

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZDRAVOTNĚ SOCIÁLNÍ FAKULTA

System bezpečného ukládání radioaktivního odpadu

Bakalářská práce

Vypracovala: Kateřina Neumannová

Vedoucí práce: MUDr. Josef Štorek, PhD.

2007

The system of the safe storing of radioactive waste

Abstract

We can hardly imagine today's modern world of 21st century without usage of nuclear energy and ionizing radiation. We meet them in nuclear energetics, industry, health service and other different fields. Similarly to other human activities even here waste rises – radioactive waste which can be dangerous for a man and for the whole environment. Therefore it is very important to deal with it according to existing rules.

Radioactive waste rises even in the Czech Republic and that is why an enhanced attention is very necessary here. Therefore I would like to break into these problems as much as I can and I would like to describe these problems in my bachelor work so that everybody is informed about basic information how to deal with radioactive waste in an understandable form. I think that everybody in this country, regardless to their education, should have a basic overview about problems of radioactive waste.

I would be very pleased if this bachelor work could help people interested in these problems and if my work is used as an educational material. If readers find new interesting information, my work will be even more useful.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Systém bezpečného ukládání radioaktivního odpadu* vypracovala samostatně a použila pramenů, které cituji a uvádím v přiložené bibliografii.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českých Budějovicích

.....
Podpis studenta

Poděkování

Na tomto místě bych chtěla poděkovat panu **MUDr. Josefu Štorkovi, PhD.** za odborné vedení a pomoc při zpracování této bakalářské práce a dále panu **Ing. Lubomíru Pavlíčkovi** a panu **Františku Polenovi** za poskytnutí potřebných materiálů.

Obsah:

Úvod.....	3
1. Současný stav	5
1.1. Radioaktivní odpady obecně	5
1.2. Radioaktivita a ionizující záření	6
1.3. Klasifikace radioaktivních odpadů	8
1.3.1. Původ radioaktivních odpadů	9
1.4. Shromažďování, třídění a přepracování radioaktivních odpadů	11
1.5. Vyhořelé jaderné palivo	13
1.6. Úprava radioaktivních odpadů	13
1.6.1. Cementace	14
1.6.2. Bitumenace	14
1.6.3. Vitifikace	14
1.7. Ukládání radioaktivního odpadu	15
1.7.1. Výběr vhodné lokality pro úložiště radioaktivních odpadů	16
1.7.2. Odhad dopadu na životní prostředí v dosahu vlivu úložiště radioaktivních odpadů	18
1.7.3. Dokumentace k radioaktivním odpadům	18
1.8. Kontaminace organismu radioaktivními látkami	19
1.8.1. Zevní kontaminace organismu	19
1.8.2. Vnitřní kontaminace	22
1.8.3. Metabolismus nejvýznamnějších radionuklidů v organismu	23
1.8.4. Akutní nemoc z ozáření	24
2. Cíl práce a hypotézy	28
3. Metodika práce	29
4. Výsledky	30
4.1. Legislativa k radioaktivním odpadům	30
4.2. Historie nakládání s radioaktivními odpad	31
4.3. Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO)	31
4.4. Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem	33
4.4.1. Nízko a středně radioaktivní odpady	34
4.4.2. Vyhořelé jaderné palivo a další vysoce radioaktivní odpady	34
4.5. Úložiště radioaktivních odpadů v České republice	35
4.5.1. RICHARD	35
4.5.2. BRATRSTVÍ	37
4.5.3. DUKOVANY	38
4.5.4. HOSTIM	39
4.6. Sklady vyhořelého jaderného paliva	40
4.6.1. Mezisklad a sklad Dukovany	40
4.6.2. Plánovaný sklad vyhořelého jaderného paliva Temelín	43

4.6.3.	Záložní varianta skladu použitého jaderného paliva v lokalitě Skalka	44
4.7.	Hlubinné úložiště	44
4.7.1.	Anatomie hlubinného úložiště	45
4.7.2.	Hlubinné úložiště ve světě	48
5.	Diskuse	49
6.	Závěr	53
7.	Seznam použité literatury	55
8.	Klíčová slova.....	58
9.	Přílohy.....	59

Úvod

Motto :

„Nevěř tomu, čemu nerozumíš, ale nezavrhuj, cos neprozkoumal.“

(Karel Čapek)

Dnešní moderní svět 21.století si již těžko dokážeme představit bez využívání jaderné energie a ionizujícího záření. Setkáváme se s nimi v jaderné energetice, průmyslu, zdravotnictví a řadě jiných oborů. Stejně jako při jiných lidských činnostech i zde vznikají odpady – radioaktivní odpady, které mohou být člověku i celému životnímu prostředí nebezpečné. Proto je třeba s nimi nakládat podle přísných, přesně daných pravidel. Základy přístupu k nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem byly formulovány na konferenci o mírovém využití jaderné energie v Ženevě v roce 1955. Od té doby jsou principy a postupy při tom využívané neustále modernizovány a zdokonalovány.

I v České republice vznikají tyto radioaktivní odpady, a proto je třeba věnovat jim zvýšenou pozornost. Problém radioaktivních odpadů je často probírán v médiích, které ovšem často podávají informace neobjektivní a zkreslené. Pokud se ale najde někdo, kdo se chce s problematikou radioaktivních odpadů seznámit po odborné stránce, narazí na překážku. Žádná odborná literatura na toto téma zatím nebyla zpracována. Také já jsem při svém výzkumu nenašla žádnou v češtině psanou monografii, která by rámcově informovala o celém systému nakládání s radioaktivními odpady. Proto bych chtěla do tohoto problému co nejvíce proniknout a popsat ve své bakalářské práci tak, aby každému čtenáři byly podány základní informace o problematice nakládání s radioaktivními odpady ve srozumitelné formě.

Jedním z hlavních důvodů, proč jsem si vybrala téma radioaktivních odpadů, je pravděpodobnost vzniku hlubinného úložiště v blízkosti mého bydliště. Jako většinu

obyvatel naší vesnice ani mě tento problém nenechává chladnou, a proto jsem se chtěla o radioaktivních odpadech dozvědět více.

Má bakalářská práce je rozdělena na dvě části, na teoretickou a praktickou část. Teorii je věnován současný stav, kde popisuji obecně vše o problematice radioaktivního odpadu od jeho vzniku až po uložení. Začlenila jsem zde také, jakým způsobem by mohlo být poškozeno lidské zdraví při úniku radioaktivity z odpadů. Praktickou část tvoří kapitoly výsledky a diskuse. Zde jsem se snažila nastínit postup České republiky v nakládání s radioaktivními odpady a zároveň porovnat s jinými vybranými státy. Cílem mé studie bylo co nehlouběji proniknout do problematiky nakládání s radioaktivními odpady a zmapovat celou situaci kolem úložišť radioaktivních odpadů u nás. Snažila jsem se shrnout všechny dostupné informace do uceleného souboru dat, který věrohodně podá základní informace k tématu.

V úvodu bych ještě chtěla říci, že do své práce jsem mezi radioaktivní odpady zahrnula také vyhořelé jaderné palivo, které však podle zákona není definováno jako odpad, jelikož je považováno za druhotnou surovinu. V budoucnu se předpokládá jeho další využití. Podle mého názoru však je součástí této problematiky.

1. Současný stav

1.1. Radioaktivní odpady obecně

Při mnoha lidských činnostech, průmyslem začínaje a medicínou konče, využíváme zdroje ionizujícího záření. Stejně jako při jiných činnostech vznikají po jejich použití zbytky, které se dále nedají již využít. Tento materiál, kterým jsou kontaminované předměty či zbytky používaných radionuklidových záříčů, nazýváme radioaktivním odpadem. Podobně jako s komunálními odpady musíme s radioaktivními odpady nakládat tak, aby se nestaly nebezpečnými pro životní prostředí a živé organismy. Jejich působení na biosféru je o to nebezpečnější, že jsou to látky radioaktivní s určitou aktivitou a tím by mohly vážně poškodit lidské zdraví. Proto musíme tyto odpady bezpečně izolovat od životního prostředí a nakládat s nimi podle přísných pravidel, které jsou přesně definovány v radiační ochraně. **(15, 22)**

Ne však všechny zbytky radionuklidových záříčů a kontaminovaných předmětů musí být radioaktivním odpadem. V radiační ochraně jsou definovány hranice, kdy působení ionizujícího záření na živé organismy a životní prostředí lze pokládat za nevýznamné. Na základě těchto hranic jsou stanoveny tzv. uvolňovací úrovně, tj. hodnoty, podle kterých nakládáme s radioaktivními zbytky jako s radioaktivním odpadem, a nebo jim nepřikládáme takový význam. V každém případě za radioaktivní odpad je považován materiál či látka obsahující radionuklidové záříče, které by po proniknutí do životního prostředí způsobily překročení průměrné efektivní dávky 0,25 mSv za kalendářní rok na jednotlivce z kritické skupiny obyvatel. **(15, 22, 26)**

Je zjištěno, že ročně vznikne na celém světě okolo 50.000 m³ radioaktivního odpadu. Z toho 500 m³ je vysoce radioaktivní. Ve srovnání s komunálním odpadem je to však mizivé množství, protože studie uvádějí, že obyvatelé v Evropské unii vyprodukují za rok 2 miliardy tun komunálního odpadu. **(1)**

1.2. Radioaktivita a ionizující záření

Radioaktivita je samovolná přeměna jader nestabilních nuklidů na jiná jádra, při níž vzniká ionizující záření. Byla objevena v roce 1896 Henrim Bequerelem při zkoumání vzorku uranové soli. Podstatu radioaktivity popsali Piere a Marie Curieovi. **(1)**

Radioaktivitu dělíme na přirozenou a umělou. Přirozenou radioaktivitu najdeme u řady látek v přírodě. Umělé radioaktivní prvky vznikají transmutací, vlivem řetězové reakce nebo pomocí urychlovačů částic (př. Co^{60}).

Tabulka č.1: Rozpadová řada uranu (1)

Radionuklid	Název	Typ rozpadu	Poločas rozpadu
^{238}U ↓	Uran	Alfa	$4,47 \cdot 10^9$ roků
^{234}Th ↓	Thorium	Beta	24,1 dne
^{234}Pa ↓	Protaktinium	Beta	1,18 min.
^{234}U ↓	Uran	Alfa	$2,45 \cdot 10^5$ roků
^{230}Th ↓	Thorium	Alfa	$8 \cdot 10^4$ roků
^{226}Ra ↓	Rádium	Alfa	1600 let
^{222}Rn ↓	Radon	Alfa	3,82 dne
^{218}Po ↓	Polonium	Alfa	3,11 min.
^{214}Pb ↓	Olovo	Beta	26,8 min.
^{214}Bi ↓	Bismut	Beta	19,9 min.
^{214}Po ↓	Polonium	Alfa	164 μs
^{210}Pb ↓	Olovo	Beta	22,3 roků
^{210}Bi ↓	Bismut	Beta	5,01 dne
^{210}Po ↓	Polonium	Alfa	138 dní
^{206}Pb	Olovo		stabil. prvek

Jednou z hlavních vlastností zdrojů radioaktivního záření je jejich aktivita, která vyjadřuje počet radioaktivních přeměn za jednotku času. Jednotkou je 1 Bq. Aktivita radioaktivních látek klesá s časem, což je charakterizováno poločasem přeměny. Poločas přeměny je doba, za kterou se rozpadne polovina jader. **(1, 36)**

Radionuklidy jsou zdrojem různého ionizujícího záření: **α , β a γ záření.**

Záření α - proud jader helia, má nejkratší dosah a lze ho odstínit listem papíru.

Záření β - proud záporně nabitých elektronů nebo kladně nabitých pozitronů, lze ho zachytit tenkou vrstvou hliníku.

Záření γ - elektromagnetické vlnění (proud pozitronů) vysoké frekvence, nemá elektrický náboj,
- přes svoji velkou energii je nejpronikavější a díky tomu také nejnebezpečnější pro lidský organizmus, pohltí ho však silná vrstva olova nebo betonu.

Ionizující záření je neviditelné, ale lze ho změřit detektory nebo dozimetry. Dozimetry jsou přístroje k měření dávky záření; tedy množství energie, kterou záření lidskému organizmu předalo. Jednotkou je 1 Gy.

Radioaktivitu a ionizující záření využíváme v mnoha oborech. Jaderné elektrárny pracují na principu jaderného štěpení; vzniká řetězová reakce, která je základem jaderné energie. Také v medicíně se můžeme setkat s radioaktivitou, a to v podobě např. Leksellova gama nože (léčba nádorů), radiofarmaka. Dalšími obory, které využívají radioaktivity a ionizujícího záření jsou průmysl, zemědělství, vědní obory atd. **(1, 36)**

Bohužel i při využívání ionizujícího záření a radionuklidů vznikají stejně jako při jiných lidských činnostech odpady. Od komunálních odpadů jsou o to nebezpečnější, že jsou v různé míře radioaktivní, a proto by mohly ohrozit celé životní prostředí včetně zdraví člověka. Je proto nutné s nimi nakládat tak, aby k tomuto ohrožení nedošlo.

1.3. Klasifikace radioaktivních odpadů

Radioaktivní odpady jsou klasifikovány a kategorizovány podle různých hledisek, například podle :

- výše radioaktivity, a to na nízko aktivní, středně aktivní a vysoce aktivní
- skupenství, na pevné, kapalné a plynné
- doby poločasu rozpadu převládajících radionuklidů,
- na krátkodobé a dlouhodobé
- původu, na institucionální a z jaderné energetiky.

