



Český model
amerického kongresu

Nakládání s jaderným odpadem

Zpráva Výzkumné služby Kongresu

Jan Kmínek



UNIVERZITA
KARLOVA





Úvod

Jako jaderný odpad je označován materiál, který produkuje radioaktivní záření a který nemá v současné době další využití. Radioaktivní odpad se dělí na nízkoaktivní, středně aktivní a vysoce aktivní. Do těchto kategorií je zařazen podle množství radioaktivního záření, které produkuje, a také podle poločasu rozpadu daného materiálu (poločas rozpadu je doba, za kterou se přemění přesně polovina částic, a je charakteristický pro jednotlivé nuklidy prvků). V omezené míře je možné radioaktivní odpad znovu využít při přepracování na nové palivo, avšak většina se ho v současné době hromadí a čeká na trvalé uložení. Klíčovým problémem, kterým se zabývá tato výzkumná zpráva, je řešení otázky ukládání využitého radioaktivního materiálu tak, aby nikomu neškodil.

1. Producenti radioaktivního odpadu

1.1. Jaderné elektrárny

1.1.1. Provoz

Mezi veřejně nejznámější producenty radioaktivního odpadu patří jednoznačně jaderné elektrárny. Palivový cyklus v jaderných elektrárnách začíná zavezením čerstvého paliva. To je obvykle složeno z nuklidu uranu $^{238}_{92}\text{U}$, který je obohacen o izotop $^{235}_{92}\text{U}$. Čerstvé palivo není před svým použitím téměř vůbec radioaktivní.¹ Po několika letech strávených v reaktoru, během nichž se spotřebuje využitelná energie, se však již jedná o vysoce radioaktivní jaderný odpad, který je třeba uložit na dobře odstíněné místo splňující řadu požadavků.

1.1.2. Likvidace odstavených jaderných elektráren

Vzhledem k omezené životnosti jaderných i nejaderných částí jaderných elektráren musí dojít po určité době provozu k jejich odstavení. Plánovaná doba provozu jaderných elektráren je obvykle 20 až 40 let, tato doba však bývá po zhodnocení stavu prodloužována až na 60 let. Nejkritičtější částí je tlaková nádoba reaktoru, která nejde vzhledem k vysoké radiaci opravit ani vyměnit. Po definitivním odstavení z provozu je třeba zařízení rozebrat a bezpečně zlikvidovat, což u nejaderných částí není problém, avšak s technologiemi zasaženými radiací je třeba zacházet bezpečně. Tyto technologie se opět dělí podle množství záření, které vyzařují, a podle toho se s nimi nakládá. Nízkoaktivní části je možné dekontaminovat, u vysoce aktivních zařízení je ale možné pouze jejich uložení spolu s vyhořelým palivem do trvalého úložiště radioaktivního odpadu. Náklady na budoucí likvidaci odstavené jaderné elektrárny představují průměrně 5 % z ceny elektřiny, kterou elektrárna dodává na trh.

¹ Pro představu se uvádí, že pokud si položíte za křeslo, ze kterého budete sledovat televizi, nepoužitou peletu jaderného paliva, dostanete větší dávku záření od televize než od čerstvého paliva do jaderné elektrárny.



1.2. Institucionální producenti

Mezi další producenty jaderného odpadu patří např. nemocniční zařízení. Zde se využívají radioaktivní prvky zejména při ozařování různých typů nádorů. Odpad z těchto zařízení je podstatně méně radioaktivní, je ho ale nutné sledovat neméně obezřetně. Do této kategorie se začleňují též výzkumná střediska, která mohou provozovat vlastní zmenšené modelové reaktory, které také produkují velmi malé množství jaderného odpadu.

1.3. Armáda

V armádě vzniká jaderný odpad při mnoha různých činnostech. Jednou z nich je provoz jaderných ponorek či letadlových lodí. Princip jejich činnosti je v podstatě stejný jako u jaderných elektráren, pouze v menším měřítku. Jaderné reaktory na palubách těchto plavidel tedy produkují podobný druh vyhořelého paliva, které je vysoce aktivní. Dalším zdrojem mohou být nukleární hlavice, ať už do mezikontinentálních balistických raket či jiných nosičů. V nich se nachází izotopy v takových množstvích, kdy nedochází ke štěpným reakcím, a nevyzařují tedy radioaktivní záření. Problémem může být případně jejich likvidace (např. v případě odzbrojování), jelikož se jedná o obohacený uran. V případě, že dojde k využití těchto zbraní, zařízení v nich způsobí neřízenou štěpnou reakci produkující obrovské množství radiace a následně radioaktivní spad. V tomto případě se však nedá hovořit o jaderném odpadu, který by bylo třeba zlikvidovat, neboť by při jeho rozmetání na obrovské území byla likvidace téměř nemožná. V některých typech zbraní² se používá též ochuzený uran. Ten se vyznačuje velmi vysokou tvrdostí a průrazností, avšak velmi nízkou radioaktivitou, takže není téměř nebezpečný. Při intenzivním nasazení těchto zbraní, během kterého dochází k jejich rozptýlení do prostředí, však může dojít k poškození životního prostředí.

