

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Technicko-ekonomická analýza různých metod zpracování
a úpravy RAO z JE ve vazbě na možnosti uložení v ČR**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin VÁCLAVÍK**
Osobní číslo: **E13N0087P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Technicko - ekonomická analýza různých metod zpracování
a úpravy RAO z JE ve vazbě na možnosti uložení v ČR**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


1. Uveďte platnou a připravovanou legislativu ČR v oblasti odpadového hospodářství.
2. Uveďte dostupné možnosti nakládání s RAO z JE ve světě a ve vazbě na možnosti uložení v ČR.
3. Technicko - ekonomicky zhodnoťte metody zpracování a úpravy RAO z JE ve vazbě na možnosti uložení v ČR.
4. Navrhněte optimální varianty.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


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

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2014
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předložená diplomová práce se zabývá technicko-ekonomickou analýzou zpracování a úpravy radioaktivních odpadů z jaderných elektráren. První část je věnována teorii ohledně radioaktivních odpadů. Ve druhé části jsou popsány jednotlivé způsoby zpracování a úpravy. Třetí část se věnuje legislativě v oblasti radioaktivních odpadů. V další části jsou vypracovány odhady nákladů jednotlivých metod úpravy, zpracování a konečného uložení. Poslední část se zabývá výběrem vhodné metody nakládání s radioaktivními odpady.

Klíčová slova

Jaderný opad, zpracování, úprava, uložení, náklady

Abstract

The master thesis deals with the technical and economic analysis of the processing and treatment of radioactive waste from nuclear power plants. The first part refers to the theory of radioactive waste. Various ways of processing and treatment are described in the second part. The third part is concerned with the legislation regarding radioactive waste. The cost estimates of various methods of the processing, treatment and final disposal are developed in the next part. The last part is focused on the selection of appropriate methods for disposal of radioactive waste.

Key words

Nuclear waste, processing, treatment, storage, costs

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 11.5. 2015

Jméno a příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce Janě Jiříčkové PhD. za cenné a profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Diplomová práce byla podporována z prostředků Technologické agentury České republiky (TAČR), součást projektu CANUT TE01020455.

Obsah

ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	14
1 VZNIK A KLASIFIKACE RAO.....	15
1.1 KLASIFIKACE RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ	15
1.1.1 Doporučené způsoby klasifikace RAO	16
1.2 VZNIK RAO.....	19
1.2.1 Jaderný palivový cyklus	20
2 NAKLÁDÁNÍ S RAO Z JADERNÝCH ELEKTRÁREN	22
2.1 BEZPEČNOSTNÍ HLEDISKA PŘI NAKLÁDÁNÍ S RAO	23
2.2 NAKLÁDÁNÍ S RAO PŘED JEJICH ZPRACOVÁNÍM	24
2.2.1 Minimalizace odpadů u zdroje	24
2.2.2 Shromažďování RAO.....	24
2.2.3 Třídění a charakterizace RAO	25
2.3 ZPRACOVÁNÍ RAO	25
2.3.1 Kapalné RAO	25
2.3.2 Pevné RAO.....	30
2.4 ÚPRAVA RAO	34
2.5 ULOŽENÍ RAO Z JE V ČR.....	39
3 LEGISLATIVA V OBLASTI ODPADOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ.....	40
3.1 VLÁDNÍ NAŘÍZENÍ.....	40
3.2 VYHLÁŠKY PROVÁDĚJÍCÍ ZÁKON Č. 18/1997Sb.	41
3.3 ATOMOVÝ ZÁKON.....	42
3.4 PŘIPRAVOVANÁ LEGISLATIVA	42
4 TECHNICKO-EKONOMICKÁ ANALÝZA METOD ZPRACOVÁNÍ A ÚPRAVY RAO	43
4.1 ANALÝZA ZPRACOVÁNÍ RAO.....	43
4.2 ANALÝZA ÚPRAVY RAO	50
4.3 ANALÝZA UKLÁDÁNÍ RAO.....	58
5 OPTIMÁLNÍ VARIANTY	61
ZÁVĚR	62
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	64
PŘÍLOHY	66

Úvod

Již od počátku pokusů s jadernými materiály jsou vytvářeny jaderné odpady, které je nutné izolovat od obyvatelstva a životního prostředí. Díky haváriím jaderných zařízení, výbuchům jaderných bomb a výzkumu štěpných materiálů jsou známy nežádoucí účinky těchto odpadů na živé organismy, životní prostředí a technologie. Proto se v zájmu vyšší bezpečnosti vytvářejí a vylepšují metody, které zabraňují kontaktu s těmito odpady. V souvislosti s rostoucí poptávkou po elektrické energii jsou v dnešní době hlavním původcem radioaktivních odpadů právě jaderné elektrárny. Škála nebezpečnosti těchto odpadů je široká. Počínaje nízko aktivními, které nepředstavují velké riziko až po vysoce aktivní, se kterými se musí nakládat s nejvyšší opatrností. Je však nutné uvést, že podle zákona č.18/1997 Sb. se stává radioaktivní materiál odpadem až po prohlášení za odpad. To znamená, že pro něj již není využití a není možné ho volně uvést do životního prostředí. Například použité jaderné palivo není odpadem, ale významnou surovinou, neboť jen velmi malé procento jeho objemu tvoří odpad a zbytek je dále využitelným materiálem pro přepracování. Pokud je některý materiál prohlášen za odpad, je nutné s ním nakládat v souladu s platnými zákony a co nejefektivněji a nejekonomičtěji zabránit úniku radionuklidů do životního prostředí.

Největší procento tvoří odpady kapalné a pevné. Podle aktivity se nízko a středně aktivní kapalné odpady zpracovávají nejčastěji metodami odpařování, chemickou úpravou, iontovou výměnou nebo membránovou metodou. U všech těchto metod jde o co největší objemovou redukci a snížení aktivity vypouštěné vody. Vysoce aktivní kapalné odpady se nejčastěji vitrifikují. Tento proces spočívá v odpaření přebytečné vody a zbylé radioaktivní látky se zabudují do skleněné matrice. Při tomto procesu je odpad i upraven a imobilizován, tudíž splňuje podmínky pro uložení. Ze zpracování nízko a středně aktivních odpadů vznikají produkty obsahující značnou část původních radionuklidů. Jsou jimi koncentráty z odparek, vysycené iontoměniče, chemikálie a kaly z filtrů. Tyto produkty je nutno upravit a imobilizovat buď zabudováním do cementové směsi, bitumenu nebo polymeru. Takto upravený odpad je nadávkován do nádoby (nejčastěji 200l ocelových sudů) a odeslán ke konečnému uložení nejčastěji do přípovrchového úložiště nebo do starých dolů upravených pro tyto účely.

Použité jaderné palivo je skladováno buď suchým způsobem, kdy jsou palivové soubory umístěny v masivním kontejneru uvnitř skladovací haly nebo mokřím způsobem, kdy se skladují ve speciálních bazénech. Pokud je použité jaderné palivo prohlášeno za odpad, je nejčastěji umístěno hlubinného úložiště, které zabraňuje úniku radionuklidů do okolí.

Seznam symbolů a zkratk

\check{C}	Číslo
FRO	Faktor redukce objemu
JE	Jaderná elektrárna
JPC	Jaderný palivový cyklus
k_{1kWh}	Cena za 1kWh elektrické energie [Kč]
k_b	Cena za 1m ³ betonu [Kč]
k_{bitm^3}	Cena za 1m ³ bitumenu [Kč]
k_{cemm^3}	Cena za 1m ³ cementové směsi [Kč]
k_{db}	Cena za dopravu 1m ³ betonu [Kč]
k_{ch}	Cena za 1kg chemikálií [Kč]
k_{HNO_3}	Cena za 1kg HNO ₃ [Kč]
k_{NaOH}	Cena za 1kg NaOH [Kč]
$k_{skla/1kg}$	Cena za 1kg sklotvorných látek a aditiv [Kč]
k_{sod}	Cena za 1kg sody [Kč]
k_{sudu}	Cena za 1 sud [Kč]
$k_{váp}$	Cena za 1kg vápna [Kč]
m_{nalitr}	Hmotnost chemikálií na jeden litr [kg]
$m_{páry}$	Hmotnost páry [kg]
m_{rok}	Váha kovových odpadů za 1rok [kg]
$m_{skla/1h}$	Množství vyprodukovaného skla za 1h [kg]
$MAAE$	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
MaR	Měření a regulace
n	Počet zaměstnanců [ks]
$n_{kon/rok}$	Počet kontejnerů za 1rok [ks]
n_{lis}	Počet sudů za 1h [ks]
n_m	Počet měsíců [ks]
$n_{s/h}$	Počet sudů za 1h [ks]

N_{AO}	.....	Nízko aktivní odpady
N_{NTL}	.....	Nízkotlaké lisování
N_{arm}	.....	Náklady na armování [Kč]
N_b	.....	Náklady na beton [Kč]
N_{bed}	.....	Ostatní náklady spojené s betonováním [Kč]
N_{bit}	.....	Náklady na bitumen [Kč]
N_{br}	.....	Náklady bez rezervy [Kč]
N_c	.....	Celkové roční náklady bez rezervy [Kč]
N_{cem}	.....	Náklady na cementovou směs [Kč]
N_{cs}	.....	Celkové roční náklady s rezervou 10% [Kč]
N_{cz}	.....	Celkové náklady na zalití jedné jímky [Kč]
N_{cz112}	.....	Celkové náklady na zalití všech 112 jímek [Kč]
N_{db}	.....	Náklady na dopravu betonu [Kč]
N_{el}	.....	Náklady na energii [Kč]
N_{ch}	.....	Náklady na chemikálie [Kč]
N_{chvs}	.....	Náklady na vápno a sodu [Kč]
N_{jeb}	.....	Náklady na jeřáb včetně kolejnic [Kč]
N_{kb}	.....	Cena betonu [Kč]
N_{kon}	.....	Náklady na kontejnery [Kč]
N_{kp}	.....	Náklady na krycí panely [Kč]
N_m	.....	Měsíční náklady na jednoho zaměstnance [Kč]
N_{mo}	.....	Náklady na měření, kontrolu a osvětlení [Kč]
N_p	.....	Náklady na personál [Kč]
N_{PEp}	.....	Cena za polyetylenovou plachtu [Kč]
N_s	.....	Náklady na sudy [Kč]
N_{skla}	.....	Náklady na složky pro výrobu skla [Kč]
N_u	.....	Náklady na údržbu a revize [Kč]

N_{zem}	Náklady spojené se zemními pracemi [Kč]
N_{zp}	Náklady na zemní plyn [Kč]
N_{zb}	Náklady spojené se zpracováním betonu [Kč]
N_{ll}	Náklady na zpracování jednoho litru odpadu [Kč]
$OUÚ$	Odpady s radioaktivitou nižší než uvolňovací úroveň
PO	Přechodné odpady
P_{gen}	Příkon generátoru [W]
P_{lis}	Příkon pohonu lisu [W]
P_o	Příkon ostatních částí systému [W]
P_{VTlis}	Příkon pohonu vysokotlakého lisu [W]
P_1	Příkon ohřívače [W]
P_2	Ohřívací výkon [W]
Q_c	Celková spotřeba elektrické energie [Ws]
Q_{gen}	Roční odběr generátoru [Ws]
Q_{kal}	Roční odběr kalcinátoru [Ws]
Q_{lis}	Spotřeba elektrické energie pohonu lisu [Ws]
Q_o	Odběr elektrické energie ostatních částí vitrifikačního systému [Ws]
Q_S	Spotřeba elektrické energie komplexu na spalování odpadů [Ws]
Q_{T1}	Energie potřebná k roztavení vsázky [Ws]
Q_{T2}	Odběr elektrické energie indukční pece [Ws]
Q_{VTlis}	Spotřeba elektrické energie pro pohon vysokotlakého lisu [Ws]
Q_1	Spotřeba energie na odpaření jedné dávky [Ws]
Q_2	Energie potřebná na odpaření jedné dávky tj. 170l odpadu [kWh]
Q_{1kg}	Energie potřebná k vytvoření 1kg páry [Ws]
Q_{1t}	Energie potřebná k roztavení 1t vsázky [Ws]
RAO	Radioaktivní odpad
SAO	Středně aktivní odpady
$Sb.$	Sbírka

<i>SÚJB</i>	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
<i>SÚRAO</i>	Správa úložišť radioaktivních odpadů
<i>t</i>	Čas [s]
<i>t_{rok}</i>	Počet provozních hodin za rok [h]
<i>t_{lis}</i>	Čas potřebný ke slisování jednoho sudu [s]
<i>VAO</i>	Vysoce aktivní odpady
<i>VJP</i>	Vyhořelé jaderné palivo
<i>VNAO</i>	Velmi nízko aktivní odpady
<i>VTL</i>	Vysokotlaké lisování
<i>V_b</i>	Množství betonu [m ³]
<i>V_{bit/sud}</i>	Množství bitumenu v jednom sudu [m ³]
<i>V_{cem/sud}</i>	Objem cementové směsi v jednom sudu [m ³]
<i>V_{ion}</i>	Množství ionexu [m ³]
<i>V_j</i>	Objem jedné jímky [m ³]
<i>V_o</i>	Objem zpracovávaného odpadu [m ³]
<i>V_s</i>	Vnější objem jednoho sudu [m ³]
<i>V_z</i>	Zbylý objem [m ³]
<i>V_{lt}</i>	Množství ionexu na jeden litr odpadu [m ³]
<i>WENRA</i>	Western European Nuclear Regulators Association
<i>ŽP</i>	Životní prostředí
<i>ΣP_{el}</i>	Součet výkonů zařízení [W]
<i>ΣP_o</i>	Součet příkonů ostatních zařízení [W]
<i>ΣP_s</i>	Součet příkonů komplexu spalování [W]
<i>ΣQ_{ot}</i>	Spotřeba elektrické energie okolních technologií [Ws]
<i>η</i>	Účinnost [-]
<i>β</i>	Zatížení [-]

Seznam obrázků a tabulek

OBR.1.1 DĚLENÍ RAO PODLE POLOČASU ROZPADU A MNOŽSTVÍ AKTIVNÍCH PRVKŮ [8]	19
OBR.1.2 VZNIK RAO [11]	19
OBR.1.3 PALIVOVÝ CYKLUS [12].....	20
OBR.2.1 CYKLUS NAKLÁDÁNÍ S RAO [2].....	23
OBR.2.2 NAKLÁDÁNÍ S RAO PŘED ZPRACOVÁNÍM A VAZBY NA JINÉ ETAPY [2].....	24
OBR.2.3 SCHÉMA ZPRACOVÁNÍ KAPALNÝCH RAO [2]	25
OBR.2.4 ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA ODPAŘOVÁNÍ KAPALNÝCH RAO [16].....	26
OBR.2.5 SCHÉMA IONTOMĚNIČOVÉ KOLONY	28
OBR.2.6 ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA ZAŘÍZENÍ PRO IONTOVOU VÝMĚNU VČETNĚ VSTUPNÍCH FILTRŮ [17]	28
OBR.2.7 MEMBRÁNOVÁ METODA [20].....	30
OBR.2.8 LISOVÁNÍ ODPADU V BOXU [8]	32
OBR.2.9 SCHÉMA SPALOVÁNÍ PEVNÝCH ODPADŮ (JAPONSKO) [18].....	33
OBR.2.10 SCHÉMA DEKONTAMINACE KOVOVÝCH RAO [19]	34
OBR.2.11 EXTRUDÉR SE ŠNEKOVÝM MÍŠIČEM [20].....	36
OBR.2.12 ROTOROVÁ FILMOVÁ ODPARKA [20]	36
OBR.2.13 SCHÉMA CEMENTAČNÍHO ZAŘÍZENÍ [20].....	37
OBR.2.14 CEMENTAČNÍ ZAŘÍZENÍ S MÍCHÁNÍM SMĚSI UVNITŘ SUDU (VLEVO) A MÍCHÁNÍM SMĚSI V MIXÉRU (VPRAVO) [22]	38
OBR. 2.15 SCHÉMA ZAŘÍZENÍ NA VITRIFIKACI VAO [24]	39
TAB.1.1 ČLENĚNÍ RAO PODLE RADIČNÍCH CHARAKTERISTIK [2].....	16
TAB.1.2 ČLENĚNÍ RAO PODLE FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ [2]	16
TAB.1.3 KLASIFIKACE RAO PODLE DOPORUČENÍ MAAE [7,2].....	17
TAB.1.4 TYPICKÁ MNOŽSTVÍ RAOV JEDNOTLIVÝCH ETAPÁCH JPC VZTAŽENÁ NA JEDNOTKOVOU PRODUKCI ELEKTRICKÉ ENERGIE V JE [9].....	22
TAB.2.1 VLASTNOSTI ORGANICKÝCH A ANORGANICKÝCH IONTOMĚNIČŮ [17].....	29
TAB.2.2 APLIKACE MECHANICKÝCH METOD NA RŮZNÉ ODPADY [8]	30

1 Vznik a klasifikace RAO

Každý předmět, materiál nebo prvek, který chceme prohlásit za radioaktivní odpad, musí splnit tři podmínky:

- daný předmět musí obsahovat takové množství radionuklidů, že je překročena zprošťovací úroveň
- jedná se o látky, které již nelze dále využít
- vlastník těchto předmětů je musí sám prohlásit za odpad[2]

Radioaktivním odpadem může být i jaderné palivo. Pokud je splněna i třetí podmínka. V České republice jsou provozovatelé jaderných reaktorů zároveň i majitelé vyhořelého paliva a jejich prohlášení je v tomto ohledu směrodatné. V souladu s atomovým zákonem je s vyhořelým palivem nakládáno jako s odpadem i do doby, než je za radioaktivní odpad prohlášeno. V některých případech může toto prohlášení učinit SÚJB. Podmínkou je, že už od počátku se musí s palivem nakládat tak, aby nebyla ztížena jeho případná pozdější úprava pro konečné uložení.[2]

Důležitá je také otázka využitelnosti. Pro někoho může být daný kontaminovaný předmět již odpadem, ale někdo jiný ho může považovat za užitečný a po vhodném dekontaminačním procesu je možné ho dále využívat.[2,4] Jako dobrý příklad může sloužit použité jaderné palivo, které je již někdy prohlášeno za odpad, ale pro někoho je velmi cennou druhotnou surovinou obsahující řadu cenných materiálů (obohacený uran, plutonium), které je možné dále využít.[5,2]

1.1 Klasifikace radioaktivních odpadů

RAO je možné klasifikovat několika způsoby:

- Podle fyzikálních vlastností (plynné, kapalné, tuhé, odpady lisovatelné a nelisovatelné, spalitelné a nespalitelné atd.) [6]
- Podle chemických vlastností (anorganické a organické, korozivní a nepodléhající korozi, kyselé a neutrální atd.) [2]
- Podle místa vzniku (průmysl, medicínské aplikace, **jaderný palivový cyklus**) [2]

V tabulkách 1.1 a 1.2 je znázorněno několik způsobů členění RAO

Tab.1.1 Členění RAO podle radiačních charakteristik [2]

CHARAKTERISTIKA	ČLENĚNÍ NA ODPADY
Doba životnosti radionuklidů	Přechodně radioaktivní s poločasem rozpadu menším než 1 rok, krátkodobé s poločasem nad 30 let
Obsah radionuklidů	Nízko, středně a vysoce aktivní (orientační hranice pro nízko aktivní odpady pod 10^9 Bq/m ³ , pro středně aktivní $10^9 - 10^{14}$ Bq/m ³ a vysoce aktivní nad 10^{14} Bq/m ³)
Typ emitovaného záření	Obsahující radionuklidy vyzařující záření alfa, beta a gama-aktivní odpady s obsahem umělých radionuklidů
Tepelný výkon	S významnou nebo nevýznamnou produkcí tepla (důležité z mnoha hledisek jako transport, skladování a ukládání. Jako hranice mezi středně a vysoce aktivními RAO je doporučena hodnota 2kW/m ³)
Kritičnost	S obsahem štěpitelných materiálů (pokud je obsah materiálu vysoký, je nutno uvažovat speciální opatření)
Povrchová kontaminace RAO	Na silně, středně a slabě kontaminované odpady, resp. bez povrchové kontaminace
Dávkové faktory relevantních radionuklidů	S nízkými nebo vysokými dávkovými faktory. Toto hraje roli při zkoumání bezpečnosti úložných systémů a jejich vlivu na lidský organismus a životní prostředí

