

Odpady

Zdokonalování technologií,
zprůšňování dozoru a osvěta

z palivového cyklu jaderných elektráren

PETR
OTČENÁŠEK

Doc. Ing. Petr Otčenášek, CSc., (*1937) vystudoval Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze. Zaměřil se na kinetiku jaderných reaktorů. Jako vedoucí katedry užitě jaderné fyziky byl garantem postgraduálních kurzů rekvalifikačních odborníky na jadernou energetiku. V letech 1980–1985 pracoval na katedře matematiky Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v oboru matematického modelování. Od roku 1985 do r. 2003 působil na katedře jaderné fyziky Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy. Je autorem více než 200 publikací zaměřených zejména na problémy jaderné energie. I nadále pracuje jako poradce v domácím i zahraničním prostředí.

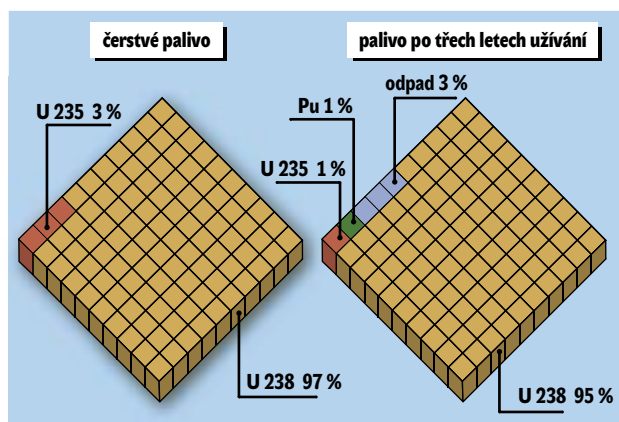
Hrozba jaderných zbraní z období studené války ještě nevyvanula, riziko zneužití jaderné energie a radioaktivních zdrojů je každodenním tématem sdělovacích prostředků. Radioaktivní záření je měřitelné jen speciálními detektory. Za těchto okolností lze důvěru veřejnosti nastolit pouze systematickým předkládáním věcně a pravdivě formulovaných informací. Ani o jaderných odpadech nemá smysl uvažovat bez souvislosti se světovým odpadovým hospodářstvím a jeho vlivem na biosféru.

V současné době se jako jaderné palivo v tepelných reaktorech celosvětově používá oxid uranický ve tvaru tablety s průměrem a výškou asi 1 cm. Jedna palivová tableta poskytuje výkon přibližně 200 W po dobu 4 let (od zavezení do reaktoru po vyjmutí). Tablety jsou v lehkovodních energetických reaktorech hermeticky uzavřeny v trubici ze slitiny zirkonu, sloupec tablet v palivovém proutku např. pro reaktory VVER 440 má délku 242 cm.

Čerstvé palivo obsahuje nanejvýš 5 procent uranu 235, štěpitelného tepelnými neutrony, a 95 nebo více procent uranu 238, který je štěpitelný pouze neutrony s vysokými energiemi. Absorpce neutronu v uranu 238 vytváří plutonium 239, které je vynikajícím jaderným palivem štěpitelným tepelnými i rychlými neutrony. Vyhořelé palivové proutky obsahují přibližně 95 procent uranu 238, jedno procento uranu 235, jedno procento plutonia a asi 3 procenta produktů vzniklých při štěpení (viz rovněž obr. 1).

Ukončení palivového cyklu

Skutečným odpadem vyhořelých palivových článků jsou štěpné produkty a aktinidy, zatímco uran a plutonium jsou energeticky dále



3. Izotopické složení čerstvého a vyhořelého paliva lehkovodních reaktorů.

využitelné – plutonium jako palivo pro rychlé reaktory a uran 238 jako materiál plodící další plutonium zejména v rychlých reaktorech. Vyhořelé palivo tedy není pouze odpadem, ale také využitelnou surovinou. V současné době existují dvě technologie ukončení jaderného palivového cyklu (viz Vesmír 71, 431, 1992/8 a 71, 625, 1992/11):

- přepracování vyhořelého paliva,
- přímé uložení, které vrací do hlubin Země kromě odpadu i energeticky využitelné suroviny – uran a plutonium.

