POKROČILÉ JADERNÉ TECHNOLOGIE A SKUPINA ČEZ

SKUPINA ČEZ

OBSAH

ŠANCE JADERNÉ ENERGETIKY 5
370 000 MW čistého výkonu 6
Proč právě jádro 6

POUŽITÉ PALIVO CENNOU SUROVINOU 9
Jak udělat z použitého paliva palivo čerstvé 10
Stále aktuálnější jsou transmutační technologie 11
V České republice se použité palivo zatím ukládá do skladů 13

NA DVEŘE KLEPOU NOVÉ GENERACE REAKTORŮ 17
Současné typy jaderných reaktorů 18
Důraz na bezpečnost 20
TOP 6 jaderných reaktorů budoucnosti 20
Zvyšování účinnosti 24
Lídry dalšího vývoje jsou USA, Rusko a lidnatá Asie 24

JADERNOU FÚZI JSME „OPSALI“ Z PŘÍRODY 27
K principu termojaderné fúze 28
TOKAMAK 28
ITER 30

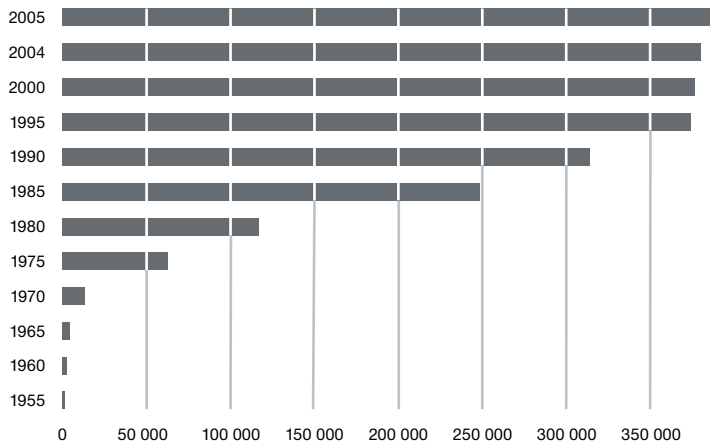
MODERNÍ JADERNÉ TECHNOLOGIE A SKUPINA ČEZ 33
Jaderná elektrárna Dukovany 34
Jaderná elektrárna Temelín 36

ŠANCE JADERNÉ ENERGETIKY

Mírové využití jaderné energie je jedním z nejperspektivnějších způsobů zajištění energetických potřeb lidstva – v současnosti i budoucnosti.
Bezpečné a spolehlivé zásobování elektrickou energií je pro každou moderní ekonomiku životně důležité. Zejména pokud je nárůst spotřeby elektrické energie trvalým trendem a jen v Evropě dosahuje každoročně hodnoty okolo 1,8 %. Na celém světě stoupla od roku 1980 spotřeba energie téměř o 50 %. Krytí tohoto nárůstu vyžaduje citlivé „vybalancování“ nákladů na výrobu elektrické energie, požadavků na ochranu životního prostředí, bezpečnosti provozu, spolehlivosti a dostupnosti vhodných zdrojů.
I když se v poslední době staví méně nových jaderných reaktorů než v 70. a 80. letech, produkce elektřiny z jádra neustále stoupá. Jaderná energetika rozhodně nestagnuje, její rozvoj naopak nabírá na tempu. Jen za prvních pět let nového tisíciletí odpovídal vzrůst výroby výkonu 40 nových velkých jaderných elektráren. V této bilanci 2 % výkonu pocházejí od nových reaktorů, zbytek připadá na vrub vylepšování a zvyšování výkonu elektráren stávajících. Dvě třetiny světových reaktorů mají dnes přitom lepší využitelnost v průběhu roku než 80 %, Finsko, Španělsko, Belgie, Švýcarsko a Jižní Korea dosahují využitelnosti přes 90 %, 13 nejlepších reaktorů USA dosahuje dokonce více než 98 %. S vysokým využitím jaderných elektráren drží krok i jejich technický rozvoj.
Svět má v současnosti v oblasti energetiky dva globální problémy – přístup k energetickým zdrojům a negativní vliv emisí na změny klimatu na Zemi. Oba řeší jaderná energetika; ta neprodukuje prakticky žádné tzv. skleníkové plyny (CO_2) a přispívá významným způsobem ke snížení globálních emisí těchto plynů do ovzduší. Jaderné zdroje současně patří všude ve světě mezi nejlevnější energetické zdroje. Ve výhodné ceně elektřiny vyrobené v jaderných zdrojích – srovnatelné nebo nižší než jsou ceny z uhelných a plynových elektráren – se odráží nízký vliv palivových nákladů. Na rozdíl od ostatních zdrojů v sobě tato cena zahrnuje také externí náklady (nakládání s odpady, vyřazování zařízení z provozu, zdravotní a environmentální vlivy).

Výzkum radioaktivních odpadů v Curtain University

Růst instalovaného výkonu jaderných elektráren ve světě (v MW_e)



Z pohledu dlouhodobého vývoje měla celosvětová produkce elektřiny z jaderných elektráren v průběhu posledních 15 let trvale vzestupný trend. Příčinou je kromě výstavby nových kapacit, průběžných rekonstrukcí a zvyšování instalovaných výkonů především trvalé zlepšování provozních parametrů. Kvalitním řízením provozu došlo k nárůstu průměrného koeficientu využití bloků z hodnoty 71,6 % na 83,3 %. Podle Výzkumné iniciativy Evropského parlamentu EPRI, Světové energetické rady WEC a sdružení států OECD bude využívání jaderné energie žádoucí a nezbytné i v 21. století. Klíčové instituce Evropské unie, jako je Evropský ekonomický a sociální výbor a Výbor pro průmysl, vnější obchod, výzkum a energii se za využívání jaderné energie jednoznačně postavily.

370 000 MW ČISTÉHO VÝKONU

Instalovaný výkon jaderných elektráren na celém světě vzrostl v roce 2005 o nových 1130 MW_e. Elektřina vyrobená z jádra představuje šestnáct procent světové produkce elektřiny. Světová asociace pro atomovou energii uvádí, že na počátku roku 2006 bylo v provozu celkem 443 reaktorů, které disponovaly instalovaným výkonem okolo 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. V 56 zemích světa pracuje navíc 284 výzkumných a experimentálních reaktorů, které kromě plnění úkolů vědeckého výzkumu produkují i radioizotopy pro použití v medicíně. Světová moře brázdí na 220 jaderných reaktorů pohánějících ponorky a ledoborce. Jen US Navy již v této aplikaci jaderných reaktorů získala přes 5400 reaktor-roků provozních zkušeností. Malé jaderné reaktory pohánějí vesmírné lodě a sondy.
Růst kapacity jaderných elektráren v posledních letech dokumentuje kromě jiného zahájení provozu dvou nových reaktorů, japonského Higashidori a indického Tarapur. Po delší přestávce začal do sítě opět dodávat energii i kanadský reaktor Pickering a byla zahájena výstavba nových reaktorů ve Finsku (Olkiluoto 3) a v Pákistánu. Ve Francii se připravuje výstavba obdobného jaderného bloku s výkonem 1600 MW ve Flamanville. V USA jsou licencovány nové typy reaktorů. U mnoha stávajících reaktorů se prodlužuje životnost.
V současnosti se ve 12 zemích světa staví 30 reaktorů. Pro příštích 15 let je ohlášena výstavba dalších 60. Zvyšování instalované kapacity v jaderných elektrárnách má přitom hlavní příčinu ve vylepšování, modernizaci a zvyšování výkonu provozovaných elektráren. Např. Švýcarsko zvýšilo výkon svých reaktorů o 12,3 %, v USA bylo vydáno 44 povolení na vylepšení výkonu a prodloužení životnosti stávajících reaktorů, někde až na 60 let. Do roku 2015 chce Jižní Korea do provozu uvést 8 nových reaktorů. V USA bylo podáno 20 žádostí o výstavbu, vesměs v lokalitách současných elektráren. Podle Světové nukleární asociace by se mělo do roku 2030 postavit až 400 nových jaderných reaktorů. Největší podporu má výstavba jaderných elektráren v Asii, významná je také v Jižní Africe, USA a v Rusku.

jaderné elektrárny každoročně ušetří životní prostředí od zhruba 2 miliard tun CO_2

PROČ PRÁVĚ JÁDRO

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 CO_2 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 devastace ve výši zhruba 2 miliard tun CO_2. Bez jaderné energetiky by v Evropské unii stouply emise oxidu siřičitého o 100 % a oxidů dusíku o 95 %.

celosvětová produkce elektřiny z jaderných elektráren má trvale vzestupný trend

Výhodami jaderné energie jsou kromě spolehlivého provozu a bezpečnosti provozu i nízké náklady na výrobu elektrické energie, zejména v důsledku nízkých nákladů na palivo. Navíc cena „elektřiny z jádra“ v sobě zahrnuje externí náklady za nakládání s odpady, vyřazování zařízení z provozu a likvidaci či hlubinné ukládání použitého paliva.
Pokud k těmto přednostem připočítáme významné zlepšování provozních ukazatelů a vyšší efektivitu využití jaderného paliva, dostáváme energetický zdroj s nejnižšími náklady, který na trhu pro zákazníky může zajistit stabilní a přijatelné ceny elektřiny.

Zásoby surovin pro jaderné palivo

Jaderných paliv je dostatek a trh s těmito palivy, včetně souvisejících služeb, je globálně dlouhodobě stabilizovaný. Ročně se ve světě vytěží 65 tisíc tun uranové rudy. Výkyvy ceny uranu na světových trzích více méně kopírují aktuální situaci v jaderném průmyslu a s očekávanou renesancí jaderných elektráren lze očekávat růst této ceny. Nejdůležitější surovinou pro výrobu jaderného paliva je dnes uranová ruda. Množství uranu ve vrchních vrstvách zemské kůry je odhadováno na 10^{15} tun, takže uranu je asi 1000krát víc než zlata, 30krát víc než stříbra a přibližně tolik, jako je zinku, olova, bóru a molybdenu. Ve vodách oceánu je ho obsaženo asi 109 tun, přičemž říčními přítoky a erupcemi podmořských sopek přibývá ročně asi 5000 tun. V provozním měřítku se však zatím zpracovávají pouze suroviny ze zemské kůry – rudy.
Mezi státy, kde se těží největší množství uranu, patří Austrálie, Kazachstán, Kanada, Jižní Afrika, Namibie, Brazílie, Ruská federace, USA a Uzbekistán. Celosvětová roční těžba uranu představuje celkem 3 107 000 tun.
Světové zásoby ekonomicky dostupných jaderných paliv mohou bez recyklace paliva vystačit na 85 let a pokud by se nasadily rychlé reaktory, pak by s recyklací mohly vystačit na 2,5 tisíce let. Zásoby lithia pro další generaci fúzních reaktorů by vystačily dokonce na 46 milionů let.

Díky dnešní zvyšující se poptávce po uranu se v řadě zemí rozvíjí geologický průzkum, který by měl vést k objevení velkých nových zásob. Byla ohlášena řada uranových ložisek v kanadské oblasti Athabasca Basin, kde jsou již kvalitní světová ložiska McArthur River, Cigar Lake a Midwest Lake. Je naděje, že další vrty tato ložiska potvrdí. Velké investice do infrastruktury se vynakládají v Kazachstánu, který se chce zařadit mezi největší producenty uranu na světě (předpokládá se, že do roku 2012 bude produkovat ročně až 15 000 tun uranu).
Obavy, že dodávky uranu nebudou pro rozvíjející se světovou jadernou energetiku stačit, nejsou opodstatněné ze dvou důvodů. Jednak se po desetiletích stagnace, způsobené likvidací zásob, začíná uranový průmysl rozvíjet, a jednak bude trh, pokud nebudou existovat restrikce ze strany vlád, stimulovat produkci tak, aby kryla budoucí požadavky jaderné energetiky.
Od zvýšení těžby uranu není třeba očekávat ekologická rizika. Odpady z uranových úpraven se obvykle ukládají na odkaliště a spolu s hlušinou jsou později zaváženy do vytěžených hlubinných nebo povrchových dolů při jejich rekultivaci.

POUŽITÉ PALIVO CENNOU SUROVINOU

Jako každé jiné průmyslové odvětví produkuje i jaderná energetika svůj odpad. Žádný jiný průmyslový provoz na světě však nepodléhá v oblasti odpadů tak přísné regulaci a tak důkladně nemonitoruje nakládání se svými zbytky jako jaderné elektrárny.

Menší část odpadů tvoří vysokoaktivní odpady, k nimž patří především použité jaderné palivo, které se v elektrárně dočasně skladuje s možností přepracování na znovu použitelné palivo. Použitého paliva k uložení není mnoho – z provozu Jaderné elektrárny Dukovany za celou dobu její plánované životnosti by bylo možné v kontejnerech o vnějším průměru 2,6 m vyskládat toho palivo na plochu ne větší, než jaká je rozloha asi poloviny fotbalového hřiště.

Jaderný odpad z Jaderné elektrárny Dukovany byl původně převážen do skladu v areálu jaderné elektrárny Jaslovské Bohunice na Slovensku, odkud měl být postupně odebírán na základě mezistátní smlouvy s bývalým 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.

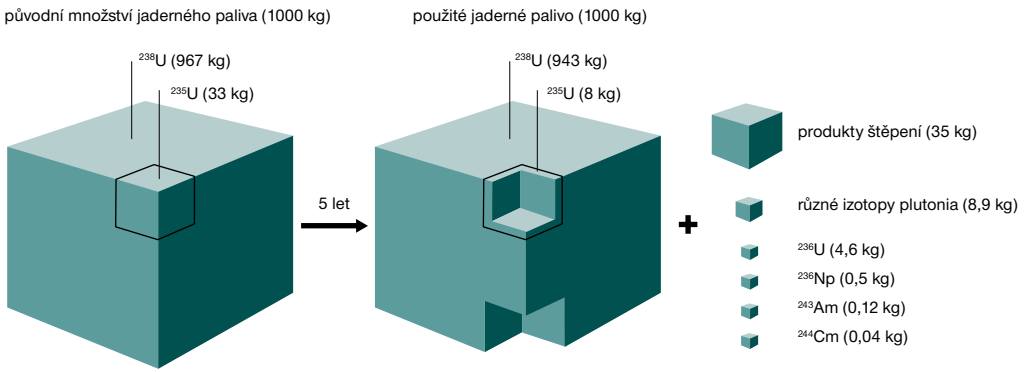
Na celém světě přibude ročně z provozu jaderných elektráren asi 12 000 tun použitého paliva.

Názor, že jaderné palivo použité k výrobě elektrické energie má definitivně punc nebezpečného jaderného odpadu, se postupně mění. Změnu pohledu na produkty řízené jaderné reakce umožnilo zvládnutí moderních technologií přepracování použitého paliva, které někdejší odpady zařadily do kategorie cenných surovin. Tyto suroviny mohou po zpracování opakovaně posloužit k výrobě paliva nového. V daleké budoucnosti, kdy na Zemi dojdou zásoby přírodního uranu, budou moci přispět k zajištění energetických potřeb lidstva.

