 Bq/l. Takové množství tritia bylo běžné ve všech vodách v roce 1978 v důsledku zkoušek jaderných zbraní.
- Zdravotní význam tritia obsaženého ve vltavské vodě je nepatrný, neboť i celoroční pití takové vody nemůže způsobit ozáření vyšší než je tisícina mezní dávky pro obyvatelstvo, která činí 5 mSv

V období 1986 až 1994 probíhalo vodoprávní a hygienické řízení týkající se účinků radioaktivních výpustí z ETE a jeho výsledkem bylo vydání povolení pro vypouštění odpadních vod. Při vodoprávním řízení byly mimo jiné potvrzeny nevýznamné příspěvky provozu elektrárny k přirozené úrovni radioaktivního pozadí v hydrosféře.

Podle hodnocení významných mezinárodních organizací, jako je Mezinárodní komise pro radiologickou ochranu (ICRP), Vědecký výbor OSN pro účinky radioaktivního záření (UNSCEAR), Světová zdravotnická organizace (WHO) a Program OSN pro životní prostředí (UNEP), jsou zdravotní a ekologická rizika jaderné energetiky včetně jejího palivového cyklu podstatně menší než je tomu u jiných technologií k výrobě elektřiny, včetně obnovitelných zdrojů. Přitom se v hodnoceních uvažuje i riziko vyplývající z tritia vypouštěného do vodních zdrojů. Pro normální provoz jaderných elektráren stanovily dozorné orgány přísné limity vypouštění tritia. Jeho skutečné výpustě však zpravidla dosahují jen zlomky povolených limitů.

Námitka: Klimatické vlivy jaderné elektrárny Temelín na životní prostředí.

V průběhu let 1989 až 1992 byl řešen státní úkol, týkající se vlivu jaderné elektrárny Temelín na životní prostředí. Garantem bylo ministerstvo životního prostředí a hlavním řešitelem Výzkumný ústav vodohospodářský. Na úkolu spolupracovala celá řada organizací včetně pobočky ČSAV v Českých Budějovicích. Při řešení byla použita doporučení MAAE, postup aplikovaný v Německu, všeobecně uznávané počítačové programy, matematické modely, atd. Byly sledovány takové meteorologické prvky, jako průměrná roční teplota, průměrná roční relativní vlhkost, doba slunečního svitu, množství srážek za rok, délka trvání mlhy a námrazy. Hodnocení bylo prováděno do vzdálenosti 10 km od elektrárny. Pokud jde o uvedené meteorologické prvky, budou jejich výkyvy způsobné provozem chladicích věží menší než jsou odchylky mezi extrémními roky. Tyto výsledky jsou v souladu se studiemi, které byly v souvislosti s výstavbou jaderných elektráren uskutečněny v Německu, Švýcarsku, USA, Francii i ve Spojeném království. Pokud jde o teplotu vody vypouštěné v Kořensku, ta bude maximálně 24 stupňů Celsia.To zvýší teplotu při homogenizaci s vltavskou vodou v době minimálních povolených průtoků maximálně o 2,3 stupně Celsia, ale v celoročním průměru bude teplota vody zvýšena jen o 0,3 stupně C.To je v rámci meziroční variability meteorologických podmínek, což nemůže negativně ovlivnit ani faunu, ani floru vltavské kaskády. Stručné závěry jsou uvedeny v publikaci Výzkumného ústavu vodohospodářského T.G.Masaryka v Praze z roku 1994: Ing. Eduard Hanslík, CSc. „Vliv jaderné elektrárny Temelín na hydrosféru a další složky životního prostředí“.

Námitka: Zvlášť nebezpečné je plutonium-239. Tento prvek je radiotoxický a nanejvýš rakovinotvorný.

Odpověď: Problematikou nebezpečnosti plutonia se zabýval japonský vědec Dr. Matsuoka po dobu 25 let od roku 1965. Uskutečňoval experimenty s plutoniem na zvířatech v japonském Národním ústavu pro radiologické vědy. Podle něj nejsou pravdivé informace o tom, že vlastnosti plutonia jsou nejhorší ze všech materiálů existujících na světě. U člověka nebyl dosud zaznamenán ani jediný případ onemocnění rakovinou vlivem plutonia. Plutonium je málo absorbovatelné v zažívacím traktu a i když sníme potravu kontaminovanou plutoniem, plutonium se z těla vyloučí a je jen malé riziko jeho uložení v jiných orgánech těla. Podle dosavadních poznatků nezpůsobuje plutonium ani leukémii. Plutonium je

nerozpustné ve vodě a je přibližně stejně toxické jako olovo. Například jed sarin je 330krát toxičtější než plutonium. Není třeba se obávat ani genetických účinků plutonia. /11, 12/

Uvedené poznatky Dr. Matsuoki potvrzují a doplňují i informace z /13 /. Jsou zde popisovány události a zkušenosti související s objevením a zpracováváním plutonia v laboratořích USA v rámci vývoje atomové bomby. Vědci, kteří se od samého začátku přímo zabývali výzkumem a vývojem atomové bomby, se dožili vysokého věku. Například Hans Bethe zemřel ve věku 98 let, Philip Morrison ve věku 89 let, Glenn Seaborg, objevitel plutonia v roce 1941, se dožil 87 let a Edward Teller zemřel ve věku 94 let. Sám Seaborg označil plutonium za tuctový prvek, což byl zcela odlišný názor než tomu bylo v mytologii, kterou v 70. letech vytvořili odpůrci jaderné energie, kteří označovali plutonium za „jedovatou energii“ nebo „smrtící prvek“. Podle vědců z Lawrence Livermoore National Laboratory (LANL) je plutonium nejtěžší průmyslově využívaný prvek, téměř dvojnásobně těžší než olovo. Plutonium však nikdy nebylo nejtoxičtějším prvkem, jak se často tvrdí. Je sice toxické, ale odlišným způsobem než je tomu u známějších jedů, jako je kyanid nebo botulin. V nejnepravděpodobnějším případě může plutonium uvnitř těla způsobit rakovinu za dvacet nebo více let, ale kyanid zabíjí během několika minut. Plutonium má 10 izotopů, z nichž nejdůležitější jsou Pu-238, Pu-239 a Pu-241. Izotopy s lichým číslem jsou štěpitelné, se sudým číslem nikoliv. Pu-239 se používalo k výrobě atomových zbraní a nyní je součástí směsného kysličníkového uran-plutoniového paliva MOX, které se používá v lehkovodních reaktorech. Pu-238 slouží jako zdroj energie v kardiostimulátorech. Zatímco konvenční zdroje energie v kardiostimulátorech mají životnost 10 let, v případě Pu-238 vydrží tento zdroj po celý život pacienta. Nejrozšířenější je využití Pu-238 při výzkumu kosmického prostoru, jak je uvedeno v kapitole 5.5. Plutonium je alfa zářič, ale radioaktivní částice lze zastavit listem papíru, oděvem nebo pokožkou. Je-li drženo v ruce, „hřeje jako živý králík“, jak se vyjádřila asistentka Enrica Fermiho. Plutonium má vysoký energetický obsah, neboť jediný gram Pu-239 se rovná 1,43 t měrného paliva a rozštěpením jednoho kilogramu Pu lze získat 10 GWh elektrické energie, k jejíž výrobě by bylo nutno spálit 1000 tun ropy /17/.

Za snad nejexkluzivnější klub na světě lze považovat skupinu 26 Američanů, kteří byli v letech 1944 - 1945 kontaminováni plutoniem při nehodách souvisejících s vývojem a výrobou atomové bomby při různých chemických procesech. Utrpěli například popáleniny plutoniovými roztoky. Všichni tito pracovníci měli vysoké hodnoty plutonia v moči a každý z nich byl pravděpodobně kontaminován 0,1 - 1,2 mikrogramy Pu. Většina z nich opustila Los Alamos brzy po válce a rozptýlila se po celých Spojených státech. Od roku 1952 byli však každých pět let podrobováni komplexní zdravotní prohlídce. /13/ V letech 1971 - 1972 se 24 z nich vrátilo do Los Alamos za účelem celkového posouzení svého zdravotního stavu po plutoniové zátěži. Do roku 1979, kdy George L. Voelz se svými spolupracovníky uveřejnil dlouhodobou studii zdravotního stavu uvedeného souboru pracovníků, dva muži zemřeli. Jeden v roce 1959 ve věku 36 let na srdeční infarkt a druhý zemřel v roce 1975 ve věku 52 let při autonehodě. Studie zahrnovala období 32 let. Zbývající 24 členové klubu netrpěli žádnou rakovinou až na dva případy rakoviny kůže, kde ale příčinou nebylo ozáření plutoniem. Ve studii se konstatovalo, že nemoci a fyzické změny u sledovaných osob byly charakteristické pro bílou mužskou populaci 50. a 60. let v USA. /13/

Podle Erica Voice, britského vědce, který pracoval s plutoniem v laboratořích v Harwellu a Dounreay, je v současné době pod stálým lékařským dohledem na 1200 osob kontaminovaných plutoniem bez detekovatelných zdravotních účinků. Po odchodu do důchodu v roce 1992 se tento vědec zúčastnil několika experimentů, při nichž byly do těla několika dobrovolníků záměrně injektovány roztoky citrátu plutonia. Účelem experimentů bylo sledovat způsob vylučování plutonia z těla a jeho pohyb v krvi, tkáních, játrech a kostech. Na otázku, zda je plutonium uvnitř těla nebezpečnější než kterákoliv jiná radioaktivní látka odpověděl Eric Voice, že nikoliv. Prohlásil, že rádium kolem nás je 20x nebezpečnější než stejná hmotnost Pu. Uvedl dále, že neexistuje jediný důkaz, že by někdo zemřel nebo měl zdravotní potíže z radioaktivního plutonia. Eric Voice zemřel v září 2004 ve věku 80 let. Byl hlasitým odpůrcem mýtů o nebezpečnosti plutonia /14/. Eric Voice zemřel pět let poté, co byl v roce 1999 ukončen britský program experimentů s plutoniem na lidech. V té době byli ještě na živu ostatní účastníci experimentu /13/.

V roce 1995 se diskutovalo o možnosti využití plutonia pro teroristické účely v souvislosti s útokem v tokijském metru, při němž byl použit sarin. Proto je vhodné obě metody porovnat. /12/

- Množství pašovaného plutonia je velmi malé a ceny značně vysoké.
- Mnohem lacinější pro teroristické účely je použití smrtelné chemikálie.

- Jednou z možností použití plutonia teroristy by bylo jeho vhození do velkého zdroje pitné vody. Tento způsob by však byl neefektivní ze dvou důvodů: zaprvé je plutonium nerozpustné ve vodě a za druhé i kdyby bylo rozpustné, bylo by ho třeba použít ve velkém množství, aby mělo reálné účinky na zdraví lidí. Plutonium je stejně toxické jako kterýkoliv těžký kov, například olovo.
- Teroristické využití plutonia má ještě dva další nedostatky: emituje alfa záření, které lze odstínit například jen listem papíru. Za druhé lze radioaktivitu snadno detekovat.

Máme-li tedy shrnout, pak je plutonium pro teroristické účely jednak drahé, nesnadno získatelné a nevýhodné. Existuje celá řada chemikálií, které jsou laciné, snadno dostupné a potenciálně smrtící, pokud jsou použity proti nic netušící veřejnosti.

Námitka: Transport radioaktivních materiálů představuje další nebezpečí. Při nehodách se radioaktivita uvolňuje.

Odpověď: Ročně se na celém světě přepravuje na 10 milionů zásilek obsahujících radioaktivní látky, z toho asi 10 % se přepravuje přes hranice států. Přeprava se řídí přísnými mezinárodními a národními předpisy, které požadují, aby radioaktivní látky byly chráněny takovým způsobem, který vyloučí uvolnění radioaktivity a ohrožení veřejnosti a životního prostředí i při těžkých dopravních haváriích. Hmotnost zásilek se pohybuje od 100 gramů až po 120 tun a velikost od krabičky zápalek až po kontejnery dlouhé 12 m. Nízkoaktivní uranový koncentrát (žlutý koláč) se přepravuje ve dvousetlitrových sudech, hexafluorid uranu v robustnějších obalech vzhledem k jeho chemickým vlastnostem, přepravní obaly pro čerstvé palivové články mají hmotnost až 15 tun a kontejnery pro přepravu vyhořelého paliva váží 80 až 120 tun /15/.

Do konce roku 2002 bylo v USA uskutečněno na 3 000 transportů vyhořelého paliva bez nehody a jakéhokoliv úniku radioaktivních látek do životního prostředí. Kromě toho americké námořnictvo přepravilo od roku 1957 783 kontejnerů s vysoce aktivními odpady na celkovou vzdálenost přes 1,6 milionu km, rovněž bez nehody. V Evropě bylo již bezpečně přepraveno na 70 000 tun vyhořelého paliva hustě obydlenými oblastmi /16/. Bezpečně se též letecky přepravovaly desítky palivových tyčí obsahujících plutonium například z Německa do Belgie a Skotska. Speciálními námořními loděmi se přepravuje plutonium z evropských přepracovacích závodů až do Japonska. V Evropě jsou přepravovány jaderné materiály po železnici, silnicích i letecky a nikdy se nestala žádná nehoda, při níž by byl zaznamenán únik radioaktivních látek. Tyto vynikající výsledky byly dosaženy díky velké pozornosti, která se věnuje konstrukci a zkouškám přepravních kontejnerů vyhořelého paliva, jak již bylo uvedeno v kapitole 4.6.

Odpověď na údajně velký počet obětí černobylské havárie podle Greenpeace je v kapitole 7.0 o zdravotních následcích černobylské havárie.

8.4 Jaderná energie a média

Objevení jaderného štěpení vyvolalo vzrušení ve vědecké komunitě, ale nedostalo se na přední stránky novin a časopisů. Částečným důvodem bylo utajování nové technologie, která byla využita k vojenským účelům. Až do havárie v americké JE TMI-2 byly však zprávy v médiích více či méně přesné a vyrovnané. Proč došlo ke změně? Jedním z důvodů je to, že pokud určité médium chce i nadále existovat, musí vytvářet zisk jako jiné podnikání. Protože v rámci médií je velká konkurence, je snaha přinášet přitažlivější informace než konkurence. Zatímco u vědy je věrohodnost závěrů klíčovým faktorem vyžadující hluboké technické zázemí a ochotu předložit výsledky náročnému a zdlouhavému přezkoumávání jinými vědci, v médiích je situace poněkud odlišná. Zde je klíčovým faktorem úspěchu zaujetí okamžité pozornosti a její udržení. Není čas předkládat zprávy ke kritickému hodnocení, ale naopak, termíny pro dodání zpráv jsou velmi kruté. Podrobné zpravodajství je proto spíše výjimkou. Z ekonomického hlediska není praktické, aby média měla tým reportérů dostatečně erudovaných ve specializovaných technických oblastech, jakou jaderná energetika bezesporu je. Navíc, novináři mají obvykle humanitární, nikoliv technické vzdělání a nelze se proto divit, že jaderné záležitosti jsou v médiích často velmi zkreslené, mají negativní charakter a nejsou vyvážené. /3/

Jestliže se v současnosti objevuje v médiích slovo „jaderný“, pak je to hlavně v souvislosti se Severní Koreou, snažící se vyvíjet jaderné zbraně, nebo s Íránem, obviňovaným z toho, že uskutečňuje obohacování uranu za účelem téhož. Veřejnost může pod dojmem těchto zpráv dospět k závěru, že

obohacování uranu nutně souvisí s tajným úsilím o vývoj zbraní hromadného ničení. Média se ale už nezmiňují o druhé stránce obohacování uranu. Proč například neuvedou, že obohacování uranu je pro jaderné palivo totéž jako rafinace ropy pro benzín. Benzín nemusí být nutně použit k výrobě napalmu a stejně tak uran nemusí být použit k výrobě atomové zbraně. Problematika obohacování uranu se podobá i problematice umělých hnojiv na bázi dusičnanu amonného. Dusičnan amonný je užitečná látka, z níž lze ale vyrobit silnou výbušninu, ale pro tyto účely se obecně nepoužívá. A zdá se, že média nejsou schopna pojednávat o uranu nebo plutoniu jinak než tím způsobem, že se jedná o materiály „vojenské jakosti“ bez ohledu na to, zda je tomu tak, či nikoliv. Veřejnosti se tak stále vnucuje názor, že existuje souvislost mezi jadernou energií a jadernými zbraněmi. Vzniká proto otázka, proč média rovněž nepoužívají takové termíny, jako „benzín vojenské jakosti“ nebo nepovažují dynamit za „umělé hnojivo vojenské jakosti“. /18/

Druhým nejvděčnějším tématem z hlediska médií je ukládání radioaktivních odpadů. Pokud média hovoří o „radioaktivním odpadu“, neopomenou předřadit slůvko „smrtelný“. Ve veřejnosti tak vzniká iracionální strach z jaderného odpadu a záření a politici se před svými voliči bojí hovořit ve prospěch bezpečného ukládání radioaktivních odpadů, protože by to pro ně byla politická sebevražda a nezvolení v dalším volebním období. Přitom ozáření veřejnosti z uložených odpadů je tak nízké, že je nerozeznatelné od přírodního radiačního pozadí a nezpůsobuje žádné zdravotní účinky. Veřejnost je ale zmatena, protože vyjádření věci znalých odborníků je vždy v médiích „vyvažováno“ vyjádřeními ignorantů. Jaderný průmysl bude proto muset i nadále čelit této asymetrii, jak média hodnotí jaderné a jiné běžné záležitosti. Bude to však ještě zdlouhavý boj. /18/ Zdá se však, že jaderné energii pomohou v jejím rozvoji samotní odpovědní ekologové, jak uvidíme v následující kapitole.