Podle klasifikace je s radioaktivními odpady nakládáno určitým způsobem. Tak např. s vysoce aktivními a středně aktivními radioaktivními odpady musíme zacházet velice zodpovědně, protože jejich vysoká radioaktivita by měla nepříznivý vliv na životní prostředí. Proto je třeba při jejich manipulaci aplikovat speciální metody, zařízení a stínění proti záření. Vysoce aktivní odpad se navíc zahřívá, takže ho musíme chladit. V každém případě ho musíme na co nejdelší dobu izolovat od životního prostředí. **(1)**

Naopak nízko aktivní odpad můžeme v rozumné míře v kapalném nebo plynném stavu vypouštět do přírody, protože radioaktivita v běžném životním prostředí (radioaktivní pozadí) nebude těmito výpustmi pozorovatelně ovlivněna. To se týká např. našich jaderných elektráren. Jejich výpustě jsou samozřejmě pravidelně měřeny a kontrolovány. **(1)**

Tabulka č.2: Klasifikace radioaktivních odpadů podle Evropské komise

Kategorie	Charakteristika	Doporučený typ úložiště
1. Přechnodné radioaktivní odpady	Možné uvedení do životního prostředí za méně než 5 let	zajištěná skládka
2. Nízko a středně radioaktivní odpady	Nízká koncentrace radionuklidů, není potřeba brát v úvahu rozpadové teplo	-----
2.1. Nízko a středně radioaktivní odpady krátkodobé	Poločas rozpadu nepřesahuje 30 let, průměrná koncentrace dlouhodobých radionuklidů nepřesahuje 400 Bq/g jako průměr na celé úložiště	povrchové
2.2. Nízko a středně radioaktivní odpady dlouhodobé	Koncentrace dlouhodobých radionuklidů shora přesahuje uvedené limity	hlubinné
3. Vysoce radioaktivní odpady	Vysoká koncentrace dlouhodobých radionuklidů, je třeba brát v úvahu rozpadové teplo	hlubinné

Zdroj: 3

1.3.1. Původ radioaktivních odpadů

Podle místa původu dělíme odpady na dvě velké skupiny : radioaktivní odpady z jaderné energetiky a radioaktivní odpady institucionální.

1) Odpady z jaderné energetiky

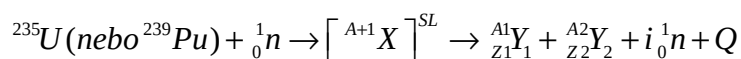
Na samém počátku si musíme uvědomit, co to vlastně radioaktivní odpad z jaderné energetiky je. Pro nevyužitelné pozůstatky z těžby a zpracování uranových a thoriových rud, které jsou prvopočátkem v jaderné energetickém cyklu, se nepoužívá označení radioaktivní odpad. Stejně tak vyhořelé jaderné palivo není radioaktivním odpadem. Tyto suroviny mohou být v budoucnu ještě dále zpracovány pro obsah cenných prvků, které však prozatím neumíme oddělit nebo nám zatím nejsou potřebné. Ale i tak musíme tyto suroviny bezpečně skladovat a izolovat od životního prostředí.

(26, 36)

O radioaktivním odpadu mluvíme až při výrobě samotných palivových článků. Vznikají odpady v kapalně, pevně i plynné formě a všechny obsahují radionuklidy z uran-radiových a thoriových rozpadových řad. Skupenství odpadů záleží na typu technologie výroby palivových článků a způsobu zpracování provozních médií.

Plynné odpady obsahují hlavně produkty ze štěpení ^{235}U a ^{239}Pu . Kapalně odpady se nacházejí v chladícím okruhu a obsahují radionuklidy, které vznikají při jaderné reakci neutronů s prvky konstrukčních materiálů jaderného reaktoru. Pevné radioaktivní odpady vznikají převážně kontaminací kapalných a nebo přímo aktivací konstrukčních materiálů reaktoru neutrony při štěpné reakci. (1, 36)

Obr.1. Štěpení ^{235}U (^{239}Pu)



(22)

Jaderné elektrárny produkují relativně málo radioaktivního odpadu (je zde zahrnuto i vyhořelé jaderné palivo), v průměru asi 10 % z celkového množství radioaktivních odpadů. Tento odpad je však vysoce radioaktivní.(1, 26, 36)

2) Institucionální odpady

Institucionálními radioaktivními odpady rozumíme odpady vznikající ve zdravotnictví, výzkumných pracovištích, průmyslu či zemědělství, kde je využíváno radionuklidových záříčů k různým účelům. Mezi tyto odpady patří např. pracovní oděvy, injekční stříkačky, radioaktivní záříče, rukavice atd.

Tyto odpady patří většinou mezi nízko aktivní a středně aktivní odpady. Přestávají být tedy radioaktivní během několika set let, a proto je lze ukládat do povrchových úložišť.

Institucionální radioaktivní odpady tvoří největší množství odpadů, až 90 % z celkového množství radioaktivních odpadů. Jejich radioaktivita je však velice malá. (26, 36)

1.4. Shromažďování, třídění a přepracování radioaktivních odpadů

Radioaktivní odpady jsou shromažďovány na jedno místo, kde jsou dále tříděny. Při třídění je nutno brát v úvahu jejich fyzikální a chemické vlastnosti. Jinak se tedy zachází s kapalnými a jinak s pevnými odpady. Často dochází ještě k jejich přepracování, tedy oddělení ještě využitelných látek od konečného odpadu, který by měl být co nejmenší. K tomu se využívá různých technologií. (26)

Plynné radioaktivní odpady

Plynné radioaktivní odpady vypuštěné do ovzduší ve formě aerosolů jsou zpravidla zpracovány filtrací přes vysoce účinné filtry HEPA (High Efficiency Particulate Air Filter). Tyto filtry vychytávají radionuklidy, takže se do životního prostředí tyto škodlivé zdroje ionizujícího záření téměř nedostanou (jejich účinnost je asi 99,8%). Tím je tedy plyný radioaktivní odpad minimalizován. Použité HEPA filtry jsou zneškodňovány stejně jako radioaktivní odpad. Jsou zpracovány a nakonec uloženy v kontejnerech do úložišť radioaktivních odpadů. (1, 26)

Kapalné radioaktivní odpady

Kapalné radioaktivní odpady jsou shromažďovány při velkém množství do nádrží nebo při malém množství do nádob. Jak nádoby tak nádrže musí být z vhodného materiálu, aby nedocházelo ke korozi nebo k úniku při manipulaci. Zpravidla jsou ještě nádrže či nádoby umístěny do dalších nádob, které jsou v případě poškození schopné pojmout obsah vložených nádob nebo nádrží.(1, 26)

Kapalné odpady jsou tříděny na vodné roztoky a organické kapaliny. Toto třídění je důležité kvůli dalšímu zpracování, při kterém dochází k dekontaminaci a vysokému zkoncentrování zbylého odpadu.(26)

a) Vodné roztoky kapalných radioaktivních odpadů

Nejvíce vhodnou zpracovávací metodou je odpařování na odparekách. Využívá ji většina původců radioaktivního odpadu, protože snižuje koncentraci radionuklidů ve výpustích a výrazně redukuje objem kapalných odpadů. Nevýhodou této metody je koroze odparek. Dalším zpracováním je iontová výměna, která pracuje na základě selektivity iontových měničů k určitým prvkům. Nevýhoda tohoto zpracování však je v nízké tepelné a radiační stabilitě iontových měničů a jejich nízká odolnost v určitém chemickém prostředí. Jednou z možností jak snížit objem kapalných odpadů je také extrace organickými činidly. Tato metoda se nazývá PUREX a používá se hlavně k oddělení cesia a stroncia od odpadu při přepracování vyhořelého jaderného paliva.

Dále se ještě využívá metod membránových procesů, elektrodialýzy, elektroflotace atd. (26)

b) Organické kapalně radioaktivní odpady

Tyto odpady se nejčastěji zpracovávají spalováním. Konečným odpadem je v tomto případě popel, který je potom snadno upravitelný k uložení.

K dalším metodám patří oxidace, destilace organické fáze od vodní nebo reextrakce radionuklidových zářičů z organických kapalných odpadů vodnými roztoky. (26)

Pevné radioaktivní odpady

Pevné radioaktivní odpady třídíme na stlačitelné a nestlačitelné (pokud bychom chtěli zmenšit jejich objem) nebo na hořlavé a nehořlavé (pro zabezpečení jejich dalšího uložení nebo pro spalování ve specifických spalovnách).(26)

1.5. Vyhořelé jaderné palivo

Vyhořelé jaderné palivo není v souladu s atomovým zákonem⁽¹⁾ odpadem, pokud je za něj neprohlásí jeho vlastník. Je považováno za druhotnou surovinou, která se bude v budoucnu dále přepracovávat. A pouze to, co zbyde po jeho přepracování, se bude považovat za odpad. Prozatím však nebyly vyvinuty vhodné technologické postupy k přepracování vyhořelého paliva, a proto s ním je prozatím nakládáno jako s radioaktivním odpadem. Nesmí však být ztížena jeho další budoucí úprava. **(1)**

Vyhořelé jaderné palivo tvoří asi 1% objemu radioaktivních odpadů a obsahuje přes 90% radioaktivity. Patří tedy do vysoce radioaktivních odpadů, které musíme izolovat od životního prostředí.

V České republice vyprodukují obě jaderné elektrárny (Temelín, Dukovany) asi 3000 tun vyhořelého paliva za celou dobu svojí životnosti. Ročně vyprodukují asi 98 tun. Vyhořelé jaderné palivo se skládá hlavně z uranových izotopů (96%), z plutonia (1%) a směsi štěpných produktů izotopů stroncia a cesia (3%). Doba životnosti těchto vysoce radioaktivních izotopů je přes 100.000 let. Po celou tuto dobu musí být izolovány od životního prostředí.**(1, 29)**

V České republice je vyhořelé palivo prozatím skladováno v povrchových meziskladech v Dukovanech (pro možné budoucí využití). **(1, 29)**

1.6. Úprava radioaktivních odpadů

Úpravou radioaktivních odpadů rozumíme změnu jejich fyzikálních a chemických vlastností, případně jejich vložení do jiných obalových souborů. Cílem této úpravy je zajistit bezpečnou dopravu, skladování nebo uložení. Smyslem této úpravy je zafixování radionuklidů ve hmotě, do které jsou vloženy. Kapalně odpady

⁽¹⁾ Zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření

jsou upravovány cementací, bitumenací a vitrifikací. Těmito třemi způsoby jsou částečně upravovány i pevné odpady. Obalové hmoty musí odolat naprosto všem vnějším i vnitřním činitelům (př. koroze, teplo, mechanické poškození atd.).(26)

1.6.1. Cementace

Do kovových sudů je nalita vzniklá směs cementu (70%) a radioaktivního koncentrátu (30%). Při této metodě je kladen důraz na druh cementu ve vztahu ke složení radioaktivního koncentrátu. Do směsi jsou často přidávána aditiva. Výhodou této úpravy je velká odolnost v tlaku, jednoduchá a levná technologie výroby. Nevýhodou jsou velký objem a vysoká vyluhovatelnost (tj. množství radionuklidů, které se uvolní po ponoření produktu cementace do vodného roztoku za časovou jednotku). (22, 26)

1.6.2. Bitumenace

Tato metoda spočívá ve smíchání kapalného odpadu s bitumenem za současného odpaření vody. Bitumen je organická látka (živice) podobná asfaltu. Výhody této úpravy spočívají v objemové redukci výsledného produktu, nízké vyluhovatelnosti ve vodě, odolnosti vůči chemickým vlivům, radiační stálosti (do 10^7 Gy). Nevýhodou je hořlavost bitumenu a vysoké náklady na výrobu. (22, 26)

1.6.3. Vitrifikace

Tento proces zpevňování je založen na základě výroby speciálních skel nebo sklo keramiky z kapalného radioaktivního odpadu a sklovitých materiálů při teplotě 900 až 1200°C. Hlavní složkou sklovitého materiálu je oxid křemičitý. Vitrifikace se může použít ke zpevňování vyhořelého jaderného paliva (používají se borosilikátová skla). Výhodou této metody je opět malý objem produktu a velmi nízká vyluhovatelnost. Nevýhodou je velice složitá a nákladná technologie výroby. (22)

Tabulka č.3: Typy obalů pro nízko a středně radioaktivní odpady

Charakteristika	200 l sud	200 l sud zalitý cementem ve 400 l	Betonový kontejner na 200 l sud
Vnitřní objem (l)	200	200	200
Vnější objem (l)	210	410	1000
Vnější rozměr (cm)	57 x 88	77 x 110	100 x 125
Hmotnost (kg)	< 500	< 1000	< 2 500
Tloušťka stěny (mm)	1	100	200
Materiál	pozink. ocel	ocel, beton	beton
Povrchová úprava	nátěr	nátěr	není
Biologické stínění	není	10 cm beton	20 cm beton
Manipulovatelnost	výborná	dobrá	dobrá
Korozní životnost (r)	20	> 100	> 150

Zdroj: 3

1.7. Ukládání radioaktivního odpadu

Na nakládání s radioaktivními odpady jsou kladeny přísné bezpečnostní podmínky. Zatím nebyl nalezen jiný způsob nakládání s nimi než jen jejich ukládání. Byla vybrána speciální místa na základě pečlivého posouzení, kde byla zřízena úložiště radioaktivních odpadů. Tento úložný systém zabezpečuje izolaci odpadů od životního prostředí a splňuje přísné bezpečnostní požadavky.(26)

Úložiště radioaktivních odpadů dělíme z hlediska jejich umístění na povrchová a hlubinná. Na našem území existují prozatím pouze povrchová úložiště, kde jsou radioaktivní odpady skladovány. V budoucnu by měly být vytvořeny hlubinné úložiště pro vysoce radioaktivní odpad a vyhořelé jaderné palivo. Tyto dvě složky radioaktivních materiálů jsou natolik nebezpečné, že jejich dlouhodobé uložení v povrchových úložištích nepřipadá v úvahu. **(26, 29)**

Krátkodobé a nízko aktivní odpady z jaderné energetiky jsou ukládány v povrchovém úložišti v areálu jaderné elektrárny Dukovany. Sklad má objem asi 55 000 m³, v dnešní době je zaplněno zhruba 6% celkové kapacity skladu.

Krátkodobé nízko aktivní institucionální odpady jsou ukládány v úložištích Richard (u Litoměřic) a Bratrství (u Jáchymova). Celkový objem úložiště Richard je 17 050 m³ a Bratrství má pět komor o objemu 1200 m³. V dnešní době je úložiště Richard zaplněno z 61% a Bratrství z 69% celkové kapacity. **(36)**

1.7.1. Výběr vhodné lokality pro úložiště radioaktivních odpadů

Pro zřízení úložiště je důležitý vhodný výběr odpovídající lokality. Na základě podkladů o tomto území jsou prováděny bezpečnostní studie, které prověří, zda tato lokalita může být úložištěm radioaktivních odpadů. Bezpečnostní rozborů potvrzují, že zřízení úložiště je v plném souladu s podmínkami radiační ochrany, a to od jeho umístění až po projekt a výstavbu.