V současnosti existují ve světě tři hlavní přístupy k nakládání s použitým vysoceaktivním radioaktivním jaderným palivem: trvalé uložení použitého paliva do vhodné geologické formace, přepracování do formy nového čerstvého paliva a tzv. „vyčkávací strategie“, kdy použité palivo čeká na eventuální nové technologie dalšího využití.

Kontrola ve skladu vitrifikovaného jaderného odpadu v La Hague (Francie)

Jak se změní jaderné palivo po „vyhoření“ v reaktoru



JAK UDĚLAT Z POUŽITÉHO PALIVA PALIVO ČERSTVÉ

Od čtyřicátých let minulého století je znám proces přepracování použitého paliva, při kterém se oddělí nebezpečné radioaktivní látky od neškodného uranu. Princip je poměrně složitý a velmi nákladný chemický proces. Vychází z toho, že použité lehkovodní jaderné palivo sice obsahuje asi tři procenta vysoce radioaktivních štěpných produktů, ale kromě toho též skoro 96 % nespotřebovaného uranu a nově vzniklé transuranové prvky (především plutonium, ale též neptunium, americium a curium), kterých je dohromady okolo jednoho procenta, a z nichž některé lze opět použít jako hodnotné štěpné materiály. To pochopitelně představuje značný energetický potenciál. V reaktorech postavených po roce 1980 lze využít i štěpnou směs plutonia s uranem označovanou jako MOX (UO_2+PuO_2). Ve většině reaktorů může MOX nahradit asi třetinu paliva, v některých je to dokonce polovina.
Výhodami přepracování použitého jaderného paliva je redukce původního množství paliva na méně než dvacetinu původního objemu. Dalšími produkty přepracování použitého jaderného paliva jsou izotopy, které lze využít v lékařství či potravinářském průmyslu jako radioaktivní zářiče. Zbylých několik procent vyhořelého paliva je tvořeno izotopy, pro něž nebylo nalezeno žádné využití a je nutné je považovat za odpad určený k trvalému uložení.

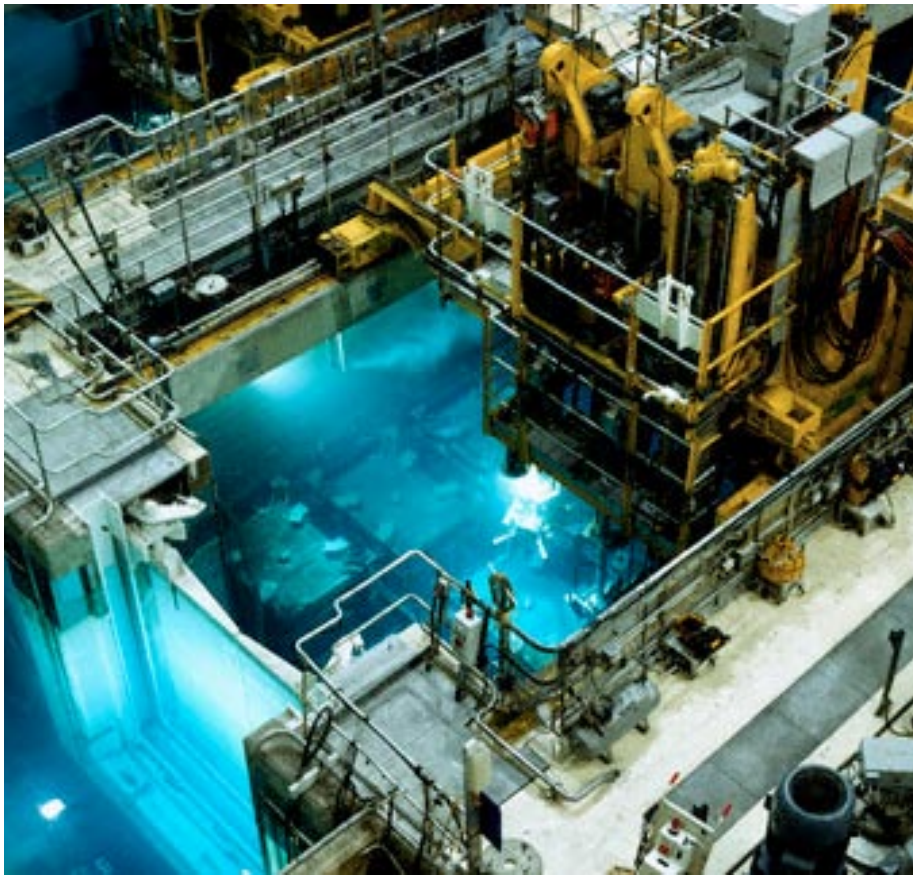
Perspektivy přepracování použitého paliva

Ve světě je v porovnání s počtem jaderných elektráren jen málo přepracovacích závodů. Je to dáno tím, že recyklace uranu a plutonia je velmi drahá a mohou si ji tedy dovolit jen bohaté země. Nízké ceny přírodního uranu této skutečnosti ještě nahrávají. Cestou „ekonomičnosti“ jdou i Spojené státy. Pokud vezmeme v potaz cenu ukládání použitého paliva v trvalých podzemních skladech, není myšlenka přepracování takovou výstředností, jak by se zdálo. Přestože v současnosti vyjde trvalé úložiště až 1,5krát levněji, dlouhodobě tomu tak nebude. Ukládat z jedné elektrárny 30 tun ročně nebo pouhých pět, které zbudou po přepracování, je přece jen rozdíl. Je zřejmé, že s rozvojem jaderné energetiky v Indii, Číně a Japonsku bude jaderná recyklace brzy nutností. Bez ní totiž dojde přírodní uran ve stejnou dobu, jako uhlí.

Svět už použité jaderné palivo přepracovává

Některé země s rozsáhlejším jaderným programem se pro přepracování použitého paliva ve vlastních závodech již rozhodly. V provozu jsou komerční přepracovací závody např. v La Hague a v Marcoule ve Francii či v Sellafieldu ve Velké Británii. Aktivní jsou v této oblasti i Rusko, Čína a Japonsko. Kapacita závodů, které jsou v současnosti v provozu, by však stačila na přepracování asi jen čtvrtiny celkového množství paliva použitého v současných jaderných elektrárnách.
Mezi země, které nechávají vlastní použité jaderné palivo přepracovávat v zahraničí a kromě štěpných materiálů odebírají zpět také příslušné radioaktivní odpady, patří Belgie, SRN, Švýcarsko a Nizozemí. V USA se zatím nepřepracovává, ale už se o této možnosti začalo hovořit.
Zákazník, který si nechá vyhořelé palivo přepracovat, dostane zpět materiál na nové palivo, ale musí si vzít zpět i vysokoaktivní zbytky po přepracování a postarat se o ně. Přepracování si dnes mohou dovolit jen ekonomicky velmi silné země. Takto získané palivo je vždy dražší, než přírodní uran.
Celkově se dnes přepracovává zhruba 10 % celosvětové produkce použitého jaderného paliva.
Francouzi vypočítali, že recyklace 10 až 11 tun plutonia vyhořelých palivových článků za rok se rovná energetickému potenciálu 11 milionů tun ropného ekvivalentu.

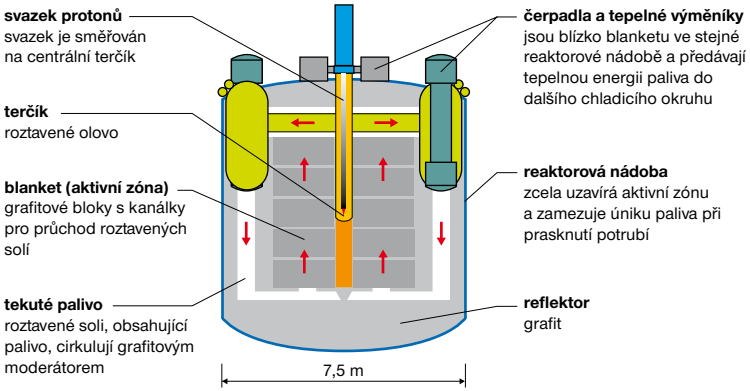
Závod na přepracování použitého paliva v La Hague (Francie)



STÁLE AKTUÁLNĚJŠÍ JSOU TRANSMUTAČNÍ TECHNOLOGIE

Jako velmi nadějná a perspektivní se ukazuje kombinace technologie chemického přepracování vyhořelého paliva a následné jaderné transmutace jeho vybraných složek. Konečným cílem je jaderná přeměna dlouhožijících transuranových prvků a izotopů štěpných produktů s dlouhými poločasy rozpadu na izotopy s krátkým poločasem rozpadu nebo dokonce až na izotopy stabilní.
Jaderná přeměna jader těchto prvků probíhá tříštivou reakcí pomocí neutronů, tedy jiným mechanizmem, než je štěpení uranových jader v jaderném reaktoru. Typy reaktorů určené pro transmutaci se budou od současných energetických reaktorů významně lišit.
V zemích, které se rozhodnou pro technologie přepracování a transmutace, se použité jaderné palivo po několikaletém skladování v bazénech u reaktoru a následném skladování ve skladu použitého paliva převeze do přepracovacího závodu, ve kterém se oddělí jeho jednotlivé složky – uran se použije k výrobě nového paliva, z transuranových prvků a z dlouhodobých štěpných produktů se připraví speciální palivo pro transmutační reaktorové systémy.

Reaktor pro transmutaci radioaktivního odpadu



Typy transmutačních reaktorových systémů

Prvním typem transmutačních reaktorových systémů je transmutor s pevným nebo kapalným palivem a vnějším neutronovým zdrojem. Tento zdroj bude tvořen mohutným lineárním urychlovačem nabitých částic (protonů), které v materiálu terče (např. v roztaveném olovu) způsobí tzv. tříštivou reakci, při které vznikne velký počet neutronů; ty následně způsobí štěpení v aktivní zóně transmutačního reaktoru. Použité palivo z tohoto reaktoru se opět chemicky přepracuje, což odstraní krátkodobé štěpné produkty a palivo se doplní o nové štěpitelné izotopy. Zbytky odpadů z takového reaktoru pak stačí uložit na 10 až 50 let, během kterých se stanou neškodnými. Výkon reaktoru bude možné regulovat pomocí výkonu urychlovače.

Tento typ transmutoru, který je znám pod zkratkou ADS (Accelerator Driven System, tj. urychlovačem řízený systém), bude velmi bezpečným reaktorovým systémem, protože v něm nebude moci reakce probíhat bez externího neutronového zdroje. Takovýto reaktor však nebude primárně určen pro produkci elektrické energie, k provozu urychlovače ji bude naopak spotřebovávat. Přesto vzhledem k tomu, že se při transmutaci prvků vyvíjí velké množství tepla, mohl by urychlovač instalovaný v jaderné elektrárně i po skončení její životnosti pomáhal likvidovat vyhořelé jaderné palivo a dál tak vyrábět elektřinu. Výstavbu prvního evropského demonstračního transmutoru tohoto typu připravuje EURATOM v belgickém výzkumném ústavu SCK-CEN a spuštěn by měl být po roce 2012.

Druhým typem vyvíjených transmutačních reaktorů je solný reaktor s kapalným jaderným palivem na bázi roztavených fluoridových solí. Tento reaktor označovaný jako MSR (Molten Salt Reactor) patří do skupiny pokročilých reaktorových typů s jejichž nasazením se počítá především v druhé polovině století. Bude mít charakter vysokoteplotního energetického transmutačního reaktoru. Výroba elektrické energie zde bude díky vysoké teplotě roztavené fluoridové soli probíhat s účinností dokonce vyšší než v současných jaderných elektrárnách. Vždy určitá část kapalného paliva, které bude cirkulovat mezi reaktorem a výměníkem tepla, bude kontinuálně během chemického přepracování zbavována štěpných produktů a po doplnění o nové štěpitelné a transmutovatelné izotopy bude opět vrácena do primárního palivového okruhu reaktoru. Velkou předností tohoto typu transmutačního reaktoru je právě princip průběžného „on-line“ přepracování jeho paliva, který je použitelný pouze u kapalných jaderných paliv. Technologie solného reaktoru byla do značné míry ověřena v letech 1964 až 1969 v Oak Ridge National Laboratory v USA, později však dostal přednost vývoj tlakovodních reaktorů s pevným palivem.

dnes se přepracovává zhruba 10 % celosvětové produkce použitého paliva

Nezbytná je mezinárodní spolupráce

Pro dokončení vývoje transmutačních reaktorových systémů je třeba uskutečnit veliké množství výzkumných a ověřovacích prací; ty lze realizovat pouze v rámci široké mezinárodní spolupráce. Státy, které se vývojem těchto technologií zabývají (např. USA, Francie, Belgie, Velká Britanie, Japonsko, Jižní Korea, Rusko, Španělsko, Česká republika nebo Švédsko), zapojily do svých programů nejvýznamnější jaderné ústavy a laboratoře. Výzkum transmutace použitého paliva tak již postupně dosahuje zkušebního technologického měřítka a např. ve francouzském rychlém reaktoru Phenix jsou od konce roku 2003 užívány i palivové články obsahující vedle uranu a plutonia i americium. V Evropské unii koordinuje výzkumné projekty v oblasti vývoje přepracování a transmutace EC/EURATOM.

V České republice se výzkumem pokročilých metod chemického přepracování a transmutačních technologií zabývá několik organizací

Použité palivo z jaderných elektráren se chladí ve vodních bazénech před jeho chemickým přepracováním (La Hague, Francie)

spojených v národním konsorciu TRANSMUTACE. V tomto konsorciu jsou sdruženy Ústav jaderného výzkumu Řež, a. s., Energovýzkum, s. r. o., ŠKODA Jaderné strojírenství, a. s., Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze a Ústav jaderné fyziky AV ČR. Výzkumné práce se soustřeďují na vývoj solného transmutačního reaktoru včetně vývoje technologií pyrochemického přepracování jeho kapalného paliva. Výsledky práce, zejména v oblasti vývoje fluoridových technologií přepracování paliva, řadí naše pracoviště mezi vedoucí pracoviště v oboru.
Technologie chemického přepracování použitého paliva a jeho jaderné transmutace je cestou trvale udržitelného rozvoje a cestou přijatelnosti jaderné energetiky širokou veřejností.

V ČESKÉ REPUBLICE SE POUŽITÉ PALIVO ZATÍM UKLÁDÁ DO SKLADŮ

Mnoho zemí se rozhodlo určitý čas vyčkat a uložit použité palivo do dočasných skladů a rozhodnutí o řešení problému použitého jaderného paliva oddálit do doby, kdy věda může přinést podstatná zdokonalení současných technologií či přijít se zcela novým řešením. Patří mezi ně i ČR. Palivo, z něhož byla v jader-

Manipulace s čerstvým palivem
Sklad použitého paliva v Dukovanech
Areál Temelína se znázorněním budoucího skladu

ných elektrárnách Dukovany a Temelín vyrobena energie, je nejdříve umístěno až na 13 let do bazénů použitého paliva v těsné blízkosti jaderných reaktorů. Poté se přemístí do meziskladu v areálu elektráren. V něm může být ve skladovacích kontejnerech uloženo zhruba 60 let.