8.5 Ekologové - budoucí propagátoři jaderné energie

Název této podkapitoly je zatím sice hudbou budoucnosti, ale příjemnou hudbou, jejíž některé takty se již začínají hrát nyní. První takty této hudby zazněly asi v polovině 70. let minulého století, kdy se asi stovka význačných vědců, sdružená v Římském klubu, omluvila za své protijaderné postoje a prohlásila, že jaderná energie představuje nejvhodnější řešení problému globálního oteplování. O dvacet let později, v roce 1994, byla ve Francii vydána kniha francouzského ekologa Bruna Combyho „Ekologové pro jadernou energetiku“, v níž autor mimo jiné poukazuje na to, že existuje „atomový paradox“, který forrmuloval takto: “Většina ekologů je silně proti jaderné energii. Paradoxem ale je, že jaderná energie je nejzelenější formou energie a že z důvodů ochrany životního prostředí bude v 21. století hlavním zdrojem elektřiny.“ /19/ Za podporu jaderné energie byl z představenstva ekologické skupiny „Friends of the Earth“ (Přátelé Země) vyloučen bývalý biskup z Birminghamu Hugh Montefiore. Provinil se tím, že napsal, že by jaderná energie měla být používána ke snížení emisí oxidu uhličitého. Bylo mu oznámeno, že takový názor není v souladu s jeho úlohou důvěrníka skupiny, kterou zastával po dobu dvaceti let. On však odpověděl, že budoucnost planety je pro něj důležitější než členství v organizaci Přátelé Země. /14/

Proti ideologii ekologických organizací se dnes ale patrně nejvíce provinil samotný zakladatel organizace Greenpeace Patrick Moore a také profesor James Lovelock, vědec a oslavovaný environmentalista, autor teorie Gaia. Patrick Moore je nyní vedoucím vědcem organizace Greenspirit Strategy Ltd. se sídlem v kanadském Vancouveru. Koncem dubna 2005 vystoupil v podvýboru pro energii a přírodní zdroje amerického senátu. Z jeho projevu přinášíme nejdůležitější myšlenky. /2/

- Po dobu 15 let každý den bojoval proti minimálně čtyřem věcem (například proti nadměrnému výlovu velryb, proti likvidaci toxických odpadů, proti těžbě uranu, kyselým dešťům, ap.), a proto se rozhodl, že bude pro změnu bojovat za něco. Přešel od politiky konfrontace k politice snažící se o konsensus, protože nelze všechny akce založit pouze na základě ekologických hodnot.
- Změny musí být sociálně přijatelné a technicky a ekonomicky proveditelné. Není vždy snadné vybalancovat ekologické, sociální a ekonomické priority. K dosažení udržitelnosti jsou třeba kompromisy a spolupráce mezi vládami, průmyslem, akademickou oblastí a ekologickým hnutím. V posledních dvaceti letech vynaložil pan Moore velké úsilí při hledání konsensu mezi protichůdnými zájmy.
- Ne všichni jeho kolegové ale viděli věci tímto způsobem, odmítli politiku konsensu a dávají přednost pokračující konfrontaci a rostoucímu extremismu. Podle Moora se jejich ekologický extremismus má tendenci stát antihumánním. Jsou proti vědě a technice, neboť nepodložené názory jsou přijímány navzdory faktům. (Příkladem je nulová tolerance ke geneticky modifikovaným potravinovým plodinám a k jaderné energii.) Jsou proti podnikání a všechny velké společnosti líčí jako nenasytné a korupční organizace. Liberální demokratický trh je odmítán, ale není navrhována životaschopná alternativa jak zajistit materiální potřeby pro více než 6 miliard lidí. Ekoextremisté mají naivní vizi návratu k utopické rajské zahradě, která ale nikdy neexistovala. V jejich vybájeném světě nemají být chemikálie, letadla ani jaderné elektrárny.

O nezbytnosti budoucího rozvoje jaderné energetiky uvádí pan Moore následující argumenty:

- Pokud nedojde k revitalizaci jaderných elektráren v USA, klesne podíl jaderných elektráren na výrobě elektřiny a zvýší se závislost na fosilních palivech, což se promítne v růstu emisí CO_2, SO_2, NO_x a rtuti. Tyto polutanty způsobují výrazné škody na životním prostředí, včetně kyselých dešťů, smogu, nemocí dýchacích cest a kontaminace rtutí.
- Prominentní ekologové nyní všichni silně podporují jadernou energii jako praktický způsob snižování emisí skleníkových plynů při současném zajišťování zvýšené poptávky po energii.
- Současné reaktory jsou bezpečnější než tomu bylo u reaktoru v jaderné elektrárně TMI-2 a v Černobylské jaderné elektrárně. Novější reaktory mají vysoké využití výkonu a nízké palivové náklady. Dopředu myslící ekologové a vědci jasně prohlašují, že jaderná technologie dosáhla bodu, kdy aktivistické strašení její nebezpečností je zcela mimo realitu.
- Reaktory v TMI-2 a v Černobylu jsou často uváděny jako příklady jaderných havárií. Tyto reaktory se ale podstatně liší od dnešní vysoce bezpečné technologie. Havárie v Černobylu byla výjimkou, která potvrzuje pravidlo, že jaderné elektrárny jsou všeobecně bezpečné. Černobylská havárie se vlastně více či méně očekávala, neboť projekt byl špatný, výstavba byla odbyta, údržba byla nedostatečná a provoz neprofesionální. To vše vedlo k největší nehodě reaktoru na světě. Nehoda

v americké jaderné elektrárně TMI-2 byla ale vlastně úspěšná story, protože radiace z částečně roztavené aktivní zóny byla zadržena betonovou ochrannou stavbou (kontejnmentem), jak bylo určeno projektem. Dnes je ve světě v provozu přes 440 reaktorů, které denně vyrábějí velká množství elektřiny bez vážných nehod.

- Jedním z důvodů opozice proti jaderným reaktorům je to, že produkují radioaktivní odpady a vyhořelé palivo. Neexistují ale žádné technické překážky, aby se jaderné odpady nedostaly do životního prostředí ve škodlivém množství, jak to potvrzují zkušenosti se stovkami lokalit jaderných elektráren na celém světě. Nejdůležitější při tom je, že použité (vyhořelé) palivo z reaktoru obsahuje ještě asi 95 % potenciální energie. Proto by nemělo být trvale zlikvidováno, ale bezpečně skladováno, aby bylo možno v budoucnosti využít jeho zbývající energetický obsah.
- Dalším argumentem opozice je to, že reaktory produkují plutonium, které může být získáno a použito k výrobě jaderných zbraní. Je to velmi nešťastná záležitost, ale není to důvod k zákazu jaderné energie. Nikdo například vážně neuvažuje o zákazu mačet, pušek, děl a automobilů, které jsou příčinou mnoha úmrtí. Není ani snaha o zákaz umělých hnojiv, s jejichž pomocí se vyrábějí výbušniny. Problematika šíření jaderných zbraní se proto musí řešit odděleně od výroby elektřiny v jaderných elektrárnách.
- Kromě snižování emisí skleníkových plynů a omezení závislosti na fosilních palivech nabízí jaderná energie další dva ekologicky přátelské energetické přínosy. Zaprvé je to výroba vodíku pro realizaci vodíkového hospodářství, kdy vodík slouží jako čisté palivo pro pohon automobilů, vlaků a letadel. Za druhé může jaderná energie přispět k řešení dalšího krizového stavu, kterým je nedostatek pitné vody pro zásobování obyvatelstva a zavlažování zemědělských plodin, a to bez emisí CO2.
- Jaderná energie a obnovitelné zdroje zůstávají jediným praktickým, bezpečným a k životnímu prostředí přátelským způsobem snižování emisí skleníkových plynů, zaručující energetickou bezpečnost. Nyní přišel čas pro zdravý rozum a vědecké řízení jaderné energetiky. /2/

Další ránu extremistickým ekologům zasadil profesor James Lovelock, který se na londýnské konferenci, konané v listopadu 2004, vyjádřil v tom smyslu, že energetická politika Zelených poškozuje celý svět a zostřuje krizi globálního oteplování. Konferenci zorganizovala společnost Prospect, která je unií vědců, manažerů a inženýrů z energetického průmyslu. Profesor naléhavě oslovil vlády světa, aby přijaly jadernou energii v boji proti globálnímu oteplování. Zde jsou některé jeho myšlenky: /20/

- Nyní, když lidstvo zavinilo, že je Země nemocná, nebude moci být vyléčena alternativními nápravnými opatřeními Zelených, jako jsou větrné turbíny a biopaliva. Jsem pesimista, pokud jde o budoucnost, protože ve srovnání s dobou před padesáti lety vědci ztratili respekt veřejnosti.
- Ke klimatickým změnám již dochází v Arktidě, zvyšování globální teploty by zničilo amazonské deštné pralesy, negativní změny postupují velmi rychle a je jen málo času k nápravě. Musí se omezit spalování fosilních paliv, a to co nejdříve. Čistá obnovitelná energie vypadá půvabně, ale je neobyčejně drahá a jen o málo užitečnější než je strava založená na aperitivech.
- Zelené koncepce udržitelného rozvoje a obnovitelných zdrojů energie jsou falešné a nereálné sny, které mohou vést k pohromě. K zabránění horkého a nepohodlného světa není jiná citlivá alternativa než je jaderná energie.
- Obavy z nebezpečnosti jaderné energie jsou iracionální a přehnané a hnutí zelených by proto mělo upustit od své opozice.
- Profesor Lovelock má obavy ze dvou hlavních klimatických jevů, a to z tání ledovců v Grónsku, které by zvedlo hladinu moří, a z extrémních vln veder v západní a střední Evropě, jež vědci považují za přímé důsledky globálního oteplování. Jsou to varovné signály, že se globální oteplování urychluje. Obává se ale, že pouze zničující katastrofy způsobené skleníkovým efektem nakonec donutí vlády omezit spalování fosilních paliv.

Profesor Lovelock se považuje stále za zeleného a naléhavě žádá své přátele v tomto hnutí, aby upustili od tvrdohlavé opozice vůči jaderné energii. Jeho prosbu však nepodpořil ani Stephen Tindale, výkonný ředitel Greenpeace Spojeného království, ani Tony Jupiter, ředitel Friends of the Earth. Poradce britského premiéra, Brian Wilson, však ocenil odvahu pana Lovelocka postavit se čestně k problematice globálního oteplování a doufá, že ho v jeho postoji podpoří i jiní. Podle něj je jaderná energie „ptáček v našich rukou“, kterého chce zelená lobby zastřelit. /21/

Environmentalisté Bruno Comby, zakladatel sdružení Environmentalists for Nuclear (www.ecolo.org) a James Lovelock, autor myšlenky Gaia – živá planeta

Prameny:

/1/ INSTANT INFO, Praha 1993 (Hlavní zdroj informací: Antinuclear movement. A world survey to nuclear energy. Longman Group, Harlow, Essex, UK, 1990)
/2/ Greenpeace founder makes the case for nuclear. Nuclear News, 2005, č. 7, s. 15 + 20-21
/3/ Waltar, A. E.: America the powerless. Facing our nuclear energy dilemma. Medical Physics Pub. Corporation. Madison, 1996, s. 17 - 27
/4/ Respekt, 1994, s. 6
/5/ Lidová demokracie, 11.1.1994
/6/ Svobodné slovo, 13.5.1993
/7/ Lidové noviny, 28.9.1993
/8/ Respekt, 1994, s. 29
/9/ Jihočeské listy, 6.12.1996
/10/ Moravský den, 14.8.1997
/11/ Daily Press Review No.127 (11.6.1993) MAAE Vídeň
/12/ NucNet, Background No 6, 29.3.1995
/13/ Fishlock, D.: The Drama of Plutonium. Nuclear Engineering Int., 2005, č. 612, s. 41 - 42
/14/ Nuclear Engineering International, 2004, č. 604, s. 6
/15/ Elektrizitaetswirtschaft, 1996, č. 26, s. 1716 - 1718
/16/ Nuclear News, 2003, č. 9, s. 37
/17/ Nuclear News, 1997, č. 6, s. 20
/18/ Power Engineering, 2005, č. 7, s. 26
/19/ NucNet, 2001, Insider No 34
/20/ Nuclear Future, 2005, č. 1, s. 7
/21/ Nuclear Future, 2004, nulté číslo, s. 4

9.0

Vztah některých zemí k jaderné energii

Vztah jednotlivých zemí k jaderné energii byl a stále je ovlivňován celou řadou faktorů, mezi něž patří například:

- Dostupnost vlastních zdrojů energie.
- Vyspělost vědecko výzkumné a průmyslové základny.
- Kvalifikace pracovní síly.
- Možnost získávání energie z jiných zemí.
- Snaha o získání energetické nezávislosti.
- Orientace na ochranu životního prostředí a omezení globálního oteplování.
- Postoje politických stran.
- Postoje veřejnosti.
- Jaderná energie se často stává předmětem předvolebního boje politických stran a při sestavování koaličních vlád menší strany nutí větší strany k ústupkům, aby mohla být koaliční vláda vůbec ustavena.

Uvedené a další faktory se mohou s časem měnit od politiky podpory jaderné energie až po politiku požadující ústup od využívání tohoto energetického zdroje. Od jaderné energie odstupuje např. hospodářsky vyspělé Německo, kde se jaderné elektrárny již významně podílejí na celkové výrobě elektřiny a jsou provozovány bezpečně a ekonomickým způsobem. Celkový přehled o jaderných elektrárnách ve světě podle jednotlivých zemí najdete např. na www.world-nuclear.org. Dále uvádíme jen několik poznámek o stavu jaderné energetiky v některých zemích.

9.1 Stav jaderné energetiky v jednotlivých zemích.

Argentina
Dva reaktory pokrývají cca 9 % spotřeby elektřiny v zemi. Vláda oznámila koncem srpna 2006, že zahájí práce na rozvoji jaderné energetiky. Plán předpokládá dokončení těžkovodního reaktoru v JE Atucha-2 do roku 2010 a prodloužení životnosti reaktorů v JE Atucha-1 a Embalse a výstavbu čtvrtého reaktoru. (Nuclear News, 2006, č. 11, s. 52)

Arménie
Jaderná elektrárna Metsamor s reaktorem VVER se podílí na celkové výrobě elektřiny 42 %. Arménie měla původně v provozu 2 reaktory VVER, ale po velkém zemětřesení v roce 1988 byl jeden z nich trvale odstaven, ačkoliv v době zemětřesení oba reaktory spolehlivě dodávaly tolik potřebnou elektřinu. Vláda uvažuje o výstavbě nové jaderné elektrárny až v roce 2016 skončí životnost stávajícího reaktoru.

Austrálie
V Austrálii není dosud v provozu ani jedna jaderná elektrárna. Podle prohlášení ministra pro vzdělání a vědu z dubna 2005 by však Austrálie měla uvažovat o rozvoji jaderné energetiky, neboť je podle něj načase, aby jaderná energie byla využita ke zmírňování globálního oteplování. V tomto směru je jaderná energie nejvhodnějším řešením v dlouhodobé perspektivě. /1/ Austrálie má velké zásoby uranu, je dodavatelem přibližně ¼ uranu na světovém trhu. Ministerský předseda Howard varoval, aby země neschovávala hlavu do písku pokud jde o jadernou energii. Jestliže se Austrálie nebude angažovat v oblasti jaderné energetiky, jestliže obětuje racionální diskusi na oltář protijaderné teologie a politickému oportunismu, pak za to země zaplatí velkou daň. (Nuclear Future, 2006, č. 5, s. 201)

Belgie
Jaderné elektrárny se podílejí téměř 60 % na celkové výrobě elektřiny. Po volbách v roce 1999 se šest politických stran, které se snažily vytvořit koaliční vládu, dohodlo o postupném uzavírání jaderných elektráren. /2/ Začátkem roku 2003 přijal belgický parlament zákon, který zakazoval výstavbu nových jaderných elektráren a nařizoval ukončit provoz stávajících po dosažení životnosti 40 let. První reaktor

měl být podle tohoto zákona trvale odstaven z provozu v roce 2015. Ve všeobecných volbách v květnu 2003 byly však protijaderně zaměřené strany poraženy.

Brazílie

Kromě dostavby jaderné elektrárny Angra-3 plánuje vláda vybudovat do roku 2030 jaderné elektrárny o celkovém výkonu 4 000 MW_e. V květnu 2006 byl v Rosende zahájen provoz centrifugového obohacovacího závodu. (NEI 2007, č. 635, s. 29)

Bulharsko

Dva bulharské jaderné reaktory zajišťují 35 % spotřeby elektřiny v zemi. V souladu s dohodou o přistoupení do Evropské unie byly k 31.12. 2002 trvale odstaveny první dva bloky JE Kozloduj. Třetí a čtvrtý blok byly vyřazeny v roce 2006 poté, co bulharská vláda přistoupila na požadavek Evropské komise /3/. Odstavení obou bloků mělo negativní vliv na ekonomiku a energetickou situaci země. Inspektoři MAAE opakovaně zdůrazňovali, že bulharské jaderné elektrárny splňují dnešní požadavky na bezpečnost. Bulharská vláda plánuje dokončit dva reaktory v Belene, jejichž výstavba byla zahájena v 80. letech, ale přerušena v letech devadesátých. Dva bloky by měly mít reaktory VVER-1000 modernizovaného typu V- 466. Tyto reaktory mají sekundární kontejnment a obsahují prvky pasivní bezpečnosti (NEI 2007, č. 635, s. 29). Státní elektrárenská společnost NEK vyzvala dvě konsorcia k předložení nabídek. Jedním z nich je Atomstrojexport, zahrnující i společnosti Siemens a Framatome ANP, druhým Škoda JS. /5/ Bulharsko bylo klíčovým dodavatelem elektřiny do zemí bývalé Jugoslávie a také do Řecka v době konání letních olympijských her.

