

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

UKLÁDÁNÍ RADIOAKTIVNÍHO ODPADU

**vedoucí práce: Ing. Romana Řáhová
autor: Marek Plic**

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Marek PLIC**
Osobní číslo: **E09B0179P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Ukládání radioaktivního odpadu**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování:

1. Rozdělení odpadů z JE.
2. Uveďte způsoby ukládání radioaktivních odpadů.
3. Důvody výstavby hlubinného úložiště.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

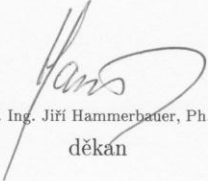
Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Romana Řáhová

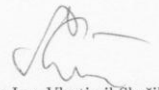
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


Doc. Ing. Jifí Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na problematiku radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva. Obsahuje údaje o základním rozdělení radioaktivních látek, jejich zpracování a přechodném či trvalém uložení. Popisuje teoretický princip vzniku hlubinného úložiště na území České republiky.

Klíčová slova

Radioaktivní odpad, radioaktivita, radionuklid, hlubinné úložiště.

Abstract

This presented thesis is focused on the issues of the radioactive waste and burnt-out nuclear fuel. It contains the data about the basic division of radioactive substances, their processing and temporary or permanent storage. It describes theoretic principles of creating the deep repository on the territory of the Czech Republic.

Key words

Radioactive waste, radioactivity, radionuclide, deep repository.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 5. 6. 2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Romaně Řáhové za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 ROZDĚLENÍ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ	11
1.1 RADIOAKTIVNÍ ODPAD	11
1.2 RŮZNÉ DRUHY TŘÍDĚNÍ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ	12
1.3 DOPORUČENÉ ZPŮSOBY KLASIFIKACE RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ	14
1.4 RADIOAKTIVNÍ ODPADY V JADERNÝCH ELEKTRÁRNÁCH	17
1.4.1 <i>Kapalné odpady</i>	18
1.4.2 <i>Pevné odpady</i>	18
1.4.3 <i>Plynné odpady</i>	19
2 ZPŮSOBY ZPRACOVÁNÍ RADIOAKTIVNÍHO ODPADU	20
2.1 MINIMALIZACE ODPADŮ	20
2.2 TŘÍDĚNÍ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ	20
2.3 DEKONTAMINACE, FRAGMENTACE, STERILIZACE, CHEMICKÁ ÚPRAVA	21
2.3.1 <i>Dekontaminace</i>	21
2.3.2 <i>Fragmentace</i>	21
2.3.3 <i>Sterilizace</i>	21
2.3.4 <i>Chemická úprava</i>	21
2.4 RECYKLACE ODPADŮ	21
2.5 ZPRACOVÁNÍ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ	22
2.5.1 <i>Zpracování kapalných odpadů</i>	23
2.5.2 <i>Zpracování pevných odpadů</i>	24
2.5.3 <i>Zpracování plynných odpadů</i>	26
2.6 ÚPRAVA RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ	26
2.6.1 <i>Úprava nízko a středně aktivních odpadů</i>	27
2.6.2 <i>Úprava vysoce aktivních odpadů</i>	28
3 UKLÁDÁNÍ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ	31
3.1 PŘÍPOVRCHOVÉ A PODZEMNÍ ÚLOŽIŠTĚ	31
3.2 HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ	34
3.2.1 <i>Multibariérový systém hlubinného úložiště</i>	35
3.2.2 <i>Přírodní bariéra</i>	35
3.2.3 <i>Inženýrská bariéra</i>	35
3.3 VÝVOJ HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ V ČESKÉ REPUBLICE	36
3.3.1 <i>Umístování hlubinného úložiště</i>	38
3.3.2 <i>Předpokládané řešení hlubinného úložiště v ČR</i>	38
3.3.3 <i>Uzavírání hlubinných úložišť</i>	40
4 ZÁVĚR	41
POUŽITÁ LITERATURA	42

Seznam zkratek

MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
OUÚ	Odpady o radioaktivitách nižších než uvolňovací úrovně
VNAO	Velmi nízko aktivní odpady
NAO	Nízko aktivní odpady
SAO	Středně aktivní odpady
VAO	Vysoce aktivní odpady
HEPA	High-Efficiency Particulate Air Filter
RAO	Radioaktivní odpad
ÚVVVR	Ústav pro výzkum, výrobu a využití radioizotopů
ÚJV Řež	Ústav jaderného výzkumu Řež
NORM	Naturally occurring radioactive materials
VJP	Vyhořelé jaderné palivo

Úvod

Dnešní moderní populace si už nedovede představit žití bez elektrické energie. S každodenním nárůstem obyvatel se také zvyšuje spotřeba energie, a proto nenávratně vyčerpatelné zdroje musíme nahrazovat obnovitelnými popřípadě perspektivnějšími. Jednou z možností je využití jaderné energie, která sebou nese mnoho výhod, mezi které patří například téměř kontinuální dodávka energie. Žádná činnost se neobejde bez odpadů a energetika není a nebude výjimkou, proto si musíme položit otázku, co dál s nebezpečným jaderným odpadem? Většina atomových elektráren ve světě sleduje možnosti recyklace použitého paliva, ale v této práci se zaměřím pouze na možné úpravy radioaktivního materiálu a jeho uložení.

I přes možný budoucí rozvoj nových technologií k recyklaci jaderného odpadu, zbude z různých průmyslových odvětví, jaderné energetiky či zdravotnictví část dlouhodobých nebo vysoce radioaktivních látek, které budeme muset dále po několik tisíc let izolovat od životního prostředí. Vhodnou alternativou je vybudování hlubinného úložiště. K realizaci je potřeba vytipování vhodné lokality a dostatečný finanční prostředek.

V první části této bakalářské práce budu popisovat základní rozdělení radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva. Zaměřím se na klasifikaci podle Mezinárodní agentury pro atomovou energii, ale zmíním i různé druhy třídění radioaktivních odpadů.

Druhý bod bude popisovat způsob zpracování RAO a VJP před jeho uložení, popřípadě jeho opakovaným využitím. Rozepíšu zde jak minimalizaci, třídění, recyklaci tak i zpracování pevných, kapalných a plyných odpadů.

V poslední kapitole této bakalářské práce budu pojednávat o uložení radioaktivního odpadů do přípovrchových úložišť nebo do konečného hlubinného úložiště. Budou zde rozepsána přípovrchová úložiště nacházející se na území České republiky. Závěr této práce je věnován problematice výstavby hlubinného úložiště v České republice.

1 Rozdělení radioaktivních odpadů

1.1 Radioaktivní odpad

Každá látka, materiál nebo předmět může být prohlášen za radioaktivní opad, pokud jsou splněny tyto tři podmínky. Zaprvé tyto látky musí obsahovat radionuklidy a to v takovém množství, že jsou překročeny zprošťovací úrovně. Zadruhé musí jít o látky, materiál nebo předměty, které nejsou dále využitelné a poslední podmínkou je prohlášení vlastníka za opad. [1]

Za radioaktivní opad může být prohlášeno i vyhořelé jaderné palivo. Podle české legislativy je vyhořelé palivo odpadem tehdy, je-li splněna i třetí podmínka. V České republice jsou vlastníkem vyhořelého paliva provozovatelé jaderných reaktorů a jejich prohlášení je v tomto ohledu směrodatné. Za určitých okolností může prohlášení učinit Státní úřad pro jadernou bezpečnost. Podmínkou je, že se od počátku s vyhořelým palivem musí nakládat tak, aby nebyla ztížena jeho případná budoucí úprava ke konečnému uložení. [1]

Je však třeba mít na zřeteli, že zejména přístup k otázce využitelnosti může být rozporuplný. Pro někoho může být určitý kontaminovaný předmět odpadem, jiný jej však může považovat za užitečný a vhodný k dalšímu používání. Například předmět, původně silně zamořený radionuklidy, lze při použití vhodného dekontaminačního postupu odmořit a vrátit zpět do procesu k dalšímu využití. Jako jiný příklad může sloužit vyhořelé jaderné palivo, jež pro některé země představuje významnou druhotnou surovinu obsahující množství cenných materiálů. Obohaceného uranu a plutonia, které mohou posloužit jako nové jaderné palivo v existujících nebo nových jaderných elektrárnách. [1]

Pokud jde o limity umožňující uvádět látky obsahující radionuklidy do životního prostředí, tyto jsou stanoveny v příslušné vyhlášce Státního úřadu pro jadernou bezpečnost. Například při zpracování kapalných radioaktivních odpadů je cílem zkoncentrovat radionuklidy do co nejmenšího objemu a oddělit je od neužitečného velkého objemu zbylé kapaliny. V ideálním případě by měla být vyčištěná kapalina zproštěna všech radionuklidů, to se však málokdy daří. Aktivity zbylých radionuklidů jsou však tak malé, že vyčištěnou kapalinu lze uvést do životního prostředí. V praxi se tak vypouštějí dekontaminované vody z jaderných elektráren do povrchových vodotečí nebo, v případě plyných odpadů, filtrací přečištěné radioaktivní exhalace do okolní atmosféry. [1]

1.2 Různé druhy třídění radioaktivních odpadů

Existuje několik způsobů, jak klasifikovat radioaktivní odpady. Stručně lze uvést jejich členění podle fyzikálních vlastností na odpady pevné, kapalně a plynné, nebo na odpady lisovatelné a nelisovatelné, spalitelné a nespalitelné apod. Podle chemických vlastností rozeznáváme odpady anorganické a organické, korozivní a nepodléhající korozi, nebo např. kyselé a neutrální. Odpady lze klasifikovat také podle místa jejich vzniku. Jde o takzvané institucionální odpady, což jsou odpady vznikající ve výzkumných střediscích nebo při průmyslových a medicínských aplikacích při diagnostice nebo léčbě nemocných. [2]

Tab. 1.1 Členění radioaktivních odpadů podle radiačních charakteristik[2]

charakteristika	členění na odpady
Doba životnosti radionuklidů	Přechodně radioaktivní s poločasem rozpadu menším než 1 rok, krátkodobé s poločasem rozpadu od 1 do 30 let a dlouhodobé s poločasem nad 30 let
Obsah radionuklidů	Nízko, středně a vysoce aktivní (orientační hranice jsou pro nízko aktivní odpady pod 10^9 Bq/m ³ , pro středně aktivní odpady s obsahem 10^9 - 10^{14} Bq/m ³ a vysoce aktivní nad 10^{14} Bq/m ³)
Typ emitovaného záření	Obsahující radionuklidy vyzařující záření alfa, což jsou většinou přírodní radionuklid, a dále beta, gama-aktivní odpady s obsahem umělých radionuklidů
Tepelný výkon	S významnou nebo nevýznamnou produkcí tepla (důležité s hlediska transportu, skladování, ukládání odpadů, kdy jako hranice mezi středně a vysoce aktivními odpady se doporučuje hodnota tepelného výkonu 2kW/m ³)
Kritičnost	S obsahem štěpitelných materiálů (při vysokém obsahu štěpitelných materiálů odpad podléhá speciálním kontrolním opatřením)
Povrchová kontaminace radioaktivních odpadů	Na silně, středně a slabě kontaminované odpady, resp. bez povrchové kontaminace
Dávkové faktory relevantních radionuklidů	S nízkými či vysokými dávkovými faktory, což hraje roli při hodnocení bezpečnosti úložných systémů a jejich vlivu na člověka a životní prostředí