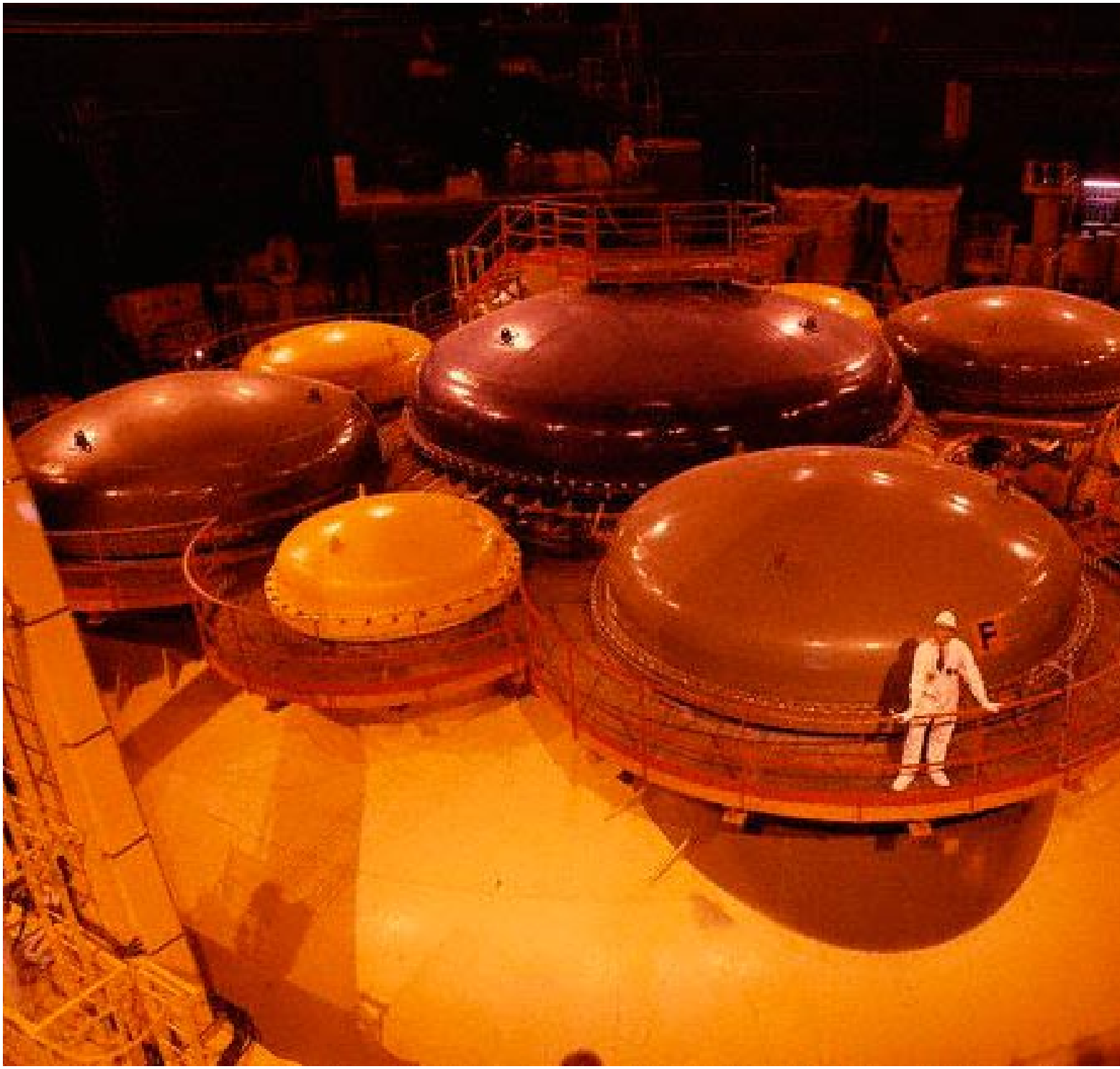
v ČR se transmutačními technologiemi zabývají organizace konsorcia Transmutace

V současné době slouží ke skladování použitého jaderného paliva sklady v areálu Jaderné elektrárny Dukovany s celkovou kapacitou 1940 tun tzv. těžkého kovu (izotopy uranu, plutonia a dalších vyšších aktinidů). Tato kapacita uspokojí potřeby Jaderné elektrárny Dukovany na 40 let provozu. V Jaderné elektrárně Temelín se připravuje výstavba třetího meziskladu o kapacitě 1370 tun projektovaná na 30 let provozu elektrárny.
Do doby, než bude technologie přepracování pro ČR ekonomicky přijatelná – a to lze dnes jen ztěží upřesnit – se česká jaderná energetika bez dočasného skladování použitého paliva v meziskladech neobejde.

Záruky za bezpečné uložení použitého paliva nese stát

Veškeré náklady spojené s nakládáním s použitým jaderným palivem v ČR financuje ze svého rozpočtu provozovatel jaderných elektráren, tj. ČEZ, a. s. Záruky za bezpečné uložení všech radioaktivních odpadů, včetně použitého jaderného paliva, nese stát, který za účelem splnění požadavků daných zákonem založil Správu úložišť radioaktivního odpadu (SÚRAO).
Posláním SÚRAO je zajišťovat na území České republiky bezpečné ukládání radioaktivních odpadů v souladu s požadavky na ochranu člověka i životního prostředí před nežádoucími vlivy těchto odpadů. Při své činnosti se SÚRAO řídí ustanoveními atomového zákona, ostatními zákony a právními předpisy a svým statutem schváleným vládou. SÚRAO postupuje v souladu s mezinárodními doporučeními a smlouvami z oblasti využívání jaderné energie a ionizujícího záření, přijatými Českou republikou. Přitom usiluje o aktivní a vstřícnou spolupráci s původci radioaktivních odpadů, s obcemi, v jejichž blízkosti se nacházejí úložiště radioaktivních odpadů, i se širší veřejností. Činnost SÚRAO je kontrolována Radou SÚRAO. Předmětem činnosti SÚRAO je především bezpečný a plynulý provoz úložišť radioaktivních odpadů, příprava, výstavba úložišť, nakládání s radioaktivními odpady, evidence odpadů a správa a kontrola odvodů a poplatků od provozovatelů jaderných zařízení.
Činnosti, které Správa úložišť radioaktivních odpadů zajišťuje, jsou financovány z jaderného účtu. Na tento účet přispívají všichni původci radioaktivních odpadů, ČEZ platí 50 Kč z každé vyrobené MWh. Samostatnou účetní rezervu tvoří ČEZ na krytí nákladů spojených s vyřazováním jaderných elektráren po ukončení jejich provozu.
Ve srovnání s množstvím paliva nezbytným pro provoz jiných energetických zdrojů není množství použitého paliva z českých jaderných reaktorů velké. Na základě dosavadního rozvoje technologií na přepracování použitého jaderného paliva je opakované využití tohoto paliva u nás sice technicky reálné, nicméně v současné době z ekonomických důvodů nerealizovatelné.
Pokud jde o uložení vysoce aktivních odpadů a použitého jaderného paliva, ty budou uloženy v hlubinném úložišti. Pro ně se v současné době v souladu se státní koncepcí nakládání s radioaktivními odpady a použitým jaderným palivem hledá vhodná lokalita. Zprovoznění skladu se předpokládá v roce 2065. Definitivní sklad vysokoaktivního a použitého paliva bude vybudován pravděpodobně v žulovém masivu, pro který je, vzhledem k jeho stabilitě cca 300 mil. let, doba uložení 100 000 let pouze „krátkou epizodou v životě“. Radioaktivní odpady budou uloženy v místech, která znali již trilobiti. Palivové kazety budou umístěny v několika ocelových nebo měděných pouzdrech a ve skalním masivu budou utěsněny tak, aby byla možná jejich kontrola, zpětné vyjmutí a event. další využití.

Umístění skladu
použitého paliva

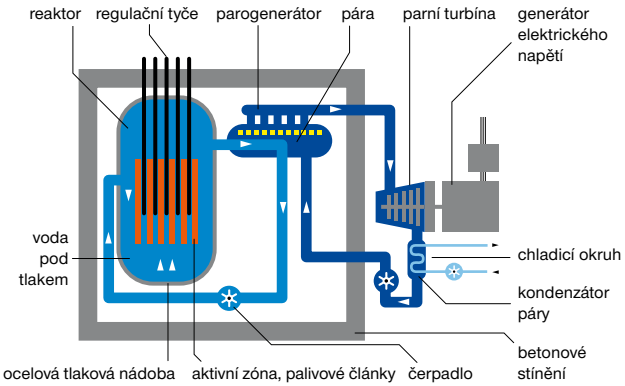


NA DVEŘE KLEPOU NOVÉ GENERACE REAKTORŮ

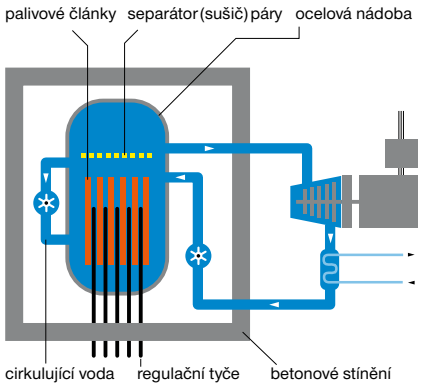
Vývoj jaderných reaktorových technologií lez rozdělit do několila generací:
Generace I Jde o prototypy komerčních reaktorů z 50. a 60. let.
Generace II Sem patří reaktory postavené v 70. a 80. letech, které nyní tvoří páteř jaderné energetiky. Nejběžnějšími typy jsou lehkovodní reaktory (např. VVER v Dukovanech) a těžkovodní reaktory (např. CANDU využívaný v Kanadě). Mezi nejvyspělejší reaktory této generace patří temelínské.
Generace III Tyto reaktory, někdy označované jako tzv. „pokročilé reaktory“, vznikají od 90. let minulého století. Od roku 1996 fungují například v Japonsku. Do této kategorie spadá i nový reaktor EPR budovaný ve Finsku nebo AP–600 od Westinghouse Company, který získal licenci ve Spojených státech.
Generace III+ S uvedením těchto reaktorů do provozu se počítá okolo roku 2010, zatím procházejí vývojem nebo jsou ve schvalovacím řízení. Patří sem především reaktory s kuličkovým keramickým palivem PBMR (s výstavbou počítá jižní Afrika a Čína) a americký AP–1000. Tato generace implementovala z francouzského a německého systému to nejlepší a celek zjednodušila (asi o 40 % se např. snížil počet komponentů, využívá se menší počet konektorů a dalších součástí). Nejdůležitější změnou je zdokonalení bezpečnostních systémů. Ani při roztavení paliva nedojde k úniku radioaktivity do okolí.
Generace IV: Tato generace je ještě ve fázi výzkumu a vývoje. Ten probíhá za rozsáhlé mezinárodní spolupráce. Některé ze zkoumaných modelů jsou po technické stránce velmi zajímavé a přinášejí další přidanou hodnotu. Místo tradiční vody bude většina využívat k chlazení látky umožňující provoz s mnohem vyšší teplotou a reaktory budou např. schopny oddělit z vody relativně levnou cestou vodík a připravit tak palivo pro budoucí vodíkovou energetiku. To otevírá budoucím energetickým systémům další perspektivy. Plán na jejich využití je rozvržen až do roku 2030.

Rychlý množinový reaktor SuperPhenix (Francie)

Reaktor PWR (tlakovodní)



Reaktor BWR (varný)



Podle Mezinárodní agentury pro atomovou energii MAAE se během příštích patnácti let na zemi postaví atomové elektrárny o výkonu 127 tisíc MW a za dvacet let se kapacita světové jaderné energetiky rozroste zhruba o pětinu na 427 tisíc MW. Polovina z nových reaktorů III. a částečně už i IV. generace nahradí zastaralé zdroje z 60. a počátku 70. let, z nichž některé se budou modernizovat.

SOUČASNÉ TYPY JADERNÝCH REAKTORŮ

Princip reaktorů je v podstatě jednoduchý, jejich konstrukce však velmi složitá. Obecně je reaktor veliká nádoba nebo soustava nádob, která musí odolávat vysokým tlakům, teplotám a intenzívnímu toku neutronů. V atomových elektrárnách ve světě v současné době pracují jaderné reaktory řady různých typů, které splňují předpoklad dalšího vývoje.

PWR, VVER (Pressurized light-Water moderated and cooled Reactor, Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor)

Tlakovodní reaktor PWR nebo ruský typ VVER je dnes ve světě nejrozšířenějším typem jaderného reaktoru (asi 57 %). Tento typ pracuje jak v Jaderné elektrárně Dukovany, tak v Jaderné elektrárně Temelín. Původně byl vyvinut v USA, později koncepci převzalo Rusko. Pro svou vysokou bezpečnost jsou stejné reaktory používány kromě jaderných elektráren i k pohonu jaderných ponorek. Jaderným palivem je obohacený uran ve formě tabletek oxidu uraničitého uspořádaných do palivových tyčí. Moderátorem i chladivem je obyčejná voda. Výměna paliva probíhá při odstaveném reaktoru zpravidla jednou za 1 až 1 a půl roku (nahradí se jedna třetina použitého paliva).

BWR (Boiling Water Reactor)

Varný reaktor BWR je druhým nejrozšířenějším typem. Palivem je mírně obohacený uran ve formě válečků oxidu uraničitého uspořádaných do palivových tyčí. Palivo se mění stejně často jako v případě PWR. Obdobou PWR je i aktivní zóna a obyčejná voda coby chladivo a moderátor. Voda se ohřívá až do varu přímo v tlakové nádobě a v horní částí reaktoru se hromadí pára. Když se zbaví vlhkosti, žene se přímo k turbíně. Reaktory BWR jsou jednookruhové.

CANDU

Těžkovodní reaktor CANDU byl vyvinut v Kanadě a exportován také do Indie, Pákistánu, Argentiny, Koreje a Rumunska. Palivem je přírodní uran ve formě oxidu uraničitého, chladivem a moderátorem těžká voda D_2O. Aktivní zóna je v nádobě ve 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.

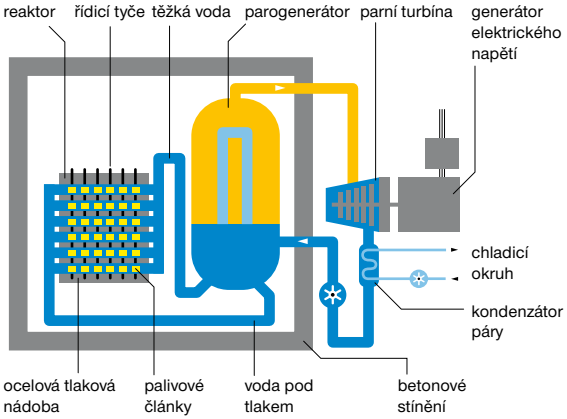
AGR (Advanced Gas Cooled, Graphite Moderated Reactor)

Pokročilý plynem chlazený reaktor AGR se zatím používá výhradně ve Velké Británii. Palivem je uran obohacený izotopem ^{235}U ve formě oxidu uraničitého, moderátorem je grafit, chladivem oxid uhličitý. Elektrárna je dvouokruhová.