Tyto podmínky jsou závazné pro provozovatele úložiště i pro původce odpadů. Bezpečnostní rozborů také zkoumají vliv úložiště po jeho naplnění a uzavření. K této tématice jsou zpracovány další plány. **(26)**

a) Geografická charakteristika

Popisuje rozmístění, hranice a prostor za hranicemi úložiště. Je zhotovena mapa této lokality, na které jsou vyznačeny trasy veřejné dopravy, ropovody, plynovody, průmyslové závody, sklady nebezpečných látek apod.

b) Demografická charakteristika

Udávají aktuální stav osídlení a distribuce osídlení s ohledem na vzdálenost a směr. Na základě těchto údajů je stanovena zátěž obyvatelstva v bezpečnostních podmínkách.

c) Meteorologická, klimatická a hydrologická charakteristika

Popisují vliv klimatických podmínek na vzniku a provozu úložiště (výkyvy teplot, srážky, bouřky, větry, vlhkost vzduchu apod.). Z hydrologických údajů je důležité rozmístění vodních toků, jezer, nádrží a výskyt podpovrchové vody.

d) Geologická, seismologická a geofyzikální charakteristika

Popsání horninového prostředí úložiště, zda je možný výskyt zemětřesení (do vzdálenosti 30 km). Také musí být zaznamenány veškeré sesuvy půdy.

e) Inženýrsko geologická charakteristika

V tomto hodnocení je studován vliv průběhu stavby na lokalitu (vrty, výkopy, budování konstrukce atd.).

Důležité jsou také informace o předpokládaném množství uloženého radioaktivního odpadu, jaké jsou fyzikální a chemické vlastnosti odpadu. Je vytvořen jakýsi katastrofický scénář v případě úniku radioaktivity z radioaktivních odpadů, jakým způsobem by mohlo k úniku radioaktivity dojít.

Ke každému plánovanému skladu radioaktivního odpadu je nejdříve vytvořen projekt, který obsahuje mimo jiné i jaký vliv bude mít uložený materiál na životní prostředí včetně obyvatelstva. V projektu je provedena analýza možných nehod, při kterých by mohlo dojít k úniku radioaktivity (př. netěsnost obalového materiálu, zemětřesení, teroristický útok atd.). Dále je zde popsáno hodnocení zdravotních rizik spjatého se záměrem vybudování skladu. Tyto projekty jsou dostupné veřejnosti.

Bezpečnostní rozbor představují základní soubor analýz, které identifikují významné a kritické scénáře příjmu radionuklidů, založené na znalosti detailů okolního prostředí, kritérií přijatelnosti uložení odpadů a podmínek provozu úložiště.⁽²⁾ To vše s ohledem na současné i budoucí generace.(26)

1.7.2. Odhad dopadu na životní prostředí v dosahu vlivu úložiště radioaktivních odpadů

Tyto odhady jsou sestaveny pomocí všech transportních mechanismů a cest. Transportními cestami rozumíme cesty přenosu radionuklidů, které by mohly ohrozit zdraví člověka. Rozbory se provádí pro období výstavby, provozní období, období institucionální kontroly, období po ukončení institucionální kontroly. Výsledkem této studie je analýza mechanismů uvolnění kontaminantů a jejich transportu do míst, kde může dojít k jejich styku s člověkem. (26)

Mezi transportní cesty patří :

- transport podzemní vodou
- transport ovzduším
- transport povrchovou vodou
- transport potravinovými řetězci.

Pro všechny typy transportu se vypočítávají efektivní dávky a stanovují se kritické transportní cesty. (26)

⁽²⁾ BURIAN, I. a kol., *Principy a praxe radiační ochrany*, 1.vyd. Praha: Azin CZ, 2000. 619 s., str.495
ISBN 80-238-3703-6

1.7.3. Dokumentace k radioaktivním odpadům

Každý radioaktivní odpad musí mít svůj průvodní list. Tento dokument provází radioaktivní odpad od jeho úpravy až po jeho uložení. Jsou zde zapsány důležité fyzikální a chemické vlastnosti (složení, objem či hmotnost, aktivita, skupenství, typ obalového materiálu atd.). Dále je zde uvedeno prohlášení o nepřítomnosti volných kapalin, pyroforických a výbušných látek nebo jedů v odpadu, a identifikační znaky odpadu.(26)

1.8. Kontaminace organismu radioaktivními látkami

I z radioaktivního odpadu může dojít k úniku nebezpečné radioaktivity, ať už při samotné manipulaci s odpadem a nebo i při zneužití teroristy, kteří pomocí radioaktivního odpadu mohou vytvořit špinavou bombu proti lidstvu.

Únik radioaktivity z jakéhokoli zdroje ionizujícího záření může ohrozit lidské zdraví, a to kontaminací organismu radionuklidy. Kontaminací rozumíme přítomnost radioanuklidů na povrchu nebo uvnitř organismu. Rozlišujeme dva typy kontaminace: zevní a vnitřní.(4)

1.8.1. Zevní kontaminace organismu

Zevní kontaminace je znečištění nekrytého povrchu těla, kůže a sliznic, radionuklidy. Z toho většina radionuklidů je tvořena β a γ zářiči (^{131}I , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{239}Pu atd.). Běžný oděv nás dokáže před účinky β záření ochránit, ale v případě kontaminace nechráněné kůže význam záření β roste. Před účinky γ nás však oděv neochrání. (4)

Účinnou bariérou proti vstupu většiny radionuklidů do těla je neporušená kůže. Záleží ovšem na typu radionuklidu a na radiosenzitivitě kůže, která je na různých místech těla odlišná. Pokud se na tělo nachází rána, dochází k její rychlé kontaminaci.

Ve vodě rozpustné radionuklidy se dostávají poškozeným povrchem kůže do krevního řečiště. Naopak nerozpustné sloučeniny radioizotopů zůstávají v ráně a při vysoké radioaktivitě mohou komplikovat průběh hojení. (2, 5)

Při zevní kontaminace převažuje účinek beta záření, které proniká nejvýše do hloubky 2-5 mm a proto vyvolává jen povrchová poškození. K rozvoji patologických změn v důsledku ozáření dochází na kůži, spojivkách a sliznicích dutiny ústní a nosní. (4)

Tabulka č.4: *Prahové dávky a doba rozvoje poškození kůže ionizujícím zářením*

Kompartment	Prahová dávka (Gy)	Nástup příznaku
Epidermis	3	8-20 dnů
Bazální vrstva		10-14 dnů
Denudace		10-15 dnů
Vlasové folikuly	2-3	Hodiny, dny
Smrt buněk folikulů	0,1	6-12 hodin
Epilace	2-3	7-15 dnů
Mazové žlázy	3	21-28 dnů
Potní žlázy	3	25-30 dnů
Cévy	2-3	Hodiny až týdny
Časný erytém	2-3	Hodiny
Poškození kapilár	9-10	Dny až týdny

Zdroj: 5

Dávka záření působícího na kůži závisí na aktivitě uvolněných radionuklidů, stáří směsi štěpných produktů a na délce kontaktu radionuklidů s kůží. V závislosti na dávkovém příkonu a na radiosensibilitě kožního okrsku se lokální poškození rozvíjí jako akutní nebo chronická radiační dermatitida. Akutní dermatitida vzniká

při dávkových příkonech 0,1 až 1 Gy.h⁻¹. Chronická dermatitida bývá vyvolána dávkovým příkonem 0,001 až 0,01 Gy.h⁻¹. Za prahovou účinnou aktivitu štěpných produktů, schopnou vyvolat akutní radiační poškození při kontaktu s kůží, považujeme plošnou aktivitu 15 μCi .cm⁻², kdy platí vztah 1Ci = 3,7.10¹⁰ Bq. (2, 5)

Radiační dermatitida

Toto onemocnění je velice podobné popáleninám. Vzniká po jednorázovém ozáření dávkou 3 Gy a více. Intenzita projevu onemocnění závisí na dávce záření, typu záření, velikosti dávkového příkonu, lokalizaci a velikosti ozářené oblasti. Příznaky začínají zánětlivou reakcí, přecházejí v puchýře a zvředovatění až po nekrózu tkáně.

Chronická dermatitida je typická fibrotizací kůže (zjizvení). Kůže je hladká, šupinatá a citlivější na jakékoliv traumata. Po delším časovém intervalu se objevují karcinomy kůže. (5)

Tabulka č.5: *Klinické příznaky radiační dermatitidy v závislosti na dávce a čase*

Příznak	Dávkový rozsah (Gy)	Čas nástupu (dny)
Sekundární erytém	3-10	14-21
Epilace	>3	14-18
Suchá desquamace	8-12	25-30
Vlhká desquamace	15-20	20-28
Tvorba puchýřů	15-25	15-25
Zvředovatění	>20	14-21
Nekróza	>25	>21

Zdroj:5

1.8.2. Vnitřní kontaminace

Při vnitřní kontaminaci dochází ke vdechnutí (inhalaci) nebo požití (ingesci) radionuklidu. Většinou je současně provázena vnější ozáření osob. Při inhalaci se částice větší než 15 μm zachytí v dutině nosní a hltanu, částice velké 5-15 μm se vychytávají v bronchiálním stromu a částice menší než 5 μm jsou většinou vdechnuty až do plic. Při ingesci putují radionuklidy gastrointestinálním traktem. Zde se radionuklidy vstřebávají podle svého charakteru, některé se vstřebají již v trávicí trubici, jiné až v tlustém střevě. **(2, 4)**

Fyzikálně chemické a chemické vlastnosti radionuklidů určují jejich další osud v organismu. Rozpustné látky se z cest vstupu resorbují rychle, dostávají se do krve a krví do orgánů, kde se vychytávají. **(2)**

Podle typu distribuce se radionuklidy rozdělují do čtyř skupin:

- rovnoměrné rozdělení v organismu (Na, K, Rb, Cs)
- afinita ke kostní tkáni (Ca, Sr, Ra, Pu)
- afinita k retikuloendoteliární soustavě (La, Pr, Ce)
- selektivní rozdělení v organismu (I ve štítné žláze, Fe v krvetvorbě)

Většina radionuklidů se v organismu rozděluje rovnoměrně, což většinou vede k poškození orgánů nebo celého systému. Radionuklidy, které mají afinitu k určitým tkáním většinou působí dlouhodobě a onemocnění má chronický charakter. Akutní forma onemocnění při vnitřní kontaminaci je vzácná. Vedle poškození dýchací a trávicí soustavy, které souvisí s transportem radionuklidů po inhalaci nebo ingesci jsou nejvíce ohroženy kostní tkáň a štítná žláza. **(2, 4)**

1.8.3. Metabolismus nejvýznamnějších radionuklidů v organismu

Jód (^{131}I)

Jód-131 je beta zářič, který je dobře rozpustný ve vodě a velice dobře vstřebatelný. Po vstřebání se kumuluje ve štítné žláze, která ho vychytává z organismu. Štítná žláza je poměrně radiosenzitivní orgán, který na vysoké absorbované dávky reaguje hypofunkcí a později vyšší pravděpodobností výskytu karcinomů. Poločas rozpadu tohoto nuklidu je 8,05 dne.

Po kontaminaci organismu radiojódem je nutné rychle ho vyvézt podáním jodidu draselného, který nahradí radioaktivní jód. Je nutné podat tyto jodidové tablety do šesti hodin po kontaminaci, jinak je léčba neúčinná. (5)

Cesium (^{137}Cs , ^{135}Cs)

Cesium-135 je beta zářič a cesium-137 gama zářič. Poločas rozpadu ^{137}Cs je 33 let a ^{135}Cs je poločas rozpadu $1,6 \cdot 10^6$ let. V organismu se rozdělují většinou rovnoměrně, ale převládá afinita ke kosternímu svalstvu a myokardu. (2)

Stroncium (^{90}Sr)

Stroncium-90 je beta zářič s poločasem rozpadu 28,6 let. Vstřebává se do kostí a kostní dřeně. Nebezpečné je hlavně z hlediska vyvolání karcinomů kostí. Ihned po kontaminaci lze radiostroncium vyvézt z organismu fosfátem hlinitým nebo síranem barnatým. (5, 6)

Plutonium (^{239}Pu)

Plutonium je smíšený alfa a beta zářič s poločasem rozpadu 24 360 let. Nejčastěji proniká do těla přes poraněnou kůži. Dostává se do krve a z té přechází z 45% do jater, z 45% do kostí a zbytek se ukládá v dalších tkáních. I plutonium můžeme z organismu vyvézt a to pomocí dietylentriamín pentaoctové kyseliny. (5)

Uran (^{238}U , ^{235}U , ^{239}U)

Tyto izotopy uranu emitují všechny typy záření. Mají velice dlouhý poločas rozpadu (^{235}U až 700 mil. let). Z gastrointestinálního traktu je vstřebatelnost tohoto těžkého kovu malá, ale pokud se dostane do organismu, je velice toxický. Ke vstřebání dochází v parenchymu ledvin, kde vznikají nekrotické změny. Uran lze vyvézt podáním bikarbonátu sodného. (5, 6)

Tabulka č.6: Léčebné postupy při vnitřní kontaminaci

Radionuklid	Medikace	Účinek
Jód	Jodid draselný	Kompetitivní inhibice jódu ve štítné žláze
Plutonium	Dietyltriamin pentaocetát vápenatý	Vyvázení
Uran	Bikarbonát sodný	Alkalizace moči
Cesium	Berlínská modř	Mobilizace orgánů
Stroncium	Síran barnatý, Alginát sodný	Snížení vstřebání

Zdroj: 5

1.8.4. Akutní nemoc z ozáření

Akutní nemoc z ozáření je poškození organismu jednorázovou dávkou ionizujícího záření o dávce vyšší než 0,7 Gy. Jde o sdružené působení záření - celkové ozáření zevně i vnitřně gama zářením, poškození tělesného povrchu zářiči beta a orgánové poškození zářiči beta i alfa. U akutní nemoci z ozáření rozlišujeme tři syndromy, jejichž výskyt je závislý na absorbované dávce záření: dřeňový, gastrointestinální a neurovaskulární syndrom. (2)

U jednotlivých syndromů ještě rozpoznáváme čtyři časové fáze: prodromální, latentní, manifestní a rekonvalescence. Délka a závažnost jednotlivých fází závisí na dávce ionizujícího záření.