Jiným místem vzniku je, co do množství odpadů a jejich aktivity mnohem významnějším, jaderný palivový cyklus. Sem patří odpady z těžby a zpracování radioaktivních surovin, z obohacování a výroby jaderného paliva, reaktorové odpady, odpady z přepracování vyhořelého paliva a odpady z vyřazování jaderných zařízení, v nichž procesy jaderního palivového cyklu probíhaly. Pokud jde o množství vznikajících odpadů, v zemích provozující jaderný palivový cyklus tvoří tyto odpady 90% (někdy i více) z celkového množství. [2]

Tab. 1.2 Členění radioaktivních odpadů podle fyzikálních vlastností[2]

charakteristika	členění na odpady
<i>Skupenství</i>	Pevné, kapalné a plynné
<i>Velikost a hmotnost</i>	O malých, středních nebo velkých rozměrech a hmotnostech
<i>Lisovatelnou</i>	Lisovatelné a nelisovatelné
<i>Těkavost</i>	Těkavé, méně těkavé a netěkavé
<i>Hořlavost</i>	Spalitelné a nespalitelné
<i>Rozpustnost a mísitelnost</i>	Rozpustné a nerozpustné, resp. mísitelné a nemísitelné

Vedle radiačních a fyzikálních charakteristik lze také třídit odpady podle chemických nebo biologických vlastností. Mezi chemické vlastnosti, které hrají roli při zpracování a úpravě odpadu, patří potenciální chemická rizika, korozivita, korozní odolnost, obsah organických látek, hořlavost, reaktivita, tvorba plynů, sorpční vlastnosti radionuklidů, chemická agresivita a obsah solí v kapalných radioaktivních odpadech.

Biologické vlastnosti se sledují zejména u odpadů z medicínských zařízení, pracovišť nukleární medicíny a z některých výzkumných pracovišť. Sem se zařazuje obvykle schopnost rozkladu organických složek a infekčnost odpadů. [2]

Mezi nejběžnější pevné odpady v jaderných výzkumných střediscích nebo medicínských zařízení patří kontaminované sklo a polyetylén, resp. Polyvinylchlorid, kontaminované oděvy, rukavice, papír, buničitá vata apod. Odpady v kapalném stavu jsou spotřebované dekontaminační roztoky, oplachované vody a další. V některých jaderných elektrárnách mezi pevné odpady patří spotřebované filtry a iontoměniče a kontaminované součásti zařízení. Kapalné odpady pak představují vody primárního okruhu, odluky z parogenerátorů aj. Typickým plynným odpadem jsou exhalace obsahující krátkodobé štěpné produkty, vypouštěné do okolní atmosféry.[3]

Velikost a hmotnost hraje roli při manipulaci s pevnými odpady, nezdědka se vyžadují speciální zdvihací zařízení a transportní prostředky. Lisovatelnost některých odpadů umožňuje zmenšit původní objem, a tím snížit nároky na skladování nebo konečného uložení. Rozptýlitelnost odpadů, pokud se nalézají v kapalném stavu nebo sypkém stavu, je faktorem, který je třeba zvažovat při bezpečnostních rozborech způsobu přepravy. V případě těkavosti je třeba bránit úniku těkavých látek (např. ve skladovaných odpadech) vhodným zapouzdřením anebo zabezpečením účinného větrání skladu. Rozpustnost a mísitelnost jsou vlastnosti, které rozhodují o výběru vhodné technologie a vhodného ztužidla při úpravě odpadu pro potřebu konečného uložení. [3]

Z uvedeného přehledu je patrné, že se ve všech případech spíše jedná o zažitou kvalitativní charakteristiku než o přesně číselně vymezené členění. Bylo sice učiněno několik pokusů o stanovení konkrétních hranic, všechny však ztroskotaly na tzv. „hraničním efektu“. Bylo možno těžko zdůvodnit, proč určitá hodnota těsně nad stanoveným limitem má jiné dopady než hodnota těsně pod ním. [3]

1.3 Doporučené způsoby klasifikace radioaktivních odpadů

Klasifikací radioaktivních odpadů 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 radioaktivních odpadů z roku 1994. 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 [2]:

- Středně aktivní odpady vykazují hodnoty uvolňovaného přeměnného 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 (krátkodobé odpady na rozdíl od odpadů dlouhodobých mají nižší měrnou aktivitu dlouhodobých alfa zářičů než 4000 Bq/g v jednotlivé obalové jednotce, resp. 400 Bq/g jako průměr pro celé úložiště)
- U odpadů, jejichž radioaktivita leží pod uvolňovacími úrovněmi, nesmí dávky jednotlivců z obyvatelstva přesahovat efektivní dávku ve výši $0,01 \text{ mSv/rok}$.

K otázce limitů aktivity radionuklidů v obalové jednotce a v celém úložišti je třeba poznamenat, že tyto limity jsou odvozeny pro každé úložiště zvlášť a závisí na národních směrných hodnotách přípustných dávek kritických osob. Například pro úložiště Dukovany byl limit radionuklidů stanoven na úrovni nižší, než uvádějí zmíněná doporučení. [2]

Tab. 1.3 Klasifikace radioaktivních odpadů podle Mezinárodní agentury pro atomovou energii[2]

kategorie	charakteristika	Doporučený typ úložiště
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 mSv	Žádné omezení
2. nízká a středně aktivní odpad	Aktivita radionuklidů je natolik nízká, že při jejich ukládání není nutno brát v úvahu vznik rozpadového tepla	Přípovrchové
2a. nízká a středně aktivní odpady krátkodobé	Obsahují radionuklidy o poločasu přeměny menším než 30 let a měrná aktivita dlouhodobých nuklidů nepřesahuje 4000 Bq/g v jednotlivé obalové jednotce, resp. 400 Bq/g jako průměr pro celé úložiště	Přípovrchové
2b. nízká 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 úvahu vznik přeměnného tepla. Hranicí je hodnota tepelného výkonu 2kW/m ³	hlubinné

Nejnovější dokument Mezinárodní atomové agentury z roku 2008 zachovává principy dřívějších schémat, ale současně vnáší některé modifikace, neboť výstavba, provoz a hodnocení bezpečnosti úložišť doznaly určitých změn. 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. [2]

Zmíněné třídy lze charakterizovat následovně [2]:

- **Odpady o radioaktivitách nižších než uvolňovací úrovně (OUÚ)** 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 0,01mSv. V podstatě se jedná o neradioaktivní odpady a zde jsou uváděny kvůli konzistenci s nově připravovanou klasifikací MAAE. [2]
- **Přechodné (velmi krátkodobé) odpady (PŘO)** jsou takové, které mohou být skladovány do vymření (po dobu až několika let), a potom uvedeny do životního prostředí bez souhlasu odpovědných orgánů. To se týká především odpadů s krátkodobými radionuklidy o poločasu přeměny do 100 dnů používanými obvykle ve výzkumu nebo pro medicínské či průmyslové aplikace. [2]

- **Velmi nízko aktivní odpady (VNAO)**, které nesplňují kritéria pro odpady typu OOÚ, ale které nevyžadují vysoký stupeň kontroly a izolace lze ukládat do úložišť 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, pocházejí 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 úložišť s komplikovaným bariérovým systémem, a proto se pro ně budují zvláštní úložiště se zjednodušeným izolačním systémem. V české legislativě není tato kategorie dosud ošetřena. [2]
- **Nízko aktivní odpady (NAO)** obsahují radionuklidy o aktivitách vyšších, než jsou uvolňovací úrovně, 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 úložišť s inženýrskými bariérami. Tato úložiště jsou budována na povrchu země nebo zapouštěna pod zem nejčastěji do hloubek nepřesahujících 30 metrů. Tato kategorie zahrnuje velké množství nejrůznějších materiálů, kontaminovaných krátkodobými radionuklidy o vyšších aktivitách, ale s malými množstvími dlouhodobých radionuklidů. Patří sem i bývalá třída středně aktivních odpadů, které se od nízko aktivních liší tím, že při manipulaci s nimi je již zapotřebí stínění, jako hranice se užívá hodnota povrchové efektivní dávky 2 mSv/h. [2]
- **Středně aktivní odpady (SAO)** v této klasifikaci 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, a proto je třeba tyto odpady umísťovat do podzemních úložišť budovaných ve větších hloubkách, mezi desítkami a stovkou metrů pod zemským povrchem. [2]
- **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 úložiště pro tyto odpady. Jde o vyhořelé jaderné palivo a vysoce aktivní odpady z jeho přepracování, které je třeba

ukládat do hlubinných úložišť ve stabilních geologických formacích několik set metrů nebo hlouběji pod zemským povrchem. [2]

Je třeba poznamenat, že méně nebezpečné odpady lze vždy ukládat do více zajištěných typů úložišť, obráceně to však nejde z bezpečnostních důvodů. Rozhodnutí o úložném systému však musí být podloženo patřičnou technicko-ekonomickou analýzou, nebo je odvislé od platné legislativy. Např. ve Švýcarsku není dovoleno radioaktivní odpady ukládat na povrchu země, proto všechny vyprodukované odpady budou uloženy v hlubinném úložišti.