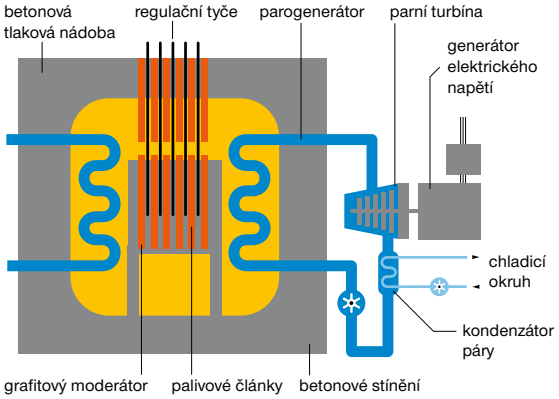
HTGR (High Temperature Gas Cooled Reactor)

Vysokoteplotní reaktor HTGR patří k velmi perspektivním typům jaderných reaktorů. Bezpečnost typu je na vysoké úrovni, reaktor poskytuje na výstupu velmi vysokou teplou. Má proto i velmi vysokou účinnost výroby elektrické energie (až 40 %). Teplo se může využívat nejen pro výrobu elektřiny, ale i přímo v různých průmyslových procesech, například metalurgických nebo při zplyňování uhlí. Vysokoteplotní reaktory jsou zatím vyvinuty pouze

Reaktor CANDU (chlazený a moderovaný těžkou vodou)



Reaktor AGR (chlazený plynem)



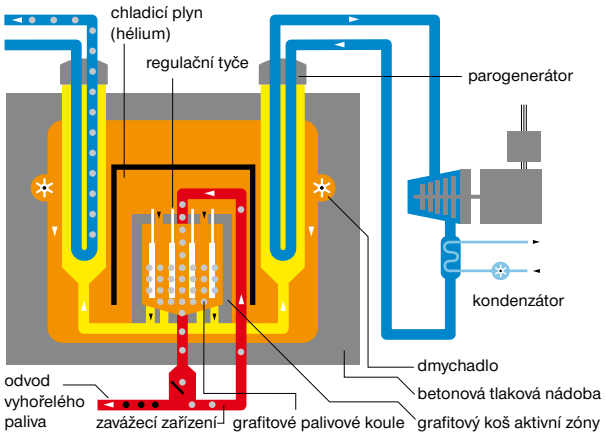
experimentálně v Německu, USA a Velké Británii. Palivem je vysoce obohacený uran ve formě malých kuliček oxidu uraničitého. Kuličky povlékané třemi vrstvami karbidu křemíku a uhlíku jsou rozptýleny v koulích grafitu, velkých asi jako tenisový míček. Grafit slouží jako pevná, tepelně odolná schránka uranu i vznikajících radioaktivních zbytků i jako moderátor. Palivové koule se volně sypou do aktivní zóny, na dně jsou postupně odbírány. Chladivem je helium proháněné aktivní zónou.

FBR (Fast Breeder Reactor)

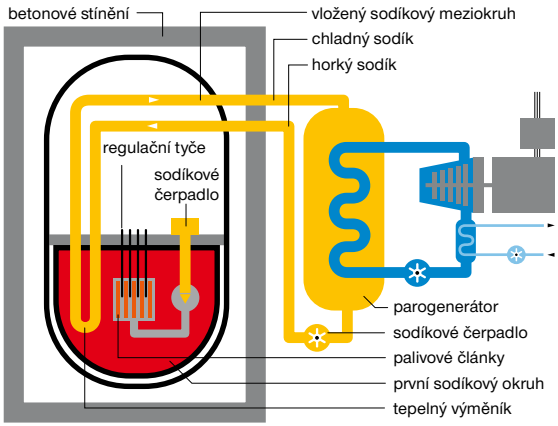
Rychlý množivý reaktor FBR pracuje v Rusku (BN–600 v Bělojarsku), další byly postaveny ve Francii (SuperPhénix) a Velké Británii. V USA, Německu a Japonsku existují demonstrační elektrárny tohoto typu. V dlouhodobé perspektivě je těmto reaktorům přisuzován velký význam. Palivem je plutonium ve směsi oxidu plutoničitého a uraničitého. Během provozu vyprodukuje více nového plutoniového paliva, než kolik ho sám spálí. Reaktor nemá moderátor, řízená štěpná reakce v něm probíhá působením nezpomalených, rychlých neutronů. Aktivní zóna tvořená svazky palivových tyčí je obklopena „plodivým“ pláštěm z uranu. V každém litru objemu FBR se uvolňuje až desetkrát více tepla než u klasických pomalých reaktorů. Chladivem je sodík, který ze sekundárního okruhu proudí do parogenerátoru, kde ve třetím okruhu ohřívá vodu na páru.

Palivové tabletky

Reaktor HTGR (německý typ, vysokoteplotní)



Reaktor FBR (rychlý množivý)



EPR (European Pressurised Water Reactor) – reaktor budoucí Evropy

Projekty jaderných elektráren nové generace vycházejí jednak ze zdokonalování současných typů konstrukce tlakovodních reaktorů, jednak z vývoje typů nových. Významným projektem pro budoucí Evropu je reaktor III. generace EPR (European Pressurised Water Reactor). Tento reaktor s předpokládaným výkonem vyšším než 1500 MW vychází ze zkušeností německých a francouzských jaderných elektráren. K vývoji nového reaktoru EPR založily již v roce 1989 německá firma Siemens a francouzský FRAMATOM společný podnik.

Evropský tlakovodní reaktor má optimální bezpečnostní charakteristiky. Je vybaven čtyřnásobně redundantními bezpečnostními systémy, dvojstěnným kontejnmentem a tzv. pasivním zařízením (tj. aniž by musela zasahovat řídicí technika) pro případ, že by došlo k tavení paliva. Projekt se zaměřil na zjednodušení klíčových konstrukčních prvků, což přináší jak zvýšení spolehlivosti a bezpečnosti, tak snížení ceny.

K dispozici evropským provozovatelům jaderných elektráren jsou i jiné projekty, jako např. americký AP 1000, ruský VVER 1000, V–392, japonský varný ABWR/ESBWR nebo německý varný SWR–1000. Všem společná je filosofie pasivního bezpečnostního systému.

DŮRAZ NA BEZPEČNOST

U projektů nových jaderných elektráren se sleduje především co nejvyšší bezpečnost, dále ekonomická výhodnost provozu a vyloučení zneužití. Z hlediska zajištění bezpečnosti se v projektech uvažují dva typy bezpečnostních principů: tzv. inherentní bezpečnost předpokládá využití základních fyzikálních principů, které samy vyloučí možnost havárie, a tzv. pasivní bezpečnost zmírní následky event. havárií a spolu s bariérami zabrání úniku nebezpečných látek i v případě, že by selhala veškerá aktivní bezpečností havarijní technika. Inherentní systém je netečný vůči lidským chybám, úmyslným zásahům nebo vnějším vlivům.

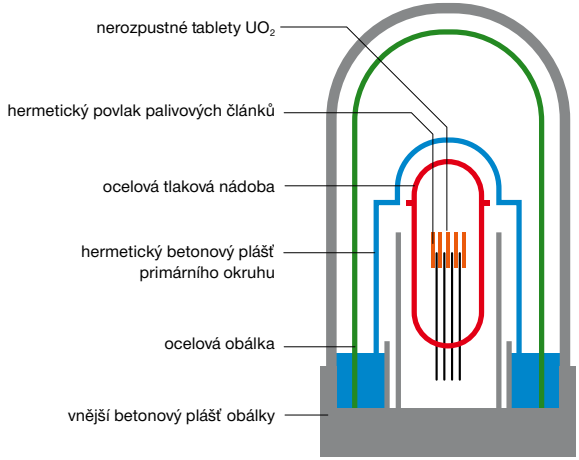
Typickým příkladem prvku inherentní bezpečnosti je tzv. záporný koeficient reaktivity u vodou chlazených reaktorů. Dojde-li ke zvýšení teploty v reaktoru, voda se změní v páru, čímž dojde v důsledku horšího zpomalování neutronů k poklesu četnosti štěpení a tím k poklesu množství uvolňované energie. Klasickým prvkem pasivní bezpečnosti je i samovolný pád absorpčních tyčí do aktivní zóny působením gravitace (v případě přerušení dodávky elektrického proudu). U moderních jaderných elektráren slouží jako vnější bariéra proti úniku radioaktivních látek pevná železobetonová kopule nad reaktorem – kontejnment.

TOP 6 JADERNÝCH REAKTORŮ BUDOUCNOSTI

Mezinárodní fórum IV. generace (GIF), které sdružuje vědce a provozovatele jaderných zařízení z deseti zemí světa, navrhlo zahrnout do kategorie „reaktor čtvrté generace“ šest různých typů reaktorů. Cílem je vyvinout taková jaderná zařízení, která by pomohla řešit současné energetické a ekologické problémy. Všechny vybrané reaktory musí splňovat přísná kritéria bezpečnosti, spolehlivosti a ekonomičnosti provozu. Do kategorie ekonomičnosti spadá například přijatelné riziko pro investory, časový úsek výstavby elektrárny ne delší než tři roky a cenová konkurenceschopnost výroby elektřiny ve srovnání s ostatními zdroji v regionu. Pro bezpečnost byly zase určující odolnost aktivní zóny reaktoru proti poškození nebo netolerance reaktoru k chybám lidské obsluhy.

Kromě GIF působí v oblasti rozvoje pokročilých jaderných technologií také Mezinárodní projekt novodobých jaderných reaktorů a palivových cyklů (INPRO), který zaštiťuje Mezinárodní asociace pro jadernou energii. Cílem INPRO je podporovat bezpečné, udržitelné a ekonomicky dostupné využití jaderných technologií v souvislosti s energetickými nároky 21. století. V současné době má 22 členů včetně Ruska. Do žebříčku „TOP 6“ se dostal rychlý reaktor chlazený plynem, rychlý reaktor chlazený teku-

V reaktorech se zvýšenou jadernou bezpečností uzavírá štěpné produkty šest bariér



tým sodíkem, rychlý reaktor chlazený tekutým olovem, reaktor chlazený tekutou solí, vysokoteplotní reaktor chlazený vodou a vysokoteplotní reaktor chlazený heliem.
Všechny typy operují s mnohem vyššími teplotami než dnešní reaktory – zatímco v současnosti je běžná provozní teplota v lehkovodních reaktorech do 330 °C, u reaktorů čtvrté generace se pohybuje od 510 do 1000 °C.
Čtyři z nominovaných typů (s plynovým, olověným, solným a heliovým chlazením) jsou navrženy přímo na výrobu vodíku, u ostatních se předpokládá výroba elektřiny. Ta se pak může použít i pro elektrolýzu vody na vodík a kyslík. V současné době se získává přes 96 % vodíku z fosilních paliv, v budoucnu by měla mít elektrolýza vody mnohem větší slovo.
O společném postupu ve vývoji všech šesti vybraných typů reaktorů a o otevřené výměně technických informací podepsaly v roce 2006 v únoru dohodu Spojené státy, Kanada, Francie, Japonsko a Velká Británie. Na rozvoji nových reaktorových technologií usilovně pracují i země vně společenství GIF. Průkopníkem ve využívání thoria jako jaderného paliva je například Indie.

Lehkovodní reaktory s nadkritickými stavy páry

Pokročilou technologii představuje koncepce SWCR – Supercritical Water Cooled Reactor anebo HPLWR – High Performance Light Water Reactor, což je důsledná aplikace moderní paroturbínové techniky na lehkovodní reaktory. Při přechodu na nadkritické stavy páry se tlakovodní reaktor a varný reaktor fakticky spojují do jedné koncepce. Chladicí voda zůstává v reaktoru – stejně jako v tlakovodním reaktoru – jednofázová. Vstupuje do reaktoru zahřátá na 280 °C a při systémovém tlaku cca 25 MPa (250 barů) se ohřívá na více než 500 °C. Stejně jako ve varném reaktoru se pak tzv. čerstvá (ostrá) pára vede přímo do turbíny. Na rozdíl od tlakovodního reaktoru zde odpadá výroba páry (tedy parní generátor) a rozdělování do primárního a sekundárního okruhu. Technologie nevyžaduje odlučovače páry v tlakové nádobě. Jelikož palivo v reaktoru může být poháněno, podobně jako kotle na uhlí v tepelné elektrárně, v průtlačném režimu, odpadají i cirkulační čerpadla pro chladiva. Péči o páru ve fázi tzv. mezipřehřívání mezi vysokotlakou a nízkotlakou turbínou přebírá tepelný výměník typu pára-pára, který je napájen dílčím proudem z čerstvé páry, stejně jako je tomu u tlakovodních a varných reaktorů.
Díky těmto změnám se dosahuje citelně vyšší účinnosti zařízení – už při teplotě čerstvé páry 510 °C je to o 44 %, popř. i více.
Teploty, s nimiž je třeba počítat, dosahují až 620 °C, a jsou tedy vyšší než v tlakovodních reaktorech. To znamená, že zde nelze k výrobě pokrytí palivových proutků použít slitin zirkonu (zirkalloy), nýbrž ušlechtilých ocelí anebo slitin na bázi niklu. Palivo UO_2 nebo MOX zde však lze použít stejně jako u lehkovodních konvenčních reaktorů.

Rychlé reaktory chlazené sodíkem

Potenciál rozvoje budoucích lehkovodních reaktorů spočívá hlavně ve zlepšování tepelné účinnosti při nízkých nákladech na jaderné zařízení při aplikaci dosavadních zkušeností z parních elektráren.
Velkého pokroku doznalo využití paliva – rychlé reaktory mohou dosáhnout mnohonásobků vyhoření lehkovodních reaktorů. Rychlý a sodíkem chlazený reaktor KNK v Karlsruhe už dosáhl více než 150 GW/t vyhoření, což je třikrát větší využití paliva, než jaké se dnes běžně dosahuje u lehkovodních reaktorů. V kombinaci s přepracováním (např. pomocí procesu Purex) může takový reaktor navíc produkovat nové palivo pro lehkovodní reaktory a rovněž může štěpit transurany a tak také podstatně redukovat množství radioaktivního materiálu určeného k trvalému uložení. Tato schopnost přisuzuje rychlým reaktorům rozhodující význam z hlediska udržitelného zásobování jadernou energií a optimálního způsobu řešení manipulace s jaderným odpadem.
Celkem se v rámci programu Generace IV na světě v roce 2006 vyvíjelo šest reaktorů, z toho ve třech případech šlo o reaktory rychlé.

V aktivní zóně vysokoteplotního reaktoru HTGR (Německo)

Nejvíce zkušeností se zatím získalo s reaktory chlazenými sodíkem: EBRR-II v USA a Phenix ve Francii. Pokud jde o větší podobné reaktory – např. SuperPhenix ve Francii (1200 MW_e) nebo MONJU v Japonsku – projevily se provozní problémy a tyto reaktory zatím nejsou připraveny pro komerční provoz.
Otevřenými otázkami vývoje tohoto typu reaktorů jsou: pasivní bezpečnostní chování reaktorů, vztah mezi náklady a výkonem a spolehlivost. Poměrně velký zájem o reaktory chlazené sodíkem je v Japonsku, v Evropě je menší.
Do roku 2010 bude v ruské elektrárně Bělojarsk uveden do komerčního provozu nový jaderný reaktor „pokročilé" generace s označením BN–800, který má nahradit svého předchůdce, reaktor BN–600; ten je dosud největším rychlým reaktorem na světě sloužícím ke komerčním účelům. Do sítě ročně dodává okolo 4000 milionů MWh. Vyšším výkonem disponoval pouze francouzský SuperPhenix.
Projekt rychlého reaktoru BN–800 byl zahájen v roce 1985. Od možnosti průmyslového využití ho doposud dělila velká finanční náročnost.
Reaktor BN–800 bude disponovat 880 MW_e; v porovnání s původním reaktorem BN–600 dojde ke zvýšení výkonu o 320 MW_e. Oproti současnému typu nabízí výrazné zdokonalení sekundárního okruhu, používání kvalitnějších materiálů a možnost použití více druhů paliv.
Reaktor bude uzpůsoben „spálit" za rok až dvě tuny plutonia získaného z vojenských zbraní.

