

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra technologií a měření

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Minimalizace radioaktivních odpadů

Vypracoval: Lukáš Král
Vedoucí práce: Ing. Romana Řáhová

2012

Úvod

Z materiálů Světové rady pro energii (WEC) vyplývá, že se globální potřeba zdrojů elektřiny během příštích 25 let zdvojnásobí. Ze současných 3,5 terawatt má dojít k růstu až na hodnotu 7,1 terawatt. Z 90% bude nárůst spotřeby energie zapříčiněn rozvojovými zeměmi. Emise CO₂ při použití tepelných elektráren mohou v důsledku toho stoupnout až o 100 % [1]. Je tedy potřeba uvažovat o vhodné alternativě. Jednou z možností je jaderná energie. Jako každá technologie má svoje klady a zápory. Jaderná problematika je v současnosti často projednávaným tématem, jak odborníky, tak médii.

Jako v každém odvětví průmyslu, i v jaderné energetice se neobejdeme bez odpadů. Oproti jiným odpadům vznikajících lidskou činností, které jsou jedovaté či jinak nebezpečné po celou dobu, radioaktivní odpady svou nebezpečnost postupem času ztrácejí. Použité palivo obsahující radionuklidy, se s charakteristickým poločasem rozpadu přeměňují na neaktivní prvky. Již od počátku se začalo řešit, jak tyto odpady bezpečně zneškodňovat. Systematické základy ke zneškodňování RAO a vyhořelého jaderného paliva byly formulovány na První mezinárodní konferenci o mírovém využívání jaderné energie v Ženevě v roce 1955. Od té doby se tyto principy a postupy soustavně obnovují a zdokonalují.

1. Složení radioaktivních odpadů

1.1 Radioaktivní odpad

Abychom mohli nějakou látku, materiál nebo předmět prohlásit za RAO, musí splňovat následující tři podmínky: Předně musí tyto látky obsahovat radionuklidy v takovém množství, že jsou překročeny zprošťovací úrovně. Zadruhé musí jít o látky, materiál nebo předměty nadále již nevyužitelné a zatřetí je jejich vlastník musí prohlásit za odpad.

Další otázkou, která vyvstává, je využitelnost. Pro někoho může být určitý kontaminovaný předmět odpadem, jiný jej však může považovat za užitečný a vhodný k dalšímu použití. Například jaderné vyhořelé palivo, jež se pro některé země stává přítěží, v podobě nákladů spojených s jeho likvidací (uložením), pro jiné země může představovat významnou druhotnou surovinu obsahující množství cenných materiálů (obohaceného uranu a plutonia), které mohou být využity jako nové jaderné palivo v existujících nebo nových jaderných elektrárnách. [kniha]

1.2 Jaderný palivový cyklus

Ve všech fázích jaderného palivového cyklu vzniká určité množství RAO. Množství RAO vztahené k produkci jaderné energie můžeme nalézt v tabulce 1-1. Data zde uvedená představují rozsahy objemů odpadů z typických provozů v některých zemích. Rozdíly v objemech jsou zapříčiněny odlišnými typy zařízení a použitými technologiemi, při nichž odpady vznikají.

STADIUM PALIVOVÉHO CYKLU	TYP ODPADU	OBJEM V m ³ /GWROK
Přední část palivového cyklu		
Konverze na hexafluorid	kapalný, pevný	30-70
Obohacení	plynný, kapalný, pevný	15-40
Výroba dioxidu uranu	kapalný, pevný	60-80
Výroba směsného paliva	kapalný	5-10
Provoz jaderných reaktorů		
Koncentráty	kapalný	40-80
Kaly	pevný (mokrý)	5-20
Ionexy	pevný (mokrý)	6-10
Dekontaminační roztoky	kapalný	2-10
Pevné odpady	pevný	100-300
Zadní část palivového cyklu		
➤ Přepřacování		
Obaly palivových produktů	pevný	12-20
Tritiové výpusti	kapalný	50-70
Vysoce aktivní odpady	kapalný	20-30
Středně aktivní odpady	kapalný	15-30
Nízko aktivní odpady	kapalný, pevný	50-100
➤ Přímé uložení		
Palivové články	pevný	30 t těžkého kovu
Vyřazování z provozu		
➤ Výroba paliva		
Jaderný reaktor	pevný	300-500
Přepřacování paliva	pevný	5-20

Tabulka I-1. Typická množství radioaktivních odpadů vznikajících v jednotlivých etapách jaderného palivového cyklu, vztažená na jednotkovou produkci elektřiny v jaderných elektrárnách.