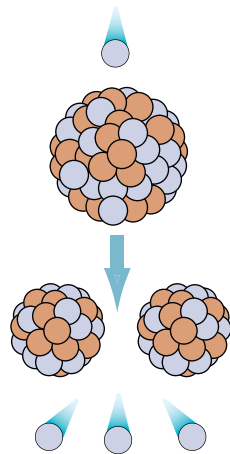
Využívají se obě metody. Některé země (například Francie) se přiklonily k otevřenému palivovému cyklu, který vyhořelé palivo přepracovává.¹ Jiné země (USA, Finsko a další) dávají přednost uzavřenému cyklu, v němž je vyhořelé palivo prohlášeno za odpad a zavedeno do hlubinného úložiště.

I přímé uložení však ponechává zadní vrátka – hlubinné úložiště musí být po určitou dobu „dostupné“, technologie uložení musí umožňovat případné vyjmutí vyhořelého paliva jako suroviny, jež může být jednou

1) Vytěžením energeticky využitelného materiálu z jaderného paliva se zabývá zejména společnost BNFL a Cogema.

2) Pozn. red.: Jaderná energie bude pod satelitním dozorem. Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE) ve Vídni kontroluje dění kolem reaktorů a bazénů s vyhořelým jaderným palivem. Dosud probíhá kontrola tak, že se veškeré dění v těchto prostorech zaznamenává kamerou na hard-disk a inspektoři si jednou za tři měsíce obsah disku zkontrolují s tím, co jaderná elektrárna agentuře nahlásila. Kromě toho kontrolují palivové soubory i fyzicky. Od dubna zkouší MAAE v jaderné elektrárně Mochovce na Slovensku bezpečnostní a kontrolní satelitní systém (SASS), který každých pět minut odešle informace z reaktorového sálu zaznamenané kamerovým systémem na stůl inspektorovi MAAE ve Vídni. Po odzkoušení bude tento systém nainstalován do více než 100 sledovaných jaderných elektráren. Ale ani tento systém nebude ještě znamenat konec osobních návštěv jaderných inspektorů.

3) Modular vault dry store.



1. Schéma štěpení jádra uranu

2. Palivové proutky lehkovodního reaktoru.



mnohem cennější než jakákoliv jiná surovina včetně ryzího zlata. Jak otevřený, tak uzavřený palivový cyklus mají své výhody a nevýhody, oba jsou zdokonalovány a náklady na ně se mění. Proto ani nemá smysl usilovat o analýzu, která by dávala některému z nich přednost. Například Německo přechází z otevřeného cyklu na přímé uložení vyhořelého paliva bez přepracování. Japonsko předpokládá využívání obou cyklů, kdy otevřený cyklus bude mít přednost u vyhořelého jaderného paliva s vyšším obsahem plutonia.

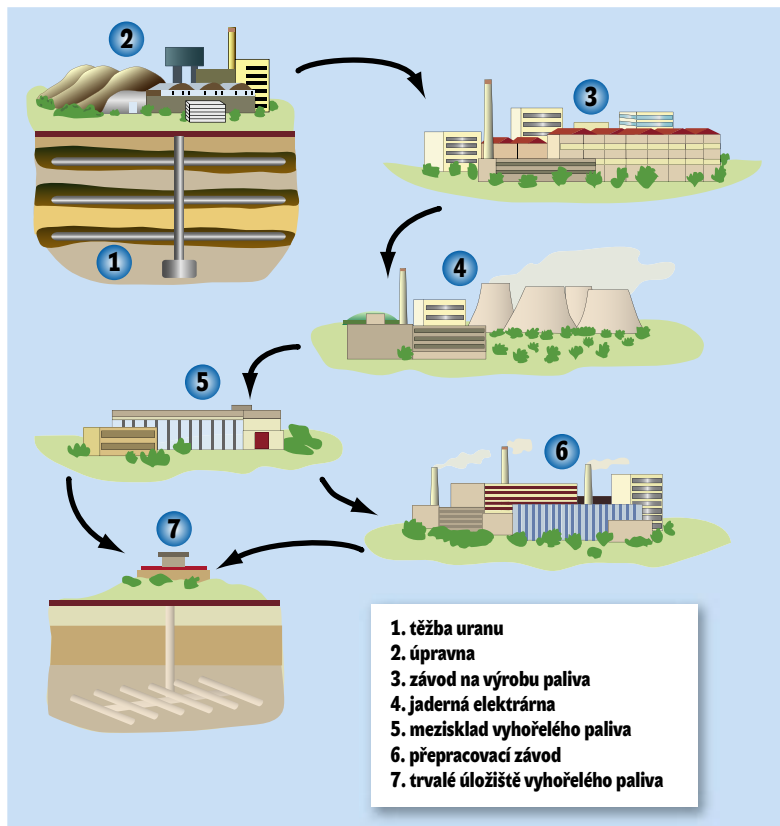
Významný výzkum se zaměřuje na vývoj dalších metod ukončení jaderného palivového cyklu. Ozařováním lze dlouhodobé radionuklidy přeměnit (transmutovat) na střednědobé nebo krátkodobé a tím výrazně zkrátit dobu, po kterou radioaktivní inventář představuje riziko. Jako cíle vyvíjených transmutačních technologií jsou nejčastěji uváděny:

