

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



Radioaktivita, radioaktivní odpad a jeho rizika

Bakalářská práce

Tereza Poláčková

Veřejná správa v zemědělství a krajině

prof. Ing. Pavel Tlustoš, CSc.

© 2018 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Radioaktivita, radioaktivní odpad a jeho rizika" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 20. 4. 2018

Poděkování

Chtěla bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce panu prof. Ing. Pavlu Tlustošovi, CSc. za pomoc a rady při zpracování této práce. Děkuji také panu Ing. Janu Chocholáčovi, Ph.D. za rady, které mi poskytl.

Radioaktivita, radioaktivní odpad a jeho rizika

Souhrn

Bakalářská práce je vypracována formou literární rešerše. Jejím tématem je „Radioaktivita, radioaktivní odpad a jeho rizika“. Problematika radioaktivních odpadů je velmi aktuální a při tom se celá oblast potýká s nedostatečnou nebo nepřesnou informovaností. Podstatné je proto shrnout základní fakta a předložit je tak, aby byl popsán celý postup nakládání s odpady zejména s ohledem na vysoký stupeň zabezpečení celého systému. Práce se proto zaměřuje na problematiku vzniku a zpracování radioaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva. Hlavní snahou je zpracovat text tak, aby jej bylo možné využít jako informační zdroj pro občany a představitele obcí, což je důležité zejména v souvislosti s připravovaným hlubinným úložištěm. Snahou bylo ukázat i institucionální zajištění jaderné bezpečnosti na území České republiky spolu s uvedením zdrojů, kde je možné získat ověřené a pravdivé informace k dané problematice.

Jaderná bezpečnost je v České republice na vysoké úrovni. Jsou používány reaktory jejichž chod je bezpečný, a navíc má celý systém řadu zabezpečovacích prvků. Důkazem je že na Mezinárodní stupnici jaderných událostí bylo dosaženo bodu jedna – anomálie. Nepostradatelnou úlohu v jaderné bezpečnosti má Státní úřad pro jadernou bezpečnost, který zodpovědně plní svoji funkci.

První část práce je zaměřena především na samotnou radioaktivitu, shrnuje základní pojmy, věnuje se původu radioaktivity a radioaktivním přeměnám. Je zde popsán vliv ionizujícího záření na živé organismy, včetně člověka. V následující části je naznačeno dělení radioaktivních odpadů podle různých hledisek, jsou zde shrnuty i základní bezpečnostní zásady při nakládání s nimi. Pozornost je věnována také zpracování odpadů s ohledem na jejich skupenství a aktivitu, práce popisuje možnosti jejich imobilizace před konečným uložením, včetně způsobů přepracování vyhořelého jaderného paliva. Poslední kapitola je věnována úložištím na území České republiky včetně informací o množstvích uložených odpadů. Na závěr jsou shrnuty základní informace o připravovaném hlubinném úložišti.

Klíčová slova: radioaktivita, ionizující záření, radioizotopy, jaderné palivo, radioaktivní odpad, radioaktivní přeměny

Radioactivity, radioactive waste and their risks

Summary

The Bachelor's thesis is elaborated as a literary research. The topic is "Radioactivity, radioactive waste and its risks". The issue of radioactive waste is topical, but the field has to deal with insufficient awareness or inaccurate information. It is therefore important to summarize elementary facts and interpret them so as to describe the entire waste management process with regard to the high level of security of the whole system. The thesis is thus focused on the emergence and treatment radioactive waste and spent nuclear fuel. The main effort is to elaborate the thesis as an information source for citizens and municipality representatives, which is necessarily especially in the context of the deep repository in preparation. The effort was also to demonstrate institutional nuclear safety assurance in the Czech Republic and introduce sources of verified and true information related to the field.

Nuclear safety has high standard in the Czech Republic. There are used very safe reactors and their operation has an entire system of safety elements. The proof is that it has achieved degree one of the International Nuclear Event Scale – anomaly. An indispensable role in nuclear safety is played by the State Office for Nuclear Safety in nuclear safety, which executes its function responsibly.

The first part of thesis is primarily focused on radioactivity: it summarizes the basic concepts and deals with the origin of radioactivity and radioactive conversion. The effect of ionizing radiation on living organisms including humans is described. The next part classifies radioactive waste according to various aspects; it also summarizes elementary principles for radioactive waste management. Attention is also paid to the processing of waste in terms of its state and activity; the thesis describes the possibilities of its immobilization before final disposal, including the methods of reprocessing spent nuclear fuel. The last chapter is dedicated to repositories in the Czech Republic including information about the amount of disposed waste. The last part summarizes basic information about the deep repository in preparation.