Nevýhodou je, že toto členění, podobně jako všechna předchozí, nelze graficky znázornit. Radionuklidy obsažené v odpadech mají rozdílné vlastnosti, a proto hranice mezi jednotlivými kategoriemi budou záviset nejen na jejich radioaktivitě a poločasu přeměny, ale i na celé řadě dalších faktorů, jako jsou charakter emitovaného záření, množství uvolňovaného tepla, nebo radiotoxicita a od ní odvozené uvolňovací úrovně. [3]

Odpady typu NORM, které znamenají přirozeně se vyskytující radioaktivní materiály, mohou obsahovat různé aktivity (většinou dlouhodobých) radionuklidů, a proto je lze nalézt mezi kategoriemi nízko aktivních, velmi nízko aktivních a mezi odpady o aktivitách nižších, než jsou uvolňovací úrovně. Tyto odpady představují radioaktivní látky na haldách po těžbě kovů a rud jako měď, cín wolfram apod., nebo těžené suroviny, které byly podrobeny nějakému technologickému procesu. [3]

Tyto lokality se v poslední době podrobují celosvětové kontrole a v případě vyšších aktivit se provádějí sanace, například převrstvením hald, nebo dokonce kompletní rekultivací lokality. Značnou pozornost věnují těmto odpadům v USA, ale i v Evropě. V Německu provedli kompletní sanaci zamoření těmito látkami na lokalitě Mansfeld. [3]

V České republice není tento typ radioaktivních odpadů v rámci atomového zákona legislativně ošetřen, i když se sanačními pracemi se na řadě lokalit počítá. Přístup ke zneškodňování radioaktivních odpadů se v různých státech liší, neboť míra, s jakou se zdroje ionizujícího záření v zemích světa využívají, je různá. [3]

1.4 Radioaktivní odpady v jaderných elektrárnách

Při provozu jaderných elektráren vznikají radioaktivní látky v různých formách a množstvích, které je třeba vhodně zpracovat a uložit, aby jejich vliv na životní prostředí byl minimální. Provozní zkušenosti ukazují, že opatření, provedená v jaderných elektrárnách pro hospodaření s radioaktivními odpady zajišťují radiační bezpečnost personálu a životního prostředí. [3]

Podle skupenství se radioaktivní odpady z jaderných elektráren dělí na kapalné, pevné a plynné. Po čištění či přepracování na speciálním zařízení se část kapalných odpadů vypouští po zředění do vodních toků a plynné odpady se ventilačním komínem vypouští do atmosféry. Při tom je sledováno výrazné snížení objemu radioaktivních odpadů a převod do stavu snadno skladovatelného. Na každé elektrárně jsou vymírací nádrže pro kapalné a pevné odpady provedené tak, aby byl vyloučen únik radioaktivních látek do životního prostředí (do země, spodní vody, do atmosféry) s kapacitou na 5 až 8 let provozu elektrárny. [3]

1.4.1 Kapalné odpady

Kapalné odpady jsou tvořeny zejména úniky chladiva z primárního okruhu, vodou z nádrží vyhořelého paliva, drenáží a vodou ze sanitárních smyček, odpadové vody z dezaktivace, regeneračních roztoků apod. Pro čištění radioaktivních vod jsou instalovány speciální čistící stanice. Množství odpadních radioaktivních vod závisí na typu použitého reaktoru, řízení chemického režimu, spolehlivosti provozu zařízení primárního okruhu a dalším. Chemické složení těchto vod a aktivita se mění v širokém rozsahu. Pro úpravu kapalných odpadů a jejich skladování můžeme tyto odpady rozdělit na [4]:

- Kapalné odpady s malou aktivitou (37 až $3,7 \cdot 10^5$ Bq/l)
- Kapalné odpady se střední aktivitou ($3,7 \cdot 10^5$ až $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq/l)
- Kapalné odpady s vysokou aktivitou (větší jak $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq/l)

Kapalné odpady s malou a střední aktivitou se podle složení upravují koagulačními metodami, mechanickými a chemickými úpravami, iontovými měniči, destilací. Skladování radioaktivních kapalných odpadů je složité, vyžaduje větší prostory a velice přísnou kontrolu. Je proto třeba z hlediska bezpečnosti převést kapalné odpady na pevné, které se lépe skladují. Koncentráty kapalných odpadů z destilačních stanic a další kapalné odpady je třeba převést do pevné formy tak, aby byla zajištěna trvalá vazba radioaktivity, kterou neovlivní voda ani jiné vnější vlivy. Nejčastěji se používá fixování kapalných odpadů na bitumenační lince do bitumenu. V pevné fázi se tyto odpady snáze skladují, jsou určitou dobu skladovány na území elektrárny a k trvalému skladování budou transportovány na regionální složiště. [4]

1.4.2 Pevné odpady

Pevné odpady se pokládají za radioaktivní, jestliže na vzdálenost $0,1$ od nich je γ -záření vyšší než $7,74 \cdot 10^{-9}$ C/kg, nebo je v nich měrná aktivnost β -aktivních produktů větší než $7,4 \cdot 10^4$ Bq/kg. [4]

Můžeme je rozdělit na [4]:

- nízko aktivní (γ -záření $7,74 \cdot 10^{-9}$ do $7,74 \cdot 10^{-6}$ C/kg)
- středně aktivní (γ -záření od $7,74 \cdot 10^{-6}$ do $2,58 \cdot 10^{-4}$ C/kg)
- vysoko aktivní (γ -záření větší než $2,58 \cdot 10^{-4}$ C/kg, měrná aktivita $\sim 3,7 \cdot 10^{10}$ Bq/kg)

Ve velké jaderné elektrárně je za rok asi 2 až 5 m³ pevných vysoko aktivních odpadů, nízkoaktivních asi 150 až 200 m³/rok. Pro bezpečné skladování se musí redukovat objem pevných odpadů, což se provádí lisováním (zmenšením objemu 5 až 10 krát), spalováním pro spalitelné odpady (zmenšení objemu 10 až 50 krát). [4]

1.4.3 Plynné odpady

Největší vliv na životní prostředí mají radioaktivní plynné odpady, jejichž množství a složení je určeno zejména aktivitou ze systémů odsávání plynů z technologických zařízení, provozních místností (závisí na těsnosti povlaků palivových článků, aktivitě chladiwa). Můžeme je rozdělit do těchto skupin [4]:

- vzácné plyny (zdroje β -, γ - záření)
- izotopy jódu
- radioaktivní aerosoly
- izotopy tritia 3 a uhlíku 14

Veškeré plynné odpady jsou před vypuštěním do atmosféry zpracovány tak, aby se z nich odstranila většina radioaktivních látek. Plyny a vzduch z vnitřních prostor elektrárny procházejí ventilačními systémy se speciálními filtry. Obvykle se používají hrubé předfiltry, po nichž jsou zařazeny vysoce účinné HEPA (High-Efficiency Particulate Air Filter) filtry, schopné pohlit 99,9 % pevných částic. Radioaktivní plynný jod je zachycován na dřevouhelných filtrech. Protože vzácné plyny uvolňované v malém množství z palivových článků mají většinou krátký poločas rozpadu, stačí je po několik hodin až dní zadržet. Součástí ventilačního systému jsou tedy i nádrže, kde se plynné odpady zadržují po dobu, než se radionuklidy rozpadnou na neaktivní prvky. Potom se v souladu s přísnými hygienickými limity vypouštějí do atmosféry. Provozní zkušenosti a přísná měření dokazují, že zatímco z komína jaderné elektrárny vycházejí jen zlomky povolených limitů, vypouští běžná klasická elektrárna na uhlí do ovzduší několikanásobně více radioaktivních látek. [4]

2 Způsoby zpracování radioaktivního odpadu

Nakládání s RAO před jejich zpracováním má za cíl snížit co nejvíce objem a radioaktivitu odpadů, případně upravit jejich chemické složení, aby následné zpracování a úprava proběhly co nejefektivněji a aby výsledný produkt maximálně vyhovoval jak požadavkům na bezpečnost při transportu a skladování, tak na co nejmenší prostor nutný pro konečné uložení. [2]

2.1 Minimalizace odpadů

Minimalizaci odpadů je třeba brát v úvahu již ve fázi plánování jaderného zařízení nebo procesu. Do zařízení nebo procesu se nesmí vnášet nepotřebné materiály, které by mohly být kontaminovány. Dalším procesem je výběr radionuklidů. Je-li nutné zkoumat vlastnosti anebo chování nějakého prvku či sloučeniny v podmínkách úložného systému, je třeba dát přednost krátkodobému radionuklidu před dlouhodobým. Pokud je zvolen vhodný povrch materiálů přicházející do kontaktu s radionuklidy, lze velmi výrazně snížit obsah spotřebovaných dekontaminačních roztoků. Také použitím vhodných dekontaminačních postupů lze na vhodně zvolených površích dosáhnout vyšších dekontaminačních faktorů a nižších objemů odpadních kapalin. [2]

2.2 Třídění radioaktivních odpadů

Třídění odpadů umožňuje uplatňovat jednodušší metody zpracování a jednodušší technologie, a tím snížit riziko nehody. Dále umožňuje snáze charakterizovat vzniklé odpady, snížit nároky na skladovací a úložné prostory a znovu získat cenné materiály pro recyklaci. V neposlední řadě pak umožňuje oddělit odpady s krátkodobými nuklidy, které lze přímo nebo po krátké době skladování uvolňovat do životního prostředí. [2]

Hlavním cílem je oddělit radioaktivní materiál od neaktivního, rozčlenit aktivní materiály podle kategorií a oddělit cenné předměty a materiály pro dekontaminaci, respektive recyklaci.[2]

Typy odpadů podrobovaných třídění lze rozdělit na [2]:

- kapalné odpady
- pevné odpady

2.3 Dekontaminace, fragmentace, sterilizace, chemická úprava

2.3.1 Dekontaminace

Je-li to přijatelné z hlediska radiační ochrany a ekonomicky výhodné, doporučuje se provádět dekontaminaci odpadů. V ideálním případě dojde ke změně kategorie odpadů, kdy obsah radionuklidů v odpadech poklesne natolik, že bude možno je uvádět do životního prostředí. [5]

2.3.2 Fragmentace

Jedním z dalších kroků je redukce rozměrů nestandardních odpadů (fragmentace), která spočívá v řezání nebo stříhání trubek, drcení pevných odpadů. Odpadá tak potřeba rozměrově nestandardních obalových souborů, které by bylo třeba obstarávat ke splnění požadavků na bezpečné skladování nebo uložení. [2]

2.3.3 Sterilizace

V případě biologických odpadů vyvstává často nutnost jejich chemické sterilizace (vlození do formaldehydu nebo chlorovaného vápna), zejména tehdy, nebudou-li okamžitě zpracovávány a upravovány například zmrazováním, vysoušením, radiační sterilizací, sterilizací parou anebo mikrovlnnou sterilizací. [2]

2.3.4 Chemická úprava

Odpady se podrobují radiochemické a chemické analýze za účelem zjištění radionuklidového a chemického složení. Podle získaných výsledků je možné rozhodnout o možnosti provedení dekontaminace. Chemická analýza pak umožní stanovit další potřebné kroky pro případ, že by chemická forma odpadů mohla negativně ovlivnit podmínky a výsledky dalšího zpracování. Tím se myslí alkalizace kyselých roztoků, destrukce pěnnotvorných, komplexotvorných a organických látek, odstraňování amoniových iontů, anebo snižování chemické toxicity radioaktivního odpadu. [2]

2.4 Recyklace odpadů

V jaderném palivovém cyklu, ale i při výzkumu a v medicínských nebo průmyslových aplikacích, vzniká celá řada vedlejších produktů a odpadů kontaminovaných radioaktivními látkami, z nichž část má stále ještě jistou užitečnou hodnotu a může být tudíž podrobena recyklaci a opětovně používána buď přímo, nebo po určité úpravě. Touto úpravou se rozumí

odstranění nebo alespoň snížení obsahu radioaktivních látek dekontaminací, nebo různými fyzikálními či chemickými separačními metodami. [2]

Recyklace se již úspěšně promítla do projektování, výstavby, provozu, údržby a úprav jaderných zařízení. Očekává se, že podstatná množství materiálů (především kovy a betonu) bude vznikat při vyřazování jaderných zařízení, což dá příležitost k uplatnění různých metod recyklace a opětovného používání. Tyto metody jsou dostatečně flexibilní, aby umožnily výběr nejvhodnějších z nich pro dané technické a legislativní prostředí. [2]

