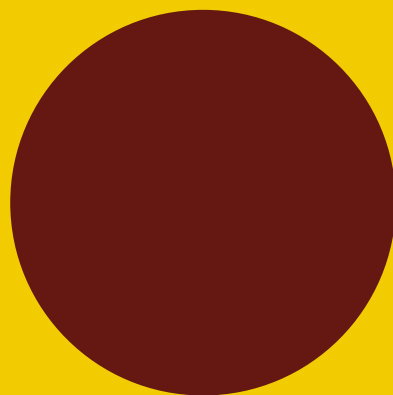
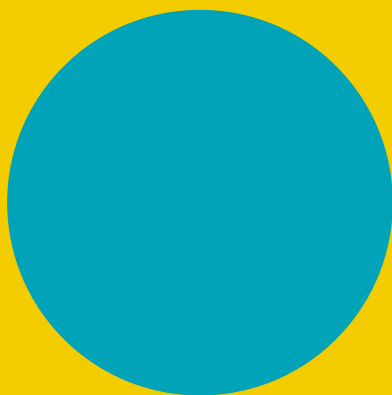


ENCYKLOPEDIA ENERGETIKY

JADERNÁ ENERGIE



ENCYKLOPEDIA ENERGETIKY

JADERNÁ ENERGIE



OBSAH

Tajemství atomů • Pavel Augusta	7
Energie bez kouře • Michael Sovadina, Marie Dufková	17
Trezor na tisíc let • Marie Dufková	27
Surovina nebo odpad • Marie Dufková	37
Podivuhodné paprsky • Marie Dufková	51
Tajemství energie hmoty • Milan Malík	65
Bezpečnost jaderných elektráren • Jan Tůma	75
Jaderné elektrárny budoucnosti • Marie Dufková	89
Jaderná syntéza • Miroslav Zeman	101

ÚVOD

Z čeho se skládá svět? Jak vznikl? Jaké síly v něm působí? Na tyto a podobné otázky, které nám klade sama příroda, hledají lidé odpovědi od nepaměti. Lidská zvědavost odkryla již řadu tajemství, ale s každým objevem se vynořují nové a nové otázky. Typickým případem je objev atomového jádra. Byl učiněn teprve na počátku 20. století. Od té doby také víme, že atomové jádro je stotisíckrát menší než atom a přitom nese více než 99,5 % jeho hmotnosti. Uvolnit obrovské jaderné síly se podařilo již čtyřicet let po jeho objevu.

Mírové využití jaderné energie je dnes jedním z nejperspektivnějších způsobů zajištění energetických potřeb lidstva – v současnosti i budoucnosti. Množství elektřiny vyrobené z jádra představovalo na přelomu tisíciletí šestnáct procent světové produkce elektřiny a instalovaný výkon jaderných elektráren na celém světě se zvyšoval o nových 1 130 MW_e za rok.

Stále více světových energetických expertů se shoduje na tom, že energie vyrobená v jaderných elektrárnách je pro trvale udržitelný vývoj moderní průmyslově rozvinuté společnosti zcela zásadní. Světové zásoby energetických zdrojů a vliv emisí CO₂ na změny klimatu na Zemi představují dva základní problémy, kterým musí lidstvo čelit. V obou případech nalézá řešení ve využívání jaderné energie. Jen v oblasti emisí ušetří jaderné elektrárny každoročně životní prostředí od zhruba 2 miliard tun CO₂. Bez jaderné energetiky by v Evropské unii stouply emise oxidu siřičitého o 100 % a oxidů dusíku o 95 %.





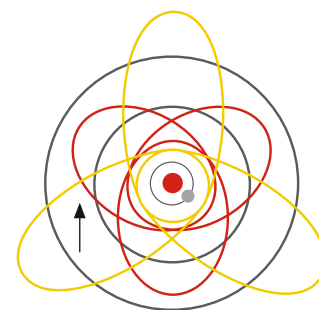
Démokritos z Abdér



Isaac Newton



John Dalton



Planetární model atomu

TAJEMSTVÍ ATOMŮ

Cesta k dnešnímu rozvoji jaderné energetiky byla dlouhá. Mohli bychom říci, že trvala déle než 2 000 let, avšak všechno podstatné se událo teprve v předvečer dvacátého století. Začalo to hlubším poznáním hmoty, pochopením stavby atomů a objevením přirozené radioaktivity. Rozbití atomového jádra a ovládnutí řetězové reakce pak znamenalo už skutečný počátek nového věku.

VÝLET DO MIKROSVĚTA

O podstatě světa, který nás obklopuje, přemýšleli lidé od pradávna. Některé jejich představy se nám dnes mohou zdát komické, občas bychom však byli možná překvapeni, jak hluboko ke kořenům pravdy pronikli již před tisíci lety. Bez jakýchkoli přístrojů, jen silou myšlenky. První učenec-vědec, hodné tohoto jména, najdeme bezpochyby ve starém Řecku. Tam také začínají dějiny poznání o atomech. Dva řečtí filozofové – Leukippos z Milétu a Démokritos z Abdér – došli již někdy v 5. století před Kristem k závěru, že hmotu nelze dělit do nekonečna. Usoudili, že musí existovat nějaké malé, už dále nedělitelné částice. Protože nedělitelný se řecky řekne atomos, nazvali je atomy. Podle jejich představy byly atomy neviditelné, nerozrušitelné, neproniknutelné a věčné kousky hmoty, různé velikosti, hmotnosti i tvarů. Prostor mezi nimi měl být prázdný. Velký úspěch ovšem jejich teorie nezískala, pro tehdejší pohled na svět

byla přece jen těžko přijatelná. Přesto jejich myšlenka přetrvala staletí. Vždyť podobný názor znovu zastával slavný fyzik Isaac Newton o 2000 let později. O atomech se domníval, že to jsou „odolné a pevné pohyblivé částice, že se nikdy neopotřebují ani nerozbijí na menší části“.

S mnohem propracovanější atomovou teorií hmoty přišel anglický chemik John Dalton, žijící v 18. a 19. století. Dalton zjistil, že i velmi malé částičky látky stále obsahují stejné prvky, a to dokonce ve stále stejném poměru. Například nepatrná kapka vody obsahuje vodík a kyslík, stejně jako celý rybník. Z toho vyvodil, že každá látka, tedy například i voda, je složena z malých částíček a ty opět z ještě menších pračásteček prvků, jejichž vzájemný poměr je stále stejný. Svým „pračástečkám“ říkal Dalton atomy. Podle Daltona je každý prvek složen z jednoho druhu atomů o stejné hmotnosti, atomy různých prvků se od sebe liší. Na základě svých (dnes už můžeme říci, že

skvělých) dedukcí sestavil Dalton dokonce první tabulku atomových hmotností prvků, ve které atomům vodíku přisoudil hmotnost rovnou jedné.

JAK VYPADÁ ATOM

Dnes už o atomech víme samozřejmě mnohem více, a tak si některé z nich můžeme představit. Hned zpočátku musíme uvést na pravou míru tvrzení o jejich nedělitelnosti – atomy jsou sice základními „cihlami“ hmoty, jsou však ještě dále rozložitelné.

Každý atom obsahuje **jádro** složené z protonů a neutronů. **Protony** jsou kladně nabitě elektrické částice, **neutrony** jsou elektricky neutrální. Okolo jádra obíhají po různých vzdálených drahách záporně nabitě **elektrony**. Počty protonů a elektronů se sobě rovnají, jsou však různé u atomů jednotlivých prvků. Moderní fyzika zná ještě další částice, pro naši představu však tyto nejzákladnější zatím stačí.



Wilhelm Conrad Röntgen



Snímek ruky ženy W. C. Röntgena



Uranový minerál

Rozměry atomu jsou skutečně nepatrné. Průměr atomu je asi 10^{-6} až 10^{-10} mm. Průměr jeho jádra je ještě menší, asi 10^{-15} mm. Průměr jádra se, jak je vidět, od průměru celého atomu velmi liší. Můžeme si ho představit jako špendlíkovou hlavičku ve středu koule o průměru 100 metrů. Přitom je v jádru soustředěna takřka veškerá hmotnost atomu. I ta je samozřejmě nepatrná. Jako hmotnost atomu vodíku se uvádí 1,67 kvadriliontin gramu, což se pro lepší představu dá napsat takto:

0,000 000 000 000 000 000 000 001 67 g.

Atom kyslíku je asi dvanáctkrát těžší, ale ani jej bychom asi nevážili doma v kuchyni.

PRVNÍ KROK STRANOU:

W. C. RÖNTGEN

Wilhelm Conrad Röntgen (1845–1923) pocházel z holandské rodiny usazené v Německu. Byl to nejen skvělý vědec, ale i mimořádně charakterní a obětavý člověk. V 17 letech ho vyloučili z gymnaziálních studií, protože odmítl prozradit spolužáka, který nakreslil na tabuli výsměšnou karikaturu jednoho profesora. Nesložil tak maturitu, což mu pak po léta činilo značné potíže.

I tak se však nakonec stal řádným univerzitním profesorem. Jeho objev nového typu záření – paprsků X – posunul možnosti lékařské vědy na míle kupředu. Paprsky pronikající

měkkými tkáněmi lidského těla a vytvářející obraz vnitřních orgánů otevřely lékařům úplně nový svět. Za svůj objev nepřijal Röntgen sebemenší odměnu; dokonce i Nobelovu cenu, kterou byl vyznamenán v roce 1901, věnoval celou univerzitě. Odmítl také nabízený šlechtický titul, aby nakonec ve všeobecné nouzi, která po první světové válce Německo postihla, zemřel v nedostatku.

ZÁŘÍCÍ KAMENY

Vydejme se teď na chvíli do Paříže, do budovy zdejšího polytechnického ústavu.

Ptáte se proč? Právě tady, v chladném a zamračeném únoru roku 1896, totiž začíná atomový věk. Pokud by se nám podařilo nahlédnout zaprášenými okny ústavu, mohli bychom pozorovat staršího důstojného muže, jak si hraje s kameny různých tvarů i barev. „Od prvního dne, co jsem se dozvěděl o objevu paprsků X profesorem Röntgenem, napadla mě myšlenka, že vlastnost vysílat pronikavé záření úzce souvisí s fosforescencí.“ To jsou slova profesora A. H. Becquerela, který nemá od slov daleko k činům.

Profesor **Becquerel** hodlá své tvrzení prokázat experimenty. Proto ozařuje nejrůznější látky slunečním světlem a pak je nechá působit na fotografickou desku aby zjistil, zda světlo opět vyzařují – fosforeskují. Kontrolní vzorky

neozářuje – fosforeskovat (zářit) by tedy neměly. Jako jednu z experimentálních látek si Becquerel vybírá (náhodou, intuicí, kdo ví?) uranovou sůl. A skutečně, minerál září.

Kupodivu však stejné stopy zanechává na desce i kontrolní, tedy neosvícený vzorek. Profesor opakuje pokus jednou, dvakrát, desetkrát se stále stejným výsledkem. Uranová sůl září, ať je předem osvícena či neosvícena. Teorie o fosforescenci se hroutí. Becquerel je naštěstí vědec, který nepřizpůsobuje fakta svým teoriím, ale teorie faktům.

Bez lítosti opouští svou původní myšlenku a chápe, že je na stopě zcela nového fyzikálního jevu. Jevu, který byl později nazván radioaktivitou.

Jen několik kroků chodbou od laboratoře profesora Becquerela má svou pracovní jeho kolega **Pierre Curie**. Sdílí ji spolu se svou mladou manželkou Marií. Tato skvělá studentka a dnes už nadějná vědecká pracovnice přišla do Paříže z Polska. Její jméno Curie-Sklodowská o tom nenechává nikoho na pochybách. Manželé Curieovi se spolu s profesorem Becquerelem vydávají po stopách tajemného záření.

Začala úmorná a nekonečná práce. Než se Curieovým podařilo získat pouhou jednu desetinu gramu nového prvku nazvaného radium – hlavního zdroje Becquerelem



Marie Curie-Skłodowska



Lázeňský palác Radium v Jáchymově

objeveného záření – museli zpracovat více než tunu materiálu tzv. smolince z českého Jáchymova.

DRUHÝ KROK STRANOU: JÁCHYMOV

Jáchymov byl založen roku 1516 jako královské horní město na bohatých žilách stříbrné rudy. Během několika málo let se jeho sláva a pověst o velikém bohatství rozšířila daleko za hranice Českého království. Působil tu i proslulý lékař **Agricola**, autor vzácného díla o starém hornictví. Od roku 1519 tu byly raženy jáchymovské tolary, peníze ceněné v celém světě. Vždyť jáchymovské tolary daly jméno dnešnímu dolaru.

Po vyčerpání stříbrných žil však sláva města stejně rychle pohasla, jako předtím zazářila. V 19. století se tu už těžil jen uran – nepřilíši ceněná surovina, vhodná například k výrobě barev. Získával se ze smolince, horniny označované tak starými horníky, protože její objevení znamenalo smůlu – ztrátu stříbrných žil.

Becquerelův objev znamenal pro Jáchymov nový rozkvět. Už v roce 1909 tu byly zřízeny první radioaktivní lázně na světě. V lázeňském paláci Radium se léčily nemoci pohybového ústrojí, nervové i cévní.

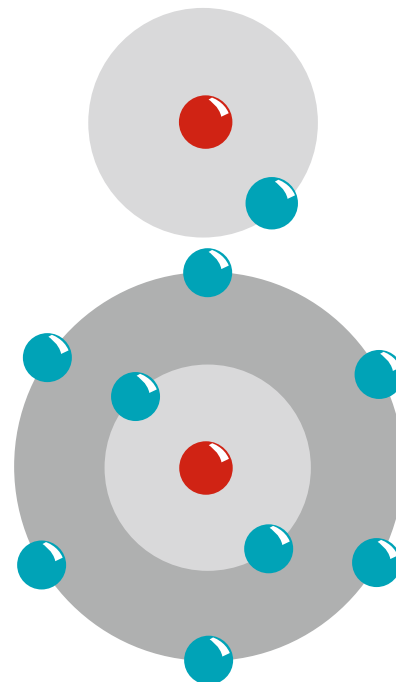
V 50. letech dvacátého století se náhle stal uran nejhledanější surovinou světa. Svě-

ta, ve kterém hlavním trumfem byla atomová bomba. Do Jáchymova opět plynuly obrovské částky peněz, zároveň se tu však rodila smrt, bolest, strach a zoufalství. V uranových dolech byli v nepředstavitelně krutých podmínkách nuceni dobývat strategickou surovinu pro Sovětský svaz českoslovenští političtí vězni. Tisíce jich to zaplatilo životem nebo poškozeným zdravím. Veškerá těžba byla odvážena do Sovětského svazu, aby z ní byl vyroben jaderný arzenál dodnes ohrožující svět. Po vyřabování zásob skončila již podruhé (tentokrát poněkud pochmurná) sláva města, které mimoděk stálo na začátku nové epochy – epochy atomové energie.

PRAVĚK JADERNÉ FYZIKY

Již první průkopníci na poli radioaktivity se setkali se skrytým nebezpečím, které nový jev přinášel. Becquerel nosil nějaký čas radioaktivní preparát v kapse, snad aby ho měl stále při ruce. Utrpěl od něj osklivou popáleninu, která se dlouho nechtěla zhojit. Bylo zřejmé, že nově objevené záření dokáže ovlivnit lidskou tkáň. A tak se již roku 1901 konají první pokusy s léčebnými účinky radioaktivního záření.

Usilovné zkoumání přináší první ovoce. Před vězkuníky se začínají rýsovat některé



Modely atomu vodíku a kyslíku

základní vlastnosti radioaktivního záření. Jsou objeveny a pojmenovány **částice alfa**, tvořené jádry hélia, **částice beta**, tj. záporně nabitě elektrony, a **částice gama**, elektromagnetické záření podobné záření rentgenovému.

Dánský vědec Niels Bohr vytváří názorný model stavby atomu, jak jsme jej již stručně popsali. Hmota atomu je soustředěna v kladně nabitěm jádru, okolo něhož obíhají záporně nabitě elektrony.

Objevuje se i další nový pojem – **izotop**. Některé atomy stejného prvku mají sice stejné chemické vlastnosti, ale jinou hmotnost. Proto se při některých fyzikálních dějích mohou chovat jinak. Takové atomy pak nazýváme izotopy. Některé izotopy mají dokonce vlastní názvy. Tak například izotop vodíku H s hmotnostním



Dobová rytina se symbolikou alchymistů

číslem 2 (místo 1) se nazývá deuterium, izotop vodíku H s hmotnostním číslem 3 je tritium. Izotop deuterium je běžně obsažen ve vodě.

TŘETÍ KROK STRANOU: ALCHYMISTÉ

Staří alchymisté věnovali své úsilí dosažení dvou hlavních cílů. Tím prvním byl kámen mudrců či elixír života, zázračná materie, poskytující dokonce i nesmrtelnost, druhým pak ovládnutí transmutace prvků. Transmutace neboli přeměna znamenala v praxi návod na to, jak z levného a dostupného kovu vyrobit zlato. Ani jednoho cíle, alespoň pokud víme, dosaženo nebylo. Při hledání transmutace naopak alchymističtí mistři mnoho zlata utopili v marných a často nesmyslných pokusech. Většinou končili v bídě, nemilosti svých pánů, mnozí ve vězeňské cele nebo i na popravišti.



Niels Bohr



Ernest Rutherford



James Chadwick

A tak se zdálo jisté, že měnit prvky jeden na druhý prostě nelze.

SPLNĚNÝ SEN

A přece se odvěký sen alchymistů splnil. Roku 1919 anglický fyzik Ernest Rutherford uskutečnil umělou přeměnu jednoho prvku na druhý.

Rutherford ostřeloval atomy dusíku částicemi alfa a získal atomy kyslíku. V té době už znal i samovolnou přirozenou přeměnu jednoho prvku v druhý – rozpad radia na radon.

Měli tedy nakonec alchymisté pravdu? Měli a neměli. Měnit prvky (tedy například olovo na zlato) chemickou cestou asi opravdu nejde, rozhodně to dodnes neumíme. Daří se to ovšem fyzice. Procesy fyzikální přeměny prvků jsou ovšem tak nákladné, že by se výroba zlata tímto způsobem opravdu nevyplátila.

Roku 1930 objevili němečtí vědci **W. Bothe** a **K. Becker** mimořádně pronikavé záření vznikající při ozařování některých prvků s malou atomovou hmotností (například bóru nebo berylia) paprsky alfa. Manželé **Frédéric** a **Irène Joliot-Curieovi** (dcera průkopníků manželů Curieových s manželem) zjistili, že toto záření dokáže vyřážet atomová jádra. Krátce nato si Angličan J. Chadwick povšiml, že v tomto záření jsou

přítomny dosud neznámé částice. Tak byly objeveny neutrony.

NA STARTU

Při stovkách svých pokusů manželé Joliot-Curieovi jednoho dne bombardovali hliníkový plíšek částicemi alfa. Přitom zjistili, že výsledný produkt není stálý, ale po nějakou dobu vyzařuje další částice a pak se rozpadá. Chová se vlastně jako přirozeně radioaktivní prvek. Objev umělé radioaktivity odstartoval dlouhou pouť využívání jaderné energie.

Používání alfa částic jako „střel“ s sebou nese četné problémy. Tím hlavním je jejich kladný náboj. Pokud jimi ostřelujeme jádro atomu, jsou přitahovány a tím zpomalovány záporně nabitými elektrony okolo jádra. Zároveň jsou stejně (kladně) nabitým jádrem odpuzovány. Pravděpodobnost srážky alfa částice s jádrem je tedy velmi malá. Ještě více klesá u prvků s vyšší atomovou hmotností, neboť ty mají větší počet elektronů v obalu a větší kladný náboj jádra. Proto se při prvních experimentech dařilo přeměňovat na radioaktivní látky jen lehké prvky, těžší zůstávaly beze změny.

Po pečlivém prostudování zpráv o objevu umělé radioaktivity zahájil své pokusy italský fyzik **Enrico Fermi**. (Všimněte si kolik vědců různých národností se už v naší stručné



Enrico Fermi



Fritz Strassman



Lise Meitnerová



Otto Hahn

historii vystřídalo, ve vědě hranice neexistují.) Ten se pokusil problémy s alfa částicemi obejít a vyvolat umělou radioaktivitu pomocí elektricky neutrálních částic neutronů. Neutrony nejsou přitahovány ani odpuzovány elektrony ani jádrem. Mohou proto ve hmotě urazit mnohem delší dráhu než částice alfa a s mnohem větší energií.

Fermiho řešení vypadá nadějně, ale má své nedostatky. Na rozdíl od částic alfa nejsou neutrony vyzařovány z přirozených radioaktivních látek, ale jen z látek uměle radioaktivních vzniklých bombardováním částicemi alfa. Zdrojem neutronů mohou být dokonce jen některé umělé radioaktivní prvky. Navíc se při bombardování uvolní na sto tisíc částic alfa pouhý jediný neutron. A tak malé množství uvolňovaných neutronů vážně zpochybňovalo úspěch Fermiho nápadu.

NOVÝ PRVEK?

Fermi ovšem nebyl muž, který by se lehce vzdával. Jako zdroj použil radon vznikající přirozeným rozpadem radia. Radon je radioaktivní a uvolňuje částice alfa. Plyný radon kontaktoval Fermi s práškovým beryliem. To se stalo radioaktivním a uvolňovalo neutrony. Neutrony z berylia bombardoval Fermi postupně všechny prvky Mendělejevovy tabulky. První výsledky se dostavily až u fluoru, ale skutečný úspěch přinesl teprve uran.

URAN

Při bombardování uranu (v Mendělejevově tabulce má číslo 92) se ukázalo, že vzniklý produkt je radioaktivní, obsahuje několik aktivních prvků a navíc jeden z nich neodpovídá žádnému z dosud známých prvků. Na první pohled se zdálo, že novinář, který při zprávě o Fermiho výzkumech použil titulku: „Itálie vyrábí 93. prvek bombardováním uranu“, má pravdu.

Fermi sám byl mnohem skeptičtější. Právem. Trvalo plné čtyři roky než bylo jasné, co se vlastně stalo. Skupina německých fyziků a chemiků – L. Meitnerová, O. Hahn, F. Strassman – dospěla k poznání, že po bombardování uranu neutrony zůstává mezi produkty rozpadu baryum.

Baryum je přibližně o polovinu lehčí než uran. Tedy nikoli nový prvek, ale rozpad jádra. Bylo zřejmé, že se atom uranu rozštěpil. Lise Meitnerová tento rozpad jader atomu uranu nazvala **jaderným štěpením**. Zároveň zjistila, že součet atomových hmotností obou vzniklých zlomků je menší než atomová hmotnost mateřského uranu. Rozdíl hmotností představoval uvolnění obrovského množství energie. První krok k novému zdroji energie o netušené síle byl učiněn. V té době však už L. Meitnerová nežila v rodném Německu. Věda už nebyla mezinárodní, politické hranice pronikly i do fyziky. Kvůli

svému rasovému původu i politickému přesvědčení musela L. Meitnerová a další z jejích kolegů uprchnout před nacistickou zvůli do exilu.

ENERGIE Z JÁDRA

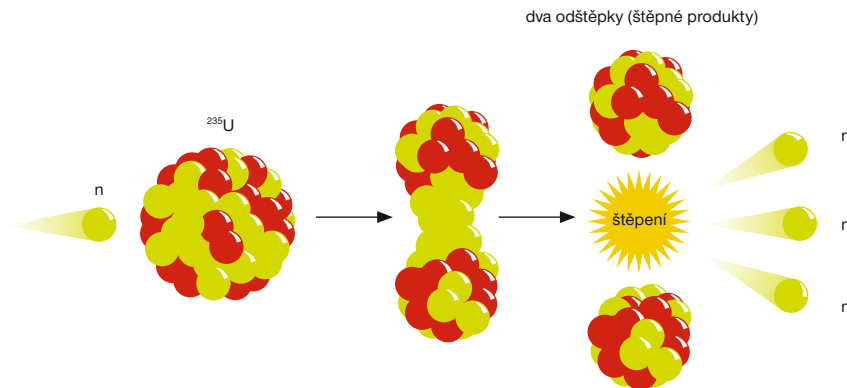
Jedním z uprchlíků před fašismem, tentokrát před italským, byl i Enrico Fermi. Ažyl našel ve Spojených státech amerických. Práce Meitnerové a jejích druhů mu pomohla najít cestu dál.

ČTVRTÝ KROK STRANOU: I ŠPIČKOVÝ FYZIK SE MŮŽE MÝLIT

Není pochyb o tom, že E. Fermi byl v oboru fyziky génius.

K posílení naší vlastní sebedůvěry si však vyprávíme tento příběh. Ještě v Itálii trpěla jeho rodina jednu zimu v bytě chladem. Správce domu navrhl, aby si pořídili místo jednoduchých oken dvojítá. Fermi, zvyklý nepostupovat naslepo, hbitě spočetl, že úspora tepla by nestála za řeč. Jeho manželka však raději spoléhala na praktickou zkušenost než na teoretické výpočty, byt vědecké, a okna nechala zdvojit. Rázem bylo v bytě teplo.

Vysvětlení je jednoduché – teorie nelhala, jen velký fyzik se při výpočtech spletl v desetinné čáře.



Princip štěpné řetězové reakce

ŘETĚZOVÁ REAKCE

Fermi si uvědomil, že po rozštěpení jádra se mimo jiné uvolní i neutrony. Tyto neutrony za příznivých okolností rozbijí další jádra a opět z nich uvolní neutrony. Ty opět rozštěpí další jádra... Tak vznikne samovolná **řetězová reakce**. Jde jen o to, připravit ty „příznivé okolnosti“.

Ve skutečnosti je většina neutronů pohlcena okolním prostředím dřív, než narazí na jádro uranu. Navíc jsou neutrony vznikající při štěpení příliš rychlé, a proto neúčinné.

CYKLOTRON

Aby mohla být „odstartována“ řetězová reakce, potřebujeme účinné elektricky nabitě částice, kterými bychom mohli ostřelovat látku a získávat tak neutrony. Jestliže však takovou letící částici urychlíme, buď nám uletí z dosahu, nebo narazí na jádro dřív, než získá dostatečnou rychlost. Problém nakonec vyřešil O. Lawrence, když sestrojil důmyslný přístroj, urychlovač částic – **cyklotron**. V cyklotronu ohýbá silný magnet dráhu urychlovaných částic do spirály, takže nemohou uniknout a obíhají stále větší rychlostí. Tím se zvětšuje jejich energie. Za svůj

objev získal O. Lawrence Nobelovu cenu za fyziku v roce 1939.

Trvalo však další čtyři roky, než se Fermimu a jeho týmu podařilo zkonstruovat první jaderný reaktor s moderátorem (látkou, která zpomaluje neutrony na rychlost vhodnou pro další štěpení). Spoutali tak řetězovou reakci a přinutili ji poprvé v historii lidstva poslouchat pokyny člověka.

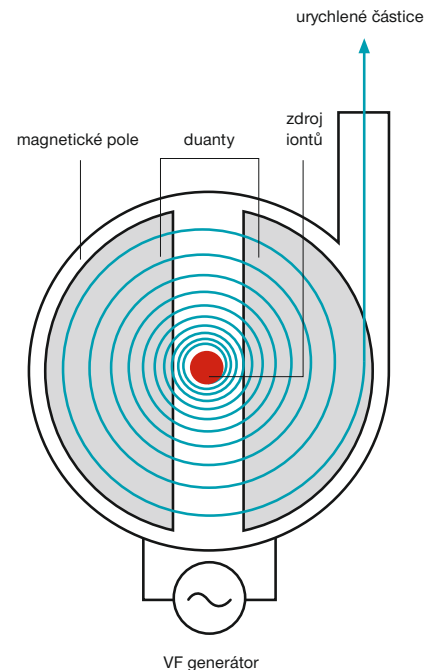
U CÍLE

První jaderný reaktor byl postaven na bývalém sportovním stadionu chicagské univerzity. To jistě vzbuzuje podezření – a právem. První umělá řetězová reakce byla spuštěna **2. prosince 1942**.

Uprostřed ničivé války nebyla doba příznivá vědeckému bádání. Ale výzkumy v jaderné fyzice pokračovaly nerušeně dál. Možná skrytě, proto také i v prostorách stadionu, ale bez finančních potíží. Cílem totiž nebyla levná a čistá elektrická energie, ale – **atomová bomba**.

PÁTÝ KROK STRANOU: ATOMOVÁ BOMBA

Nuceným i dobrovolným odchodem některých špičkových odborníků z nacistického

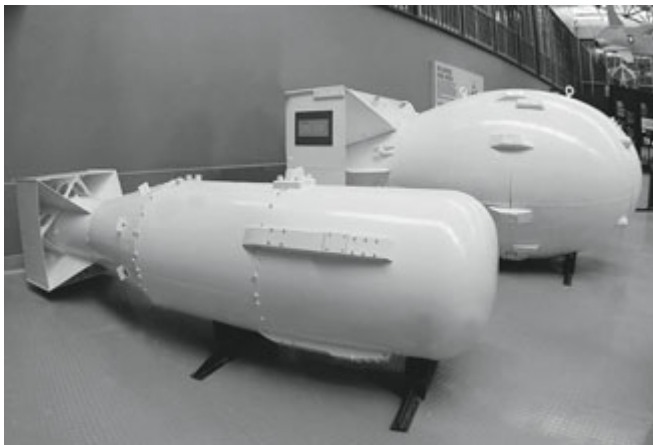


Cyklotron

Německa a z území, která okupovalo, se nebezpečí, že Hitler získá jadernou zbraň snížilo. Nikdo si však nebyl jist, co se vlastně v laboratořích třetí říše připravuje. Pověsti o vývoji „tajné zázračné zbraně“ vzbuzovaly strach. A například úspěšné rakety V1 a zejména V2 jeho oprávněnost jen potvrzovaly.

Zasvěcení si dobře uvědomovali, co by jaderná zbraň v rukou nacistů znamenala. Nastal závod s časem. Nejvyšší představitelé USA rozhodli, že vývoj nového typu bomby má plnou prioritu.

Na její konstrukci pracovali ti opravdu nejlepší, mezi nimi i geniální Albert Einstein. První atomová bomba vybuchla 16. července 1945, zatím jen na pokusné střelnici ve státě Nové Mexiko. Její účinek se ukázal jako zdrcující. Dosud žádná zbraň v historii lidstva neměla tak úděsnou sílu.



Atomové bomby Little Boy a Fat Man



Ruský jaderný ledoborec Arktika

V té době byla válka v Evropě již u konce, nacistické Německo na kolenou. Na Dálném východě však stále ještě zuřivě odolávaly mnohamilionové japonské ozbrojené síly. Porážka země „vycházejícího slunce“ byla sice neodvratná, ale dobývání japonských ostrovů námořními výsadky slibovalo při proslulém fanatismu jejich obránců kruté ztráty.

6. srpna 1945 ve 2 hodiny 45 minut odstartoval z ostrova Tinian, teprve krátce předtím osvobozeného od japonské okupace, značně přetížený bombardér B 29 Enola Gay. Pilotoval jej plukovník Tibbets, podle jehož matky nesl letoun své jméno. Na palubě zatím tiše ležela jedna ze dvou atomových bomb, které měli Američané k dispozici. Jmenovala se docela mírumilovně Little Boy (Malý chlapec). O dvě minuty později následovala Enolu Gay dvě další doprovodná letadla.

Když se krátce po půl osmé ráno objevila nad japonským přístavem Hirošimou trojice amerických létajících pevností, nezbudila valný zájem. Pouhé tři bombardéry nemohly žádnou velkou škodu nadělat. A přece... Účinky výbuchu atomové bomby byly úděsné.

Ve středu ohnivé koule vznikla teplota padesát milionů stupňů Celsia. Zpustošeným územím se prohnala smršť skla a trosek. Na obloze se vytvořil ten tolik charakteristický obrovský oblačný „hřib“.

9. srpna byla svržena druhá bomba, zvaná Fat Man (Tloušťák), na Nagasaki. O pět dní později vyhlásil japonský císař ochotu kapitulovat a 2. září 1945 byla kapitulace podepsána. 2. světová válka definitivně skončila.

SVĚTLO A SÍLA

Budoucnost atomové energie samozřejmě nespočívá ve stále ničivějších zbraních. Naopak. Obrovská síla ukrytá v jádrech atomů může sloužit k prospěchu celé planety a vyřešit tíživé energetické problémy lidstva. První elektřinu z uranu vyrobil a dodal do sítě testovací reaktor ACRO v Idahu v USA v roce 1951.

V roce 1954 byla v Obninsku u Moskvy uvedena do provozu první komerční atomová elektrárna. Dodnes ji následovaly stovky dalších. U nás byla první atomová elektrárna (označená A – 1) v Jaslovských Bohunicích spuštěna roku 1972.

Jaderné reaktory se uplatňují i v dopravě. Už v roce 1955 byla dokončena stavba prvního atomového ledoborce na jaderný pohon Lenin.

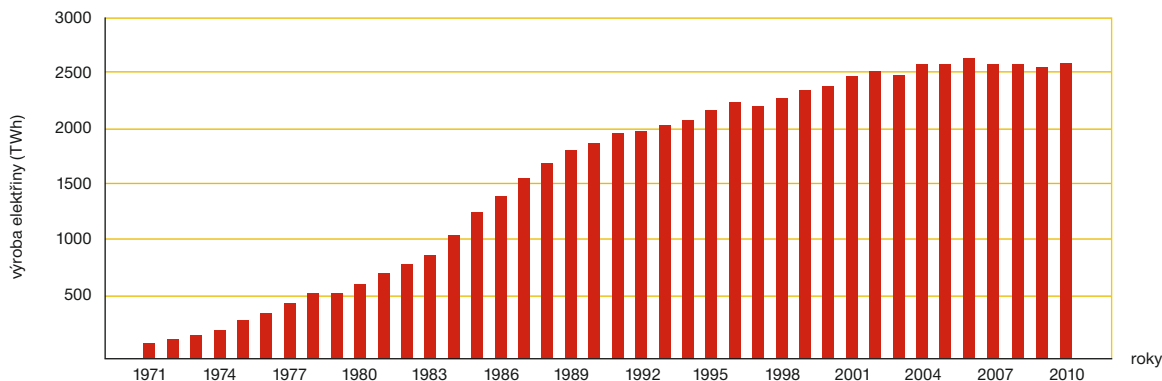
Světová asociace pro jadernou energii uvádí, že na počátku roku 2006 bylo v provozu celkem 436 reaktorů, které disponovaly instalovaným výkonem více než 370 000 MW_e.

Nejvíce jaderných zdrojů je provozováno v USA, ve Francii, Japonsku, Velké Británii a v Rusku.

Jaderná energetika hraje velmi významnou roli i v zemích EU – z jaderných elektráren pochází přibližně jedna třetina veškeré elektřiny vyrobené v Evropě. Sedmnáct zemí na světě je závislých na elektřině z jaderných zdrojů více než čtvrtinou své spotřeby.

Ve více než 50 zemích světa pracuje navíc na tři sta výzkumných a experimentálních reaktorů, které kromě plnění úkolů vědeckého výzkumu produkují i radioizotopy pro použití v medicíně.

Světová moře brázdí jaderné reaktory pohánějící ponorky a ledoborce. Malé jaderné zdroje dodávají elektřinu a teplo vesmírným lodím a sondám.



Produkce elektřiny z jaderných zdrojů

JADERNÁ ENERGETIKA V DATECH

- **1939:** objev jaderného štěpení
- **1942:** spuštění první řízené řetězové štěpné reakce (Enriko Termu, první reaktor v Chicagu)
- **1951:** první elektřina vyrobená v Idahu v USA v EBR-I (Experimental Breeder reaktor-I) USA. Reaktor vyrobil cca 100 kW elektřiny a zásobil elektrická zařízení v budově
- **1954:** první jaderná elektrárna Obninsk u Moskvy o výkonu 5 MW zásobila elektřinou 2000 domácností (dnes typická jaderná elektrárna zásobí 400 000 domácností)
- **1970–80:** rychlý růst jaderné energetiky, průměrně 30 % ročně
- **1987:** jaderná energetika dosáhla 16% podíl na výrobě elektřiny ve světě
- **1987–90:** zpomalení rozvoje jaderné energetiky
- **2008:** celosvětová renesance jaderné energetiky, podíl jádra na výrobě elektřiny ve světě je stále 16%

PO PADESÁTI LETECH

Krátce po začátku éry jaderné energetiky, kdy se bouřlivě stavěly první jaderné

reaktory, nikdo neměl, samozřejmě, zkušenosti s jejich dlouhodobým provozem. Jejich životnost se odhadovala na 30 let. Dnes se ukazuje, že může být až 80 let. Výkony existujících reaktorů se dnes zvyšují a jejich životnost se prodlužuje.

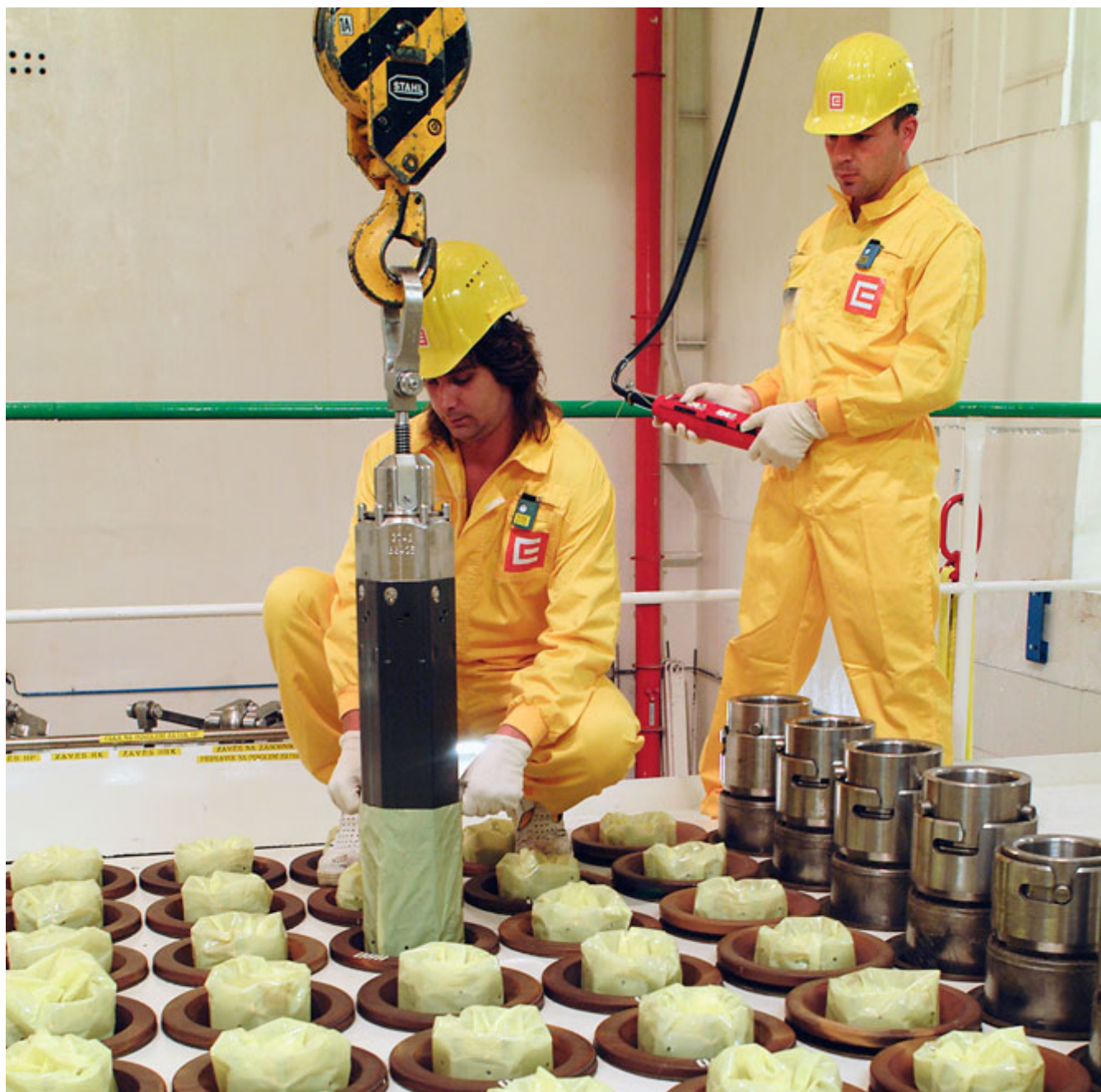
Produkce elektřiny z jaderných zdrojů tak stále stoupá, přestože výstavba reaktorů se v devadesátých letech přibrzdila. Vzrůst výroby za posledních 5 let je ekvivalentní postavení 40 nových velkých jaderných elektráren. Dvě procenta z toho pocházejí od nových reaktorů, zbytek je dosažen zvyšováním účinnosti a výkonu současných reaktorů.

Dvě třetiny světových reaktorů mají lepší využitelnost v průběhu roku než 80 %, 13 nejlepších reaktorů USA dosahuje více než 98 %. (Pro srovnání: nejlepší světové větrné elektrárny dosahují něco přes 20 % využitelnosti.) Jaderné reaktory přitom musejí být pravidelně odstavovány pro výměnu paliva a předepsanou kontrolu a údržbu.

V první dekádě třetího tisíciletí se 62 nových jaderných reaktorů ve světě staví (tj. asi 20 % současné kapacity), 156 je plánováno (asi 50 % současné kapacity) a 366 dalších je navrženo (dalších asi 75 % současné kapacity).

JADERNÉ ODPADY

- Jaderná energetika je jediným energetickým odvětvím, které se plně a zodpovědně stará o své odpady a náklady na jejich likvidaci má předem započítány do ceny svého produktu.
- Množství radioaktivních odpadů je velmi malé ve srovnání s jinými odpady. Např. množství použitého paliva, které vyprodukovala Jaderná elektrárna Dukovany za 20 let svého provozu, by se vešlo do krychle o hraně 4 m.
- Použité jaderné palivo může být přepracováno a dále energeticky využito.
- Radioaktivita odpadů se s časem snižuje.
- Bezpečné metody hospodaření s odpady a jeho likvidace jsou technicky zvládnuté a odzkoušené. Většina zemí volí skladování a následně hlubinné uložení s možností dalšího budoucího využití.
- Přepracování použitého paliva na nové ušetří až 30 % čerstvého paliva. Přepracování závody jsou ve Francii, Spojeném království, Rusku, Japonsku a Indii, jejich roční kapacita umožňuje zpracovat 4 000 t běžného použitého paliva. Dosud bylo přepracováno 90 000 t (z celkově vyprodukovaných 290 000 t) použitého paliva z komerčních reaktorů.



Sklad čerstvého paliva v Jaderné elektrárně Dukovany





Jaderná elektrárna Temelin



Jaderné palivové tablety

ENERGIE BEZ KOUŘE

Jak se liší jaderná elektrárna od uhelné? Při pohledu z dálky nepříliš. Stejně chladičí věže s oblaky vodní páry, stejné dráty elektrického vedení běžící do krajiny. Pojďme ji prozkoumat blíže. Přiblížíme-li se ze strany transformátorů pro vyvedení výkonu a vstoupíme do strojovny, uvidíme stejné generátory, turbíny a kondenzátory. Teprve v srdci jaderné elektrárny, v reaktorovém sálu, zjistíme rozdíl. Teplo, a jeho prostřednictvím páru pro pohon turbíny, nevyrábí ohniště s nezbytným komínem, ale jaderný reaktor. Postupně a stále naléhavěji si uvědomujeme, jaké škody v životním prostředí napáchalo a ještě může napáchat spalování fosilních paliv. Budoucnost patří zdrojům „bez kouře“. Z nich nejvýznamnějším a v dohledné době nevyčerpatelným je jaderná energie.

JADERNÁ ENERGIE

I když budeme čím dál usilovněji hledat cesty úspor energie, zdá se, že v dohledné budoucnosti bude potřeba energie na Zemi vzrůstat. Hovoří o tom všechny prognózy a je nasnadě, že rozvojové země se budou snažit dohnat rozvinuté země co nejrychleji. Podle odhadů světové energetické rady (WEC) z roku 1997 se poptávka po primární energii do roku 2020 zvýší o 50 % a potřeba elektrické energie dokonce o 50 až 70 %. Tři čtvrtiny poptávky budou pocházet z rozvojových zemí.

Elektrina slouží člověku teprve kolem 120 let, za tu dobu se však zasloužila o pokrok civilizace více než kterýkoliv jiný objev. Budoucí energetická politika ve světě se bude muset zaměřit na vyřešení dvou základních problémů: rozvoj dostatečně mohutných zdrojů elektřiny, které by byly reálně schopny postupně nahradit ztenčující se zásoby

fosilních paliv, a které by při tom současně neemitovaly do atmosféry skleníkové plyny ohrožující globální klima. V úvahu tedy přicházejí jaderné a obnovitelné zdroje.

Při tvorbě energetických koncepcí je třeba vzít v úvahu tzv. **hustotu energie**, jakou mohou zdroje dosáhnout. Například pro získání výkonu 1000 MW_e je nutné instalovat sluneční články nebo větrné elektrárny na ploše 50 až 60 km², nebo pěstovat energetické rostliny na ploše 3000 až 5000 km². Jaderná elektrárna o stejném výkonu vyžaduje jen několik km², a to včetně požadavků na celý palivový cyklus. Při dnešním pouze jednoprocenním využití energie uranu v současných typech jaderných reaktorů nahradí 1 kg uranového paliva 30 tisíc kg černého uhlí, při využití uranu v rychlých reaktorech dokonce 1,8 milionu tun černého uhlí.

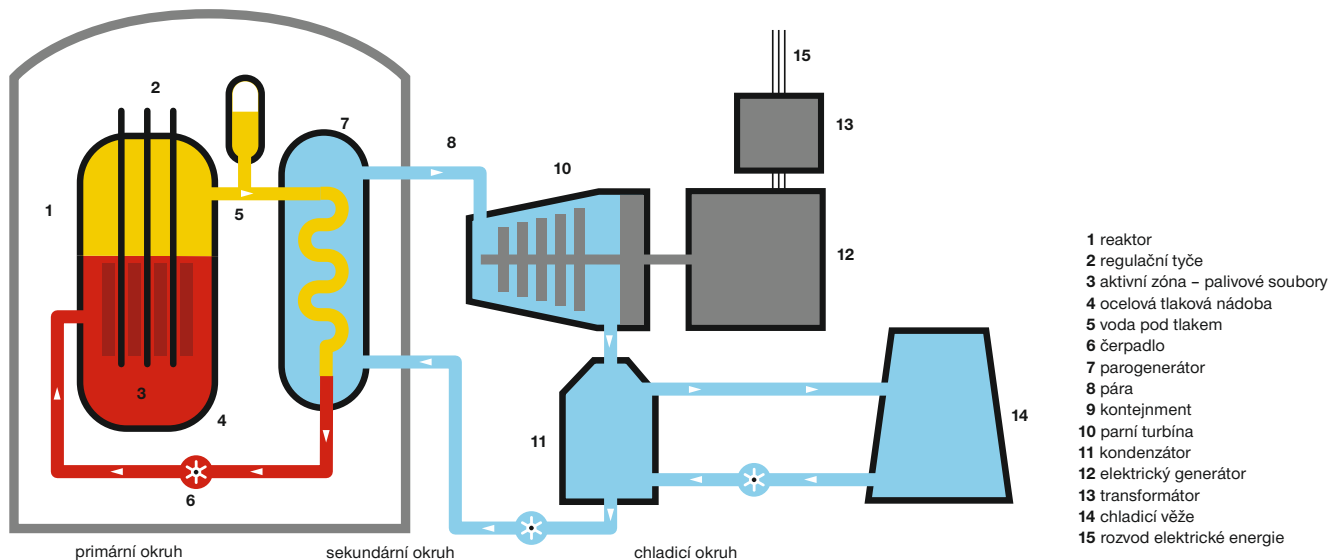
A to jsou jen některé z pádných argumentů pro rozvoj jaderné energetiky. Na

často citovaný problém jaderných odpadů je možné se podívat i z druhé strany: malý objem bezpečně likvidovatelných a kontrolovatelných odpadů je právě jednou z předností jaderné energetiky ve srovnání s jinými průmyslovými odvětvími, která po sobě zanechávají miliony tun odpadů, mnohdy trvale jedovatých.

Podívejme se, jak jaderné elektrárny fungují.

NĚKOLIK SLOV Z HISTORIE

Zatímco první elektrický proud z parních a vodních elektráren rozsvěcoval žárovky a roztácel kola již na sklonku 19. století, na elektřinu z jádra jsme si museli počkat až do druhé poloviny 20. století. Výrobu elektrického proudu na základě jaderného štěpení zahájil výzkumný reaktor v Idaho Falls v USA v roce 1951. O tři roky později byla v Obninsku,



Princip uspořádání jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem

v tehdejší SSSR, poprvé připojena jaderná elektrárna na veřejnou elektrickou síť. Dodávala 5 MW_e. Jen pro srovnání, dnešní jaderné reaktory dosahují výkonů až 1 200 MW_e.

Může nás těšit, že Čechy nehrají v jaderné historii nijak podřadnou roli, i když někdy jen mimoděk. Stály dokonce na samém počátku „atomové“ doby – vždyť radium izolované manželi Curieovými v roce 1898 pocházelo z jáchymovského smolince. V roce 1919, krátce po zrodu Československé republiky, byl v Jáchymově založen Radiologický ústav. V roce 1946 vznikl při České akademii věd a umění Výbor pro atomovou fyziku a v roce 1955 byl založen Ústav jaderného výzkumu v Řeži u Prahy.

Vraťme se však k elektrárnám – už v roce 1956 byla s tehdejší SSSR podepsána smlouva o výstavbě první československé jaderné elektrárny v Jaslovských Bohunicích na Slovensku o výkonu 150 MW_e. Vedle této první vlašťovky byly v Jaslovských Bohunicích později postaveny čtyři bloky VVER 440. Následovala stavba jaderné elektrárny

v Dukovanech na Moravě (rovněž se čtyřmi reaktory typu VVER 440). Temelín v jižních Čechách je vybaven reaktory VVER 1000 ve spojení se špičkovou technikou, především z USA. Obě naše jaderné elektrárny nyní vyrábějí více než třetinu elektrické energie vyrobené v ČR. Mezinárodními expertními týmy jsou hodnocené jako jedny z nejlepších v Evropě, Dukovany dokonce patří mezi 20 % nejlépe provozovaných jaderných reaktorů na světě!

PRINCIP JADERNÉ ELEKTRÁRNY

Základní princip všech elektráren je stejný: elektrina vzniká v generátoru, jehož rotor se velmi rychle otáčí. Ve vodních elektrárnách otáčí rotorem turbína poháněná energií vodního proudu, u větrných elektráren je to vítr. Turbíny tepelných elektráren žene pára. Energií nabitou páru získáváme z parního kotle, pod kterým můžeme topit uhlím, naftou či plynem.

Jaderné elektrárny jsou v zásadě elektrárny tepelné, teplo potřebné pro přeměnu vody na páru však v nich nezískáváme spalováním paliva, ale jaderným štěpením. Počínaje turbínou pohánějící generátor je jaderná elektrárna vlastně stejná jako klasická elektrárna uhelná. Jediný rozdíl – ovšem zásadní – je ve zdroji tepla.

CO SE DĚJE V PALIVU

V palivu jaderného reaktoru, jímž bývá oxid uraničitý, směs oxidů uranu a plutonia nebo plutonium, probíhá štěpná reakce. Jádro atomu štěpitelného prvku (uranu, thoria, plutonia) se může po nárazu letícího neutronu za příznivých okolností rozštěpit. Vzniknou dvě nová jádra – štěpné produkty – a dva až tři nové neutrony. Štěpné produkty mají velmi vysokou kinetickou energii, narážejí do okolních jader a ohřívají tak prostředí. Tím vzniká vysoká teplota, kterou můžeme energeticky využít. Nové neutrony letí dál a mohou štěpit další jádra.

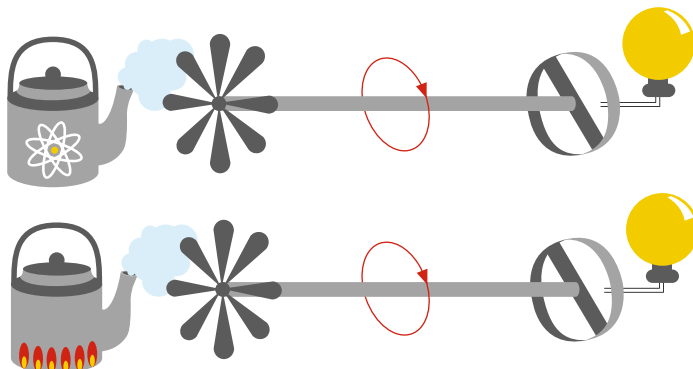


Schéma tepelné elektrárny

Rozběhne se řetězová reakce, základ jaderné energetiky.

V reaktoru mohou probíhat i jiné reakce, například:

- **Radiační záchyt** – jádro pohltí přilétající neutron a získá tak energii, kterou může částečně vyžářit ve formě záření gama. Touto reakcí často reaguje jádro izotopu uranu 238, kterého v palivu bývá více než 90 %.
- **Rozptyl neutronu** – neutron se po nárazu na jádro odrazí a letí dál jiným směrem. Tak často reagují jádra uranu s neutrony o vysoké energii.
- **Záchyt neutronu** – jádro jiného prvku než uranu neutron pohltí. Materiál účinně pohlcující neutrony se nazývá absorbátor. Dobrymi absorbátory jsou například bór nebo kadmium.

V reaktoru probíhá ještě mnohem více jiných reakcí, energeticky využít však můžeme pouze spolehlivě ovládané a řízené štěpení.

Přibližme si zjednodušeně osud jednoho neutronu v reaktoru VVER, jaké pracují u nás. Izotop uranu 235 se i v přírodě samovolně štěpí na dvě lehčí jádra a jeden

nebo více volných neutronů. Neutrony ze samovolného štěpení by však v reaktoru nestačily spustit řetězovou reakci.

K nastartování reaktoru se používá vnější neutronový zdroj. Neutron, který začneme sledovat, má vysokou energii. Pravděpodobnost, že při svém letu rozštěpí jádro izotopu uranu 235, je malá, spíše se při srážce s ním jen odrazí, jako by se odrazil míček od zdi. Neutron se od jader odrazí, aniž by jim předal část své velké energie, pouze mění směr letu. Aby mohl jádra štěpit, musíme ho zpomalit. Nejlépe se neutron zpomalí srážkou s jádrem, které je přibližně stejně velké, tedy např. s jádrem atomu vodíku, které tvoří jediný proton. Reakci si pak můžeme představit jako srážku dvou kulečnickových koulí. Látce, která zpomaluje neutrony, se říká moderátor.

Rychlý neutron se změnil na pomalý neutron. Ten opět naráží na jádro uranu 235. Tentokrát se už ale neodrazí. S vysokou pravděpodobností jádro rozštěpí – nastává řetězová štěpná reakce. Aby se reakce nemohla rozvíjet živelně a nekontrolovaně, je v reaktoru absorbátor, který přebytečné neutrony pohlcuje.

Popsali jsme si osud neutronu v tzv. pomalých reaktorech, které jsou na světě



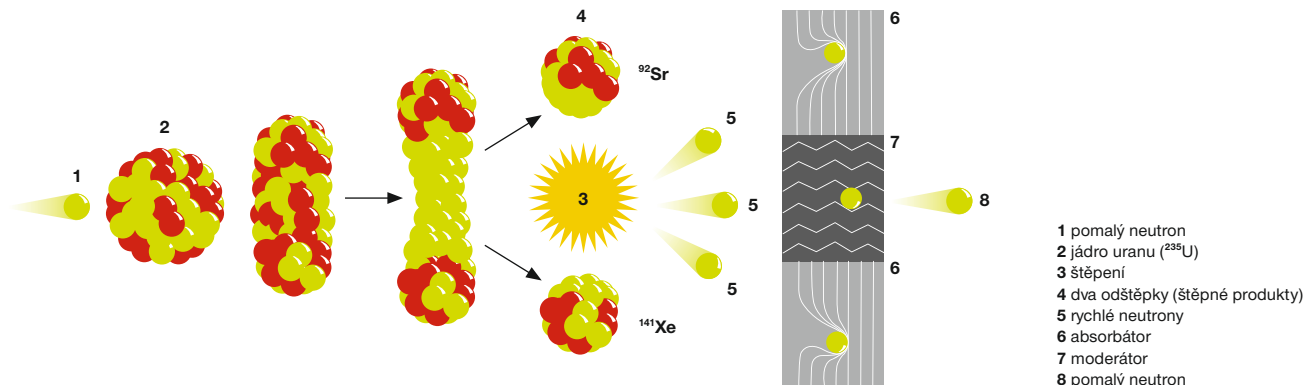
Kontejner s čerstvým jaderným palivem firmy Westinghouse

nejrozšířenější. Štěpným materiálem v palivu těchto reaktorů je izotop uranu 235. Pro tento izotop je totiž charakteristický růst pravděpodobnosti štěpení s poklesem rychlosti (energie) neutronů.

ŘÍZENÁ ŘETĚZOVÁ REAKCE

Podle průběhu řetězové štěpné reakce rozlišujeme v reaktoru tři základní stavy:

- **V podkritickém stavu** je hustota absorbéru tak vysoká, že neutrony vznikající při štěpné reakci jsou plně pohlcovány a nemohou vyvolávat štěpení dalších jader. Řetězec štěpné reakce je přetržen, reakce zaniká. V praxi se takový stav v jaderném reaktoru vytvoří zavedením regulačních a havarijních tyčí s absorbérem do aktivní zóny reaktoru. Dělá se to v případech, kdy chceme snížit výkon reaktoru nebo ho odstavit z provozu.
- **Při kritickém stavu** je hustota (počet vložených tyčí) absorbéru a paliva taková, že ze dvou až tří neutronů vzniklých při štěpení paliva vždy jen jeden vyvolá další štěpnou reakci. V takovém případě pak řetězová reakce stále pokračuje – nerozrůstá se, ani nezaniká. Tomuto stavu



Moderování (zpomalování) neutronu

odpovídá běžný provoz reaktoru při stálém výkonu.

- **Nastane-li nadkritický stav**, štěpná jaderná reakce roste, neboť roste i počet neutronů štěpících jádra. Takový stav je nutný pro zvýšení výkonu reaktoru.