Česká republika

ČR má nejen příznivé podmínky pro další rozvoj jaderné energetiky, ale i takovou energetickou situaci, která si další výstavbu jaderných elektráren nakonec vynutí. ČR patří mezi několik zemí světa, které jsou schopné dodávat jaderné elektrárny při vysokém podílu domácího průmyslu. Má vyspělý průmysl a stavebnictví a vysoce kvalifikovanou pracovní sílu v potřebných oborech. Disponuje vlastními zásobami uranu. ČR je silně závislá na dovozu ropy a zemního plynu, což velmi zatěžuje platební bilanci státu. Velké vodní zdroje jsou již maximálně využity a jiné obnovitelné zdroje energie budou moci přispívat k výrobě elektřiny jen několika procenty. Během maximálně dvou desetiletí bude nutno vyřadit z provozu dožívající uhelné elektrárny a o něco později začít nahrazovat i jaderné elektrárny buď výstavbou nových nebo prodlužováním jejich životnosti o dalších 10 - 20 let, jak je obvyklé v zahraničí. Pokud nebude politická vůle zvyšovat těžbu hnědého uhlí, nebude jiná možnost než výstavba nových jaderných elektráren anebo zvyšování dovozu zemního plynu, což by při jeho rostoucích cenách ještě zvýšilo tlak na platební bilanci a zvýšilo i energetickou závislost na zahraničí. Ve společnosti Škoda JS, jež je nyní součástí skupiny OMZ (Uralmaš-Ižgora Group), byl proveden audit, který potvrdil, že komponenty vyráběné firmou Škoda JS pro jaderné elektrárny jsou v souladu s kódem ASME (American Society of Mechanical Engineers). Auditoři ASME byli přítomni při ukázkách sváření, nedestruktivních metod zkoušení a tlakových zkoušek. Byla rovněž ověřována výrobní dokumentace týkající se kontroly jakosti. Certifikát ASME kódu byl prodloužen do poloviny roku 2010. Ve světě vlastní tento certifikát 90 firem, z toho v Evropě jen 15. (NEI, 2007, č. 636, s. 5)

Architektonická vize dokončení Temelína. V polovině roku 2008 podal ČEZ na MŽP podklady pro EIA (posouzení vlivu na životní prostředí) na dostavbu Jaderné elektrárny Temelín.

Čína
Čína má v provozu 11 reaktorů, které vyrábějí jen několik procent z celkově vyrobené elektřiny v zemi, ale země má velké plány rozvoje jaderné energetiky. Do roku 2020 chce postavit celkem 32 reaktorů o jednotkovém výkonu v rozmezí 1000 až 1600 MWe. /6/ Kromě vývoje lehkovodních reaktorů vlastní konstrukce Čína vyvíjí i vysokoteplotní reaktory. V lednu 2003 byl dán do provozu vysokoteplotní reaktor o výkonu 10 MWe a nyní pokračuje vývoj demonstračního reaktoru tohoto typu o výkonu 150 - 200 MWe. Měl by být uveden do provozu v roce 2010. V této oblasti spolupracuje Čína s Jihoafrickou republikou, která rovněž vyvíjí modulový vysokoteplotní reaktor o výkonu 110 MWe. V polovině prosince 2006 podepsala čínská státní společnost pro jadernou techniku (NPTC) kontrakt na dodávku 4 zdokonalených reaktorů společnosti Westinghouse AP-1000. Měrné investiční náklady se mají pohybovat v rozmezí 1000 - 1200 USD/kWe poté, co budou postaveny první dva reaktory. Asi čtvrtina dodávek bude pocházet z Číny. Pokud Westinghouse získá další objednávky, rozsah čínských dodávek se zvýší. Dne 20.4.2007 dosáhl plného výkonu ruský reaktor VVER-1000, typ V-428 o výkonu 1055 MWe v JE Tianwan a 30.4. i druhý blok této elektrárny. (NEI, 2007, č. 635, s. 30)

Finsko
Podíl na výrobě elektřiny z jaderných elektráren činil v roce 2007 27 %. Po volbách 21. 3. 1999 se 96 členů parlamentu vyslovilo proti výstavbě pátého jaderného reaktoru, zatímco 79 členů bylo pro a 25 bylo nerozhodnutých. /7/ O tři roky později, koncem května 2002, ale finský parlament hlasoval ve prospěch výstavby nového reaktoru poměrem hlasů 107 ku 92. Několik dní po hlasování opustila strana zelených vládu. Elektrárenská společnost TVO zahájila technicko-ekonomické hodnocení výstavby pátého bloku v roce 1998. Ze šesti typů reaktorů byl nakonec vybrán evropský tlakovodní reaktor o výkonu 1600 MWe (EPR-1600). Rozbor vlivu na životní prostředí byl ukončen v roce 2000 a vláda dala souhlas s výstavbou v lednu 2002. Společnost TVO podepsala kontrakt na výstavbu EPR-1600 s francouzsko-německou společností Framatome ANP. Je to první reaktor tohoto typu, který bude vůbec postaven. Parlament souhlasil v roce 2002 i s výstavbou konečného úložiště vyhořelého paliva. Nová elektrárna s reaktorem EPR-1600 bude uvedena do provozu v roce 2010 - 2011, tedy o 2 roky později než se původně plánovalo. Důvodem jsou některé problémy, například nutnost nového odlití některých komponent, mimo jiné všech osmi potrubí chladicího okruhu a čtyř z pěti částí kompenzátoru objemu. Finské elektrárenské společnosti plánují výstavbu dalších jaderných elektráren o výkonu 1000-1800 MWe. Společnost Fortum Power zahájila vypracování studie o vlivu jaderné elektrárny na životní prostředí EIA (Environmental Impact Assessment), týkající se jaderné elektrárny v lokalitě Loviisa. Tuto rozborovou zprávu předala ministerstvu obchodu a průmyslu v červnu 2008. Stejné ministerstvo již obdrželo žádost o vypracování EIA také od společnosti TVO, která uvažuje o výstavbě 4. bloku v lokalitě Olkiluoto. Tepelný výkon jaderných elektráren se pohybuje v obou případech v rozmezí 2800 - 4600 MW. (NEI, 2007, č. 636, s. 4)

Rozestavěný reaktor EPR ve finském Olkiluoto

Francie
Díky prozíravé politice francouzského prezidenta De Gaulla se Francie od počátku 60. a 70. let orientovala na rozvoj jaderné energetiky s cílem dosáhnout co nejvyšší energetické nezávislosti. Nyní se jaderné elektrárny podílejí na celkové výrobě elektřiny kolem 75 % a velké množství elektřiny z francouzských jaderných elektráren odebírá Spojené království, Itálie a další země. Francouzský ministr hospodářství, financí a průmyslu ve vládě zvolené v roce 2002 prohlásil, že jaderná energie je nejlepší odezvou na skleníkový efekt, přičemž problematika radioaktivních odpadů je řešitelná. Mezinárodní agentura pro energii - IEA - konstatovala ve své zprávě z roku 2004, že francouzská energetická politika byla úspěšná v dosahování energetické nezávislosti, ekonomického růstu a ochrany životního prostředí, a to díky centralizovanému přístupu se silnou účastí vlády. Jaderná energie je prý pro Francii životně důležitá a dobře Francii posloužila. /8/ Elektrárenská společnost EdF plánuje postavit jadernou elektrárnu s reaktorem EPR-1600. Nejdříve předloží svůj záměr Národní komisi pro veřejnou diskusi, která zorganizuje roční diskusi ještě před zahájením povolovacího řízení. Existují plány na postavení celkem deseti těchto reaktorů.
Koncem roku 2007 byla zahájena výstavba prvního reaktoru EPR-1600 o výkonu 1650 MWe v lokalitě Flammanville. Investiční náklady se odhadují na 3,3 miliardy EUR, což jsou měrné investiční náklady ve výši 2000 EUR/kWe. Výstavba má trvat 54 měsíců, takže elektrárna bude uvedena do provozu v roce 2012. (NEI, 2007, č. 635, s. 31)

Staveniště nového reaktoru EPR ve francouzském Flamanville

Indie
Indie realizovala svůj jaderný program třicet let v mezinárodní izolaci. V roce 1974 uskutečnila zkoušku jaderné zbraně, nepodepsala smlouvu o nešíření jaderných zbraní a v důsledku toho bylo na ni uvaleno celosvětové embargo na dovoz jaderné technologie a jaderných materiálů.
K významnému obratu došlo v polovině července 2005 při návštěvě indického premiéra v Bílém domě, kde byla podepsána dohoda umožňující americkým a dalším zahraničním firmám dodávat do Indie jaderné materiály, zařízení a technologie. Byly zrušeny veškeré obchodní restrikce zavedené po roce 1974 a Indie se bude moci podílet i na mezinárodním projektu termojaderného reaktoru ITER. Indie poskytne svá jaderná zařízení pod mezinárodní kontrolu MAAE a bude pokračovat ve svém moratoriu zkoušek jaderných zbraní. /9/ V Indii byla zahájena výstavba demonstračního rychlého reaktoru o výkonu 500 MWe, který byl vyvinut indickými vědci a bude určen k využití velkých zásob thoria. Indický ministerský předseda prohlásil, že národním cílem je podstatné zvýšení příspěvku jaderné energie v energetice země. Vyzval jaderný průmysl, aby ztrojnásobil své úsilí k dosažení kvalitativního skoku ve výrobě elektřiny. Záměrem je 20 000 MW do roku 2020. Indie bude podle něj pokračovat ve vývoji rychlých množivých reaktorů a ve využívání bohatých zásob thoria. (Nuclear Future, 2006, č. 1, s. 5)

Írán
První jadernou elektrárnu v Búšehru začala stavět německá firma KWU, ale nedostavěla ji v důsledku války mezi Irákem a Íránem. Dostavbu prvního bloku uskutečňuje dnes Rusko v rámci materiální a technické pomoci podepsané v roce 1995. Koncem února 2005 byla podepsána tajná dohoda o dodávkách ruského jaderného paliva do této elektrárny, která by měla být uvedena do provozu koncem roku 2006. Jaderné palivo bude ve všech etapách dáno pod kontrolu inspektorů MAAE. /10/ Vyhořelé palivo z prvních deseti let provozu bude předáno do Ruska k uložení nebo přepracování. Pokud bude rozhodnuto o výstavbě druhého bloku této elektrárny, bude se pravděpodobně zase jednat o reaktor typu VVER-1000. Íránská vláda plánuje do roku 2020 vybudovat jaderné elektrárny o výkonu 6000 MWe. Dne 15. ledna 2007 prohlásil mluvčí íránského ministerstva zahraničí, že Írán pokračuje ve vývoji obohacování uranu, a to navzdory prosincové rezoluci Rady bezpečnosti, která požaduje ukončení těchto aktivit. Írán neustále tvrdí, že jaderná energie je nezbytná pro jeho ekonomiku. Toto stanovisko nyní podepřela i publikace Národní akademie věd USA a také profesor Roger Stern z univerzity Johna Hopkinse. Profesor se domnívá, že během pěti let může export ropy z Íránu klesnout na polovinu současné úrovně a do roku 2015 dokonce na nulu. Dospěl proto k závěru, že tvrzení Íránu o potřebě jaderné energie je pravdivé a je odezvou na očekávaný pokles příjmů za ropu. (NEI, 2007, č.631, s.7) Předseda íránské organizace pro atomovou energii (AEOI) oznámil, že Írán vypisuje mezinárodní tendr na výstavbu dvou jaderných elektráren s tlakovodními reaktory třetí generace o výkonu 1000 nebo1600 MWe. Tendr se týká projektování, dodávek zařízení, výstavby a uvádění do provozu jaderných elektráren v lokalitě Búšehr. Podle energetické strategie mají být v Íránu postaveny jaderné elektrárny o celkovém výkonu 20 000 MWe. (Nuclear News, 2007, č. 7, s. 48) Na svém zasedání v německém Heiligendammu se účastníci G8 zavázali řešit regionální problém šíření jaderných zbraní diplomatickými prostředky a ve vztahu k Íránu bylo přijato toto prohlášení: "Mezinárodní důvěra ve výlučně mírovou povahu íránského jaderného programu by umožnila otevřít zcela novou kapitolu v našem vztahu s Íránem, a to nejen v jaderné oblasti, ale také v širší politické, ekonomické a technologické oblasti." (NEI, 2007, č. 636, s. 5) V prosinci 2007 byla zveřejněna zpráva US National Inteligence Estimate (NIE), v níž se konstatovalo, že od roku 1993 Írán nepokračuje ve vývoji jaderných zbraní. Podle autorů je to „nejautoritativnější názor zpravodajské komunity v záležitostech národní bezpečnosti." Tato zpráva navazuje na relativně pozitivní zprávu z listopadu 2007, kterou přednesl generální tajemník MAAE El Baradei. Ten potvrdil, že zpráva NIE je v souladu se stanoviskem MAAE. Obě zprávy naznačily, že íránský jaderný program méně ohrožuje mezinárodní bezpečnost než Západ tvrdí a že v podstatě neexistuje konkrétní důkaz o pokračujícím programu jaderných zbraní. NIE připouští, že USA nadhodnocovaly íránskou jadernou hrozbu. (Judith Perera: West turns on Iran. Nuclear Engineering Int. 2008, č. 642, s. 8-9)

Itálie
Itálie byla mezi prvními zeměmi, které začaly stavět jaderné elektrárny. V roce 1987 ale Italové v hlasování rozhodli o uzavření všech tří tehdy provozovaných jaderných elektráren. V důsledku tohoto rozhodnutí nyní Itálie musí dovážet velké množství elektřiny, například z Francie, kde se 75 % elektřiny vyrábí v jaderných elektrárnách. Začátkem roku 2005 prohlásil premiér Berlusconi, že by Itálie neměla opustit myšlenku mít vlastní jaderné elektrárny a naznačil tak možný odklon od italského protijaderného stanoviska.

Japonsko
55 jaderných reaktorů produkuje 30 % elektřiny země. Japonsko trvale rozvíjí jadernou energetiku, aby si zajistilo dostatek elektřiny pro ekonomiku a omezilo znečišťování životního prostředí. Poradní výbor pro přírodní zdroje a energii doporučil vládě, aby se zvýšil podíl elektřiny z jaderných elektráren v roce 2010 až na 42 %, a to z nynějších 29,3 %. Japonsko vyvíjí jak rychlé množivé reaktory, tak vysokoteplotní reaktory, aby maximálně využilo jednak energii přírodního uranu, jednak vytvořilo předpoklady pro jadernou výrobu vodíku. Zkušební vysokoteplotní reaktor dosáhl již teploty chladiva na výstupu z aktivní zóny 950 st. Celsia, což je teplota vhodná pro štěpení vody pro výrobu vodíku. V plánu je výstavba demonstračního vysokoteplotního reaktoru o výkonu 600 MWe a závodu na výrobu vodíku o hodinové kapacitě 60 000 m^3. /4/ Vláda hodlá zrušit grantové a dotační programy na výstavbu klasických elektráren a místo toho chce podporovat výstavbu vodních, geotermálních a jaderných elektráren. Do roku 2014 by mělo být postaveno dalších 15 reaktorů, takže se současný výkon 45 000 MWe zvýší o 20 000 MWe. /6/
Japonská společnost Mitsubishi Heavy Industries (MHI) byla vybrána za klíčovou firmu, která bude vyvíjet demonstrační rychlý množivý reaktor. Do roku 2025 by měl být k dispozici demonstrační reaktor a do roku 2050 komerční rychlý reaktor.Vývoj rychlého reaktoru je součástí strategické energetické politiky zajišťující budoucí zásobování energií. Příslušná ministerstva se shodla na tom,

aby byl vývoj rychlých reaktorů svěřen jediné centrální společnosti. (Modern Power Systems, 2007, č. 5, s. 5)

Jižní Korea

Jižní Korea aktivně rozvíjí jadernou energetiku od 70. let minulého století. Dnes má v provozu 20 jaderných bloků, které se podílejí na celkové výrobě elektřiny pětatřiceti procenty. Do roku 2015 vláda plánuje zvýšit jejich výkon o dalších 11 600 MWe. Země buduje také jaderné elektrárny s reaktory domácí konstrukce KSNPP o výkonu 1000 MWe. Jaderné elektrárny jsou provozovány bezpečně s vysokým koeficientem provozuschopnosti, který se pohybuje kolem 90 %. Vláda podporuje další rozvoj jaderné energetiky, a zaměřuje se nejen na zvyšování bezpečnosti provozu, ale i na využívání radioizotopů v medicíně, zemědělství a průmyslu. Aktivně se též podílí na mezinárodní spolupráci v jaderné oblasti. /11/ Koncem roku 2007 byla zahájena výstavba úložiště nízko a středně aktivních odpadů a projekt za 1,2 miliardy USD bude ukončen v roce 2009. V úložišti bude skladováno na 800 000 sudů po dobu 60 let. Výstavbu umožnilo kladné referendum z listopadu 2005. Díky tomu získá příslušná provincie finanční podporu ve výši 250 milionů USD. (NEI, 2006, č. 618, s. 2)

Výstavba 4 nových bloků Shin Kori na pobřeží Japonského moře u jihokorejskéhu Pusanu.

