

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Technologické možnosti vitrifikace radioaktivního  
materiálu**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel BALÍČEK**  
Osobní číslo: **E14N0147P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Technologické možnosti vitrifikace radioaktivního materiálu**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište vznik a rozdělení radioaktivního odpadu
2. Uveďte jednotlivé možnosti zpracování radioaktivního odpadu
3. Detailně popište princip vitrifikace
4. Provedte analýzu fyzikálního principu tavení skla ve studeném kelímku
5. Navrhněte celý technologický proces vitrifikace ve studeném kelímku a pro navržený proces proveďte numerický výpočet

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na pochopení problematiky zpracování radioaktivních odpadů. Největší důraz je pak kladen na technologii vitrifikace. První část se zabývá vznikem a rozdělením radioaktivního odpadu. Dále jsou uvedeny základní možnosti zpracování radioaktivních odpadů. Následující část se podrobněji věnuje metodě vitrifikace. Poslední část se zabývá technologií studeného kelímku zvláště pak pro metodu vitrifikace včetně modelu pro numerický výpočet v multifyzikálním programu ANSYS.

## **Klíčová slova**

Radioaktivní odpad, vitrifikace, studený kelímek, tavení skla, metoda konečných prvků, program ANSYS.

## **Abstract**

The master theses is focused on understanding the problems of radioactive waste processing. The greatest emphasis is placed on the technology of vitrification. The first part deals with the production of radioactive waste and waste management. The following part describes the basic options for handling radioactive waste. And the next section deals in detail with the method vitrification of radioactive waste . The last part of the theses deals with using the cold crucible particularly for the vitrification method, including the model for numerical calculation by using ANSYS software.

## **Key words**

Radioactive waste vitrification, cold crucible, glass melting, finite element method, ANSYS software.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou 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 bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 22.8.2016

Bc. Pavel Balíček

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. a konzultantovi Ing. Janu Hrbkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 RADIOAKTIVNÍ ODPADY</b> .....	<b>12</b>
1.1 RADIOAKTIVITA .....	12
1.1.1 Jednotky radioaktivity .....	13
1.2 DEFINICE RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ .....	14
1.3 KLASIFIKACE RAO PODLE SKUPENSTVÍ .....	14
1.3.1 Pevné odpady.....	14
1.3.2 Kapalně odpady.....	14
1.3.3 Plynné odpady .....	15
1.4 KLASIFIKACE RAO PODLE PŮVODCE .....	15
1.4.1 RAO z jaderných elektráren .....	15
1.4.2 Institucionální RAO .....	17
1.5 KLASIFIKACE RAO PODLE AKTIVITY .....	17
1.5.1 Přechodné radioaktivní odpady.....	18
1.5.2 Nízkoaktivní odpady.....	18
1.5.3 Středně aktivní odpady.....	18
1.5.4 Vysokoaktivní odpady .....	18
1.6 KLASIFIKACE PODLE DOPORUČENÍ MAAE .....	19
1.7 NAKLÁDÁNÍ S RAO A VJP .....	21
1.7.1 Úložiště RAO v ČR.....	22
1.7.2 Ukládání VJP a vysokoaktivních odpadů.....	23
1.8 LEGISLATIVA NAKLÁDÁNÍ S RAO A VJP V ČR.....	23
1.8.1 Státní úřad pro jadernou bezpečnost .....	25
1.8.2 Správa úložišť radioaktivních odpadů .....	26
<b>2 MOŽNOSTI ZPRACOVÁNÍ RADIOAKTIVNÍHO ODPADU</b> .....	<b>27</b>
2.1 ZPRACOVÁNÍ RAO .....	27
2.1.1 Fragmentace.....	27
2.1.2 Nízkotlaké a vysokotlaké lisování .....	28
2.1.3 Odpařování přebytečné vody.....	28
2.1.4 Spalování.....	29
2.2 KONEČNÁ ÚPRAVA RAO .....	29
2.2.1 Bitumenace .....	29
2.2.2 Cementace .....	30
2.2.3 Polymerace.....	30
2.2.4 Vitrifikace .....	31
2.3 SROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ ZPRACOVÁNÍ RAO PODLE OBJEMOVÉ REDUKCE .....	31
<b>3 PRINCIP VITRIFIKACE</b> .....	<b>32</b>
3.1 JEDNOSTUPŇOVÝ SYSTÉM VITRIFIKACE.....	34
3.2 DVOUSTUPŇOVÁ VITRIFIKACE .....	36
3.3 VÝHODY A NEVÝHODY METODY .....	37
<b>4 FYZIKÁLNÍ PRINCIP TAVENÍ SKLA VE STUDENÉM KELÍMKU</b> .....	<b>38</b>
4.1 STUDENÝ KELÍMEK.....	38
4.1.1 Segmentový kelímek .....	39
4.1.2 Kelímek s integrovaným induktorem.....	40
4.2 TAVENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH MATERIÁLŮ VE STUDENÉM KELÍMKU.....	40

4.2.1	Tavení titanu.....	41
4.3	PRINCIP TAVENÍ SKEL VE STUDENÉM KELÍMKU .....	42
4.3.1	Vlastnosti skla.....	43
4.3.2	Tavení vložením elektricky vodivého kroužku .....	44
4.3.3	Tavení vložením elektricky vodivého prášku či granulí .....	45
4.3.4	Tavení pomocí přímého ohřevu vsázky .....	46
4.3.5	Tavení pomocí nepřímého odporového ohřevu .....	46
4.3.6	Tavení s využitím mikrovlnného ohřevu.....	46
4.4	VÝHODY POUŽITÍ STUDENÉHO KELÍMKU PRO METODU VITRIFIKACE .....	47
4.5	STUDENÝ KELÍMEK PRO VITRIFIKACI RADIOAKTIVNÍHO ODPADU V LA HAGUE.....	47
<b>5</b>	<b>NÁVRH TECHNOLOGICKÉHO PROCESU VITRIFIKACE .....</b>	<b>48</b>
5.1	ELEKTROMAGNETICKÉ POLE [27, 36].....	49
5.2	TEPLOTNÍ POLE .....	51
5.2.1	Okrajové podmínky teplotního pole.....	52
5.2.2	Tepelné ztráty ve studeném kelímku [36].....	53
5.3	ENERGETICKÁ NÁROČNOST STUDENÉHO KELÍMKU .....	54
5.4	NÁVRH STARTOVACÍ FÁZE PRO TECHNOLOGICKÝ PROCES VITRIFIKACE .....	55
<b>6</b>	<b>NUMERICKÝ MODEL PRO PROCES VITRIFIKACE VE STUDENÉM KELÍMKU.....</b>	<b>56</b>
6.1	METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MPK) .....	56
6.2	METODIKA TVORBY MODELU V PROGRAMU ANSYS.....	57
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>58</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>1</b>



## Seznam symbolů a zkratk

A.....	Aktivita (Bq)
ČR.....	Česká republika
EU.....	Evropská unie
IAEA.....	International Atomic Energy Agency
MAAE.....	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
RAO.....	Radioaktivní odpad
SÚJB.....	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SÚRAO.....	Správa úložišť radioaktivních odpadů
VJP.....	Vyhořelé jaderné palivo
$\sigma$ .....	Mechanická pevnost (MPa)
$\rho$ .....	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )
$\gamma$ .....	Koeficient tepelné roztažnosti (1/K)
$\lambda$ .....	Tepelná vodivost (W/m*K)
$\eta$ .....	Viskozita (Pa*s)
$C_p$ .....	Specifické teplo (J/kg*K)
$T_m$ .....	Teplota tání (°C)
G.....	Elektrická vodivost (S)
NR <sub>i</sub> .....	Normalizovaná míra vyluhovatelnosti radionuklidů (g/cm <sup>2</sup> *den)
V.....	Objem (m <sup>3</sup> )
h.....	Výška (m)
r.....	Poloměr (m)
f.....	Kmitočet (Hz)
$\epsilon_0$ .....	Součinitel emisivity (-)
$\vec{H}$ .....	Fázor intenzity magnetického pole (A/m)
H.....	Velikost intenzity magnetického pole (A/m)
$\mu_0$ .....	Permeabilita vakua (H/m)
$\mu_r$ .....	Relativní permeabilita (H/m)
$\epsilon_0$ .....	Permitivita vakua (F/m)
$\epsilon_r$ .....	Relativní permitivita (-)
I.....	Proud (A)
P.....	Ztráty (W)

---

$\eta$ .....	Účinnost (%)
$I$ .....	Proud (A)
$\xi$ .....	Tloušťka oxidů skull vrstvy (m)
$B$ .....	Magnetická indukce (T)
$J$ .....	Proudová hustota ( $A/m^2$ )
$E$ .....	Intenzita elektrického pole (V/m)
$\vec{E}$ .....	Fázor intenzity elektrického pole (V/m)
$\omega$ .....	Úhlová rychlost (rad/s)
$W_e$ .....	Elektrická energie (W)
$\varphi$ .....	Elektrický potenciál (V)

## Úvod

Dnešní svět si jen těžko představit bez využívání jaderné energie a ionizujícího záření. Přesto tyto pojmy v mnoha lidech vyvolávají spíše negativní emoce, někdy i strach. Setkáváme se s nimi nejen v jaderné energetice, ale i v řadě mnoha jiných oborů, jako jsou například: průmysl, zdravotnictví, stavebnictví, doprava či zemědělství. Každá lidská činnost se neobejde bez vzniku odpadů. Likvidace těchto odpadů byla v minulosti vedená s malým zájmem o životní prostředí. S příchodem klimatických změn, úbytku pitné vody ale i nežádoucím účinkům na lidské zdraví, se veřejnost začíná více zajímat o své životní prostředí. Zde se hodí uvést staré indiánské přísloví: „*Zacházejte se Zemí dobře. Země vám nebyla dána vašimi rodiči. Země vám byla propůjčena vašimi dětmi. Nedědíme Zemi od našich předků, půjčujeme si ji od svých dětí.*“.

Země EU každoročně vyprodukuje okolo 2 miliard tun odpadu všeho druhu. Musíme si ale uvědomit, že z celkového podílu produkce odpadu, představuje radioaktivní odpad pouze malou část produkce, jde o desetiny až setiny procent celkového podílu. Ale vzhledem k jejich dlouhodobému působení je potřeba jim věnovat pozornost. Bezpečné uložení radioaktivních odpadů spočívá v izolaci od biosféry, dokud jejich aktivita neklesne samovolným rozpadem na úroveň, která již není nebezpečná pro žádnou složku životního prostředí. Možností, jak zpracovávat radioaktivní odpad jsou hned několik. Záleží především na aktivitě a poločasu rozpadu odpadu. Tato práce se zabývá technologií vitrifikace. Původ slova vitrifikace lze nalézt v latině, latinské slovo „vitrum“ znamená v překladu sklo. Jak tedy překlad napovídá, vitrifikace je označení zatahování odpadu do skla. Sklo má pro tyto účely vhodné vlastnosti a to především: tvrdost, chemickou a tepelnou odolnost, nepropustnost pro páry a plyny. Vitrifikace má tedy oproti dalším možnostem zpracování radioaktivního materiálu výhodu především v eliminaci rizika koroze či stárnutí materiálu, v kterém je odpad uložen. [1, 2]

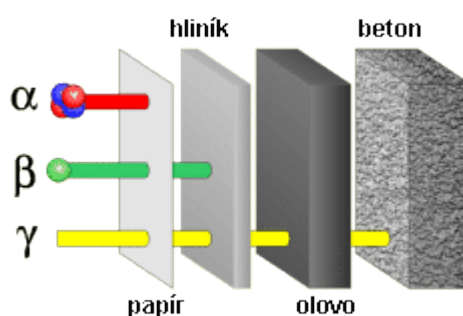
Poslední část práce je věnována vitrifikaci metodou „studný kelímek“, která je považována za druhou generaci vitrifikačních zařízení a která by měla v budoucnu nahradit současná vitrifikační zařízení využívající klasickou tavící nádobu.

# 1 Radioaktivní odpady

## 1.1 Radioaktivita

Radioaktivitou se rozumí jev, při kterém se rozpadají nestabilní jádra atomů v důsledku jejich energeticky nevhodným uspořádáním. Při tomto rozpadu se uvolňuje energie ve formě ionizujícího záření. Při jaderné přeměně se mění struktura jádra, nuklid jednoho prvku se mění na nuklid jiného prvku. Tyto nuklidy pak nazýváme jako radionuklidy. [3]

Radioaktivita byla objevena v roce 1896 francouzským fyzikem Henri Becquerelem při jeho pokusech s luminiscencí minerálů a krystalů. U uranové soli objevil neviditelné záření, které proniká krycím papírem a exponuje na fotografické desky. Tento jev nazval uranovým zářením. K objasnění radioaktivity pak o dva roky později přispěli manželé Pierre a Maria Curieovi, kteří se zabývali pokusy s uranovou rudou. V uranové rudě našli prvky polonia a radia, které aktivně vysílaly radiaci. Tento jev byl již nazván, tak jak ho známe dnes, radioaktivita. V roce 1899 novozélandský fyzik Ernest Rutherford našel dva rozdílné druhy záření, nazval je záření  $\alpha$  a záření  $\beta$ . Zjistil, že záření  $\alpha$  pohltí i list papíru, kdežto záření  $\beta$  je asi 100krát pronikavější a prochází i například hliníkovým plechem. O rok později pak francouzský fyzik Paul Ulrich Villard našel pronikavější záření, které bylo schopno proniknout několika centimetry betonu, a nazval jej zářením  $\gamma$ . [4]



Obr. 1.1 Pronikavost jednotlivých druhů záření [Převzato z [5]]

Různé druhy záření se tedy uvolňují různými radionuklidy. Záření  $\alpha$  je tvořeno jádry helia obsahující dva protony a dva neutrony. Typickými  $\alpha$ -zářiči jsou např. radium a plutonium. Vyskytují se především u prvků ze samého konce Mendělejevovy tabulky. Nejčastějším typem záření je záření  $\beta$ , které je tvořeno elektrony nebo kladně nabitými pozitrony. Používá se například k bezdotykovému měření tloušťky plechu. Jak je z obrázku 1.1 patrné, nejpronikavější je záření  $\gamma$ . Toto záření má podobu elektromagnetického záření s krátkou

vlnovou délkou. Nemá žádný náboj, lze ho tedy považovat za proud fotonů. Často se využívá jako rentgenové zařízení, pro člověka je ale nejvíce nebezpečným zářením. [4]

Obecně lze radioaktivitu rozdělit na přirozenou a umělou. Přirozená radioaktivita je charakteristická u nestabilních nuklidů, u kterých dochází k samovolné přeměně atomového jádra. Umělá radioaktivita je však vyvolána vnějším vlivem, například ostřelováním prvku  $\alpha$ -částicemi dojde k nárůstu energie uvnitř prvku a následnému rozpadu na jiný prvek. Umělou radioaktivitu získávají prvky transmutací, vlivem řízených řetězových reakcí nebo působením urychlených částic.

### 1.1.1 Jednotky radioaktivity

Veličina, která nám vyjadřuje míru radioaktivity, se nazývá aktivita. Okamžitá hodnota aktivity je definována jako počet jader, které se přemění za jednotku času. Okamžitá hodnota aktivity v čase  $t$  je tedy:

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} \quad (\text{rov. 1.1})$$

kde  $N(t)$  je počet dosud nepřeměněných jader v čase  $t$ . Jednotkou aktivity je tedy 1 rozpad za 1 sekundu. Po zavedení mezinárodně domluvené soustavy jednotek fyzikálních veličin, tzv. soustavy SI, byla aktivita na počest objevitele radioaktivity nazvána Becquerel (Bq). [3] [4]

$$1\text{Bq} = \frac{1 \text{ rozpad}}{1 \text{ sekundu}} \quad (\text{rov. 1.2})$$

V některých publikacích se můžeme setkat se starší jednotkou aktivity. Je to především u států, které nemají zavedenou soustavu SI. Starší jednotkou aktivity je tedy 1 Curie (1 Ci), pojmenován na počest manželů Curieových, kterým se podařilo získat první známý čistý radioizotop, a to 1 gram radia 226 na který byla tato jednotka vztažena. Přepočít těchto dvou jednotek je pak tedy:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq} \quad (\text{rov. 1.3})$$

## 1.2 Definice radioaktivních odpadů

Radioaktivní odpad (RAO) je definován jako materiál, který obsahuje, nebo byl kontaminován radionuklidy v koncentracích vyšších, než je uvolňovací úroveň, jak je stanoveno regulačními orgány jednotlivých zemí. Z toho vyplývá, že uvolňovací úroveň může být v jiných státech vyšší či nižší. Pro ČR vychází definice z tzv. Atomového zákona (tj. zákon č. 18/1997 Sb. v platném znění). [6]

## 1.3 Klasifikace RAO podle skupenství

Toto třídění nesouvisí s aktivitou radioaktivního odpadu, ale má důležitý význam pro výběr metody zpracování odpadu.