- snížení radiotoxicity vyhořelého jaderného paliva;
- možnost náhrady uranu 235 jinými štěpnými materiály při výrobě energie, tedy rozšíření potenciálních energetických zdrojů;
- snížení nákladů a dalších nároků na konečné uložení odpadů palivového cyklu;
- „denaturace“ plutonia (tj. snížení obsahu štěpitelných izotopů) s cílem znehodnotit jej, aby nemohlo být vojensky zneužito.

Skladování čerstvě vyhořelého paliva

Mezi koncem využívání jaderného paliva v reaktoru a jeho zpracováním podle zvolené technologie se vyhořelé palivo skladuje. Rozpad radioaktivních odpadů v etapě skladování snižuje radioaktivitu i vývin tepla, a tím umožní bezpečnější a levnější přepracování nebo umístění paliva do hlubinného úložiště. Čas získaný skladováním umožní získat podklady k volbě mezi uložením a přepracováním nebo k využití některé z dalších metod, které se dnes intenzivně vědecky i technicky rozvíjejí. Doba skladování je v různých zemích rozdílná. Například licence v USA je na 20 let, ale současně platí závěr NRC (Nuclear Regulatory Commission), že suché sklady využívající obalové soubory jsou bezpečné po staletí. V České republice je vlastníkem vyhořelého paliva (ČEZ) uváděna celková doba předpokládaného skladování od vyjmutí paliva z reaktoru asi 80 let. Tomu odpovídá předpoklad, že pro první palivové soubory z jaderné elektrárny Dukovany bude třeba zprovoznit hlubinné úložiště v roce 2065.

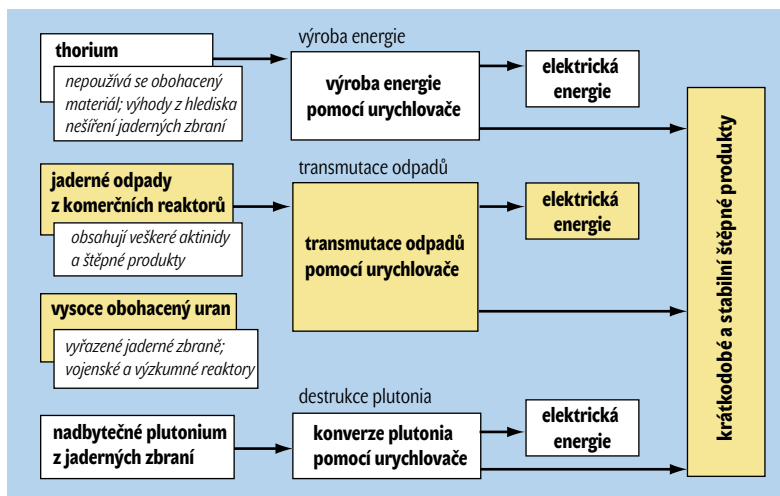
Bezprostředně po vyjmutí z reaktoru je nutné vyhořelé palivo (s vysokým vývinem tepla) několik let chladit vodou v bazénech jaderné elektrárny. Pak se teprve může převézt do skladů. Ty bývají většinou vybudovány v blízkosti elektrárny, ale mohou být i jinde. Například v USA se sklady stavějí zatím v lokalitách elektráren, ale počítá se s vybudováním centrálních skladů, které by byly vhodné například pro skladování paliva z odstavených elektráren. V Japonsku se předpokládá vybudování nového velkého centrálního skladu. V Německu se spíše přechází od používání již vybudovaných centrálních skladů k výstavbě skladů v lokalitách elektráren.



