

No. 3 | únor 2006 | česká verze

Jaderná energie: Mýtus a skutečnost

Jaderný palivový cyklus

***Jürgen Kreuzsch, Wolfgang Neumann,
Detlef Appel (kapitoly 1 a 3),
a Peter Diehl (kapitola 2)***

Obsah:

1	Jaderný palivový cyklus	4
2	Těžba uranu	6
3	Nakládání s jaderným odpadem	21
4	Literatura	39

Publikace tématické řady Jaderná energetika

Jaderný palivový cyklus

Jürgen Kreuzsch, Wolfgang Neumann, Detlef Appel a Peter Diehl

© Heinrich Böll Foundation 2006

Všechna práva vyhrazena.

Spoluvydavatel:  wise

Publikace nemusí nutně vyjadřovat názor Nadace Heinricha Bölla.

Publikace regionální kanceláře Nadace Heinricha Bölla pro jižní Afriku, ve spolupráci s vedením Nadace Heinricha Bölla.

Kontakt:

Heinrich Böll Foundation Regional Office for Southern Africa, PO Box 2472; Saxonwold, 2132; South Africa.

Phone: +27-11-447 8500. Fax: +27-11-447 4418. info@boell.org.za

Heinrich Böll Foundation, Rosenthaler Str. 40/41, 10178 Berlin, Germany.

Tel.: ++49 30 285 340; Fax: ++49 30 285 34 109; info@boell.de; www.boell.de/nuclear

České vydání vzniklo ve spolupráci se sdružením Jihočeské matky, Calla a Hnutím DUHA.



Hnutí DUHA
Friends of the Earth Czech Republic



Jihočeské matky

O autorech

Detlef Appel vystudoval geologii v Hanoveru a ve Vídni. V letech 1971 až 1981 byl zaměstnán jako pracovník výzkumu na univerzitě v Hanoveru, kde v roce 1979 získal doktorát. Od roku 1981 pracuje jako nezávislý konzultant a inspektor v oboru geologie a životního prostředí. Zaměřuje se především na obecné strategie a konkrétní řešení v ochraně půdy a podzemních vod, analýzy dopadů na životní prostředí, skládky, opuštěná znečištěná území a konečné uložení radioaktivního odpadu.

Peter Diehl se začal zabývat tématem těžby uranu v roce 1982, kdy se připojil k regionálnímu ekologickému sdružení, které protestovalo proti otevření nového uranového dolu na jihozápadě Německa. Na přelomu 80. a 90. let pomáhal vytvářet síť evropských ekologických organizací zabývajících se těžbou uranu. Od roku 1995 pracuje pro Světový energetický informační servis (WISE), nevládní organizaci sídlící v Amsterdamu, která poskytuje informace a poradenství protijaderným skupinám z celého světa.

Jürgen Kreuzsch (1952) vystudoval geologii v Marburgu a Hanoveru, se specializací na geofyziku, geologické inženýrství a hydrogeologii. Od roku 1980 pracoval jako inspektor a konzultant pro Gruppe Ökologie e.V. se zaměřením na ukládání radioaktivních a toxických chemických odpadů. Od roku 1988 je výkonným ředitelem firmy intac GmbH, která poskytuje konzultační, inspekční a projekční služby v oblasti techniky životního prostředí.

Wolfgang Neumann je fyzik. Pracuje na tématech spojených s jadernou energetikou pro Gruppe Ökologie na Institut für ökologische Forschung und Bildung e.V. v Hanoveru. Jako inspektor a odhadce poskytuje poradenské služby občanským sdružením, ekologickým organizacím, poslancům, agenturám i úřadům na federální, státní i regionální úrovni. K danému tématu zpracoval řadu studií a posudků. Je členem Komise pro bezpečnost reaktorů (RSK) a Komise pro radiační ochranu (SSK) při Spolkovém ministerstvu životního prostředí a reaktorové bezpečnosti. Dříve pracoval jako člen „Radiální komise“ v organizaci Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V.

1 Jaderný palivový cyklus

Využívání jaderné energie vyžaduje fungování několika různých typů průmyslových závodů, přičemž provoz každého z nich je spojen se specifickými riziky. Od prachu v uranových dolech, přes potenciální i faktickou radioaktivní zátěž personálu i obyvatelstva při běžném provozu a nehodách v jaderných zařízeních, až po možnou kontaminaci podzemních vod v okolí úložiště radioaktivních odpadů.

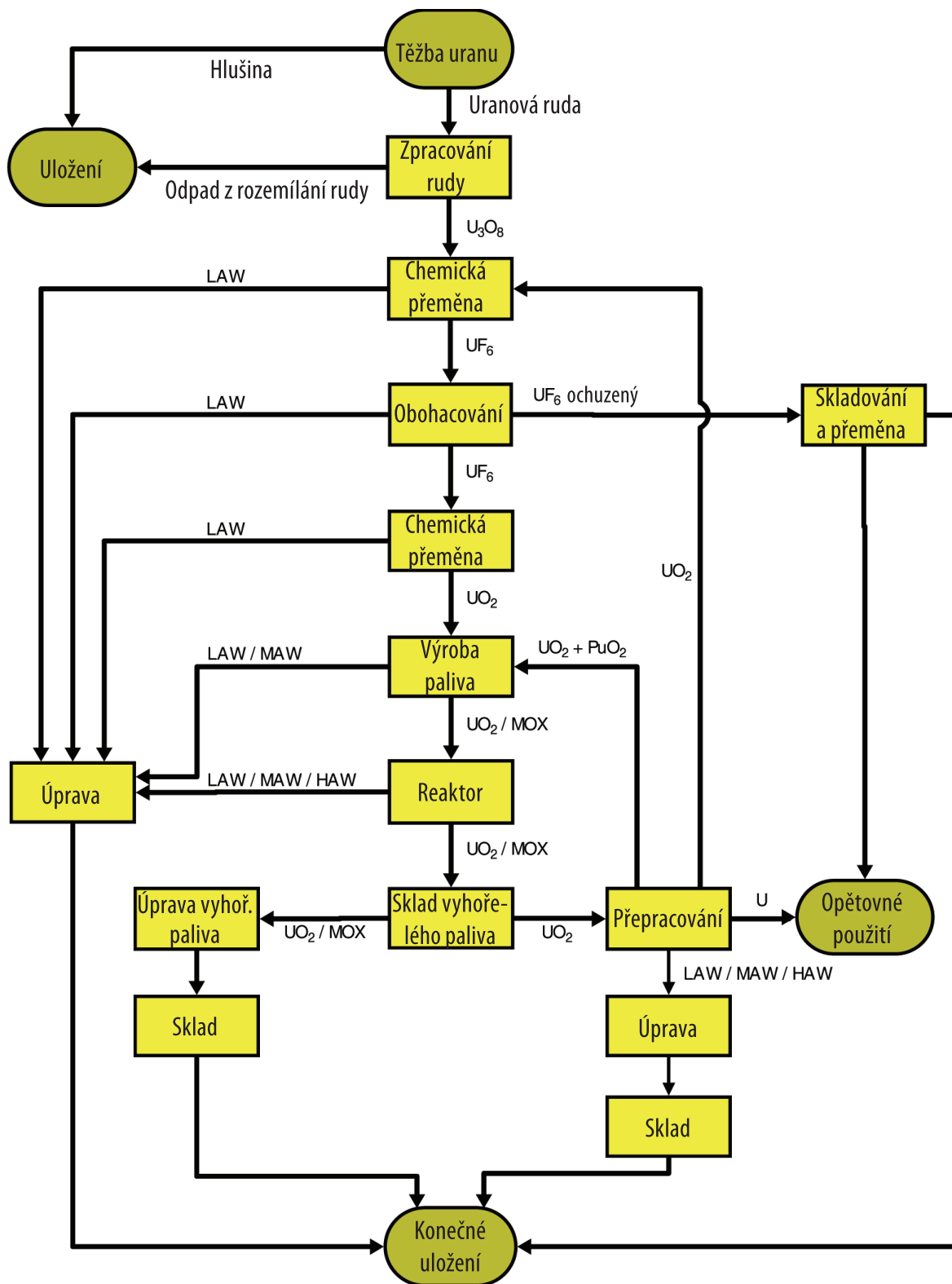
Nezbytné kroky, které je třeba učinit, aby se z uranu stalo palivo pro jaderný reaktor, jsou schematicky znázorněny na následující straně. Po použití uranového paliva v reaktoru a nezbytné době skladování existují dvě možnosti, jak s ním naložit. První možností je úprava vyhořelého paliva a následné „přímé“ konečné uložení, druhou možností je přepracování. Přepracováním se rozumí separování uranu a plutonia z vyhořelého paliva, výroba nového paliva ze získaného materiálu a opětovné použití v reaktoru. Většina států provozujících jaderné elektrárny přepracování vyhořelého paliva nevyužívá. Podrobnější informace o přepracování jsou uvedeny v dalších kapitolách.

Při obohacování vzniká jako odpadní vedlejší produkt ochuzený uran. Každý obohacovací závod vyprodukuje několik tisíc tun tohoto materiálu ročně. Zatím není zřejmé, jakým způsobem bude se stále radioaktivním ochuzeným uranem naloženo v budoucnosti. Může se stát, že mimo jaderný palivový cyklus se podaří využít pouze malou část, zatímco zbytek bude třeba bezpečně uložit.

Radioaktivní odpad produkuje každé jaderné zařízení. Podle aktivity se odpad dělí do tří kategorií na nízkoaktivní (LAW), středněaktivní (MAW) a vysokoaktivní (HAW). V porovnání s ostatními kategoriemi tvoří vysokoaktivní odpad pouze malou část objemu, ale je v něm koncentrována většina celkové aktivity. K jeho hlavním složkám patří především vyhořelé palivo určené ke konečnému uložení, vitrifikované štěpné produkty separované jako odpad při přepracování a materiál zaktivovaný v reaktoru. Středně a nízkoaktivní kategorie zahrnují širší spektrum odpadu. Množství odpadu závisí na typu reaktoru a koncepci nakládání s odpady, která se liší stát od státu. Například německý reaktor PWR o výkonu 1300 MWe vyprodukuje každoročně 60 m³ středně a nízkoaktivního odpadu a 26 tun vyhořelého paliva. V důsledku likvidace reaktoru po ukončení provozu vznikne 5700 m³ převážně nízkoaktivního odpadu. Po skončení pětaticetileté životnosti všech reaktorů bude v Německu třeba uložit 300 000 m³ nebezpečného odpadu.

Úložiště pro definitivní uložení radioaktivního odpadu musí být vybudováno bez ohledu na to, zda země využívá přepracování vyhořelého paliva. Palivo MOX, vyráběné z materiálu získaného přepracováním, se totiž po svém použití již podruhé nepřepracovává a musí se uložit jako vyhořelé. Ve Francii sice proběhly pokusy o přepracování vyhořelého paliva MOX, ale jejich aplikace v průmyslovém měřítku zatím není myslitelná. Zatímco úložiště pro vyhořelé palivo zatím nebylo nikde na světě postaveno, zařízení pro ukládání středně a nízkoaktivních odpadů některé země provozují. Co nejrychlejší vybudování maximálně bezpečného úložiště se stalo nezbytností pro všechny státy využívající jadernou energetiku. Při pečlivém výběru lokality a provedení stavby může konečné uložení nabídnout bezpečnější řešení než ostatní zmiňované možnosti. Zátěže zděděné po jaderné energetice musejí být zlikvidovány.

Obrázek 1. Zjednodušené schéma palivového cyklu s přepracováním a bez přepracování



Zdroj: Gruppe Ökologie

2 Těžba uranu

Úvod

Éra velkokapacitní těžby začala po 2. světové válce, kdy se z uranu stala strategická surovina. Úsilí o získání materiálu pro výrobu atomových zbraní zpočátku ignorovalo dopady na zdraví dělníků i životní prostředí a nehlédlo na ekonomické náklady. Spojené státy získávaly uran z řady různých zdrojů, zejména z vlastních a kanadských dolů. Sovětský svaz, který si zpočátku nebyl vědom existence větších nalezišť na svém území, vybudoval průmysl těžby uranu na území svých satelitů – především v Československu a východním Německu, ale i v Maďarsku a Bulharsku. V 50. letech pracovalo ve východoněmeckém dole „Wismut“ v krutých podmínkách 100 000 dělníků, kteří vytěžili podobné množství uranu jako v současnosti v kanadských dolech s kvalitní rudou několik set lidí.

Postupně se uran stával komerční surovinou pro jaderné elektrárny a v sedmdesátých letech se situace změnila. Vlády přestaly být výhradním odběratelem a vytvořil se trh s uranem. Pozitivním důsledkem bylo posílení environmentálních standardů těžby. Po skončení studené války byla utlumená poptávka po uranu ze strany armád a likvidované zásoby jaderných zbraní se dokonce staly sekundárním zdrojem uranu. Uran pocházející z likvidace jaderných hlavic v současné době pokrývá polovinu poptávky ze strany jaderného průmyslu, což v důsledku znamená, že se vyplatí provozovat jen ekonomicky nejefektivnější doly. Vzhledem k tomu, že lze snadno předpovědět vyčerpání sekundárních zdrojů, a s přihlédnutím k záměru výstavby nových jaderných elektráren v některých zemích můžeme předpokládat další změnu situace. Uran se opět může stát vzácným zdrojem, který musí být těžen za cenu vysokých finančních nákladů a vážných dopadů na životní prostředí.

Těžba uranu: technologie a její dopady

S průměrnou koncentrací v zemské kůře na úrovni 3 g/t není uran vzácným kovem. Těžba ovšem dává smysl pouze v nalezištích s koncentrací dosahující minimálně 1000 g/t (0,1 %); ruda s nižší kovnatostí bývá těžena pouze za výjimečných okolností. Těžitelné zásoby se nacházejí v mnoha ložiscích v různých částech světa. Jednotlivá ložiska se přitom liší podle geologických podmínek, velikosti, kovnatosti rudy a přístupnosti z pohledu těžby. Například v lokalitě Colorado Plateau na západě Spojených států, kde se nachází uranová ruda s kovnatostí 0,1 až 0,2 %, se uran, až do poklesu ceny na konci osmdesátých let, těžil v několika ve stovkách malých dolů. Ve východním Německu, Československu nebo v kanadském Elliot Lake se uranová ruda, převážně s nízkou kovnatostí, těžila po desítky let ve velkých podzemních dolech. Náklady na těžbu ve východním Německu dosahovaly v roce 1990, kdy byla ukončena, desetinasobku ceny uranu na světových trzích.

Po skončení studené války mohly pokračovat v těžbě pouze ekonomicky efektivní doly. V současné době se nejkvalitnější ruda těží v kanadské provincii Saskatchewan v podzemním dole McArthur River (dosahuje mimořádné kovnatosti 17,96 %), nejhudší ruda (s kovnatostí 0,029 %) se ve velkém měřítku těží v povrchovém dole Rössing v Namibii.

Ve většině případů se uran těží konvenčním způsobem v povrchových a hlubinných dolech. S výjimkou několika nalezišť vysoce kvalitní rudy v kanadském Saskatchewanu, se kovnatost pohybuje pod 0,5 %, což znamená nutnost vytěžení velkého objemu rudy kvůli zisku určitého množství uranu. Horníci v dolech vdechují prach a radioaktivní plyn radon, čímž jsou vystaveni riziku rakoviny plic. Zejména v počátcích těžby uranu v poválečných letech vedlo nedostatečné větrání dolů k extrémně vysokým koncentracím prachu a radonu. V roce 1955 se typická koncentrace radonu v šachtách dolu Wismut pohybovala kolem 100 000 Bq/m³, se špičkovými hodnotami do 1,5 miliónu Bq/m³. Mezi lety 1946 a 1990 zemřelo na rakovinu plic 7 163 východoněmeckých uranových horníků. Práce v dole byla identifikována jako příčina vzniku onemocnění u většiny z nich – v 5 237 případech. Kongres Spojených států přiznal odpovědnost vlády za zdravotní problémy uranových horníků (většinou se jednalo o Navahy), když v roce 1990 schválil zákon o kompenzacích pro postižené

ozářením. Kvůli administrativním překážkám a nízkému objemu vyčleněných prostředků se ovšem horníci (či spíše jejich potomci) dočkali kompenzace až po novele z roku 2000.

Během těžby se z dolů musí odčerpat velké množství kontaminované vody, která se vypouští do řek a jezer. Například odpadní voda z kanadského dolu Rabbit Lake způsobila prudké zvýšení koncentrace uranu v usazeninách na dně jezera Wollaston, konkrétně v zátocce Hidden Bay. Zatímco přirozená koncentrace uranu v usazeninách nedosahuje ani 3 $\mu\text{g/g}$, v Hidden Bay dosáhla v roce 2000 úrovně 25 $\mu\text{g/g}$ a poté se každoročně zdvojnásobila až na 250 $\mu\text{g/g}$ v roce 2003. V říčních usazeninách v důlní oblasti Wismut Ronneburg byla naměřena koncentrace uranu a radia s aktivitou 3000 Bq/kg, což znamená stonásobek přírodního pozadí.

Odvětrávání dolů nutné pro snížení ohrožení zdraví horníků znamená uvolňování radioaktivního prachu a radonu do okolí, čímž narůstá riziko rakoviny plic u okolního obyvatelstva. Například z bývalého německého dolu Schlema-Alberoda uniklo v roce 1993 do ovzduší 7426 miliónů m^3 (235 m^3/s) kontaminovaného vzduchu s koncentrací radonu 96 000 Bq/ m^3 .

Hlušina vzniká při odstraňování skrývky v povrchových a při hloubení šachet a štol v podzemních dolech. Haldy hlušiny obsahují v porovnání s běžnou horninou zvýšené množství radionuklidů. Na dalších haldách končí ruda, která je příliš chudá a nevyplatí se zpracovávat. Tyto haldy ohrožují zdraví obyvatel i životní prostředí ještě po uzavření dolu, neboť se z nich uvolňuje radon a dešťová voda vymývá radioaktivní a toxické materiály. Haldy kolem uranového dolu Wismut v oblasti Schlema/Aue mají celkový objem 47 miliónů m^3 zabírají plochu 343 hektarů. Hlušina byla často ukládána na příhodných místech v bezprostředním sousedství obydlených území. V důsledku tohoto postupu narostla například koncentrace radonu v ovzduší ve městě Schlema na 100 Bq/ m^3 , v některých čtvrtích až na 300 Bq/ m^3 , než byla hlušina zakryta. Nezávislý ekologický institut odhaduje dopad uvedených koncentrací jako riziko vzniku rakoviny plic u dvaceti (resp. šedesáti) obyvatel z tisíce. Hlušina byla také často rozemleta na štěrk a použita jako stavební materiál při stavbě silnic a železnic. Materiál se zvýšenou úrovní radioaktivity se tak rozšířil do dalších oblastí.

V některých případech se uran získává z málo kvalitní rudy **milířovým loužením**. Jedná se o případy, kdy se ekonomicky nevyplatí chudou uranovou rudu rozemílat. Při milířovém loužení, které může být podle použité kapaliny kyselé nebo alkalické, se nalije příslušné množství loužidla (například kyseliny sírové) na špičku kuželové haldy a během protékání rozpouští rudu. Roztok se zachytává v nádrži pod haldou a odvádí se do zpracovacího závodu. V Evropě byla tato technologie do roku 1990 používána v Maďarsku a východním Německu.

Během loužení představuje „milíř“ nebezpečí úniku prachu, radonu a loužící kapaliny. Po skončení procesu loužení mohou nastat dlouhodobé problémy v důsledku samovolného loužení, ke kterému může dojít, když ruda obsahuje pyrit (k podobným případům došlo v Německu a v kanadské provincii Ontario). Za přístupu vody a vzduchu může uvnitř haldy dojít k reakci vedoucí ke vzniku kyseliny sírové a následnému dlouhotrvajícímu vymývání uranu a dalších látek způsobujících kontaminaci. Tato situace může vést k trvalé kontaminaci podzemní vody.

