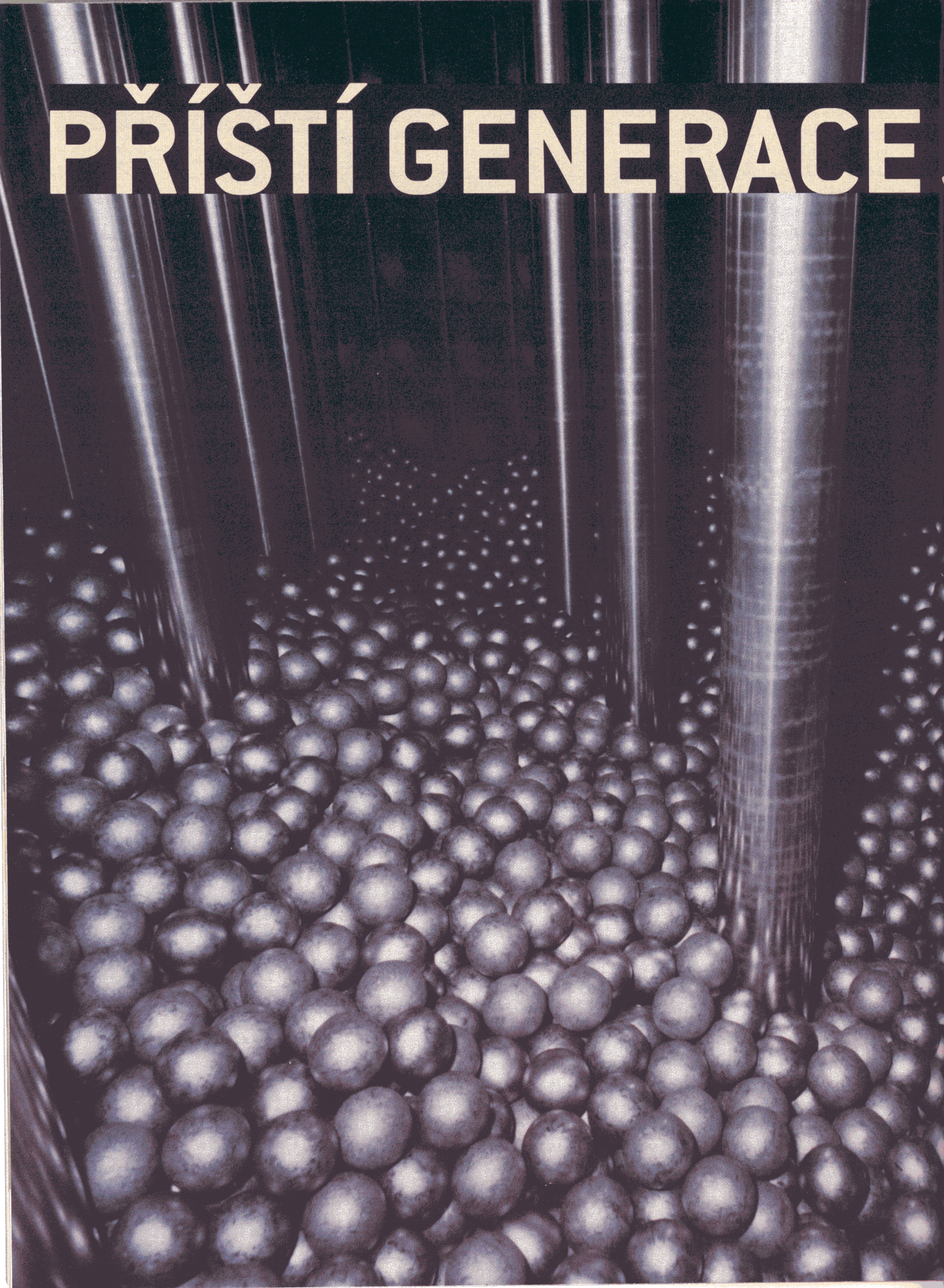


PŘÍŠTÍ GENERACE



JADERNÉ ENERGIE

James A. Lake, Ralph G. Bennett a John F. Kotek

Nové, bezpečnější a úspornější jaderné reaktory by zabezpečily energetické potřeby lidstva na mnoho let dopředu, a navíc by pomohly vyřešit problém globálního oteplování

R

ostoucí ceny elektřiny a výpadky proudu v minulém létě v Kalifornii oživily diskusi o jaderné energii a její klíčové roli pro zachování světla v Americe. Současných 103 atomových elektráren pokrývá pětinu celkové ná-

rodní spotřeby elektřiny. A i když ve veřejnosti stále přetrvávají zbytky nedůvěry, kterou zasely Three Miles Island a Černobyl, průmysl se z těchto lekci poučil a během posledního desetiletí vypracoval solidní bezpečnostní systémy. Mezitím účinnost a spolehlivost jaderných elektráren dosáhla skutečně nevídaných mezí. V současnosti se jedná o nutnosti snížit emise skleníkových plynů, aby se zabránilo možnému vlivu na globální oteplování, a v souvislosti s tím si stále více lidí uvědomuje, že jaderné reaktory produkují elektřinu, aniž by vypouštěly do ovzduší oxid uhličitý nebo znečišťující látky jako třeba oxidy dusíku nebo smogotvorné sloučeniny síry. Má se za to, že světová spotřeba energie vzroste do roku 2030 o padesát procent a kolem do roku 2050 již bude přibližně dvojnásobná. Proto se zdá zcela oprávněné znovu se zamyslet nad budoucností jaderné energie (viz „ARGUMENTY PRO JADERNOU ENERGIÍ“ na straně 74).

Od roku 1978 nebyla v USA objednána stavba žádné nové jaderné elektrárny, a po roce 1995 nebyla žádná atomová elektrárna ani dokončena. Chceme-li na stavbu jaderných elektráren ve velkém měřítku navázat, musíme své přání podložit důkazem ekonomického přínosu takových zařízení, zlepšenou bezpečností provozu a účinným využitím managementu a zdrojů. Zároveň se musíme věnovat i otázce nešíření jaderných zbraní. Všechny výše uvedené body závisí na návrhu jaderného reaktoru, který si vybereme.