Kazachstán

Země má 15 % světových zásob uranu. Chce se stát předním dodavatelem palivových tablet. Představitelé Kazachstánu a Ruska podepsali dokumenty o vytvoření tří společných podniků v oblasti jaderné energetiky v hodnotě 10 miliard USD. První společný podnik bude vyvíjet a na trh dodávat reaktory typu VBER-300, které jsou vhodné i pro kazašské podmínky. V rámci druhého podniku bude v Angarsku v Irkutské oblasti vybudováno první mezinárodní středisko pro obohacování uranu a třetí společný podnik se bude zabývat průzkumem a těžbou uranu. Společný podnik bude ročně produkovat 5000 až 6000 tun U, zatímco současná roční ruská těžba představuje jen 3000 tun U. (NEI, 2006, č. 626, s. 3)

Litva

Litva dnes produkuje 70 % elektřiny v jediném reaktoru (typ RBMK) Ignalinské JE. Druhý reaktor musel být na nátlak EU odstaven. Ministerští předsedové Lotyšska, Litvy a Estonska se shodli na vypracování společné energetické strategie a na podpoře iniciativy směřující k výstavbě nové jaderné elektrárny v Litvě. (NEI, 2006, č. 620, s. 3)

Německo

V roce 2007 se jaderné reaktory podílely na celkové výrobě elektřiny 26 %. Německo je příkladem země, která se rozhodla rozvíjet jadernou energetiku, aby snížila svou závislost na dovozu ropy a zvýšila energetickou nezávislost. Sociálně demokratická strana (SPD) a CDU-CSU zpočátku podporovaly tento vývoj. Byly vypracovány rozsáhlé plány výstavby jaderných elektráren o celkovém výkonu 50 000 MWe, vyvíjely se rychlé množivé reaktory a vysokoteplotní plynem chlazené reaktory,

uvažovalo se i o výstavbě přepracovacího závodu, atd. Tento velký program vedl ale k protestům odpůrců, jichž se zúčastňovaly desetitisíce osob, a proti nimž zasahovala i policie. Pokračující demonstrace se odrazily ve změně názoru některých politických stran a SPD se postupně stala protijadernou stranou. Ani po nástupu CDU-CSU k moci ale nemohly být realizovány radikální změny ve prospěch jaderné energetiky, protože odpovědnost za udělování licencí byla v rukou vlád spolkových zemí, kde měla převahu opozice. Nejnákladnějším důsledkem této politiky bylo přerušení výstavby rychlého reaktoru o výkonu 350 MWe (SNR-350) v Kalkaru, zastavení výstavby demonstračního vysokoteplotního reaktoru ve Schmehausenu, zrušení výstavby přepracovacího závodu ve Wackersdorfu, atd. Po vytvoření vládní koalice v roce 1998 mezi sociální demokracií a stranou Zelených, musela SPD přistoupit na požadavek strany Zelených, která požadovala urychlené odstavení všech jaderných elektráren z provozu. Po zdlouhavých rozhovorech vlády s elektrárenskými společnostmi byla uzavřena kompromisní dohoda. Podle ní mohla každá jaderná elektrárna vyrobit množství elektřiny odpovídající výrobě za dobu 32 let od zahájení komerčního provozu. Kromě toho bylo stanoveno, že bude možno počínaje rokem 2000 vyrobit ještě 2 600 TWh elektřiny. Uvedené podmínky v praxi znamenají, že by provoz všech jaderných elektráren měl být ukončen do roku 2020. Proti politice ústupu od jaderné energie protestovaly jak průmyslové kruhy a odbory, tak i strana CDU-CSU a veřejnost. Strana CDU-CSU prohlásila, že pokud vyhraje následující volby, pak opět bude podporovat jadernou energetiku. Předseda odborového svazu zaměstnanců důlního, chemického a energetického průmyslu požádal v roce 2002 premiéra Schroedra o přehodnocení politiky ústupu od jaderné energie, neboť považoval za iluzorní názor ministra pro životní prostředí, J. Trittina, že se obnovitelné zdroje energie budou v roce 2050 podílet padesáti procenty na výrobě elektřiny v zemi. 570 profesorů německých univerzit podepsalo memorandum na podporu dalšího rozvoje jaderné energetiky. Ve veřejnosti klesají sympatie k násilným akcím.
V Německu stále trvá politika ústupu od jaderné energie, ale dostává se pod stále větší tlak. I když strana CDU-CSU nepodporuje tuto politiku, není pravděpodobná její změna, pokud bude v koaliční vládě se sociální demokracií (SPD), která je protijaderná. (NEI, 2007, č. 635, s. 32) Mezinárodní energetická agentura (IEA) naléhá na Německo, aby ukončilo svou politiku ústupu od jaderné energie, neboť její setrvání by mělo vážné důsledky pro energetickou bezpečnost, ekonomickou efektivnost a ekologickou stabilitu. Pokračující politika nepochybně sníží potenciál Německa snižovat emise skleníkových plynů. Kromě toho, uzavírání produktivních jaderných elektráren před skončením jejich životnosti bude vyžadovat další investice, kterým by se jinak dalo zabránit. (NEI, 2007, č. 636, s. 5) Minstr životního prostředí požaduje uzavření pěti nejstarších jaderných elektráren, takže roce 2009 by jich mělo být v provozu jen 10. Proti jeho názoru se staví jak elektrárenské společnosti, tak i veřejnost. Německé jaderné elektrárny patří mezi nejlepší na světě pokud jde o nejvyšší výrobu elektřiny za celou životnost nebo o koeficient využití výkonu za celou životnost elektrárny. Například mezi deseti jadernými elektrárnami s nejvyšší výrobou elektřiny je osm z Německa.

Nizozemí
Nizozemský nejvyšší správní soud blokoval pokus parlamentu, který těsným hlasováním chtěl předčasně ukončit provoz jediné jaderné elektrárny Borssele již v roce 2003. Ministr pro životní prostředí prohlásil, že se stejně pokusí provoz této elektrárny ukončit a vláda tak skutečně učinila./14/ Po volbách ale nová vláda povolila provozovat elektrárnu až do roku 2013, kdy dosáhne životnosti 40 let. Teprve potom se rozhodne, zda bude trvale vyřazena z provozu nebo bude její životnost dále prodloužena. Nová vláda navrhla začátkem ledna 2006, aby JE Borssele mohla být provozována až do roku 2033, tedy 60 let. Společnost vlastnící elektrárnu bude na oplátku investovat 250 milionů EUR do úsporných opatření, čistějších uhelných elektráren a do obnovitelných zdrojů energie. Rovněž vláda vynaloží na tyto účely stejnou částku.Rozbory ukázaly, že prodloužení provozu na 60 let nebude představovat nepřekonatelné problémy. (Nuclear News, 2006, č. 2, s. 63) Nizozemí tak signalizuje obrat ve prospěch jaderné energie, a to jednak z důvodu zabezpečení dodávek energie, jednak z obav z klimatických změn. Plánuje se dokonce výstavba nové jaderné elektrárny o výkonu 1680 MWe, která by v roce 2010 snížila emise CO_2 třikrát více než všechny větrné elektrárny v Nizozemí. (Nuclear Future, 2006, č. 5, s. 201)

Pákistán
Na jadernou elektrárnu Kanupp o výkonu 125 MWe bude napojeno odsolovací zařízení o denní kapacitě 1600 m^3 pitné vody. Bude to první krok k výrobě odsolené vody ve velkém měřítku jako významný společensko ekonomický úkol této země. Pákistán v tomto směru spolupracuje s MAAE a byla již zahájena výroba potřebných zařízení. (Nuclear Future, 2007, č. 2, s. 99)

Polsko

I když je uhlí hlavním zdrojem energie, Polsko plánuje diverzifikovat své energetické zdroje a vybudovat jadernou elektrárnu se dvěma jadernými bloky. Záměr vybudovat jadernou elektrárnu vyplývá z nezbytnosti krýt rostoucí poptávku po elektřině, snižovat emise CO_2 a snižovat cenu elektřiny. Je třeba ale splnit několik předpokladů:

- veřejnost musí s tímto plánem souhlasit,
- musí se zvýšit prostředky na jaderný výzkum a vývoj,
- připravit legislativu a financování.

Polské jaderné projekty byly již dvakrát přerušeny. Jednou to bylo v padesátých letech a podruhé po černobylské havárii. Jaderné elektrárny ale nemohou nahradit elektrárny uhelné a uhelný a jaderný průmysl budou muset spolupracovat při uspokojování energetických potřeb a omezování globálního oteplování. /12/ Předseda vlády Kaczynski prohlásil v parlamentě, že by měly být připravovány plány k výstavbě prvních jaderných elektráren. (Nuclear Future, 2006,a č. 5, s. 201) Polsko a tři pobaltské země mají zájem o vybudování další jaderné elektrárny v lokalitě Ignalinské jaderné elektrárny. Jaderná energie je zde opět v popředí zájmu, protože je ekonomická a nepřispívá ke skleníkovému efektu. Nová jaderná elektrárna by měla být postavena do roku 2015, aby zajistila energetickou a národní bezpečnost.(Nuclear News, 2007, č. 5, s. 53)

Rumunsko

Jaderné bloky se zde podílejí třinácti procenty na výrobě elektřiny. Druhý blok byl spuštěn v r. 2008. Plánuje se také dokončení třetího a čtvrtého bloku JE Cernavoda a zájem již projevilo 13 firem a sdružení z USA, Rumunska, Itálie, Kanady, Belgie, Německa, Španělska a Jižní Koreje. (Nuclear Future, 2006, č. 9, s. 107)

Stávající i budované reaktory Černavoda v Rumunsku

Rusko

V roce 2007 se jaderné elektrárny podílely na výrobě elektřiny 16 %. Prezident Putin zdůraznil strategický význam jaderné energie s cílem snížit závislost na dodávkách zemního plynu k výrobě elektřiny. /15/ V roce 2000 se vlády Ruska a USA dohodly na snižování zásob vojenského plutonia a vysoce obohaceného uranu a o jejich využití k výrobě paliva pro jaderné reaktory. Dlouhodobý plán jaderné energetiky počítá s využitím rychlých reaktorů nové generace, které budou řešit problematiku bezpečnosti, ekonomickou efektivnost a riziko šíření jaderných zbraní. Po deseti letech vývoje je nyní k dispozici projekt přirozeně bezpečného olovem chlazeného rychlého reaktoru označovaného jako BREST. Je to víceúčelový reaktor určený k výrobě elektřiny, ke spalování plutonia z vojenských hlavic, k výrobě radionuklidů a k transmutaci dlouhožijících štěpných produktů. V současné době má Rusko zájem o výstavbu mezinárodního úložiště vyhořelého paliva. Úložiště by mohlo být vybudováno v důlním a chemickém kombinátu v sibiřském městě Železnogorsk v Krasnojarské oblasti. Tento

záměr je v souladu i s plány MAAE. Rusko je dnes jedinou zemí s legislativou, která umožňuje realizovat takový projekt. Roční kapacita úložiště by mohla dosáhnout až 70 000 t vyhořelého paliva. Náklady se odhadují na 4,7 miliardy USD. /16/ Ambicí bývalého prezidenta Putina bylo přeměnit Rusko na energetickou supervelmoc. Jeho energetický program předpokládá, že do roku 2030 bude postaveno 40 nových jaderných elektráren za přibližně 60 miliard USD. (NEI, 2006, č. 621, s. 3) Prezident prohlásil koncem ledna 2006, že je země připravena vybudovat „prototypové" mezinárodní středisko jaderného palivového cyklu pod kontrolou MAAE. Středisko by pomohlo posílit mezinárodní záruky nešíření jaderných zbraní a umožnilo by přístup k jaderné energii všem zemím za podmínky, že budou plnit všechny požadavky režimu nešíření jaderných zbraní. (Nuclear Future, 2006, č. 2, s. 57)
Italská firma Enel podepsala předběžnou dohodu s ruskou společností Rosatom o rozvoji jaderné energetiky v Rusku a v zemích střední a východní Evropy. (NEI, 2007, č. 634, s. 9) Francouzská společnost Alstom uzavřela se společností Atomenergomaš dohodu o ustavení společného podniku, který bude vyrábět konvenční zařízení pro jaderné elektrárny na bázi francouzské technologie a turbíny typu Arabella. Ruská firma se specializuje na projektování, výrobu, montáž a opravy zařízení pro ruské jaderné elektrárny a poskytne novému podniku výrobní budovu o rozloze 60 000 m2 v Podolsku. Nový podnik bude schopen dodávat kompletní jaderné elektrárny, včetně konvenční části. (Nuclear News, 2007, č. 6, s. 42) V Rusku byla zahájena výstavba první plovoucí jaderné elektrárny, která ponese jméno akademika Lomonosova. Předpokládá se, že v letech 2008 až 2016 bude postaveno celkem 7 těchto elektráren. Výstavba prvních dvou potrvá 4 roky, u posledních 4 se sníží na 2 až 2,5 roku. Vývoj bude stát 200 milionů USD a plovoucí elektrárna bude uvedena do provozu v roce 2010. (Modern Power Systems, 2007, č. 5, s. 7) Společnost Gazprom bude potřebovat minimálně 5 těchto mobilních elektráren, aby mohla rozvíjet těžbu ropy a zemního plynu v přímořských oblastech. Zájem projevily také ruské firmy těžící uhlí a neželezné kovy a zákazníci z Chile, Vietnamu, Austrálie, Číny, Jižní Koreje, Indonésie a Saudské Arábie. (NEI, 2007, č. 630, s. 22, 23)

Slovinsko
Počítá se s výstavbou druhého jaderného bloku o výkonu 1000 MWe v JE Krško. Zahájení výstavby se plánuje na rok 2013 a zahájení komerčního provozu v roce 2017. Slovinsko odmítá tvrzení, že při vstupu do EU v roce 2004 slíbilo uzavřít svou jedinou jadernou elektrárnu Krško. S tímto požadavkem přišly úřady rakouské spolkové země Korutany. (Energetika, 2007, č. 6, s. 208)

Spojené království
Podíl jaderných elektráren na celkové výrobě elektřiny byl v roce 2007 15 %. Britská vláda uveřejnila koncem února 2003 Bílou knihu o energetické politice. V ní se kladl důraz na snižování emisí CO_2, na podporu obnovitelných zdrojů energie a technologií čistého uhlí, na zvyšování energetické účinnosti a na úsporná opatření. V podstatě se nepočítalo s dalším rozvojem jaderné energetiky v nejbližší budoucnosti. Tento postoj potvrdil začátkem prosince 2004 i ministr energetiky. Avšak již začátkem roku 2005 se objevily známky toho, že energetická politika vlády není životaschopná, protože se například nedaří plnit cíle ve snižování emisí CO_2, které jsou na stejné úrovni jako v roce 1998, kdy se labouristická strana ujala vlády. V Bílé knize o energii v roce 2003 byly zmiňovány nepatrné vyhlídky pro jadernou energii. Uplynuly ale jen tři roky a situace se radikálně mění. Premiér Tony Blair se v polovině roku 2006 jasně vyslovil ve prospěch jaderné energie, protože obnovitelné zdroje energie ani efektivnější využívání energie nemohou poskytnout celkové řešení nedostatku energie, kterému bude muset země čelit. V současné době se připravují legislativní kroky pro urychlenou výstavbu nových jaderných elektráren. Pokud jde o ekonomiku jaderné energie, uvádí se, že vyšší budoucí ceny fosilních paliv a pravděpodobné zahrnutí poplatků za emise CO_2 do ceny elektřiny ve výši 45 USD/tCO_2, výrazně zlepšují ekonomické vyhlídky jaderných elektráren. (Nuclear News, 2006, č. 10, s. 36) Prověrka energetické situace naznačuje, že bude nutno naléhavě postavit 8 až 10 jaderných reaktorů, aby se snížila závislost na dovážené energii. John Hutton, ministr obchodu, podnikání a legislativních reforem prohlásil, že Spojené království potřebuje stavět nové jaderné elektrárny co nejrychleji a že vláda podniká legislativní a regulační kroky pro dosažení tohoto cíle. První nová JE by měla být postavena během deseti let. V úvahu připadají reaktory EPR-1600 společnosti Areva, ESBWR společnosti GE-Hitachi, a AP-1000 společnosti Westinghouse. (Nuclear Future, 2008, č. 3, s. 122)

Španělsko

Pětinu elektřiny v zemi vyrábí 8 reaktorů. Konzervativní strana Partido Popular (PP) premiéra Aznara získala ve volbách v roce 2000 183 mandátů z 350, zatímco levicové opoziční strany požadující ústup od jaderné energie 133 mandátů. Strana PP podporuje další provoz jaderných elektráren. /18/ Uvažuje se i o prodlužování životnosti nynějších jaderných elektráren, protože dosud nejsou k dispozici obnovitelné zdroje energie, které by jaderné elektrárny nahradily. (Nuclear Future, 2006, č. 5, s. 201)

Švédsko
Švédsko vyrábí polovinu elektřiny v jaderných elektrárnách. Po nehodě v americké jaderné elektrárně Three Mile Island-2 přijal švédský parlament v roce 1980 zákon, který požadoval, aby do roku 2010 byl ukončen provoz všech 12 jaderných elektráren o výkonu přes 10 000 MWe. V roce 1997 parlament schválil ukončení provozu prvního reaktoru v JE Barseback o výkonu 600 MWe.Termín ukončení provozu byl stanoven k 1.7.1998 s tím, že druhý blok zastaví provoz o tři roky později, tedy v roce 2001.Vláda zdůvodňovala ukončení provozu jednak tím, že byl přebytek elektřiny a jednak tím, že chybějící elektřina bude moci být nahrazena elektřinou z větrných a slunečních elektráren, z malých vodních elektráren, spalováním biomasy a úspornými opatřeními. Rozhodnutí vlády vyvolalo nesouhlas jak majitele elektrárny, tak průmyslových kruhů, odborů i široké veřejnosti. Přesto byl první blok uzavřen s osmnáctiměsíčním zpožděním k 30.11.1999.