Projektové řešení skladů se řídí požadavky, které specifikuje Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE). Je zaměřeno na dlouhodobě bezpečné a ekonomické provedení, značné nároky jsou kladeny na to, aby vyhořelé palivo nemohlo být zneužito.² Skladovat se dá pod vodou (bazény většinou bývají na povrchu, např. ve Francii, Rusku, Velké Británii nebo na Slovensku, a jen výjimečně v podzemí, např. v CLAB ve Švédsku). Možné jsou i suché sklípkové sklady³ (použité např. v Maďarsku nebo v CASCAD ve Francii), horizontální betonové moduly, do kterých je vkládán tenkostěnný kovový kanystr (např. řešení NUHOMS používané v USA) nebo suché kovové či betonové obalové soubory umístěné pod širým nebem (rovněž v USA). Každá z technologií má své výhody. Pro skladování v České republice se – podobně jako v Německu – používají suché dvojúčelové (pro skladování a pro přepravu) obalové soubory umístěné v železobetonové

4. Jaderný palivový cyklus.

5. Možné uspořádání transmutoru.





6. Nahoře: Vchod do připravovaného úložiště vyhořelého paliva v Yucca Mountain.
7. Malé obrázky vpravo uprostřed: model přepravního kontejneru CASTOR 440.
8. Dole: Transporty vyhořelého paliva jsou podle zkušeností po technické stránce vysoce bezpečné. Snímky 6 a 8 © Fenomen multimedia, a. s.



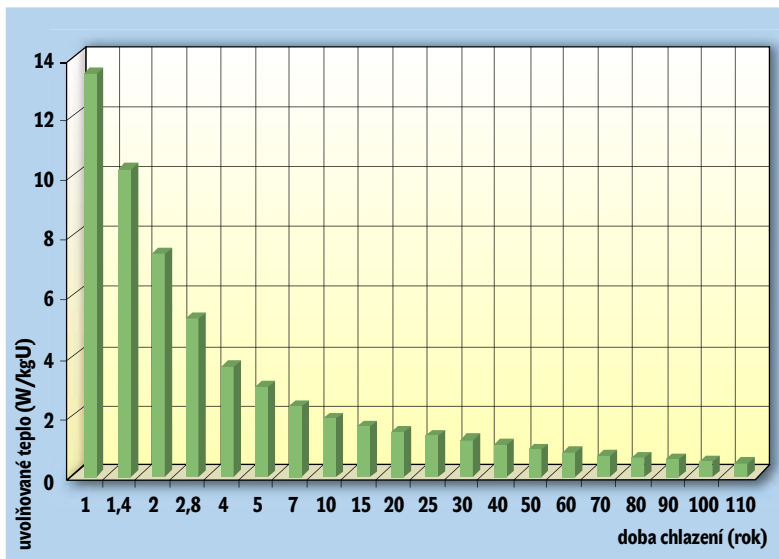
budově. Téhož technologii se u nás dává přednost, protože je jednoduchá, umožňuje vytváření modulů, provozní náklady jsou nízké a riziko skladování v kovových nebo betonových obalových souborech je velmi nízké.