Přestože milířové loužení pozbylo významu po poklesu cen uranu, nelze vyloučit jeho návrat v případě oživení těžby chudých rud.

Alternativou ke konvenčním těžebním postupům je **chemická těžba** uranu loužením. Při použití této technologie se vyvrtanými dírami přivádí k podzemnímu uranovému ložisku kyselá nebo alkalická loužící kapalina (například kyselina sírová) a roztok obsahující uran se čerpá zpátky na povrch. Narozdíl od konvenční těžby nevyžaduje chemická těžba transport rudy z ložiska. Popsanou technologii lze využít pouze v případě, že se ložisko uranu nachází maximálně 200 m pod povrchem a je obklopeno nepropustnou horninou.

K výhodám této technologie patří nižší riziko poškození zdraví dělníků v důsledku havárie nebo ozáření, nižší náklady a eliminace hald hlušiny a odpadu z rozemílání. Mezi hlavními nevýhodami je třeba zmínit riziko úniku loužící kapaliny mimo ložisko s následnou vážnou kontaminací podzemní vody a nemožnost obnovení přírodních podmínek v místě loužení po skončení těžby. Kontaminované kaly se ukládají buď v povrchových nádržích nebo injektují do podzemních úložných „studní“.

Historicky byla velkokapacitní chemická těžba uranu loužením doprovázená pumpováním miliónů tun kyseliny sírové pod zem provozována ve Stráži pod Ralskem v České republice, na několika místech v Bulharsku a v mírně pozměněné podobě ve východoněmeckém Königsteinu. V případě Königsteinu bylo do rudného ložiska jako součást loužící kapaliny injektováno celkem 100 000 tun kyseliny sírové. Po uzavření dolu zůstalo 1,9 miliónu m³ roztoku pod zemí, kde nadále docházelo k rozpouštění hornin, a dalších 0,85 miliónu m³ cirkulovalo mezi místem těžby a rekultivačním závodem. Kapalina obsahuje vysoké koncentrace kontaminujících látek, které mnohonásobně překračují standardy povolené pro pitnou vodu: u kadmia 400×, u arsenu 280×, u niklu (130×), u uranu (83×) atd. Odpadní kapalina představuje vážné nebezpečí pro regionální zásobu podzemní pitné vody. Dopady na podzemní vodu jsou ovšem daleko vážnější v případě české Stráže pod Ralskem, kde bylo pod zem napumpováno 3,7 miliónu tun kyseliny sírové. V oblasti těžby se na ploše 5,74 km² nachází 28,7 miliónu m³ kontaminované kapaliny. Ta navíc horizontálně i vertikálně pronikla mimo těžební oblast a kontaminovala území o ploše 28 km² a 235 miliónu m³ podzemní vody.

Po poklesu ceny uranu v devadesátých letech zůstala chemická těžba jediným domácím zdrojem uranu ve Spojených státech. V současné době opět získává význam při těžbě chudých rud – Austrálie, Rusko, Kazachstán a Čína připravují nové projekty.

Ruda vytěžená konvenčním způsobem v povrchových nebo hlubinných dolech je nejdříve rozdrvena a promývána v **uranových mlýnech**. Mlýn bývá většinou umístěn v blízkosti dolu z důvodu omezení přepravní vzdálenosti. Následně se uran extrahuje pomocí hydrometalurgických procesů. Ve většině případů se jako rozpouštěcí činidlo používá kyselina sírová, lze ovšem využít i alkalické loužení. Protože z rudy se nevyplavuje pouze uran, ale i další prvky jako molybden, vanad, selen, železo, olovo a arsen, musí být uran z roztoku separován. Výsledný produkt zpracování v uranovém mlýnu se nazývá „žlutý koláč“, jedná se oxid uranu U₃O₈ obsahující řadu příměsí. Žlutý koláč se přechovává a přepravuje v sudech. Hlavní riziko spojené s rozemíláním uranové rudy představuje vysoká prašnost. V případě uzavřených mlýnů je třeba počítat s možností bezpečného ukládání značného množství radioaktivního odpadu.

Odpad z uranových mlýnů má formu kalu, který se ukládá v usazovacích nádržích. Množství tohoto odpadu prakticky odpovídá množství uranové rudy, protože separovaný uran představuje pouze malý zlomek celkové hmoty. Množství odpadu připadající na jednu tunu uranu odpovídá převrácené hodnotě koncentrace uranu v rudě.

Patrně největší nádrž na odpad z uranových mlýnů se nachází u uranového dolu Rössing v Namibii, obsahuje 350 miliónů tun kalu. Největší skládka tohoto odpadu ve Spojených státech a Kanadě obsahuje 30 miliónů tun pevného materiálu, ve východním Německu 86 miliónů tun.

Ve dvacátém století docházelo k případům, kdy byl odpad z uranových mlýnů jednoduše nekontrolovaně vypouštěn do okolí. K nejzávažnějšímu případu došlo v Mounaně v africkém Gabonu, kde tato praxe trvala do roku 1975. Pobočka francouzské firmy Cogéma zde přitom těžila uran od roku 1961. Během prvních patnácti let provozu byl odpad z rozemílání uranu vypouštěn do blízkého potoka. Celkem tak bylo do okolí rozptýleno 2 milióny tun odpadu, který kontaminoval vodu a poté se vytvořil usazeninu v říčním údolí, kam se potok vléval. Po uzavření dolu v roce 1999 byl naplavený odpad místo bezpečného uložení zasypan vrstvou zeminy.

I přes odseparování části uranu obsahuje odpadní kal všechny složky původní rudy. Protože izotopy s dlouhým poločasem rozpadu z uranové řady (thorium 230, radium 226) zůstanou v kalu, obsahuje odpad 85 % aktivity původní rudy před mletím. Z technických důvodů nelze z rudy separovat všechny uran, kal tedy obsahuje rovněž rezidua uranu. Navíc jsou v kalu zastoupeny těžké kovy a další nebezpečné látky jako arsen a chemická činidla používaná při rozemílání.

Radionuklidy obsažené v odpadu z rozemílání uranu jsou zodpovědné za dvacetkrát až stokrát zvýšenou úroveň záření gama v okolí skládek a odkališť, byť riziko je vzhledem k rychlému poklesu intenzity záření se vzdáleností spíše lokální.

V případě, že povrch odkaliště nebo skládky vyschne, dochází k rozfoukávání jemného písku větrem po okolí. Při silném větru se v okolí východoněmeckých skládek tohoto odpadu stmívalo, neboť obloha byla zatažena mrakem radioaktivního prachu a to i nad vesnicemi položenými

v sousedství. Teprve později byly skládky zakryty. Ve vzorcích odebraných ve zmíněných vesnicích byla naměřena vysoká úroveň radia 226 a arsenu.

Radium 226 obsažené v kalech se postupně rozpadá na radioaktivní plyn radon 222, jehož vdechnutí zvyšuje riziko vzniku rakoviny plic. Radon ze skládky kalu uniká, přičemž jeho množství prakticky nezávisí na množství uranu obsaženého v odpadu. Míra unikajícího radonu závisí především na množství uranu, který byl obsažen v celkovém množství rozemleté rudy. Úniky radonu patří k hlavním nebezpečím přetrvávajícím po uzavření dolu. Úřad pro ochranu životního prostředí Spojených států (EPA) odhaduje zvýšení rizika rakoviny plic mezi obyvatelstvem v blízkosti osmdesátihektarové otevřené skládky odpadu z uranového mlýna na dva případy ze sta.

Protože radon se rychle šíří vlivem větru, dostává velké množství lidí malou přídatnou dávku záření. Přestože riziko pro jednotlivce je malé, nelze jej zanedbat kvůli vysokému počtu dotčených. Celkově EPA odhaduje, že v důsledku existujících skládek radioaktivního odpadu z uranových mlýnů ve Spojených státech zemře na rakovinu plic 500 lidí za sto let, (nebudou-li přijata protiopatření).

Průsaky z kalových nádrží představují další významné riziko, zejména kvůli možné kontaminaci podzemních i povrchových vod. Rovněž hrozí, že se prvky jako uran a arsen dostanou do zásob pitné vody a do masa ryb. Problém průsaků se týká především kyselého odpadu, neboť kyselá prostředí zlepšuje mobilitu radionuklidů a zvyšuje riziko úniku do okolí. V případě, že kaly obsahují pyrit, se kyselá prostředí nevyhnutelně vytvoří kvůli vzniku kyseliny sírové v kalu. Celkový průsak ze skládky kalů v Helmsdorfu u dolu Wismuth byl před rekultivací odhadován na 600 000 m³ za rok, přičemž pouze polovinu uniklého objemu se podařilo zachytit a načerpat zpátky do nádrže. Průsaky znamenaly značnou kontaminační zátěž, kterou lze v násobcích přípustného limitu pro pitnou vodu vyjádřit následovně: sulfáty 24×, arsen 253×, uran 46×. V případě maďarské nádrže na odpadní kaly z rozemílání uranu u města Pécs došlo k postupu kontaminované podzemní vody směrem k městským studnám s pitnou vodou rychlostí 30 až 50 m za rok.

Vzhledem k dlouhému poločasu rozpadu některých izotopů obsažených v kalech, musí být odpad z uranových mlýnů dlouhodobě zabezpečen. Ve skutečnosti ovšem nádrže značně trpí vlivem různých druhů eroze. V důsledku dešťů mohou vzniknout erozní strouhy, k narušení hrází můžou přispět také rostliny a zvířata. V případě zemětřesení, prudkých dešťů nebo záplav mohou usazovací nádrže selhat úplně. K podobným selháním došlo například v roce 1977 v lokalitě Grants v americkém státě Nové Mexiko, kdy se přes hráz přelilo 50 000 tun kalu a několik milionů litrů kontaminované vody nebo v roce 1979 v Church Rock, také v Novém Mexiku, kdy uniklo 1000 tun kalu a 400 milionů litrů kontaminované vody.

Vzhledem ke své jemné pískové struktuře byly vysušené kaly příležitostně využívány jako stavební materiál. V domech postavených z tohoto materiálu ovšem byla zjištěna vysoká úroveň záření gama a radonu. Podle odhadu EPA by u obyvatel žijících v takovém domě vzrostlo riziko vzniku rakoviny plic o čtyři případy na sto lidí.

Rekultivace starých uranových dolů

V počátcích uranového průmyslu těžební společnosti opouštěly své doly po vytěžení ložisek bez jakékoli úpravy. Ve Spojených státech se ani neuzavíraly šachty nemluvě o zabezpečení odpadu. V Kanadě se často odpad z rozemílání uranové rudy sypal přímo do blízkého jezera.

V Kanadě i Spojených státech stále existují stovky bývalých malých uranových dolů, na nichž neproběhla žádná rekultivace. Vlády se stále pokoušejí identifikovat majitele těchto dolů, kteří jsou za rekultivaci odpovědní a v některých případech vládní agentury provádějí rekultivace na vlastní náklady. Jako příklad úspěšné rekultivace uranového dolu může posloužit lokalita Jackpile Paguete v Novém Mexiku. K dokončení se blíží rovněž náročná rekultivace dolu Wismut ve východním Německu.

Nutnost rekultivace se netýká jenom opuštěných konvenčních dolů, ale také míst, kde byla ukončena chemická těžba. V tomto případě musí být bezpečně uloženy odpadní kaly a vyčištěna kontaminovaná podzemní voda. Čištění podzemní vody je velmi zdlouhavé a ani při použití nejmodernější

technologie nemůže vést k dosažení původní kvality. Ve Spojených státech byla snaha o vyčištění vody v mnoha případech zastavena, když po letech čerpání a čištění nedocházelo k viditelnému snížení kontaminace. V těchto případech byly uděleny výjimky z požadovaných standardů.

Zatímco k uvedeným případům docházelo většinou v odlehlých místech, kde podzemní voda není používána jako pitná, v bývalém Sovětském svazu existují místa s neřešenými následky dřívější chemické těžby i v hustě obydlených oblastech. V České republice a východním Německu probíhají programy rekultivací po chemické těžbě, zatímco v Bulharsku byla těžba ukončena bez následné rekultivace.

Odpad z rozemílání uranové rudy se ve většině případů ukládá tak, aby byla omezena možnost jeho úniku do okolí. Myšlenka vrátit tento odpad do místa, odkud byla vytěžena ruda nemusí vždy vést k přijatelnému řešení. Přestože z materiálu byla extrahována většina uranu, nestal se méně rizikovým, spíše naopak. Většina nebezpečných látek (85 % celkové radioaktivity a všechny chemické látky) v materiálu zůstaly, ale v důsledku chemických a mechanických úprav se zvýšila jejich náchylnost k úniku do okolí. Ukládání tohoto odpadu do hlubinných dolů proto většinou nelze doporučit, neboť by zde přišel rychle do styku s podzemní vodou.

Situace je podobná v případě pokusu o ukládání tohoto odpadu v povrchových dolech. Rovněž v tomto případě hrozí kontaminace spodní vody přímo nebo průsakem. Výhodou tohoto způsobu uložení by byla odolnost proti erozi. Ve většině případů se odpad z rozemílání uranové rudy kvůli nedostatku lepších možností ukládá povrchově. Tak může být snáze kontrolováno dodržování požadavků na jeho zabezpečení, ale nezbytně je třeba podniknout opatření proti erozi.

Ve Spojených státech byla v osmdesátých letech pro regulaci ukládání odpadu z rozemílání uranové rudy přijata společná vyhláška Úřadu pro ochranu životního prostředí (EPA) a jaderného dozoru (NRC). Vyhláška definuje maximální přípustné koncentrace kontaminujících látek v půdě a jejich přípustný únik (konkrétně v případě radonu) a stanoví časový úsek, po který musí rekultivační opatření efektivně plnit funkci zábrany. Většinou jde o 200 až 1000 let s požadavkem na fungování bez aktivní údržby. Na základě této vyhlášky bylo rekultivováno dvanáct skládek. Část z nich byla rekultivována beze změny svého umístění pomocí zarovnaní a zakrytí mnoha vrstvami zeminy a kameniva, z jiných byl odpad přemístěn na vhodnější místo, kde nehrozilo zaplavení ani kontaminace podzemní vody.

Naproti tomu v Kanadě se pro rekultivace zátěží z uranové těžby uplatňují méně přísná pravidla. Například v případě velkého objemu odpadů z rozemílání uranové rudy v oblasti Elliot Lake se mezi opatření počítá i zalití vodou jako jediná „ochranná bariéra“. V případě hospodaření s odpady z uranové těžby na území bývalého Sovětského svazu a jeho satelitů existují velké rozdíly podle jednotlivých států a oblastí. Zatímco ve východním Německu, Maďarsku a Estonsku probíhají rekultivace, na Ukrajině, v České republice, Kazachstánu a Kyrgyzstánu zatím k zabezpečení odpadu nedošlo.

V kazašském Aktau se nachází 100 miliónů tun odpadů z rozemílání uranové rudy, které dosud nebyly ani provizorně ochráněny, takže prach je odnášen větrem do okolí. V Kyrgyzstánu bylo velké množství odpadu umístěno na strmých horských svazích ohrožených sesuvem půdy.

Náklady na rekultivace se pohybují ve velmi širokém rozmezí. Na horní hranici patří náklady na velkoplošné rekultivace financované vládami Německa a Spojených států. Vztáhneme-li náklady na tyto rekultivace ke hmotnostní jednotce uranu vytěženého v příslušných lokalitách, dostaneme cenu 14 dolarů na libru U_3O_8 . Tato hodnota převyšuje cenu uranu z období před oživením trhu. Na spodní hranici se nachází případ kanadské lokality Elliot Lake, kde se v důsledku mimořádně nízkých ekologických standardů náklady na rekultivaci dostaly na 0,12 dolaru na libru vyprodukovaného U_3O_8 .

Aby v budoucnosti nebylo nutné likvidovat zátěže z těžby uranu z veřejných prostředků, musejí v současné době provozovatelé dolů vytvářet fondy na jejich likvidaci již od zahájení těžby. Ovšem ani tento postup nemůže peníze daňových poplatníků stoprocentně ochránit. Například z fondu, který na zajištění odpadu z rozemílání uranové rudy v Moabu ve státě Utah vytvořila před svým bankrotem společnost

Atlas Corp's, bude možné pokrýt pouze 3 % nákladů, jejichž celková výše se dohaduje na 300 milionů dolarů. Pro případ obřího australského dolu Ranger Mine bylo publikováno, že náklady na jeho uzavření dosáhnou 176 milionů australských dolarů, přičemž pouze 65 milionů bude možné pokrýt ze stávajících záruk. V případě bankrotu společnosti ERA, která důl provozuje, by daňoví poplatníci museli zaplatit ještě větší část nákladů na rekultivaci.

Zásoby uranu

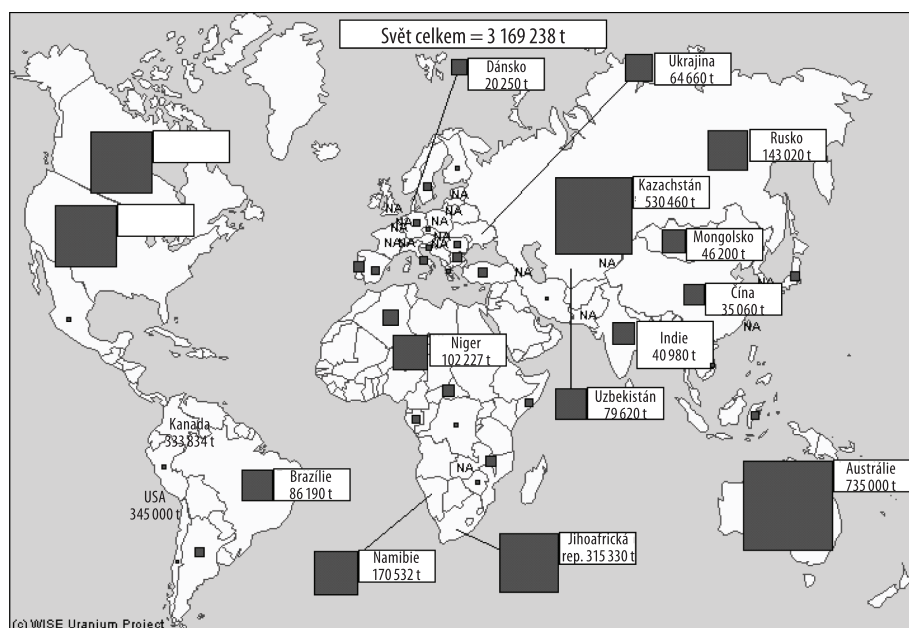
Primární zásoby

Ložiska uranu se většinou klasifikují podle stupně věrohodnosti odhadu velikosti a očekávaných nákladů na těžbu. Za nejrespektovanější zdroj informací o zásobách uranu platí „Červená kniha“ vydávaná Nuclear Energy Agency. Podle této publikace

(NEA 2004) činí celosvětově „známé zásoby“ těžitelné s vynaložením nižších nákladů než 130 dolarů na kilogram uranu (tj. 50 dolarů na libru U_3O_8) zhruba 4,6 miliónu tun. Dále takzvané „neprozkoumané zásoby“ těžitelné za stejnou cenu se odhadují na 6,7 miliónu tun uranu a dalších 3,1 miliónu tun bez omezení těžebních nákladů. Protože odhady „neprozkoumaných zásob“ se zakládají na spekulacích, budeme dále diskutovat pouze „známé zásoby“, do kterých spadají kategorie RAR (věrohodně potvrzené zásoby) a EAR I (odhadované dodatečné zásoby 1. kategorie). Na obrázku 2 je znázorněna mapa rozložení věrohodně potvrzených zásob těžitelných s náklady nižšími než 130 dolarů na kilogram uranu (WUP 2005).

Obrázek 2.