Recyklace se uplatňuje ve všech fázích jaderného palivového cyklu, počínaje těžbou a úpravou radioaktivních surovin přes výrobu jaderného paliva, provoz reaktorů, případného přepracování vyhořelého paliva a vyřazování jaderných zařízení z provozu. V oblasti výzkumu, průmyslových a medicínských aplikací se s recyklací a opětovným využíváním materiálů můžeme setkat hlavně v případech, kdy se vhodnou dekontaminací daří vrátit k opětovnému používání cenné materiály a přístroje. [2]

Při rozhodování o recyklaci je třeba brát v úvahu ekonomickou stránku, přičemž opodstatnění procesu recyklace by mělo být založeno na analýze přínosů a výdajů. Při její přípravě je třeba brát v úvahu následující skutečnosti [2]:

- Náklady na recyklaci
- Hodnotu recyklovaných materiálů
- Dávky, které personál může během recyklace obdržet
- Náklady vynaložené na zpracování a ukládání těchto materiálů, pokud by se s nimi zacházelo jako s odpadem

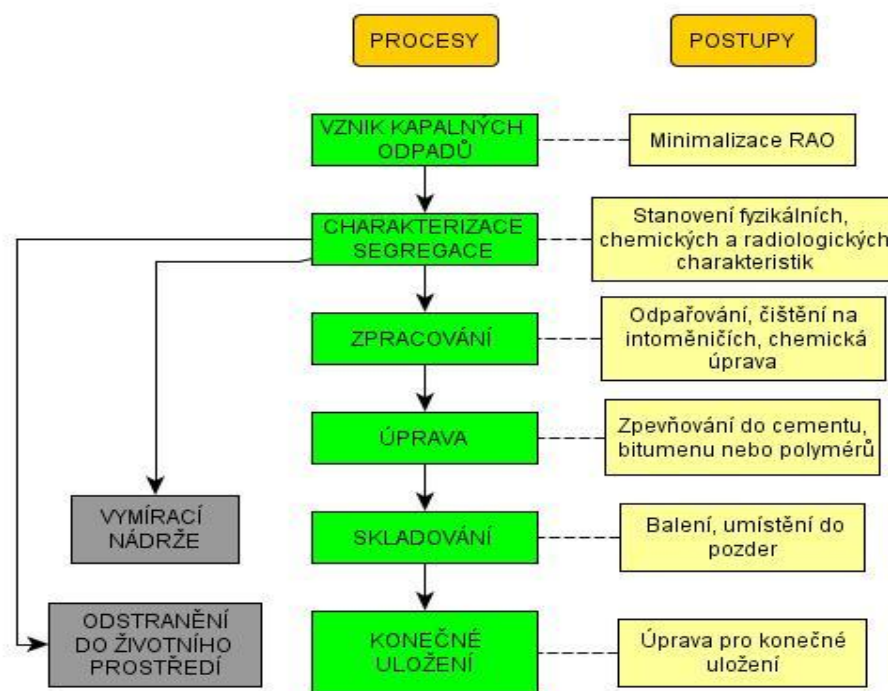
Obecně lze říci, že tam, kde je to ekonomické a zároveň dostatečně bezpečné, se materiály recyklují, nebo se znovu používají. Jako příklad mohou sloužit sudy pro přepravu uranového koncentráту, které se buď přímo, nebo po oplachu vracejí do přepravního cyklu. Na druhé straně existuje celá řada materiálů jako např. kaly anebo filtry, jejichž recyklace by se ekonomicky nevyplatila. [2]

2.5 Zpracování radioaktivních odpadů

Cílem zpracování radioaktivních odpadů je snižování jejich objemu, odstraňování radionuklidů a případně i dosažení změny jejich složení, jestliže to usnadní následující úpravu odpadů. Přispěje se ke zvýšení bezpečnosti celého systému zneškodňování odpadů, zejména při jejich skladování, přepravě a konečném uložení. [2]

2.5.1 Zpracování kapalných odpadů

U kapalných odpadů je metoda snižování jejich objemu závislá na solnosti vstupních roztoků a přítomnosti pevných podílů. Pro odpady s vyšším obsahem rozpuštěných i pevných složek se provádí odpařování, extrakce a chemická úprava, pro málo solné pak iontová výměna, membránové metody a některé další. Jednoduché schéma zpracování kapalných odpadů je znázorněno na obr. 2.1. [2]



Obr. 2.1 Schéma zpracování kapalných odpadů [2]

2.5.1.1 Chemická úprava

Jde o levný, ale nepříliš účinný postup, při němž dekontaminační faktor se pohybuje v rozmezí 10 až 100, pro aktinidy až 1000. Tento postup je založen na srážení nebo spolusrážení některých složek roztoku, popřípadě na sorpci složek roztoku na vytvořenou sraženinu. Metoda je vhodná pro velké objemy solných roztoků a kalů. [2]

2.5.1.2 Odpařování

Tepelná úprava je vždy náročná ekonomicky, v případě odpařování je však dostatečným důvodem pro jeho široké použití universálnost procesu a jeho vysoký dekontaminační faktor (až 10^5). Výhodou je, že kondenzát může být z pravidla přímo, nebo po dočištění na iontoměničích uveden do životního prostředí. Technologické zařízení je jednoduché a také proces je dokonale propracován. Používají se kotlové a filmové rotorové odparky různé

konstrukce, pracující někdy za podtlaku. Odpařování může být znehodnoceno tvorbou pěny a únikem těkavých radionuklidů. [2]

2.5.1.3 Iontová výměna

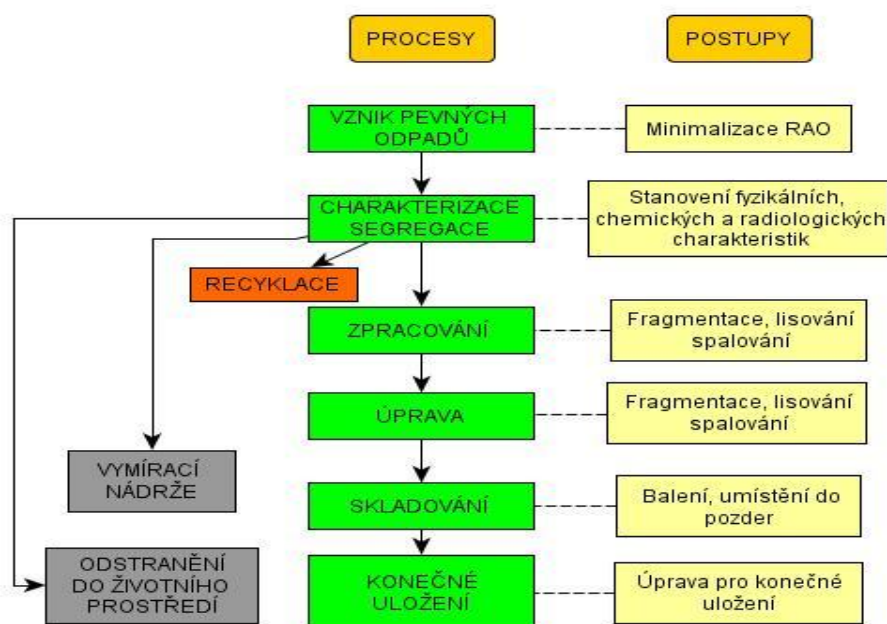
Jak již název značí, k iontové výměně použijeme iontoměniče. Složky roztoku, které jsou v iontové formě, mohou zaměnit ionty, které tvoří součást chemické struktury iontoměniče. Dekontaminační faktor dosahuje hodnot až 10^4 . Technologie iontové výměny není příliš vhodný při vyšší solnosti zpracovávaného roztoku. [2]

2.5.1.4 Extrakce

Jde o selektivní metodu, používanou tehdy, má-li být izolovaná složka dále využívána. Je založena na rozpustnosti vybraných složek odpadů ve vhodně zvoleném, zpravidla organickém rozpouštědle. Proces je poměrně citlivý na změnu podmínek, vede vždy k tvorbě sekundárních odpadů, které musí být často zpracovávány jako organické kapaliny. Extrakce se využívá pro izolaci vzácnějších složek v radioaktivních odpadech. Technologická zařízení jsou poměrně jednoduchá a provozně ověřená. Dekontaminační faktor dosahuje až 10^4 . [2]

2.5.2 Zpracování pevných odpadů

Postupy zpracování pevných radioaktivních odpadů lze podle principu používaných metod rozdělit na mechanické, tepelné, chemické a biologické. [2]



Obr. 2.2 Zjednodušené schéma zpracování pevných odpadů [2]

2.5.2.1 Mechanické procesy

a) *Lisování*

Lisování je jednoduchou metodou zmenšení objemu radioaktivních odpadů jako např. (papír, textil, umělá hmota, skleněné nádoby, menší kovové předměty, vzduchotechnické filtry). Nízkotlakým lisováním lze zmenšit objem odpadů 2-5 krát. Ve vysokotlakém lisu lze dosáhnout redukce objemu 10-20 krát. Někdy se oba postupy kombinují. Zařízení je jednoduché, snadno se obsluhuje a je průmyslově ověřené. Použitím této metody se předpokládá třídění shromážděných odpadů (poškození lisu většími předměty, únik kapaliny atd.). Na rozdíl od nízkotlakého lisu je vysokotlaký lis investičně a provozně nákladný a je také citlivý na chyby obsluhy. Lisování se optimálně provádí v nádobách, tj. v sudech pro uložení. Ve vysokotlakém lisu se zpracovávají celé sudy obsahující odpady slisované na nízkotlakém zařízení. Takto slisovaný odpad ještě není konečnou formou k uložení. Zpravidla se zpevňují cementem v ocelových sudech. [2]

b) *Fragmentace*

Tento proces se využívá ve dvou případech. Je to ve fázi zpracování pevných odpadů, kdy pro jejich velký objem nelze použít lisovacího zařízení, a při vyřazování zařízení z provozu, kdy je třeba demontovat například velkoobjemové součásti primárních okruhů jaderných reaktorů, velkokapacitních nádrží, potrubí apod. [2]