Tab.1.2 Členění RAO podle fyzikálních vlastností [2]

CHARAKTERISTIKA	ČLENĚNÍ NA ODPADY
Skupenství	Pevné, plynné a kapalné
Velikost a hmotnost	O malých, středních a velkých rozměrech nebo hmotnostech
Lisovatelnost	Lisovatelné a nelisovatelné
Těkavost	Těkavé, méně těkavé a netěkavé
Hořlavost	Spalitelné a nespalitelné
Rozpustnost a mísitelnost	Rozpustné a nerozpustné, resp. mísitelné a nemísitelné

1.1.1 Doporučené způsoby klasifikace RAO

Už od 60. let minulého století se Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE) zabývá klasifikací RAO. V současné době je platná kategorizace z roku 1994¹, která je uvedena v tabulce 1.3, která přiřazuje nejvhodnější způsob uložení k jednotlivým kategoriím.[2] Spojuje nízko a středně aktivní odpady a zároveň tuto kategorii dělí na krátkodobé a dlouhodobé odpady.[7]

¹ INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Classification of Radioactive Waste – A Safety Guide, Safety Series No. 111-G-1.1, IAEA, Vienna, 1994

Tab.1.3 Klasifikace RAO podle doporučení MAAE [7,2]

KATEGORIE	CHARAKTERISTIKA	DOPORUČENÝ TYP ÚLOŽIŠTĚ
1. odpady potenciálně uváděné do životního prostředí	Roční dodávka připadající na vrub ozáření jednotlivce z obyvatelstva musí být menší nebo rovna efektivní dávce 0,01mSv	Žádné omezení
2. nízko a středně aktivní odpad	Při ukládání se nemusí uvažovat rozpadové teplo, neboť radionuklidy mají velmi nízkou aktivitu	přípovrchové
2a. nízko a středně aktivní odpady krátkodobé	Obsažené radionuklidy mají poločas rozpadu menší než 30 let a měrná aktivita dlouhodobých nuklidů nepřesahuje 4000Bq/g v jedné obalové jednotce, nebo 400Bq/g jako průměr pro kompletní úložiště	přípovrchové
2b. nízko a středně aktivní odpad	Jsou přesáhnuty limity měrné aktivity dlouhodobých radionuklidů z bodu 2a	hlubinné
3. vysoce aktivní odpady	Při ukládání těchto odpadů musíme uvažovat vznik přeměnového tepla vznikajícího vysokou aktivitou radionuklidů. Hraniční hodnotou je 2kW/m ³ tepelného výkonu	hlubinné

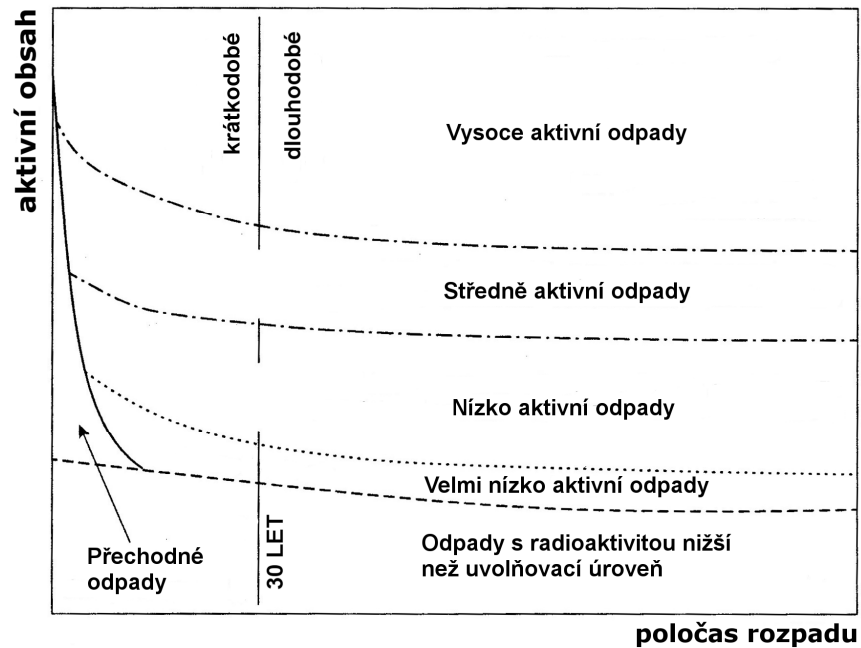
V této otázce je také nutné poznamenat, že pro každé úložiště jsou tyto limity odvozeny jinak, hlavně podle národních směrných hodnot přípustných dávek osob kritických (např. pro Dukovanské úložiště je limit radionuklidů stanoven na nižší úroveň, než je uvedeno ve zmíněných doporučeních. [2])

Podle nejnovějšího dokumentu Mezinárodní atomové agentury z roku 2008 jsou zachována dřívější schémata, ale zároveň vnáší určité modifikace, protože provoz, výstavba a hodnocení bezpečnosti dosáhly jistých změn. Proto bylo definováno šest kategorií odpadů a kvalitativní určení mezních podmínek mezi jednotlivými kategoriemi. Na jednotlivých orgánech odpovědných za nakládání s odpadem zůstalo stanovení podrobnějších mezních podmínek. [2])

Charakteristika zmíněných tříd:

- **Odpady s radioaktivitou nižší než uvolňovací úroveň (OUÚ).** Tyto odpady je možné uvolnit přímo bez případných omezení ve formě recyklace či dekontaminace. Pokud není překročena aktivita obsažených radionuklidů, je kontaminace považována za zanedbatelnou. Ve skutečnosti se jedná o odpady neradioaktivního charakteru a jsou uváděny kvůli konzistenci s nově připravenou klasifikací MAAE. [8,2])

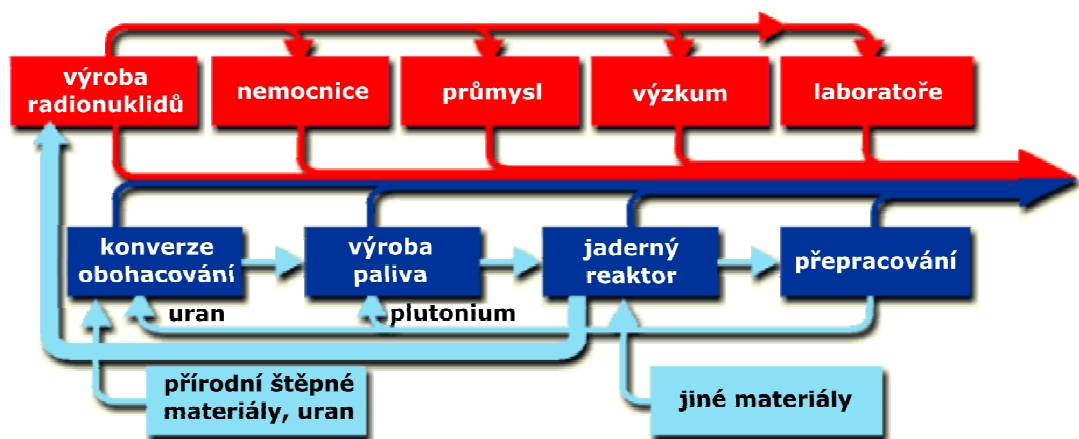
- **Přechodné odpady (PO).** Skladují se do vymřeni (i po dobu jednotek let) a poté je možné uvést tyto odpady do životního prostředí bez souhlasu orgánů pověřených touto problematikou. Tento problém se týká hlavně odpadů pocházejících z průmyslu, výzkumu a medicínských aplikací, kde se jedná o radionuklidy krátkodobé s poločasem přeměny do 100 dnů. [8,2]
- **Velmi nízko aktivní odpady (VNAO).** Jedná se o odpady nesplňující kritérium OUÚ, ale není nutný vysoký stupeň kontroly a izolace. Tyto odpady lze ukládat do typu řízených skládek i s neradioaktivními odpady. Největším zástupcem těchto odpadů je hlušina po těžbě radioaktivních surovin a další VNAO s přirozenými radionuklidy jako jsou například slabě kontaminované části vyřazeného jaderného zařízení (betonové zdivo apod.). [8,2]
- **Nízko aktivní odpady (NAO).** Tento typ již obsahuje radionuklidy o vyšší aktivitě, než je uvolňovací úroveň, ale množství dlouhodobých radionuklidů je omezené, které vyžadují důkladnou kontrolu a izolaci po dobu stovek let. Proto je nutné je ukládat do přípovrchových úložišť, které obsahují inženýrské bariéry. Budují se na povrchu země nebo se zapouštějí pod zem do hloubek často nepřesahujících 30 metrů. [8,2]
- **Středně aktivní odpady (SAO).** U těchto odpadů je vyžadován vyšší stupeň kontroly a izolace než u předešlých z důvodu obsahu dlouhodobých radionuklidů. Tyto odpady se díky svým vlastnostem ukládají do větších hloubek od desítek až po stovky metrů pod zemí avšak nemusí být zajištěn odvod tepla.
- **Vysoce aktivní odpady (VAO).** Obsahují největší množství dlouhodobých radionuklidů a vlivem radioaktivní přeměny se také stávají velkým zdrojem tepla. Toto vše musí být bráno v potaz při výstavbě úložiště určeného pro tento druh odpadu. Jde o použité jaderné palivo a vysoce aktivní produkty při jeho přepracování. Z těchto důvodu jsou budována hlubinná úložiště pro tento odpad v hloubkách stovek a více metrů pod zemí ve stabilních geologických formacích.



Obr.1.1 Dělení RAO podle poločasu rozpadu a množství aktivních prvků [8]

1.2 Vznik RAO

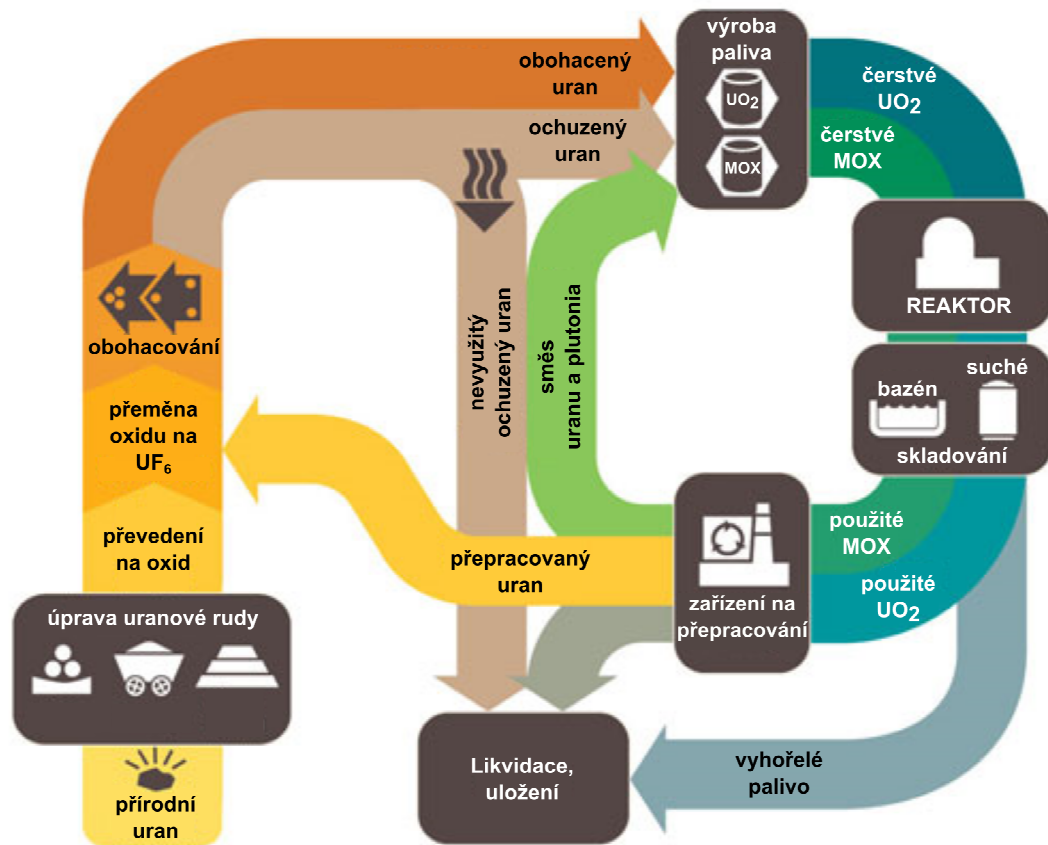
RAO vznikající právě v průmyslu, zdravotnictví, zemědělství, výzkumu, ale i při vyřazování těchto zařízení z provozu jsou nazývány institucionálními odpady. Co do množství a rizika je největším producentem RAO v civilním sektoru právě jaderná energetika počínaje těžbou radioaktivních surovin, výrobou samotného paliva až po nakládání s VJP (přepřacování, konečné uložení).[10]



Obr.1.2 Vznik RAO [11]

1.2.1 Jaderný palivový cyklus

Za radioaktivní odpad je nutno označit nejen použité palivo, ale také odpady vznikající při těžbě a zpracování uranových rud, výrobě paliva, provozování reaktoru, zpracování VJP (jeho trvalé uložení nebo přepracování) a také odpady, které vzniknou vyřazením jaderného zařízení z provozu.



Obr. 1.3 Palivový cyklus [12]

Těžba a zpracování uranové rudy

Uranové rudy jsou nejčastěji dobývány hornickým způsobem buď v povrchových nebo hlubinných dolech a uranová ruda je zpracovávána hydrometalurgicky v úpravně rud. V některých lokalitách jsou hydrometalurgické metody aplikovány již přímo v geologické formaci a v tomto případě hovoříme o tzv. podzemním loužení. K loužení se používají silně kyselé roztoky a jejich hlavní součástí je kyselina sírová H₂SO₄ ve směsi s kyselinou dusičnou HNO₃, někdy jsou použity alkalické roztoky, kde hlavní složku představují karbonáty. Z roztoku je za pomoci extrakce nebo sorpce na ionoměničích izolován uran, který se sráží jako uranový koncentrát, nejčastěji diuranát amonný (tzv. žlutý koláč).[9]

Nesmíme však zapomínat na to, že nedochází jen k rozpouštění a mobilizaci uranu, který je pak separován, ale také k mobilizaci doprovodných prvků.

Hlušiny a odvaly z dolů jsou skladovány na haldách v blízkosti místa těžby a jsou částečně používány ve stavebnictví nebo jako sanační materiál při uzavírání dolů. Po loužení rud vzniká velké množství rozrušených hornin a kontaminovaných vod s vysokou solností. Tyto látky se skladují v odkalištích, která se převrstvují zeminou nebo jsou překrývána nepropustnou folií. Vlivem dešťů průtokem podzemních vod vznikají také kontaminované podzemní vody. Tyto vody se udržují v podzemí nebo jsou vyčerpány na povrch, kde dochází k jejich odsolení a chemické sloučeniny jsou uloženy do odkališť nebo se dále recyklují.

Výroba jaderného paliva

V úpravně uranové rudy se získá koncentrát, který se dále rafinuje ve výrobně paliva. Tzn. jeho rozpuštění v kyselině dusičné, dále se oddělí uran extrakcí od nečistot a nakonec je převeden na oxid. Následujícím krokem je přeměna na hexafluorid uranu, dále v kaskádě centrifug dojde k obohacení a redukce na dioxid uranu, z něj jsou vyrobeny peletky paliva. Při výrobě vznikají různé druhy pevných a kapalných RAO, které jsou kontaminovány nízkými aktivitami uranu a jejich množství záleží na použité technologii.

Provoz jaderných reaktorů

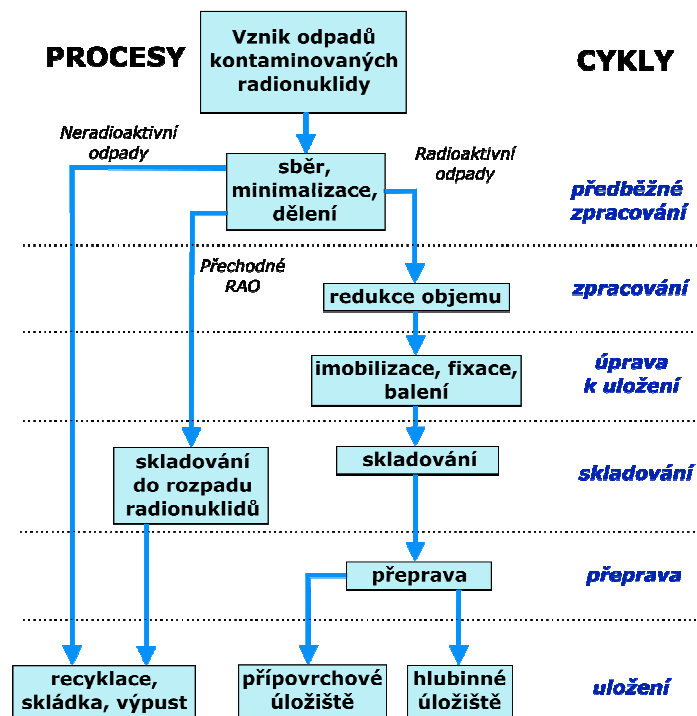
Z každého typu reaktoru jsou různé RAO co do skupenství a chemických a radiochemických vlastností. Zabýváme se tlakovodním reaktorem, který je používán na českých JE. RAO z těchto reaktorů vznikají při plánovaných i neplánovaných odpouštěních chladiva z primárního okruhu, z ventilačních systémů, ze stanic pro čištění chladicí vody, z radiochemických laboratoří, kde je kontrolován chod reaktoru, při opravách a výměnách technologických zařízení, při výměně paliva a prádelnách určených k čištění pracovních oděvů. Aktivita těchto odpadů je obvykle nízká, výjimku tvoří kaly a iontoměniče, které dosahují střední aktivity a části primárního okruhu (regulační tyče), které jsou považovány za vysoce aktivní.

Tab.1.4 Typická množství RAOv jednotlivých etapách JPC vztažená na jednotkovou produkci elektrické energie v JE [9]

STÁDIUM PALIVOVÉHO CYKLU	TYP ODPADU	OBEJM V m ³ /GWROK
Přední část palivového cyklu		
Konverze na hexafluorid	Pevný, kapalný	30-70
Obohacení	Pevný, kapalný, plynný	15-40
Výroba dioxidu uranu	Pevný, kapalný	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 proutků	pevný	12-20
Tritiové výpusti	kapalný	50-70
VAO	Kapalný	20-30
SAO	Kapalný	15-30
NAO	Pevný, kapalný	50-100
- Přímé uložení		
Palivové články	Pevný	30t těžkého kovu
- Vyřazování z provozu		
Výroba paliva (celé zařízení)	Pevný	5-10
Jaderný reaktor (celé zařízení)	Pevný	300-500
Přepřacování paliva (celé zařízení)	Pevný	5-20

2 Nakládání s RAO z jaderných elektráren

S každým RAO musí být zacházeno tak, aby nedošlo ke znečištění životního prostředí nebo ohrožení obyvatelstva. To upravuje řada legislativních opatření. K nakládání s RAO však musíme nahlížet i z pohledu ekonomického a technického. Snažíme se o co nejmenší počet operací spojený s nakládáním s RAO, jejich komplexnější využití a o plánování strategie minimalizace RAO přímo u zdroje (snaha o co nejmenší produkci RAO samotného jaderného zařízení). Z toho plyne finanční a časová úspora. Nakonec však musí být zbylé RAO zpracovány a pokud se nedají dále využít, je nutné je uložit podle požadovaného postupu pro jednotlivé druhy odpadů viz obr. 2.1.