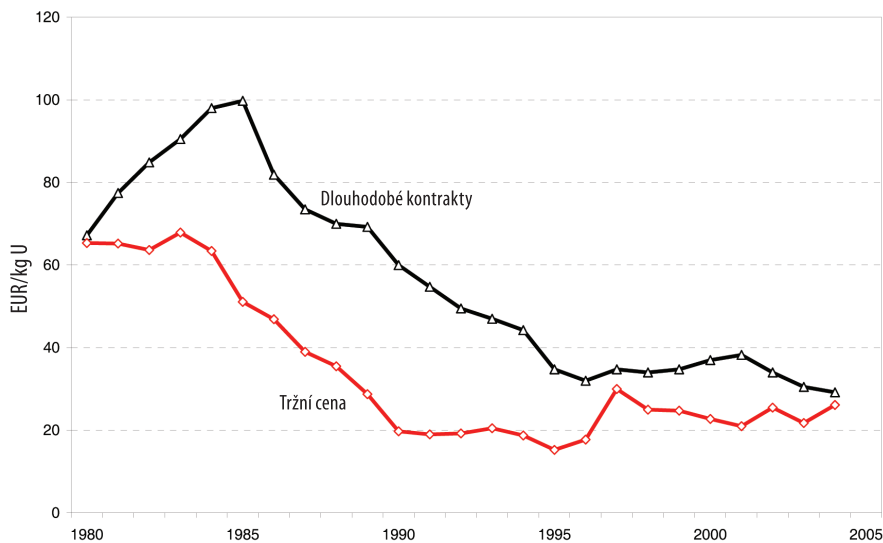
Světové zásoby uranu (RAR – 130 USD/kg U)
věrohodně potvrzené zásoby v tunách U k 1. 1. 2003
při těžebních nákladech 130 USD/kg U nebo nižších (OECD 2004)



Narozdíl od mnoha jiných surovin se ložiska uranu nacházejí na všech kontinentech. Ovšem převážná většina známých zásob leží na území několika málo států, zejména uvažujeme-li ložiska s vysokou kovatostí rudy či těžitelná s nízkými náklady.

Po dosažení maxima ve výši 43 dolarů za libru U_3O_8 na konci sedmdesátých let se tržní cena uranu ustálila na úrovni kolem 10 dolarů za libru U_3O_8 . Na konci roku 2000 klesla dokonce na 7 dolarů, pak ovšem začala prudce stoupat až na 33 dolarů za libru U_3O_8 v říjnu 2005. Vývoj průměrné ceny uranu dodávaného evropským odběratelům na základě okamžitých a dlouhodobých smluv v období 1980 až 2004 je znázorněn na obrázku 3 (ESA 2005).

Obrázek 3. Ceny uranu podle Euratomu



Poznámka: Vzhledem k cenovému vývoji v posledních měsících není graf aktuální. V prosinci 2006 se cena vyšplhala na 63 dolarů za libru U_3O_8 . Závěry této kapitoly však dosud nebyly touto skutečností ovlivněny.

Během dvaceti let, po které trvala nízká cena uranu, poklesly na minimum aktivity spojené s průzkumem nových ložisek. V současné době, zejména poté, co tržní cena uranu v září 2004 překročila hodnotu 20 dolarů za libru U_3O_8 , vzniká řada nových průzkumných společností a tradiční se začínají na uran více soustředit. Výsledkem mohou být nové objevy, které povedou k nárůstu známých zásob. Přestože nelze vyloučit ani nalezení velkých ložisek s vysokou kovaností rudy, pravděpodobnější je, že většina současných pokusů povede k objevu menších a chudších nalezišť. Pouze v případě lokality Shea Creek v kanadské provincii Saskatchewan lze očekávat nález nového ložiska rudy s vysokou kovaností, prvního po dvaceti letech.

Několik uranových ložisek nelze v současné době těžit z politických a sociálních důvodů. Jako nejznámější případ lze uvést ložisko Jabiluka v australském Severním teritoriu. Potenciální důl je obklopen Národním parkem Kakadu uvedeným na seznamu světového dědictví UNESCO, ze kterého byl ovšem administrativně vyňat. Vzhledem k vytrvalému odporu ze strany domorodých kmenů, musela těžební společnost ERA zastavit práce na otevření dolu a odtěženou zeminu navězt zpátky. Dalším příkladem může být projekt těžby uranu loužením v lokalitě Crownpoint ve státě Nové Mexiko, která se nachází na území kmene Navahů. Na žádost zástupců kmene bylo v květnu 2005 pozastaveno povolení k těžbě. Navíc Rada Navahů schválila usnesení, podle kterého se na celém území kmene nesmí těžit ani zpracovávat uran. Usnesení vstoupilo v platnost 29. dubna 2005, může být ovšem zrušeno federálním zákonem.

Rozhodnutím soudu v důsledku žaloby místní ekologické organizace byla v září 2002 rovněž zrušena licence firmy Cogéma na těžbu v lokalitě McClean Lake v kanadské provincii Saskatchewan. Firma ovšem vzápětí požádala o odklad a díky úspěšnému odvolání nakonec soudní spor v březnu 2005 vyhrála. Návrhy na otevření nových uranových dolů v indických státech Žarkand, Andrapradéš, a Megalaja narazily na odpor místních kmenových společenství i ekologických organizací.

Opozice proti těžbě uranu se ovšem neomezuje na domorodé obyvatelstvo a ekologické organizace. Vlády tří australských států (Queensland, Victoria a Western Australia) těžbu uranu zakázaly legislativním opatřením. Tím ovšem neodradily průzkumné společnosti od jejich aktivit na svém území. Představitelé uranového průmyslu totiž věří, že časem může dojít ke změně politiky těchto států, zejména z důvodu vstřícného postoje federální australské vlády k těžbě uranu.

Vedle ložisek, kde se uran těží jako hlavní surovina, existuje několik dolů, ve kterých jde o **vedlejší produkt** získávaný při těžbě jiných nerostů (například zlata, mědi nebo fosfátů).

V Jihoafrické republice se veškerá produkce uranu počítá k vedlejším produktům těžby zlata. Vzhledem k nevýhodnému kursu jihoafrické měny a nízkým cenám uranu na světových trzích v minulých letech ovšem dnes provozuje linku k extrakci uranu pouze jediný zlatý důl (Vaal River). Navíc lze očekávat, že nízká ziskovost řady méně významných jihoafrických zlatých dolů povede k jejich uzavření, což sníží potenciál pro budoucí získávání uranu jako vedlejšího produktu.

V australském dole Olympic Dam se těží velmi rozsáhlé ložisko mědi, přičemž uran se získává jako vedlejší produkt. Navzdory nízké kovnatosti uranové rudy (kolem 0,053 %) dosahuje celkové množství uranu v ložisku na 302 000 tun, což znamená největší lokální zásobu uranu na světě. Provozovatel dolu přišel v nedávné době s návrhem na zvýšení těžby s cílem zdvojnásobit roční produkci.

Fosfátové horniny obsahují v průměru 0,005 až 0,02 % uranu. Potenciální množství uranu ve světových zásobách fosfátů se pohybuje od 5 do 15 miliard tun, které nejsou započítány do výše uvedených odhadů. Hlavní ložiska se nacházejí v Maroku, Mexiku, Spojených státech a Jordánsku. Při běžně používaném zpracování fosfátů zůstává většina uranu jako příměs v hlavním produktu (například ve hnojivech). Byla ovšem vyvinuta řada technologií, které umožňují uran extrahovat. Tím lze z hlavního produktu odstranit nežádoucí příměs a získat alternativní zdroj uranu. Po celém světě je v provozu zhruba 400 závodů na zpracování fosfátů, z nichž by bylo teoreticky možné získat 11 000 tun uranu ročně. Řada zařízení k extrakci uranu byla skutečně postavena (ve Spojených státech, v Kanadě, ve Španělsku, v Belgii, v Izraeli a na Tchaj-wanu), většina z nich ovšem ukončila provoz v období nízkých cen uranu. Jejich opětovné spuštění se ovšem po nárůstu ceny může vyplatit.

Dále existuje několik druhů **vedlejších zdrojů uranu**, které nejsou zahrnuty do odhadů světových zásob. Nejvýznamnějším vedlejším zdrojem by mohl být uran, který se v malých koncentracích nachází ve vrstvách břidlice. Hornina sice v těchto případech obsahuje pouze 0,005 až 0,04 % uranu, ale díky velkému rozsahu ložisek se ve výsledku jedná o značné množství – 169 230 tun v německém Ronneburgu, 254,000 tun ve švédském Ranstadu, a dokonce 4 až 5 miliard tun v lokalitě Chattanooga Shale ve Spojených státech. Ovšem i zastánci jaderné energie shledávají případnou těžbu těchto zásob nejistou: "Přestože břidlicová ložiska představují velkou zásobu uranu, budou vyžadovat velké náklady na jeho získání. Dále by bylo nezbytné vybudovat rozsáhlé doly, zpracovací závody a usazovací nádrže, což by zcela jistě vyvolalo silné ekologicky motivované protesty. Navíc oblast kolem Ronneburgu je součástí mnohamiliardového rekultivačního projektu Wismut. Proto jsou břidlicová ložiska dlouhodobým zdrojem, jehož těžba vyžaduje tržní cenu uranu přes 130 dolarů za kilogram, aby byla ekonomicky výhodná. Nutnou podmínkou těžby je ovšem prosazení projektu přes ekologicky motivovanou opozici, což nelze zaručit v žádném ze tří uvedených případů," (IAEA 2001).

Dalším příležitostně diskutovaným zdrojem uranu je **mořská voda**. Ta obsahuje uran v koncentraci 3 mg/t, ovšem celkové množství se odhaduje na 4 miliardy tun. Výzkum technologií, které by dokázaly tento uran extrahovat, pokračuje, při současných ani předvídatelných cenách ovšem nemůže být získávání uranu z mořské vody konkurenceschopné. Dosud také nebyla posouzena jeho energetická bilance ani dopady na životní prostředí.

Sekundární zdroje

K sekundárním zdrojům uranu počítáme možnosti jeho získání jiným způsobem než z vytěžených rud. Jedná se o recyklovaný uran z vyhořelého paliva, přebytečných jaderných zbraní a odpadu z obohacování (ochuzený uran). Do stejné kategorie patří i strategické zásoby uranu.

Recyklovaný uran z vyhořelého paliva (RepU): Získávání uranu z vyhořelého paliva se dnes praktikuje především v přepracovacích závodech La Hague ve Francii a Sellafield ve Velké Británii. Dosud ovšem byla k výrobě čerstvého paliva použita pouze malá část separovaného uranu. Ani v blízké budoucnosti nelze očekávat změnu v tomto trendu.

Podle nedávné zprávy francouzského sboru auditorů učinila společnost Electricité de France (EdF) opatření k dlouhodobému skladování přepracovaného uranu (RepU) po dobu 250 let. V současné

době se v La Hague přepracovává 850 tun vyhořelého uranového paliva z celkového množství 1050 tun každoročně vyprodukovaného ve Francii (navíc za každý rok přibývá 100 tun vyhořelého směsného paliva MOX, které se nepřepřacovává). Produktem přepracování je 816 tun uranu a 8,5 tuny plutonia, přičemž 650 tun uranu se konverzí upraví do formy stabilního oxidu pro dlouhodobé skladování a použití ve vzdálenější budoucnosti. Uran získaný v bývalém přepracovacím závodě Marcoule nebyl dosud k výrobě čerstvého paliva využit. Dosud zůstává uskladněn v Marcoule ve formě tekutého uranového nitrátu, 3800 tun patří EdF a 4800 tun společně CEA a Cogéma. Použití přepracovaného uranu je problematické z několika důvodů. RepU obsahuje příměsi umělých izotopů U 232 a U 236, což vyžaduje zvláštní opatrnost při jeho zpracování. Izotop U 232 a jeho rozpadové produkty zvyšují dávky záření, kterým je vystavena obsluha, v případě izotopu U 236 se jedná o absorbér neutronů a jeho přítomnost vyžaduje vyšší stupeň obohacení. V důsledku není využití RepU za současné situace na trhu výhodné. Jeho konverze je třikrát dražší než v případě přírodního uranu a navíc obohacení nemůže být provedeno v jediném francouzském obohacovacím závodě (závod Eurodif využívající difúzní technologii), aby nedošlo ke kontaminaci linky. Při výrobě dvou zkušebních dávek paliva pro elektrárnu Cruas byl RepU obohacován v zahraničních (nejspíš ruských) závodech využívajících technologii centrifug.

Zředěný vysoce obohacený uran: vysoce obohacený uran (HEU) z likvidovaných jaderných zbraní může být zředěn na nízké obohacení (LEU) a využit k výrobě jaderného paliva.

V roce 1993 byla uzavřena dohoda, na jejímž základě bude Rusko po dobu dvaceti let dodávat Spojeným státům zředěný vysoce obohacený uran získaný z 500 tun HEU. Toto množství odpovídá 153 000 tun přírodního uranu a práci přepracovacího závodu na úrovni 92 miliónů SWU (Separative Work Units). Každoroční dodávky podle této smlouvy (uran pro výrobu paliva získaný z cca 30 tun HEU, nahrazující zhruba 9000 tun přírodního uranu) stále probíhají a budou pokračovat do roku 2013. Spojené státy využívají také svůj vlastní vysoce obohacený uran. Ke zředění v horizontu do roku 2016 bylo určeno 153 tun HEU, zhruba 39 tun již bylo zpracováno. (NEA 2004)

HEU ovšem vedle vysoké koncentrace U 235 obsahuje i nežádoucí izotop U 234. V případě ředění přírodním uranem by zbytkové množství izotopu U-234 ve výsledném směsném produktu vyžadovalo speciální postup při výrobě paliva. Proto je vhodné přimíchávat k HEU materiál s nízkou koncentrací U 234. V Rusku tento problém řeší opětovným obohacováním ochuzeného uranu (odpad z původního obohacení) na koncentraci 1,5 % U-235, přičemž výsledný produkt využívají k ředění HEU. Rusko tak využívá nadbytečnou kapacitu svých obohacovacích centrifug a naplňuje dohodu se Spojenými státy, aniž by odčerpávalo přírodní uran z vlastních zásob.

Stojí za zmínku, že potřebná práce obohacovacích závodů je v tomto případě větší než ta, která se ušetří díky použití HEU (Diehl 2004). Energie vynaložená v minulosti při obohacování na vysoký stupeň se tedy nevyužije, z HEU se získá pouze surovina.

Ochuzený uran: Odpad z procesu obohacování se nazývá ochuzený uran (DU). Obvykle má formu hexafluoridu uranu (UF₆) a obsahuje zbytkové množství štěpitelného izotopu U 235, což lze využít k opětovnému obohacení.

Od roku 1996 posílají západoevropské obohacovací závody Urenco a Eurodif svůj ochuzený uran k opětovnému obohacení do Ruska. Využívají tak volnou kapacitu obohacovacích kaskád vlastněných Rosatomem (Ruský federální úřad pro atomovou energii – dříve Minatom). Produktem opětovného obohacování je převážně ekvivalent přírodního uranu a určité množství obohacené na úroveň vhodnou pro výrobu paliva. Tyto produkty zpětně odebírají Urenco a Eurodif, zatímco sekundární ochuzený uran zůstává v Rusku a prochází ještě jednou procesem obohacování. Tím se získá další ekvivalent přírodního uranu a mírně obohacený uran vhodný k ředění HEU na koncentraci vhodnou pro výrobu paliva. Zbývající finální odpad, který stále obsahuje dvě třetiny objemu dovezeného materiálu, zůstává v Rusku. Informace o jeho dalším osudu nejsou dostupné, pouze v srpnu 2005 Rosatom uvedl, že tento odpad bude využit v rychlých reaktorech.

Konsorcium Cogéma/Areva v květnu 2005 oznámilo, že podepsalo smlouvu o transferu technologie s ruskou firmou Tenex, který má umožnit defluorizaci tj. zpětnou konverzi hexafluoridu uranu (UF₆) na U₃O₈. Hodlá tak upravovat ochuzený uran do formy vhodné pro skladování.

V současnosti posílají Urenco i Eurodif do Ruska každoročně 7000 tun ochuzeného uranu a zpátky dostávají 1100 tun uranu zpětně obohaceného na úroveň přírodního materiálu ve formě UF_6 . Eurodif navíc dostává 130 tun uranu obohaceného na 3,5 % rovněž ve formě UF_6 . Pro Urenco a Eurodif spočívá hlavní přínos této praxe v tom, že ušetří náklady za ukládání ochuzeného uranu. Naproti tomu Rosatom využívá příležitost k využití nadbytečné kapacity obohacovacích závodů. Urenco předpokládá, že spolupráce s Ruskem na opětovném obohacování bude ukončena po roce 2010. Podrobnosti o opětovném obohacování lze získat v dalších publikacích (Diehl 2004).

Poroste-li nadále cena uranu, lze předpokládat, že společnosti provozující obohacovací závody přistoupí k efektivnějšímu využívání suroviny, což znamená pokles koncentrace U-235 v ochuzeném uranu. Ke získání stejného množství obohaceného uranu, tak bude třeba méně přírodního za cenu vyšší spotřeby energie v obohacovacím závodě.

Strategické rezervy přírodního a níže obohaceného uranu: O strategických rezervách uranu ve světě máme k dispozici minimum informací. Jedná se o jeden z hlavních důvodů nejisté budoucnosti trhu s uranem. Podle hrubého odhadu činí strategické zásoby přírodního uranu 41 633 tun a skladovaný obohacený uran by mohl nahradit 23 440 tun přírodního (NEA 2004). Nejde ovšem o spolehlivé údaje, protože většina zemí neposkytuje potřebné informace.

Náhrada uranu

Životnost uranových zásob lze teoreticky prodloužit díky využití jiných štěpitelných materiálů, zejména plutonia a umělého izotopu U-233, který lze získat transmutací thoria.

Plutonium (směsné palivo MOX): Pokud jde o palivo pro lehkovodní reaktory, může být část potřebného množství štěpitelného izotopu U 235 nahrazena izotopem plutonia Pu-239. V tomto případě se plutonium smíchá s přírodním nebo mírně obohaceným uranem, čímž vznikne materiál pro výrobu směsného paliva (MOX). Plutonium lze získávat z likvidovaných jaderných zbraní a při přepracování vyhořelého paliva. Centrum pro mezinárodní bezpečnost a spolupráci při Stanford University odhaduje celkovou hmotnost přebytečného vojenského plutonia na 92 tun, tedy množství, které může nahradit 11 040 tun přírodního uranu, a množství civilního plutonia na 252 tun, což znamená potenciální náhradu 30 240 tun přírodního uranu. Některé okolnosti ovšem trvale vedou k politickému tlaku proti využívání směsného paliva. Jedná se zejména o rizika spojená s přepracováním vyhořelého paliva a jeho negativní dopady na životní prostředí, problematická je rovněž nutnost přepravy plutonia na velké vzdálenosti.

V září roku 2000 uzavřely Spojené státy a Rusko dohodu o nakládání s přebytečným plutoniem. Podle této dohody bude během příštích 25 let využito 34 tun plutonia z likvidovaných zbraní hromadného ničení na výrobu směsného paliva. Z tohoto důvodu plánují Spojené státy výstavbu továrny na výrobu směsného paliva poblíž Savannah River v Jižní Karolíně, ruský závod bude stát u Severska. Zkušební palivo z amerického plutonia bylo vyrobeno ve francouzských závodech Cadarache a Marcoule a v dubnu 2005 dopraveno ke zkušebnímu provozu do elektrárny Catawba v Jižní Karolíně.

Plutonium vzniká rovněž při provozu energetických reaktorů v důsledku zachytávání neutronů většinovým uranovým izotopem U 238. Plutonium je proto obsaženo ve vyhořelém palivu a lze jej získat využitím technologie přepracování. Dosud se přepracovává pouze část světové produkce vyhořelého paliva především ve francouzském závodě La Hague a v britském Sellafieldu. Vedle ekologických problémů spojených s procesem přepracování má tato technologie i další omezení. Přepracovávat lze výhradně vyhořelé palivo vyrobené převážně z čerstvého uranu, aby nežádoucí izotopy neznečistily separované plutonium. V roce 2003 spotřebovaly evropské společnosti (nejdůležitější spotřebitelé směsného paliva) palivo MOX s celkovým obsahem 12,12 tun plutonia, které nahradilo 1450 tun přírodního uranu a práci přepracovacích závodů v hodnotě 0,97 miliónu SWU.