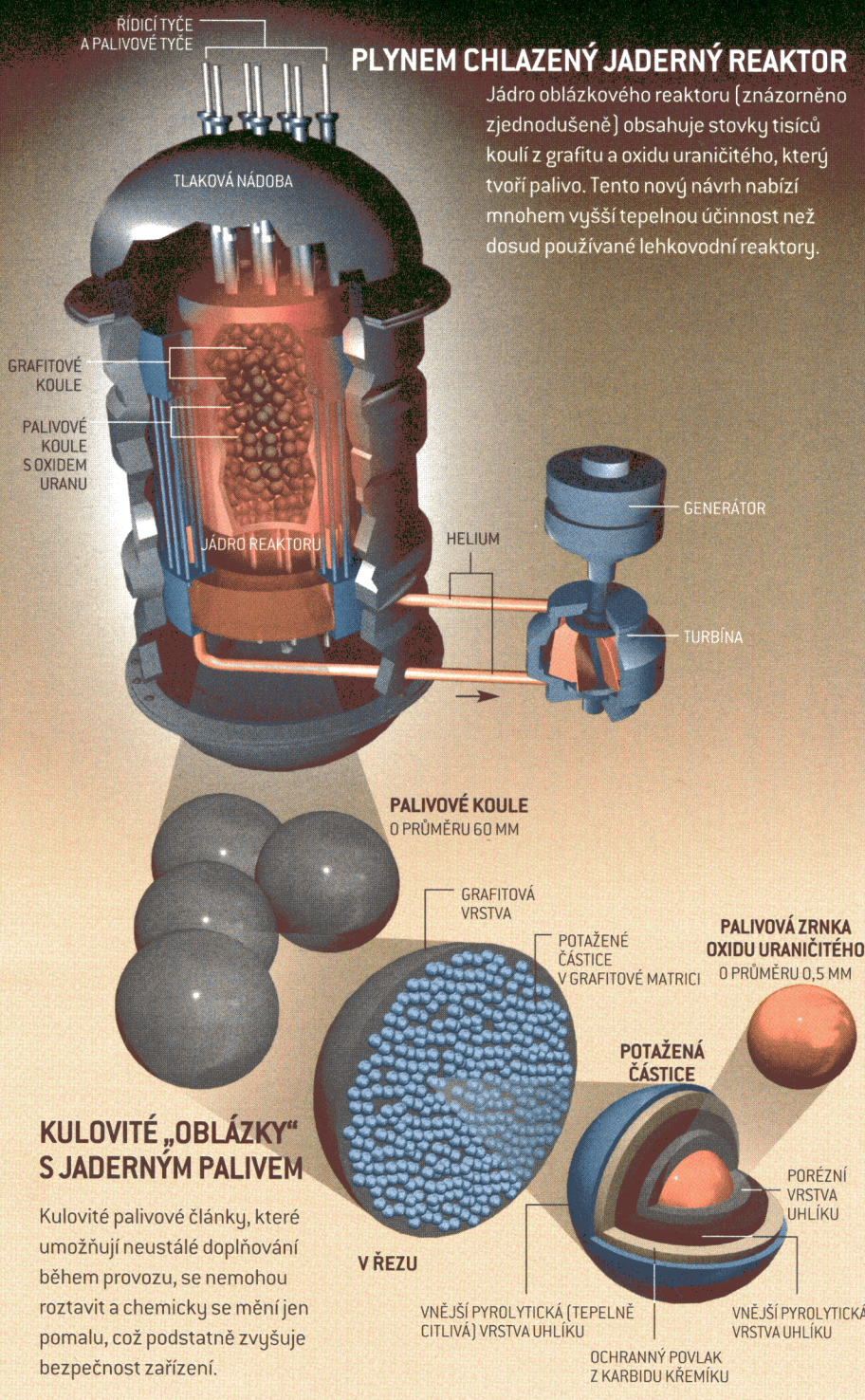
Návrháři nových jaderných systémů ve své snaze o úspěch přejímají nové postupy. V první řadě se snaží obsáhnout celý cyklus jaderného paliva, od dobývání rudy přes zpracování odpadů až po vývoj infrastruktury potřebné pro jednotlivé kroky. Dále je důležité, že projektanti hodnotí jednotlivé systémy z hlediska jejich udržitelnosti – tak, aby vyhovely současným potřebám, aniž by ohrozily prosperitu budoucích generací. Tento přístup pomáhá osvětlit vztah mezi dodávkami energie a potřebami prostředí a společnosti. Důraz na udržitelnost systémů může vést k vedlejším produktům jaderné energetiky – například vodíku jako pohonné hmoty pro přepravu. Díky němu se také zvyšuje úsilí o nalezení alternativního typu reaktoru, který by méně zatěžoval své okolí odpady a zároveň by dokázal lépe využít energii obsaženou v uranu.

„OBLÁZKOVÝ REAKTOR:“ Moduly z potaženého uranového paliva a grafitu o velikosti kulečnickové koule tvoří spolu s řídicími tyčemi jádro pokusného reaktoru chlazeného plynem v Německu.

ŘÍDÍCÍ TYČE
A PALIVOVÉ TYČE

PLYNEM CHLAZENÝ JADERNÝ REAKTOR

Jádro oblázkového reaktoru (znázorněno zjednodušeně) obsahuje stovky tisíců koulí z grafitu a oxidu uraničitého, který tvoří palivo. Tento nový návrh nabízí mnohem vyšší tepelnou účinnost než dosud používané lehkovodní reaktory.



KULOVITÉ „OBLÁZKY“ S JADERNÝM PALIVEM

Kulovité palivové články, které umožňují neustálé doplňování během provozu, se nemohou roztavit a chemicky se mění jen pomalu, což podstatně zvyšuje bezpečnost zařízení.

Věříme, že rozsáhlé využití jaderně-energetických technologií přinese podstatné výhody oproti jiným zdrojům energie. Je však třeba, aby se jaderná energetika na svou cestu do budoucnosti řádně připravila.

Jaderné systémy budoucnosti

V ODPOVĚĎ na obtíže s udržitelností jaderných systémů, dostatečně vyso-

kou úrovní bezpečnosti a konkurenční ekonomickou základnou pro jadernou energii dalo v roce 1999 ministerstvo energetiky USA podnět k zahájení programu Generace IV. Generace IV se vztahuje na rozsáhlou skupinu návrhů jaderných zařízení, která spadají do čtyř kategorií: rané prototypy reaktorů (Generace I), velké jaderné elektrárny dneška (Generace II), pokročilé reaktory s lehkou vodou a další systémy s neod-

myslitelnými bezpečnostními prvky, které byly navrženy v nedávné minulosti (Generace III), a systémy příští generace, které budou navrženy a postaveny v příštích dvaceti letech (Generace IV) (viz rámeček na protější stránce). V roce 2000 vedl zájem o projekt Generace IV ke vzniku sdružení devíti zemí, zahrnující Argentinu, Brazílii, Kanadu, Francii, Japonsko, Jižní Afriku, Jižní Koreu, Velkou Británii a USA. Zúčastněné státy mapují situaci a spolupracují při výzkumu a vývoji nových systémů pro jadernou energetiku.

Ačkoli se program Generace IV zabývá celou řadou systémů, několik příkladů nám poslouží k ilustraci širokého přístupu návrhářů při jejich snaze nalézt nejlepší řešení. Základem systémů příští generace jsou tři obecné třídy reaktorů: chlazené plynem, chlazené vodou a rychlé reaktory.

Reaktory chlazené plynem

JADERNÉ REAKTORY, které používají k chlazení jádra plyn (obvykle helium nebo oxid uhličitý) byly postaveny a úspěšně pracovaly, ale dodnes našly jen omezené využití. Požadavkům Generace IV se blíží zajímavý model, zvaný „oblázkový“ modulární reaktor. Na tomto systému pracují týmy inženýrů v Číně, Jižní Africe a Spojených státech, přičemž Jižní Afrika plánuje postavit prototyp ve skutečné velikosti a zahájit jeho provoz v roce 2006.

Návrh je založen na základním prvku paliva, zvaném *oblázek*, což je grafitová koule velká jako kulečnicková, která obsahuje asi 15 000 částic oxidu uranu o velikosti makového zrnka (viz obrázek vlevo). Každá z rovnoměrně rozptýlených částic má na sobě několik hustých povlaků. Jedna z vrstev, složená z odolné křemíko-uhlíkové keramiky, slouží jako tlaková nádoba, která zadrží produkty jaderného štěpení při činnosti reaktoru nebo při náhodných výkyvech teploty. Zhruba 330 000 těchto kulových palivových oblázků je umístěno v kovové nádobě, stíněné mohutnými grafitovými bloky. Do jádra se navíc přidává 100 000 grafitových oblázků bez palivové náplně, aby bylo možné regulovat jeho výkon a rozložení teploty.