### 1.3.1 Pevné odpady

Mezi pevné odpady patří všechny pevné materiály, které obsahují nebo byly kontaminovány radionuklidy. Jelikož míra kontaminace se často liší, je proto důležité jejich třídění. Většinou sem patří ochranné pomůcky, jako jsou pláště či rukavice, ale i různé díly strojů nebo součásti technologických celků. Hlavním krokem při zpracování těchto odpadů je zmenšení objemu. To je pak realizováno metodami lisování, chemicky či spalováním. Pevný radioaktivní odpad se nejčastěji ukládá do ocelových sudů, které se poté zalévají cementovou směsí. [7]

### 1.3.2 Kapalné odpady

Tyto odpady představují největší hrozbu pro životní prostředí. Pro zabránění úniku těchto odpadů se proto musí využívat metod zpracování, které přemění kapalný odpad do pevné podoby. Tím se zvýší stabilita odpadu, což je důležité pro jeho následné ukládání. Kapalné odpady vznikají ve všech zařízeních, které pracují se zdroji ionizujícího záření. Odpady, které byly kontaminované krátkodobými nuklidy, se skladují do doby, než klesne jejich aktivita pod stanovené limity. Následně se už s těmito odpady pracuje jako s odpadovou vodou. Příkladem těchto odpadů jsou především vodné roztoky. Ostatní kapalné odpady, které byly kontaminované dlouhodobými nuklidy, musí být transformovány do pevné podoby. K tomu se využívá hned několik metod, jako jsou: cementace, bitumenace, vitrifikace. [7]

### 1.3.3 Plynné odpady

Plynné odpady, díky svému rychlému šíření, můžeme podobně jako kapalné odpady řadit mezi velmi rizikové. Většinou ale tyto odpady mají nízkou aktivitu, jsou to většinou krátkodobé zářiče, proto se velmi často řízeně vypouštějí do atmosféry. Řízené vypouštění plynných odpadů se odvíjí od stanovených limitů. Pokud je aktivita nad limity, plyn se na určitou dobu zadrží, po rozpadu nejaktivnějších radioizotopů se ale opět vypouští do atmosféry. Některé plynné odpady je nutné vypouštět přes filtry, jako třeba radioaktivní izotop jódu. [7]

## 1.4 Klasifikace RAO podle původce

Původce radioaktivního odpadu se dělí na jaderně energetickou sféru a na institucionální sféru. V každé z těchto sfér lze nalézt odpady různých aktivit.

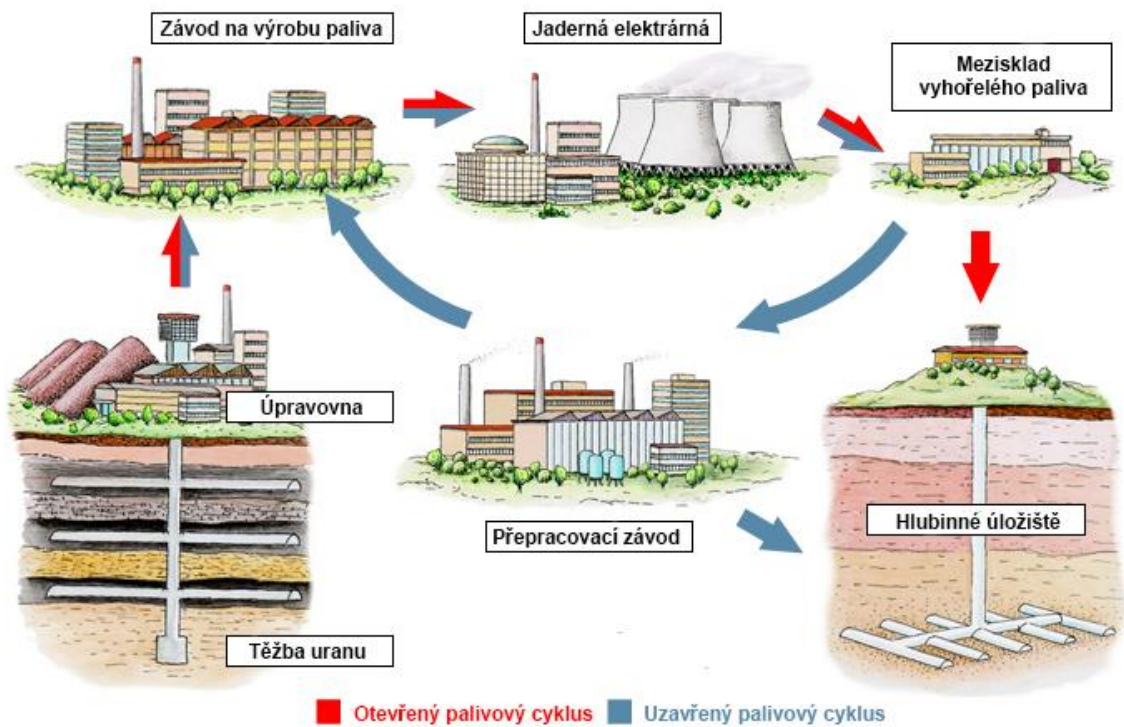
### 1.4.1 RAO z jaderných elektráren

Jak již název napovídá, tyto odpady vznikají během palivového cyklu jaderných elektráren. Palivový cyklus začíná těžbou uranové rudy, kterou je například smolinec. Těžba je realizována povrchovým nebo hlubinným způsobem. K získání 1 kg jaderného paliva je potřeba 2 až 4 tuny uranové rudy. Již při těžbě dochází ke kontaminaci přírodními radionuklidy, jsou ale brány za zdroje nerostů, přesto jsou na ně kladeny stejné požadavky v oblasti ochrany osob, jako u jiných zdrojů ionizujícího záření. Po mechanickém a chemickém zpracování rudy, vzniká tzv. žlutý koláč. Zde vznikají nízkoaktivní odpady, které mají podobu kalů, kapalných odpadů, filtračních materiálů a železného šrotu. [7, 8]

Při samotném provozu jaderných elektráren vzniká celá řada radioaktivních odpadů. Vedle vysokoaktivního vyhořelého paliva, dochází ke kontaminaci chladiva, konstrukčních materiálů nebo i pracovních pomůcek a ochranných obleků pracovníků elektrárny. Nízko a středně aktivní odpad je pak podle svého charakteru dále zpracován bitumenací, cementací nebo vitrifikací a následně uložen v úložišti.

Vyhořelé jaderné palivo (VJP) tvoří méně než 1 % objemu všech radioaktivních odpadů na světě, z hlediska aktivity ale obsahuje přes 90 % veškeré radioaktivity. V ČR v souladu s atomovým zákonem č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření, je VJP považováno za druhotnou surovinu, která se bude v budoucnu přepracovávat, a které nelze, pokud to jeho vlastník sám neurčí, považovat za odpad. [1]

Pro stanovení, kdy VJP bude považováno za radioaktivní odpad, je nutné si definovat druhy palivových cyklů. Názorné zobrazení palivových cyklů lze nalézt na obrázku 1.2.



Obr. 1.2 Schématické znázornění palivových cyklů [Převzato z [9]]

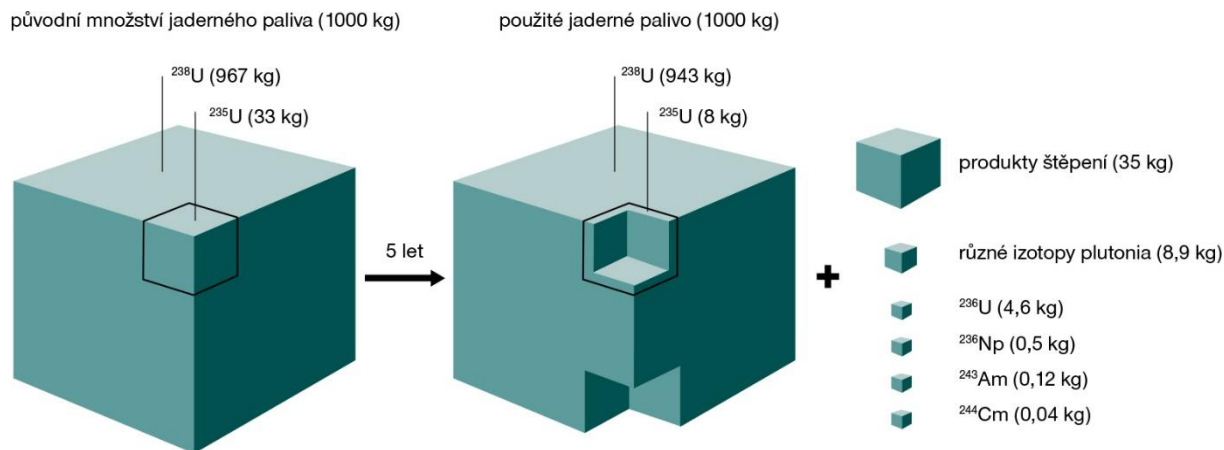
- **Otevřený palivový cyklus**

Tento cyklus nepočítá s přepracováním vyhořelého paliva. Palivo je na určitou dobu uloženo v meziskladu, kde klesá jeho radioaktivita a vyvíjené teplo. Tento cyklus představuje všechny činnosti od těžby uranové rudy, přes její zpracování do podoby jaderného paliva, až po konečné uložení vyhořelého jaderného paliva do hlubinného úložiště.

- **Uzavřený palivový cyklus**

Na rozdíl od otevřeného palivového cyklu, tento cyklus počítá s přepracováním paliva a jeho dalším využitím. Na obrázku 1.3 je zobrazeno, jak se jaderné palivo změní po „vyhoření“ v reaktoru. Z obrázku je patrné, že velká část využitelných štěpných zbytků může být znovu využita. Při přepracování vznikají odpady pouze z neštěpitelných zbytků. Proces přepracování jaderného paliva, je ale velmi nákladný. Jen malá část zemí se přepracováním paliva zabývá, mnoho zemí tedy spíše využívá otevřeného palivového cyklu. Mezi představitele zemí, které vlastní závody na přepracování paliva, můžeme řadit například Francii nebo Velkou Británii.





Obr. 1.3 Transformace jaderného paliva v reaktoru [Převzato z [1]]

### 1.4.2 Institucionální RAO

Institucionální odpady vznikají především ve zdravotnictví, výzkumných pracovištích, průmyslu či zemědělství. Hlavním problémem těchto odpadů je jejich rozmanitost rozsáhlost. Odpady vznikají na mnoha různých pracovištích v malém množství. Na rozdíl od odpadů z jaderných elektráren, které mají relativně stejnorodý charakter. Institucionální odpady tedy můžeme považovat za nejrizikovější z hlediska nakládání s nimi. Rozsáhlost a rozmanitost těchto odpadů má významný vliv na větší náročnost při jejich shromažďování a třídění. V důsledku těchto skutečností je zvýšená časová a ekonomická náročnost nakládání s těmito odpady.

Nakládání s převážnou většinou institucionálních odpadů vzniklých na území ČR zabezpečuje Ústav jaderného výzkumu Řež a.s., ten je zároveň největším producentem tohoto druhu odpadu. Produkuje zhruba 60 % z celkového množství, zároveň ale největším zpracovatelem těchto odpadů, zhruba 95 %. [7]

### 1.5 Klasifikace RAO podle aktivity

Asi nejdůležitějším parametrem pro rozdělení radioaktivních odpadů, je jeho aktivita. Podle intenzity záření a doby, po kterou toto záření produkuje, je možné radioaktivní odpad rozdělit do čtyř skupin.

### 1.5.1 Přejchodné radioaktivní odpady

V době vzniku tento radioaktivní odpad vykazuje malou míru radioaktivity, ale dostatečně velkou na to, že znemožňuje nakládat s ním jako s běžným odpadem. Většina radionuklidů v odpadu je krátkým poločasem rozpadu. Základní podmínkou pro klasifikování odpadu jako přechodného je, že po uplynutí doby pěti let poklesne aktivita natolik, že je možné s tímto odpadem nakládat jako s běžným odpadem. Nejčastěji se skladuje ve vymíracích komorách a skladech. Tento druh odpadu se nepočítá do celkového ročního množství vyprodukovaného RAO, jelikož nedochází k jeho ukládání, ale pouze ke skladování. Významnými producenty tohoto typu odpadu jsou zdravotnická zařízení. [6, 10]

### 1.5.2 Nízkoaktivní odpady

Nízkoaktivní odpady obsahují jen poměrně malé množství radionuklidů (množství menší než  $10^9$  Bq/m<sup>3</sup>), poločas rozpadu je okolo 30 let, a proto jsou tyto odpady ukládány převážně do povrchových úložišť. [10]

### 1.5.3 Středně aktivní odpady

U této kategorie odpadů se ještě uvolňuje teplo, proto pro převoz i skladování musí být stíněny. Jedná se většinou o předměty, které přišly do styku s jaderným palivem (povlaky paliva, zařízení na úpravu vyhořelého paliva, atd.). Poločas rozpadu těchto odpadů se pohybuje řádově ve stovkách let. Obsah radionuklidů je u těchto odpadů menší než  $10^{14}$  Bq/m<sup>3</sup>. Také tyto odpady jsou ukládány v povrchových nebo podpovrchových úložištích. [10]

### 1.5.4 Vysokoaktivní odpady

Hlavním kritériem pro přiřazení RAO do kategorie vysoko aktivních odpadů je nutnost stínění a odvodu tepla. Tyto odpady obsahují množství radionuklidů větší než  $10^{14}$  Bq/m<sup>3</sup>. Z celkové produkce tyto odpady představují pouze asi 1 % odpadu s 99 % radioaktivity. Přibližně z 90 % je pak vysoko aktivní odpad složen z vyhořelého jaderného paliva, pokud není považováno za surovinu. Dalším významným rysem tohoto druhu RAO je obsah velkého množství radionuklidů s dlouhým poločasem rozpadu nad sto tisíc let. Všeobecně se přijímá, že nejnebezpečnější doba je prvních 300 let po vzniku vysoko aktivního RAO. Během této doby zanikne většina krátkodobých radionuklidů, které jsou největším zdrojem tepla, a radioaktivita odpadu významně poklesne. [6, 10]

Do budoucna se předpokládá, že vyhořelé jaderné palivo (VJP) nebude považováno za odpad, ale jako surovina pro přepracování. Štěpné produkty odstraněné z jaderného paliva pak budou nejpravděpodobněji vitrifikací znehybněny a poté teprve uloženy do hlubinného úložiště.

## 1.6 Klasifikace podle doporučení MAAE

Zkratka MAAE je označení pro Mezinárodní agenturu pro atomovou energii. Někde se můžeme setkat se zkratkou IAEA, což je z anglického International Atomic Energy Agency. Tato agentura se sídlem ve Vídni v Rakousku, byla založena v roce 1957. V aktuálním roce 2016 má 168 členských států, Česká republika vstoupila v roce 1993. [17]

Jelikož problematika nakládání s RAO je celosvětová, a to včetně těch zemí, které nemají jaderně energetický program, stala se MAAE velice důležitou nezávislou mezivládní organizační složkou, která spolupracuje se všemi členskými státy. Především dohlíží a stanovuje pravidla pro mírové využívání jaderné energie a zároveň funguje jako kontrolní složka dodržování Smlouvy o nešíření jaderných zbraní. Spolupráce s MAAE přináší členským státům důležité informace o vývoji a ověřování metod bezpečnosti úložišť radioaktivních odpadů. Především pak přináší zprávy a různá doporučení, jak s RAO nakládat. Příkladem může být doporučená klasifikace RAO, která vydala MAAE v roce 1994 (viz. *Tab. 1.1*). [18]

Tab. 1.1 Klasifikace radioaktivních odpadů podle Mezinárodní agentury pro atomovou energii  
[Převzato z [18]]

kategorie	charakteristika	doporučený typ úložiště
<b>1. odpady potenciálně uváděné do životního prostředí</b>	Roční dávka připadající na vrub ozáření jednotlivce z obyvatelstva musí být nižší nebo rovna efektivní dávce 0,01 mSv	Žádné omezení
<b>2. nízko a středně aktivní odpad</b>	Aktivita radionuklidů je natolik nízká, že při jejich ukládání není nutno brát v úvahu vznik rozpadového tepla	Přípovrchové
<b>2a. nízko a středně aktivní odpady krátkodobé</b>	Obsahují radionuklidy o poločasu přeměny menším než 30 let a měrná aktivita dlouhodobých nuklidů nepřesahuje 4000 Bq/g v jednotlivé obalové jednotce, resp. 400 Bq/g jako průměr pro celé úložiště	Přípovrchové
<b>2b. nízko a středně aktivní odpady dlouhodobé</b>	Měrná aktivita dlouhodobých radionuklidů přesahuje limity uvedené v 2a	Hlubinné
<b>3. vysoce aktivní odpad</b>	Aktivita radionuklidů je tak vysoká, že při jejich ukládání je třeba brát v úvahu vznik přeměnného tepla. Hranicí je hodnota	Hlubinné

	tepelného výkonu 2kW/m <sup>3</sup>	
--	-------------------------------------	--

V roce 2008 MAAE vydala dokument (Classification of Radioactive Waste) s úpravou stávajícího doporučeného rozdělení RAO, přičemž zachovává stejné principy klasifikace dle předešlých rozdělení. Výsledkem bylo rozdělení a definice šesti skupin RAO: [18, 19]

1. **Odpady o radioaktivitách nižších než uvolňovací úroveň** – tyto odpady jsou po kontrole, kde obsah radionuklidů se považuje za zanedbatelný, brány jako běžný odpad a lze s ním zacházet bez omezení.
2. **Velmi krátkodobé odpady** – tyto odpady obsahují krátkodobé radionuklidy s poločasem rozpadu do 100 dnů. Jedná se především o odpady z výzkumu a zdravotnictví. Nejčastěji jsou pak skladovány ve vymíracích komorách a po rozpadu krátkodobých radionuklidů se s nimi zachází, jako s odpady dle bodu 1.
3. **Velmi nízko aktivní odpady** – jedná se o odpady s nízkou aktivitou radionuklidů, které se z ekonomických důvodů nevyplatí ukládat do obvyklých úložišť RAO. Ukládají se do skládek s nebezpečným odpadem, kde je nutné zamezit kontaminaci spodní a povrchové vody. Nejčastějšími zástupci těchto odpadů jsou: Hlušina z těžby radioaktivních surovin, kontaminovaná zemina, kontaminované materiály z průmyslu.
4. **Nízko aktivní odpady** – tyto odpady obsahují radionuklidy o aktivitách vyšších, než je uvolňovací úroveň, s omezeným množstvím dlouhodobých radionuklidů. Ukládají se do přípovrchových úložišť a je nutná jejich izolace a kontrola po dobu až několika set let. Další specifikací těchto odpadů je hodnota efektivní povrchové dávky, která může být maximálně 2 mSv/h.
5. **Středně aktivní odpady** – tyto odpady obsahují větší množství dlouhodobých radionuklidů, než v předchozím případě. Vzhledem k tomu je vyžadován vyšší stupeň kontroly a izolace. Ukládají se do podzemních úložišť desítky až stovky metrů pod zemským povrchem.