Thorium: Indie, která disponuje pouze chudými ložisky uranu, ale má významné zásoby thoriových písků, a pravděpodobně i některé další země se pokoušejí vyvinout thoriový palivový cyklus. Thorium (Th 232) sice není štěpitelné a nelze jej využít pro řetězovou reakci, při ostřelování neutrony se ovšem přemění na štěpitelný izotop U-233, který lze využít pro výrobu jaderného paliva. Proces

ovšem vyžaduje silný zdroj neutronového záření, tedy jaderný reaktor s uranovým nebo plutoniovým palivem. Thorium tedy nemůže eliminovat používání uranu, může ovšem snížit jeho spotřebu. Vyrobený izotop U 233 může být separován v přepracovacích závodech a následně využit k výrobě paliva, nebo rozštěpen přímo v reaktoru, kde vznikl. Thoriový palivový cyklus dosud není technologicky dotažen, neboť ozářené thorium se obtížně rozpouští v kyselině dusičné využívané při přepracování. Práce s izotopem U 233 pak znamená vážné riziko ozáření, vzhledem k současné přítomnosti izotopu U 232 a jeho rozpadových produktů, které patří k silným gama-zářičům.

Německé prototypy reaktorů využívajících thorium (AVR v Jülichu a THTR 300 v Hamm-Uentropu) musely být uzavřeny z důvodu přetrvávajících technických problémů. Jako palivo využívaly směs thoria a vysoce obohaceného (!) uranu zapuštěnou do grafitové formy.

Jihoafrická republika plánuje vývoj palivového cyklu pro modulární reaktor s kuličkovým ložem (PBMR). Tento typ reaktoru sice svou konstrukcí navazuje na typ THTR, ale pracuje s uranovým palivem a s využitím thoria nepočítá.

I v případě, kdy by se podařilo vyřešit technické problémy spojené s thoriovým palivovým cyklem, je třeba pamatovat na to, že zásoby thoria jsou rovněž omezeny a jejich těžba má negativní dopad na životní prostředí.

Přehled zdrojů uranu

Světové zdroje uranu mohou být shrnuty následujícím způsobem. Znamé primární zásoby (těžitelné s náklady nižšími než 130 dolarů na kilogram uranu) činí 4,6 miliónu tun uranu. Sekundární zdroje ze zásob v různých formách přidávají dalších 0,21 miliónu tun ekvivalentu přírodního uranu, tedy zhruba 5 %. Získávání uranu z vyhořelého paliva a opětovným obohacováním ochuzeného uranu nelze popsat jako „zdroj“, můžeme pouze předpovědět úroveň produkce podle dostupných technologických kapacit. Navíc může být 0,04 miliónu tun přírodního uranu nahrazeno plutoniem.

Uran – poptávka a nabídka

V roce 2003 činila celková produkční kapacita uranových dolů 47 260 tun uranu, faktická produkce ovšem dosáhla pouze 35 772 tun, tedy 76 % kapacity. Na druhé straně spotřeba uranu navázaná na jadernou energetiku dosáhla ve stejném roce 68 435 tun uranu. Produkce dolů tak pokrývala kolem 52 % poptávky, zatímco podstatná část připadla na sekundární zdroje.

Vzhledem k tomu, že sekundární zdroje budou vyčerpány v horizontu příštích deseti let, budou doly muset k pokrytí současné poptávky téměř zdvojnásobit svoji produkci. To znamená nutnost otevření velkého počtu nových dolů, neboť současná kapacita nemůže takovému požadavku vyhovět. K zásadnímu nárůstu produkce ovšem nemůže dojít ze dne na den, zprovoznění nového dolu může trvat i déle než deset let. Navíc v současné době existuje pouze několik málo ložisek připravených k těžbě, protože výzkum v této oblasti poklesl v minulých dvaceti letech v důsledku nízkých cen uranu na minimum. Vzhledem k tomu, že známé zásoby uranu v ložiscích s vysokou kovatostí rudy jsou velmi omezeny, bude nárůst produkce záviset na těžbě ložisek s méně kvalitní rudou. Jinými slovy půjde o těžbu na velkých plochách s enormním dopadem na životní prostředí.

Popsaný nedostatek těžební kapacity se může projevit ještě závažněji, dojde-li k realizaci některých návrhů na expanzi jaderné energetiky.

Tabulka 1. Roční produkce uranu podle států v roce 2003 (WNA 2005)

Pořadí	Země	Tun uranu	% světové produkce	Pozn.
1.	Kanada	10457	29.2%	
2.	Austrálie	7572	21.2%	
3.	Kazachstán	3300	9.2%	
4.	Rusko	3150	8.8%	c)

5.	Niger	3143	8.8%	
6.	Namibie	2036	5.7%	
7.	Uzbekistán	1770	4.9%	
8.	Spojené Státy	846	2.4%	
9.	Ukrajina	800	2.2%	c)
10.	Jihoafrická rep.	758	2.1%	a)
11.	Čína	750	2.1%	c)
12.	Česká republika	345	1.0%	
13.	Brazílie	310	0.9%	
14.	Indie	230	0.6%	c)
15.	Německo	150	0.4%	b)
16.	Rumunsko	90	0.3%	c)
17.	Pákistán	45	0.1%	c)
18.	Argentina	20	0.1%	
	Svět celkem	35772	100.0%	

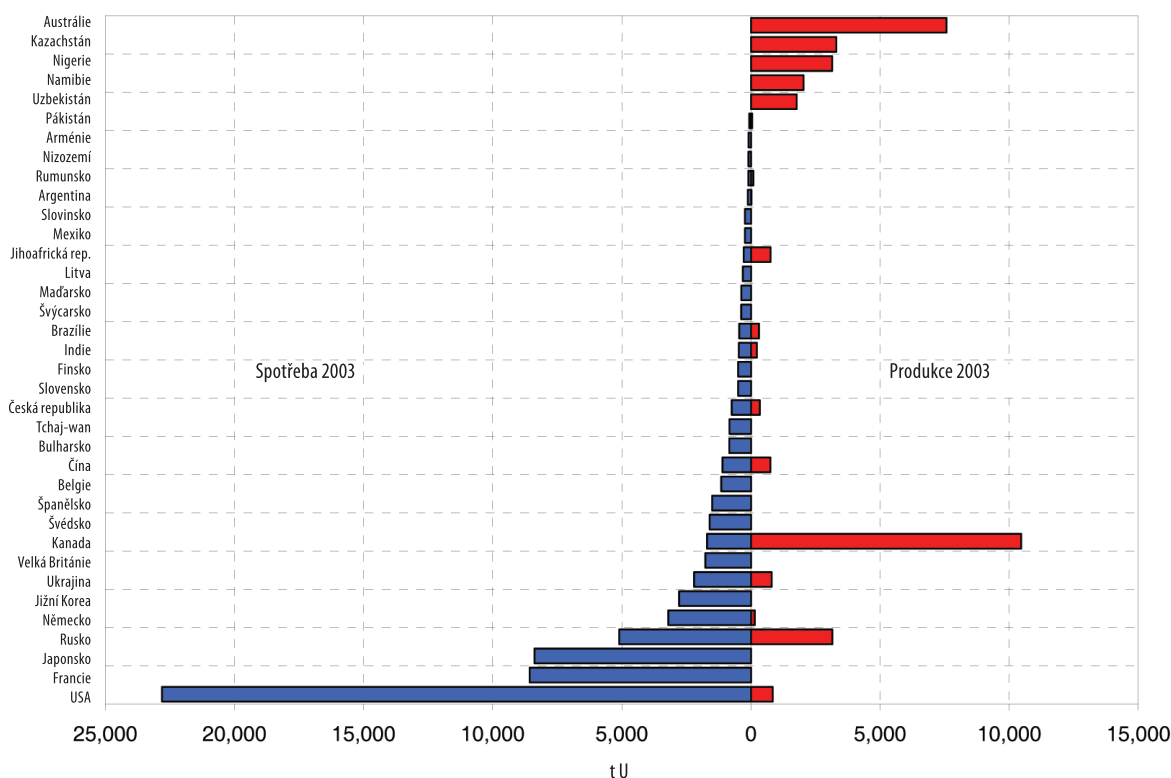
a) Uran je vedlejší produkt při těžbě zlata

b) Produkce související s likvidací dolu

c) odhad WNA

Dále je nutno vzít v potaz regionální nerovnováhu poptávky a nabídky. S výjimkou Kanady a Jihoafrické republiky nedokáže žádná ze zemí, které uran spotřebovávají, pokrýt svoji poptávku domácí produkcí. Největší současní spotřebitelé uranu, kromě Ruska a Spojených států, mají pouze malé (pokud vůbec nějaké) zásoby uranu. Pouze sedm zemí produkuje více uranu, než činí jejich domácí poptávka, jak znázorňuje obrázek 4 (NEA 2004).

Obrázek 4. Poptávka po uranu a světová produkce v roce 2003 (t/U)



Do obtížné situace z pohledu dodávek uranu se dostává zejména Rusko, které po rozpadu Sovětského svazu ztratilo přístup k významným zásobám uranu, zejména na území Kazachstánu. Při

současné úrovni produkce 3150 tun za rok (2003) vytěží Rusko své zásoby těžitelné s náklady odpovídajícími současné ceně uranu během patnácti let. Navíc požadavky ruských reaktorů v roce 2003 činily 5100 tun uranu, což znamená překročení domácí produkce o 1950 tun uranu (62% pokrytí domácí těžbou). Rusko přitom plánuje výstavbu několika nových reaktorů. Z uvedeného vyplývá, že přes značné strategické zásoby se Rusko dostane do krize v zásobování uranem v poměrně krátkém časovém horizontu. Ruské orgány proto navrhují těžbu rozlehlá, ekonomicky nevýhodná ložiska nekvalitní rudy v Jakutsku, s cílem získat alespoň nějaký uran. Hrozící nedostatek uranu v Rusku vysvětluje také na první pohled překvapující obohacování ochuzeného uranu, který se používá jako příměs vysoce obohaceného uranu z likvidace jaderných zbraní. Nadbytečná kapacita obohacovacích zařízení tak Rusku umožní využít dovezený sekundární zdroj a šetřit vlastní surovinu, byť přijde vniveč energie spotřebovaná v minulosti k vysokému obohacení uranu.

Hrozba mezery v dodávkách uranu v Rusku se týká také odběratelů z Evropské unie, neboť Rusko bylo dosud významným dodavatelem. V roce 2003 dodalo do EU produkty z přírodního uranu (3400 t U), opětovného obohacení (1000 t U) a zředěného HEU (1300 t U), což dohromady činilo 35 % celkových dodávek společností v celé Evropské unii.

Jak Indie tak Čína chystají ambiciózní programy rozvoje jaderné energetiky a stávají se potenciálně velkými spotřebiteli uranu. Obě země přitom disponují velmi omezenými uranovými ložisky.

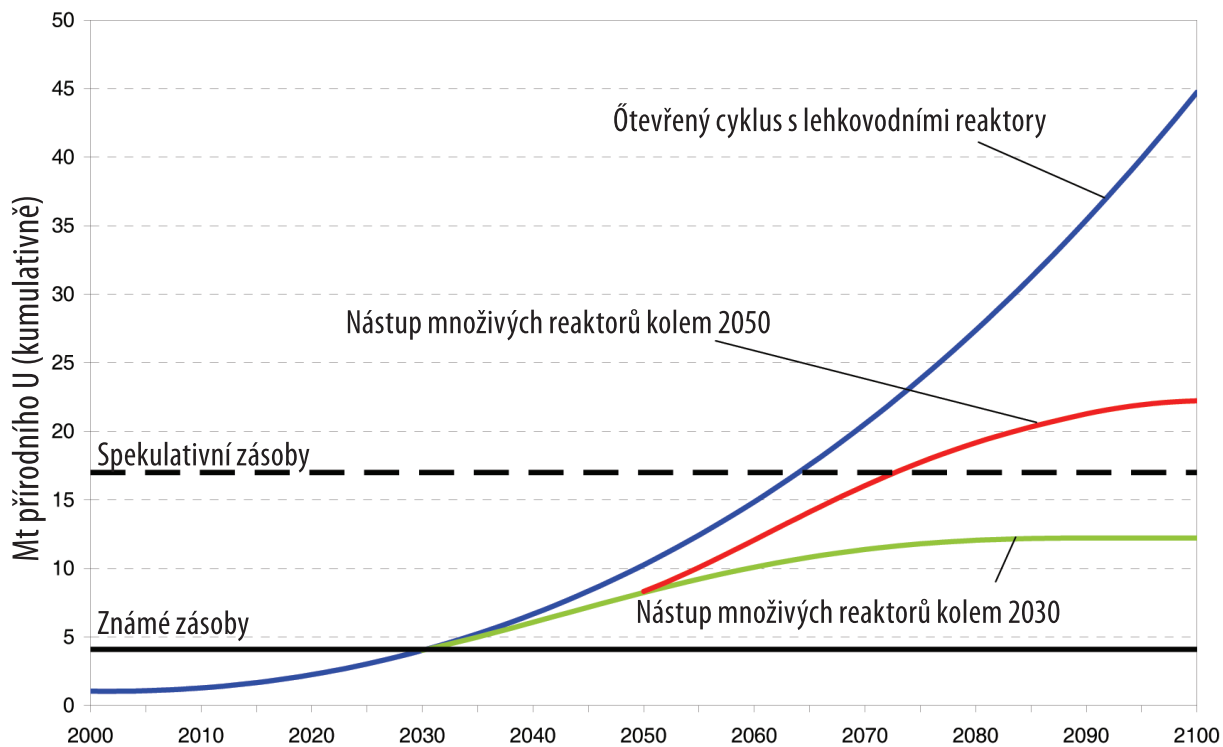
Indie, která nepřistoupila k Dohodě o nešíření jaderných zbraní (NPT) a provedla testy svých bomb, nemá přístup k zahraničním zdrojům uranu. Indická ložiska jsou pouze malá a obsahují chudou rudu. Kvůli nedostatku jiné možnosti, indická vláda plánuje v několika částech země otevření nových dolů s cílem těžbu chudou rudu – navzdory protestům domorodých kmenů a ekologických organizací. Rovněž indické úsilí o vývoj thoriového palivového cyklu je třeba vidět v tomto kontextu. Indie ovšem zvažuje rovněž politické řešení. Jako první krok ratifikovala v březnu 2005 Konvenci o jaderné bezpečnosti (CNS), což umožňuje zahraniční inspekce v indických jaderných elektrárnách.

Čína hodlá dovážet uran z Austrálie, což ovšem dosavadní bezpečnostní závazky vztahující se na australský uran neumožňují. Čína totiž odmítá akceptovat inspekce MAAE, které ověřují, zda programy rozvoje jaderné energetiky slouží výhradně mírovým účelům. V únoru 2005 ovšem byly zahájeny rozhovory mezi Čínou a Austrálií, jejichž cílem je najít cestu k vývozu australského uranu, na němž mají obě strany společný zájem.

Ovšem i v případě, že se podaří vyřešit problém nedostatečné kapacity uranových dolů a regionální převisy poptávky, musíme vzít v úvahu další hledisko: celkovou životnost známých zásob uranu. Známé primární zásoby a sekundární zdroje by mohly pokrývat současnou poptávku po dobu sedmdesáti let. Při zvýšení počtu provozovaných reaktorů by ovšem pochopitelně došlo k nárůstu poptávky. Obrázek 5 ukazuje scénář využívání světových zásob uranu postavený na předpokladu zachování současného podílu jaderné energetiky na dodávkách při pokračujícím nárůstu spotřeby elektřiny (NERAC 2002). Podle tohoto scénáře by v případě využívání uranu v jednoduchém otevřeném cyklu (bez přepracování) v lehkododných reaktorech (současná dominantní technologie) došlo k vyčerpání známých zásob kolem roku 2030. Spekulativní zásoby by, v případě sto procentního potvrzení jejich existence, byly vyčerpány kolem roku 2060. Jaderná energetika by mohla pokračovat pouze za předpokladu těžby méně a méně kvalitních ložisek, s vysokými ekonomickými náklady a závažnými ekologickými dopady.

Problém omezených zásob uranu by mohl být teoreticky řešen masivním nasazením rychlých množivých reaktorů. Podle původních předpokladů měla tato technologie prodloužit životnost uranových zásob šedesátkrát. Technické problémy ovšem zapříčinily uzavření všech prototypů tohoto typu reaktoru, kromě jediného provozovaného v Rusku. Čína a Rusko ovšem nadále pokládají tuto technologii za schůdnou možnost pokrývání svých energetických potřeb.

Obrázek 5. Scénář využití světových zásob uranu



Shrnutí

Těžba uranu se rozrůstá, staré zátěže jsou zanedbávány

- Současné oživení uranového průmyslu s sebou nese nová ekologická rizika a zátěže. V mnoha zemích přitom dosud nabyly dostatečně vyřešeny problémy starých zátěží z doby studené války.

Znamé zásoby nestačí k pokrytí rostoucí poptávky

- Bez přepracování vyhořelého paliva mohou známé zásoby v uranových ložiscích pokrýt předpokládanou poptávku zhruba do roku 2030, spekulativní zásoby by byly vyčerpány o třicet let později. Těžba se bude muset rozšířit na lokality s nekvalitní rudou, což bude znamenat vážné dopady na životní prostředí.
- Sekundární zdroje, které v současné době pokrývají polovinu poptávky, tvoří pouze 5 % celkových zásob.

Nedostatek těžební kapacity

- Aby bylo možné pokrýt současnou poptávku, bude se muset produkce dolů v příštích deseti letech zdvojnásobit, protože sekundární zdroje budou v tomto časovém horizontu vyčerpány. Současná těžební kapacita ovšem nedokáže tuto poptávku uspokojit a k otevření je připraveno jen několik dolů.
- Případný nárůst poptávky vyžaduje další rozšiřování těžební kapacity.

Regionální nerovnováha poptávky a nabídky

- Většina zemí, které jsou současnými nebo potenciálními spotřebiteli uranu, disponuje malými domácími zásobami uranu a jejich závislost na dovozu se bude prohlubovat. Pouze sedm zemí těží tolik uranu, aby mohly vyvážet.
- Do složité situace se dostává především Rusko, které bude čelit vážnému nedostatku dodávek v horizontu deseti let. Tato krize ovlivní i uranové zásobování v EU, které do značné míry závisí na dodávkách z Ruska.
- Problém zásobování uranem se dramaticky zhorší, přistoupí-li Indie a Čína, tedy státy bez vlastních významných zásob uranu, k ambiciózním programům rozvoje jaderné energetiky.
- S vývozem uranu do Ruska, Číny a Indie jsou navíc spojeny bezpečnostní problémy.

3 Nakládání s jaderným odpadem

Přeprava

Bez přepravy radioaktivních materiálů by jaderná energetika nemohla existovat. Transporty představují nezbytné propojení jednotlivých fází palivového cyklu. Přepravovaným materiálem přitom může být uran po rozemletí rudy, hexafluorid uranu, články čerstvého i vyhořelého paliva a mnoho druhů odpadu. Celosvětově se uskuteční zhruba 100 000 transportů obsluhujících jadernou energetiku za rok, jenom v Německu kolem 10 000. Část transportů musí urazit velmi dlouhou vzdálenost – například hexafluorid uranu z Německa do Ruska (asi 1000 km po zemi) nebo materiál obsahující plutonium z přepracovacích závodů ve Francii do Japonska (15 000 námořních mil po moři). Dochází rovněž k transportům, jejichž důvody jsou čistě ekonomické. Například některé německé elektrárny dovážejí palivo ze Švédska a zároveň část švédských elektráren používá palivo vyrobené v Německu.

Na některých místech, jako jsou přepracovací závody, mezisklady nebo přístavy, dochází ke koncentraci transportů. V zájmu obyvatelstva i pracovníků přepravních společností by měla být hustota transportů dobře promyšlena. Především je třeba vzít v úvahu potřebná bezpečnostní opatření s ohledem na vystavení osob radiaci při běžném provozu i případné havárii. Většina zemí se snaží vyhnout současnému průběhu více než jednoho transportu.