Tabulka č.7: *Akutní nemoc z ozáření v časových a dávkových profilech*

Syndromy	Prahová dávka	Prodromální fáze	Latentní fáze	Manifestní fáze
Dřeňový	1 Gy	30 min - 48 hod.	2.den – 3. týden	2. den – 4. týden
Gastrointestinální	8 Gy	10 min - 48 hod.	3. – 5. den	5. – 8. den
Neurovaskulární	30 Gy	od 5 min.	2. den nebo chybí	2. – 4. den

Zdroj: 5

1.8.4.1.Syndromy akutní nemoci z ozáření

Dřeňový syndrom

Již při dávce 0,7 Gy se objevuje útlum krvetvorby. Nejvíce je však kostní dřeň poškozena při celotělovém ozáření o dávce 1 až 10 Gy. Míra poškození kmenových buněk je úměrná dávce záření. Kmenové buňky jsou vůči záření tím citlivější, čím jsou méně diferencované. Již po prvním týdnu po ozáření jsou patrné známky regenerace krvetvorby. **(2, 5)**

Ozáření nezpůsobuje pouze onemocnění krvetvorby, ale také poškození lymfatické tkáně, sleziny, brzlíku u dětí a lymfatických uzlin. **(5)**

Střevní syndrom

Působení ionizujícího záření o dávce již 0,4 Gy vyvolá poškození střevního epitelu. K největšímu rozvoji této nemoci však dochází při dávkách 10 až 100 Gy na celé tělo. Se stoupající dávkou se prohlubuje nerovnoměrnost mezi vznikem

epiteliálních buněk klků v kryptách a mezi jejich zánikem na vrcholu klků. Dochází k obnažení sliznice a k narušení resorpční a bariérové střevní funkce. Dostaví se porucha vstřebávání a zvýšené vylučování tekutin, elektrolytů a bílkovin. Výsledkem je celkové poškození organismu. (2, 5)

Neurovaskulární syndrom

Tento syndrom má dvě podformy – vaskulární a mozkovou. Vaskulární poškození se objeví již po dávkách ozáření 30 Gy a k mozkovému poškození dochází po ozáření dávkou kolem 100 Gy. Při dávce 100 Gy dochází ke smrti do několika dnů, při dávce 500 Gy během dvou hodin a při dávkách vyšších než 1000 Gy nastupuje okamžitá smrt. (2)

Při poškození cév dochází ke zvýšení permeability kapilár a to vlivem úbytku endoteliálních buněk. Obvykle nastává pokles krevního tlaku a následný hypovolemický šok a smrt.

Při poškození centrálně nervového systému dochází k nekróze a edému. Důsledkem toho jsou křeče, třes, těžká porucha vědomí a smrt. (2, 5)

1.8.4.2. Časové fáze akutní nemoci z ozáření

Prodromální fáze

Jedná se o bezprostřední stresovou reakci organismu na ozáření. Prodromální fáze akutní nemoci z ozáření je charakterizována rychlým nástupem nauzey, zvracením, průjmem a celkovou slabostí. Objevuje se mezi několika minutami a 6 hodinami po ozáření. Se zvyšující dávkou záření jsou obtíže intenzivnější a mají delší trvání. Příznaky přetrvávají jeden až dva dny, ale mohou být pociťovány i delší dobu. (5)

Latentní fáze

V této fázi dochází k úplnému nebo částečnému ústupu obtíží, které se objevily v prodromální fázi. Ozáření jsou tedy bez klinických příznaků. Se vzrůstající dávkou se latentní fáze zkracuje. Rozvíjí se poškození životně důležitých systémů, hlavně krvetvorby a zažívacího traktu. (2, 5)

Manifestní fáze

V této fázi dochází k plnému rozvoji akutní nemoci z ozáření. Rozvíjí se komplexní poškození, doprovázeného odezvou na úrovni neurohumorálních regulačních mechanismů a v oblasti látkové výměny. Typickými příznaky jsou zvýšená únava, třesavka, krvácení z dásní a nosu, průjem, horečka, rozvrat imunitního systému. Tato fáze trvá většinou 4 až 6 týdnů. Většina postižených v této fázi umírá. V příznivém případě nastupuje fáze rekonvalescence. (5)

Rekonvalescentní fáze

Tato fáze nastává jen v případě, že ozářený přežije manifestní fázi. V tomto období nastává úplné nebo částečné uzdravení. Záleží na individuální citlivosti každého jedince na ionizující záření. Nejčastější přetrvávající poruchou je spermatogeneze. (2)

2. Cíl práce a hypotézy

Problematika zneškodňování radioaktivních odpadů je velmi aktuální. Usazují tak z diskusí v médiích, kde je tento problém často řešen. I přesto však v současné době neexistuje žádná ucelená odborná literatura na toto téma.

Cílem mé bakalářské práce je proniknout do problematiky ukládání radioaktivních odpadů. Ráda bych shrnula všechny dostupné informace k tématu do uceleného souboru dat tak, aby byly čtenáři podány základní informace k tématu ve srozumitelné formě. Dále bych chtěla zmapovat celkovou situaci kolem úložišť radioaktivních odpadů u nás. Veškeré sesbírané informace uvedu ve výsledcích.

V oddílu věnovanému diskusi bych chtěla porovnat postupování České republiky v politice nakládání s radioaktivními odpady s jinými vybranými státy.

Ve své práci jsem si stanovila tyto hypotézy:

Hypotéza 1: Ověření platnosti domněnky Světové zdravotnické organizace (WHO) o existenci časovaných bomb v podobě skládek radioaktivních odpadů v podmínkách České republiky.

Hypotéza 2: Nalezení jiné alternativy řešení nakládání s radioaktivními odpady než jen jejich ukládání.

Zda se mé hypotézy potvrdily jsem rozebrala v závěru práce.

3. Metodika práce

Metodika práce spočívala ve shromažďování informací k tématu zejména z odborné literatury a internetových zdrojů, z právních legislativ a publikovaných brožur. Navštívila jsem mimo jiné informační centrum Temelína a Správy úložišť radioaktivních odpadů, kde jsem získala mnoho potřebných informací a materiálů.

Toto téma je samozřejmě velice široké, proto jsem se především zaměřila na sběr základních dat k problematice radioaktivních odpadů. Největší část své práce jsem věnovala systému ukládání radioaktivního odpadu u nás a komplexu úložišť radioaktivních odpadů.

4. Výsledky

4.1. Legislativa k radioaktivním odpadům

V této podkapitole bych chtěla vyjmenovat nejdůležitější dokumenty a zákony týkající se radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva využívaných v České republice.

Česká republika je členem Společné úmluvy o bezpečném nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem. V našem státě je nakládáno s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem podle usnesení vlády č. 487/ 2002; koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem . V této koncepci je zformulována strategie státu a státních organizací při nakládání s radioaktivními odpady na období přibližně do roku 2025 s výhledy až do konce 21. století. **(8)**

Požadavky na nakládání s radioaktivními odpady jsou definovány v zákonu č. 18/1997 Sb.(atomový zákon) v §§ 24-31 a ve vyhlášce SÚJB č. 307/2002 Sb. (o radiační ochraně) v §§ 46-55 .Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB) v souladu s § 3 odst. 2 písm. k , zákona č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření, každoročně zveřejňuje zprávu o hospodaření s radioaktivními odpady v České republice.⁽³⁾

Za bezpečné ukládání radioaktivního odpadu odpovídá stát, a to prostřednictvím Správy úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO). Ta byla zřízena rozhodnutím ministra průmyslu a obchodu č. 107/1997 dne 20. května 1997 (doplnění č. 80/2001). **(26)**

⁽³⁾ Zákon č. 18/1997 Sb; o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon), Vyhláška č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně

4.2. Historie nakládání s radioaktivními odpady

Systém nakládání s radioaktivními odpady v České republice má poměrně dlouhou historii. Radioaktivní odpady vznikaly na našem území ve větším rozsahu již od počátku 18. století, v souvislosti s využíváním uranu a thalia. Od roku 1959 se vytvářel celostátní systém svozu a zneškodňování radioaktivních odpadů vzniklých ve výzkumu, zdravotnictví, průmyslu a v jiných neenergetických oblastech. Provoz systému zajišťoval Ústav pro výzkum, využití a výrobu radioizotopů. Součástí tohoto systému byla úložiště radioaktivních odpadů Hostím (již uzavřené), od roku 1964 úložiště Richard a od roku 1972 úložiště Bratrství. (22)

Náklady na trvalé zneškodňování neenergetických radioaktivních odpadů byly do roku 1990 hrazeny státem. Od roku 1991 původci odpadů hradili jen náklady související s úpravou radioaktivních odpadů. Po přijetí atomového zákona (z.č.18/1997 Sb.) jsou původci radioaktivních odpadů povinni hradit i náklady spojené s trvalým uložením radioaktivních odpadů. (22, 26)

V roce 1981 byla schválena vládní koncepce zneškodňování radioaktivních odpadů z provozu jaderných reaktorů, která zahrnovala i výstavbu povrchového úložiště v ČR. To bylo zřízeno v areálu jaderné elektrárny Dukovany, kde jsou radioaktivní odpady ukládány od roku 1995. Současně s ním byl uveden do provozu také sklad pro vyhořelé jaderné palivo.

V roce 1997 byla založena Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO), která zajišťuje činnosti spojené s ukládáním radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva.(22, 26, 29)

4.3.Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO)

Odpovědnost za bezpečné nakládání s radioaktivními odpady na území České republiky má Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO), která byla zřízena Ministerstvem průmyslu a obchodu na základě atomového zákona. Tato organizace

se řídí ustanoveními atomového zákona, ostatními zákony a právními předpisy schválenými vládou České republiky; postupuje v souladu s mezinárodními doporučeními a smlouvami z oblasti využívání jaderné energie a ionizujícího záření přijatými naším státem. **(18, 29)**

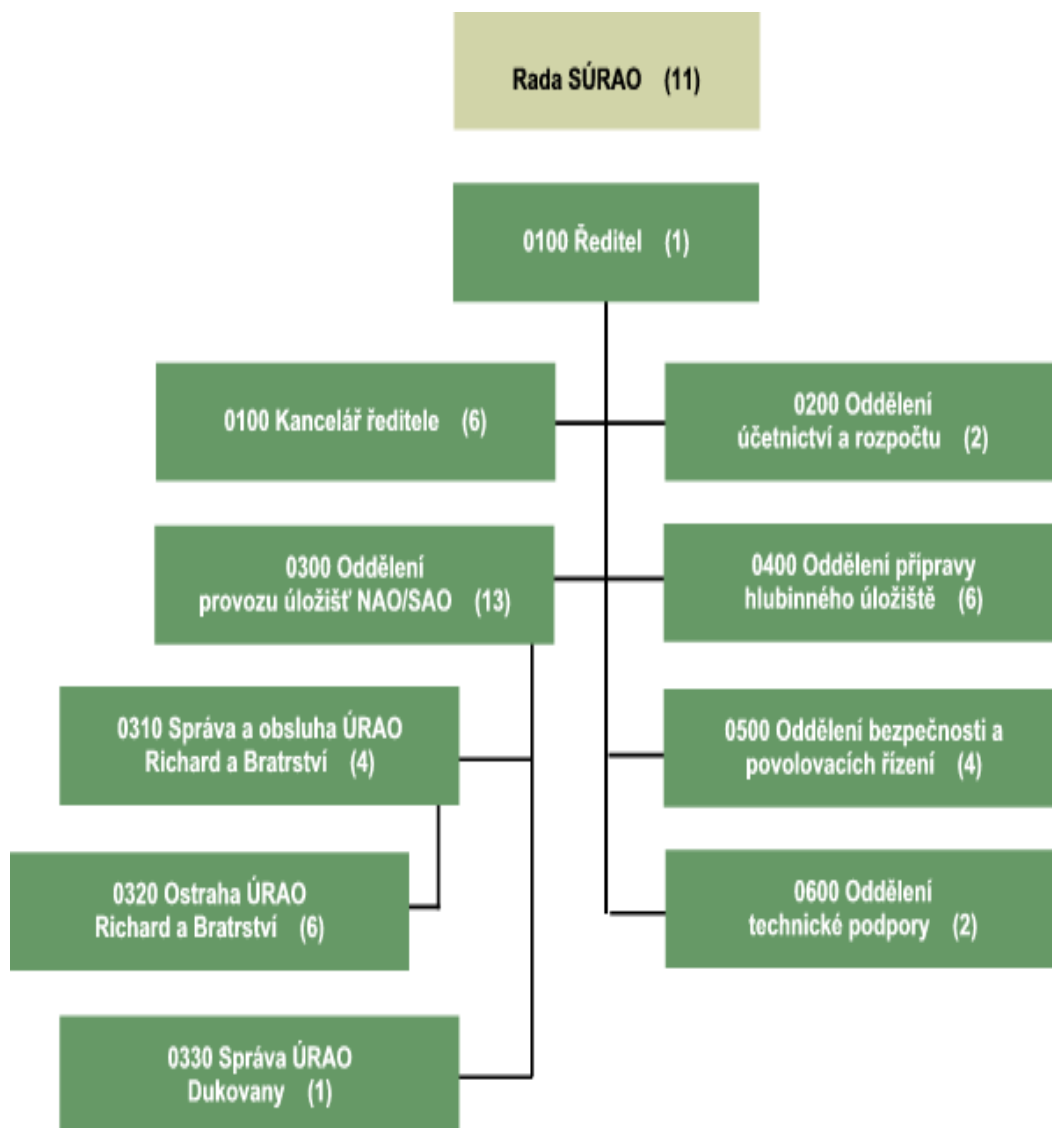
SÚRAO řídí ředitel a rada. Rada SÚRAO se skládá ze zástupců Ministerstva průmyslu a obchodu ČR, Ministerstva financí ČR, Ministerstva životního prostředí ČR, hlavních původců radioaktivních odpadů a regionů, v nichž se nacházejí úložiště radioaktivních odpadů.