Z ČEHO SE SKLÁDÁ REAKTOR

Aby reaktor úspěšně fungoval, musíme do něho dát palivo, moderátor, absorbátor a chladivo, které bude odvádět teplo vzniklé při štěpení jader. Podle druhu a konfigurace (sestavení) těchto komponent se reaktory rozdělují na mnoho různých typů.

Palivo bývá tvořeno palivovými proutky. Malé tabletky paliva se poskládají na sebe, čímž vytvoří proutek o průměru asi 9 mm. Svazek těchto proutků tvoří palivovou kazetu. U reaktoru typu VVER 1000 se například v šestibokých palivových kazetách vkládá do reaktoru přes 47 tisíc proutků, v každé kazeti je jich 317. Část reaktoru, do které se vkládá palivo a kde také probíhá štěpná reakce, se nazývá aktivní zóna. Palivové proutky jsou chráněny povlakem ze speciální slitiny, nejčastěji na bázi zirkonia, která zaručí předání tepla z paliva chladivu a zároveň nepropustí radioaktivní štěpné produkty. U některých typů reaktorů je pa-

livo ve formě koulí, které se volně spouštějí do aktivní zóny.

Moderátorem bývá u reaktoru, kde štěpení obstarávají pomalé neutrony, nejčastěji voda, ale také grafit nebo těžká voda (D_2O). U reaktorů, které pracují na bázi rychlých neutronů (tj. štěpitelným izotopem je uran 238 nebo plutonium), moderátor chybí.

Absorbátor se do aktivní zóny vkládá také ve formě tyčí, podobně jako palivo. Palivové kazety někdy mívají dvě části – v dolní je palivo, v horní absorbátor. Výkon reaktoru se pak reguluje výškou vytažení nebo zasunutí kazet do aktivní zóny. Pro případ okamžitého zastavení výkonu reaktoru jsou připraveny havarijní tyče. V nich bývá mnohem vyšší koncentrace absorbátoru než v tyčích regulačních.

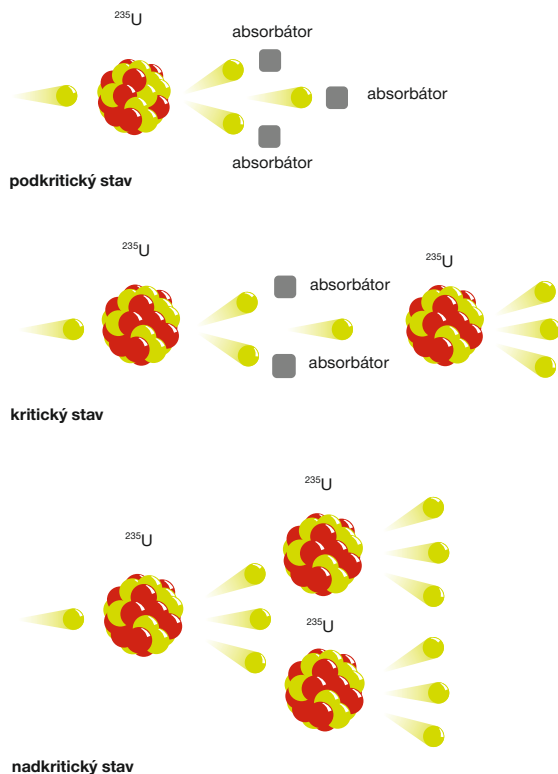
Havarijní tyče jsou vysunuty nahoru nad aktivní zónu, kde drží pomocí elektromagnetů. V případě potřeby havarijní signál vypne elektromagnety a tyče spadnou volným pádem do aktivní zóny, čímž štěpnou reakci zastaví. U některých reaktorů se dokonce tyče do aktivní zóny vstřelují, takže jejich zásah je ještě rychlejší.

Chladivem je médium, které odvádí teplo. Při štěpení jader odletují nová jádra (štěpné úlomky), narážejí do okolních jader a svou

kinetickou energií tak způsobují zahřívání okolí. Teplonosné médium odvádí toto teplo tam, kde ho můžeme využít. Štěpící se materiál je potřeba neustále ochlazovat, aby nedošlo k roztavení povlaku na palivovém proutku a úniku štěpných produktů. Jako chladivo se nejlépe osvědčuje obyčejná voda, těžká voda, oxid uhličitý, helium, sodík a některé soli nebo slitiny. Reaktory mívají jeden nebo více chladicích okruhů.

Nejjednodušší schéma jaderné elektrárny je jednookruhové. Přímou v reaktoru se varem vody vytvoří pára, která se vede k turbíně. Zde koná užitečnou práci a po ochlazení v kondenzátorech se vrací zpět do reaktoru. Celý cyklus se stále opakuje. Je to velmi jednoduchý postup, ale má jednu nevýhodu – voda z reaktoru může být radioaktivní, může s sebou nést stopová množství aktivovaných korozních produktů. S touto vodou se dostává do styku velká část strojního vybavení elektrárny, hlavně turbína, kondenzátory a čerpadla. Proto se tento způsob u nových generací elektráren již neuzivá.

Ve většině zemí, včetně České republiky, se provozují dvouokruhové elektrárny. Voda z reaktoru koluje v tzv. **primárním okruhu**. Trubky primárního okruhu procházejí výměníkem, tzv. **parogenerátorem**, kde ohřívají



Různé stavy řetězové štěpné reakce

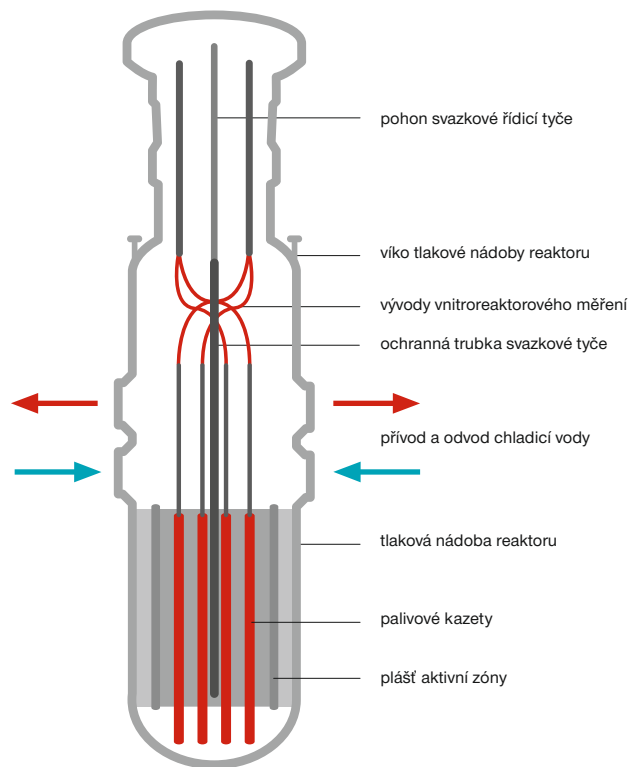


Schéma tlakovodního jaderného reaktoru

vodu **sekundárního okruhu**. Teprve v něm vzniká pára, která se vede k turbíně a do kondenzátorů. Sekundární chladicí okruh vůbec nepřijde do styku s reaktorem.

Některé elektrárny se speciálními typy reaktorů užívají dokonce tříokruhové schéma provozu. Jsou to například rychlé množivé reaktory, využívající jako chladivo v primárním okruhu tekutý kov.

KONSTRUKCE REAKTORŮ

Princip reaktorů je v podstatě jednoduchý, jejich konstrukce však velmi složitá. Provedení závisí na mnoha ukazatelích: typu paliva, chladiva a moderátoru, na uvažova-

ném provozním tlaku, teplotě atd. Obecně je reaktor velká nádoba nebo soustava nádob, která musí odolávat vysokým tlakům, teplotám a intenzivnímu toku neutronů. Proto i její výroba je velmi náročná a použité materiály musí být speciálně čisté a odolné.

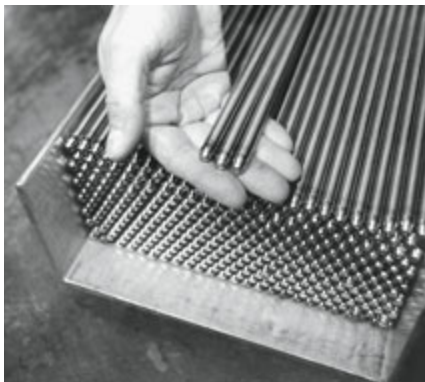
Základní konstrukce jsou:

- **Reaktor s tlakovou nádobou** – používá se tam, kde objem paliva je přibližně stejně velký jako objem moderátoru. Reaktorová nádoba je vyrobena ze speciální nerezavějící ocele, váží několik set tun, průměr bývá okolo 7 metrů a výška až 23 metrů.
- **Reaktor s tlakovými trubkami** – je vhodný v případech, kde objem moderátoru je

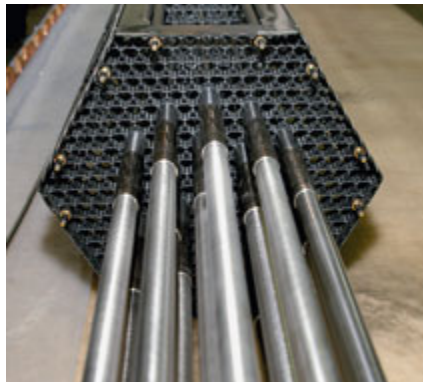
mnohem větší než objem paliva. Palivo je umístěno v trubkách obklopených bloky moderátoru. Celý systém je umístěn v betonové budově.

- **Reaktor s nádobou ze železobetonu.**

Při konstrukci jaderných reaktorů používají ke zpomalování neutronů grafit by pro vyšší výkony musely reaktorové nádoby být takových rozměrů, že by se prakticky nedaly vyrobit ani převézt na místo stavby elektrárny. Proto se reaktorové nádoby budují přímo na staveništi ze železobetonu. Vnitřní rozměry takových železobetonových nádob dosahují desítek metrů. Jsou velmi odolné proti tlaku, tzn. i velmi bezpečné.



Palivové proutky



Palivová kazeta



Přeprava tlakové nádoby reaktoru VVER

TYPY REAKTORŮ

Ve světě dnes pracuje kolem 440 jaderných reaktorů. Jsou nejrůznějších typů s různou četností zastoupení. Povězme si něco o těch nejpoužívanějších.

TLAKOVODNÍ REAKTOR PWR

(Pressurized light-Water moderated and cooled Reactor) nebo ruský typ **VVER** (Vodo – Vodjanoj Energetičeskij Reaktor) je dnes ve světě nejrozšířenější typ. Tlakovodních reaktorů pracuje asi 253, tj. 57 % ze všech světových energetických reaktorů. Původně byl vyvinut v USA, později koncepci převzalo i Rusko.

Stejně reaktory jsou pro svou vysokou bezpečnost používány i k pohonu jaderných ponorek. Palivem je obohacený uran ve formě tabletek oxidu uraničitého uspořádaných do palivových tyčí.

Výměna paliva probíhá při odstaveném reaktoru zpravidla jednou za 1 až 1 a půl roku. Nahradí se 1/3 použitých článků. Moderátorem i chladivem je obyčejná voda. Proudí v primárním okruhu pod velkým tlakem a o teplotě kolem 300 °C. V parogenerátoru ohřívá vodu sekundárního okruhu, ta se mění na páru a žene turbínu.

Typické parametry reaktoru **VVER-1000**:

- obohacení uranu izotopem ^{235}U na 3,1 % až 4,4 %,

- rozměry aktivní zóny 3 m v průměru a 3,5 m výška,
- tlak vody 15,7 MPa,
- teplota vody na výstupu z reaktoru 324 °C.

VARNÝ REAKTOR BWR

(Boiling Water Reactor) je druhý nejrozšířenější typ, těchto reaktorů pracuje na světě 94, což je asi 21 % celkového počtu. Palivem je mírně obohacený uran ve formě válečků oxidu uraničitého uspořádaných do palivových tyčí. Výměna paliva probíhá při odstaveném reaktoru zpravidla jednou za 1 až 1 a půl roku.

Aktivní zóna je podobná aktivní zóně tlakovodního reaktoru. Moderátorem i chladivem je obyčejná voda. Voda se ohřívá až do varu přímo v tlakové nádobě a v horní části reaktoru se hromadí pára. Pára se zbaví vlhkosti a žene se přímo k turbíně. Elektrárny s reaktory **BWR** jsou tedy jednookruhové.

Typické parametry reaktoru BWR s výkonem 1000 MW:

- obohacení uranu izotopem ^{235}U na 2,1 % až 2,6 %,
- rozměry aktivní zóny 4,5 m v průměru a 3,7 m výška,
- tlak vody 7 MPa,
- teplota páry na výstupu z reaktoru 286 °C.

TĚŽKOVODNÍ REAKTOR CANDU

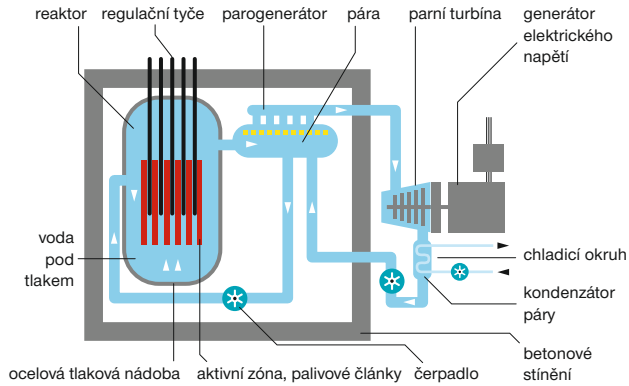
byl vyvinut v Kanadě a exportován také do Indie, Pákistánu, Argentiny, Koreje a Rumunska. Dnes pracuje asi 35 takových reaktorů. Palivem je přírodní uran ve formě oxidu uraničitého, chladivem a moderátorem je těžká voda D_2O . Aktivní zóna je v nádobě tvaru ležícího válce, která má v sobě vodorovné průduchy pro tlakové trubky. Těžkovodní moderátor v nádobě musí být chlazen, neboť moderační schopnost se snižuje se zvyšující se teplotou. Těžká voda z prvního chladicího okruhu předává své teplo obyčejné vodě v parogenerátoru, odkud se vede pára na turbínu.

Typické parametry reaktoru **CANDU** s výkonem 600 MW:

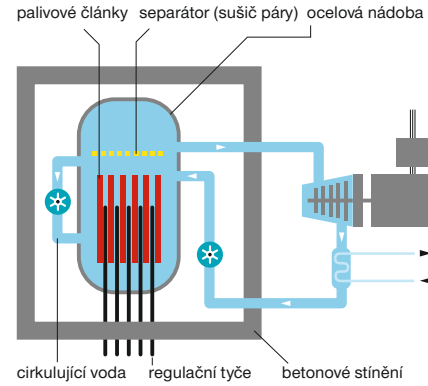
- rozměry aktivní zóny 7 m v průměru a 5,9 m výška,
- tlak těžké vody v reaktoru 9,3 MPa,
- teplota těžké vody na výstupu z reaktoru 305 °C.

PLYNEM CHLAZENÝ REAKTOR MAGNOX GCR

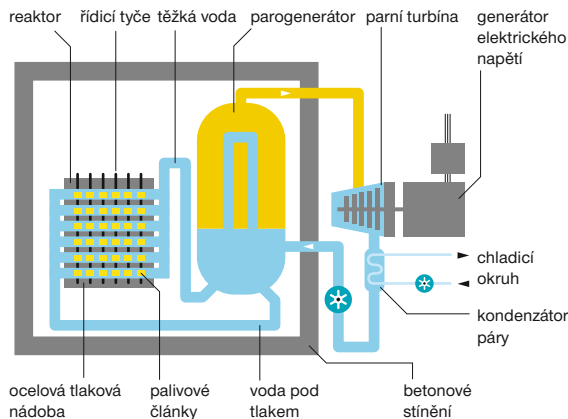
(Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor) se používá ve Velké Británii a v Japonsku. Palivem je přírodní kovový uran ve formě tyčí pokrytých oxidem magnezia. Aktivní zóna se skládá z grafitových bloků



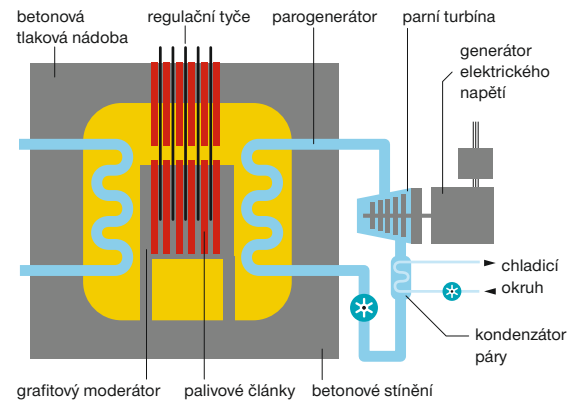
Reaktor PWR (tlakovodní)



Reaktor BWR (varný)



Reaktor CANDU (chlazený a moderovaný těžkou vodou)



Reaktor AGR (chlazený plynem)

(moderátor), kterými prochází několik tisíc kanálů, do každého se umísťuje několik palivových tyčí. Aktivní zóna je uzavřena v kulové ocelové tlakové nádobě se silným betonovým stíněním. Palivo se vyměňuje za provozu. Chladivem je oxid uhličitý, který se po ohřátí vede do parogenerátoru, kde předá teplo vodě sekundárního okruhu.

Typické parametry reaktoru **Magnox** s výkonem 600 MW:

- přírodní uran s obsahem 0,7 % izotopu ^{235}U ,

- rozměry aktivní zóny 14 m v průměru a 8 m výška,
- tlak CO_2 2,75 MPa,
- teplota CO_2 na výstupu z reaktoru 400 °C.

POKROČILÝ PLYNEM CHLAZENÝ REAKTOR AGR

(Advanced Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor) se zatím používá výhradně ve Velké Británii, kde pracuje 14 takových reaktorů. Palivem je uran obohacený izotopem ^{235}U ve formě oxidu uraničitého,

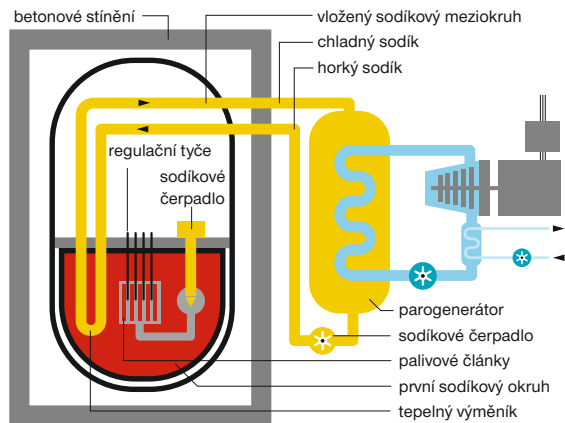
moderátorem grafit, chladivem oxid uhličitý. Elektrárna je dvouokruhová.

Typické parametry reaktoru **AGR** s výkonem 600 MW:

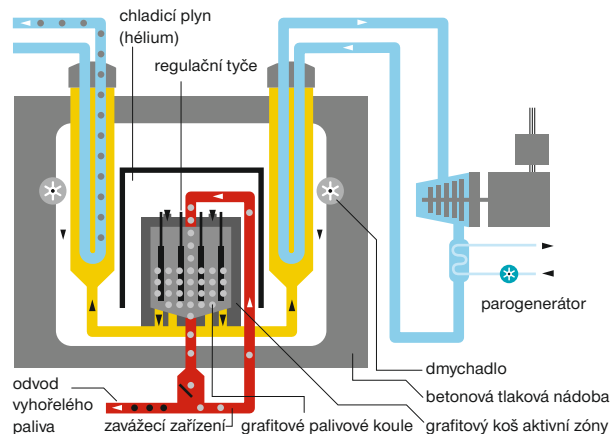
- uran obohacený na 2,3 % izotopu ^{235}U ,
- rozměry aktivní zóny 9,1 m v průměru a 8,5 m výška,
- teplota CO_2 na výstupu z reaktoru 450 °C.

RYCHLÝ MNOŽIVÝ REAKTOR FBR

(Fast Breeder Reactor) je v Rusku (BN-600 v Bělojarsku), ve Francii a Velké Británii.



Reaktor FBR (rychlý množivý)



Reaktor HTGR (německý typ, vysokoteplotní)

Palivem je plutonium ve směsi oxidu plutoničitého a uraničitého. Během provozu vyprodukuje více nového plutoničitého paliva, než kolik sám spálí. Reaktor nemá moderátor, pracuje na rychlých neutronech. Aktivní zóna tvořená svazky palivových tyčí je obklopena „plodícím“ pláštěm z uranu. Chladičem je tekutý sodík. Aktivní zóna je potopena v ocelové nádobě naplněné sodíkem. Uvnitř reaktoru je výměník, kde sodík předává teplo druhému chladicímu okruhu, ve kterém proudí také roztavený sodík. Sodík ze sekundárního okruhu proudí do parogenerátoru, kde ve třetím okruhu ohřívá vodu na páru.

Typické parametry reaktoru **FBR** s výkonem 1300 MW:

- palivo obohacené 20 % Pu,
- rozměry aktivní zóny včetně plodivé oblasti – 3, 1 m v průměru a 2,1 m výška,
- tlak sodíku 0,25 MPa,
- teplota sodíku na výstupu z reaktoru 620 °C.

REAKTOR TYPU RBMK

(Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj), známá je též zkratka LWGR, se používá výhradně na území bývalého SSSR. Tohoto typu byl

reaktor první jaderné elektrárny v Obninsku i reaktor v Černobylu. Další reaktory tohoto typu se již nestaví. Palivem je přírodní nebo slabě obohacený uran ve formě oxidu uraničitého. Palivové tyče jsou vloženy v kanálech, kudy proudí jako chladivo obyčejná voda. V tlakových kanálech přímo vzniká pára, která po oddělení vlhkosti pohání turbínu. Elektrárna je tedy jednookruhová. Moderátorem je grafit, který obklopuje kanály.

Typické parametry reaktoru **RBMK** s výkonem 1000 MW:

- obohacení uranu izotopem ^{235}U na 1,8 %,
- rozměry aktivní zóny – 11,8 m v průměru a 7 m výška,
- počet kanálů 1693,
- tlak nasycené páry 6,9 MPa,
- teplota parovodní směsi na výstupu z reaktoru 284 °C.

VYSOKOTEPLTNÍ REAKTOR HTGR

(High Temperature Gas Cooled Reactor) patří k velmi perspektivním typům. Mají výborné bezpečnostní parametry a poskytují velmi vysokou teplotu na výstupu z reaktoru. Teplo tak může být využíváno nejen pro výrobu

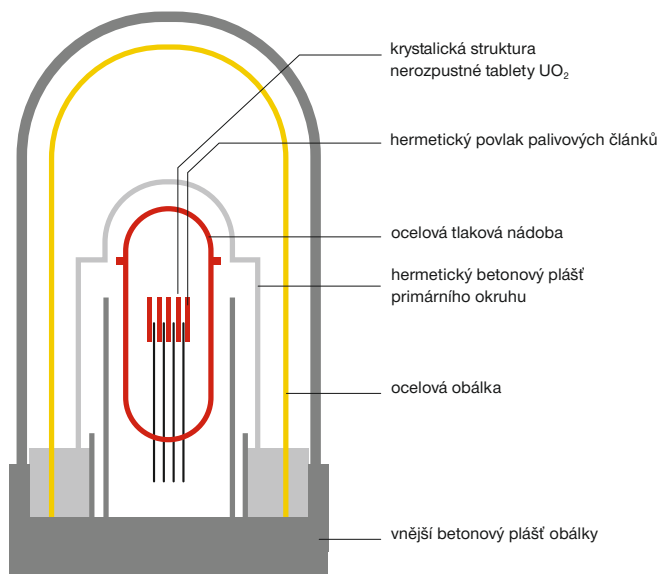
elektřiny, ale i přímo v různých průmyslových procesech.

Vysokoteplotní reaktory jsou zatím vyvinuty pouze experimentálně v Německu, USA a Velké Británii. Palivem je vysoce obohacený uran ve formě malých kuliček oxidu uraničitého (0,5 mm v průměru). Kuličky povlakané třemi vrstvami karbidu křemíku a uhlíku jsou rozptýlené v koulích z grafitu, velkých asi jako tenisové míček. Palivové koule se volně sypou do aktivní zóny, na dně jsou postupně odebírány.

V koncepci USA se používají místo koulí šestiúhelníkové bloky, které se skládají na sebe. Chladičem je helium proháněné skrz aktivní zónu. V parogenerátoru předá teplo chladicí vodě sekundárního okruhu, vzniklá pára pohání turbínu. Horké helium může být vedeno přímo do průmyslových a chemických procesů.

Typické parametry reaktoru **HTGR** s výkonem 300 MW (německý typ):

- obohacení uranu izotopem ^{235}U na 93 %,
- rozměry aktivní zóny 5,6 m v průměru a 6 m výška,
- tlak hélia 4 MPa,
- teplota hélia na výstupu z reaktoru 284 °C.



Bariéry reaktoru PWR



Vystavba Jaderné elektrárny Temelín

BEZPEČNOST JADERNÝCH ELEKTRÁREN

Při provozu jaderných elektráren je bezpečnost základním a prvořadým požadavkem. Vznikající radioaktivní materiál a radioaktivní záření se nikdy nesmějí dostat do vnějšího prostředí a ohrozit personál elektrárny nebo dokonce obyvatelstvo v blízkém i dalekém okolí. Jaderná elektrárna musí odolat zemětřesení i jiným živelním pohromám, pádu letadla, teroristickým útokům, technickým závadám i selhání obsluhy. Ze základních opatření pro zajištění radiační bezpečnosti jaderných elektráren jsou nejvýznamnější bariéry jaderných elektráren a autoregulace reaktoru.

BARIÉRY JADERNÝCH ELEKTRÁREN

První bariéra spočívá už v samé struktuře jaderného paliva. Krystalická struktura nejčastěji používaného oxidu uraničitého UO_2 má sama schopnost udržet při normálním provozu reaktoru 99 % vznikajících radioaktivních štěpných produktů.

Druhou bariérou je hermetický obal palivové tyče. Jeho úkolem je zachytit zbylé asi 1 % plyných produktů štěpení. Dokonce ani při porušení hermetičnosti palivové tyče není ohrožena radiační bezpečnost v primárním okruhu elektrárny.

Třetí bariérou je vlastní reaktorová nádoba, která je dostatečně pevná, a hermeticky uzavřený primární okruh.

Čtvrtou bariéru tvoří tzv. ochranná obálka. Přestože selhání všech už zmíněných tří bariér je velmi nepravděpodobné, je pro další zvýšení bezpečnosti prostor primárního okruhu moderních jaderných elektráren uzavřen pod ochranný železobetonový obal – kontejnment. Tato ochrana je vybudována i na naší Jaderné elektrárně Temelín.

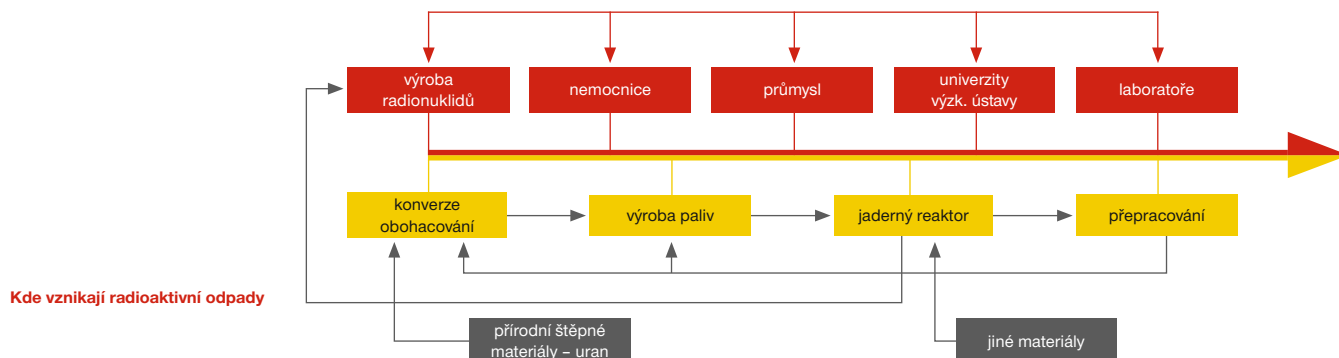
AUTOREGULACE REAKTORU

Dalším významným prvkem zaručujícím bezpečnost jaderné elektrárny je princip autoregulace reaktoru.

Autoregulace je schopnost reaktoru omezit náhlé změny výkonu automaticky i bez využití regulačních orgánů. Pokud dojde k neočekávanému zvýšení výkonu reaktoru, autoregulace vrátí výkon k původním provozním hodnotám. Vývoj reaktorů směřuje právě k těmto typům s tzv. **inherentní** (vnitřní) **bezpečností**.

Bezpečnosti provozu jaderných elektráren je ve srovnání s jinými obory věnována vysoce nadstandardní pozornost. Ze zkušenosti provozu již tzv. 13 000 reaktorů vznikla celá řada účinných technických a organizačních opatření, která jsou zárukou bezpečného provozu jaderných elektráren.





TREZOR NA TISÍC LET

Takřka při každé lidské činnosti vznikají odpady. Při výrobě elektřiny v jaderných elektrárnách vznikají odpady radioaktivní. Radioaktivní odpady vznikají ovšem i při používání radionuklidů a ionizujícího záření v lékařství, zemědělství, průmyslu nebo výzkumu. Ve srovnání s odpady jiného druhu je jejich množství relativně malé. Existují různé způsoby jejich zneškodňování. Ukládání těchto odpadů podléhá přísným pravidlům a kontrole. Radioaktivita odpadů časem ubývá. Několikanásobné bezpečnostní bariéry v úložištích zajišťují, aby odpady zůstaly oddělené od životního prostředí po tisíce let.

RADIOAKTIVNÍ ODPADY

Jestliže dáme lidem možnost vybrat si mezi bydlením v blízkosti úložiště radioaktivních odpadů a velkokapacitním vepřínem, většina si vybere vepřín. Přitom je pro zdraví značně rizikovější než úložiště radioaktivních odpadů. Problém spočívá v tom, že o tom většina lidí nebude přesvědčena.

Radioaktivní odpady se staly bubákem moderní doby. Nezelehčujeme však, jednou jsou tady a víme, že jsou skutečně nebezpečné. Je třeba je důkladně oddělit od životního prostředí a zajistit, aby do něho nepronikly ani po mnoha a mnoha letech.

Je přesně definováno, která látka je považována za radioaktivní odpad. Honba za zpříšňováním hygienických limitů se někdy přehání. Při ukládání radioaktivních odpadů do země se vyskytly už i tak absurdní požadavky na snížení limitu pro uznání materiálu za radioaktivní odpad, že by se například

i nebožtíci museli pochovávat v olověných kontejnerech. Lidské tělo totiž obsahuje určité množství přírodních radioaktivních prvků. Kdyby se brazilská kávová zrna vyráběla v jaderné elektrárně, musela by být zařazena mezi nízkoaktivní odpad.

Bez ohledu na místo a způsob vzniku dělíme radioaktivní odpady podle aktivity na **nízkoaktivní**, **středně aktivní** a **vysokeaktivní** a podle poločasu rozpadu převládajících radionuklidů na **krátkodobé** a **dlouhodobé**.

KDE SE BEROU A KOLIK JICH JE

Bezodpadové technologie jsou snem a zbožným přáním. Každá lidská činnost přináší odpady. Relativně velké množství odpadů za sebou zanechává energetika, zejména klasické zdroje, vyrábějící elektrickou energii z fosilních paliv. Jaderné elektrárny produkují odpadů sice relativně málo, zato však radioaktivních.

Radioaktivní odpady vznikají i mimo energetiku, v nejrůznějších oblastech průmyslu, medicíny, výzkumu, v zemědělství, potravinářství, geologii, ekologii, vodohospodářství i v archeologii, zkrátka všude tam, kde se používají radionuklidy a ionizující záření. Jedná se většinou o nízkoaktivní a středně aktivní odpady.

Použitě palivo z jaderných reaktorů tvoří méně než 1 % objemu všech jaderných odpadů, ale obsahuje přes 90 % veškeré radioaktivity. Nízkoaktivní odpady naopak představují 90 % objemu všech radioaktivních odpadů, ale pouze 0,1 % jejich radioaktivity.

Radioaktivní odpady vznikají v podstatě v průběhu celého palivového cyklu od vytěžení uranové rudy až po likvidaci elektrárny na konci doby její životnosti. Haldy hlušiny zbývající po dolování se za radioaktivní odpad zatím nepovažují, přestože obsahují ještě nemalý podíl uranu a další přírodní radionuklidy.



Žlutý koláč – surovina pro výrobu paliva pro jaderné reaktory

Vytěžená uranová ruda se drtí, mele na jemný písek a louží se kyselinou nebo zásaditým louhem. Vyloužené sloučeniny uranu se propírají, srážejí a suší. Vzniká uranový koncentrát U_3O_8 s obsahem uranu alespoň 65 %. Pro intenzivní žlutou barvu se mu říká „žlutý koláč“. Při všech těchto operacích vzniká nízkoaktivní odpad s obsahem přirozených radionuklidů. V počátečních fázích palivového cyklu vzniká z hlediska objemu nejvíce odpadu. Je však nízkoaktivní a k jeho dostatečné izolaci od životního prostředí není nutné budovat speciální technická díla. Ukládá se v odkalištích v blízkosti úpraven. Uranový koncentrát pak prochází rafinací, konverzí a obohacováním, aby se zvýšil podíl izotopu uranu ^{235}U asi na 2,5 až 4 %. Obohacený uran ve formě oxidu uraničitého UO_2 se lisuje do tablet, z nichž se vyrábějí palivové články.

Rovněž při výrobě jaderného paliva vznikají nízkoaktivní odpady.

Při tzv. „vyhořívání“ paliva v reaktoru dochází štěpnou reakcí ke vzniku značného množství radionuklidů. Štěpné produkty zůstávají uzavřeny v palivových článcích a jen výjimečně dochází k jejich proniknutí do technologických okruhů elektrárny. Použité palivo má vlastnosti vysokoaktivního odpadu. Je možné ho uložit, nebo přepracovat na nové



Uranový důl

palivo. Zbytek radioaktivního materiálu po přepracování představuje co do aktivity a toxicity nejzávažnější typ radio-aktivních odpadů. Při provozu elektrárny vznikají i nízkoaktivní a středně aktivní odpady. Po ukončení provozu jaderné elektrárny dojde k její likvidaci a kontaminované a aktivované části se rovněž zpracují a uloží jako radioaktivní odpad.

CHARAKTERISTIKA A KATEGORIZACE

Radioaktivní odpady se podle aktivity a podle poločasu rozpadu hlavních obsažených radionuklidů dělí na 5 kategorií. Každá skupina vyžaduje jiný přístup při zneškodňování a jiné podmínky pro trvalé uložení. Pro názornost u každé kategorie uvedeme doporučený způsob uložení.

Samozřejmě můžeme vždy využít úložiště vyšších kategorií pro radioaktivní odpady s nižší aktivitou, avšak odpady budou zabezpečeny více než je nezbytné, což je sice dobré, ale většinou neúměrně nákladné a zbytečné.

KATEGORIE 1

Vysoká aktivita, obsah dlouhodobých zářičů, vysoká produkce tepla, doba nebezpečnosti až miliony let.



Měření radioaktivity uranové horniny 1000 m pod zemí

Doporučené trvalé uložení:

v hlubinném úložišti ve stabilní hornině, vybudovaném speciálně pro tento účel, výjimečně v opuštěném solném dole.

KATEGORIE 2

Střední aktivita, obsah dlouhodobých zářičů, malá produkce tepla, doba nebezpečnosti statisíce let.

Doporučené trvalé uložení:

hlubinné geologické formace, opuštěné solné doly, výjimečně jiné opuštěné doly.

KATEGORIE 3

Nízká aktivita, obsah dlouhodobých zářičů, nevýznamná produkce tepla, doba nebezpečnosti desetitisíce let.

Doporučené trvalé uložení:

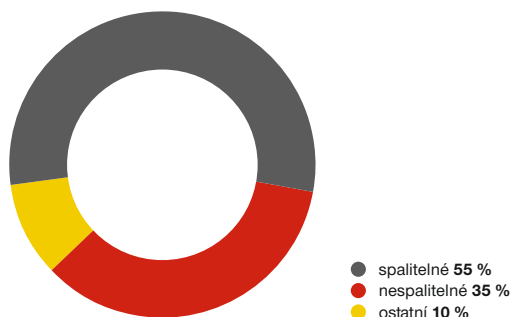
hlubinné geologické formace, opuštěné solné doly, výjimečně jiné vybrané opuštěné doly.

KATEGORIE 4

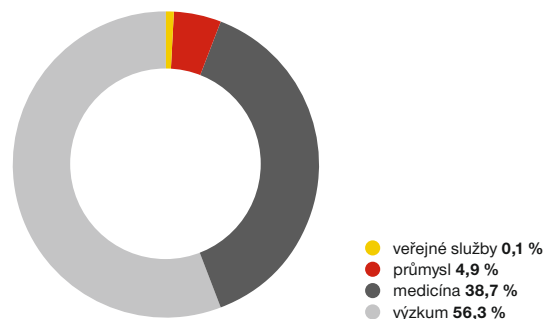
Střední aktivita, bez obsahu dlouhodobých zářičů, mírná produkce tepla, doba nebezpečnosti tisíce let.

Doporučené trvalé uložení:

opuštěné solné doly, vybrané jiné opuštěné doly, jeskyně, povrchová a podpovrchová úložiště se zesílenou inženýrskou strukturou (např. stavební konstrukce a izolace).



Rozdělení institucionálních radioaktivních odpadů podle druhu



Rozdělení institucionálních radioaktivních odpadů podle původu

KATEGORIE 5

Nízká aktivita, bez obsahu dlouhodobých zářičů, nulová produkce tepla, doba nebezpečnosti stovky let.

Doporučené trvalé uložení:

opuštěné solné a jiné vybrané opuštěné doly, jeskyně, povrchová a podpovrchová úložiště.

ZNEŠKODNĚNÍ ODPADŮ

Principem zneškodnění radioaktivních odpadů je jejich oddělení od biosféry takovým způsobem, aby po celou dobu jejich existence nemohlo dojít k ohrožení člověka a životního prostředí. Při zneškodňování radioaktivních odpadů je třeba mít na paměti dvě hlavní hlediska: bezpečnostní, které je prvotní, a ekonomické. Bezpečnost je zajišťována řadou technických opatření: úpravou odpadů, snižováním jejich objemu, jejich převáděním do stabilních a nerozpustných forem, budováním izolačních a stabilizačních vrstev, vhodným umístěním úložiště atd. Ekonomie se uplatňuje při výběru nejúčinnějšího technického řešení tak, že se vždy u navržených opatření porovnávají předpokládané vynaložené náklady s bezpečnostně-technickými přínosy, vyjádřenými finančním ekvivalentem (označuje se to anglickým termínem

cost/benefit analysis). Stručně řečeno, jestliže nějaké bezpečnostní opatření je schopné zvýšit bezpečnost o 1 %, ale za cenu např. 100 % zvýšení nákladů, nemá již cenu ho realizovat.

INSTITUCIONÁLNÍ RADIOAKTIVNÍ ODPADY

Nejrůznější radioaktivní látky, přírodní i uměle připravené radioizotopy, se široce využívají v mnoha hospodářských odvětvích. Při výrobě radioizotopů a při jejich využívání ve výzkumu, lékařství, průmyslu, zemědělství a v dalších oborech lidské činnosti vznikají různé druhy tak zvaných „institucionálních“ radioaktivních odpadů. Jsou to tedy odpady zcela jiné než ty, které vznikají vyhořením paliva v jaderných elektrárnách. Tyto odpady jsou produkovány na mnoha různých pracovištích v malých množstvích. Pocházejí například z nemocnic, z oddělení radiologie a nukleární medicíny, z pracovišť vyrábějících umělé radioizotopy, z vysokoškolských a výzkumných laboratoří, z nejrůznějších odvětví průmyslu a zemědělství, kde se používají radioaktivní zářiče a ionizující záření.

Jsou to např. takové materiály jako papír, pryž, použité injekční stříkačky,

použité zářiče z nemocnic, kde se léčí rakovina a zhoubné nádory, zářiče z různých průmyslových pracovišť, roztoky a radiofarmaka (léky obsahující radionuklidy) z medicíny, sklo, textil, plasty, třísky, odstřížky plechu, mrtvá laboratorní zvířata, použité filtry z filtračních zařízení, rukavice, ochranné oděvy atd. Jejich zneškodňování probíhá zhruba takto: hned na místě vzniku se odpad roztřídí, slisuje, pak se zalévá betonem do ocelových stolitrových sudů, které se ještě jednou zabetonují do větších sudů. Sudy jsou z obou stran pozinkované, mezi vnitřní schránkou a stěnou sudu je nejméně 5 cm betonu. Uzavrou se neprodyšně víkem a natrou asfaltem. Sudy se označí a zkontrolují dozimetrem, nejsou-li na povrchu znečištěny radioaktivitou. Speciálním autem se za dodržení všech bezpečnostních předpisů svážejí na úložiště.

V České republice jsou v provozu dvě úložiště takovýchto nízkoaktivních odpadů v podpovrchovém dole Richard u Litoměřic a v dole Bratrství v Jáchymově. Třetí úložiště v dole Alkazar u Berouna je již uzavřené. Institucionálních odpadů je v České republice ročně zpracováváno kolem 100 m³ (množství se rok od roku liší, pohybuje se mezi 50 až 150 m³).



Dopravní chodba úložiště Richard



Úložná komora v dole Bratrství

ÚLOŽIŠTĚ V ČESKÉ REPUBLICE

Uzavřeným úložištěm institucionálních odpadů je opuštěný vápencový důl Alkazar u Berouna. Tvoří ho dvě důlní štolý. Do provozu bylo uvedeno v roce 1958 a uzavřeno bylo v roce 1964. Bylo používáno k ukládání nízkoaktivních odpadů z vědeckých a nemocničních pracovišť, zejména z Ústavu jaderného výzkumu Řež a z Ústavu pro výzkum, výrobu a využití radioizotopů Praha. Ve štolě A zůstalo uloženo asi 2 000 nádob o objemu 12 l, malý počet sudů o objemu 200 l a filtry z radiochemických laboratoří v obalech z PVC. Ve štolě B zůstalo uloženo celkem 105 m³ odpadů, uložených ve 2100 nádobách. Z celkového množství je 66 m³ běžný neradioaktivní laboratorní odpad. Zabetonovaný biologický odpad má objem 35 m³ a kapalný odpad upravený na beton má objem 4 m³. Během uplynulých 20 let došlo několikrát k násilnému vniknutí do úložiště, a proto tu byla vybudována tlustá betonová zeď, aby se takové případy už nemohly opakovat.

Úložiště Bratrství u Jáchymova jsou rovněž opuštěné důlní prostory bez inženýrských bariér. Do provozu bylo uvedeno v 70. letech. Objem důlních prostor

použitých pro úložiště je přibližně 300 m³. Za předpokladu, že tyto prostory budou sloužit pouze pro potřeby radionuklidových pracovišť, vystačí kapacita ještě asi na 30 let provozu. Úložiště je vybudováno ve štolě „Zdař Bůh“ a přilehlých komorách bývalého dolu Bratrství. Štola je vyražena v slídnato-křemičitých svorech. Skladují se zde institucionální radioaktivní odpady obsahující přírodní radionuklidy. Zjednodušeně by se tedy dalo říci, že přirozené radionuklidy vytěžené z jáchymovské rudy se sem opět vrací zpět, ale pečlivě zabalené, uzavřené v sudech a stíněné betonem.

Dosud zde bylo uloženo asi 240 m³ odpadů. Aktivita uložených odpadů je ve srovnání s přírodní aktivitou v okolí úložiště zanedbatelná. Obyvatelstvo nemůže být ohroženo dokonce ani v případě úplného zatopení uložených odpadů a úniku kontaminovaných (zamořených) vod do povrchových toků. Celková aktivita uložených odpadů, včetně aktivity izotopů, které vzniknou rozpadem uranu, dosahuje řádově TBq, což tvoří nepatrný, nevýznamný zlomek přírodní aktivity nalézající se v Jáchymově, ať už v podzemí, nebo na povrchu.

Úložiště Richard u Litoměřic je umístěno v podpovrchovém opuštěném dole na vápenc. Uvedeno do provozu bylo v roce 1964. Bývalý hlubinný vápencový důlní komplex Richard II u Litoměřic sloužil za druhé světové války jako podzemní továrna na výrobu leteckých součástí. V současné době se v něm skladují nízkoaktivní a středně aktivní odpady s umělými radionuklidy z neenergetických pracovišť. Pro potřeby ukládání institucionálních radioaktivních odpadů je provozována část prostorů dolu o celkovém objemu asi 17 000 m³, přičemž pro zaplnění odpady se počítá s 8 500 m³. Kapacita úložiště vystačí do roku 2070.

V roce 1989–1990 byl v souladu s doporučeními Mezinárodní agentury pro atomovou energii (MAAE) vypracován bezpečnostní rozbor úložiště. V závěrech se uvádí, že systém Richard II lze klasifikovat jako dočasný sklad. Znamená to, že po dobu několika set let v něm mohou být bezpečně skladovány radioaktivní odpady. Podmínkou pro to je ale splnění ve zprávě uváděných požadavků, mezi něž patří např. uskutečnění úplného geologického a hydrologického průzkumu. Úprava a zabezpečení sousedních podzemních prostorů a vybudování monitorovací sítě.



Povrchové úložiště v Jaderné elektrárně Dukovany



Linka na zpracování odpadů v dukovanské elektrárně

RADIOAKTIVNÍ ODPADY Z JADERNÝCH ELEKTRÁREN

Při provozu jaderných elektráren se objevují vedle vysokoaktivního použitého paliva také nízkoaktivní a středně aktivní plynné, kapalné a pevné radioaktivní odpady. Vznikají kontaminací různých materiálů radionuklidy uvolňovanými v reaktoru. Výjimečně jsou to štěpné produkty; ty se za normálního provozu nemohou dostat ven z obalu palivových článků. Většinou to jsou radionuklidy vzniklé aktivací různých látek obsažených v primárním okruhu. Vznikají a shromažďují se hlavně v chladicím systému reaktoru a v menší míře v bazénech na skladování použitého paliva. Další radioaktivní odpady pak pocházejí z různých čistících a filtračních stanic v elektrárně, z prádelny a umývárny, případně z laboratoří.

Při zpracování odpadů se řídíme třemi hlavními zásadami: snížit množství a objem odpadů, odstranit radionuklidy a změnit složení odpadů.

Aby se snížilo množství odpadů určené ke zpracování a skladování a aby se minimalizovaly náklady s tím spojené, klade se největší důraz na snížení jejich objemu. To je zvláště důležité u nízkoaktivních odpadů, které mají

velký objem, ale nízkou aktivitu. V závislosti na druhu odpadů se ke snížení objemu používá odpařování, lisování, spalování atp.

Druhou hlavní zásadou při zneškodňování odpadů je odstranit z nich radionuklidy. To se děje například fyzikálně – chemickým oddělováním nebo zadržením odpadů po dobu, než se přítomné radionuklidy samovolně rozpadnou.

Pro bezpečné uložení odpadů a jejich izolování od okolí je důležité, aby měly formu, která umožní jejich uzavření do kontejnerů a další praktickou manipulaci s nimi. Všechny radioaktivní odpady se pečlivě shromažďují, sledují a po celou dobu práce s nimi se monitorují a kontrolují.

KAPALNÉ ODPADY A MOKRÉ PEVNÉ ODPADY

V závislosti na typu reaktoru vznikají kapalně odpady, které se liší jak množstvím, tak aktivitou. Například reaktory chlazené a moderované vodou produkují více kapalných odpadů než reaktory chlazené plynem. Kapalně radioaktivní odpady vznikají při čištění primárního chladiva, bazénů pro skladování použitého paliva, drenážních vod, oplachových vod apod. Vznikají také při údržbě

a opravách. Do skupiny mokrých pevných odpadů patří použité ionexové pryskyřice z iontoměničových filtrů, nasycené náplně filtrů a filtrační kaly. Největší množství těchto odpadů představují ionexové pryskyřice.

Hlavním cílem zpracování kapalných radioaktivních odpadů je takové snížení obsahu radionuklidů, aby bylo možné převážnou část těchto odpadů buď bezpečně vypustit do životního prostředí, nebo důležité složky z nich znovu použít. Pro zpracování kapalných radioaktivních odpadů se používají čtyři hlavní technologické postupy:

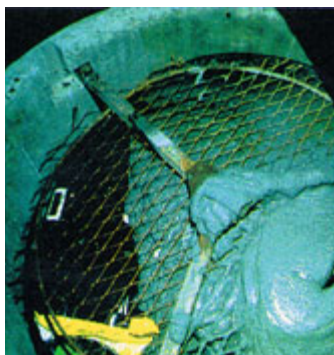
- odpařování přebytečné vody,
- chemické srážení,
- oddělení pevných částic,
- iontová výměna.

Tyto procesy jsou dokonale ověřené a široce používané takřka na všech jaderných elektrárnách světa.

Ze všech uvedených metod se největšího snížení objemu a neúčinnější dekontaminace dosahuje **metodou odpařování**. Po odpaření vody zůstávají netěkavé pevné zbytky ve formě solí, které obsahují většinu radionuklidů. Metoda odpařování je tak vysoce účinná, že čistý kondenzát (odpařená a znovu z kondenzovaná voda) se může bez



Bitumenace



Cementace



Polymerace

dalšího zpracování vypouštět do povrchových vodotečí. Kromě prostého odpařování se používají také **chemické metody**, kdy se do kapalných odpadů přidávají srážecí činidla, nejčastěji hliníkaté a železité soli, jejichž pomocí se radionuklidy vysrážejí a usadí na dně ve formě nerozpustných solí (precipitace), nebo se přidávají vločkotvorné chemikálie, které vážou radionuklidy ve formě vloček (flokulace). Na rozdíl od metody odpařování, kde se dosahují dekontaminační faktory 10^4 až 10^6 (to znamená, že v kondenzátu je pouhá desetitisíciná až miliontina původního množství radionuklidů), jsou dekontaminační faktory u chemické metody nízké a stupeň oddělení není úplný, takže je nutné je kombinovat s dalšími účinnějšími metodami. Pomocí filtrů a odstředivek se z kapalných odpadů odstraňují pevné částice. Jako doplněk se někdy používají biologické čisticí metody, které využívají schopnosti některých mikroorganismů kumulovat v sobě radionuklidy.

Nejčastěji se používají kombinované **fyzikálně-chemické metody**: adsorpce, iontová výměna, elektrodialýza, reverzní osmóza. K čištění vody primárního a sekundárního okruhu reaktorů, vody z bazénů pro skladování vyhořelého paliva a kondenzátů z odparek se používá tzv. metoda výměny iontů. Iontoměniče jsou nerozpustné vysokomolekulární látky s ionizovatelnou funkční

skupinou. Mohou být organické, anorganické, přírodní i umělé. Iontoměničové filtry účinně zachytávají radionuklidy. Když se nasatí, je možné je buď regenerovat, nebo se zpracují také jako radioaktivní odpad.

Mokré pevné odpady, které zůstanou po zpracování kapalných odpadů, je ještě nutné přeměnit do pevných produktů, to je do takové chemicky a fyzikálně stabilní formy, která snižuje možnost pohybu radionuklidů nebo jejich uvolnění při dopravě, skladování nebo konečném uložení. Pro zpevnění a znehybnění se používají nejčastěji tři metody:

- cementace,
- bitumenace,
- polymerace.

Zpevňování radioaktivních odpadů do cementu (**cementace**) přináší řadu výhod a používá se v celém světě již mnoho let. Je levné, nepotřebuje nijak složitá zařízení, výsledný produkt je stabilní, pojme do sebe relativně hodně odpadu a má i vysokou schopnost samostínění.

Na rozdíl od cementace prováděné za studena je **bitumenace** horký proces, který umožňuje, aby byl odpad před znehybněním zbaven další vody. Díky tomu se velmi snižuje objem odpadů i náklady. Nevýhodou tohoto procesu je to, že bitumen (živice, organická látka podobná asfaltu) je potenciálně hořlavý a vyžaduje speciální opatření

při zacházení. Přesto se bitumenizace stále více uplatňuje v USA, Japonsku, Rusku, Švédsku, Švýcarsku a jinde.

Poměrně novým procesem znehybnění mokřích pevných odpadů je **polymerace**, tj. jejich zabudování do umělých hmot, jako jsou polyester nebo epoxidové pryskyřice. Jejich použití je však nesrovnatelně nákladnější a vyžaduje relativně složitá zařízení. Proto se tento proces používá jen tam, kde je zpevnění do cementu nebo bitumenu technicky nevhodné.

Výhodou umělých hmot je velká odolnost vůči vyluhování radionuklidů a chemická netečnost.

Kapalné odpady se zpracovávají v areálu elektrárny na speciálních linkách. Zahušťují se a koncentrují, aby se co nejvíce zmenšil jejich objem. Přebytková voda se odpařuje na odparkách, koncentrát se chemicky sráží, cementuje, nebo upravuje do bitumenu asfaltové živice. Zanedbatelná část kapalných odpadů se ředí čistou vodou a řízeně vypouští do povrchových vod.

Koncentrace radionuklidů ve výpustích jaderných elektráren splňuje limity pro pitnou vodu a je 100 až 150krát nižší než koncentrace přírodních radionuklidů v povrchových vodách a běžných tekutinách. Jedinou výjimku představuje izotop vodíku – **tritium**, ale i jeho koncentrace v odpadních vodách



Pevné odpady



Plynné odpady



Kapalné odpady

z jaderné elektrárny je 100krát nižší, než maximální přípustný limit pro pitnou vodu. Tritium nelze dostupnými způsoby z vody odstranit. Protože má stejné chemické vlastnosti, jako lehký vodík, dostává se do odpadních vod. Sít monitorovacích stanic a pravidelné měření vzorků zajišťuje neustálou kontrolu.

PLYNNÉ ODPADY A RADIOAKTIVNÍ AEROSOLY

Při normálním provozu jaderné elektrárny vznikají i plynné radioaktivní odpady ve formě plynných radioaktivních prvků, rozptýlených částic nebo aerosolů. Nejdůležitějšími těžkými radionuklidy jsou **halogeny, vzácné plyny, tritium a uhlík ^{14}C** . Veškeré plynné odpady jsou před vypuštěním do atmosféry zpracovány tak, aby se z nich odstranila většina radioaktivních látek. Plyny a vzduch z vnitřních prostor elektrárny procházejí ventilačními systémy se speciálními filtry. Obvykle se používají hrubé předfiltry, po nichž jsou zařazeny vysoce účinné HEPA (High-Efficiency Particulate Air Filter) filtry, schopné pohltit 99,9 % pevných částic. Radioaktivní plynný jod je zachycován na dřevouhelných filtrech. Protože vzácné plyny uvolňované v malém množství z palivových článků mají většinou krátký poločas rozpadu, stačí je po několik hodin až dní

zadržet. Součástí ventilačního systému jsou tedy i nádrže, kde se plynné odpady zadrží po dobu, než se radionuklidy rozpadnou na neaktivní prvky. Potom se v souladu s přísnými hygienickými limity vypouštějí do atmosféry. Provozní zkušenosti a přísná měření dokazují, že zatímco z komína jaderné elektrárny vycházejí jen zlomky povolených limitů, vypouští běžná klasická elektrárna na uhlí do ovzduší několiknásobně více radioaktivních látek.

PEVNÉ ODPADY

Při provozu jaderné elektrárny vznikají též různé suché pevné odpady obsahující radioaktivní materiály. Patří mezi ně různé kontaminované látky a předměty z provozních, revizních, ale nejčastěji údržbových a opravárenských činností. Jsou to papír, pryž, textil, dřevo, sklo, plasty, izolační materiály, náplně filtrů, drobný kovový odpad a také různé aktivované součástky a zařízení. Pevné radioaktivní odpady se obvykle člení do 4 kategorií: **spalitelné, nespalitelné, lisovatelné a nelisovatelné**.

Hlavním cílem zpracování pevných radioaktivních odpadů je rovněž snížení jejich objemu. Protože tyto odpady představují široké spektrum materiálů a forem, nestačí obvykle použít jedinou techniku k jejich zpracování, ale je třeba kombinovat různé procesy.

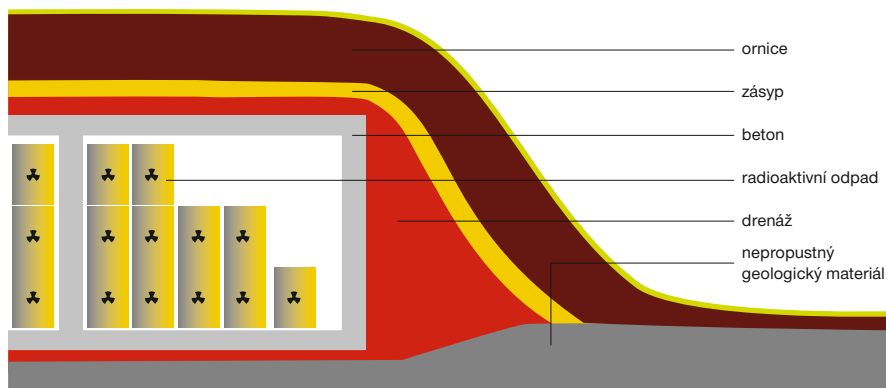
Nejpoužívanější technikou je nízkotlaké lisování, které dokáže zmenšit objem odpadů až 5krát. Vysokotlaké lisování docílí ještě podstatnějšího zmenšení objemu. Lisováním se sice snižuje objem odpadů, ale nemění se jejich vlastnosti z hlediska dlouhodobé manipulace a konečného ukládání.

Zkušenosti ukazují, že 50–80 % pevných radioaktivních odpadů lze považovat za spalitelné. Oproti lisování má spalování tu výhodu, že se kromě významného snížení objemu získá homogenní konečný produkt ve formě popela, který může být bez dalšího zpracování uložen do kontejnerů určených ke skladování a konečnému uložení. Spalováním lze odstranit i organické kapaliny, například oleje, mazadla nebo rozpouštědla, jejichž zpracování je obtížné. Vzniklé plyny je samozřejmě nutné jímát a naložit s nimi jako s plynnými radioaktivními odpady.