Pro přepravu radioaktivních materiálů platí soubor doporučení Mezinárodní agentury pro atomovou energii (IAEA 1995). Cílem této regulace je omezení rizika na „přijatelnou“ úroveň. Bezpečnostní princip přitom spočívá především v ochraně radioaktivního materiálu dostatečným obalem. Požadavky na kvalitu obalu přitom záleží na druhu a množství radioaktivního materiálu. Kontejnery pro přepravu vysokoaktivního materiálu by se neměly porušit ani při vážné havárii. Mimo jiné jsou dimenzovány na pád z výšky 9 metrů na betonovou plochu, pád z výšky jednoho metru na ocelovou překážku, vystavení ohni při teplotě 800 °C po dobu 30 minut a ponoření do hloubky 15 m na 8 hodin. Uvedené požadavky na zmíněné obaly bývají ovšem často kritizovány. Pokud jim totiž konstrukce obalu vyhovuje, znamená to, že vydrží řadu havarijních stavů, ovšem při jiných situacích, které nelze vyloučit, není integrita obalu garantována. Například náraz rychlostí 80 km/h na kamenitý povrch nebo požár v tunelu trvající 30 minut patří k situacím, při kterých dojde k větší zátěži než v případě uvedených požadovaných hodnot. V takových případech může dojít k úniku radionuklidů a následnému ozáření osob.

V posledních letech došlo během transportů spojených s palivovým cyklem jaderných elektráren pouze k malému počtu nehod, přičemž nebyl zaznamenán žádný významný únik radioaktivního materiálu. V případě výstavby nových elektráren, úložišť a dalších zařízení spojených s jaderným palivovým cyklem v různých zemích bude ovšem celkový počet transportů narůstat. K vážné havárii sice zatím naštěstí nedošlo, její riziko ovšem hrozí každému dalšímu transportu.

Absolutní bezpečnost transportu radioaktivních materiálů nelze zajistit, což platí pro bezproblémový transport i pro případ nehody. Účinná ochrana transportu proti teroristickému útoku není prakticky proveditelná. Vážná nehoda nebo teroristický útok na transport přepravující vysokoaktivní odpad, vyhořelé palivo nebo oxid plutonia může vést ke smrtelným dávkám záření v bezprostředním okolí a k silnému ozáření osob v okruhu několika kilometrů kolem transportu. Havárie by mohla vést k nutné evakuaci nebo přesídlení obyvatel postižené oblasti (Large and Associates 2004).

Přepracování vyhořelého paliva

V šedesátých a sedmdesátých letech byla rozšířena představa o věčně fungujících jaderných elektrárnách, které levně pokryjí veškerou poptávku po energii. Zvažovaný teoretický jaderný cyklus na první pohled připomíná „perpetuum mobile“. Po vyhoření čerstvého uranového paliva v lehkododním reaktoru bylo plánováno jeho přepracování s cílem separovat uran a plutonium. Separované prvky se měly využít k výrobě paliva a množivého materiálu pro rychlé množivé reaktory, kde bylo

plánováno namnožení plutonia. Po kampani v rychlém reaktoru měla následovat další separace plutonia, jeho opětovné využití v množivém reaktoru a z menší části v lehkovodních reaktorech. Díky provozu množivého reaktoru by bylo možné po přepracování získat další plutonium a koloběh by mohl pokračovat.

Teoretický koncept se ovšem nepodařilo realizovat. Kvůli bezpečnostním problémům, malému koeficientu množení v experimentálních reaktorech a vysokým nákladům byl program rozvoje rychlých množivých reaktorů ve většině zemí ukončen – ve Spojených státech v roce 1977, o několik let později v Německu a posléze i ve Francii a Velké Británii. V současné době probíhá vývoj množivých reaktorů pouze v Japonsku, Rusku a Indii, i v těchto zemích ovšem postupuje velmi pomalu.

Vzhledem k popsané situaci pominul hlavní důvod pro přepracování vyhořelého paliva. Bez množivých reaktorů není kontinuální recyklace paliva proveditelná. Část jaderného průmyslu a některé státy se ovšem rozhodly v přepracování pokračovat s cílem využít separovaného uranu a plutonia k výrobě směsného paliva (MOX) pro tlakovodní reaktory. Přepracovací závody ovšem nepracují ve všech zmíněných státech. V Německu byly plány na jeho výstavbu z bezpečnostních a ekonomických důvodů zrušeny v roce 1989. Německé vyhořelé palivo se přepracovává ve Francii a Velké Británii¹, stejně jako belgické, švýcarské a v menším měřítku i z ostatních zemí.

Přehled civilních přepracovacích závodů provozovaných v současné době je uveden v tabulce 2:

Tabulka 2. Civilní přepracovací závody

Země	Lokalita	Kapacita [tuny za rok]
Francie	La Hague (UP2-800)	1 000
	La Hague (UP3)	1 000
Velká Británie	Sellafield (B205)	1 500
	Sellafield (THORP)	1 200
Rusko	Čeljabinsk (RT1)	600
Japonsko	Tokai Mura (Tokai)	100
Indie	Tarapur (PREFRE)	400
	Kalpakkam (KARP)	100

Zdroj: WISE-Paris

V tabulce jsou uvedeny hodnoty jmenovité kapacity, závody obvykle přepracují menší množství materiálu. Konkrétně závod THORP v Sellafieldu dosud nikdy nedosáhl naplnění plánované kapacity. Za zmínku stojí rovněž vojenská přepracovací zařízení ve Francii, Velké Británii, Rusku a Indii, výhradně vojenské přepracování provozují Spojené státy a Severní Korea.

Přepracování je technicky značně komplikovaný proces. Soubory vyhořelého paliva je třeba rozebrat, jednotlivé tyče nařezat a následně rozpustit v kyselině dusičné. Po separaci uranu a plutonia je nutné zpracovat i zbývající materiál. Výstupem přepracování jsou čtyři hlavní složky:

- plutonium
- uran
- nízko, středně a vysokoaktivní odpad
- radioaktivní znečištění vzduchu a vody

Přepracováním osmi článků vyhořelého uranového paliva získáme jeden článek směsného paliva MOX a značný objem odpadu.

Plutonium a směsné palivo

Hlavním smyslem civilního přepracování je získávání plutonia, kterého vyhořelé palivo z lehkovodních reaktorů obsahuje zhruba 1 %. Teoreticky by bylo možno při stoprocentním využití přepracovacích závodů separovat 5 až 6 tun plutonia ročně.

Veškeré separované plutonium by mělo být zpracováno do formy směsného paliva MOX. Tento

1) *Aktuální situaci v Německu popisuje publikace Gruppe Ökologie (2005).*

záměr lze ovšem v praxi obtížně naplnit. Ve světě totiž není k dispozici dostatečná kapacita závodů na výrobu směsného paliva, v průmyslovém měřítku jsou provozovány pouze ve Francii a Belgii. Závod na výrobu paliva MOX byl v roce 2001 uveden do provozu také v britském Sellafieldu, nefunguje ovšem podle předpokladů, došlo zde ke skandálním chybám obsluhy. Rusko směsné palivo nevyrábí, v Japonsku a Indii provozují pouze malé pilotní závody. Zůstává tedy otázkou, zda bude kompletní recyklace plutonia možná. Zpracování pro konečné uložení zatím není vyvíjeno. Pravděpodobně bude možné zalít plutonium do skla nebo keramických materiálů.

Z hlediska bezpečnosti a radiační ochrany bývá směsné palivo hodnoceno jako problematičtější než uranové:

- Plutonium je vysoce radiotoxické. Vdechnutí množství menšího než 0,1 mg může být smrtelné.
- Riziko vzniku samovolné řetězové reakce během manipulace a zpracování je v případě plutonia vyšší než u uranu.
- Existuje řada možností úniku plutonia během běžného přepracování a výroby oxidu, stejně jako během případné havárie při přepracování, skladování, přepravě a manipulaci s plutoniem nebo při výrobě a transportu směsného paliva.
- Lehkovodní reaktory nebyly původně navrženy na zavážení palivem obsahujícím plutonium. Využívání směsného paliva MOX je možné pouze při snížení úrovně bezpečnosti (reaktor se obtížněji řídí a zejména odstavuje).
- Při použití souborů směsného paliva se zvyšuje množství radionuklidů s dlouhým poločasem rozpadu v aktivní zóně, potenciálně zhoršuje následky případné havárie.
- Zvýšená produkce tepla a intenzita neutronového záření vede k větším problémům během přepravy, skladování a zpracování vyhořelého paliva.
- Za současného stavu technologií nelze směsné palivo v průmyslovém měřítku přepracovávat. Konečné uložení se ovšem stává komplikovanějším v důsledku produkce tepla, neutronového záření a nebezpečí samovolné řetězové reakce. Ve srovnání s vyhořelým uranovým palivem vyžaduje MOX náročnější, rizikovější a nákladnější management, kromě jiného i rozměrnější úložiště.

Uran

Uran představuje zhruba 99 % hmoty těžkého kovu obsaženého ve vyhořelém palivu. Ve většině zemí se pouze malá část uranu z přepracování opětovně využívá v energetických reaktorech. Obsahuje totiž pouze malé množství štěpitelného izotopu, naopak zastoupení izotopů s nežádoucími vlastnostmi je vyšší než v přírodním uranu. Velká část separovaného uranu se skladuje. V minulosti některé země posílaly tento uran do Ruska ke smíchání s vysoce obohaceným uranem získaným při likvidaci atomových zbraní. Malá část uranu z přepracování se uplatní v leteckém průmyslu a při výrobě průrazné munice. Výhledově neexistuje prakticky žádná poptávka po uranu z přepracování, protože opětovné efektivní využití v reaktoru není možné a pro jiné aplikace se používají neaktivní materiály. Využití pro výrobu zbraní by mělo být v blízké době zakázáno. Plány na úpravu pro konečné uložení dosud nedospěly do stadia vývoje.

Odpad

Radionuklidy s dlouhým poločasem rozpadu původně koncentrované ve vyhořelém palivu během přepracování skončí rozličných odpadech s různou úrovní radioaktivity. Část odpadů je vysokoaktivní a uvolňuje teplo. V minulých letech se v důsledku přepracování zvýšil objem radioaktivních materiálů pro konečné uložení minimálně desetkrát. Tento trend pokračuje i v současnosti, s výjimkou závodu v La Hague, kde pro některé druhy odpadu vyvinuli novou metodu úpravy.

Všechny odpady musejí být zpracovány a dočasně uloženy v meziskladech. To znamená další radiační zátěž při bezproblémovém provozu a zvýšené riziko havárie. Vysokoaktivní materiál přitom bývá po dlouhou dobu skladován ve velmi rizikovém tekutém stavu. Například v Sellafieldu byla od uvedení závodu THORP do provozu v roce 1994 vitrifikována pouze velmi malá část odpadu. Vysoce aktivní tekutý odpad v objemu 80 m³ vzniklý během provozu prototypového přepracova-

cího závodu WAK v Německu zůstává od roku 1990, kdy byl závod uzavřen, stále ve skladovacím bazénu. Plánovaná vitrifikace by významně snížila riziko havárie při přepravě i skladování, problémy radioaktivity a uvolňovaného tepla ovšem nevyřeší.

Znečištění

Úniku určitého množství radionuklidů do okolí nelze během rozebírání a rozpouštění palivových souborů, separace uranu a plutonia či skladování a úpravy odpadů zabránit. Navzdory využívání filtrů a dalších preventivních opatření se část radionuklidů vypouští v tekuté i plynné formě do okolí přepracovacího závodu. Množství různých radionuklidů vypouštěných každoročně do okolí přepracovacích závodů Sellafield a La Hague se pohybuje až o tři řády výše než v případě provozu lehkovodního reaktoru (Marignac, Coeytaux 2003). Lidé jsou vystaveni účinkům radiace prostřednictvím kontaminované půdy a živočišných i rostlinných potravin. Podle německých předpisů by uvedené závody nedostaly licenci k provozu, protože nesplňují limity (Öko-Institut 2000). Během různých výzkumů vědci zaznamenali zvýšený výskyt dětské leukémie (trojnásobný v okolí La Hague a desetinásobný v okolí Sellafieldu) v porovnání s průměrem v příslušné zemi. Souvislost mezi tímto zvýšením a provozem přepracovacích závodů se nepodařilo jednoznačně prokázat, ale ani vyloučit. V okolí závodů bylo v tělech ptáků a mořských živočichů naměřeno množství radioaktivity, které přesahuje limity Evropské unie pro dovoz potravin.

Úniky z přepracovacích závodů mají ovšem širší dopad než znečištění blízkého okolí. Zejména tekuté odpady se v oceánu rozptýlí na velkou plochu. Radionuklidy ze Sellafieldu byly monitorovány i na irském pobřeží. Tradiční rybářské státy, jako je Norsko, se proto obávají ohrožení oblastí rybolovu v Severním moři.

Přepracování bez užitku

K negativní bilanci přepracování doložené v předchozím textu lze přidat další body:

- Cíle přepracování v souvislosti s provozem lehkovodních reaktorů nebylo dosaženo. Přepracování opětovně použitého paliva nelze při současném stavu technologií v průmyslovém měřítku provádět. Přepracování nepřináší ani ekonomicky významnou úsporu přírodního uranu ani podstatné snížení množství plutonia pro konečné uložení. Ve zprávě pro francouzskou vládu se uvádí, že přepracování a použití směsného paliva může v nejlepším případě pokrýt 10 % poptávky po přírodním uranu a omezit množství plutonia ve finálním odpadu o 15 % (Marignac, Coeytaux 2003).
- Vážné nehody v přepracovacích závodech nejsou pouze teoretické. Aktuálním příkladem z roku 2005 může být únik 83 m³ rozpuštěného vyhořelého paliva prasklou trubkou v závodě THORP v Sellafieldu. Podle oficiálních informací byla nebezpečná látka zachycena v uzavřené části objektu a nedošlo k dopadům na životní prostředí. Alarmující je ovšem skutečnost, že závada byla objevena až po několika měsících. Lze předpokládat, že k úniku nebezpečných látek do okolí nedošlo pouze šťastnou shodou okolností.
- V souvislosti s provozem přepracovacího závodu v La Hague se každoročně vypravuje 450 transportů s nákladem plutonia nebo materiálu, který plutonium obsahuje. Transporty nacestují jenom po Francii více než 250 000 km, když nezapočítáváme přepravu uranu a odpadů. Palivový cyklus bez přepracování má evidentně menší nároky na přepravu nebezpečných materiálů.
- Přepracování významně zvyšuje počet potenciálních cílů teroristického útoku. Vedle transportů patří ke zranitelným místům s velkým rizikovým potenciálem části přepracovacích závodů. Náraz letadla do bazénu s vyhořelým palivem nebo vysokoaktivním odpadem, případně do skladu separovaného plutonia, by vedl ke katastrofickým následkům přesahujícím černobylskou havárii. Množství radionuklidů uvolněných do okolí by v tomto případě bylo vyšší.
- Přepracování není ekonomicky výhodné. Několik studií posuzujících situaci Německu a na úrovni OECD/NEA porovnávalo palivové cykly s přepracováním a s „přímým“ uložením vyhořelého paliva. Podle jejich závěrů se dodatečné náklady na přepracování pohybují od 14 do 50 % (Gruppe Ökologie 1998). Novější odhady zpracované ve Spojených státech ukazují na 80% nárůst nákladů (Bunn et al. 2003). Nutno podotknout, že autoři studií vycházeli z předpokladů příznivých pro

přepřerování. Ekonomická nevhodnost může být ve skutečnosti ještě výraznější.

Závěrem lze shrnout, že přepřerování vyhořelého paliva není pro palivový cyklus významně přínosné z hlediska bezpečnosti, úspory surovin ani ekonomické výhodnosti.

Skladování v meziskladech

Nezávisle na zvoleném konceptu palivového cyklu (s přepřerováním nebo bez) jsou mezisklady vyhořelého paliva a radioaktivního odpadu nezbytné. V případě vyhořelého paliva a vysokoaktivních odpadů se požaduje dlouhodobější skladování, neboť pro další zpracování a konečné uložení je třeba určitý čas k omezení produkce tepla a celkové aktivity v důsledku úbytku nuklidů s krátkým poločasem rozpadu. Nízko a středněaktivní odpady se musí během zpracování před konečným uložением skladowat minimálně z logistických důvodů.

Pro skladování vyhořelého paliva se používají tři koncepty (IAEA 1995):

- mokré skladování v bazénech s vodou
- suché skladování ve svislých tlustostěnných kontejnerech
- suché skladování v sudech umístěných ve vodorovných či svislých chodbách s posílenou betonovou klenbou

Pouze v několika případech se mokré skladování (ve Švédsku) a suché skladování (v jednom ze čtrnácti německých meziskladů) provádí v podzemí. Výhodou suchého skladování je nižší pravděpodobnost havárie, neboť nevyžaduje systém aktivního chlazení. Rovněž hrozba koroze konstrukčních prvků paliva je v tomto případě nižší. Z těchto důvodů a zároveň kvůli nižším nákladům se v poslední době suché skladování v kontejnerech preferuje. Na druhé straně hrozba mechanického poškození paliva je v případě suchého skladování vyšší a kontejnery proto musí zůstat uzavřeny po několik desítek let. Dlouhodobé chování lze jen obtížně předpovědět. Závisí na typu paliva i kontejneru a způsobu ukládání, ovšem dosavadní zkušenost je příliš krátká pro přesné posouzení. Mezisklady nejsou vybaveny dostatečnými bariérami proti úniku radionuklidů za běžného provozu (mokré skladování) ani dostatečným dozorem pro případ, kdy k úniku dojde (suché skladování). Obyčejně v konceptu meziskladu rovněž chybí vícebariérový systém pro případ vnějšího ohrožení typu pádu letadla. Ve většině případů existuje pouze jediná bariéra (kontejner), v některých případech – například bazén mokrého skladování v La Hague – proti vnějšímu ohrožení neexistuje žádná účinná bariéra. Porovnání z hlediska bezpečnosti vede k závěru, že suché skladování v kontejnerech se jeví jako vhodnější, riziko úniku radionuklidů ovšem zůstává i v tomto případě. Bezpečnost skladování lze pomocí technických opatření zvýšit, většinou se k nim však z ekonomických důvodů nepřistupuje.

Mezisklady, bez ohledu na koncept, mohou být umístěny přímo v prostoru jaderných elektráren, nebo na jiném místě jako centrální sklad pro více elektráren. Z důvodu omezení manipulace a přepravy a s nimi spojených rizik je vhodnější varianta meziskladu v prostoru elektrárny. Například Německo tuto variantu v posledních letech upřednostňuje (BFS 2005).

Převážnou většinu celkového objemu radioaktivních odpadů (cca 95 %) tvoří nízko a středněaktivní složka. Odpady tohoto typu se skladují převážně v kontejnerech uvnitř průmyslových hal. V případě dlouhodobého skladování se z bezpečnostních i ekonomických důvodů musí přistoupit ke zpracování odpadu, zejména v případě tekuté a plynné fáze. Touto cestou se omezí riziko úniku radionuklidů při skladování a manipulaci, stejně jako při případné havárii. Pomocí současných technologií lze rovněž snížit objem odpadu, čímž zároveň naroste kapacita skladu. Zároveň ovšem existují problémy jako dlouhodobá stabilita a produkce plynů v důsledku reakcí mezi odpadem a materiálem obalů, například v případě zalívání odpadů do betonu.

V případě vážné havárie hrozí navzdory nižší aktivitě odpadů poměrně značný únik radionuklidů. To platí zejména pro havárii v důsledku záměrného nárazu letadla. Vzhledem k nižšímu množství radioaktivních látek nejsou bezpečnostní opatření na takové úrovni jako v případě skladování vyhořelého paliva a vysokoaktivních odpadů.