Obr.2.1 Cyklus nakládání s RAO [2]

2.1 Bezpečnostní hlediska při nakládání s RAO

Na nakládání s RAO lze pohlížet podle devíti základních hledisek, která by měla být dodržena, aby nedocházelo k nežádoucím projevům nakládání s RAO.

Ochrana zdraví – musí být zaručena dostatečná ochrana obyvatelstva

Ochrana životního prostředí – musí být zaručena dostatečná ochrana životního prostředí

Ochrana v nadnárodním měřítku – musí být brán ohledat na dopady na životní prostředí a obyvatelstvo za hranicemi státu

Ochrana budoucích generací – musí být zaručeno, aby míra dopadu na budoucí generace nebyla větší než dopad na obyvatelstvo v současnosti

Zajištění budoucích generací – s RAO je nakládáno tak, aby nebylo přenášeno zatížení na budoucí generace

Národní právní rámec – s RAO je nakládáno podle národních právních nařízení včetně přesně definované odpovědnosti a existence nezávislého dozoru

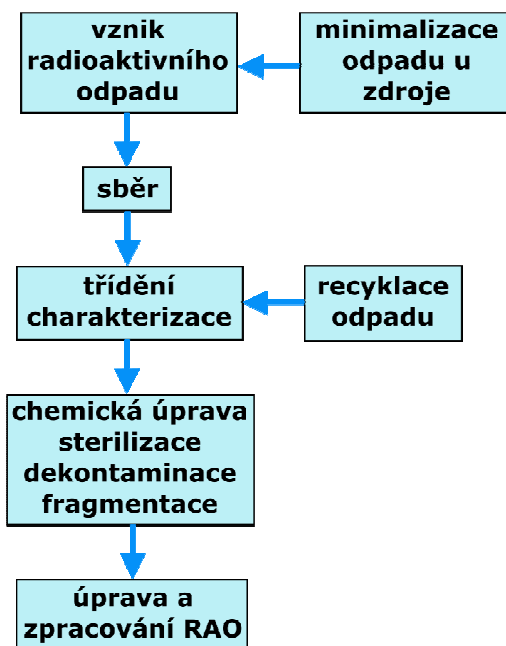
Omezení vzniku RAO – vznik RAO je udržován na praktickém minimu

Vztahy mezi vznikem RAO a nakládání s nimi – tyto vztahy by měly být vhodně zohledněny

Bezpečnost zařízení – zařízení je zabezpečeno vhodným způsobem po celou dobu jeho provozu

2.2 Nakládání s RAO před jejich zpracováním

Cílem nakládání s RAO je co nejvíce snížit konečný objem odpadů určených ke konečnému uložení a ty co neefektivněji připravit k procesu ukládání.



Obr.2.2 Nakládání s RAO před zpracováním a vazby na jiné etapy [2]

2.2.1 Minimalizace odpadů u zdroje

Minimalizace odpadů u zdroje je nejvýznamnějším strategickým přístupem díky svým malým nákladům a velké efektivitě. V praxi se musí brát ohled na tento faktor již při výstavbě zařízení (zbytečně nevnášet do zařízení předměty, které by mohly být kontaminovány). U JE je tento faktor velmi důležitý, neboť použitím vhodných konstrukčních materiálů je možné snížit množství odpadů, které vzniknou po vyřazení jaderného zařízení z provozu. Snížení dosáhneme výběrem konstrukčních materiálů pro aktivní zónu s co nejnižším obsahem niklu, uhlíku nebo europia.

Vhodně zvoleným povrchem materiálů, které jsou v kontaktu s radionuklidy lze výrazně snížit množství dekontaminačních roztoků.

2.2.2 Shromažďování RAO

Cílem shromažďování RAO je sbírat předměty, látky a materiály, které byly vystaveny kontaminaci radionuklidy, nejsou dále využitelné a mohou představovat riziko pro obyvatelstvo, pracovníky a životní prostředí.

V jaderných elektrárnách jsou kapalné RAO nejčastěji shromažďovány v uzavřených nerezových nádržích, mezi kterými je možno kapaliny vzájemně přečerpávat. Pokud dojde k úniku z jedné z nádrží, je možno přečerpat obsah vadné nádrže do nádrže rezervní.

2.2.3 Třídění a charakterizace RAO

Nejdůležitějším úkolem je oddělit neaktivní materiály od aktivních, rozdělit aktivní materiály do jednotlivých kategorií a určit předměty, které budou poslány na dekontaminaci respektive recyklaci.

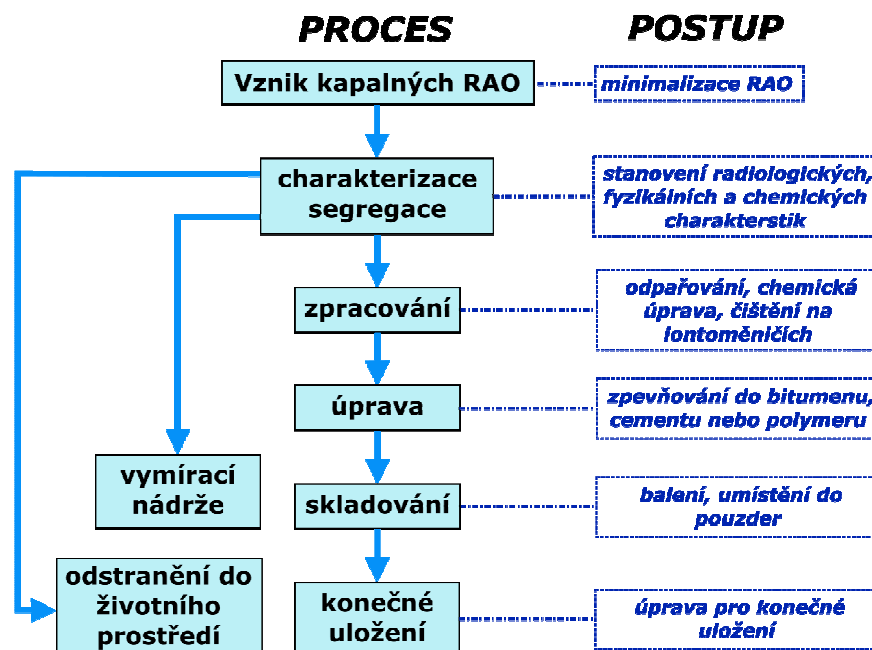
Pokud je materiál označen za radioaktivní, je nutné o něm zjistit co nejvíce informací (míra radioaktivity, mechanické, chemické, fyzikální, tepelné a biologické vlastnosti), aby bylo možné ho charakterizovat a rozhodnout, jaký bude další proces nakládání.

2.3 Zpracování RAO

Úkolem zpracování RAO je odstranění radionuklidů z odpadu, redukce objemu odpadu, popřípadě i změna složení, pokud se tím usnadní jejich následná úprava. Některé odpady však úpravu nepotřebují a jsou uskladněny nebo uloženy v původním stavu, jako například kovové části technologických zařízení.

2.3.1 Kapalně RAO

Podle solnosti roztoku a případného množství pevných látek se používají různé metody redukce objemu. V případě odpadů s vyšším množstvím pevných i rozpustných látek se provádí odpařování, chemická úprava a extrakce a v případě málo solných odpadů se provádí iontová výměna, membránové metody a další méně používané metody (ultrafiltrace, elektrochemické procesy).

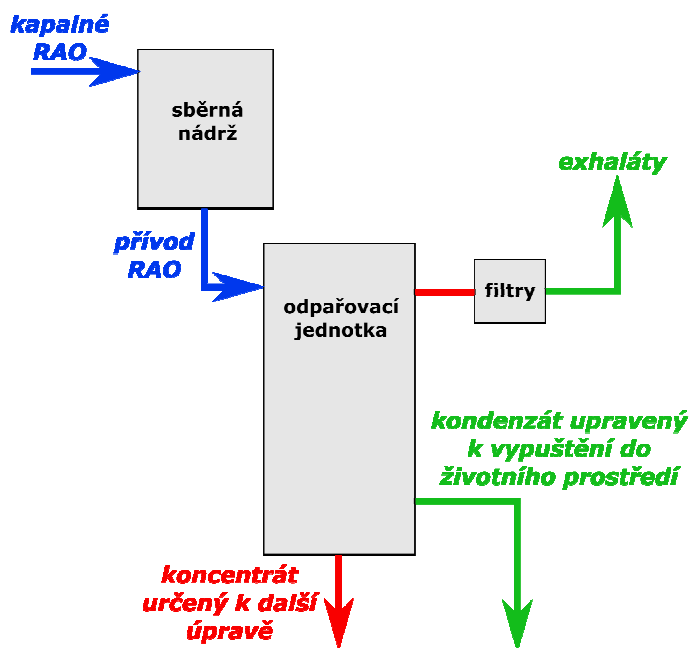


Obr.2.3 Schéma zpracování kapalných RAO [2]

Nejběžnější metody zpracování kapalných RAO jsou následující:

Odpařování

Záporem metody odpařování je její energetická náročnost, ale ten je vyvážen univerzálností procesu a jeho vysokým dekontaminačním faktorem a faktorem objemové redukce. Další výhodou je, že výsledný kondenzát může být vypuštěn přímo do životního prostředí nebo je do procesu ještě zařazena iontová výměna. Díky jednoduchosti je celý proces dobře zvládnán a propracován. Nejčastěji se používají filmové rotorové a kotlové odparky různých konstrukcí. Při odpařování může vznikat pěna, která celý proces znehodnocuje a také může docházet k úniku těkavých radionuklidů (tritium, jód, ruthenium). Aby nedocházelo k nepřiměřené korozi, jsou nástříky chemicky upravovány, protože vlivem vysoké teploty se koroze kovových materiálů urychluje. Výstupním odpadem je koncentrát, který může mít solnost až 600g/l, nejčastější hodnota se však pohybuje kolem 200g/l.



Obr.2.4 Zjednodušené schéma odpařování kapalných RAO [16]

Jedním z dalších článků odpařování je tzv. kalcinace. K té dochází, zvýší-li se teplota odpařování nad hodnotu 300°C a RAO jsou odpařeny do sucha. A pokud se teplota pohybuje od 600-800°C, dochází k superkalcinaci a sole obsažené v odpadech se termicky rozkládají a pokud jsou přidána aditiva, dochází i k rozkladu chemickému. Takto získaný odpad se dále upravuje zpevňováním za pomoci vhodného ztužidla, či je taven nebo spékán.

Chemická úprava

Jedná se o méně nákladný proces než v případě odpařování, ale dekontaminační faktor je o několik řádů nižší. Principem je srážení, popř. spolusrážení určitých složek roztoku. Použitím vhodné chemikálie je možno selektivně zachycovat radioaktivní kontaminanty a také převést chemické složky, které nepříznivě ovlivňují další části procesu na inertní formu (např. kyselina boritá, která zabraňuje tvrdnutí cementu, se za pomoci vápna převede na málo rozpustný boritan vápenatý).

Díky zvládnutí celého procesu je možné zpracovávat velké objemy kalů a solných roztoků za normálních teplot a je možno tento způsob úpravy uplatnit před opařováním popř. před iontoměniči.

Chemikálie jsou smíseny s kontaminovanou vodou v mixérech. Radioaktivní složky roztoku se vločkují nebo vytváří sedimentující sraženiny, které jsou následně odstraněny. Zařízení jsou často podobná nebo stejná jako zařízení z vodohospodářské praxe.

Iontová výměna

Iontová výměna je jeden z dalších nejpoužívanějších procesů zpracování kapalných RAO a postupem času se stal průmyslově dobře zvládnutelný a efektivní. Používá se zejména v primárním okruhu jaderných elektráren pro odstranění aktivních částic, ale také k odstranění částic nepříznivě ovlivňujících technologii [17].

Jde o výměnu volných iontů v roztoku za ionty elektrostaticky vázané do funkčních skupin v pevné matici. Pokud je funkční skupina negativně nabitá, výměna bude obsahovat kationty. A v případě kladného nabití bude obsahovat anionty. Z toho vyplývá, že některé iontoměniče mají lepší afinitu pro určité ionty. Jako příklad lze uvést H formu katexu, který uvolní iont vodíku do roztoku a z roztoku přijme iont cesia podle následující rovnice:



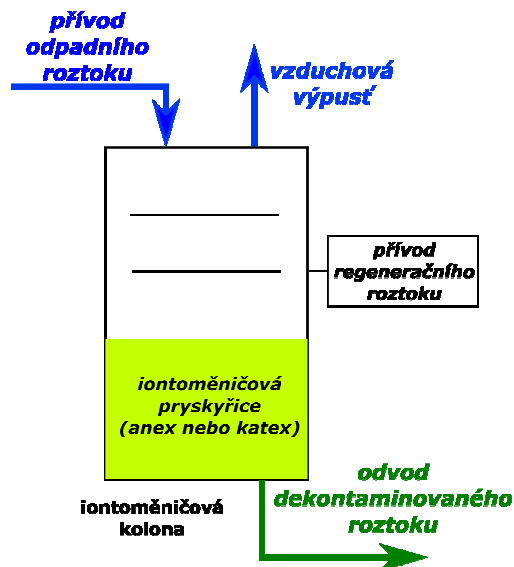
kde R reprezentuje nerozpustnou matici iontoměničové pryskyřice. Iontoměnič je nejčastěji dodáván ve formě malých kuliček (viz příloha A) [17].

Z iontoměniče jsou následně kontaminanty desorbovány a vzniklý eluát se dále upravuje podle stejného postupu jako koncentrované kapalné odpady. Pokud je již iontoměnič vysycen, je upravován obdobným způsobem jako koncentrát [17].

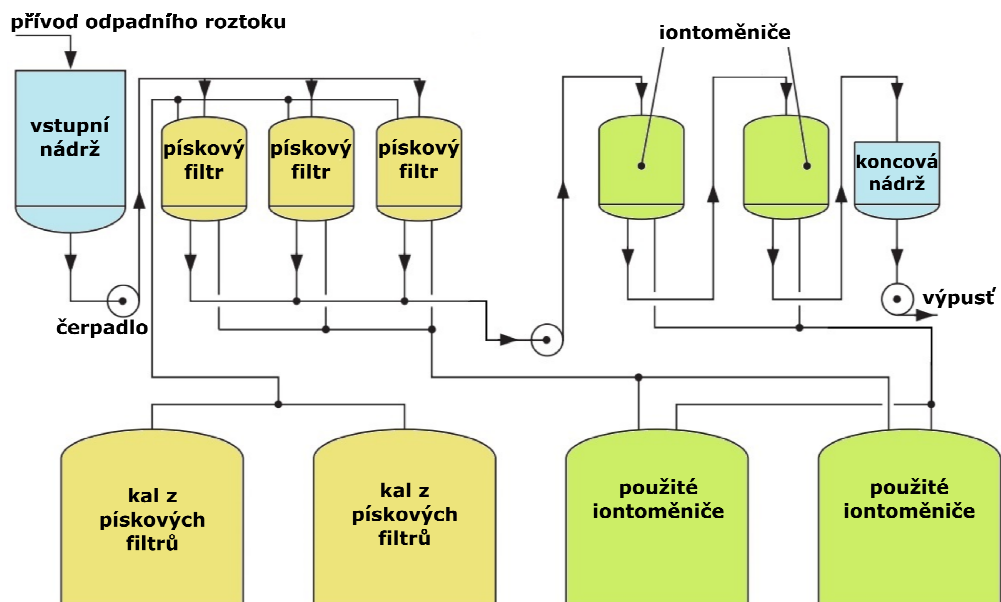
V základu lze rozdělit látky na organické pryskyřice, které mají větší účinnost, ale obtížněji se upravují k uložení a na anorganické sorbenty, které jsou odolnější vůči ionizujícímu záření a působí selektivněji. Výběr iontoměničů a sorbentů je rozsáhlý a

dekontaminační faktor může dosahovat hodnot 10^4 . Problém však nastává, pokud má zpracovávaný roztok příliš velkou solnost, protože dochází ke konkurenčním záchytům neaktivních složek a to již při solnostech nad 1g/l. Problémem jsou také přítomnosti koloidů a chelátů, které se nesorbují a pevné částice, zanášející iontoměničovou kolonu. Proto se do systému někdy přidávají předřadné filtry pro filtraci pevných nečistot (viz obr.2.6) [17].

Schéma iontoměničové kolony je znázorněno na obr.2.5.



Obr.2.5 Schéma iontoměničové kolony



Obr.2.6 Zjednodušené schéma zařízení pro iontovou výměnu včetně vstupních filtrů [17]

Každý z iontoměničů má jiné parametry a chová se odlišně za různých podmínek (chemické složení, teplota, míra záření atd.). Proto je velmi nutné zvolit iontoměnič tak, aby

co nejlépe vyhovoval a nepodléhal předčasně zkáze. Vlastnosti iontoměníčů jsou popsány v následující tabulce.

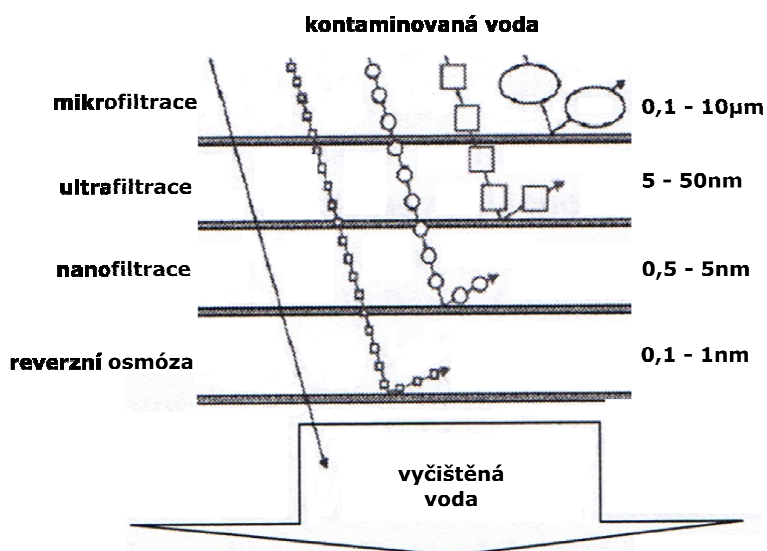
Tab.2.1 Vlastnosti organických a anorganických iontoměníčů [17]

VLASTNOST	ORGANICKÝ MĚNIČ	ANORGANICKÝ MĚNIČ	KOMENTÁŘ
Teplotní stabilita	Spíše slabá	Dobrá	Anorganické jsou zvláště dobré
Chemická stabilita	Dobrá	Spíše dobrá	Specifické organické a anorganické jsou použitelné pro větší rozsah pH
Radiační stabilita	Spíše slabá	Dobrá	Organické jsou velmi slabé při kombinaci vysoké teploty a kyslíku
Regenerace	Dobrá	Nejistá	Většina anorganických měničů fungují na bázi sorpce a regeneračními limity
Mechanická pevnost	Dobrá	Proměnlivá	Anorganické měniče mohou být křehké nebo měkké nebo se mohou rozkládat při překročení rozsahu pH
Náklady	Střední až vysoké	Nízké až vysoké	Většina anorganických jsou levnější než organické
Dostupnost	Dobrá	Dobrá	Oba typy jsou snadno k dostání
Imobilizace	Dobrá	Dobrá	Anorganické mohou být převedeny do odpovídající minerální struktury a organické mohou být imobilizovány v matici nebo spáleny
Nakládání	Dobré	Uspokojivé	Organické jsou odolné kuličky, anorganické jsou křehké
Použitelnost	Dobrá	Dobrá	Díky kuličkové formě jsou oba druhy snadno použitelné

Mezi nejpoužívanější iontoměníče se řadí přírodní anorganické (např. aluminosilikáty), přírodní organické, modifikované přírodní organické (např. celulóza přidáním některé kyselinové funkční skupiny), syntetické anorganické (např. zeolity, titaničitiny), syntetické organické (polystyren divinylbenzenem, fenol, akryl) [17].