1.2.1 Těžba a zpracování uranových rud

Při provozu jaderného reaktoru vznikají různé radioaktivní látky. Přibližně 99 % tvoří štěpné produkty uzavřené v palivových článcích. Avšak i mimo palivové články vzniká malé množství radioaktivních látek a to zejména pohlcováním neutronů. Zanedbatelné množství těchto látek se po dalším zpracování kontrolovaně vypouští do atmosféry a do vodotečí, čímž se dále ředí. Ostatní radioaktivní látky vytvářejí tzv. reaktorové radioaktivní odpady, které se musí upravit a pak určitou dobu uchovávat izolovaně od životního prostředí, aby se omezil únik ionizujícího záření, které by mohlo být hrozbou pro současnou nebo budoucí populaci. Pod pojmem radioaktivní odpad se rozumí jakýkoliv materiál, pro který se neplánuje žádné

další užití a jehož charakter a úroveň radioaktivity jsou takové, že z hlediska radiační bezpečnosti neumožňují jeho bezprostřední rozptýlení do životního prostředí. Radioaktivní odpady nevznikají pouze v jaderné energetice (zpracování uranové rudy, výroba jaderného paliva, provoz jaderné elektrárny, přepracování vyhořelého paliva), ale například i ve zdravotnictví, průmyslu, zemědělství či výzkumu tzv. institucionální odpady [2].

Vyhořelé palivo z jaderné elektrárny tvoří méně než 1 % objemu všech jaderných odpadů na světě, avšak obsahuje přes 90 % veškeré radioaktivity

2. Rozdělení radioaktivních odpadů

Existuje několik způsobů jak klasifikovat RAO. Stručně lze uvést jejich členění podle fyzikálních vlastností na odpady pevné, kapalné a plynné, nebo na odpady lisovatelné a nelisovatelné, spalitelné a nespalitelné apod. Dle chemických vlastností můžeme odpady dělit na organické a anorganické, korozivní a nepodléhající korozi, nebo např. na kyselé a neutrální. Odpady lze klasifikovat také podle místa jejich vzniku. Například odpady institucionální, které vznikají převážně v medicínských aplikacích, výzkumných střediscích nebo v průmyslu. Významnějším místem vzniku RAO je jaderný palivový cyklus.

2.1 Doporučované způsoby klasifikace RAO

Klasifikací RAO se zabývala Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE) již od šedesátých let uplynulého století a publikovala v tomto ohledu několik dokumentů. V současnosti je platná kategorizace RAO z roku 1994, která je uvedena v tabulce 2-1. Ta přiřazuje jednotlivým kategoriím nejvhodnější způsob uložení, spojuje nízko a středně aktivní odpady a současně tuto kategorii rozděluje na odpady krátkodobé a dlouhodobé. Mezi jednotlivými kategoriemi stanovuje tyto hranice:

- středně aktivní odpady vykazují hodnoty uvolňovaného přeměňovaného tepla nižší a vysoce aktivní odpady vyšší než 2 kW/m^3
- krátkodobé odpady obsahují radionuklidy o poločasu přeměny kratším než 30 let, odpady s radionuklidy nad touto hranicí jsou odpady dlouhodobé
- u odpadů, jejichž radioaktivita leží pod uvolňovacími úrovněmi, nesmí dávky jednotlivců z obyvatelstva přesahovat efektivní dávku ve výši $0,01 \text{ mSv/rok}$

Tabulka 2-1. Klasifikace radioaktivních odpadů podle doporučení Mezinárodní agentury pro atomovou energii