6. **Vysoko aktivní odpady** – tyto odpady obsahují velké množství radionuklidů s krátkým ale i dlouhým poločasem rozpadu. Vzhledem k jejich aktivitě dochází ke značnému uvolňování tepla. Ukládají se pak do hlubinných úložišť ve stabilních geologických formacích několik set metrů pod zemským povrchem. Nejčastějším typem těchto odpadů je pak vyhořelé jaderné palivo.

## 1.7 Nakládání s RAO a VJP

Jak již bylo zmíněno, v ČR v souladu s atomovým zákonem č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření, lze považovat radioaktivní materiál za odpad právě tehdy, když ho jeho vlastník určí za odpad. Nakládáním s RAO a VJP, pak rozumíme činnosti jako: [11]

- shromažďování,
- třídění,
- zpracování,
- úprava,
- skladování a
- ukládání.

Po určení radioaktivního odpadu za odpad svým vlastníkem, tedy vzniku RAO popřípadě VJP, jsou odpady nejdříve vhodně shromážděny a následně tříděny. Pro třídění odpadů je nutné znát jeho charakteristické vlastnosti, především fyzikální a chemické vlastnosti, které byly podrobněji vysvětleny v předchozích kapitolách. Charakterizace odpadu má značný vliv na to, jak bude s radioaktivními odpady dále nakládáno. Zároveň nám podává informaci o tom, jak s daným odpadem zacházet z hlediska bezpečnosti osob a životního prostředí.

Dalším krokem v nakládání s RAO je následné zpracování a úprava odpadu. Zpracováním se rozumí, že využitelné látky se v co největší možné míře oddělují a vracejí se k opětovnému použití tak, aby se co nejvíce z minimalizovalo množství zbylých a radioaktivních odpadů. Patří sem především technologické procesy pro zmenšení objemu odpadu. Úpravou RAO se pak rozumí úprava odpadu tak, aby byla zajištěna bezpečná přeprava, skladování a uložení odpadu. Jednotlivým technologiím zpracování a úpravy odpadu se podrobněji zabývám v kapitole 2.

Posledním krokem v nakládání s RAO je skladování a ukládání odpadu. Rozdíl mezi skladováním a ukládáním radioaktivního odpadu je v časovém omezení. Skladování RAO je jen na určitou dobu ve speciálně upravených skladech, kdežto ukládání je trvalé umístění RAO do prostor či objektu bez úmyslu jeho dalšího přemístění a manipulaci. Jedná se tedy o konečné umístění RAO. [11]

### 1.7.1 Úložiště RAO v ČR

Odpovědnost za bezpečné ukládání RAO převzal v roce 1997 na základě již zmíněného atomového zákona stát, respektive jím založená organizační složka Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO). Jejím hlavním úkolem je zajišťovat bezpečné ukládání RAO v souladu s požadavky na ochranu životního prostředí a osob před nežádoucími vlivy těchto odpadů na území ČR.

V ČR se nacházejí čtyři přípovrchová úložiště, která slouží k ukládání nízko a středně aktivních odpadů bez obsahu dlouhodobých radionuklidů. Z dosavadních čtyř přípovrchových úložišť jsou k dispozici tři, a to úložiště:

- Dukovany
- Richard
- Bratrství

**Úložiště Dukovany** se nachází v areálu jaderné elektrárny Dukovany. Je to největší a nejmodernější úložiště jaderného odpadu v ČR. V trvalém provozu je od roku 1995 a celkový objem úložných prostor je 55 000 m<sup>3</sup>, což dovoluje uložení zhruba 180 000 sudů. Pro představu v roce 2015 bylo v úložišti Dukovany uloženo 204 m<sup>3</sup> odpadu. Předpokládanému vyčerpání kapacity úložiště by mohlo dojít za stávajícího tempa v roce 2100. [12, 13]

**Úložiště Richard** se nachází nedaleko Litoměřic v prostorách bývalého vápencového dolu. Své jméno získalo po událostech za druhé světové války, kdy Němci v těchto prostorách budovali podzemní továrnu s krycím jménem Richard. V provozu je od roku 1964 a celkový objem úložných prostor pro radioaktivní odpad je 8 400 m<sup>3</sup>, což dovoluje uložení zhruba 28 000 sudů. V roce 2015 bylo v úložišti Richard uloženo 95,5 m<sup>3</sup>. Pokud v budoucnu nedojde k překročení maximálních hodnot uložených radionuklidů, uvažuje se o rozšíření kapacity tohoto úložiště. [12, 13]

**Úložiště Bratrství** se nachází u Jáchymova v prostorách bývalého uranového dolu, které má rozlohu 9,8 km<sup>2</sup>. Pro ukládání RAO zde byla v roce 1974 upravena Těžní štola a přilehlé komory. Celkový objem prostor pro ukládání RAO je přibližně 1 200 m<sup>3</sup>. V roce 2008 byla kapacita úložiště využita z více jak 80 %. Termín naplnění kapacity a uzavření tohoto úložiště je teď závislý na budoucím objemu radioaktivních odpadů. Důležité je zmínit to, že se zde ukládají pouze odpady s přirozenými radionuklidy. V roce 2015 zde bylo uloženo 68 sudů, které zaujímají 14,7m<sup>3</sup>. [12, 13]

Posledním úložištěm, které již bylo uzavřeno, je úložiště Hostim. V provozu bylo mezi roky 1959 až 1964. Nachází se v opuštěném vápencovém lomu nedaleko Berouna. Celkový objem úložiště byl 1690m<sup>3</sup>, v současnosti se zde nachází odpad o objemu 200m<sup>3</sup>. V úložišti byla v letech 1991 až 1994 provedena inventarizace a kontrola uložených odpadů. K definitivnímu uzavření a zabezpečení došlo v roce 1997, přispěl k tomu i fakt, že lokalita je součástí Chráněné krajinné oblasti Český kras. Nyní jsou monitorovány jeho vlivy na životní prostředí. [12]

### 1.7.2 Ukládání VJP a vysokoaktivních odpadů

Otázka co s vysokoaktivním odpadem a VJP je jedním z vážných problémů současné energetiky. VJP lze sice přepracovávat, ale i po přepracování zůstávají zbytky, které nejdou zneškodnit jinak než uložením v hlubinném úložišti. Navíc každý stát, který se rozhodl vyrábět elektrickou energii z jaderných zdrojů, musí převzít zodpovědnost v otázce zneškodnění všech odpadů vznikajících s touto činností. V současné době se v ČR projednává výstavba hlubinného úložiště pro VJP a vysokoaktivních odpadů. Pro výstavbu hlubinného úložiště je nutné nalézt geologicky vhodnou lokalitu, především je nutné brát v úvahu seismickou aktivitu a působení spodních vod. Z dosavadních variant se zdá nejlepší využití žulových, solných nebo jílových úložišť. Mezi zvažované lokality budoucí výstavby hlubinného úložiště v ČR patří: Čertovka, Březový potok, Magdaléna, Čihadlo, Hrádek, Horka a Kraví hora. Z těchto lokalit mají být vybrány dvě nejvhodnější. Výstavba by měla být zahájena do roku 2030 a provoz by měl být zahájen do roku 2065. [21, 22]

## 1.8 Legislativa nakládání s RAO a VJP v ČR

Radioaktivní odpady vznikaly na území ČR již od počátku osmnáctého století v souvislosti s využíváním rádia a uranu. Až v roce 1959 byl vytvořen celostátní systém svozu a

zneškodňování radioaktivních odpadů, který byl provozován Ústavem pro výzkum, využití a výrobu radioizotopů. Celkové náklady spojené s trvalým zneškodněním neenergetických odpadů hradil do roku 1990 stát. Od roku 1991 do roku 1997, začali původci RAO hradit náklady spojené s úpravou radioaktivních odpadů pro jeho uložení. V roce 1997, kdy vešel v platnost tzv. „Atomový zákon“ (tj. zákon č. 18/1997 Sb. v platném znění), došlo k razantní změně financování likvidace RAO, a které platí dodnes. Důležité je zmínit fakt, že nakládání s RAO a VJP nespadá pod tzv. „Odpadový zákon“ (tj. zákon č. 185/2002 Sb.). [6] [14]

Po uzákonění Atomového zákona vznikl tzv. „Jaderný účet“. Ten spravuje stát prostřednictvím Ministerstva financí a České národní banky. Na tento účet jsou původci RAO povinni ukládat finance ke krytí nákladů spojených s ukládáním radioaktivních odpadů, které vznikly nebo teprve vzniknou a s tím spojených činností. Pro představu, na tento účet odvádí provozovatel z každé MWh elektrické energie vyrobené v jaderné elektrárně 50 Kč. Pro radioaktivní odpady z jiných sfér je pak vybírán poplatek podle druhu odpadu a aktuálního sazebníku. [1, 6]

Z hlediska zpracování odpadů z jaderných elektráren, kdy bychom se měli snažit co nejvíce redukovat objemy těchto odpadů, by bylo vhodné se zamyslet nad změnami v legislativě, konkrétně v otázce poplatků odváděných na Jaderný účet. V současnosti provozovatel jaderných elektráren v ČR (tedy ČEZ, a.s.) není nucen minimalizovat objemy RAO z jaderných elektráren, jelikož odvádí poplatky z množství vyrobené elektrické energie, ale nikoliv za množství ukládaného RAO.

Jelikož se jedná o vysoce nebezpečné odpady, je nutné tyto odpady přísně evidovat a kontrolovat, především pak díky jejich vlivu na životní prostředí, osoby a jejich možnému zneužití. Pro tyto účely zřídil stát:

- Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB) a
- Správu úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO).



### 1.8.1 Státní úřad pro jadernou bezpečnost

Tento úřad vznikl 1. 1. 1993, jako následovník Československé komise pro atomovou energii. SÚJB vykonává státní správu a dozor při využívání jaderné energie a ionizujícího záření. Náplní SÚJB je: [15]

- *„výkon státního dozoru nad jadernou bezpečností, jadernými položkami, fyzickou ochranou jaderných zařízení, radiační ochranou a havarijní připraveností v prostorách jaderných zařízení;*
- *povolování výkonu činností na základě zákona o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření č. 18/1997 Sb. (Atomový zákon), např. k umístování a provozu jaderného zařízení a pracoviště s velmi významnými zdroji ionizujícího záření, nakládání se zdroji ionizujícího záření a radioaktivními odpady, přepravě jaderných materiálů a radionuklidových zářičů;*
- *schvalování dokumentace, vztahující se k zajištění jaderné bezpečnosti a radiační ochrany, stanovené atomovým zákonem, limitů a podmínek provozu jaderných zařízení, způsobu zajištění fyzické ochrany, havarijních řádů k přepravám jaderných materiálů a vybraných radionuklidových zářičů, vnitřních havarijních plánů jaderných zařízení a pracoviště;*
- *stanovení podmínek a požadavků radiační ochrany obyvatel a pracovníků se zdroji ionizujícího záření (např. stanovení limitů ozáření, vymezení kontrolovaných pásem), stanovení zóny havarijního plánování a požadavků havarijní připravenosti držitelů povolení dle atomového zákona;*
- *sledování stavu ozáření obyvatelstva a pracovníků se zdroji ionizujícího záření;*
- *koordinace činnosti radiační monitorovací sítě na území ČR a zajišťování mezinárodní výměny dat o radiační situaci;*
- *vedení státního systému evidence a kontroly jaderných materiálů, státních systémů evidence držitele povolení, dovážených a vyvážených vybraných položek, zdrojů ionizujícího záření;*
- *odborná spolupráce s Mezinárodní agenturou pro atomovou energii;*
- *poskytování údajů o hospodaření s radioaktivními odpady obcím a okresním úřadům na jimi spravovaném území a přiměřených informací o výsledcích činnosti úřadu veřejnosti a vládě ČR;*

- poskytování údajů o měření a hodnocení účinků jaderných, chemických a biologických látek na člověka a prostředí včetně hodnocení stupně ochrany individuálních a kolektivních prostředků ochrany člověka před těmito látkami;
- koordinace a zabezpečování činností při plnění úkolů plynoucí z Úmluvy o zákazu vývoje, výroby, hromadění zásob a použití chemických zbraní a jejich zničení ve smyslu zákona č. 19/1997 Sb. a Úmluvy o zákazu biologických a toxinových zbraní ve smyslu zákona č. 281/2002 Sb.;
- výkon působnosti národních úřadů podle Smlouvy o všeobecném zákazu zkoušek jaderných zbraní, Úmluvy o zákazu biologických a toxinových zbraní a Úmluvy o zákazu vývoje, výroby, hromadění zásob a použití chemických zbraní a jejich zničení. “

### 1.8.2 Správa úložišť radioaktivních odpadů

Pro zajištění činností spojených s ukládáním RAO byla 1. 6. 1997, na základě již několikrát zmiňovaného atomového zákona, zřízena Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR zřízena Správa úložišť radioaktivních odpadů. SÚRAO se pak od roku 2000 na základě § 51 zákona č. 219/2000 Sb. stala organizační složkou státu. Náplní SÚRAO je: [16]

- „zajištění přípravy, výstavby, uvedení do provozu, provoz a uzavření úložišť radioaktivních odpadů a monitorování jejich vlivu na okolí;
- zajištění nakládání s radioaktivními odpady;
- zajištění úpravy vyhořelého nebo ozářeného jaderného paliva do formy vhodné pro uložení nebo následné využití;
- vést evidenci převzatých radioaktivních odpadů a jejich původců;
- spravovat odvody původců radioaktivních odpadů na jaderný účet;
- vypracovávat návrhy na stanovení odvodů plátců na jaderný účet;
- zajišťovat a koordinovat výzkum a vývoj v oblasti nakládání s RAO;
- kontrolovat rezervy držitelů povolení na vyřazování jejich zařízení z provozu;
- poskytovat služby v oblasti nakládání s RAO;
- nakládat s RAO, které byly dopraveny na území ČR ze zahraničí a nelze je vrátit;
- zajišťovat prozatímní správu RAO, které připadly do vlastnictví státu. “

## 2 Možnosti zpracování radioaktivního odpadu

Při nakládání s radioaktivními odpady se snažíme co nejvíce zmenšit objem těchto odpadů a zároveň převést radioaktivní nuklidy do stabilní nerozpustné formy, změnami jejich fyzikálních popřípadě chemických vlastností tak, aby výsledný odpadový produkt byl co nejvíce bezpečný pro osoby a životní prostředí, a zároveň zaujímal co nejmenší prostor při jeho konečném uložení. Samotná úprava a zpracování RAO před jeho konečným uložením závisí zejména na typu a skupenství odpadu.

Možnosti zpracování RAO můžeme rozdělit na dvě fáze, fáze samotného zpracování a fáze konečné úpravy. Konečná úprava má za cíl především připravit RAO na konečné uložení, tzn. zvýšení odolnosti proti degračním procesům, dostatečná mechanická a radiační stabilita a co největší stabilita fyzikálních a chemických vlastností.

Možností zpracování a úpravy RAO je celá řada. V následujících podkapitolách budou popsány základní a nejčastěji používané metody zpracování a úpravy těchto odpadů.

### 2.1 Zpracování RAO

Jak již bylo několikrát zmíněno, pro zpracování RAO je nejdůležitější redukce objemu a oddělení aktivních radionuklidů od zbytku zpracovávaného materiálu. Konečným produktem zpracování by tedy měla být látka, která byla zbavena nekontaminovaných částí. Tento produkt buď prochází následující konečnou úpravou, kdy dochází k izolaci radionuklidů, nebo v případě přechodných RAO skladován po určitou dobu a následně uvolňován do životního prostředí.