Některé organické odpady se dají likvidovat mikrobiologickým rozkladem. Taková jednotka je vybudována u jaderné elektrárny Loviisa ve Finsku.

DOČASNÉ SKLADOVÁNÍ A KONEČNÉ UKLÁDÁNÍ

Skladování nízkootlivních a středně aktivních odpadů je dnes běžnou záležitostí.



Řez povrchním úložištěm radioaktivních odpadů

Velká část radioaktivních odpadů vyprodukovaných v jaderném průmyslu a výzkumu zůstává skladována v místě svého vzniku nebo v zařízeních speciálně konstruovaných pro tyto účely. I když jsou tyto sklady pouze dočasné, mohou se využívat po dlouhou dobu (několik desítek let nebo i déle). Umístění radioaktivních odpadů v dočasném úložišti má několik výhod: stále klesá jejich radioaktivita, což usnadní budoucí manipulaci. V klidu se může hledat úložiště trvalé. Odpady jsou pod stálým dozorem a kontrolou. Během skladování je dostatek času na rozmyšlení, co s odpady podniknout dále, a objeví-li se modernější a výhodnější metoda jejich zpracování, snadno se vyzvednou. Pro dlouhodobé skladování jsou upravené a zabalené odpady podrobně popsány a evidovány, aby se v budoucnu usnadnilo jejich vyjmutí a konečné uložení. Skladovací systém vždy zahrnuje řadu preventivních kontrolních opatření k zabránění úniku radionuklidů a ke zjišťování případných úniků.

Hlavní rozdíl mezi konečným uložením a skladováním spočívá v tom, že v prvním případě se nepočítá s opětovným vyzvednutím odpadů, i když i to by bylo možné. Konečným cílem při uložení odpadů je zadržení radionuklidů po dobu, po kterou představují nepřijatelné riziko pro životní pro-

středí. U hlubinného geologického ukládání vysoce aktivních odpadů z jaderných elektráren se potřebná doba zadržení radionuklidů počítá na tisíce až statisíce let. U mělkého podpovrchového uložení se jedná řádově o stovky let (300–600 let) v závislosti na druhu obsažených radionuklidů. Protože tímto způsobem uložené odpady jsou snadno přístupné, je nezbytné chránit lokalitu před vstupem nepovolaných osob, a proto důležitou úlohu v celkovém bezpečnostním systému úložiště hrají ochranná opatření. Není třeba úplně zakázat vstup do lokality, ale vstup na ni musí být kontrolován. Až klesne aktivita na neškodnou úroveň, bude možné lokalitu uvolnit pro jiné účely.

Objekty označované ve světě jako sklady a mezisklady jsou určeny k přechodnému, tedy časově omezenému, využívání. Jsou zde soustředěny materiály před přepracováním, před konečným zpracováním atd. Tyto prostory mohou být umísťovány pod povrchem v neomezené hloubce či na povrchu.

Jako **povrchová úložiště** jsou označovány stavby budované na povrchu nebo mělce pod povrchem, každopádně stále v přímém dosahu biosféry. Slouží k trvalému uložení odpadů na dobu, o níž lze předpokládat, že lidé povedou evidenci o dané lokalitě



Silo na nízké a středně aktivní odpady z finské elektrárny Olkiluoto

a příčině jejího použití. Povrchová úložiště jsou dostupná a předpokládá se, že posléze bude území uvolněno k jinému využívání. Úložiště má několik bezpečnostních bariér a monitorovací systém.

Podpovrchová úložiště jsou objekty na hranici přímého dosahu biosféry. Patří sem naprostá většina opuštěných důlních prostor využívaných k ukládání radioaktivního odpadu a některé speciální účelové stavby budované podpovrchově.

Uměle vyhloubené, řídicí pečlivě upravené již existující podzemní prostory se označují jako **hlubinná úložiště**. Jsou umístěna do hlubokých stabilních geologických formací mimo dosah biosféry a jsou určena k dlouhodobému, resp. trvalému uložení nebezpečných látek. Uložení se předpokládá na dobu srovnatelnou s geologickými časovými měřítky, to je statisíce až miliony let.

LEGISLATIVA A BEZPEČNOST

Riziko spojené s radioaktivními odpady se často považuje za hlavní argument proti využívání jaderné energie. Technologie ukládání radioaktivních odpadů je však z bezpečnostního hlediska zcela vyřešena. Žádné jiné odpady na světě nejsou tak dobře evidovány, ošetřovány a zajišťovány, jako odpady



Ukládání sudů do jímky



Betonáž na úložišti v Dukovanech

radioaktivní. Pro zacházení s žádnými jinými látkami neexistuje tak propracovaná legislativa a systém kontrol.

Podobně jako je tomu u ostatních činností v jaderném průmyslu, je plánování, výstavba a provoz zařízení na zpracování a ukládání radioaktivních odpadů předmětem přísných národních předpisů, které vycházejí převážně z mezinárodních doporučení Mezinárodní agentury pro atomovou energii. V těchto předpisech jsou zakotveny:

- technické požadavky, které přispívají k bezpečnosti celého systému zadržení radioaktivních látek,
- opatření ke kontrole dodržování těchto požadavků,
- opatření k udržení účinnosti zadržovacího systému po velmi dlouhou dobu.

Technické požadavky zahrnují hlavně kritéria pro výběr lokality, fyzikální a chemickou formu odpadů, úpravu a balení odpadů, projekt zařízení a konstrukci pro zadržení radioaktivních látek, metody skladování a uložení odpadů, normy radiační ochrany a podmínky pro výstavbu, provoz a uzavření úložiště po zaplnění.

Mezinárodní agentura pro atomovou energii ve Vídni koordinuje výzkumné a vývojové práce na zneškodňování odpadů, poskytuje technickou a poradenskou pomoc

svým členským státům. Vydává legislativní doporučení a vysílá kontrolní skupiny svých nezávislých odborníků.

BEZPEČNOSTNÍ ANALÝZA

Každý projekt skladování a ukládání radioaktivních odpadů obsahuje řadu bezpečnostních analýz. Matematickým modelováním úložiště a jeho chování za všech, a to i vysoce nepravděpodobných situací se zkoumá možnost úniku radionuklidů do okolí. Výstupem těchto modelů je určení podmínek, jež musí forma odpadu i samo úložiště splňovat pro zajištění bezpečnosti systému. Takto určené limity jsou pouhými zlomky platných limitů hygienických (např. pro úložiště v Dukovanech jsou 500krát menší).

Důležitou součástí žádosti o povolení výstavby a provozu úložiště je bezpečnostní zpráva, která též hodnotí možnosti vlivu radioaktivních odpadů na člověka. Mnohaleté výzkumy a laboratorní zkoušky, jakož i studium příkladů z přírodního prostředí prokázalo, že proniknutí radioaktivních látek k člověku je velmi nepravděpodobné. Bezpečnostní dokumentace úložiště obsahuje rozbor i hypotetických případů, jako je velké zemetřesení spojené s dlouhotrvajícími srážkami a dokladuje, že ani v takovém

extrémním případě nedojde k ohrožení okolí radioaktivními látkami.

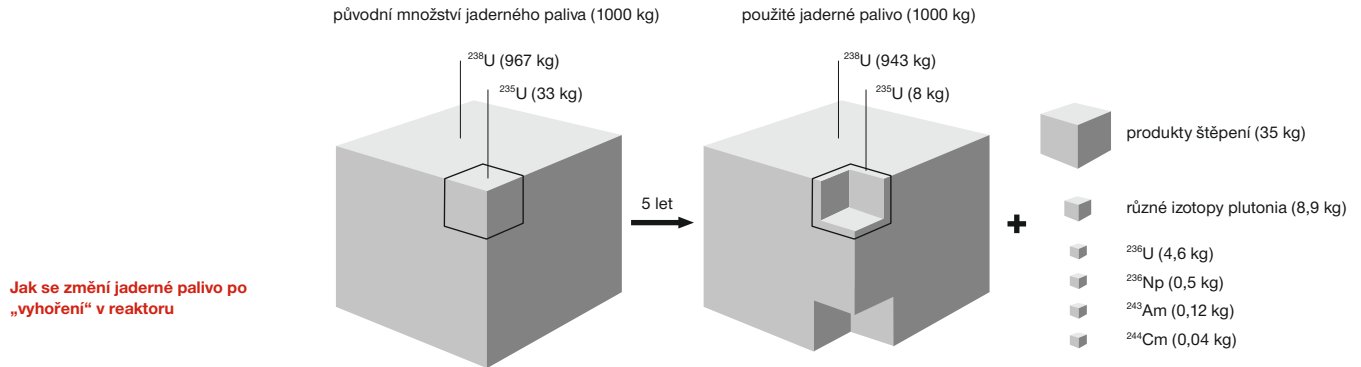
NÍZKOAKTIVNÍ A STŘEDNĚ AKTIVNÍ ODPADY V ČESKÝCH JADERNÝCH ELEKTRÁRNÁCH

Jaderné elektrárny Dukovany a Temelín produkují ročně asi 300 m³ nízkooaktivních a středně aktivních odpadů, které se ukládají přímo v areálu jaderné elektrárny.

Je pro ně určeno povrchové úložiště v Dukovanech. Pojme 55 000 m³ odpadu. Tvoří je 112 železobetonových jímek o rozměrech 17,3 × 5,3 × 5,4 m, které jsou „zabaleny“ do více než čtvrtmetrové vrstvy speciální vodoizolační hmoty označené asfaltopropylénový mikrobeton. Jímky jsou z povrchu kryty železobetonovými panely. Součástí úložiště je i speciální drenážní síť soustředěná do kontrolních bodů vnitřní monitorovací sítě. Ukládají se sem zpracované, zpevněné odpady v obalech.

Při ukládání bude zavážena jímka odkryta a otevřený prostor bude překryt pohyblivou manipulační střechou, která má chránit pracovní prostor před klimatickými změnami. Po ukončení provozu budou zaplněné jímky překryty izolační vrstvou a přehrnuty cca 4 m hlíny.





SUROVINA NEBO ODPAD

V palivu jaderných elektráren vzniká štěpnou reakcí řada prvků, dá se říci, že téměř celá Mendělejevova tabulka. Použité palivo bývá považováno za odpad, ale již dnes je jasné, že tento odpad se brzy může stát cenným zdrojem surovin nebo palivem pro jiný typ elektrárny. Část použitého paliva lze totiž přepracovat zpět na klasické jaderné palivo. Vysokoaktivní odpady, které zbudou po přepracování použitého jaderného paliva, nebo samotné použité palivo, které se (zatím) nebude nijak zpracovávat, se uloží hluboko pod zem. Je to nejbezpečnější způsob, jak s ním naložit. Ve světě se hlubinná úložiště již budují a existují projekty na nové zajímavé metody ukládání. Úniku radioaktivních látek do biosféry brání několikanásobné důmyslné bariéry. Sama příroda nám však podává důkaz, že zcela postačuje ta nejpřirozenější z nich – hornina.

POUŽITÉ PALIVO

CO OBSAHUJE POUŽITÉ JADERNÉ PALIVO

Použité palivo z jaderných reaktorů tvoří méně než 1 % objemu všech jaderných odpadů na světě, avšak obsahuje přes 90 % veškeré radioaktivity. Jeden reaktor s výkonem kolem 1000 MW produkuje ročně kolem 30 tun použitého paliva. Protože palivo má vysokou hustotu, představuje to objem jen asi 1,5 m³. Palivo vyjmuté z reaktoru obsahuje stále ještě 95 % nespotřebovaného uranu, z toho 1 % štěpitelného ^{235}U a 1 % štěpitelného izotopu plutonia ^{239}Pu . Ostatní štěpné produkty, které dnes považujeme za odpad, tedy představují jen asi 1200 kg. Hlavní podíl radioaktivity nesou mezi těmito štěpnými produkty cesium ^{137}Cs a stroncium

^{90}Sr , oba s poločasem rozpadu kolem 30 let. V důsledku radioaktivního rozpadu použité palivo postupně ztrácí radioaktivitu a četné radioizotopy přecházejí na neaktivní prvky, jejichž oddělení z odpadu by v budoucnu mohlo být zajímavé. Je to např. platina, ruthenium, rhodium, paladium, stříbro, prvky vzácných zemin atd.

JAK SE S NÍM ZACHÁZÍ

Palivové články pro tlakovodní reaktory jsou pokryty obalem z vysoce odolné slitiny zirkonia, která je mnohem odolnější než například nerezavějící ocel.

Palivové články v reaktoru musely vydržet teploty kolem 300 °C a tlak přes 12 MPa, snadno tedy odolají mnohem mírnějším podmínkám při skladování a další manipulaci. Použité články se z reaktoru vyjmou

a pod hladinou vody kanálem převezou do bazénu použitého paliva, který je v reaktorové hale vedle reaktoru. Tam jsou pod vodou uloženy asi 5 až 10 let. Voda je neustále chladí, protože radioaktivním rozpadem se v nich stále vyvíjí teplo. Jejich radioaktivita klesne mezitím asi na 50 % původní hodnoty. Použité články se pak vloží do speciálních kontejnerů a odvezou do meziskladu použitého paliva. Zde se skladují řádově několik desítek let.

CO S POUŽITÝM PALIVEM

Zatím jedinou možností, jak odstranit dlouhodobé radionuklidy, je počkat, až se rozpadnou na neradioaktivní nuklidy. Toto čekání bude trvat statisíce let a po celou tuto dobu musíme zajistit, aby se nemohly dostat do biosféry. Metody, kterými toho lze

Palivový cyklus v České republice

Těžba	Výroba	Použití	Skladování	Uložení
žlutý koláč	palivové tablety, články	po použití je palivo radioaktivní	chlazení	geologické formace
DIAMO	Rusko, USA	Energetická společnost ČEZ	ČEZ	SÚRAO

Koncová část palivového cyklu

Doba setrvání použitého paliva	Místo	Zodpovědnost	Dozor
5– 13 let	bazén paliva EDU, ETE	Energetická společnost ČEZ	Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB)
60– 100 let	sklady EDU, sklad ETE záložní sklad		
trvale	hlubinné úložiště	SÚRAO	

dosáhnout, byly náročným výzkumem objeveny, jsou známé a proveditelné. Požadavku na oddělení radioaktivních odpadů od biosféry nejlépe vyhovuje jejich znehybnění v různých druzích skla, keramických materiálů nebo bitumenu a jejich trvalé uložení ve speciálním hlubinném úložišti s řadou ochranných bariér. Druhou možností, jak s odpady naložit, je jejich přepracování.

MEZISKLADY

Skladování použitého paliva v meziskladech je z mnoha hledisek výhodné. Jeho aktivita a teplota klesne, což zjednoduší a zlevní další manipulaci.

V meziskladu se palivo postupně hromadí a do hlubinného úložiště se pak uloží najednou, což je levnější, než dlouholeté udržování provozu hlubinného úložiště a jeho zaplňování po etapách. V meziskladu se počítá se zdržením použitého paliva asi na 40 až 50 let. Mezisklady se většinou budují přímo v areálu elektrárny, kde existují potřebné inženýrské sítě a kde je dobře prozkoumáno geologické podloží. Mohou však stejně dobře stát i jinde jako jiná běžná průmyslová stavba. Existují dva základní

typy meziskladů, a to suché a mokré, podle toho, jsou-li kontejnery s použitým palivem chlazený vzduchem nebo vodou.

Mokrý způsob skladování je dnes ve světě nejrozšířenější. Použité palivo se skladuje ve vodních bazénech buď přímo u reaktoru, nebo mimo něj. Voda zajišťuje spolehlivý odvod tepla, zajišťuje i ochranu před zářením. Snadná je i vizuální kontrola použitého paliva. Nevýhodou je nutnost stálého chlazení a čištění vody, přičemž vznikají kapalné radioaktivní odpady. Provozní náklady jsou vyšší než u suché metody skladování. Přímou u reaktorů je to častý způsob, mimo reaktor existují mokré sklady ve Švédsku (CLAB), ve Francii v přepracovacím závodě La Hague a ve Velké Británii v přepracovacím závodě v Sellafieldu.

Tzv. suchému skladování se dává přednost při delších intervalech skladování. Bývá řešeno dvojím způsobem: palivo je umístěno do betonových staveb (sklípků), nebo do betonových či kovových kontejnerů. Příkladem prvního přístupu jsou modulové boxy – použité palivo je umístěno v trubkách naplněných inertním plynem. Trubky jsou vertikálně umístěny v hnízdech v betonové stavbě s cirkulujícím vzduchem.

Takové řešení je použito v USA u reaktoru Fort Saint Vrain nebo v Anglii na elektrárně Wylfa.

Další možností jsou betonová síla – použité palivo je v zapouzdřených ocelových koších uloženo do betonových nádob. Chladicí vzduch proudí ve speciálních kanálech. Tento systém je v USA na elektrárně Oconee nebo v Kanadě na elektrárně Gentilly.

Kontejnery mohou plnit tři účely: slouží pro dopravu, pro skladování nebo pro trvalé uložení. Existují i takové, které plní více účelů najednou. Ve skladu stojí kontejnery na betonové podložce a kolem nich proudí přirozeným tahem vzduch, který je ochlazuje. Jsou buď umístěny v budově podobné lehké průmyslové hale, nebo dokonce jen na volném prostranství. Příkladem tohoto řešení může být sklad v Ahausu v Německu nebo v elektrárně Surry v USA. Takovýto typ meziskladu je i v Dukovanech a Temelíně.

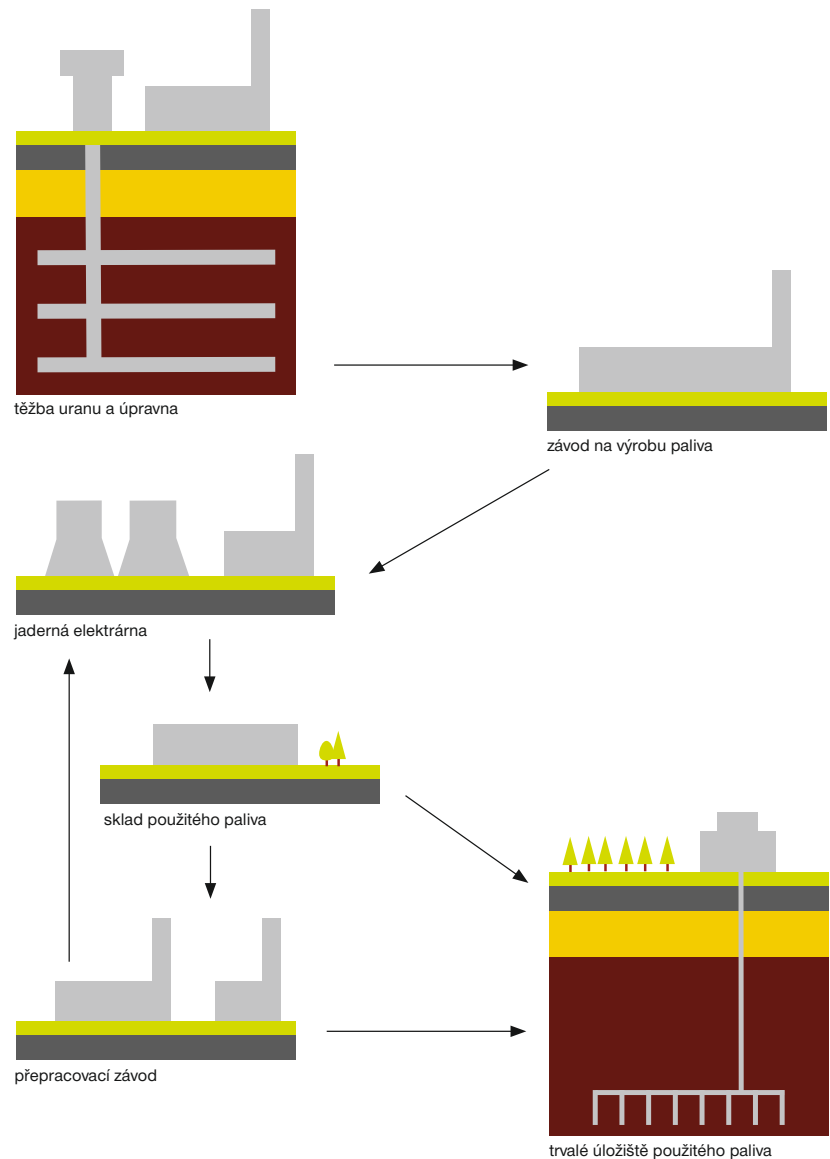
Suché skladování má tyto výhody: nižší provozní náklady, žádné nebo malé množství korozních produktů, snadná manipulace a možnost rozšíření skladu. Do suchých skladů se dává palivo teprve po několika letech odpočinku a chlazení v bazénu použitého paliva.

Jaderný odpad z Jaderné elektrárny Dukovany byl původně převážěn do skladu v areálu Jaderné elektrárny Jaslovské Bohunice na Slovensku, odkud měl být postupně odebírán na základě mezistátní smlouvy se Sovětským svazem a odvezen na území tehdejšího SSSR. Ruská federace jako nástupnický stát po rozpadu Sovětského svazu od těchto závazků ustoupila. Po rozdělení Československa byl jaderný odpad ze zahraničí postupně převezen do vlastního skladu v areálu Jaderné elektrárny Dukovany.

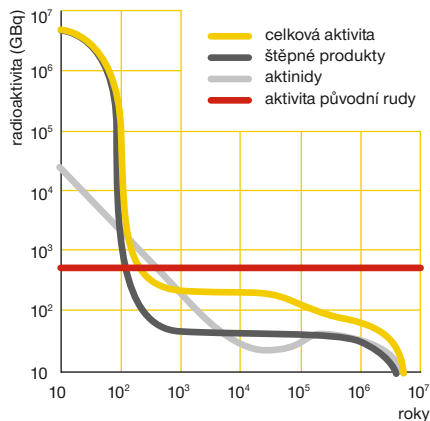
DOČASNÉ SKLADOVÁNÍ, A CO DÁL?

Skládování použitých článků po dobu mnoha let provozu elektrárny není technickým problémem. Technologie skladování v bazénech naplněných vodou je používána po desetiletí.

V posledních letech došlo téměř na všech jaderných elektrárnách k rozšíření skladovacích kapacit tím, že se palivové články začaly ukládat do skladovacích bazénů hustěji. Suché skladování ve stíněných kontejnerech se rovněž používá v řadě zemí. Skladování



Palivový cyklus jaderných elektráren včetně recyklace použitého paliva



Aktivita odpadů z 1 tuny vyhořelého paliva a aktivita odpovídajícího množství uranové rudy

paliva v jaderné elektrárně kteroukoliv z těchto metod nevede k žádnému ohrožení pracovníků či obyvatelstva. Skladování použitého paliva v ocelových kontejnerech lze přirovnat např. k umístění velmi silných zařízení používaných v průmyslu nebo v medicíně v masivních stínících zařízeních. Ani ty samozřejmě nijak své okolí neohrožují.

Dál máme nejméně dvě možnosti: použité palivo přepracovat na nové, nebo ho odvézt do trvalého hlubinného úložiště. Oba způsoby jsou ve světě technicky zvládnuty a záleží na ekonomických rozborech příslušné země, který způsob zvolí. USA, Švédsko a Španělsko zatím volí uložení, Francie, Velká Británie a Japonsko se daly cestou přepracování.

Z ekonomických důvodů většina zemí dává přednost trvalému uložení, i když existují opatření, aby i pak mohlo být palivo vyzvednuto.

Ve výzkumu jsou další zajímavé metody zpracování použitého paliva a likvidace jaderných odpadů. V České republice jsou sklady použitého paliva s kapacitou 600 a 1 340 tun v areálu Jaderné elektrárny Dukovany a staví se sklad pro použité palivo z Temelína.

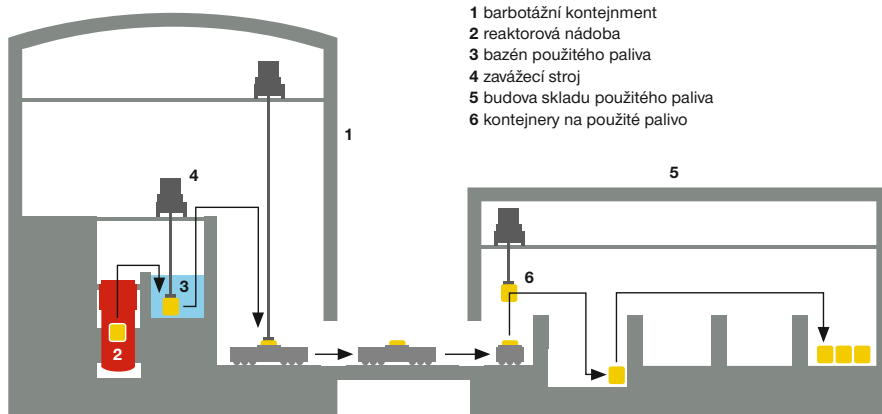


Schéma zacházení s použitým jaderným palivem v Jaderné elektrárně Dukovany

PŘEPRACOVÁNÍ

Některé země s rozsáhlejším jaderným programem se rozhodly pro přepracování použitého paliva. Přepracování použitého paliva na nové ušetří až 30 % čerstvého paliva. Přepracování závody jsou ve Francii, Spojeném království, Rusku, Japonsku a Indii, jejich roční kapacita umožňuje zpracovat 4 000 t běžného použitého paliva. Dosud bylo přepracováno 90 000 t (z celkově vyprodukovaných 290 000 t) použitého paliva z komerčních reaktorů. Francouzi vypočítali, že recyklace 10 až 11 tun plutonia z použitých palivových článků za rok se rovná 11 milionům tun ropného ekvivalentu. Zákazník, který si nechá použité palivo přepracovat, dostane zpět materiál na nové palivo, ale musí si vzít také vysokoaktivní zbytky, které po přepracování zůstanou, a postarat se o ně.

Přírodní uran obsahuje 0,7 % štěpitelného izotopu ^{235}U , zatímco téměř veškerý zbytek představuje izotop ^{238}U . Tento izotop se v reaktoru částečně přeměňuje na plutonium ^{239}Pu , které je také štěpitelné. V palivových článcích pro nejběžněji používané tlakovodní reaktory může být část ^{235}U nahrazena

plutoniem. Je tedy možné použité palivo, které obsahuje plutonium, přepracovat a vyrobit z něj nové palivo. Jedna tuna přepracovaného jaderného paliva uspoří dvě tuny přírodního uranu.

Přepracování představuje poměrně složitý a velmi nákladný chemický proces. Jeho princip je znám již od čtyřicátých let a stále se zdokonaluje. Z palivových kazet se odstraní ochranný zirkoniový obal a palivové články se naštipají na kratší kusy. Vše se děje dálkově řízenými manipulátory a roboty. Použité palivo se rozpouští v kyselině dusičné a z roztoku se chemicky oddělují jednotlivé složky. Plutonium se opět použije jako palivo pro rychlé nebo lehkovodní i těžkovodní reaktory.

Uran se uskladní, nebo použije pro výrobu nového paliva. Zbytky kovového pokrytí palivových článků se zpracují jako středně aktivní odpad. Štěpné produkty se oddělí a vitrifikují (zesklovatí). Z jedné tuny použitého paliva tak vznikne pouze 115 litrů vysokoaktivního odpadu převedeného do formy skla.

Přepracování si dovolují jen ekonomicky velmi silné země. Takto získané palivo je



Přepřacovatelský závod THORP



Mokrý sklad použitého paliva



Kontejnery v prvním ze skladů použitého paliva v Jaderné elektrárně Dukovany (suchý sklad)

vždy dražší, než přírodní uran. Nepřichází-me však o důležitou energetickou surovinu. Důraz se klade spíše na likvidaci zbytků po přepřacování jako odpadů.

KONEČNÁ LIKVIDACE

Po dočasném skladování v jaderných elektrárnách přijde na řadu konečná likvidace odpadů.

Třebaže se někdy objevuje názor, že problém likvidace vysokoaktivních odpadů není ještě vyřešen, není tomu tak. Odpadu, o který jde, dosud není mnoho, protože jaderné elektrárny nespoteblovávají mnoho paliva. Např. množství použitého paliva, které vyprodukovala Jaderná elektrárna Dukovany za 20 let svého provozu, by se vešlo do krychle o hraně 4 m. Významnou ekologickou výhodou jaderné energetiky je způsob zacházení s odpady: nešíří se volně do životního prostředí, ale radioaktivní odpad je po dlouhá období uchován uvnitř palivových článků, ve kterých vznikl. Protože je použitého paliva málo a může se skladovat velmi dlouho, není zatím důvod spěchat s rozhodnutím o jeho konečné likvidaci.

Na způsoby likvidace vysokoaktivních odpadů, ať již ve formě zesklenných zbytků po přepřacování, nebo přímo samotného použitého paliva, panuje mezi odborníky shoda. Budou se ukládat do kontejnerů odolných proti korozi a s nimi do umělých dutin 300 až 1000 m pod zem v hlubokých geologických formacích. Navrženy jsou již i speciální metody převedení odpadu na neaktivní materiál pomocí urychlovačů.

VITRIFIKACE

Vysokoaktivní kapalné odpady se upravují převedením na stabilní materiál – sklo. Po odstranění vody z odpadu se přidají sklotvorné přísady a běžnou sklářskou technikou se při asi 1200 °C vytváří křemičitanové nebo borokřemičitanové sklo. Zkoušejí se i fosfátosilikáty. Zesklenné odpady mají vysokou odolnost vůči vyluhování vodou, dobrou tepelnou vodivost a mechanickou pevnost. Pro ještě lepší tepelnou vodivost se zkoušejí kapky skla obalovat kovem – roztaveným olovem nebo hliníkem.

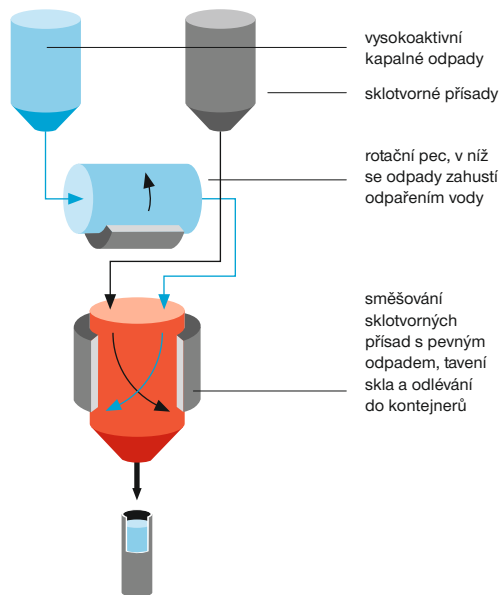
V roce 1978 byl uveden do provozu první průmyslový závod na vitrifikaci odpadů v Marcoule ve Francii, v roce 1987 v Čelja-

binsku v Sovětském svazu, v roce 1989 druhý závod ve Francii v Cap de La Hague a v roce 1990 ve Windscale ve Velké Británii. Tyto závody dokážou zpracovat všechny odpady, které při přepřacování paliva vznikají.

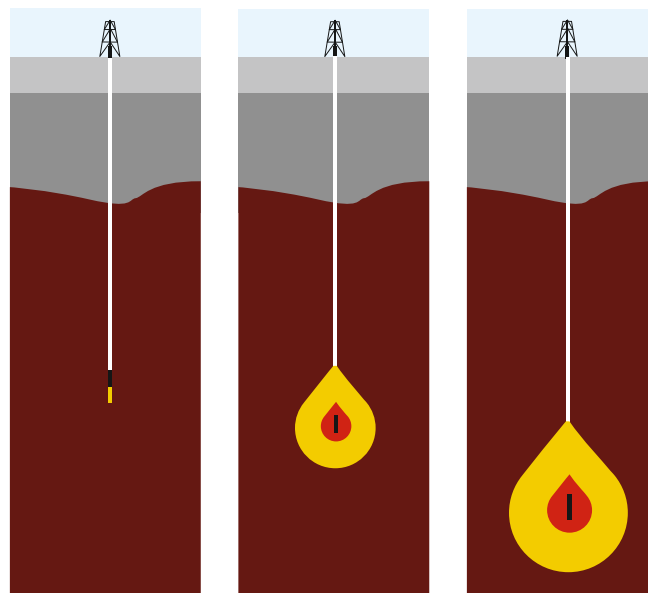
Od října 1985 do září 1991 byl v provozu vitrificační provoz v Mol v Belgii. Další země mají projekty na vlastní vitrificační závody. Čína chce převzít belgickou technologii, Japonsko zkouší zařízení s americkou a francouzskou technologií. V roce 2007 přepřacovalo 210 tun použitého paliva. Spouští nový závod v Rokkasho-mura, který bude přepřacovávat použité uranové palivo na tzv. MOX (Mixed Oxide Fuel). USA má tři vitrificační projekty v různých stádiích vývoje, z toho dva jsou určeny pro likvidaci zbrojních pracovišť. Proces vitrifikace radioaktivních odpadů byl zvládnut i v Ústavu jaderného výzkumu v Řeži.

PROJEKT ADTT

Pod touto zkratkou se skrývá nejmodernější koncepce zneškodňování vysokoaktivních odpadů. V překladu zkratka znamená přeměnu odpadu pomocí urychlovače (Accelerator driven transmutation



Vitrifikace vysokoaktivních odpadů



Zneškodnění jaderných odpadů v hlubinném vrtu v síře

technology). Působením neutronů z urychlovače se vysoce radioaktivní prvky s dlouhým poločasem rozpadu mohou přeměňovat na krátkodobé nebo dokonce na neradioaktivní.

Metodu vyvinuli vědci z výzkumné laboratoře Los Alamos v USA jako vedlejší využití silných urychlovačů určených původně pro hvězdné války. Velký lineární urychlovač protonů z terčíku z vhodného materiálu (roztavené olovo) vyrazí neutrony, kterými se ostřeluje radioaktivní odpad. Ten je ve formě taveniny s fluoridem LiBeF_2 nebo v roztoku s těžkou vodou. Přitom vzniknou buď látky s krátkým poločasem rozpadu, které stačí uložit jako odpad jen na 10 až 50 let, což je podstatně méně problematické, než na desetitisíce let, nebo dokonce i látky neradioaktivní.

Při transmutaci radioaktivních prvků se vyvíjí velké teplo, takže takovéto zařízení by se dalo využít i pro výrobu elektrické energie. Kdyby se urychlovač instaloval do areálu

jaderné elektrárny, mohl by po skončení její životnosti likvidovat použité jaderné palivo a dál vyrábět elektřinu na stávajícím elektrárenském zařízení. Využilo by se tak nejen to, co dnes nazýváme odpadem, ale i všechna ostatní zařízení elektrárny včetně turbín, chladicích věží atd. Nová elektrárna ani nevyžaduje taková bezpečnostní opatření jako klasická jaderná elektrárna, neboť teplo nevzniká řetězovou štěpnou reakcí.

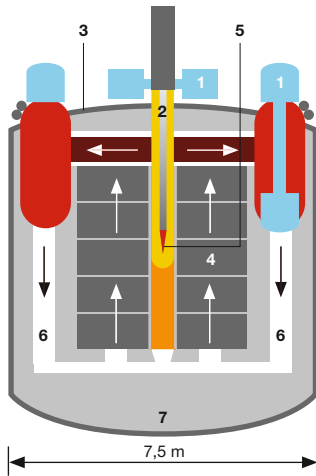
V tomto typu elektrárny lze stejným způsobem jako použité palivo „spalovat“ také thorium. Thorium je čtyřicátý nejčastější prvek v zemské kůře. Přitom ze 12 gramů thoria lze uvolnit tolik energie jako spálením 30 tun uhlí. Bude-li tento reaktor schopen přeměnit 99 % svých zplodin, získáme téměř neomezený zdroj energie, takřka bez odpadu.

Potřebné silné urychlovače jsou velmi nákladná zařízení a potrvá jistě řadu let, než budeme moci tuto převratnou technologii uvést do provozu. Je však ukázkou toho, že problémy, které se nám dnes zdají obtížné,

mohou být zítra díky novým vědeckým objevům elegantně vyřešeny.

UKLÁDÁNÍ DO SÍRY

Vedle dnes už „klasických“ projektů na ukládání použitého paliva a vysokoaktivních odpadů vznikl v roce 1990 v Rusku zajímavý projekt ukládání odpadu do hlubokých, až pětikilometrových vrtů, vyplněných nízkotavitelným a ve vodě nerozpustným materiálem, nejlépe sírou. Odpad v hermetických pouzdech se spustí do vrtu, kde teplem, které vyvíjí, roztaví síru. Teplota tavení síry je 113°C a její tepelná vodivost je asi desetkrát nižší než tepelná vodivost hornin. Jaderný odpad zvýší teplotu dna vrtu asi na 500°C . V důsledku tepelné roztažnosti hornin a chemického působení síry se průměr vrtného otvoru dole zvětší, celý sloupec nahromaděného odpadu se začne posouvat dolů. Vznikne „kapka“ o teplotě až 1800°C , síra vytvoří s oxidy železa z okolních hornin pyrit. Odpad pomalu



Reaktor pro transmutaci radioaktivního odpadu (typický výkon 500 MW)

- 1 čerpadla a tepelné výměníky jsou blízko blanketu ve stejné reaktorové nádobě a předávají tepelnou energii paliva do dalšího chladicího okruhu
- 2 svazek protonů – svazek je směřován na centrální terčik
- 3 reaktorová nádoba – zcela uzavírá aktivní zónu a zamezuje úniku paliva při prasknutí potrubí
- 4 blanket (aktivní zóna) – grafitové bloky s kanálky pro průchod roztavených solí
- 5 terčik z roztaveného olova, v němž vznikají neutrony
- 6 tekuté palivo – roztavené soli, obsahující palivo, cirkulují grafitovým moderátorem
- 7 reflektor – grafit



Přeprava vyhořelého jaderného paliva

klesá do hlubin a jeho postup se zpomaluje podle toho, jak se odpad rozpadá a ztrácí radioaktivitu. Samovolný pokles může postupovat až do 10 km. Jeden vrstev lze využít pro takovéto ukládání až třikrát. Nerozpustný pyrit tvoří matici, která zabrání úniku radionuklidů nejméně po tři miliony let. Bezpečnost metody zaručuje též velká hloubka, které lze dosáhnout vrtem ve srovnání s klasickými důlními metodami. Tento způsob likvidace odpadu je blízký přírodnímu procesu, který se odehrával při vzniku naší Země.

PŘEPRAVA

Ročně se na celém světě přepravuje na 10 milionů zásilek s radioaktivním obsahem, z toho je 10 % dopravováno přes hranice států. Mezi všemi přepravami nebezpečného materiálu činí 10 milionů zásilek pouhých 3 procenta, přeprava radioaktivních materiálů spojených s jadernou energetikou pouhou čtvrtinu procenta a přeprava vysokoaktivního použitého paliva pouze tři tisíce procenta. Přeprava se řídí přísnými národními a mezinárodními předpisy, které

zaručují její vysokou bezpečnost a přijatelnost z hlediska životního prostředí. V předpisech se požaduje, aby radioaktivní látky byly chráněny takovým způsobem, který vyloučí ohrožení osob nebo životního prostředí i při těžkých dopravních haváriích.

Národní a mezinárodní předpisy vycházejí z doporučení Mezinárodní agentury pro atomovou energii ve Vídni (MAAE) a Mezinárodní komise pro radiační ochranu (ICRP). První vydání těchto doporučení je z roku 1961, poslední rozsáhlejší aktualizace byla provedena v roce 1990. Doporučení MAAE se týkají zejména způsobu, jakým musejí být jednotlivé radioaktivní látky pro bezpečnou přepravu zabaleny a také dopravních cest – železniční, silniční, vodní a letecké dopravy. Hmotnost zásilek se pohybuje od 100 g až po 120 tun a velikost od krabičky od zápalek až po obaly o délce 12 m. Například nízkoaktivní uranový koncentrát se přepravuje ve dvousetlitrových sudech. Převážní kontejnery pro čerstvé jaderné palivo mají hrubou hmotnost až 15 t, kontejnery pro přepravu použitého paliva 80 až 120 t, protože mají tlusté stěny pro odstínění radioaktivity. Doposud nebyl

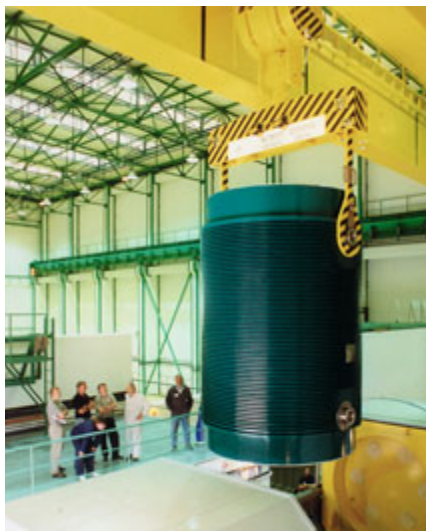
zaznamenán jediný případ úniku radioaktivity při transportu použitého paliva nebo radioaktivních odpadů.

Jen v Evropě se již takových přeprav uskutečnilo více než 7 800 a v USA více než 2 500.

KONTEJNERY

Různé druhy sudů, obalů a kontejnerů mají především funkci izolační, musí bránit úniku radioaktivních látek do životního prostředí a naopak chránit obsah před destruktivními zásahy zvenčí. Kromě toho pak musí umožňovat snadnou manipulaci. Kontejnery na přepravu a skladování použitého paliva jsou z tlustostěnné oceli. Mohou vážit od 20 do 100 tun, podle toho, jsou-li určeny k přepravě po silnici, železnici, nebo lodí. Pro ukládání se vyrábějí z uhlíkaté nebo nerezavějící oceli, z mědi nebo z kombinace mědi a oceli. Navrženy jsou i titanové konstrukce. Podle projektových výpočtů budou takovéto kontejnery hermetické po statisíce let. Zvnějšku mívají kontejnery žebra pro lepší odvod tepla.

V Německu vypracovali v roce 1990 projekt kontejnerového systému POLLUX.

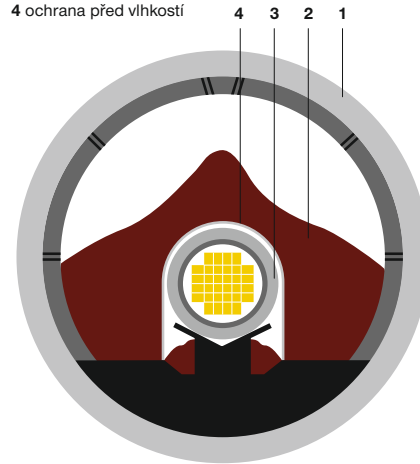


Manipulace s kontejnerem CASTOR



Řez kontejnerem na použité palivo

- 1 skladovací chodba
- 2 zásyp
- 3 keramický povlak
- 4 ochrana před vlhkostí



Uložení kontejneru ve skladovacím tunelu

Kontejnery jsou dvouplášťové, vnitřní vrstva z oceli je hermetická. Jsou vhodné na všechny typy odpadů i všechny typy úložišť. V České republice se používají masivní ocelové kontejnery typu CASTOR.

ZKOUŠENÍ KONTEJNERŮ

Kontejnery na použité palivo jsou konstruovány tak, aby vydržely i náraz lokomotivy nebo pád dopravního letadla. Bezpečnosti kontejnerů pro přepravu a skladování použitého paliva se věnuje velká pozornost. Svědčí o tom řada požadovaných mechanických, tepelných a vodotěsných zkoušek, které musí kontejnery absolvovat, aniž by se porušila jejich těsnost. Jedná se hlavně o tyto zkoušky:

- volný pád z výšky 1 m na ocelový trn o výšce 15 cm a minimální délce 29 cm,
- volný pád z výšky 10 m na betonovou plochu,
- tepelná zkouška, při níž je kontejner vystaven žáru kolem 800 °C po dobu 30 minut,
- vodotěsnost, která se zkouší ponořením kontejneru 15 m pod vodní hladinu na dobu 8 hodin.

I sudy pro přepravu a ukládání nízkoaktivních a středně aktivních odpadů se přísně zkoušejí, i když aktivita v nich uchovávaná je nesrovnatelně nižší oproti použitému palivu.

BARIÉRY

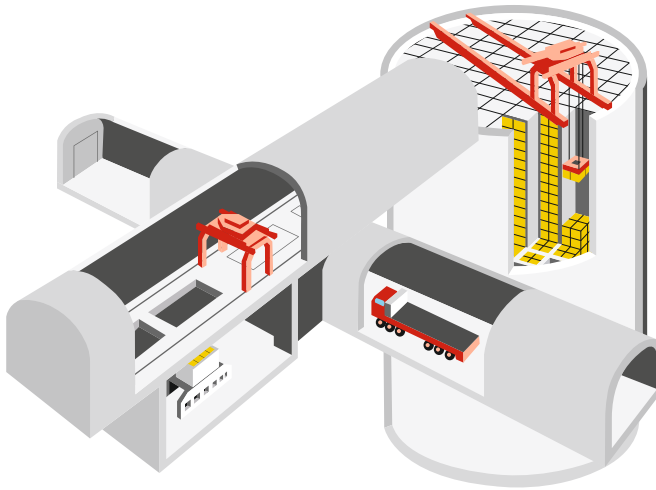
Nejdůležitějším úkolem při trvalém uložení radioaktivních odpadů pod zem je zabránit proniknutí radionuklidů do okolí člověka. Tomuto proniknutí brání několik bariér – bariéry umělé, vytvořené člověkem a bariéry přírodní.

První bariérou je znehybnění a zadržení radionuklidů v odolné a nerozpustné chemické formě, v tzv. matici. Ke znehybnění vysokoaktivních odpadů se obvykle používá borosilikátové sklo nebo keramické materiály, u středně aktivních odpadů hlavně cement nebo bitumen (asfaltová živice). U radioaktivních materiálů o nízké aktivitě obvykle není třeba žádná fixační matrice. Sklo nebo keramika jsou vysoce odolné materiály, takřka nepodléhají působení kyselin nebo jiných agresivních látek,

radionuklidy se z nich nevyluhují vodou ani při velmi dlouhém působení. Vypracovány a vyzkoušeny jsou i metody tzv. synroc (synthetical rocks), což je zabudování odpadů do velmi trvanlivé krystalické titanátové keramiky s mezikrystalickou skelnou fází.

Další bariéru tvoří obal. Obal izoluje zpevněné odpady po určitou dobu. Například v USA se požaduje, aby u vysokoaktivních odpadů obal izoloval odpady po dobu minimálně 1000 let. U nízkoaktivních a středně aktivních odpadů bývá tato doba desítky až stovky let. Obaly současně slouží jako stínění, zamezují kontaminaci a usnadňují manipulaci při dopravě a ukládání. Obaly pro vysokoaktivní odpady jsou vyrobeny z kovu. Bývá to ocelový, tlustostěnný nerezavějící kontejner nebo měděná nádoba, uvažuje se i o nádobách z titanu. U nízkoaktivních a středně aktivních odpadů se používají plechové sudy, případně ocelové nebo betonové kontejnery.

Další technickou bariéru mohou tvořit betonové pakety nebo přebaly, do nichž



Skládování radioaktivních odpadů

se ukládají plechové sudy nebo betonové kontejnery.

Jako další technická bariéra slouží stavební konstrukce úložných prostorů na povrchu, těsně pod povrchem nebo v geologických formacích. Jde například o speciální betony, nepropustné nátěry, asfaltové nebo jílové izolace a drenážní systémy, jejichž účelem je zamezit úniku potenciálně uvolněných radionuklidů z odpadů (pokud by unikly ze svých obalů) do biosféry a také zabránit vniknutí vody do úložiště.

Přírodní bariérou je vlastní geologická formace, v níž je úložiště vybudováno. Čím lepší jsou vlastnosti této bariéry (tj. pevnost, vodonepropustnost, tepelná stabilita), tím jednodušší a lacinější mohou být technické bariéry. Geologická formace musí být v oblasti bez zemětřesení, většinou se vybírá hornina, která se prokazatelně nezměnila za posledních i několik milionů let a je tedy u ní předpoklad, že zůstane stabilní i nadále. Jako vhodné geologické formace se nejčastěji volí tyto základní horninové typy: solná ložiska, jílo-

vité sedimenty, tufy, granity (žuly) a rulové horniny.

Pro vyhodnocení způsobu uložení odpadů je rozhodující hledisko bezpečnosti tj. zhodnocení vlivu potenciálního úniku radionuklidů z úložiště do okolí. Při dané technologii zpracování jsou tedy rozhodující izolační vlastnosti úložiště a jeho okolí. Proto již při výběru lokality úložiště se největší důraz klade na co nejkvalitnější geologické podloží a hydrogeologické charakteristiky místa. Jediné možné ohrožení představuje destrukce úložiště a jeho současné zatopení vodou. Tato havárie je pouze hypotetická, přesto bezpečnostní dokumentace úložiště obsahuje i její rozbor a vyhodnocení, kterým je doloženo, že ani v tomto případě k ohrožení okolí radioaktivními látkami nedojde.

Při hlubinném uložení odpadů slouží hornina jako ochrana před takovými jevy, jako jsou záměrné sabotážní akce lidí, požáry, havárie letadel, záplavy a větrné smrště. Hornina slouží i jako stínění a odvádí rozpadové teplo. Obsah radioaktivity se ve

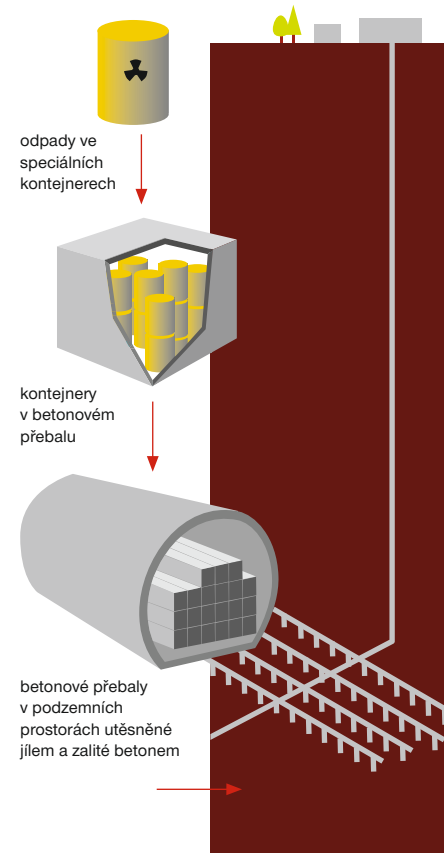


Schéma ukládání opadu do hlubinného úložiště – bezpečnostní bariéry

vzduchu v úložišti a podzemních vodách v okolí kontroluje každý měsíc. Laboratorně se též zkoušejí vzorky půdy a další vzorky ze životního prostředí. Pomocí hydrogeologických vrtů se kontrolují spodní vody při provozu úložiště i po jeho ukončení.

HLUBINNÁ ÚLOŽIŠTĚ

Jako hlubinná úložiště se označují účelově zbudované anebo zrenovované podzemní struktury umístěné do hlubokých geologických formací mimo přímý dosah biosféry.



Razicí štít pro připravované konečné úložiště vyhořelého paliva v nevadském pohoří Yucca Mountains v USA. Úložiště je umístěné stovky metrů pod povrchem, pojme na ploše 1 400 akrů celkem 77 tisíc tun radioaktivního odpadu. (Kontejnery uložené ve vyrubaných tunelech budou 50 let monitorovány na těsnost a poté budou původním vytěženým vulkanickým popelem a prachem, který byl dočasně uložen na povrchu, zasypany.)



Ústí hlubinného úložiště v Yucca Mountains v USA

Jsou určeny k trvalému uložení dlouhodobě, resp. prakticky trvale nebezpečných látek. Jednoznačná přednost před úpravou starších důlních děl se dává zbudování úložiště nového, speciálního, neboť doly bývají v místech geologických poruch, puklin, žil a tudíž nejsou dostatečně těsné proti spodní vodě a jiným vlivům. Při jejich provozu též docházelo k rozrušování okolní horniny např. trhacími pracemi. Úložiště musí být zbudováno v neporušeném nebo minimálně porušeném geologickém prostředí, v oblasti, kde nehrozí vulkanická činnost, zemětřesení, zaplavení mořem nebo zalednění. Termínem dlouhodobě je označováno období srovnatelné s geologickými časovými měřítky, tedy časové úseky delší než 10 000 let, ale spíše 40 000 až 100 000 let. Nedá se předpokládat, že by bylo možné uchovat po tak dlouhou dobu informaci o důvodu blokování nějaké lokality. Proto všechny práce směřují k tomu, aby byl znemožněn jakýkoliv kontakt budoucích pokolení s uloženým materiálem, a to ať vědomý nebo náhodný.

Hlubinný úložný systém nebyl ještě nikdy zprovozněn, avšak v řadě států existují

rozsáhlé programy jeho vývoje. Nejdále ve výstavbě je Finsko. Hlubinné úložiště v Eurajoki má být zprovozněno v roce 2020. Vybudování hlubinného úložiště předchází finančně i časově náročná výzkumná a vývojová činnost a průzkumné práce. Průzkum trvá v různých zemích 20 až 40 let a spotřebuje celkem 50 až 70 % finančních nákladů určených na úložiště. Výstavba se plánuje ve všech případech zhruba na 10 let.

Důležitou součástí dokumentace úložiště tvoří bezpečnostní zpráva, která vyhodnocuje možnosti vlivu odpadů na člověka. Musí dokázat, že navržený úložný systém má takové parametry, že nedojde k proniknutí radionuklidů ke člověku po celou dobu existence úložiště.

Životnost inženýrských bariér se odhaduje na 300 let. Životnost hmoty, ve které jsou znehybněny radionuklidy je až 1 milion let. Stabilita geologických formací, do nichž jsou úložiště umísťována, je nejméně 70 milionů let. Úložiště se v průběhu provozu i po zaplnění a uzavření pečlivě kontrolují, pomocí hydrogeologických vrtů se sledují spodní vody v okolí.

Pro bezpečnostní rozborů úložišť se používá matematické modelování. Migraci radionuklidů lze studovat i na příkladech z přírody.

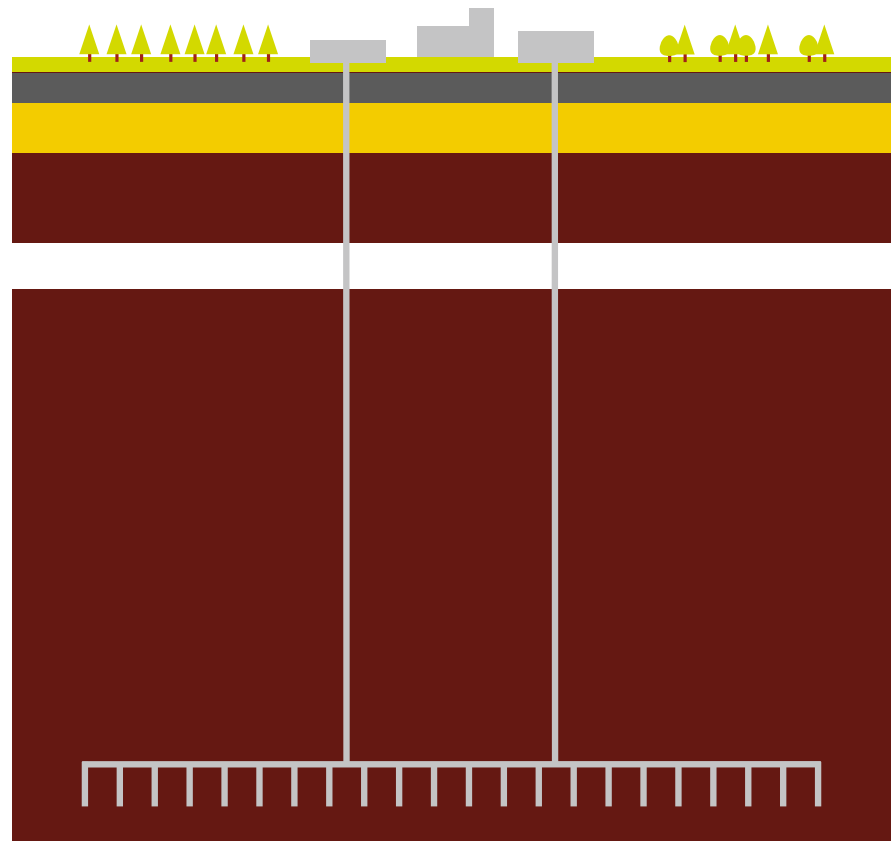
CO NA TO MATKA PŘÍRODA

OKLO

První jaderná řetězová reakce neproběhla v reaktoru vytvořeném panem Fermim pod Chicagským stadionem v roce 1942. Příroda člověka předběhla nejméně o dvě miliardy let. V ložisku uranové rudy Oklo v africkém Gabunu probíhala samočinně řetězová štěpná reakce po dobu asi 500 000 let. V lokalitě bylo v okruhu asi 200 m zjištěno na 13 takových „reaktorů“.

Izotopové složení přírodního uranu je dnes všude na světě přibližně stejné – 0,7 % ^{235}U a 99,3 % ^{238}U . V lokalitě Oklo je však obsah ^{235}U značně nižší, místy jen 0,3 %, jako by byl „spotřebován“. Existence přírodního reaktoru byla potvrzena při podrobném rozboru tohoto ložiska. Podle odhadu zde došlo ke štěpení asi 12 000 tun

uranu ^{235}U . Řetězová reakce se udála v neobvyklé geologické situaci. Ruda byla velmi bohatá a obsahovala asi 3 % ^{235}U , což je obsah jako v dnešním obohaceném uranovém palivu používaném v lehkovodních reaktorech. Díky těmto okolnostem a vhodnému geochemickému prostředí byl umožněn vznik řetězové reakce, při níž se spotřebovával ^{235}U a vznikal jaderný odpad. Navzdory vysokým teplotám více než 600 °C a radiačnímu poškození okolních hornin a minerálů se ložisko Oklo chovalo jako bezpečný přírodní sklad vyhořelého paliva po dobu 2 miliard let do dneška. Mnohé odpadní produkty, například plutonium, neptunium a thorium, zůstaly buď tam, kde vznikly, nebo se přemístily jen na nepatrnou vzdálenost do okolní horniny. Dokonce i látky, které mají největší tendenci k přemístění, se pohybovaly rychlostí pouze 10 metrů za jeden milion let. Způsob, jakým radionuklidy unikly z okolí svého vzniku, přesně odpovídá předpovědím v bezpečnostních modelech úložišť radioaktivních odpadů. Ačkoliv u přírodního reaktoru v Oklo neexistovaly nejrůznější bariéry proti úniku radionuklidů



Základní schéma hlubinného úložiště; areál na povrchu země spojují s ukládacími prostorami několik set metrů pod zemí přístupové a větrací šachty



Závod na přepracování použitého paliva v La Hague (Francie)



Přeprava jaderného paliva probíhá za přísných bezpečnostních opatření

a protékala zde voda, nedostaly se vyprodukované radioaktivní prvky dále než do bezprostředního okolí svého vzniku.