SLABIKÁŘ JADERNÉ ENERGETIKY

VĚTŠINA SVĚTOVÝCH jaderných elektráren používá reaktory se stlačenou vodou. V těchto systémech je voda udržována při vysokém tlaku 155 atmosfér, tedy 15,7 MPa, aby se předešlo jejímu varu jak na místě chladiva tak jako pracovní tekutiny. Vysokotlaký lehkovodní reaktor byl původně vyvinut ve Spojených státech na základě zkušeností z Amerického námořního programu reaktorů a v komerční podobě byl poprvé spuštěn v roce 1957.

Jádro vysokotlakého vodního reaktoru je tvořeno polem palivových tyčí ze slitiny zirkonia s ochranným povlakem; tyto tyče se skládají z malých válečků s lehce obohaceným oxidem uranu o průměru malé mince. Typické čtvercové pole 17×17 palivových tyčí tvoří palivový agregát a zhruba 200 takových agregátů tvoří jádro reaktoru. Jádra, která mají obvykle průměr asi 3,5 metru a jsou 3,5 m vysoká, jsou uzavřena v ocelových tlakových nádobách o tloušťce stěny 15-20 centimetrů.

Při jaderných reakcích vzniká teplo, které odvádí obíhající voda. Chladivo je čerpáno do jádra při teplotě okolo 290°C a opouští jádro při 325°C . K řízení intenzity celkové reakce, a tím i produkce elektřiny, se do jádra zasouvají řídicí tyče. Ty jsou zhotoveny z materiálů, které zpomalují štěpné reakce tím, že absorbují pomalé (tepelné) neutrony uvolněné během štěpení. Jejich vytahováním z jádra nebo naopak zasouváním do jádra se ovládá rychlost jaderné reakce. Je-li třeba vyměnit palivo nebo pokud dojde k nehodě, jsou palivové tyče zcela zasunuty do jádra, aby se reakce zastavila.

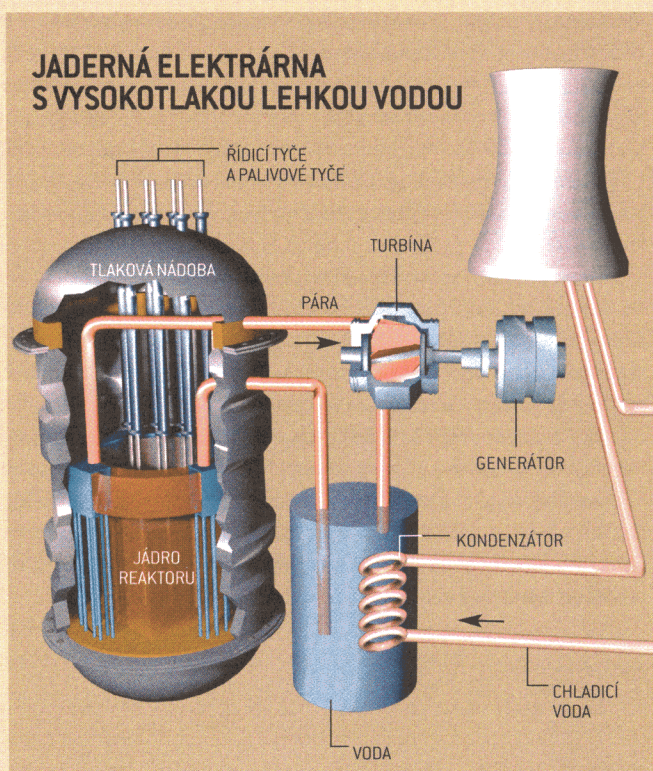
V primárním chladicím okruhu reaktoru opouští horká voda jádro a proudí do výměníku tepla (zvaného parní generátor), kde své teplo předává sekundárnímu parnímu okruhu, který pracuje při nižším tlaku. Pára vytvořená ve výměníku tepla je potom vedena parní turbínou, která otáčí generátorem, a tak vytváří elektřinu (obvykle 900 až 1100 megawattů). Pára poté kondenzuje, čerpá se zpět do výměníku tepla a celý děj se opakuje. Když odhlédneme od zdroje tepla, jsou jaderné elektrárny obecně podobné elektrárnám tepelným.

Existuje několik variant reaktorů s chlazením lehkou vodou. Největší význam mají reaktory s vroucí vodou, které pracují při

nižším tlaku (obvykle 70 atmosfér, tedy 7 MPa) a vytvářejí páru přímo v jádru reaktoru; tím se ušetří výměník tepla. V několika málo elektrárnách se jako chladicí tekutina reaktoru používá těžká voda (obsahující deuterium, tedy vodík s jedním neutronem navíc), plynný oxid uhličitý nebo kapalný kov, například sodík.

Tlaková nádoba reaktoru je obvykle umístěna v betonové budově, která funguje jako radiační štít. Celá tato budova je pak uzavřena v železobetonovém plášti, který má v případě nehody zabránit úniku radioaktivních plynů či kapalin.

—J.A.L., R.G.B. and J.F.K.



Abby mohl systém obložek pracovat při teplotách nad 300°C , které jsou u návrhů s chlazením lehkou vodou (Generace II) běžné, používají se pro stavbu jádra tepelně odolné a nehořlavé materiály. Pracovní tok helia, který vychází z jádra při teplotě 900°C , je veden přímo do soustavy parní turbíny a generátoru, kde se při poměrně vysoké 40procentní účinnosti převádí jeho energie na elektřinu. Tato účinnost je

o čtvrtinu lepší než u běžných reaktorů s vodním chlazením.

Poměrně malé rozměry a obecná jednoduchost obložkových reaktorů přispívá k jejich ekonomické dostupnosti. Každá jednotka, zajišťující elektrický výkon 120 megawattů, zaujímá ve srovnání s dnešními elektrárnami desetkrát menší plochu. To umožňuje vývoj flexibilnějších modelů malých rozměrů, které mohou přinést ještě lep-

ší hospodářské výsledky. Například modulární systémy lze vyrábět v továrně a potom je dopravovat na staveniště.

Oblázkový systém je v porovnání se současnými návrhy až neuvěřitelně jednoduchý: na rozdíl od současných lehkovodních reaktorů s dvěma sty velkými subsystemy tato zařízení vystačí s pouhými pětadvaceti. Je také důležité, že je lze provozovat i v rozsa-

ARGUMENTY PRO JADERNOU ENERGIÍ

DNEŠNÍCH 438 JADERNÝCH ELEKTRÁREN vytváří zhruba 16 % světové elektřiny. Ve Spojených státech se 103 jaderných elektráren podílí 20 % na celkové produkci elektrické energie země. Ačkoli nebyla v USA objednána žádná nová jaderná elektrárna už více než dvě desítky let, elektrický výkon amerických generátorů vzrostl díky zlepšujícím se parametrům o více než 8 %. Jen v posledních deseti letech americké jaderné elektrárny dodaly do sítě více než 23 000 MW, ačkoli nebyla postavena ani jedna nová atomová elektrárna. Mezitím vzrůst produkce snížil cenu za jednotku takto vyrobené energie. Díky tomu vzrostl i zájem obchodní sféry o prodloužení licencí stávajících elektráren, případně o stavbu nových jaderných zařízení.