Nízko a středněaktivní odpady lze skladovat v prostoru elektráren nebo v centrálních skladech. Z důvodu potřeby omezit přepravu a manipulaci by se měla preferovat první varianta.

U meziskladů vyhořelého paliva je třeba brát v úvahu riziko teroristického útoku, stejně jako v případě jaderných elektráren. Přestože reaktor se zdá být atraktivnějším cílem, dopady útoku na velký skladovací bazén (například v přepracovacím závodě) mohou být stejně hroživé. Kontejner s vyhořelým palivem je navíc v některých zemích, například v Německu vnímán jako negativní symbol. Skladovací zařízení jsou rovněž zranitelnější z důvodu menšího počtu bezpečnostních opatření než v případě reaktoru. Z uvedených důvodů nelze pokus o teroristický útok na mezisklad vyloučit.

Konečné uložení

Co musí být uloženo?

Výroba energie v jaderných elektrárnách – stejně jako některé procesy v určitých oblastech průmyslu, lékařství a výzkumu – je spojena s produkcí radioaktivních odpadů. Ionizující záření uvolňované těmito odpady se může stát příčinou vzniku genetické modifikace nebo onemocnění rakovinou, ohrožuje tedy lidské zdraví i životní prostředí. Radioaktivní odpady proto musejí být bezpečně izolovány od okolního prostředí. Způsob nakládání s radioaktivními odpady stejně jako požadavky na manipulaci odpovídá rizikovému potenciálu různých materiálů. Rizikový potenciál je určen hlavně druhem a intenzitou radioaktivního záření, radiotoxicitou a dobou, po kterou zůstane odpad nebezpečný pro člověka i životní prostředí. Manipulaci a ukládání ovlivňují i další vlastnosti odpadu, například teplo uvolňované v důsledku rozpadu radioaktivních izotopů.

Spektrum radioaktivních odpadů vznikajících v různých zemích a nakládání s nimi, závisí do značné míry na tom, zda příslušná země využívá přepracování vyhořelého paliva, jako například Francie, nebo preferuje koncept přímého ukládání. V zemích, které přepracování neprovozují, se s vyhořelým palivem nakládá fakticky i podle zákonů jako s odpadem.

Doba, po kterou odpad ohrožuje lidské zdraví i životní prostředí, závisí na poločasu rozpadu obsažených radionuklidů. Izotopy s poločasem rozpadu kratším než třicet let se běžně označují jako krátkodobé. Radionuklidy s delším poločasem rozpadu se nacházejí hlavně ve vysokoaktivním odpadu, v některých případech rovněž ve středněaktivním. Převážná část těchto odpadů vzniká v důsledku výroby jaderné energie. Jedním z radionuklidů s velmi dlouhým poločasem rozpadu (704 milionů let) je uran-235. Během provozu jaderných reaktorů vzniká celá řada radioizotopů s velmi rozdílným poločasem rozpadu, například plutonium-239 (poločas rozpadu 24 110 let), cesium (30,2 let), kobalt-60 (5,3 dne), které se posléze nacházejí i v různých druzích odpadu.

Produkce tepla v důsledku rozpadu radionuklidů se týká především vysokoaktivních odpadů z jaderné energetiky. Většina kvantitativně převažujících radioizotopů se rozpadá poměrně rychle, což umožní již po několika desetiletích snadnější nakládání s odpadem. Ovšem z pohledu konečného uložení může pokračující produkce tepla zapříčinit dlouhodobé problémy, neboť ovlivní vlastnosti okolní horniny. Proto musí být produkce tepla pečlivě vyhodnocena.

Přestože cíle a bezpečnostní principy nakládání s radioaktivními odpady jsou ve většině zemí využívajících jadernou energii podobné, existují rozdíly v konkrétních postupech pro různé druhy odpadu. Příčinou mohou být rozdílné ekonomické úvahy a organizační požadavky vyplývající z různého rozsahu jaderného programu, dále pak odpověď na otázku „přepracování vyhořelého paliva – ano či ne?“

Na mezinárodní úrovni se za nejdůležitější kritéria pro výběr postupu při nakládání s radioaktivním odpadem považuje jeho aktivita a poločas rozpadu dominantních radioizotopů. Podle aktivity se odpad třídí na:

- nízkoaktivní odpad
- středněaktivní odpad
- vysokoaktivní odpad

Pro volbu postupu při nakládání s odpadem je důležité, aby nízko a středněaktivní odpady obsahovaly především krátkodobé radioizotopy (s poločasem rozpadu do 30 let). Obsahují-li větší množství dlouhodobých izotopů, patří z pohledu nakládání s odpady do samostatné kategorie.

Vysokoaktivní odpady, ve kterých převažují krátkodobé radioizotopy, pocházejí především z výroby jaderných zbraní. Tento odpad tedy hraje roli pouze v zemích s vojenským jaderným programem. Ve Spojených státech bylo v roce 1999 otevřeno hlubinné úložiště pro tento typ odpadu v solné vrstvě v lokalitě Carlsbad v Novém Mexiku.

Vysokoaktivní odpady vzniklé při výrobě jaderné energie obsahují vysoké množství dlouhodobých radioizotopů. Obvykle se předpokládá jejich společné uložení s dlouhodobým středně aktivním odpadem. Ovšem vzhledem k rozdílné produkci tepla je třeba odpady těchto kategorií oddělit.

V závislosti na specifických vlastnostech odpadu a z nich plynoucích bezpečnostních požadavcích se pro různé kategorie používají různé postupy. Pro nízko a středněaktivní odpady se praktikuje trvalé uložení na zemském povrchu (například ve Francii a Spojených státech) nebo v malé hloubce pod povrchem (ve Švédsku, Finsku atd.). V případě všech dlouhodobých a vysokoaktivních odpadů se předpokládá uložení v hlubinných geologických formacích.

Po předběžném výběru umístění úložiště v lokalitách Gorleben a Konrad se v Německu třídí radioaktivní odpad odlišně od mezinárodní praxe. Za hlavní kritérium se bere produkce tepla, zatímco poločas rozpadu obsažených radionuklidů hraje vedlejší roli. V Německu je rovněž povoleno (narozdíl od Francie) ukládání nízkoaktivních odpadů s velmi nízkou aktivitou na skládkách komunálního odpadu. Nepřesáhne-li naměřená radioaktivita hodnotu definovanou zákonem o radiační ochraně může být materiál opětovně využit (STRLSCHVO 2001). Ve Francii se odpady s podobně nízkou aktivitou ukládají ve speciálních povrchových úložištích.

Současná situace

Technická a vědecká debata o nakládání s radioaktivním odpadem začala ve chvíli, kdy první odpady z civilního i vojenského využívání jaderné energie vznikly. Již v padesátých a šedesátých letech bylo diskutováno široké spektrum různých možností. Vedle hlubinného ukládání, na které se spoléhá v současnosti, byly zvažovány i poměrně exotické možnosti jako ukládání ve vesmíru či v antarktickém ledovci. Tato debata se týkala dlouhodobého středně a vysokoaktivního odpadu, včetně vyhořelého paliva z jaderných elektráren.

Během šedesátých let začal být široce akceptován koncept ukládání tohoto odpadu v hlubinných geologických formacích kontinentální zemské kůry. Výběr preferované geologické formace v jednotlivých zemích záleží na geologické situaci stejně jako na politických a urbanistických podmínkách. Pro prosazení konceptu hlubinného úložiště byly rozhodující bezpečnostní a ekonomické argumenty.

Naproti tomu nakládání s nízko a středně aktivním odpadem bylo vnímáno jako méně problematické. Brzy začalo být praktikováno ukládání těchto odpadů do moře, na zemském povrchu a do malých hloubek pod zem. Ukládání do moře bylo zakázáno v roce 1993 Londýnskou úmluvou o ochraně moří. Úložiště krátkodobého nízko a středněaktivního odpadu jsou dnes v několika zemích provozována nebo plánována. Německo plánuje ukládání těchto odpadů v hlubinných geologických formacích. Bývalý důl na železnou rudu Konrad u města Salzgitter získal v roce 2000 příslušnou licenci.

Konečným uložením se rozumí shromáždění radioaktivních odpadů ve speciálně navrženém a upraveném prostoru s cílem jejich izolace od lidské činnosti a životního prostředí. Při konečném uložení se nezamýšlí opětovné vyjmutí odpadu v budoucnosti. Podle druhu a časovému dosahu nebezpečnosti odpadu se úložiště umísťují na povrchu – většinou v povrchových dolech – nebo v hlubinných geologických formacích kontinentální zemské kůry. Povrchové ukládání se omezuje na nízko a středněaktivní odpady. Úložiště v těchto případech odděluje odpad od okolí pomocí technických bariér, které je třeba udržovat a monitorovat. V případě ukládání v hlubinných geologických formacích je izolace zajišťována prostřednictvím pasivní, bezúdržbové geologické bariéry.

Úložiště pro dlouhodobý vysokoaktivní odpad dosud neexistuje, třebaže některé státy začaly usilovat o jeho vybudování již v šedesátých a sedmdesátých letech. Programy nakládání s jaderným odpadem se ve většině zemí výrazně zpomalily. Hlavním důvodem bylo podcenění technických, vědeckých i politických problémů spojených s uskutečněním plánů. Odpor obyvatelstva v místech plánované výstavby úložiště vedl k obnovení diskuse o nakládání s radioaktivními odpady a nutnosti přehodnotit výběr lokalit s přihlédnutím k sociálním aspektům. V poměrně pokročilém stadiu jsou práce na přípravě úložiště ve Spojených státech (lokalita Yucca Mountain) a ve Finsku (Olkiluoto).

Bezpečnostní principy a požadavky

Na mezinárodní úrovni byly stanoveny základní bezpečnostní cíle pro ukládání radioaktivních odpadů:

- Konečné uložení musí zajistit ochranu člověka a životního prostředí před nebezpečím ozáření a dalšími hrozbami spojenými s vlastnostmi odpadu.
- Potenciální budoucí dopady konečného uložení na člověka a životní prostředí nesmí překročit dnes akceptovanou míru.
- Příští generace nesmí být postiženy nepřijatelnou zátěží.
- Případné dopady konečného uložení za hranicemi země, kde bylo vybudováno, nesmí překročit limity platné v příslušné zemi.

V mnoha zemích, včetně všech členských států Evropské unie, se tato pravidla stala součástí právního řádu a tvoří základ pro formulaci (nebo potvrzení) národních požadavků na výstavbu konečného úložiště. Tyto požadavky zahrnují radiologické standardy, kterých musí být při výstavbě úložiště dosaženo, stejně jako některé další závazky. Například v německém zákoně o radiační ochraně je požadována minimalizace dopadů úložiště na okolí.

Standardy pro posouzení dlouhodobé bezpečnosti uzavřených úložišť odpovídají nejvyšším přijatelným dávkám při vystavení lidí radioaktivnímu záření nebo následnému riziku onemocnění rakovinou. Platné standardy pro maximálně přípustnou efektivní dávku záření se v různých zemích pohybují od 0,1 do 0,3 mSv za rok. Standardům odpovídá riziko v rozmezí 10⁻⁴ až 10⁻⁶, což znamená, že pouze jedna osoba z 10 000 respektive miliónu vystavených po celý život příslušné dávce může onemocnět rakovinou.

Standardy se vztahují pouze na úložiště, na nichž proběhl kompletní výzkum. Úplné posouzení plnění požadavků na minimalizaci dopadů na okolí je možné pouze po dokončení výstavby úložiště. Nicméně principy minimalizace jsou následující:

- zabránit vystavení lidí dávkám radiace a kontaminaci okolí ve všech proveditelných případech,
- udržovat vliv na okolí na nejnižší možné úrovni s ohledem vědecké poznání a vývoj technických prostředků i v případech, kdy úložiště splňuje standardy.

Výstavba konečného úložiště musí navíc vyhovět požadavkům na ochranu různých složek životního prostředí. Například v Německu musí být dodržen princip odpovědnosti podle vodního zákona. Tento princip požaduje přísnou ochranu vody, zejména podzemních zásob, v okolí konečného úložiště radioaktivních odpadů před kontaminací nebo zhoršením jejích vlastností. Vztahuje se na možnost úniku radioaktivních i jiných nebezpečných látek z úložiště.

Aby usnadnila naplnění zmíněných cílů, navrhla Mezinárodní komise pro radiační ochranu principy optimalizace radiační ochrany během všech fází návrhu a výstavby úložiště (ICRP 1998). Principy zahrnují volbu lokality a požadují aplikaci optimalizační procedury založené na konceptu vícebariérového systému ochrany a výběru lokality s dostatečnými geologickými podmínkami pro příslušnou velikost úložiště. S obdobným záměrem, včetně zahrnutí požadavků na ochranu podzemních vod, připravil německý Federální úřad pro radiační ochranu (BFS) „Principy bezpečného konečného uložení“ (BFS 2004).

V návrhu německé Komise pro výběr lokality úložiště (AKEND), který se týká nové procedury výběru, se odrážejí zmíněné požadavky zdůrazněním podílu geologických bariér na dlouhodobé bezpečnosti. Na ochranné vlastnosti úložiště klade návrh následující požadavky:

- Při očekávaném průběhu přírodních procesů v lokalitě nesmí nebezpečná látka proniknout izolační vrstvou horniny po dobu miliónu let. Úložiště musí prokázat bezpečnostní rezervu.
- V případě mimořádného vývoje musí být dodrženy standardy platné pro úroveň nebezpečných látek v životním prostředí.

Uvedené požadavky stimulují hledání „nejlepšího možného“ úložiště, tedy takového, které nejlépe splňuje kritéria pro výběr lokality a vyhovuje stavu vědeckého poznání a technické úrovni.

Proč úložiště v hlubinných geologických formacích?

Spolu se všeobecnými požadavky na konečné úložiště musí varianta jeho vybudování v hlubinné geologické formaci zaručit izolaci odpadu od lidské činnosti a životního prostředí po velmi dlouhou („geologickou“) dobu. Ve světě se předpokládá využití tohoto typu úložiště zejména pro vysokoaktivní a dlouhodobý středněaktivní odpad. V současné době se počítá s budováním speciálních dolů pro tento účel.

Krátkodobé nízko a středněaktivní odpady se ve většině zemí ukládají v malé hloubce nebo na povrchu. Naproti tomu v Německu bylo v minulosti (Druhý atomový program z let 1963–1967) rozhodnuto o uložení všech druhů radioaktivního odpadu v hlubinných geologických formacích. Hlavními důvody pro toto rozhodnutí byly vysoká hustota obyvatelstva a intenzivní využívání vody a půdy (Schwibach 1967). Konečné uložení těchto odpadů bylo v Německu praktikováno v testovacích lokalitách v uzavřeném solném dole Asse II poblíž Wolfenbüttelu (1967–1978) a v Morslebenu (1978–1998).

Hlubinné uložení v geologických formacích má v případě výběru vhodné lokality zásadní výhody oproti ostatním možnostem. K hlavním výhodám patří:

- velká vzdálenost mezi odpadem a biosférou
- vysoká a dlouhodobá retenční kapacita geologických bariér
- malá rychlost geologických procesů včetně přeměny a pohybu látek v geosféře zaručující dlouhodobou spolehlivost a funkčnost systému úložiště
- pasivní princip hlavních (geologických) bariér bez potřeby monitoringu a údržby.

Navíc vlastnosti geosféry, ze kterých plynou uvedené výhody, nemohou být ovlivněny (případně pouze minimálně) v důsledku lidské činnosti. Dlouhodobá bezpečnost uzavřeného úložiště nebude záviset na záměrech ani technickém či ekonomickém potenciálu budoucích generací. Tyto veličiny se předvírají daleko obtížněji než vliv přírodních procesů na geologické bariéry systému úložiště (Buser 1997; Gruppe Ökologie 2001; AKEND 2002). Rovněž pokusy o záměrné narušení uzavřeného úložiště v hlubinné geologické formaci během války nebo teroristického útoku jsou krajně nepravděpodobné.

Uvedené výhody se pochopitelně týkají všech druhů radioaktivního odpadu, pro krátkodobé odpady ovšem není jejich využití nezbytné a řada států a institucí volí v tomto případě jinou možnost. Pozitiva hlubinného ukládání se projeví pouze v případě, že jsou při výběru lokality plně respektována bezpečnostní hlediska a podaří se věrohodně prokázat její dlouhodobou vhodnost.

Konečné uložení z pohledu rozvoje nebo útlumu jaderné energetiky

Radioaktivní odpady různého původu se nacházejí ve všech zemích, které využívají jadernou energetiku nebo jiné jaderné technologie. Tyto odpady nezmizí ani po útlumu výroby v jaderných elektrárnách, jejich bezpečné zajištění bude nadále nezbytné.

Celosvětově zpožděný proces hledání vhodné lokality pro úložiště středně a vysokoaktivních odpadů s dlouhým poločasem rozpadu signalizuje složitost problému z vědeckého, technického i sociálního hlediska. Závažnost problému nepochybně vzroste v případě zvyšování množství odpadu. Naopak útlum jaderné energetiky usnadní hledání řešení na úrovni jednotlivých států. Množství a druh odpadu určeného k uložení bude v tomto případě možné se značnou přesností určit, což usnadní výběr lokality a návrh podoby úložiště. Omezené množství odpadu, jenž musí

být nevyhnutelně uložen, rovněž pomůže zmírnit odpor k vybudování úložiště v dotčeném regionu.

Naproti tomu v případě neomezeně pokračujícího provozu jaderných elektráren významně vzrostou požadavky na rozměr úložiště, nebo bude nutné vybudovat větší počet úložišť.

Problémy konečného uložení

Při ukládání radioaktivních odpadů v zařízeních umístěných na povrchu nebo v malé hloubce se neprojeví výhody vyjmenované pro případ hlubinného ukládání v geologických formacích (Gruppe Ökologie 2001). Odpady se nacházejí přímo v biosféře, a proto je příliš riskantní prohlásit takové úložiště za dostatečnou pasivní bariéru a ponechat je svému osudu. Pasivní ochrana lidí i životního prostředí ze strany geologické bariéry není srovnatelná s variantou hlubinného úložiště. Proto tento typ ukládání vyžaduje dodatečné technické bariéry a zařízení pro jejich monitoring a případné opravy. Další nevýhodou je přístupnost odpadu a jeho zranitelnost při případném teroristickém útoku. Zařízení tedy vyžaduje ochranu proti záměrnému narušení zvenčí. Úložiště vybudovaná na zemském povrchu nebo v malých hloubkách pro krátkodobý nízký a středněaktivní odpad vyžadují údržbu po dobu několika století, aby bylo možné zaručit ochranu lidí a životního prostředí. V tak dlouhém časovém horizontu nelze spolehlivě předpovědět životaschopnost instituce odpovědné za provoz zařízení a dokonce ani podobu společnosti či státního zřízení na dotčeném území. Při bližším pohledu vidíme, že konečné uložení odpadu na povrchu nebo v malé hloubce se může v současnosti jevit jako ekonomicky výhodné řešení, znamená ovšem zdravotní riziko a možnou ekonomickou zátěž pro příští generace.

Ačkoli konečné uložení v hlubinných geologických formacích kontinentální zemské kůry v současné době doporučují jako nejbezpečnější dlouhodobou možnost státní i mezinárodní instituce zodpovědné za radioaktivní odpady, má i tato varianta svoje nevýhody. Výhrady zodpovědných institucí k této formě uložení odpadu vyplývají především z následujících bodů:

- rozpor mezi dlouhým časovým úsekem, po který zůstává odpad nebezpečný pro člověka a životní prostředí, a malou věrohodností dlouhodobé předpovědi zachování funkčnosti bariér úložiště
- nemožnost sledování chování systému bariér po uzavření úložiště a potvrzení schopnosti dlouhodobého zachování funkčnosti
- nemožnost zásahu v případě chybného fungování individuálních bariér nebo jejich úplného selhání
- nemožnost zpřístupnění úložiště a případného vyjmutí odpadu po jeho uzavření.