CIGAR LAKE

Ložisko uranové rudy Cigar Lake v kanadské provincii Saskatchewan je pozoruhodné tím, že na povrchu nejsou žádné známky výskytu uranu. Ložisko je v hloubce 450 m, ruda má vysoký obsah uranu – v průměru 14 %, místy až 40 %.

Jeho stáří se odhaduje na 1300 milionů let. Geologie ložiska se podobá geologii úložišť navrhovaných pro vyhořelé palivo ve Švédsku, Finsku a Kanadě. Přesto, že horniny zde byly nasyceny vodou po dobu 1 miliardy let, k výraznému přemístění uranu nedošlo.

MORRO DE FERRO

Nedaleko brazilského lázeňského městečka Pocos da Calda v pohoří Minas Gerais je malý kopec Morro de Ferro (Železný kopec), který je jedním z nejradioaktivnějších míst na zeměkouli. Na konci malého údolí odvodňovaného potoky je rudné ložisko obsahující asi 30 000 tun radioak-

tivního prvku thoria a jeho rozpadových produktů, jako je radium a prvky vzácných zemin. Rostliny rostoucí na povrchu ložiska absorbují tolik radia ^{228}Ra , že když se položí na fotografický film, vytvoří samy svůj vlastní obraz. Tato lokalita je předmětem výzkumu, protože poskytuje příležitost k modelování způsobu uvolňování a pohybu thoria a radia v podzemních vodách. Sledováním vody v okolí Morro de Ferro bylo prokázáno, že thorium z ložiska uniká rychlostí pouze 1 částice z miliardy částic za rok.

POROVNÁVÁNÍ: RADIOAKTIVNÍ A NERADIOAKTIVNÍ ODPAD

Na otázku, jsou-li horší radioaktivní odpady nebo jedovaté odpady chemické, nelze jednoznačně odpovědět. Záleží totiž především na tom, jak s nimi člověk zachází, co podniká pro to, aby byly nebezpečné co nejméně.

Riziko doprovázející radioaktivní odpady je dobře definováno v oblasti ionizujícího záření. Na rozdíl od jiných průmyslových činností je riziko záření od počátku rozvoje

jaderné vědy a techniky dobře známo, a proto se účinná ochranná opatření proti záření uskutečňují již předem a nikoliv, jako je tomu u jiných činností, až následně, když se již škodlivé následky pro zdraví nebo životní prostředí projeví.

Vzhledem k vysokému energetickému obsahu uranu je množství radioaktivních odpadů z jaderné energetiky v porovnání s množstvím odpadů vznikajícím při výrobě stejného množství elektřiny v klasických elektrárnách relativně malé. Jaderná elektrárna o výkonu 1000 MW spotřebuje ročně kolem 30 t uranového paliva, zatímco srovnatelná uhelná elektrárna „spolyká“ denně 11 vlaků uhlí. Celkové množství použitého paliva je tedy také asi 30 t. Bude-li přepracováno, znamená to, že 97 % paliva se recykluje na nové palivo a vysokoaktivních odpadů přeměněných na sklo zůstane jen asi 1 t. Kromě toho jaderná elektrárna vyprodukuje za rok cca 40 m³ nízkoaktivních a 10 m³ středně aktivních odpadů. Uhlenná elektrárna o výkonu 1000 MW zanechá ročně kolem 7 milionů tun odpadů, zejména ve formě odpadních plynů CO₂, SO₂,



Takovéto množství zesklavatělych vysokoaktivních odpadů by vzniklo, kdyby člověk po celý svůj život spotřebovával jen elektřinu vyrobenou v jaderných elektrárnách



Bazén s vyhořelým palivem

prachu a popele. Pevné odpady obsahují též těžké kovy, jako kadmium, arzén, rtuť, které nikdy neztrácejí svou toxicitu. Tyto odpady obsahují také kancerogenní chemické látky a přírodní radioaktivní prvky.

Ve Velké Británii se ročně vyprodukuje na 40 milionů m³ toxických průmyslových odpadů, což je množství, které by zaplnilo řeku Temži v délce téměř 100 km. Naproti tomu britský jaderný průmysl vyprodukuje ročně nízkoaktivní odpady v množství, které by se vešlo na malé parkoviště aut. Pro skladování středně aktivních odpadů by stačilo 20 londýnských autobusů a zeskloněné vysokoaktivní použité palivo by zaplnily jedno taxi.

Ve Spolkové republice Německo vzniká ročně na 500 milionů tun nejrůznějších odpadů, z nichž asi 10 %, tj. 50 milionů tun, jsou potenciálně nebezpečné odpady. Asi 4 miliony tun jsou považovány za tzv. zvláštní odpady. Z těchto zvláštních odpadů tvoří radioaktivní odpady 13 %. Díky malému objemu radioaktivních odpadů produkovanému jedním reaktorem je celkové množství těchto odpadů relativně malé i v celosvětovém měřítku.

Pro manipulaci s radioaktivními odpady od jejich vzniku až po jejich konečné uložení existují přísné národní a mezinárodní předpisy a standardy. Kontrola radioaktivních odpadů je uskutečňována nezávislými orgány, aby se zabránilo zneužití.

Pokud jsou radioaktivní odpady něčím výjimečné, pak jejich výjimečnost spočívá v pozornosti, s jakou se s nimi manipuluje a jak jsou izolovány od živé přírody. Péče, jaká se věnuje v jaderném průmyslu radioaktivním odpadům, může být příkladem i pro konvenční průmyslová odvětví.

CO MŮŽEME ŘÍCI O JINÝCH NEBEZPEČNÝCH ODPADECH

Neexistuje jediné dobře definovatelné riziko, ale vícenásobná rizika týkající se například hořlavých, korozivních nebo toxických vlastností odpadů.

Nebezpečné odpady jsou produkovány v obrovských množstvích z velmi širokého počtu zdrojů od odpadů z domácností až po průmyslové odpady z různých odvětví, jež nelze jasně identifikovat. Mnoho z nich je ponecháno na otevřených skládkách nebo volně vypouštěno do životního

prostředí. Vědecké základy pro hodnocení a kontrolu rizik a vypracování norem a kritérií pro ochranu obyvatelstva a životního prostředí existují pouze pro některé z těchto odpadů, nejsou však sladěny v mezinárodním měřítku jako je tomu u radioaktivních odpadů.

Vzhledem k rozdílným zdrojům odpadů nejsou činnosti vedoucí k tvorbě nebezpečných odpadů většinou podrobeny ústřední kontrole. Taková kontrola je totiž nesmírně obtížná.

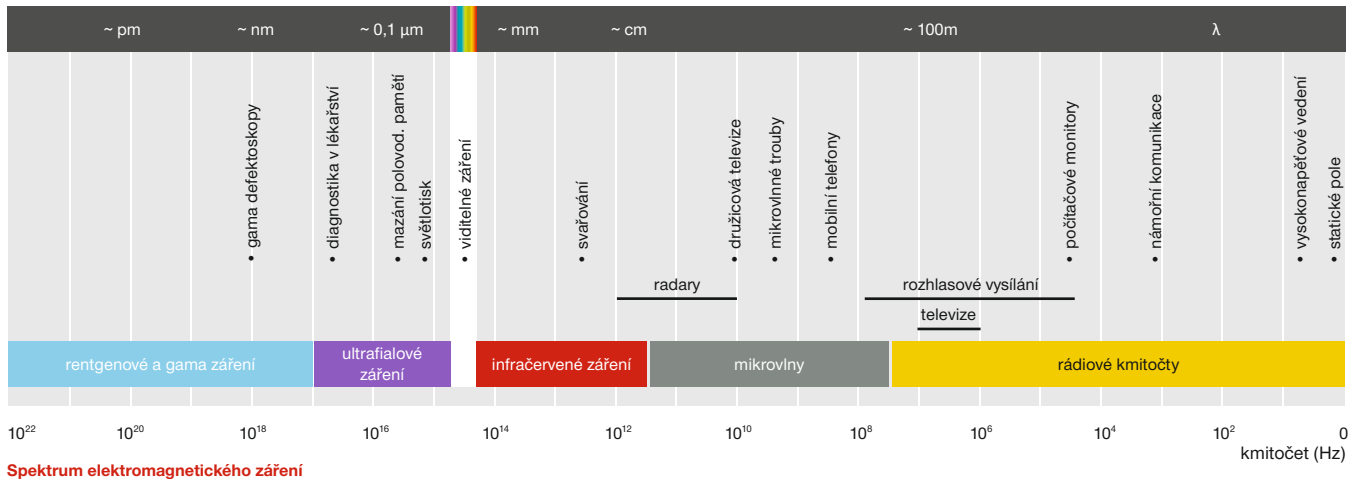
NÁKLADY

Zneškodňování radioaktivních odpadů je velmi nákladné. Proto každý provozovatel jaderné elektrárny již od počátku provozu ukládá na zvláštní fond část peněz získaných z prodeje vyrobené elektřiny.

Z každé prodané kilowatthodiny je část získaných prostředků určena na budoucí likvidaci odpadu a celé elektrárny po skončení provozu. V České republice jde o 50 Kč z každé vyrobené megawatthodiny.

Jaderná energetika tak pamatuje na budoucnost. Je to zodpovědný a v rámci celého průmyslu ojedinělý přístup.





Spektrum elektromagnetického záření

PODIVUHODNÉ PAPRSKY

Od samého počátku své existence žije člověk trvale v moři záření – světelného, tepelného, ultrafialového, ionizujícího. Světelné a tepelné záření můžeme vidět nebo vnímat. Ionizující záření je neviditelné, ale můžeme ho snadno zjistit speciálními přístroji – detektory. Zdrojem ionizujícího záření jsou radioaktivní prvky vyskytující se na Zemi, reakce probíhající na Slunci a hlubiny vesmíru. Zdroje záření mohou být i umělé, vytvořené člověkem – třeba rentgen nebo televizor. Záření jsme vystaveni neustále, aniž máme možnost tomu zcela zabránit. Ionizující záření a radioaktivní látky jsou neoddelitelnou složkou našeho životního prostředí. Mohou nám škodit i prospívat, naučili jsme se jich využívat v mnoha oborech lidské činnosti.

ZÁŘENÍ KOLEM NÁS

Elektromagnetické vlny se v našem okolí vyskytují v širokém rozmezí vlnových délek. Jejich spektrum sahá od hodnot srovnatelných s rozměrem atomového jádra až do desítek kilometrů. Jen uzounký proužek v oblasti mikrometrů (10⁻⁶ m) je viditelné světlo. Částečně si umíme představit ještě ultrafialové nebo infračervené záření, která spektrum viditelného světla lemují, ale už asi trochu tápeme v otázce kam zařadit mikrovlny, rentgenové záření nebo rádiové vlny.

A právě **ionizujícímu záření** které nemůžeme vidět ani cítit, ale které lze detekovat jednoduchým zařízením, se budeme věnovat. Přestože ionizující záření provází Zemi od jejího vzniku, objevil člověk jeho

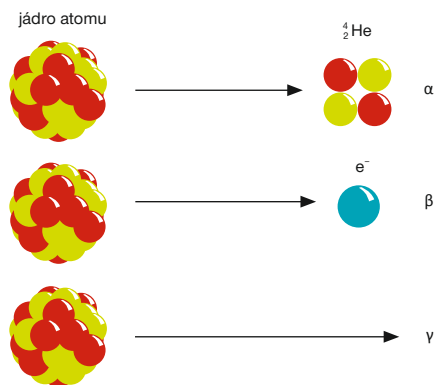
existenci poměrně nedávno. V roce 1896 zjistil francouzský vědec Henri Becquerel, že minerál obsažený v uranové rudě zanechává na zabalené fotografické desce svůj obraz. Dva roky po Becquerelovi popsala paní **Marie Curieová-Sklodovská** prvky, které se samovolně rozpadají, a tento jev nazvala radioaktivitou. Po 1. světové válce nastal v lékařství rozmach využívání paprsků X, které v roce 1895 objevil německý fyzik Wilhelm Conrad Röntgen.

Tehdejší rentgenologové však neznali dobře účinky záření, vystavovali se nadměrným dávkám bez ochrany a mnoho z nich onemocnělo. Dnes se o ionizujícím záření i o radioaktivitě ví mnohem více.

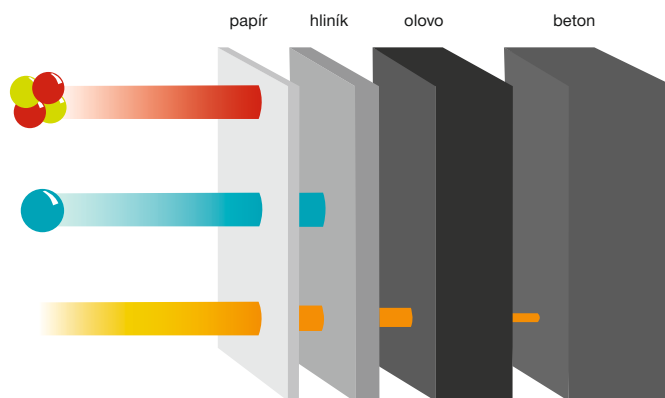
Radioaktivita je součástí našeho života. Přirozeně se vyskytující radioaktivní atomy

jsou přítomny v zemské kůře, ve stěnách našich domovů, škol a kanceláří, v potravě, kterou jíme či pijeme. Radioaktivní plyny jsou ve vzduchu, který dýcháme. Rovněž naše těla – svaly, kosti a tkáně – obsahují přirozeně se vyskytující radioaktivní prvky. Záření, které přichází z mimozemského prostoru, nazýváme **kosmickým zářením**.

Veškerá látka je tvořena z atomů. Většina atomů na Zemi se nemění, jsou stabilní. Jádra některých atomů však samovolně mění své složení (rozpadají se) nebo svůj energetický stav a vysílají částice ionizujícího záření. Některá z těchto jader procházejí celou řadou přeměn, než se dostanou až ke stabilní formě. Nejznámějšími druhy ionizujícího záření, které vzniká i dalšími procesy, jsou záření alfa, beta, gama, záření X a neutrony.



Druhy ionizujícího záření



Pronikavost jednotlivých druhů ionizujícího záření

DRUHY IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

Záření **alfa** je tvořeno jádry helia a je vyzařováno jádry prvků, jako je např. uran, thorium, radium apod. Záření alfa může být úplně zastaveno již pouhým listem papíru nebo tenkou vrstvou naší pokožky. Jestliže se ale materiály emitující záření alfa dostanou do našeho těla při vdechnutí, s jídlem nebo pitím, mohou přímo ozářit vnitřní tkáň a způsobit biologické poškození.

Záření **beta** je tvořeno elektrony nebo pozitrony (elektrony s kladným nábojem) a provází různé přeměny radioaktivních prvků. Elektrony jsou pronikavější než alfa částice a mohou proniknout vrstvou vody o tloušťce 1 až 2 cm. Záření beta může být pohlceno hliníkovým plechem o tloušťce několika milimetrů až centimetrů.

Záření **gama** je fotonové záření s čárovým spektrem, vysílané atomovými jádry při radioaktivních přeměnách a dalších procesech. Díky své energii mohou paprsky gama proniknout lidským tělem, ale mohou být pohlceny tlustou stěnou betonu nebo olova. Gama záření ionizuje nepřímě, jen prostřednictvím nabitých částic vzniklých při interakci gama kvanta s látkou.

Záření **X (rentgenové záření)** je fotonové

záření zahrnující brzdné záření (vznikající brzděním nabitých částic v elektrických polích) a charakteristické záření (vysílané při přechodu elektronu atomového obalu na nižší energetickou hladinu).

Neutrony jsou nenabitě elementární částice, jejichž zdrojem může být například štěpení uranu. Jsou neutrální, proto přímo neionizují. Při jejich interakci s atomy látky může vzniknout záření alfa nebo beta, které pak vyvolává ionizaci. Neutrony mají vysokou schopnost pronikat látkou a mohou být pohlceny pouze tlustou vrstvou betonu, vody nebo parafinu. Nejlépe se odstíní vrstvou vody nebo jiného materiálu bohatého na vodík, neboť se účinně zpomalují srážkami s protony – jádry vodíku.

VELIČINY A JEDNOTKY

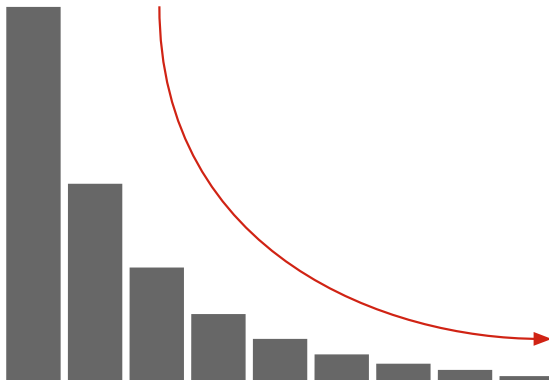
Jádra atomů některých prvků se rozpadají a uvolňují při tom energii ve formě záření. Tento fyzikální jev se nazývá radioaktivitou a radioaktivní atomy se nazývají radionuklidy.

Všechny radioaktivní látky mají jednu charakteristickou vlastnost: jejich aktivita klesá s časem. Čas potřebný k tomu, aby se přeměnila polovina jader přítomných na

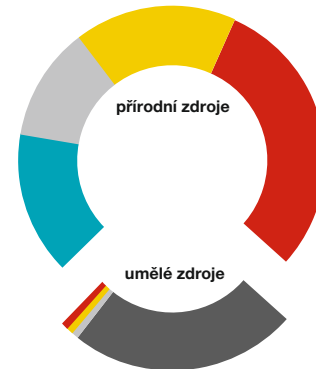
počátku, se nazývá poločas přeměny. Po dvou poločasech klesne aktivita na čtvrtinu, po třech poločasech klesne na osminu atd. Jaderná přeměna je statistický děj a její pravděpodobnost je stejně velká pro všechny stejné velké časové intervaly. Poločasy radioaktivních látek jsou různé a pohybují se od setin sekundy do milionů let. Například poločas přeměny jodu ^{131}I je osm dní, poločas přeměny uranu ^{238}U je 4,5 miliardy let. Izotop draslíku ^{40}K , který je hlavním zdrojem radioaktivity našich těl, má poločas rozpadu 1,42 miliardy let.

Existuje teorie, že všechny atomy na světě jsou radioaktivní, pouze jejich poločas přeměny je tak dlouhý, že jej neumíme změřit. Radioaktivní přeměna zůstává konstantní bez ohledu na vnější vlivy, jako je například teplota nebo tlak.

Zdroj záření se popisuje pomocí veličiny zvané **aktivita**. Je to počet radioaktivních přeměn probíhajících v určitém množství radionuklidu za jednotku času. Jednotkou aktivity je **becquerel (Bq)**. Dojde-li v látce k jedné přeměně za 1 sekundu, má aktivitu 1 Bq. Becquerel je velice malá jednotka. Například lidské tělo obsahuje několik tisíc Bq přirozených radioaktivních látek, např. draslíku ^{40}K . To znamená, že každou



Ubývání radioaktivity časem. Za časovou jednotku (poločas rozpadu) se přemění vždy polovina jader.



přírodní zdroje

- vnitřní ozáření
- záření ze zemské kůry
- kosmické záření
- radon

umělé zdroje

- lékařské aplikace
- průmyslové aplikace
- jaderná energetika
- spad z testů jaderných zbraní

Podíl průměrného ozáření člověka z různých zdrojů. Podíl jednotlivých příspěvků přírodních zdrojů silně kolísá podle nadmořské výšky a typu horninového podloží. Ozáření jednotlivce pak v neposlední řadě závisí také na životním stylu (časté lety letadlem, sledování televize, větrání či nevětrání v radonových oblastech atd.) a stravovacích zvyklostech. Z umělých zdrojů převládají zdravotnické aplikace. Příspěvek globálního spadu nebo jaderných energetických zařízení je zanedbatelný.

sekundu probíhá v našem těle několik tisíc radioaktivních rozpadů jen z tohoto zdroje.

Základní veličinou popisující účinek záření je **dávka**. Udává množství energie pohlcené v jednotce hmotnosti prostředí. Její jednotkou je **gray** (Gy). Nejdůležitější věc, kterou potřebujeme měřit, je vliv záření na člověka. Protože různé druhy záření mají při shodné dávce odlišné účinky, zavedla se pro přesnější vyjádření účinku záření na člověka veličina zvaná **dávkový ekvivalent**, jehož jednotkou je **sievert** (Sv). Například jedno rentgenové vyšetření plic může představovat až 1 mSv.

Pro práci s ionizujícím zářením je důležitý údaj udávající působení záření v čase, pro který byla zavedena veličina **příkon dávkového ekvivalentu**. Měří se v jednotkách sievert za hodinu. Pro praxi je to jednotka příliš velká, proto se častěji setkáváme s milisieverty nebo mikrosieverty za hodinu.

PŘÍRODNÍ ZDROJE

Ionizující záření přichází z okolního prostoru i ze Země samotné. Vzduch, který dýchá-

me, jídlo a nápoje, které jíme, jsou mírně radioaktivní. Toto záření se nazývá přírodní (přírodní pozadí) a je tu od samého začátku světa. Nemá co dělat s aktivitami člověka.

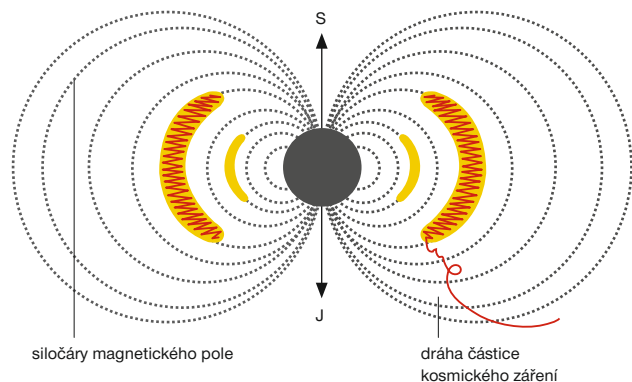
KOSMICKÉ ZÁŘENÍ

Střední roční dávkový ekvivalent, který obdrží průměrný občan zeměkoule od kosmického záření, činí přibližně 0,25 až 0,30 mSv. Země je soustavně bombardována z vesmíru vysokoenergetickými částicemi a jádry atomů. Většina těchto částic pochází ze Slunce (tzv. sluneční vítr), některé přicházejí z hlubokého vesmíru, možná i mimo naši galaxii. Jakmile tyto „primární částice“ nebo jádra dosáhnou Země, sráží se s atmosférou a štěpí se na spršky „sekundárních částic“. Zemi před intenzivním kosmickým zářením chrání magnetické pole. Tzv. Van Allenovy pásy (podle amerického fyzika J. V. van Allena) zadržují částice kosmického záření ve výškách od tisíce do 50 tisíc km nad zemským povrchem. Další část záření (ultrafialovou složku) pak odstíní vrstva ozonu v horní vrstvě atmosféry.

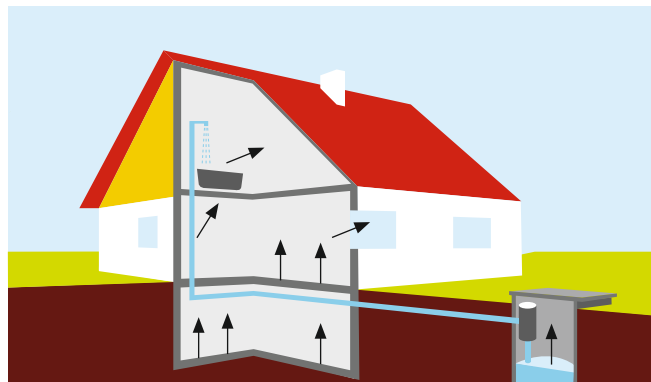
Přesto v průměru každý z nás obdrží z tohoto zdroje nejméně čtvrtinu mSv každý rok. Lidé žijící ve větších nadmořských výškách obdrží dokonce ještě větší dávkový ekvivalent, protože nad nimi je menší vrstva vzduchu, který nás chrání. Lidé žijící ve výškách kolem 1 500 m n. m. obdrží přibližně dvojnásobek než obyvatelé výšek na úrovni moře. Lidé žijící v Himálaji nebo horolezci (výška kolem 6 tisíc m n. m.) obdrží dávkový ekvivalent kolem jedné tisícin mSv každou hodinu, tj. přibližně 9 mSv za rok. Ještě výše, ve stratosféře, je vzdušná vrstva tak slabá, že jen velmi málo chrání před kosmickým zářením. V letové výšce letadel (10 km) pasážerů a letců obdrží dávkový ekvivalent kolem pěti tisícín mSv za hodinu. V nadzvukových letadlech, která létají ve výšce kolem 15 km, dosahuje dávkový ekvivalent kolem deseti tisícín mSv za hodinu.

ZEMĚ A BUDOVY

Kosmické záření pochází z oblastí mimo naši Zemi. Ale i Země sama je zdrojem záření. Střední roční dávkový ekvivalent ze



Zemské magnetické pole zachycuje mnoho nabitých částic z kosmického záření. Částice se koncentrují ve dvou radiálních pásích (Van Allenovy pásy). Jsou to jakoby tunely, ve kterých částice spirálovitě putují uzavřené magnetickým polem. K zemi mohou proniknout jen v oblasti pólů.



Pronikání radonu do budovy z podloží, ze stavebního materiálu a z vody

Země je 0,35 mSv. Pozemské záření přichází přímo z hornin v zemské kůře. Některé horniny a minerály obsahují stopy přirozeně radioaktivních prvků uranu a thoria, např. žula. Budovy postavené z kamene jsou stejně radioaktivní jako matečná hornina. Jiné stavební materiály jako cihly nebo beton, také obsahují mírně radioaktivní látky. Množství záření, které obdržíme ze země a obydlí, se dosti liší podle místa a podle použitého stavebního materiálu.

Přírodní pozadí na některých místech světa se vyznačuje zvýšenou radioaktivitou hornin:

- Ramsar v Íránu – až 400 mSv/rok,
- Kerala v Indii – průměrně 3,8 mSv, max. 17 mSv/rok,
- Guarapari v Brazílii – průměrně 8 až 15 mSv, max. 175 mSv/rok.

VZDUCH

Střední roční dávkový ekvivalent, který obdržíme ze vzduchu, se pohybuje mezi 1 až 3 mSv v závislosti na místě, kde žijeme. Na svědomí to mají radioaktivní plyny radon a thoron, radon je obvyklejší než thoron. Jsou členy přírodních rozpadových řad, uranové a thoriové. Společně jsou zod-

povědné za více než polovinu středního ročního dávkového ekvivalentu z přírodních zdrojů, který se opět liší podle místa pobytu.

JÍDL A PÍTÍ

V průměrné potravě je přibližně pětina mSv středního ročního ekvivalentu. Všechno, co jíme a pijeme, je mírně radioaktivní. Nejvíce je v potravinách zastoupen radioizotop draslíku ^{40}K , méně tritium a ještě méně ^{226}Ra , ^{228}Th , ^{210}Pb a ^{210}Po . Rostliny přijímají radioaktivní minerály z půdy a některé prvky mohou být rozpuštěné ve vodě. Takovým způsobem vstupuje radioaktivita do těla potravinovým řetězcem. Potrava obsahuje dostatek radioaktivity k tomu, aby nás učinila mírně radioaktivními. Některé potraviny, např. brazilské ořechy, káva nebo čaj, obsahují více radioaktivních prvků než jiné. Ale to neznamená, že bychom je neměli jíst. Dieta založená na minimální radioaktivitě může naopak představovat skutečné riziko z nesprávné výživy.

CO JE TO RADON?

Radon je přírodní radioaktivní plyn. Vzniká jako jeden z členů rozpadové řady uranu, který je přítomen v mnoha horninách. Radon odtud vystupuje na zemský povrch

nebo proniká do podzemních vod. Všichni jej po celý život dýcháme. Mimo budovy se rozptýluje do vzduchu, takže jeho koncentrace na volném prostranství je velice nízká. Proniká však do uzavřených prostorů, jako jsou doly, obytná stavení, školy a pracoviště, kde se hromadí. Podle místních geologických a atmosférických podmínek a při špatném režimu větrání se může nahromadit ve značných množstvích. Radon má poločas přeměny 3,8 dne, poměrně rychle se tedy z něj stávají další radioaktivní prvky, kterým se říká dceřiné produkty radonu. Jde o zářiče alfa, a proto před nimi spolehlivě ochrání i lidská pokožka. Když však radon vdechneme, setkají se s ním „nahé“ lidské plíce. V nechráněné tkáni pak záření alfa může napáchat velké škody. Vdechování radonu zvyšuje riziko vzniku rakoviny plic.

Není bez zajímavosti, že o zvýšeném riziku radonu se začalo diskutovat po ropné krizi z roku 1973, kdy se začala zavádět různá úsporná opatření v oblasti energie, mimo jiné též pečlivé utěšování oken a dveří a omezování větrání místností. Koncentrace radonu v uzavřených prostorech je v průměru osmkrát vyšší než ve volné přírodě a utěšování oken se může



Rentgenové záření se využívá v medicíně



Zubní rentgen

ještě mnohonásobně zvýšit. Ukázalo se, že snaha o zlepšení situace v jedné oblasti (šetření energií) může znamenat zhoršení stavu v jiné oblasti (zdravotní hlediska).

Ve většině bytů v České republice je hladina radonu nízká, s průměrem asi 55 becquerelů v m^3 . V některých oblastech, hlavně tam, kde jsou v zemi radioaktivní horniny, jsou však hladiny radonu vyšší. Ve středočeském žulovém masivu se vyskytují budovy s hodnotami obsahu radonu až 11 tisíc Bq v m^3 . Koncentrace radonu je zvýšená v budovách postavených z nevhodných stavebních materiálů. Ke snížení obsahu radonu v domech se doporučují různá opatření, například instalace ventilátorů k odsávání radonu z míst pod budovami nebo dokonalejší izolování základů. Pro omezení pronikání radonu ze stavebních materiálů stěn se používají vzduchotěsné tapety. Nejdůležitější a zároveň nejjednodušší je dostatečné větrání. V některých případech však naopak může radon pomáhat při léčení nemocných.

V Jáchymovských lázních se pacienti koupou v termální vodě s vysokým obsahem radonu. Léčba působí blahodárně hlavně při nemocech pohybového ústrojí – kůže, svaly i klouby se dobře prokrví. Dýchací cesty

pacientů jsou chráněny, zejména důkladným větráním prostoru a omezenou dobou pobytu v koupeli.

UMĚLÉ ZDROJE

Všechny přírodní zdroje dohromady představují asi 83 % středního ročního dávkového ekvivalentu pro jednotlivce. Zbývající dávkový ekvivalent je způsobován umělými zdroji.

Člověk vypustil do životního prostředí i radionuklidy, které by jinak zůstaly pod zemí – jsou to radioaktivní látky unikající do ovzduší při spalování fosilních paliv. Málokdo si uvědomuje, že je jich mnohem víc, než kolik se jich dostane do životního prostředí při normálním provozu jaderné elektrárny. Mezi zářením produkovaným přírodou a tím, které vyprodukoval člověk, není žádný rozdíl. Uměle vyprodukované záření představuje kolem 17 % středního ročního dávkového ekvivalentu, tj. 0,3 mSv. Většina přichází z lékařských zdrojů.

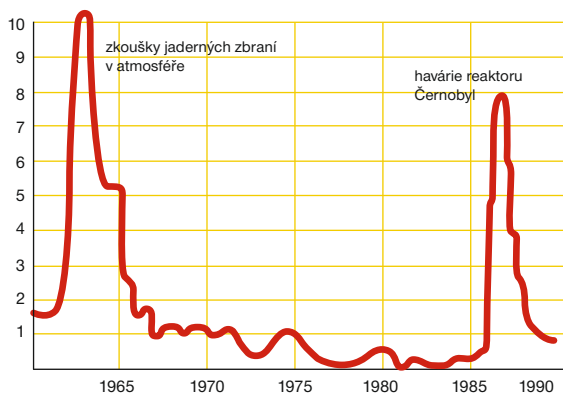
LÉKAŘSKÉ ZDROJE ZÁŘENÍ

Záření se používá v medicíně dvěma způsoby: malé dávky při diagnóze poranění nebo nemoci a velké dávky na ničení rakovino-

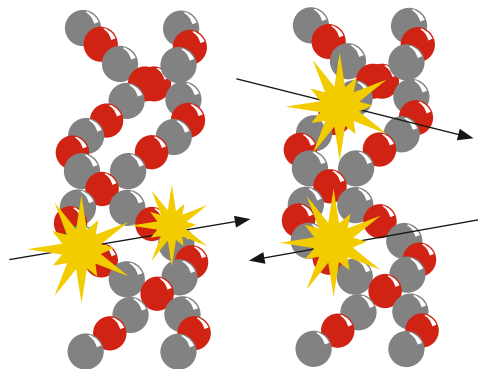
tvorných buněk. Nejznámější formou záření používaného v medicíně je rentgenové záření (X). Většinou se používá na zobrazení zubů, hrudníku a končetin. Typický rentgen zubů představuje 0,1 mSv, rentgen plic 0,5 mSv, rentgen prsu 1 mSv, rentgenové vyšetření fyziologických procesů představuje 1 až 10 mSv. Dávka se liší podle typu vyšetření a je snaha ji snižovat používáním co nejlepšího zařízení. Radioaktivní látky vpravené do těla se používají ke sledování tělesných funkcí a k lokalizaci nádorů. Dávkové ekvivalenty z těchto vyšetření se pohybují mezi 1 až 10 mSv. Největší dávky se v medicíně používají pro léčení rakoviny. Mohou být skutečně velmi vysoké – typická léčebná dávka představuje desítky grayů a je obvykle rozdělena do několika týdnů. Záření se pečlivě zaměřuje jenom na nádor, aby nepoškodilo okolní tkáň.

RŮZNÉ ZDROJE

Dávkový ekvivalent, který obdržíme v současné době z atmosférického spadu ze zkoušek jaderných zbraní prováděných v 50. a 60. letech, představuje asi jednu až dvě setiny mSv ročně. Dnes je to 30krát méně než v roce 1964. Malým zdrojem ionizujícího záření může být některé spotřební



Aktivita ^{137}Cs v líském organismu (Bq/kg) od roku 1960 do roku 1990



Poškození DNA. Nejzávažnější poškození buňky způsobí „zásah“ do šroubovice DNA (kyseliny deoxyribonukleové), která je nositelem genetického kódu. Molekula je našťastí dvojí, má tvar dvoušroubovice, takže poškození jedné části je okamžitě opravováno podle druhé. Záření však může způsobit také dvojí zlom molekuly DNA (znemožňující dělení buňky), tedy její smrt, nebo se tak pozmění některá její důležitá funkce, že to může buňku naopak přimět k nekontrolovanému rakovinnému bujení.

zboží, například televizory, detektory kouře, hodinky se svítícím ciferníkem atd. Denní práce u počítače s klasickou obrazovkou představuje asi 0,002 mSv za rok. Uhlí a fosfátové horniny obsahují stopy radioaktivních prvků uranu a radia, takže používání fosfátů jako hnojiva a spalování uhlí v kamnech nebo elektrárnách způsobuje rozšiřování radioaktivity do životního prostředí. V průměru dávkový ekvivalent z těchto různých zdrojů představuje 0,01 mSv na osobu a rok.

Palivový cyklus jaderné elektrárny od vytěžení uranové rudy, přes její zpracování, využití paliva v elektrárně až po uložení odpadů představuje velmi malý zlomek přírodního pozadí – kolem 0,1 %.

JAK PŮSOBÍ ZÁŘENÍ

Sluneční světlo nás ohřívá, protože naše tělo absorbuje infračervené paprsky, které světlo obsahuje. Infračervené paprsky tedy vnímáme, nejsou však zdrojem ionizace v tělesných tkáních. Naproti tomu ionizující záření může narušit normální funkce buněk, nebo je dokonce zničit. Množství energie potřebné k vyvolání významných biologických účinků

prostřednictvím ionizace je tak malé, že naše tělo nepocítuje tuto energii, jako je tomu v případě infračervených paprsků, které vyvolávají teplo. Biologické účinky ionizujícího záření se liší podle typu a energie záření. Měřítkem rizika biologického poškození je dávka záření, kterou obdrží tkáň.

Pro ionizující záření je charakteristické, že způsobuje ve hmotě elektrický efekt, zvaný ionizace. Je to proces, při němž vzniká z původně neutrálního atomu kladně nabitý ion a volný záporně nabitý elektron. Každý druh záření má jinou ionizační schopnost. Například záření alfa má velmi vysokou ionizační schopnost, ale v látce neprotrhne hluboko. Ionizace změní elektronovou strukturu látky, a tím i její vlastnosti. V materiálech, jako je ocel, může způsobit tvrdnutí, v mědi může vyvolat zkrěhnutí. V živé tkáni může ionizace způsobit chemické změny, které ovlivní nebo zpomalí růst buněk, jejich funkci nebo rozmnožování. Ionizace se objevuje v buňkách našeho těla neustále, neboť jsme vystaveni záření z přírodních zdrojů. Naštěstí mají živé systémy účinný systém napravování takových poškození. Bez tohoto opravného mechanismu by byl život nemožný.

Za nízké dávkové ekvivalenty se považují hodnoty do stonásobku průměrného dávkového ekvivalentu na světě, tj. kolem 250 mSv/rok.

Ze studií vypracovaných mezinárodními odborníky UNSCEAR vyplývá, že nelze prokázat riziko vzniku dodatečných případů rakoviny až do hodnot 200 mSv/rok. K prvním příznakům zdravotních obtíží dochází při dávkových ekvivalentech vyšších než 500 mSv. Při celosvětovém jednorázovém ozáření 3 až 5 tisíc mSv je pravděpodobnost úmrtí padesátiprocentní. Velmi však záleží na tom, zda došlo k ozáření celého těla nebo jen části a zda ozáření bylo jednorázové nebo k němu docházelo v průběhu delšího časového období. U částečného ozáření, byť velmi vysokými dávkami, je zdravotní újma podstatně menší, stejně tak u ozáření rozloženého do delšího časového období, kdy v pauzách efektivně zapracují opravné mechanismy.

U nízkých dávek záření existuje přesto značný stupeň nejistoty, pokud jde o celkové účinky. Jedna z teorií má za to, že i malé ozáření, třeba jen na úrovni přírodního pozadí, může znamenat určité riziko. Aby však bylo možné prokázat, jaká úroveň záření může



Příklady osobních dozimetrů



Porovnání přírodního pozadí a limitů pro ozáření

1	příspěvek od všech prům. zdrojů včetně jaderných zařízení	0,01 mSv/rok
2	příspěvek od havárie v Černobylu	0,2 mSv/rok
3	dávkový limit pro obyvatelstvo	1 mSv/rok
4	přírodní pozadí	3 mSv/rok
5	dávkový limit pro pracovníky se zářením	50 mSv/rok
6	lékařsky zjištěitelné účinky záření	> 500 mSv/rok

způsobit rakovinu, k tomu je třeba sledovat miliony lidí po dobu několika generací.

Takový výzkum by byl velmi komplikovaný, protože nelze izolovat část obyvatelstva jako kontrolní skupinu, která by nebyla vystavena záření. Kromě toho existují tisíce látek v našem běžném životě, které rovněž a s ještě větší pravděpodobností mohou způsobit rakovinu – např. komínové saze, tabákový kouř, ultrafialové záření, azbest, některá chemická barviva, plísňové toxiny v potravinách, viry a dokonce i teplo.

Naproti tomu existuje jiná teorie, podle níž jsou malé dávky ionizujícího záření organismu prospěšné, neboť stimulují v buňkách opravné mechanismy. Buňka „cvičená“ na opravování drobných poškození pak opraví i z jiných příčin vzniklé poškození, které by jinak vedlo k rakovinnému růstu. Blahodárnému účinku malých dávek se říká hormeze. Příkladem příznivého působení nízkých dávek je léčení pacientů v radioaktivních lázních.

MĚŘENÍ A OCHRANA

Ionizující záření není sice vidět, ale vzhledem k jeho vlastnostem ho lze snadno

a přesně zjistit a měřit. K tomu slouží různá zařízení obsahující materiály, jejichž vlastnosti se mění při pohlčení ionizujícího záření – tzv. **detektory**.

Jedná se o změny elektrické vodivosti materiálu detektoru, změny barvy, chemického složení, objemu apod. Často se využívá vlastností některých látek reagovat zábleskem (scintilací) na každou částici ionizujícího záření. Tyto signály pak detektor předává prostřednictvím vyhodnocovacího zařízení dále. Výsledkem je přesná informace o parametrech ionizujícího záření.

Úroveň záření v životním prostředí se měří obvykle scintilační měřicí sondou. Vyhodnocovací a zobrazovací zařízení podává informaci o okamžité úrovni záření a počítá denní a měsíční průměry.

Množství radonu v uzavřených prostorách se měří stopovým detektorem. Po určité době se v místnosti nechá volně ležet detektor s látkou, ve které radioaktivní částice zanechávají stopy. Po čase se počet stop vyhodnotí a vypočítá se množství radonu.

Všichni pracovníci se zářením používají osobní dozimetry, pomocí nichž se zjistí dávka, kterou při práci obdrželi. Vnitřní zamoření (kontaminace), tj. případ, že by pracovník vdechl nebo požil radioaktivní látku, se měří tzv. celotělovým počítačem. Lze říci, že veškerá měření ionizujícího záření a radiačních dávek jsou díky specializované a dokonalé měřicí technice na vysoké úrovni.

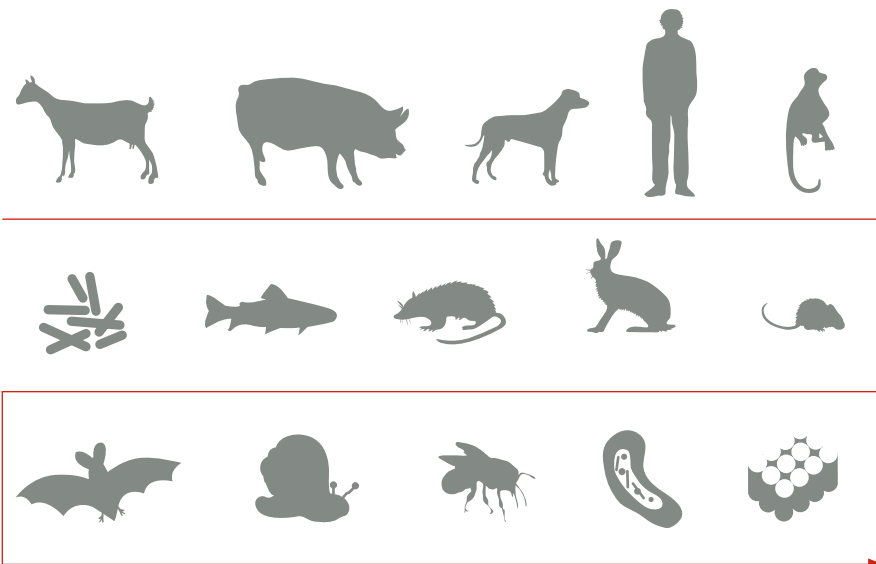
Ochrana před zářením spočívá na třech základních principech:

- dostatečná vzdálenost od zdroje záření,
- co nejkratší pobyt v blízkosti zdroje záření,
- stínění, tj. vkládání vrstev materiálu, který záření pohlcuje, mezi zdroj a člověka.

Četnost záření ubývá s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje, což znamená, že vzdálíme-li se do desetinásobné vzdálenosti, působí na nás 100krát menší četnost záření.

PRÁCE SE ZÁŘENÍM

Člověk pracující s radioaktivním zářením je vystaven tzv. profesionálnímu ozáření.



koza	2 400 mSv
prase	2 500 mSv
pes	2 600 mSv
člověk	3 000–5 000 mSv
opice	5 400 mSv
myš	5 600 mSv
králík	7 000 mSv
krysa	8 000 mSv
pstruh	15 000 mSv
bakterie	40 000 mSv
netopýr	150 000 mSv
hlemýžď	200 000 mSv
vosa	1 000 000 mSv
měňavka	1 000 000 mSv
virus tabákové mozaiky	2 000 000 mSv

Citlivost na ozáření u různých tvorů. Dávkový ekvivalent, který přežije polovina ozářených jedinců

Mnoho lidí pracuje s radioaktivními materiály, např. v nemocnicích, laboratořích, v průmyslu a v jaderných elektrárnách. Jiní nepracují s radioaktivním materiálem, ale ve svém zaměstnání obdrží větší dávku od přírodního pozadí, např. letci v nadzvukových letadlech, horníci atd. Profesionální ozáření je relativně časté, protože záření a radioaktivní materiály se běžně používají v medicíně, průmyslu i zemědělství. Lékař nebo veterinář pracující s rentgenem obdrží kolem pětiny mSv záření ročně navíc. Letci obdrží ročně kolem dvou mSv navíc z kosmického záření. Největší dávkový ekvivalent byl zaznamenán u pilota Concordu: 17 mSv. Horníci v dolech jsou vystaveni velkým dávkám radonu a thoronu, což představuje kolem 1,2 mSv ročně. Dávky jsou tím nižší, čím lepší je ventilace v dolech.

Všeobecně lze říci, že průměrné roční dávky, které obdrží pracovníci profesionálně se zabývající ionizujícím zářením a radionuklidy, jsou podstatně nižší než individuální

dávkové limity. Radiační ochrana může sloužit jako příklad pro jiné bezpečnostní disciplíny díky dvěma základním pravidlům:

- prvním je předpoklad, že každá úroveň záření nad nulovou úrovní přináší určité riziko poškození zdraví;
- druhým je ochrana budoucích generací před aktivitami, které uskutečňujeme v současné době.

ÚČINKY ZÁŘENÍ

Když je buňka ozářena, mohou nastat dva případy poškození: buňka umře, nebo přežije ve změněné formě, což může mít za následek rakovinu nebo genetické poškození budoucích generací. Smrt buněk lze pozorovat bezprostředně po ozáření. To se nazývá **časný efekt záření**. Změna buněk se může projevit až po letech, vzniká **zpožděný (pozdní) efekt záření**. Samozřejmě je dobré vědět, jakým rizikům jsme vystaveni a jak významné je každé z nich. Tabákový

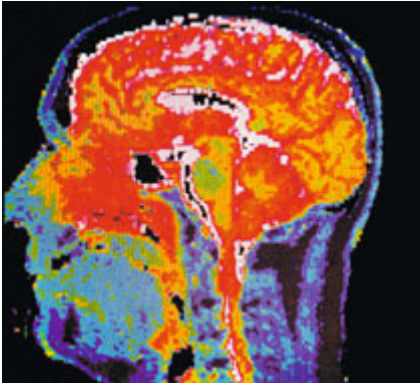
kouř a chemické škodlivé látky v atmosféře průmyslových měst vyvolávají přibližně 25 % všech smrtelných případů rakoviny. Dalších 35 % lze připsat stravovacím zvyklostem a 20 až 30 % jiným příčinám souvisejícím s životním prostředím.

POUŽITÍ ZÁŘENÍ

Používání radiační a jaderné techniky v medicíně, průmyslu, zemědělství, energetice a v jiných vědeckých a technických oborech znamenalo ohromný přínos pro lidskou společnost. Elektřina z jaderných elektráren není tedy zdaleka jedinou výhodou, kterou nám svět atomů poskytuje.

ZDRAVOTNICTVÍ

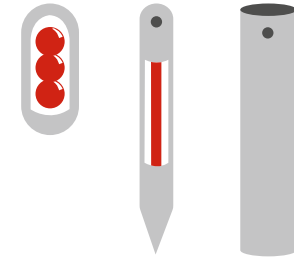
Díky radiačním diagnostickým a léčebným aplikacím bylo zachráněno mnoho lidských životů. Tři ze čtyř hospitalizovaných pacientů v průmyslově vyspělých zemích mají nějakým způsobem prospěch z nukleární



Scintigram mozku



Radiogramy se používají v genetickém výzkumu



Brachyterapeutické zářiče. Různé tvary jehel a tub naplněné radioaktivním zářičem se aplikují přímo do těla pacienta, do nádorového ložiska, nebo tělní dutiny. Potřebná léčebná dávka záření se dosáhne jednak aktivitou aplikovaných zářičů, jednak dobou, po kterou jsou v těle pacienta umístěny.

medicíny. Každý z nás se už pravděpodobně v životě setkal s rentgenem. Známe radioterapii jako revoluční způsob léčení rakoviny.

Nukleární medicína

Vybrané radionuklidy se používají pro zobrazení orgánů nebo procesů v lidském těle, např. ledvin, štítné žlázy, srdce, struktury kostí, nádorů apod. Vhodná látka se označí radionuklidem a vpraví do těla. Koluje krevním oběhem a podle svých vlastností se usazuje ve sledovaném orgánu. Zobrazovací zařízení pak detekuje vysílané záření a ve spojení s počítačem umožní vytvořit obraz zkoumaného orgánu. Používají se radionuklidy s krátkým poločasem přeměny, aby pacient nebyl zbytečně zatěžován. Stopovací vyšetření umožňují sledovat základní životní pochody, např. proudění krve, činnost ledvin, plic atd.

Radioimunoanalýza

Pomocí značených látek a protilátek se ve zkumavce studují vzorky tělních tekutin (např. krve) a velmi přesně se tak stanovují hormony, enzymy, viry, některé drogy a jiné látky. Spolehlivě zjistí přítomnost látky již při koncentraci 0,000 000 000 001 g v 1 litru. Při radioimunoanalýze pacient do žádného kontaktu s radioaktivní látkou nepříjde.

Radiofarmaka

Léčiva obsahující radionuklidy se užívají v diagnostice, ke stopovacím účelům i k terapii. Radiofarmaka se chemicky ani biologicky neliší od příslušného neaktivního léčiva. V praxi se používají takové sloučeniny, které se selektivně zachytávají a koncentrují v určitém orgánu a umožňují tak při diagnóze sledovat jeho tvar. Při terapii mohou radiofarmaka selektivně nahromaděná v rakovině tkáni účinně ozařovat nádor zevnitř.

Léčení nádorů

Pro radioterapii se nejčastěji užívají silné zářiče gama, rentgenové záření a někdy i záření z urychlovačů. Někdy se zářiče ve tvaru jehel aplikují přímo do nádorového ložiska nebo tělní dutiny. Nádory jsou tvořené mladými buňkami, které se velmi rychle dělí a jsou mnohokrát citlivější k záření než zdravá tkáň. Místo, v němž je zhoubný nádor, se s velkou přesností ozaří a nádor se tak zničí. Na tomto principu je založen i Leksellův gama nůž, který úspěšně léčí nádory a jiné chorobné procesy v lidském mozku.

Leksellův gama nůž

Někteří nemocní mají mozkový nádor, který nejde vyoperovat klasickou metodou. Jiní

nemocní trpí deformací nitrolebečních cév a krvácením do mozku.

Tam, kde nepomůže neurochirurgie, může pomoci radiochirurgie, tj. zničení nemocné tkáně paprskem záření. Může se jednat o paprsek částic urychlených v urychlovači, nebo o paprsek záření gama z radionuklidu ^{60}Co .

Metodu zavedl švédský neurochirurg profesor Lars Leksell. První zařízení – pojmenované po svém objeviteli Leksellův gama nůž – bylo sestrojeno ve Švédsku v roce 1968. Gama nůž se skládá z pohyblivého operačního stolu a z velké ocelové ozařovací hlavice, která obsahuje 201 kobaltových zářičů ve formě proutků. Důmyslný systém clon zajistí namíření jednotlivých paprsků záření do místa, které má být operováno, s přesností 0,1 mm. Celé zařízení je řízeno počítačem. Vysoká dávka záření gama zničí v krátkém okamžiku a zcela bezbolestně přesně vymezený a ostře ohraničený kousek tkáně. Terapie trvá 5 až 30 minut, celá procedura včetně předchozího zobrazení tkání a cév v mozku a radiofyzikálních výpočtů asi 3 až 5 hodin. Druhý den může jít pacient domů.

Díky peněžní sbírce má Česká republika vlastní gama nůž v pražské nemocnici Na Homolce.



Leksellův gama nůž

Sterilizace

Zdravotnický materiál, injekční stříkačky, nástroje, protézy, obvazy atd. se ozářením zbaví bacilů a jiných škodlivých mikroorganismů.

Výhodou je, že se může sterilizovat jednak materiál už neprodyšně uzavřený, neboť záření pronikne i obalem, jednak se mohou sterilizovat materiály, které nelze ošetřit klasicky, např. horkým vzduchem nebo vyvařením.

ZEMĚDĚLSTVÍ

Aplikace jaderné techniky v zemědělství přinesla podivuhodné zlepšení, pokud jde o odrůdy a výnosy zemědělských plodin. Na Zemi 35 tisíc lidí denně umírá hladu. Radionuklidy a záření pomáhají snižovat toto hrozné číslo.

Potravinářství

Hniloba, škůdci, plísňe a předčasně vyklíčení osiva znehodnotí ročně na Zemi 25 až 30 % všech potravin. Záření gama ničí škůdce a mikroby, sterilizuje. 30 let se již v mnoha zemích světa ozářují plodiny, koření, ovoce, houby, ryby i hotová jídla (sterilní dieta pro těžké pacienty nebo pro kosmonauty). Ozářené potraviny jsou naprosto nezávadné a zdravější, než chemicky ošetřované.

Ozářování potravin je nyní dovoleno v 36 zemích jako alternativa k chemickému zpracování. Používá se ke zpomalení klíčení nebo k ničení choroboplodných zárodků.

Potraviny takto ozářené nejsou samy radioaktivní, tedy ani jejich konzumenti nejsou ohroženi zářením. Ozářené potraviny jsou označeny, aby spotřebitel byl ujištěn o jejich nezávadnosti a mohl se rozhodnout, zda je chce koupit.

Ozářením semen rostlin může vyvolat mutaci, v důsledku níž se změní důležité vlastnosti kulturních plodin, nebo vznikne nová odrůda s vyšším výnosem, vyšším obsahem výživných látek, odolnější proti chorobám a nepřízní počasí, proti polehnutí, s výhodnější dobou zralosti apod. Záření se ve šlechtitelství používá již více než 50 let.

Likvidace škodlivého hmyzu

Značná část úrody, hlavně v rozvojových zemích, padne za oběť škodlivému hmyzu. Jiný hmyz přenáší nebezpečné choroby na užitková zvířata i na člověka. V boji proti hmyzu se často používají jedovaté nebezpečné látky, škodlivé i pro člověka a celou ostatní přírodu. Radiační technika životní prostředí neohrožuje ani v nejmenším. V laboratoři se vypěstuje velké množství samečků příslušného hmyzu a ti se sterilizují, tj. ozáří se takovou dávkou záření, že nemo-



Ozařování brambor v Japonsku

hou mít živé potomstvo. Ozáření samečci se vypustí do přírody, páří se se samičkami, ale nakladená vajíčka jsou neoplozená a nová generace se nenarodí. V některých zemích se tak podařilo výrazně snížit populace škodlivého hmyzu.

Hnojiva

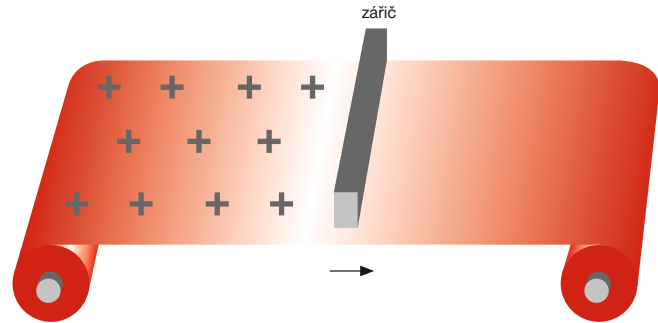
Hnojiva jsou drahá a v případě nadměrného nebo chybného použití mohou ohrozit jak zdraví člověka, tak poškodit životní prostředí. Je třeba, aby se hnojivo dostalo do rostlin a minimalizovaly se jeho ztráty vznikající špatným rozmístěním nebo hnojením v nevhodnou dobu. Vzorek hnojiva se označí vhodným radionuklidem, např. ^{32}P (běžný neradioaktivní izotop ^{31}P je součástí hnojiva a jeho „bratříček“ ^{32}P se chemicky chová úplně stejně). Radioaktivní ^{32}P se dá snadno zjistit, a proto je možno sledovat, kolik hnojiva rostlina přijala, kolik zůstalo v půdě, kolik se ho spláchlo do vodotečí apod. Na základě těchto znalostí se ztráty hnojiva dají snížit na minimum.

Krmivářství

Hospodářská zvířata v moderních chovech dostávají různé krmné směsi, u nichž záleží na vyváženosti složek. Radioaktivní stopovače při výzkumu pomohou určit optimální dobu míchání nebo tvar míchacího zařízení,



Analýza chemického složení historických artefaktů jadernými metodami



Odstraňování elektrostatického náboje z povrchu látek

aby některé složky směsi nezůstaly příliš koncentrované a nevyvolaly u zvířete potíže z předávkování.

Lesnictví

Sazenice lesních stromů se pro snadnou manipulaci balí do speciálních materiálů, které byly vyrobeny z ozářeného polypropylenu. Takový materiál se snadno v půdě rozloží a kořínky sazenic prorostou. Podobné materiály se používají jako tzv. geotextilie pro zpevňování svahů. Po vytvoření zpevňujícího rostlinného krytu se látka rozloží a neznečišťuje životní prostředí.

Chovatelství

Stejně jako v lidské medicíně se i ve veterinární široce uplatňují radiační diagnostické metody (rentgen, radioimunoanalýza, radioenzymatická analýza). Kontroluje se zdravotní stav, podle hladiny hormonů v krvi se stanovuje správná doba k inseminaci. Radiačními technikami se kontroluje nezávadnost krmiva.