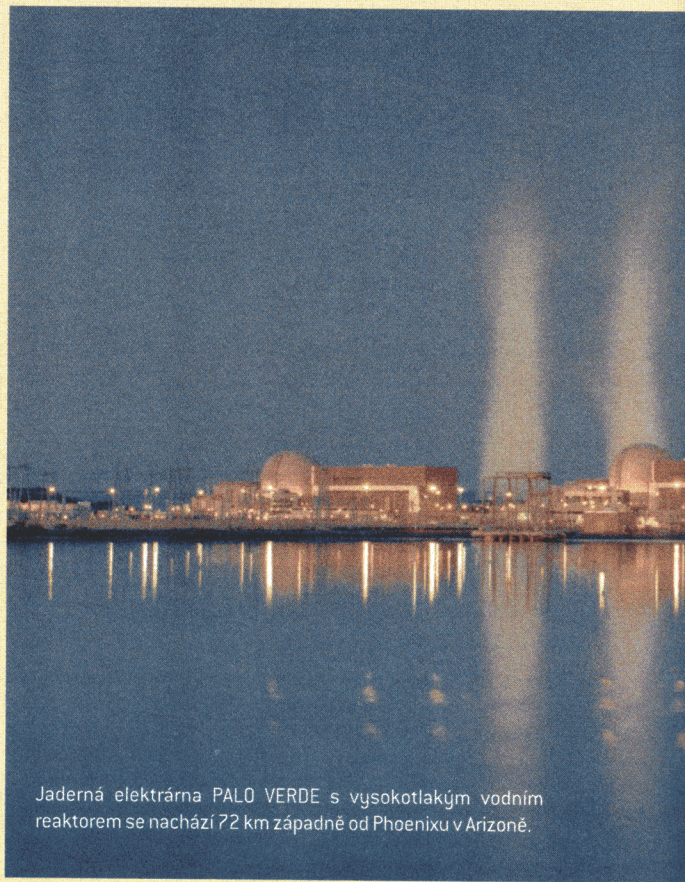
Leckoho může překvapit, že jaderná energetika má přímý pozitivní vliv na životní prostředí, především na kvalitu vzduchu. Ačkoli diskuse o možném narušení zemského klimatu emisemi oxidu uhličitého a dalších skleníkových plynů pokračují, nikdo nepochybuje o vážných zdravotních důsledcích znečišťování ovzduší plyny, které vznikají při spalování fosilních paliv. Narozdíl od elektráren využívajících fosilní paliva nevypouštějí jaderné elektrárny do ovzduší žádný oxid uhličitý ani oxidy síry či dusíku. Díky jaderné energetice se Spojené státy každoročně vyhnou emisi 175 milionů tun uhlíku (v podobě CO_2), který by byl rozptýlen do okolí, pokud by se stejné množství elektřiny získávalo pomocí spalování uhlí.

Jen malá pozornost se věnuje schopnosti jaderné energetiky produkovat vodík pro použití v palivových článcích pro dopravu a v dalších čistších elektrárnách. Velmi slibným přístupem je využití energie z vysokoteplotního jaderného reaktoru k pohonu parního zpracování methanu. Při tomto ději však stále vzniká jako vedlejší produkt oxid uhličitý. Několik přímých termochemických reakcí může s použitím vysoké teploty a vody vést k produkci vodíku. Výzkum termochemického rozkladu kyseliny sírové a dalších reakcí, které vedou k vodíku, právě probíhá v Japonsku a ve Spojených státech. Ekonomickou výhodnost takové produkce vodíku je třeba ještě prokázat, ale pro tuto cestu se otevírají obrovské možnosti, například spojením výroby vodíku a elektrické energie.

Ekonomicky výhodné

Každá jaderná stavba ve Spojených státech musí vzít v úvahu ekonomický pohled, tedy kapitálové náklady a financování. Potíž je v tom, že současná generace jaderných elektráren, kterou představují tři pokročilé návrhy lehkovodních reaktorů, schválené Jadernou regulační komisí, vykazuje náklady asi 1500 dolarů za jeden elektrický kilowatt (kWe), což nemusí být dostatečně nízká cena pro zahájení nové stavby. Široce probíraným cílem nových jaderných elektráren (Generace III a IV) je dosažení 1000 dolarů za jeden kWe. Tak by tyto elektrárny mohly konkurovat zatím nejspornější alternativní formě, elektrárnám na zemní plyn. Každé jaderné zařízení příští generace musí být navíc postaveno zhruba za dobu tří let, aby se náklady spojené s financováním udržely na zvládnutelné úrovni. Nové zjednodušené (ale zatím nevyzkoušené) schvalovací postupy by měly celý proces urychlit.

Sohledem na uplynulé zkušenosti s jadernou energetikou v USA představuje naplnění těchto cílů pro konstruktéry velkou výzvu. Jaderní in-



Jaderná elektrárna PALO VERDE s vysokotlakým vodním reaktorem se nachází 72 km západně od Phoenixu v Arizoně.

ženýři se snaží dosáhnout vyšší tepelné účinnosti zvýšením provozní teploty a zjednodušením subsystémů a jednotlivých složek. Urychlení stavby elektrárny si vyžaduje standardizaci návrhů, výrobních postupů a schvalovacích procedur, rozdělení elektráren do malých modulů, které ušetří nákladnou stavbu na místě, a použití počítačů při řízení celé stavby. Tak mohou být stavební práce v prostředí virtuální reality zakončeny ještě dříve, než dojde k jejich skutečnému zahájení.

Moderní bezpečnostní opatření

Společně s ekonomickými aspekty jaderných elektráren doznala za posledních dvacet let velkého zlepšení i jejich bezpečnostní opatření. Nehoda v elektrárně Three Mile Island v roce 1979 soustředila pozornost vlastníků a provozovatelů jaderných elektráren na další zlepšení a důslednější dodržování bezpečnostních opatření. Počet takzvaných bezpečnostně důležitých případů, hlášených Jaderné regulační komisi, například klesl z průměrných dvou případů na jednu elektrárnu v roce 1990 na pouhou jednu desetinu tohoto stavu v roce 2000. Mezitím, a od doby Černobylu v roce 1986, se důvěra veřejnosti v jaderné elektrárny do velké míry obnovila.

Na žádost amerického ministerstva energetiky formulovali mezinárodní a domácí odborníci dlouhodobé bezpečnostní cíle pro příští generaci jaderných zařízení. Vyzdvihli tři hlavní cíle: zlepšit bezpečnost



a spolehlivost elektráren, snížit možnost významných škod při haváriích a minimalizovat možné následky jakýchkoli současných nehod. Splnění těchto cílů bude vyžadovat nové návrhy elektráren, které budou zahrnovat bezpečnostní opatření, která pomohou předcházet nehodám a v případě havárie zabránit rozšíření radioaktivity do okolního prostředí.

Ukládání a recyklace jaderného odpadu

Je třeba věnovat dostatečnou pozornost i manipulaci s jaderným odpadem a jeho ukládání, aby se předešlo jeho možnému zneužití. Jako možný sklad vyhořelého jaderného paliva se právě zvažuje dlouhodobé podzemní úložiště Yucca Mountain v Nevadě. Jeho stavba je však o celé desetiletí opožděna, a ani po svém dokončení nebude schopno vyhovět budoucím požadavkům na uložení obrovských množství jaderného odpadu.

Současný jednorázový cyklus využívá čerstvě vytěžený uran, jednou ho spálí v reaktoru a potom ho vyhodí jako odpad. V takovém postupu se na elektřinu převede pouhé jedno procento energie obsažené v uranu, a navíc vzniká velké množství vyhořelého jaderného paliva, které musí být bezpečným způsobem uloženo. Obojímu se lze vyhnout, pokud použijeme vyhořelé palivo znovu – tedy pokud z něj získáme použitelné složky.