Část těchto námitek lze řešit pečlivým výběrem lokality a rozbořem dlouhodobé bezpečnosti úložiště, který zahrne všechny relevantní aspekty. Dále je třeba zdůraznit, že technické řešení, které by umožňovalo zásahy do systému úložiště a umožnilo přístup k odpadu po jeho uzavření, by znamenalo omezení dlouhodobé bezpečnosti.

Konečné uložení určitých radioaktivních odpadů v nízkoporézní hornině s vysokou schopností zadržovat radionuklidy čelí problému uvolňování plynů z uloženého odpadu, které může vést k narušení funkčnosti geologické bariéry. Důsledkem zvýšeného tlaku plynu v uzavřeném úložišti může být vznik trhlin v hornině. Změna chemického prostředí zase může vést ke zpomalení nebo zrychlení samovolného postupu radionuklidů. Uvolňování plynu se omezuje především na nízký a středněaktivní odpad. Podle současných odhadů problém uvolňovaného plynu neznamena diskvalifikaci konečného uložení v hlubinných geologických formacích, musí být ovšem bráno do úvahy při návrhu úložiště a zajištění jeho dlouhodobé bezpečnosti.

Prokázání dlouhodobé bezpečnosti a izolačních schopností

Všechny horniny a všechny lokality zkoumané pro konečné uložení radioaktivních odpadů mají z bezpečnostního hlediska své výhody a nevýhody. Z tohoto důvodu existuje řada metodických požadavků na prokázání vhodnosti zvolené lokality. Aplikace této metodiky na hlubinné ukládání v geologických formacích ukazuje na jeho lepší bezpečnost ve srovnání s jinými zvažovanými možnostmi nakládání s odpadem. Prokázání dlouhodobé bezpečnosti konkrétního úložiště může být krokem ke zmírnění nevýhod této možnosti plynoucích z dlouhodobé nepřístupnosti odpadu po uzavření úložiště.

Dlouhý poločas rozpadu některých izotopů obsažených v odpadu znamená, že v případě jejich úniku z úložiště by došlo k ohrožení lidského zdraví a životního prostředí i v daleké budoucnosti. Klíčovým požadavkem je proto bezpečná izolace odpadu po velmi dlouhou dobu. Z vědeckého hlediska nelze věrohodně předpovědět chování systému úložiště, konkrétně jeho geologických bariér, po celou dobu, kdy odpad zůstane nebezpečný a musí být izolován od biosféry. Dlouhodobá funkčnost geologických bariér závisí na budoucích klimatických a geologických procesech, které nelze v předstihu předvídat. Lze ovšem sestavit přehled možných dopadů na dlouhodobou bezpečnost úložiště.

Vědecký důkaz izolace odpadu po celou dobu jeho nebezpečnosti nelze pochopitelně poskytnout. Německá Komise pro výběr lokality úložiště (AKEND 2002) tvrdí, že lze získat spolehlivou předpověď funkčnosti klíčových geologických bariér systému úložiště na milión let a prokazování dlouhodobé bezpečnosti má vycházet z tohoto časového horizontu. V jiných zemích se požadavek na prokázání dlouhodobé bezpečnosti omezuje na kratší časový horizont (10 000 let). Navzdory klesající spolehlivosti předpovědí s výhledem do vzdálenější budoucnosti by časový horizont výzkumu neměl být omežován.

Zmíněné nejistoty v předpovědích se mohou prohloubit v důsledku nepřesnosti informací o lokalitě úložiště a vzájemném působení mezi odpady, technickými a geologickými bariérami, na kterých jsou odhady budoucího chování postaveny. Po dobu, kdy jsou odpady a bariéry přístupné, nelze pozorovat procesy významné pro dlouhodobé chování úložiště, protože to se ještě nenachází v definitivním dlouhodobém stavu. Stabilní stav nastane až dlouhou dobu po uzavření úložiště, kdy už není přístupné a pozorování nelze provést.

Německá Komise pro výběr lokality úložiště (AKEND 2002) uvádí, že klíčovým opatřením k prokázání dlouhodobé bezpečnosti zůstává správný výběr lokality. Ten rovněž významně ovlivňuje spolehlivost předpovědí o budoucím chování úložiště. Proto musí být možnost věrohodné předpovědi budoucího vývoje brána v úvahu během procesu výběru lokality. Výzkum konkrétní lokality pak musí přinést požadované informace, ze kterých bude možno posoudit dlouhodobou bezpečnost úložiště. Poté bude nutné podniknout příslušná opatření vyplývající ze zbývajících nejistot.

Možnost opětovného vyzvednutí

Následující odstavec diskutuje možnost opětovného vyzvednutí odpadu (konkrétně vyhořelého paliva a vysokoaktivního odpadu) z úložiště podle předem stanoveného plánu a bez velkých technických komplikací. Toto téma se stalo předmětem mezinárodní debaty, která se zaměřuje především na články vyhořelého paliva. Možnost vyzvednout v budoucnu uložený odpad a změnit rozhodnutí o jeho konečném uložení sledují ve svých programech nakládání s radioaktivním odpadem země jako Švédsko, Finsko a Spojené státy. Pro možnost budoucího vyzvednutí odpadu existují bezpečnostní, etické i ekonomické argumenty (NEA 2001) jako například:

- bezpečnostní problémy technického rázu, které se objeví po umístění odpadu do úložiště, nebo změna akceptovatelných bezpečnostních standardů
- možnost opětovného využití části uloženého odpadu
- možnost využití alternativních metod zpracování odpadu nebo technologie uložení vyvinuté v budoucnosti
- možnost reagovat na společenské změny a sníženou ochotu obyvatel akceptovat rizika spojená s úložištěm
- umožnit příštím generacím svobodnou volbu.

Mezinárodně diskutované plány zajištění možnosti opětovného vyzvednutí neodmítají koncept konečného uložení, ale požadují jeho odklad. Před zprovozněním úložiště má proběhnout několik fází postupného zavážení částí úložiště, přístupových šachet a štol. Přístup k odpadu se s každou fází komplikuje a případné vyzvednutí by vyžadovalo stále větší nasazení technických prostředků. Po uzavření úložiště by vyzvednutí bylo možné pouze s využitím těžební technologie. Zatím neexistuje jednotná představa o přesném průběhu a době trvání jednotlivých fází. Diskutovaná doba, po kterou by mělo být možné technicky jednoduché vyzvednutí odpadu, se pohybuje v horizontu několika desetiletí, případně století.

Proces zajištění dlouhodobé bezpečnosti úložiště se zakládá na pečlivém výběru pasivního a bezúdržbového systému. Při vynechání fáze umožňující přístup k odpadu bude podmínek pasivní bezpečnosti dosaženo v nejkratší možné době. V případě zajišťování přístupu k odpadu bude podmínek pasivní bezpečnosti dosaženo později. V mezidobí bude nutno zajistit opatření aktivní bezpečnosti (kontrola a monitoring), jejichž spolehlivost může být stěží garantována. Navíc opatření aktivní bezpečnosti vyžadují stabilní společenské a ekonomické prostředí, což nelze zaručit v případě dlouhé doby požadované pro možnost vyzvednutí odpadu.

Etické argumenty ve prospěch zachování možnosti vyzvednutí odpadu, zejména pak svobodná volba pro příští generace, nepůsobí přesvědčivě. Etické principy nelze naplňovat cestou, která vede ke snížení bezpečnosti. Ochrana současné i budoucích generací musí být sama o sobě základním etickým požadavkem na koncepci nakládání s jaderným odpadem. Ochrana musí mít nejvyšší prioritu, bez naplnění bezpečnostních požadavků by všechny ostatní aspekty koncepce ztrácely význam.

I v případě ponechání možnosti rozhodovat o odpadu budoucím generacím zůstane primární odpovědnost za řešení problému radioaktivních odpadů na generaci současné. Problém možnosti vyzvedávání odpadu nemůže být omluvou pro zpoždění vývoje konečných úložišť o neurčitou dobu. Možnost vyzvednutí odpadu rovněž nemůže nahradit správně navržené úložiště.

Na druhé straně promyšlený program vývoje konečného úložiště může zahrnovat opatření ke zlepšení možnosti vyzvednutí odpadu po určitou pevně stanovenou dobu. V tomto smyslu byl formulován švýcarský koncept označený jako „monitoring dlouhodobého geologického uložení“, který zahrnuje zkušební programy a organizační opatření (EKRA 2000). Technickou proveditelnost konceptu prověřuje projekt „Entsorgungsnachweis“ (NAGRA 2002), rozhodnutí o konceptu bude předcházet celospolečenská diskuse.

Přístupy k výběru místa konečného úložiště v různých zemích

Zatímco cíl výběru lokality konečného úložiště zůstává ve všech zemích stejný, tedy najít místo pro dlouhodobě bezpečné uložení odpadu vyprodukovaného v dané zemi, přístupy, které mají vést k naplnění tohoto cíle, se v konkrétních podrobnostech liší. Tím pádem existují i rozdíly v procedurách výběru úložišťové lokality. K hlavním příčinám rozdílů patří:

- různé koncepty klasifikace způsobu ukládání a lokality úložiště
- různé politické a zákonné požadavky
- různé geologické podmínky v oblasti výzkumu (na území příslušného státu)
- různé požadavky na výběr místa (vhodné, relativně nejlepší).

V řadě zemí byly zahájeny aktivity směřující k výběru lokality pro úložiště v sedmdesátých letech. V té době byl výběr lokality chápán výhradně jako vědecký a technický problém. Transparentnost a otevřenost procesu rozhodování nehrála žádnou nebo minimální roli. V některých případech byl výběr silně ovlivněn vnějším tlakem a neproběhl podle předem definované procedury (německý Gorleben, Yucca Mountain ve Spojených státech). Každopádně žádná z národních výběrových procedur zahájených v sedmdesátých letech dosud nevedla ke zprovoznění konečného úložiště vysokoaktivních odpadů a vyhořelého paliva.

Negativní zkušenosti se způsobem výběru lokality pro úložiště a společenský vývoj v minulých desetiletích vedl v některých zemích ke zvýšenému zapojení veřejnosti. Výběr úložišťové lokality již není pouze vědeckým a technickým procesem, významnou roli hraje rovněž společenská akceptovatelnost a demokratické rozhodování. Otevřenost a transparentnost procedury, stejně jako přijatelnost jejího výsledku, jsou dnes celosvětově vnímány jako důležité předpoklady pro úspěšnou proceduru výběru úložiště. Procedura proto musí splňovat minimálně následující sociologické a metodické požadavky:

- zveřejnění časového plánu a kritérií výběru před zahájením procedury
- postupná jasně strukturovaná procedura s předem definovaným harmonogramem rozhodování a několikastupňové povolovací řízení
- účast veřejnosti a dotčených osob a skupin již od počátku procedury se závaznými výstupy veřejných projednání

- systematické zahrnutí sociologických kritérií
- odůvodnění kritérií

Přístupy jednotlivých států k naplnění uvedených požadavků se ovšem liší, především z důvodu přetrvávání výše zmíněných rozdílů v aplikaci procedury.

Vyhledávání lokality pro úložiště veřejnost v mnoha zemích vnímá negativně. Občané zpochybňují legitimitu procedury, neboť požadavky na zapojení veřejnosti do rozhodování nebývají dostatečně plněny (výjimku tvoří Švýcarsko, Švédsko a do určité míry Finsko). Děje se tak navzdory tomu, že nezbytnost účasti veřejnosti již není zpochybňována. Z pohledu rozhodovacího procesu je zřejmé, že každému významnému rozhodnutí ve věci dlouhodobého nakládání s radioaktivním odpadem musí předcházet široká diskuse, do které se zapojí široké spektrum účastníků. Veřejnost nepřijímá rozhodnutí o nevratných technických krocích, jejichž důsledky přesně nechápe a nemá je pod kontrolou. Klíčovým požadavkem na pokročilý rozhodovací proces při výběru lokality je postup podle konceptu, jehož jednotlivé kroky jsou prakticky vratné (NEA 2004).

Jako příklad moderní procedury výběru úložiště uvádíme v tabulce 3 přehled doporučení německé Komise pro výběr lokality úložiště (AKEND 2002). Procedura zahrnuje vědecká technická i sociologická kritéria, jasné rozčlenění do šesti kroků, vyhodnocení všech německých regionů podle stejných kritérií a odmítá předběžný výběr vhodných geologických formací. Součástí je neomezená účast veřejnosti od počátku procedury do jejího konce. Cílem je vyřešení rozporu mezi národními a regionálními zájmy, ke kterému vede idea, že vybudování úložiště neznamená pouze zátěž, ale také příležitost (NIES 2004).

Tabulka 3. Procedura v krocích: kritéria, posuzování, schvalování a nástroje pro zapojení veřejnosti

Kroky procedury	Schvalování, Kritéria, Posuzování	Nástroje zapojení veřejnosti
Krok 1: Identifikace oblastí splňujících minimální specifické požadavky	<ul style="list-style-type: none"> geologická vylučovací kritéria a minimální požadavky 	Pro celou proceduru (kroky 1–6): <ul style="list-style-type: none"> vybudování informační platformy kontrolní komise pro ověření dodržování pravidel procedury
Krok 2: Výběr konkrétních oblastí s vhodnými geologickými podmínkami	<ul style="list-style-type: none"> geologické posouzení 	
Krok 3: Identifikace a výběr regionů pro povrchový výzkum vhodnosti umístění úložiště (minimálně tři místa) v případě nutnosti krok zpět	<ul style="list-style-type: none"> stanovení vědeckých vylučovacích kritérií analýza sociálně ekonomického potenciálu stanovení váhy kritérií specifikace programů povrchového výzkumu a odpovídajících kritérií posouzení ochota veřejnosti k zapojení do procesu povrchového výzkumu geologické a těžební hledisko 	Od kroku 3 dále: <ul style="list-style-type: none"> setkání občanů jako hlavní nástroj zapojení veřejnosti podpora setkání občanů ze strany kompetentních odborníků kulaté stoly dotčených osob průzkum ochoty spolupracovat na krocích 3 a 4 příprava konceptu rozvoje regionu rozhodnutí místní samosprávy orientační průzkum názorů veřejnosti a samosprávy na konci kroku 5
Krok 4: Určení lokalit pro podzemní výzkum (minimálně dvě místa) v případě nutnosti krok zpět	<ul style="list-style-type: none"> povrchový výzkum a jeho vyhodnocení orientační posouzení bezpečnosti ochota k účasti na programu podzemního průzkumu stanovení testovacích kritérií 	
Krok 5: Rozhodnutí na místě v případě nutnosti krok zpět	<ul style="list-style-type: none"> podzemní průzkum a jeho vyhodnocení posouzení bezpečnosti porovnání zkoumaných lokalit 	
Krok 6: Lokalita úložiště pro povolovací řízení		

Zdroj: AKEND (2002)

Alternativní ukládání

Vedle konceptu izolace radioaktivního odpadu v hlubinných geologických formacích existuje několik alternativ, které byly v minulosti diskutovány a částečně uváděny do praxe. Jedná se o následující koncepty:

- Přeprava do vesmíru

Tento návrh byl diskutován především ve Spojených státech v prvních debatách o odstranění dlouhodobého radioaktivního odpadu. Výhodou této idey je definitivní odstranění radioaktivního odpadu z dosahu člověka. Vzhledem k ekonomickým nákladům by bylo možné tento koncept uplatnit pouze v případě malého množství odpadu (vysokoaktivní odpad). Navíc existuje riziko havárie během startu kosmické lodi s nepředstavitelnými následky. I v případě přijatelnosti tohoto způsobu ukládání by jeho využití bylo omezeno na několik zemí s rozvinutou technologií.

- Ukládání v antarktickém ledovci

Tento koncept izolace odpadu vychází ze skutečnosti, že v rozlehlých oblastech Antarktidy se nachází ledovec o stáří 15 milionů let a tloušťce 4 km. Ke změnám tohoto ledovce by

v dohlédnutelné budoucnosti nemělo dojít. Dosud ovšem nebyly zodpovězeny všechny otázky týkající se geofyzikálních a geochemických vlastností masy ledu a možného dopadu klimatických změn. Koncept by kromě toho vyžadoval zásadní změnu mezinárodních dohod a širokou politickou podporu. Žádný stát tento koncept nerozvíjí.

- Ukládání do moře

Ukládání nízko a středně aktivního odpadu do moře, která upravovaly specifické podmínky MAAE, nebylo praktikováno od roku 1983 na základě dobrovolného moratoria a od roku 1993 je zakázáno v důsledku podpisu Londýnské konvence. Záměrem bylo ukládání uvedeného odpadu do velkých hloubek, kde probíhá jen omezené promíchávání vodních vrstev. V důsledku malého proudění a vysoké hustoty vody se předpokládalo pouze limitované rozptýlení radionuklidů. Ukládání vysokoaktivního odpadu do moře s cílem dlouhodobého rozředění dosud žádná země nezvažovala.

- Ukládání pod mořské dno

Na začátku osmdesátých let analyzovaly některé členské státy OECD/NEA možnost ukládání vysokoaktivního odpadu pod mořské dno. Dno ve velkých hloubkách oceánu má vhodné vlastnosti, zejména v místech se silnou vrstvou sedimentu vyniká vysokou schopností pohlcovat radionuklidy. Pravděpodobnost nehody je v tomto případě poměrně nízká. Dosud však nebyly vyvíjeny ani zkoušeny technologie, které by umožnily budování úložiště ani následné umístění odpadu. Vývoj této technologie by vyžadoval schválení dodatku k Londýnské konvenci. Ve světě tuto možnost žádný stát aktivně nerozvíjí.

- Podpovrchové ukládání

Ukládání krátkodobých nízko a středně aktivních odpadů v malé hloubce pod povrchem představuje současnou technologickou špičku. Řada zemí staví nebo provozuje zařízení tohoto typu (evropské země, Spojené státy, Japonsko, Jihoafrická republika). Izolaci odpadu po požadovanou, poměrně krátkou (do 300 let) dobu zajišťuje výběr vhodné podzemní lokality s odpovídající geologickou bariérou a výstavby technických a geotechnických bariér. Zařízení je rovněž monitorováno. Postupem času se tato úložiště přemění ve běžné sklady. Pro vysokoaktivní odpady a vyhořelé palivo nelze tento koncept kvůli dlouhému poločasu rozpadu využít.

Alternativy k ukládání odpadu

Otázka, zda existuje alternativa k hlubinnému ukládání jaderného odpadu v geologických formacích, se v široké veřejnosti často diskutuje. Pro hledání alternativy hovoří eticky postavené argumenty, jako ochrana potenciálního zdroje nebo uchování otevřené možnosti zásahu pro budoucí generace. Z tohoto pohledu zhodnotíme dvě mezinárodně nejčastěji diskutované alternativy, kterými jsou:

- separace a transmutace
- dlouhodobé skladování.

Separace a transmutace

Smyslem separace a transmutace je přeměna dlouhodobých a vysoce toxických radionuklidů na méně nebezpečné s nejkratším možným poločasem rozpadu. Problémy konečného úložiště, především velmi dlouhá doba nutné izolace odpadu, by podle zastánců transmutace mohly být vyřešeny díky přeměně dlouhodobých radionuklidů na krátkodobé. Teoreticky by transmutační program mohl zredukovat problém dlouhodobé izolace na potřebu prostého skladu na několik desítek let, případně století. Systém s využitím transmutace vyžaduje v první řadě přepracovací závod, aby bylo možné oddělit radionuklidy určené pro transmutaci, tedy dlouhodobé radionuklidy od ostatních. Tento krok umožní selektivní konverzi dlouhodobých radionuklidů na krátkodobé ozářením v reaktoru. V úvahu připadá použití kritického reaktoru, který je nezávislým transmutačním zařízením, nebo podkritického reaktoru, který vyžaduje přídavný zdroj neutronů k udržení řetězové reakce.