Membránová metoda

Membránová metoda obsahuje mikro, ultra a nano filtry a speciální membránu pro reverzní osmózu. Na každý filtr je přiváděna kapalina k čištění pod tlakem zvyšujícím se pro každý filtr. Každý z filtrů zachycuje menší částice než předchozí (viz obr.), až dojde prakticky k úplnému vyčištění. Filtry se regenerují zpětným promytím.



Obr.2.7 Membránová metoda [20]

2.3.2 Pevné RAO

Pevné odpady z jaderných elektráren a jaderných zařízení s nimi spojenými jsou nejčastěji zpracovávány mechanicky (lisování, lisování za tepla, fragmentace, peletování) nebo termicky (spalování, tavení kovů a plastů). Cílem těchto metod je co největší zmenšení objemu původního RAO.

Tab.2.2 Aplikace mechanických metod na různé odpady [8]

ODPAD	NTL	VTL	HORKÉ LISOVÁNÍ	PELETOVÁNÍ
Suchý odpad (papír, plast, atd.)	●	●		●
Lehký kovový odpad		●		
Masivní kovový odpad		●		
Popel ze spalovny		●		
Iontoměničové pryskyčice		●	●	●
Dřevo		●		
Beton		●		
Sklo (žárovky, lab. sklo)	●	●		
Půda/Písek		●		
Mokrý odpady			●	●
Vzduchové filtry	●	●		
Tepelné izolanty	●	●		

Lisování

Technologie lisování je kategorizována podle velikosti tlaku aplikovaného na slisování odpadu, kde je hlavním faktorem redukce objemu. FRO je určován jako poměr původního objemu k objemu slisovanému odpadu.

Nízkotlaké lisování (NTL)

Nízkotlaké lisování je nejpoužívanější technologií mechanického zpracování pevných RAO, které by k tomuto účelu byly vhodné (viz Příloha B). Obvykle je síla aplikovaná na slisování menší než 5MN (500tun), velké množství aplikací však využívá sílu okolo 0,5MN (50tun) pro 200l sudy. Nízkotlaké lisování se tedy používá pro kompresi měkkých, snadno lisovatelných, nízko aktivních RAO [8].

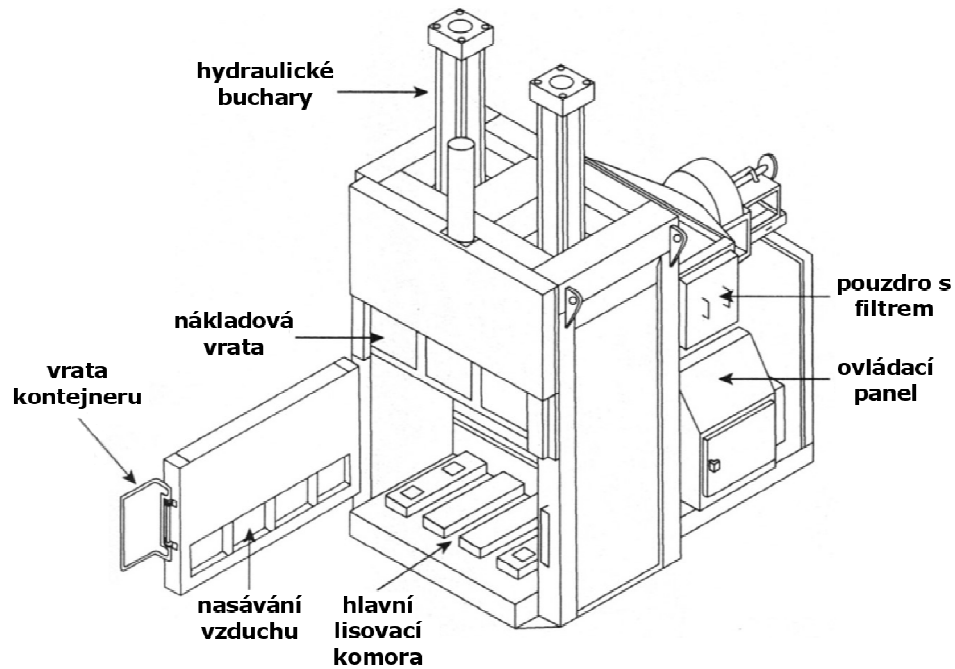
Nízkotlaké lisování se rozlišuje na 3 základní typy:

- Lisování v sudech
- Lisování v boxech
- Slisování do kostky

Nejpoužívanější je lisování v sudech. Do sudu o objemu 200l je umístěn odpad určený k slisování a následně je sud umístěn do lisu. Hydraulický píst, který má koncovku pasující do sudu, stlačí odpad. Po stlačení první várky se přidá další odpad a celý proces se opakuje, dokud není sud plný. NTL se někdy používá i před procesem vysokotlakého lisování, aby se ušetřil počet sudů, které jsou následně sešrotovány i s odpadem ve vysokotlakém lisu [8].

Způsob lisování odpadů v boxech (viz obr. 2.8) je prakticky stejný jako způsob lisování do sudů. Místo ocelového sudu je použit ocelový box o objemu 2,5m³ a síla je 2 až 5MN (200 až 500tun). Boxy jsou využívány zejména pro objemné odpady a jejich konečné uložení je efektivnější díky jejich pravidelnému hranatému tvaru [8].

Slisování do kostky je odlišné od prvních dvou způsobů, protože odpad je naskládán do krychlového lisu a následně slisován do tvaru krychle bez použití sudu nebo boxu. Výsledné kostky jsou zabaleny do plastových pytlů nebo kartonových krabic a pro lepší zachování struktury slisované krychle jsou převázány plastovými nebo kovovými pásky. Tuto metodu však vytlačují předchozí dvě metody a používá se spíše pro redukci objemu u neradioaktivních odpadů [8].



Obr.2.8 Lisování odpadu v boxu [8]

Vysokotlaké lisování (VTL)

Metoda vysokotlakého lisování se používá zhruba v padesáti zařízeních na zpracování RAO na celém světě. Jedná se o mechanickou metodu redukce objemu, při které je sud nebo box naplněn odpadem a poté se naplněný sud nebo box slisuje pomocí hydraulického lisu o síle 10-50MN (1000-5000tun) nebo větší. Tato síla je dostatečná pro sešrotování sudu včetně jeho obsahu (ocelové konstrukce, trubky, ventily, betonové bloky, dřevo, plasty, papír atd.). Výsledný puk je vložen do kontejneru nebo je přebalen. Vysokotlaké lisování je také někdy používáno pro lisování popela ze spalovny nebo použitých iontoměničových pryskyřic. FRO je však menší než 2 [8].

Horké lisování

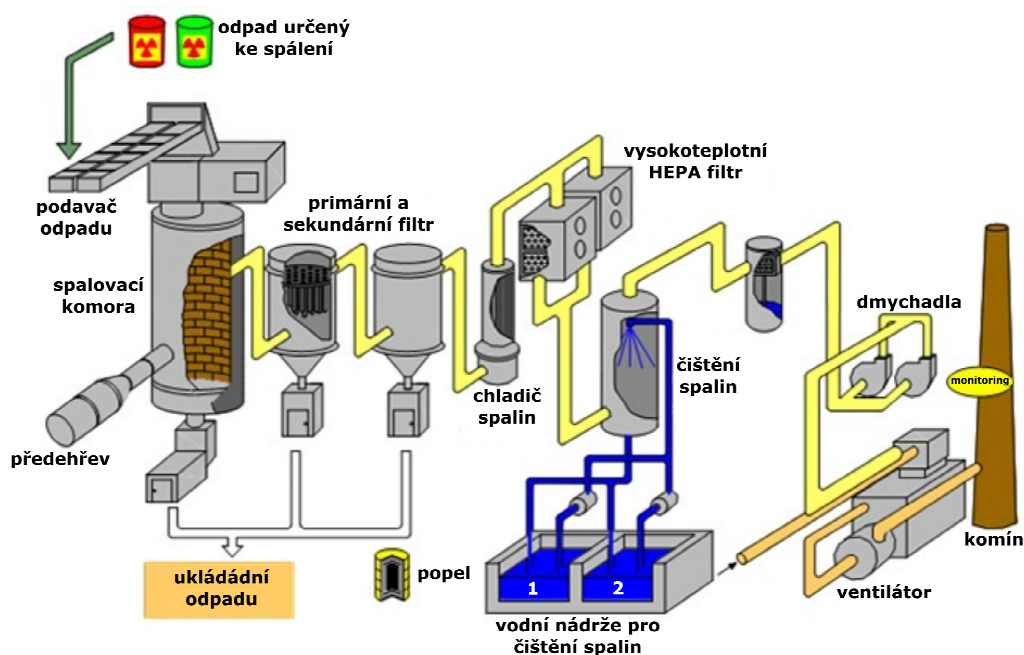
Proces horkého lisování se používá zejména pro lisování mokrych odpadů jako například iontoměničové pryskyřice. Nejprve je pryskyřice vysušena na požadovanou míru vlhkosti a následně se umístí do sudu a pošle ke slisování. Výsledný produkt je umístěn do vodotěsného kontejneru, aby se zabránilo případné rehydrataci odpadu [8].

Peletování

Metoda peletování je vhodná zejména pro mokré RAO jako jsou iontoměniče, kaly atd. Při této metodě je surový odpad vysušen do práškové formy a slisován ve formě. Výlisek je následně rozsekán nebo nakrájen na malé kousky [8].

Spalování

Jedná se o velmi účinnou metodu redukce objemu dosahující hodnot mezi 80 až 150. Vyžaduje však vysoké investiční a provozní náklady a náročnou obsluhu. Při spalování se dosahuje teplot 800-1000°C. Odpad se před zavezením do spalovací komory třídí a pokud možno rozdrťí na malé kousky většinou za použití drtiče. Výsledným produktem je primárně popel, ale při procesu vznikají také kapalné odpady (vypírací vody z čištění plynů) a vzduchotechnické filtry. Popel je většinou vsypán do sudů a poslán k dalšímu zpracování. Na obrázku 2.8 je schematicky znázorněno zařízení na spalování pevných RAO V Japonsku [18].

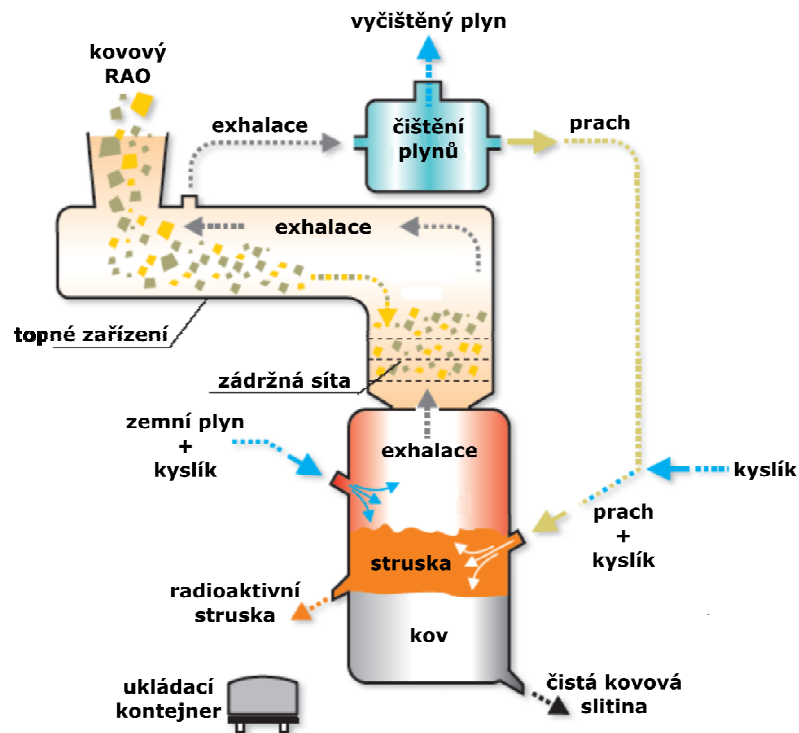


Obr.2.9 Schéma spalování pevných odpadů (Japonsko) [18]

Tavení

Při tavení kovů a plastů se dá značně zmenšit jejich objem a také se zabuduje značná část kontaminantů do struktury vytaveného materiálu. Pokud je však zvolen vhodný postup tavení, je možné kov dekontaminovat a radionuklidy se zachytí ve strusce. Ingot dekontaminovaného materiálu je změřen a je rozhodnuto o jeho případném uvolnění. [19]

U zařízení na dekontaminaci kovu se nejdříve odpad předeheře kvůli snížení energetické náročnosti a zvýšení kapacity. Kovový RAO se taví v lázni tekutého kovu v oxidačním prostředí, což urychluje tavení, zlepšuje dekontaminaci a redukuje tvorbu prachu. Pro odstranění radionuklidů je trvale udržována vrstva strusky (2-3% hmotnosti kovu). Ta je průběžně odváděna a roztavený kov se vypouští a vytváří se z něj ingot. Exhalace obsahující radionuklidy jsou zachytávány a čištěny a vzniklý prach se vpravuje do roztavené strusky. Schéma systému je znázorněno na obrázku 2.9 [19].



Obr.2.10 Schéma dekontaminace kovových RAO [19]

2.4 Úprava RAO

Posledním krokem před uložením je úprava RAO. Odpady musí splňovat podmínky pro jejich konečné uložení. Kapalné a pevné odpady je nutno zpevnit (imobilizovat) a umístit do obalu, pokud nebyly vhodně upraveny již v předchozím kroku. Surový odpad se smíchá se ztužidlem a vytvoří tak pevnou a stabilní formu. To umožňuje lepší manipulaci s RAO a snižuje šanci na kontaminaci životního prostředí radionuklidy. Pevné odpady jsou nejčastěji umístěny do odpovídajícího obalu a zality betonem. Kapalné odpady (iontoměniče, kaly, koncentráty) je nutno zpevnit a to pomocí bitumenu, cementu nebo polymeru. Pro úpravu vysoce aktivních odpadů se používá metoda vitrifikace nebo sintrace.

Ztužidlo musí splňovat náročné podmínky na bezpečné ukládání odpadů. Mezi nejdůležitější patří:

- Dostatečně silná vazba ztužidla a radionuklidů + chemických látek (nesmí docházet k vyluhovatelnosti vodou a degradačním procesům)
- Dlouhodobě stabilní chemické a fyzikální vlastnosti
- Minimální narušování ostatních prvků úložného systému
- Minimální tvorba plynů
- Dostatečná radiační a mechanická odolnost

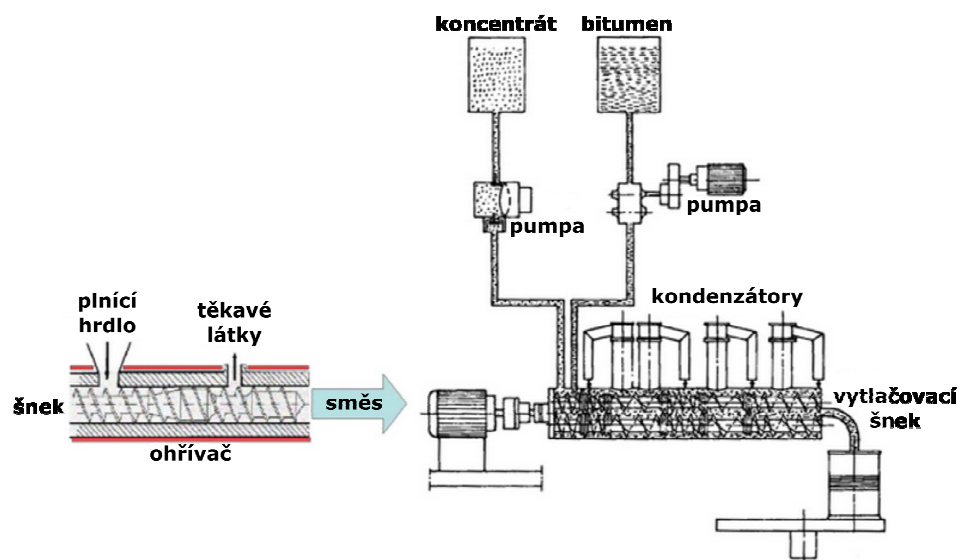
Bitumenace

Základní myšlenkou celého procesu bitumenace je přidání RAO do roztaveného bitumenu, odpaření zbývající vody, zafixovat koncentrát v bitumenu a výsledný produkt nadávkovat nejčastěji do 200l ocelových sudů. Zahřívání bitumen a koncentrát se mísí nejčastěji v rotorové filmové odparce (viz obr.2.12) nebo v extrudéru se šnekovým míšičem (viz obr.2.11).[20]

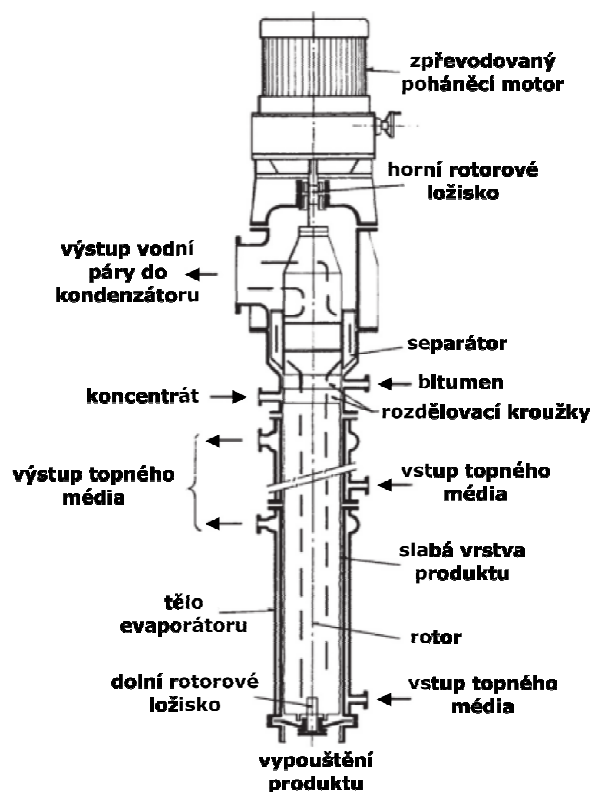
V případě extrudéru se šnekovým míšičem se plnicím hrdlem zavede směs bitumenu a koncentrátu do zahřívání šnekového míšiče na teplotu 160-200°C, kde se obě hmoty mísí a odpařuje se přebytečná voda. Odpařená voda se zkondenzuje, a pokud vyhovuje kontrole, je možné ji vypustit. Směs bitumenu a kondenzátu se zpravidla dávkuje do 200l ocelových sudů.