2. Ukládání jaderného odpadu

2.1. Bezprostřední ukládání vyhořelého paliva v JE

Bezprostředně po vytažení prutů s vyhořelým jaderným palivem z reaktorů dochází k jejich uložení v bazénech, které se vyskytují přímo v reaktorových sálech v kontejnmentu.³ V těchto bazénech palivo stále ještě produkuje vysoké množství energie (zejména tepla),

² Mezi takové zbraně spadá především vysoce průrazná munice, jako jsou protipancéřové střely apod. (spolu s ochuzeným uranem obsahuje obvykle wolfram).

³ Kontejnmentem se nazývá hermeticky uzavřená část jaderné elektrárny, ve které se nachází reaktor a případně některá další zařízení elektrárny kontaminovaná radiací.



kerou je nutné odvádět. Po několika letech již poklesne radioaktivita paliva natolik, že je možné jej skladovat mimo vodní prostředí.

2.2. Dočasná úložiště

Dočasná úložiště, která jsou někdy označována jako tzv. mezisklady, slouží, jak již název napovídá, ke střednědobému ukládání vyhořelého jaderného paliva. Bývají často stavěna v areálech jaderných elektráren a jedná se o budovy, které musí splňovat přísné bezpečnostní podmínky (např. musí odolat pádu letadla apod.). V nich je palivo skladováno ve speciálních uzavřených nádobách, které jsou neustále monitorovány. Je u nich sledována především teplota, ale i mnoho dalších ukazatelů včetně možného úniku radiace do prostoru meziskladu. Tímto způsobem je v současnosti ve Spojených státech amerických skladováno přibližně 65 000 tun vyhořelého jaderného paliva, přičemž každý rok přibývají další 2 000 tun.

Pro institucionální producenty středně aktivního odpadu je ukládání zprostředkováváno státní agenturou, která po dokončení výstavby trvalého úložiště zajistí přesun těchto středně aktivních odpadů na nové místo. V případě nízkoaktivních odpadů jsou vzhledem k jejich malému záření tato úložiště dostatečně bezpečná a jsou tedy využívána jako trvalá.

2.3. Trvalá úložiště

Trvalá úložiště jsou projektována jako podzemní objekty vyhloubené v geologicky velmi stabilním a pevném podloží s minimem prosakujících podzemních vod. Tyto podmínky nejčastěji splňují například žulové masivy. Jedná se o systém tunelů a šachet, do kterých by měly být ukládány nádoby s radioaktivním odpadem, které by zde měly vydržet izolovány po celou dobu radioaktivních přeměn, tedy miliardy let. Otázkou zůstává, zda použité materiály např. na výrobu izolačních sudů na ukládání vyhořelého jaderného paliva po tak dlouhou dobu vydrží. Jisté však je, že hornina, do které je trvalé úložiště jaderného odpadu vyhloubeno, je velmi stará a bude ve své podobě existovat ještě mnoho miliard let. S tím souvisí i podmínka geologické stability oblasti, jelikož při pohybech podloží v geologicky aktivních oblastech by mohlo dojít například ke zničení ochranných obalů radioaktivního odpadu nebo k jeho vyloučení na povrch a následnému rozšíření radiace do okolí.

Trvalá úložiště budou z většiny své kapacity využita vyhořelým jaderným palivem z elektráren, které je do doby jejich zprovoznění uchováno v meziskladech. Z malé části budou využívána k ukládání středně aktivního odpadu produkovaného zdravotnickými či vědeckými institucemi.

2.3.1. Yucca Mountain nuclear waste repository

Ve Spojených státech amerických se již objevil pokus o výstavbu trvalého úložiště radioaktivního odpadu. Jeho výstavba byla schválena Kongresem již v roce 2002, ale



i vzhledem k odporu občanů byl tento projekt vládou Baracka Obamy v roce 2011 pozastaven, což vede k tomu, že není v současné době k dispozici žádné trvalé úložiště a produkovaný jaderný odpad se dále hromadí v meziskladech rozmístěných po celých Spojených státech.