Většina zemí s rozsáhlým jaderným programem – včetně Francie, Japonska a Velké Británie – používá uzavřený cyklus jaderného paliva. V těchto zemích se z použitého paliva získává uran a plutonium (které vzniká vlivem záření v reaktorech) a obojí se používá jako nové palivo. Tak se zdvojnásobí množství energie, které získáme z paliva, a zároveň se z odpadu odstraní většina dlouhodobě radioaktivních prvků. Je však třeba poznamenat, že v současnosti je recyklované palivo dražší než čerstvě vytěžené. Současná recyklační technologie také vede k oddělení plutonia, které lze případně použít k výrobě zbraní.

V podstatě každá recyklace jaderného paliva probíhá postupem, zvaným PUREX (*plutonium uranium extraction*; extrakce plutonia a uranu), který byl původně určen pro získávání čistého plutonia k výrobě jaderných zbraní. Při takovém způsobu recyklace se palivové agregáty v pancéřovaných sudech odolných proti poškození převážejí do recyklační stanice. Palivové agregáty jsou rozbity na kusy a rozpuštěny v silných kyselinách. Z roztoku paliva se potom extrakcí vhodným rozpouštědlem oddělí štěpné produkty a další prvky od uranu a plutonia, které se dále čistí. Uran a plutonium se používají k výrobě smíšeného oxidového paliva do lehkodvodních reaktorů.

Recyklace pomáhá snížit na minimum produkci jaderných odpadů. Aby se snížily nároky na skladový prostor, měl by životaschopný cyklus jaderného paliva oddělovat produkty vysokotepebného štěpení, především cesium 137 a stroncium 90. Tyto prvky by se uchovávaly odděleně za konvenčního chlazení po dobu 300 až 500 let, dokud by jejich radioaktivita nepoklesla na bezpečnou úroveň. Ideální uzavřený palivový cyklus (rychlého reaktoru) by nerecykloval jen uran a plutonium, ale všechny aktinoidy v palivu včetně neptunia, americia a curia. V jednorázovém palivovém cyklu k předpokládané dlouhodobé radiotoxicitě z 98 % přispívá právě neptunium 237 (s poločasem rozpadu 2,14 milionu let) a plutonium 242 (s poločasem rozpadu 387 tisíc let). Má-li dlouhodobé uložení paliva přinést požadované výsledky, tedy pokles radioaktivity materiálu, je dobré z něj nejprve odstranit a recyklovat tyto dlouho žijící aktinoidy. Odstranění cesia, stroncia a aktinoidů by padesátkrát zvýšilo kapacitu skladovacích prostor.

Díky pokračujícímu zájmu o zvýšení životaschopnosti a úspornosti cyklů jaderného paliva vyvíjí několik zemí účinnější recyklační techniky. V *Argonne National Laboratory* ve Spojených státech se dnes vyvíjí elektrometalurgický postup, kterým se vyhneme oddělování čistého plutonia. Pokročilé vodní postupy, které nabízejí podobné výhody, jsou předmětem výzkumu ve Francii, Japonsku a v dalších zemích.

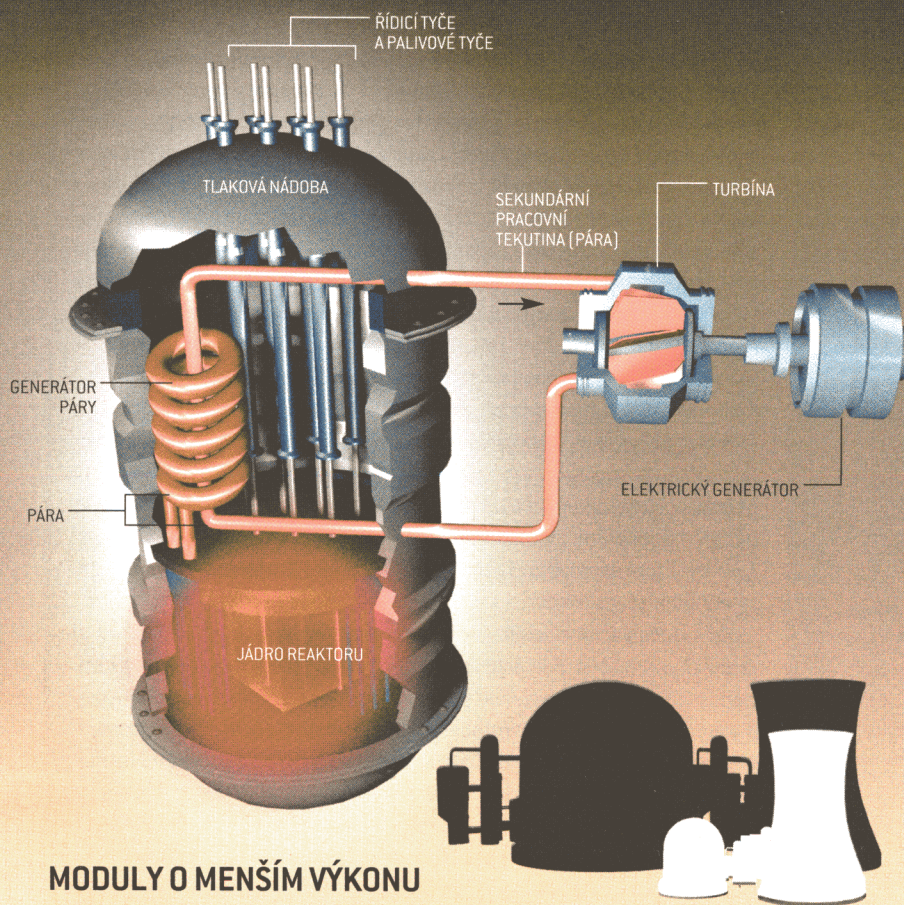
Zajistit nešíření

U nových jaderně-energetických systémů je nutné zajistit, aby se materiály použitelné k výrobě jaderných zbraní nedostaly mimo výrobní proces. Když chtějí jaderné zbraně získat státy, raději investují do zvláštního zařízení na výrobu štěpných materiálů, než aby sbíraly jaderné odpady z civilních atomových elektráren. Komerční cykly jaderného paliva jsou obecně nejdražším a nejobtížnějším způsobem, jak získávat materiál vhodný k výrobě zbraní. V zájmu nešíření jaderných zbraní musí nové palivové cykly musí v tomto trendu pokračovat.

—J.A.L., R.G.B. a J.F.K.

VODOU CHLAZENÝ JADERNÝ REAKTOR

Návrh reaktoru podle IRIS, jak ho vyvinula společnost Westinghouse Electric (na obrázku je v základním schématu) je novou verzí, v které se parní generátor (výměník tepla) a pohon řídicích tyčí nachází v tlakové nádobě ze silné oceli.



MODULY O MENŠÍM VÝKONU

Ochranné konstrukce pro kompaktní reaktor typu IRIS mohou být menší. Díky nižšímu výkonu reaktoru, 100–350 megawattů, může být provoz těchto jednotek ještě účinnější.

hu teplot, které umožňují produkci malých množství vodíku z vody nebo z jiného zdroje pro pozdější využití v palivových článcích nebo v motorech s čistým spalováním v dopravě, tedy v technologiích, na nichž by mohla spočívat energetika na bázi vodíku (viz rámeček na straně 74).