#### 2.1.1 Fragmentace

Fragmentací ve zpracování RAO rozumíme dělení velkých kusů pevných RAO. Takovými odpady mohou být například nádrže, porubí, kusy betonu atp., které obsahují nebo byly vystaveny působením radionuklidů. Fragmentací těchto velkých kusů získáváme menší části odpadů o vhodných rozměrech, které pak dále zpracováváme, nebo je již přímo ukládáme. Samozřejmě lze i oddělit neaktivní část materiálu. Pro rozdělení velkých kusů se používají nástroje a technologie jako: hydraulické nůžky, mechanická pila, řezání kyslíko-acetylenovým plamenem, plazmové řezání, řezání diamantovým kabelem atd.. [6]

Fragmentace je používána ve všech zpracovatelských centrech po celém světě a zároveň se jedná technologii běžně používanou i mimo jaderný sektor. [6]

### 2.1.2 Nízkotlaké a vysokotlaké lisování

Nízkotlaké a vysokotlaké lisování je snadnou a osvědčenou metodou pro efektivní zmenšování objemu RAO. Lisování je založené na stlačování pevného odpadu pomocí hydraulického, pneumatického nebo šroubového pístu. Tato technologie je velmi dobře známa a umožňuje nám snadnou instalaci a obsluhu. Nízkotlaké lisy pracují se silou do 2 000 kN a redukce objemu může být až 4:1. Závisí to především na materiálových vlastnostech lisovaného odpadu. Vysokotlaké lisy pracují se silou až 20 000 kN a redukce objemu bývá cca od 2:1 do 10:1. Vysokotlaké lisování se také občas označuje jako superlisování. Na rozdíl od nízkotlakého lisu je vysokotlaký lis investičně a provozně velmi nákladný, zároveň je citlivější na chyby obsluhy. Vylisovaná odpad se většinou dále zpracovává, využívá se často metody cementace. Vylisovaný odpad sice radikálně zmenší svůj objem, ale jeho fyzikálně-chemické vlastnosti zůstávají stejné. [6]

### 2.1.3 Odpařování přebytečné vody

Již z názvu je patrné, že se jedná o metodu zpracování kapalných odpadů. Odpařování vody je jednou z neúčinnějších metod redukce objemu kapalných RAO. Objemová redukce může být v závislosti na koncentraci a druhu odpadu až  $10^5$ . Po odpaření vody je většina radionuklidů obsažena v pevných zbytcích, nejčastěji ve formě solí. Největším problémem při zpracování odpadu touto metodou je únik nežádoucích plyných produktů, především pak těkavých sloučenin jódu a plyného tritia. Proto je součástí každé odpařovací stanice filtrační technika. Proces odpařování, který probíhá v tzv. odparkách, je zpravidla ukončen dříve, než se odpaří všechna voda. Je to z toho důvodu, aby odpad by stále v tekuté formě a dal se lépe transportovat z odparek k dalšímu zpracování. Výsledný koncentrát se před konečným uložením dále upravuje (např. bitumenací). [18]

Další výhodou je, že odpařená a následně znovu zkondenzovaná voda se bez dalšího zpracování dá znovu využít, nebo vypustit do životního prostředí. Jako hlavní nevýhodu této metody pak můžeme brát její finanční náročnost. Jelikož se jedná o tepelný proces, je s tím spojena vysoká energetická náročnost. [20]

### 2.1.4 Spalování

Spalováním spalitelných RAO lze dosáhnout vysoké objemové redukce. Konečným produktem je pak radioaktivní popel, jehož složení závisí na použité technologii a vlastnostech spalovaného odpadu. Technologií spalování je celá řada. Mezi ty, které se nejvíce využívají, patří: Spalování při nadbytku vzduchu, Spalování při kontrolovaném přístupu kyslíku, pyrolýza, vysokoteplotní spalování a spalování ve fluidním loži. Při spalování ovšem dochází k určitému úniku radionuklidů v podobě radioaktivních plynů. Proto musí spalovny radioaktivních odpadů využívat sofistikovaný filtrační systém, jehož typ závisí na spalovací technologii, charakteru spalovaného odpadu a na legislativě z hlediska uvolňovacích úrovních. [6]

Kromě vysoké objemové minimalizace, která je u pevných RAO v poměru mezi 80:1 až 110:1, se mezi výhody spalování odpadu řadí chemická stálost popela a nespalitelných látek, a zároveň možnost spalovat tekuté hořlavé odpady a pryskyřice společně s pevným odpadem. Mezi hlavní nevýhody ovšem patří: vysoké investiční a provozní náklady, nákladná a náročná filtrace plynů, vzhledem k vlastnostem popelu náročné a bezpečnostně problematické zacházení s radioaktivním popelem. [6]

## 2.2 Konečná úprava RAO

Konečná úprava má především za cíl izolovat aktivní radionuklidy, zajistit bezpečnost před únikem těchto radionuklidů, zajistit co největší odolnost izolace proti degradačním procesům. Výsledný produkt konečné úpravy lze pak ukládat do prostor jeho trvalého umístění.

### 2.2.1 Bitumenace

Bitumenace je tepelný proces zpevňování především kapalných RAO a kalů. Bitumen je organická látka ve formě živice. Proces bitumenace probíhá při teplotách 160 – 200 °C, kdy je bitumen roztaven (záleží na druhu bitumenu), následně se přidává do směsi předeřáté kapalné RAO. Vlivem vysoké teploty se ze směsi odpařuje voda, vznikají krystaly solí a různé další tuhé částice, které následně zůstávají zachycené v bitumenové matici. Vzhledem k odpařování kapalného RAO musí být zajištěna filtrace odpařovaných plynů. Vzniklá směs RAO se pak nalévá do 200 litrových sudů, kde poté ztuhne. [6]

Tato metoda zpracování kapalných RAO se stala velmi rozšířenou. Mezi přednosti této metody patří především objemová redukce výsledného produktu, vysoká plasticita, materiálová dostupnost a radiační stálost. Mezi nevýhody lze pak řadit hořlavost, nízká tepelná vodivost a pokles viskozity s rostoucí teplotou. [6]

### 2.2.2 Cementace

Cementace je proces fixace RAO do cementové matrice. Čistá cementová matrice však není schopna dlouhodobě vázat radionuklidy. Z tohoto důvodu se do cementové směsi přidávají různá aditiva, především pak typy anorganických sorbetů. Metoda se dá využít pro zpracování kapalných, ale i pevných RAO. Při zpracování pevných RAO se prolévá pevný odpad s již předem připravenou cementovou kaší. Kdežto při zpracování kapalných RAO se kapalný odpad přímo smíchává s připravenou směsí pojiva. Výsledná cementová kaše se nechá ztuhnout, kdy při procesu tuhnutí dochází k částečnému odpařování vody. Zpracování kapalných RAO cementací je náročnější z hlediska dávkování surovin vstupujících do procesu. Zvýšená pozornost je pak u vodního součinitele pro daný typ cementu s aditivem. Celý proces cementace probíhá za normálních teplot. [6]

Mezi výhody metody cementace patří zejména nehořlavost, dlouhá stálost, pevnost v rázu a tlaku, nízká cena cementu, jednoduchá a levná technologie výroby. Hlavní a největší nevýhodou této metody oproti jiným metodám je značný nárůst objemu odpadu. Mezi další nevýhody můžeme řadit vysokou vyluhovatelnost, problémy při zpracování kyselých roztoků (nutná úprava pH nebo chemického složení odpadu) a například i k možnému praskání a bobtnání při styku s vodou. [6]

### 2.2.3 Polymerace

Polymerace se využívá pro zpracování kapalných RAO. Tyto odpady se zabudovávají do umělých hmot, především se využívají polyestery, vinylestery nebo epoxidové pryskyřice. Hlavní výhodou je nízká vyluhovatelnost a díky vlastnostem umělých hmot také vysoká chemická stabilita. Proces polymerace je ovšem velice nákladný a vyžaduje technologicky složité zařízení, proto se využívá jen ve výjimečných případech, kde nelze využít metody bitumenace nebo cementace. [20]

## 2.2.4 Vitřifikace

Vitřifikace je proces fixace RAO do skelné matrice. Tato celosvětově uznávaná metoda se především využívá pro zpracování vysokoaktivních kapalných RAO. Lze ji ovšem také využít pro zpracování nízko a středně aktivních odpadů. Na rozdíl od předchozích metod zpracování odpadu má výsledná směs nejlepší stabilitu z hlediska radiačního namáhání. Další nespornou výhodou je vysoká objemová redukce. Mezi hlavní nevýhodu této metody můžeme brát její vysokou finanční náročnost. [6]

Podrobněji se budu technologií vitřifikace zabývat v kapitole č. 3.

## 2.3 Srovnání technologií zpracování RAO podle objemové redukce

Pro zhodnocení jednotlivých výše popsaných možností zpracování RAO byla vytvořena tabulka 2.1. V tabulce jsou uvedené jednotlivé technologie zpracování, ke kterým jsou pak přiřazeny jednotlivé typy odpadů, na které lze danou metodu využít. V posledním sloupci je uvedený redukční faktor. Ten nám říká, kolikrát při dané technologii a typu odpadu se zmenší jeho objem. Pokud je redukční faktor označen jako menší než jedna, znamená to, že v důsledku použití dané technologie dochází k nárůstu objemu.

Tab. 2.1 Srovnání jednotlivých technologií zpracování RAO podle jejich redukčního faktoru

[Převzato z [6]]

Technologie	Použitelnost (typy RAO)	Redukční faktor
Bitumenace	Koncentráty	2 - 3
	Ionexy a kaly	< 1
Cementace	Koncentráty	1
	Kovové RAO (prolévání)	< 1
	Ionexy a kaly	< 1
	Ostatní pevné RAO	< 1
Nízkotlaké lisování	Pevné spalitelné	2 - 4
	Nespalitelné, lisovatelné	2 - 4
Vysokotlaké lisování	Ostatní pevné RAO	2 - 3
	Nespalitelné, lisovatelné	2 - 10
Fragmentace	Kovové RAO	1 - 2
Odpařování vody	Koncentráty	50 - 10 <sup>5</sup>
Polymerace	Koncentráty	< 1
Spalování	Pevné spalitelné	80 - 110
	Ionexy a kaly	80 - 110
	Organické kapaliny	80 - 110
Vitřifikace	Pevné spalitelné	50 - 100
	Ionexy a kaly	50 - 100
	Koncentráty	10 - 50

Z tabulky 2.1 vyplývá, že nejefektivnějším způsobem zpracování RAO z hlediska minimalizace těchto odpadů, je vhodné využít metod odpařování přebytečné vody, spalování a vitrifikace. Jejich značnou nevýhodou je ale jejich provozní a finanční náročnost. Zároveň lze tyto metody využít jen pro určité typy RAO. Z těchto důvodů jsou pak nejpoužívanější metody cementace a bitumenace.

### 3 Princip vitrifikace

Vitrifikace je proces zpracování RAO, při kterém dochází k fixaci radionuklidů do skelné matrice. Vlastnosti skelné matrice, kterými například jsou chemická odolnost, nízká vyluhovatelnost, nehořlavost, mechanická pevnost, odolnost proti korozi a radiaci, nám pomáhají zaručit minimální dopad toxicity radioaktivních odpadů na životní prostředí.

Princip vitrifikace spočívá ve vkládání materiálu (RAO) do roztavené skelné hmoty při teplotách 1 000 – 2 000 °C, kdy vzniká homogenní směs, která se vylévá do vhodné nádoby (tzv. patrony), a která utuhne ve výsledný sklovitý produkt. Samotné tavení se provádí ve sklářských pecích s elektrickým odporovým ohřevem, nebo v indukčních tavicích zařízeních o střední nebo vysoké frekvenci. Sklo je ale za normálních podmínek dobrým izolantem, jelikož má velmi nízkou vodivost. Ovšem se vzrůstající teplotou dochází k porušení jeho struktury a klesá jeho odpor. Při pracovních teplotách vitrifikace je již sklo v kapalně formě, má dostatečně porušenou vnitřní strukturu a stává se elektricky vodivým. Pro iniciaci vitrifikace se z důvodů fyzikálních vlastností skla přidávají vhodné vodivé příměsi, nebo je sklo napřed roztaveno formou předehřevu. Ten lze například provést nepřímým odporovým ohřevem nebo předehřátím pomocí plynových ohříváků. Samotný princip vitrifikace pak začíná až při teplotách vyšších než 1 000 °C. Při vysokých teplotách tavení zároveň dochází k objemové redukci vkládaného materiálu. Pro princip vitrifikace je nejvíce využíváno borosilikátové sklo. Přesné chemické složení skla je závislé na typu zpracovávaného materiálu, obsahuje především ale tyto oxidy:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ . Složení skel jednotlivých vitrifikačních zařízení používaných ve světě pro zpracování RAO lze nalézt v tabulce 3.1. Další možností je využití fosfátového skla, které se využívá především v Rusku. Fosfátové sklo má oproti borosilikátovému sklu výhody v nižší teplotě tání a v procentuálním množství odpadu, které dokáže pojmout na podíl sklotvorného materiálu. Značnou nevýhodou je ovšem agresivita vůči kovovým materiálům, což ztěžuje následné ukládání odpadu. Zároveň má oproti borosilikátovému sklu nižší odolnost vůči vyluhování. V průběhu vývoje vitrifikační metody



byly ještě vyzkoušeny olovnatá a titanová skla. Nejvíce se však osvědčila borosilikátová skla, která se s výjimkou Ruska používají téměř všechna zařízení zabývající se vitrifikací RAO. [6, 23]

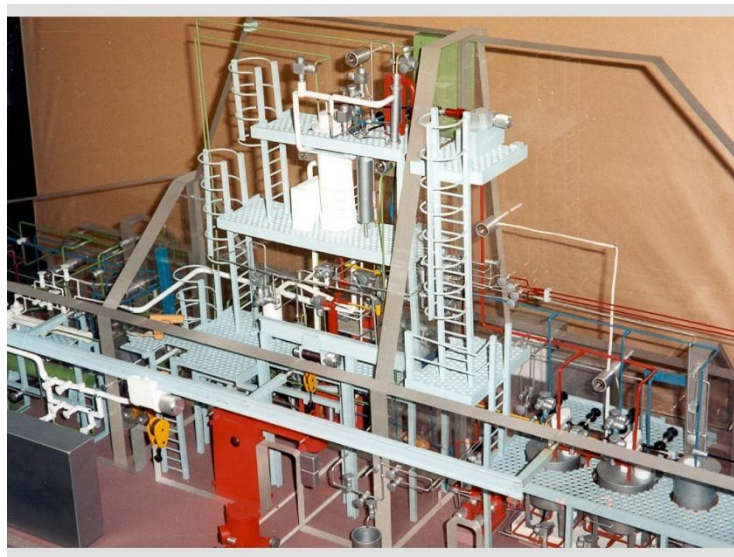
Tab. 3.1 Vitrifikační zařízení pro zpracování RAO a složení používaných skel. |Převzato z [3]|

Stát (Označení skla)	Podíl látky v [%]							
	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	ostatní
Francie (R7/T7)	47,2	-	14,9	4,4	4,1	-	10,6	18,8
USA (DWPF)	49,8	-	8,0	4,0	1,0	1,4	8,7	27,1
USA (SRNL)	30,5	1,1	15,2	25,0	6,1	0,1	9,6	13,5
UK (WVP)	47,2	-	16,9	4,8	-	5,3	8,4	17,4
Německo – Belgie (Pamela)	52,7	-	13,2	2,7	4,6	2,2	5,9	18,7
Rusko (Mayak)	-	52,0	-	19,0	-	-	21,2	7,8
Rusko (Radon K-26)	43,0	-	6,6	3,0	13,7	-	23,9	9,8
Japonsko (P0798)	46,6	-	14,2	5,0	3,0	-	10,0	20,2
Čína	46,2	-	13,4	4,2	2,5	1,5	9,1	23,1

Technologie vitrifikace se využívá především pro zpracování vysokoaktivní odpadů. Lze ji ale také využít ke zpracování středněaktivních odpadů. Například pro středněaktivní koncentráty z provozu jaderných elektráren typu VVER, které obsahují vysoký obsah boritanů a alkalických iontů, lze využít vitrifikace za tvorby borosilikátových skel. Díky obsahu koncentrátu lze pak přidat jen malé množství sklotvorných přísad a dosáhnout velké redukce objemu. [6]

Největším průkopníkem v oblasti technologie vitrifikace se stala Francie. Již v 50. letech 20. století bylo borosilikátové sklo doporučeno francouzskou Komisí pro atomovou energii (CEA - Commissariat à l'énergie atomique) jako vhodný materiál pro dlouhodobé uskladnění vysokoaktivních odpadů. Ve Francii byl poté vybudován celosvětově první vitrifikační prototyp s označením PIVER. Ten byl spuštěn v roce 1969 v Marcoule a byl provozován do roku 1980. Spolu s Francií byl prováděn vývoj technologie vitrifikace především v Rusku, Německu, Belgii, U.S.A a Japonsku. V ČR se touto technologií zabývá především Ústav jaderného výzkumu Řež (ÚJV Řež). Na Slovensku je pak provozováno vitrifikační zařízení v Jaslovských Bohunicích. Zde je zpracovávané kontaminované chladicí médium vzniklé po skladování palivových článků z reaktoru A1 z přilehlé jaderné elektrárny. Tento reaktor s označením A1 byl již v roce 1977 uzavřen z důvodu havárie a od roku 1979 probíhá jeho postupná likvidace. Veškeré jaderné palivo bylo na základě mezinárodní dohody odvezeno do Ruska, ovšem zůstaly zde různé vysokoaktivní odpady. Vitrifikační zařízení v Jaslovských