Rychlé reaktory chlazené olovem

Jako chladiva pro rychlé reaktory lze použít i olova. Jeho eventuální průsaky či kontakt se vzduchem či vodou nevede na rozdíl od sodíku ihned k výbušným reakcím. Vysoký varný bod olova 1740 °C činí tvorbu parních bublin v aktivní zóně krajně nepravděpodobnou. Nevýhodou je koroze olova na ocelích, tu však lze omezit. Reaktory chlazené olovem se už sériově používají v ruských jaderných ponorkách. Program Generace IV se zaměřuje na to, aby podobné reaktory přišly i na trh civilních jaderně-energetických zařízení.
Jádro reaktoru s palivovými tyčemi z plutonia a oxidu uranu obohaceného o 20 % je umístěno ve velké olovem chlazené tlakové nádobě vysoké cca 15 metrů. Ve výšce cca 7,5 m je nad středem jádra tepelné těžiště kruhovitého ponorného chladiče, který přenáší tepelný výkon aktivní zóny (400 MW) při teplotě olova od 420 do 560 °C do sekundárního okruhu. Přenos tepla uvnitř olověné nádoby probíhá pouze přirozenou konvekcí, což zaručuje vysokou spolehlivost systému. Olověná masa má objem převyšující 2500 tun; to zajišťuje velmi setrvačné a spolehlivé termické chování systému.
Počítá se s vyhořením paliva 150 až 200 GW/t, aniž by se palivové články musely během procesu vyhoření přemisťovat. Palivo se má přemisťovat pouze při dopravě od jeho dodavatele do jaderné elektrárny ve formě kompletní kazety; po zapuštění má v tlakové nádobě fungovat po dobu 15 až 20 let. To kromě jiného znamená, že nikdo (dokonce ani provozovatel reaktoru) nemá během celé doby fungování reaktoru k palivu přístup a nemůže s palivem (event. nekontrolovaně) manipulovat. Protože reaktor pracuje pasivním způsobem, je prakticky vyloučeno, aby došlo k nežádoucí situaci vinou chybné manipulace s řídicími mechanizmy. Tato koncepce, které dávají přednost hlavně v USA, umožňuje využívat jadernou energetiku i v politicky nestabilních zemích.

jaderná zařízení řeší současné energetické a ekologické problémy

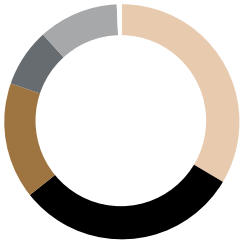
V oblasti sekundárního okruhu se ověřuje možnost využít nadkritický tzv. CO_2–Braytonův proces. Jde o rekuperativní oběh s mezistupňovým chlazením. CO_2 se ohřívá v ponorných chladičích při tlaku 20 MPa (200 barů) na 560 °C; tento tlak se poté snižuje ve třístupňové nebo čtyřstupňové turbíně na 7,5 MPa (75 barů). Po ochlazení ve velkoobjemovém

rekuperátoru a nízkoteplotním chladiči je CO_2 pomocí dvou kompresorů a jednoho mezichladiče opět stlačen. Problémem, který vývojáři zatím uspokojivě nevyřešili, je nízkotlaký kompresor, který má fungovat v blízkosti kritického bodu CO_2. Alternativou k tohoto řešení se zdá být konvenční a velmi efektivní parní okruh. Vysoké teploty čerstvé páry do 560 °C umožňují realizovat moderní nadkritický parní proces s vysokým stupněm účinnosti (45 %).

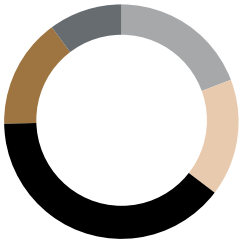
Plynem chlazené reaktory

V Jülichu se vyvíjí reaktor chlazený heliem. Zájem o něj mají USA, Francie, Japonsko a JAR. Jde o koncepci reaktoru pro poměrně malé výkony (do 300 MW). Ve prospěch této koncepce hovoří relativně nízká cena reaktoru i bezpečnostní hlediska – i kdyby došlo k výpadku chlazení, nemůže dojít k jaderné reakci. Přednost se v současné době dává modulárnímu typu reaktoru s rekuperativním tzv. Helium-Braytonovým okruhem, jímž se reaktorové chladivo vede přímo do turbíny.
Tato koncepce reaktoru má ve srovnání s jinými i určité nevýhody. Patří k nim malá hustota výkonu v aktivní zóně a velké objemy helia a z toho plynoucí velké objemy potřebných výměníků tepla. U reaktoru chlazeného heliem se sice počítá se stupněm účinnosti 45 %, ale cena, za kterou se tento výsledek získá, se zdá být dosti vysoká.

Podíl zdrojů na výrobě elektřiny v EU



Podíl zdrojů na výrobě elektřiny ve světě



ZVYŠOVÁNÍ ÚČINNOSTI

Nejdůležitějším úkolem celosvětového programu Generation IV je zvyšování účinnosti jaderných reaktorů. Pojem účinnost reaktorů lze přitom chápat buď jako stupeň využívání jaderného paliva, nebo jako účinnost přeměny tepelné energie v mechanickou, resp. elektrickou s co nejvyšším stupněm využití.

Lepší využití paliva

V jaderných elektrárnách se uplatňují nové přístupy ke zvyšování efektivnosti zejména v souvislosti s lepším využíváním jaderného paliva. Zatímco v 70. letech minulého století se z 1 tuny UO_2 vyrobilo 20 až 30 GW elektrické energie, dnešní zařízení vykazují produkci 50–55 GW. Podmínkou je vyšší obohacení paliva (až do 5 % U–235), což samozřejmě na druhé straně náklady na palivo prodražuje. Přitom nejde pouze o štěpení U–235. Při neutronové absorpci se během procesu mění nesnadno štěpitelný U–238 v lehce štěpitelné plutonium, takže ke konci procesu vyhoření se rozštěpí stejné množství vzniklého plutonia jako U–235. Na rozdíl od uhlí, které se v tepelné elektrárně kompletně spálí, se v palivových tyčích v jaderném reaktoru nalézají ještě využitelné zbytky paliva, tj. uranu a plutonia, a to i ve fázi, kdy životnost či plánovaná doba používání těchto palivových tyčí už končí.
Výrazný skok v účinnosti jaderných zařízení se očekává od IV. generace reaktorů.

hlavním úkolem programu Generation IV je zvyšovat účinnost jaderných reaktorů

LÍDRY DALŠÍHO VÝVOJE JSOU USA, RUSKO A LIDNATÁ ASIE

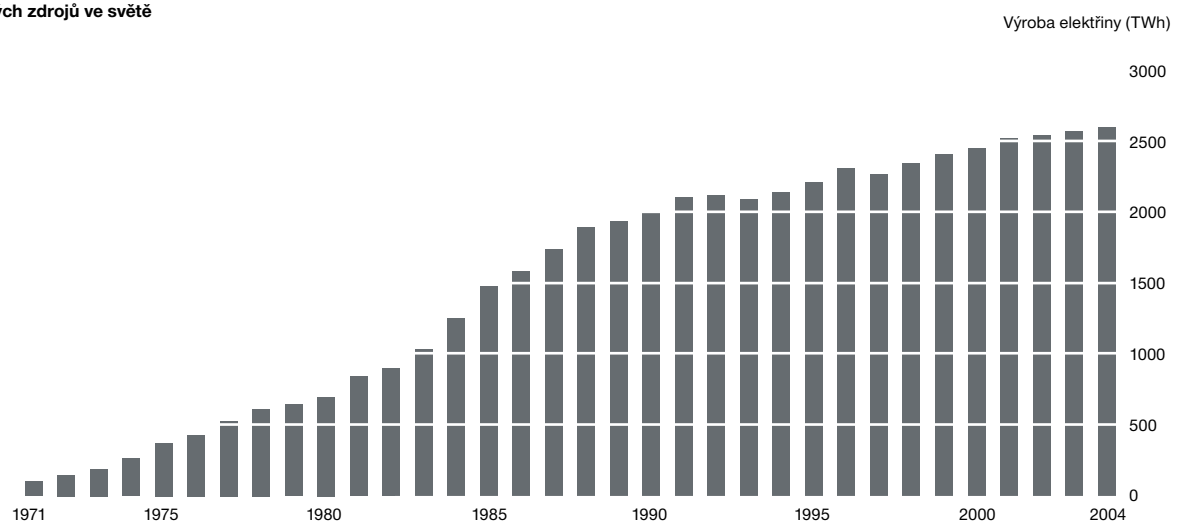
USA

V jaderných elektrárnách v USA se vyrábí elektrická energie pokrývající pětinu spotřeby. Boom jejich výstavby trval po celá 70. a 80. léta minulého století, kdy se do provozu uvedlo 97 reaktorových bloků. Od roku 1990 se spustily jen čtyři, každý o výkonu 1200 megawattů. Posledním byl v roce 1996 Wattsbar–1 ve státě Tennessee. Jejich výstavba začala ještě v první polovině 70. let minulého století. Nejstarší provozovaný reaktor (varný, 641 MW) Oyster Creek ve státě New Jersey běží už téměř 36 let. Průměrný věk amerických jaderných reaktorů překročil 25 let. Čtyřicet ze 104 současných jaderných reaktorů už obdrželo licenci na prodloužení provozu na 40 a více let.
Nový reaktor se má v USA začít stavět nejpozději v roce 2010. Zahájí tak novou etapu rozsáhlé výstavby. Podle odborníků se v USA budou stavět elektrárenské bloky s pokročilými tlakovodními nebo varnými reaktory III. generace.
Americké jaderné elektrárny vyrábějí při instalovaném výkonu blížícím se 100 tisícům MW více než čtvrtinu světové produkce „jaderné elektřiny“. Celkem se v USA vyrobí za rok 3846 miliard kWh elektřiny, tj. 13 tisíc kWh na obyvatele. Pro srovnání: V ČR představuje roční produkce elektřiny něco přes 80 miliard kWh, tzn. 8 tisíc kWh na obyvatele.

Rusko

Na rozvoj jaderné energetiky se připravuje i Rusko. Do roku 2010 chce postavit tři nové jaderné reaktory: v roce 2008 druhý blok ve Volgodonsku, o dva roky později pátý blok v Balakovské (u Saratova) a čtvrtý v Kalininské (nedaleko Tveru) elektrárně. Ve všech případech má jít o tisícimegawattové tlakovodní reaktory. Devět atomových elektráren se nachází v evropské části Ruska, desátá Bělojarská na pomezí Evropy a Asie.
V současné době je v Rusku v provozu 31 jaderných reaktorů, které produkují šestinu elektřiny vyrobené v Rusku. Kromě 15 tisícimegawattových grafitových a 15 tlakovodních (VVER–1000 a VVER–440) je už více než čtvrt století v provozu v uralském Bělojarsku šestisetmegawat-

Produkce elektřiny z jaderných zdrojů ve světě



tový množivý reaktor BN–600 na rychlé neutrony, který spaluje i použité palivo z ostatních reaktorů. Po ukončení provozu 350 MW reaktoru v kazachstánském Aksau (dříve Ševčenko) na kaspickém poloostrově Mangyšlak zůstal jediným reaktorem svého druhu na světě. V roce 2010 bude v Rusku uveden do komerčního provozu ještě výkonnější BN–800.

Asie

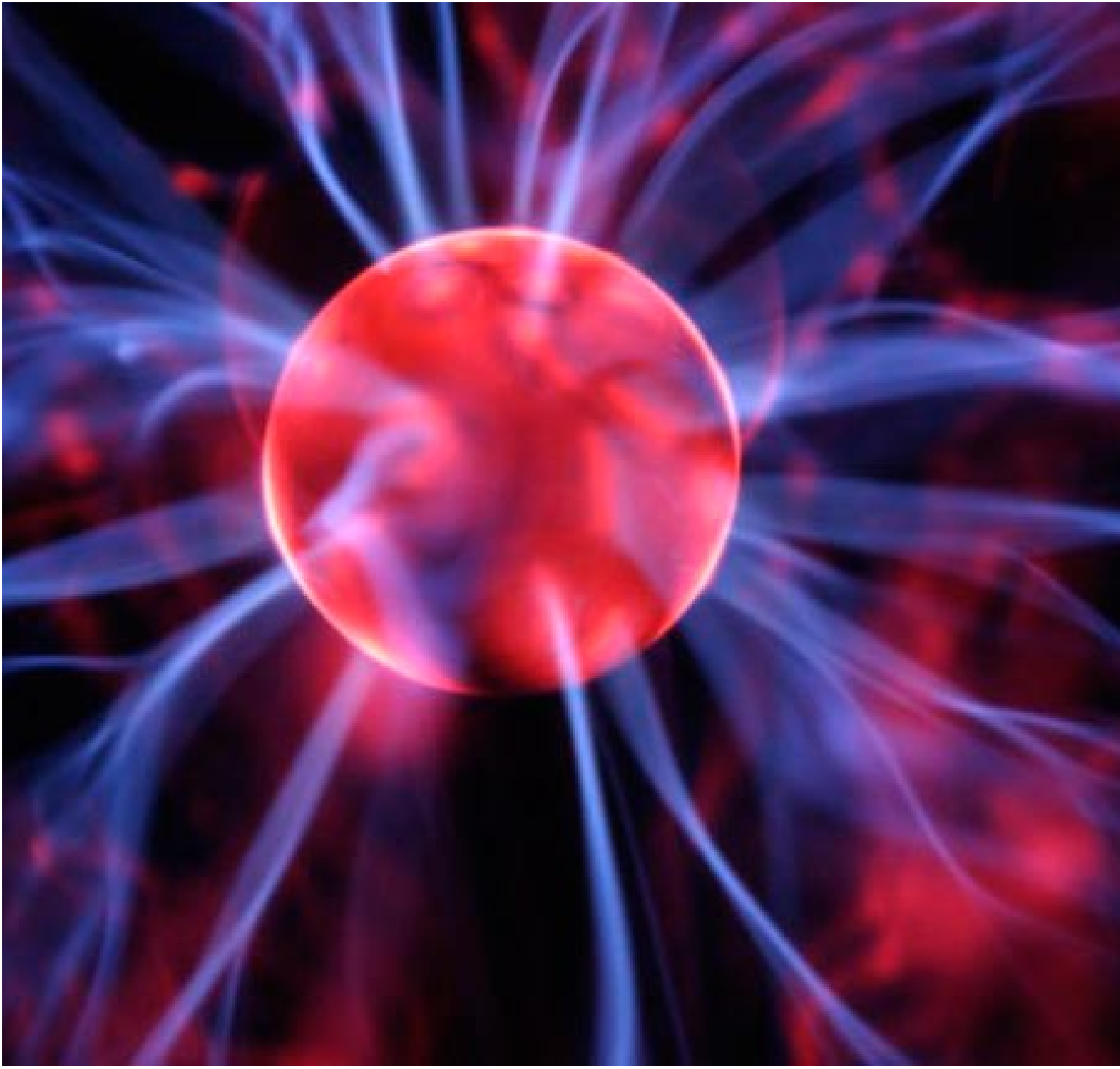
S jadernou technologií jednoznačně počítají i rozvíjející se asijské ekonomiky. Jak uvádí zpráva Světové nukleární asociace WNA, Čína, Indie, Japonsko a Jižní Korea uvedou do konce roku 2010 do provozu 20 jaderných reaktorů s celkovým výkonem 16 125 MW. Roční růst spotřeby energie v těchto zemích se v posledním desetiletí pohybuje od 4,3 % v Číně po 9 % v Jižní Koreji.