Tyto reaktory příští generace zahrnují také několik důležitých bezpečnostních rysů. Helium jako ušlechtilý plyn nereaguje s ostatními materiály dokonce ani při vysokých teplotách. Navíc, díky tomu, že palivové články a jádro reaktoru jsou zhotoveny z žáruvzdorných materiálů, nemohou se tavit a budou se

AUTOŘI

JAMES A. LAKE, RALPH G. BENNETT a JOHN F. KOTEK hrají vůdčí roli v americkém jaderném programu. Lake je zástupcem ředitele laboratoře pro jaderné a energetické systémy na americkém ministerstvu energetiky, kde řídí výzkum a vývoj programů jaderné energie a bezpečnosti a zároveň obnovitelné a fosilní energie. Bennett je ředitelem pro jadernou energii na téže ministerstvu a členem skupiny pověřené vývojem generace IV. Kotek vede sekci speciálních projektů v Argonneské národní laboratoři Západ v Idahu a je členem týmu pro generaci IV. Před příchodem do Argonneské laboratoře byl zástupcem ředitele pro technologii na oboru pro jadernou energetiku, vědu a techniku na ministerstvu energetiky

chemicky měnit jen při extrémně vysokých teplotách v případě nehody (nad 1600 °C) - to je hodnota, která zaručuje dostatečnou bezpečnost zařízení.

Další zabezpečení plyne z neustálého a pravidelného zásobování jádra palivem: během činnosti reaktoru se každou minutu odebírá ze dna jeden oblázek a je nahrazen novým, který se přidává shora. Tímto způsobem se všechny oblásky pohybují jádrem směrem dolů, podobně jako míčky v osudí během losování, přičemž celá cesta shora až na dno trvá šest měsíců. Soustava tak obsahuje optimální množství paliva pro svou činnost s minimálním množstvím nadbytečných štěpných reakcí. To zabraňuje celé řadě nehod, pramenících z přílišné intenzity reakce, ke kterým může dojít v současných reaktorech s vodním chlazením. Rovnoměrný pohyb oblázků oblastmi s vysokou a nízkou produkcí energie také znamená, že každý z nich je ve srovnání s pevně uchyceným palivem vystaven méně náročným provozním podmínkám, což opět přispívá k bezpečnosti celé jednotky. Po použití musí být oblásky dlouhodobě uloženy v depozitních skladech, stejně jako dnes používané palivové tyče.

Reaktory chlazené vodou

STANDARDNÍ technologie jaderného reaktoru s vodním chlazením má nové vyhlídky na budoucnost. Ve snaze předejít nehodám, které může způsobit únik chladiva jako v Three Mile Island, a zjednodušit celé zařízení vznikla nová třída systémů Generace IV, v níž jsou všechny primární složky obsaženy v jediné nádobě. Americkým příspěvkem v této třídě je mezinárodní návrh moderního a bezpečného reaktoru (IRIS), který vypracovala společnost Westinghouse Electric.

Umístění celého chladicího systému v nárazuvzdorné tlakové nádobě znamená, že ani v případě prasknutí potrubí s chladivem nemůže být primární okruh vážně poškozen. Protože tlaková nedovolí kapalině uniknout, povede jakákoli možná nehoda k mnohem menšímu poklesu tlaku než u předchozích návrhů.

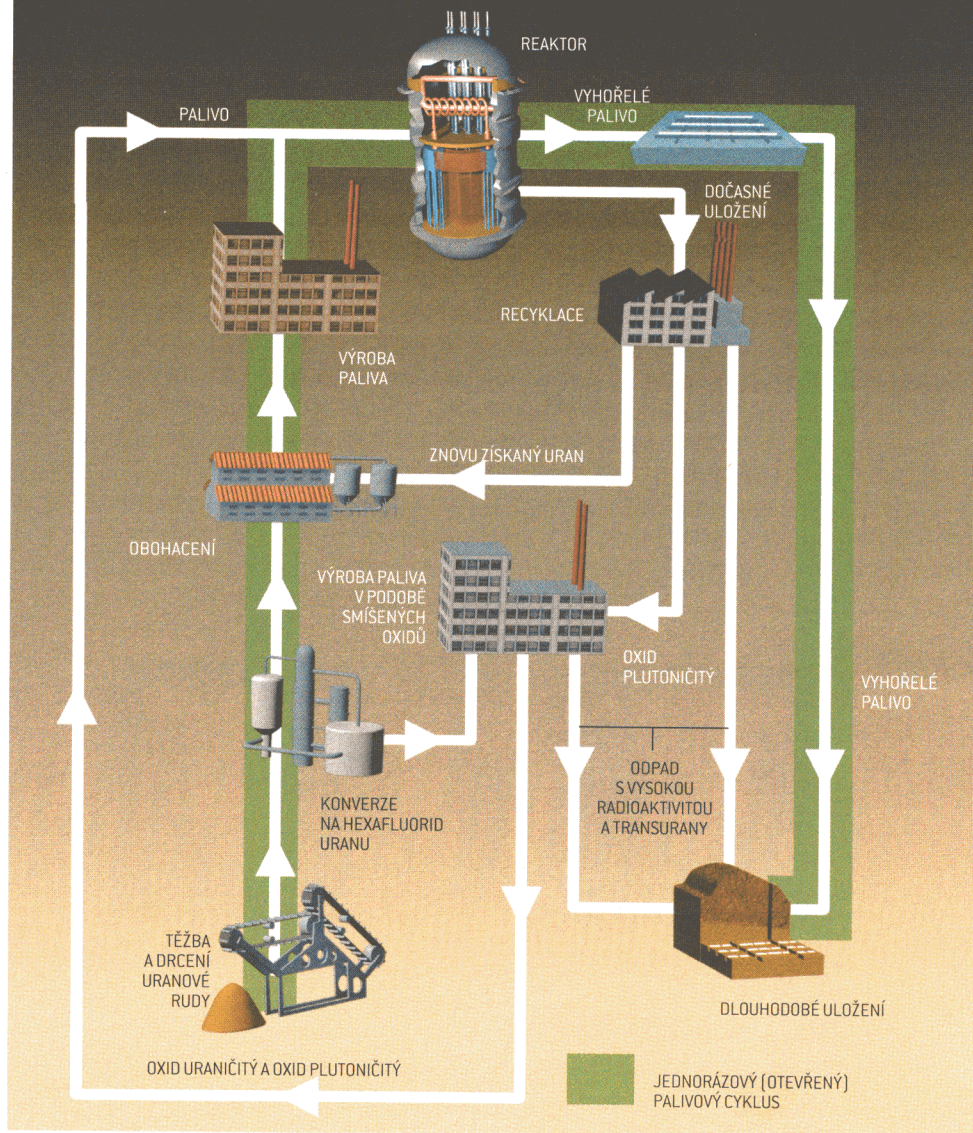
OTEVŘENÉ A UZAVŘENÉ CYKLY JADERNÉHO PALIVA

K dosažení takto kompaktního uspořádání bylo do těchto reaktorů začleněno několik důležitých zjednodušení. Subsystémy jsou v tlakové nádobě umístěny nad sebou, aby v případě nehody umožnily pasivní přenos tepla přirozenou cirkulací. Navíc, pohon řídicích tyčí je umístěn v nádobě, což vylučuje jejich vysunutí z jádra. Tyto jednotky mohou být postaveny i jako malé moduly, které umožní flexibilní a poměrně levné použití na různých místech.

Návrháři těchto reaktorů zkoumají také možnost provozu elektráren při vysoké teplotě a tlaku (více než 374 °C a 22,4 MPa); tyto podmínky jsou známy jako kritický bod vody, při kterém se ztrácí rozdíl mezi kapalinou a párou. V tomto kritickém bodu se voda chová jako spjitá tekutina s výjimečným specifickým teplem (tepelnou kapacitou) a dosahuje nejvyšší tepelné vodivosti. Při zahřívání se nevaří a při rychlém uvolnění tlaku se mění v páru. Hlavní výhodou práce nad hodnotami kritického bodu je to, že tepelná účinnost soustavy může dosáhnout až 45 %, a tak se přiblížit k režimu zvýšené teploty, který umožňuje produkci palivového vodíku.