KATEGORIE	CHARAKTERISTIKA	DOPORUČENÝ TYP ULOŽIŠTĚ
1. odpady potenciálně uváděné do životního prostředí	roční dávka připadající na vrub ozáření jednotlivce z obyvatelstva musí být nižší nebo rovna efektivní dávce $0,01 \text{ mSv}$	žádné omezení
2. nízko a středně aktivní odpad	aktivita radionuklidů je natolik nízká, že při jejich ukládání není nutno brát v úvahu vznik rozpadového tepla	přípovrchové
2a. Nízko a středně aktivní odpady krátkodobé	obsahují radionuklidy o poločasu přeměny menším než 30 let a měrná aktivita dlouhodobých nuklidů nepřesahuje 4 Bq/g v jednotlivé obalové jednotce, resp. 400 Bq/g jako průměr pro celé uložště	přípovrchové
2b. Nízko a středně aktivní odpady dlouhodobé	měrná aktivita dlouhodobých radionuklidů přesahuje limity uvedené v 2a.	hlubinné
3. vysoce aktivní odpad	aktivita radionuklidů je tak vysoká, že při jejich ukládání je třeba brát v potaz vznik přeměňovaného tepla. Hranicí je hodnota tepelného výkonu 2 kW/m^3	hlubinné

Nejnovější dokument Mezinárodní atomové agentury z roku 2008 zachovává základy předešlého dělení, ale současně přináší některé modifikace. Ty se týkají především výstavby, provozu a hodnocení bezpečnosti uložště. Výsledkem je definice šesti kategorií odpadů a kvalitativní určení mezních podmínek mezi jednotlivými kategoriemi, přitom však podrobnější stanovení mezních podmínek se ponechává na odpovědných orgánech jednotlivých zemí. [3]

2.1.1 Odpady o radioaktivitách nižších než uvolňovací úroveň (OOÚ)

Jsou odpady uvolnitelné bez omezení pro recyklaci nebo uvedení do životního prostředí. Při nepřekročení aktivit v nich obsažených radionuklidů se kontaminace radionuklidy považuje za zanedbatelnou. Z hlediska radiační ochrany by roční dávka připadající na vrub dávky jednotlivce z obyvatelstva neměla přesahovat hodnotu efektivní dávky 0.01 mSv. V podstatě se jedná o neradioaktivní odpady.

2.1.2 Přechodné (velmi krátkodobé) odpady (PŘO)

Odpady, které mohou být skladovány do vymření, a potom uvedeny zpět do životního prostředí bez souhlasu odpovědných orgánů. To se týká především odpadů s krátkodobými radionuklidy o poločasu přeměny do 100 dnů. S těmito odpady se můžeme setkat především ve výzkumu, medicíně či v průmyslu.

2.1.3 Velmi nízko aktivní odpady (VNAO)

Odpady nesplňující kritéria pro odpady typu OOÚ, ale které nevyžadují vysoký stupeň kontroly a izolace lze ukládat do uložišť typu řízených skládek. Spolu s nimi lze ukládat i neradioaktivní odpady. Typickým příkladem je hlušina po těžbě radioaktivních surovin a další velmi nízko aktivní odpady s přirozenými radionuklidy; sem lze zařadit slabě kontaminované materiály, pocházející např. z vyřazování jaderných zařízení z provozu, jako je betonové zdivo objektů. Patří sem rovněž kontaminovaná zemina nebo drť o nízké radioaktivitě. Z ekonomických důvodů není vhodné takové odpady ukládat do uložišť s komplikovaným bariérovým systémem, a proto se pro ně budují zvláštní uložišť se zjednodušeným izolačním systémem. V české legislativě není tato kategorie dosud ošetřena.

2.1.4 Nízko aktivní odpady (NAO)

Obsahují radionuklidy o aktivitách vyšších, než jsou uvolňovací úroveň, avšak s omezeným množstvím dlouhodobých radionuklidů. Ty vyžadují důkladnou izolaci a kontrolu po dobu několika set let, a proto je třeba je ukládat do přípovrchových uložišť s inženýrskými bariérami. Tato uložišť jsou budována na povrchu země nebo zapuštěna pod zem nejčastěji do hloubek nepřesahujících 30 metrů. Tato kategorie zahrnuje velké množství materiálů, kontaminovaných krátkodobými radionuklidy o vyšších aktivitách, ale s malým množstvím dlouhodobých radionuklidů.