2.5.2.2 Tepelné procesy

a) *Spalování*

Cílem spalování radioaktivních odpadů je jejich minimalizace. Pokud odpady obsahují organické složky, pak proces zahrnuje i jejich odstranění a převedení do anorganické formy. Z hlediska redukce objemu jde o velmi účinnou technologii, vznikají však při ní druhotné odpady, jako např. popel, vzduchotechnické filtry, vypírací vody z čištění plynů atd. Technologická zařízení jsou investičně i provozně nákladná a náročná na obsluhu. Nejběžněji používaný typ spalovacího zařízení je dvoukomorový, pozůstávající ze spalovací a dohořivací komory. Existují však také rotační komorové jednotky, což jsou v podstatě zmenšené verze cementářských pecí. Odpady určené ke spálení musí být vytríděny a pokud možno rozmělněny na malé kousky. Běžné provozní teploty ve spalovně nepřekračují 1000 °C, což na rozklad některých organických složek nestačí. Při použití plazmového hořáku se výrazně zvyšují náklady. [2]

b) Tavení

Objem kovových a plastových radioaktivních odpadů lze účinně zmenšit jejich roztavením, přičemž podstatná část kontaminantu se přitom zabuduje do vytavené hmoty, což odstraňuje potřebu další úpravy těchto odpadů před uložením. Při vhodně zvoleném procesu lze u kovů podstatnou část radionuklidů převést do strusky. Tím se kovový odpad dekontaminuje. Zařízení je náročné na obsluhu a je investičně i provozně nákladné. Tak jako ve všech vysokoteplotních procesech platí omezení zpracovatelnosti pro některé těkavé radionuklidy. [2]

2.5.2.3 Chemické procesy

Oxidace organických materiálů nízkoteplotními chemickými procesy umožňuje zpracovávat odpady s obsahem radionuklidů, které by při vyšších teplotách unikaly spolu s exhalacemi. Tyto procesy jsou zaváděny pouze zřídka. Důvodem je dostupnost metod, které jsou méně náročné na finanční zdroje i na technické zkušenosti obsluhy. Navíc při zpracování pevných odpadů zpravidla nedochází k redukci jejich objemu. Metody se uplatňují pouze v případech velmi malé produkce odpadů, kdy spalování nebo tepelný rozklad jsou ekonomicky nepřijatelné. [2]

2.5.3 Zpracování plyných odpadů

Plynné odpady zpravidla obsahují nízké aktivity radionuklidů, což umožňuje jejich kontrolované vypouštění do atmosféry. Exhaláty obsahují vedle radioaktivních plynů také aerosoly, popřípadě pevné částice a těkavé radionuklidy. Ty jsou zachycovány na filtrech. Používané filtry jsou různého typu (keramické, svíčkové, látkové...). Radioaktivní plyny vznikající ve větším množství se plní do tlakových lahví a skladují do rozpadu příslušného izotopu na úroveň umožňující jeho uvedení do životního prostředí. [2]

2.6 Úprava radioaktivních odpadů

Před konečným uložením musí být odpady převedeny do formy, jež je požadována pro jejich umístění do úložiště. Zároveň musí výsledný produkt splňovat požadavky na přepravu odpadů a jejich skladování před uložením. Úpravou je zpevňování kapalných radioaktivních odpadů a zpevňování pevných odpadů ztužidlem, jejich vložení do obalu, s nímž budou ukládány, pokud se tak již nestalo během jejich zpracování. Takto zpevněné odpady mohou být umístěny ještě do dalšího obalového souboru. [2]

2.6.1 Úprava nízko a středně aktivních odpadů

Různé druhy nezpracovaných odpadních materiálů nebo koncentrátů musí být zpevňovány, aby je bylo možno bezpečně dopravovat, skladovat, resp. uložit. Při výběru vhodného postupu je třeba brát ohled na kompatibilitu s obalovými materiály a s prostředím, do něhož se bude takto zpevněný odpad ukládat. [2]

2.6.1.1 Bitumenace

Zabudování kapalných odpadů do bitumenové (asfaltové) matrice se provádí smíšením přehřátých koncentrátů s roztaveným bitumenem nebo bitumenovou vodní emulzí. Při teplotách 160-200 °C se odpaří voda a bitumen spolu se solemi koncentrátu se vypouští do ocelového sudu, kde se ponechává ztuhnout. Kondenzát lze po úpravě (např. na iontoměničích) a po kontrole zpravidla vypustit.

Metoda používající odpařování směsi odpadu a bitumenové emulze ve filmové odparce byla vyvinuta v ČR a v průmyslovém měřítku slouží na obou českých jaderných elektrárnách, v Dukovanech i Temelíně.

Technologická zařízení vycházejí z ověřených technologií používaných v chemickém nebo potravinářském průmyslu. Proces může být realizován jako přerušovaný nebo nepřetržitý. Při použití bitumenové emulze lze snížit teplotu zpracování směsi, avšak na úkor kvality výsledného produktu. Uvedeným způsobem lze zpracovávat vhodné koncentráty nízko a středně aktivních odpadů, jemné kaly a iontoměniče. [2]

2.6.1.2 Cementace

Výroba cementového kamene smísením vody s cementem je základem jednoduché metody zpevňování kapalných radioaktivních odpadů, při níž se však místo vody používá radioaktivní koncentrát. Po ztvdnutí cementu se odpad v matrici mechanicky uzavře a částečně se tak podílí na její struktuře. Pro vytvoření kamene je teoreticky potřeba 24 % vody, míchání směsi však vyžaduje 40 až 55 % vody. Nadbytečná voda se částečně vypaří, zčásti však zůstává přítomna v pórech produktu. [2]

Zařízení k mísení cementové směsi je jednoduché a průmyslově dokonale ověřené. Používají se především vsázková technologická zařízení, ale existují i kontinuální mísiče šnekového typu. Pro úpravu menšího množství odpadů lze s výhodou využít mísení přímo v úložném obalu. Nabídka cementů je velmi široká, pro některé odpady se využívají speciální, rychle tvrdnoucí a chemicky odolné cementy. [2]

Cementace je vhodná pro nízko a středně aktivní koncentráty, iontoměniče, kaly a v menším množství i organické kapaliny. Cement je využíván také pro zalití pevných odpadů a zpracovaných biologických odpadů. [2]

2.6.1.3 Polymerace

Existuje zhruba 40 termoplastů i reaktoplastů, které mohou být použity pro zpevnění radioaktivních odpadů. Polyestery, vinylestery a epoxidy byly ověřovány pro zpevnění iontoměničů a organických kapalin. Polyetylen pro zpevnění vysušených nebo kalcinovaných odpadů. Močovino-folrmaldehydové pryskyřice pro radioaktivní koncentráty a anorganický silikátový polymer pro kalcinované odpady. Ve všech případech jsou složky radioaktivních odpadů v matrici mechanicky uzavřeny, ale nepodílejí se na jejich struktuře. [2]

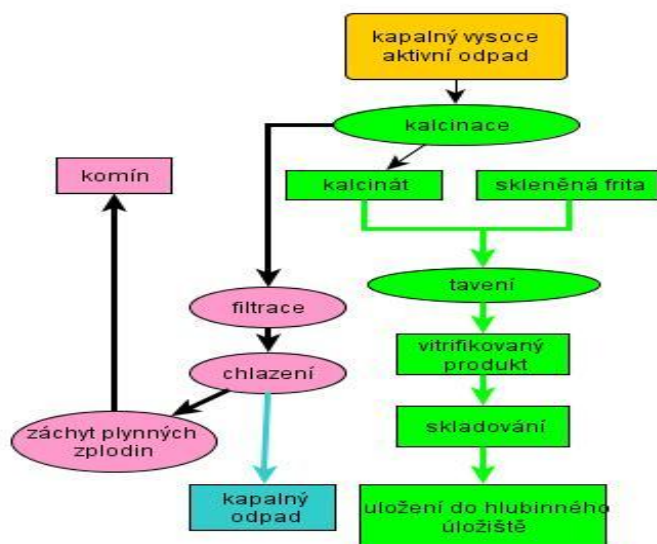
2.6.2 Úprava vysoce aktivních odpadů

2.6.2.1 Vitrifikace

Na rozdíl od bitumenu, cementu či polymeru odolávají skelné a keramické systémy radiačnímu namáhání, a proto jsou používány pro zpevnění kapalných vysoce aktivních odpadů. Po smísení vysoce aktivních odpadů se sklotvornými složkami se směs zahřeje na teplotu 900-1200 °C, přičemž se vytvoří tavenina, která po vychladnutí obsahuje částečně chemicky zabudované a z části mechanicky vázané oxidy radionuklidů i neaktivních solí z původního odpadu. [6]

Byly zkoušeny systémy založené na borosilikátových, olovnatých, titanových a fosfátových sklech. V současnosti se nejvíce osvědčila skla borosilikátová. Tavenina se vypouští do nádob z ušlechtilé oceli, v níž se také skladuje a po vložení do stínícího kontejneru přepravuje. [6]

Tavení se provádí v klasických sklářských pecích s elektrickým odporovým ohřevem nebo v indukčních středofrekvenčních nebo vysokofrekvenčních tavících zařízeních. Tato zařízení musí být připojena na účinný systém čištění plynů a exhalací. Systém je významným zdrojem druhotných odpadů, pevných i kapalných. Zaskleněné odpady mají vysokou odolnost vůči vyluhování vodou, dobrou tepelnou vodivost a mechanickou pevnost. Pro lepší tepelnou vodivost se zkoušejí kapky skla obalovat kovem (olovem, hliníkem). Před vložení do pece se radioaktivní odpady podrobují kalcinaci. Jednoduché schéma vitrifikačního procesu je znázorněno na obr. 2.3 a vlastnosti produktu a charakteristiky procesu jsou souhrnně znázorněny v tab. 2.I. [2]



Obr. 2.3 Schéma vitrificačního procesu [2]

Tab. 2.1 Kvalitativní porovnání charakteristik stabilizačních procesů a produktů[2]

CHARAKTERISTIKA	BITUMEN	CEMENT	POLYMER	SKLO	KERAMIKA
kategorie radioaktivních odpadů	NAO,SAO	NAO, SAO	NAO, SAO	NAO, SAO, VAO	VAO
proces					
složitost, nároky na obsluhu	vysoká	nízká	vysoká	velmi vysoká	velmi vysoká
citlivost na složení	nízká	střední	střední	vysoká	střední
objemová redukce	0,6-0,8	2	0,5	0,12	0,2
investiční náklady	vysoké	nízké	střední	velmi vysoké	velmi vysoké
provozní náklady	vysoké	nízké	vysoké	velmi vysoké	velmi vysoké
maximální množství RAO	200 l/h	1000 l/h	20 l/h	~50 l/h	~50 l/h
produkt stability					
mechanická stabilita	nízká	vysoká	střední	vysoká	vysoká
hořlavost	vysoká	žádná	střední	žádná	žádná
radiační stabilita	střední	střední	nízká	velmi vysoká	velmi vysoká
retence aktinidů	malá	vysoká	malá	vysoká	vysoká
retence β, γ zářičů	vysoká	malá	střední	vysoká	vysoká
jiné negativní vlastnosti	výbušnost	vysoká porozita	korozivnost vůči obalu	vysokoteplotní proces	vysokoteplotní proces
jiné pozitivní vlastnosti	plasticita	samostínící efekt		dobrá tepelná vodivost	dobrá tepelná vodivost

2.6.2.2 Zpevnění keramickými hmotami

Zatímco sklo je amorfní materiál a v podstatě tuhý roztok, keramické materiály si zachovávají svoji krystalickou strukturu. Zpevňování je opět vysokoteplotní proces se všemi důsledky, avšak dopady se většinou zabudovávají do struktury hmoty. Dosahují tak vyšší zadržovacích schopností a dlouhodobé stálosti. Používají se přírodní keramické hmoty, ale vyvinuty byly i syntetické hmoty, které se při zachování všech příznivých vlastností vyznačují nižší teplotou zpracování a vyšším množstvím přidávaného odpadu. [2]