PRŮMYSL

Radioaktivita se dá snadno měřit a této vlastnosti lze dobře využít všude tam, kde je potřeba „vystopovat“ nějaký prvek nebo sloučeninu. Například když se ve válcovnách vnese do železa malé množství radio-

aktivního izotopu železa, dá se přesně určit jeho přítomnost i po absolvování všech procedur – tažení, válcování atd. Radioaktivní stopovač tak umožní snížit ztrátu materiálu při opracování, zjistit místa nerovnoměrného propracování atd.

Radioaktivní stopovací techniky jsou široce používány např. při sledování pohybu a distribuce hmoty v různých technologických zařízeních. Sledují se průtoky, míchání směsí, filtrace, úniky, koroze, kontroluje se čistota surovin. Záření se používá pro měření a kontroly průmyslových procesů v papírnictví, ocelářství, uhelném průmyslu – šetří zdroje a energii.

Kosmické rakety a satelity využívají pro zásobování elektrickým proudem tzv. „jaderné baterie“.

Kontrola opotřebení

Radioaktivním stopovačem se označí namáhaná součástka a pak se měří přírůstek nebo úbytek radioaktivity v mazací nebo chladicí kapalině. Zabudováním malého zářiče do stěny vysoké pece lze přesně zjistit okamžik protavení výstelky pece, pec včas odstavit a opravit.

Tloušťkoměry a hladinoměry

V papírnách, sklárnách, gumárnách, při výrobě plastů a v mnoha jiných provozech

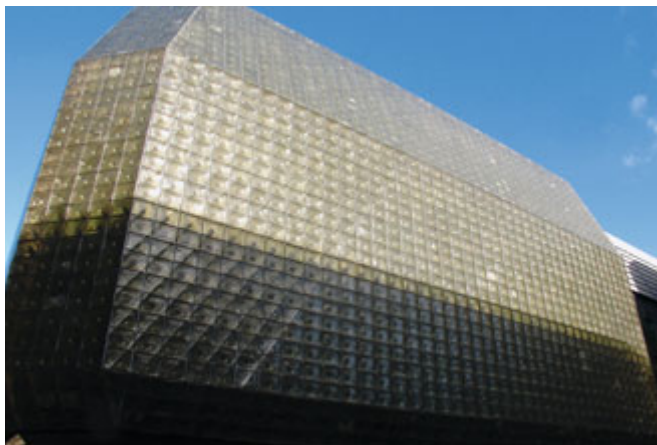
měří čidla vybavená radioaktivním zářičem a detektorem tloušťku materiálů na běžících páscech, nebo hladinu kapaliny v nádobách a nádržích. Dají se použít všude tam, kde nelze kvůli teplotě, korozi, tlaku nebo z jiných důvodů použít klasická měřidla. Výhodou radionuklidových měřičů je, že měření probíhá bez doteku s měřenou látkou, údaj o naměřené hodnotě je k dispozici okamžitě a průběžně v kteroukoliv chvíli a měřiče nejsou drahé.

Radiografie

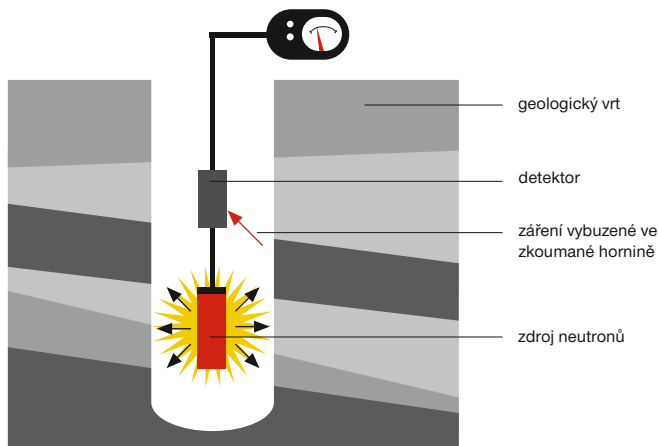
Tato metoda pracuje na principu rentgenů. Záření prozáří materiál a odhalí v něm dutiny, vady, slabá místa, zobrazí části jinak neviditelné. Prozařováním se kontroluje kvalita svarů potrubí, kvalita strojních dílů, konstrukcí atd. Záření spolehlivé a včas odhalí netěsnosti a závady.

Radiační polymerace

U dálkových kabelů potažených izolační vrstvou velmi záleží na její kvalitě. Pevný, pružný, odolný a dokonale těsnící materiál lze vyrobit tak, že kabel obalený plastem se ozáří, záření způsobí v obalu tzv. zesíťování, tj. vznik mnoha chemických vazeb, a vznikne materiál, který má všechny žádané vlastnosti. Pomocí ionizujícího záření lze vyrábět různé druhy pěnových polymerů, které se používají



Dodáním různých příměsí do skla a ozářením různými dávkami se docílí mnoha barevných odstínů



Neutronová karotáž

pro čalounění automobilů, k výrobě sportovní výstroje a obuvi. Velké výhody přináší radiální polymerace tenkých vrstev laků, lepidel, tiskařských barev atd. Lze tak vyrábět různé lamináty, obalové materiály, tapety atd. Při výrobě polymerních vláken pro textilní průmysl se zářením dá dosáhnout naroubování vhodných chemických látek na povrch vlákna, čímž se modifikují vlastnosti – nasákavost, nemačkovost atd. Vytvrzování nátěrových laků bez použití zdraví škodlivých rozpouštědel šetří životní prostředí.

Jestliže se vhodný pórovitý materiál nechá nasáknout monomermem a poté se ozáří dávkou, která vyvolá polymeraci, lze vyrobit materiál se zcela novými vlastnostmi – tvrdostí, leštitelností atd. Tyto kompozitní materiály nacházejí uplatnění jako podlahové krytiny, náhražky vzácných dřev, obkládací cihly atd.

Zářením se také dají barvit různé druhy skel do odstínů žluté, hnědé, kouřové, ametystové. Ozářením lze dosáhnout jinak těžko realizovatelných barevných dekorů. Ve větším měřítku byla u nás tato metoda poprvé aplikována na skleněném obložení budovy Nové scény Národního divadla v Praze a na stanici Jinonice pražského metra.

VODOHOSPODÁŘSTVÍ

Radioaktivní indikátory pomáhají sledovat prosakování, propojení a cesty spodních vod. Pohlcováním záření se určuje tloušťka vrstev ledu a obsah vody ve sněhové pokrývce, což je důležité pro odhad množství vody při jarním tání. Zářiče umístěné v blízkosti studní brání tzv. zaokrování studní – rozvoji mikroorganismů a tvorbě hydroxidů železa. Radioanalytické metody pomáhají měřit průtok vody v potrubí i na povrchu, parametry filtrace vody v pískovém podloží, čištění odpadních vod a účinnost úpraven pitné vody.

GEOLOGIE

Tzv. radionuklidová karotáž pomáhá získat podrobné znalosti o geologickém složení hornin. Do vrtu se spustí zářič a vyhodnocovací zařízení, které měří záření vyvolané v hornině a určí obsahy prvků přítomných v horninách. Obsah síry v uhlí nebo jeho popelnatost se měří rentgenfluorescenční analýzou. Rozptylem neutronů se měří vlhkost půdy.

ARCHEOLOGIE

Radionuklidové metody datování určují stáří hornin i stáří nalezených archeologických

předmětů. Měření aktivity zbytku izotopu uhlíku ^{14}C spolehlivě určí stáří dřeva, kostí, textilií, slonoviny. Radioanalytické metody určí složení barev na obrazech starých mistrů, složení mincí, keramiky, mramoru, skla. Poskytnou tak informaci o metodě zpracování, místě původu, stáří a pravosti.

OCHRANA UMĚLECKÝCH PAMÁTEK

Ozáření ničí plísně, hmyz a mikroby, které ohrožují historické předměty z papíru, textilu a dřeva. Zářením pronikne celým předmětem a zničí např. červotoče i hluboko v gotických dřevěných sochách, kde povrchové chemické ošetření nepomáhá. Zachraňují se tak umělecké, historické a kulturní hodnoty. U nás je ozařovna uměleckých předmětů v Roztokách u Prahy.

STAVEBNICTVÍ

Neutronové vlhkoměry měří obsah vlhkosti v čerstvém i tuhacím betonu, což je velmi důležité např. při stavbě přehrad nebo jiných obřích betonových konstrukcí, kde na jakosti betonu velmi záleží. Kontrola obsahu radioaktivity vyřadí stavební materiály, jako např. panely, které by mohly uvolňováním



Hlásič požáru

radonu ohrožit zdraví obyvatel. Prozařovací metody odhalí nebezpečné defekty např. v konstrukcích mostů a mohou zabránit neštěstí.

KRIMINALISTIKA

Radioanalytické metody rozeznají spolehlivě třeba padělaný obraz od originálu nebo falzifikáty bankovek. Radiodiagnostické metody pomohou při určování otrav nebo identifikaci pozůstatků neznámého člověka. Speciální radioaktivní prášek může zviditelnit otisky prstů lépe než klasické metody.

ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

SLEDOVÁNÍ PŘÍTOMNOSTI ŠKODLIVÝCH LÁTEK

Aktivační analýza, rentgenfluorescenční analýza nebo jiné radioanalytické metody zjistí obsah prvku (třeba některého znečišťovatele životního prostředí) ve vzorku již v množství biliontiny gramu. Pomáhají sledovat postupující znečištění životního prostředí nebo postup nebezpečných látek potravním řetězcem od zdroje znečištění k člověku.

Vypočítejte si vlastní letošní dávkový ekvivalent. Sečtete podle tabulky veškeré možnosti ozáření, které jste v tomto roce podstoupili. Jak se liší od průměrné světové hodnoty?

Průměrné ozáření z půdy a z radonu představuje		1,350 mSv
Připočtete, bydlíte-li:		0,3 mSv
na úrovni moře		
ve výšce 300 m nad mořem		0,325 mSv
ve výšce 600 m nad mořem		0,375 mSv
ve výšce 1000 m nad mořem		0,450 mSv
v žulovém domě		1,350 mSv
v dřevěném domku (odečtete)		-0,135 mSv
poblíž uhelné elektrárny nebo topíte uhlím		0,040 mSv
na hranici pozemku jaderné elektrárny		0,002 mSv
1,5 km od jaderné elektrárny		0,000 2 mSv
5 km od jaderné elektrárny		0,000 02 mSv
pokud nevětráte		1,350 mSv
jíte běžné potraviny a nápoje		0,350 mSv
díváte se denně 1 hodinu na barevnou televizi		0,002 mSv
pracujete denně 1 hodinu s počítačem		0,002 mSv
letěl jste letadlem na vzdálenost 4 000 km		0,250 mSv
používáte starší hodinky s luminofory		0,010 mSv
byl jste: na rentgenu plic		0,800 mSv
na rentgenu trávicího traktu		4,000 mSv
na radiofarmaceutickém vyšetření		0,300 mSv

ČIŠTĚNÍ KOUŘOVÝCH PLYNŮ A ODPADNÍCH VOD

Oxid siřičitý nebo oxidy dusíku ve spalných plynech z uhelných elektráren, továren nebo z hutí lze smícháním s vhodnou chemikálií a ozářením převést na neškodné nebo dokonce užitečné látky (hnojivo). Splaškové odpadní vody se ozařují jednak proto, aby se zničily choroboplodné zárodky, jednak záření rozloží některé nebezpečné sloučeniny na neškodné. Záření gama nebo elektro- nové paprsky z urychlovačů rozloží kyanidy, fenoly, urychlí rozpad polymerů atd.

OCHRANA PŘED POŽÁREM

Ionizační hlásiče požáru známe z mnoha veřejných prostorů nebo průmyslových provozů. Malý radioaktivní zářič ionizuje ovzduší, a jakmile se v blízkosti objeví kouř, ionizace na částicích kouře zesílí a spojí se poplašný elektrický obvod.

Snad právě v této souvislosti se o ionizujícím záření – stejně jako o ohni – dá vyslovit známé rčení, že je dobrým sluhou, ale zlým pánem. K tomu, aby zůstalo vždy jen dobrým sluhou člověka, je potřeba více o něm vědět a znát.





TAJEMSTVÍ ENERGIE HMOTY

K získání dostatečného množství energie prošli lidé dlouhou a obtížnou cestu tisíciletími. Ani dnes nejsme u konce. Ukazuje se, že tradiční energetické suroviny uhlí, ropa a zemní plyn nebudou lidstvu k dispozici navždy a musíme počítat s tím, že v nedaleké budoucnosti se jejich zásoby budou snižovat. Do popředí zájmu se dostávají nové úsporné technologie i netradiční zdroje energie. Nemůžeme se však spoléhat na to, že by se v dohledné době celosvětová spotřeba energie snižovala. Se zvyšováním úrovně rozvojových zemí i s dalším rozvojem vyspělých států budou nároky na dostatek energie stále vyšší. Ani jaderná energetika v současné podobě není konečným řešením na cestě za energií. Velké prostředky jsou vkládány do výzkumu nových typů jaderných reaktorů a zejména do výzkumu termojaderné syntézy. Slavný vzorec Alberta Einsteina $E = m \cdot c^2$ se tak stal jedním ze základních vkladů do naší energetické budoucnosti.

ENERGIE HMOTY

V roce 1905 formuloval tehdy ještě neznámý fyzik Albert Einstein svou speciální teorii relativity. Einstein tehdy pracoval jako patentový úředník v Bernu, kde posuzoval význam patentových přihlášek vynálezců, které vyžadovaly znalost fyziky. Svou speciální teorii relativity doslova přivodil revoluci v dosavadním chápání fyziky. Mimo jiné usoudil, že mezi hmotností a energií je určitá souvislost a hmotnost je pouze „zvláštní formou energie“.

Ve vzájemných vztazích obou veličin pak platí známá rovnice $E = m \cdot c^2$, kde E je energie, m hmotnost a c rychlost světla $300\,000\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

V 1 kg jakékoli látky je tedy ukryta energie

$$E = m \cdot c^2 = 1 \text{ kg} \cdot (3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 =$$
$$= 9 \times 10^{16} \text{ J} = 25 \text{ TWh.}$$

Jestliže uvážíme fakt, že Jaderná elektrárna Dukovany tuto energii (ve formě elektrické) vyrábí asi 2 roky, pak si uděláme představu, o jak velkou hodnotu jde.

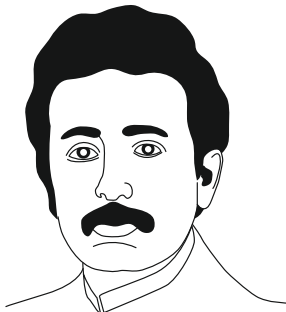
V látce je tedy ukryta obrovská energie (tzv. klidová energie), ale není zase tak úplně jednoduché tuto klidovou energii látky v praxi využít. Brání nám v tom příčiny fyzikální i technické. Přesto se nám v jaderných reaktorech daří při štěpení jader uranu energeticky využít až 0,1 % jejich klidové energie.

$$E = m \cdot c^2$$

Povězme si něco více o Einsteinově slavném vzorci. Až do doby jeho objevu platil názor, že hmotnost a energie jsou dvě naprosto rozdílné a na sobě nezávislé veličiny. Energie tělesa souvisí s jeho pohybovým stavem, vyjadřuje schopnost tělesa konat práci, zatímco hmotnost tělesa souvisí s jeho setrvačnými a gravitačními účinky. Po staletí pátrali učenci po podstatě struktury látky, až se nakonec roku 1770 francouzskému chemikovi A. L. Lavoisierovi podařilo objevit zákon zachování hmotnosti. Roku 1842 německý lékař J. R. Mayer analogicky dokázal, že také energie nemůže být uměle vytvořena, ani se nemůže ztratit, ale pouze



Antoine Laurent Lavoisier používal při svých chemických pokusech jemných vah. Prokázal, že se hmotnost neztrácí. To, co jedné sloučenině po experimentu na hmotnosti chybělo, zbylo buď jako látka nová, nebo přibýlo na hmotnosti jiné sloučenině. Součet hmotností před i po pokusu zůstal stejný. Zákon zachování hmotnosti ve stejné době formuloval také ruský vědec M. V. Lomonosov.



O Albertu Einsteinovi a jeho teorii relativity toho bylo napsáno již mnoho. Uvedme, že teorie relativity existují dvě. Ta z roku 1905, o které jsme hovořili, se nazývá speciální teorie relativity. O deset let později uveřejnil A. Einstein obecnou teorii relativity, která je zobecněním speciální teorie relativity pro případ gravitace.



Julius Robert Mayer nebyl fyzik, ale přesto se mu z fyziologických pozorování podařilo objevit zákon zachování energie. Jeho myšlenky však zprvu nebyly uznány.

se přeměňovat z jedné formy v druhou. Objevil tak zákon zachování energie, který později přesně formuloval německý fyzik H. Helmholtz.

Poté však přichází A. Einstein a prohlašuje: energie a hmotnost nejsou na sobě nezávislé veličiny. Naopak, energie látky je úměrná její hmotnosti a oba zákony zachování, hmotnosti a energie, platí současně vedle sebe.

Energie a hmotnost jsou tedy navzájem úměrné a jsou spolu neoddělitelně vázány překvapivě jednoduchým vztahem $E = m \cdot c^2$. A právě tento Einsteinův slavný vzorec je klíčem v našem putování za energií. Určité hmotnosti odpovídá určitá energie a naopak. Například každé těleso, které uvedeme do pohybu, se stává těžší, protože energie, kterou mu dodáváme, představuje přírůstek hmotnosti. Čím větší rychlostí se pohybuje, tím více jeho hmotnost vzrůstá. Nemějte však obavy o své tělesné proporce, protože při rychlostech, jichž můžeme dosáhnout my, je tento přírůstek úplně zanedbatelný. I kdybychom se

mohli pohybovat rychlostí $42\,000\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, zvětšila by se naše hmotnost pouze o 1 %. K tomu, aby těleso zvětšilo svou hmotnost na dvojnásobek, musí se pohybovat rychlostí $261\,000\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Stejně tak se zvětšuje hmotnost tělesa i při zahřívání, neboť tepelná energie je určována rychlostí kmitavých pohybů částic tělesa. Při větší rychlosti kmitání se zvětšuje hmotnost jednotlivých částic tělesa a tím i hmotnost tělesa jako celku. Při ochlazování (kdy se tepelná energie uvolňuje) se hmotnost tělesa naopak zmenšuje. **Změny energie jsou tedy spojeny vždy se změnami hmotnosti.**

Uvedme dále jednotky hmotnosti a energie používané v jaderné fyzice. Jednotka hmotnosti kilogram a jednotka energie joule jsou totiž pro mikrosvět částic příliš velké. Proto z praktických důvodů používáme ve světě atomů jako jednotku **hmotnosti** (označovanou $\underline{u}$) $1/12$ hmotnosti neutrálního atomu uhlíku ^{12}C , což je přibližně $1,66 \times 10^{-27}\text{ kg}$ (tzv. atomová hmotnostní jednotka).

Pro naše úvahy postačí předpokládat, že hmotnost částice jádra – nukleonu je zhruba

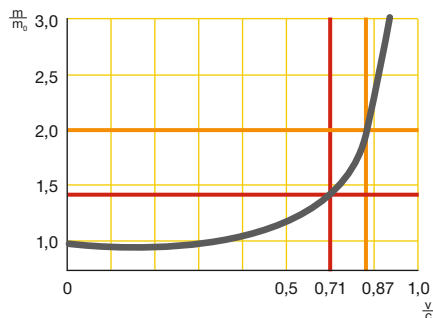
ba rovna $1 \underline{u}$. Hmotnost atomu v jednotkách $\underline{u}$ bude potom přibližně rovna počtu nukleonů. Například ^{235}U má hmotnost $235,04393 \underline{u}$, nám stačí uvažovat hodnotu $235 \underline{u}$.

Energii ve světě atomů vyjadřujeme v elektronvoltech (eV). Energii 1 eV získá elektron (s elektrickým nábojem $1,602 \times 10^{-19}\text{ C}$) při urychlení elektrickým polem o napětí 1 V. Číselně je 1 eV roven $1,602 \times 10^{-19}\text{ J}$, což je i pro svět atomů jednotka poměrně malá, a proto se používají násobky ke V = 10^3 eV a MeV = 10^6 eV .

V těchto jednotkách odpovídá podle Einsteinova vztahu **hmotnosti $1 \underline{u}$ energie 931,494 MeV.**

STRUKTURA LÁTKY

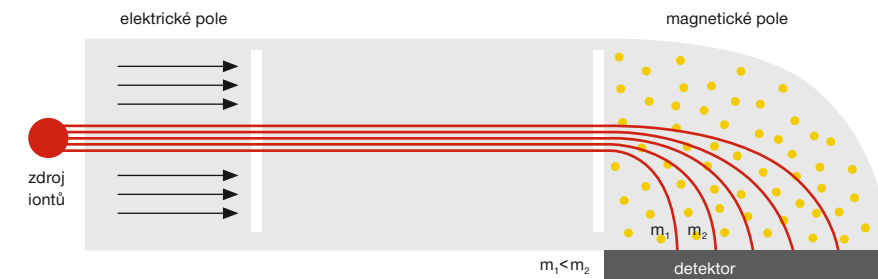
V době objevu teorie relativity toho nebylo o struktuře látky známo mnoho. Představa atomu jako základního elementu látky prodělala od 5. stol. př. n. l., kdy ji poprvé vyslovil řecký filozof Demokritos, dlouhý vývoj. Základní poznatky přinesl rok 1910, kdy britský fyzik E. Rutherford sestavil planetární model



Graf závislosti hmotnosti částice na rychlosti. Závislost hmotnosti částice na rychlosti je vyjádřena vzorcem

$$m = m_0 / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Hmotnost je rovna m_0 (klidová hmotnost) jen při $v = 0$. Při malých rychlostech oproti rychlosti světla c je přírůstek hmotnosti nepatrný. Při rychlostech blízkých c již není možno přírůstek hmotnosti zanedbat a musíme s ním počítat např. při návrhu velkých urychlovačů nabitých částic.



Princip hmotnostního spektrografu. Ionty jsou nejprve urychleny elektrickým polem a potom procházejí magnetickým polem, které je orientováno kolmo na směr jejich pohybu. Poloměr zakřivení drah iontů je přímo úměrný hmotnosti částic.

atomu. Ten pak později zdokonalil dánský fyzik **N. Bohr** (1913) a konečně po objevu neutronu i německý fyzik **W. K. Heisenberg** (1934). Tím samozřejmě vývoj názorů na strukturu látky neskončil, objevily se nové teorie, nová a důmyslnější experimentální zařízení, na kterých se potvrzují překvapující předpovědi. Tak jak moderní fyzika proniká stále více do hlubin struktury látky, objevuje se atom stále složitější. Jak vypadá skutečně elementární částice látky? Na tuto otázku nemá fyzika dodnes definitivní odpověď.

Připomeňme si: atom se skládá z nesmírně malého jádra s kladným elektrickým nábojem, kolem něhož obíhají záporně nabitě elektrony. Jádro atomu tvoří dva druhy částic: kladné protony a neutrální neutrony. Dohromady jim říkáme **nukleony** (z latinského nucleus = ořech, jádro). Počet protonů v jádře označujeme Z a počet nukleonů A ; počet neutronů je pak $A - Z$. Konkrétní atom prvku X zapisujeme A_ZX . Elektronový obal atomu má přibližně desettisíckrát větší průměr než samotné jádro. Hmotnost elektronu je asi 1836krát menší než hmot-

nost nukleonu. To je tak malá hodnota, že ji můžeme při pozorování hmotnosti atomu zanedbat – na elektrony připadá méně než 0,05 % celkové hmotnosti atomu. Prakticky je tedy veškerá hmotnost atomu koncentrována do jádra, které má obrovskou hustotu – 1 cm^3 „jaderné látky“ by vážil 400 milionů tun!

Protože je však velikost jádra tak mizivě malá oproti rozměru celého atomu, skládá se látka především z prázdného prostoru.

Naše cesta za uvolňováním klidové energie látky vede přímo k jádrům atomů.

VAZEBNÁ ENERGIE JADER

JADERNÉ SÍLY

Jakmile se zjistilo, že jádro atomu se skládá z protonů a neutronů, vznikla otázka, jaké síly drží tyto částice pohromadě v atomovém jádře.

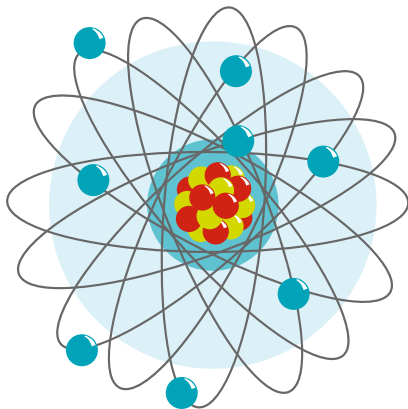
Je zřejmé, že tyto síly nemohou být elektrické, neboť dva kladně nabitě protony se podle Coulombova zákona odpuzují.

Ani přitažlivá gravitační síla toho mnoho nezachrání, protože po výpočtu zjistíme, že je asi $10^{36} \times$ slabší než odpudivá elektrická. Zřejmě jde o nový druh sil, které se nazývají **jaderné síly**. O vysvětlení jejich podstaty se významně zasloužil japonský fyzik H. Yukawa v roce 1935. Přitažlivé jaderné síly jsou asi tisíckrát silnější než síly elektromagnetické, ale mají velmi nepatrný dosah. Začínají působit teprve tehdy, když jsou nukleony tak těsně u sebe, že se téměř dotýkají (je to podobné jako u lepidlových bonbonů, které také drží spolu teprve tehdy, když se dotýkají). Další vlastností těchto sil je, že jsou nábojově nezávislé. To znamená, že mají stejnou velikost mezi dvěma protony, dvěma neutrony i mezi protonem a neutronem.

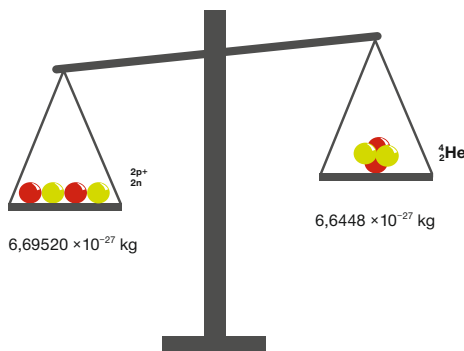
HMOTNOSTNÍ SCHODEK A VAZEBNÁ ENERGIE

V roce 1919 sestavil britský chemik

F. W. Aston nový typ hmotnostního spektrografu (přístroje, kterým se dá zjišťovat přesná hmotnost izotopů prvků podle jejich pohybu



Stavba atomu – schématický obrázek atomu kyslíku. Tento atom kyslíku ^{16}O má 8 protonů, 8 neutronů a 8 elektronů. Tento izotop má v přírodní směsi zastoupení 99,76 %.



Názorné vysvětlení hmotnostního schodku. Volné nukleony jsou těžší než jádro z nich vytvořené. Rozdíl hmotností nazýváme hmotnostní schodek.

v elektrických a magnetických polích). Při měřeních zjistil, že hmotnost atomových jader je o něco nižší než součet hmotností jednotlivých nukleonů, které jádra tvoří. Rozdíl mezi oběma hmotnostmi říkáme **hmotnostní schodek jádra**. K vysvětlení tohoto poznatku nám stačí opět vzorec Alberta Einsteina.

Atomové jádro je vázaný systém částic. Představte si, že bychom chtěli jádro rozdělit na jednotlivé nukleony. Museli bychom překonat soudržnost nukleonů vázaných jadernými silami a dodat jim energii. Jestliže však částici dodáme energii, vzroste její hmotnost. Volné nukleony musí být tedy těžší než vázaná soustava nukleonů. Naopak při spojení protonů a neutronů do jednoho jádra snižuje jejich energii práce přitažlivých jaderných sil, dochází k uvolnění stejně velké energie a k úbytku hmotnosti. Energie volných nukleonů je tedy větší než energie jádra, které z nich složíme, o rozdíl nazývaný se **vazebná energie**.

To platí i obecně: každá částice ve vesmíru patří k nějakému systému (jádro, atom, molekula, krystal, planeta...). Pokud chceme částici od systému oddělit, musíme jí dodat energii větší, než kterou je v systému vázána. Přináležitost částice k nějakému

systému je tedy charakterizována vazebnou energií E_v , kterou částice musí za vstup do systému „zaplatit“. Přitom snižuje svou hmotnost o hodnotu $m = E_v \cdot c^{-2}$.

Podle toho vazebnou energii jádra chápeme i jako míru jeho stability. Čím je vazebná energie jádra větší, tím je nesnadnější rozložit ho na jednotlivé volné nukleony.

Řekněme si ještě pár slov o vazebných energiích atomu a molekuly. Podle předchozího výkladu bude vazebná energie atomu E_{VA} energie potřebná k oddělení elektronového obalu od jádra atomu a vazebná energie molekuly E_{VM} energie potřebná k oddělení jednotlivých atomů molekuly od sebe. O jak velké hodnoty energie jde? Měřením a výpočty byly získány následující výsledky:

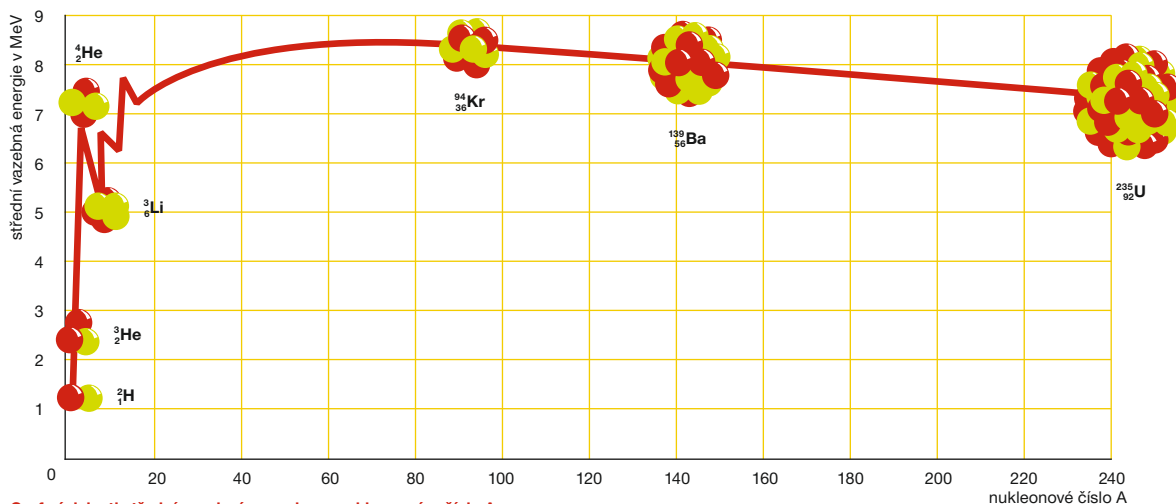
- **Vazebná energie jader je velká, pohybuje se od 2,22 MeV** (pro deuteron – jádro těžkého vodíku ^2H) **až po 1800 MeV** (pro těžká jádra).
- **Vazebná energie atomu nepřevyšuje 0,12 MeV, vazebná energie elektronu v atomu vodíku je 13,6 eV. Vazebná energie atomů v molekulách je pouze několik eV.**

CESTA K JADERNÉ ENERGII

Lze tedy uvolnit alespoň malou část obrovské klidové energie látky, která je soustředěna v jádrech atomů – jaderné energie?

Pokusy a pozorování krátce po objevu radioaktivity v roce 1896 ukázaly, že se při rozpadu nestabilních (radioaktivních) atomů uvolňuje energie. Množství energie, které získáme při radioaktivním rozpadu, je však pro praktické využití bezvýznamné. Například přirozeným rozpadem jednoho kilogramu radia se uvolní přibližně tolik energie, kolik odpovídá spálení 60 tun uhlí. Rozpad však probíhá velmi pomalu – polovina určitého počátečního množství radia se rozpadne teprve za 1620 let.

Vraťme se nyní ještě jednou k F. W. Astonovi. Jeho přesná měření na hmotnostním spektrografu ukázala, že vazebná energie je u jader jednotlivých prvků a jejich izotopů různá. Je zřejmé, že čím více nukleonů je v jádře, tím větší bude vazebná energie. Závislost vazebné energie na počtu nukleonů v jádře však není lineární. Odchytky způsobují efekty související jak se strukturou jader, tak i s elektrostatickým odpuzováním kladně nabitých protonů. Zobrazíme si gra-



Graf závislosti střední vazebné energie na nukleonovém čísle A

ficky **střední vazebnou energii** (tj. vazebnou energii připadající na jeden nukleon) v závislosti na počtu nukleonů.

Na tomto grafu lépe vyniknou všechny odchylky od lineárního průběhu – hodnoty střední vazebné energie nejprve rychle rostou od 0 (pro $A=1$) do 8 MeV (pro $A=16$), pak jsou zhruba stejně velké s maximem o hodnotě 8,6 MeV (pro $A=60$, tj. ${}^{56}\text{Fe}$, ${}^{62}\text{Ni}$) a nakonec pomalu klesají do 7,6 MeV pro nejtěžší jádra.

Skutečnost, že těžká jádra jsou méně stabilní, je třeba vztáhnout k tomu, že při zvyšování počtu nukleonů sice přitažlivé jaderné síly v jádře narůstají, ale působí pouze mezi sousedními nukleony. Odpudivé síly mezi protony rovněž narůstají, působí však mezi všemi protony. Tím se vazba mezi částicemi poněkud uvolní.

Nejdůležitějším závěrem je však pro nás možnost využití jaderné energie: z grafu plyne, že jadernou energii můžeme uvolňovat dvěma způsoby – štěpením (viz konec grafu) a slučováním (viz začátek grafu).

ŠTĚPENÍ

První možností je **štěpení těžkých jader** na středně těžká. Podle grafu jsou produkty

štěpení stabilnější a celková vazebná energie (která se uvolní při jejich vzniku) je větší než vazebná energie těžkého jádra. Proto mohou těžká jádra štěpením přecházet do stavu s nižší klidovou energií a přitom se uvolňuje poměrně velká energie ve formě kinetické energie produktů štěpení – kladně nabitá jádra jsou svým elektrickým polem odmrštěna od sebe a při zabrzdění těchto částic v palivu, moderátoru a v ostatních částech reaktoru přejde jejich kinetická energie postupně až na energii kmitů atomů a molekul, tedy do formy tepelné energie. Z grafu vidíme, že se přitom uvolní asi 1 MeV na nukleon. Při jednom procesu štěpení těžkého jádra se tak uvolní okolo 200 MeV, což je podle Einsteinova vztahu v jednotkách μ asi $200/931,494 = 0,21 \mu$. Z kapkového modelu atomových jader plyne, že štěpení je energeticky výhodné, je-li parametr štěpení $Z^2/A > 17$. Tato podmínka je splněna pro všechna jádra těžší než Ag. Prakticky je však štěpení možné pouze pro jádra s $A > 230$ (Th, U, Pu). Největší průmyslový význam má v současné době štěpení jader uranu ${}^{235}\text{U}$ v lehkovodních reaktorech.

Jaká část klidové energie se uvolní? Tento podíl jednoduše spočítáme, vyjádříme-li klidovou hmotnost uranu v jednotkách μ . S jistou chybou lze hmotnost nukleonu považovat za 1μ . Pak ${}^{235}\text{U}$ má hmotnost asi 235μ . Uvolněná klidová energie $0,21 \mu / 235 \mu = 8,9 \times 10^{-4}$ odpovídá asi 0,1 % klidové energie ${}^{235}\text{U}$.

SLUČOVÁNÍ

Druhou možností, jak získat energii, je **slučování velmi lehkých jader** na jádra těžší (termojaderná syntéza). Z našeho grafu je zřejmé, že slučováním dvou lehkých jader (např. ${}^2_1\text{H}$ a ${}^3_1\text{H}$) s nízkou vazebnou energií vznikne stabilní jádro s vysokou vazebnou energií.

Jejich rozdíl se přitom uvolní. Reakci můžeme chápat tak, jakoby útvar složený původně ze dvou jader přešel do nižšího energetického stavu. Z průběhu grafu střední vazebné energie je zřejmé, že při slučování lehkých jader se může získat až několikanásobně více energie na nukleon než v případě jaderného štěpení. Reakce jaderné syntézy jsou základními procesy uvolňování energie na Slunci a ve hvězdách.

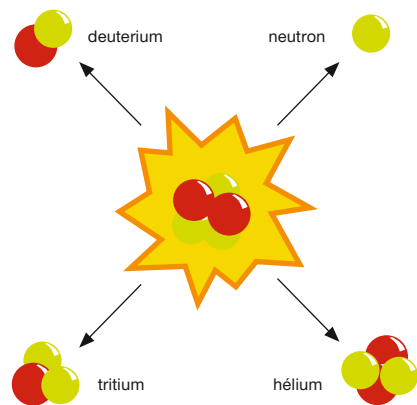
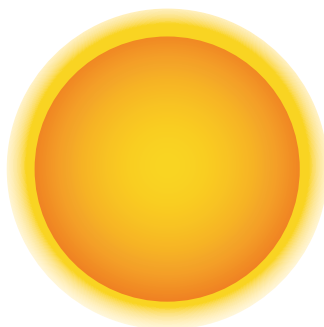


Schéma jaderného slučování (fúze). Znázorněná reakce probíhá velmi rychle. Tuto reakci budou pravděpodobně využívat první energetické termojaderné reaktory. Při jaderném slučování se uvolňuje až 1% klidové energie interagujících částic.



Slunce – přírodní termojaderný reaktor

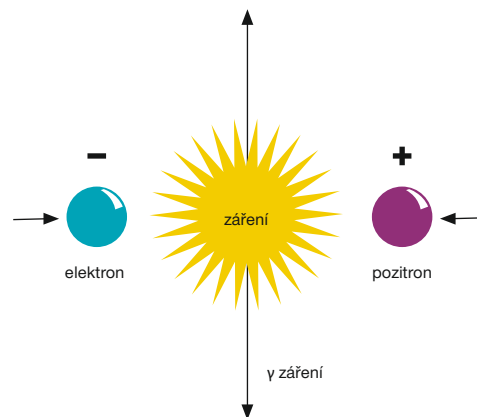
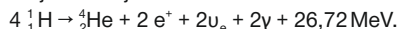


Schéma anihilace – částice elektron se svou antičásticí pozitronem. Setkají-li se částice s antičásticí, dojde k anihilaci, při které se uvolní jejich klidová energie a změní se v příslušné množství záření. Využití klidové energie je až 100 %.

Proces vzniku sluneční energie vysvětlil německý fyzik **H. A. Bethe** v roce 1938 jako vodíkovou syntézu, při níž se v několika krocích slučují čtyři vodíková jádra (protony) do jednoho jádra helia:

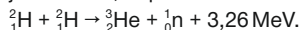


Z hlediska našich měřítek je energetická bilance Slunce skutečně úctyhodná: každou vteřinu se jadernými silami mění 0,5 miliardy tun vodíku v helium s celkovým hmotnostním úbytkem 4 miliony tun. Celkový uvolňovaný výkon je $3,6 \times 10^{26}\text{ W}$! A přitom je naše Slunce ve srovnání s ostatními hvězdami docela malé...

Jaká část klidové energie se při této reakci uvolňuje? Při jedné reakci syntézy se uvolní 26,7 MeV, což je v atomových hmotnostních jednotkách $26,7/931,494 = 0,029\text{ u}$.

Klidová hmotnost 4 vodíkových jader ^1_1H je přibližně 4 u. Pak uvolněná klidová energie $0,029\text{ u}/4\text{ u} = 7,25 \times 10^{-3}$ odpovídá 0,7 % klidové energie slučovaných částic.

Pro budoucí řízené uvolňování energie v termojaderných reaktorech mají význam jiné reakce, např.



Tato reakce probíhá mnohem rychleji než syntéza na Slunci, což je důležité vzhledem k nutnosti udržet v termojaderných reaktorech po určitou dobu velice horké husté plazma pro nastartování reakce. Těžký vodík ^2_1H (deuterium) máme ve světových mořích k dispozici v prakticky nevyčerpatelném množství.

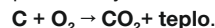
NEJLEPŠÍ JE ANTIHMOTA

Všimněme si nyní dalších způsobů uvolňování energie a vzájemně je porovnejme. Povídali jsme si již o štěpení těžkých jader, kde můžeme využít až 0,1 % klidové energie štěpeného jádra, a o slučování lehkých jader, které je ještě 7krát výhodnější. Tyto procesy probíhají v důsledku působení jaderných sil. Hovořili jsme však také o atomech a molekulách. Jaké zde jsou možnosti pro uvolňování energie?

Každý atom se skládá z kladně nabitého jádra a záporně nabitého elektronového obalu. Zatímco v jádře působí mezi nukleony zejména jaderné síly, mezi elektrony a jádrem jsou to síly elektromagnetické.

Stejně silы jsou zodpovědné i za soudržnost molekul – stabilních skupin atomů.

Podívejme se z energetického hlediska na známou reakci **spalování**, která probíhá např. v uhelných elektrárnách:



Je zjištěno, že energie uvolněná při vzniku 1 molekuly CO_2 z C a O_2 je 4,1 eV.

V jednotkách u: $4,1/931,494 \times 10^6 = 4,4 \times 10^{-9}\text{ u}$. Jaká část klidové energie C a O_2 se uvolnila? Klidová hmotnost atomu uhlíku je 12 u, molekula kyslíku má klidovou hmotnost přibližně 2krát $16\text{ u} = 32\text{ u}$ (kyslík má v jádře 16 nukleonů), dohromady máme hodnotu 44 u. Uvolněná část klidové energie je $4,4 \times 10^{-9}\text{ u}/44\text{ u} = 10^{-10}$!

Hořením se tedy uvolní pouze 0,1 miliardtiny klidové energie interagujících atomů. Jinak řečeno je výtěžek energie při spalování uhlí nebo jiných fosilních paliv pouze 0,000 000 000 1 %.

Podobný výpočet bychom mohli provést i pro jiné chemické reakce, při nichž se uvolňuje energie. Např. pro výbušnou reakci hoření vodíku $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ bychom pro uvolněný podíl klidové energie vodíku a kys-

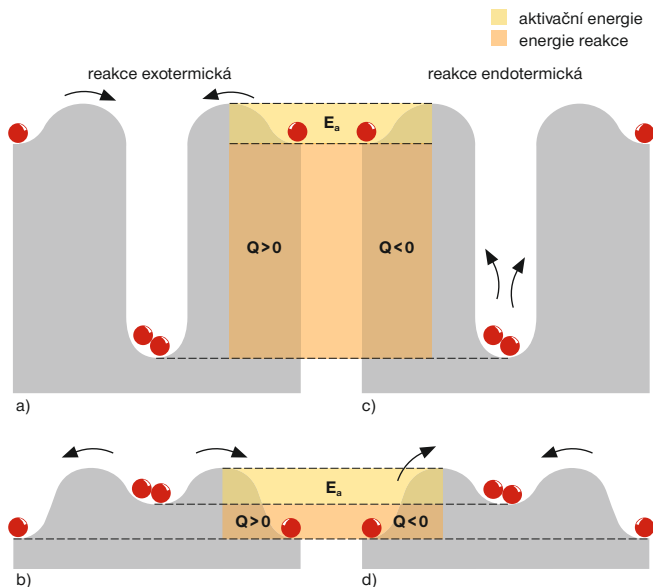


Schéma exotermických a endotermických reakcí. Energetické změny, které probíhají při těchto reakcích, si můžeme znázornit na mechanickém modelu. V případě (A) je znázorněn vznik stabilního útvaru snížením potenciální energie jeho částí, v případě (B) rozdělením složeného útvaru vzniknou dvě stabilnější části opět snížením jejich potenciální energie. Tyto dva modely představují schéma reakcí exotermických. Případy (C) a (D) jsou modely reakcí endotermických.

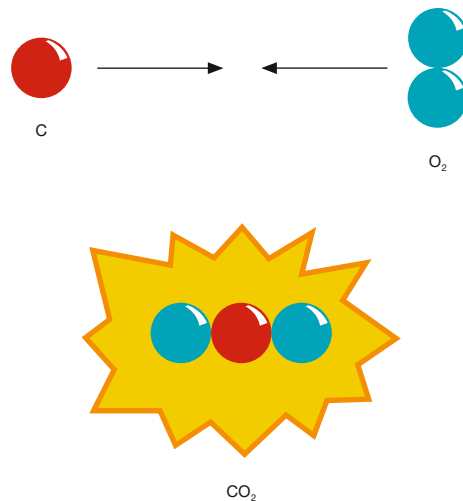


Schéma hoření. Tento typ reakce vede v konečném důsledku k výrobě elektrické energie v klasických uhelných elektrárnách. Využití klidové energie je 0,000 000 000 1 %. Opačná reakce probíhá jako fotosyntéza v živých rostlinách a spotřebovává se přitom energie slunečního záření.

líku dostali hodnotu $1,5 \times 10^{-10}$, tedy řádově stejný výsledek jako pro reakci spalování.

Porovnejme si nyní „účinnost“ jednotlivých reakcí:

- **výtěžek při chemických reakcích** $\sim 10^{-10}$
- **výtěžek při jaderném štěpení** $\sim 10^{-3}$
- **výtěžek při jaderné syntéze** $\sim 10^{-2}$

Jaderné palivo je tedy přibližně deset až stamilionkrát „výhřejší“ než chemické palivo. Příčinou takového rozdílu je skutečnost, že nukleony v jádře atomu jsou mnohem silněji vázány jadernými silami než atomy v molekule silami elektromagnetickými.

Viděli jsme, že jaderné štěpení a syntéza jsou reakce opravdu efektivní. Ale nejvíce klidové energie se uvolňuje při tzv. **anihilaci částice s antičásticí**. V roce 1928 britský fyzik **P. A. M. Dirac** uveřejnil teorii, ze které

mimo jiné vyplýval překvapující výsledek: existence částice se stejnou hmotností jako elektron, ale s kladným elektrickým nábojem.

Tato částice dostala název **pozitron** (antičástice k elektronu) a v roce 1932 byla skutečně objevena v kosmickém záření. O dva roky později pak byl tento partner elektronu vyroben i uměle v laboratorních podmínkách. Z Diracovy teorie ale také plyne, že pokud elektron interaguje s pozitronem, dojde k jejich zániku (anihilaci) a přeměně na fotony elektromagnetického záření.

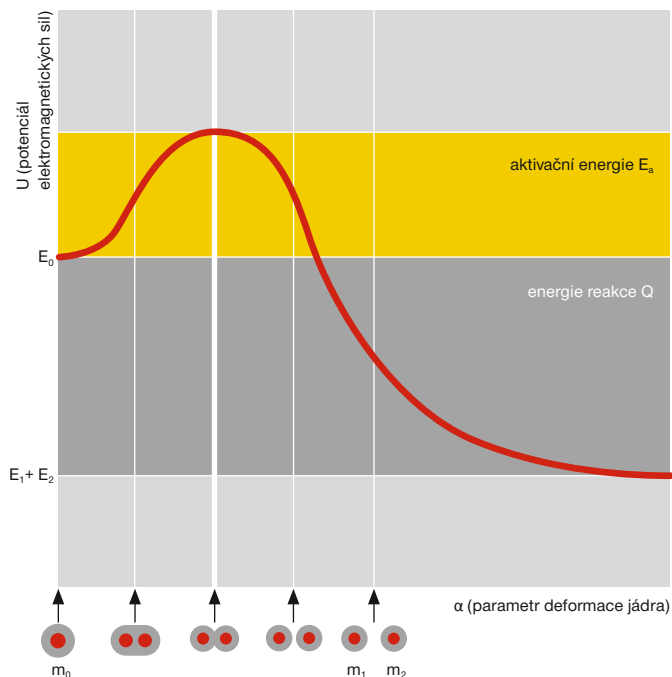
Později výzkumy ukázaly, že existence antičástice není výsadou jen elektronu, ale že každá částice má svou antičástici. Látku vytvořenou z antičástic nazýváme **antihmotou**. Setká-li se částice s antičásticí,

navzájem zanikají za uvolnění příslušného množství energie.

Při procesu $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$ se celá klidová hmotnost pozitronu a elektronu změní na 2 fotony záření gama. Využití klidové energie je 100%!

Proces anihilace hmoty a antihmoty se jeví z hlediska efektivnosti jako ideální zdroj energie.

„Výhřevnost“ anihilačního paliva je 100 až 1 000krát větší než u jaderného paliva (štěpení, syntéza). Na druhé straně však nemá anihilace elementárních částic jako zdroj energie praktický význam, neboť pro vytvoření podmínek, při kterých může probíhat, je zapotřebí vynaložit daleko více energie, než se uvolní při anihilaci. Obrovská energie je nutná pro umělé získání antičástic.



Průběh potenciální bariéry při štěpení těžkého jádra (kapkový model jádra)

NENÍ TO TAK JEDNODUCHÉ

Hovořili jsme o reakcích, při kterých se uvolňuje energie. Takové reakce nazýváme **exotermické**. Uvolněná energie je úměrná úbytku klidové hmotnosti při reakci.

Opačné reakce, při kterých musíme energii dodávat, se nazývají **endotermické**.

Dodaná energie je úměrná zvýšení klidové hmotnosti při reakci. Zapišme si jadernou reakci jednoduše jako $a + b \rightarrow c + d$, kde a, b jsou částice či jádra do reakce vstupující a c, d jsou produkty reakce.

O typu reakce pak rozhodne energie reakce $Q = (m_a + m_b - m_c - m_d) \times c^2$, která vyjadřuje rozdíl součtu klidových energií částic vstupujících do reakce a součtu klidových energií produktů reakce. Jestliže $Q > 0$, jde o reakci exotermickou, jestliže $Q < 0$, jedná se o reakci endotermickou. Pokud je $Q = 0$, nazýváme takovou reakci

pružným procesem, při němž hmotnosti částic před a po reakci zůstávají stejné.

Ne každá exotermická reakce však probíhá samovolně. Např. k tomu, aby hořelo uhlí, ho musíme zapálit – dodat počáteční impuls pro rozběh reakce. Pro nastartování jaderné syntézy musíme jádra překonat bariéru odpuzivých elektromagnetických sil. Podobně je tomu i pro reakci štěpení uranu. Samovolně se uran štěpí s obrovským poločasem rozpadu asi 10^{16} let. Pro energetické využití musíme reakci štěpení urychlit.

Začneme s kapkou rtuti. Ze zkušenosti víme, že kapka rtuti se rozdělí, jestliže překonáme síly povrchového napětí, např. klepnutím skleněnou tyčinkou. Podobně i jádro atomu můžeme s určitým omezením považovat za kapku jaderné kapaliny. Během štěpení se původně kulové jádro



Některé vlastnosti atomového jádra můžeme odvodit z modelu jádra jako kapky kapaliny. Kvalitativně dobře se dá tímto modelem vysvětlit například štěpení i syntéza jader.

deformuje, zvětšuje svůj povrch a proti silám povrchového napětí musí konat práci. Současně pomalu klesá odpuzování elektrickými silami mezi protony jádra. Nakonec se kapka zaškrtní, elektrostatické odpuzování nabyde převahy nad silami povrchového napětí a oddělí obě části jádra, které se od sebe rozletí velkou rychlostí asi $10\,000\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Proto štěpení bude probíhat pouze tehdy, jestliže jádru dodáme energii větší, než je bariéra štěpení (způsobená vlivem povrchové energie) tzv. **aktivační energie E_a** . Počátečním podnětem pro štěpení, „klepnutím“ do jádra, může být např. interakce jádra s neutronem. Neutron je zvláště výhodný, neboť nenese elektrický náboj a nemusí překonávat bariéru odpuzivých elektrických sil protonů tak jako nabitě částice. Bariéra štěpení E_a klesá se zvyšující se nestabilitou jader, která je vyjádřena parametrem štěpení Z^2/A :

- pro $Z^2/A \approx 32$ (Au – Pb)
je $E_a \approx 40$ až 50 MeV
- pro $Z^2/A \approx 36$ (Th – U)
je $E_a \approx 6$ až 8 MeV
- pro $Z^2/A \approx 45$ až 50 (prvek s $Z \approx 120$)
je $E_a \approx 0\text{ MeV}$

Jádra, pro která je $Z^2/A > 45$, nemohou existovat, neboť taková jádra se po



Tableta jaderného paliva (peleta) je vyrobena z oxidu uranického v keramické formě s mírným obsahem štěpitelného izotopu ²³⁵U (do 4 %). Energeticky nahradí více než 800 kg černého uhlí.

vytvoření ihned samovolně rozštěpí. Pro některá těžší jádra stačí pro aktivaci štěpení energie získaná zachycením neutronu.

Tímto způsobem si můžeme vysvětlit i rozdíl v charakteru štěpení izotopů uranu ²³⁵U a ²³⁸U.

Zatímco ²³⁸U lze štěpit pouze rychlými neutrony, ²³⁵U se štěpí i pomalými neutrony s minimální energií. V čem tento rozdíl spočívá?

- Jádro ²³⁵U má větší hodnotu Z^2/A než ²³⁸U, a tedy i menší výšku bariéry E_a .
- Vazebná energie neutronu k jádru ²³⁵U je větší než k jádru ²³⁸U, což plyne z toho, že z jádra ²³⁵U se zachytem neutronu stává sudo – sudé jádro (má sudý počet protonů i neutronů). Tento typ jader je velmi stabilní. Uvolněná vazebná energie neutronu může převýšit bariéru štěpení E_a .

Vazebná energie neutronu k jádru ²³⁵U převyšuje i při minimální kinetické energii neutronu výšku bariéry štěpení, zatímco pro štěpení ²³⁸U je nutné použít neutrony s minimální kinetickou energií 1 MeV.

Vzhledem k tomu, že při procesu štěpení jádra uranu je emitováno i několik neutronů, otevírá se zde možnost realizace řetězové reakce, vhodné pro energetické využití v jaderných reaktorech. Dnes je

Výhřevnost různých druhů paliv

Palivo	Výhřevnost MJ/kg
černé uhlí	20–30
hnědé uhlí	10–17
suché dřevo	16,0
benzín	42,7
petrolej	44,4
vodík	95,5
jaderné palivo firmy WEC pro JE Temelín	3 900 000 MJ/kg = cca 45 MWd/kg

Porovnání izotopů ²³⁵U a ²³⁸U

	²³⁵ U	²³⁸ U
zastoupení v přírodě (%)	0,7	99,3
bariéra štěpení E_b (MeV)	6,0 pro ²³⁶ U	6,1 pro ²³⁹ U
vazebná energie elektronu k jádru ϵ_n (MeV)	6,8	5,1
$\epsilon_n - E_a$ (MeV)	0,8	–1,0

jadernou energetikou produkováno asi 16 % světové výroby elektrické energie.

1 JADERNÁ TABLETA = 880 KG UHLÍ

Efektivnost jednotlivých zdrojů energie můžeme porovnat i podle jejich výhřevnosti, která udává, kolik tepla na jednotku paliva získáme jeho dokonalým spálením (včetně ochlazení spalin na původní teplotu paliva). U jaderného paliva nehovoříme o **výhřevnosti**, ale o **vyhoření**, které udáváme v jednotkách megawattden na kilogram (MWd/kg). Přitom 1 MWd = 8,64 × 10⁴ MJ. Příklady některých paliv jsou uvedeny v tabulce.

Jaderná elektrárna Temelín je druhou jadernou elektrárnou v České republice. Vyrábí elektrickou energii ve dvou výrobních

blocích o výkonu každého z nich 1 000 MW. Při účinnosti asi 33 % tedy každý reaktor vyrábí 3 000 MW tepla. Vsázka paliva do reaktoru je asi 81 tun uranu (92 tun UO₂) ve tvaru malých válečků z UO₂ – tzv. pelet. Pelety jsou uloženy v palivových proutcích (386 ks v jednom palivovém proutku), které jsou po 312 ks sdruženy do 163 palivových souborů (kazet). Po odečtení prázdných míst v 1098 vodicích trubkách pro regulační elementy snadno zjistíme, že v aktivní zóně je asi 19,2 milionů pelet, z nichž každá váží 4,8 gramu. Energetický obsah jedné pelety je pak 1,87 × 10⁴ MJ a může nahradit 1,6 t hnědého uhlí, 880 kg černého uhlí nebo 438 kg benzínu. Tato energie se z pelety získává v průběhu 4 let. Elektrárna Temelín tak ročně ušetří přibližně 15 mil. tun hnědého uhlí. Toto množství by se vešlo na 300 tisíc nákladních vagónů.





Bloková dozorna Jaderné elektrárny Dukovany

BEZPEČNOST JADERNÝCH ELEKTRÁREN

„Mnozí z nás byli dlouho nešťastni v souvislosti se zvyšujícím se počtem jaderných elektráren pro jejich zřejmá nebezpečí, jakož i problémy spojené se skladováním jaderných odpadů. V současnosti však vážavě přiznáváme, že používání uhlí a ropy je pro společnost ještě nebezpečnější než jaderná energie, a to vzhledem k produkci oxidu uhličitého...“

Teprve těmito památnými slovy začínající zpráva „**The First Global Revolution**“, vydaná v polovině roku 1992 váženým Římským klubem akademiků a předních světových vědců, posunula u rozumných lidí po černobylské havárii poprvé jazyček vah mezi protichůdnými názory na jadernou energetiku v její prospěch. Jedna strana, včetně většiny odborníků a národohospodářů, její rozvoj podporuje a opírá se o fakt, že víc než padesátileté zkušenosti s dnešními komerčními jadernými elektrárnami jsou natolik příznivé, že nepřipouštějí pochybnosti o jejich ekonomických a ekologických přednostech, zvláště když jsou stále zdokonalovány. Ve srovnání s jinými

zdroji energie, opírajícími se o klesající zásoby fosilních paliv, jejichž spalování otravuje biosféru a přivolává katastrofu katastrof skleníkový jev, ob stojí právě jen jaderné elektrárny.

JSOU JADERNÉ ELEKTRÁRNY NEBEZPEČNÉ?

Tábor odpůrců jaderné energie zatím nepřišel s reálným plánem „Co místo atomu?“. Svá negativní stanoviska opírá o představy nebezpečí vymknutí se jaderného zdroje zpod kontroly a trumfuje tragédií Černobylu, i když už je dobře známo, že se na ní podepsala nezodpovědnost společnosti,

kteřá nerespektovala obvyklé mezinárodní zásady i jinde než jen v oblasti jaderné bezpečnosti. Přes všechny praktické zkušenosti popírá nadále možnost bezpečné likvidace radioaktivního odpadu, s nímž je provoz jaderných zařízení nevyhnutelně spojen. Nahrávají tomu i katastrofické romány a filmy.