Největší plány rozvoje jaderné energetiky má Čína, která v roce 2003 vyráběla z jádra pouze 2,2 % své elektřiny. Nyní chce začít stavět dvě nové jaderné elektrárny v provinciích Kuang-tung a Fu-ťien. Elektrárnu v hodnotě 100 miliard jüanů (296,6 miliardy korun) v regionu Kuang-tung postaví společnost China Guangdong Nuclear Power Holding Co. Při výstavbě elektrárny v provincii Fu-ťien se spojí China National Nuclear Power Corp. (CNNP) s energetikou společností China Huadian Group. Elektrárna by měla mít až šest reaktorů s výkonem 1000 megawatt. Do roku 2020 chtějí Číňané vybudovat 30 reaktorů, dosáhnout celkového instalovaného výkonu v jaderných elektrárnách 36 000 MW a 6% podílu elektřiny na celkové výrobě. O zakázky v rámci tohoto ambiciózního čínského plánu se ucházejí americký Westinghouse s reaktory typu AP–1000, evropská Areva s evropským reaktorem EPR–1600 i ruský Atomstrojexport s VVER–1000 a VVER–1500.

Indie očekává, že se do roku 2020 ztrojnásobí její spotřeba elektrické energie. Polovina elektřiny se dnes vyrábí z uhlí, jehož zásoby jsou omezené. Proto Indie hodlá v roce 2050 vyrábět čtvrtinu své elektřiny v jaderných zdrojích; mělo by to být stokrát více než dnes. K současným 2770 MW instalovaným ve 14 jaderných blocích, které se na indické výrobě elektřiny podílejí necelými třemi procenty, přibude během pouhých tří let dalších osm reaktorů o výkonu 3960 MW. Indie má vlastní zásoby uranu, výrobu těžké vody, malý rychlý množivý reaktor a připravuje výstavbu velkého. Vyvíjí technologie zpracování thoria, jehož zásoby jsou v Indii obrovské, a počítá s urychleným zaváděním rychlých (množivých) reaktorů, které spalují uranové palivo použité v nynějších reaktorech a současně si vyrábějí nové.

Díky své vysoké úrovni v oblasti technologií je v čele světového vývoje mírového využívání jaderných zdrojů Japonsko. Svůj první jaderný reaktor uvedlo do provozu v roce 1966 a od roku 1973 považuje rozvoj jaderné energetiky za národní strategickou prioritu. V roce 1998 byl spuštěn malý prototyp plynem chlazeného reaktoru, který v roce 2005 dosáhl 950 °C, což umožňuje jeho použití pro termochemické procesy včetně výroby vodíku. V roce 2015 se očekává spuštění jaderné elektrárny vyrábějící pomocí tepla z reaktoru 1 000 m^3 vodíku za hodinu.

Jaderná energetika je národní strategickou prioritou i pro Jižní Koreu, která dováží 97 % energií. Podle plánu z roku 2000 má k současným rozestavěným čtyřem jaderným blokům přibýt do roku 2015 dalších osm. V Šin Kori se staví první 1400MW korejský reaktor nové generace s vyšší bezpečnostní úrovní a s životností 60 let; do provozu se má uvést v roce 2011.



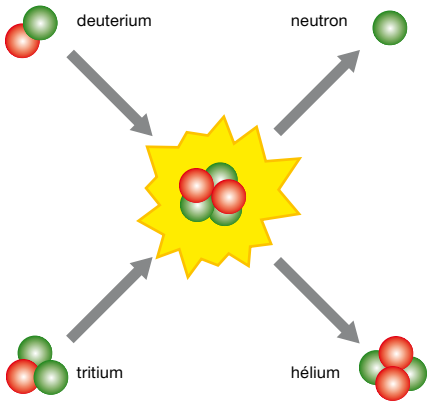
JADERNOU FÚZI JSME „OPSALI“ Z PŘÍRODY

Termonukleární reakce, či jaderná fúze, je proces, při kterém dochází ke sloučení atomových jader a tvorbě těžšího jádra. Během této reakce se uvolňuje velké množství energie. Vědci tvrdí, že pokud by se podařilo zvládnout jadernou fúzi, získali bychom takřka nevyčerpatelný zdroj energie. Podobný, jaký funguje od věků uvnitř žhavé sluneční koule. Očekávání jsou doslova fantastická – účinnost využití paliva při jaderné fúzi je 10 000 000krát větší než u všech chemických reakcí včetně hoření. Zatímco elektrárna o výkonu 1 GW musí ročně spálit 2,5 milionu tun uhlí, nebo použít plochu 20 km^2 solárních panelů či 2000 stometrových sloupů větrných jednotek, v případě fúzní elektrárny by šlo o 500 kg vodíku. Přitom reaktor s termojadernou fúzí neprodukuje takřka žádný radioaktivní odpad a reakce se při jakémkoliv samovolném ochlazení paliva automaticky přirozeně přeruší. Budoucnost termojaderných elektráren se jeví jako velmi slibná i z ekonomického hlediska, a to i při předpokládaných výkonech 2 až 3 GW. Od jaderné fúze se očekává, že kromě bohatého zdroje energie přinese i řešení v boji s globálním oteplováním.

Klimatické změny se podle mnoha odborníků podaří odvrátit, pokud se hlavním zdrojem výroby elektrické energie stanou jaderné elektrárny. Například Robert Aymar, výkonný ředitel švýcarské Evropské organizace pro jaderný výzkum (CERN) a Carlo Rubbia, italský jaderný vědec a nositel Nobelovy ceny z roku 1984, se domnívají, že jen jaderná a solární energie vypadají jako životaschopné řešení pro celosvětově se zvyšující spotřebu energie, které nepřinese zhoršení v podobě klimatických změn. 1,6 miliardy lidí, tedy celá čtvrtina obyvatel Země, nemá dodnes přístup k elektrické energii.
Koordinací termojaderného výzkumu byl v bývalém Československu pověřen již v roce 1959 Ústav vakuové elektroniky Československé akademie věd, dnešní Ústav fyziky plazmatu AV ČR.
Termonukleární reakce probíhá v jádrech hvězd, nebo ve vodíkových bombách, tedy za podmínek, které zatím nejsme schopni trvale udržet umělým způsobem. Proto je průmyslové využití termonukleární reakce dosud nemožné.

Vysokofrekvenční výboj ve zředěném plynu vytváří tzv. studené plazma

Schéma jaderného slučování (fúze)



K PRINCIPU TERMOJADERNÉ FÚZE

Při průmyslovém využití termojaderné fúze dochází ke slučování jader deuteria s jádry tritia (jde o izotopy vodíku). Vzniká jádro helia a odlétá neutron. Proces doprovází uvolnění velkého množství energie. Při sloučení dvou atomů vodíku do atomu helia se sice na energii přemění pouze asi 0,3 % hmotnosti, ale po vynásobení mocninou rychlosti světla 300 000 km/s je energetický zisk podstatně vyšší. Vzniká tak velká energie, že 10 gramů deuteria a 15 gramů tritia vystačí na celoživotní energetickou spotřebu průměrné osoby v průmyslové zemi se vším všudy. Deuterium se nachází v každé sloučenině obsahující vodík, např. v obyčejné vodě. Z jednoho litru vody můžeme vyprodukovat energii ekvivalentní 300 litrům benzinu; energetickou spotřebu České republiky by mohlo deuterium z Máchova jezera krýt po dobu zhruba sta let. Tritium se tvoří přímo v reaktoru reakcí neutronů – produktů termojaderné reakce – s lithiem v tzv. plodivém obalu obklopujícím první stěnu vakuové komory.
Přírodní termojaderná fúze ve Slunci spotřebuje každou vteřinu 600 milionů tun vodíku, což je přibližně stokrát více než hmotnost největších egyptských pyramid, avšak naprosto zanedbatelné množství ve srovnání s jeho zásobami ve Slunci (2×10^{30} kg). Asi půl procenta hmotnosti vodíkového paliva se v souladu s Einsteinovou teorií relativity mění na energii a uniká z povrchu jako elektromagnetické záření. Zanedbatelnou část (10^{-10}) z něj vnímáme na Zemi jako světlo a teplo. Přitom tento „zlomek“ je zdrojem energie veškerého života na Zemi.
Produktem fúzních reakcí je jádro helia, které není radioaktivní. Helium je poměrně vzácný inertní plyn, který se nepodílí na tvorbě skleníkového efektu.
Základním médiem termojaderné reakce je ionizovaný plyn – plazma.

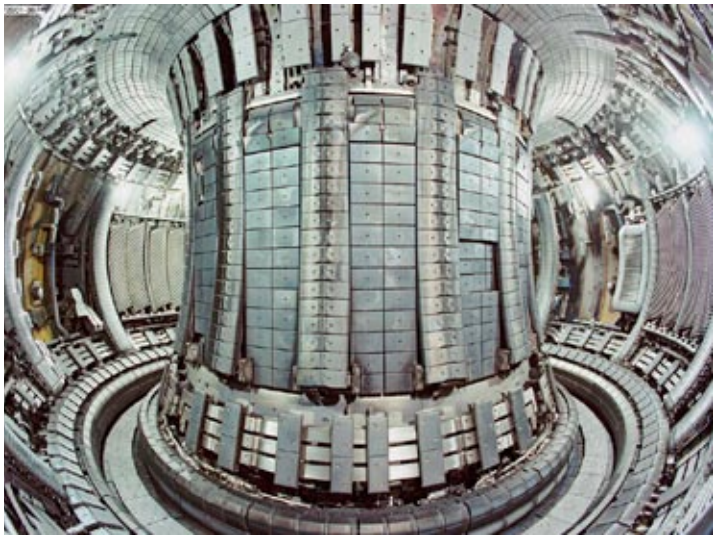
Přírodní zákony „dělají problémy“

V přírodě se jádra za normálních okolností neslučují, brání jim v tom odpudivé síly shodně nabitých nábojů – protonů. Neutrony, které jsou také přítomny v jádře, nemají náboj žádný. Chceme-li, aby se jádra spojila, musíme je k tomu donutit a přiblížit je na vzdálenost 10^{-14} m. Elektrostatickou odpudivou sílu lze překonat tím, že jádra srážíme dostatečnou rychlostí, nebo zahřátím na tzv. zápalnou teplotu. V přírodě tato reakce probíhá pouze v nitru hvězd při teplotě asi 1 000 000 000 °C. Ani při ní však nefúzují všechny částice, ale pouze některé, které náhodou natrefí na jinou částici pohybující se stejnou rychlostí. Chceme-li mít z termojaderné fúze užitek, nestačí jádra zahřát na obrovskou slučovací teplotu, ale je třeba plazma (hmotu o teplotě stovky milionů stupňů) dané hustoty zachovat po určitou dobu. Přesněji řečeno: součin hustoty plazmatu a doby udržení jeho energie musí být větší než daná konstanta. Stejně velkého součinu dosáhneme s malou hustotou a velkou dobou udržení energie. To naznačuje dva způsoby, jak dosáhnout komerčního využití termojaderné reakce. Výsledkem je očekávaná 33% účinnost návratu energie vznikající v termojaderném reaktoru, ať už ve formě záření či rychle se pohybujících jader.
Dosud se výzkum trvající více než 50 let ubíral dvěma cestami. Představitelem první a v současné době úspěšnější je experimentální zařízení TOKAMAK (TOroidálnaja KAmera i MAgnitnyje Katušky – toriodální komora a magnetické cívky), reprezentantem druhé je laserová fúze.

TOKAMAK

Tokamak si můžeme představit jako dutou prstencovou komoru (nafouknutou pneumatiku) naplněnou vodíkovým plynem, která je obklopena magnetickými cívkami a transformátorovým jádrem. K ohřevu plazmatu uvnitř komory se využívá elektromagnetické indukce a mikrovlnného záření. Indukovaný proud zahřívá plazma přibližně na 100 000 000 °C. Magne-

Pohled do nitra největšího světového tokamaku JET
Opravy uvnitř komory tokamaku

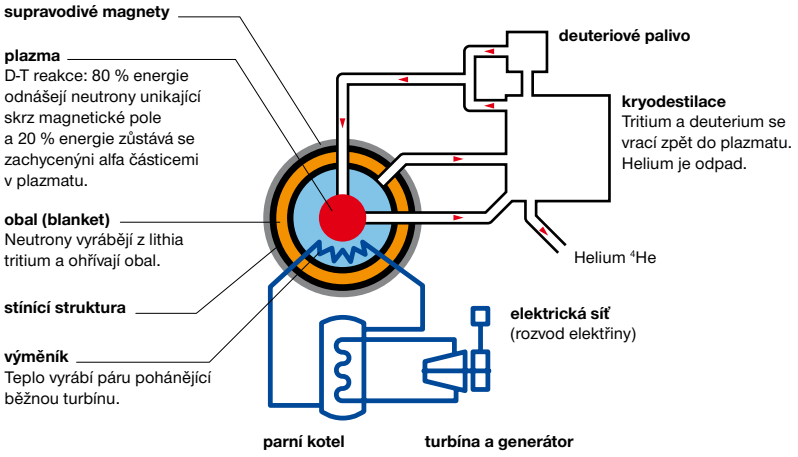


tické pole udržuje plazma o vysoké teplotě ve středu tunelu, takže se nedotýká stěny.
Pokud budeme chtít přírodu napodobit a fúzi nejen vyvolat, ale i řídit, narazíme brzy právě na problém vysoké teploty. Nejde ani tak o její vytvoření, jako o to, aby se v důsledku jejího působení reaktor nevypařil. Řešení vědci

tokamak na první pohled připomíná gigantickou cívku

proto hledají ve výzkumu materiálů pro plášť reaktoru. Ten by měl odolat teplotě jak svými vlastními materiálovými vlastnostmi, tak díky magnetickému poli.
Na světě existuje asi 22 tokamaků. V současné době jsou sdruženy v Koordinační skupině Large Tokamak Facilities (LTF – velká tokamaková zařízení). Zaměřují se na experimenty doplňující databázi projektu ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor – mezinárodní termonukleární experimentální reaktor). Dosavadní největší a nejúspěšnější tokamak na světě JET (Joint European Torus) provozuje Evropská unie (EURATOM) v anglickém Culhamu u Oxfordu. Jeden z prvních tokamaků na světě funguje i v Ústavu fyziky plazmatu AV ČR pod názvem CASTOR (Czechoslovak Academy of Sciences Torus) z roku 1984. Česká republika je tak jedinou z nově přistoupivších zemí

Schéma termojaderné elektrárny



Evropské unie, která má zařízení principiálně shodné s ITER.
Nejvýkonnější západoevropský JET v hodnotě 500 milionů eur byl schopen na krátkou dobu dosáhnout teploty 300 000 000 °C a v roce 1997 vyprodukovat výkon 16 MW. Potřeboval k tomu ale 25 MW. Zadáním pro nový projekt ITER je při spotřebě 50 MW vyprodukovat 250 MW výkonu.