Nakládáním s radioaktivními odpady se myslí shromažďování, třídění, zpracování, úprava, skladování, přeprava a ukládání radioaktivních odpadů. Je důležité rozlišovat ukládání a skladování radioaktivních odpadů. Skladování je předem časově omezené umístění radioaktivního odpadu a vyhořelého jaderného paliva do určených prostorů, objektů nebo zařízení. Ukládání je proces trvalého umístění radioaktivního odpadu do prostoru, objektu nebo zařízení bez úmyslu dalšího přemístění. **(29)**

Práce SÚRAO je financována z jaderného účtu, jehož příjmy pocházejí primárně od producentů radioaktivního odpadu, ale také z investování nashromážděných peněz na finančních trzích. Rozpočet SÚRAO schvaluje Poslanecká sněmovna v rámci státního rozpočtu. **(18)**

V rámci mezinárodní spolupráce pracuje SÚRAO zejména s NEA/OECD (Nuclear Energy Agency – Agentura pro jadernou energii), Evropskou komisí a Mezinárodní agenturou pro atomovou energii ve Vídni a také s ostatními evropskými národními organizacemi pro nakládání s radioaktivními opady. SÚRAO uzavřela také rámcové smlouvy o spolupráci se španělskou organizací ENRESA, švýcarskou organizací NAGRA a finskou společností POSIVA. **(29)**

Obr.č.2: Organizační schéma SÚRAO



Zdroj: 13

4.4.Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem

V květnu roku 2002 byl vládou schválen dokument Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v České republice. Koncepce určuje strategii státu a jeho úřadů pro nakládání s radioaktivními odpady až do roku

2025 s výhledem do konce století a upravuje vztah státu k producentům odpadu a vyhořelého jaderného paliva. **(8, 18, 29)**

4.4.1. Nízko a středně radioaktivní odpady

Nejvíce je na našem území vyprodukováno krátkodobých nízko a středně radioaktivních odpadů. Vznikají kapalném nebo pevném skupenství během provozu a likvidaci jaderných reaktorů a při nakládání se zdroji ionizujícího záření. Tato radioaktivní odpady mohou být po úpravě vloženy do povrchových úložišť. **(18)**

Nízko aktivní odpady jsou po poklesu radiace pod určitou mez klasifikovány jako neradioaktivní odpad, dále jsou tedy recyklovány nebo uloženy na bezpečné skládky neradioaktivního odpadu. Jejich izolace od biosféry je v době jejich radioaktivity nutná na 300 až 500 let. **(18)**

Dlouhodobých nízko a středně radioaktivních odpadů u nás nevzniká velké množství, ale díky dlouhé radiační aktivitě nejsou vhodné pro uložení do povrchových úložišť. Tyto odpady by v budoucnu měly být uloženy v hlubinném úložišti. Prozatím jsou skladovány v povrchových úložištích. V České republice jsou pro tyto odpady zřízeny povrchová úložiště Dukovany (v areálu jaderné elektrárny Dukovany), Richard (bývalý důl u Jáchymova) a Bratrství (bývalý důl u Litoměřic). **(18, 29)**

4.4.2. Vyhořelé jaderné palivo a další vysoce radioaktivní odpady

Vysoce radioaktivní odpad, který pochází z jaderných elektráren a výzkumných reaktorů (ŘEŽ), je nejvíce nebezpečným druhem radioaktivního odpadu. Jeho izolace od biosféry je nutná na více než 10 tisíc let. Proto jejich skladování není možné v povrchových úložištích. Pro takový odpad se předpokládá vytvoření hlubinného úložiště. Tento způsob je v rámci mezinárodního měřítko považován za nejreálnější variantu zneškodňování vysoce radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva. Nevylučuje se však možnost přepracování tohoto odpadu. SÚRAO plánuje zřízení hlubinného úložiště kolem roku 2065. **(29)**

Prozatím je tento vysoce nebezpečný odpad, což je především vyhořelé jaderné palivo, skladován v tzv. meziskladech v areálu jaderné elektrárny Dukovany. S meziskladem vyhořelé jaderné paliva se počítá také v areálu jaderné elektrárny Temelín. Zde je vyhořelé jaderné palivo uskladněno ve speciálních kontejnerech, které jsou pod stálým dohledem. Palivo je zde uloženo na dobu 40-50 let. Do té doby se předpokládá nalezení vhodné metody na jeho přepracování. Pokud se nenajde metoda, jak vyhořelé palivo přepracovat, bude uloženo do hlubinného úložiště.

Vzhledem k tomu, že vyhořelé palivo obsahuje prvky schopné uvolnit ještě velké množství energie, předpokládá se v budoucnu ještě jeho budoucí využití. Proto není vyhořelé jaderné palivo klasifikováno jako radioaktivní odpad, ale jako druhotná surovina.**(18, 29)**

4.5. Úložiště radioaktivních odpadů v České republice

4.5.1. RICHARD

Úložiště radioaktivních odpadů Richard bylo zřízeno v komplexu bývalého vápencového dolu Richard II. (v prostoru svahu Bídnice) nedaleko Litoměřic. Bylo vybudováno v subhorizontální desce jílovitého vápence teplického souvrství o mocnosti cca 5 m. Ukládací prostory jsou 70-80 m pod povrchem země, takže je toto úložiště klasifikováno jako podpovrchové. Nadloží i podloží tohoto důlního komplexu tvoří nepropustné jílovité slínovce o mocnosti 50 m v celém prostoru. Pod jílovitými slínovci se nachází jemnozrnné slínité pískovce. Úložiště se nachází nad úrovní hladiny podzemních vod. **(22, 29, 32)**

Jako úložiště začal Richard fungovat od roku 1964. Celkový prostor pro využití je 17 050 m³, avšak kapacita pro ukládání odpadu je asi poloviční. Zbytek tvoří chodby nezbytné pro obsluhu a manipulaci s odpady. Součástí úložiště je i systém hlubinného a povrchového monitorování okolí. **(29)**

Od roku 1964 jsou v úložišti ukládány institucionální radioaktivní odpady o nízké a střední radioaktivitě. V současné době je zde uloženo 5 096 m³ upraveného radioaktivního odpadu (to je asi 61% z celkové kapacity) o celkové aktivitě 778 TBq. Odpady jsou zpravidla plněny do 200 litrových kovových kontejnerů. Některé odpady jsou umístěny do 100 litrových kovových sudů, které jsou ještě vloženy do 200 litrových kontejnerů. Vzniklý prostor mezi odpadem a kontejnerem (sudem) je vyplněn betonem, čímž je zabezpečena technická bariéra před únikem radioaktivity do životního prostředí. Stěna vnějšího kontejneru je ještě z obou stran pozinkována a natřena asfaltovým lakem. (29, 32)

Kontejnery jsou vkládány ukládány do upravených komor. Po naplnění je komora uzavřena mříží, která umožňuje ventilaci vzduchu. Kontejnery, které obsahují odpad s izotopy plutonia a americia, jsou skladovány odděleně. V úložišti je stabilní teplota a vlhkost (10 °C a 95% rel. vlhkost).

Provoz úložiště, jeho monitorování a způsob ukládání radioaktivních odpadů zajišťuje SÚRAO na základě povolení podle atomového zákona a příslušných předpisů. Každý rok zhotovuje SÚRAO výroční zprávu ke každému úložišti. (32)

Tabulka č.8: Výroční zpráva úložiště Richard z roku 2005

Odpady uložené v roce 2005	Úložiště Richard
Počet obalových jednotek (200litrový sud)	321
Celková hmotnost obal. jednotek a kusového odpadu	121,9 t
Celkový objem odpadů	70,2 m ³
Celková aktivita (k 31. 12. 2005)	731,2 GBq

Zdroj: 32

4.5.2. BRATRSTVÍ

Úložiště Bratrství se nachází v komplexu bývalého uranového dolu v Jáchymově. Je určeno výhradně pro radioaktivní odpad s přírodními radionuklidy. Do provozu bylo uvedeno v roce 1974. **(29)**

Pro ukládání byla upravena těžní štola a přilehlé komory. Stěny a stropy komor byly k ukládání radioaktivních odpadů technicky upraveny. Části chodeb a stropu ve štole jsou zajištěny betonem zakončeným ve stropní části ocelovými nosníky. Podlahy s drenážním systémem a centrální retenční jímkou jsou také vybetonovány.

V případě přítomnosti pracovníků je úložiště uměle odvětráváno ventilátorem, který je umístěn v přístupové štole. Jinak sem proudí větry přirozeným tahem, a to buď ve ze štoly (výdušná letní období) a nebo do dolu (vztažná v zimním období). **(30)**

Návaznost úložiště na stará důlní díla, kde byl těžen smolinec, způsobuje přítomnost zvýšené koncentrace radonu a dceřinných produktů v prostoru úložiště. Proto je tomu nutné přizpůsobit provoz, monitorování a způsob ventilace. Kontroly jsou prováděny nejen podle plánu, ale i podle operativní potřeby. Zejména je kontrolována aktivita důlních vod na ^{226}Ra a rozpadové produkty Rn a aktivita ovzduší na rozpadové produkty Rn. Vzhledem k místnímu přirozenému prostředí, které se vyznačuje vysokým obsahem přírodních radionuklidů, jsou naměřené hodnoty aktivity vyšší než je obvyklé přirozené pozadí v jiných oblastech ČR. Povolené limity však nebyly překročeny. **(29, 30)**

V dnešní době je v úložišti Bratrství uloženo 910 m^3 upravených radioaktivních odpadů, což je asi 69% celkové kapacity úložiště. Stejně jako k úložišti Richard i zde vydává každá rok SÚRAO výroční zprávu. **(22)**

Tabulka č.9: Výroční zpráva úložiště Bratrství z roku 2005

Odpady uložené v roce 2005	Úložiště Bratrství
Počet obalových jednotek (200litrový sud)	16
Celková hmotnost obal. jednotek a kusového odpadu	5,3 t
Celkový objem odpadů	3,2 m ³
Celková aktivita (k 31. 12. 2005)	0,9 GBq

Zdroj: 30

4.5.3. DUKOVANY

Úložiště Dukovany bylo vybudováno elektrárenskou společností již v roce 1987, oficiálně jako povrchové úložiště radioaktivních odpadů z jaderné energetiky z obou jaderných elektráren. Patří mezi nejmodernější a největší úložiště radioaktivních odpadů v České republice a zároveň odpovídá západoevropským úložištím svou bezpečností a konstrukcí. **(31)**

Úložiště se nachází v areálu jaderné elektrárny Dukovany na území obce Rouchovany v okrese Třebíč. Zabírá plochu zhruba 1,3 ha a celkový objem úložných prostorů je 55 000 m³ (více než 180 000 sudů o objemu 200 litrů). Úložný prostor je natolik velký, aby pojmul všechny nízko a středně aktivní odpady z obou jaderných elektráren (Dukovany, Temelín) po celou jejich životnost, a to i v případě prodloužení jejich provozu o dalších 10 let. **(29)**

Dukovanské úložné prostory jsou složeny ze 112 železobetonových jímek uspořádaných do čtyř řad po 28 jímkách. Rozměry jedné jímky jsou 5,3 x 5,4 x 17,3 m, což znamená, že se do jedné jímky při maximálním využití prostoru vejde 1 600 sudů o objemu 200 litrů. Sudy s radioaktivním odpadem jsou ukládány do jímek pomocí portálového jeřábu, který se pohybuje po jeřábové dráze umístěné na horních hranách jímek. **(29, 31)**

Tabulka č.10: Výroční zpráva úložiště Dukovany z roku 2005

Odpady uložené v roce 2005	Úložiště Dukovany
Počet obalových jednotek (200litrový sud)	1 254
Celková hmotnost obal. jednotek a kusového odpadu	299 047 kg
Celkový objem odpadů	258,6 m ³
Celková aktivita (k 31. 12. 2005)	194,5 GBq

Zdroj: 31

Proti možnému úniku radionuklidů do biosféry brání několik bariér s dlouhodobou životností :kovová stěna sudu, betonová výplň, vhodná forma odpadu. Po zaplnění je jímka uzavřena a chráněna před pronikáním vlhkosti. Provoz úložiště je opět přísně monitorován. SÚRAO, které za provoz úložiště odpovídá, vyhodnocuje každý rok výroční zprávy. V dnešní době je v úložišti umístěno 2 050 m³ odpadů (cca 6% celkové kapacity). **(22, 31)**

4.5.4. HOSTIM

Dnes již uzavřené úložiště Hostím u Berouna bylo zřízeno pro ukládání nízko a středně radioaktivních odpadů. Jeho provoz byl zahájen v roce 1959 a ukončen v roce 1963. V roce 1965 bylo rozhodnuto o jeho trvalém uzavření, které se uskutečnilo v roce 1996. Před jeho uzavřením byly z úložiště vyvezeny rizikové odpady, čímž byla snížena radioaktivita úložiště na 0,1 TBq. Radiační riziko z odpadů je tedy zanedbatelné.

Počáteční uzavření úložiště zazdění vstupů se ukázalo jako nedostatečné proti násilným vniknutím. Proto bylo v roce 1997 provedeno konečné uzavření. Veškeré prostory byly zaplněny betonem. I přes minimální riziko úniku radioaktivity je prostor pravidelně monitorován. **(22, 29)**

4.6.Sklady vyhořelého jaderného paliva

Skladování vyhořelého jaderného paliva je součástí koncové části palivového cyklu. Účelem skladování je „vychlazení“ použitého paliva na míru potřebnou pro jeho další přepracování nebo definitivní uložení. Tomuto účelu odpovídá i požadavek na životnost kontejneru minimálně 60 let, protože předpokládaná vytvoření hlubinného úložiště je stanoveno na rok 2065. Do té doby se ještě předpokládá nalezení metody jak vyhořelé palivo dále využít.