Pravdou je, že jakákoliv lidská činnost, tím spíše průkopnická díla technická, je vždy spjata s rizikem škod a ohrožení zdraví i životů. Otázky rizik a náhodnosti havárií se už léta zabývá vědecký obor, opírající své teorie o globální statistiky nehod a katastrof. Jako „katastrofu“ označují dnes světové pojišťovny událost, při které najednou



Regulační tyč, balón zavěšený pod stropem v roli ochranné obálky, termometr s radiolampami a detektor neutronů na kresbě znázorňující spuštění prvního atomového reaktoru světa ve sklepení Stagg Fieldu 2. 12. 1942 nejnáznorněji ilustrují primitivní zárodky „jaderné bezpečnosti“

zahyne nejméně dvacet osob, nebo když vzniklá hmotná škoda převyší 6 milionů US dolarů. Vyloučíme-li z těchto událostí války a teroristické akce, pak od konce padesátých let, kdy se začalo s nadšením mluvit o vstupu lidstva do „atomového věku“, došlo podle statistik na naší planetě po dnešní dobu přibližně k jedenácti tisícům katastrof, při kterých přišlo o život téměř 8 milionů lidí. Více než polovinu jich mají na svědomí přírodní pohromy. Proti zemětřesení, uragánům a záplavám je technika s výjimkou možnosti jistého předvídání a zásahu technicky vybavených záchranářů stále ještě bezmocná.

K neštěstím, haváriím a katastrofám vyvolaným přebujelou nebo riskantní technikou, při pozornějším pohledu hlavně průmyslem a dopravou, však veřejnost nezaujímá jednotný postoj. Zřízení letadel, srážky vlaků a tragédie na silnicích přijímá s pocitem jakési „daně“ za technický pokrok, pohodlnější život a rychlost pohybu. Klidně usedáme za volanty svých automobilů, ač víme, že při dopravních nehodách na ulicích, silnicích a dálnicích světa každoročně přichází o život 400 tisíc osob. Naproti tomu zprávy o ne-

škodných událostech v nových netradičních oborech – např. v kosmonautice, genovém inženýrství nebo v jaderné energetice – nás obvykle vzruší: co všechno by se mohlo stát?

O zaujatosti by nás měla přesvědčit konfrontace se statistikou, prozrazující, co všechno se doopravdy například v jaderné energetice opravdu stalo:

Během více než čtyřiceti let, jež uplynuly od spuštění prvních experimentálních jaderných elektráren až do koncem roku 1996 na světě provozovaných 442 jaderných bloků v 32 zemích, s celkovým výkonem 351 tisíc MW, kryjících celosvětovou spotřebu elektřiny ze 17 %, zahynulo při smrtelných úrazech spojených bezprostředně s jejich provozem o něco méně než 200 osob (včetně Černobylu). To je sotva pětina životů, které padnou na ulicích a silnicích celého světa za obět přebujelému motorismu každý den!

Jak dokazuje řada profesionálně a objektivně vedených statistik z průmyslových oborů i z dopravy a jiných technických činností, je jaderná energetika v důsledku nejpřísnějších předpisů a norem (a od šedesátých let i díky účinnému mezinárodnímu dozoru

orgánů Mezinárodní atomové agentury **MAAE**) bezkonkurenčně nejbezpečnější, a to i když bereme v úvahu vliv na zdraví a životy v okolí. Každá sebemenší nehoda či provozní havárie, zejména ve spojení s únikem radioaktivity, je zveřejňována, analyzována a stává se školou bezpečnějších postupů a podkladem pro zpřísnění předpisů. Většina z nich spadá na vrub nespolehlivosti „lidského činitele“. To však hledí technici vyloučit automatizací a mnohonásobnou kontrolou.

POUČENÍ Z PRVNÍCH POKUSŮ

První řízená řetězová štěpná reakce uranu se za nejpřísnějšího utajení rozběhla ve sklepní hale chicagského stadionu 2. prosince 1942 v urano-grafitovém bloku pokusného grafitového reaktoru v 15 h 20 min místního času. Po vytažení poslední ze tří kadmiových regulačních tyčí se tisícitunový blok grafitu ohřál o několik °C – poprvé v historii lidstva – energií štěpení jader uranu. Třicetičlenný tým fyziků, který vedl Enrico Fermi, měl k dispozici jen zcela primitivní pomůcky: termometry a ionizační



Sídlo Mezinárodní agentury pro atomovou energii (MAAE) ve Vídni

komůrky, měřící hustotu neutronů zprostředkovávajících štěpení. To prozrazoval pouze praskot z reproduktorů.

Pro případ vymknutí reakce z rukou fyziků drželi tři asistenti na vrcholku milíře službu, kterou dnes obstarává havarijní automatika. V případě nedovoleného nárůstu reakce a teploty měli připravenými vědři polévat blok roztokem kadmiové soli, silně pohlcující neutrony. V případě vznícení grafitu bylo možné od stropu spustit pryžový povlak leteckého balonu tak, aby zabránil přístupu vzduchu.

První reaktor světa však reagoval přesně podle výpočtů na zasouvání kadmiových tyčí a ani roztoku, ani předchůdce „ochranné obálky“ nebylo nutné nikdy použít.

K prvním obětem radiace patřilo několik zaměstnanců z tajných laboratoří v Oak Ridge a v Los Alamos, pracujících na separaci uranu a plutonia pro první atomové pumy.

U prvních experimentálních nebo demonstračních reaktorů pro mírové využití jaderné energie se po armádních zkušenostech s nebezpečím radiačního ožáření („nemoc ze záření“) začaly obsluhy, zejména údržbář a záchranáři, chránit přetlakovými

ochrannými kombinézami. Zavedla se osobní dozimetrie. Uranové články byly opatřeny hermetickým povlakem a aktivní zóny reaktorů tzv. reflektory, odrážejícími unikající neutrony, a byly uzavřeny kombinovanými plášti a štíty z olova a betonu. Původně ruční řízení vytahováním regulačních tyčí bylo svěřeno automatické a k rychlému zastavení reakce byly vyčleněny oddělené tyče havarijní ochrany, vstřelované nebo volným pádem rychle zasahující do aktivní zóny.

OBĚTI VÝVOJE REAKTORŮ

Zatímco vývoj parních kotlů při nástupu parostrojní techniky, stavba odvážných mostů a vývoj automobilů a letadel si zpočátku vyžádaly tisíce životů jako daň za nezkušenost, vývoj výzkumných a průmyslových reaktorů stál lidských obětí mnohonásobně méně.

První větší havárie postihly roku 1952 a 1958 experimentální těžkovodní reaktory NRX a NRU v kanadském vývojovém středisku v Chalk River. Nedostatečná regulační technika měla při obou nehodách spolu s chybou operátorů za následek popraskání

povlaku několika uranových článků, což vedlo k zamoření aktivní zóny štěpnými produkty. Nikdo nezahynul, avšak ruční dekontaminace zplodin trvala desítky měsíců. O její náročnosti svědčí např. údaj o spotřebě 50 tisíc párů rukavic a 20 tisíc respirátorů pro údržbáře.

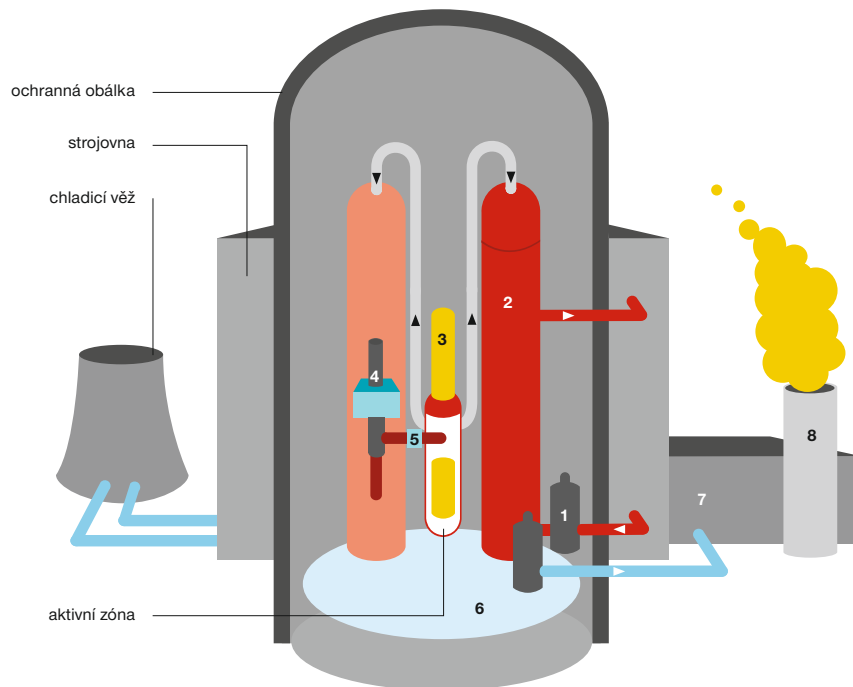
První obětí vývoje výzkumných reaktorů se stal až jugoslávský fyzik, jeden z osmi, kteří 15. října 1958 v rozporu s předpisy vstoupili po odpojení varovného systému průlezem betonového pláště k nádobě odstaveného těžkovodního reaktoru ve Vinci u Bělehradu. Vinou vedoucího směny (napuštěním těžké vody) došlo k nekontrolovanému spuštění. Vzhledem k odpojeným radiometrům se jeho nulový výkon prozradil až po chvíli vůní ozónu z neutrony rozkládaného vzduchu v šachtě. Při úprku úzkým průlezem dostali postižení dávku od 2 do 10 sievertů. Speciálním letadlem byli okamžitě dopraveni do pařížského ústavu Service d'Hygiène Atomique, kde je prof. Jammet unikátní operací – transplantací kostní dřeně – až na jednoho během roku uzdravil.

Těžká havárie postihla v americké laboratoři v Idaho Falls vyvíjený prototyp kompaktního

varného reaktoru SL-1, určeného k pohonu jaderných ponorek. Dne 2. ledna 1961 tři pracovníci noční směny vyměňovali nad víkem tlakové nádoby regulační tyče. Reaktor s nominálním výkonem 3 MW byl řadu týdnů odstaven. Při zvednutí deváté tyče havarijní ochrany nad povolených 10 cm došlo k nečekanému startu reakce a výkon bleskově vzrostl na 20 tisíc MW. Chladicí okruhy byly mimo provoz, palivové články popraskaly a vodík vzniklý žárem ve styku s hliníkovými povlaky explodoval. O likvidaci nehody byl natočen instruktážní film Nejpracnější operace světa. Celý objekt musel být hermeticky obezděn a teprve po dvou měsících mohly dálkově řízené manipulátory zahájit rozbíjení spečených palivových článků, které byly 700 m dlouhým, vodou zaplněným kanálem přetahovány pod hladinou do speciální „horké komory“. Tam byly během dalšího roku postupně rozřezány na gramové proužky, ukládané do hermetických kontejnerů k „pohřbení“.

DĚTSKÉ NEMOCI PRVNÍ GENERACE

V 60. letech vyhlásily jaderné velmoci prestižní plány rozvoje jaderné energetiky. Po příznivých zkušenostech s uranografitovým reaktorem „První na světě“



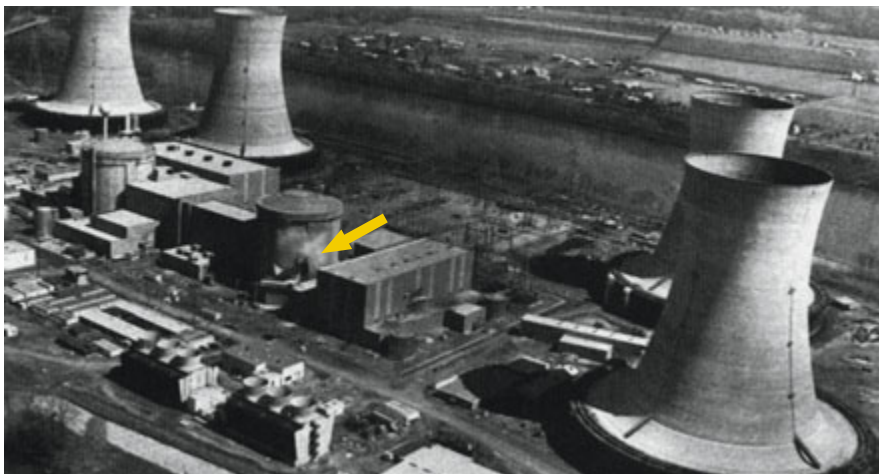
K průběhu havárie TMI-2: Závadou v napájecím okruhu (1) se začal vysušovat parogenerátor (2). Tyče havarijní ochrany (3) zastavují reakci. Objemový kompenzátor (4) při rostoucím tlaku v nádobě otevřel ventily (5). Jeden z nich se zasekl a voda z primárního okruhu vytéká do spodní nádrže (6). Automatika zapnula čerpadlo, které kontaminovanou horkou vodu přečerpalo mimo obálku do zásobníku odpadních vod (7), z jehož ventilačního komínku unikly plynné radionuklidy (8).

spuštěným v Obninsku u Moskvy roku 1954 (s výkonem jen 5 MW_e) se do „atomového klubu“ zapojila Velká Británie průmyslovým prototypem jaderné elektrárny v **Calder Hall** (1956) a o rok později následovali Američané s prvou jadernou elektrárnou s varným reaktorem v **Shippingportu**.

Dalších deset let se budovaly jaderné elektrárny jako drahé unikáty se samozřejmými „dětskými nemocemi“.

V polovině 60. let po ověření spolehlivosti a účinnosti vyšly z mnoha možných typů reaktorů jako jasný vítěz bloky s tlakovodními a varnými reaktory chlazenými a moderovanými obyčejnou vodou (PWR, BWR, ve východním bloku VVER). Těžkovodním reak-

torům CANDU zůstala věrná jen Kanada. Sovětský svaz, který chtěl z prestižních důvodů získat světové prvenství, využil k urychlení výstavby vedle vodovodních reaktorů tzv. kanálové reaktory s grafitovým moderátorem (RBMK), které se daly montovat spíše stavbařským způsobem. Výstavbu jaderných elektráren i jednotkový výkon bloků totiž brzdila zdoluhavá hutní výroba tisícitunových tlakových nádob a obtížný transport na staveniště. Fyzikální nedostatky těchto reaktorů, stavěných navíc bez ochranné obálky, která se pro vyšší bezpečnost uplatnila jak u západních, tak později i u „východních“ vodovodních reaktorů, se jim však v případě Černobylu vymstily.



Šipka na leteckém snímku jaderné elektrárny Three Mile Island (TMI) vyznačuje ventilační komínek na zásobníku odpadních vod, z něhož při komplikované havárii 28. 3. 1979 unikl v Harrisburgu radioaktivní mrak



Každý, kdo jadernou elektrárnu navštívil, je ohromen složitostí technologie a řídicího systému. Pohled do strojovny Jaderné elektrárny Dukovany.

Už při projektu jaderných elektráren se začalo požadovat, aby byly zajištěny proti jakýmkoliv vnějším zásahům například proti zemětřesení, explozi v těsné blízkosti, pádu letadla nebo sabotáži. Bezpečnostní předpisy pro povolení stavby a potom provozu jaderné elektrárny hned od začátku požadovaly, aby zařízení bezpečně zvládlo i nejméně pravděpodobné havárie.

Úniku štěpných produktů hromadících se pod povrchem palivových článků, které nesmějí za žádných okolností zůstat bez chlazení, brání několik bariér: nerozpustnost tabletek, z nichž jsou složeny palivové tyče, hermetičnost jejich obalu, hermetický primární okruh včetně nádoby a kontejnment (ochranná obálka), zabrahující i v případě vůbec nejhorší, tzv. projektové havárie (prasknutí nádoby či primárního okruhu, spojené s výronem par a plynů) úniku radioaktivních zplodin do okolí. Veškeré technologické a řídicí systémy jsou několikanásobně jistěny a plně automatizovány. Systematicky proškolení a zkoušení operátorů jsou zacvičováni na

trenažérech i k zásahům při výjimečných situacích.

ROLE MEZINÁRODNÍ ATOMOVÉ AGENTURY

Roku 1957 byla z popudu OSN založena **Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE)** se sídlem ve Vídni, která spojením mezinárodních zkušeností i autoritou kontrolních orgánů neobyčejně přispěla k tomu, že jaderné elektrárny snížily rizika jak pro své zaměstnance, tak pro okolí na absurdně nízkou míru, jak to prokazují např. tabulka rizik dobrovolných a nedobrovolných činností současné lidské populace, nebo tabulky pravděpodobnosti pojistných událostí, které člověka mohou během průměrného života postihnout.

Stav jaderné bezpečnosti podle mezinárodních pravidel a norem prověřuje zvláštní služba MAAE označená **OSART** (Operational Safety Team). Její osvědčení dává pracovníkům, obyvatelům v okolí jaderných elektráren i každému státu mezinárodní

jistotu. Mezinárodní bezpečnosti napomáhá i organizace **WANO**, sdružující provozovatele jaderných elektráren, dále poradní skupina pro jadernou bezpečnost **INSAG** a další.

Každý, kdo jadernou elektrárnu navštívil, je ohromen složitostí technologie a řídicího systému. I v nejjednodušších vodních a tepelných elektrárnách dochází v průběhu jejich mnohaleté nepřetržité činnosti k nejrůznějším poruchám a výpadkům, drobným požárům, úniku tekutin a páry, zkratům na silové i řídicí kabeláži. Ani sebemodernější jaderné bloky se těmto provozním závadám a selhání komponent nemohou vyhnout. Trpí jimi zejména starší a dosluhující elektrárny.

Stejná závada – například požár některého výstupního transformátoru – ovšem v tepelné elektrárně nevyvolá žádný ohlas. Zato závada, která vede např. jen ke snížení výkonu jaderného bloku po dobu opravy, po uveřejnění v „černé kronice“ vyvolává ve veřejnosti negativní náladu a skryté obavy, i když obvykle nebývá spojena se sebemenším unikem radioaktivity a ohrožením zaměstnanců elektrárny,

natož obyvatel obcí v okolí. Aby proto byla veřejnost pravdivě a srozumitelně informována a nenalétla na zavádějící a zkreslující hodnocení sdělovacích prostředků, prosadila MAAE v roce 1991 mezinárodní stupnici **INES** (The International Nuclear Event Scale), která sedmi stupni hodnotí mimořádné události dnes už nejen v jaderných elektrárnách, ale i ve výzkumných reaktorech, v úložistiích použitého paliva a jaderných odpadů, včetně jejich transportu.

STUPNICE HODNOCENÍ JADERNÝCH UDÁLOSTÍ

INES dělí nehodové události zásadně na **nehody** (stupně 1, 2, 3), neohrožující okolí a za branou elektrárny či závodu nevyžadující žádná mimořádná opatření, a na **havárie** (stupně 4, 5, 6, 7), vyžadující v důsledku většího úniku radioaktivity do okolí opatření, obsažená v přijatých havarijních plánech.

Každá účastnická země je povinna v přesně stanoveném termínu o **každé** nehodě či havárii informovat koordinační centrum MAAE, které ji ohodnotí určitým stupněm INES vždy podle jejího nejhoršího dopadu na okolní životní prostředí, na prostředí v objektu a jeho bezpečnostní systém. Ústředí dostává z různých míst zprávy o nehodách a provozních poruchách, které jsou pod úrovní

7	Velmi těžká havárie	značný únik radioaktivních látek na velké území, okamžité zdravotní následky, dlouhodobé ohrožení životního prostředí
6	Těžká havárie	velký únik radioaktivních látek mimo objekt, nutnost využít havarijních plánů k ochraně okolí
5	Havárie s účinky na okolí	vážnější poškození aktivní zóny, únik 100–1000 TBq biologicky významných radioizotopů, nutnost částečné evakuace okolí
4	Havárie s účinky uvnitř zařízení	částečné poškození aktivní zóny, ozáření personálu, ozáření okolních obyvatel na hranici limitu
3	Vážná porucha	ozáření personálu nad normu, menší únik radioaktivity do okolí – zlomky limitu
2	Porucha	technické poruchy, které neovlivní bezpečnost elektrárny přímo, ale mohou vést k přehodnocení bezpečnostních opatření
1	Odchylka od normálního provozu	poruchy nepředstavující riziko, ale odhalující nedostatky bezpečnostních opatření
0	Událost bez významu pro bezpečnost	nejběžnější provozní poruchy, bezpečně zvládnutelné

Stupnice INES



Výstavba pokročilých typů jaderných elektráren s reaktory se zvýšenou bezpečností a dvojitým kontejnmentem se v budoucnu zkrátí na 3 až 5 let



Jaderná elektrárna Jaslovské Bohunice

vážných nehod (INES–3). Havárie s účinkem na okolí (INES–4) jsou výjimečné. Havárie stupně 5 byly dvě: Windscale a Three Mile Island, havárie stupně 6 žádná. Zatím nejzávažnější událostí za posledních dvanáct let zůstává jako ojedinělá havárie Černobylu.

HAVÁRIE JADERNÝCH ELEKTRÁREN

První „příkázání“ reaktorové bezpečnosti zní, že palivové články musí být za všech okolností účinně chlazeny, aby nepopraskal jejich hermetický povlak a nedošlo k jejich roztavení. Tím by se totiž obávaným produktům štěpení otevřela cesta k zamoření celého primárního okruhu.

U vodou chlazených reaktorů má proto primární okruh několik na sobě nezávislých smyček s oběhovými čerpadly, která jsou navíc zálohována. Pro případ výpadku napájení čerpadel jsou připraveny náhradní zdroje energie. Aby se povrch článků nikdy neobnažil, je v zásobnících připravena dostatečná zásoba vody s borem, pohlcujícím neutrony, která by měla vystačit k doplňování aktivní zóny a k nouzovému dochlazování i při vůbec nejhorší myslitelné havárii, jakou by bylo prasknutí potrubí primárního okruhu.

Jistá závislost na jiných zdrojích energie pro čerpadla doplňující okruh a udržující

nouzové dochlazování je určitou slabinou donedávna výhradně používaného **aktivního systému bezpečnosti**. Havarijní a bezpečnostní systémy jsou obvykle příliš složité, což zvyšuje možnost poruch i selhání lidského činitele, zejména je-li operátorům umožněn ruční zásah do řízení.

Od roku 1969 se vyskytlo jen několik havárií skupiny INES–4, obvykle nikoliv kvůli selhání chladicího okruhu, nýbrž v důsledku omezení průtoku chladiva kolem chybně založeného článku. Štěpnými produkty nasycené články se totiž musí obvykle po třech letech z reaktoru vyjmout a nahradit méně vyhořelými články z obvodu aktivní zóny, na jejichž místo přijdou zcela nové články. Dokud nebyla manipulace zcela zautomatizována, vinou obsluhy došlo v odstupu deseti let ke třem haváriím tohoto typu.

INES–4

SAINT LAURENT (FRANCIE 1969 A 1980)

Jaderná elektrárna Saint Laurent má dva tzv. integrované reaktory kanálového typu s grafitovým blokem v tlustostěnné betonové nádobě z předpjatého betonu. 3 200 palivových kanálů v každém z nich plní a vyměňuje dálkově ovládaný manipulátor na víku

betonového bloku. Pětice kratších článků v každém kanálu se po odšroubování ocelového víka mění za plného výkonu bloku 450 MW_e.

Při noční směně 17. 10. 1969 vložil operátor do snímače manipulátoru děrnou pásku s programem automatické výměny několika článků. Spuštěný manipulátor se po chvíli zastavil a signalizoval, že adresovaný box čerstvých článků je prázdný. Operátor v rozporu s předpisy automatiku vyřadil a ručně navedl stroj k jiné příhradce, v níž však místo článků ležely grafitové zátky. Po jejich vložení se v kanálu zastavil průtok vody a zbývající články (asi 50 kg) se roztavily. Jakmile z nich uvolněné štěpné produkty kontaminovaly vody primárního okruhu, automatika reaktor odstavila a vyhlásila poplach. Zbavit reaktor taveniny a kontaminace trvalo více než rok a vyžádalo si mimořádné úsilí. Ze závěrů komise EdF vyplynulo, že do programu se sice vloudila chyba, avšak operátor v několika bodech porušil předpisy, a byl proto potrestán třemi roky vězení.

Podobná nehoda se opakovala v roce 1980 i na sousedním reaktoru. V obou případech vznikla značná škoda na zařízení i v důsledku výpadku výkonu po dobu víc než jednoho roku, nikdo však neutrpěl zranění a mimo elektrárnu neunikla radioaktivita.



Černobyl po katastrofě



Černobyl dnes

INES-4

JASLOVSKÉ BOHUNICE A-1 (ČSSR 1977)

K havárii těžkou vodou moderovaného a plynem (CO_2) chlazeného reaktoru čs. jaderné elektrárny A-1 s výkonem 103 MW_e došlo po čtyřletém ověřovacím provozu 22. února 1977 při výměně paliva. Ve snaze urychlit výměnu palivového článku, aby nedošlo k samovolnému odstavení reaktoru, neodstranila obsluha jeho ochrannou silikagelovou vložku. Ta v kanálu znemožnila průtok chladícího plynu a palivo se začalo tavit. Když se protavila i kanálová trubka, dostala se do primárního okruhu těžká voda. Rychlou erozí narušila povlak čtvrtiny z 570 založených článků. Radioaktivní zplodiny zamořily primární okruh a přes netěsnosti parogenerátorů došlo i ke kontaminaci sekundárního okruhu parovodů, turbíny a kondenzátoru. Ani zde nebyl nikdo zraněn nebo nadměrně ozářen.

Protože pod nátlakem SSSR se musela naše jaderná energetika dále orientovat jen na sovětské vodo-vodní reaktory, nebyl

provoz A-1 už obnovován. Likvidace zařízení končí teprve v současné době.

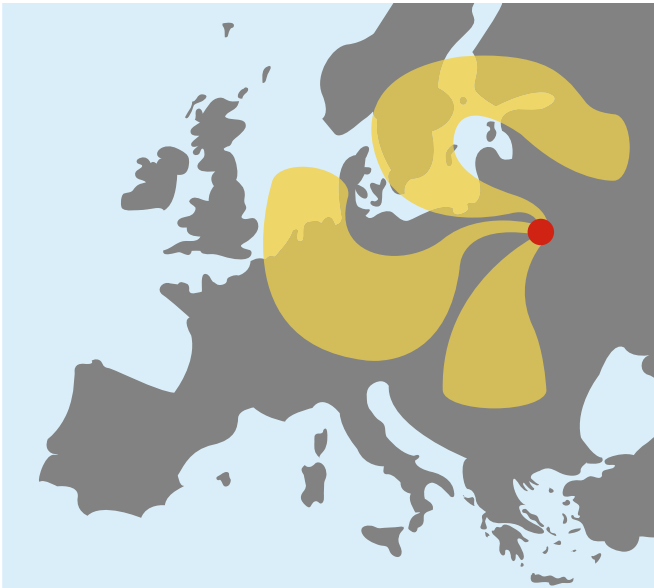
INES-5

THREE MILE ISLAND (USA 1979)

Několik dnů před velkou havárií, která postihla poměrně nový druhý blok jaderné elektrárny Three Mile Island, vzrušil obyvatele deset kilometrů vzdáleného města Harrisburgu katastrofický film Prometheus v plamenech. Pojednával o reaktoru, který se protavil do země a zamořil Kalifornii. Proto si dovedeme představit paniku, která obyvatele zachvátila, když v noci z 28. na 29. března 1979 zazněly z elektrárny sirény a o hodinu později pohotovostní oddíly policie začaly s evakuací okrajových čtvrtí. Co poplachu předcházelo?

Ve 4,05 h ohlásil operátorům bloku jedoucího na plný výkon 900 MW_e poplašný signál výpadek dodávky vody do jednoho parogenerátoru. Rezervní napájecí čerpadla se sice o 4 sekundy později rozběhla, vodu však nedodávala, protože opraváři

z předchozí směny zapomněli otevřít ručně ovládaná šoupátka. Havarijní automatika proto odstavila oba turbogenerátory a vstřelila do reaktoru tyče havarijní ochrany. Teplota v aktivní zóně začala výrazně narůstat, a proto automatika zapnula doplňující čerpadla primárního okruhu. Obsluha nemohla tušit, že jeden z ventilů regulujících tlak se zasekl a voda pod vysokým tlakem tudý vystříkovala a stékala pod tlakovou nádobu. Na to přišla obsluha až po dramatických dvou hodinách zápolení o udržení nouzového průtoku aktivní zónou. Následkem kolísání hladiny došlo k roztavení obnažených částí článků a jejich tavenina ucpala postupně průtok dalšími kanály. Skupina přivolaných specialistů až do rána pokračovala v dochlazování, aby nedošlo k obávanému vzniku vodíku, hrozícího explozí. Nádrže pod blokem se mezitím zaplnily unikající kontaminovanou vodou a automatika spustila nekontrolovaně kalové čerpadlo, které ji začalo odčerpávat mimo ochrannou obálku (hrubá chyba techniky!) do pomocného zásobníku. A z jeho ventilačního komínku začal větrem směřujícím



Radioaktivní mračno v prvních třech dnech po havárii

Zkrácení očekávané délky života ve dnech při výrobě elektřiny z různých zdrojů (zdroj: Waltar, A. E.: America the Powerless. Facing our nuclear energy dilemma)

Energetický zdroj	Zkrácení délky života ve dnech
uhlí	23
ropa	4
zemní plyn	2,5
sluneční energie	1
vodní energie	0,2
jaderná energie	0,05 (asi 1 hodina)

k městu unikat radioaktivní mrak, na který reagovaly sirény.

Nikdo nepřišel o život, nikdo nebyl zraněn ani postižen vyšší dávkou radiace. Ovšem panika, kterou vyvolali televizní reportéři obléhající brány elektrárny, vyděsila celé Spojené státy. Případ „Harrisburg“ měl obrovský negativní dopad na jaderný program USA. Stal se mezinárodní „školou“ reaktorové techniky a varováním, že na jaderné bezpečnosti nelze šetřit. Likvidace nehody trvala dvanáct let a vyžádala si desetkrát vyšší náklady než stavba původního bloku.

INES-7

PRAVDA O ČERNOBYLU

Dva mohutné výbuchy krátce po sobě v noci 26. dubna 1986 zničily čtvrtý blok jaderné elektrárny Černobyl poblíže Kyjeva v SSSR a radioaktivní zplodiny vzniklého

požáru roznesené větrem ohrožily nejen její okolí, ale i řadu sousedních států. Chladicí systémy jinde ve světě nepoužívaného sovětského typu kanálového grafitového reaktoru RBMK-1000, v jehož víc než šestnácti stech samostatně chlazených kanálech varem vody vzniká přímo pára, jsou samy o sobě mimořádně komplikované. Fyzikálně značně nestabilní aktivní zóna reaktoru, obklopená navíc hořlavým grafitem, postrádá ochrannou obálku, a ani systém řízení reaktoru neodpovídal bezpečnostním požadavkům MAAE. Tzv. inherentní nestabilita těchto reaktorů spočívá v tom, že dojde-li k růstu teploty a v kanálech roste počet bublinek páry, pak reaktivita a tím i výkon mají tendenci stoupat, na rozdíl od vodo-vodních reaktorů, u kterých by byla reakce naopak tlumena.

V osudné noci měli operátoři provést neodborně připravený pokus o využití elektrického výkonu dobíhajícího turbosoustroj

ke krátkodobému nouzovému chlazení reaktoru. Se souhlasem nadřazených vyřadili vedoucí směny bezpečnostní automatiku bránící připustit riskantně nízké hodnoty výkonu reaktoru. Regulační tyče byly zdviženy v takovém počtu a tak vysoko, že když se v 1 h 23 min 40 s ukázalo, že následkem zmíněného kladného koeficientu reaktivity začíná výkon snížený jen na 200 MW s růstem páry v kanálech bouřlivě stoupat, nestačily dostatečně rychle klesnout zpět do aktivní zóny. O pouhé 4 sekundy později tepelný výkon vzrostl nejméně na stonásobek a došlo k parní explozi, která odhodila tisícitunové víko reaktoru stranou. Do rozžhavené masy rozervaného bloku vnikl vzduch a reakcí vodíku vzniklého stykem vodní páry a žhavého grafitu došlo vzápětí k druhé explozi, která rozmetala část aktivní zóny. Vylétující žhavé trosky zapálily asfaltový potah střechy. Když se střecha propadla, bylo tudy s mračnem kouře do vzduchu



Kontrola paliva před výměnou na školním reaktoru VR-1 katedry jaderných fyziků JFJ ČVUT v Praze

vyvrženo 5 tun radioaktivních látek. Silné úniky radioaktivity se podařilo omezit až po desetidenním hrdinném zápasu špatně vybavených záchranářů a vojáků, na jejichž životy a zdraví se v prvních dnech vůbec nebral ohled.

Proměnlivé větry zanesly radioaktivní mračno s nejméně dvěma miliony TBq radioaktivních látek (zejména jódu a cesia) v několika tazích nad Skandinávií, střední Evropu a Balkán.

Katastrofa si bezprostředně vyžádala 31 mrtvých z řad zaměstnanců elektrárny a požárních, a 237 lidí onemocnělo akutní nemocí z ozáření. Tisíce záchranářů a pomocníků dostaly dávky od 300 do 500 mSv.

Oblast o průměru 30 km v okolí elektrárny je stále ještě veřejnosti nepřístupná, škody na půdě, hospodářství a majetku byly později odhadnuty na víc než 10 miliard US dolarů. Při pozdější rozšířené evakuaci pomáhalo přes půl milionu osob, z nichž

čtvrtina postižená silnějšími dávkami je dodnes pod lékařskou kontrolou.

V průběhu dramatické záchranné operace byly trosky reaktoru zasypány tisíci tunami hlíny, dolomitu a olova a s pomocí dálkově řízené těžké mechanizace byla zničená reaktorovna uzavřena komplikovaným **betonovým sarkofágem** o hmotnosti 3/4 milionu tun. Ten je pod stálou kontrolou, ale musí být nyní rekonstruován, protože hrozí jeho „proděravění“.

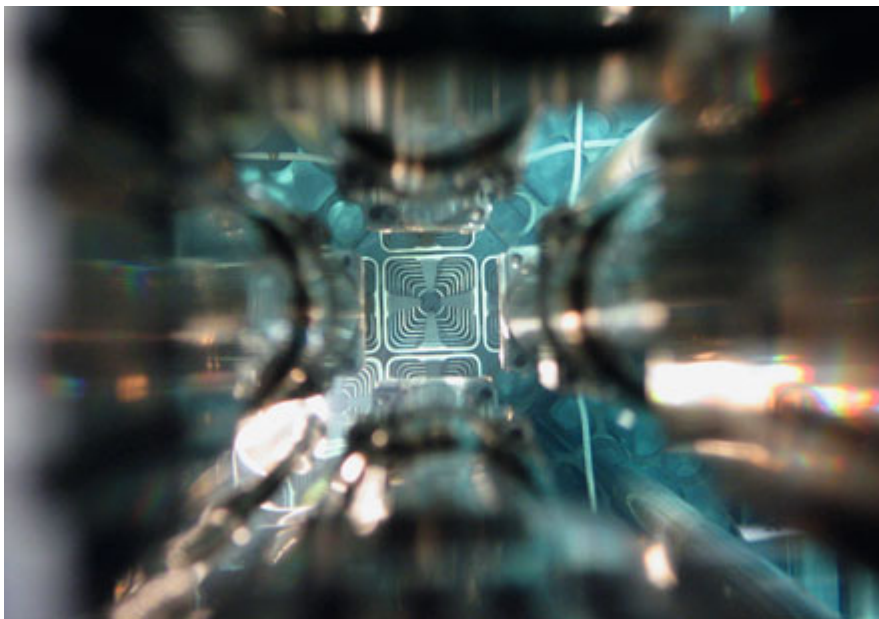
Ke skutečně nezávislému a odbornému rozboru radiologické situace v oblasti, kde žijí 2 miliony obyvatel, byl v letech 1991–1992 uskutečněn **mezinárodní projekt „Černobyl“**, na kterém se podílelo 200 předních vědců z 25 zemí (i z ČR), MAAE, komise Evropského společenství a OSN.

Zprávy o komplexním vyšetření zdraví obyvatel postižených míst nasvědčují, že původně zveličované obavy z rozšíření rakoviny, genetických anomálií novorozen-

ců a nárůstu leukémie se nenaplnily. Ani nesmírně nákladný exodus obyvatel nebyl možná nutný. Na světě jsou oblasti (např. v indickém Tamilu), kde obyvatelstvo bez potíží žije na území, z jehož hornin vyzařuje trojnásobek dávkového příkonu než v zakázaném pásmu Černobylu.

JADERNÁ ENERGETIKA JAKO NEZBYTNOST

Světový program jaderné energetiky utrpěl Černobylem těžkou ránu. Mínění veřejnosti i politiků nebralo v potaz ani důkazy shromážděné mezinárodní komisí o tom, že katastrofu fyzikálně pochybného a jinými zeměmi nepoužívaného reaktoru způsobil součet šesti vážných porušení zásad jaderné bezpečnosti. Jak prohlásil sám prezident MAAE **Hans Blix**: „...ani promyšlený útok gangsterů na tento reaktor nemohl být uskutečněn lépe!“



Aktivní zóna školního a výzkumného reaktoru VR-1

Bezprostřední odpovědí jaderných energetiků po katastrofě bylo urychlení prací na vývoji jaderných bloků s tzv. **zvýšenou jadernou bezpečností**. Jejich kombinovaná ochranná obálka, která by byla v Černobylu zabránila drastickému úniku obávaných radioaktivních zplodin, se plně osvědčila v případě nehod nebo poškození jaderných bloků. U rychlého francouzského reaktoru Superphénix (1200 MW) například jen s povrchovými oděrkami odolala zásahům dvou raket, které na ni vypálil v lednu roku 1982 neznámý útočník. V Národní reaktorové laboratoři SANDIA v USA testovali případ nárazu stíhače Phantom F-4 na kupoli obálky. Letoun se roztříštil, ale hřídele turbín zanechaly na betonovém plášti jen asi 6 centimetrů hluboký vryp.

Nevyvratitelný důkaz o bezpečnosti jaderných bloků podalo tragické zemětřesení, které 17. ledna 1995 změnilo japonské Kobe v hromadu trosek. Dvanáct jaderných

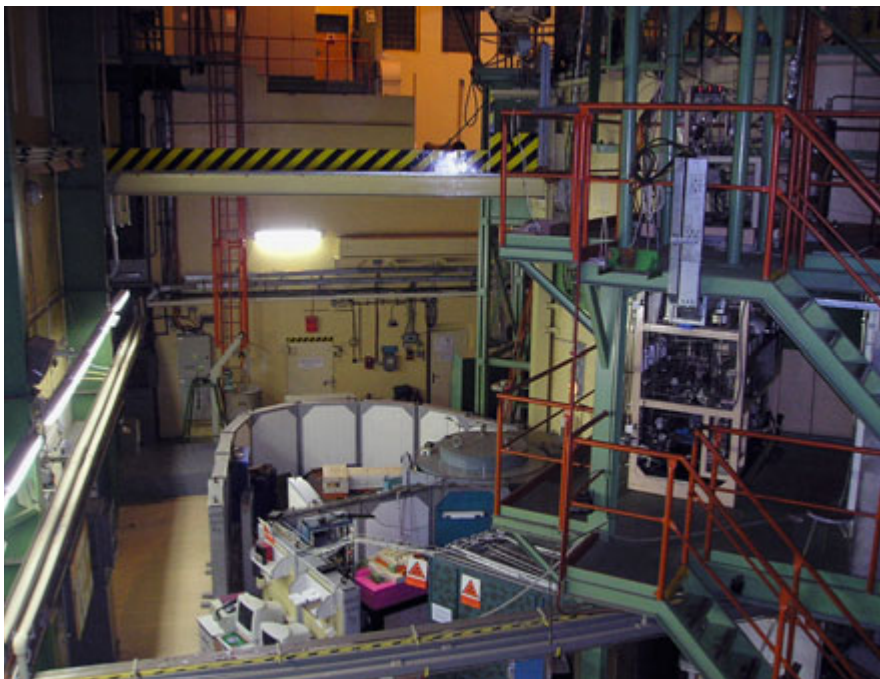
bloků v okruhu sto kilometrů od epicentra zemětřesení o síle 7,2 RichtEROVY stupnice neutrpělo žádnou škodu a žádný z nich nemusel ani zastavit svůj provoz!

Mnoho jaderných bloků již přesáhlo životnost 25 let, plánovanou původně na základě obav z radiačního narušení tlakových nádob. Nejprísnější expertizy a testy vzorků materiálů však ukázaly, že provoz bez zvýšení rizika může být prodloužen u většiny bloků až na 40 až 60 let! Při rekonstrukcích se obvykle nahrazují starší systémy řízení digitálními systémy a zvyšuje se účinnost havarijních dochlazovacích okruhů i tzv. barbotážního zařízení v ochranných obálkách, které musí zvládnout výron páry a zabránit úniku radioaktivních zplodin v případě nejhorší projektové havárie.

Dvousetčlenný vědecký tým prof. Rasmusena se v USA po léta věnoval analýze bezpečnosti a rizik havárií jaderných elektráren. Možnost největší projektové havárie,

jaká se přihodila v Černobylu, vyjádřil rizikem jednoho případu za 20 tisíc let. V tabulkách statistiky to odpovídá pravděpodobnosti 10^{-6} na reaktor a rok. Vztaheno k současně pracujícím 440 blokům by se tedy katastrofa s větším únikem radioaktivity do okolí mohla opakovat jedenkrát za půl století. Mezitím však dojde již na přelomu století k vyřazení nejstarších bloků a k přibývání reaktorů se zvýšenou jadernou bezpečností, u kterých se riziko velké havárie snižuje až pod 1×10^{-10} . Ohrožení jedince potom vychází statisticky právě tak málo pravděpodobné, jako být zabit pádem meteoritu.

Není divu, že již šest let po Černobylu nejen slavný Římský klub, ale stále více rozumných lidí (a zejména vědci, technici a ekonomové) změnilo a mění svůj postoj k jaderné energetice. Bez ohledu na to, že ji mnozí považují za „nežádoucí nutnost“, dávají jí přednost před ohrožením planety skleníkovým efektem, ke kterému přispívají



Část reaktorové haly výzkumného reaktoru VLR-15 v Ústavu jaderného výzkumu v Řeži u Prahy



Aktivní zóna výzkumného reaktoru

vedle přebujelého motorismu zejména elektrárny a výtopny, spalující fosilní paliva.

VÝZKUMNÉ JADERNÉ REAKTORY

Chtějí-li lidé odpovědně ovládat jaderné procesy, musí se nejprve dozvědět co nejvíce o vlastnostech samotných atomových jader. Tisíce jaderných fyziků se dnes věnují celé řadě detailních výzkumů: struktuře jader a rozložení jaderných sil, rotacím a vibracím atomových jader, změnám energetického stavu či složení jader a v neposlední řadě nespočtu možných jaderných reakcí. Kromě toho jaderný výzkum vyžaduje i náš každodenní život. Zpravidla proto rozlišujeme výzkum základní, který zkoumá nepoznané vlastnosti přírody a odkrývá lidem nové cesty, a výzkum aplikovaný, který řeší konkrétně zadané úkoly podle potřeb dnešní společnosti a jejího průmyslu.

Mezi základní a aplikovaný výzkum nelze klást ostrou hranici, jejich úkoly i metody se mnohdy překrývají a drahá experimentální zařízení se často používají jak pro základní, tak pro aplikovaný výzkum. Příkladem takových zařízení jsou výzkumné jaderné reaktory.

Výzkumné reaktory slouží jako velmi silný zdroj neutronů, pomáhají ověřovat naše znalosti o fyzice reaktorů a v neposlední řadě přispívají k praktické výuce budoucích odborníků. Nejčastěji se věnují těmto pracovním tématům:

- základní výzkum: vlastnosti neutronů a jaderné reakce s neutrony;
- výzkum možnosti lékařské diagnostiky a terapie pomocí svazků neutronů;
- výroba speciálních radioizotopů pro průmysl a medicínu;
- výroba objemově dopovaného křemíku pro silnoproudou elektroniku;

- aktivační analýzy, tj. stanovení složení materiálu podle jeho vlastního záření po ozáření neutrony;
- zjišťování materiálových změn po dlouhodobém ozařování neutrony (např. změny pevnosti reaktorových nádob) testování vlastností jaderných palivových článků za podmínek přesně simulujících činnost energetického reaktoru;
- demonstrační účely;
- prostředek výuky studentů jaderně-inženýrského oboru.



Přeprava použitého paliva z výzkumného reaktoru ÚJV Řež





Rozestavěná EPR ve Finsku

JADERNÉ ELEKTRÁRNY BUDOUCNOSTI

V Evropě, USA, Japonsku i Rusku se již několik let vyvíjejí pro blízkou budoucnost reaktory, jejichž bezpečnost je kromě dosavadních bariér opřena o základní fyzikální principy, vylučující možnost havárie (tzv. inherentní bezpečnost), a o tzv. prvky pasivní bezpečnosti, které by i při nesmírně nízké pravděpodobnosti nehody zabránily úniku nebezpečných látek mimo prostor reaktoru a kontejnmentu i v případě, že by všechny instalované systémy aktivní bezpečnosti selhaly, například v důsledku výpadku dodávky proudu.

NOVÁ KONCEPCE REAKTORŮ

Inherentní bezpečnost se opírá o takové uspořádání aktivní zóny, které za všech okolností po fyzikální stránce vykazuje **záporný koeficient reaktivity**. Dojde-li ke zvýšení teploty reaktoru nebo jen článku v některém z palivových kanálů, zhorší se přirozenou cestou zpomalování neutronů udržujících reakci v chodu, tím začne klesat počet štěpících se jader, což se projeví poklesem množství uvolňované energie. Inherentně bezpečným se dnes označuje takový systém, který je netečný vůči lidským chybám nebo úmyslným zásahům i proti vnějším vlivům.

Pasivní bezpečnost se rozumí použití takových systémů regulace výkonu,

chlazení aktivní zóny a jejího havarijního dochlazování, které budou fungovat i v případě výpadku dodávky proudu pro čerpadla, regulační ventily a jiné komponenty, což by mohlo nastat jen při současném selhání několika zdrojů energie, které mají dnešní jaderné elektrárny v záloze. Příkladem jsou tyče havarijní ochrany, které v případě selhání elektrického systému uvolnění a pohonu spadnou do aktivní zóny působením zemské tíže.

Zcela nekonvenčně havarijní chlazení řeší například švédská koncepce reaktoru PIUS. Aktivní zóna je ponořena v bazénu s vodou obsahující bór. V případě nedostatečného chlazení hrozícího tavením článků si reaktor samovolně připouští vodu z bazénu, takže odpadá potřeba čerpadel a jejich

zálohované napájení proudem. Většina projektů reaktorů se zvýšenou bezpečností se však vrací ke stávajícímu řešení, k němuž přidávají zejména chladicí pasivní systémy, využívající přirozené cirkulace tekutin vlivem rozdílných teplot a zabraňující úniku nebezpečných zplodin **dvojitým kontejnmentem**. Ten pak v novém provedení dokáže autonomně, s využitím přirozené tepelné cirkulace vzduchu nebo vody, po dlouhou dobu odvádět teplo radioaktivního rozpadu, které se vyvíjí i po náhlém odstavení reaktoru v palivových člancích.

Jak tato nová koncepce pozmění poslední generaci reaktorů se zvýšenou bezpečností konkrétně dokumentujeme na příkladu zdokonaleného evropského tlakovodního reaktoru EPR, nebo na



Příklad moderní jaderné technologie: zařízení pro obohacování uranu Eurodif francouzské firmy Areva (Jižní Francie)



Jaderná elektrárna Temelín patří k nejmodernějším jaderným elektrárnám na světě

reaktoru AP-1000 od Westinghouse, které se již ve světě staví. Společným znakem jejich inherentního principu a kombinace aktivní a pasivní bezpečnosti je i výrazné snížení počtu komponent u reaktoru, parogenerátorů i ve strojojnách, což sníží investice do stavby i technologie, zrychlí jejich výstavbu, zjednoduší provoz a údržbu a zvýší spolehlivost bloku. Většina z nich bude plněna až z třetiny novou formou paliva MOX (tablety ze směsi oxidů uranu a plutonia), které umožní využít nadbytečné zásoby plutonia, a protože jde o vodou nerozpustný a nezneškoditelný keramický materiál, sníží se tím dále nebezpečí úniku štěpných produktů do chladicích okruhů.

PERSPEKTIVNÍ TYPY REAKTORŮ

Většina projektů budoucích jaderných elektráren plynule navazuje na dnešní osvědčené typy, které zpravidla používají tlakovodní reaktory. Některé nové projekty se však snaží o zásadnější zásah do konstrukce jaderné elektrárny, díky které by se ještě

výrazněji zvýšila její inherentní bezpečnost. Nové myšlenky jsou sice často velmi přitažlivé, jejich ověření ovšem vždy znamená bezpečnostní komplikace spojené s netradičním experimentálním provozem.

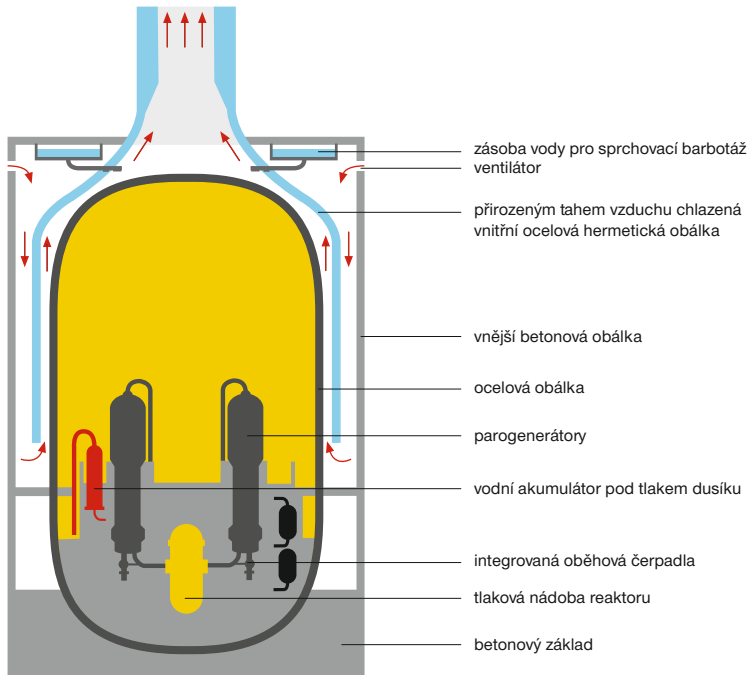
Jako příklady projektů založených na systematickém zdokonalování současného přístupu ke konstrukci tlakovodních reaktorů jmenujme alespoň projekt Evropského tlakovodního reaktoru EPR a projekt AP-1000 od americké firmy Westinghouse. Oba projekty se zaměřují především na zjednodušení klíčových konstrukčních prvků, což přinese jak zvýšení spolehlivosti a bezpečnosti, tak snížení ceny. Zásadní význam EPR kromě toho spočívá v ustanovení společného německo-francouzského programu.

Mezi méně tradiční projekty se řadí švédská koncepce reaktoru PIUS. Podle tohoto projektu se reaktor celý nachází v podzemí pod vodou obohacenou bórem, který je silným absorbátorem neutronů. V případě nedostatečného vnějšího chlazení reaktor samovolně nasaje vodu z bazénu. Tak je zajištěno zastavení štěpných reakcí a při-

rozené chlazení reaktoru po dobu jednoho týdne, i kdyby nefungovala žádná čerpadla. Zvýšené náklady na realizaci podzemního bazénu jsou kompenzovány tím, že není nutná výstavba kontejnmentu.

ZDOKONALENÝ EVROPSKÝ TLAKOVODNÍ REAKTOR EPR

Projekt tlakovodního reaktoru EPR s tepelným výkonem 4 270 MW a s hrubým elektrickým výkonem 1600 MW, těží z bohatých inženýrských zkušeností německých a francouzských společností Siemens a Framatome, které k jeho vývoji roku 1989 založily společný podnik Nuclear Power International (NPI). Celý blok je složen ze čtyř fyzicky zcela oddělených částí obklopujících ze všech stran dvojdielný betonový kontejnment. Vnitřní kontejnment z předpjatého betonu je odolný proti přetlaku v případě exploze primárního okruhu včetně parogenerátorů. Vnější železobetonový plášť je pak odolný mj. i proti pádu letadla. V prostoru mezi nimi je udržován podtlak. Každá ze čtyř smyček v samostatné přístavbě s čerpadly a pomocnými systémy



Koncepce reaktoru AP-600 se zvýšenou jadernou bezpečností, jehož jednotlivé bariéry se navzájem samovolně uvádějí v činnost

chlazení má samostatné záložní elektrické napájení. Ve Francii a ve Finsku se již tyto pokročilé reaktory budují.

AMERICKÝ TLAKOVODNÍ REAKTOR AP-600

Tlakovodní reaktor AP-600 vyvinula americká společnost Westinghouse na objednávku šestnácti elektrárenských společností. Vysoké bezpečnosti dosáhne zejména nižší hustotou energie v aktivní zóně. Pro elektrický výkon 600 MW_e vystačí jen dvě chladicí smyčky.

Důsledným využitím pasivní bezpečnosti s tepelnými výměníky a autonomním ochlazováním vnitřního ocelového kontejneru, nad kterým je umístěna betonová ochranná obálka, se podařilo snížit počet čerpadel, nádrží, výměníků, potrubí,

ventilů a dieselgenerátorů. Projekt počítá s možností velmi rychlé výstavby, snížením investičních nákladů a s životností bloku po 60 let! V případě havárie aktivní zóny nebo poškození tlakového okruhu parogenerátorů dokáží tepelné výměníky pasivního systému v každé smyčce bezpečně odvádět teplo přirozenou cirkulací. Dvě nádrže a dva tlakové vodní akumulátory mají za všech okolností doplňovat chladicí vodu s borem. Během prvních deseti hodin by se kontejnment zaplavil vodou. Hromadící se teplo by pak odváděl mezerou mezi ocelovým a betonovým pláštěm kontejneru chladicí energii. Koncentraci radioaktivních zplodin v kontejnmentu sníží pasivní sprchovací systém, který využije vodu s přídavkem kyseliny borité v několika nádržích, z nichž

bude automaticky vytlačována stlačeným dusíkem. Díky tomu odpadá řada čerpadel, potrubí, ventilů a řídicích prvků. Z modelu AP-600 vychází větší typ AP-1000 s výkonem 1117 MW_e, který se již staví v Číně.

SIEMENS DŮVĚŘUJE FYZIKÁLNÍM ZÁKONŮM

Varný reaktor SWR –1000 s vysokou bezpečností a s elektrickým výkonem 1000 MW_e, otestovaný ve výzkumném centru v Julichu za účasti evropských energetických institucí, se hodlá obejít zcela bez aktivních systémů se vstřikováním chladiva a oběhovým dochlazováním. Jakmile by z jakýchkoliv důvodů došlo k nebezpečnému poklesu hladiny vody v reaktoru a klesl její tlak, spustí snímače pasivní ochrany ve výměnících tepla bez ohledu na operátory bezpečnostní systém: havarijně odstaví reaktor, odtlakuje tlakovou nádobu a zaplaví reaktor vodou.

K žádné akci není třeba ani elektrické energie zvenčí, ani signálů od operátorů. Bez zdroje elektrického proudu se obejde i odvádění zbytkového tepla z aktivní zóny pomocí tzv. havarijních kondenzátorů,



Pohled do reaktoru demonstrační elektrárny HTR-300



Výstavba nejnovější evropské jaderné elektrárny ve francouzském Flamanville

a stejným způsobem by bylo odváděno teplo i z kontejnmentu.

VYSOKOTEPLTNÍ REAKTORY

Samostatný vývojový směr představují **vyso-kotepltní reaktory**. Jak název napovídá, hlavní výhodou těchto reaktorů je podstatně vyšší pracovní teplota, než při jaké se provozují klasické tlakovodní reaktory. Díky tomu lze dosáhnout výrazně vyšší účinnosti výroby elektrické energie až 40 %. Ještě výhodnější by bylo použití takového reaktoru v blízkosti provozů s vysokou spotřebou technického tepla, například u metalurgických závodů nebo při zpilyňování uhlí.

Vysokotepltní reaktory mají pracovat při teplotě kolem 1000 °C, nemohou být tedy přímo chlazeny vodou jako reaktory tlakovodní či varné. Odvod tepla z reaktoru zprostředkovává plyn. Používá se helium, které je k jaderným i chemickým procesům netečné a zároveň dobře přenáší teplo. Palivovými elementy jsou u dnešních demonstračních vysokotepltních

reaktorů grafitové koule, které obsahují zrnka silně obohaceného uranu. Grafit slouží jednak jako pevná, tepelně odolná schránka uranu i vznikajících radioaktivních zbytků, jednak jako **moderátor**, tedy jako prostředí, ve kterém se podstatně snižuje rychlost neutronů po jejich vystřelení ze štěpícího se jádra. Pomalé neutrony mají totiž mnohem větší šanci, že zasáhnou a rozštěpí další uran 235.