Bohunicích (viz obr. 3.1) se pak zabývá zpracováním tzv. chrompiku. Jedná se o směs chromanu a dvojjchromanu draselného, který byl použit k chlazení paliva.[23]



Obr. 3.1 Model vitrifikační linky v Jaslovských Bohunicích [Převzato z [33]]

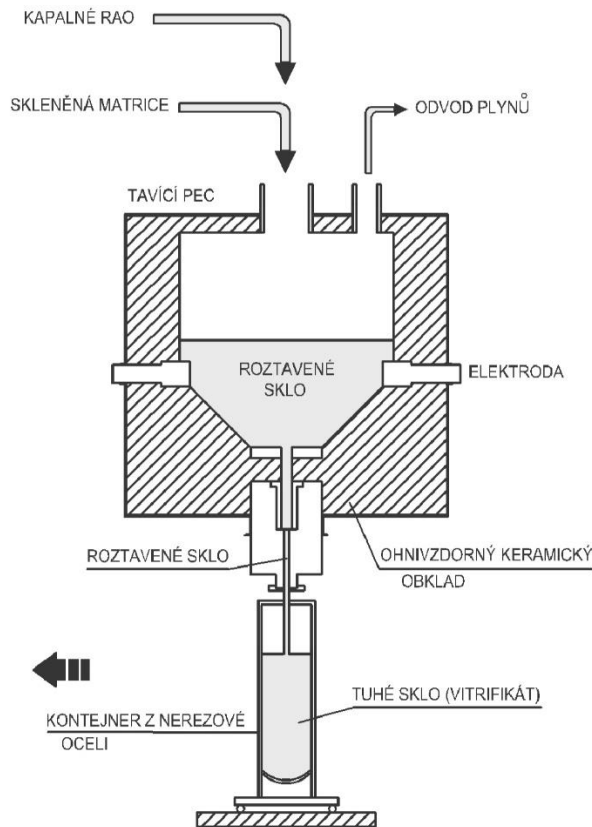
Metodu vitrifikace můžeme obecně rozdělit podle způsobu ohřevu, přesněji podle použitého zdroje k ohřevu. Jedná se především o zdroje elektrické anebo zdroje tepelné z fosilních paliv. Pro zdroje z fosilních paliv se většinou jedná o využití výtavných ohnišť nebo rotačních pecí. Nevýhodou tohoto systému je znečištění výsledné taveniny spalinami, proto se příliš nevyužívá. Naopak pro zpracování vysokoaktivního odpadu se především využívá zdrojů elektrické energie.

Dále můžeme metodu vitrifikace rozdělit podle toho, jakým způsobem a v jaké formě se vkládá materiál do roztavené skelné hmoty, a to na:

- jednostupňový systém vitrifikace a
- dvoustupňový systém vitrifikace.

### 3.1 Jednostupňový systém vitrifikace

Tento systém se jinak označuje zkratkou LFCM (z anglického Liquid fed ceramic melter). V tomto systému je kontaminovaný materiál přiváděn přímo do taveniny skla, nebo je napřed smíchán s kompozity skla (v tzv. homogenizátoru) a následně dávkován do tavící pece. [6]



Obr. 3.2 Jednostupňová tavíčí pec [Převzato z [6]]

Proces tavení je zobrazen na obrázku 3.2, kdy tavení probíhá ve speciální žáruvzdorné keramické tavíčí peci s elektrodami. Využívá se vzniku Joulova tepla ve vsázce, kdy mezi elektrodami a taveným materiálem prochází proud, přičemž dochází ke vzniku Jouleových ztrát, které jsou definovány jednoduchým vztahem:

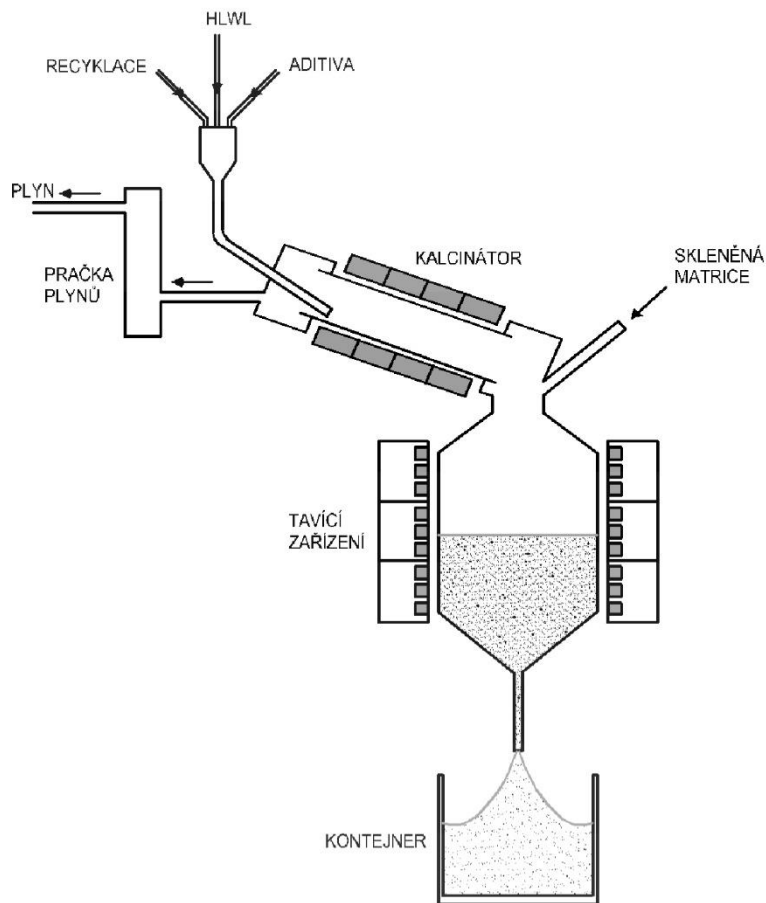
$$P = R \times I^2 [W] \quad (\text{rov. 3.1})$$

Roztavený materiál se pak vylévá do předem připravené patrony (většinou se jedná o kontejner z nerezové oceli), kde se nechá vytvrdnout. Výsledný produkt není nikdy zcela homogenní, je zde značný podíl vzduchových bublin a cizích fragmentů, jako jsou žáruvzdorné oxidy. Je ovšem odolný vůči chemické a biologické degradaci a účinkům radiace.

První zařízení jednostupňové vitrifikace bylo odzkoušeno v roce 1985 v prostorách německého zařízení Pamela nacházejícího se v Belgii. Tavíčí pec obsahovala čtyři páry elektrod, které byly umístěny proti sobě, a mezi nimi docházelo k procházení střídavého proudu, čili ke vzniku Joulova tepla. Provozní teplota byla mezi 1 150 °C a 1 200 °C. Provoz zařízení byl ukončen v roce 1991. [6]

### 3.2 Dvoustupňová vitrifikace

Na rozdíl od jednostupňové vitrifikace, kdy je kapalný koncentrát přímo přiváděn do taveniny skla, zde dochází k zahuštění a kalcinaci vodného roztoku a až poté se výsledný produkt přivádí do taveniny skla. Kalcinace se provádí v tzv. rotačním kalcinátoru. Kalcinátor je nakloněný rotační válec, který je vyhříván na teplotu okolo 800 °C. Do kalcinátoru je přiváděna kontaminovaná kapalina, která je zde zahušťována do pevné formy, především pak zbavena vody, a zároveň zde dochází ke kalcinaci, neboli rozložení solí na oxidy. Pro zabránění slepování odpadu v kalcinátoru se před procesem přidává dusičnan hlinitý. Nebo je kalcinátor vybaven speciální rozbíjecí tyčí, která funguje na principu tyčového mlýnku a zabraňuje tvorby krusty. Výsledkem je pak prášková forma kalcinátu. Po kalcinaci se do skelné matrice přidávají přísady (obvykle ve formě skleněné frity) a jsou následně přiváděny do taviče v poměru 82 % skla a 18 % štěpných produktů (poměr používaný ve vitrifikačním zařízení La Hague ve Francii pro skelný materiál s označením R7/T7). Samotné tavení pak probíhá při teplotách 1 100 °C až 1 150 °C. [6]



Obr. 3.3 Princip dvoustupňové vitrifikace [Převzato z [6]]

První vitrifikační zařízení tohoto typu bylo spuštěno v roce 1978 v Marcoule ve Francii s názvem AVM (Atelier de Vitriification de Marcoule). Toto zařízení bylo v provozu do roku 1999 a celkově v něm bylo zpracováno okolo 1900 m<sup>3</sup> odpadu. [6]

### 3.3 Výhody a nevýhody metody

Již v předchozích kapitolách byly zmíněny některé přednosti týkající se využití metody vitrifikace. V této kapitole budou všechny přednosti shrnuty a zároveň zde budou uvedeny i některé nedostatky této metody.

Většina výhod metody vitrifikace vychází z vlastností vyprodukovaného skla. Sklo dokáže pojmout širokou škálu odpadů různého složení. Především kapalné odpady v podobě vysycených ionexů nebo různých kapalných koncentrátů. Při zpracování pevných odpadů, lze metodu například využít pro zpracování aktivního popelu ze spaloven. Sklo je zároveň odolné vůči biologické degradaci, je chemicky stabilní, je nehořlavé, koroze skla ve vodě nebo vlhkém prostředí probíhá velice pomalu a především je sklo bráno za méně náchylné k účinkům radiačního poškození, než jiné krystalické látky. Další nespornou výhodou je vysoká redukce objemu odpadu. Jelikož samotná vitrifikace probíhá za vysokých teplot, dochází k redukci objemu podobně jako při spalování odpadu. Redukce objemu se pohybuje okolo 1:50 až 1:100.

Největší nevýhodou této metody jsou především investiční a provozní náklady. Tavení za vysokých teplot je všeobecně energeticky náročné, proto je vhodné tuto metodu využívat za kontinuálního provozu, aby se co nejvíce zmenšil prostoj mezi cykly ochlazování a zahřívání tavicí pece respektive taveniny. Pro kontinuální provoz je ovšem nutné vlastnit značné množství odpadu. ČR, z hlediska produkce odpadů vhodných pro zpracování metodou vitrifikace, neprodukuje dostatečné množství pro zajištění kontinuálního provozu vitrifikace. Provedením analýzy nákladů a přínosů se pak ČR rozhodla pro metody konečné úpravy aktivních odpadů, jakými jsou především cementace a bitumenace. Dalším nedostatkem metody vitrifikace je, vzhledem k tavení a následnému odpařování či spalování odpadu v tavicí peci, nutné čištění plynů a aerosolů. Při tom vznikají další sekundární RAO. [6]

## 4 Fyzikální princip tavení skla ve studeném kelímku

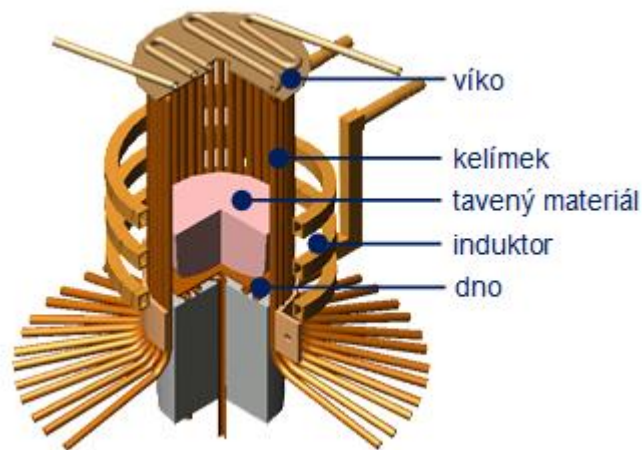
V následujících kapitolách bude popsán princip studeného kelímku, vlastnosti skla a jaké jsou možnosti tavení ve studeném kelímku. Následně budou uvedeny výhody použití studeného kelímku pro oblast vitrifikace RAO.

### 4.1 Studený kelímek

Studený kelímek je vysokofrekvenční indukční zařízení pro tavení elektricky vodivých, ale i elektricky nevodivých nebo nízko vodivých materiálů. Pro účely vitrifikace lze studený kelímek využít k tavení elektricky nevodivých a nízko vodivých materiálů především pak pro tavení skel. Studený kelímek funguje na principu elektromagnetické indukce, kdy působením induktoru vzniká elektromagnetické pole, kde se indukují vířivé proudy. Tyto proudy pak procházejí materiálem o určité rezistivitě a na základě Joulova zákona zde vznikají ztráty, které se mění v teplo. Jedná se tedy o velmi rychlý ohřev. Studený kelímek si lze jednoduše představit jako jednoduchý transformátor v zapojení nakrátko. Kelímek je intenzivně chlazen vodou, tím dochází k tzv. „skull“ efektu, kdy se vytvoří několik milimetrů tlustá zpevněná vrstva taveného materiálu na okrajích dotyku taveniny a kelímku. Skull vrstva nám chrání samostatný kelímek před taveninou, která bývá často vysoce chemicky agresivní, a zároveň prakticky nahrazuje nádobu pro roztavený materiál. Tento fakt má nespornou výhodu při zpracování radioaktivních odpadů. Pracovní teplota uvnitř kelímku je až 3 000 °C, kdežto pracovní teplota samotných částí studeného kelímku je díky intenzivnímu chlazení vodou okolo 50 °C. Na obrázku 4.1 je zobrazeno schéma studeného kelímku. Kelímek je složen z trubkovitých většinou měděných dílů, celý kelímek je pak obmotán závití induktoru, který generuje elektromagnetické pole. Výkony induktorů se při použití měděného studeného kelímku pohybují mezi 50 až 400 kW při frekvencích v rozmezí 90 až 5 000 kHz. [24, 25, 26]

Studený kelímek můžeme dělit podle typu provedení kelímku na:

- segmentový kelímek a
- kelímek s integrovaným induktorem



Obr. 4.1 Schéma studěného kelímku [Převzato z [24]]

#### 4.1.1 Segmentový kelímek

Jedná se o nejpoužívanější typ studěného kelímku. Segmentový kelímek (Obr. 4.2) se skládá ze dvou hlavních částí. Jedná se o induktor, který je připojen na vysokofrekvenční zdroj. Další částí jsou tzv. segmenty, které oddělují vsázku od induktoru. Tyto segmenty jsou duté a prochází jimi chladicí médium, které ochlazuje vnější vrstvu vsázky. Segmenty mohou mít kruhový, obdélníkový nebo lichoběžníkový průřez. V závislosti na použitém tvaru průřezu se ale mění velikost Joulových ztrát přímo v segmentu. Z hlediska těchto ztrát se nejvíce využívá kruhového průřezu. Segmenty musí být provedeny tak, aby z hlediska elektromagnetického pole nebránily indukci vířivých proudů v tavenině. Pokud jsou segmenty z kovového materiálu, jsou stěny zhotoveny z jednotlivých lamel, které nejsou ve vzájemném kontaktu (viz obr. 4.2). [27, 28]



Obr. 4.2 Ukázka tavení v segmentovém kelímku [Převzato z [27]]

#### 4.1.2 Kelímek s integrovaným induktorem

Princip tavení je v zásadě stejný jako u segmentového kelímku. Rozdíl je především v konstrukci kelímku. Nejsou zde již využívány segmenty, které mají za úkol ochlazovat vsázku, nýbrž přímo induktor nám tvoří stěnu kelímku (viz *obr. 4.3*). Pro ochlazování je induktor konstruován s dutými závity, kudy proudí chladicí médium. Tento kelímek má vyšší účinnost, používá se hlavně pro tavení materiálů, u nichž je tavící teplota vyšší než 2 000 °C. Vyšší účinnost je především dána tím, že na rozdíl od segmentového kelímku zde nedochází ke ztrátám vířivými proudy v daných segmentech. Kelímek s integrovaným induktorem má ovšem celkově vyšší nároky na chlazení celého induktoru. Při nedostatečném chlazení pak může dojít k situaci, kdy na tavenině se nevytvoří celistvá skelná vrstva chránící kelímek, a vlivem vodivosti taveniny pak může dojít ke zkratu a následnému poškození induktoru. [27, 28]



*Obr. 4.3 Ukázka tavení skla v kelímku s integrovaným induktorem [Převzato z [28]]*