2.4. Přepřacování vyhořelého paliva

Tato možnost je vysoce nákladná a vyplácí se pouze u velkého množství paliva. Tento proces je využíván například ve Francii, kde je většina elektrické energie vyrobena v jaderných elektrárnách. Současné technologické postupy nicméně neumožňují úplné zpracování radioaktivního paliva, a tak i při přepřacování dochází ke vzniku tekutého vysoce aktivního odpadu, který je třeba následně vitrifikovat (tj. upravit do podoby skla).

3. Financování

3.1. Dočasná úložiště

Dočasné ukládání vyhořelého jaderného paliva je financováno přímo majiteli jaderných elektráren, kteří ze svých prostředků nakupují speciální stínící nádoby a financují výstavbu meziskladů v areálech svých elektráren. Tento typ skladování přináší náklady, se kterými společnosti počítají při stanovování ceny, za kterou dodávají elektřinu do distribuční sítě.

V případě institucionálních producentů středně aktivního odpadu dochází k přechovávání tohoto odpadu státní agenturou za poplatek podle množství předaného odpadu.

3.2. Trvalé úložiště

Vybudování trvalého úložiště s sebou přináší obrovské náklady. Obecně rozšířeným modelem je financování stavby trvalého úložiště speciálním fondem, do kterého přispívají jednotliví producenti radioaktivního odpadu. Hlavními přispěvateli do tohoto fondu jsou provozovatelé jaderných elektráren, kteří platí poplatky za vyprodukované MWh elektrické energie. Experimentální (výzkumné) jaderné reaktory, které jsou umístěné například na univerzitách, mají stanoveny poplatky podle svého tepelného výkonu ($MWh_{(t)}$). Další producenti jako zdravotnická zařízení mají stanoveny poplatky podle množství vyprodukovaného odpadu. V porovnání s příjmy z výroby elektrické energie pak poplatky od menších producentů představují pouze několik málo procent.

Ve Spojených státech amerických slouží k tomuto účelu *Nuclear Waste Fund*, který v současné době obsahuje asi 25 miliard dolarů. Vzhledem k legislativním omezením je z něj však tyto prostředky nyní velice obtížné čerpat.



4. Závěr

Vzhledem k povaze jaderného odpadu, který není v krátkodobém ani střednědobém horizontu z důvodu nebezpečného záření možné zcela recyklovat, je nutné přistoupit ke stavbě hlubinného trvalého úložiště radioaktivního odpadu. Současný stav, kdy je jaderný odpad skladován ve více než 120 zařízeních, vyvolává nejistotu ohledně úrovně jeho zabezpečení. Jeho přesun na jedno vysoce zabezpečené místo by byl zcela jistě více než žádoucí. Při výběru lokality by samozřejmě mělo být dbáno na eliminaci všech možných rizik, od geologické nestability přes záplavy až po extrémní klimatické podmínky. Určitou roli by mohlo hrát i to, že je zařízení *Yucca Mountain nuclear waste repository* již částečně rozestavěné.

5. Zdroje

CLARK, M. What Does the U.S. Do with Nuclear Waste? *Scientific American* [online]. Nature America, 2017 [cit. 2017-02-26]. Dostupné z:

<https://www.scientificamerican.com/article/what-does-the-us-do-with-nuclear-waste/>

HAVLÍČEK, L. Financing of Liabilities Beyond the Service Life of Nuclear Installations. *Acta Polytechnica: Journal of Advanced Engineering* [online]. Czech Technical University Publishing House, 2006, **4/2006**(46), 13-17 [cit. 2017-02-26]. ISSN 1805-2363. Dostupné z:

<https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/842/674>

HEJHAL, M. *Analýza vytváření rezerv na budoucí vyřazování jaderných elektráren z provozu*. Praha, 2014. Diplomová práce. Fakulta elektrotechnická Českého vysokého učení technického v Praze. Vedoucí práce doc. Ing. Jaroslav Knápek, CSc.

NAŘÍZENÍ VLÁDY ČR ze dne 28. srpna 2002, kterým se stanoví výše odvodu a způsob jeho placení původci radioaktivních odpadů na jaderný účet a roční výše příspěvku obcím a pravidla jeho poskytování. Praha, 2002, ročník 2002, číslo 416. Dostupné také z:

https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/ostatni-predpisy-a-narizeni/NV_416_2002_20120103.pdf

Nuclear Power in the USA. *World Nuclear Association* [online]. London: World Nuclear Association, ©2016 [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-power.aspx>

Radioactive Waste Management. *World Nuclear Association* [online]. London: World Nuclear Association, ©2016 [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx>



U.S.NRC [online]. North Bethesda, Maryland [cit. 2017-02-26]. Dostupné z:
<https://www.nrc.gov>

Yucca Mountain nuclear waste repository. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-02-26]. Dostupné z:
https://en.wikipedia.org/wiki/Yucca_Mountain_nuclear_waste_repository