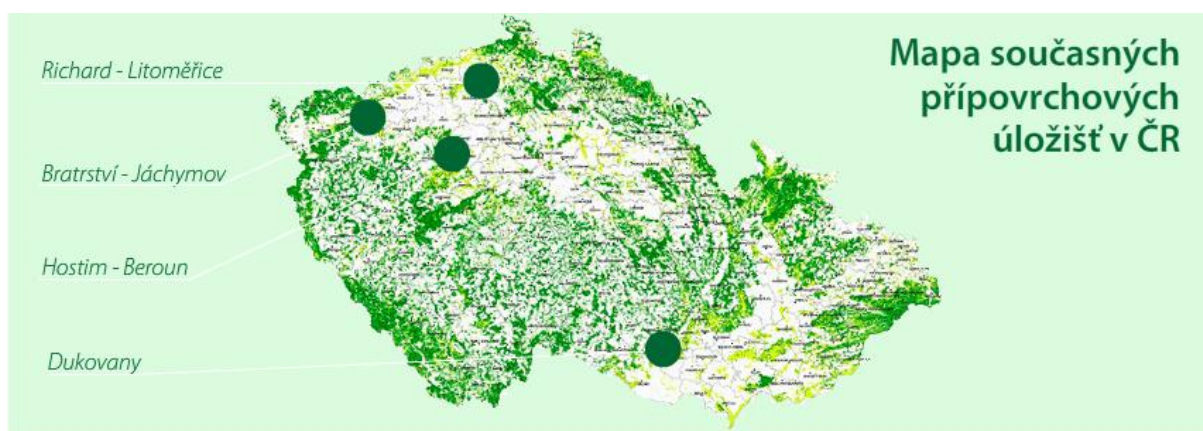
3 Ukládání radioaktivních odpadů

Od konce čtyřicátých let uplynulého století se ve světě uplatňovaly nejrůznější způsoby jak se zbavovat radioaktivních odpadů. Postupně se některé staly nepřijatelnými pro společnost, která se začala více zajímat o životní prostředí. Z počátku se zavrhl variantu ukládání RAO na dno moří a oceánů a od vypouštění v kapalné formě do země. Vynést RAO ke slunci je v dnešní době příliš rizikové. Výsledkem je princip ukládání, který je schválen odbornou veřejností ve všech zemích provozující jaderná zařízení. Tento princip je založen na izolaci radioaktivních odpadů od člověka a jeho životního prostředí po celou potřebnou dobu. Účinná izolace lze dosáhnout pomocí systému bariér, jak umělých, tak i přírodních. [7]

3.1 Přípovrchové a podzemní úložiště

Moderní přípovrchové úložiště je zpravidla železobetonová struktura izolovaná proti průniku vody vhodným materiálem (asfalt, jíla...), vybavená drenáží pro odvod povrchových vod a zachycování možných průniků z úložných jímek. Drenážní vody jsou po kontrole vypouštěny nebo odesílány ke zpracování jako druhotné RAO. Úložné jímky mají objem mezi 500 a 1000 m³ a po zaplnění odpadem se volný prostor mezi obaly vyplňuje betonovou záměsí. Po zaplnění se jímky zakrývají izolačními a ochrannými vrstvami, které brání průniku srážkové vody a před kontaktem osob, zvířat nebo kořenů rostlin. [7]

Česká republika má nyní v provozu tři úložiště. Jedná se o úložiště Dukovany, které se nachází v areálu elektrárny Dukovany a je největším úložištěm u nás, úložiště Richard u Litoměřic na úpatí Bídnice a nejmenším je úložiště Bratrství u Jáchymova na úpatí Krušných hor. [7]



obr. 3.1 Mapa současných přípovrchových úložišť v ČR [7]

Úložiště Dukovany bylo vybudováno pro zneškodnění radioaktivních odpadů, které vznikají v jaderné energetice a patří do kategorie nízko-aktivních a středně-aktivních odpadů. V trvalém provozu je od roku 1995. Jedná se o nejmodernější a zároveň největší úložiště radioaktivních odpadů v České republice, které svou konstrukcí i bezpečností odpovídá standardům platným v západoevropských zemích. Jsou zde ukládány především sudy s provozními odpady z dukovanské i temelínské jaderné elektrárny. V jaderné elektrárně vznikají dva typy nízkoaktivních odpadů. Jde o pevné odpady (kontaminované ochranné pomůcky, čisticí textilie, balicí materiály, papír, fólie elektroinstalační materiál, stavební sut' a atd.) a odpadní vody. Kontaminované odpadní vody procházejí několika stupňovou úpravou. Ta spočívá především v odpaření, která vede k zahuštění. Takto vzniklý koncentrát je následně butumenován. Pevné odpady jsou tříděny a upravovány podle jejich vlastností. Stavební sutě a některé elektroinstalační materiály jsou shromažďovány do 200 litrových sudů, balicí materiály (fólie) jsou lisovány. Spalitelné odpady jsou odesílány do speciálních spaloven (Švédsko). Vzniklý popel je dovážen zpět a ukládán. Celkový objem úložných prostor 55 000 m³ (zhruba 180 000 sudů), který je dostatečný k uložení všech provozních odpadů z obou elektráren a to i v případě prodloužení jejich plánované životnosti na 40 let. Úložiště Dukovany bude podle současných předpokladů provozováno do roku 2100. Poté se bude tři sta let monitorovat. Po tuto dobu bude celý areál oplocen a střežen. [8] [9] [10]



obr. 3.2-3 Přípovrchové úložiště Dukovany[8]

Institucionální odpady, které vznikají ve zdravotnictví, průmyslu, zemědělství či výzkumu, jsou od roku 1964 ukládány v úložišti radioaktivních odpadů Richard. Odpady, které mají příliš vysokou aktivitu, než aby mohly být trvale uloženy v úložišti, jsou do doby, než je bude možné uložit v hlubinném úložišti, přijímány ke skladování do úložiště Richard.

V současné době je zde uloženo více než 25 000 obalových souborů. Celkový objem využívaných prostor přesahuje 17 000 m³. Kapacita pro vlastní ukládání odpadu je asi poloviční a zbytek prostoru tvoří chodby nezbytné pro obsluhu a manipulaci s odpady. Předpokládáme-li vyplnění zbývajících prostor úložiště v rozmezí 100 až 200 sudů ročně, můžeme odhadnout dobu provozu úložiště do roku 2070. [11]



obr. 3.4 Podzemní chodba[11]

Úložiště Bratrství v Jáchymově je vybudováno v části opuštěných podzemních prostor bývalého uranového dolu Bratrství. Samotné úložiště tvoří jen nepatrnou část důlního pole Bratrství, které má rozlohu 9,8 km² s více než 80 km štol a překopů. Úložiště je situováno v prostorech okolo bývalé Těžní štoly. V roce 1974 byla tato štola s přílehlými komorami adaptována na úložiště radioaktivních odpadů. Do tohoto úložiště jsou přijímány pouze odpady, které obsahují přirozené radionuklidy. Celkový objem prostoru pro ukládání je přibližně 1 200 m³ a v současné době je zde uloženo více než 2 100 obalových souborů. [12]



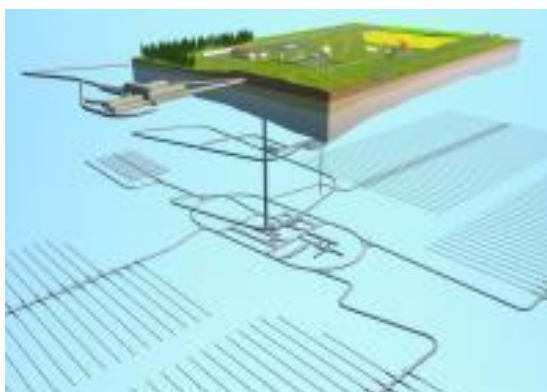
obr. 3.5-6 Přístupová chodba [12]

Úložiště radioaktivních odpadů Hostím, bylo vybudováno v roce 1959 ve vápencovém lomu Alkazar poblíž vesnice Hostím adaptací dvou štol vyražených v letech 1942 - 1944. Celkový objem obou chodeb byl cca 1690 m³. V úložišti jsou uloženy nízko a středně aktivní odpady z ÚJV Řež a. s. a ÚVVVR. Nyní je toto úložiště uzavřeno a jsou monitorovány jeho vlivy na životní prostředí. [13] [14]

3.2 Hlubinné úložiště

Hlubinné úložiště pro vysoce aktivní odpady a vyhořelé jaderné palivo je uměle vyhloubený nebo pečlivě upravený podzemní prostor situovaný do hlubokých stabilních geologických vrstev. Přednost před úpravou starších důlních děl se dává zbudování úložiště nového, a to v neporušeném geologickém prostředí, v oblasti, kde nehrozí vulkanická činnost, zemětřesení, zaplavení mořem nebo zaledněním. Dlouhodobým uložením se miní časový úsek srovnatelný s geologickými časovými obdobími v měřítku delším než 10 tisíc let, spíše však 40 až 100 tisíc let. Všechny práce směřují k tomu, aby byl znemožněn jakýkoli kontakt budoucích pokolení s uloženým materiálem. Vybudování hlubinného úložiště jaderného odpadu proto předchází finančně i časově náročná a vývojová činnost a průzkumné práce. Hlubinné úložiště pro vysoce aktivní odpady a vyhořelé jaderné palivo se bude skládat ze tří částí [16]:

- podzemních prostorů pro ukládání a manipulaci s kontejnery s vyhořelým palivem a vysoce aktivními odpady
- přístupových šachet a tunelů
- nadzemního - povrchového areálu.



obr. 3.7 Koncept hlubinného úložiště [16]

Ukládací komory budou vybudovány v hloubce zhruba 500 m ve stabilní geologické formaci a odpad bude umístěn ve speciálních kontejnerech s dlouhodobou životností. Podzemní chodby se mohou podle množství ukládaného odpadu rozprostírat na ploše

několika km² v závislosti na koncepci řešení úložiště (např. jednopatrové nebo vícepatrové, horizontální či vertikální ukládání kontejnerů). Podzemní prostory a v nich probíhající ukládací činnost však nijak neovlivní ani neomezí dění na povrchu. Ukládací prostory budou s povrchovým areálem propojeny svislými přístupovými šachtami a tunelem ve tvaru šroubovice. Nadzemní areál úložiště bude zajišťovat nezbytné technické zázemí a jeho rozloha může být jen několik hektarů. Bude zahrnovat provozy a zařízení zabezpečující dodávky elektřiny, větrání úložiště, dílny pro servis důlních zařízení, správní budovy, sociální zázemí, sklady a také informační středisko. Způsob výstavby celého úložiště musí zohledňovat jak hlediska ochrany přírody a krajiny v dané lokalitě, tak oprávněné požadavky obcí. [15] [16]