Sklady v areálu elektrárny Dukovany používají kovový obalový kontejner pro 84 palivových souborů s modelovým označením CASTOR 440/84 a novější CASTOR 440/84M modifikovaný na novější palivo s vyšším vyhořením. Vyhořelé palivo z jaderné elektrárny Temelín se bude skladovat v obalových souborech umožňujících uložení paliva z reaktoru VVER 1000, které se od paliva pro reaktory VVER 440 zásadně odlišuje jak rozměry, tak konstrukcí. Požadavky na skladování stanovila doporučení MAAE. Jejich respektování vytváří ze samotného obalového souboru extrémně bezpečnou bariéru, oddělující radioaktivní obsah od životního prostředí. Obalové soubory temelínské elektrárny budou uloženy v železobetonových budovách umožňujících odvod zbytkového výkonu přirozeným prouděním vzduchu. Po vstu-

typ elektrárny	počet ztracených pracovních dní následkem úrazu	úmrtí
uhelná	1500-1800	6-27
na kapalná paliva	2-3	1-7
plynová	2	0,17
jaderná	6	0,06
sluneční	75-90	0,6

9. Odhad účinků výroby elektřiny (1 GWrok) na lidské zdraví. V případě uhelných elektráren a elektráren na kapalná paliva jde většina úrazů na vrub dopravy, úmrtí se připisují provozu. U ostatních typů elektráren je rovněž vliv dopravy paliva a materiálů na úrazy dominantní; v případech úmrtí se od sebe liší. U plynové elektrárny největší ohrožení znamená dodávka plynu, u jaderné elektrárny je to její výstavba a regenerace paliva, zatímco u sluneční elektrárny má největší podíl dodávka a doprava materiálů.

pu otvory podél budovy bude vzduch obtékat obalové soubory a ohřátý vystupovat světlíkem ve střeše. Budova zabezpečí fyzickou ochranu skladu a ochrání obalové soubory před nepříznivými vnějšími vlivy. Dimenzována je na málo pravděpodobné přírodní živelné události, jako jsou zemětřesení nebo extrémní klimatické



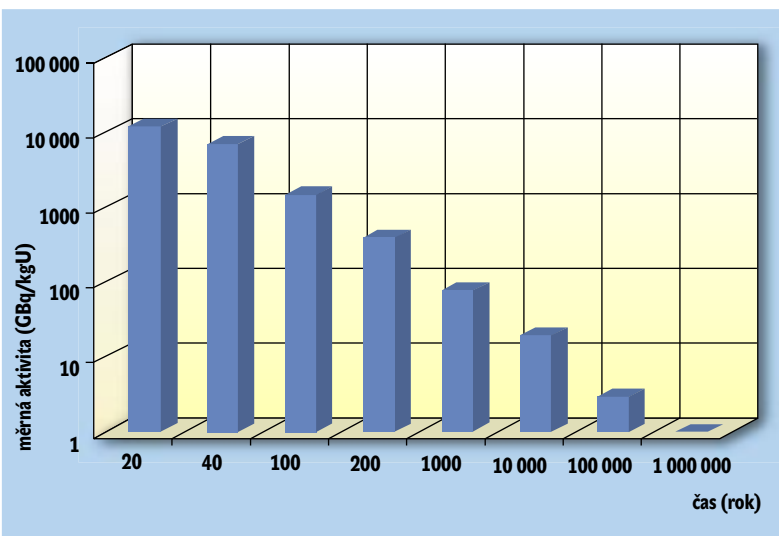
podmínky. Rovněž odolá pádu letadla o dvou tunách, explozi v blízkosti skladu a dalším i málo pravděpodobným událostem, které by eventuálně mohl způsobit člověk. U nově připravovaného skladu v areálu elektrárny Temelín byly analyzovány i důsledky případného teroristického útoku velkým dopravním letadlem. Analýzy potvrdily výsledky obdobných studií v zahraničí: sice by došlo k značnému poškození budovy skladu a následnému požáru, ale ani tato situace by nezpůsobila významné zamoření okolí. Pravděpodobnost, že by úroveň dávek stoupla do té míry, aby vyžadovala okamžitá ochranná opatření, je zanedbatelná.