U rotorové filmové odparky je bitumen a koncentrát zaveden vstupy na horní části do zahřívání odparky na 160-200°C vnějším médiem. Odpařená voda je zkondenzována, a pokud vyhoví kontrole, je vypuštěna. Výsledný bitumenový produkt vytéká ze spodní části odparky do 200l sudů. [20]

Bitumen má několik variant a ty vznikají různými způsoby. Přímý destilovaný bitumen je zbytek z destilace ropy, zatímco oxidovaný bitumen je vytvořený procházejícím vzduchem skrze ropné zbytky. Další metoda tvorby bitumenu je teplotním rozpadem těžkých olejových frakcí v rafinačním průmyslu. Bitumenová emulze vzniká přímým injektováním bitumenu do vody. Nejdůležitějšími charakteristikami bitumenu jsou penetrace, bod měknutí a bod vzplanutí. [20]



Obr.2.11 Extrudér se šnekovým míšičem [20]



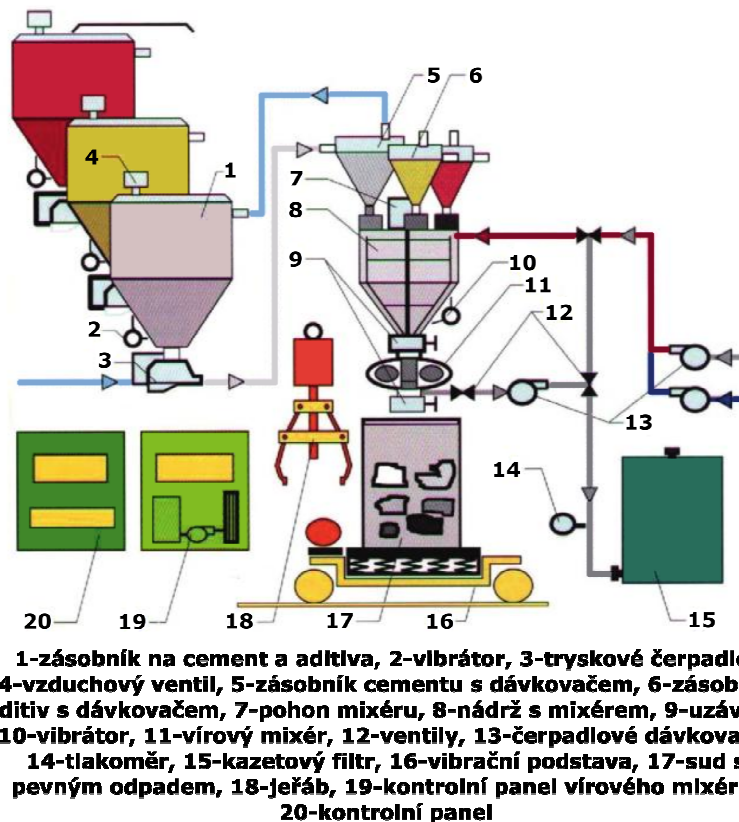
Obr.2.12 Rotorová filmová odparka [20]

Cementace

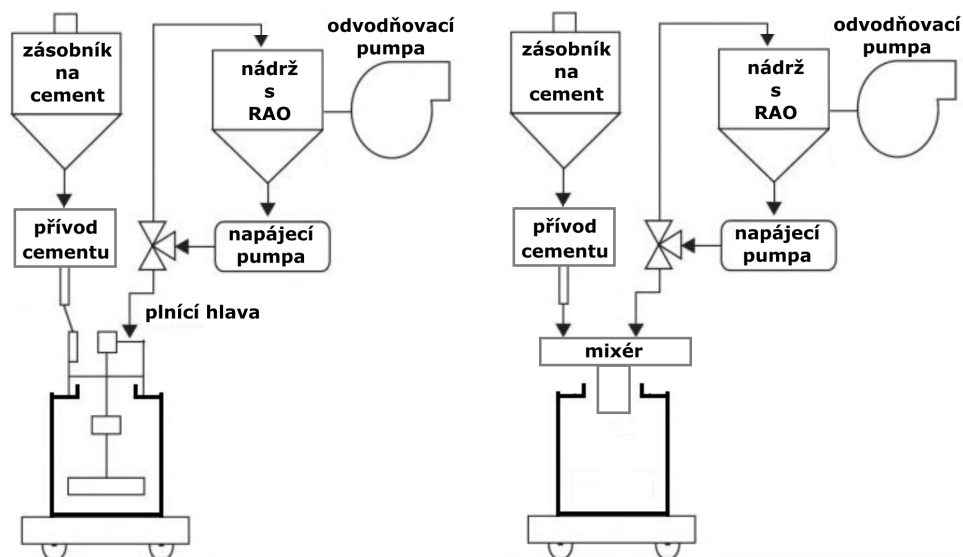
Cementace RAO je léty prověřená technologie splňující podmínky pro úpravu odpadů. Cementy jsou anorganické materiály, které mají schopnost reagovat s vodou za okolních podmínek a vytvářejí tvrdý a voděodolný produkt. Místo vody se však používá radioaktivní koncentrát. Po zatvrdnutí je odpad uzavřen ve struktuře a z části se podílí na jeho struktuře. Většina cementů je založena na bázi křemičitanu vápenatého, jako je Portlandský cement.

Právě Portlandský cement je nejpoužívanější pro imobilizaci kapalných a mokrých odpadů. Obsahuje směs oxidů kovů alkalických zemin vápníku, dále pak oxidy křemíku a hliníku. Portlandský cement a jemu podobné materiály jsou vyráběny pálením vápence (zdroj vápníku) s jílem nebo s pískem (zdroj křemíku), čímž vzniká slínek, ke kterému se v procesu mletí přidává sádrovec jako regulátor tuhnutí. Výsledný prášek po smísení s vodou začne hydratovat a tím tuhne [23]. Složení odpadů, zejména chemické vlastnosti mohou narušovat proces hydratace cementu, a proto se přidávají aditiva. Přidávány jsou i látky zvyšující tekutost směsi, rychlost tuhnutí a látky pro snížení porozity. [20]

Pevné odpady se zalévají v sudu cementovou směsí, která je předem namíchána v mixéru spolu s aditivem. Směs je následně nalita do sudu s odpadem a nechá se zatuhnout (viz obr.2.13). Kapalně a mokré odpady jsou míseny s cementovou směsí nejčastěji třemi způsoby. V prvním případě se do prázdného sudu nadávkuje zvlášť cementová směs a odpad, poté se do směsi zavede míchací stroj a celou směs dostatečně promíchá (viz obr.2.14). Druhý způsob je podobný prvnímu, jen je směs míchána v mixéru a následně nalita do sudu (viz obr.2.14). Třetí možnost není tak rozšířená jako dvě předchozí a spočívá v nadávkování suchého cementu a odpadu do bubnu, který je uzavřen. Buben je upevněn do stroje a funguje jako bubnová míchačka. Smíchaná směs je následně určena k uložení. [22]



Obr.2.13 Schéma cementačního zařízení [20]



Obr.2.14 Cementační zařízení s mícháním směsi uvnitř sudu (vlevo) a mícháním směsi v mixéru (vpravo) [22]

Polymerace

Mezi nejpoužívanější polymery se řadí polyestery, vynilestery a epoxidy. Používají se zejména pro zpevňování iontoměničových pryskyřic. Odpad se smíchá s polymerem a je v něm mechanicky uzavřen, ale nepodílí se na jeho struktuře. Mezi další možnosti se řadí použití geopolymérů, založená na reakci aluminosilikátů za tvorby struktur tvořených z křemíkových tetraedrů a hliníku. [2]

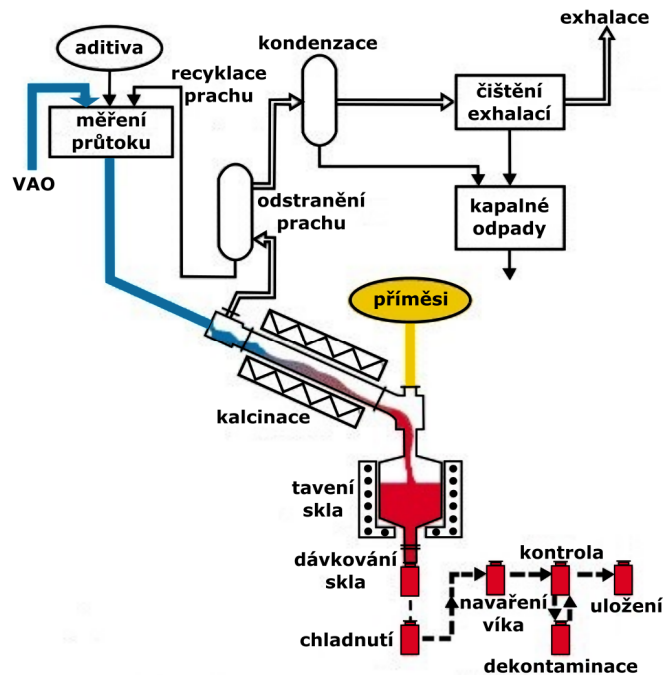
Pro mísení RAO se používají mísiče a hnětače s extrudéry, které se používají v chemickém průmyslu.

Vitrifikace

Vitrifikace splňuje náročné požadavky na imobilizaci vysoce aktivních RAO. V principu jde o uzavření vysoce aktivních látek uvnitř skleněné matrice. VAO se mísí se sklotvornými látkami (sole bóru, fosforu a alkalických kovů), poté se zahřívají na teplotu 900-1500°C, přičemž se vytvoří tavenina. Vychladlá tavenina obsahuje chemicky vázané a mechanicky zabudované oxidy radionuklidů a neaktivní sole z původního VAO. Poměr jednotlivých složek sklářského kmene se může podstatně lišit, díky různým chemickým vlastnostem imobilizovaného odpadu. [20]

Pro vitrifikaci VAO se nejvíce osvědčila borosilikátová skla. Je však nutné podotknout, že výběr vhodného je ovlivněn vlastnostmi imobilizovaného odpadu a metodou zpracování. [20]

Princip vitrifikace je znázorněn na obr.2.15. VAO je nejprve smísen s aditivy, následně je kalcinován a poté se produkt roztaví v peci s elektrickým odporovým ohřevem nebo v indukčním středofrekvenčním či vysokofrekvenčním zařízení. Tavenina se nadávkuje do nerezových kontejnerů. Ty se nechají vychladnout, navaří se na ně víko, zkontrolují a dekontaminují. Celé zařízení je vybaveno účinným systémem odvodu exhalací, který zahrnuje záchyt těkavých radionuklidů a úletů a kondenzaci vody. [20]



Obr. 2.15 Schéma zařízení na vitrifikaci VAO [24]

2.5 Uložení RAO z JE v ČR

Vysoce aktivní odpady z JE v ČR se ukládají metodou suchého skladování v areálech jaderných elektráren. Použité jaderné palivo je z bazénu skladování paliva přeloženo do obalového souboru (Castoru) a ten je umístěn do meziskladu vyhořelého paliva. Do budoucna by se mělo VJP ukládat v hlubinném úložišti.

Nízko a středně aktivní odpady z JE se po zpracování ukládají v Dukovanském úložišti. Objem tohoto úložiště je 55000m³ (180000 sudů). Úložiště tvoří 112 železobetonových jímek uspořádaných do dvou dvouřadů po 56 jímekách. Na horních hranách jímek je umístěn portálový jeřáb, který umožňuje manipulaci se sudy určenými k uložení i s betonovými panely, které jímku zakrývají. Poté, co sudy převezme Správa úložišť radioaktivního odpadu, jsou sudy vyskládány na pojízdnou rampu, odkud jsou pomocí jeřábu odvezeny nad ukládací jímku a uloženy na určené místo. Po naplnění jímky se celý prostor vylije betonem a zakryje víkem. [11]

3 Legislativa v oblasti odpadového hospodářství

Na radioaktivní odpady se vztahuje zvláštní legislativa, která upravuje manipulaci, nakládání, uskladnění a uložení RAO.

V České republice je nakládáno s RAO a použitým jaderným palivem v souladu s koncepcí, kterou schválila vláda České republiky dne 15. května 2002 (usnesení vlády č. 487/2002). Tato koncepce formuluje strategii státu a orgánů státu při nakládání s RAO.

Nejdůležitějšími právními dokumenty v oblasti nakládání s RAO je tzv. atomový zákon (popsán v další části), který je doplněn o několik nařízení vlády (viz kapitola 3.1 Vládní nařízení), několik vyhlášek SÚJB provádějících zákon č. 18/1997Sb. (viz kapitola 3.2 Prováděcí vyhlášky)² a rozhodnutí ministra průmyslu a obchodu o zřízení SÚRAO a usnesení vlády o statutu této správy.

Jelikož je většina RAO ukládána do země, je nutné se řídit i báňskými zákony, které upravují činnosti spojené s hornickou činností. Nedílnou součástí jsou zvláště v případě hlubinného úložiště.

Z kategorizace RAO plyne, že s odpady s charakteristikou OUÚ se nemusí zacházet podle zákonů a vyhlášek pro radioaktivní odpady. S těmito odpady se nakládá podle novelizovaného zákona o odpadech č. 229/2014 platného od 1.1.2015.

3.1 Vládní nařízení

Kromě Atomového zákona jako nejdůležitějšího dokumentu v oblasti RAO je nutné brát v potaz i několik dalších dokumentů, kterými jsou:

- Nařízení vlády č. 416/2002 Sb., kterým se stanoví výše odvodu a způsob jeho placení původci radioaktivních odpadů na jaderný účet a roční výše příspěvku obcím a pravidla jeho poskytování.
- Nařízení vlády č. 11/1999 Sb., o zóně havarijního plánování.
- Nařízení vlády č. 73/2009 Sb., o předávání informací v souvislosti s mezinárodní přepravou radioaktivního odpadu a vyhořelého jaderného paliva.
- Nařízení vlády č. 399/2011 Sb., o poplatcích na odbornou činnost Státního úřadu pro jadernou bezpečnost

² Všechny vyhlášky a jejich aktuální znění jsou dostupné na serveru SÚJB
<https://www.sujb.cz/legislativa/provadeci-pravni-predpisy/vyhlasiky-sujb/>

3.2 Vyhlášky provádějící zákon č. 18/1997Sb.

- Vyhláška č. 144/1997 Sb., o fyzické ochraně jaderných materiálů a jaderných zařízení a o jejich zařazování do jednotlivých kategorií.
- Vyhláška č. 146/1997 Sb., stanovující činnosti, které mají bezprostřední vliv na jadernou bezpečnost, a činnosti zvláště důležité z hlediska radiační ochrany, požadavky na kvalifikaci a odbornou přípravu, způsob ověřování zvláštní odborné způsobilosti a udělování oprávnění vybraným pracovníkům a způsob provedení schvalované dokumentace pro povolení k přípravě vybraných pracovníků.
- Vyhláška č. 215/1997 Sb., o kritériích na umístování jaderných zařízení a velmi významných zdrojů ionizujícího záření.
- Vyhláška č. 106/1998 Sb., o zajištění jaderné bezpečnosti a radiační ochrany jaderných zařízení při jejich uvádění do provozu a při jejich provozu.
- Vyhláška č. 195/1999 Sb., o požadavcích na jaderná zařízení k zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany a havarijní připravenosti.
- Vyhláška č. 324/1999 Sb., kterou se stanoví limity koncentrace a množství jaderného materiálu, na který se nevztahují ustanovení o jaderných škodách.
- Vyhláška č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně.
- Vyhláška č. 317/2002 Sb., o typovém schvalování obalových souborů pro přepravu, skladování a ukládání jaderných materiálů a radioaktivních látek, o typovém schvalování zdrojů ionizujícího záření a o přepravě jaderných materiálů a určených radioaktivních látek (o typovém schvalování a přepravě).
- Vyhláška č. 318/2002 Sb., o podrobnostech k zajištění havarijní připravenosti jaderných zařízení a pracovišť se zdroji ionizujícího záření a o požadavcích na obsah vnitřního havarijního plánu a havarijního řádu.
- Vyhláška č. 319/2002 Sb., o funkci a organizaci celostátní radiační monitorovací sítě.
- Vyhláška č. 419/2002 Sb., o osobních radiačních průkazech.
- Vyhláška č. 185/2003 Sb., o vyřazování jaderného zařízení nebo pracoviště III. nebo IV. kategorie z provozu.
- Vyhláška č. 309/2005 Sb., o zajišťování technické bezpečnosti vybraných zařízení.
- Vyhláška č. 132/2008 Sb., o systému jakosti při provádění a zajišťování činností souvisejících s využíváním jaderné energie a radiačních činností a o zabezpečování jakosti vybraných zařízení s ohledem na jejich zařazení do bezpečnostních tříd.
- Vyhláška č. 165/2009 Sb., o stanovení seznamu vybraných položek v jaderné oblasti.

- Vyhláška č. 166/2009 Sb., o stanovení seznamu položek dvojího použití v jaderné oblasti.
- Vyhláška č. 213/2010 Sb., o evidenci a kontrole jaderných materiálů a oznamování údajů požadovaných předpisy Evropských společenství.

3.3 Atomový zákon

V plném znění ZÁKON č. 18/1997Sb. ze dne 24. ledna 1997 o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů.

Tento zákon upravuje:

- způsob využívání jaderné energie a ionizujícího záření a podmínky vykonávání činností souvisejících s využíváním jaderné energie a činností vedoucích k ozáření
- systém ochrany osob a životního prostředí před nežádoucími účinky ionizujícího záření
- povinnosti při přípravě a provádění zásahů vedoucích ke snížení přírodního ozáření a ozáření v důsledku radiačních nehod
- zvláštní požadavky pro zajištění občanskoprávní odpovědnosti za škody v případě jaderných škod
- podmínky zajištění bezpečného nakládání s radioaktivními odpady
- výkon státní správy a dozoru při využívání jaderné energie, při činnostech vedoucích k ozáření a nad jadernými položkami.[1]

3.4 Připravovaná legislativa

V současnosti je připravován nový atomový zákon včetně všech prováděcích předpisů, které by měly vstoupit v platnost v letech 2015-17. Součástí prováděcích předpisů bude i nová vyhláška o nakládání s RAO, která nahradí i příslušnou hlavu vyhlášky č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně. Jedná se vesměs o implementaci Směrnice 2001/70/Euratom a vybraných dokumentů MAAE a WENRA k nakládání s RAO (dokumenty ke skladování a ukládání RAO)³

³ Dokumenty jsou dostupné na www.wenra.org a www-pub.iaea.org/books (SSR-5, GSR-5)

4 Technicko-ekonomická analýza metod zpracování a úpravy RAO

Zvolená metoda musí splňovat požadované podmínky, ale zároveň nesmí být příliš ekonomicky náročná. Pro každou metodu je zvoleno jedno konkrétní zařízení. Pořizovací a provozní náklady se samozřejmě mění s velikostí zařízení, jeho vytížením, vlastnostmi zpracovávaného odpadu a aktuální cenou jednotlivých komponent a materiálů.

4.1 Analýza zpracování RAO Odpařování

Výhody metody:

- Jednoduchost a univerzálnost procesu
- Nízké nároky na obsluhu
- Možnost zpracovávat roztoky s vysokou solností
- Vysoký dekontaminační faktor (až 10^5) a faktor objemové redukce (až 10^4)
- Kondenzát může být vypuštěn přímo do ŽP nebo dočištěn na iontoměníči

Nevýhody metody:

- Velká energetická náročnost
- Může docházet ke znehodnocování procesu tvorbou pěny a úniku těkavých látek
- Nutnost chemického úpravy nástřiku, kvůli snížení korozivity

Odpařování je jednou z nejpoužívanějších metod zpracování kapalných RAO díky své univerzálnosti a faktoru redukce objemu. Kdyby se kapalný odpad rovnou zpevňoval například cementovou směsí, bylo by potřeba mnohem větší množství nejen cementu, ale i sudů na odpad a hlavně místa na konečné uložení v úložišti. Díky odpaření je původní množství odpadu zredukováno až na 1/10000. To znamená značnou finanční úsporu na další kroky procesu.

Analýza běžně používané malé odparky

Hlavními komponenty systému jsou elektrický vyvíječ páry, odpařovací jednotka, chladič a nádrže na odpad o objemu 5000l. Součástí systému jsou také spojovací potrubí, ventily, měřicí a regulační systémy, Celý systém je instalován v zastřešené budově včetně osvětlení a ventilace.