Ačkoli mohou být reaktory založené na vodě v nadkritických podmínkách na první pohled velmi podobné standardním návrhům Generace II, odlišností je mnoho. Například jádra těchto reaktorů jsou mnohem menší, což pomáhá snížit náklady na tlakovou nádobu a okolní zařízení. Za druhé, přídatné zařízení pro oběh páry je podstatně zjednodušeno, neboť ke své práci využívá jen jedinou fázi tekutiny. Navíc, menší jádro a malá hustota chladiva vyžadují méně vody, kterou je třeba uchovávat v nádobě pro případ nehody. Protože chladivo o nízké hustotě nesnižuje energii neutronů, lze uvažovat o návrzích rychlých reaktorů se všemi výhodami plynoucími ze stálosti jejich provozu. Hlavní nevýhodou systémů s vodou nad jejím kritickým bodem je zvýšená korozivita tohoto chladiva. Proto je třeba vyvinout nové materiály a techniky ke zvládnutí koroze a eroze. Výzkum reaktorů s vodou při podmín-

Jednorázový cyklus jaderného paliva [zeleně] vychází z uranové rudy, kterou zpracuje na štěpné palivo, které spálí v reaktoru a odpad uloží do bezpečných prostor na mnoho let. Tento postup, běžný ve Spojených státech, využívá jen jedno procento energie obsažené v uranu. V uzavřeném cyklu [bílě] je vypotřebované palivo dále zpracováno a získává se z něho uran a plutonium pro nové použití. Tato recyklační technika se dnes používá ve Francii, Japonsku a Velké Británii. Budoucí uzavřené cykly, založené na rychlých reaktorech, by mohly získávat další aktinoidy, které se dnes považují za odpad.



kách nad kritickým bodem se provádí v Kanadě, Francii, Japonsku, Jižní Koreji a ve Spojených státech.

Reaktory s rychlými neutrony

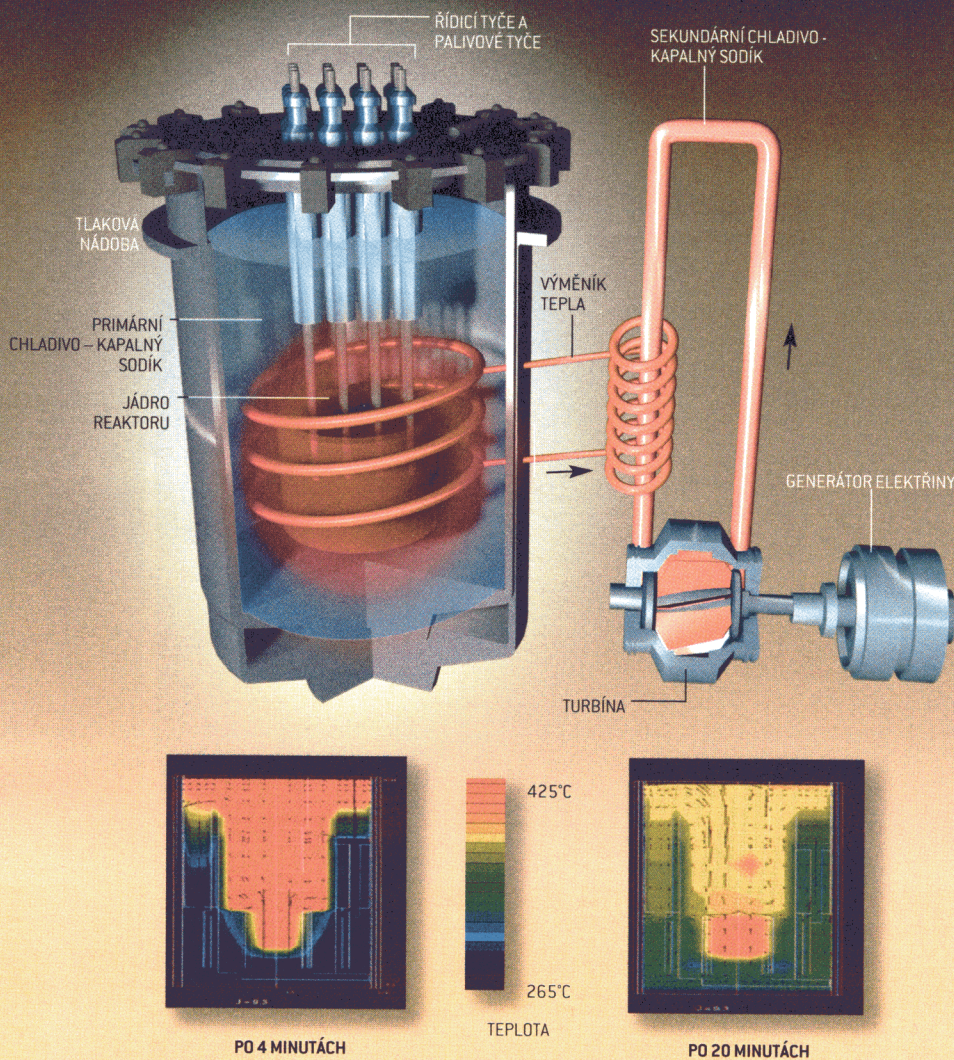
DLOUHODOBÝM PŘÍSTUPEM je návrh rychlého reaktoru neboli reaktoru s vysokoenergetickými neutrony, dalšího typu systému Generace IV. O tuto třídu reaktorů se snaží týmy návrhářů ve

Francii, v Japonsku, Rusku, Jižní Koreji a dalších státech. Americký program rychlých reaktorů byl ukončen v roce 1995, ale pod vlivem Generace IV se americký zájem může znovu probudit.

Většina jaderných reaktorů využívá tepelné, neboli nízkoenergetické emisní spektrum neutronů. V tepelném reaktoru se rychlé (vysokoenergetické) neutrony, generované ve štěpné reakci, zpomalují na úroveň „tepelné“ energie

RYCHLÝ JADERNÝ REAKTOR

Jádra rychlých jaderných reaktorů, například Super PRISM od General Electric (znázorněn schematicky), produkují rychlé (vysokoenergetické) neutrony a jsou často chlazena roztavenými kovy. V rychlých reaktorech se vysokoenergetické neutrony používají k vytváření jaderného paliva.



PASIVNÍ CHLAZENÍ JÁDRA

ROZDĚLENÍ TEPLoty ukazuje jak může přenos tepla chladivem v podobě kapalného kovu pasivně ochladit jádro reaktoru využitím externího poklesu tepla.

při srážkách s vodíkem ve vodě nebo s jinými lehkými atomy. Ačkoli tyto reaktory dokážou vyrábět elektřinu s malými náklady, nejsou příliš výkonné při produkci jaderného paliva (v mnoha rychlých reaktorech) ani při jeho recyklaci.

Většina dosud postavených rychlých reaktorů používá jako chladivo kapalný sodík. Budoucí verze budou moci využít sodík, olovo, slitinu sodíku a biz-

mutu nebo inertní plyny jako například helium či oxid uhličitý. Neutrony s vyšší energií v rychlých reaktorech lze využít k produkci nového paliva nebo k likvidaci odpadů z tepelných reaktorů s dlouhou dobou života a plutonia z rozebraných zbraní. Při recyklaci paliva z rychlých reaktorů mohou neutrony poskytnout mnohem více energie z uranu při současném snížení množství od-

padů, které je nutno dlouhodobě ukládat. Tyto návrhy rychlých reaktorů představují jeden z klíčů ke zvýšení životaschopnosti budoucích jaderných energetických systémů, zvláště když lze očekávat podstatně větší využití atomové energie.