Převoz do povrchového areálu hlubinného úložiště

Po etapě skladování se bude vyhořelé palivo převážet do povrchového areálu hlubinného úložiště. Transporty vyhořelého paliva jsou podle zkušeností po technické stránce vysoce bezpečné a přístupy k nim se dále průběžně vylepšují. Snaha o minimalizaci transportů vychází nejen z potřeby snížit rizika spojená s dopravou jako takovou (dopravní havárie), ale zejména z organizačních komplikací způsobovaných odpůrci jaderné energetiky, kvůli nimž náklady na transport vzrostly. České jaderné

10. Tepelný výkon vyhořelého paliva se výrazně snižuje po vyjmutí z reaktoru (palivo tlakovodních reaktorů s vyhořením 50 MWd/kg U a používaného s měrným výkonem 40 kW/kg U), zpracováno podle Regulatory Guide 3.54.

11. V závislosti na době od vyjmutí paliva z reaktoru se snižuje měrná aktivita vyhořelého jaderného paliva.



O JADERNÝCH ODPADECH VE VESMÍRU VYŠLO:

Petr Otčenášek: Ukončení palivového cyklu jaderných elektráren, Vesmír 71, 431-432, 1992/8

Petr Otčenášek: Alternativy ukončení palivového cyklu, Vesmír 71, 626, 1992/11

Lumír Nachmiller: Principy trvalého zneškodnění radioaktivních odpadů, Vesmír 71, 624-626, 1992/11

Ludmila Marková: Vyhořelé palivo z (nejen) amerických jaderných reaktorů, Vesmír 75, 71, 1996/2

Ludmila Marková: Čeho se bojíme: skladování a transport vyhořelého jaderného paliva?, Vesmír 75, 626, 1996/11

Aleš Laciok, Ludmila Marková, Antonín Vokál: Co s vyhořelým jaderným palivem?, Vesmír 79, 191, 2000/4

doba setrvání použitého paliva	cca 5-13 let	cca 70 let	trvale
místo	bazény vyhořelého paliva EDU a ETE	sklady Elektrárny Dukovany sklad Elektrárny Temelín záložní úložiště Skalka	hlubinné úložiště
zodpovídá	energetická společnost ČEZ, a. s.		SÚRAO - Správa úložišť radioaktivních odpadů
dozor vykonává	Státní úřad pro jadernou bezpečnost		
finanční prostředky	příslušný rozpočet ČEZ, a. s.	jaderný účet (odvody ČEZ, a. s.)	

12. Schéma konce jaderného palivového cyklu v České republice.

elektrárny využívají obalové soubory, které jsou transportní i skladovací. Zavezení vyhořelého paliva se provede v jaderné elektrárně, takže ve skladu samotném se pracuje výhradně s plně hermeticky uzavřeným palivem.

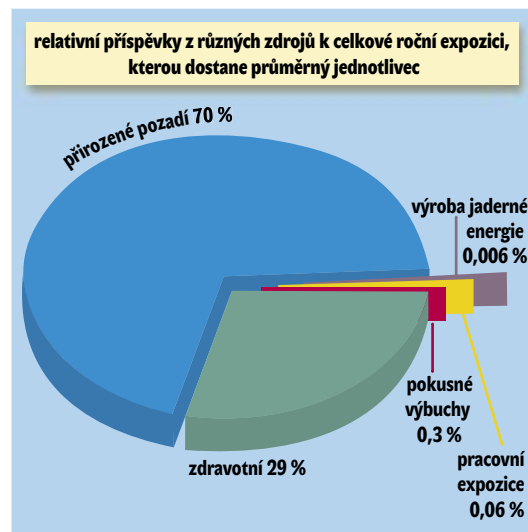
Na soubor, ve kterém bude vyhořelé palivo po etapě skladování definitivně uloženo, jsou kladeny jiné požadavky než na obalové soubory pro skladování a transport. Nemusí například zajišťovat vysokou stínicí schopnost, ale musí naopak zachovat po dlouhou dobu těsnost i při kontaktu s vodou. Jiné jsou také požadavky na odvod tepla. Například se předpokládá, že úložný obalový soubor pro palivo VVER 440 pojme pouze 7 palivových souborů. Když se úložný obalový prostor naplní a uzavře, soubor se převezde do podzemní části skladu, vybudované v hloubkách 300 až 1000 metrů pod povrchem, a umístí se do lože z bentonitu nebo jílu. Bentonit při styku s vodou zvětšuje objem, a tím vytváří v okolí úložného obalového souboru další hermetické těsnění. Vrstva nadložní horniny spolu s uměle vytvořenými bariérami je zárukou, že radionuklidy nezačnou unikat do biosféry ani po dlouhé době desítek tisíc let. Výběr vhodné lokality pro hlubinné úložiště je dlouhodobý projekt, který v České republice řídí nikoliv provozovatel jaderných elektráren (ten by již ve vzdálenějším časovém horizontu nemusel existovat), ale - obdobně jako v jiných zemích - stát, a to prostřednictvím Správy úložišť radioaktivních odpadů. Náklady na přípravu a realizaci hlubinného úložiště budou čerpány z jaderného účtu vytvořeného odvody z prodeje elektřiny každou jadernou elektrárnou. Pro umístění hlubinného úložiště jsou vhodné pouze stabilní a neporušené geologické formace. Kritéria na volbu hlubinného úložiště jsou specifikována doporučeními MAAE. Není například možné využít stará důlní díla, budovaná téměř výhradně v nehomogenních masivech, ve kterých byla navíc dolování a odstřely narušena tektonika horninových vrstev. Hlubinné úložiště bude otevřeno novým důlním dílem v důkladně prozkoumaném geologickém prostředí. Hostitelským masivem může být hornina, která se prokazatelně nezmění po dobu několika milionů let a lze předpokládat, že zůstane stabilní i nadále.