V České republice se nachází prozatím dva sklady vyhořelého jaderného paliva v areálu jaderné elektrárny v Dukovanech, z toho jeden je již uzavřen. Do budoucna se předpokládá vybudování dalšího skladu v areálu jaderné elektrárny Temelín. Na základě dalších studií byl vypracován návrh na vytvoření záložního skladu vyhořelého jaderného paliva v lokalitě Skalka v okrese Žďár nad Sázavou. **(15, 29)**

4.6.1. Mezisklad a sklad Dukovany

Již v době budování dukovanské elektrárny v roce 1974 a i v počátcích stavby Temelína se nepředpokládalo skladování a ukládání vyhořelého jaderného paliva na našem území. Tehdejší Československo mělo na základě mezistátní smlouvy veškeré vyhořelé palivo odvézt do Sovětského svazu, protože jsme byli součástí sovětského bloku. To se však po převratu změnilo a Rusko v roce 1991 zakázalo skladování a ukládání vyhořelého jaderného paliva na svém území. Proto musela být vytvořena jiná varianta, kterou se stalo vybudování meziskladu u nás.**(27)**

Při výběru vhodné lokality byla uvažována jak hlediska jaderné a radiační bezpečnosti, tak otázky ekonomické, provozní a časové. Ukázalo se, že nejlepším místem bude jaderná elektrárna Dukovany, které vyhovuje všem požadavkům a již existující infrastrukturou zaručuje včasné vybudování meziskladu. Bylo tedy rozhodnuto postavit mezisklad vyhořelého jaderného paliva v areálu jaderné elektrárny Dukovany. Mezisklad měl pojmout veškeré vyhořelé palivo za celou životnost

elektrárny. Tento záměr byl však v roce 1992 změněn, kapacita meziskladu byla omezena pouze na 600 tun vyhořelého paliva (tj. 2/5 původní kapacity). (27)

Mezisklad Dukovany byl uveden do provozu v roce 1995 pro dlouhodobé skladování vyhořelého jaderného paliva z reaktorů VVER-440 provozovaných v jaderné elektrárně Dukovany. Vyhořelé palivo je zde skladováno v obalových souborech typu Castor 440/84. Celková kapacita úložného prostoru (60 kontejnerů) byla 8. března 2006 zaplněna a mezisklad byl uzavřen. Dozor nad ním provádí SÚJB a odpovědnost spadá na Energetickou společnost ČEZ a.s. (27)

V areálu jaderné elektrárny Dukovany byl již vybudován koncepčně identický nový sklad o kapacitě 1340 tun, tj. 133 kusů obalových kontejnerů Castor 440/84 M, který by měl pojmout veškerou produkci vyhořelého paliva až do doby ukončení provozu jaderné elektrárny Dukovany. Tento sklad byl vytvořen v souladu s usnesením vlády č. 121/1997.⁽⁴⁾ V tomto dokumentu vláda doporučila stavbu nových skladů vyhořelého jaderného paliva v areálu jaderných elektráren. Kolaudace nového skladu byla provedena v únoru 2006. V listopadu 2006 vydalo SÚJB povolení k etapám uvedení do provozu. (27, 28)

Provoz meziskladu

Cesta paliva do meziskladu začíná v reaktorové hale. Palivové kazety jsou po vyjmutí z reaktoru nejprve vloženy do bazénu, kde chladnou několik let. Potom jsou pod vodou překládány do kontejneru. Ten je pak vyzvednut z bazénu, vysušen, naplněn heliem a přenesen na speciální železniční vagón. Po kolejích, které vedou vnitřkem areálu elektrárny, je kontejner převezen do přijímacího skladu. Ze je z vagónu sejmut na podlahu pomocí mostového jeřábu. Na kontejner jsou napojeny kabely monitorovacího systému. Tím je celé uskladňování u konce. Naplnění, převoz a umístění jednoho kontejneru trvá asi 10 dní. Mezisklad je pod stálým dohledem monitorovacího systému, který hlásí sebemenší změny. (15, 19, 28)

⁽⁴⁾ Usnesení vlády č. 121/1997, o koncepci skladování vyhořelého jaderného paliva

Nový sklad je postaven v těsné blízkosti již uzavřeného původního skladu. Vzájemně jsou tyto sklady propojeny koridorem. Provoz v novém skladu bude probíhat stejně jako v prvním meziskladu. **(31)**

Castor 440/84

Hlavní funkcí kontejneru Castor 440/84 je bezpečné oddělení vyhořelého jaderného paliva od okolí a odstínit radioaktivní záření vznikající při přirozeném rozpadu produktů štěpení v palivu. Dále zabezpečuje odvod tepla, které se uvolňuje při rozpadu a ochranu před vnějšími vlivy, které by mohly způsobit poškození paliva. **(13, 28)**

Kontejner je odlit z jednoho kusu speciální tvárné litiny s vnitřním povrchem pokrytým niklem, který chrání proti korozi. Tloušťka stěny je 37 cm. Po vložení palivových kazet a zakrytí kontejneru primárním víkem je vnitřní prostor naplněn héliem. To zajišťuje dobrý odvod tepla a navíc jako netečný plyn brání oxidaci (korozi). Pokud by byl kontejner naplněn běžným vzduchem, ke korozi by došlo jak na palivových člancích, tak mezi primárním a sekundárním víkem kontejneru. Mezi víky je tlak vyšší než uvnitř kontejneru, proto při poruše netěsnosti by tok plynů směřoval dovnitř kontejneru a ne ven. O případných změnách tlaku mezi víky informuje signalizační zařízení obsluhu skladu. **(13, 15)**

Teplo prostupující zevnitř na povrch kontejneru je odebíráno přirozeným prouděním vzduchu. Ten se do skladovací haly dostává průduchy ve stěně a po té, co ochladí povrch kontejneru, začne vstoupat vzhůru a kontejner opustí otvory ve střeše. **(13)**

Palivové kazety jsou do kontejneru umístěny ve speciálním palivovém koši, který brání jejich samovolnému pohybu a vzájemnému dotyku. Každý kontejner pojme 84 palivových kazet. Naplněný kontejner má hmotnost 120 tun. **(13)**

Castor 440/84M

Tento nový typ kontejneru bude využíván v novém skladu vyhořelého jaderného paliva v Dukovanech. Provedením se téměř neliší od původního typu Castor 440/84. Hlavní rozdíly jsou v konstrukci; zesílení biologického stínění a upravení konstrukčního a materiálového provedení vnitřního koše kontejneru. K těmto změnám muselo dojít díky novému použití jaderného paliva, které díky většímu obohacení a následnému vyhoření bude mít v době plnění kontejnerů větší tepelný a radiační výkon. **(15)**

Kontejner Castor pojme 84 palivových kazet. Těleso je z tvárné litiny, koš z borovaného hliníku, neutronové stínění zajišťuje polyethylen. Vnitřní prostor je vyplněn heliem o nižším tlaku než je tlak atmosférický. Těsnost zajišťují dvě víka. Každé víko má jedno těsnění kovové a jedno elastomérové. Třetí víko je krycí a jeho funkcí je ochrana před vnějšími vlivy. Průměr kontejneru je 2,66 m a výška je 4,2 m. Prázdný kontejner váží 93,7 tun. Cena jednoho kontejneru je zhruba 20 mil. korun. **(13, 15)**

4.6.2. Plánovaný sklad vyhořelého jaderného paliva Temelín

Aktivní zóna jaderné elektrárny Temelín obsahuje 163 palivových kazet. Každé čtyři roky je obměňována $\frac{1}{4}$ paliva, tj. 41-42 kazet. První výměna proběhla v únoru 2003. Použité palivové kazety jsou ukládány do přilehlého bazénu, kde chladnou. Kapacita tohoto bazénu je jen 680 palivových kazet. Je tedy stanoveno, že do konce roku 2013 bude možné skladovat použité palivové kazety v tomto bazénu přímo u reaktoru. Po tomto datu bude potřeba zajistit skladování vyhořelého jaderného paliva v novém vybudovaném skladu v areálu elektrárny. **(8, 15, 27)**

V prosinci 2002 byla zpracována studie proveditelnosti realizace skladu vyhořelého jaderného paliva v elektrárně Temelín. Na tuto studii navazovala různá projednávání, zkoumání vlivů na životní prostředí, ale až v prosinci 2005 SÚJB vydalo rozhodnutí o povolení výstavby. Plánovaná výstavba je v souladu se všemi příslušnými

předpisy (usnesení vlády č. 121/1997, 487/2002, 244/1992)⁽⁵⁾ Sklad by měl být připraven k provozu do konce roku 2013. (7, 8, 11)

Sklad bude založen na stejném principu jako sklady v jaderné elektrárně Dukovany, tedy suchý způsob skladování v kontejnerech Castor 440/84M. Stejně jako v Dukovanech i zde tento způsob skladování nevylučuje případné přepracování vyhořelého paliva. Kapacita skladu bude 1370 tun, což by mělo stačit na 30 let provozu Temelína. (7, 11, 27)

4.6.3. Záložní varianta skladu použitého jaderného paliva v lokalitě Skalka

Plánovaný sklad vyhořelého jaderného paliva Skalka se nachází v okrese Žďár nad Sázavou. Leží 407 m.n.m. a zaujímá plochu 1,5 ha. Tato podzemní stavba je situována poblíž železniční tratě. V tunelech by měly být opět suchým způsobem skladovány kontejnery s vyhořelým palivem po dobu minimálně 60 let. V budoucnu by pak bylo palivo uloženo do hlubinného úložiště nebo přepracováno.(15, 35)

Podzemní stavba by měla být vyražena v severní části tektonicky stabilního masivu Pálená. V horizontálních tunelech by byly skladovány kovové transportně-skladovací kontejnery s použitým jaderným palivem. Projektové řešení skladu předpokládá umístění cca 2900 tun paliva. Doprava do skladu by probíhala po železnici speciálním vagónem, palivo by bylo dopravováno v kontejnerech licencovaných SÚJB. (15, 35)

4.7. Hlubinné úložiště

Hlubinné úložiště je určeno pro přijetí všech radioaktivních odpadů, které nelze bezpečně uložit v povrchových úložištích z důvodů jejich dlouholeté vysoké radioaktivity. Jedná se zejména o dlouhodobé středně a vysoce radioaktivní odpady z jaderné energetiky, výzkumných a průmyslových pracovišť, a o vyhořelé jaderné

⁽⁵⁾ Usnesení vlády č. 121/1997, o koncepci skladování vyhořelého jaderného paliva,
Usnesení vlády č. 244/1992, o posuzování vlivů na životní prostředí,
Usnesení vlády č. 487/2002, koncepcie nakládání s vyhořelým jaderným palivem

palivo po jeho prohlášení za odpad. Bezpečné uložení odpadů i dlouhodobá izolační schopnost úložišť by měla být zajištěna konstrukčními bariérami a vhodným geologickým prostředím. **(3, 20, 34)**

Kromě zřízení hlubinného úložiště byly zvažovány ještě jiné alternativy ukládání radioaktivního odpadu. Např. ukládání do věčně zamrzlé půdy, hlubinné vrty, uložení na mořském dně nebo ve vesmíru. Tyto varianty však ztroskotaly na základě technické proveditelnosti, nejistoty dlouhodobých výhledů, bezpečnostních pochybností a mezinárodních smluv.**(3)**

Zákony většiny zemí stanovují, že každý stát si zodpovídá za zřízení úložiště sám. Proto některé země hledají a zkoumají na svých územích nejvhodnější místo a technologie pro vytvoření hlubinného úložiště. Co se týče České republiky, lze obecně říci, že má pro výstavbu hlubinného úložiště vhodné podmínky. Naše území je z geologického hlediska velmi staré a stabilní. **(29, 34)**

4.7.1. Anatomie hlubinného úložiště

Uložení vysoce radioaktivních odpadů (včetně vyhořelého jaderného paliva) do hlubinného úložiště by se mohlo zdát jako nouzovým řešením. Opak je však pravdou. Tímto logickým řešením lze tento nebezpečný odpad na dobu téměř 100 tisíc let ochránit před přírodními vlivy, živly a destruktivními zásahy člověka. Pokud existují obavy, že vysoce radioaktivní odpad dlouhodobě skladovaný v povrchových úložištích by se mohl stát terčem teroristických útoků, tak v hlubinném úložišti je toto nebezpečí minimální. Přístup do úložiště bude po jeho zaplnění uzavřen a zasypán.**(20)**

Hlubinné úložiště, jak již bylo řečeno, nemůže být vybudováno na jakémkoliv místě. Horninový masív, ve kterém se bude nacházet, musí splňovat řadu podmínek. Např. musí být geologicky dlouhodobě stabilní, neporušený, musí zde být minimální výskyt podzemních vod a horninový materiál musí tvořit přirozenou bariéru proti šíření radioaktivity z odpadů. Tomuto uměle vytvořenému, pečlivě připravenému

podzemnímu prostoru předchází finančně, časově a vývojově náročná činnost. (17, 20, 34)

V České republice bude pravděpodobně hlubinné úložiště vybudováno v žulovém masívu v seismicky stabilní oblasti. Vysoce radioaktivní odpad by se zde měl ukládat dlouhodobě, a to na 100 tisíc let. V koncepci vybudování úložiště je pamatováno i na další generace v souvislosti se znemožněním jakéhokoliv kontaktu s uloženým nebezpečným materiálem. (3, 17)

V roce 2003 byl proveden projekt geologických prací k zhodnocení a zúžení lokalit pro umístění hlubinného úložiště. Výsledkem toho bylo určení 6 možných lokalit k vytvoření úložiště (Lubenec-Blatno (Ústecký a Plzeňský kraj), Budišov (Vysočina), Pačejov (Plzeňský kraj), Rohozná (Vysočina), Pluhův Žďár-Lodhěřov (Jihočeský kraj), Božejovice-Vlksice (Jihočeský kraj)). Tyto lokality budou dále zkoumány. Příprava hlubinného úložiště byla zahájena již v roce 1990. Do roku 2015 by mělo SÚRAO oznámit jednu hlavní a jednu náhradní lokalitu pro zřízení úložiště. V období let 2030-2040 by mělo být vybudováno a do aktivního provozu uvedeno v roce 2065. (3, 29)

Bezpečnostní bariéry hlubinného úložiště

Bezpečnostními bariérami rozumíme ochranné vrstvy, které zabrání pronikání radioaktivity z odpadů do životního prostředí. (20)

Matrice – bariéra, která má za úkol znehybnění radionuklidů v odolné a nerozpustné chemické formě. Do této formy jsou radioaktivní odpady zaváděny při jejich úpravě, (př. borosilikátová skla, keramické materiály, cement, asfaltová živice atd.).

Obal – bariéra, do které je odpad umístěn (př. ocelové kontejnery, měděné a titanové nádoby).

Přírodní bariéra – vlastní geologická formace, v níž je hlubinné úložiště umístěno (př. solná ložiska, jílové sedimenty, tufy, žulové a rulové horniny).