K použití ve spektru rychlých neutronů se kovová chladiva báječně hodí. Za prvé, mají mimořádně vysokou tepelnou vodivost, což jim umožňuje přestat nehody podobné události v Three Mile Island a v Černobylu. Za druhé, některé (ne však všechny) kapalné kovy jsou vůči zařízení podstatně méně korozivní než voda; tím se zvyšuje životnost tlakové nádoby a dalších důležitých složek systému. Za třetí, tyto vysokoteplotní systémy mohou pracovat při tlaku, který je blízký tlaku atmosférickému; to značně zjednodušuje návrh systému a snižuje riziko nehody.

Po celém světě pracuje více než tucet reaktorů chlazených sodíkem. Zkušenosti s nimi nás upozorňují na dvě základní těžkosti, které je třeba překonat. Sodík reaguje s vodou za uvolnění velkého množství tepla, což může vést k nehodě. Proto přidali návrháři k reaktoru chlazenému sodíkem druhý sodíkový okruh, který izoluje primární chladivo v jádru reaktoru od vody v parním systému, kde se vyrábí elektřina. Některé současné návrhy se zaměřují na nové technologie výměníků tepla, které poskytují lepší ochranu proti netěsnostem.

Druhou velkou výzvou je ekonomický pohled. Protože sodíkem chlazené reaktory vyžadují dvojstupňový přenos tepla mezi jádrem a turbínou, jsou nákladnější a tepelná účinnost je nižší než u nejmodernějších návrhů, kde je reaktor chlazený vodou, případně vzduchem (pokročilý reaktor se sodíkovým chlazením dosahuje účinnosti 38 %, zatímco reaktor s vodou nad kritickým bodem pracuje s účinností 45 %). Navíc, kapalné kovy jsou neprůhledné, což ztěžuje kontrolu a údržbu jednotlivých složek zařízení.

Nové návrhy rychlých reaktorů se snaží využít výhod předchozích verzí a zároveň se vypořádat s jejich nedostatky. Technologie již pokročila nato-

JAK BEZPEČNÉ JSOU JADERNÉ ELEKTRÁRNY PŘED TERORISTY?

TRAGICKÉ UDÁLOSTI z 11. září 2001 vyvolávají znepokojivé otázky o zranitelnosti jaderných zařízení při teroristickém útoku. Ačkoli byla přijata rozsáhlá civilní i vojenská opatření, aby se podobným akcím předešlo, obraz nárazu padajícího letadla z našich představ hned tak nezmizí. Máme se tedy bát? Odpověď zní ne i ano.

Pro rychle se pohybující letadlo není jaderná elektrárna snadným cílem, neboť pouhý náraz na její kopuli, který by nezasáhl přímo centrum, by stavbu příliš nenarušil. Jádro reaktoru, které se nachází pod ní - na úrovni země nebo pod zemí, má obvykle méně než 3 m v průměru a je asi 4 m vysoké. Je uzavřeno v těžké ocelové nádobě, která je obklopena betonovou schránkou. Podrobnosti jednotlivých reaktorů se liší, ale všechny jsou stavěny tak, aby přečkaly i ty nejhorší přírodní katastrofy včetně zemětřesení, tornád a hurikánů. Ačkoli nebyly navrženy jako odolné proti válečným aktům, přestály by i náraz malého letadla.

I když je jádro reaktoru chráněno, části potrubí a chladicího zařízení reaktoru, pomocné vybavení a sousední prostory mohou být přímým nárazem zranitelné. Jaderné elektrárny jsou však vybaveny několika nouzovými chladicími systémy a nouzovými zdroji elektrického proudu pro případ, že byl hlavní přívod přerušen. V nepravděpodobném případě zničení všech těchto bezpečnostních zařízení by se mohlo jádro reaktoru

přehřát a roztavit. Ale i v takové extrémní situaci, podobné události v Three Mile Island, by se radioaktivní materiály jádra stále udržely uvnitř tlakové nádoby.

Mají-li jaderné elektrárny svou Achillovu patu, pak jsou jí určitě místní dočasné sklady vyhořelého paliva.



FRANCOUZSKÝ VOJÁK hlídá protiletadlovou raketovou baterii poblíž největší evropské stanice na zpracování jaderných odpadů v La Hague v Normandii.

Ačkoli tyto sklady obvykle obsahují několik použitých palivových agregátů – a tudíž více radioaktivity, než reaktor, většina nebezpečnějších radioaktivních izotopů ze starého paliva se už rozložila. Vyhořelé palivové soubory, které byly z reaktoru odstraněny teprve nedávno, jsou skladovány v hlubokých nádržích vody, aby se ochladily, a zároveň aby se odstínilo záření, které z nich vychází. Tyto otevřené nádrže jsou obklopeny železobetonovými kontejnery se

silnými stěnami. Po několika letech je materiál přemístěn do suchých palivových kontejnerů z betonu, které jsou chlazený vzduchem.

Ačkoli chladicí nádrže poskytují teroristům jen malý, a tudíž nesnadný cíl, bodově vedený útok by mohl vysušit vodu v nádrži a palivo by se přehřálo a roztavilo. Experti však říkají, že k opětovnému naplnění nádrže by postačila obyčejná požární hadice. I kdyby se palivo již začínalo tavit, do vzduchu by se podle odborníků dostalo jen velmi málo radioaktivních částic. Náraz velkého letadla na suché palivové kontejnery by je nanejvýš odhodil na stranu. Pokud by v některých místech došlo k jejich narušení, rozdrčené kousky oxidovaného potahu paliva by mohly uvolnit něco radioaktivity, říkají odborníci na jadernou bezpečnost.

Někteří experti věří, že Jaderná regulační komise brzy nařídí zesílení ochrany pomocných zařízení jaderných elektráren a jejich dočasných skladů vyhořelého paliva.

Pro případ teroristického útoku jsou připraveny plány na evakuaci obyvatelstva, i když je kritici prohlašují za nepraktické. Lze se však domnívat, že by místní lidé měli na odchod do bezpečí dostatek času, zhruba osm až deset hodin, než by je zasáhla významná dávka záření. Nejzávažnější nebezpečí představuje dlouhodobé zamoření místní lokality částicemi ze vzduchu, jejichž odstranění by bylo velmi drahé.

lík, že je možné předvídat rychlé reaktory, které budou podle odborníků téměř neroztavitelné. Navíc, díky chemicky netečným chladivům, jakými jsou například inertní plyny, olovo nebo slitiny olova a bizmutu, nemusí být zapotřebí druhý chladicí okruh, a tak se zlepší i ekonomický aspekt návrhu.

Jaderná energie dospěla ve svém vývoji k důležitému okamžiku. Ekonomický úspěch současné generace amerických elektráren je založen na vylep-

šených technikách řízení a na pečlivých postupech, díky nimž zájem o nové elektrárny roste. Nové návrhy reaktorů mohou významným způsobem zlep-

šit bezpečnost, životaschopnost a ekonomiku jaderně-energetických systémů na dlouhá léta, a tak otevřít cestu k jejich širokému využití. SA

CHCETE-LI VĚDĚT VÍCE:

Nuclear Energy in a Sustainable Development Perspective. Organizace pro ekonomickou spolupráci a rozvoj, Agentura pro jadernou energii, Paříž, 2000.

Dostupné na stránce www.nea.fr/html/ndd/docs/2000/nddsustdev.pdf

Stránka Americké společnosti pro jadernou energii: www.ans.org

Stránka Ministerstva energetiky USA: gen-iv.ne.doe.gov

Stránka Institutu Energie: www.nei.org