Jeden ze tří reaktorů Jaderné elektrárny Forsmark ve Švédsku

Společnost Sydkraft obdržela kompenzaci ve výši 5,9 miliard SEK. V jižní části Švédska se ale brzy objevil nedostatek elektřiny, který byl kompenzován dovozem „špinavé“ elektřiny z dánských a polských uhelných elektráren. V roce 2002 se Švédsko poprvé stalo čistým dovozcem elektřiny, když dovoz převýšil vývoz o 5,3 TWh. Elektřina z Polska byla dodávána prostřednictvím podmořského kabelu. Ironií je to, že kabel měl původně sloužit hlavně pro vývoz švédské elektřiny do Polska. Druhý blok JE Barseback měl být po dalším odkladu trvale odstaven k 1.7.2003, ale ani tehdy k tomu nedošlo, protože se nenašla náhrada za jím vyrobenou elektřinu. Tento blok byl definitivně uzavřen do konce roku 2005. Průzkumy veřejného mínění z června 1999, prosince 2001 a v roce 2003 ukázaly, že kolem 80 % dotazovaných bylo pro pokračování provozu jaderných elektráren a někteří byli i pro výstavbu nových. Také 76 % mladší generace bylo pro využívání tohoto energetického zdroje. Vedoucí představitelé 3 odborových svazů se vyslovili pro další výstavbu jaderných elektráren. Menšinová sociálně demokratická strana je ve své protijaderné politice podporována opoziční centristickou stranou, zatímco liberální konzervativní strana je pro výstavbu 2 - 3 nových jaderných elektráren. Tato strana rovněž požaduje citlivější energetickou politiku. /19/ (Sociální demokracie za předsednictví zavražděného Olofa Palmeho byla původně propagátorem jaderné energetiky.) Politika vyřazování jaderných elektráren z provozu je stále předmětem politických diskusí, protože v souvislosti se suchými roky posledních let se snižují zásoby vody ve vodních nádržích a je ohrožena výroba elektřiny z vodních elektráren, které se podílejí na výrobě elektřiny až padesáti procenty. Záměr orientace na elektřinu z větrných a slunečních elektráren vůbec nevyšel, protože výroba elektřiny z těchto elektráren je tak nízká, že je vhodná jen k zaokrouhlování k celkovému vyrobenému množství cca 145 TWh za rok.
Druhý blok JE Barseback byl uzavřen koncem roku 2005 a vláda vyplatila majiteli kompenzaci ve výši 5,6 miliardy SEK (697 milionů USD). Tento blok mohl být v provozu až do poloviny roku 2017, kdy by dosáhl životnosti 40 let. (NEI, 2005, č. 617, s. 2) Současné diskuse se týkají nikoliv toho, kdy odstavit další jaderný blok, ale toho, jak zajistit dlouhodobé dodávky energie. Nikdo dnes nepožádá jaderný průmysl, aby natrvalo odstavil další reaktor. Po volbách v roce 2006 byla ustavena středopravá

aliance křesťanských demokratů, strany středu, liberální strany a pravicové strany, které se dohodly na tom, že za této vlády nedojde k uzavírání jaderných elektráren. Liberální strana dokonce požaduje výstavbu nových jaderných elektráren. Ve prospěch jaderné energie hovoří dobré provozní výsledky jaderných elektráren, růst ceny ropy a problematika globálního oteplování. Elektrárenské společnosti plánují v příštích letech vynaložit 3 miliardy EUR na zvyšování výkonu současných jaderných elektráren, což umožní zvýšit výrobu elektřiny o 10 TWh za rok. To představuje přibližně 10 % celkové spotřeby elektřiny. Veřejné mínění i politici se stále více přiklánějí k jaderné energii. (NEI, 2006, č. 626, s. 6-7) Švédsko je jedinou zemí, která má diskriminační daň proti jaderné energetice. Přesto a přes uzavření Barsebacku výroba elektřiny z jádra stoupá díky modernizacím jaderných elektráren.

Švýcarsko

Podíl jaderných elektráren na celkově vyrobené elektřině je 40 %. Prezident švýcarského sdružení pro obchod a průmysl zdůraznil, že jaderná energie je nezbytná pro ekonomiku země a pro zajištění konkurenční schopnosti průmyslu v souvislosti s deregulací energetiky. Švýcarské obyvatelstvo odmítlo v referendu dvě protijaderné iniciativy, a to Moratorium + a Elektřina bez jaderné energie. Proti se vyslovilo 60 resp. 67 % hlasujících. Také dolní komora parlamentu odmítla návrh na omezení provozní životnosti jaderných elektráren na 30 a 40 let a návrh na zákaz přepracování vyhořelého paliva. /3/ Odstavení jaderných elektráren z provozu by stálo Švýcarsko minimálně 62 miliard švýcarských franků (40 miliard EUR) /20/. Švýcarská federální rada v únoru 2007 oznámila, že mění svou energetickou politiku tak, aby se vyhnula nedostatku energie po roce 2020, a proto předpokládá pozitivní přínos jaderné energie. Existujících 5 provozovaných jaderných elektráren bude nutno nahradit a doplnit novými. Nová politika stojí na třech pilířích: úspory energie a účinnost, obnovitelné zdroje energie a centrální elektrárny, mezinárodní spolupráce. Tato doporučení vycházejí ze zprávy ministerstva životního prostředí, dopravy, energetiky a komunikací, v níž se uvádí, že současná energetická strategie nezaručí ve střednědobé a dlouhodobé perspektivě dodávky energie a povede k rostoucí závislosti na zahraničních dodávkách. (Nuclear News, 2007, č. 5, s. 52) Společnost Atel požádala o souhlas s výstavbou nové JE v blízkosti JE Goesgen. Výkon reaktoru má být 1100 - 1600 MWe a má se jednat o lehkovodní reaktor třetí generace. Investiční náklady se odhadují na 5,8 až 6,7 miliardy USD. (Nuclear News, 2008, č. 8, s. 67)

USA

Po mnoholetých diskusích schválil prezident Bush v srpnu 2005 energetický zákon, který podle jeho slov umožní získávat a používat čistější domácí zdroje energie efektivním způsobem, a to z uhlí, ropy, zemního plynu a jaderné energie. Díky tomu se sníží závislost na zahraničních dodávkách energie. Jaderná energie je podle prezidenta jedním z nejdůležitějších zdrojů k výrobě elektřiny a koncem tohoto desetiletí bude opět zahájena výstavba nových zdokonalených reaktorů třetí a čtvrté generace. Jaderná energetika umožní dosáhnout a udržet cíle v oblasti národní, ekonomické a ekologické bezpečnosti a vysoké životní úrovně. /21/ Jaderný průmysl má ambiciózní plány, neboť chce do roku 2020 vybudovat jaderné elektrárny o výkonu 50 000 MWe. Nynější Americká administrativa podporuje rozvoj jaderné energetiky několika způsoby, například spoluúčastí se soukromým průmyslem na vývoji reaktorů 4. generace, částečným financováním prvních několika nových jaderných elektráren a zjednodušováním povolovacího řízení. Kongres již schválil 3 licenční postupy pro nové jaderné elektrárny:

- Předčasné povolení lokality, které umožní investorovi zvolit si lokalitu, aniž by se hned zavázal k výstavbě jaderné elektrárny.
- Včasná certifikace projektu reaktorů. Byly již schváleny 3 certifikace nových reaktorů, které budou moci být stavěny.
- Jediná kombinovaná licence pro výstavbu i provoz JE. Dříve bylo nutno žádat nejprve o stavební povolení a teprve potom o povolení provozu.

S dalším rozvojem jaderné energetiky souhlasí většina Američanů. V květnu 2005 to bylo 70 % dotazovaných, proti bylo 24 %. Obdobně tomu bylo i v roce 2003, a to dva roky po 11. září 2001, navzdory zprávám o možných hrozbách teroristických útoků proti jaderným elektrárnám. Za administrativy prezidenta Cartera byla jaderná energie považována za poslední východisko z nouze. Tehdy byl přerušen vývoj rychlých reaktorů, přepracování vyhořelého paliva i vývoj vysokoteplotních reaktorů. To nakonec vedlo k zaostávání USA v těchto oblastech za jinými zeměmi a nyní se USA snaží dohnat své zpoždění spoluprací s jinými aktéry. USA se opět vrací k přepracování vyhořelého paliva. Byl zahájen program, jehož cílem je umožnit přepracování v rámci globálního partnerství v oblasti jaderné energie (Global Nuclear Energy Partnership - GNEP). V rozpočtu na finanční rok 2007 byla pro tyto účely vyčleněna částka 250 milionů USD, která by se do roku 2009 mohla zvýšit až

na 1 miliardu USD. Program je součástí iniciativy prezidenta Bushe a předpokládá spolupráci s jinými zeměmi, které se zabývají problematikou jaderného paliva. (Modern Power Systems, 2006, č. 3, s. 2) Americká jaderná regulační komise (US NRC) prodloužila provozní licenci u 48 jaderných reaktorů o dvacet let na šedesát let a zdá se, že během několika let budou moci být všechny jaderné reaktory v USA provozovány 60 let. Podle komisaře NRC J. Merrifielda bude zahájen proces, na jehož konci bude možno většině provozovaných reaktorů povolit životnost až 80 let. Díky tomu by se jaderné elektrárny staly ekonomicky výhodnějšími než je tomu dnes. (Nuclear Future, 2007, č. 3, s. 110) Kandidát na prezidenta USA John McCain požadoval, aby do roku 2030 bylo v USA vybudováno 45 nových jaderných elektráren a dalších 55 JE bez bližšího časového určení. Zdůraznil rovněž význam výzkumu a vývoje technologií čistého uhlí, na nějž chce ročně vynakládat 2 miliardy USD. (Nuclear News, 2008, č. 8, s.13). V polovině roku 2008 eviduje Nuclear Energy Institute zájem o stavební a provozní licenci pro 33 nových reaktorů (www.nei.org)

Úložiště jaderných odpadů v Yucca Mountains (Nevada)

Turecko

Turecká vláda sice rozhodla o odložení výstavby jaderné elektrárny Akkuyu, což ale neznamená, že se v budoucnu jaderné elektrárny stavět nebudou. /11/ Ministerský předseda Erdogan požaduje, aby do roku 2015 byly vybudovány 3 jaderné elektrárny o celkovém výkonu 5000 MWe. Podle jeho slov je ekonomický rozvoj tak rychlý, že do roku 2020 vzroste poptávka po energii o 60 %. Při návštěvě tureckého prezidenta v Moskvě koncem června 2006 prohlásil prezident Putin, že vidí možnosti spolupráce s Tureckem v oblasti jaderné energetiky. Společnost Atomstrojexport je připravena podílet se na výstavbě tureckých jaderných elektráren. (Nuclear News, 2006, č. 9, s. 106)

Evropská unie

Evropský výbor pro ekonomiku a sociální záležitosti (EESC) se vyjádřil, že EU se nemůže obejít bez jaderných elektráren, které se dnes podílejí na výrobě elektřiny přibližně 35 procenty. Náhrada jaderné energie obnovitelnými zdroji je v dohledné době zcela nereálná, a to jak v Evropě, tak na celém světě. Mluvčí EESC požadoval zahájení informační kampaně o jaderné energii, aby občané EU byli informováni o pravém stavu věcí. /22/ EESC je poradním orgánem Evropské komise a zahrnuje ekonomickou a společenskou složku občanské společnosti, reprezentovanou například odbory, zaměstnavatelskými svazy a dalšími veřejnými skupinami. Rovněž výbor pro průmysl, zahraniční obchod, výzkum a energii (ITRE) uveřejnil zprávu, v níž se mimo jiné uvádí /23/:

- Jaderná energie se nejvíce podílí na výrobě elektřiny v základním zatížení a neprodukuje skleníkové plyny.
- Spolehlivé zásobování elektřinou na bázi obnovitelných zdrojů energie nemůže být zajištěno z důvodu přetržitosti výroby.
- Nelze podceňovat vliv jaderné energetiky v boji proti globálnímu oteplování.
- Problém radioaktivních odpadů je řešitelný u těch, kdo chtějí naslouchat.

Evropský parlament hlasoval v roce 2000 poměrem hlasů 347 ku 125 při 34 abstencích proti návrhu Zelených, kteří požadovali zákaz přepracování vyhořelého paliva. /23/ Komisař EU pro vnitřní trh a daně vyzval v roce 2002 některé vlády EU, aby znovu zvážily ústup od jaderné energie. Jaderná energie podle něj přispívá ke snižování energetické závislosti, zvyšuje diverzifikaci zdrojů a pomůže vyrovnávat výkyvy cen ropy a zemního plynu. Poukázal rovněž na to, že se o jaderné energii diskutuje na základě neopodstatněných emocí. Na podporu rozvoje jaderné energetiky v EU hovoří i očekávaná zvyšující se závislost zemí EU (15) na dodávkách primární energie ze zahraničí, jak ukazuje tab.9.1. Odmítnutí jaderné energie by znemožnilo dosáhnout cílů při snižování emisí CO_2. (Nuclear Future, 2008, č. 1, s. 66)

Tab.9.1: Očekávaná závislost zemí EU (15) na zahraničních dodávkách energie (%)

Zdroj energie	**1995**	**2020**
Ropa	72,9	86,1
Zemní plyn	39,9	67,3
Uhlí	39,5	67,8
Celkem	46,4	63,4

Světová energetická rada (WEC)
Předseda světové energetické rady prohlásil v roce 2002, že by bylo neodpovědné, kdyby bohaté země uzavíraly své jaderné elektrárny, neboť by to vedlo jak k růstu emisí skleníkových plynů, tak také k růstu cen fosilních paliv. Podle prohlášení generálního sekretáře WEC je jaderná energie výhodná z ekonomického i ekologického hlediska, z hlediska cenové stability, vysokých koeficientů provozuschopnosti a je také v souladu s cíli udržitelného rozvoje světa. /25/

IPCC
Mezinárodní panel o změnách klimatu (IPCC) uvedl ve své čtvrté rozborové zprávě o technologiích ke zmínění globálního oteplování, že jaderná energie je klíčovou technologií, která je již dnes k dispozici. Mezi další technologie tohoto druhu patří záchyt a skladování CO_2 a pokročilé technologie obnovitelných zdrojů energie, včetně sluneční a slapové energie a energie mořského vlnění. (NEI, 2007, č. 635, s. 5)

Prameny:

/1/ Nuclear News, 2005, č. 7, s. 44
/2/ Nuclear News, 1999, č. 9, s. 96
/3/ Nuclear Engineering Int., 2003, č. 587, s. 24
/4/ Nuclar Future, 2004, nulté číslo, s. 7 + 9
/5/ Nuclear News, 2005, č. 10, s. 41
/6/ Nuclear News, 2005, č. 6, s. 46 - 47
/7/ Nuc Net, 1999, News No 146
/8/ Nuclear News, 2004, č. 10, s. 31
/9/ Nuclear News, 2005, č. 9, s. 17
/10/ Nuclear News, 2005, č. 4, s. 48
/11/ Nuclear Engineering Int., 2002, č. 581, s. 47
/12/ Atomwirtschaft, 2005, č. 8/9, s. III
/13/ NucNet, 1997, News No 450
/14/ NucNet, 2000, News. No 63
/15/ NucNet, 2000, News No131
/16/ Nuclear Engineering Int., 2005, č. 613, s. 2
/17/ Nuclear Future, 2005, č. 2, s. 52
/18/ NucNet, 2000, News No 97
/19/ NucNet, 2001, News No 392
/20/ NucNet, 2001, News No 13
/21/ Nuclear Engineering Int., 2005, č. 614, s. 4
/22/ Nuclear Engineering Int., 2004, č. 595, s. 2
/23/ NucNet, 2001, News No 267
/24/ NucNet, 2000, News No 188
/25/ Nuclear Engineering Int., 2003, č. 588, s. 45 - 46

10.0

Perspektivy jaderné energetiky

Jaderná energetika dospěla do současného stavu, kdy se podílí na světové výrobě elektřiny 16 % a na spotřebě primární energie 6 %, za padesát let. Je to mnohem kratší doba nežli toho dosáhly jiné energetické zdroje, například uhlí nebo vodní energie. U vodní energie to trvalo přes 100 let.
V současné době je výroba elektřiny v jaderných elektrárnách soustředěna hlavně v hospodářsky vyspělých zemích. Jen 10 % jaderných elektráren se nachází v rozvojových zemích, kde se ale v příštích desetiletích očekávají nejvyšší přírůstky počtu obyvatelstva, silný ekonomický růst a v důsledku toho také vysoká poptávka po energii. Příkladem jsou Brazílie, Čína a Indie, kde se jaderné elektrárny zatím podílejí jen několika procenty na výrobě elektřiny.

Při volbě energetické strategie čelí každá země nebo region rozdílným podmínkám. Evropa se například nemusí obávat populační exploze. Jiná situace je ale v Číně nebo Indii, kteréžto země musí čelit hladu a chudobě, a proto růst spotřeby energie je pro ně hlavním problémem /1/. Některé očekávané problémy světa v 21. století výstižně charakterizují body ve zprávě představitelů sedmi amerických a devíti ruských národních laboratoří, adresované prezidentu Bushovi a Putinovi /2/:

- Nastal čas pro vypracování komplexního a realistického plánu dalšího rozvoje a využívání jaderné energie v celosvětovém měřítku, který by umožňoval přístup k jaderné energii všem zemím světa, ale současně by snížil riziko šíření jaderných zbraní, jaderného terorismu a škodlivých vlivů na životní prostředí.
- Nelze již pochybovat o tom, že nastane nová jaderná éra. Růst světové poptávky po energii vyvine silný tlak na dostupnost nejaderných paliv, na kvalitu životního prostředí a klimatické změny.
- Zvýší se pravděpodobnost vzniku mezinárodních konfliktů v souvislosti se závislostí na dodávkách fosilních paliv.
- Pouze jaderná energie je schopná krýt světovou poptávku po bezpečném, čistém a životaschopném zdroji k výrobě elektřiny a vodíku.
- S pomocí vlád a regulačních a ekonomických podmínek by jaderná energie mohla krýt do roku 2050 30 až 40 % světové poptávky po elektřině. K dosažení této vize musí hospodářsky vyspělé země dodávat jaderně energetické systémy rozvojovým zemím, které budou potřebovat další energetické zdroje.
- Do poloviny 21. století by zdokonalené reaktory mohly vyrábět i velká množství vodíku pro dopravní prostředky a snížit tak závislost na dodávkách ropy.
- Jaderné technologie pro příští jadernou éru musí překonat současné systémy z celé řady hledisek. Například jaderné palivové cykly musí být optimalizovány z hlediska efektivnosti, odolnosti proti šíření jaderných zbraní, minimalizace tvorby odpadů a bezpečnosti. Vyhořelé palivo musí sloužit k získání vedlejších cenných produktů pro aplikaci v medicíně, průmyslu, zemědělství a energetice.
- Aby jaderná energie mohla úspěšně sehrát svoji roli v optimálním mixu s fosilními palivy a obnovitelnými zdroji energie, musí být k dispozici uzavřený palivový cyklus a zejména rychlé reaktory. Bez rychlých reaktorů nebude jaderná energetika moci sehrát svou důležitou úlohu.

Během stagnace jaderné energetiky v hospodářsky vyspělých zemích naštěstí nepřestaly pracovat výzkumné a vývojové organizace, které připravovaly studie, koncepce a projekty nových reaktorů malých, středních i velkých výkonů využitelných později v nové éře jaderné energetiky, která se již tehdy předpokládala.