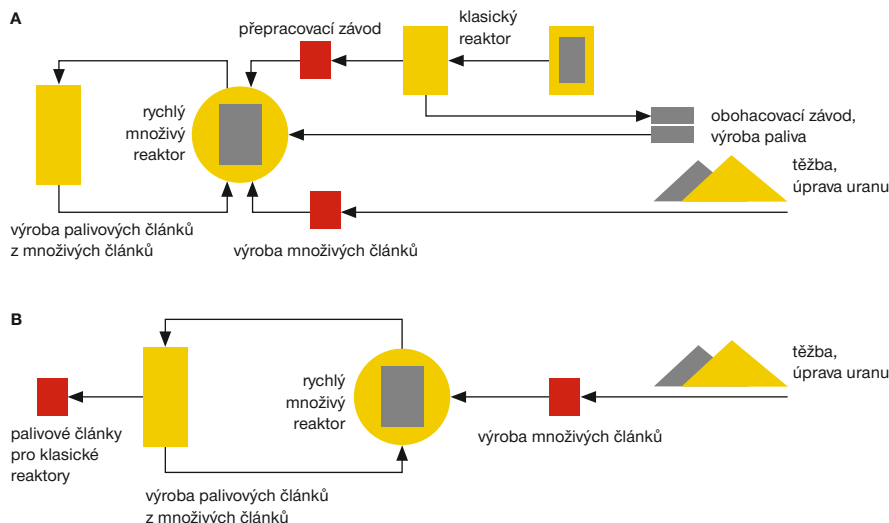
U vysokotepltních reaktorů musí být uran podstatně více obohacen o štěpitelný izotop 235, aby nedocházelo k nadměrné absorpci neutronů, zato se však spolu s ním může použít thorium 232 jako doplňkové jaderné palivo. Thorium se v reakci s pomalým neutronem transmutuje (přeměňuje) na protaktinium, které se beta-rozpadem přemění na štěpitelný uran 233 – nové palivo. Ušetří se tak asi polovina cenného obohaceného uranu. Tím se vysokotepltní reaktor trochu podobá rychlým množivým reaktorům.

Vysoká teplota v reaktoru ovšem neznamená, že jde o reaktor méně bezpečný, spíše naopak. Při vážné nehodě na okruhu chlazení se vysokotepltní reaktor po dobu

několika hodin díky velké tepelné setrvačnosti grafitu a přirozené cirkulaci helia nepřehřívá a nevzniká nebezpečný přetlak. Helium se neaktivuje a palivo i produkty štěpení jsou pevně uzavřeny v grafitových koulích, takže únik radioaktivity je minimální.

Prototypy elektráren s vysokotepltními reaktory již byly odzkoušeny. Například v Německu byla v letech 1986–1990 provozována demonstrační elektrárna THTR-300. Reaktor této elektrárny obsahoval 675 000 palivových koulí o průměru 6 cm. Každá koule obsahovala 10 000 mikrokuliček paliva – celkem 10 gramů thoria a 1 gram silně obohaceného uranu povlečených vždy třemi pevnými vrstvami karbidu křemíku a uhlíku. Výměna palivových koulí s použitým uranem za čerstvé probíhala sypáním za plného provozu reaktoru, což je oproti tlakovodním reaktorům podstatná výhoda. Chladicí helium dosahovalo teploty 750 °C. Demonstrační elektrárna poskytovala do veřejné sítě elektrický výkon 300 MW.

Na základě dobrých zkušeností s tímto experimentálním provozem jsou v Německu



Recyklování paliva v rychlých množivých reaktorech. (A) počáteční stav, (B) ustálený stav.

zpracovávají projekty výkonnějších vysoko-teplotních reaktorů. Jde především o projekt reaktoru HTR–500. Reaktor by měl pracovat i při nižším obohacení uranu než THTR–300, chladicí helium by mělo dosáhnout teploty až 950 °C a elektrárna by měla mít elektrický výkon 500 MW. Další projekty zvažují rozčlenění jednoho velkého reaktoru na řadu menších o elektrickém výkonu kolem 100 MW. Takové modulové uspořádání je sice dražší, ale projekt se snadno přizpůsobuje odlišným potřebám jednotlivých konkrétních míst (to je velká výhoda vzhledem k přísným schvalovacím procedurám) a omezuje se i rozsah případné havárie.

Kulové palivo a modulární uspořádání bude mít i reaktor typu PBMR (Pebble bed modular reactor) chystaný k výstavbě v Jihoafrické republice.

RYCHLÉ MNOŽIVÉ REAKTORY

Od počátku jaderné energetiky je v dlouhodobé perspektivě přisuzován zásadní význam tzv. **rychlým množivým reaktorům**.

V takovém reaktoru není žádný moderátor, řízená štěpná reakce v něm probíhá působením nezpomalených, rychlých neutronů. Rychlé neutrony jsou zároveň schopné jadernou reakcí transmutovat izotop uranu 238 na neptunium, které se beta-rozpadem mění na štěpitelné plutonium 239. Uran 238 tvoří asi 99,3 % přírodního uranu, ale není štěpitelný v energetických reaktorech. Štěpitelný uran 235 tvoří pouze 0,7 % přírodního uranu. Pokud by se jaderná energetika opírala pouze o přírodní uran 235, jako je tomu dnes, nevydržely by jeho zásoby lidstvu o nic déle než zásoby ropy. Pokud by však energetika využívala štěpitelné plutonium vyrobené rychlými množivými reaktory z uranu 238 (nebo uran 233, který stejným procesem vzniká z thoria 232), mohly by zásoby paliva pokrývat současné energetické potřeby až 5000 let. Samozřejmě by to znamenalo i výrazné snížení těžebních prací, které také nepříznivě ovlivňují naše životní prostředí.

Řetězový průběh štěpení musí být u rychlých reaktorů zajištěn vysokým obohacením paliva o uran 235. V dnešních rychlých

reaktorech se používá obohacení 20% až 30%, u některých se již palivo doplňuje i štěpitelným plutoniem 239, které si reaktor dříve vyrobil. Vedle palivových článků se do různých zón reaktoru (hlavně po jeho obvodu) vkládají i články množivé, které obsahují ochuzený uran, resp. thorium, a ve kterých vzniká během provozu reaktoru štěpitelné plutonium, resp. uran. Množivé články po jisté době poskytují surovinu k výrobě palivových článků pro rychlé i pro klasické reaktory.

Je také nutné se postarat o účinné **chlazení** reaktoru. Rychlý množivý reaktor je opravdu vydatným zdrojem energie – v každém litru jeho objemu se uvolňuje až desetkrát více tepla než u klasických pomalých reaktorů. Plyn ani voda takové množství tepla nemohou odvádět, voda navíc zpomaluje neutrony. Proto přichází na řadu sodík, lehký kov, který je při teplotách nad 100 °C tekutý a jeho pohyb se velmi snadno kontroluje elektrickými čidly. Sodík má mnohem lepší tepelnou vodivost než voda i mnohem vyšší teplotu varu (883 °C při atmosférickém tlaku). Teplota sodíku se na výstupu rychlého reaktoru pohybuje obvykle

Rozdělení jednotlivých typů energetických jaderných reaktorů podle generací, příklady

Generace I První prototypové reaktory	Generace II Komerční výkonové reaktory	Generace III Pokročilé reaktory	Generace III+	Generace IV
- Shippingport - Dresden - Fermi I. - Magnox	- LWR-PWR, BWR - BWR - CANDU - AGR - VVER - RBMK	- ABWR - system 80+ - EPR - AP 1000 - VVER 1000	zavedení vývojových konstrukčních zlepšení v oblasti ekonomiky a bezpečnosti provozu v krátkodobém rozmezí	- vyšší ekonomičnost - zvýšená bezpečnost - minimalizace odpadů - odolnost proti zneužití jaderných materiálů

kolem 550 °C, takže chladivo je na rozdíl od tlakovodních reaktorů hluboko pod bodem varu. To je z hlediska bezpečnosti výhodné. Zásadním problémem sodíku je ale jeho velká chemická reaktivita s kyslíkem a s tím související nebezpečí požáru při jeho úniku. Musí se proto zajistit co nejbezpečnější oddělení sodíkového okruhu od vody i od vzduchu a také instalovat mimořádně spolehlivý protipožární systém. Navíc se sodíkový okruh zpravidla zdvojuje, aby nedošlo ani při nepravděpodobné havárii s požárem k úniku aktivity. Neobvyklé, i když méně závažné komplikace přináší také skutečnost, že po odstavení reaktoru a poklesu teploty sodík ztuhne.

A jak jsou na tom rychlé reaktory z hlediska bezpečnosti? Oproti klasickým reaktorům jsou patrně některé odlišnosti. Jmenujme nejprve hlavní komplikace: reaktor pracuje s velkou hustotou štěpitelných prvků, z daného objemu se uvolňuje velké množství tepla, rychlé neutrony podstatně zkracují odezvu reaktoru na vnější vlivy (i na ovládání), únik sodíku představuje nebezpečí požáru. Naopak oproti tlakovodním reaktorům je výhodné, že sodík má vyšší teplotu varu, než při jaké ochlazuje reaktor, a tak v primárním okruhu nemusí být vysoký tlak. Kromě toho vynikající tepelná vodivost sodíku zajišťuje

dostatečné havarijní chlazení reaktoru i bez čerpadel, jen přirozenou cirkulaci přes speciální tepelný výměník.

Z řady demonstračních elektráren s rychlými reaktory, které pracovaly či ještě pracují mj. v Rusku, USA, Francii, Německu, Velké Británii či Japonsku, jmenujme alespoň dvě největší.

V dubnu 1980 byl k ruské energetické síti přiřazován třetí blok Bělojarské jaderné elektrárny o elektrickém výkonu 600 MW s rychlým množivým reaktorem BN-600. Dosud největším rychlým reaktorem byl pak francouzský Superphénix. Je umístěn v jednoblokové demonstrační elektrárně o výkonu 1200 MW mezi Ženevou a Lyonem. Pro tento reaktor byl typický experimentální provoz při sníženém výkonu, s častými odstávkami a testy.

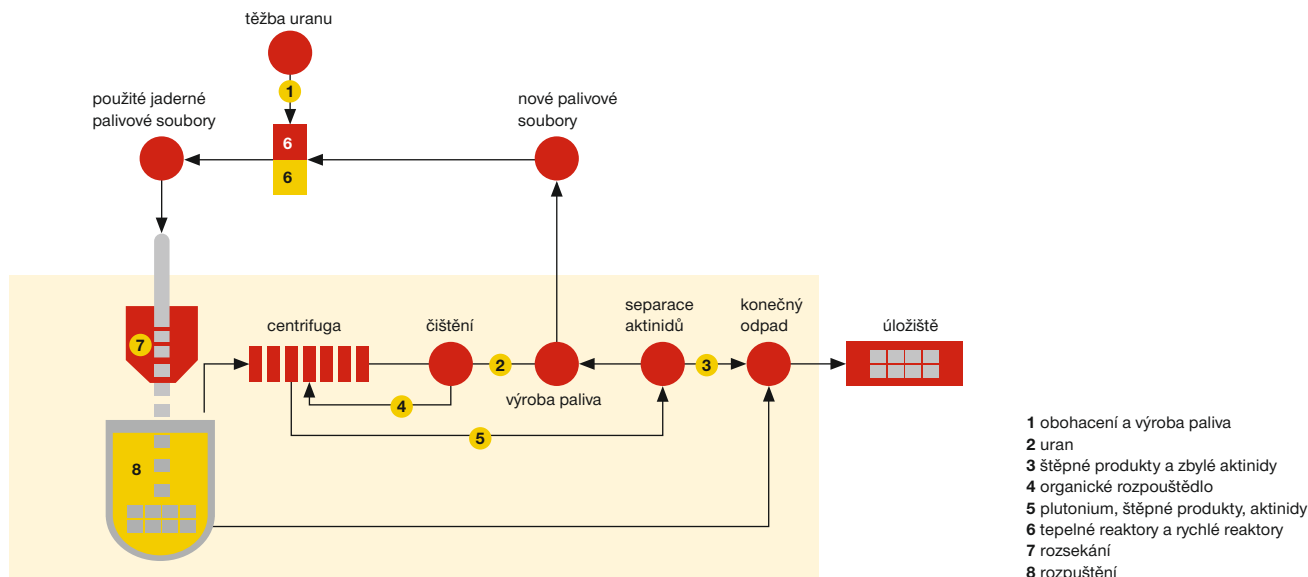
Země, které mají zkušenosti s provozem rychlých reaktorů, pracují zpravidla i na projektech budoucích elektráren s rychlými reaktory. Konstrukteři se přitom zaměřují především na snížení ceny a na co největší zajištění bezpečného provozu reaktoru.

V současné době přesto nelze širší použití rychlých reaktorů očekávat. Jejich provoz je technologicky velmi náročný,

a v důsledku toho vychází dobývání přírodního štěpitelného paliva podstatně levněji než jeho výroba v rychlých reaktorech. Kromě toho existují vážné obavy z úniku plutonia či z jeho zneužití k vojenským nebo teroristickým účelům. Také z hlediska bezpečnostního a ekologického přinášejí zatím rychlé reaktory a zejména provozy následné výroby plutoniového paliva řadu komplikací. Tím spíše je žádoucí do výzkumu rychlých reaktorů investovat potřebné prostředky, vždyť dosud nemáme jiný fungující, vydatný a palivem dlouhodobě zajištěný zdroj energie!

REAKTORY IV. GENERACE

Významný posun z hlediska dalšího rozvoje jaderné energetiky nastal na počátku tohoto tisíciletí, kdy bylo založeno fórum označované **GENERATION IV (GIV)**. GIV se hodlá zabývat dlouhodobější perspektivou a soustředěným výzkumem v oblasti jaderné energetiky. Toto úsilí vychází zejména z dosavadních zkušeností s jadernou energetikou, přičemž se snaží objektivně hodnotit nejen její nesporné úspěchy, ale i problémy a nedostatky. Velmi náročné zadání je pak formulováno tak, aby při ekonomické konkurenceschopnosti jaderné energetiky mohly



Jedno z možných řešení nového pohledu na jaderný palivový cyklus

být její dosavadní nevýhody v maximální míře odstraněny. „Klub“ GIV tvoří 10 zakládajících států: Argentina, Brazílie, Kanada, Francie, Japonsko, Jižní Korea, Jihoafrická republika, Švýcarsko, Velká Británie, Spojené státy americké a v nedávné době se připojila Evropská unie, kterou zastupuje EURATOM.

NOVÝ POHLED NA JADERNÝ PALIVOVÝ CYKLUS

Velkou předností GIV je, že se nově komplexně dívá na jaderný palivový cyklus jako na celek. Znamená to zvážit jak ekonomicky těžitelná množství uranu, tak i jeho celkové využití a množství odpadů, které po provozu uvažovaných jaderných elektráren zůstane. Zásady, které jsou v GIV pokud jde o palivový cyklus uplatňovány, lze shrnout:

- Zvýšit využití uranu (dosud se při tzv. jednorázovém palivovém cyklu, uplatňovaném např. i v ČR, využívá pouze malá

část energie, kterou lze při vhodných strategiích získat).

- Minimalizovat množství vysoceaktivních odpadů.
- Speciální zaměření na aktinoidy (zde se perspektivně může jednat i o tzv. U-Th cyklus, ve kterém se z v přírodě bohatě zastoupeného thoria ^{232}Th vytváří štěpitelný ^{233}U , který se v daném reaktoru využívá pro získávání energie).
- Přepřacování, transport, ukládání, návaznost různých reaktorových systémů.
- Poměrně významně se mění i pohled na nakládání s použitým jaderným palivem (jak z hlediska jeho dalších jaderných přeměn – **transmutace** –, tak i pokud jde o vytvoření dostatečných zásob paliva, např. plutonia, pro některé moderní reaktory, např. **rychlé** či **vysokoteplotní**).

REAKTOROVÉ SYSTÉMY GIV

V rámci GIV je nyní sledování 6 reaktorových systémů, které byly vybrány vyhodnocením

více než 90 možností. Do ověřovacího provozu by se měly dostat okolo roku 2020.

Plymem chlazený rychlý reaktorový systém (Gas-Cooled Fast Reactor System: GFR)

Aktivní zóna je zde chlazená plynem (předpokládá se využití i hélia) a štěpení je zajišťováno především rychlým spektrem neutronů. Helium ohřáté v reaktoru (vstupní teplota 490 °C, výstupní teplota až 850 °C) je přímo přivedeno na heliovou turbínu, která je připojena k elektrickému generátoru. Nejhodnějším kandidátem pro palivo těchto systémů se jeví UPuC v SiC (karbid uranu a plutonia v pokrytí z karbidu křemíku). Výkon jedné reaktorové jednotky by měl být 600 MW_e.

Olovem chlazený rychlý reaktorový systém (Lead-Cooled Fast Reactor System: LFR)

Tento systém bude chlazen olovem nebo slitinou olovo-vismut. Projekt bude

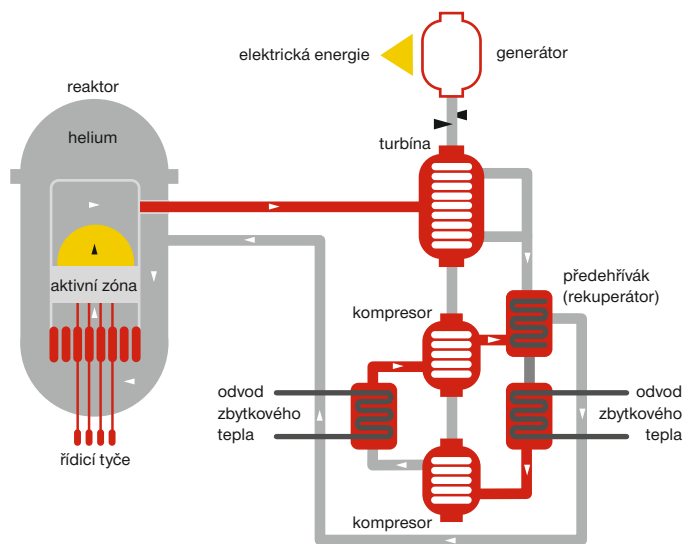


Schéma uspořádání plynem chlazeného rychlého reaktorového systému

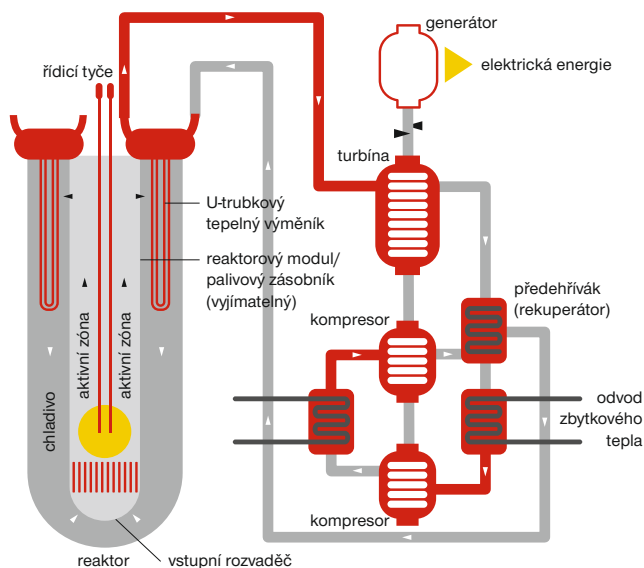


Schéma uspořádání olovem chlazeného rychlého reaktorového systému

zahrnovat tři verze reaktoru: tzv. „bateriový“ o výkonu 50–150 MW_e, „modulový“ o výkonu 300–400 MW_e a „velký“ o výkonu 1200 MW_e. Velmi zajímavý je tzv. „bateriový“ systém, jenž by měl být využíván především ve vzdálených oblastech a rozvojových zemích. Jeho výhodou budou malé rozměry, v podstatě uzavřený palivový cyklus (nutnost výměny paliva po asi 15–20 letech), což redukuje jeho cenu. Palivo bude ve formě nitridu nebo kovové slitiny. Výstupní teploty chladiva se mají pohybovat okolo 550 °C.

Reaktorový systém s roztavenými solemi (Molten Salt Reactor System: MSR)

Reaktorový systém s roztavenými solemi patří mezi nejpokrokovější. Má-li budoucnost i v jaderné energetice patřit reaktorům s tekutým palivem, pak jejich hlavním představitelem je bezesporu právě MSR. Tento systém může pracovat jako transmutor (spalovač **aktinoidů** – radioaktivních prvků s protonovým číslem větším než 90 – a dlou-

hodobých štěpných produktů), reaktor s relativně velmi nízkou tvorbou radioaktivních odpadů i reaktor pracující v U-Th (uranthoriovém) palivovém cyklu. Palivo bude ve formě roztavených fluoridů uranu a plutonia a **moderátorem** (prostředí, ve kterém se snižuje rychlost neutronů po jejich vystřelení ze štěpícího se jádra) je grafit. Teplota roztavené soli na vstupu do reaktoru se bude pohybovat okolo 560 °C a na výstupu okolo 700 °C (s možností až 850 °C). Reaktor s roztavenými solemi byl provozován v 70. letech v Oak Ridge National Laboratory v rámci tzv. Molten Salt Reactor Experiment.

Sodíkem chlazený rychlý reaktorový systém (Sodium-Cooled Fast Reactor System: SFR)

Tento systém využívá ke štěpení rychlé spektrum neutronů (nezpomalené, rychlé neutrony). K chlazení systému bude využíván tekutý sodík, jehož teplota se na výstupu z rychlého reaktoru pohybuje obvykle okolo 550 °C. Pro palivovou směs jsou uvažo-

vány dvě možnosti – dobře známá a ve světě používaná směs **MOX** (Mixed Oxide Fuel – směs UO₂ a PuO₂) nebo kovová slitina uranu-plutonia-zirkonia. Energetické systémy tohoto typu budou navrhovány na výkon 1500–1700 MW_e. Základem pro další výzkum tohoto systému mohou být zkušenosti z provozu (dnes již odstaveného) největšího rychlého reaktoru, jímž byl francouzský Superphénix (výkon 1200 MW_e).

Superkritický vodou chlazený reaktorový systém (Supercritical-Water-Cooled Reactor System: SCWR)

Jedná se o špičkový tlakovodní reaktor, přičemž superkritičností se zde rozumí parametry vodní (kritické parametry vody – vysoká teplota za vysokého tlaku), nikoliv neutronově-fyzikální. Vstupní teplota bude přibližně 280 °C a výstupní 510 °C, přičemž tlak se bude pohybovat okolo 25 MPa. Reaktor bude pracovat v oblasti tepelného spektra neutronů (moderátorem je voda). Palivo bude ve formě UO₂. Tyto reaktorové systémy mají

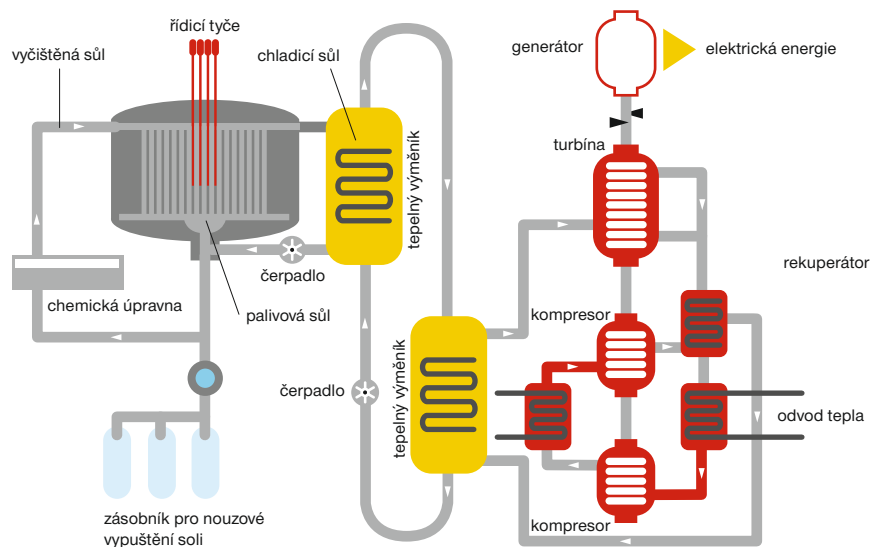


Schéma uspořádání reaktorového systému s roztavenými solemi

být pokračováním klasických tlakovodních reaktorů (PWR – Power Water Reactor). Oproti současným tlakovodním reaktorům mají mít však vyšší účinnost (33–35 % u současných tlakovodních reaktorů a 44 % u budoucích superkritických reaktorů).

Vysokoteplotní reaktorový systém (Very-High-Temperature Reactor System: VHTR)

Vysokoteplotní reaktorové systémy mají být dalším krokem ve vývoji vysokoteplotních plynem chlazených reaktorů. Tyto systémy budou vynikat nejen vysokou bezpečností z hlediska těžkých havárií spojených s tavením aktivní zóny, ale výstupní parametry jejich chladiva (s největší pravděpodobností helia) je přímo předurčují i pro produkci vodíku. Využitím vysoké výstupní teploty chladiva (až 1000 °C) lze produkovat termochemickým procesem vodík přímo z vody. Předpokládá se, že jednotka o výkonu 640 MW_e určená k produkci vodíku může vyrábět až 2 miliony krychlových

metrů vodíku za den. V reaktoru bude probíhat štěpení tepelnými neutrony, modernizovanými grafitem. Předpokládáné palivo bude mít pravděpodobně podobu koule s ZrC nebo SiC pokrytím. Prototyp elektrárny s vysokoteplotním reaktorem byl odzkoušen v Německu v letech 1986–1990, kdy zde byla provozována demonstrační elektrárna THTR-300.

URÝCHLOVAČEM ŘÍZENÝ REAKTOR

Další možný způsob uvolňování jaderné energie spočívá ve využití tříštivých reakcí vyvolaných urychlenými protony. Tento princip byl navržen již v padesátých letech a nyní prožívá svoji velkou renesanci. Nejčastěji je dnes označován zkratkou ADTT z anglického „urychlovačem řízená transmutační technologie“. Reaktor obsahuje jen podkritické množství štěpitelného paliva. Znamená to, že se v něm nedostává neutronů k udržení řetězového charakteru

jaderného štěpení. Řetězová reakce bude probíhat jen tehdy, umístíme-li do reaktoru silný zdroj neutronů.

Takovým zdrojem neutronů má být terčik těžkého prvku (např. z thoria či z olova) bombardovaný svazkem vysoce urychlených protonů. Jádro těžkého prvku, které vždy obsahuje mnoho neutronů, se totiž po zásahu rychlým protonem zpravidla roztrhne. Takto uvolněné neutrony vyvolají štěpení jader v reaktoru, který terčik obklopuje. To znamená, že výkon reaktoru bude možné přímo regulovat pomocí výkonu urychlovače, který je zdrojem bombardujících protonů. To je velmi praktické a hlavně bezpečné – při jakékoli nesnazi stačí vypnout urychlovač a reakce okamžitě vyhasne.

PROČ SE TENTO PRINCIP ZATÍM NEVYUŽÍVÁ?

Hlavní překážkou je příliš nízká účinnost dodávky neutronů prostřednictvím urychlovače protonů. Do urychlovače je potřeba

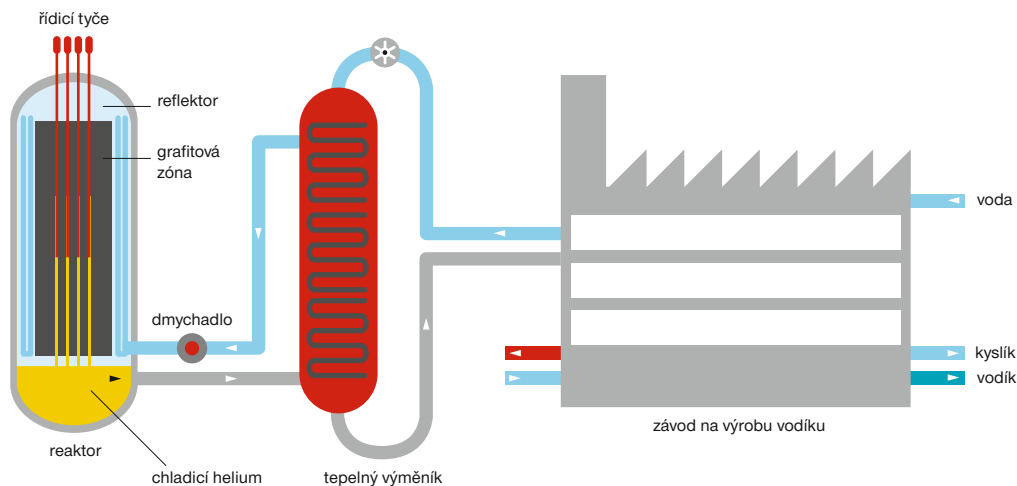


Schéma uspořádání vysokoteplotního reaktorového systému

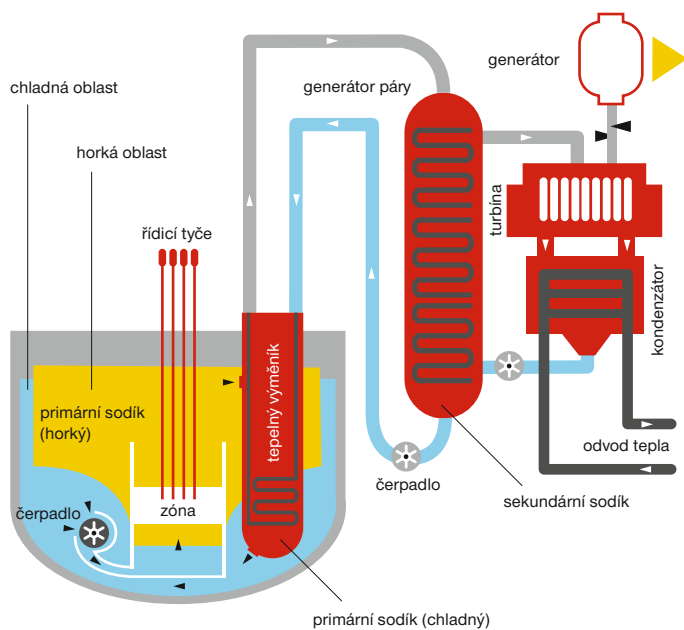


Schéma uspořádání sodíkem chlazeného rychlého reaktorového systému

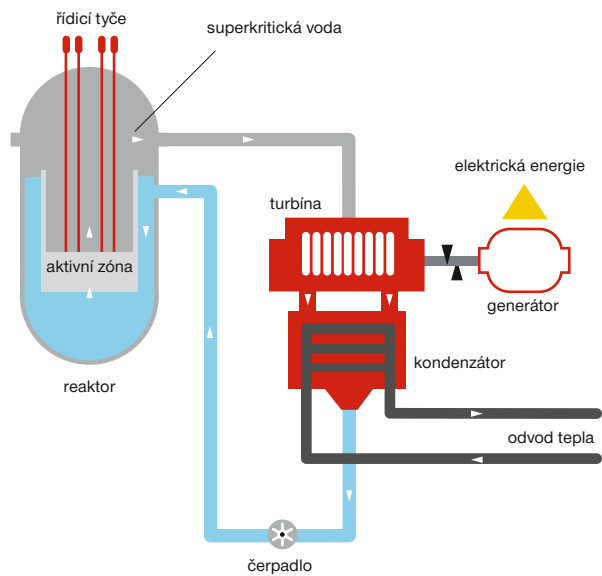
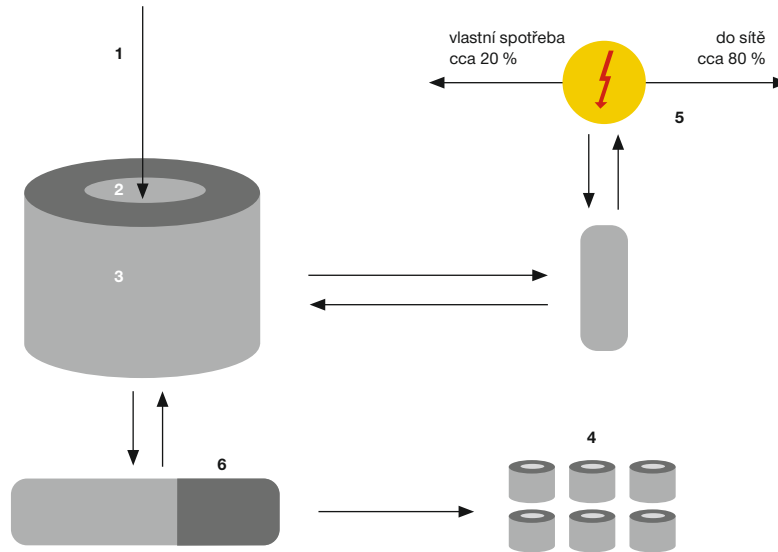


Schéma uspořádání superkritickou vodou chlazeného reaktorového systému



Základní schéma elektrárny řízené urychlovačem (ADTT)

- 1 urychlovač** dodává svazek protonů 800 MeV na terčik
- 2 terčik** ostřelováním terčiků protony dochází k „tříštění“ jádra a uvolnění velkého počtu neutronů
- 3 blanket (reaktor)** v blanketu obklopujícím terčik probíhá štěpná reakce. Palivo obsahující likvidované aktivní odpady protéká blanketem ve formě roztavených solí
- 4 tok odpadů** krátkodobé štěpné produkty určené ke skladování v místním technickém zařízení. Po cca 30 až 100 letech jejich radioaktivity „zmizí“, tj. bude stejně vysoká jako u jiných materiálů, které nás běžně obklopují
- 5 energetický systém** elektrina se vyrábí klasickým způsobem s pomocí páry a turbíny (10–20 % elektriny se vrací do urychlovače)
- 6 oddělování** štěpné produkty s krátkým poločasem rozpadu jsou odděleny. Ostatní prvky se vrací zpět k pokračování transmutace

zavést mnohem více energie, než kolik pak nese svazek protonů, a zdaleka ne všechny protony způsobí tříštivé reakce. Kromě toho je samotná výstavba urychlovače velmi drahá. Naději na výrazný pokrok přinesl až rozvoj nových urychlovačů tzv. protonových děl v rámci projektu „hvězdných válek“, který probíhal v USA v osmdesátých letech. Jedno takové velké protonové dělo se nachází v Národní laboratoři Los Alamos a má se nyní stát základem pro první experimentální provoz ADTT.

Optimistické odhady uvádějí, že i přes pokrok v konstrukci urychlovačů bude u ADTT celá jedna pětina vyrobené elektriny určena na provoz urychlovače. Jinými slovy, bezpečnější řízení elektrárny půjde na úkor účinnosti provozu. Naštěstí má ADTT i jiné, v dnešní době velmi podstatné výhody:

- obdobně jako v rychlých reaktorech lze pomocí ADTT transmutovat thorium na uran 233. V případě ADTT se ale uran 233 využije jako palivo okamžitě, bez nepříjemné okliky přes úpravu;

- bez náročných úprav lze v ADTT spalovat i přebytky plutonia, které jsou dnes nebezpečným pozůstatkem z období rozsáhlého jaderného zbrojení. Úpravy plutonia pro klasické elektrárny jsou komplikované jak z hlediska ochrany životního prostředí, tak z hlediska zajištění plutonia před vojenským či teroristickým zneužitím;
- pomocí ADTT lze přeměnit (transmutovat) dlouhožijící radioaktivní prvky na prvky s podstatně kratší dobou rozpadu.
- Podle ADTT mohou neutrony v reaktoru po stupně „rozbit“ všechny těžké dlouhožijící radioizotopy.

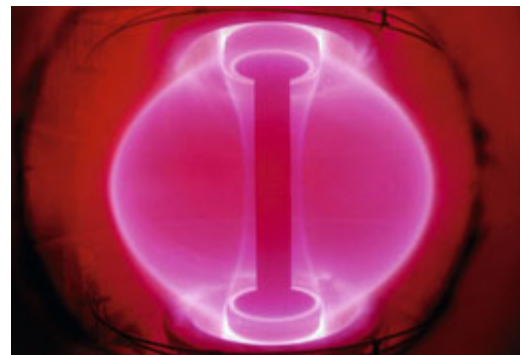
Právě poslední bod znamená velkou naději pro ty, kteří se nedokáží smířit s dlouhodobou radiací vyhořelého jaderného paliva. Projekty založené na ADTT předpokládají, že se vyhořelé jaderné palivo z tradičních elektráren dále energeticky využije a přitom se zároveň zlikvidují radioaktivní látky s dlouhým poločasem rozpadu. Projekt je velmi lákavý i ekonomicky – z části peněz, které

již dnes jaderné elektrárny spoří na likvidaci vyhořelého jaderného paliva (tedy zatím na hlubinná úložiště), by se u elektráren vybudovaly urychlovače, a ty by vedle likvidace nebezpečných zářičů pomáhaly vyrábět další elektrinu. To, co dnes považujeme za odpad, by bylo díky ADTT opět palivem.

A hlavní obtíže? První jsme již uvedli – nedostatečná účinnost urychlovačů.

Zbývá vyjasnit i přechod protonů z vysokého vakua urychlovače do prostředí horkého olověného či thoriového terčiku a chlazení terčiku. Celou řadu komplikací bude přinášet také třídění velmi aktivních látek. Odpady (stabilní a krátkožijící produkty jaderných reakcí) bude nutné oddělovat od dlouhožijících radioizotopů, které musí v reaktoru zůstat spolu s palivem, aby byly transmutovány.





Pohled do nitra tokamaku na žhavé plazma

JADERNÁ SYNTÉZA

Nejvíce nadějí na vyřešení tísnivého nedostatku energie v nadcházejících letech je vkládáno do vyřešení a následného rozvoje termonukleární energetiky. Napodobení syntetických procesů, slučování vodíku a jeho izotopů v helium, což zatím dokáže pouze Slunce, by navždy zajistilo pro celé lidstvo dostatek energie. Cesta vedoucí k tomuto cíli však bude ještě značně nákladná a dlouhá.

Bouřlivý rozvoj technologií klade stále stoupající nároky na energetické zdroje. Klasické zdroje, převážně vázané na fosilní paliva, spolu s energiemi řek nebudou zanedlouho schopny pokrývat stoupající spotřebu. Procesy založené na bázi štěpení jader těžkých prvků (uranu apod.) v jaderných elektrárnách sice umožní prodloužit krytí energetické potřeby po další dobu, ale zásoby štěpného materiálu nejsou rovněž neomezené.

Využívání energie štěpitelných prvků nelze dnes z hlediska dlouhodobého výhledu pokládat za příliš perspektivní. Kromě jejich omezených zásob je tu ještě hledisko radioaktivních odpadů a jejich nesnadného ukládání. Tato stránka věci se stane zvlášť závažnou v době, kdy po vyčerpání zdrojů fosilních paliv budou již téměř veškerou energii vyrábět jaderné elektrárny.

Všechny tyto potíže zmizí až do výroby elektrické energie vstoupí nový fenomén, proces zcela odlišný a dá se říci opačný,

než je štěpení jader těžkých prvků. Vyspělý svět a jeho věda usilovně pracuje na naději příštích tisíciletí: na rozvinutí procesu spojování lehkých prvků v jádra prvků těžších, tj. procesu **nukleární fúze** neboli **jaderné syntézy**.

NUKLEÁRNÍ FÚZE

Zásadní převrat ve využívání jaderné energie by měl přijít s přechodem na řízenou jadernou syntézu, při níž je energie uvolňována nikoli řízeným štěpením velmi těžkých jader, ale naopak řízeným slučováním jader velmi lehkých.

Reakce, při kterých se jádra lehkých prvků spojují v těžší jádro jiného prvku, byly studovány již v roce 1932. Tedy dříve, než bylo objeveno štěpení uranu. Na urychlovači byl bombardován terčík obsahující **těžký vodík (deuterium)**, který se od prostého vodíku liší tím, že jeho jádro obsahuje jeden neutron navíc. „Střelivem“ byla urychlená

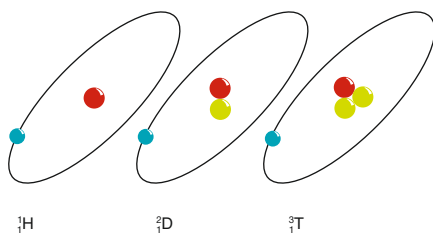
jádra těžkého vodíku, nazývaná **deuterony**. Bylo zjištěno, že některý ze zrychlených deuteronů zasáhl **deuterony** terčíku tak, že proběhla jaderná syntéza. Vznikl buď izotop **lehkého helia** a **neutron**, anebo **tritium**, což je nejtěžší izotop vodíku, obsahující ve svém jádře dva neutrony.

Při těchto reakcích se uvolňuje 50 000 kWh energie na gram deuteria. Přibližně stejné množství energie se získá spálením tří tun kvalitního černého uhlí.

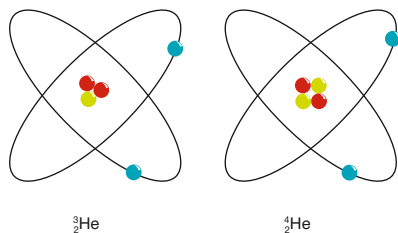
Tritium, produkt této reakce, se v přírodě prakticky vůbec nevyskytuje. Je radioaktivní a samovolně se rozpadá s poločasem 12 let na izotop lehkého helia a elektron.

Kdyby se podařilo uskutečnit prakticky proveditelnou a technicky zvládnutelnou jadernou syntézu deuteria tak, aby se uvolněná energie dala využít, získalo by tím lidstvo zdroj, který by stačil pokrýt jeho spotřebu energie po dlouhá tisíciletí.

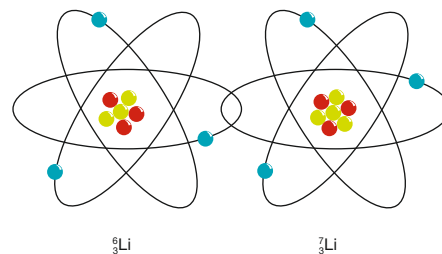
Z hlediska člověka vlastně neomezeně dlouho. Deuterium se vyskytuje v přírodě



Izotopy vodíku: (1) obyčejný vodík, (2) těžký vodík – deuterium, (3) tritium



Izotopy helia



Izotopy lithia

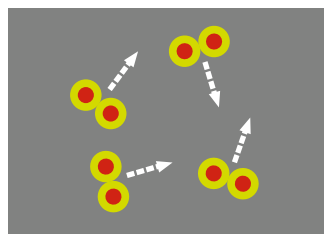
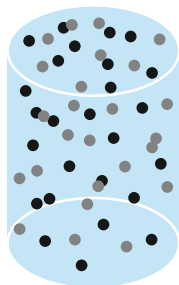
	+		→		+		+	3,26 MeV		
${}^2_1\text{D}$	+	${}^2_1\text{D}$	→	${}^3_2\text{He}$	+	${}_0^1\text{n}$	+	3,26 MeV		
	+		→		+		+	4,03 MeV		
${}^2_1\text{D}$	+	${}^2_1\text{D}$	→	${}^3_1\text{T}$	+	${}^1_1\text{H}$	+	4,03 MeV		
	+		→		+		+	17,6 MeV		
${}^2_1\text{D}$	+	${}^3_1\text{T}$	→	${}^4_2\text{He}$	+	${}_0^1\text{n}$	+	17,6 MeV		
	+		→		+		+	18,4 MeV		
${}^2_1\text{D}$	+	${}^3_2\text{He}$	→	${}^4_2\text{He}$	+	${}^1_1\text{H}$	+	18,4 MeV		
	+		→		+		+	22,4 MeV		
${}^6_3\text{Li}$	+	${}^2_1\text{D}$	→	${}^4_2\text{He}$	+	${}^4_2\text{He}$	+	22,4 MeV		
	+		→		+		+	4,02 MeV		
${}^6_3\text{Li}$	+	${}^1_1\text{H}$	→	${}^3_2\text{He}$	+	${}^4_2\text{He}$	+	4,02 MeV		
	+		→		+		+		+	14,9 MeV
${}^7_3\text{Li}$	+	${}^2_1\text{D}$	→	${}^4_2\text{He}$	+	${}^4_2\text{He}$	+	${}_0^1\text{n}$	+	14,9 MeV
	+		→		+		+	17,3 MeV		
${}^7_3\text{Li}$	+	${}^1_1\text{H}$	→	${}^4_2\text{He}$	+	${}^4_2\text{He}$	+	17,3 MeV		

Nejdůležitější reakce jaderné syntézy

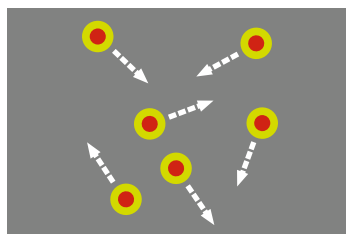
všude, kde se vyskytuje vodík, a to v poměru 1 : 6 000. Jen ve světových oceánech je $2,6 \cdot 10^{13}$ tun deuteria. Toto deuterium lze od vodíku snadno oddělit a zužít jako jaderné palivo. Ukazuje se však, že praktické uskutečnění této reakce je nesmírně obtížný vědecký i technický problém. Cesta použití urychlovačů pro tento účel nevede k cíli. Naprostá většina urychlených deuterionů mine cíl a nezasáhne deuterony v bombardovaném terčiku. Jen zhruba každý miliontý deuterion „se treťí“ a uskuteční jadernou syntézu.

Aby došlo ke spojení dvou deuterionů (nebo deuterionu a jádra tritia) v jádro izotopu helia, musí překonat obě částice obrovskou překážku. Tou je jejich souhlasný elektrický náboj. Je známo, že souhlasné náboje se odpuzují, a proto pro překonání odpuzivých elektrických sil se obě jádra proti sobě musí pohybovat vysokou rychlostí. Jen tehdy se při vzájemné srážce k sobě přiblíží na vzdálenost méně než 10^{-13} cm. Překonají-li jádra tuto mez, začnou mezi nimi působit jiné zákonitosti a dostávají se ke slovu přitažlivé jaderné síly. Teprve tehdy se vytvoří podmínky pro uskutečnění jaderné syntézy.

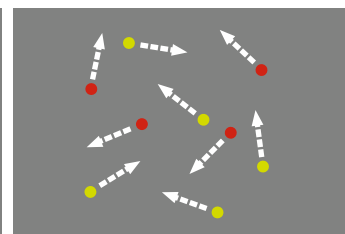
Při malých rychlostech částic k tomuto jevu nedojde, neboť jádra nejsou schopna překonat elektrické odpuzivé síly.



A ●● molekula deuteria



B ●● atom deuteria



C ● deutron ● elektron

Plynné deuterium uzavřené v myšlené „ideální“ nádobě při různých teplotách. (A) při pokojové teplotě je deuterium molekulárním plynem, (B) při teplotě několika tisíc stupňů se deuteriový plyn skládá z atomů, (C) při teplotě blízké milionu stupňů jsou již všechny atomy deuteria ionizovány, vzniká plazma složené z rychle se pohybujících volných elektronů a deuteronů.

TERMONUKLEÁRNÍ REAKCE

Rychlost je možné částicím udělit také jinak než urychlovačem. Zahříváme-li směs plynného deuteria a tritia, atomy se stoupající teplotou stále více ionizují a elektrony spolu s volnými jádry zvyšují svou rychlost.

Rychlost částic je přímo úměrná teplotě. Tedy čím vyšší je teplota směsi, tím rychleji se částice pohybují. Pro překonání odpudivých elektrických sil jader je třeba teploty mnoha milionů stupňů Celsia. Aby reakce syntézy deuterium-deuterium (D-D) na helium a neutron dosáhla stability a sama trvale „hořela“, je třeba dosáhnout teploty 350 milionů °C.

Podstatně nižší „zápalnou“ teplotu má reakce tritia s deuteriem. „Zápalná“ teplota této směsi je „jen“ zhruba 40 milionů °C. Nevýhodou této reakce je, že tritium se v přírodě téměř nevyskytuje a je ho nutno vyrábět z **izotopu lithia** bombardováním neutrony. Tento mezistupeň výroby „paliva“ bohužel proces značně komplikuje a prodražuje. Udržení tak vysokých teplot po delší dobu se však ukázalo být velmi těžkým technickým problémem.

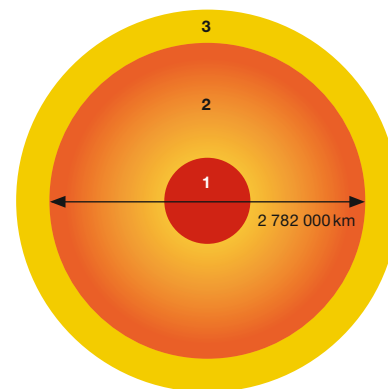
Zdánlivě nejjednodušší by bylo použít jako palivo prostý vodík, kterého je všude dost. Jeho „zápalná“ teplota pro rozběhnutí termo-

nukleární syntézy je však natolik vysoká, že syntéza jeho jader může probíhat jen ve Slunci. Přírozený sluneční reaktor zajišťuje ve svém středu takové vysoké tlaky a teploty, jaké jsou zatím mimo technické možnosti člověka.

Pro praktickou výrobu elektrické energie se dnes jako nejperspektivnější jeví ohřívání termonukleárního paliva opakujícími se elektrickými impulzy. Dodávaná energie ohřívá zředěný plyn v reakčním prstenci a ten, zcela ionizovaný, vytváří žhavé plynné plazma. Snahou je, aby celý proces byl říditelný a v každém okamžiku ovladatelný.

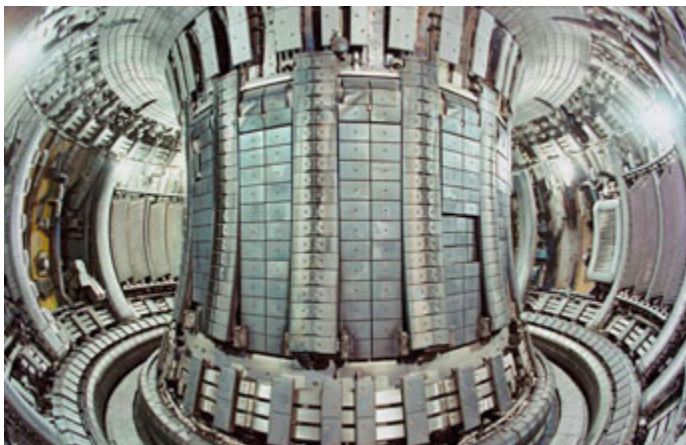
Plazma je směs zcela ionizovaných částic rozložených mateřských prvků, pohybujících se vysokými rychlostmi za extrémně vysokých teplot.

Základní podmínkou pro uskutečnění prakticky využitelné termonukleární reakce je udržet „provazec“ žhavého plazmatu v homogenním, spojitým stavu alespoň po tak dlouhou dobu, aby jaderná syntéza měla čas proběhnout. Pro výzkumníky je to však trvalá a jen velmi obtížně zvládaná překážka. Zatím dosahovaná doba, po které se horké plazma v rychlém výboji udrží ve spojitě formě, je velmi krátká. Vlivem vnitřních nestabilit se úzký kanál výboje rozpadá dříve, než je syntézu jader možno energeticky využít.

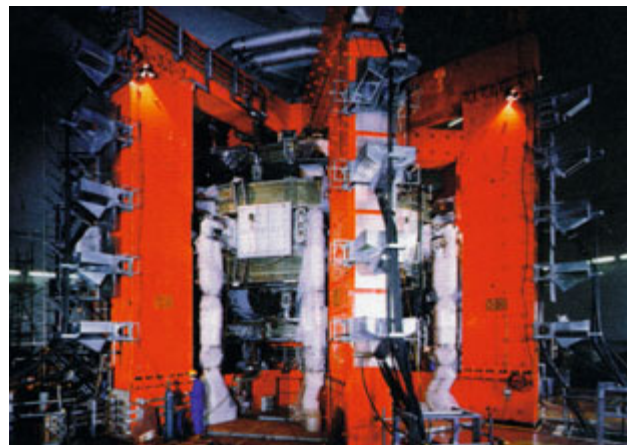


Průřez Sluncem: (1) aktivní oblast kolem slunečního středu, ve které probíhají termonukleární reakce; (2) vrstva horké sluneční hmoty, která tvoří izolaci aktivní oblasti; (3) sluneční atmosféra

Pro zvýšení stability zúženého plazmatu, a tím prodloužení doby impulzního výboje se používá magnetického pole z vnějšího zdroje. Supravodivé materiály jsou zde zcela běžným předpokladem, protože požadavky na magnetické výkony cívek jsou značné. Typickým představitelem tohoto způsobu byla jedna z prvních aparatur – anglická ZETA. Impulzní výboj v ZETĚ se uskutečňoval v komoře tvaru velkého prstence, naplněné zředěným deuteriem. Výboj měl trvání několika tisícín sekundy.



Pohled do komory tokamaku JET, ve které v roce 1991 poprvé proběhla v měřitelném rozsahu řízená termonukleární syntéza



Tokamak JET v Culhamu u Oxfordu – společný experiment Evropského společenství

Získané horké plazma je třeba izolovat a uzavřít v omezeném prostoru. „Nádoba“ jejíž stěny by byly pro plazma nepropustné a snesly i jeho vysokou teplotu a tlak, nemůže být zkonstruována ze žádného materiálu složeného z atomů. Obal „nádob“ se proto vytváří silným magnetickým polem.

Problémy jsou i v nalezení vhodného tvaru „nádob“. Jeden z prvních a nejdůležitějších tvarů magnetických nádob byl prstenec. Magnetické pole je v něm udržováno ve směru jeho osy. Částice se zde pohybují po šroubovicích. Pro udržení částic v blízkosti osy i po větším počtu oběhů se přidává dodatečné krouivé magnetické pole. Na tomto principu byla založena například americká aparatura nazvaná STELLARATOR.

Jiný tvar má magnetická nádoba v aparatuře, kde magnetické pole vytváří krátký válec, který je na obou koncích uzavřen zesíleným magnetickým tokem. Toto pole odráží a vrací zpět částice, které by jinak unikaly ve směru osy válce. Zesilováním magnetického pole je možné nádobu zmenšovat a zvyšovat tak teplotu. Známá aparatura tohoto typu je ruská OGRA.

TERMONUKLEÁRNÍ REAKTORY

Věda zatím zvolila dvě základní cesty, kudy se nyní ubírá výzkum termonukleární syntézy.

Základní rozdíl mezi nimi je ve způsobu, jakým se do „paliva“ přivádí potřebná energie pro získání žhavého plazmatu. První cesta využívá nyní již klasických elektrických pulzů do zředěné směsi „paliva“ v magnetických „nádobách“ různého tvaru, druhá využívá světelných pulzů vysokovýkonných laserů, soustředujících své paprsky do spalovací komory.

CESTA PRVNÍ

Hlavní částí současného fúzního reaktoru je prstencová kruhová nádoba, uvnitř naplněná plazmatem zahříváným silnými elektrickými výboji na vysoké teploty. Potřebnou vzdálenost plazmatu od stěn zajišťují silná magnetická pole.

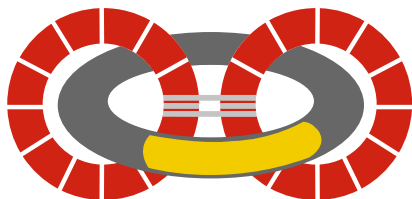
Touto úpravou se tepelné zatížení stěn sníží na 1 000 až 1 300 °C. Vnitřní nádoba je obklopena pláštěm z tekutého lithia.

Lithium zde plní několik úkolů. Jednak ochlazuje stěny vnitřní nádoby, jednak pů-

sobením unikajících neutronů z procesu jaderné syntézy se zde rodí tritium. Současně plní i poslání energetického média. Odvádí vyrobené teplo k výměníkům elektrárny, kde ohřívá vodu ke klasické výrobě elektrické energie v turbínou poháněném generátoru.

Další vrstvu obalu tvoří grafitový plášť nebo voda nasycená bórem. Zde se zachycují anebo zpomalují neutrony, které by jinak pronikaly mimo reaktor.

Grafitový štít a bórová clona mají za úkol odstranit problém, který byl pojmenován jako **druhotně vybuzeá radioaktivita**. Při jaderné syntéze totiž dochází k lavinovitému úniku neutronů. Neutrony však nemají elektrický náboj, a proto nepodléhají vlivu magnetického pole. Hrozí proto nebezpečí, že bez odstínění budou vnikat do jader atomů prvků materiálu, ze kterého je reaktor zkonstruován. Mnohá z nich pak přemění na uměle radioaktivní jádra jejich izotopů. Odpad (nebo také výstup) jaderné syntézy sám o sobě radioaktivní není. Vzniká helium. Není-li však proces probíhající v reaktoru dokonale stíněn a izolován, stane se radioaktivním sám materiál, z něhož je reaktor postaven.



Toroid

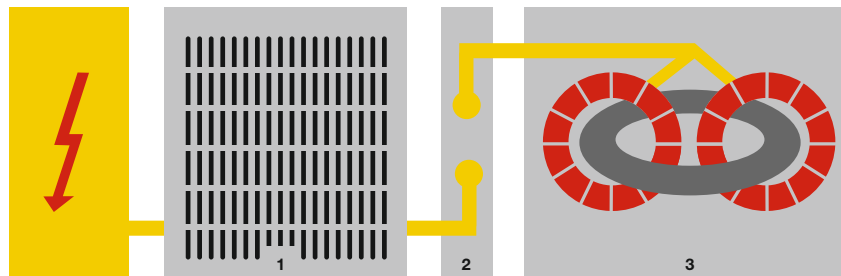
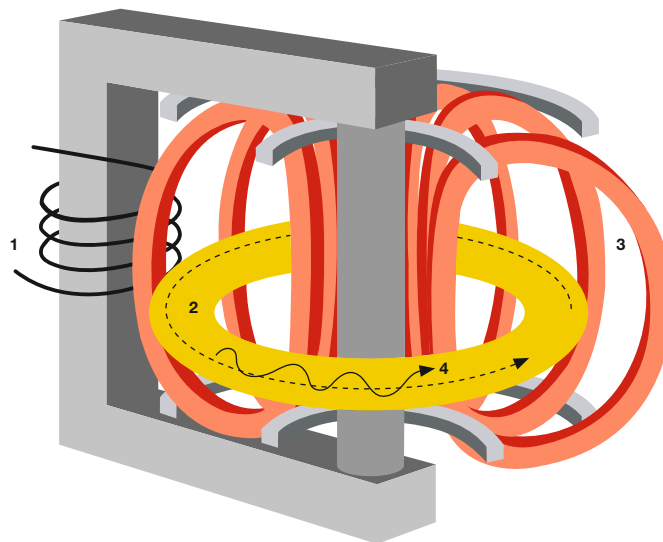


Schéma elektrického zapojení ZETY. Baterie kondenzátorů (1) se nabije stejnosměrným elektrickým proudem z usměrňovače na napětí až 25 000 voltů. V okamžiku, kdy chceme vyvolat výboj v toroidu (v prstencové trubici), sepně se speciální spínač (2) a kondenzátory se začnou vybíjet do primárního vinutí transformátoru (3), jehož jádro je tvořeno dvěma železnými prstény. Proudový impuls v primárním vinutí vyvolá v sekundárním vinutí, tvořeném uzavřenou trubicí se zředěným deuteriem, elektrický výboj. Při plném využití kondenzátorů dosáhne proud v ZETĚ až 200 000 ampérů.