#### 4.2 Tavení elektricky vodivých materiálů ve studeném kelímku

Studený kelímek je využíván pro tavbu elektricky vodivých materiálů v průmyslu již řadu let, především pak pro tavení kovů či slitin o vysoké čistotě. Takovými materiály jsou například titan, zirkon, nikl, kobalt nebo wolfram. Konstrukčně nejrozšířenějším kelímkem je pak segmentový kelímek, který je možno pro zlepšení čistoty výsledného materiálu a účinnosti procesu (především snížení ztrát přenosem tepla) tavení umístit do ochranné atmosféry či vakua. Další výhody oproti klasickým indukčním tavícím pecím jsou pak například: rychlost tavení, daleko menší prostorové nároky, menší požadavky na pracovní sílu a samozřejmě menší energetická náročnost. Na rozdíl od tavení elektricky nevodivých materiálů se pro tavení elektricky vodivých materiálů používají mnohem nižší frekvence, obvykle se tyto frekvence



pohybují od 10 do 30 kHz. U tavení vodivých materiálů na rozdíl od tavení nevodivých ovšem klesá účinnost kelímku s rostoucí konduktivitou. Obvykle je pak účinnost celého procesu do 20 %. Proto nejsou ve studeném kelímku taveny dobré vodiče, jako je měď nebo hliník, ale využívá se pro tavbu speciálních kovů nebo slitin. [34, 35]

Pro průmysl je několik dodavatelů studených kelímků pro tavení elektricky vodivých materiálů. Takovým dodavatelem je například americká firma Consarc, která se již 40 let specializuje na konstrukci a výrobu široké škály technických zařízení pracujících v ochranné atmosféře nebo vakuu pro tavení kovů a speciálních slitin. Na obrázku 4.4 je vyobrazen dodávaný studený kelímek od této firmy. [34]

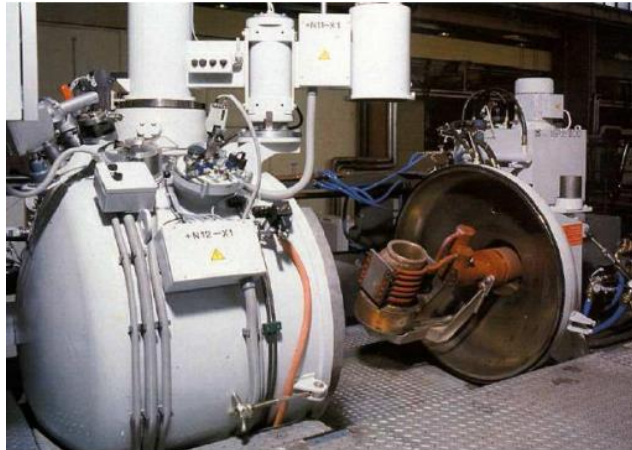


Obr. 4.4 Ukázka studeného kelímku pro průmysl od firmy Consarc [Převzato z [34]]

#### 4.2.1 Tavení titanu

Jak již bylo zmíněno, je studený kelímek pro tavení elektricky vodivých materiálů nejčastěji využíván pro tavbu titanu. Titan má specifické vlastnosti, které se využívají v automobilovém nebo leteckém průmyslu, zdravotnictví, ale i chemickém průmyslu. Vyniká především v jeho vysoké pevnosti v poměru k jeho hmotnosti a vysoké odolnosti vůči korozi. Díky svým oxidačním vlastnostem se na povrchu vytváří vrstva oxidu, a proto je vhodný pro použití jako nekorozivní materiál v kyselině dusičné. Jeho značnou nevýhodou je cena

odlitku, která se odvíjí především z komplikovanosti jeho výroby. Zařízení pro tavení titanu ve vakuu je zobrazeno na obrázku 4.5. [35]



Obr. 4.5 Studený kelímek pro tavbu titanu [Převzato z [35]]

Cenu především ovlivňují tyto faktory:

- Díky snadné reakci s oxidy, která při tavení negativně ovlivňuje finální vlastnosti titanu, musí být titan taven v ochranné atmosféře či vakuu,
- musí být odléván do speciálních nereaktivních forem (slitiny zirkonia, thoria a yttria),
- obtížnost odlévání odlitku z hlediska jeho vysoké viskozity, často je využíváno odstředivé lití

### 4.3 Princip tavení skel ve studeném kelímku

Jak již bylo zmíněno, studený kelímek se využívá pro tavení vodivých, tak elektricky nevodivých materiálů. Pro účely metody vitrifikace se budu zajímat v následujících kapitolách především o tavení skel ve studeném kelímku, čili elektricky nevodivých materiálů. Jelikož sklo je za běžných teplot nevodivé, je nutné samotný proces tavení skla nějakým způsobem nastartovat. K tomu se využívají pomocné prostředky, tzv. „start-up“ prostředky. Takovými prostředky pak mohou být:

- vložení elektricky vodivého kroužku,
- nepřímým odporovým ohřevem,
- přímé ohřátí vsázky pomocí plynových hořáků,

- využití mikrovlnného ohřevu,
- vložení elektricky vodivého prášku, jehož oxid podléhá tavení.

Výběr konkrétního řešení, které bude využito pro nastartování tavení, závisí především na materiálových vlastnostech taveného materiálu a zároveň na požadavcích ohledně čistoty konečného produktu tavení. Jednotlivé startovací prostředky budou popsány v následujících kapitolách.

#### 4.3.1 Vlastnosti skla

Sklo je obecně anorganická amorfni (nekystalická) látka, která vzniká tavením krystalických látek za vysoké teploty a následným rychlým ochlazením bez vzniku krystalizace. Na rozdíl od běžných krystalických látek není jeho struktura pravidelná a postrádá symetrické a periodické uspořádání. Nejběžnějším typem skla jsou skla oxidická, především pak křemičitá a borokřemičitá. Dále obsahuje značné množství příměsí. Tyto příměsi nám poté ovlivňují celkové vlastnosti skla. Například přidáním uhličitanu sodného dochází k výraznému snížení teploty tavení skla. [29]

Pro účely vitrifikace se nejvíce využívá skel borosilikátových a fosfátových (viz *kap. 3*). Zpravidla se nejedná o čistá skla, je zde mnoho přísad, které ovlivňují vlastnosti skla, ať už z důvodu jednoduššího zpracování, tak z důvodu vlastností pro nejstabilnější a nejefektivnější skladování radioaktivního odpadu. Mezi důležité parametry skel pro uložení radioaktivních odpadů pak patří: [3]

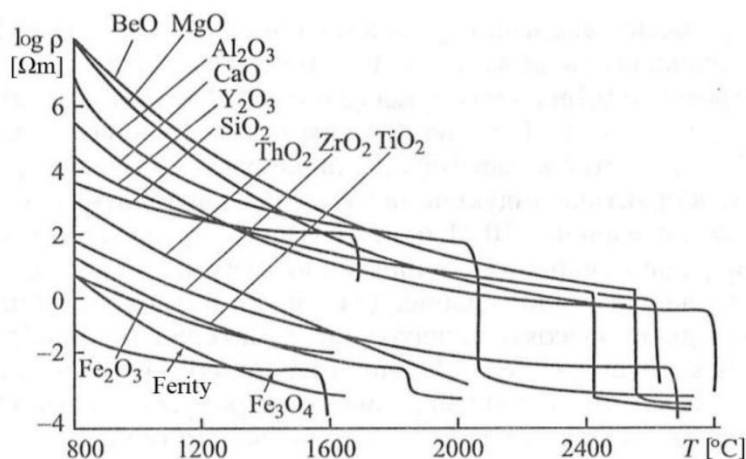
- Mechanická pevnost –  $\sigma$  (MPa)
- Normalizovaná míra vyluhovatelnosti radionuklidů -  $NR_i$  ( $\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{den}$ )
- Hustota –  $\rho$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
- Koeficient tepelné roztažnosti –  $\gamma$  ( $1/\text{K}$ )
- Specifické teplo –  $C_p$  ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ )
- Teplota tání –  $T_m$  ( $^\circ\text{C}$ )
- Tepelná vodivost –  $\lambda$  ( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ )
- Viskozita –  $\eta$  ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )
- Elektrická vodivost –  $G$  (S)

V tabulce 4.1 jsou pak uvedeny parametry obou typů skel, používaných pro vitrifikaci radioaktivních odpadů. V posledním sloupci je uvedena maximální dovolená teplota. Jedná se o teplotu, při jejímž překročení je narušená hranice tepelné stability a dochází k navýšení vyluhovatelnosti radionuklidů (NR).

Tab. 4.1 – Typické vlastnosti skel pro imobilizaci radioaktivních odpadů [Převzato z [3]]

Typ skla:	Hustota $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Mechanická pevnost $\sigma$ (MPa)	Koeficient tepelné roztlačnosti $\gamma$ (1/K)	Maximální dovolená teplota $T_{\max}$ (°C)
Borosilikátové sklo	2,7	22 - 54	$8 \cdot 10^{-6}$	823
Fosfátové sklo	2,6	9 - 14	$1,5 \cdot 10^{-6}$	723

Jak již několikrát bylo zmíněno, sklo je za běžných teplot nevodivé. Při normální teplotě (okolo 20 °C) pak jeho měrný odpor dosahuje hodnot okolo  $10^6 \Omega \cdot \text{m}$ . Při zahřívání skla se ale jeho měrný odpor snižuje a postupně se stává elektricky vodivým materiálem.

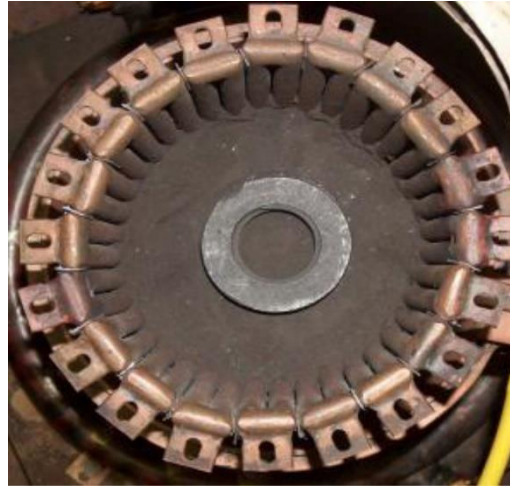


Obr. 4.4 Materiály a jejich závislost měrného odporu a teploty [Převzato z [32]]

#### 4.3.2 Tavení vložením elektricky vodivého kroužku

Tato startovací metoda využívá vlastností přidaného materiálu, který je elektricky vodivý. Postupným tavením materiálu dochází k ohřívání vsázky až do doby, kdy se vsázka stane elektricky vodivá. Po nastartování tavby se přidaný materiál odstraní. Jako startovací materiál se může například použít grafit ve formě kroužků, nebo válečků. Grafit má vysokou hodnotu teploty tání (přes 3 000 °C), což umožňuje grafit vyndat po nastartování tavby, aniž by došlo k ovlivnění složení výsledné taveniny. Nevýhodou této metody ovšem je, že při odstraňování

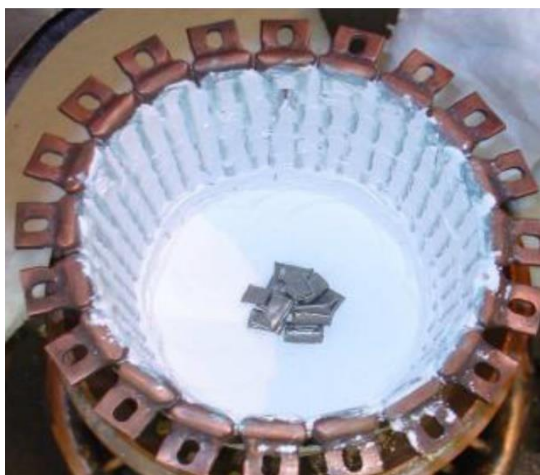
vodivého kroužku může docházet ke komplikacím, zejména pak když tavba probíhá ve vakuu nebo ochranné atmosféře. [26]



Obr 4.5 ukázka startovacího grafitového kroužku [Převzato z [32]]

### 4.3.3 Tavení vložením elektricky vodivého prášku či granulí

Tato startovací metoda je částečně podobná předchozí. Elektricky vodivý materiál (nejčastěji druh kovu) ve formě prášku nebo granulí je přidán do vsázky. Ohřívání materiál oxiduje a následně dochází k exotermní reakci. Zde je nutné splnit několik podmínek, především pak dostatek kyslíku, aby výsledný produkt byl co nejméně znečištěn přidaným materiálem, a vhodné množství startovacího materiálu. Tavní bod startovacího materiálu musí být vyšší než tavní bod vsázky. Jelikož startovací materiál zůstává s taveninou (dochází k velmi rychlému tavení), musí být zajištěné dostatečné chlazení kelímku a možnost regulovat výkon, který je přenášený do vsázky. Nevýhodou této metody pak je, že pokud nedojde k úplné oxidaci startovacího materiálu, dochází vlivem jeho zbytků k ovlivnění chemického složení a tedy vlastností výsledného produktu. [26, 27]



Obr. 4.6 ukázka startovacích elektricky vodivých granulí [Převzato z [32]]

#### 4.3.4 Tavení pomocí přímého ohřevu vsázky

Další možností tavy je možnost využití externího zdroje tepla ve formě plynových hořáků. Plynové hořáky ohřejí vsázku, a jakmile je dosaženo teploty, při které začnou vznikat vířivé proudy, jsou plynové hořáky odpojeny. Značnou nevýhodou této metody je především vznik spalin, které mohou negativně ovlivnit čistotu a kvalitu výsledného produktu. [26]

#### 4.3.5 Tavení pomocí nepřímého odporového ohřevu

Podobně jako u ohřevu pomocí plynových hořáků se jedná o externí zdroj tepla. Využívá se především topných těles a teplo se z nich přenáší zejména prouděním či sáláním. Nepřímý odporový ohřev se především využívá při tavbě kovů a slitin s nižším bodem tání. Pro tavení skel ji lze využít, ovšem ohřev vsázky je daleko pomalejší a méně účinný. Nepřímého odporového ohřevu lze ve vitrifikaci RAO využít především při kalcinaci odpadu. [23]

#### 4.3.6 Tavení s využitím mikrovlnného ohřevu

Mikrovlnný ohřev funguje na principu dielektrického ohřevu, kdy dochází k ohřevu dielektrik. Pro dielektrický ohřev platí, že teplo vzniká uvnitř materiálu, má tedy vysokou účinnost. Pro tavení skel se ovšem příliš nepoužívá, jelikož sklo za normálních teplot mikrovlny nepohlcuje. Z toho důvodu je nutné do směsi přidat aditiva, která dokáží mikrovlny pohlcovat. To ovšem opět vede k možnosti znečištění výsledného produktu těmito materiály. Sklo ovšem již při 500 °C dokáže mikrovlny pohlcovat, a tak se zde nabízí prostor k vývoji této metody s kombinací jiného ohřevu vsázky, který nemusí být tak efektivní a zároveň ekonomicky a provozně náročný. [23]

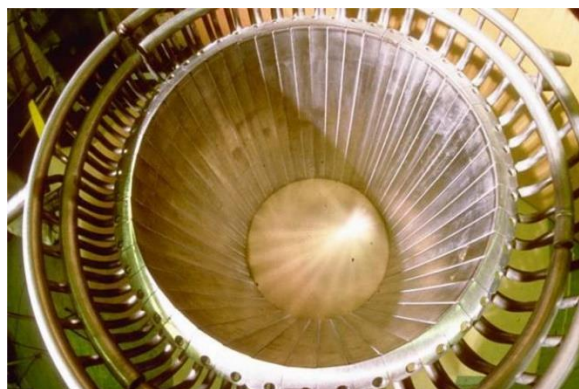


#### 4.4 Výhody použití studeného kelímku pro metodu vitrifikace

Vitrifikace metodou „studený kelímek“ je v současné době považována za druhou generaci vitrifikačních zařízení a do budoucna by měla zcela nahradit stávající vitrifikační zařízení zabývající se zpracováním RAO. Studený kelímek je vhodný pro zpracování jak vysokoaktivních RAO (především kapalně RAO), tak i nízko a středně aktivních odpadů v kapalně nebo pevné formě. Značnou výhodou oproti stávajících vitrifikačních zařízení je především v delší životnosti studeného kelímku vzhledem k tvorbě skleněné vrstvy, která studený kelímek chrání. To také umožňuje tavit materiál při vyšších teplotách, než u klasických vitrifikačních pecí, díky čemuž lze tavit větší spektrum materiálů. Oproti velkým vitrifikačním pecím je také studený kelímek mnohem menší. Studený kelímek je sice stále vysoce energeticky náročné zařízení, ale vzhledem k jeho menšímu provedení, lze kelímek na rozdíl od pecí provozovat diskontinuálně. Zároveň může být zařízení se studeným kelímkem provozováno jako kombinovaná zařízení se spalovnou. [6]

#### 4.5 Studený kelímek pro vitrifikaci radioaktivního odpadu v La Hague

Vývoj vitrifikačního zařízení s využitím metody studeného kelímku zahájila již v 80. letech minulého století Francie. V roce 1983 bylo prokázáno, že toto zařízení dokáže tavit sklo. V následujících letech došlo k vývoji, především z pohledu industrializace procesu. Společnost Cogema ve spolupráci s komisí pro atomovou energii (CEA Marcoule) zahájila v roce 2005 v La Hague ve Francii přestavbu jedné z tavicích jednotek využívající indukční tavicí pec na zařízení typu studený kelímek. V dubnu roku 2011 bylo toto zařízení uvedeno do plného provozu. Jedná se o dvoustupňové vitrifikační zařízení, které je provozováno při teplotách 1 200 – 1 300 °C, při frekvenci 300 kHz. Pracovní výkon zařízení je 25 kg/hod vitrifikátu. Kelímek je segmentového typu o průměru 650 mm. [6, 23]



Obr. 4.7 Studený kelímek v La Hague ve Francii [Převzato z [23]]

#### 4.5.1.1 Příklady vitrifikačních zařízení ve světě

V tabulce 4.2 je výčet vitrifikačních světových zařízení. Jsou zde uvedeny typy odpadů, které jednotlivá zařízení zpracovávají. HLW (High-level waste) – vysokoaktivní odpady, LILW (Intermediate-level radioactive waste) – nízko a středněaktivní odpady, LLW (Low-level waste) – nízkoaktivní odpady. Dále jsou zde uvedeny metody vitrifikace, kterými je odpad zpracováván. IHC (Induction Hot Crucible) – dvoustupňový systém vitrifikace, CCM (Cold Crucible Melter) – vitrifikace pomocí studeného kelímku, JHCM (Joule-Heated Ceramic Melter) – jednostupňový systém vitrifikace, IHPT (Induction-Heated Pot Type Melter). Kurzívou jsou označeny zařízení, které využívají vitrifikaci metodou studeného kelímku. V posledním sloupci jsou pak uvedeny data provozu.