Hlubinné úložiště a veřejnost

Přestože hlubinné úložiště budou projektována s životností „na věky“, lze se zřetelem na vyčerpávání všech paliv včetně jaderných očekávat, že již generace v nejbližších stoletích

budou materiály z úložišť potřebovat. Sklady vyhořelého paliva a hlubinné úložiště nejsou problémové z hlediska techniky, ale jsou kartami v politických hrách a předmětem tlaku vyvolávaného odpůrci jaderné energetiky. Tím větší význam má pravdivé informování veřejnosti, které by zvýšilo přijatelnost takového díla a poukázalo na ohromné finanční částky, které vybraný region získá z jaderného účtu pro vlastní rozvoj. Kompenzace pro nejbližší okolí jaderných zařízení jsou opodstatněné, jestliže má ze stavby v sousedství užitek široká veřejnost. Z obdobných staveb mohou mít neinformovaní obyvatelé přirozený strach jako z něčeho neznámého. Ani přes veškeré úsilí nelze dosáhnout souhlasu všech, a nejen pro úložiště jaderného paliva, ale - jak ukazuje současná praxe - ani pro další stavby, jako jsou dálnice, průmyslové zóny, v poslední do-

13. Skladovací obalový soubor typu CASTOR - jaderná elektrárna Dukovany.



14. V porovnání s přirozeným pozadím i s dávkami přicházejícími z využití radionuklidů v medicíně přispívá jaderná energetika k roční dávce nepatrně.

bě i větrné elektrárny a další celospolečensky významné akce. Nelze ani zajistit informovanost někoho, kdo informován být nechce.

Jaderných paliv je dostatek. V současné době představují známé zásoby uranu 2,3 megaton (Mt) a jeho celkové těžitelné zásoby desítnásobek. Společně s uranem z moří, z hornin a z thoria z hornin představují těžitelné zásoby nejméně 160 Mt. Těžitelné zásoby lithia v horninách a mořích jsou 1,2 Gt a těžitelné zásoby deuteria 200 Gt. Proto by identifikované zásoby využívané v lehkododných reaktorech bez recyklování vystačily na 50 až 100 let, v rychlých reaktorech na 5000 roků. Pokud by měl jaderněenergetický systém využívající reaktory na rychlých neutronech zásobovat lidstvo primární energií, jakou spotřebovává celý svět, potom by těžitelné zásoby štěpných a množivých materiálů vystačily na více než 30 tisíc let, zásoby lithia pro fúzní reaktory na 46 milionů let. Protože takový potenciál nemá žádné jiné palivo, je jaderná energetika příslibem energetické budoucnosti lidstva. Nutnou podmínkou přijatelnosti jaderné energetiky v současnosti i budoucnosti je však průhledné řešení celého palivového cyklu.