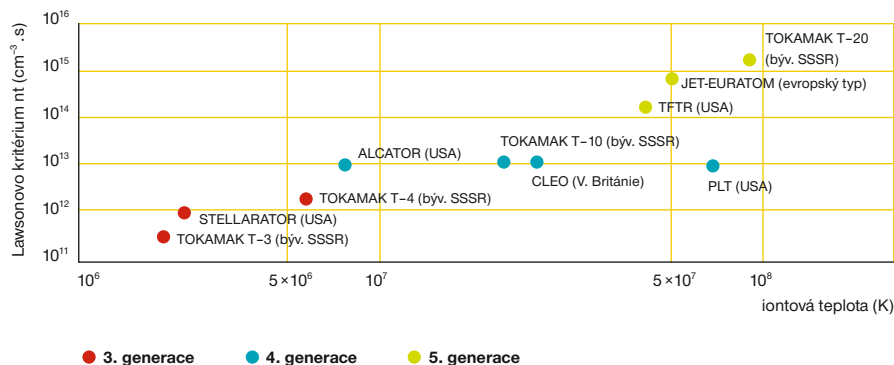
Dále je zde tepelná izolační vrstva a soustava supravodivých cívek, vytvářejících magnetické pole uvnitř reaktoru. Chladicím prostředkem supravodivé části bývá tekuté helium, snižující teplotu na -269°C . Reaktor je tedy velmi složité technické dílo, kde v těsném sousedství leží zóny teplé miliony stupňů Celsia a části zmrazené k blízkosti absolutní nuly. Předpokládá se, že elektrický výkon reaktorů tohoto typu by byl 2 000 až 3 000 MW.

Reprezentantem takového termojaderního reaktoru je známý TOKAMAK, zkonstruovaný v bývalém SSSR. Je to mezinárodně přijatý souhrnný název pro reaktory s výbojovou trubicí prstencového tvaru, nazývanou **toroid**, uloženou v silném magnetickém poli. K zapálení výboje v takové trubici není třeba umísťovat elektrody. Stačí situovat trubici tak, aby tvořila sekundární vinutí transformátoru, a do primáru transformátoru pak zavést impuls elektrického proudu. Tím vznikne uvnitř výbojové trubice elektrické napětí; které ionizuje deuterium. Obdobně jako v trubici s elektrodami nastane uzavřený prstencový výboj, který se po jeho zúžení vlivem silného magnetického



- 1 vinutí primárního obvodu transformátoru
- 2 sekundární obvod: smyčka vodíkového plazmatu
- 3 cívky formující magnetické pole
- 4 šroubovitě magnetické pole

Princip tokamaku: Vodíkový plyn tvoří v sekundárním obvodu obřího transformátoru smyčku nakrátko. Tak je v plynu indukován obrovský elektrický proud, který jej zahřívá na extrémní teploty. Při těch jsou atomy vodíku roztržány na volné elektrony a volná jádra – vzniká tzv. vodíkové plazma. Cívky vytvářejí silné magnetické pole, spolehlivě izolující vodíkové plazma od chladné konstrukce. Plazma může být navíc přehříváno elektromagnetickým vlněním ze silných vysílačů a rychlými atomy vodíku z urychlovačů.



Závislost Lawsonova kritéria na dosažených teplotách plazmatu u různých typů toroidních komor

pole soustředí v ose trubice a stěn se vůbec nedotkne.

Aby termonukleární reakce vznikla a udržela se, je v reaktoru zapotřebí zahřát určité množství „paliva“ na vysokou teplotu a udržet je po určitou dobu v konzistentním stavu. Vzájemné vztahy mezi druhem „paliva“, jeho množstvím, minimální výškou potřebné teploty a dobou nutnou k proběhnutí reakce jsou mezi sebou vázány a popsány tzv. Lawsonovým kritériem. To znamená, že je možné určit při změně jedné z výše uvedených hodnot hodnoty ostatní, neboť ty se závisle mění. Věda tak získala užitečného pomocníka s velice užitečnými důsledky.

Jako příklad můžeme uvést hodnoty plynoucí z Lawsonova kritéria pro fúzi deuteria a tritia. Pro zdárný průběh této reakce je potřeba, aby reagovalo 1×10^{14} jader za sekundu v 1 cm³ plazmy při teplotě 5×10^7 . Pro samotné deuterium by tato tepelná hodnota dosáhla hodnoty 5×10^9 K. Kelviny jsou odvozeny od absolutní teploty. Pro přepočítání Kelvinů na °Celsia platí rovnice:

$$T(K) = 273,16 + t(^{\circ}C)$$

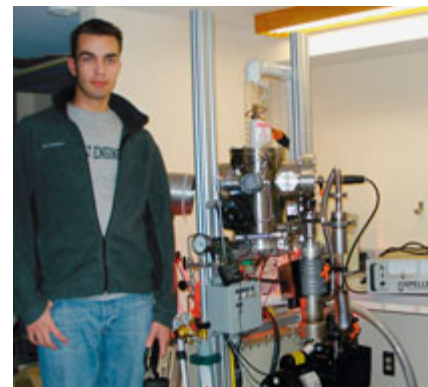
Termonukleární fúze by se tedy měla kontrolovaně rozhořet při teplotě 50 milionů kelvinů v plazmě o hustotě 100 bilionů

jader v jednom krychlovém centimetru po dobu minimálně jedné sekundy. Nejlepšího výsledku zatím dosáhl evropský tokamak JET, největší na světě, který dokáže spalovat směs deuterium – tritium. V roce 1997 pokořil hned tři rekordy: vyprodukoval 22 MJ fúzní energie v jednom výboji, zaznamenal špičkový výkon 16,1 MW a dosáhl výtěžku reakce 65 %, tj. poměr produkovaného výkonu k celkovému příkonu 0,65. Podařilo se také, že stabilně dodával 4 MW fúzního výkonu po dobu 4 sekund. V roce 2003 bylo dosaženo dosavadního rekordu trvání fúzní reakce ve francouzském tokamaku TORE SUPRA: 6,5 minuty.

CESTA DRUHÁ

Jiným myšlenkovým proudem v řešení termonukleární reakce je taková konstrukce reaktoru, kde energie zvyšující teplotu deuteria není dodávána elektrickými pulzy, ale světlem laserových paprsků. Je to princip tzv. inerciálního udržení.

Termonukleární syntéza proběhne působením svazků laserových paprsků na kapsle obsahující směs deuteria a tritia. K tomuto účelu se používají plynové lasery. Paprsky se mnohonásobně zesilují optickým systémem.



V roce 2006 postavil fusor produkující neutrony sedmnáctiletý student Thiago Olson z USA. Zařízení pracuje na principu inerciálního elektrostatického udržení.

Jeden světelný pulz laserové soustavy je pak schopen během 100×10^{-12} sekundy předat ozařované kapsli světelnou energii až 50 kJ, což odpovídá špičkové vstupní energii až 100×10^6 MW.

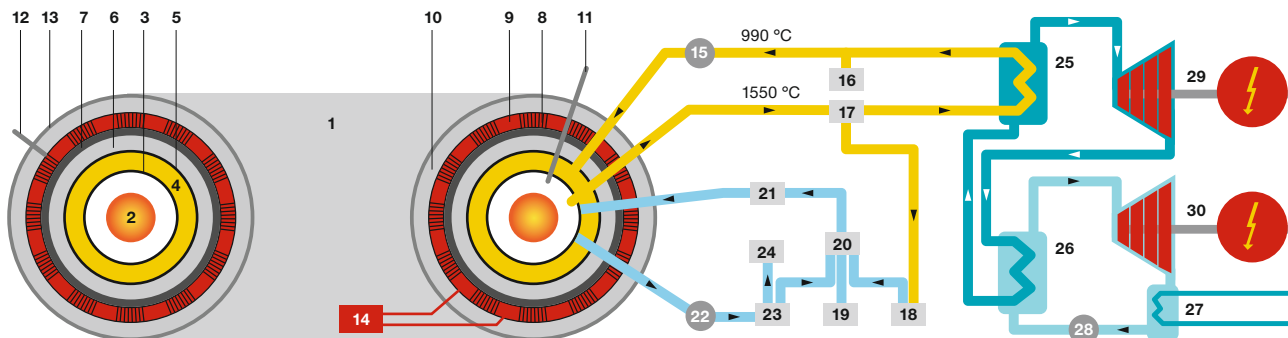
Předpokládá se použití kapslí (tablet) složených ze zmrzlého deuteria a tritia. Vnější vrstva kapsle se odpaří (akce), což způsobí, že její vnitřní objem je stlačen velkou silou (reakce). Stlačení zvýší hustotu a teplotu na takové hodnoty, že se zapálí fúzní reakce. Hlavním problémem inerciálního fúze je dosažení homogenního ozáření kuličky při vysoké opakovací frekvenci: ve fúzní elektrárně pracující na tomto principu by mělo být každou sekundu ohřáto a zapáleno 10–20 kapslí. Reakce musí být velmi rychlá, neboť žhavé plazma není drženo žádným vnějším silovým polem. K reakci musí dojít dříve, než se plazma stačí rozletět do prostoru. (Doba, kterou máme k dispozici, tedy závisí na setrvačnosti hmoty – inercií – proto se celý proces nazývá inerciální.)

První úspěšné testy byly provedeny pomocí laseru Shiva v Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) v USA s dvaceti laserovými svazky. Podařilo se stlačit tablety na hustotu stonásobně větší než je hustota

- 1 toroidní fúzní reaktor
- 2 plazma o teplotě 200 mil. K
- 3 toroidní nádoba fúzního reaktoru
- 4 chladicí plášť reaktoru s tekutým lithiem
- 5 ochranný plášť z grafitu nebo vody
- 6 tepelná izolace
- 7 stínění elektromagnetů
- 8 supravodivé cívky magnetů
- 9 chlazení elektromagnetů tekutým lithiem
- 10 vakuová mezistěna

- 11 přívod elektrické energie potřebné ke startu reaktoru,
- 12 napájení elektromagnetů elektrickým proudem,
- 13 biologické stínění reaktoru
- 14 chladicí zařízení (-269°C)
- 15 čerpadlo lithia
- 16 zásobník lithia
- 17 odlučovač tritia (T)
- 18 zásobník nového tritia vyrobeného v reaktoru
- 19 zásobník deuteria (D)
- 20 příprava zásob D-T pro reaktor

- 21 vstřikovací zařízení D-T do reaktoru
- 22 vakuové čerpadlo
- 23 odlučovač plynu
- 24 zásobník helia
- 25–26 parogenerátory
- 27 kondenzátor
- 28 čerpadlo kondenzátu
- 29–30 turbosoustroj



Celkové energetické schéma termonukleárního fúzního reaktoru

kapalného deuteria, to ale k zapálení fúze nestačilo. V současnosti se v LLNL buduje NIF (National Ignition Facility), největší laserový systém na světě se 192 laserovými svazky s výkonem 8 TW. Měl by vytvořit hustotu rovnou 1500 násobku hustoty kapalného deuteria. Dalším projektem, který se plánuje, a do něhož je zapojena i Česká republika, je evropský HiPER (High Power laser Energy Research facility). Měl by fungovat následovně: nejprve výkonný laser stlačí palivový terčík obsahující deuterium natolik, že dosáhne třicetkrát větší hustoty než olovo. Pak se jeho teplota druhým laserem zvýší na 100 milionů stupňů.

Za těchto podmínek již může proběhnout fúzní reakce, takže se vodíková jádra začnou slučovat na jádra helia, což je provázáno značnou produkcí energie.

Uvolněná tepelná energie se v tomto typu reaktoru bude odvádět prostřednictvím tekutého lithia do tepelných výměníků.

Elektrický proud se pak bude vyrábět zcela konvenčním způsobem v parogenerátorech. Elektrický výkon reaktorů tohoto typu se uvažuje do 1000 MW.

ČESKÝ TOKAMAK CASTOR – GOLEM

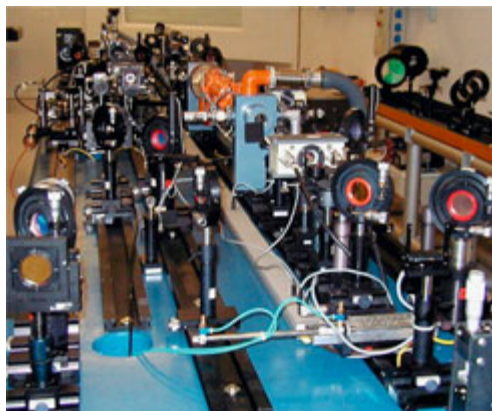
Je jedním z nejstarších tokamaků na světě. Původně ho zapůjčil Praze moskevský Ústav atomové fyziky I. V. Kurčatovova v roce 1977 pod jménem TM-1. Po zásadní rekonstrukci v roce 1984 byl pojmenován CASTOR (Czech Academy of Science Torus) a do roku 2006 sloužil ke studiu okrajového plazmatu a neinduktivního vytváření (vlečení) proudu plazmatem a k materiálovým výzkumům. Nyní je přestěhován na Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT do Břehové ulice v Praze 1. Pod novým jménem Golem slouží k výuce a experimentům studentům specializace Fyzika a technika termojaderné fúze.

- Hlavní poloměr 0,4 m,
- vedlejší poloměr 0,1 m,
- magnetické pole 1,5 T,
- proud plazmatem 25 kA,
- vysokofrekvenční vlečení proudu 20 kW,
- doba výboje 50 ms,
- hustota plazmatu $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$,
- teplota elektronů 200 eV (energie 1 eV odpovídá teplotě 11 600 °C),
- teplota iontů 100 eV.

COMPASS-D

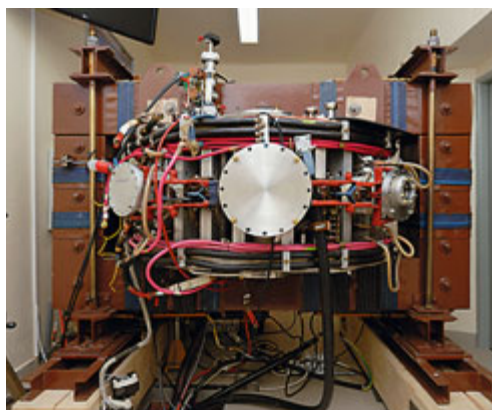
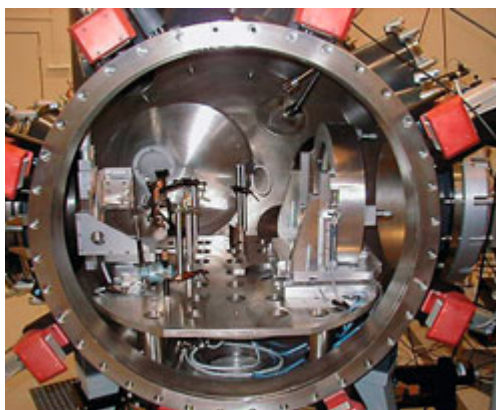
COMPASS (COMPact ASSEMBly) tokamak byl zkonstruován v 80. letech ve výzkumném centru v Culhamu v Anglii.

Prováděly se v něm průkopnické experimenty například s cívkami pro korekci magnetického pole. Patří svými rozměry (poloměr prstence 0,6 m a výškou komory asi 0,7 m) mezi menší tokamaky. Jeho hlavní výhodou je, že tvarem plazmatu odpovídá budovanému největšímu tokamaku



PALS – první prostorový filtr RF1, umístěný mezi oscilátorovou sekcí a prvním výkonovým zesilovačem

PALS – výstupní část oscilátorové sekce s laserovým předzesilovačem (uprostřed)



PALS – detail jednoho modulu zesilovače A5 s vysokonapěťovými kabely přivádějícími elektrickou energii k čerpacím xenonovým výbojkám laseru

Tokamak CASTOR – Golem

ITER a rozměrově je přesně jeho desetinou. V roce 2002 byl provoz Compass-D v Anglii ukončen a vzhledem k jeho velkým a doposud nevyužitým možnostem a také k jeho relevanci k projektu ITER byl zdarma nabídnut Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd ČR. Dnes je tokamak umístěn v nové budově ústavu a řadí Českou republiku na špičku evropského i světového výzkumu horkého plazmatu a termojaderné fúze.

ITER

Krok od největších tokamaků, jaké kdy byly postaveny – JET, TFTR, JT-60U a dalších –, k termojadernému reaktoru dodávajícím

elektrickou energii do komerční sítě je stále tak velký, že neznáme rozumnou předpověď, podle které by se na základě výsledků získaných na stávajících experimentálních zařízeních daly spočítat parametry reaktoru, v němž by termojaderná reakce byla nejen zapálena, ale hořela by sama.

V současné době ještě neumíme postavit elektrárnu s termojaderným reaktorem, ale zároveň nutně potřebujeme postavit zařízení větší než dosavadní tokamaky.

Řešením je ITER – zkratka slov International Thermonuclear Experimental Reactor – Mezinárodní termonukleární experimentální reaktor – latinsky „cesta“.

Smlouvu o projektu ITER pod patronací Mezinárodní agentury pro atomovou energii (IAEA) se sídlem ve Vídni spolu podepsaly v roce 1987 USA, SSSR, Japonsko a Evropská unie. Termojaderný ITER by měl prokázat vědeckou, inženýrskou a do jisté míry i ekonomickou schůdnost termojaderné elektrárny. Po dlouhých mezinárodních jednáních bylo za místo tokamaku ITER zvoleno francouzské Cadarache, kde již probíhají přípravné práce k výstavbě.

V roce 2001 byl dokončen projekt zařízení s objemem plazmatu 837 m^3 , proudem plazmatu 15 MA, výkonem 500 MW a $Q > 10$. U ITER se tedy nepředpokládá (ale ani

**Laserový fúzní systém PALS
v Ústavu fyziky plazmatu v Praze**

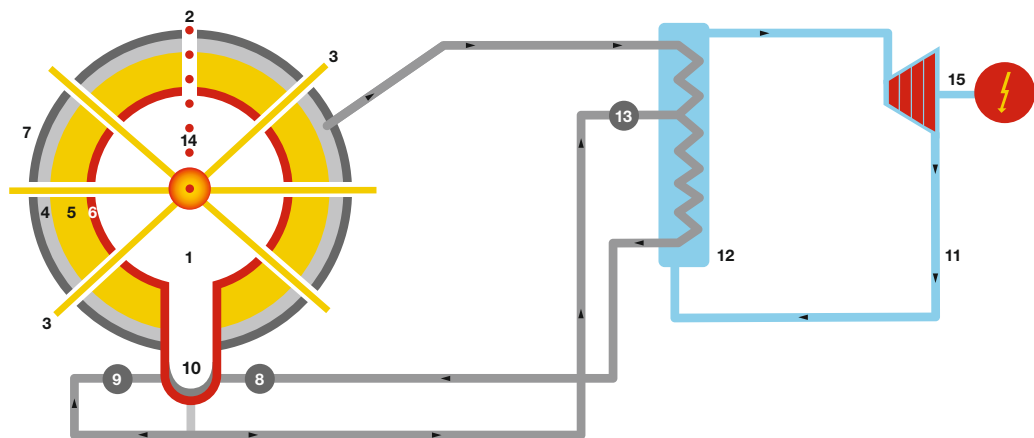


Schéma jiné varianty termonukleárního laserového reaktoru

- 1 vakuová komora reaktoru
- 2 vstup pelet D-T
- 3 vstup laserových impulzů dvanácti trubicemi
- 4 lithiová ochranná stěna
- 5 porézní stěna
- 6 vnitřní stěna reaktoru
- 7 hlavní tlaková nádoba
- 8 hlavní čerpadlo
- 9 recirkulační čerpadlo
- 10 supersonický kondenzátor
- 11 sekundární okruh páry
- 12 parní generátor
- 13 čerpadlo kondenzátu
- 14 pelety D-T
- 15 turbogenerátor

nevyklučuje) samovolné hoření termojaderné reakce, nicméně má být prvním termojaderným zařízením, kde bude uvolněná termojaderná energie větší než energie spotřebovaná na zapálení a udržování reakce, a bude tedy možné studovat prakticky již veškeré procesy, které budou probíhat v pozdějším skutečném reaktoru. Stěžejní bude testování technologií, které jsou nezbytné pro reaktor termojaderné elektrárny, včetně generování tritia v lithiovém obalu (blanketu) reaktoru.

Zatímco fyzikové netrpělivě čekají na první výsledky z ITER, který bude dvakrát větší než současný nejmohutnější tokamak na světě JET, před inženýry a techniky stojí výzva, se kterou se doposud nesetkali. Na rozdíl od štěpných atomových reaktorů musí budoucí fúzní reaktor počítat s odvodem mnohem větší plošné hustoty tepelného výkonu. Tím, že chladicí médium ve štěpném reaktoru protéká vnitřkem reaktoru, má k dispozici mnohem větší kontaktní plochu než fúzní reaktor, ve kterém bude moci chladicí médium využít pouze stěny reaktoru. Vnitřní objem fúzního reaktoru je totiž zaplněn plazmatem. Zkrátka a dobře, doposud při krátkých pulzech bylo třeba chránit plazma před materiálem stěn, nyní,

v ITER, bude třeba chránit materiál stěn před plazmatem.

Návrh a výroba komponent odolávajících vysokým teplotám a neutronovému záření je úkolem, na jehož vyřešení bude záviset úspěch řízené termojaderné syntézy. Celý deuterio-lithiový cyklus by měl vypadat takto:

hořící plazma $D + T \rightarrow 4He + n$ (17,6 MeV)
 plodící obal $6Li + n \rightarrow 4He + T$ (4,78 MeV)
 $7Li + n \rightarrow 4He + T + n$ (-2,47 MeV)
 celkově (plazma a obal) deuterium + lithium
 $\rightarrow$ helium + energie

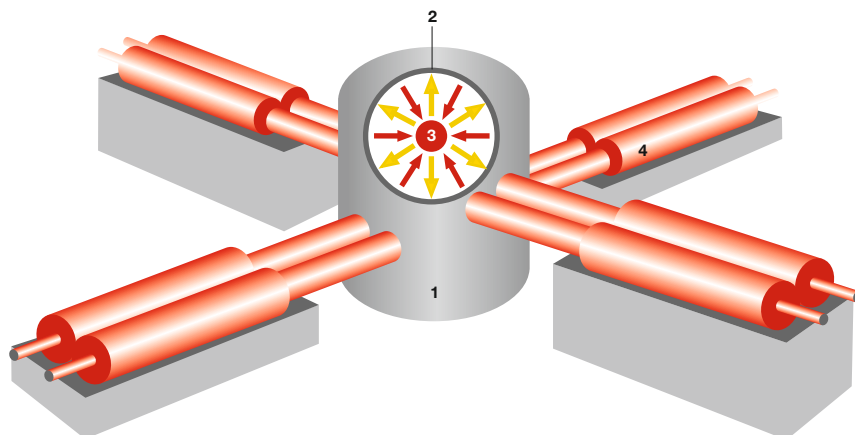
Výroba paliva včetně jeho skladování – v první fázi se počítá s izotopy vodíku deuteriem a tritiem – je víceméně zvládnutá. Deuterium lze získat poměrně snadno extrakcí z vody. Tritium se tvoří přímo v reaktoru reakcí neutronů – produktů termojaderné reakce – s lithiem v tzv. plodícím obalu (blanketu) obklopujícím první (ve směru od plazmatu) stěnu vakuové komory.

Pro plodící obal jsou v současnosti zvažovány různé koncepce – např. oxidy lithia a berylium ve formě „oblázků“, tekutá slitina olova s lithiem v ocelové struktuře,

lithium ve struktuře z vanadu nebo karbidu křemíku. Další neutrony pro výrobu tritia lze získat reakcí primárních neutronů s beryliem (násobení neutronů).

Základním mechanismem ohřevu plazmatu je Jouleovo teplo vznikající průchodem elektrického proudu plazmatem. Zahřát plazma v tokamacích na potřebnou teplotu pouze tímto mechanismem není možné. Pro další ohřev je nutné vyvinout injektory svazku vysoce energetických neutrálních částic a generátory elektromagnetického vlnění vhodné frekvence.

ITER bude supravodivý tokamak – to znamená, že zatímco ve vakuové komoře bude zuřit plazmová bouře o teplotě stovek milionů stupňů Celsia, za stěnou reaktoru bude teplota blízká absolutní nule. Jen při teplotě tekutého helia 4,5 K (-269 °C) nabývají totiž slitiny na bázi niobu tvořící magnetické cívký, uzavřené v konstrukci z nerez oceli, supravodivých vlastností. S podobnými teplotními skoky se nesetkali ani kosmonauti v mrazivém vesmíru. Aby toho nebylo málo, první stěna reaktoru bude bombardována neutronovými toky takové intenzity, že jejich účinky konstruktéři dosud neznají. Přípravu je se rozměrné zařízení IFMIF (International



- 1 terčová komora reaktoru HELIOS s Hartmannovým mechanismem dávkování paliva (D-T)
- 2 otočná a fokusová zrcadla (D-T)
- 3 palivový terčik
- 4 dvojitá pulzní laserová děla

Princip termonukleárního reaktoru laserové fúze typu HELIOS firmy LASL (USA)

Fusion Material Irradiation Facility) v ceně 0,5 miliardy eur, které bude konstrukční materiály testovat neutronovým zářením intenzity očekávané v průmyslovém reaktoru. Štěpné reaktory, které by eventuálně mohly sloužit jako zdroj testovacích neutronů, totiž poskytují toky neutronů na jednotku výkonu čtyřikrát menší, než budou toky v ITER, a navíc s odlišným energetickým spektrem.

Stejně tak konstrukce supravodivých cívek dosud nevidaných rozměrů nebude jednoduchou záležitostí. Pravdou je, že inženýři se opírají o zkušenosti získané na zařízeních podobného typu, i když ne takových rozměrů.

Charakteristické pro výrobu první stěny (PFW – Primary First Wall), to je stěny „vidící“ plazma, je sendvičové uspořádání. To proto, že na PFW jsou kladeny různé požadavky, které jeden typ materiálu není schopen zajistit: vysoká tepelná odolnost, odolnost proti erozi a současně dobrá tepelná vodivost. Na limiter vymezující průřez plazmatického provazce jsou kladeny z hlediska zátěže větší požadavky než na stěny vlastní vakuové komory. Prstencový limiter byl zkoušen na francouzském tokamaku

Tore Supra a technologie v Cadarache. Francouzský prstencový limiter se skládá z 576 chlazených prvků připomínajících „prsty“. Tepelnou odolnost „prstů“ zajišťují destičky uhlíkového kompozitu přecházejícího na dobře tepelně vodivou Cu-slitinu protékanou tlakovou vodou. Kritickým procesem je vodivé spojení kompozitu a Cu-slitiny. Odvádění tepla bude v budoucnu použito k výrobě elektrické energie pomocí parogenerátoru jako v klasické elektrárně.

Všechny vnitřní části vakuové komory tokamaků se pokrývají materiálem z prvků s nízkým atomovým číslem, např. dlaždicemi z grafitových kompozitů (stejný materiál se používá na raketoplánech), doplňují se nástřikem berylia, což dramatickým způsobem snižuje ztráty energie vyzařováním. Zkouší se i wolfram, který nepodléhá erozi v takové míře jako beryllium, ale má velmi velké atomové číslo. Tokamak ASDEX Upgrade má už většinu první stěny z wolframových dlaždic. ITER použije jak wolfram, tak uhlíkový kompozit i beryllium.

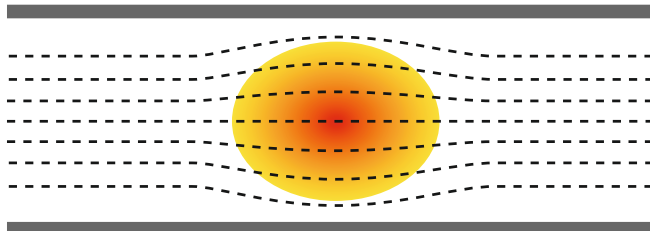
Nádoba reaktoru musí zajistit vysoké vakuum, proto je zde důležitá pevnost a možnost svaření rozměrné konstrukce,

aniž by došlo k nepřipustně velké deformaci. Konstrukce bude z nemagnetické a nízkoaktivovatelné nerez oceli a bude mít dvojitou stěnu vyztuženou žebry, na něž budou připevněny vnitřní součásti. Vakuová nádoba musí též obsahovat okna pro dodávku a ohřev paliva, instalaci diagnostiky a výměnu vnitřních součástí. Už dnes je ITER inspirací pro řadu jiných odvětví: tepelně namáhaný materiál pro kosmický průmysl, anemometry pro větrné turbíny, zobrazování pomocí magnetické rezonance v lékařství, iontová implantace v polovodičovém průmyslu, magnety pro CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucleaire – Evropské sdružení pro jaderný výzkum), brzdy pro letadla a vlaky, sterilizace plazmatem, ale i software pro předpověď kolapsu energetické sítě.

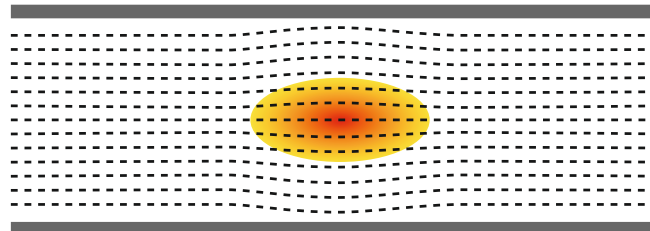
TERMONUKLEÁRNÍ ELEKTRÁRNY

Snahou a veškerým úsilím výzkumu je v konečné fázi zkonstruovat a postavit skutečnou funkční termonukleární elektrárnu. Prvním předpokladem je tedy dosáhnout

1



2



Magnetická komprese plazmatu: (1) při střední intenzitě magnetického pole vyplňuje plazma poměrně velký prostor, (2) po silném zvětšení intenzity magnetického pole je plazma stlačena na malý prostor a silně se zahřeje

takového stavu syntézy, aby energie do procesu dodávaná byla převyšena energií z procesu odebíranou. Energetický zisk je plně závislý na výšce teploty dosažené ve „spalovacím prostoru“ zařízení.

Přes všechny dosavadní úspěchy, kdy se krůček za krůčkem stupeň dosažené teploty zvyšuje, je cesta k plnému využívání termonukleární energie značně vzdálená.

Dnes lze jen těžko předpovědět, jak bude zařízení i celá elektrárna vyhlížet i jaký typ reaktoru bude použit. Volba bude záležet na mnoha dosud ještě ani ne dobře známých okolnostech.

Bude-li uvažována účinnost 40 %, pak pro elektrický výkon 1000 MW bude nutné dosáhnout výkonu reaktoru 2 500 MW.

Dá se tedy pouze předpokládat, že materiál, který bychom volili dnes, bude použit i v budoucnosti. Dnes bychom jistě pro prstenec komory kvůli vysokým teplotám volili molybdenové slitiny. Uzavřen by měl být v plášti naplněném roztavenými solemi fluoridů berylia a lithia. Kolem této vrstvy bude další ochranný plášť na ochranu proti neutronům.

Vinutí magnetů bude provedeno ze supravodivého materiálu. Povaha provozu bude potřebovat ještě dodatečný zdroj tritia vyráběného z lithia ostřelováním neutrony.

V případě využití laserových reaktorů není vyloučeno, že bude použito hvězdčovitě uspořádání laserových systémů.

V USA pracuje zařízení HELIOS. Je vybaveno osmi laserovými paprsky a uprostřed je válcová nádoba s terčíkem stlačeného paliva.

HELIOS může vyvinout energii 10 kJ. Vstupní okna terčové komory mají průměr 350 mm. Pulzy trvají 0.5 až 1 ns – 1 ns (nanosekunda) = 10^{-9} sec – a mají hladinu výkonu 20 TW. Lasery CO_2 mohou opakovat pulzy 750 krát za sekundu.

V roce 1984 bylo uvedeno do provozu zařízení ANTARES. Je desetinásobně výkonnější než HELIOS. K zařízení je připojeno 6 laserových zdrojů.

Výroba palivových terčů je velmi složitá a nákladná. Náplň D-T (deuterium-tritium) je uzavřena pod vysokým tlakem při nízkých teplotách do kapslí a je pokryta kovovými, plastovými anebo kombinovanými skořápkami. Ideální a velmi výhodné bude vynechat tritium a fúzní reakci provozovat pouze na základě deuteria. Příprava materiálů by se tím podstatně zjednodušila a zlevnila. To bude ovšem vyžadovat ještě další mnohaletou přípravu, protože tímto krokem by se opět zvýšila nutná teplota v reakčním poli.

Výhled na spuštění první funkční termonukleární elektrárny s parogenerátorovým

mezistupněm se odhaduje na první polovinu 21. století.

VÝHODY TERMONUKLEÁRNÍ SYNTÉZY

Termonukleární syntéza má oproti jiným velkým zdrojům energie obrovské výhody. Jde o inherentně (tj. z vlastního principu) zcela bezpečný projekt – stačí vypnout přívod proudu např. do cívek formujících magnetické pole a reakce okamžitě vyhasne.

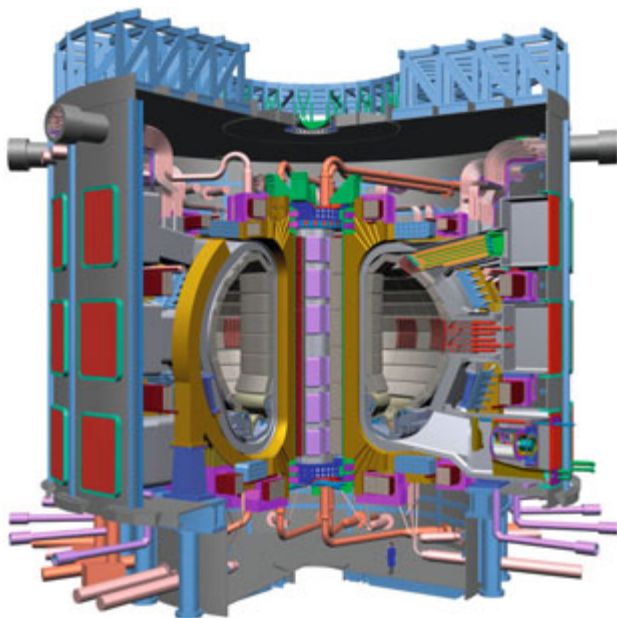
Za druhé, Země má (podobně jako hvězdy) pro jadernou syntézu prakticky nevyčerpatelné množství paliva.

A za třetí, výstupem jaderných reakcí je neaktivní helium, nevzniká tedy vysokoaktivní odpad.

Na druhé straně je třeba uvést, že jde o technicky nesmírně komplikovaný projekt, který představuje vysoké finanční náklady.

PŘÍMÁ PŘEMĚNA TERMONUKLEÁRNÍ ENERGIE

Dalším krokem ve vývoji termonukleárních elektráren bude vynechání energetického mezistupně. Odpadla by ta část, kde se získané teplo přes výměník převádí na horkou vodní páru, která teprve vyrábí elektrický



Mezinárodní projekt ITER – první prototyp fúzní elektrárny

proud. Elektrická energie by se získávala přímo v reaktoru. Uplatnění tohoto velmi ekonomického způsobu je věcí dalšího vývoje a výzkumu. V principu se jedná o prosté zesilování a zeslabování magnetického pole „nádoby“ obklopující reakční prostor, ve kterém probíhá termonukleární reakce. Tento proces připomíná funkci spalovacího motoru.

Úlohu pístu ve válci hraje proměnné magnetické pole. Přeměna tepelné energie v magnetickou a z ní v elektrickou se však děje bez přítomnosti jakýchkoli pohyblivých součástí.

Uskutečnění přímé přeměny termonukleární energie v elektrickou (s vynecháním stupňů přeměny tepla v páru a na mechanický pohyb parogenerátoru) by mělo řadu výhod.

Předně se očekává vysoká účinnost. Rovněž i po mechanické stránce by bylo zařízení ní podstatně jednodušší a méně nákladné.

Již dnes jsou však zřejmé i některé obtíže, které jsou s přímou přeměnou spojeny. Jednou z nich je okolnost, že požadavek na vysokou účinnost vede k tomu, že změna objemu plazmatu při stlačení a rozpínání bude muset být značná a v důsledku toho narostou i požadavky na rozměry „nádoby“ a tím i nákladnost zařízení.

ELEKTROLYTICKÁ SYNTÉZA

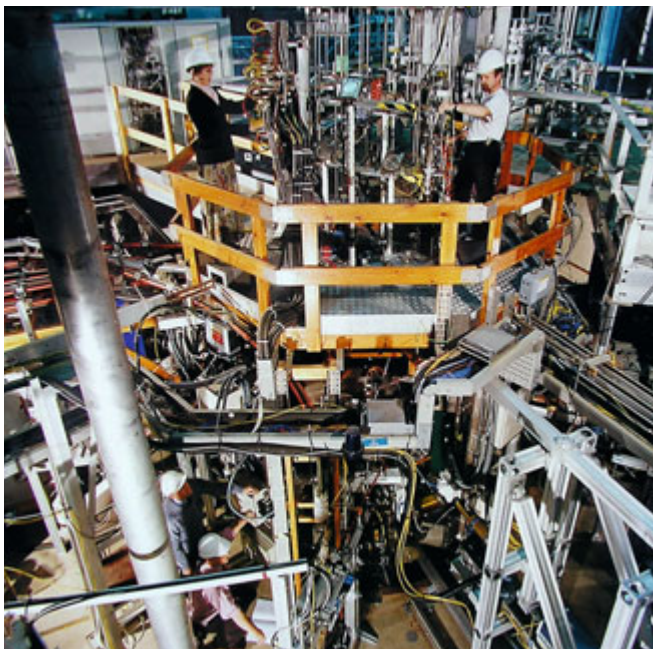
Koncem minulého století rozčeřila hladinu zájmu laické veřejnosti i vědeckého světa zpráva, že se podařilo provést jadernou fúzi elektrochemickou cestou, tzv. studenou fúzi. Při měření vstupů energií do procesu a výstupů z něho byl naměřen přebytek energie z reakce vystupující.

I přes opakování publikovaného pokusu v několika světových laboratořích však původně ohlášeného výsledku dosaženo nebylo.

VODÍKOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ

Mezi perspektivní návrhy zajímavé svou originalitou a úzce související s úspěšným rozvojem termonukleární energetiky patří i úvahy o zcela novém uspořádání energetiky Země v budoucnosti.

Myšlenka předpokládá, že v určitém stupni vývoje techniky bude možné vyrábět energii v dostačujícím přebytku. Vychází z toho, že termonukleární elektrárny již budou v běžném provozu a budou schopny umístění buď na dno oceánů, nebo v těsné blízkosti moří. Úvahy pak vedou k dalšímu předpokladu, že těmito přímořskými nebo podmořskými zdroji vyrobená energie by se vyráběla vodík. Při dostatku energie by se ho mohlo produkovat obrovské množství. Již samo umístění elektráren by bylo výhodné. Byly by blízké zdroje jak deuteria, tak i vody, kterou rozkládají na kyslík a vodík a svou, termonukleární fúzi produkovanou energii



Tokamak Compass



Tokamak Compass – spodní část

by spotřebovávaly hned na místě na výrobu vodíku bez nutnosti dalšího energetického přenosu. Vyrobený vodík by se potrubím odváděl na pevninu.

Výrobu vodíku můžeme provádět tradiční, starou a osvědčenou elektrolýzou, která probíhá s účinností využití elektrické energie přibližně na 60 %. Novým, efektivnějším způsobem je využití vysokotlakých elektrolýzérů (v pokusných zařízeních se dosáhlo účinnosti až 85 %). Teoretická hodnota účinnosti je 120 %. Tento zdánlivý paradox je způsoben povahou reakce, při jejímž ideálním průběhu lze k rozkladu kromě elektrické energie využívat i tepla okolí. V budoucnosti lze očekávat, že praktická účinnost elektrolýzy se bude pohybovat kolem sta procent.

Ještě výhodnější by však bylo vynechat fázi výroby elektřiny úplně a vodu rozkládat na vodík a kyslík bez elektrolýzy, pouze

teplem reaktoru. Voda by se v horkém prostředí reaktoru ionizovala a horké plyny, směs iontů, by se pak jednoduše fyzikálními metodami dělily na vodík a kyslík.

Doprava vodíku je již bez dalších vážnějších technických problémů. Porovnáme-li vodík s methanem, je vodík podstatně lehčí, ale méně výhřevný. Pro získání stejného množství energie bude sice potřeba dopravit trojnásobné množství plynu, ale vodík je „tekutější“ a projde ho potrubím víc než srovnávaného methanu.

Spalováním vodíku vzniká voda. Jedná se tedy o ekologicky naprosto čisté palivo. Skladovatelnost vodíku oproti elektřině je nesporná.

Uplatnění vodíku je nepřeberné. V domácnostech, v dopravě, v chemickém průmyslu, v hutnictví a v řadě dalších odvětví průmyslu by pomáhal zavádět výrobní postupy neznečišťující životní prostředí.

V současnosti je myšlenka na vodíkové hospodářství zatím jen vidinou budoucnosti. Dnes při tradiční výrobě elektrolýzou je to zdroj stále ještě velice drahý. Při použití jaderné energie se stane daleko levnějším.

Je zřejmé, že používání vodíku je velmi výhodné. Z pohledu současného stavu znalostí a stavu techniky se však jeví jako velmi rizikové pro svou vysokou reaktivnost a ve směsi s kyslíkem i výbušnost.

Lze jen doufat, že do vyřešení podstatně obtížnějších otázek spojených s termojadernou syntézou bude uspokojivě zodpovězena i otázka vodíku.

NOBELOVY CENY ZA FYZIKU

UDĚLENÉ V LETECH 1901–2010

- 1901 W. C. Röntgen (Německo)
Objev rentgenového záření
- 1902 H. A. Lorentz (Nizozemí), P. Zeeman (Nizozemí)
Výzkum vlivu magnetického pole na světlo (Zeemanův jev)
- 1903 A. H. Becquerel (Francie)
Objev přírodní radioaktivity
P. Curie (Francie), M. Curie-Skłodowska (Francie)
Prozkoumání přírodní radioaktivity
- 1904 Sir J. W. Strutt-Rayleigh (GB)
Výzkum hustoty vzácných plynů a s tím související objev argonu
- 1905 P. E. A. von Lenard (Německo)
Výzkum katodových paprsků
- 1906 Sir J. J. Thomson (GB)
Elektrická vodivost plynů, výzkum výbojů v plynech
- 1907 A. A. Michelson (USA)
Přesné optické přístroje a metrologické pokusy s nimi provedené, měření rychlosti světla (mj. Michelsonův pokus)
- 1908 G. Lippmann (Francie)
Barevná fotografie na principu interference světla
- 1909 C. F. Braun (Německo), G. M. Marconi (Itálie)
Vynález bezdrátové telegrafie
- 1910 J. D. van der Waals (Nizozemí)
Stavová rovnice plynů a kapalin
- 1911 W. Wien (Německo)
Zákony tepelného záření
- 1912 N. G. Dalén (Švédsko)
Vynález automatických regulátorů pro osvětlení majáků
- 1913 H. Kamerlingh-Onnes (Nizozemí)
Fyzika nízkých teplot a objev supravodivosti
- 1914 M. von Laue (Německo)
Difrakce rentgenových paprsků na krystalech
- 1915 Sir W. H. Bragg, otec (Velká Británie), sir W. L. Bragg, syn (GB)
Strukturní analýza krystalů pomocí rentgenových paprsků
- 1916 cena neudělena; peněžní cena byla vložena do zvláštního fondu
- 1917 Ch. G. Barkla (GB)
Objev charakteristického rentgenového záření
- 1918 Max Karl Ernst Ludwik Planck (Německo)
Návrh kvantové teorie atomu
- 1919 Johannes Stark (Německo)
Studium spekter v elektrických polích
- 1920 Charles E. Guillaume (Švýcarsko)
Objev niklových slitin s nízkou roztažností
- 1921 Albert Einstein (Německo/Švýcarsko)
Vysvětlení fotoelektrického jevu a příspěvky k teoretické fyzice
- 1922 Niels Henrik David Bohr (Dánsko)
Teorie atomové struktury a atomového spektra
- 1923 Robert Andrews Millikan (USA)
Popis fotoelektrického jevu a určení náboje elektronu
- 1924 Karl Manne Georg Siegbahn (Švédsko)
Vynález techniky rentgenové spektroskopie
- 1925 James Franck a Gustav Ludwig Hertz (Německo)
Vysvětlení interakce mezi elektrony a atomy (v kvantové teorii)
- 1926 Jean Baptiste Perrin (Francie)
Výzkum velikosti atomů, molekul a tedy struktury hmoty
- 1927 Arthur Holly Compton (USA) a Charles Thomson Rees Wilson (GB)
Vysvětlení odrazu rentgenového záření (Comptonův jev) a vynález mlžné komory
- 1928 Owen Willians Richardson (GB)
Vysvětlení termoemise
- 1929 Prince Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie (Francie)
Objev vlnové povahy elektronů

- 1930 Sir Chandrasekhara Venkata Raman (Indie)
Výzkum rozptylu záření prostředím (Ramanův jev)
- 1931 cena neudělena
- 1932 Werner Karl Heisenberg (Německo)
Vytvoření kvantové mechaniky a návrh principu neurčitosti
- 1933 Paul Adrien Maurice Dirac (Velká Británie) a Erwin Schrödinger (Rakousko)
Vytvoření vlnové mechaniky
- 1934 cena neudělena; peněžní cena byla z $\frac{1}{3}$ vložena do hlavního fondu a ze $\frac{2}{3}$ do zvláštního fondu
- 1935 Sir J. Chadwick (GB)
Objev neutronu
- 1936 C. D. Anderson (USA)
Objev pozitronu
V. F. Hess (Rakousko)
Objev kosmického záření
- 1937 Sir G. P. Thomson (Velká Británie), C. J. Davisson (USA)
Objev difrakce elektronů na krystalech a založení elektronografie
- 1938 E. Fermi (Itálie)
Objev jaderných reakcí vyvolaných pomalými neutrony
- 1939 E. O. Lawrence (USA)
Vynález a konstrukce cyklotronu
- 1940, 1941, 1942 cena neudělena; peněžní cena byla z $\frac{1}{3}$ vložena do hlavního fondu a ze $\frac{2}{3}$ do zvláštního fondu
- 1943 O. Stern (USA)
Objev magnetického momentu protonu a rozvinutí metody molekulových svazků
- 1944 I. I. Rabi (USA)
Rezonanční metoda k registraci magnetických vlastností atomových jader
- 1945 W. Pauli (Rakousko)
Objev vylučovacího (Pauliho) principu
- 1946 P. W. Bridgman (USA)
Fyzika extrémně vysokých tlaků a termodynamika
- 1947 sir E. V. Appleton (GB)
Výzkum ionosféry a objev Appletonovy vrstvy
- 1948 P. M. S. Blackett (GB)
Zdokonalení Wilsonovy mlžné komory a objevy učiněné touto metodou v oblasti nukleární fyziky a fyziky kosmického záření
- 1949 H. Yukawa (Japonsko)
Teoretická předpověď existence mezonů
- 1950 C. F. Powell (GB)
Vypracování metody fotografické registrace trajektorií částic v emulzích a objev dvou druhů mezonů
- 1951 Sir J. D. Cockroft (GB), E. T. S. Walton (Irsko)
Transmutace atomových jader urychlenými částicemi
- 1952 F. Bloch (USA), E. M. Purcell (USA)
Metody měření magnetického momentu atomového jádra a neutronu, magnetická rezonance
- 1953 F. Zernike (Nizozemí)
Metoda fázového kontrastu a její aplikace v mikroskopii
- 1954 M. Born (GB)
Statistická interpretace vlnové funkce
W. W. G. Bothe (NSR)
Vypracování koincidenční metody a objevy jí učiněné
- 1955 W. E. Lamb (USA), P. Kusch (USA)
Měření hyperjemné struktury spektrálních čar vodíku a zjištění magnetického momentu elektronu
- 1956 W. B. Shockley (USA), J. Bardeen (USA), W. H. Brattain (USA)
Výzkum polovodičů a objev tranzistorového jevu

- 1957 T. D. Lee (USA), Ch. N. Yang (USA)
Objev narušení zákona zachování parity
- 1958 P. A. Čerenkov (SSSR), I. M. Frank (SSSR), I. J. Tamm (SSSR)
Objev a popis Čerenkovova záření, studium chování
vysokoenergetických částic.
- 1959 E. G. Segrave (USA), O. Chamberlain (USA)
Objev antiprotonu
- 1960 D. A. Glaser (USA)
Vynález bublinové komory
- 1961 R. Hofstadter (USA)
Vypracování rozptylové metody elektronů a zjištění elektrické
struktury nukleonů
R. L. Mössbauer (NSR)
Objev Mösshauerova jevu
- 1962 L. D. Landau (SSSR)
Fyzika nízkých teplot, zejména makroskopická teorie
supratekutosti kapalného hélia
- 1963 E. P. Wigner (USA)
Objev principů symetrie
H. D. Jensen (NSR), M. Goeppert-Mayerová (USA)
Slupkový model atomového jádra
- 1964 N. G. Basov (SSSR), A. M. Prochorov (SSSR),
Ch. H. Townes (USA)
Kvantová elektronika, lasery, masery
- 1965 S. I. Tomonaga (Japonsko), J. Schwinger (USA),
R. P. Feynman (USA)
Rozvinutí kvantové elektrodynamiky
- 1966 A. Kastler (Francie)
Optické metody Hertzových rezonancí v atomech
R. S. Mulliken (USA)
Elektronová struktura molekul
- 1967 H. A. Bethe (USA)
Teorie jaderných reakcí, zejména reakcí probíhajících v nitru hvězd
- 1968 L. W. Alvarez (USA)
Objev rezonancí (kvazičástic)
- 1969 M. Gell–Mann (USA)
Vypracování systematiky elementárních částic, myšlenka kvarku
- 1970 H. Alfvén (Švédsko)
Magnetohydrodynamika a její astrofyzikální aplikace
L. E. F. Néel (Francie)
Feromagnetismus a anti feromagnetismus
- 1971 D. Gabor (GB)
Vynález holografie
- 1972 J. Bardeen (USA), L. Cooper (USA), J. R. Schrieffer (USA)
Teorie supravodivosti
- 1973 L. Esaki (Japonsko) I. Giaver (USA), B. D. Josephson (GB)
Tunelové diody
- 1974 Sir M. Ryle (Velká Británie), A. Hewish (GB)
Objevy v radioastronomii, zejména astronomické aplikace
aperturní analýzy a objev pulzarů
- 1975 A. N. Bohr (Dánsko), B. R. Mottelson (Dánsko),
L. J. Rainwater (USA)
Zobecněný model atomového jádra
- 1976 B. Richter (USA), S. CH. CH. Ting (USA)
Objev těžkých kvazičástic se šarmem, částice „psi“
- 1977 P. W. Anderson (USA), sir N. F. Mott (GB),
J. H. van Vleck (USA)
Přínos k fyzice amorfních látek, vývoj v oblasti polovodičů
- 1978 A. A. Penzias (USA), R. W. Wilson (USA)
Výzkum mikrovlnného záření v kosmu (reliktové záření)

- 1978 P. L. Kapica (SSSR)
Experimentální objevy ve fyzice nízkých teplot, zejména u kapalného hélia
- 1979 S. L. Glashow (USA), A. Salam (Pakistán), S. Weinberg (USA)
Teorie elektroslabé interakce
- 1980 J. W. Cronin (USA), V. L. Fitch (USA)
Objev narušení principu kombinované parity
- 1981 K. M. Siegbahn (Švédsko), N. Bloembergen (USA), A. L. Schawlow (USA)
Elektronová mikroskopie s vysokým rozlišením a laserová spektroskopie
- 1982 K. G. Wilson (USA)
Studium změn stavů (skupenství) a metoda renormalizační grupy a její aplikace na kritické jevy
- 1983 S. Chandrasekhar (USA)
Vývoj hvězd
W. A. Fowler (USA)
Teorie tvorby chemických prvků v kosmu
- 1984 C. Rubbia (Itálie), S. van der Meer (Nizozemí)
Objev dříve hypotetických vektorových mezonů W^+ , W^- a Z
- 1985 K. von Klitzing (NSR)
Kvantový Hallův jev, měření elektrického odporu
- 1986 Ernst Ruska (Německo), Gerd Binnig (Německo) a Heinrich Rohrer (Švýcarsko)
Pokroky v elektronové mikroskopii a rastrovacím tunelovém mikroskopu
- 1987 J. Georg Bednorz (Německo) a K. Alexander Müller (Švýcarsko)
Studium supravodivosti v keramických materiálech
- 1988 Leon M. Lederman, Melvin Schwartz a Jack Steinberger (USA)
Objev neutrina a vyvinutí způsobů jeho využití ve výzkumu
- 1989 Norman F. Ramsey (USA), Hans G. Dehmelt (USA) a Wolfgang Paul (Německo)
Konstrukce césiových atomových hodin
- 1990 Jerome I. Friedman (USA), Henry W. Kendall (USA) a Richard E. Taylor (Kanada)
Objev struktury neutronů a protonů
- 1991 Pierre-Gilles de Gennes (Francie)
Analýza uspořádávání molekul v jistých látkách, např. tekutých krystalech a polymerech
- 1992 Georges Charpak (Francie)
Vynález detektoru částic
- 1993 Russell A. Hulse a Joseph H. Taylor Jr. (USA)
Studium binárních pulzarů a gravitačních vln
- 1994 Bertram N. Brockhouse (Kanada) a Clifford G. Shull (USA)
Rozvoj neutronové spektroskopie a metody neutronové difrakce
- 1995 Martin L. Perl a Frederick Reines (USA)
Objev tau leptonu a detekce neutrina
- 1996 David M. Lee, Douglas D. Osheroff a Robert C. Richardson
Objev supertekutosti helia-3
- 1997 Steven Chu (USA), Claude Cohen-Tannoudji (Francie) a William D. Phillips (USA)
Rozvoj metody chytání atomů laserovým světlem
- 1998 Robert B. Laughlin (USA), Horst L. Störmer (Německo) a Daniel C. Tsui (USA)
Objev nové formy kvantové tekutiny s částečně nabitými excitacemi
- 1999 Gerardus 't Hooft a Martinus J. G. Veltman (Nizozemí)
Objasnění kvantové struktury elektroslabých interakcí ve fyzice

- 2000 Zhores I. Alferov (Rusko), Herbert Kroemer (Německo)
a Jack S. Kilby (USA)
Práce na informační a komunikační technologii, vynález integrovaného obvodu a polovodivých heterostruktur užívaných ve vysokorychlostní a optoelektronice
- 2001 Eric A. Cornell (USA), Wolfgang Ketterle (Německo)
a Carl E. Wieman (USA)
Dosažení Bose-Einsteinovy kondenzace ve zředěných plynech alkalických atomů a základní studie vlastností kondenzátu
- 2002 Raymond Davis Jr. (USA), Masatoshi Koshiba (Japonsko)
a Riccardo Giacconi (USA)
Za průkopnické výzkumy v astrofyzice, zejména za objevení kosmického neutrina
- 2003 Alexej A. Abrikosov (USA), Vitalij L. Ginzburg (Rusko),
Anthony J. Leggett (USA)
Za průkopnické příspěvky k teorii supravodičů a supratekutosti
- 2004 David Gross, David Politzer a Frank Wilczek (všichni USA)
Za objev asymptotické volnosti v teorii silné interakce
- 2005 Roy J. Glauber, J. L. Hall, Theodor W. Hänsch
Objev metody optického frekvenčního hřebenu, kvantová teorie optické koherence
- 2006 John C. Mather, Georg Smoot
Detailní průzkum reliktního záření pomocí družice COBE, objev anizotropie a fluktuací reliktního záření
- 2007 Albert Fert, Peter Grünberg
Objev obří magnetorezistence a nových magnetických senzorů uplatnitelných například v harddiscích
- 2008 Yoichiro Nambu, Makoto Kobajaši a Tošihide Masukawa
Objev mechanismu spontánního narušení symetrie v subatomové fyzice, objev původu narušené symetrie a předpověď existence nejméně tří rodin kvarků
- 2009 Charles Kao, Willard Boyle a George E. Smith
Průlom v oblasti přenosu světla v optických vláknech a za vynález CCD
- 2010 Andre Geim a Konstantin Novoselov
Objev grafenu

JMENNÝ REJSTŘÍK

Agricola (Georg Bauer) 9
Aston Francis William 67, 68
Becker H. 10
Becquerel Alexander Henri 8, 9, 51, 52, 114
Bethe Hans Albrecht 70, 116
Blix Hans 84
Bohr Niels 67, 114, 116
Bothe W. W. G. 10, 115
Curie Pierre 8, 18, 114
Curie-Skłodowská Marie 8, 9, 18, 51
Dalton John 7
Démokritos z Abdér 7
Dirac Paul Adrien Maurice 71, 115
Einstein Albert 65, 66, 68, 69, 114
Fermi Enrico 11, 12, 115
Hahn Otto 11
Heisenberg Werner 67, 115
Helmholz Hermann von 66
Chadwick James 10, 115
Jammet prof. 77
Joliot-Curie Frédéric 10
Joliot-Curie Irène 10
Lavoisier Antoine Laurent 65
Lawrence Ernest Orlando 12, 106, 115
Leksell Lars 59, 60
Leukippos z Milétu 7
Lomonosov Michail Vasiljevič 66
Mayer Julius Robert 65, 66
Meitnerová Lise 11
Newton Issac 7
Rassmusen 85
Röntgen Wilhelm Conrad 51, 114
Rutheford Ernest, lord Nelson 10, 66
Strassmann Fritz 11
Yukawa H. 67, 115

Grafická úprava a sazba: www.marvil.cz

Ilustrace: Martina Hamouzová

Fotobanky: Profimedia, isifa, ČTK

Materiál je součástí vzdělávacího programu ČEZ, a. s., Svět energie. Je určen k bezplatnému šíření pro vzdělávací účely.

Autoři publikace vynaložili veškeré úsilí identifikovat autory všech reprodukováných fotografií, bohužel se to ve všech případech nepodařilo.

Nabídku dalších materiálů vzdělávacího programu Svět energie naleznete na **www.cez.cz/vzdelavaciprogram**

2011 © ČEZ, a. s., sekce komunikace, Duhová 2/1444, 140 53 Praha 4, tel.: 211 042 681