Tab. 4.2 – Vitrifikační zařízení ve světě |Převzato z [3]|

Vitrifikační zařízení	Typ odpadu	Metoda	V provozu
R7/T7, La Hague, Francie	HLW	IHC	od 1989/1992
AVM, Marcoule, Francie	HLW	IHC	1978 - 2008
<b>R7, La Hague, Francie</b>	<i>HLW</i>	<i>CCM</i>	<i>od 2005</i>
WVP, Sellafield, UK	HLW	IHC	od 1991
DWPF, Savannah River, USA	HLW	JHCM	1996 - 2011
WVDP, West Valley, USA	HLW	JHCM	1996 - 2002
EP-500, Mayak, Rusko	HLW	JHCM	od 1987
<b>CCM, Mayak, Rusko</b>	<i>HLW</i>	<i>CCM</i>	-
Pamela, Mol, Belgie	HLW	JHCM	1985 - 1991
VEK, Karlsruhe, Německo	HLW	JHCM	2010 - 2011
Tokai, Japonsko	HLW	JHCM	od 1995
Radon, Rusko	LILW	JHCM	1987 - 1998
<b>Radon, Rusko</b>	<i>LILW</i>	<i>CCM</i>	<i>od 1999</i>
VICHR, Bohunice, Slovensko	HLW	IHC	1997 - 2001, probíhající inovační práce
WIP, Trombay, Indie	HLW	IHPT	od 2002
AVS, Tarapur, Indie	HLW	IHPT	od 1985
WIP, Kalpakkam, Indie	HLW	JHCM	v testování
WTP, Hanford, USA	LLW	JHCM	od 1998
<b>Taejon, Korea</b>	<i>LILW</i>	<i>CCM</i>	<i>plánování</i>
<b>Saluggia, Itálie</b>	<i>LILW</i>	<i>CCM</i>	<i>plánování</i>

## 5 Návrh technologického procesu vitrifikace

Pro vytvoření návrhu technologického procesu je nutné, si definovat několik parametrů. Ze zadání a problematiky studeného kelímku vyplývá, že následující kapitoly se budou zabývat



vhodnou startovací fází tavení. Jedná se tedy zejména o problematiku elektromagnetického a teplotního pole. Provedení konstrukce samotného studeného kelímku v této práci nebude řešena a budou použity parametry již známého studeného kelímku v Maracoule ve Francii.

Jedná se o kelímek s pevným dnem. Tento typ kelímku je používán pro diskontinuální provoz vitrifikace. Druhým existujícím typem je studený kelímek s pohyblivým dnem, ten se využívá zejména v kontinuálních prozozech a z tohoto důvodu je zde výrazně eliminován problém se startovací fází tavení. Jak již ale bylo zmíněno v předešlých kapitolách, ČR v současné nemá dostatečné množství vysokoaktivního odpadu pro, aby zajistila kontinuální provoz tohoto typu vitrifikačního zařízení.

## 5.1 Elektromagnetické pole [27, 36]

Elektromagnetické pole popisují čtyři tzv. Maxwellovi rovnice. Ty mohou být v integrálním tvaru nebo v diferenciálním tvaru. Integrální tvar popisuje elektromagnetické pole v určité oblasti, diferenciální pak popisuje pole v jistém bodě oblasti. Z diferenciálního tvaru lze pak odvodit rovnice elektromagnetického vlnění složek  $H$  a  $E$  v obecném prostředí. Diferenciální tvar Maxwellových rovnic:

$$\operatorname{rot} H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{rov. 5.1})$$

$$\operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (\text{rov. 5.2})$$

$$\operatorname{div} D = \rho \quad (\text{rov. 5.3})$$

$$\operatorname{div} B = 0 \quad (\text{rov. 5.4})$$

Kde platí:

$$J = \gamma E \quad (\text{rov. 5.6})$$

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E \quad (\text{rov. 5.7})$$

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (\text{rov. 5.8})$$

Dosazením a následnými úpravami dostaneme:

$$\nabla^2 H = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial H}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 H}{\partial^2 t} \quad (\text{rov. 5.9})$$

$$\nabla^2 E = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial E}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 E}{\partial^2 t} \quad (\text{rov. 5.10})$$

Pro vodivé prostředí pak platí  $\varepsilon = 0$ , pro nevodivé prostředí pak platí  $\gamma = 0$ . Vodivé prostředí je pak ve tvaru:

$$\nabla^2 H = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial H}{\partial t} \quad (\text{rov. 5.11})$$

$$\nabla^2 E = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial E}{\partial t} \quad (\text{rov. 5.12})$$

Nevodivé prostředí pak ve tvaru:

$$\nabla^2 H = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 H}{\partial^2 t} \quad (\text{rov. 5.13})$$

$$\nabla^2 E = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 E}{\partial^2 t} \quad (\text{rov. 5.14})$$

V praxi průběhy proudu a napětí mohou být sinusového charakteru, čili i průběhy E a H jsou harmonické. Ty lze pak popsat pomocí fázorů v komplexní rovině a tím se zbavit závislosti na čase. Dostaneme poté rovnice ve tvaru:

$$\nabla^2 \vec{H} = \lambda^2 \vec{H} \quad (\text{rov. 5.15})$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \lambda^2 \vec{E} \quad (\text{rov. 5.16})$$

Kde:

$$\lambda^2 = j\omega\mu_0\mu_r\gamma \quad (\text{rov. 5.17})$$

$$\alpha = \frac{1}{\lambda} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\mu_r\gamma}} \quad (\text{rov. 5.18})$$

Koeficient  $\alpha$  nám pak vyjadřuje tzv. hloubku vniku, která nám určuje, jak hluboko bude elektromagnetická indukce pronikat do vsázky a přeměňovat se na teplo. Hloubku vniku lze pak ovlivnit změnou frekvence napájecího proudu protékajícího induktorem, jelikož platí:

$$\omega = 2\pi f \quad (\text{rov. 5.19})$$

Výsledná diferenciální rovnici druhého řádu pak v obecném řešení je:

$$\vec{H} = A_1 e^{h_1 x} + A_2 e^{h_2 x} \quad (\text{rov. 5.20})$$

Kde  $A_1$  a  $A_2$  jsou integrační konstanty.

## 5.2 Teplotní pole

Jelikož indukční ohřev je sdružená úloha, musí být zavedeny kritéria i pro teplotní pole. Ze známých z elektromagnetického pole je pak možné vypočítat rozložení teploty ve vsázce. Tepelný postup lze pak rozdělit na vnitřní a vnější. Vnější tepelný postup popisuje přímý ohřev vsázky tepelnými procesy, jako jsou kondukce, konvekce a radiace. Vnitřní tepelný postup pak popisuje proces přestupu tepla uvnitř tělesa, který je dán především tepelnou vodivostí ohřívajícího tělesa. Většina materiálů však během postupného ohřívání mění svojí tepelnou vodivost, pro ty pak platí rovnice:

$$\frac{d}{dt}(\rho\varepsilon) = \text{div}(\lambda\text{grad}T) + W \quad (\text{rov. 5.21})$$

Integrací předchozí rovnice s použitím Gaussovy formule dostaneme rovnici tepelné vodivosti v integrovaném tvaru:

$$\int_V \frac{d}{dt}(\rho\varepsilon)dV = \int_S \lambda \text{grad}T dS + Q \quad (\text{rov. 5.22})$$

Rovnice 5.22 se také nazývá tzv. tepelná bilance. V levé části rovnice je vyjádřena rychlost změny vnitřní energie, na pravé pak součet tepla procházející skrz povrch S.[36]

### 5.2.1 Okrajové podmínky teplotního pole

Pro teplotní pole je nutné znát podmínky na rozhraní dvou prostředí. Existují celkem čtyři podmínky a to:

- **Dirichletova podmínka** – tam, kde je známa hodnota teploty na hranici

$$T(\Gamma, t) = T_r(\Gamma, t) \quad (\text{rov. 5.23})$$

- **Neumannova podmínka** – tam, kde je známa hodnota energie přes hranici

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n}(\Gamma, t) = f_0(\Gamma, t) \quad (\text{rov. 5.24})$$

- **Newtonova podmínka** – tam, kde je rozhraní pevných těles s kapalinou nebo plynem

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T_k - T) \quad (\text{rov. 5.25})$$

- **Podmínka 4. druhu** – tam, kde dochází k přestupu tepla radiací

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T_k - T) + \varepsilon c(T_k^4 - T^4) \quad (\text{rov. 5.26})$$

kde  $\varepsilon = 5,6687 \cdot 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>] je Stefan-Boltzmannova konstanta a  $c$  [-] je stupeň šedivosti

## 5.2.2 Tepelné ztráty ve studeném kelímku [36]

Při tavení ve studeném kelímku dochází k velkým teplotním ztrátám. Největší podíl mají tepelné ztráty v místě chlazení kelímku, jak je znázorněno na obrázku 5.1. Záleží především na rozdílu teplot chladicího média a teplotě ve vsázce. Tyto ztráty lze ovlivňovat regulací teplot těchto dvou materiálů, nebo reaktancí vzduchové mezery, respektive vzdáleností. Dále pak velikostí a vodivostí skull vrstvy. Zároveň ale stále platí, že vrstva skull nesmí být narušena, jinak může dojít k průrazu a trvalému zničení induktoru. Tyto ztráty lze pak řešit z rovnice:

$$P_w = \frac{(T_{liq} - T_{sk})\lambda_{sk}}{\xi} \quad (\text{rov. 5.27})$$

Kde  $\xi$  je tloušťka oxidů skull vrstvy. Většinou nabývá hodnot od 0,005 do 0,003 m.

Další značná část ztrát odchází horní částí studeného kelímku, především radiací a konvekcí. Obě hodnoty závisí na koeficientu  $n$ , který nabývá hodnot od 0 do 1 dle roztavené hmoty na vrchu hladiny vsázky. Dále je zde emisní faktor  $\varepsilon_n$ , který obvykle nabývá hodnot od 0,3 do 0,5.  $S_2$  je plocha roztavené hmoty. Problém pak nastává v určení ztrát, které jsou přímo uprostřed vsázky, zde záleží především na povaze plynu, který obsahuje různé částičky a příměsi.

$$P_{rad} = \varepsilon_n C_0 S_2 n \left( \frac{T_m}{100} \right)^4 \quad (\text{rov. 5.28})$$

$$P_{conv} = (0,01 - 0,05) P_{rad} \quad (\text{rov. 5.29})$$

$$P_{ch} = p_{ch} (1 - n) S_2 \quad (\text{rov. 5.30})$$

Kde:

$$p_{ch} = \alpha_{ch} (T_m - T_{liq}) \quad (\text{rov. 5.31})$$

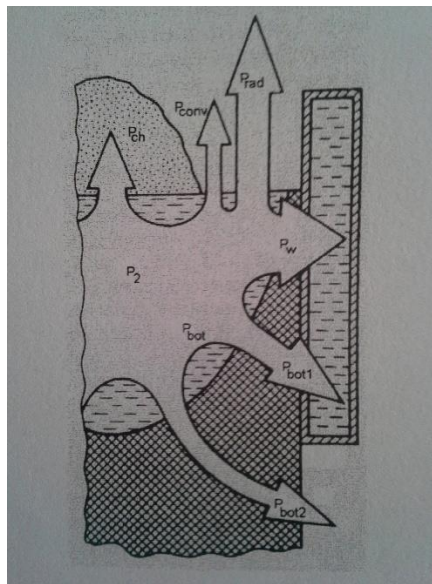
Posledními tepelnými ztrátami, jsou ztráty dnem studeného kelímku. Opět zde záleží na typu dna, zdali se jedná o vodivé nebo nevodivé dno, dále na fyzikálních vlastnostech materiálu, z kterého je dno vytvořeno. Koeficient je označen  $p_{bot}$ .

$$P_{bot} = p_{bot}(S_{cros} - 0,25\pi(D_2 - \xi)^2) \quad (\text{rov. 5.32})$$

Kde  $S_{cros}$  je plocha paraboloidu, respektive elipsoidu.  $D_2$  je průměr kelímku a  $\xi$  je tloušťka skull vrstvy.

Celková bilance teplotních ztrát je pak dána součtem všech výše uvedených ztrát.

$$P_2 = P_{ch} + P_w + P_{rad} + P_{bot} + P_{conv} \quad (\text{rov. 5.33})$$



Obr. 5.1 Tepelné ztráty ve studeném kelímku [Převzato z [36]]

### 5.3 Energetická náročnost studeného kelímku

Účinnosti studených kelímků se liší podle typu provedení studeného kelímku. Obecně platí, že integrovaný studený kelímek má vyšší účinnost než segmentový kelímek. U integrovaného studeného kelímku nám odpadají ztráty v mědi (nejsou zde naindukované proudy). Nevýhodou je ale nutné intenzivní chlazení. Pro zpracování radioaktivního odpadu je spíše nevhodná, jelikož zde může dojít k průrazu a trvalému poškození induktoru. Účinnost pro integrovaný induktor může být maximálně 50 %, kdežto pro segmentový kelímek okolo 30 %. Ze vztahu pro výpočet elektrické účinnosti pak pro integrovaný kelímek evidentně odpadá rezistivita  $R_3$ .

$$\eta = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (\text{rov. 5.34})$$

Kde  $R_1$  je rezistivita materiálu induktoru,  $R_2$  je rezistivita vsázky,  $R_3$  je rezistivita kelímku.

## 5.4 Návrh startovací fáze pro technologický proces vitrifikace

Vzhledem k situaci, že většina dnes známých startovacích možností, které byly podrobněji popsány v kapitole 4.3, přináší sebou řadu nevýhod, především pak pokud ještě více zatěžují energetickou náročnost, jako je to u metod laserového nebo mikrovlnného ohřevu, nebo negativně ovlivňují výsledný produkt příměsí. Rozhodl jsem se, že je vhodné využít vhodných vodivých prvků v směsi borosilikátových skel. V tabulce 5.1 je uvedeno procentuální složení speciálně upraveného borosilikátového skla s označením R7/T7. Tučně jsou označeny oxidy molybdenu a zirkonia. Oxidy mají za normálních podmínek vysokou hodnotu rezistivity, pokud ale budou do směsi přidány v kovové vodivé formě ve formě granulátu a za předpokladu, že tavení bude probíhat v ochranné atmosféře s dostatečným přísunem kyslíku, nemuselo by to výrazně ovlivnit finální složení produktu. Cíle této práce je tedy zjistit, zda borosilikátové sklo R7/T7 obsahuje dostatečné množství těchto prvků, za předpokladu vmísení těchto prvků v kovové vodivé formě do směsi, aby došlo při působení elektromagnetické indukce k dostatečnému ohřátí vsázky pro následné tavení.

Tab. 5.1 – Složení borosilikátového skla typu R7/T7

Oxidy	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<b>MoO<sub>3</sub></b>	ZnO	<b>ZrO<sub>2</sub></b>	CaO	ostatní
[%]	35	8,5	15,16	6	3,7	<b>12</b>	5,7	<b>7</b>	4,7	2

Tab. 5.2 – Vlastnosti kovových prvků molybdenu a zirkonia

	G [S/m]	$\rho$ [n $\Omega$ ·m]	$c_p$ [J/mol·K]	$\lambda$ [W/m·K]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
Molybden	$18,7 \times 10^6$	53,4	24,06	138	10,28
zirkonium	$2,36 \times 10^6$	421	25,36	22,6	6,52

Pro stanovení velikosti objemu granulí je nutné nadefinovat velikost studeného kelímku v Maracoule ve Francii. Výška kelímku je 70 cm, výška vsázky byla stanovena 40 cm. Kelímek měří v průměru 55 cm a má 48 chladících segmentů. Efektivní hodnota proudu byla stanovena na 1500 A o frekvenci 280 kHz. Pro výpočet objemu vázky již stačí dosadit do jednoduchého vzorce:

$$V = \pi r^2 h = 0,095 \text{ m}^3 \quad (\text{rov. 5.35})$$

V tom případě objem molybdenu ve vsázce je  $0,0114 \text{ m}^3$  a objem zirkonia je  $0,00665 \text{ m}^3$ . Jelikož ale vysypání granulí spolu se sklo-tvornou směsí je náhodné, musíme si určit střední hodnotu poloměru. Je to z toho důvodu, že pokud by granule byla blízko stěny kelímku, pak by byla ochlazována a nedocházelo by tedy k jejímu zahřívání. Pokud by byla umístěna uprostřed, nedocházelo by k efektivnímu ohřívání. Obecně platí, že čím blíže k induktoru, tím je tavení rychlejší. Při této úvaze by tedy byly granule  $0,1375 \text{ m}$  široké. V tom případě by byla podle rovnice 5.35 granule molybdenu vysoká  $0,1919 \text{ m}$  a granule zirkonia by měla výšku  $0,1119 \text{ m}$ .