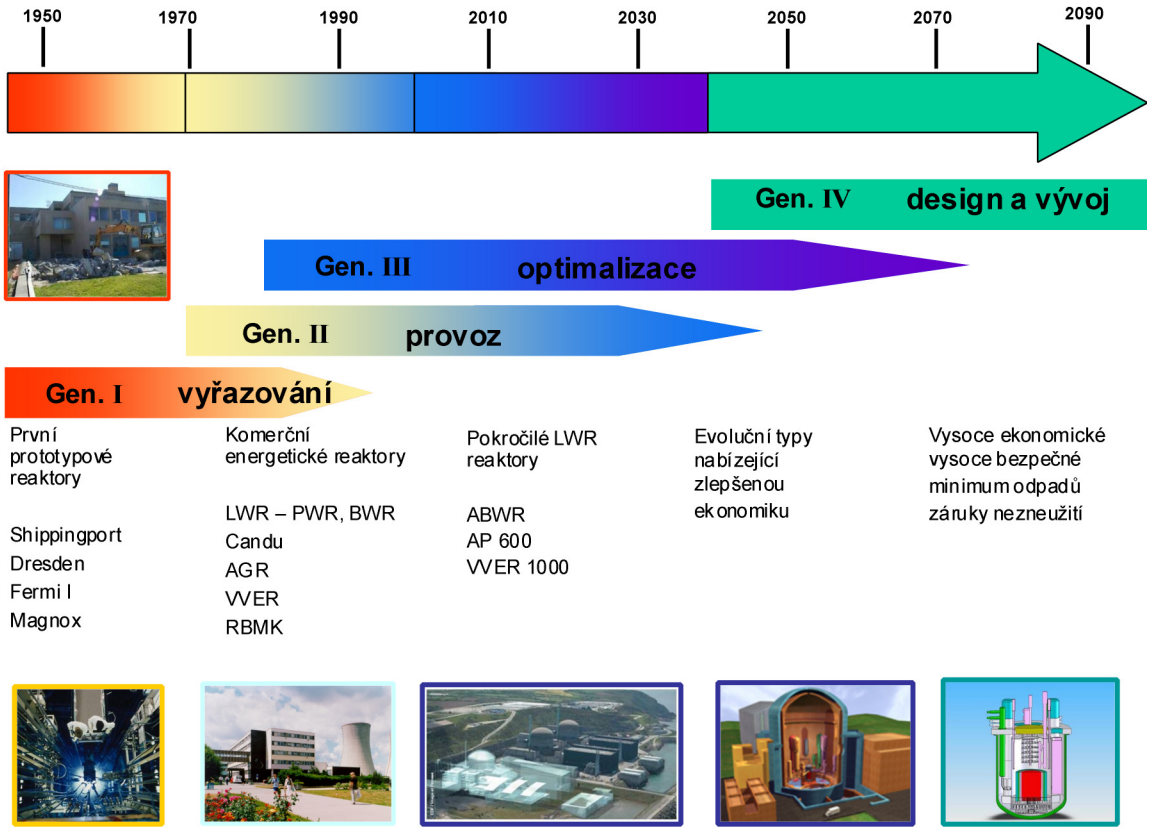
10.1 Mezinárodní spolupráce při vývoji zdokonalených reaktorů

Ve světě existuje široká škála koncepcí, projektů a programů vývoje inovovaných zdokonalených reaktorových systémů použitelných v nové éře jaderné energetiky v příštích desetiletích. Ve vývoji jsou jak malé reaktory o výkonech několika desítek až stovek MWe, tak reaktory velkých výkonů v rozmezí

1000 až 1700 MWe. Tyto koncepce zahrnují všechny dnes známé typy reaktorů: lehkovodní, těžkovodní, vysokoteplotní i rychlé.

V posledních několika letech se realizují multinárodní programy zaměřené na vývoj zdokonalených reaktorů pro střednědobé i dlouhodobé aplikace. Jsou to zejména tyto hlavní programy /3/:

- Mezinárodní fórum generace IV (GIF - Generation IV International Forum) organizované USA.
- Mezinárodní projekt inovovaných jaderných reaktorů a palivových cyklů (INPRO - International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles), organizované MAAE.
- Evropská síť Michelangelo (Micanet) zaměřená na konkurenceschopnost a udržitelnost jaderné energie v EU.



Vývoj generací jaderných reaktorů

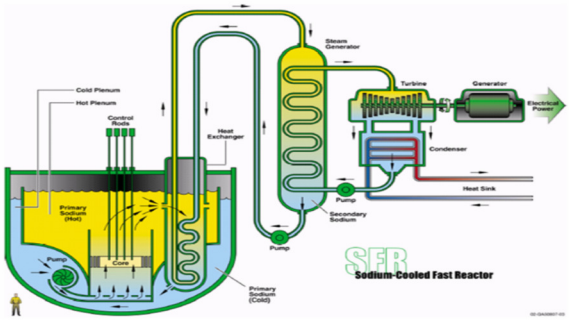
10.1.1 Mezinárodní fórum generace IV (GIF) /3,12/

V roce 1997 vypracoval poradní výbor pro vědu a techniku prezidenta USA program výzkumu a vývoje, který se týkal energetických a ekologických potřeb 21.století. V programu byla zdůrazněna důležitost životaschopné jaderné energetiky pro krytí budoucí poptávky po energii. Program GIF se zaměřuje na vývoj reaktorových systémů 4.generace, které nabídnou výhody v oblasti ekonomiky, bezpečnosti a spolehlivosti a které by mohly být komerčně využity do roku 2030. Cílem je využít mezinárodní zkušenosti, zdroje a zkušební zařízení ke zvýšení efektivnosti výzkumu a vývoje a k zamezení duplicit. Členy GIF jsou: USA, Argentina, Brazílie, Kanada, Francie, Japonsko, Jižní Korea, Jihoafrická republika, Švýcarsko a Spojené království.

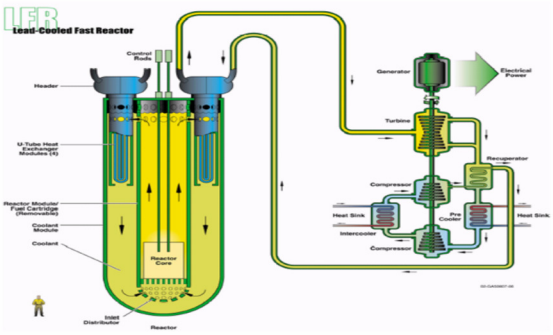
Pro další společný výzkum a vývoj bylo vybráno 6 koncepcí reaktorů, včetně jejich palivových cyklů:

- Sodíkem chlazený rychlý reaktor SFR (Sodium Cooled Fast Reactor) s uzavřeným palivovým cyklem, určený pro efektivní přeměnu aktinidů a konverzi uranu. Má dvě verze, jednou z nich je reaktor o výkonu 150 až 500 MWe, druhou reaktor o výkonu 1500 MWe.

- Olovem chlazený rychlý reaktor LFR (Lead Cooled Fast Reactor) s uzavřeným palivovým cyklem pro efektivní konverzi uranu a přeměnu aktinidů. Reaktor je chlazen tekutým olovem nebo slitinou olovo-vizmut. Palivo na bázi kovu nebo nitridu obsahuje uran a transurany. Výkon se pohybuje mezi 50 až 150 MWe v případě reaktoru vyrobeného na klíč v továrně. Plánuje se i reaktor o výkonu 1200 MWe.



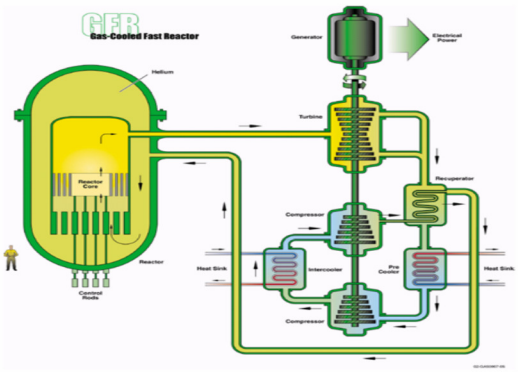
Rychlý reaktor chlazený sodíkem



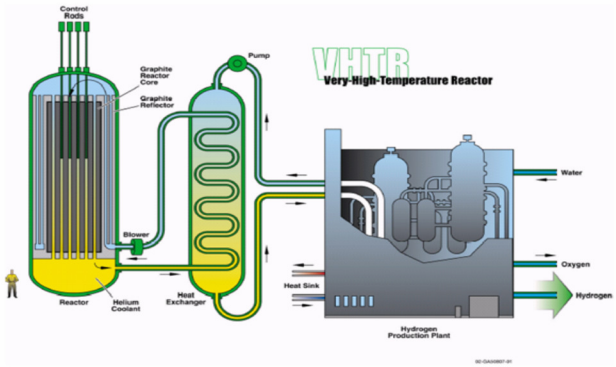
Rychlý reaktor chlazený olovem

- Plynem chlazený rychlý reaktor GFR (Gas Cooled Fast Reactor). Jedná se o héliem chlazený rychlý reaktor s uzavřeným palivovým cyklem. Jeho výkon je 288 MWe.Potenciálním palivem je kompozitní keramické palivo, zdokonalené kulové palivové články nebo elementy recyklovatelných aktinidů s keramickým pokrytím.

- Vysokoteplotní grafitem moderovaný a héliem chlazený reaktor (VHTR - Very High Temperature Reactor) s jednorázovým uranovým palivovým cyklem. Referenční reaktor bude mít tepelný výkon 600 MW a jeho aktivní zóna bude připojena na tepelný mezivýměník, dodávající technologické teplo.



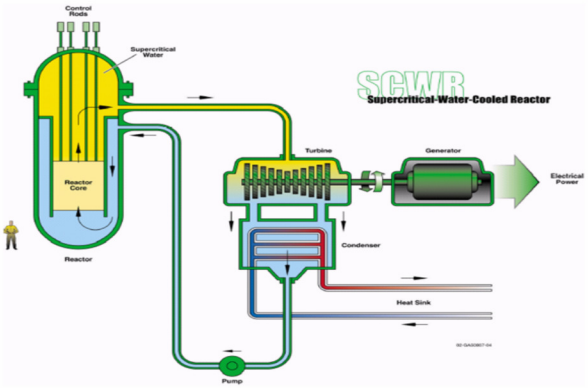
Rychlý reaktor chlazený plynem



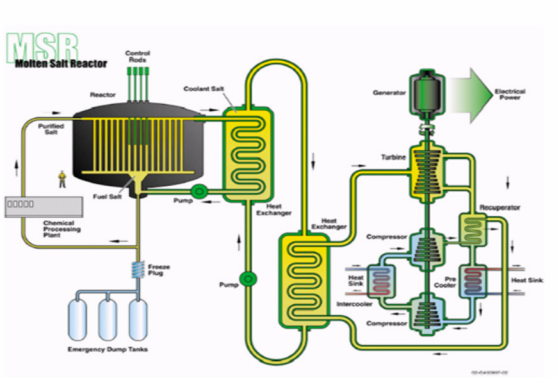
Vysokoteplotní reaktor

- Superkritický vodou chlazený reaktor SCWR (Super Critical Water Cooled Reactor). Jedná se o vysokoteplotní vysokotlakou vodou chlazený reaktor pracující nad termodynamickým kritickým bodem vody. Jako palivo bude sloužit oxid uranu a výkon reaktoru má být 1700 MWe.

- Reaktor s roztavenými solemi MSR (Molten Salt Reactor), který používá palivo ve formě roztavených solí a má uzavřený palivový cyklus s úplným recyklem aktinidů. Referenční reaktor bude mít výkon 1000 MWe. Štěpné produkty rozpuštěné v soli jsou kontinuálně odstraňovány v on-line přepracovací lince a nahrazovány thoriem-232 nebo uranem-238.



Superkritický vodou chlazený reaktor



Reaktor chlazený tavenými solemi

Výzkum a vývoj bude uskutečňován tak, aby byly dosaženy tyto hlavní výhody inovovaných reaktorů:

- Nízké investiční a provozní náklady.
- Zvýšená jaderná bezpečnost.
- Minimalizace tvorby odpadů.
- Snížení rizika šíření jaderných zbraní.

Reaktory dále budou muset splňovat cíle v následujících oblastech:

- Udržitelnost: Čistota ovzduší, dlouhodobá dostupnost systémů a efektivní využívání paliva pro výrobu elektřiny a tepelné energie ve světě, minimalizace produkce radioaktivních odpadů, omezení doby, po kterou bude nutno starat se o odpady.
- Ekonomika: Nižší výrobní náklady za celou životnost než u jiných energetických zdrojů, finanční rizika na úrovni jiných zdrojů energie.
- Bezpečnost a spolehlivost: Reaktory se musí vyznačovat vysokou bezpečností a spolehlivostí, musí mít velmi malou pravděpodobnost poškození aktivní zóny a v případě nehody nesmí být důsledky mimo elektrárnu.
- Odolnost vůči šíření jaderných zbraní: Reaktory budou představovat nejméně atraktivní a nejméně vhodný způsob krádeže jaderných materiálů vojenské jakosti a budou poskytovat zvýšenou fyzickou ochranu proti teroristickým akcím.

Ve studiích GIF byly uvažovány 4 palivové cykly, a to: jednorázový palivový cyklus bez přepracování, palivový cyklus s částečným recyklováním plutonia, palivový cyklus s úplným recyklováním plutonia, palivový cyklus s úplným recyklováním transuranových prvků.

Jednorázový palivový cyklus je nejnáročnější na spotřebu jaderného paliva a produkuje nejvíce radioaktivních odpadů ve formě vyhořelého paliva. Zásoby uranu by v případě tohoto palivového cyklu vystačily asi do poloviny 21.století a limitujícím faktorem bude prostor potřebný k uložení odpadu. Palivové systémy s úplným recyklováním sníží potřebu budování úložišť radioaktivních odpadů díky transmutaci nuklidů a omezením množství dlouhožijících nuklidů určených pro likvidaci v úložištích. Různé typy reaktorů mohou být využívány v kombinaci v symbiotických palivových cyklech, včetně kombinace palivových cyklů tepelných a rychlých reaktorů. Aktinidy z tepelných reaktorů mohou být recyklovány v rychlých reaktorech a díky tomu mohou snižovat zásoby aktinidů na celém světě. Tepelné reaktory mohou vyrábět vodík a přispět k více udržitelné energetické situaci ve světě. Ve studiích bylo rovněž konstatováno, že jaderná energetika bude mít jedinečné postavení na trhu, protože její palivový cyklus se podílí na celkových výrobních nákladech jen asi dvaceti procenty, což je velmi důležitý aspekt v budoucí energetické situaci, kdy cena fosilních paliv bude v důsledku vyčerpávání ložisek neustále růst a nepříznivě ovlivňovat výrobní náklady. Podíl paliv na výrobě elektřiny na bázi fosilních paliv se pohybuje v rozmezí 60 - 80 %.

10.1.2 Mezinárodní projekt INPRO /3/

Projekt INPRO (International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles) byl zahájen v roce 2000 za účasti 18 členských zemí MAAE včetně České republiky. (Do roku 2008 se počet členů zvýšil na 28.) Jeho cílem je zajistit v 21.století dostupný a udržitelný zdroj energie i pro rozvojové země a jejich specifické potřeby. Program se snaží dát dohromady jak držitele technologií, tak jejich uživatele. Na zahájení projektu se zúčastnily následující státy: Argentina, Arménie, Brazílie, Bulharsko, Česká republika, Čína, Francie, Chile, Indie, Indonézie, Jihoafrická republika, Jižní Korea, Kanada, Maroko, Německo, Nizozemí, Pákistán, Rusko, Španělsko, Švýcarsko, Turecko, Evropská unie.

V první fázi 1 A programu 2001 - 2003 byla vypracována základní kritéria pro porovnávání různých koncepcí a přístupů z hlediska konkurenční schopnosti, bezpečnosti, odpadů, nešíření jaderných zbraní, fyzické ochrany a udržitelnosti. Ve fázi 1 B, která byla zahájen v polovině roku 2003, se ověřuje metodologie INPRO v rámci případových studií a shromažďují se informace o zdokonalených reaktorech a palivových cyklech. V rámci této etapy bude 6 členských států řešit následující úkoly:

Argentina: Reaktor CAREM, tepelný výkon 100 MW, elektrický výkon 25 MW. Reaktor může být využit jak k výrobě elektřiny, tak k odsolování mořské vody.

Česká republika: Koncepce reaktoru s roztavenými solemi, vybraná v rámci programu GIF.

Čína: Vysokoteplotní reaktor s kulovými palivovými články PBHTR (Pebble Bed High Temperature Reactor). Prototyp vysokoteplotního reaktoru HTR-10 o tepelném výkonu 10 MW byl postaven v areálu univerzity Tsinghua na předměstí Pekingu. Vysokoteplotní reaktory budou využívány například ke zkapalňování a zplyňování velkých zásob uhlí. Předpokládá se výstavba vysokoteplotního reaktoru o výkonu 100 MW_e.

Indie: Zdokonalený těžkovodní reaktor APHWR (Advanced Pressurized Heavy Water Reactor) včetně palivového cyklu. Velké úsilí se vynakládá na vývoj rychlých množivých reaktorů pro využití zásob thoria a pro transmutaci radioaktivního odpadu.

Jižní Korea: Technologie palivového cyklu DUPIC s využitím vyhořelého paliva z tlakovodních reaktorů v těžkovodních reaktorech. (DUPIC = Direct Use of Spent PWR Fuel in Candu Reactors).

Rusko: Rychlý reaktor BN-800 s nitridickým palivem včetně palivového cyklu v rovnovážném stavu.

Druhá fáze programu bude zkoumat dostupné technologie a možnosti zahájení mezinárodních projektů. Protože poptávka po elektřině poroste zejména v rozvojových zemích, bude nutno velkou pozornost věnovat právě těmto zemím. Pro země, které budou potřebovat malý počet reaktorů nebude rozumné budovat úplnou vlastní infrastrukturu, a proto by ji mohly zajišťovat mezinárodně provozované společnosti. Další fáze zahájená v roce 2006 se zaměřuje na výzkum, vývoj a demonstraci inovovaných jaderných systémů INS (Innovative Nuclear Energy System), na vyhodnocení potenciální úlohy jednotlivých INS, na pomoc při harmonizaci licenčního řízení, přípravu průmyslových kódů a standardů, na usnadnění certifikace mezinárodních projektů /6/.