Úložiště a jeho části

I když se ohledně vybudování hlubinného úložiště vedou široké diskuse, tak jednotlivé jeho části jsou již jasné. Každé úložiště by se mělo skládat ze čtyř částí: nadzemní areál, přístupové šachty a tunely, prostory pro ukládání jaderného odpadu a samostatné kontejnery. **(34)**

1) Nadzemní areál

Nejprve bude nadzemní areál představovat zázemí pro vybudování podzemní části úložiště a potom bude zajišťovat provoz hlubinného úložiště. Vedle správních a sociálních budov, skladů atd. zde bude vyčleněna část areálu, kde bude přijímán a upravován vysoce radioaktivní odpad. Bude nutno vyjmout ho z kontejnerů, ve kterých bylo k hlubinnému úložišti přepraveno, překontrolovat a přeložit do kontejnerů určených ke konečnému uložení. **(34)**

2) Přístupové šachty a tunely

Předpokládaná hloubka těchto šachet a tunelů je od 300 m do 1 km. Tyto prostory představují propojení mezi nadzemním areálem a ukládacími prostory. Jak šachty, tak tunely budou sloužit pro ventilaci a dopravu osob, materiálu i kontejnerů a nebezpečným odpadem. Rozměry a sklon tunelu by měl být takový, aby se kontejnery mohly přepravovat nákladními auty. **(34)**

3) Ukládací prostory

V těchto rozsáhlých sítích chodeb budou definitivně uloženy kontejnery s vysoce radioaktivním odpadem. Jejich umístění by mělo být pod podlahou tunelů a chodeb. Tyto prostory by měly pojmout přibližně 10 000 m³ odpadu. **(17)**

4) Kontejnery pro radioaktivní odpad

Význam kontejnerů spočívá především v tom, že bude radioaktivní odpad prvních tisíc let izolovat od okolí a vlhkosti. Zabrání proniknout radioaktivitě do podzemních vod a ovlivnit tak životní prostředí a člověka. Materiál, ze kterého by měly být zhotoveny, musí být mechanicky odolný proti ozařování radioaktivním odpadem zevnitř. Jako nejvhodnější se v současné době jeví tři materiály: ocel vysoce legovaná niklem, uhlíkatá ocel a zlato, platina, titan nebo měď. Výplňovým a tlumícím materiálem, jímž bude kontejner v šachtě obklopen, by měl být bentonit.⁽⁶⁾ **(17, 34)**

4.7.2. *Hlubinné úložiště ve světě*

Obecně by se dalo říci, že ohledně vybudování hlubinného úložiště jsou nejdále Spojené státy americké, které už na svém území jedno mají a další připravují. To stávající ovšem neslouží k ukládání vyhořelého jaderného paliva, ale ukládá se zde vysoce radioaktivní odpad z vojenského programu. Úložiště WIPP, jak je pojmenované, leží v Novém Mexiku u města Carlsbad a odpady jsou tu ukládány od roku 1999. Druhé připravované úložiště by mělo být vybudováno ve státě Nevada v lokalitě Yucca Mountain a mělo by pojmout asi 70 000 tun vysoce radioaktivního odpadu. Výzkum této lokality probíhá již více než 10 let. Předpokládané uvedení do provozu je prozatím určeno na rok 2016. **(21, 34)**

Daleko ve svých výzkumech hledání vhodné lokality pro hlubinné úložiště jsou i Švýcaři. Ti předpokládají vytvoření úložiště zvané Grimsel v žulové skále v oblasti alpského masívu nedaleko města Interlaken. Na výzkumech této tohoto území se podílejí i čeští vědci. **(29)**

⁽⁶⁾ Bentonit – jílovitá hornina s velkou sorpční schopností, plastičností a vysokou hodnotou výměny kationtů.

5. Diskuse

Ve výsledcích jsem popsala, jakým způsobem je v České republice nakládáno s radioaktivními odpady. V diskusi bych chtěla tento postup porovnat s některými vybranými státy světa. Záměrně jsem vybrala státy s velkým počtem jaderných reaktorů. Zjišťovala jsem také, zda tyto státy stále preferují jadernou energii a nebo se již přiklání k alternativním zdrojům energie. Své poznatky jsem zapsala do tabulky.

Tabulka č.11: Nakládání s radioaktivními odpady ve světě

<i>Stát (počet reaktorů)</i>	<i>Úložiště</i>	<i>Skládovaný materiál</i>	<i>Typ ukládání</i>	<i>Současný přístup</i>	<i>Alternativní zdroje</i>
ČR (6)	JE Dukovany, Richard Bratrství	Nízko a středně aktivní odpad	Suchý způsob skladování	Příprava nového skladu Temelín	Minimum
	Mezisklad a sklad Dukovany	Vyhořelé jaderné palivo		Studie pro vytvoření hlubinného úložiště	
Francie (55)	La Hague Cadarache Centre de l'Abe	Nízko a středně aktivní odpad	Suchý způsob skladování	Přepřacování vyhořelého paliva (La Hague)	Geotermální zdroje Solární panely Přílivové elektrárny
	La Hague	Vyhořelé jaderné palivo		Studie hlubinného úložiště, transmutace	
Německo (19)	Morsleben Konrad	Nízko a středně aktivní odpady	Suchý způsob skladování	Studie pro vytvoření hlubinného úložiště	Větrné elektrárny Solární panely
	Gorleben	Vyhořelé jaderné palivo		Utlumení jaderné energie	
Velká Británie (35)	Sellafield Drigg Dounreay	Nízko a středně aktivní odpady	Suchý způsob skladování	Přepřacování jaderného paliva (Sellafield)	Větrné elektrárny Přílivové elektrárny
	Sellafield Dounreay Sizewell	Vyhořelé jaderné palivo		1997 zastaveny studie pro vytvoření hlubinného úložiště	

<i>Stát (počet reaktorů)</i>	<i>Úložiště</i>	<i>Skladovaný materiál</i>	<i>Typ ukládání</i>	<i>Současný přístup</i>	<i>Alternativní zdroje</i>
Švédsko (12)	Fosmark Oskarmshamn Ringhals	Nízko a středně aktivní odpady	Suchý typ skladování	Studie pro vytvoření hlubinného úložiště (Stripa, Äspö)	Spalování biomasy
	Clab- Oskarmshamn	Vyhořelé jaderné palivo	Mokrý typ skladování		
Španělsko (9)	El Cabril	Nízko a středně aktivní odpady	Suchý typ skladování	Přepřepřování jaderného paliva	Sluneční kolektory Přilivové elektrárny
	JE Trillo	Vyhořelé jaderné palivo		Studie hlubinného úložiště a transmutace	

Zdroj: 12, 18

Sklady radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva

Ve všech státech existují povrchové sklady pro ukládání radioaktivních odpadů. Všeobecně je využíváno dvou typů skladování, mokrý a suchý. Převládá suchý způsob, který je technologicky méně náročný a modernější. Kontejnery jsou plněné netečným plynem, který vyplňuje prostor mezi uloženým materiálem a kontejnerem. Mokrý způsob používají hlavně ve Švédsku, Velké Británii a USA. Při této metodě je radioaktivní odpad ponořen ve zvláštních pouzdrech z nerezivějící oceli do bazénu s demineralizovanou vodou. Mokrý způsob skladování je náročný na vybudování a provoz, jelikož musí být zabezpečena dokonalá těsnost bazénu. **(36)**

Hlubinné úložiště

Z tabulky je zřejmé, že většina států předpokládá vytvoření hlubinného úložiště, kde by své vysoce radioaktivní odpady a vyhořelé jaderné palivo uložily na trvalo. Doposud probíhají pouze výzkumy, které jsou nejdále v Německu a ve Švédsku. Vytvoření úložiště je však zatím v nedohlednu. Stále přetrvává problém spolehlivé izolace odpadu od životního prostředí na sta tisíce let. **(18)**

Přepřacování vyhořelého jaderného paliva

Některé státy přistoupily k přepřacování vyhořelého jaderného paliva a podstatně tím snížily konečné množství vysoce radioaktivního odpadu. Vyhořelé jaderné palivo obsahuje ještě využitelné prvky (1% ^{235}U , 1% ^{239}Pu). K přepřacování dochází ve Francii (La Hague), ve Velké Británii (Sellafield) a částečně ve Španělsku.

Přepřacování probíhá metodou zvanou Purex. Vyhořelé palivové články se vyjmou z palivových kazet a naštipají na menší kusy. Ty se rozpustí v kyselině dusičné. Ze vzniklého roztoku se chemicky oddělí plutonium a uran. Vše probíhá dálkově řízenými roboty a manipulátory, aby nedošlo k ohrožení žádného člověka. Plutonium se využívá jako palivo pro lehkovodní reaktory a uran je uskladněn nebo je z něj vyrobeno nové jaderné palivo. Zbytek vyhořelého jaderného paliva, který se již nedá využít, se uloží jako středně aktivní odpad v kapalném stavu do povrchových úložišť. Z jedné tuny paliva tak vznikne asi 115 litrů konečného radioaktivního odpadu. **(18, 23)**

Je pravdou, že metoda přepřacování vyhořelého paliva je velice technologicky a finančně náročná, proto ji mohou využívat pouze ekonomicky silné země. V České republice bohužel nelze tuto variantu realizovat. Náklady na vytvoření podmínek pro přepřacování vyhořelého paliva by mnohonásobně převýšily náklady na skladování.

Dalším problémem, na který upozorňují ekologové, je velká zátěž pro životní prostředí. Při přepřacování dochází k větším únikům radioaktivity než by došlo při okamžitém uložení vyhořelého paliva do skladů. **(18, 23)**

Transmutace

Další teoretickou možnost využití vyhořelého jaderného paliva zkoumají především v USA, ale také ve Francii, Španělsku a Švédsku. Jedná se o tzv. technologii ADTT, tedy urychlovačem řízenou transmutaci. Principem této technologie je reaktor, který bude uvolňovat energii přeměněnou z izotopů obsažených ve vyhořelém palivu.

Reaktor bude obsahovat podkritické množství štěpitelného paliva, kterému chybí neutrony k udržení řetězového charakteru jaderného štěpení. Proto umístíme do reaktoru zdroj neutronů, kterým by měl být terčík z těžkého prvku (př. thorium, olovo). Terčík bude ostřelován svazkem vysoce urychlených protonů. Ty roztříští jádro těžkého prvku. Dojde tak k uvolnění neutronů, jež vyvolají štěpení jader paliva v reaktoru a následně vzniku velkého množství energie. Opět bude sice vznikat radioaktivní odpad, ale s daleko kratším poločasem rozpadu. **(18, 24)**

Hlavním důvodem, proč se ještě této metody nevyužívá, je problém s příliš nízkou účinností dávky neutronů prostřednictvím urychlovače protonů. Ne všechny protony způsobí tříštivé reakce. Další překážkou jsou také vysoké energetické nároky na provoz urychlovače.

Alternativní zdroje energie

Neopomenutelným řešením při jaderných odpadech je také omezování jaderné energie a zavádění alternativních zdrojů energie jako jsou větrné elektrárny, vodní elektrárny, solární kolektory, spalování biomasy a další. **(14)**

Řada států již pochopila, že i tak lze řešit problém s jadernou energetikou a zavádějí ve svých zemích elektrárny poháněné těmito zdroji. Nejvíce se do této politiky zapojilo Německo, které omezuje jadernou energetiku a preferuje vytváření hlavně větrných elektráren.

Na celém světě je tento nový trend stále více upřednostňován a jsou na něj vyčleňovány velké finanční prostředky. I v České republice najdeme tyto alternativní zdroje, ale je jich zatím málo. Dá se však očekávat, že se to s časem změní. **(12, 14)**

6. Závěr

Bakalářská práce na téma Systém bezpečného ukládání radioaktivního odpadu mě velice obohatila o cenné poznatky. Dozvěděla jsem se řadu důležitých informací, o kterých jsem měla před zpracováním práce jen minimální znalosti. Záměrem této práce bylo přiblížit problematiku radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva. Domnívám se, že každý člověk v této zemi, bez ohledu na jeho vzdělání, by měl mít alespoň základní přehled o problematice radioaktivních odpadů.

První hypotéza, potvrzení domněnky o existenci časovaných bomb v podobě úložišť radioaktivních odpadů, se mi po přečtení veškerých informací o úložištích nepotvrdila. Po seznámení dokumenty k jednotlivým úložištím jsem dospěla k závěru, že z technického hlediska nemůže k úniku radioaktivity do životního prostředí dojít. Pokud ovšem je vše dodržováno tak, jak jsem se dočetla. Nikde jsem ale nedostala informace o tom, zda je skutečně životnost sudů, ve kterých je radioaktivní odpad uložen, taková jak se předpokládá. Nikdo zatím nezaručil, že radioaktivní odpad bude po celou dobu své nebezpečnosti dokonale izolován od životního prostředí. Stejně jako nikdo nezaručí, že se radioaktivní odpad nedostane do rukou teroristů, což je poslední dobou také velkou hrozbou. A na druhé straně, příčinnou většiny katastrof je člověk a jeho selhání, takže pokud bych mluvila o časované bombě, tak v souvislosti se selháním lidského faktoru. Domnívám se, že zřízení hlubinného úložiště rozhodně není nejlepším řešením a že by se měly hledat jiné způsoby, jak radioaktivní odpad zneškodnit.

Druhá hypotéza, nalezení jiné alternativy řešení nakládání s radioaktivními odpady než jen jejich ukládání, se naopak potvrdila. Existují další dvě varianty, přepracování a transmutace. Další teoretickou možností by mohlo být omezování jaderného programu ve prospěch alternativních zdrojů energie, při kterých by ke vzniku radioaktivních odpadů vůbec nedocházelo. Podle mého názoru by se jednoznačně mělo od jaderné energetiky upouštět a hledat jiné zdroje energie.

Byla bych ráda, kdyby tato bakalářská práce posloužila jako vzdělávací materiál pro zájemce o tuto problematiku. Pokud zde najdou čtenáři i nové zajímavé informace, bude mít má práce ještě větší význam.

7. Seznam použité literatury

Odborná literatura a legislativa:

- 1) BURIAN, I. a kol., *Principy a praxe radiační ochrany*, 1.vyd. Praha: Azin CZ, 2000.619 s., ISBN 80-238-3703-06
- 2) KUNA, P. a kol., *Klinická radiobiologie*, 1.vyd. Praha: Manus, 2005.222 s., ISBN 80-86571-09-2
- 3) NACHMILNER, L., *Principy nakládání s radioaktivními odpady*, 1.vyd. Praha: ČVUT, 2000.49 s., ISBN 80-01-02258-7
- 4) NAVRÁTIL, L. a kol., *Biofyzika v medicíně*, 1.vyd. Praha: Manus, 2003.398 s., ISBN 80-86571-03-3
- 5) OSTREERREICHER, J., VÁVROVÁ, J., *Přednášky z radiobiologie*, 1.vyd. Praha:Manus, 2003.116 s., ISBN 80-86571-01-7
- 6) SLOUKA, V., *Základy toxikologie radioaktivních látek*, 1.vyd. Praha: Státní zdravotnické nakladatelství, 1962.148 s.
- 7) Usnesení vlády č. 121/1997, o koncepci skladování vyhořelého jaderného paliva
- 8) Usnesení vlády č. 487/2002, koncepce nakládání s vyhořelým jaderným palivem a radioaktivními odpady
- 9) Vyhláška č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně
- 10) Zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření
- 11) Zákon č. 244/1992 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí

Internetové zdroje:

- 12) *Alternativní zdroje energie* [online]. URL:<<http://www.alternativni-zdroje.cz/>> . [cit.2007-03-01].
- 13) BLAŽKOVÁ, Irena. *Vyhořelé jaderné palivo* [oline]. URL:<<http://www.physics.muni.cz/~blazkova/dp/Odpad2.htm>>.[cit.2006-06-10].