Parametry analyzované odparky:

Množství zpracovaného odpadu:	170l/h
Teplota v odparce:	140°C
Množství přiváděné páry:	180kg/h

Energie potřebná na odpaření jedné dávky tj. 170l odpadu

$$Q_2 = m_{páry} \cdot Q_{1kg} = 180 \cdot 3300 = 594000[kJ] \rightarrow 165[kWh] \quad (4.1)$$

Ohřívací výkon

$$P_2 = \frac{Q_2}{t} = \frac{165}{1} = 165[kW] \quad (4.2)$$

Příkon ohřívače

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{165}{0,85} = 194,118[kW] \quad (4.3)$$

Spotřeba energie na odpaření jedné dávky

$$Q_1 = P_1 \cdot t = 194,118 \cdot 1 = 194,118[kWh] \quad (4.4)$$

Příkon ostatních částí systému (čerpadla, měření, ventilace, osvětlení a další zařízení)

$$P_o = 10[kW] \quad (4.5)$$

Celková spotřeba elektrické energie za 1h (pro případ, že by byl ohřev prováděn elektricky)

$$Q_c = Q_1 + P_o \cdot t = 194,118 + 10 \cdot 1 = 204,118[kWh] \quad (4.6)$$

Požizovací náklady zařízení

Požizovací náklady odparky včetně

okolní technologie (potrubí, izolace,

čerpadla, měření, nádrže, doprava,

elektroinstalace...):

3.329.600Kč

Výstavba budov a zemní práce

1.500.000Kč

Montáž, instalace a uvedení do provozu:

950.000Kč

Celkové náklady na výstavbu:

5.779.600Kč

Rezerva projektu 10%:

577.960Kč

Celkové náklady:

6.357.560Kč

Náklady jsou větší z důvodu použití kvalitnějších materiálů (nerezová ocel, odolnější tepelná izolace)

Roční náklady na provoz

Uvažujeme provoz linky 8h denně a 250 dní v roce $\rightarrow 2000h/rok + 125h/rok$ na rozehrívání

Náklady na energii

$$N_{e1} = Q_c \cdot k_{1kWh} \cdot t_{rok} = 204,118 \cdot 4,1 \cdot 2125 = 1.778.378[Kč] \quad (4.7)$$

Náklady na personál

$$N_{p1} = n \cdot n_m \cdot (N_m + 0,35 \cdot N_m) = 2 \cdot 12 \cdot (25000 + 0,35 \cdot 25000) = 810.000[Kč] \quad (4.8)$$

Náklady na chemickou úpravu nástřiku (425g NaOH/h, 340g HNO₃/h)

$$N_{chl} = t_{rok} \cdot \left(k_{NaOH} \cdot \frac{425}{1000} + k_{HNO_3} \cdot \frac{340}{1000} \right) = 2000 \cdot (30 \cdot 0,425 + 80 \cdot 0,34) = 79.900 [Kč] \quad (4.9)$$

Revize a údržba

$$N_{ul} = 30.000 [Kč] \quad (4.10)$$

Celkové roční náklady bez rezervy

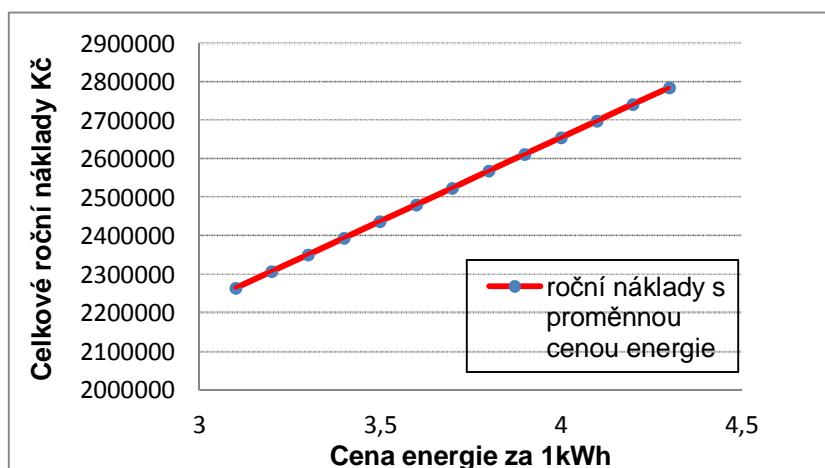
$$N_{c1} = N_{el} + N_{pl} + N_{chl} + N_{ul} = 1778378 + 810000 + 79900 + 30000 = 2.698.278 [Kč] \quad (4.11)$$

Celkové roční náklady s rezervou 10%

$$N_{cs1} = N_{c1} \cdot 1,1 = 2698278 \cdot 1,1 = 2.968.106 [Kč] \quad (4.12)$$

Náklady na zpracování jednoho litru odpadu při plném zatížení linky

$$N_{l1l} = \frac{N_{cs1}}{V_o \cdot t_{rok}} = \frac{2968106}{170 \cdot 2000} = 8,729 [Kč/l] \quad (4.13)$$



Graf 4.1 Celkové roční náklady s proměnlivou cenou energie

Chemická úprava

Výhody metody:

- Poměrně nízké náklady
- Probíhá za normální teploty
- Selektivní zachycování kontaminantů

Nevýhody metody:

- Nízký dekontaminační faktor (10^1 - 10^2)
- Problematické oddělení a dodatečná úprava ionexů a kalů
- Rušivý vliv komplexujících činidel (podstatné složky dekontaminačních roztoků)
- Náročnější manipulace se vzniklým velmi vodným kalem

Metoda je vhodné spíše jen jako předúprava před odpařováním a záchytem na ionexech.

Analýza malé chemické úpravy

Hlavními komponenty úpravy jsou mixér na mísení odpadů, čiřič, zásobníky s chemikáliemi a nádrže na odpad o objemu 10000l. Dalšími komponenty jsou čerpadla, měření a regulace, ventily, spojovací potrubí, osvětlení a některé menší položky.

Výkon linky: $5\text{ m}^3/\text{h}$

Separace zejména stroncia a několika dalších prvků (Cd, Y, Zr, Nb) s vyšší účinností vyžaduje 400mg vápna na 1l a 400mg sody na 1l. Cesium je u daného postupu separováno s účinností cca 50%.

Náklady na pořízení zařízení

Pořizovací náklady včetně

okolní technologie (nádrže, čiřiče, potrubí, čerpadla, měření, doprava,

elektroinstalace,...):	1.450.000Kč
Výstavba budov a zemní práce	1.620.000Kč
Montáž, instalace a uvedení do provozu:	480.000Kč
Celkové náklady na výstavbu:	3.550.000Kč
Rezerva projektu 10%:	355.000Kč
Celkové náklady:	3.900.000Kč

Roční náklady na provoz

Uvažujeme provoz linky 8h denně a 250 dní v roce $\rightarrow 2000\text{h}/\text{rok}$

Náklady na energii (čerpadla, osvětlení, ostatní elektrická zařízení $\sum P_{el}=8\text{kW}$)

$$N_{el2} = \sum P_{el} \cdot k_{1kWh} \cdot t_{rok} = 8 \cdot 4,1 \cdot 2000 = 65.600[\text{Kč}] \quad (4.14)$$

Náklady na chemikálie

$$N_{ch2} = m_{nalitr} \cdot V_o \cdot k_{ch}$$

V případě použití sody 400mg/l a vápna 400mg/l jsou náklady následující

$$N_{chvs} = t_{rok} (m_{nalitr} \cdot V_o \cdot k_{váp} + m_{nalitr} \cdot V_o \cdot k_{sod}) = \\ = 2000 \cdot (4 \cdot 10^{-4} \cdot 5000 \cdot 3,5 + 4 \cdot 10^{-4} \cdot 5000 \cdot 18) = 86.000[\text{Kč}] \quad (4.15)$$

Náklady na personál

$$N_{p2} = n \cdot n_m \cdot (N_m + 0,35 \cdot N_m) = 2 \cdot 12 \cdot (25000 + 0,35 \cdot 25000) = 810.000[\text{Kč}] \quad (4.16)$$

Revize a údržba

$$N_{u2} = 25.000[\text{Kč}] \quad (4.17)$$

Celkové roční náklady bez rezervy

$$N_{c2} = N_{e12} + N_{p2} + N_{ch2} + N_{u2} = 65600 + 86000 + 810000 + 25000 = 986.600[\text{Kč}] \quad (4.18)$$

Celkové roční náklady s rezervou 10%

$$N_{cs2} = N_{c2} \cdot 1,1 = 986600 \cdot 1,1 = 1.085.260[\text{Kč}] \quad (4.19)$$

Náklady na zpracování jednoho litru odpadu při plném zatížení linky

$$N_{1l2} = \frac{N_{cs2}}{V_o \cdot t_{rok}} = \frac{1085260}{5000 \cdot 2000} = 0,106[\text{Kč} / \text{l}] \quad (4.20)$$

Iontová výměna

Výhody metody:

- Jednoduchý proces
- Vysoký dekontaminační faktor (až 10^4)
- Široký výběr organických a anorganických ionexů

Nevýhody metody:

- Vyšší cena některých ionoxů
- Efektivnost metody je silně závislá na solnosti roztoku (záchyty neaktivních prvků) a přítomnosti pevných částic zanášejících kolonu

Analýza malé iontoměničové kolony

Výkon kolony: 500l/h

Kolona se skládá z iontoměničové kolony, nádrží s regeneračním roztokem, systému MaR a nádrží o kapacitě 5000l. Dalšími prvky jsou spojovací potrubí, čerpadla, ventily, osvětlení a ventilace prostor a některé menší položky. Iontoměničovou kolonu je možno zdvojit, aby nebyl provoz přerušen v době regenerace nebo výměny ionexu.

Náklady na pořízení zařízení

Požizovací náklady kolony včetně

okolní technologie (potrubí,

čerpadel, měření, doprava,...)

dvojitá kolona: 1.600.000Kč

Výstavba budov a zemní práce 1.500.000Kč

Montáž, instalace a uvedení do provozu: 410.000Kč

Celkové náklady na výstavbu: 2.838.000Kč

Rezerva projektu 10%: 283.800Kč

Celkové náklady: 3.121.000Kč

Náklady jsou větší z důvodu použití kvalitnějších materiálů, hlavně většího množství nerezové ocele.

Roční náklady na provoz

Uvažujeme provoz linky 8h denně a 250 dní v roce →2000h/rok

Náklady na energii (čerpadla, osvětlení, ostatní elektrická zařízení $\sum P_{el}=4,5\text{kW}$)

$$N_{e13} = \sum P_{el} \cdot k_{1kWh} \cdot t_{rok} = 4,5 \cdot 4,1 \cdot 2000 = 36.900[\text{Kč}] \quad (4.21)$$

Množství ionexu při průtoku kolonou 500l/h

$$V_{ion} = 500 \cdot t_{rok} \cdot V_{l} = 500 \cdot 2000 \cdot 1,25 \cdot 10^{-4} = 125[\text{dm}^3] \rightarrow 0,125[\text{m}^3] \quad (4.22)$$

Náklady na ionex

$$N_{ion} = V_{ion} \cdot k_{ion} = 0,125 \cdot 76800 = 9.600[\text{Kč}] \quad (4.23)$$

Náklady na personál

Zařízení této velikosti nevyžaduje stálou obsluhu. Často je součástí jiného zařízení (odparka, bitumenační linka)

Revize a údržba

$$N_{u3} = 32.000[\text{Kč}] \quad (4.24)$$

Celkové roční náklady bez rezervy

$$N_{c3} = N_{e13} + N_{ion} + N_{p3} + N_{u3} = 36900 + 9600 + 0 + 32000 = 78.500[\text{Kč}] \quad (4.25)$$

Celkové roční náklady s rezervou 10%

$$N_{cs3} = N_{c3} \cdot 1,1 = 78500 \cdot 1,1 = 86.350[\text{Kč}] \quad (4.26)$$

Náklady na zpracování jednoho litru odpadu

$$N_{l13} = \frac{N_{cs3}}{V_o \cdot t_{rok}} = \frac{86350}{500 \cdot 2000} = 0,086[\text{Kč} / \text{l}] \quad (4.27)$$

Vitrifikace

Výhody metody:

- Možnost zpracovávat vysoce aktivní kapalné RAO
- Vysoká objemová redukce
- Vysoká čistota výsledného produktu
- Výsledný produkt je velice odolný
- Nízká vyluhovatelnost vodou a dobrý odvod tepla

Nevýhody metody:

- Velmi vysoké pořizovací náklady
- Vysoké nároky na personál a technologie
- Životnost kovové nádoby vitrifikačního zařízení je přibližně 5000 provozních hodin

Vitrifikační zařízení je velmi důležitým prvkem při přepracování VJP, neboť při tomto procesu vznikají vysoce aktivní odpady, které je nutno účinně imobilizovat a bezpečně uložit. VAO je nejprve kalcinován a následně je přiveden do tavící pece, kde dochází k vytvoření sklené hmoty. Ta je dávkována do speciálních nerezových nádob, které se následně ukládají. Hmota musí chladnout rovnoměrně a postupně, aby nedošlo k popraskání. Po vychladnutí je kontejner dekontaminován a odeslán k uložení. Při procesu se uvolňují plynné radionuklidy, které je nutno aktivně filtrovat.

Analýza vitrifikační linky

Hlavními prvky vitrifikační linky jsou technologie na přívod a mísení VAO s aditivou, kalcinátor, tavící zařízení, zařízení na plnění produktu do kontejnerů, MaR a filtrace plynů. Dalšími prvky jsou nádrže, zásobníky, spojovací potrubí, ventily, osvětlení, ventilace prostor a další zařízení.

Parametry linky:

Výstupní výkon a frekvence generátoru:	400 – 600 kW, frekvence 300 kHz
Produkce skla:	25-40kg/h
Kapacita kontejneru:	400 kg

Pořizovací náklady

Kompletní náklady na vybavení, technologie, budovy, infrastrukturu, uvedení do provozu a další prvky se pohybují okolo 30 miliard korun.

Provozní náklady

Uvažujeme provoz linky 12h denně a 250 dní v roce →3000h/rok

Příkon generátoru

$$P_{gen} = \frac{P_{gen2}}{\eta} = \frac{500}{0,9} = 555,555[kW] \quad (4.28)$$

Roční odběr generátoru

$$Q_{gen} = P_{gen} \cdot t_{rok} = 555,555 \cdot 3000 = 1666667[kWh] \quad (4.29)$$

Roční odběr kalcinátoru

$$Q_{kal} = P_{kal} \cdot t_{rok} = 110 \cdot 3000 = 330000[kWh] \quad (4.30)$$

Náklady na energii (odběr ostatních částí systému $Q_o=1050000kWh$)

$$N_{e14} = (Q_{gen} + Q_{kal} \cdot Q_o) \cdot k_{1kWh} = (1666667 + 330000 + 1050000) \cdot 4,1 = 12.491.335[Kč] \quad (4.31)$$

Náklady na personál

$$N_{p4} = n \cdot n_m \cdot (N_m + 0,35 \cdot N_m) = 30 \cdot 12 \cdot (38000 + 0,35 \cdot 38000) = 18.468.000[Kč] \quad (4.32)$$

Náklady na složky pro výrobu skla

$$N_{skla} = k_{skla/1kg} \cdot m_{skla/1h} \cdot t_{rok} = 60 \cdot 32,5 \cdot 3000 = 5.850.000 [Kč] \quad (4.33)$$

Náklady na kontejnery

$$N_{kon} = n_{kon/rok} \cdot k_{kon} = 250 \cdot 25000 = 6.250.000 [Kč] \quad (4.34)$$

Revize a údržba

$$N_{u4} = 5.000.000 [Kč] \quad (4.35)$$

Celkové roční náklady bez rezervy

$$N_{c4} = N_{e14} + N_{p4} + N_{skla} + N_{kon} + N_{u4} = 12491335 + 18468000 + 5850000 + 6250000 + 5000000 = 48.059.335 [Kč] \quad (4.36)$$

Celkové roční náklady s rezervou 15%

$$N_{cs4} = N_{c4} \cdot 1,15 = 48059335 \cdot 1,15 = 55.268.235 [Kč] \quad (4.37)$$

4.2 Analýza úpravy RAO

Většinu zpracovaných RAO je nutno zpevnit z důvodu lepší manipulace, snížení rizika pro okolní technologie a zejména z důvodu zabránění uvolnění odpadů do životního prostředí.

Cementace

Výhody metody:

- Jednoduchá metoda
- Probíhá za normální teploty
- Široký výběr a velký trh s cementovými směsi
- Nižší pořizovací a provozní náklady
- Samotná cementová směs funguje jako kvalitní stínění

Nevýhody metody:

- Pórovitost cementační směsi
- Některé materiály mohou bobtnat a způsobovat praskání směsi
- Již nedochází k objemové redukci

Cementačních zařízení je několik typů. Rozdělují se podle způsobu míchání cementové směsi, aditiv a odpadu na zařízení s mícháním mimo sud, v sudu a bubnové míchání v sudu.

Analýza malého cementačního zařízení s mícháním v sudu

Hlavními prvky zařízení jsou sila na cementovou směs a aditiva, nádrže na odpad, mísící a dávkovací zařízení, mixér na cementovou směs a mechanismy pro upínání a přepravu sudů. Dalšími prvky jsou ventily, spojovací a přívodní potrubí, čerpadla, dmychadla, MaR, osvětlení, ventilace a další menší prvky.

Rychlost linky: 4sudy/h

Pořizovací náklady

Nádrže, sila, dávkovací zařízení,

mixér na cementovou směs, mechanismy

pro upínání a přepravu sudů, potrubí, čerpadla,

ventily, osvětlení, ventilace, ...: 2.540.000Kč

Montáž, instalace a uvedení do provozu: 770.000Kč

Rezerva projektu 10%: 331.000Kč

Celkové náklady s rezervou: 3.641.000Kč

Roční náklady na provoz linky

Uvažujeme provoz linky 8h denně a 250 dní v roce →2000h/rok

Náklady na energii (čerpadla, osvětlení, ostatní elektrická zařízení $\sum P_{el}=12kW$)

$$N_{e14} = \sum P_{el} \cdot k_{1kWh} \cdot t_{rok} = 12 \cdot 4,1 \cdot 2000 = 98.400[Kč] \quad (4.38)$$

Náklady na sudy

$$N_S = (n_{s/h} \cdot t_{rok}) \cdot k_{sudu} = (4 \cdot 2000) \cdot 850 = 6.800.000[Kč] \quad (4.39)$$

Náklady na cementovou směs

$$N_{cem} = (n_{s/h} \cdot t_{rok}) \cdot V_{cem/sud} \cdot k_{cemm^3} = (4 \cdot 2000) \cdot 0,12 \cdot 8120 = 7.795.200[Kč] \quad (4.40)$$

Náklady na personál

$$N_{p4} = n \cdot n_m \cdot (N_m + 0,35 \cdot N_m) = 3 \cdot 12 \cdot (25000 + 0,35 \cdot 25000) = 1.215.000[Kč] \quad (4.41)$$

Revize a údržba

$$N_{u4} = 33.000[Kč] \quad (4.42)$$

Celkové roční náklady bez rezervy

$$N_{c4} = N_{e14} + N_S + N_{cem} + N_{p4} + N_{u4} = 98400 + 6800000 + 7795200 + 1215000 + 33000 = 15.941.600[Kč] \quad (4.43)$$

Celkové roční náklady s rezervou 10%

$$N_{cs4} = N_{c4} \cdot 1,1 = 15941600 \cdot 1,1 = 17.535.760[Kč] \quad (4.44)$$

Bitumenace

Výhody metody:

- Dodatečná redukce objemu odpadu
- Plasticita materiálu

Nevýhody metody:

- Vyšší pořizovací a provozní náklady
- Hořlavost výsledného produktu
- Vyšší nároky na obsluhu

Hlavní částí celého systému je rotorová filmová odparka, ve které se mísí kapalný RAO s bitumenem. Přebytečná voda se odpaří a po zkondenzování a případném dočištění může být vypuštěna do ŽP. Dalšími prvky systému je dávkovací systém bitumenu a odpadu, nádrže na odpad a bitumen, chlazení odpařené kapaliny, zařízení na dočištění, plnicí zařízení, spojovací potrubí, osvětlení a ventilace prostor a další.