3.2.1 Multibariérový systém hlubinného úložiště

Dlouhodobá bezpečnost je založena na tzv. multibariérovém principu, kdy jednotlivé bariérové složky úložného systému, plní bezpečnostní funkce zajišťující dlouhodobou izolaci uloženého vyhořelého jaderného paliva nebo RAO od složek životního prostředí, s nimiž by v budoucnosti mohlo být ve styku obyvatelstvo. Celý systém se skládá ze dvou základních částí: [17]

- přírodní bariéra – geologické prostředí, které je voleno podle místních podmínek jednotlivých států (granity, solné formace, jíly)
- inženýrská bariéra - kromě kontejneru s odpadem hlavně vícevrstvá bariéra na bázi bentonitu

3.2.2 Přírodní bariéra

Přírodní bariérou je vlastní geologická formace, v níž je hlubinné úložiště umístěno. Důkladný geologický průzkum prokáže vhodnost horninového prostředí a zároveň vyloučí blízkost rizikových geologických jevů jako je např. seizmická aktivita či geologické zlomy. Většinou se vybírá hornina, která se prokazatelně nezměnila za posledních několik milionů let a je tedy u ní předpoklad stability i v letech dalších. Hodnotí se především její pevnost, nerozpustnost a tepelná stabilita. Za vhodné geologické formace se považují solná ložiska, jílové sedimenty, tufy, granity (žuly) a rulové horniny. [15]

3.2.3 Inženýrská bariéra

První bariérou, která zajišťuje bezpečnost úložiště, je znehybnění radionuklidů v odolné a nerozpustné chemické formě (tzv. matici). Tou může být u vysoce aktivních odpadů

borosilikátové sklo nebo keramické materiály, u středně aktivních odpadů hlavně cement nebo bitumen (asfaltová živice). Vyzkoušeny jsou i metody tzv. synroc (synthetical rocks), což je zabudování odpadů do umělé, chemicky vytvořené, velmi trvanlivé horniny. [15]

Druhou bariérou je obal, do kterého se jaderný odpad umístí. U vysoce aktivních odpadů to je silnostěnný ocelový kontejner nebo měděná nádoba, uvažuje se i o nádobách z titanu. Od okolí by tento kontejner měl svůj obsah izolovat po dobu minimálně tisíc let. U nízkooaktivních a středně aktivních odpadů se používají plechové sudy, popř. betonové kontejnery. Ty by měly zajistit stínění před zářením po dobu 300 až 600 let. [15]

Při poškození druhé bariéry musí izolační funkci převzít poslední inženýrská bariéra nazývaná geotechnická bariéra. Geotechnická bariéra se předpokládá na bázi bentonitů. Ten byl zvolen na základě studia přírodních analogů, kvůli svým výborným reologickým vlastnostem. Bentonit na rozdíl od betonu, či cementu, nemění své vlastnosti po dobu tisíců let. Tato bariéra musí splňovat funkce tlumící, těsnící, výplňovou a konstrukční. Geotechnická bariéra zabraňuje pronikání podzemní vody ke kontejneru, migraci radionuklidů a zajišťuje dostatečný odvod tepla od hostitelského prostředí. [17]

Geotechnická bariéra musí splňovat funkce tlumící, těsnící, výplňovou a konstrukční. Jejím úkolem je zabraňovat pronikání podzemní vody ke kontejneru, migraci radionuklidů a zajistit dostatečný odvod tepla do hostitelského prostředí. Podle vlastností, které musí geotechnická bariéra splňovat, se také stanoví konstrukce jednotlivých vrstev bariéry. [17]

3.3 Vývoj hlubinného úložiště v České republice

Příprava hlubinného úložiště v České republice byla zahájena v průběhu osmdesátých let minulého století. Cílem programu bylo vypracovat základní koncepci, vyvinout vhodnou technologii, vybrat lokalitu, provést bezpečnostní studie a vybudovat úložiště, schopné umístit veškeré vyhořelé jaderné palivo z českých jaderných elektráren i výzkumných reaktorů. Po svém zřízení Správa úložišť radioaktivního odpadu převzala plánování prací, přípravu výběrových řízení na jednotlivé rozvojové projekty a zajistila financování programu od roku 1998 z jaderného účtu, na němž se shromažďují odvody všech původců radioaktivních odpadů v ČR. V této době byl dokončen tzv. referenční projekt hlubinného úložiště v granitoidní horninové formaci bez vazby na konkrétní lokalitu. [16]

Součástí programu vývoje hlubinného úložiště v ČR byla celá řada nejrůznějších studií, kterých se zúčastnily vědecko-výzkumné organizace a vysoké školy. Základním materiálem pro diskusi zaměřenou na výběr vhodné lokality se stalo vytipování 27 perspektivních regionů. Nejrozsáhlejší studovanou oblastí byly geologické aspekty hlubinného ukládání,

které se soustřeďovaly na výběr vhodné hostitelské horniny, oblastí a v konečném stadiu i jednotlivých lokalit. Tyto práce provázely podrobnější výzkum v testovací lokalitě Melechovský masiv, na níž by se ověřovaly vlastnosti žuly pomocí geovědních disciplín, jako jsou geologie, geotechnika, geofyzika, geochemie nebo hydrogeologie. Provedená geofyzikální měření dosahovala až do hloubek 15 km. [16]



obr 3.8 Hloubení vrtu MEL-1 na testovací lokalitě Melechov [18]

Ve druhé skupině výzkumných prací byly práce zaměřené na výzkum vlastností inženýrských bariér, kde hlavní pozornost je věnována těsnícím, tlumícím a výplňovým materiálům na bázi bentonitických jíílů, ale zkoumány byly i další materiály. Vzhledem k tomu, že mezi inženýrské bariéry patří i vlastní forma odpadu včetně obalu, jsou sem zařazovány i práce věnované výpočtům inventáře radionuklidů, charakterizaci vyhořelých palivových článků, produkci tepla v prvním období uložení, tvorbě plyných produktů apod.

Třetí skupina se soustřeďuje na práce věnované bezpečnostním aspektům hlubinného ukládání. Patří sem bezpečnostní rozbor, modelování, testování, předpověď budoucího chování radioaktivních látek a také zajišťování jakosti. Do této skupiny prací bylo rovněž zařazeno studium přírodního analogu v Ruprechtově – analogie jsou dnes již všeobecně mezinárodně uznávaná forma průkaznosti předpokládaného chování úložného systému v blízké i vzdálené budoucnosti. [16]

Čtvrtá skupina prací zahrnuje projekční práce na předpokládaném uspořádání hlubinného úložiště a pomocných provozů nalézajících se na povrchu. Dosavadním výsledkem je již

zmíněný referenční projekt úložiště, který by měl shrnout představy o konstrukčním řešení úložného systému a současně by posloužil jako standard, s nímž budou porovnávána všechna konkrétní technická řešení. [16]

3.3.1 Umístování hlubinného úložiště

Základním cílem procesu umístění hlubinného úložiště je výběr optimální lokality, která by měla kromě požadavků na vlastnosti hornin, zejména na jejich izolační a retenční schopnosti, splňovat ještě řadu dalších požadavků, mezi něž patří střety zájmů, přijatelnost lokality veřejností, technická možnost vybudování povrchového areálu úložiště a dostupnost lokality. [16]

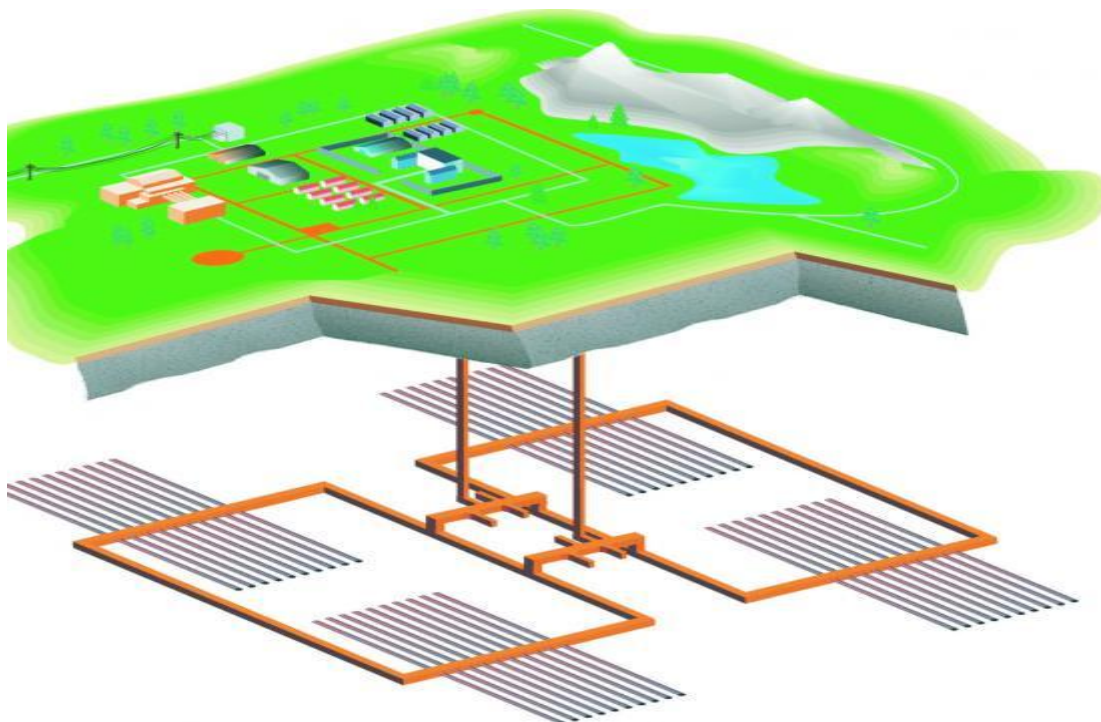
Pokud jde o horninové prostředí samotné, pak je třeba na počátku výběru zvolit takové, které se na území státu vyskytuje běžně a jehož geologický vývoj a pozice dovoluje předpokládat, že bude mít požadované vlastnosti, které navíc budou stabilní po nezbytně dlouhou dobu. [16]

V České republice byla ke konci roku 2002 ukončena první etapa přípravy hlubinného úložiště, která se stávala ze dvou fází. Z fáze regionálního mapování a fáze výběru nadějných lokalit. Jelikož koncepce ČR v oblasti nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem uložila navrhnout do územních plánů do roku 2015 dvě lokality, které by byly podrobeny detailnímu studiu, byl v rámci druhé etapy započat v roce 2003 geologický průzkum na několika vybraných lokalitách, avšak tyto práce byly s ohledem na odmítavý postoj veřejnosti přerušeny a pokračovaly bez činností, při nichž by byl nutný vstup na pozemky. Geologický výzkum se soustředil převážně na testovací lokalitu Melechov. Zahájení třetí etapy, která zahrnuje průzkumné a vrtné práce ve vybraných lokalitách, bylo odloženo a mělo by pokračovat po roce 2009. [16]