2.1.5 Středně aktivní odpady (SAO)

Tyto odpady jsou charakteristické tím, že obsahují dlouhodobé radionuklidy, a tudíž vyžadují vyšší stupeň kontroly a izolace než v předchozím případě. Během skladování nebo uložení není třeba zajišťovat odvod tepla. Mohou obsahovat dlouhodobé radionuklidy, jejichž aktivita nepoklesne na přijatelné hodnoty během doby, po kterou je společnost schopna zajišťovat institucionální dohled. Tyto odpady je potřeba umísťovat do podzemních uložišť budovaných ve větších hloubkách (do 100 metrů) pod zemským povrchem.

2.1.6 Vysoce aktivní odpady (VAO)

Jsou zdrojem značného množství uvolňovaného tepla vlivem radioaktivní přeměny, anebo obsahují velká množství dlouhodobých radionuklidů, což je třeba vzít v úvahu při konstrukci uložišť pro tyto odpady. Jde o vyhořelé jaderné palivo a vysoce aktivní odpady z jeho přepracování, které je třeba ukládat do hlubinných uložišť ve stabilních geologických formacích několik set metrů nebo hlouběji pod zemským povrchem.

3. Možné metody minimalizace radioaktivních odpadů

Úprava a zpracování radioaktivního odpadu před jeho uložením závisí na typu a skupenství odpadu. Hlavním účelem zpracování je zmenšit objem odpadu, převést radioaktivní nuklidy na stabilní, nerozpustné formy a uzavřít je do vhodného obalu, aby se v budoucnosti zamezilo případnému uvolňování radioaktivních látek do životního prostředí.

Úprava *N* a *S* aktivních pevných odpadů spočívá pouze ve zmenšení jejich objemů lisováním do ocelových sudů nebo beden. Sudy se většinou umísťují do větších sudů a zalévají se betonovou směsí tak, aby mezi stěnami obou sudů vznikla betonová vrstva několik centimetrů silná. Spalitelný odpad (papír, vata, pracovní oděvy, ...) se spalují ve zvláštních pecích, kde se spalné plyny zbavují stržené radioaktivity filtrací nebo mokkými separátory.

Nuklidy *N* a *S* aktivních kapalných odpadů se koncentrují do malého objemu spolusrážením na nerozpustné látky.

Z vysoce aktivních odpadů se zpracovávají jenom kapalné odpady vznikající při přepracování vyhořelého paliva. Většina z nich se zatím uchovává v ocelových nádržích v přepracovatelských závodech. Pouze malá část se zpracovává vitrifikací, při níž se kapalný odpad odpaří, vysuší a tepelně rozloží.

Zpracovaný radioaktivní odpad se ve vhodných kontejnerech ukládá na úložiště, kde se skladuje izolovaně od okolního prostředí. Konstrukce a vybavení úložiště závisí na aktivitě

a charakteru odpadu. Vždy ale musí být zajištěno proti úniku radioaktivních látek do životního prostředí, dokud aktivita odpadu neklesne pod bezpečnou mez.

Jaderné elektrárny, pokud nedojde k havárii s únikem radioaktivních látek, přispívají k ozáření naprosto bezvýznamně. Naopak - v okolí jaderných elektráren je úroveň záření sledována pečlivěji než kdekoli jinde. Při hodnocení radiačního rizika jaderné energetiky je ovšem třeba brát v úvahu celý cyklus od výroby paliva, jeho dopravy, zpracování až po ukládání vyhořelého paliva. Po přechodnou dobu je tento vysoce aktivní odpad uchováván na teritoriu jaderné elektrárny, a pokud není určen k dalšímu přepracování, je přemísťován do tzv. meziskladu. Tam je odpad uložen po dobu asi 40 let, než přestane produkovat příliš mnoho tepla a může být uložen v konečném hlubinném úložišti, kde bude uchováván mnoho tisíc let. Otázka definitivního bezpečného uložení vyhořelého jaderného paliva po několik století či tisíciletí není dosud uspokojivě vyřešena.

Použitá literatura

[1] www.csvts.cz/cns/news05/050531z.htm

[2] <http://ceg.fsv.cvut.cz/vyzkum/radioaktivni-odpady/problematikaodpaducr>

[3] *Nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem*. VUTIUM, 2009. ISBN 978-80-214-3629-9.