Analýza bitumenační linky

Množství zpracovávané směsi: 240l/h

Teplota: 140°C

Energie potřebná na zpracování 240l směsi

$$Q_2 = m_{páry} \cdot Q_{1kg} = 254 \cdot 3300 = 838200[kJ] \rightarrow 232,833[kWh] \quad (4.45)$$

Ohřívací výkon

$$P_2 = \frac{Q_2}{t} = \frac{232,833}{1} = 232,833[kW] \quad (4.46)$$

Příkon ohříváče

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{232,833}{0,85} = 273,922[kW] \quad (4.47)$$

Spotřeba energie na odpaření jedné dávky

$$Q_1 = P_1 \cdot t = 273,922 \cdot 1 = 273,922[kWh] \quad (4.48)$$

Spotřeba elektrické energie ostatních částí systému (motory, čerpadla, měření, ventilace, osvětlení a další zařízení)

$$P_o = 100[kW] \quad (4.49)$$

Celková spotřeba elektrické energie za 1h (pro případ, že by byl ohřev prováděn elektricky)

$$Q_c = Q_1 + P_o \cdot t = 273,922 + 100 \cdot 1 = 373,922[kWh] \quad (4.50)$$

Pořizovací náklady na linku

Pořizovací náklady na bitumenační linku se pohybují v řádu desítek milionů korun

Roční náklady na provoz linky

Uvažujeme provoz linky 8h denně a 250 dní v roce $\rightarrow 2000h/rok + 125h/rok$ na rozehřívání

Náklady na elektrickou energii

$$N_{e15} = Q_c \cdot k_{1kWh} \cdot t_{rok} = 373,922 \cdot 4,1 \cdot 2125 = 3.257.795 [Kč] \quad (4.51)$$

Náklady na sudy (při množství směsi 240l/h a hustotě $\rho=1200\text{kg/m}^3$ je rychlost linky 1sud/h)

$$N_S = (n_{s/h} \cdot t_{rok}) \cdot k_{sudu} = (1 \cdot 2000) \cdot 850 = 1.700.000 [Kč] \quad (4.52)$$

Náklady na bitumen

$$N_{bit} = (n_{s/h} \cdot t_{rok}) \cdot V_{bit/sud} \cdot k_{bitm^3} = (1 \cdot 2000) \cdot 0,12 \cdot 21600 = 5.184.000 [Kč] \quad (4.53)$$

Náklady na personál

$$N_{p5} = n \cdot n_m \cdot (N_m + 0,35 \cdot N_m) = 3 \cdot 12 \cdot (25000 + 0,35 \cdot 25000) = 1.215.000 [Kč] \quad (4.54)$$

Revize a údržba

$$N_{u5} = 200.000 [Kč] \quad (4.55)$$

Celkové roční náklady bez rezervy

$$N_{c5} = N_{e15} + N_S + N_{bit} + N_{p5} + N_{u5} = 3257795 + 1700000 + 5184000 + \\ + 1215000 + 200000 = 11.556.795 [Kč] \quad (4.56)$$

Celkové roční náklady s rezervou 10%

$$N_{cs5} = N_{c5} \cdot 1,1 = 11556795 \cdot 1,1 = 12.712.475 [Kč] \quad (4.57)$$

Nízkotlaké a vysokotlaké lisování

Výhody metody:

- Možnost redukovat objem i masivnějších pevných odpadů

Nevýhody metody:

- Při lisování některých odpadů se vytváří prach a je nutno ho filtrovat

Podle síly lisu a druhu odpadu je možné dosáhnout redukce objemu až 5x u nízkotlakého lisování a až 20x u vysokotlakého.

Analýza nízkotlakého lisu

Hlavním prvkem je nízkotlaký lis vybavený koncovkou pro lisování odpadu v sudu a krytem pro utěsnění lisovacího prostoru. Dalšími prvky jsou přívodní kabely, jištění, spínání, měření, osvětlení, ventilace prostor a další drobná zařízení.

Síla lisu: 100tun

Výkon elektrického motoru: 4kW

Pořizovací náklady nízkotlakého lisu

Pořizovací cena lisu, elektroinstalace,

MaR, osvětlení, zdvihací zařízení na sudy, ...: 232.000Kč

Požadavky na prostor jsou velmi malé,

lis je možné umístit do již používané budovy

Montáž, instalace a uvedení do provozu:	15.000Kč
Rezerva projektu 10%:	24.700Kč
Celkové náklady s rezervou:	271.700Kč

Roční náklady na provoz

Uvažujeme provoz lisovací linky 8h denně a 250 dní v roce →2000h/rok

Předpokladem je zpracování 4 sudů za hodinu, lis je v činnosti 8min na jeden sud

Spotřeba elektrické energie pohonu lisu

$$Q_{lis} = P_{lis} \cdot n_{lis} \cdot t_{lis} \cdot t_{rok} = 3 \cdot 4 \cdot 0,133 \cdot 2000 = 3192[kWh] \quad (4.58)$$

Náklady na energii (pohon lisu, osvětlení, ostatní elektrická zařízení $\sum P_o=0,8kW$)

$$N_{e16} = (\sum P_o \cdot t_{rok} + Q_{lis}) \cdot k_{kWh} = (0,8 \cdot 2000 + 3192) \cdot 4,1 = 19.647[Kč] \quad (4.59)$$

Náklady na personál

$$N_{p6} = n \cdot n_m \cdot (N_m + 0,35 \cdot N_m) = 1 \cdot 12 \cdot (23000 + 0,35 \cdot 23000) = 372.600[Kč] \quad (4.60)$$

Revize a údržba

$$N_{u6} = 10.000[Kč] \quad (4.61)$$

Celkové roční náklady bez rezervy

$$N_{c6} = N_{e16} + N_{p6} + N_{u6} = 19647 + 372600 + 10000 = 402.247[Kč] \quad (4.62)$$

Celkové roční náklady s rezervou 10%

$$N_{cs6} = N_{c6} \cdot 1,1 = 442.472 = [Kč] \quad (4.63)$$

Analýza vysokotlakého lisu

Výhody metody:

- Velká objemová redukce pevných odpadů
- Možnost lisování i masivnějších prvků (potrubí, stavební materiály,...)

Nevýhody metody:

- Vyšší pořizovací náklady
- Vyšší požadavky na obsluhu
- Nutnost filtrace částic unikajících při lisování

Hlavním prvkem je vysokotlaký lis vybavený lisovací komorou s odvodem prachu do filtrů. Dalšími prvky jsou přívodní kabely, jištění, spínání, měření, osvětlení, ventilace prostor a další drobnější zařízení. Z důvodu vysoké váhy samotného lisu je nutné přizpůsobit podlahu vyššímu zatížení.

Síla lisu: 1000tun

Výkon elektrického motoru: 110kW

Pořizovací náklady vysokotlakého lisu

Pořizovací cena lisu, filtračního zařízení s

HEPA filtry, elektroinstalace, MaR,

osvětlení, zdvihací zařízení, ...: 5.300.000Kč

Výstavba budov a zemní práce 2.600.000Kč

Rezerva projektu 10%: 790.000Kč

Celkové náklady s rezervou: 8.690.000Kč

Roční náklady na provoz

Uvažujeme provoz lisovací linky 8h denně a 250 dní v roce →2000h/rok

Příkon pohonu lisu

$$P_{VTlis} = \frac{P_1}{\eta} = \frac{110}{0,96} = 115[kW] \quad (4.64)$$

Spotřeba elektrické energie pohonu lisu, 50% plné zatížení a 50% poloviční

$$\begin{aligned} Q_{VTlis} &= P_{VTlis} \cdot t_{rok} \cdot \beta_1 + P_{VTlis} \cdot t_{rok} \cdot \beta_2 = \\ &= 115 \cdot 2000 \cdot 0,5 + 115 \cdot 2000 \cdot 0,25 = 172500[kWh] \end{aligned} \quad (4.65)$$

Celkové náklady na energii (pohon lisu, filtrační zařízení, osvětlení, ostatní elektrická zařízení

$\sum P_o=7kW$)

$$N_{e17} = (\sum P_o \cdot t_{rok} + Q_{VTlis}) \cdot k_{1kWh} = (7 \cdot 2000 + 172500) \cdot 4,1 = 764.650[Kč] \quad (4.66)$$

Náklady na personál

$$N_{p7} = n \cdot n_m \cdot (N_m + 0,35 \cdot N_m) = 3 \cdot 12 \cdot (25000 + 0,35 \cdot 25000) = 1.215.000[Kč] \quad (4.67)$$

Revize a údržba

$$N_{u7} = 100.000[Kč] \quad (4.68)$$

Celkové roční náklady bez rezervy

$$N_{c7} = N_{e17} + N_{p7} + N_{u7} = 764650 + 1215000 + 100000 = 2.079.650[Kč] \quad (4.69)$$

Celkové roční náklady s rezervou 10%

$$N_{cs7} = N_{c7} \cdot 1,1 = 2004650 \cdot 1,1 = 2.287.615[Kč] \quad (4.70)$$

Spalování

Výhody metody:

- Velká objemová redukce

Nevýhody metody:

- Nutnost filtrace a z toho plynoucí vznik druhotných odpadů
- Vysoké pořizovací a provozní náklady
- Ke spalování nemohou být přijaty odpady s velkým množstvím těkavých radionuklidů

Analýza spalovacího zařízení

Hlavními komponenty systému jsou spalovací komora, chlazení spalin, filtry, podavače odpadu, výsypka popela, MaR. Dalšími komponenty jsou potrubí, ventily, osvětlení, ventilace prostor a další technologická zařízení. Spalovací zařízení se však buduje jako komplex a proto jsou jeho součástí i nákladové prostory, manipulační technika, zařízení pro zpracování popela, správní budovy, volné prostory a další. Pro podporu spalování se používá zemní plyn.

Parametry malé spalovny

Množství spalovaného odpadu: 250 kg/h

Výhřevnost: 20-30 MJ/kg

Teplota ve spalovací komoře: 800-900°C

Komora přídavného spalování: 800-975°C

Přídavné palivo: zemní plyn

Neutralizaci plynů vápnem

Zachycování dioxinů dřevěným uhlím

Pořizovací náklady

Pořizovací náklady na kompletní zařízení spalovny odpadu jsou řádově ve stamilionech korun.

Roční náklady na provoz

Uvažujeme provoz linky 24h denně a 351 dní v roce →8424h/rok

Odhad spotřeby elektrické energie při zatížení 8,5h/den $\sum P_{S1}=200\text{kW}$, 15.5h/den $\sum P_{S2}=110\text{kW}$)

$$Q_S = P_{S1} \cdot 8,5 \cdot 351 + P_{S2} \cdot 15,5 \cdot 351 = 200 \cdot 8,5 \cdot 351 + 110 \cdot 15,5 \cdot 351 = 1195,2[MWh] \quad (4.71)$$

Náklady na elektrickou energii

$$N_{e18} = Q_S \cdot k_{1kWh} = 1195,2 \cdot 10^3 \cdot 4,1 = 4.900.136[Kč] \quad (4.72)$$

Náklady na zemní plyn (cena je velmi závislá na spotřebě, počítá se s měsíční zálohou ve výši 100.000Kč)

$$N_{zp} = N_m \cdot n = 100000 \cdot 12 = 1.200.000[Kč] \quad (4.73)$$

Náklady na personál

$$N_{p8} = n \cdot n_m \cdot (N_m + 0,35 \cdot N_m) = 21 \cdot 12 \cdot (32000 + 0,35 \cdot 32000) = 10.886.400 [Kč] \quad (4.74)$$

Revize a údržba

$$N_{u8} = 1.000.000 [Kč] \quad (4.75)$$

Celkové roční náklady bez rezervy

$$\begin{aligned} N_{c8} &= N_{e18} + N_{p8} + N_{zp} + N_{u8} = \\ &= 4900136 + 1200000 + 10886400 + 1000000 = 17.986.536 [Kč] \end{aligned} \quad (4.76)$$

Celkové roční náklady s rezervou 10%

$$N_{cs8} = N_{c8} \cdot 1,1 = 17986536 \cdot 1,1 = 19.785.189 [Kč] \quad (4.77)$$

Dekontaminace kovů tavením

Výhody metody:

- Možnost navrácení kovového materiálu zpět do procesu výroby
- Většina radionuklidů zůstává ve strusce
- Dobře zvládnutelný postup

Nevýhody metody:

- Vysoké pořizovací náklady
- Nutnost instalovat filtraci exhalací

Pořizovací náklady

Pořizovací náklady na dekontaminační zařízení jsou zhruba 100 milionů korun a více.

Záleží na velikosti, použité technologii a doplňkových zařízeních.

Analýza tavicího zařízení

Množství zpracovaného materiálu: 5000t/rok

Typ pece: indukční

Roční náklady na provoz

Množství elektrické energie (na roztavení 1t vsázky a udržení tekutosti je potřeba 580kWh)

$$Q_{T1} = m_{rok} \cdot Q_{1t} = 5000 \cdot 580 = 2900 [MWh] \quad (4.78)$$

Odběr indukční pece při uvažování účinnosti pece a měniče $\eta=0,75$

$$Q_{T2} = \frac{Q_{T1}}{\eta} = \frac{2900}{0,75} = 3866,667 [MWh] \quad (4.79)$$

Náklady na elektrickou energii spotřebovanou pecí a okolními technologiemi $\sum Q_{ot}=250MWh$

$$N_{e19} = (Q_{T2} + \sum Q_{ot}) \cdot k_{1kWh} = (3866,667 \cdot 10^3 + 350 \cdot 10^3) \cdot 4,1 = 17.288.335 [Kč] \quad (4.80)$$

Náklady na personál

$$N_{p9} = n \cdot n_m \cdot (N_m + 0,35 \cdot N_m) = 30 \cdot 12 \cdot (32000 + 0,35 \cdot 32000) = 15.552.000[\text{Kč}] \quad (4.81)$$

Revize a údržba

$$N_{u9} = 1.500.000[\text{Kč}] \quad (4.82)$$

Celkové roční náklady bez rezervy

$$N_{c9} = N_{e19} + N_{p9} + N_{u9} = 17288335 + 15552000 + 1500000 = 34.340.335[\text{Kč}] \quad (4.83)$$

Celkové roční náklady s rezervou 10%

$$N_{cs9} = N_{c9} \cdot 1,1 = 34340335 \cdot 1,1 = 37.774.369[\text{Kč}] \quad (4.84)$$

4.3 Analýza ukládání RAO

V ČR jsou nízko a středně aktivní odpady z JE po úpravě ukládány do přípovrchového úložiště Dukovany. Provozovatel JE v ČR společnost ČEZ platí 50Kč za každou vyrobenou MWh z jaderných elektráren. Obce, na jejichž katastru se nachází úložiště RAO, dostanou ročně 1,5milionu korun.

Přípovrchové úložiště

Model je podobný již provozovanému úložišti na JE Dukovany.

Úložiště je tvořeno 112 železobetonovými jímkami uspořádanými do čtyř řad po 28 jímkách. Velikost jímky je 5,3 x 5,4 x 17,3 m. Pro ukládání sudů a manipulaci s krycími panely je na kolejnicích umístěn portálový jeřáb. Po naplnění jímky je zbylý prostor vyplněn betonovou směsí, zaizolován silnostěnným polyetylenem, který zabraňuje vniku dešťové vody a navrch je jímka uzavřena železobetonovými panely.

Objem jedné jímky 15062,6+5005+10463

$$V_j = a \cdot b \cdot c = 5,3 \cdot 5,4 \cdot 17,3 = 495,126[\text{m}^3]$$

Do jedné jímky se vyjde cca 1600 sudů o objemu 200l (vnější objem sudu je 210l). Zbylý objem V_z snížen o 5% z důvodu neúplného zalití všech prostor je tedy

$$V_z = (V_j - 1600 \cdot V_s) \cdot 0,95 = (495,126 - 1600 \cdot 0,21) \cdot 0,95 = 151,169[\text{m}^3] \quad (4.85)$$

Náklady na výstavbu

Náklady na beton

$$N_b = V_b \cdot k_b = 29000 \cdot 2100 = 60.900.000[\text{Kč}] \quad (4.86)$$

Náklady na dopravu betonu

$$N_{db1} = V_b \cdot k_{db} = 29000 \cdot 130 = 3.770.000[\text{Kč}] \quad (4.87)$$

Náklady spojené se zpracováním betonu

$$N_{zb1} = 45.675.000[\text{Kč}] \quad (4.88)$$

Náklady na armování betonu (armatura, doprava a armování)

$$N_{arm} = 102.230.000[\text{Kč}] \quad (4.89)$$

Ostatní náklady spojené s betonováním (bednění, vázací dráty, ...)

$$N_{bed} = 5.000.000[\text{Kč}] \quad (4.90)$$

Náklady na krycí panely

$$N_{kp} = 17.400.000[\text{Kč}] \quad (4.91)$$

Náklady spojené se zemními pracemi

$$N_{zem} = 48.500.000[\text{Kč}] \quad (4.92)$$

Náklady na jeřáb včetně kolejnic

$$N_{jeř} = 6.900.000[\text{Kč}] \quad (4.93)$$

Náklady na měření, kontrolu a osvětlení

$$N_{mo} = 2.300.000[\text{Kč}] \quad (4.94)$$

Náklady bez rezervy

$$\begin{aligned} N_{br} &= N_b + N_{db} + N_{zb} + N_{arm} + N_{bed} + N_{kp} + N_{zem} + N_{jeř} + N_{mo} = 60900000 + \\ &+ 3770000 + 45675000 + 102230000 + 5000000 + 17400000 + \\ &+ 48500000 + 6900000 + 2300000 = 292.675.000[\text{Kč}] \end{aligned} \quad (4.95)$$

Rezerva projektu 15%

$$N_{rez} = N_{br} \cdot 0,15 = 292675000 \cdot 0,15 = 43.901.250[\text{Kč}] \quad (4.96)$$

Celkové náklady včetně rezervy

$$N_c = N_{br} + N_{rez} = 290772500 + 43615875 = 336.576.250[\text{Kč}] \quad (4.97)$$

Náklady na zakonzervování jedné jímky

Cena betonu

$$N_{kb} = V_{zb} \cdot k_b = 151,169 \cdot 2300 = 347.689[\text{Kč}] \quad (4.98)$$

Doprava betonu

$$N_{db2} = V_{zb} \cdot k_{db} = 151,169 \cdot 130 = 19.652[\text{Kč}] \quad (4.99)$$

Náklady spojené se zpracováním betonu

$$N_{zb2} = 208.613[\text{Kč}] \quad (4.100)$$

Cena za polyetylenovou plachtu (5,5x17,6m)

$$N_{PEp} = (5,5 \cdot 17,6) \cdot 1,1 \cdot k_{PEp} = 106,48 \cdot 230 = 24.490[\text{Kč}] \quad (4.101)$$

Celkové náklady

$$N_{cz} = N_{zb} + N_{zdb} + N_{zsb} + N_{PEp} = 347689 + 19652 + 208613 + 24490 = 600.444 [Kč] \quad (4.102)$$

Náklady na zalití všech 112 jímek

$$N_{cz112} = N_{cz} \cdot 112 = 600444 \cdot 112 = 67.249.728 [Kč] \quad (4.103)$$

Hlubinné úložiště

Hlubinné úložiště je jednou z variant, jak naložit s VJP z JE Dukovany a JE Temelín. V roce 1999 byly stanoveny náklady na výstavbu ve výši 47 miliard korun. Hlubinné úložiště bude vybudováno v dostatečné hloubce a úniku radioaktivního materiálu bude bránit několik bariér:

- První z nich je již samotný palivový článek, který obsahuje palivové proutky ze slitiny zirkonia obsahující tabletky paliva.
- Druhou bariérou je kovový obal palivových článků z velmi kvalitní oceli.
- Třetí bariérou je bentonitový obal, kterým se vyplní prostor mezi kovovým obalem a horninou. Bentonit vlivem vlhkosti nabobtná a celý prostor vyplní.
- Poslední bariérou je samotná hornina. Jelikož bude úložiště vybudováno ve stabilním a pevném masivu v hloubce přes 500m, je tato bariéra tou nejbezpečnější.