3.3.2 Předpokládané řešení hlubinného úložiště v ČR

Koncepční řešení hlubinného úložiště v ČR, které se příliš neliší od obdobných řešení v zahraničí, je patrné na obr. 3.9. Jde o stav areálu v době provozu, kdy budou radioaktivní odpady a vyhořelé jaderné palivo současně přijímány, překládány do úložných obalových souborů, transportovány do podzemí, ukládány a zároveň zde bude probíhat budování dalších úložných prostorů v podzemí. Kromě znázorněných objektů obsahuje areál technické zázemí a objekty zajišťující pobyt pracovníků, administrativní budovu, informační služby, komunikace atd. [16]

Mimo povrchový areál vlastního hlubinného úložiště budou ve vazbě na podzemí umístěny objekty pro větrání důlního díla, a to nadzemní části objektů dvou výdušných jam. Oba objekty budou rovněž opatřeny, stejně jako celý areál úložiště, systémem fyzické ochrany. Převážná část objektů je situována v neaktivní části areálu. Aktivní provoz je soustředěn do vyčleněné části, která je zajištěna samotnou bezpečnostní ochranou. [16]



obr. 3.9 Koncept hlubinného úložiště v ČR [16]

Celková plocha areálu hlubinného úložiště je 29,5 hektarů, z toho část, kde probíhají radiační činnosti, zabírá 3 hektary. Poměrně velikou část plochy areálu zabírá rezervní a manipulační plocha. Je to dáno částečně tím, že část této plochy bude použita pro zařízení staveniště hlubinného úložiště, částečně možnostmi poloměrů železniční vlečky. Počítá se s ní také do budoucna jako s rezervou pro výstavbu dalších možných provozů. [16]

Celý objekt přípravy vyhořelého paliva a vysoce aktivních odpadů se stává z jednoho podzemního a čtyř nadzemních podlaží. Aktivní provoz tvoří celek se dvěma organizovanými kontrolovanými vstupy pro personál, kterým předchází vstup z exteriéru, kompletní hygienická smyčka se šatnami a vstup do kontrolovaného pásma. Pro transporty paliva a odpadů slouží technologický dopravní vstup přes halu. Odtud je dále možný přístup k příslušným technologiím. Na prostory aktivní části objektu navazuje přístupovou chodbou šachta zavážení obalových souborů do podzemí. [16]

Vedle povrchových provozů s příjmem a přebalováním radioaktivních odpadů jsou na povrchu prostory určené ke skladování vytěženého materiálu a k přípravě materiálů, kterými se vyplní vytěžené podzemní prostory nevyužité pro uložení odpadů. V podzemí se pak nalézají prostory těžních a větracích šachet, podzemní komunikace a obslužné chodby a vlastní úložné prostory. Objem podzemního díla závisí na množství ukládaných odpadů a bude se pohybovat okolo jednoho milionu metrů krychlových. [16]

Při ukládání vysoce aktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva se předpokládá vkládání obalových souborů do vrtů vyhloubených v úložných chodbách. Volné prostory kolem kontejnerů se mají vyplňovat jílovitými hmotami, např. bentonitem, který díky bobtnavosti dokonale utěsňuje všechny poruchy. Nebo se budou vyplňovat jinými materiály zvyšujícími tepelnou vodivost a regulujícími bobtnací tlak, jako jsou písek nebo grafit. Všechny přístupové cesty by měly být postupně utěšňovány tak, aby voda ani plyny nemohly komunikovat s biosférou. Podzemní část úložiště musí být navržena tak, aby úložné prostory byly obklopeny vrstvou neporušené horniny o tloušťce několika set metrů a aby umělé materiály byly vzájemně i vůči hornině kompatibilní. Konkrétní řešení bude však významně ovlivněno charakteristikami horninového prostředí, volba materiálů musí respektovat především geochemické vlastnosti prostředí. [16]

3.3.3 Uzavírání hlubinných úložišť

Při uzavírání hlubinného úložiště se předpokládá, že nejprve dojde k dekontaminaci a demontáži technologických zařízení, přepravy mimo objekt úložiště a k recyklaci odpadů. Konečnou činností při uzavírání hlubinných úložišť se předpokládá zasypání úložiště, utěsnění všech vstupů materiálem na bázi bentonitických jílu a uzavření transportních cest. Utěsnění ukládacích chodeb, zaplňování úložných prostor, dekontaminace a odstraňování technologického zařízení se počítá provádět postupně v průběhu provozu hlubinného úložiště. Jedna z posledních činností je odstranění povrchových staveb, které je nutné před jejich demolicí dekontaminovat. Strategie procesu vyřazování hlubinného úložiště z provozu je založena na co nejefektivnějším dosažení následujících cílů [19]:

- Dosažení maximální rozumně dosažitelné bezpečnosti systému,
- Eliminace rizik pod úroveň rizika radiační havárie menší než 10^{-7} /rok,
- Dosažení co nejnižších nákladů při zachování postulované úrovně bezpečnosti,
- Variabilitě umožňující přizpůsobení novým podmínkám předvídatelným v předpokládaném časovém horizontu projektu,
- Aplikovatelnost nových technologií.

4 Závěr

Jaderná energetika je nedílnou součástí moderního rozvoje s velmi vysokou hustotou toku energie, bez vzniku skleníkových plynů a kyselých dešťů jako je to u uhelných elektráren. V současnosti je ve světě provozováno přes 436 jaderných bloků, který se podílí 17% veškeré světové výroby elektřiny. V tomto století provozuje jadernou elektrárnu 31 zemí, které osidluje $\frac{3}{4}$ světového obyvatelstva.

Neinformovaná společnost se obává bezpečnosti jaderného štěpného procesu i díky nešťastným událostem, které poznamenali jadernou energetiku. Tyto havárie se staly v roce 1979 na Three Mile Island (USA), v roce 1986 v Černobylu (SSSR) a poslední havárie v roce 2011 v jaderné elektrárně Fukušima (JAPONSKO). Většina těchto havarijních situací vznikla převážně kritickou chybou lidského faktoru, nebo nepředvídatelnou přírodní katastrofou.

V této bakalářské práci jsem popsal zneškodňování nízko a středně aktivních odpadů, které jsou díky zkušenostem a technologii velmi dobře vyřešeny. Důsledkem toho je dokonale propracovaná legislativa a systém kontrol, který nemají žádné jiné odpady na světě.

Dále jsem řešil problematiku ukládání vysoce radioaktivního odpadu a vyhořelého jaderného paliva. Alternativou je umístění RAO a VJP do hlubinného úložiště, které pomocí inženýrských bariér a geologických formací zajistí dostatečnou izolaci po dobu desetitisíců až statisíců let. S touto variantou začaly pracovat veškeré vyspělé státy. Případně další alternativou by bylo RAO a VJP přepracovávat, ale v dnešní době je tato varianta převážně ekonomicky nepřijatelná.

Výstavba hlubinného úložiště je úzce spjata s dobrou informovaností občanů a případného zapojení do spolurozhodování o vývoji úložiště. Další otázkou je bezpečnost proti neoprávněnému vniknutí. Terorismus nebude nejspíš největší hrozbou díky konstrukce úložiště ve hloubce 500 m, ale jak bude svět vypadat za tisíc let? Co když se kvůli nečekaným katastrofám ztratí veškeré informace o hlubinných úložištích? Co když se RAO a VJP stanou cenným produktem té doby? Na takové otázky a mnoho dalších nejspíš nebudeme mít nikdy odpovědi a proto musíme hlubinné úložiště dokonale odizolovat od budoucí populace a případnému vniknutí.

Při dnešní technologické vyspělosti nedokážeme vyhořelé jaderné palivo efektivně přetransformovat do dalšího užitkového materiálu, a proto je podle mého názoru jediná varianta ho dokonale uložit do míst, kde bude bezpečně odizolován od okolního prostředí. To je důvod výstavby hlubinného úložiště nejen v České republice, ale i po celém světě.

Použitá literatura

- [1] Radioaktivní odpad. [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.jaderny-odpad.cz/>
- [2] DLOUHÝ, Zdeněk. *Nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2009, 219 s. ISBN 978-80-214-3629-9.
- [3] RADIOAKTIVNÍ ODPADY A SKUPINA CEZ. [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/micrositesutf/odpovednost/content/pdf/cez_a_radioaktivni_odpady_-_nahled.pdf
- [4] IBLER, Zbyněk. *Provoz jaderných elektráren*. 1. vyd. Plzeň: Ediční středisko VŠSE, 1987.
- [5] Dekontaminace. [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.amec-nuclear.cz/sluzby/dekontaminace.htm>
- [6] Vitifikace. [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.glassrevue.com/news.asp@nid=178&cid=6.html>
- [7] Současná přípovrchová úložiště. [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.surao.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Soucasna-pripovrchova-uloziste>
- [8] Dukovany. [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.surao.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Soucasna-pripovrchova-uloziste/Dukovany/Historie>
- [9] Dukovany. [online]. [cit. 2012-05-11]. Dostupné z: <http://www.surao.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Soucasna-pripovrchova-uloziste/Dukovany/Zivotni-prostredi>
- [10] Dukovany. [online]. [cit. 2012-05-11]. Dostupné z: <http://www.surao.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Soucasna-pripovrchova-uloziste/Dukovany/Ukladane-odpady>
- [11] Richard-Litoměřice. [online]. [cit. 2012-05-11]. Dostupné z: <http://www.surao.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Soucasna-pripovrchova-uloziste/Richard-Litomerice/Ukladane-odpady>
- [12] Bratrství-Jáchymov [online]. [cit. 2012-05-11]. Dostupné z: <http://www.surao.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Soucasna-pripovrchova-uloziste/Bratrstvi-Jachymov/Historie>
- [13] Úložiště radioaktivních odpadů. [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/jaderna-zarizeni/uloziste-radioaktivnich-odpadu/>
- [14] Hostim-Beroun. [online]. [cit. 2012-05-11]. Dostupné z: <http://www.surao.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Soucasna-pripovrchova-uloziste/Hostim-Beroun/Ulozene-odpady>

-
- [15] Hlubinné úložiště jaderného odpadu a jeho anatomie. [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.jaderny-odpad.cz/hlubinne-uloziste.htm>
- [16] Budoucí hlubinné úložiště. [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.surao.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Budouci-hlubinne-uloziste>
- [17] Ukládání odpadů v ČR. [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://ceg.fsv.cvut.cz/vyzkum/radioaktivni-odpady/problematikaodpaducr>
- [18] Ukládání vysoce aktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva do geologického prostředí. [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/extranet/vav/aplikovana-geologie/radioaktivni-odpady>
- [19] Návrh vyřazování hlubinného úložiště z provozu. TARASOVÁ [online]. [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: http://www.rawra.cz/cze/content/download/271/1586/file/p3_navrh_vyrazovani_hu_z_provozu_rp_99.pdf