ITER

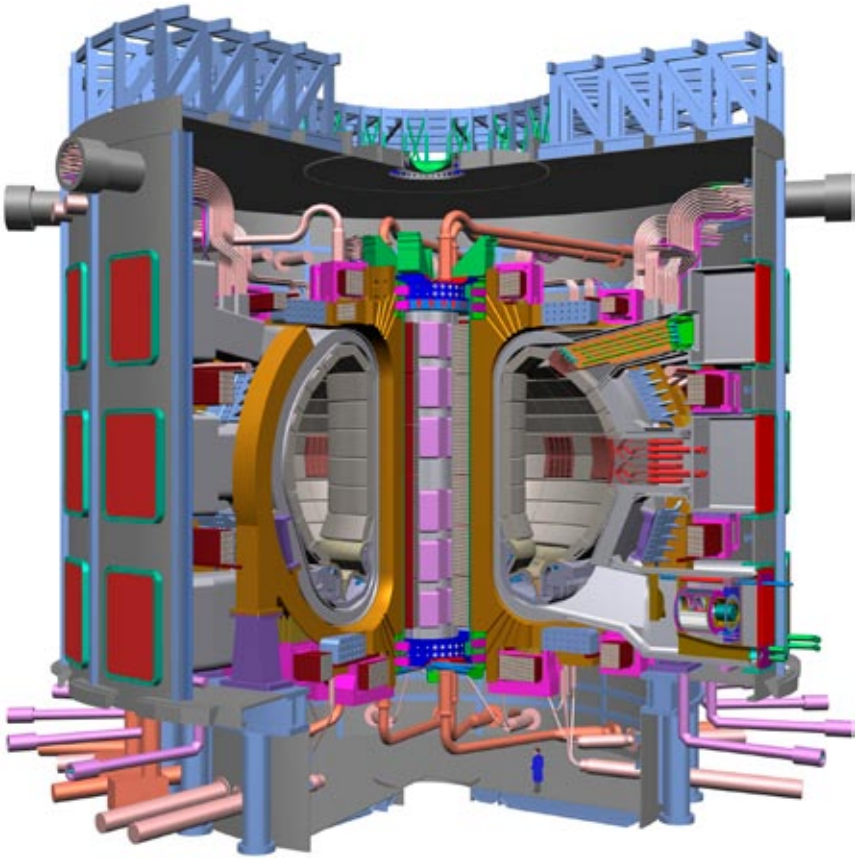
Podle dohody uzavřené zástupci zemí účastnících se projektu ITER (Evropská komise, Japonsko, USA, Rusko, Čína, Indie a Jižní Korea) bude největší tokamak na světě – předstupeň termojaderné elektrárny – uveden do provozu poblíž Marseille nedaleko Střediska jaderného výzkumu v jihofrancouzském Cadarache. Výstavba začne v Cadarache v roce 2007 a potrvá deset let. První fyzikální experimenty mají proběhnout v roce 2014, v roce 2025 mají být zahájeny první technologické experimenty, v roce 2032 má být uveden do provozu demonstrační reaktor. Bude-li úspěšný, nic nebude bránit stavbě první skutečné průmyslové elektrárny s termojaderným pohonem. Průmyslový reaktor by měl být uveden do chodu v roce 2050. Projekt počítá se zařízením s objemem plazmatu 837 m^3, proudem plazmatu 15 MA a výkonem reaktoru 500 MW. U demonstračního tokamaku ITER se nepředpokládá (ale ani nevylučuje) samovolné hoření termojaderné reakce, nicméně má být prvním termojaderným zařízením, kde bude uvolněná termojaderná energie větší než energie spotřebovaná na zapálení a udržování reakce. Bude tedy možné studovat všechny procesy, které budou probíhat v pozdějším skutečném reaktoru. Stěžejní bude testování technologií, které jsou nezbytné pro reaktor termojaderné elektrárny, včetně generace tritia v lithiovém obalu reaktoru. Řada etap inženýrských aktivit zahrnuje zkoušky důležitých komponent reaktoru: vakuové nádoby, supravodivých cívek, dálkově řízeného ovládání výměny divertoru či zdrojů rychlých neutrálních částic a elektromagnetických vln pro dodatečný ohřev plazmatu.
ITER bude po všech stránkách unikátní tokamak – 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 (–269 °C) nabývají totiž slitiny na bázi niobu, tvořící magnetické cívky, supravodivých vlastností. S podobnými teplotními skoky se nesetkali ani kosmonauti ve vesmírném prostoru. Tato technologie by se mohla stát velkým energetickým zdrojem budoucnosti – využívá dostupných paliv, neznečišťuje prostředí, nevyžaduje dopravu jaderného paliva, neprodukuje obtížně skladovatelný jaderný odpad a je mnohem bezpečnější než jaderné reaktory. Termonukleární experimentální reaktor se stane potenciálně nevyčerpatelným, ekologickým a levným energetickým zdrojem. Zbývá dodat, že exploze reaktoru ITER nehrozí. Palivo je do reaktoru dodáváno průběžně. Pokud se

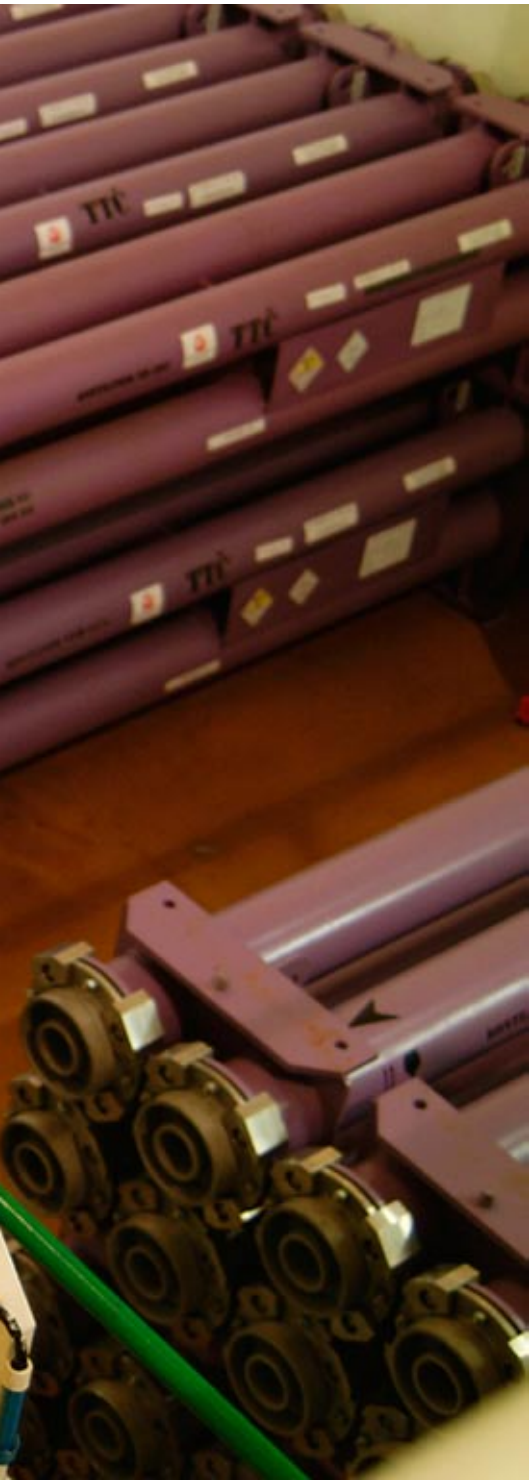
ITER má být druhým nejnákladnějším vědeckotechnickým projektem v historii lidstva

pár setin gramu plazmatu (ionizovaného plynu) při stamiliónech stupňů nutných k reakci nezvládne, plazma se v kontaktu s tunami materiálu stěn tokamaku okamžitě zchladí a jaderná reakce ustane.
První termonukleární reaktor ITER (latinsky znamená toto slovo „cesta“) se má stát druhým nejnákladnějším vědeckotechnickým projektem v historii lidstva, prvenství dosud drží mezinárodní vesmírná stanice ISS. Náklady na výstavbu reaktoru ITER jsou odhadovány asi na 4,57 miliardy eur, provoz po dobu životnosti zařízení, tj. za 20 let, bude stát dalších 5 miliard eur. Náklady si rozdělí mezi sebou signatářské země – EU zaplatí 40 %, k tomu navíc Francie jako hostitelská země zařízení dodá dalších 10 %. Zbývající země přidají každá po 10 %. Budování reaktoru by podle agenturních zpráv mohlo vytvořit až 100 000 pracovních míst.

Schéma projektu Mezinárodního termonukleárního experimentálního reaktoru ITER

Privilegované postavení si v projektu zachovává Japonsko.
Od samého počátku se na ambiciózním projektu podíleli odborníci z Ústavu fyziky plazmatu AV ČR. V letech 1988 až 1994 byly vyvinuty modely pro numerické simulace interakce hybridních vln s elektrony a alfa částicemi, tj. s reaktorovým plazmatem. Dalším příspěvkem je vývoj speciálních Hallových sond pro měření změn magnetického pole v tokamaku. Technologická témata týkající se neutronové zátěže konstrukčních materiálů zpracovávají i Ústav jaderné fyziky AV ČR a Ústav jaderného výzkumu v Řeži. Česká republika je tak do evropského termojaderného programu zapojena studiem fyziky vysokoteplotního plazmatu i výzkumem termojaderné technologie.





MODERNÍ JADERNÉ TECHNOLOGIE A SKUPINA ČEZ

Moderní technologie v oblasti jaderné energetiky nacházejí uplatnění v jaderných elektrárnách od počátků jejich projektování přes instalace až po průběžnou optimalizaci jejich provozu. I když Česká republika zatím neprovozuje termojadernou elektrárnu, koncepce a jednotlivé komponenty jejích „klasických“ jaderek rozhodně nekulhají za světovým standardem. Navíc oba zdroje dbají o neustálou modernizaci, která je vzhledem k technickému pokroku v oblasti jaderných technologií nezbytností.

V případě prudkého růstu jaderné energetiky se v budoucnu nabízí možnost využít i rychlé reaktory. Demonstrační elektrárny s těmito reaktory byly v minulosti úspěšně realizovány např. v Rusku a ve Francii a z iniciativy USA byla nedávno zahájena spolupráce na vývoji IV. generace těchto reaktorů. Jejich předností je fakt, že umožňují využít jak vytěžený a ochuzený uran, tak i nevyužitý uran, nacházející se v použitém jaderném palivu soudobých jaderných elektráren. Za zmínku stojí skutečnost, že již dnes se ve skladech uranu v EU, v USA a Rusku nachází na každou GWh vyrobené energie štěpný materiál pro produkci dalších 100 GWh. Mírové využití jaderné energie se stalo přirozenou součástí energetického mixu řady vyspělých států naší planety. Bez ohledu na to, jaký typ reaktoru bude zvolen, lze předpokládat, že jaderné elektrárny budou mít zásadní vliv na rozvoj ekonomiky i naší země.

Obě české jaderné elektrárny kladou mimořádný důraz na bezpečnost svého provozu. Ke zvyšování bezpečnosti, spolehlivosti a efektivity jejich provozu významně přispívá využívání metod pravděpodobnostního hodnocení rizika a využívání vlastních i vnějších provozních zkušeností. Je zde zaveden systém sledování a vyhodnocování poruch a provozních odchylek. Díky mezinárodní síti WANO se v českých jaderných elektrárnách aplikují zkušenosti ze všech jaderných elektráren světa.

JADERNÁ ELEKTRÁRNA DUKOVANY

Jaderná elektrárna Dukovany je první provozovanou jadernou elektrárnou v České republice a patří mezi největší, vysoce spolehlivé a ekonomicky výhodné energetické zdroje ČEZ, a. s. Roční výroba elektrické energie se pohybuje okolo 13,5 TWh, což představuje asi 20 % z celkové spotřeby elektřiny v České republice. V porovnání s ostatními významnými výrobci vyrábí elektřinu s nejnižšími měrnými náklady. 24. února 2005 uplynulo 20 let od přifázování první turbíny prvního bloku Jaderné elektrárny Dukovany k síti. Během této doby elektrárna se čtyřmi bloky s nominálním výkonem 440 MW vyrobila 240 292 GWh elektřiny, což je více než například celková výroba elektřiny v České republice v letech 2001 až 2003. Pro výrobu této elektřiny nemuselo být vytěženo přibližně 190 mil. tun hnědého uhlí, které jsme tak ušetřili pro budoucnost, a jehož spálením by bylo emitováno do ovzduší zhruba 240 mil. tun CO_2.

Zvyšování spolehlivosti a bezpečnosti

V Jaderné elektrárně Dukovany jsou ve dvou dvojblocích instalovány celkem čtyři tlakovodní reaktory typu VVER 440 – model V 213. Snaha o neustálé zvyšování jejich spolehlivosti a bezpečnosti se projevila již v období let 1988–1993 v rámci tzv. akce Dokompletace, v letech 1994–1996 se rozeběhl rozsáhlý program obnovy zařízení nazývaný Morava. V roce 1997 se začalo pracovat na záměně systémů měření a regulace. K velkým investičním akcím patřila záměna kondenzátorů turbín, resp. náhrada ocelových trubek za titanové, výměna nízkotlakých rotorů turbín, vysokonapěťových a nízkonapěťových rozvaděčů, modernizace dozimetrického systému a mnoho desítek dalších.
Ve dvacátém roce provozu proběhly v EDU dosud nejrozsáhlejší investiční akce na technologickém zařízení – výměna rotorů nízkotlakých dílů turbín a komplexní modernizace systému kontrol a řízení na třetím bloku. Modernizace nízkotlakých dílů turbín zvýšila účinnost turbín o 3,46 %. Dosažitelný výkon se zvýšil o 2 × 8 MW, což představuje ročně vyšší výrobu zhruba o 127 000 MWh.
Modernizace elektrárny bude probíhat do konce její plánované životnosti. Již dnes se ale díky vysoké kvalitě hlavních konstrukčních prvků elektrárny uvažuje o prodloužení životnosti elektrárny o deset let, tj. celkem na čtyřicet let provozu. V závislosti na technickém a ekonomickém vývoji lze uvažovat o prodloužení provozu i nad tuto hranici.