Lokalita pro výstavbu úložiště musí splnit náročné podmínky pro výstavbu, proto se provádí podrobný geologický průzkum každé potenciální oblasti. Výběr samozřejmě ovlivňuje i míra ohrožení obyvatelstva a ŽP v případě úniku radionuklidů.

Pro hlubinné úložiště je plánována i výstavba nadzemního areálu s technickými budovami pro přípravu bentonitové směsi, dílny, haly a informačního centra pro veřejnost. Až po konečném rozhodnutí bude známo, zda se budou vykonávat všechny procesy přípravy k uložení v areálu (míchání betonu, vlastní kolejová doprava,...) nebo budou některé zajišťovány externě.

5 Optimální varianty

V případě výběru vhodné metody úpravy nízko a středně aktivních kapalných RAO je důležitým parametrem solnost roztoku a množství pevných nečistot. V případě odpařování není ani jeden parametr problémem, ale v případě iontoměničové kolony ano. Proto je pro případ vysoké solnosti roztoku a většího množství pevných nečistot vhodnou metodou odpařování. Pro malé solnosti je vhodná iontová výměna díky své menší ekonomické náročnosti. Chemická úprava je vhodná zejména jako předúprava odpadů kvůli malému dekontaminačnímu faktoru. VAO je vhodné upravovat metodou vitrifikace, neboť výsledný produkt nepodléhá degradaci vlivem radiace, je chemický stálý a dobře odvádí případné zbytkové teplo.

Pevné RAO splňující požadavky spalitelnosti je vhodné spálit, čímž se dosáhne objemové redukce 95-97%. Investiční náklady jsou sice značné, ale pro tento účel stačí postavit jen několik těchto zařízení a odpady se budou svážet z jaderných elektráren v dávkách a zpět bude dovážen popel, který si původce RAO zpracuje a uloží sám. Před odvozem do spalovny se odpady skladují v polyetylenových pytlích a po naplnění kapacity (cca 10tun) se převáží po silnici v návěsech. Jako nejlepší metoda pro zpracování nespalitelných pevných RAO je metoda vysokotlakého lisování, kdy dochází až ke 4x větší objemové redukci než u nízkotlakého lisování. Z toho plyne až čtyřnásobná úspora místa v úložišti, menší počet sudů, méně ztužidel a méně místa ve skladovacích prostorech. Pro imobilizaci pevných odpadů je nejlepší způsob cementová směs a do budoucna i polymerové směsi. Kovové RAO není nutné ukládat rovnou, mohou být roztaveny a díky vhodné zvolenému postupu se radionuklidy usadí ve strusce. Strusky je cca do 5% a zbylých 95% vyčištěného kovu je možné zpracovat jako běžný kov. Z toho plyne značná úspora ukládacích kontejnerů a místa v úložišti.

Pro ukládání nízko a středně aktivních odpadů je vhodnou metodou využití již nevyužívaných dolů splňující podmínky pro uložení RAO nebo vybudování přípovrchového úložiště. V případě nakládání s VJP je možností několik. Z hlediska energetické výtěžnosti a úspory štěpného materiálu se jako nejlepší jeví jeho přepracování. Ekonomicky je však výhodnější jeho uložení v hlubinném úložišti

Závěr

Požadavky na nakládání s radioaktivními odpady definuje zákon č. 18/1997 Sb., (atomový zákon), konkrétně §24-31 a vyhláška SÚJB č. 307/2002 Sb. konkrétně § 46-55. V roce 2015-17 vejde v platnost nový atomový zákon včetně všech prováděcích předpisů. Součástí prováděcích předpisů bude i nová vyhláška o nakládání s RAO, která nahradí i příslušnou hlavu vyhlášky č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně. Jedná se vesměs o implementaci Směrnice 2001/70/Euratom a vybraných dokumentů MAAE a WENRA k nakládání s RAO.

Pro zpracování nízko a středně kapalných odpadů je nejuniverzálnější metodou metoda odpařování, při které dochází k vysokému dekontaminačnímu faktoru a faktoru redukce objemu. Nevýhodou je její energetická náročnost, proto je pro malé solnosti s malým obsahem pevných nečistot optimální variantou iontová výměna. Vysoce aktivní odpady je vhodné vitrifikovat, díky odolnosti výsledného produktu. Výstavba a provoz vitrifikačního zařízení jsou ekonomicky velmi náročné, ale výsledný produkt splňuje požadavky na bezpečné ukládání.

Pevné odpady splňující podmínky přijetí ke spálení je vhodné spálit, čímž dojde k redukci objemu až 97%. Z toho plyne obrovská úspora imobilizačních materiálů a místa v úložišti. Nespalitelné odpady je vhodné slisovat, zalít cementovou směsí a uložit. Kontaminované kovové odpady není potřeba rovnou ukládat. Mohou být roztaveny a použitím správného technologického postupu se radionuklidy uvolní do strusky a vzniká dekontaminovaný kov, který je možno dále využít. Jako radioaktivní odpad se zpracovává jen struska, které je cca 5% původního objemu.

Pro úpravu kapalných odpadů je optimální metodou bitumenace. Dochází k dodatečnému odpaření přebytečné vody a odpad je fixovaná v plastické matici. Nevýhodou mohou být vyšší pořizovací a provozní náklady. Pro však hovoří až čtvrtinový počet sudů k uložení oproti cementaci. Cementace je mnohem levnější a jednodušší postup a lze ji využít i pro zalévání pevných odpadů v sudech a kontejnerech, proto nachází uplatnění v závodech na zpracování pevných odpadů. Do budoucna se počítá s využíváním polymerů pro zpevnění odpadů.

Upravené odpady je nutno ukládat, aby neohrozili životní prostředí. K tomuto účelu je možné využít nepoužívané doly. Ty však ne vždy splňují požadavky. Proto se budují přípovrchová úložiště ze železobetonu, která splňují požadavky na ukládání a jsou lépe dostupná.

Odhady nákladů jednotlivých variant nakládání s RAO jsou zpracovány v kapitole 4. K diplomové práci byl vytvořen program pro základní orientaci v ročních nákladech jednotlivých metod nakládání s RAO (viz příloha C).

Nejlepší metodou snížení množství radioaktivních odpadů je předcházení jejich tvorby. Vhodnými technologickými postupy a správně zvolenými konstrukčními materiály se dá jejich množství zredukovat bez větších investic a hlavně bez následných investic na jejich zpracování.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Česká republika. Zákon o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů. In: 18/1997. 1997, 5/1997. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/zakony/Atomovy_zakon_II.pdf
- [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 ČEZ. In: [online]. [cit. 2014-11-19]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/micrositesutf/odpovednost/content/pdf/cez_a_radioaktivni_odpady_-_nahled.pdf
- [4] Dekontaminace. AMEC Nuclear Czech Republic [online]. 2014 [cit. 2014-11-19]. Dostupné z: <http://www.amec-nuclear.cz/sluzby/dekontaminace.htm>
- [5] Radioactive Waste Management. World Nuclear Association [online]. 2014 [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Wastes/Radioactive-Waste-Management/>
- [6] KUNC, Karel. Nakládání s RAO a VJP v ČR. [online]. 2014 [cit. 2014-11-20]. Dostupné z: <http://www.cenen.cz/upload/docs/surao-cenen>
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Classification of Radioactive Waste. Vídeň, 1994. Dostupné z: https://gnsn.iaea.org/Superseded%20Safety%20Standards/Safety_Series_111-G-1.1_1994_Pub950e_web.pdf
- [8] OJOVAN, Michael I. Handbook of advanced radioactive waste conditioning technologies. Philadelphia, PA: Woodhead Pub, c2011, xv, 488 p. Woodhead Publishing in energy, no. 12. ISBN 08-570-9095-X.
- [9] NACHMILNER, Lubomír. Principy nakládání s radioaktivními odpady. Praha, 2000. ISBN 80-01-02258-7
- [10] VESELÝ, Vladimír. Radioaktivní odpady. 1. vyd. Praha: Academia, 156, [1] p. with illus. and tables
- [11] RADIOAKTIVNÍ ODPADY. Kdejinde [online]. 2007 [cit. 2014-12-29]. Dostupné z: http://www.kdejinde.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/odpady_3.html
- [12] Stages of the Nuclear Fuel Cycle. The U.S. Nuclear Regulatory Commission [online]. 2014 [cit. 2014-12-29]. Dostupné z: <http://www.nrc.gov/materials/fuel-cycle-fac/stages-fuel-cycle.html>
- [13] EFREMENKOV. Radioactive waste management at nuclear power plants. In: IAEA [online]. 1989 [cit. 2014-12-30]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull31-4/31404683742.pdf>
- [14] CAURANT, D. Glasses, glass-ceramics and ceramics for immobilization of highly radioactive nuclear wastes. New York: Nova Science Publishers, c2009, xii, 359 p. ISBN 16-045-617
- [15] Treatment and Conditioning of Nuclear Wastes. World Nuclear Association [online]. 2007 [cit. 2014-12-30]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Wastes/Appendices/Radioactive-Waste-Management-Appendix-1--Treatment-and-Conditioning-of-Nuclear-Wastes/>
- [16] Radioactive waste management: an IAEA source book. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1992, 276 p. ISBN 92-010-2892-X

- [17] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Application of Ion Exchange Processes for the Treatment of Radioactive Waste and Management of Spent Ion Exchangers. Vienna, 2002
- [18] Incineration. Japan Atomic Energy Agency [online]. 2014 [cit. 2015-01-12]. Dostupné z: http://www.jaea.go.jp/english/04/ntokai/backend/backend_01_02_01.html
- [19] PROCESSING OF METAL RADIOACTIVE WASTE. Technologiya Metallov [online]. 2008 [cit. 2015-01-12]. Dostupné z: http://www.technologiya-metallov.com/englisch/oekologie_5.html
- [20] OJOVAN, Michael I a W LEE. An introduction to nuclear waste immobilisation. 1st ed. Boston: Elsevier, 2005, xviii, 315 p. ISBN 0080444628
- [21] SALING, James H, Audeen W FENTIMAN a Y TANG. Radioactive waste management. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2001, xi, 414 p. ISBN 1560328428
- [22] AGENCY, International Atomic Energy. Handling and processing of radioactive waste from nuclear applications. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001. ISBN 9201008015
- [23] SVOBODA, Luboš et al. Stavební hmoty. 3. přeprac. a dopl. vyd. Praha, 2013, 950 s. ISBN 978-80-8076-057-2
- [24] Marcoule Radioactive Waste Accident Risk. Lyonlacarte [online]. 2010 [cit. 2015-01-15]. Dostupné z: <http://www.lyonalacarte.com/?AREVA-Marcoule-Radioactive-Waste>
- [25] BUNN, Matthew. The Economics of Reprocessing vs. Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel [online]. Harvard University, 2003 [cit. 2015-01-17]. Dostupné z: <http://belfercenter.ksg.harvard.edu/files/repro-report.pdf>

Přílohy

Příloha A - detailní pohled na iontoměničovou pryskyřici



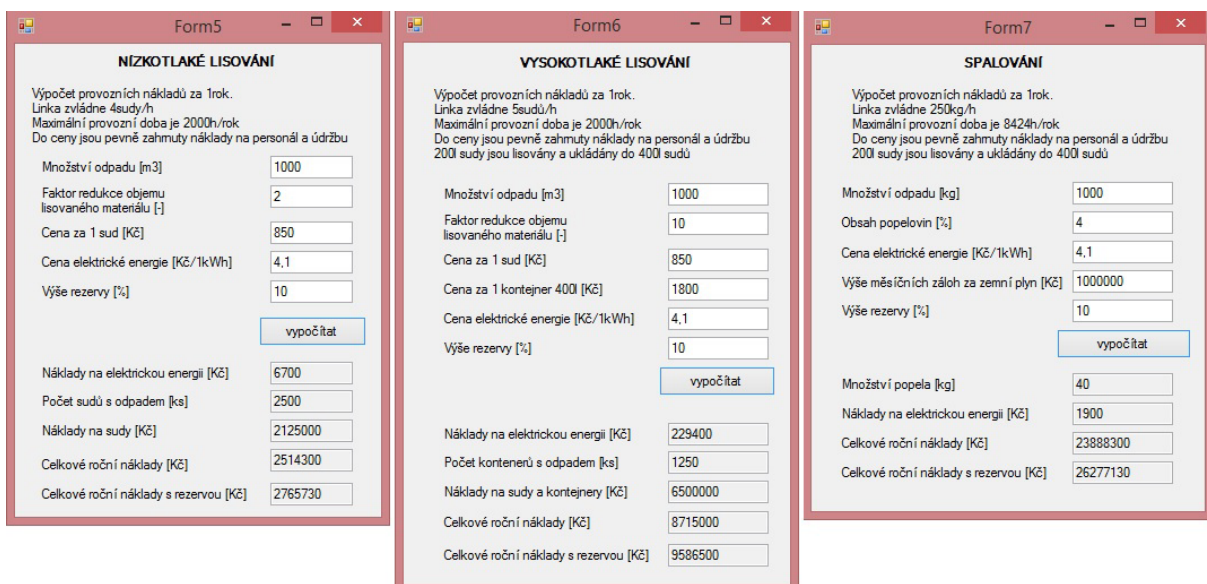
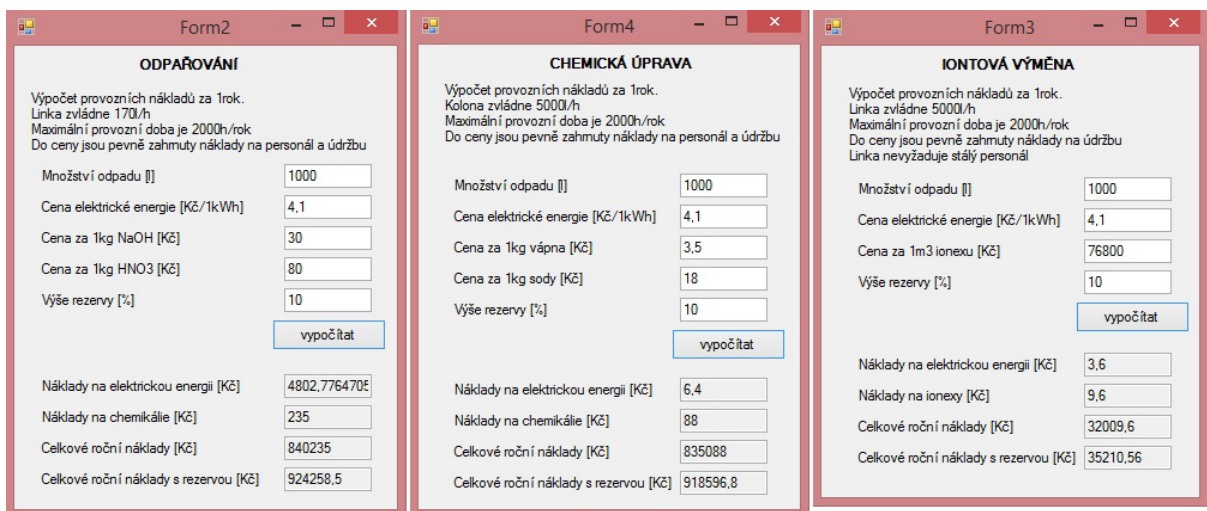
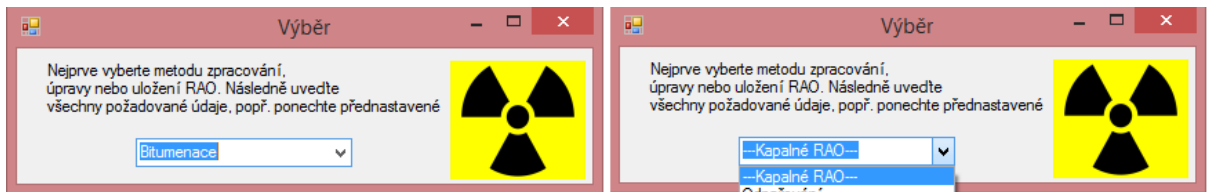
(zdroj: <http://www.lenntech.com/products/resins/rohm-haas/rohm-haas-ion-exchange-resins.htm>)

Příloha 2 – Nízkotlaký lis na RAO s koncovkou na lisování odpadu v sudu



(zdroj: http://www.chemicalpics.com/solid-waste/iaea*org%7COurWork%7CST%7CNE%7CNEFW%7Cimages%7CCompactor*.jpg/iaea*org%7COurWork%7CNE%7CNEFW%7CTechnical_Areas%7CWTS%7Cpredisposal-1*.html/)

Příloha C – Několik snímků zpracovaného programu



Form8	Form9	Form10
<p>CEMENTACE</p> <p>Výpočet provozních nákladů za 1rok. Linka zvládne 4sudy/h Maximální provozní doba je 2000h/rok Do ceny jsou pevně zahrnuty náklady na personál a údržbu</p> <p>Množství odpadu [m3] <input type="text" value="100"/></p> <p>Cena elektrické energie [Kč/1kWh] <input type="text" value="4,1"/></p> <p>Cena cementové směsi [Kč/m3] <input type="text" value="8120"/></p> <p>Cena za 1 sud [Kč] <input type="text" value="850"/></p> <p>Výše rezervy [%] <input type="text" value="10"/></p> <p><input type="button" value="vypočítat"/></p> <p>Množství sudů [ks] <input type="text" value="1250"/></p> <p>Náklady na elektrickou energii [Kč] <input type="text" value="15000"/></p> <p>Náklady na sudy [Kč] <input type="text" value="1062500"/></p> <p>Náklady na cementovou směs [Kč] <input type="text" value="1218000"/></p> <p>Celkové roční náklady [Kč] <input type="text" value="3528500"/></p> <p>Celkové roční náklady s rezervou [Kč] <input type="text" value="3881350"/></p>	<p>BITUMENACE</p> <p>Výpočet provozních nákladů za 1rok. Linka zvládne 1sud/h Maximální provozní doba je 2000h/rok Do ceny jsou pevně zahrnuty náklady na personál a údržbu</p> <p>Množství odpadu [m3] <input type="text" value="100"/></p> <p>Cena elektrické energie [Kč/1kWh] <input type="text" value="4,1"/></p> <p>Cena bitumenu[Kč/m3] <input type="text" value="21600"/></p> <p>Cena za 1 sud [Kč] <input type="text" value="850"/></p> <p>Výše rezervy [%] <input type="text" value="10"/></p> <p><input type="button" value="vypočítat"/></p> <p>Množství sudů [ks] <input type="text" value="625"/></p> <p>Náklady na elektrickou energii [Kč] <input type="text" value="935000"/></p> <p>Náklady na sudy [Kč] <input type="text" value="531250"/></p> <p>Náklady na bitumen [Kč] <input type="text" value="1620000"/></p> <p>Celkové roční náklady [Kč] <input type="text" value="3566250"/></p> <p>Celkové roční náklady s rezervou [Kč] <input type="text" value="3922875"/></p>	<p>PŘÍPOVRCHOVÉ ÚLOŽIŠTĚ</p> <p>Výpočet nákladů na výstavbu přípovrchového úložiště RAO a nákladů na zakonzervování jedné jímký</p> <p>Cena za 1m3 betonu na stavbu [Kč] <input type="text" value="2100"/></p> <p>Cena za dopravu 1m3 betonu [Kč] <input type="text" value="130"/></p> <p>Cena 1m2 PE fólie[Kč] <input type="text" value="230"/></p> <p>Cena za 1m3 betonu na vyfémání jímek [Kč] <input type="text" value="2300"/></p> <p>Rezerva projektu [%] <input type="text" value="15"/></p> <p><input type="button" value="vypočítat"/></p> <p>Náklady na výstavbu úložiště [Kč] <input type="text" value="292675000"/></p> <p>Náklady na výstavbu úložiště s rezervou [Kč] <input type="text" value="336576250"/></p> <p>Náklady na zakonzervování jedné jímký [Kč] <input type="text" value="600444,07"/></p> <p>Náklady na zakonzervování všech 112 jímek [Kč] <input type="text" value="67249735,84"/></p>