Existuje všeobecný souhlas s tím, že vývoj nových jaderných technologií se neobejde bez mezinárodní spolupráce, a proto se hledá spolupráce i mezi programy GIF a INPRO. Oba programy mají podobné cíle pokud jde o ekonomiku, bezpečnost, ekologii, palivové cykly a odpady, odolnost vůči šíření jaderných zbraní a udržitelnost. Existují ale některé rozdíly:

- Program GIF je již v etapě výzkumu a vývoje, zatímco program INPRO dokončil teprve formulaci požadavků uživatelů.
- GIF řeší hlavně poptávku několika hospodářsky vyspělých zemí, INPRO bere v úvahu specifika zemí a regionů a orientuje se více na potřeby rozvojových zemí

10.1.3 Mezinárodní spolupráce při vývoji rychlých reaktorů

V březnu 2005 byl v Obninsku pod vedením Ruska vytvořen vědecký a technický výbor po rychlé reaktory za účasti Indie, Jižní Koreje, Francie, Japonska a Ruska. Jeho úkolem bude vypracování společné studie určující hlavní priority ve výzkumu a vývoji rychlých reaktorů a příslušných palivových cyklů. Kromě společných akcí bude obsahovat i nadějné národní koncepce Francie, Indie, Jižní Koreje, Ruska a Japonska /6/

Francie: Vývoj se bude týkat plynem a sodíkem chlazeného rychlého reaktoru včetně palivového cyklu. Bude vypracována studie o přechodu z lehkovodních reaktorů na jiné typy reaktorů. Do roku 2050 budou všechny stávající lehkovodní reaktory vyřazeny z provozu, přičemž 50 % jich bude nahrazeno zdokonalenými reaktory EPR-1600 a 50 % rychlými reaktory. Později budou reaktory EPR s životností 60 let nahrazeny rychlými reaktory.

Indie: Předmětem zájmu je sodíkem chlazený rychlý reaktor s využitím palivového cyklu thoria a s vysokým koeficientem reprodukce. Indie rovněž navrhuje vyhodnotit jaderný systém pro výrobu vodíku s využitím vysokoteplotního reaktoru chlazeného směsí olovo-vizmut a s palivem ve formě kulových palivových článků. Prototyp rychlého reaktoru o výkonu 500 MWe má být uveden do provozu v roce 2011. Díky tomu budou moci být využity velké zásoby thoria, které představují čtvrtinu celosvětových zásob.

Japonsko: Budou zkoumány nadějné technologie rychlých reaktorů včetně palivových cyklů.

Jižní Korea: Bude vyvíjet sodíkem chlazený reaktor KALIMER (Korea Advanced Liquid Metal Reactor) včetně palivového cyklu. Základní projekt byl k dispozici v roce 2006 a výstavba má být zahájena do roku 2010 /13/.

Rusko: Rychlé reaktory chlazené sodíkem, olovem, směsí olovo-vizmut a plynem. Suché a mokré metody přepracování vyhořelého paliva. Předmětem zájmu je například olovem chlazený rychlý reaktor BREST-300. Olovo ve formě chladiva je chemicky inertní, má vysoký bod varu a výhodnější vlastnosti než sodík. Chlazení tekutým olovem se používá u ruských reaktorů pro pohon ponorek. Jeho výhodou je i to, že stačí použít dva chladicí okruhy místo tří, které jsou nutné u chlazení sodíkem.To usnadňuje manipulaci s palivem a snižuje investiční a provozní náklady /14/.

10.2 Některé podmínky pro další rozvoj jaderné energetiky /4, 5/

Aby jaderná energie zůstala i nadále praktickou variantou do budoucna, musí být splněny některé podmínky:

- Bude nutno vyvíjet také malé a levnější reaktory, pro které bude existovat trh. Elektrárenské společnosti nebudou vynakládat prostředky na výzkum, vývoj a komercializaci, pokud nebude pro tyto reaktory existovat dostatečně velký trh.
- Vlády zemí buď samy nebo ve spolupráci s jinými vládami budou muset podporovat vývoj reaktorů. Pokud soukromé společnosti nebudou schopné zajistit výstavbu demonstračních reaktorů v důsledku příliš velkých finančních rizik, budou muset výstavbu financovat samotné vlády, protože jinak bude mnohaleté výzkumné úsilí vynaloženo zbytečně.
- Vlády budou muset zajistit kvalifikovaný personál pro průmysl i dozorné orgány.

- Bude nutno nalézt porozumění mezi veřejností, vládou a jaderným průmyslem.
- Bezpečnost reaktorů se stane strategickým cílem celosvětové jaderné energetiky. Zvýšenou bezpečnost zajistí systémy pasivní (vnitřní) bezpečnosti, které se spoléhají na přírodní procesy gravitace, cirkulace a odpařování při dochlazování reaktoru. Pasivní systémy rovněž pomáhají zjednodušovat a snižovat počty komponent a systémů a odstraňují potřebu čerpadel a dalších podpůrných aktivních systémů, které se používají u tradičních systémů bezpečnosti.
- Další podmínkou bude omezení šíření jaderných zbraní. To lze zmírnit nebo zcela odstranit vývojem nových reaktorů a palivových cyklů.
- Z hlediska nešíření jaderných zbraní se za nejlepší řešení nabízí vývoj a aplikace reaktorů s rychlými neutrony. Tyto reaktory budou spalovat jen izotop uranu-238 a tak odpadne obohacování uranu a oddělování plutonia vojenské jakosti z palivových cyklů. Na rozdíl od dřívějších typů rychlých reaktorů nebudou mít nově vyvíjené typy plodivou zónu, kde vzniká plutonium.
- Má-li být jaderná energie považována za strategický krok ke globální ekonomice a bezpečnosti, je třeba mít jasný obraz o jejím potenciálu. Bude-li založena na současných typech reaktorů a na palivovém cyklu bez přepracování, pak by ekonomicky těžitelné zásoby uranu byly vytěženy koncem tohoto století a výkony jaderných elektráren by nebyly o příliš větší než je tomu dnes. Předpokládaný obraz se však velmi změní, jestliže budou využívány rychlé reaktory a bude realizován úplný palivový cyklus.
- Jestliže se podaří ve velkém měřítku využívat rychlé reaktory, pak se díky tomu na dlouhou dobu vyřeší i problém životnosti zásob jaderných paliv. Navíc budou moci být automaticky splněny požadavky z Kjóta a emise skleníkových plynů z energetického průmyslu budu moci být fixovány na předem určené úrovni.
- V nové jaderné éře bude muset být řešena i problematika radioaktivních odpadů. Cílem je vyvinout palivové cykly, které budou minimalizovat produkci odpadů, například procesy známé jako transmutace aktinidů a štěpných produktů. V tomto případě by se celková aktivita jaderných odpadů dostala na úroveň původně vytěžené uranové rudy během 150 - 200 let a nikoliv za desítky tisíc let, jak je tomu dnes. Tato skutečnost by zcela jistě příznivě ovlivnila i veřejné mínění.
- Pokud jde o bezpečnost zdokonalených (inovovaných) reaktorů, bude dosaženo takového stavu, kdy díky jejich projektu, fyzickému stavu a materiálům budou vyloučeny těžké havárie. I tento fakt jistě přispěje ke změně postoje veřejnosti k jaderné energii.

Tajmyr a Vajgaš, ruské atomové ledoborce.

10.3 Koncepce a projekty zdokonalených reaktorů

Zdokonalené reaktory příští generace budou muset mít tyto hlavní charakteristické rysy:

- provozní životnost 60 let,
- koeficient provozuschopnosti kolem 90 %,

- budou vyráběny sériově ve formě modulů, což usnadní přepravu a výstavbu na staveništi a také sníží investiční náklady,
- budou standardizovány a licencovatelné v různých zemích,
- jejich využití bude vícestranné, například k odsolování mořské vody, pro dálkové vytápění, k výrobě technologického tepla a některé také k výrobě vodíku,
- u některých bude možný i bezobslužný provoz,
- některé reaktory budou stavěny v podzemí,
- reaktory budou vyráběny sériově v továrnách, což povede ke snížení jejich ceny,
- díky své vysoké bezpečnosti budou moci být budovány i v obydlených oblastech nebo přímo v lokalitách továren, dolů apod.

10.3.1 Zdokonalené reaktory malých a středně velkých výkonů

Výzkum a vývoj malých reaktorů se uskutečňuje v celé řadě zemí, a to buď v rámci mezinárodní spolupráce nebo samostatně. Mezi hlavní důvody vývoje těchto reaktorů patří tyto faktory /7/:

- Vzdálené komunity mají problémy se zásobováním elektřinou, jako například Aljaška, Havaj, Sibiř, japonské ostrovy, indonéské ostrovy, atd.
- Chybí zde školený personál.
- Jsou vysoké náklady na dopravu fosilních paliv a výrobu elektřiny.
- Existují problémy s dopravou a skladováním fosilních paliv.
- Je zde obvykle malá a proměnlivá spotřeba elektřiny.
- Řešení často spočívá ve výstavbě malých reaktorů o výkonu 10 až 50 MWe, které jsou schopné pracovat v režimu proměnlivého zatížení a někdy i bez obsluhy.
- Tyto reaktory mají vysokou vnitřní bezpečnost a jsou velmi odolné vůči šíření jaderných zbraní a sabotážním akcím.
- Výměna paliva se uskutečňuje minimálně po třech letech, ale častěji až po deseti, dvaceti či třiceti letech.

USA:

- Malý uzavřený zdroj tepla ENHS (Encapsulated Nuclear Heat Source). Je to rychlý reaktor chlazený olovem nebo směsí olovo-vizmut s dlouholetou životností aktivní zóny. Po dosažení plného výkonu reaktor automaticky sleduje zatížení. Na plném výkonu může pracovat 15 let. Modul reaktoru je vyroben v továrně, kde je rovněž zaplněn palivem a na staveniště se dopravuje jako celek. Protože neexistuje mechanické propojení se sekundárním systémem, lze modul snadno instalovat a vyměňovat, podobně jako baterii. Reaktor je vyvíjen v Argonne National Laboratory (ANL) /7/ Chlazení slitinou olovo-vizmut bylo Ruskem odtajněno v roce 1998. Používali ho v reaktorech pro pohon atomových ponorek.Toto chladivo je vhodné pro rozvojové země, tedy pro reaktory vysoce bezpečné, které vyžadují malý počet obsluhujícího personálu. Palivo je možno vyměňovat po deseti, dvaceti až třiceti letech.
- Malé reaktory jsou vhodnější pro rozvojové země a spotřebitele, kteří nejsou napojeni na elektrické sítě. Těmto potřebám vyhovují například reaktory typu STAR - LM (STAR-H2, S-STAR). Jedná se o bezpečný transportovatelný autonomní rychlý reaktor chlazený tekutým kovem (Secure Transportable Autonomous Reactor - Liquid Metal). Varianta STAR-H2 je vhodná k ohřevu hélia na vysoké teploty pro štěpení vody na vodík a kyslík. Odpadní teplo má ještě vysoký teplotní potenciál a lze je využít pro technologické účely, dálkové vytápění nebo odsolování mořské vody. Varianta S-STAR představuje reaktor o malém výkonu /7/. Tento reaktor bude moci být v provozu až 30 let bez výměny paliva. Cílem bude zajištění jeho autonomního provozu, aby mohl být použit ve vzdálených oblastech střední Asie, Subsaharské Afriky ap. /9/. Reaktor STAR-LM má tepelný výkon 400 MW a elektrický výkon181 MWe a je vhodný pro velká města, reaktor S-STAR má tepelný výkon 45 MW a elektrický výkon 20 MW /15/.
- Tlakovodní reaktor IRIS společnosti Westinghouse. (International Reactor Inherently Safe). Jedná se o mezinárodní inovovaný bezpečný reaktor o výkonu 50 MWe a větším. Výměna se provádí jedenkrát za 5 let. /8/
- Zjednodušený varný reaktor MS-BWR, vyvíjený ve spolupráci General Electric a Purdue University. Jeho výkon bude 50 a 200 MWe a interval mezi výměnou paliva 10 let /8/

- Americká společnost General Atomics ve spolupráci s ruským ministerstvem atomové energetiky vyvíjí modulový vysokoteplotní héliem chlazený reaktor s plynovou turbínou GT - MHR (Gas Turbine - Modular Helium Reactor) o tepelném výkonu modulu 600 MW a elektrickém výkonu 285 MW. Je určen také ke spalování plutonia z vyřazených jaderných hlavic. Na vývoji se podílí francouzsko-německá společnost Framatome ANP a japonská společnost Fuji. Teplota na výstupu z reaktoru je 850 stupňů Celsia.
- General Atomics vyvíjí modulový vysokoteplotní reaktor pro odlehlé oblasti o výkonu 10 - 25 MWe, u něhož se výměna paliva bude provádět po šesti až osmi letech.
- Společnost Westinghouse vyvíjí v rámci programu vysokoteplotních reaktorů NGNP (Next Generation Nuclear Power) modulový reaktor s kulovým ložem a v polovině roku 2005 podepsala s čínským ústavem jaderné a nové energetické technologie INET memorandum o porozumění. Předpokládá se spolupráce v oblasti projektování, dodávek zařízení a výstavby vysokoteplotních reaktorů. /10/
- Americká společnost General Electric vyvinula koncepci modulového rychlého reaktoru s vnitřní bezpečností PRISM (Power Reactor Inherently Safe Module) o elektrickém výkonu modulu 138 MWe. Tři moduly vytvoří energetický blok o výkonu 415 MW_e a tři jaderné bloky elektrárnu o výkonu 1245 MW_e. Předpokládané vyhoření paliva je 150 000 MWd/t /16/
- Společnosti Rockwell International, Combustion Engineering a Bechtel vyvinuly modulový rychlý reaktor SAFR (Sodium Advanced Fast Reactor) o tepelném výkonu 900 MW a elektrickém výkonu 350 MWe. Moduly budu vyráběny továrním způsobem /17/

Japonsko:

- V japonském výzkumném ústavu jaderné energie JAERI je vyvíjen malý integrální tlakovodní reaktor MRX o tepelném výkonu 50 - 300 MW pro pohon lodí nebo lokální výrobu elektřiny a tepla. Výměna paliva se uskuteční po 3,5 letech. /8/
- Japonský ústřední výzkumný ústav elektrárenského průmyslu (CRIEPI) a elektrárenská společnost Tošiba vyvíjejí malý rychlý reaktor 4S (Super Safe, Small, Simple) o elektrickém výkonu 10 až 50 MW, který bude vhodný pro odlehlé oblasti, továrny a doly a mohl by být vybudován v podzemí. Je projektován tak, aby mohl pracovat bez obsluhy 10 až 30 let. Reaktor je charakterizován jednoduchým provozem a údržbou včetně výměny paliva, vyšší bezpečností a vyšší ekonomikou. Je chlazen sodíkem. Společnost Tošiba nabídla reaktor o výkonu 10 MW_e městečku Galena na Aljašce, asi 880 km severozápadně od Anchorage, které má problémy se zásobováním uhlím a ropou a vysokou cenou elektřiny /11/. Kromě městečka Galena mají zájem o menší reaktory tohoto typu o výkonu 0,5 až 2 MW_e další komunity na Aljašce, a proto Tošiba požádala americkou jadernou regulační komisi (US NRC) o licenci reaktoru 4S pro aplikace v USA /18/
- Pro rozvojové země vyvíjí Japonsko rychlý reaktor LSPR o tepelném výkonu 150 MW a elektrickém výkonu 53 MW. Jako chladivo bude používána směs olovo-vizmut. /8/

- Japonský výzkumný ústav jaderné energetiky (JAERI) vyvinul zkušební vysokoteplotní reaktor o tepelném výkonu 30 MW HTTR (High Temperature Test Reactor). Budova má rozměry 48 x 50 m, přičemž dvě patra jsou nad zemí a tři patra pod zemí. V roce 2001 bylo dosaženo výstupní teploty 850 stupňů Celsia a v roce 2004 950 stupňů. Tento reaktor bude moci být již využíván k výrobě vodíku štěpením vody. Rovněž se má uvést do provozu pilotní zařízení na výrobu vodíku o maximální kapacitě výroby 30 m^2/h s využitím procesu jod-síra. Ve vývoji je též koncepce vysokoteplotního reaktoru s plynovou turbínou v přímém cyklu pro kombinovanou výrobu elektřiny a vodíku GT HTR 300 C o tepelném výkonu 600 MW a elektrickém výkonu 300 MW. Výstupní teplota bude 950 stupňů Celsia. První reaktory tohoto typu budou uváděny do provozu v letech 2020 až 2030 /19/
- Japonský výzkumný ústav JAERI vyvíjí rychlý reaktor RAPID-L o výkonu pouhých 200 kW_e (5000 MW_t), který byl původně určen jako zdroj energie na Měsíci, ale může být využit i v zemských podmínkách. Bez výměny paliva může pracovat 10 let.

Jižní Korea

Je zde vyvíjen modulový integrovaný zdokonalený lehkovodní reaktor SMART (System-integrated Modular Advanced Reactor) o tepelném výkonu 330 MW a elektrickém výkonu 100 MW. Projektová životnost je 60 let, výměna paliva jednou za tři roky. Ve výstavbě je prototyp tohoto reaktoru o tepelném výkonu 65 MW s termínem dokončení v roce 2007. /8/

Jihoafrická republika
Elektrárenská společnost ESKOM vyvíjí modulový vysokoteplotní reaktor s kulovým ložem PBMR (Pebbler Bed Modular Reactor) o tepelném výkonu modulu 265 MW a elektrickém výkonu 110 MW. Je určen pro technologické účely včetně výroby vodíku a předpokládá se jeho využití hlavně v rozvojových zemích. /8/ O tento reaktor se zajímá i americká společnost Exelon Corp., která chce získat práva stavět reaktory v jiných zemích a hodlá získat licenci i v USA /20/

Nizozemí

- Studuje se koncepce vysokoteplotního reaktoru INCOGEN (Inherently Safe Nuclear Cogeneration), který se vyznačuje vnitřní bezpečností a může být využit ke kombinované výrobě elektřiny a tepla. Jeho tepelný výkon je 40 MW a elektrický 16,5 MW. Bylo by ho možno stavět v blízkosti měst nebo továren /21/
- Studuje se zde rovněž koncepce vysokoteplotního reaktoru NEREUS (Naturally Safe, Effective Reactor, Easy to Operate, Ultimately Simple and Small), který by byl vhodný pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla pro pivovary, papírny, pro odsolování mořské vody, ale i pro pohon lodí /22/.