- 14) BLAŽKOVÁ, Irena. *Alternativní a obnovitelné zdroje elektrické energie* [online]. URL:< <http://physics.muni.cz/~blazkova/dp/index.htm>>.[cit.2007-03-30].
- 15) ČEZ. *Radioaktivní odpad* [online]. URL:<http://www.cez.cz/presentation/static/encyklopedie/vykladovy_slovník_energetiky/hesla/rad_odp.htm>.[cit.2006-12-04].
- 16) HNUTÍ DUHA. *Radioaktivní odpady a novela atomového zákona* [online]. URL:< http://www.hnutiduha.cz/publikace/infolisty/pdf/rao_novela.pdf>.[cit.2006-10-11]
- 17) HNUTÍ DUHA. *Radioaktivní odpady z jaderných elektráren* [online]. URL:< <http://www.hnutiduha.cz/publikace/infolisty/energetika/odpad/odpad.htm>>.[cit.2006-12-10].
- 18) HNUTÍ DUHA. *Nakládání s vyhořelým jaderným palivem ve světě* [online].URL:< http://www.hnutiduha.cz/publikace/studie/ro_ve_svete.pdf>.[cit.2007-02-15].
- 19) JADERNÝ ODPAD. *Mezisklady vyhořelého paliva* [online]. URL:<http://www.jaderny-odpad.cz/mezisklady-vyhoreleho_paliva.htm>.[cit.2006-11-29].
- 20) JADERNÝ ODPAD. *Hlubinné úložiště jaderného odpadu a jeho anatomie* [online]. URL:< <http://www.jaderny-odpad.cz/hlubinne-uloziste.htm>>.[cit.2006-12-09].
- 21) JADERNÝ ODPAD. *Zpětné využití jaderného odpadu* [online]. URL:< <http://www.jaderny-odpad.cz/vyuziti-jaderneho-odpadu.htm>>.[cit.2007-02-20].
- 22) KONEČNÝ, Jiří. *Radioaktivní odpady* [online].Platný e-mail: NeumannovaKatka@seznam.cz od konecj@volny.cz .[2006-11-02].
- 23) LACIOK, Aleš. *Co s vyhořelým jaderným palivem?* [online]. URL:< <http://www.vesmir.cz/clanek.php3?CID=174>>.[cit.2007-03-31].
- 24) MACH, Roman. *Transmutace-nový zdroj energie?* [online]. URL:< <http://www.eldar.cz/zelenyklad/transmut.html>>.[cit.2007-02-04].
- 25) SIMOPT. *Urychlovačem řízený reaktor* [online]. URL:< http://www.simopt.cz/energyweb/web/index.php?display_page=2&subitem=1&

[ee_chapter=3.8.5&PHPSESSID=17e9c942b11160c76e474c50bb76c226>.](#)

[cit.2007-03-09].

- 26) SÚJB. *Nakládání s radioaktivními odpady* [online].
URL:< http://www.sujb.cz/?c_id=536>.[cit.2006-11-01].
- 27) SÚJB. *Mezisklad vyhořelého paliva Dukovany* [online].
URL:< http://www.sujb.cz/?c_id=483>.[cit.2006-12-01].
- 28) SÚJB. *Sklad vyhořelého paliva Dukovany* [online] URL:<
http://www.sujb.cz/?c_id=700>.[cit.2006-12-27].
- 29) SÚRAO. [online]. URL:< <http://www.surao.cz/>>.[cit.2006-12-01]
- 30) SÚRAO. *Bratrství-úložiště radioaktivních odpadů* [online].
URL:< <http://proe.cz/surao2/publikace/bratrstvi.pdf>>.[cit.2006-11-28].
- 31) SÚRAO. *Dukovany-úložiště radioaktivních odpadů* [online].
URL:< <http://proe.cz/surao2/publikace/dukovany.pdf>>.[cit.2006-11-27].
- 32) SÚRAO. *Richard-úložiště radioaktivních odpadů* [online].
URL:< <http://proe.cz/surao2/publikace/richard.pdf>>.[cit.2006-11-27]
- 33) SÚRAO. *Umístění hlubinného úložiště* [online]. URL:<
http://proe.cz/surao_archiv/2004/publikace_hodnoceni_uzemi_20040630_vetsi_rozliseni.pdf>.[cit.2007-01-14].
- 34) SÚRAO. *Hlubinné úložiště radioaktivních odpadů* [online]. URL:<
http://www.vidivici.cz/surao2/hlubinne_uloziste.pdf>.[cit.2007-01-29].
- 35) TONIKOVÁ, Zuzana. *Centrální sklad vyhořelého jaderného paliva v lokalitě Skalka* [online]. URL:< <http://www.ceu.cz/EIA/casopis/2000/1/e-0103.htm>>.[cit.2007-23-01].
- 36) WIKIPEDIA. *Radioaktivita* [online].
URL:< <http://cs.wikipedia.org/wiki/Radioaktivita>>.[cit.2006-10-15].
- 37) WIKIPEDIA. *Radioactive waste* [online].
URL:<http://en.wikipedia.org/wiki/Category:Radioactive_waste>.[cit.2006-12-04].

8. Klíčová slova

Radioaktivita

Radioaktivní odpad

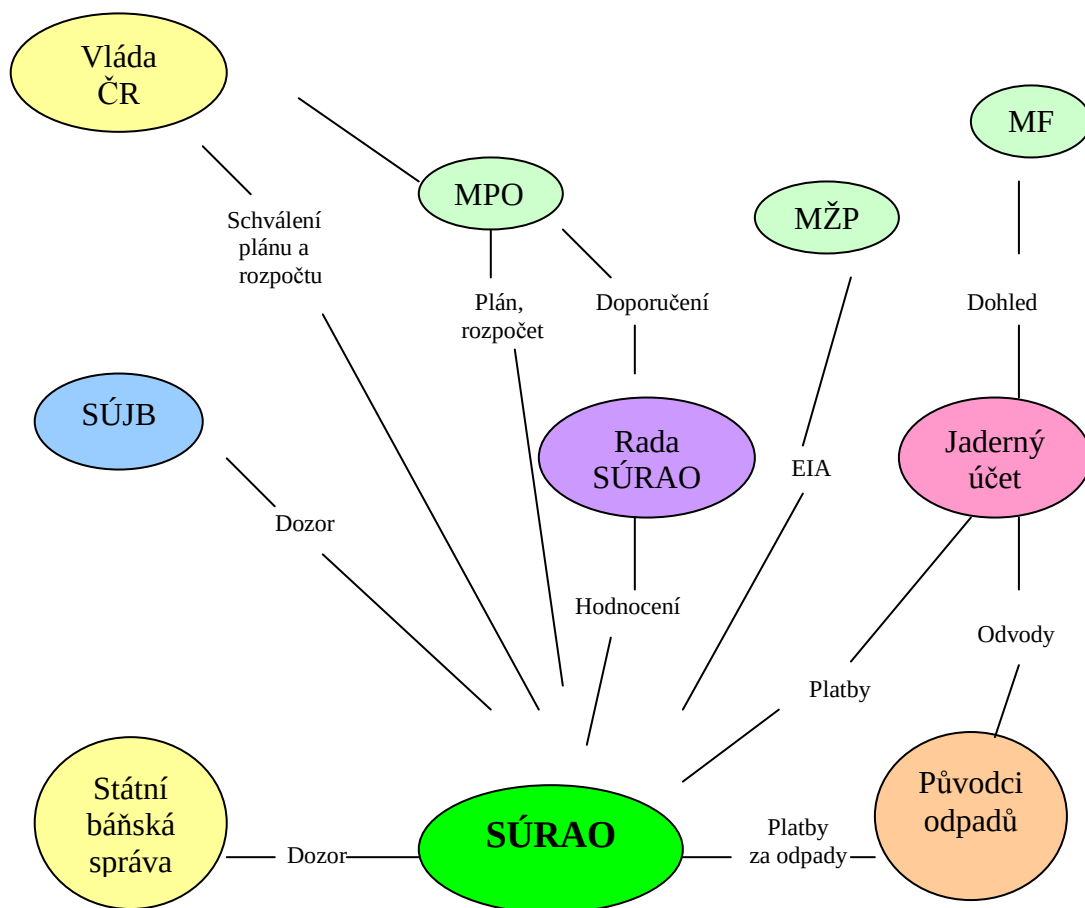
Vyhořelé jaderné palivo

Úložiště radioaktivních odpadů

Hlubinné úložiště

9. Přílohy

Příloha č.1: Schéma vazeb mezi institucemi zapojenými do nakládání s radioaktivními odpady



Zdroj: 3

Příloha č.2: Úložiště Richard



Zdroj: 32

Příloha č.3: Úložiště Dukovany



Zdroj: 31

Příloha č.4: Kontejner CASTOR



Zdroj: 13

Příloha č.5: Úložiště nízko a středně aktivních odpadů Dukovany



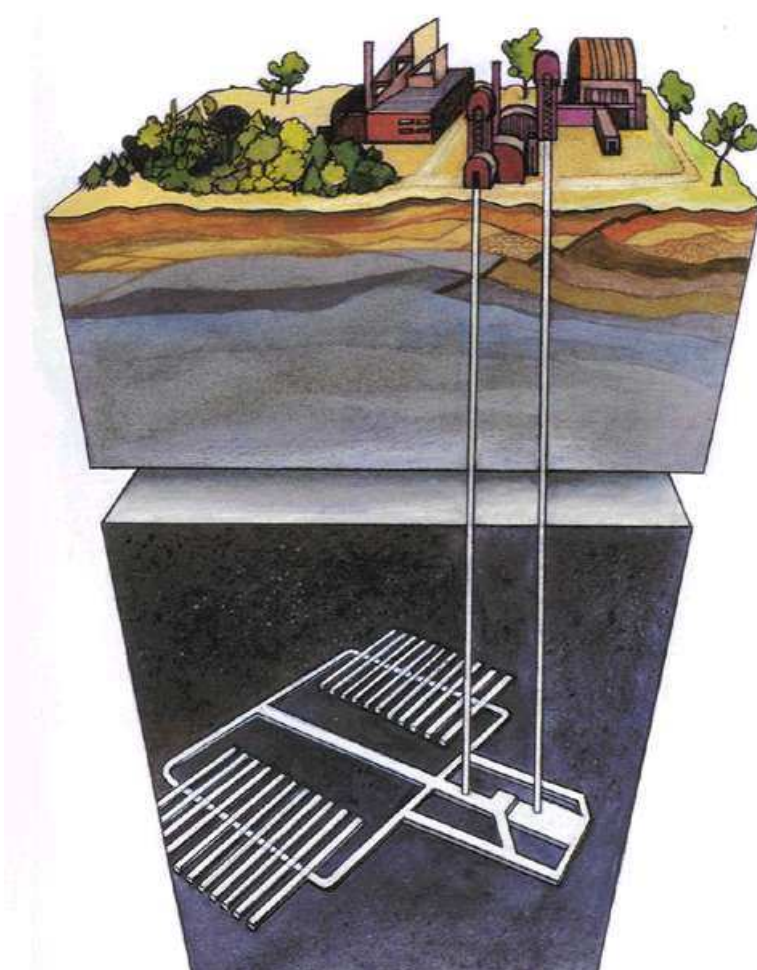
Zdroj: 31

Příloha č.6: Mezisklad vyhořelého jaderného paliva Dukovany



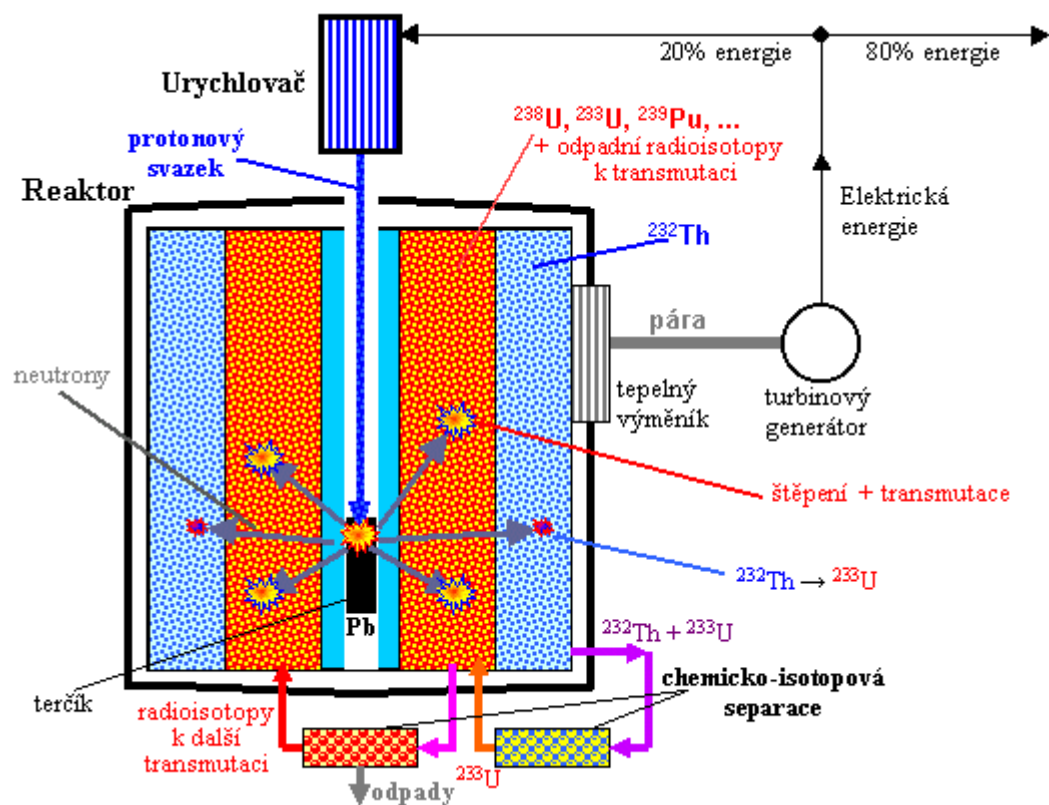
Zdroj: 31

Příloha č.7: Nákres hlubinného úložiště



Zdroj: 34

Příloha č.8: Schéma urychlovače pro transmutační technologii ADTT



Zdroj: 23