Přednosti technického řešení dukovanské elektrárny

Základním předpokladem bezproblémového provozu jaderného zdroje je bezpečný projekt. Ten v případě Jaderné elektrárny Dukovany představuje koncepce elektrárny s reaktory VVER 440/213. K významným výhodám patří například skutečnost, že tlaková nádoba reaktoru i potrubí primárního okruhu mají velmi malý obsah kobaltu. Dochází tak k nižší aktivaci materiálu a tím k menšímu ozáření personálu.
Významným a pečlivě sledovaným parametrem každé jaderné elektrárny jsou radiační výpusti. Roční úrovně aktivit výpustí, uvolňovaných do ovzduší a vodotečí, představují po celou dobu provozu elektrárny pouze nepatrné zlomky povolených hodnot. Srovnání tohoto ukazatele s jinými jadernými elektrárnami zařazuje Jadernou elektrárnu Dukovany do skupiny nejlepších elektráren na světě.
Podle Světového sdružení provozovatelů jaderných elektráren (WANO) patří Jaderná elektrárna Dukovany mezi pětinu nejlépe provozovaných jaderných elektráren na světě.

Program harmonizace

Aktuální program zvyšování bezpečnosti Jaderné elektrárny Dukovany je obsažen v tzv. Programu harmonizace. Tento program se netýká jen otázek spojených se změnou projektu elektrárny a s výměnou některých zařízení, ale zabývá se dalšími oblastmi, které mohou mít vliv na bezpečnost elektrárny. Ukazuje se, že největší váhu či příspěvek ke zvýšení bez-

pečnosti nemusí mít, jak se všeobecně předpokládá, právě zlepšování zařízení. Zvýšení bezpečnosti lze dosáhnout také zlepšováním kultury bezpečnosti. Cílem Jaderné elektrárny Dukovany je dosáhnout realizací Programu harmonizace v roce 2010 snížení koeficientu pravděpodobnosti poškození aktivní zóny ze současné hodnoty $1{,}7 \times 10^{-5}$ na hodnotu $7{,}7 \times 10^{-6}$ v roce 2010 (tato hodnota znamená, že k události, vedoucí k poškození paliva v aktivní zóně může dojít s pravděpodobností jednou za 130 000 let). Je to hodnota, kterou Mezinárodní agentura pro atomovou energii doporučuje pro nové jaderné elektrárny.

Lepší využití paliva

Palivem je v Jaderné elektrárně Dukovany oxid uraničitý UO_2. Palivo je v reaktoru umístěno v 312 palivových článcích. Každý článek je tvořen 126 palivovými proutky, ve kterých je palivo hermeticky uzavřeno. Mimo to je v reaktoru 37 regulačních kazet s palivovou částí.

Původní projektová palivová vsázka předpokládala využití jaderného paliva v takzvaném tříletém cyklu, to znamená, že každá palivová kazeta pracuje v reaktoru po dobu tří let a poté je vyvezena do bazénu použitého paliva a nahrazena kazetou čerstvou. Každý rok byla tedy v reaktoru vyměněna přibližně jedna třetina palivových kazet. Základním schématem překládky paliva bylo umístění čerstvých kazet na okraj aktivní zóny; po jednotlivých letech se při výměnách kazety přesouvaly směrem ke středu aktivní zóny. Z ekonomického hlediska (efektivní využití paliva) nebylo toto schéma ideální. Navíc čerstvé kazety mají v aktivní zóně vyšší výkon a jejich umístění na okraj zóny tak nebylo „to pravé“ ani z hlediska radiační zátěže na nádobu reaktoru. Zlepšené parametry paliva umožnily přejít v roce 1997 z tříletého na čtyřletý palivový cyklus a od roku 2003 se postupně najíždí na cyklus pětiletý.

Tato změna představuje nejen úspory z hlediska prostor pro skladování paliva, ale i významné úspory ekonomické. Jen do konce roku 2004 dosáhly několika miliard korun. Oproti projektovému stavu z roku 1985 se na jednom bloku sníží roční množství paliva, které je třeba uskladnit, ze 14 na 8,7 tuny.

Plný přechod čtyř dukovanských bloků na pětiletý cyklus výměny bude dokončen v roce 2008.

V rámci výměny paliva na 3. dukovanském bloku v roce 2005 byl poprvé použit zcela nový typ pokročilého paliva s označením Gd–2 s vyhořívajícím absorbátorem. Nové palivo dodává ruská společnost TVEL. Při zachování „výkonnosti“ kazety má sníženo střední oboha-

cení izotopem uranu 235 ze 4,38 % na 4,25 %. Tento zdánlivě nepatrný rozdíl v konečném důsledku představuje významné snížení ceny paliva, která tvoří asi čtvrtinu výrobních nákladů jaderných elektráren. V této souvislosti proběhl úspěšně proces licencování a následná instalace nového softwaru a hardwaru pro kontroly při spouštění bloku.

JADERNÁ ELEKTRÁRNA TEMELÍN

Jaderná elektrárna Temelín vyrábí elektřinu ve dvou výrobních blocích s tlakovodními reaktory VVER 1000 typu V 320. Od jara 2003 je temelínská elektrárna s instalovaným elektrickým výkonem 2000 MW největším energetickým zdrojem České republiky. Technologie elektrárny odpovídá moderním světovým parametrům. Od konstrukce kontejnmentu až po optimalizaci využití paliva.

Bezpečná ochranná obálka – kontejnment

Nejdůležitější části jaderné elektrárny (celý primární okruh bloku s jaderným reaktorem, čtyřmi parogenerátory, cirkulačními čerpadly atd.) je umístěn v železobetonovém kontejnmentu. Ten je jednou z bezpečnostních bariér jaderné elektrárny, a to jak ve vztahu k životnímu prostředí, tak ve vztahu k technologickým zařízením. Tvoří hranici hermetické zóny.
Mohutnou konstrukci kontejnmentu představuje stavba vysoká 56 metrů. Skládá se z válce a kulového vrchlíku. Stěny válce jsou silné 1,2 metru, konstrukce kopule je pouze o deset centimetrů slabší. Vnitřní průměr kontejnmentu je 45 metrů.
Ochranná funkce kontejnmentu je zajištěna několika, převážně pasivně působícími prvky:

- vnitřní povrch kontejnmentu je pokryt 8 mm silnou vrstvou uhlíkové oceli, která hermeticky uzavírá vnitřní prostor a tak brání úniku radionuklidů do okolí (celková netěsnost ochranné obálky na této obrovské ploše je otvor o velikosti maximálně dvou špendlíkových hlaviček),
- kontejnment je projektován na maximální přetlak 0,49 MPa při maximálně 150 °C,
- trvalé udržování mírného podtlaku uvnitř kontejnmentu během provozu zaručuje přisávání vzduchu přes případné drobné netěsnosti; nedochází tedy k nekontrolovatelnému úniku vzduchu mimo kontejnment,
- konstrukce kontejnmentu je provedena z předpjatého betonu; předepnutí vytvářejí ocelová předepínací lana, která procházejí celou konstrukcí kontejnmentu.

Kontejnment kromě toho zajišťuje ochranu zařízení proti vnějším vlivům, jako je pád letadla, tlaková vlna výbuchu, vichřice, extrémní teploty, extrémní srážky apod.
Díky kontejnmentu tak může probíhat i bezpečná výměna paliva, protože bazén pro použité palivo je umístěn hned vedle reaktoru. Přístup personálu a doprava materiálu do hermetického prostoru ochranné obálky jsou umožněny přes speciální vstupy, které jsou během provozu hermeticky uzavřeny.

Aktivní zóna

Aktivní zóna je prostor uvnitř reaktoru, ve kterém je umístěno palivo. Válec o výšce 3530 mm a průměru 3160 mm tvoří celkem 163 palivových souborů a 61 regulačních tyčí (klastrů). Palivové soubory jsou uspořádány v hexagonální mříži. Pohled seshora do reaktoru je tedy podobný pohledu na včelí plástev. Každý palivový soubor sestává z 312 palivových proutků, což jsou v podstatě kovové trubičky, ve kterých jsou uloženy palivové tabletky (pelety).

Reaktor

Reaktor je vlastně obrovská silnostěnná nádoba a je nejdůležitější částí jaderné elektrárny. Jsou v něm umístěny tzv. vnitroreaktorové části včetně aktivní zóny. Celková výška reaktoru je 19 m, vnější průměr asi 4,5 m. Tloušťka stěny válcové části je 193 mm. Celý reaktor váží 800 tun a jeho provozní teplota je až 320 stupňů Celsia. Byl vyroben firmou

ŠKODA JS Plzeň speciální technologií s cílem zajistit požadovanou radiační odolnost materiálu tlakové nádoby. Pro sledování stavu tlakové nádoby během celé životnosti jsou v reaktoru umístěny tzv. svědečné vzorky materiálu, které se pravidelně měří a hodnotí.

Turbína

V sekundárním okruhu bloku je turbogenerátor o elektrickém výkonu 1000 MW. Jde o obrovský stroj, dlouhý 57 metrů, kterým proteče za hodinu téměř 5700 tun páry. Turbína pracuje při 3000 otáčkách za minutu, konce nejdelších lopatek turbíny se otáčejí vyšší, než dvojnásobnou rychlostí zvuku.

Bezpečnost

Nejvyšší prioritou nadřazenou komerčním cílům společnosti je zajištění bezpečnosti při provozu elektrárny. K výkonným bezpečnostním systémům v Jaderné elektrárně Temelín např. patří:

- Pasivní systém bezpečnostního chlazení aktivní zóny reaktoru. Tento systém je tvořen čtyřmi hydroakumulátory a slouží k rychlému zaplavení aktivní zóny při nouzových situacích, které jsou spojeny s náhlým poklesem tlaku v primárním okruhu.
- Dále jsou to čtyři aktivní systémy s takzvaným dvěstěprocentním zálohováním. To znamená, že je jich k dispozici třikrát tolik, než stačí pro zvládnutí případné havárie.
- Nízkotlaký systém slouží k bezpečnostnímu dochlazování aktivní zóny a k dlouhodobému odvodu zbytkového tepelného výkonu reaktoru.
- Vysokotlaký doplňovací systém pomáhá odstavit reaktor pokud praskne velké parní potrubí přivádějící páru k turbíně.
- Vysokotlaký systém chlazení aktivní zóny slouží k chlazení reaktoru v případě malých a středních netěsností primárního okruhu.
- Sprchový systém ochranné obálky zajišťuje snížení tlaku v kontejnmentu v případě kdy praskne potrubí a uniká pára v okolí reaktoru.

Zahájení činnosti uvedených bezpečnostních systémů samozřejmě předchází odstavení reaktoru pomocí regulačních a havarijních tyčí. Jejich pád do aktivní zóny způsobí přerušení štěpné reakce již za necelé tři vteřiny.
Funkčnost bezpečnostních systémů musí být zachována při všech projektem předpokládaných událostech (normální a abnormální provoz, poruchy, výpadky zařízení a nehody na jaderné elektrárně včetně maximální projektové nehody, zemětřesení, požárů, vichřic, zátop a událostí vyvolaných lidskou činností, kterými jsou exploze, diverzní akce apod.).
S cílem zvýšit spolehlivost a bezpečnost na úroveň západních elektráren došlo již po roce 1990

Informační centrum Jaderné elektrárny Temelín

v projektu elektrárny k řadě úprav. Od roku 1991 byla elektrárna podrobena několika desítkám prověrek inspektorů Mezinárodní agentury pro atomovou energii; jejich doporučení ke zlepšení spolehlivosti a bezpečnosti elektrárny byla v průběhu výstavby, spouštění a provozu postupně realizována.
Důležitou součástí zajištění bezpečného provozu je vysoká profesionální úroveň personálu. Pro jejich přípravu byl v areálu Jaderné elektrárny Temelín vybudován plnorozsahový simulátor. Jde vlastně o kopii blokové dozorny, z které normálně operativní personál řídí skutečný blok. Na simulátoru ale řídí vše instruktor s pomocí počítače. Lze tak cvičit provozní, ale i případné havarijní stavy.

Rozvoj elektrárny

Významné úspory se očekávají od akce s názvem Transfer technologie firmy Westinghouse, v jejímž rámci dochází k předávání know-how v oblasti projektování změn systému kontroly a řízení. Na další rozvoj jsou zaměřeny i významné investice. Mezi dokončené patří zejména:

- modernizace laboratoře radiační kontroly okolí elektrárny
- analýza vlivu tlakově-teplotních změn na nádoby reaktorů (tzv. Program řízeného stárnutí)
- změna ovládání nízkotlaké kompresorové stanice umožňující automatický dálkový provoz
- modernizace požárního zabezpečovacího zařízení

Provozu Jaderné elektrárny Temelín se nevyhnuly ani některé technické problémy. Na 2. bloku musela být během odstávky pro výměnu paliva provedena úprava rotoru vysokotlakého dílu turbogenerátoru, kterou vyvolala nutnost omezit tepelné a mechanické namáhání lopatek oběžných kol.
V Temelíně byla realizována i celá řada dalších investičních akcí, jejichž cílem bylo zvyšovat úroveň jaderné bezpečnosti a spolehlivost výroby elektřiny.

- Proběhla rozsáhlá výměna potrubí rozvodu technické chladicí vody – místo původní uhlíkaté oceli byl použit nerezový materiál s prakticky neomezenou životností.
- Úprava závěsných tyčí přinesla zlepšení hydraulických poměrů při pohybu klastrů v reaktoru.
- Na komponentech primárního okruhu bylo po zkušenostech v Jaderné elektrárně Dukovany použito tzv. hřebínkové těsnění místo původního niklového; toto opatření zvýšilo spolehlivost těsnění dělicích rovin a snížilo namáhání těsnicích uzlů i riziko deformace těsnění.
- Zvýšení rychlosti zavážecího stroje pro výměnu paliva ve vertikálním směru umožňuje zkrátit odstávky. Díky úpravám v algoritmech stroje může být pravidelná roční výměna použitého paliva o 15 hodin rychlejší.

Tak jako mnohým jaderným elektrárnám ve světě se ani Temelínu nevyhnuly problémy s palivem. K některým úpravám paliva dochází v současné době. Jde o vývoj palivových souborů odolnějších proti průhybu a proti účinkům vibrací. První odolnější palivové soubory jsou již umístěny v obou reaktorech. Zásadní změna v tomto bodě nastane v roce 2009 se změnou dodavatele paliva.
U turbín byly v minulosti problémy s vibracemi lopatek vysokotlakých rotorů. Na obou blocích Temelína již došlo v tzv. malé rekonstrukci. Velká rekonstrukce – celková výměna vysokotlakých rotorů – povede k trvalému odstranění problémů vibrací lopatek a zároveň ke zvýšení dosažitelného výkonu turbín.
Z hlediska rozvoje elektrárny je důležitý i tzv. Program řízeného stárnutí, jehož úkolem je sledovat stav reaktorové nádoby. Jaderná elektrárna může být provozována bez problémů 60 let. Je ale nutné znát přesně stav a chování materiálů té nejdůležitější nádoby na elektrárně, a to nádoby reaktorové.
Rozvoj jaderné elektrárny se odvíjí od potřeb zařízení, legislativy i od zkušeností na jiných elektrárnách. Na jaderné elektrárně rozvoj prakticky nekončí nikdy. Obecně platí, že jaderná energetika je běh na dlouhou trať. Nikdy se nesmí zastavit!

● vodní elektrárny ■ uhelné elektrárny ▲ jaderné elektrárny ▼ větrné elektrárny

ČEZ, a. s., Duhová 2/1444, 140 53 Praha 4
tel.: 211 041 111 | fax: 211 042 001 | e-mail: cez@cez.cz | www.cez.cz