## 6 Numerický model pro proces vitrifikace ve studeném kelímku

Vzhledem ke složitosti návrhu studeného kelímku byla využita metoda konečných prvků za pomoci výpočetní techniky v multifyzikálním programu ANSYS. Využití numerické metody nám pak umožňuje řešit problémy na složitějších tělesech oproti analytickému přístupu. Program ANSYS nám tedy umožňuje řešit současně problém elektromagnetického a teplotního pole.

### 6.1 Metoda konečných prvků (MPK)

Jedná se o numerickou metodu, která slouží k simulaci celé řady úloh. Na vytvořeném fyzikálním modelu lze pomocí této metody simulovat různé průběhy napětí, mechanické deformace, přenos tepla, elektromagnetismus, proudění kapalin apod.. Metoda vznikla již v polovině 50. let 20. století, vzhledem ale k její náročnosti došlo k jejímu využití až s nástupem výpočetní techniky. Jak již z názvu vyplývá, základním stavebním kamenem je prvek konečných rozměrů, je tedy nutné rozdělit řešené oblasti na konečný počet podoblastí. K tomu nám slouží tzv. síť konečných prvků, kde uzly sítě nám představují body, v nichž hledáme neznámé parametry řešení. Podle topologie a hustoty prvků sítě je pak následně ovlivněna kvalita výsledů. Výpočty jsou potom prováděny podle diferenciálních rovnic. V závislosti na složitosti vstupního fyzikálního modelu, pak roste množství těchto rovnic. Omezením tedy pak už může být kapacita dostupného hardwaru a časové nároky na výpočet. [30, 31]



## 6.2 Metodika tvorby modelu v programu ANSYS

V prvé řadě je nutno poznamenat, že existuje celá řada softwarových řešení, které využívají metody konečných prvků (např. Abaqus, Fluent, Marc, Comsol a mnoho dalších). Pro zpracování této diplomové práce byla vybrána komplexní softwarová sada ANSYS, která pokrývá svým řešením téměř celé spektrum fyziky a umožňuje přístup k libovolné inženýrské simulaci. Díky jeho komplexnosti nám umožňuje řešit elektromagnetické a teplotní pole a tyto úlohy dokáže řešit sdruženě. Příkladem může být startovací proces tavení v indukčním kelímku, kdy dochází vlivem teploty ke změnám vlastností vsázky.

Pro práci s programem ANSYS je důležité si nejprve nadefinovat řešený problém, především o jaký typ úlohy se jedná. Následně se vkládají tzv. inženýrské data, což je v podstatě přehled použitých materiálů a definování jejich parametrů. Pro tvorbu modelu byl vybrán segmentový kelímek. Jednotlivé materiálové parametry jsou v tab. 5.1. V tabulce jsou udávány parametry pro základní teplotu 20 °C. Jako startovací materiál byl zvolen grafitový kroužek.

Tab. 5.1 Vstupní materiálové parametry

Oblast	Materiál	Relativní permeabilita [-]	Rezistivita [ $\Omega \cdot m$ ]
Induktor	Měď	1	1,75E-08
Vodivé dno	Měď	1	1,75E-08
Vsázka	Sklo	1	1,16E08
Segment	Měď	1	1,75E-08
Okolí	Vzduch	1	-
Startovací materiál	Molybden	1	53,4E-09

Po nastavení všech parametrů se přechází do tzv. pre-processingu. Zde se vytváří základní geometrie modelu. Geometrii lze vytvořit v programu ANSYS, ovšem je zde možnost využití jiných modelovacích programů (např. SolidWorks, AutoCAD, Agros 2D). Program ANSYS pak dokáže modely importovat a lze s nimi dále pracovat. Po vytvoření kompletní geometrie je nutné k jednotlivým oblastem přiřadit příslušné materiálové vlastnosti.

Následný proces je proces tvorby sítě (tzv. tvorba „mesh“), zde je důležité správně nastavit vhodný počet elementů, aby byly splněny jednotlivé podmínky. Program ANSYS nabízí tři možnosti meshování a to volné meshování, mapované meshování a chytré meshování. Volné meshování je určené pro libovolné zadání tvaru oblastí. Mapované meshování je vhodné pro pravidelné oblasti, můžou jimi být například čtverce. Chytré meshování pak porovnává

výsledky volného meshování a mapovaného meshování a sám pak následně vybere vhodný druh. Zároveň se také nastavují počáteční a okrajové podmínky.

Posledním krok se nazývá solution a již z názvu vyplývá, jedná se o výběr typu analýzy či stanovení přesnosti a již následuje samotný výpočet.

## Závěr

V současné době je po celém světě intenzivně řešen problém zpracování a ukládání RAO. ČR momentálně projektuje výstavbu nových hlubinných úložišť pro vysoko aktivní odpady, což se setkalo s obrovskou nevolí občanů. Dle mého názoru je odpor občanů způsoben hlavně neinformovaností o technologiích zpracování odpadu, a zároveň až někdy přehnaným strachem z radioaktivity. Přitom většina lidí ani netuší, že jsou denně vystavováni účinkům radionuklidů. V rámci nakládání s RAO v ČR jsem ovšem našel diskutabilní problém ohledně legislativy. V současné době, kdy bychom se měli snažit co nejvíce redukovat objemy RAO, abychom co nejdéle prodloužili životnost úložišť, není provozovatel našich jaderných elektráren nucen zpracovávat odpady dražší, ale efektivnější metodou, jelikož odvádí poplatky na tzv. Jaderný účet z množství vyrobené elektrické energie z jaderných zdrojů, ale nikoliv za množství ukládaného odpadu. Proto se v současné době zpracovávají odpady především cementací, popřípadě u kapalných odpadů bitumenací, které jsou z dosavadních metod ekonomicky nejvýhodnější. Dalším důležitým faktorem, který je dobré zmínit, je fakt, že ČR za současného stavu energetiky, a především z ekonomických důvodů, neplánuje výstavbu závodu na přepracování VJP. To znamená, že současné skladované vyhořelé palivo, bude po uplynutí doby nuceného chlazení konečnou úpravou zpracováno a uloženo do plánovaných hlubinných úložišť.

Další část práce byla věnována metodě vitrifikace, která má výborné vlastnosti ohledně konečnému ukládání RAO. Její hlavní nevýhodou je ovšem energetická a provozní náročnost. Z toho důvodu fungují vitrifikační zařízení především v jaderných velmocích jako jsou: Francie, U.S.A., Rusko, Japonsko nebo Velká Británie. Naopak vitrifikace metodou ve studeném kelímku přináší revoluci v zpracování RAO. Ve Francii a v Rusku již fungují vitrifikační zařízení se studeným kelímkem. Výhody oproti vitrifikaci v běžných pecích jsou především ve: vyšší teplotě tavení, což umožňuje tavit širokou škálu materiálů, vyšší životnost zařízení díky skelné vrstvě, která kelímek chrání proti korozi, a možnosti využití

diskontinuálního provozu (za menších energetických ztrát, než u klasických vitrifikačních pecí). Zajímavou formou zpracovatelského závodu pak může být spalovna spolu s vitrifikací ve studeném kelímku, kde by se mohly zpracovávat nízko a středně aktivní materiály ve formě zbylého popílku.

Problematické je ovšem nastartování procesu tavení ve studeném kelímku, jelikož sklo je za normálních teplot nevodivé. Současné metody ovšem nenabízejí spolehlivý a bez nečistot ovlivňující provoz nastartování. Navíc současné metody neumožňují snadný kontinuální provoz. V tomto ohledu se v současné době stále provádí výzkum. Mezi země, mimo jaderných velmocí uvedených v minulém odstavci, se o technologii vitrifikace metodou studeného kelímku zajímají především státy jako Čína a Německo. Německo vzhledem k uzavření několika jaderných elektráren a budoucímu uzavření, které by mělo proběhnout do roku 2025, stávajících jaderných elektráren, již plánuje využít této metody ke zpracování odpadů, vzniklých z provozu těchto elektráren.

V poslední části práce jsem se zabýval metodikou tvorby modelu pro proces vitrifikace ve studeném kelímku.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Radioaktivní odpady a skupina ČEZ. *Skupina ČEZ* [online]. Poslední změna 15.1.2007. [Cit. 14.11.2015]. Dostupné z: [http://www.cez.cz/eede/content/micrositesutf/odpovednost/content/pdf/cez\\_a\\_radioaktivni\\_odpady\\_-\\_nahled.pdf](http://www.cez.cz/eede/content/micrositesutf/odpovednost/content/pdf/cez_a_radioaktivni_odpady_-_nahled.pdf)
- [2] Vitifikace. *Wikipedia: The Free Encyclopedia* [online]. Poslední změna 9.12.2015. [Cit. 12.12.2015]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Vitrifikace>
- [3] OJOVAN, M.I., LEE, W.E. *An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation*. 2nd edition. Elsevier Newnes, 2013. 376 s.
- [4] ULLMANN, Vojtěch, RNDr. Jaderná a radiační fyzika *astronuklfyzika.cz* [online]. [Cit. 12.1.2016]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika2.htm>
- [5] Druhy Ionizujícího záření. *Skupina ČEZ* [online]. [Cit. 12.1.2016]. Dostupné z: [https://www.cez.cz/eede/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/druhy\\_5.html](https://www.cez.cz/eede/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/druhy_5.html)
- [6] KOVAŘÍK, Petr. *Nakládání s radioaktivními odpady v ČR*. Skripta pro ZČU, ÚJV - 13878CH, prosinec 2011, 116 s.
- [7] VĚTROVEC, Vladislav. Nakládání s radioaktivními odpady *blog.idnes.cz* [online]. Poslední změna 30.5.2013. [Cit. 22.11.2015]. Dostupné z: <http://vetrovec.blog.idnes.cz/c/344813/Nakladani-s-radioaktivnimi-odpady.html>
- [8] Jaderná elektrárna. *Skupina ČEZ* [online]. [Cit. 9.12.2015]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/eede/content/microsites/nuklearni/k33.htm>
- [9] Palivový cyklus. *Vuje a.s.* [online]. [Cit. 9.12.2015]. Dostupné z: <http://www.vuje.sk/sk/index.php?page=popup/schemy/palivovy-cyklus>
- [10] Problematika ukládání odpadů v ČR. *ČVUT* [online]. Poslední změna 19.9.2006. [Cit. 12.12.2015]. Dostupné z: [http://ceg.fsv.cvut.cz/ceg-old/CZ/ceg-uvod/02\\_ukladani.htm#rozd%C4%9Blen%C3%AD%20odpad%C5%AF](http://ceg.fsv.cvut.cz/ceg-old/CZ/ceg-uvod/02_ukladani.htm#rozd%C4%9Blen%C3%AD%20odpad%C5%AF)
- [11] Nakládání s RAO. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. [Cit. 14.2.2016]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/nakladani-s-radioaktivnimi-odpady/nakladani-s-rao/>
- [12] Úložiště radioaktivních odpadů. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. [Cit. 14.2.2016]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/jaderna-zarizeni/uloziste-radioaktivnich-odpadu/>
- [13] Hospodaření s radioaktivními odpady v ČR 2015. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. Poslední změna 10.3.2016. [Cit. 20.3.2016]. Dostupné z: [http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/jaderna-bezpecnost/nakladani-s-rao/Hosp\\_RAO\\_\\_2015.pdf](http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/jaderna-bezpecnost/nakladani-s-rao/Hosp_RAO__2015.pdf)
- [14] Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v ČR. *Správa úložišť radioaktivních odpadů* [online]. Poslední změna 6.3.2008. [Cit. 15.2.2016]. Dostupné z: <http://www.surao.cz/cze/content/download/524/2862/file/koncepcefinal.pdf>
- [15] O SÚJB. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. [Cit. 15.2.2016]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/o-sujb/uvod/>
- [16] O SÚRAO – Základní informace. *Správa úložišť radioaktivních odpadů* [online]. [Cit. 15.2.2016]. Dostupné z: <http://www.surao.cz/cze/O-SURAO/Zakladni-informace>

- [17] Mezinárodní agentura pro atomovou energii. *Wikipedia: The Free Encyclopedia* [online]. Poslední změna 7.1.2016. [Cit. 7.3.2016]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Mezinárodní\\_agentura\\_pro\\_atomovou\\_energii](https://cs.wikipedia.org/wiki/Mezinárodní_agentura_pro_atomovou_energii)
- [18] DLOUHÝ, Zdeněk. *Nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2009, 219 s. ISBN 978-80-214-3629-9.
- [19] Classification of Radioactive Waste. *International Atomic Energy Agency* [online]. Poslední změna 11.1.2010. [Cit. 7.3.2016]. Dostupné z: [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1419\\_web.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1419_web.pdf)
- [20] Radioaktivní odpady z jaderných elektráren. *Skupina ČEZ* [online]. Poslední změna 3.9.2007. [Cit. 16.3.2016]. Dostupné z: [https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/jaderel\\_3.html](https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/jaderel_3.html)
- [21] Ukládání radioaktivních odpadů. *Správa úložišť radioaktivních odpadů* [online]. [Cit. 17.3.2016]. Dostupné z: <http://www.surao.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Radioaktivni-odpady/Ukladani-radioaktivnich-odpadu>
- [22] Budoucí hlubinné úložiště. *Správa úložišť radioaktivních odpadů* [online]. [Cit. 17.3.2016]. Dostupné z: <http://www.surao.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu/Budouci-hlubinne-uloziste>
- [23] RUTHER, Tomáš. *Vitrifikace s využitím technologie indukčního ohřevu*. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky a ekologie, Vedoucí práce: Ing. David Roth, Ph.D., Plzeň 2012
- [24] Laboratoř studených kelímků. *Susen* [online]. [Cit. 29.4.2016]. Dostupné z: <http://susen2020.cz/vyzkum/vyhled-2015-infrastruktura-projektu-susen/laborator-studenych-kelimku/>
- [25] Studený kelímek. *Endepedie* [online]. [Cit. 29.4.2016]. Dostupné z: [http://enpedie.cz/wiki/Studený\\_kelímek](http://enpedie.cz/wiki/Studený_kelímek)
- [26] KOŽENÝ, Jiří a kolektiv. *Power losses in induction furnace with cold crucible with different segments shape* [online]. [Cit. 29.4.2016]. Dostupné z: [http://ek702p10-ket.fel.zcu.cz/images/Rocnik2014/Cislo1\\_2014/r8c2c4.pdf](http://ek702p10-ket.fel.zcu.cz/images/Rocnik2014/Cislo1_2014/r8c2c4.pdf)
- [27] RATAJ, Martin. *Možnosti uplatnění studeného kelímku při tavení skla*. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky a ekologie, Vedoucí práce: Ing. David Roth, Ph.D., Plzeň 2015
- [28] Induktives Skull-Melting von innovativen Materialien. *Institut für elektroprozessentechnik* [online]. [Cit. 1.5.2016]. Dostupné z: [http://www.etp.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/Broschuere\\_Skull.pdf](http://www.etp.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/Broschuere_Skull.pdf)
- [29] Sklo. *Institut geologického inženýrství Hornicko* [online]. [Cit. 1.5.2016]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/sklo.html>
- [30] Metoda konečných prvků. *Wikipedia: The Free Encyclopedia* [online]. Poslední změna 8.3.2015. [Cit. 5.5.2016]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda\\_konečných\\_prvků](https://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_konečných_prvků)
- [31] VRBKA, Martin a VAVERKA Michal. *Metoda konečných prvků* [online]. [Cit. 5.5.2016]. Dostupné z: [http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1\\_mkp.pdf](http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf)
- [32] ZAJACOVÁ, Nikola. *Vysokoteplotní tavení materiálů ve studeném kelímku*. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření, Vedoucí práce: Prof. Ing. Jiří Kožený CSc., Plzeň 2012
- [33] Vitřifikáčná linka. *Javys.sk* [online]. [Cit. 17.7.2016]. <http://www.javys.sk/sk/jadrove-zariadenia/technologie-spracovania-a-upravy-rao/vitrifikacna-linka>
- [34] Electromagnetic cold crucible. *Consarc.com* [online]. [Cit. 18.7.2016]. <http://www.consarc.com/blog/products/electromagnetic-cold-crucible/>

- [35] VOLF, Vladimír. *Přenos energie ve studeném kelímku*. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky a ekologie, Vedoucí práce: Prof. Ing. Jiří Kožený, Csc., Plzeň 2015
- [36] KUDRYASH, Maxim. *Experimental investigation of introduction melting in cold crucible for high temperature processing of oxides using HF transistor power supply*. Disertační práce, Der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, univerzita Hannover 2011