Ani nejpodrobnější teoretické schema transmutace nedokáže problém jaderného odpadu řešit kompletně. Vždy zůstává podstatné množství dlouhodobých radionuklidů, které vyžadují konečné uložení, přičemž transmutační systém vede ke vzniku nových odpadů v důsledku provozu a likvidace zařízení. Transmutace nemůže eliminovat potřebu vybudování konečného úložiště pro vysokoaktivní odpad. Žádné schema transmutace se nemůže vypořádat se všemi radionuklidy, některé nemohou být transmutovány z technických důvodů. Například transmutace izotopů Tc-99 a I-129 není stoprocentně efektivní ani při mnohonásobném ozáření v reaktoru. Navíc štěpením aktinidů vznikají nové dlouhodobé štěpné produkty, které nelze úplně eliminovat. To znamená, že existují podstatné limity redukce dlouhodobé radioaktivity i v případě nasazení propracovaného a velmi nákladného programu transmutace. Systém s transmutací rovněž vyžaduje provoz chemických a jaderných zařízení, s nímž se pojí větší riziko než s provozem konečného úložiště.

Jedinou ekonomicky smysluplnou cestou k prosazení tohoto způsobu nakládání s jaderným odpadem by bylo založení nové odnože jaderného průmyslu specializované na separaci a transmutaci radionuklidů. Náklady na systém s využitím transmutace budou extrémně vysoké – i v porovnání s miliardami utrácenými na programy vývoje úložišť.

Separace radionuklidů nezbytná pro transmutaci rovněž zvýší riziko snadného přístupu ke štěpitelným materiálům, které lze použít k výrobě jaderných zbraní. Všechny procesy separace, včetně těch, které jsou označovány jako „odolné proti zneužití“, jsou spojeny s vyšším rizikem než otevřený jaderný cyklus (Zerriffi, Makhijani 2000).

Transmutace není ovšem zvažována pouze jako nástroj pro likvidaci odpadů současné generace reaktorů. V Evropě (zejména ve Francii) a v Japonsku transmutační schémata předpokládají neurčitou dobu pokračování jaderné energetiky s transmutací jako jednou částí nového palivového cyklu. Francouzská „Commission Nationale D’Evaluation“ ve svých závěrech týkajících se transmutace uvádí, že tato technologie závisí na zařízeních, která v současné době neexistují, ať už jde o systémy reaktorů 4. generace nebo systém řízený akcelerátorem (CNE 2005). Každopádně zbývající množství radionuklidů by muselo být uloženo jako dlouhodobý radioaktivní odpad. Transmutace proto nepředstavuje alternativu ke geologickému úložišti.

Dlouhodobé skladování

V případě dlouhodobého skladování radioaktivních odpadů (přístup praktikovaný v Nizozemí) má bezpečnost zaručit dlouhodobá kontrola. Tento koncept předpokládá zachování současných vědeckých a ekonomických možností a ochotu společnosti pracovat na kontrolách a dalších nezbytných opatřeních. Pro koncept dlouhodobého skladování skutečně hovoří řada technických i etických argumentů. Koncept vychází z přístupu, že jedna generace může následující generaci předat svět s „rovnocennými příležitostmi“, což platí i pro generace následující. Tím zachovává možnosti a vyhýbá se obtížím s předpovídáním vzdálené budoucnosti. Podle této myšlenky „posouvající se současnosti“ by měla současná generace odpovědnost poskytnout generaci nastupující znalosti, zdroje a možnosti k řešení problémů, které jí předává. Odložil-li ovšem současná generace vybudování konečného úložiště kvůli čekání na pokročilou technologii nebo z důvodu ekonomicky výhodnějšího skladování, nelze očekávat, že příští generace přijme jiné rozhodnutí. Ve svém důsledku může tento přístup vést k předávání odpovědnosti za potřebné kroky na budoucí generace a z tohoto důvodu se jeví jako neetický.

Nejzávažnější vada strategie dlouhodobého skladování spočívá v předpokladu trvalé stability budoucích společností a jejich průběžné schopnosti zajistit požadovaná bezpečnostní a organizační opatření. Rovněž je třeba brát v úvahu přirozenou tendenci společnosti zvyknout si na existenci skladovacího zařízení ve svém sousedství a časem začít ignorovat jeho rizika. Během dlouhé doby pak může dojít k postupnému zanedbávání dozoru a údržby, s rizikem vážného poškození zdraví lidí či životního prostředí v daleké budoucnosti. Známe řadu případů ekologických problémů zděděných z minulosti, které ukazují že strategie spoléhání na budoucí generace může být chybná (NEA 1995).

Požadavek na ponechání otevřených možností pro budoucí generace rovněž předpokládá zachování současných ekonomických a vědeckých možností a znalostí, stejně jako zájem budoucí společnosti. Přitom nelze vyloučit možnost sociálních otrěsů, způsobených například válkou, které povedou k výrazně negativním dopadům na ekonomickou situaci, ale třeba i na možnosti výzkumu. V takovém případě by ponechání otevřených možností vedlo k opačnému výsledku než bylo zamýšleno. Budoucí generace by nemohly dohlížet na zděděný odpad, což by vedlo k ohrožení bezpečnosti a omezení jejich svobody. Přesun konečného rozhodnutí na budoucí generace rovněž zanedbává princip „znečišťovatel platí“.

Dlouhodobé skladování každopádně čelí velkým nejistotám v předpovědích sociálního a politického vývoje. Tyto nejistoty jsou daleko větší než v případě předpovědi funkčnosti geologické bariéry jako pasivního ochranného systému zasypaného a uzavřeného úložiště. Proto dnes neexistuje jiné realistické řešení uložení radioaktivního odpadu než hlubinné úložiště v geologických formacích. Obecnou výhodou tohoto konceptu je, že určité horniny vykazují nízkou prostupnost tekuté fáze, případně jsou v důsledku svých chemických a fyzikálních vlastností v technickém smyslu vodotěsné. Horniny si tyto vlastnosti uchovávají po celé dlouhé geologické období, což vede k předpokladu, že dokáží izolovat nebezpečné látky od biosféry řádově milión let. Nutnou podmínkou je ovšem pečlivý výběr vhodné lokality, například podle výše popsané procedury.

Nakládání s odpadem u systémů s reaktory 4. generace

U vyvíjené 4. generace reaktorů slibuje jaderný průmysl uzavřený jaderný cyklus nejen pro uran a plutonium, ale i pro všechny transurany. Požadavek na izolaci odpadů při konečném uložení by se v tomto případě redukoval na dobu kolem 1 000 let. K uskutečnění tohoto snu by ovšem bylo třeba splnit dvě podmínky:

- separovat nuklidy z vyhořelého paliva s vysokým požadavkem na čistotu separovaného materiálu
- provést transmutaci vybraných transuranů a dalších nuklidů v reaktoru.

V souvislosti se systémy reaktorů 4. generace se hovoří o zavedení symbiotického palivového cyklu pro reaktory pracující se spektrem rychlých neutronů a nové druhy tepelných reaktorů.

V současné době lze soudit, že uvedený koncept zůstane pouhým snem, stejně jako palivový cyklus navržený v šedesátých letech dvacátého století. První překážkou pro jeho naplnění by byla potřeba výstavby gigantického parku přepracovacích závodů nezbytných pro separaci nuklidů. Problémy jako vypouštění tekutých i plyných radioaktivních látek, vznik velkého množství radioaktivního a chemického odpadu, možnost vážné havárie či riziko odcizení materiálu použitelného k výrobě jaderných zbraní by byly o několik řádů závažnější než při současném objemu přepracování.

Vývoj rychlých reaktorů, které by mohly pracovat v zamýšleném režimu, byl v minulých letech z technických důvodů zastaven. Zatím neexistuje žádný důvod, který by do budoucna zlepšil jejich vyhlídky. K výzkumu separačních a transmutačních projektů bude třeba několik miliard eur. Přitom není pravděpodobné, že dlouhodobé nuklidy se podaří separovat a transmutovat natolik, aby bylo možné omezit dobu konečného uložení na deklarovanou úroveň.

Celkově lze shrnout, že z technických, ekonomických a bezpečnostních důvodů není zprovoznění „symbiotického palivového cyklu“ pravděpodobné.

4 Literatūra

Odkazy

- AKEND (Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte) (2002). Site Selection Procedure for Repository Sites – Recommendations of the AkEnd. Final report, December 2002.
- BFS (Bundesamt für Strahlenschutz) (2004). Grundsätze für die sichere Endlagerung. Bundesamt für Strahlenschutz. Entwurf, November 2004.
- (2005). Dezentrale Zwischenlagerung – Bausteine zur Entsorgung radioaktiver Abfälle. Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter.
- Bunn, M., et al. (2003). The Economics of Reprocessing vs. Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel. DE-FG26-99FT4028, Cambridge, Massachusetts, December 2003.
- Buser, M. (1997). Which is More Stable: A Rock Formation or a Social Structure? NAGRA Bulletin, no. 30.
- CNE (Commission Nationale D'Evaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs) (2005). Commission Nationale D'Evaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs. Rapport D'Evaluation, no. 11, Juin 2005.
- Diehl, Peter (1995). Uranium Mining in Europe – The Impacts on Man and Environment. WISE News Communiqué 439/440, September, special edition.
<http://www.antenna.nl/wise/439-440/cont.html>.
- (2004). Re-enrichment of West European Depleted Uranium Tails in Russia. November.
<http://www.wise-uranium.org/pdf/reenru.pdf>.
- EKRA (Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle) (2000). Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle. Schlussbericht vom 31.01.2000. Im Auftrag des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie, und Kommunikation.
- ESA (Euratom Supply Agency) (2005). Annual Report 2004. <http://europa.eu.int/comm/euratom/ar/ar2004.pdf>.
- Gruppe Ökologie (1998). Analyse der Entsorgungssituation in der Bundesrepublik Deutschland und Ableitung von Handlungsoptionen unter der Prämisse des Ausstiegs aus der Atomenergie. Im Auftrag der Heinrich Böll Stiftung, Hannover, August 1998.
- (2001). Vergleichende Bewertung von Entsorgungsoptionen für radioaktive Abfälle (Comparative Evaluation of Disposal Options for Radioactive Wastes). Abschlußbericht. Im Auftrag des Projektträgers des BMBF und BMWi für Wassertechnologie und Entsorgung, Förderkennzeichen 02 E 9350.
- (2005). Wiederaufarbeitung deutscher Brennelemente im Ausland. Prepared for Robin Wood, Hanover, Juni 2005.
- IAEA (International Atomic Energy Agency) (1995). International Atomic Energy Agency: Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials. Report No. TS-R-1.
- (1997). International Atomic Energy Agency: Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and of the Safety of Radioactive Waste Management. Vienna.
- (2001). Analysis of Uranium Supply to 2050. STI/PUB/1104, ISBN 92-0-100401-X, Vienna, May 2001, 103 pp.
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1104_scr.pdf.
- (2003). Safety and Engineering Aspects of Spent Fuel Storage. 1996 edition (as amended 2003), Vienna.
- ICRP (International Commission of Radiological Protection) (1998). Radiation Protection Recommendations as Applied in the Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste. Publication 81. Annals of the ICRP, vol. 28, no. 4.

- Large and Associates (2004). Potential Radiological Impact and Consequences Arising from Incidents Involving a Consignment of Plutonium Dioxide under Transit from Cogema La Hague to Marcoule/Cadarache. Report Ref-No R3108-A6, prepared for Greenpeace International, March 2004.
- Marignac, Y., and X. Coeytaux (2003). The Unbearable Risk – Proliferation, Terrorist Threats and the Plutonium Industry. Report prepared for „The Greens/European Free Alliance“ in the European Parliament, June 2003.
- NAGRA (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle) (2002). Project Opalinus Clay; safety report. Demonstration of Disposal Feasibility for Spent Fuel, Vitrified High-level Waste and Long-lived Intermediate-level Waste. Nagra Technical Report NTB 02-05. Nagra, Wetztingen, Switzerland.
- NEA (Nuclear Energy Agency) (1995). The Environmental and Ethical Basis of Geological Disposal of Long-Lived Radioactive Wastes. A Collective Opinion of the Radioactive Waste Management Committee of the OECD Nuclear Energy Agency.
- (2001). Reversibility and Retrievability in Geologic Disposal of Radioactive Waste – Reflections at the International Level.
- (2004). Stepwise Approach to Decision Making for Long-term Radioactive Waste Management – Experiences, Issues and Guiding Principles. NEA report no. 4429.
- (2004). Uranium 2003 – Resources, Production and Demand. OECD Nuclear Energy Agency / International Atomic Energy Agency, ISBN 92-64-01673-2, Paris 2004, 302 pp. <http://www.oecdbookshop.org/>.
- NERAC (U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee) (2002). A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. December 2002. <http://www.ne.doe.gov/nerac/FinalRoadmapforNERACReview.pdf>.
- Öko-Institut (2000). Ermittlung der möglichen Strahlenexpositionen der Bevölkerung aufgrund der Emissionen der Wiederaufarbeitungsanlagen in Sellafield und La Hague. Im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, Februar 2000.
- Schwibach, J. (1967). Research on the Permanent Disposal of Radioactive Wastes in Salt Formations in the Federal Republic of Germany. In: IAEA (1967), publication STJ/PUB/156, pp. 465–477.
- STRLSCHVO (Strahlenschutzverordnung) (2001). Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlung in der Fassung der Bekanntmachung vom 20. Juli 2001. BGBl I, S. 1714.
- WNA (World Nuclear Association) (2005). World Nuclear Association homepage. <http://www.world-nuclear.org/>.
- WUP (WISE Uranium Project) (2005). WISE Uranium Project homepage. <http://www.wise-uranium.org/>.
- Zerriffi, H., and A. Makhijani (2000). Nuclear Alchemy Gamble: An Assessment of Transmutation as a Nuclear Waste Management Strategy. Prepared for the Institute for Energy and Environmental Research, May 2000. <http://www.ieer.org/reports/transm/>.

Další publikace (historie těžby uranu)

Amundson, Michael A. 2002. Yellowcake towns – uranium mining communities in the American west. University Press of Colorado. Hardcover edition: ISBN 0-87081-662-4; paperback edition: ISBN 0-87081-765-5.

Ball, Howard. 1993. Cancer factories – America's tragic quest for uranium self-sufficiency. Contributions in Medical Studies 37. Connecticut: Greenwood Press. ISBN 0-313-27566-1.

Beleites, Michael. 1992. Altlast Wismut – Ausnahmezustand, Umweltkatastrophe und das Sanierungsproblem im deutschen Uranbergbau. Frankfurt a.M.: Brandes & Apsel Verlag. ISBN 3-86099-104-3. <http://www.wise-uranium.org/uwispb.html>.

Beleites, Michael. 1988. Pechblende – der Uranbergbau in der DDR und die Folgen. Wittenberg. <http://www.wise-uranium.org/uwispb.html>.

Eichstaedt, Peter H. 1994. If you poison us: uranium and Native Americans. Santa Fe: Red Crane Books. ISBN 0-878610-40-6.

Karlsch, Rainer, und Harm Schröter (Hg.). 1996. „Strahlende Vergangenheit“ – Studien zur Geschichte des Uranbergbaus der Wismut. St. Katharinen: Scripta Mercaturae Verlag. ISBN 3-89590-030-3.

Karlsch, Rainer, und Zbynek Zeman. 2002. Urangeheimnisse. Das Erzgebirge im Brennpunkt der Weltpolitik 1933–1960. Berlin: Ch. Links Verlag. ISBN 3-86153-276-X.

Nadace Heinricha Bölla

Nadace Heinricha Bölla, která je blízká německé Straně zelených, s hlavním sídlem na Hackesche Höfe v srdci Berlína, je samostatným právním politickým subjektem, který pracuje v duchu intelektuální otevřenosti. Prvotním cílem této nadace je podporovat politické vzdělávání a osvětu jak v Německu, tak i v zahraničí, a tak podporovat zapojení veřejnosti do demokratického rozhodování, sociálně-politickou aktivitu a vzájemné pochopení mezi kulturami.

Nadace rovněž poskytuje podporu umění a kultuře, vědě a výzkumu a rozvojové spolupráci. Při své činnosti se řídí základními politickými hodnotami jako jsou ekologie, demokracie, solidarita a nenásilí.

Díky její mezinárodní spolupráci s velkým počtem partnerů – v současnosti je počet projektů asi 100 v téměř 60 státech – se nadace soustřeďuje na posílení ekologického a občanského aktivizmu na celosvětové úrovni. To umožňuje výměnu nápadů a zkušeností a prohlubování naší vnímavosti a ostražitosti vůči změnám.

Spolupráce Nadace Heinricha Bölla na programech sociálně-politického vzdělávání a osvěty v zahraničí probíhá dlouhodobě formou projektů. Dalšími významnými nástroji mezinárodní spolupráce jsou výměnné pobyty, které zdokonalují výměnu zkušeností a vytváření politických sítí, jakož i základní a pokročilé školící programy pro angažované. Nadace Heinricha Bölla má okolo 180 zaměstnanců na plný úvazek a přibližně 320 podporujících členů, kteří poskytují pomoc jak finanční, tak i nemateriální povahy. Ralf Fücks a Barbara Unmüßig tvoří současnou správní radu Nadace Heinricha Bölla. Generální ředitelkou je Dr. Birgit Laubach. Další dva orgány, které se podílejí na vzdělávací a osvětové práci Nadace Heinricha Bölla, jsou: „Zelená akademie“ a „Feministický ústav“.

Nadace v současnosti provozuje zahraniční kanceláře a kanceláře projektů v USA, na arabském Středním východě, v Afghánistánu, Bosně a Hercegovině, Brazílii, Kambodži, Chorvatsku, České republice, El Salvadoru, Gruzii, Indii, Izraeli, Keni, Libanonu, Mexiku, Nigerii, Pákistánu, Polsku, Rusku, Jižní Africe, Srbsku, Thajsku, Turecku a u úřadu EU v Bruselu.

Pro rok 2005 měla Nadace Heinrich Bölla k dispozici téměř 36 milionů € z veřejných fondů.

*Heinrich Böll Stiftung – kancelář v Praze, Spálená 23 zadní trakt – vchod Spálená 21, 110 00, Praha 1, Česká republika
tel.: 251 814 173, fax: 251 814 174, e-mail: info@boell.cz*

*Heinrich Böll Foundation, Rosenthaler Str. 40/41, 10178 Berlin
tel.: +49 30.28534.0, fax: +49 30.28534.109, e-mail: info@boell.de, Internet: www.boell.de/nuclear, Germany*

Calla – Sdružení pro záchranu prostředí

P.O.Box 223 nebo Fráni Šrámka 35
370 04 České Budějovice
tel./fax: +420 38 73 10 166, tel.: +420 38 73 11 381
e-mail: calla@calla.cz, <http://www.calla.cz>

Sdružení Jihočeské matky

Nová 12
370 01 České Budějovice
tel./fax.: 387 312 650
e-mail: jihoceske.matky@ecn.cz, <http://www.jihoceskematky.cz>

Hnutí DUHA v Brně

Bratislavská 31
602 00 BRNO
tel.: 545 214 431
fax: 545 214 429
e-mail: info@hnutiduha.cz

Jaderná energie: Mýtus a skutečnost

Tématická řada šesti publikací k tématu jaderné energetiky, kterou vydává Nadace Heinricha Bölla, je příspěvkem do debaty o budoucnosti tohoto odvětví. Její vydání připadá na dvacáté výročí černo-bylské katastrofy. Publikace podávají aktuální přehled o situaci jaderného sektoru a vývoji diskuse o jeho budoucnosti v různých částech světa. Jejich cílem je poskytnout kvalitní informace politikům, úředníkům, novinářům, pracovníkům nevládních organizací i široké veřejnosti.

Nuclear Issues Paper Series

Editor: Felix Christian Matthes

Nuclear Power: Myth and Reality. By G. Rosenkranz

Nuclear Reactor Hazards. By A. Froggatt

The Nuclear Fuel Cycle. By J. Kreusch, W. Neumann, D. Appel, P. Diehl

Nuclear Energy and Proliferation. By O. Nassauer

The Economics of Nuclear Power. By S. Thomas

Nuclear Energy and Climate Change. By F. Ch. Matthes

Co-published by  wise

NUCLEAR ISSUES PAPERS AT THE www.boell.de/nuclear