Evropské země
Na výzkumu vysokoteplotních reaktorů se v Evropě podílí 15 partnerů z Belgie, Itálie, Spojeného království, Francie, Španělska a Německa. Německo navazuje na své dřívější zkušenosti s vývojem vysokoteplotního reaktoru AVR-15 a THTR-300 a vyvíjí vysokoteplotní reaktor HTR-MODUL o tepelném výkonu 200 MW a elektrickém výkonu 80 MW. Předpokládá se též modul HTR-500. Ve Švýcarsku se studuje koncepce reaktoru GHR-10 o tepelném výkonu 10 MW, který je určen pro vytápění komunit s možností výstavby pod zemí /23/

10.3.2 Zdokonalené reaktory velkých výkonů

V USA schválila jaderná regulační komise (US NRC) již několik projektů zdokonalených reaktorů s pasivními prvky bezpečnosti a další reaktory čekají na certifikaci /24/

- Zdokonalený varný reaktor ABWR (Advanced BWR) společnosti General Electric o výkonu 1350 MWe. Několik reaktorů tohoto typu bylo již postaveno v Japonsku ve spolupráci se společností Tošiba. Reaktor obdržel certifikát US NRC.
- Reaktory System-80+ , AP-600 a AP-1000 společnosti Westinghouse rovněž obdržely certifikát US NRC. Reaktor AP-600 spoléhá v oblasti pasivní bezpečnosti spíše na přírodní síly, jako je cirkulace, konvekce, odpařování a kondenzace než na aktivní prvky bezpečnosti, které vyžadují dodávku elektřiny. Reaktor AP-600 je standardizovaný modulový reaktor se lhůtou výstavby 3 roky od lití prvního betonu. Reaktor obsahuje o 60 % méně ventilů, o 75 % méně potrubí, o 80 % méně regulačních kabelů, o 35 % méně čerpadel a o 50 % je menší objem budov. Reaktor AP-1000 je větší verzí reaktoru AP-600 a využívá ekonomiku rozsahu.
- Reaktor ESBWR (Evolutionary Simplified BWR) je evoluční zjednodušený varný reaktor společnosti General Electric o výkonu 1380 MWe.

Japonsko

Elektrárernská společnost Tokyo Eelctric Power Company (TEPCO) vyvíjí nový zdokonalený varný reaktor ABWR o výkonu 1700 MWe s termínem uvedení do provozu za 10 - 15 let. /25/

Japonská agentura po přírodní zdroje a energii (ANRE) plánuje celonárodní program vývoje lehkovodních reaktorů příští generace s termínem zahájení v roce 2006. Cílem vývoje, který potrvá 5 - 7 let, bude zejména snížení investičních a provozních nákladů, snížení úrovně ozáření personálu, snížení objemu radioaktivních odpadů minimálně o 20 %, zkrácení doby výstavby o 30 % na 30 - 34 měsíců, dosažení koeficientu provozuschopnosti 94 % a životnost 60 let. Výkony reaktorů se budou pohybovat v rozmezí 800 až 1700 MWe, ale existují požadavky i na reaktory o výkonu 500 MWe. Mezi další charakteristiky bude patřit výroba modulů, vysoké vyhoření paliva a používání směsného uran-plutoniového paliva MOX. /26/

Francie, Německo

Evropský tlakovodní reaktor (EPR). Na vývoji tohoto reaktoru se spojily společnosti Framatome a Siemens a hlavní německé elektrárenské společnosti. Po více než deseti letech vývoje a vynaložení 2 milionů hodin bylo toto úsilí odměněno, když finská elektrárenská společnost TVO jako první objednala EPR o čistém výkonu 1600 MWe, který se stane pátým rektorem ve Finsku. Komerční provoz má být zahájen v roce 2011 a bude se jednat o reaktor o dosud největším výkonu na světě. Dva roky po uvedení tohoto reaktoru do provozu zahájí provoz i obdobný reaktor ve Francii, kde se počítá s výstavbou deseti reaktorů EPR-1600. /27/ O reaktor EPR-1600 se zajímá i americká společnost Constellation Energy, která se s francouzskou společností Areva dohodla o vytvoření společného podniku Unistar Nuclear, který spojí dohromady výrobce, provozovatele a majitele při výstavbě a provozu standardních reaktorů EPR-1600. V USA bude mít tento reaktor označení US EPR (US Evolutionary Power Reactor). Areva má v USA 200 pracovníků, kteří budou pracovat na získání certifikace US EPR v USA. /28/.

Výčet koncepcí a projektů malých, středních i velkých reaktorů není zdaleka vyčerpán. Z jejich velkého počtu bude možno vybírat ty nejvhodnější pro výstavbu prototypů a demonstračních reaktorů a nakonec pro komerční reaktory určené pro hromadné nasazení v nejbližších desetiletích.

Zdá se, že nová éra jaderné energetiky přichází právě včas, aby zamezila nebo výrazně zmírnila nevratné globální klimatické jevy na Zemi, před kterými v posledních několika letech varují vědci a které souvisí s působením jevu, který označují jako „globální stmívání“ (global dimming).Tento jev je řadou výzkumníků pozorován již asi 50 let, ale teprve v posledních letech se podařilo vysvětlit tento jev a dát ho do souvislosti s globálním oteplováním.

10.4 Globální „stmívání“ a jaderná energie /29,30/

Za posledních 50 let bylo předmětem výzkumu několik jevů na různých místech zeměkoule, které se podařilo dát do vzájemných souvislostí a vysvětlit teprve v posledních několika letech /29/

- Americký klimatolog David Travis si položil otázku, zda sražené páry z tryskových letadel mohou ovlivnit podnebí. Na tuto otázku se mu podařilo kladně odpovědět až po 11. září 2001.
- V Izraeli měl Gerry Stanhill projektovat zavodňovací systémy a k tomu potřeboval měřit intenzitu slunečního záření. Podle jeho měření byly pak tyto systémy budovány. O dvacet let později měření zopakoval a zjistil, že v Izraeli došlo k poklesu slunečního svitu o 22 % oproti měřením v padesátých letech. Své výsledky publikoval, ale vědeckou komunitou byly ignorovány.
- Obdobné výsledky zaznamenala nad bavorskými Alpami studentka klimatologie Beata Liepertová.
- Při prohledávání publikací, vědeckých časopisů a meteorologických záznamů oba nezávisle zjistili, že od padesátých let do začátku let devadesátých pokleslo množství sluneční energie v Antarktidě o 9 %, v USA o 10 % a o téměř 30 % v Rusku.
- Dva australští biologové, Michael Roderick a Graham Farquar, byli při svých výzkumech překvapeni tím, že ve volném prostranství klesá množství odpařované vody. Této skutečnosti si všimli i vědci v devadesátých letech 20. století. Vznikl zdánlivý paradox, protože množství odpařené vody klesalo, ale globální teplota rostla. Dospěli k závěru, že na vině je pokles intenzity slunečního záření.
- Čelný klimatolog V. Ramanthan si v polovině devadesátých let rovněž povšiml, že slábne sluneční záření nad velkou částí Tichého oceánu. /29/

Vědci hledali příčiny těchto jevů a protože věděli, že se samotným Sluncem se nic neděje, příčina musela být na naší planetě. Za příčinu uvedených jevů označili „globální stmívání“ (global dimming), které je způsobováno znečištěným ovzduším. Bylo potvrzeno, že za posledních několik desetiletí došlo v důsledku znečištění atmosféry k poklesu slunečního záření dopadajícího na Zemi o 10 až 20 %. To vedlo k ochlazování Země, zatímco protiběžným trendem bylo oteplování v důsledku skleníkového efektu. /29/

Před několika lety o jevu globálního stmívání většina vědců vůbec nevěděla. Nyní jsou ale přesvědčeni, že to může znamenat, že všechny současné předpovědi o budoucnosti podnebí na naší

planetě mohou být chybné. Předpokládá se, že globální stmívání je způsobováno znečištěným vzduchem, tj. mikroskopickými prachovými částečkami a chemickými sloučeninami (například sulfáty) vznikajícími hlavně při spalování fosilních paliv, tj. uhlí, ropy a zemního plynu. To má za následek dva důsledky /30/:

- viditelné znečištění vzduchu (například smog) odráží záření zpět do prostoru a zabraňuje jeho dopadu na zemský povrch,
- prachové částice mění optické vlastnosti mraků, což je ještě závažnější.

Protože se na částicích tvoří vodní kapky, znečištěné mraky obsahují větší množství kapiček než mraky neznečištěné. V důsledku toho znečištěné mraky více odrážejí sluneční paprsky než mraky čistější. Vlivem toho se tvoří větší, tmavší a déle trvající mraky, které brání slunečním paprskům dopadat na zemský povrch.

Uvedený jev má celosvětový charakter a vyskytuje se jak nad Indií, Čínou a Tichým oceánem, tak nad Evropou, oběma Amerikami i Afrikou. Tato „zrcadlová“ oblaka jsou schopna s tragickými následky pozměnit vzorce deště po celém světě. Například po celou řadu let nedošlo v africkém regionu Sahel k letním monzunovým dešťům. Je pravděpodobné, že sucha v Africe v 70. a 80. letech 20. století byla vyvolána znečištěným ovzduším šířícím se z Evropy a ze Severní Ameriky. Globální stmívání tak patrně přispělo k úmrtím milionů lidí v Africe a postihlo dalších 50 milionů. Není vyloučeno že je to teprve první ukázka toho, jak globální stmívání může narušit světový systém počasí. Kdyby například došlo ke zmizení monzunových dešťů v Asii, postihlo by to existenci 3,6 miliard lidí. /29/

Zatímco skleníkový efekt planetu ohřívá, globální stmívání ji ochlazuje a tak oteplování způsobované emisemi CO_2 je před námi skryto vlivem ochlazování znečištěným vzduchem. Snahy o omezení znečišťování s pomocí čisticích zařízení v elektrárnách a instalováním katalyzátorů do automobilů vedou k poklesu viditelného znečištění ovzduší. To bylo až dosud považováno za příznivý jev, ale nyní se tento fakt nejeví jako příznivý, protože omezí-li se znečištění atmosféry, zesílí se globální oteplování. O tom, že se bohužel nejedná jen o teorii, svědčí řada příkladů:

- Po 11. září 2001 byl v USA vyhlášen zákaz létání po dobu 3 dnů. Bylo zjištěno, že v důsledku toho se zvýšila teplota o více než 1 °C, což byla největší teplotní změna za posledních 30 let. Jestliže se teplota zvýšila tak rychle za tak krátkou dobu a přitom byl odstraněn jen jeden druh znečištění, vyplývá z toho, že celkový dopad globálního stmívání na růst globální teploty může být obrovský.
- V západní Evropě začala mít příznivý vliv opatření na omezování znečištění vzduchu. Viditelným způsobem pokleslo znečištění ovzduší a díky tomu došlo i k mírnému poklesu globálního stmívání. Avšak po několika desetiletích, kdy se teplota udržovala na stejné úrovni, začala teplota v Evropě podstatně růst. Vyvrcholilo to v létě 2003, kdy lesní požáry poškodily Portugalsko, kdy v Alpách začaly tát ledovce a kdy ve Francii umírali lidé po tisících. /29/
- Za příklad mohou sloužit i pravidelně se opakující obrovské požáry v Austrálii a v Kalifornii.

Díky používání čisticích zařízení v elektrárnách a používání katalyzátorů u automobilů tedy ochlazující účinek znečištění klesá, ale oteplující účinek CO_2 stoupá. To ale znamená, že dochází k urychlenému oteplování a že Země je patrně zranitelnější skleníkovými plyny než se až dosud předpokládalo.

Klimatolog Peter Cox s domnívá, že jestliže se nepodniknou rázná opatření, tak do roku 2030 vzroste globální teplota o více než 2 °C, což by znamenalo, že by začal postupně tát grónský ledovec. Ledovec bude sice tát dlouho, ale mořská hladina by mohla nakonec stoupnout až o 7 - 8 metrů a ohrozit mnoho světových měst. S každým desetiletím by rovněž rostlo riziko katastrofických záplav.Tím by ale tento katastrofický obraz neskončil, protože po Grónsku začnou horkem uvadat světové tropické pralesy. Současné tropické oblasti by se staly neobyvatelnými a severní oblasti by měly podobné klima jako severoafrické země se všemi doprovodnými důsledky pro zemědělství atd. /29/

Dalším znečišťováním ovzduší se globální oteplování nedá zastavit, a proto je nutno zasáhnout jak proti globálnímu oteplování, tak proti globálnímu stmívání, tedy v podstatě omezit spalování uhlí, ropy a zemního plynu, při němž vzniká CO_2, a nahradit tato fosilní paliva energetickými zdroji neemitujícími CO_2, a to již během několika desetiletí /29/.

Jaké jsou možnosti přechodu na budoucnost bez emisí CO_2? Jednou z nich je výroba elektřiny, kde bude přechod na neznečišťující energetické zdroje relativně jednoduchý. U většiny jiných zdrojů

znečištění, jako je doprava, vytápění domácností a průmyslových podniků spočívá řešení v používání vodíku ve velkém měřítku. Vodík může být spalován buď přímo nebo prostřednictvím palivových článků k výrobě elektřiny. Vodík bude možno vyrábět buď z fosilních paliv nebo elektrolýzou vody nebo štěpením vody na vodík a kyslík. Jsou k dispozici tři varianty výroby vodíku /30/:

- Obnovitelné zdroje energie + vodík.
- Fosilní paliva + zachycení a uložení CO_2 + vodík
- Jaderná energie + vodík.

První varianta není zatím reálná, protože OZE nemohou nahradit fosilní paliva a vyrábět spolehlivě velká množství vodíku. Druhou variantu se zachycením a uložením CO_2 do vytěžených ropných vrtů ke zvýšení těžby ropy a zemního plynu by uvítal ropný a plynárenský průmysl, ale jednalo by se o velmi nákladnou záležitost, podobně jak při ukládání CO_2 do oceánů. Jako nejnadějnější se zdá být třetí varianta, tj. výroba vodíku s pomocí jaderné energie. Protože jaderné elektrárny pracují v režimu základního zatížení po dobu 24 hodin, byly by vhodné buď pro výrobu vodíku elektrolýzou vody v době mimo špičkové zatížení nebo ve speciálních reaktorech vhodných pro termochemické štěpení vody při vysokých teplotách.

Pokud globální stmívání není jen teoretickým jevem, pak lze brzy očekávat plnou sílu globálního oteplování již v několika příštích desetiletích a v důsledku toho i nevyhnutelnost nasazení jaderných elektráren ve velkém měřítku. Dlouhodobé poznatky o jednotlivých izolovaných jevech a jejich příčinných vztazích do sebe zapadají a jejich následné vysvětlení není příliš povzbudivé pro následující desetiletí a znamená vážné varování, protože se velmi zkracuje doba, která je k dispozici pro nápravu v celosvětovém měřítku. Ale i kdyby se vliv globálního stmívání neukázal být tak závažný, zůstanou v platnosti tři hlavní závěry /30/:

- Obnovitelné zdroje energie mohou v příštích dvou třech desetiletích jen částečně přispět k řešení globálního oteplování.
- Zachycení a ukládání CO_2 je jen fantazií ropného průmyslu.
- Jaderná energie je jedinou věrohodnou náhradou fosilních paliv.

Prameny:

/1/ IAEA Bulletin, 2004, č. 1, s. 4-8
/2/ IAEA Bulletin, 2004, č. 11, s. 52-53
/3/ IAEA Bulletin, 2004, č. 1, s. 44-47
/4/ IAEA Bulletin, 2004, č. 1, s. 13-14
/5/ IAEA Bulletin, 2004, č. 1, s. 39-43
/6/ Nuclear Engineering Int., 2005, č.615, s. 20-21
/7/ Nuclear News, 2004, č. 9, s. 25-28
/8/ Nuclear Engineering Int., 2002, č. 579, s. 24-25
/9/ Nuclear Engineering Int., 2003, č. 582, s. 11
/10/ Nuclear News, 2005, č. 9, s. 18
/11/ Power, 2005, č. 2, s. 8 + 11
/12/ Nuclear Engineering International, 2002, č. 581, s. 5
/13/ Nuclear Engineering International, 2000, č. 557, s. 16
/14/ NucNet, 1998, News. No 281
/15/ Nuclear Engineering International, 2005, č. 612, s.24 - 28
/16/ Nuclear Engineering and Design, 1988, č. 1/2, s. 79 - 86

/17/ Nuclear Engineering and Design, 1988, č. 1/2, s. 87 - 95
/18/ Nuclear Engineering International, 2005, č. 615, s. 12 - 13
/19/ Nuclear Engineering International, 2005, č. 612, s. 20 - 22
/20/ Nuclear News, 2001, č. 2, s. 20 - 23
/21/ Modern Power Systems, 1998, č. 10, s. 36
/21/ Nuclear Engineering International, 2000, č. 557, s. 26 - 27
/23/ Nuclear News, 2001, č. 2, s. 34 - 35

/24/ Nuclear News, 2001, č. 11, s. 52 - 59
/25/ Power Economics, 2000, č. 8, s. 6
/26/ Nuclear News, 2005, č. 9, s. 32
/27/ Nuclear News, 2004, č. 4, s. 26 - 30
/28/ Nuclear Engineering International, 2005, č. 615, s. 4
/29/ Alternativní energie, 2005, č. 5, s. 26 - 28 (Podle argumentace autoritativního vědeckopopulárního pořadu televize BBC Horizon)
/30/ Nuclear Future, 2005, č. 5, s. 209 – 212

Bez jádra to nepůjde
Sestavil: Ing. Václav Vaněk
Vydal ČEZ, a. s., 2008