Keywords: ionizing radiation, radioactivity, radioisotopes, nuclear fuel, radioactive waste, radioactive conversion

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Cíl práce.....	2
3 Přehled literární rešerše	3
3.1 Radioaktivita.....	3
3.1.1 Historie objevu radioaktivity	3
3.1.2 Základní pojmy	3
3.1.3 Radioaktivní přeměny.....	5
3.1.3.1 Přeměna alfa	5
3.1.3.2 Přeměna beta.....	5
3.1.3.3 Pozitronová přeměna	6
3.1.3.4 Elektronový záchyt	6
3.1.3.5 Emise těžších jader	6
3.1.3.6 Samovolné štěpení	6
3.1.3.7 Emise nukleonů.....	6
3.1.3.8 Přeměna gama a vnitřní konverze.....	7
3.1.4 Přírodní radionuklidy.....	7
3.1.4.1 Kosmogenní radionuklidy.....	7
3.1.4.2 Primordiální radionuklidy.....	7
3.1.4.3 Sekundární radionuklidy.....	8
3.1.5 Umělé radionuklidy	8
3.2 Ionizující záření	8
3.2.1 Co je ionizující záření.....	8
3.2.2 Účinky ionizujícího záření.....	9
3.2.2.1 Biologické účinky ionizujícího záření	10
3.2.2.1 Účinky ionizujícího záření na mikroorganismy.....	11
3.2.2.2 Účinky ionizujícího záření na rostliny	12
3.2.2.3 Účinky ionizujícího záření na hmyz	12
3.2.2.4 Účinky ionizujícího záření na člověka.....	12
3.2.2.4.1 Nestochastické účinky	13
3.2.2.4.2 Stochastické účinky	14

3.2.3 Zajištění jaderné bezpečnosti a ochrany obyvatelstva.....	14
3.3 Radioaktivní odpady	16
3.3.1 Historie vzniku radioaktivních odpadů.....	16
3.3.2 Dělení radioaktivních odpadů.....	17
3.3.2.1 Dělení podle International Atomic Energy Agency	19
3.3.2.1.1 Odpady o radioaktivitách nižších než uvolňovací úroveň.....	19
3.3.2.1.2 Přechodné odpady.....	19
3.3.2.1.3 Velmi nízko aktivní odpady	20
3.3.2.1.4 Nízko aktivní odpady.....	20
3.3.2.1.5 Středně aktivní odpady	20
3.3.2.1.6 Vysoce aktivní odpady	20
3.3.2.2 Dělení podle původu.....	21
3.3.2.2.1 Institucionální radioaktivní odpady	21
3.3.3 Jaderný palivový cyklus.....	22
3.3.3.1 Zpracování uranových rud a výroba paliva	23
3.3.3.2 Odpady pocházející ze zpracování uranové rudy	24
3.3.3.3 Vyhořelé jaderné palivo jako radioaktivní odpad	24
3.3.4 Bezpečnost nakládání s radioaktivním odpadem.....	25
3.3.5 Nakládání s radioaktivními odpady před jejich zpracováním	27
3.3.5.1 Shromažďování radioaktivních odpadů.....	28
3.3.5.2 Třídění radioaktivních odpadů.....	29
3.3.5.3 Charakterizace radioaktivních odpadů.....	30
3.3.5.4 Recyklace radioaktivních odpadů.....	30
3.4 Zpracování radioaktivních odpadů	31
3.4.1 Zpracování podle skupenství	31
3.4.1.1 Zpracování kapalných radioaktivních odpadů.....	31
3.4.1.1.1 Chemickou úpravou	31
3.4.1.1.2 Odpařováním	32
3.4.1.1.3 Sorpcí a iontovou výměnou	32
3.4.1.1.4 Extrakcí.....	33
3.4.1.1.5 Mikrofiltrací, ultrafiltrací a reverzní osmózou	33
3.4.1.1.6 Plazmovým hmotnostním filtrem	33
3.4.1.1.7 Zpracování organických kapalin.....	33
3.4.1.2 Zpracování pevných odpadů.....	34

3.4.1.2.1 Lisováním	34
3.4.1.2.2 Fragmentací	34
3.4.1.2.3 Spalováním	35
3.4.1.2.4 Termickým rozkladem	35
3.4.1.2.5 Tavením.....	35
3.4.1.2.6 Chemickou úpravou	35
3.4.1.2.7 Zpracování odpadů biologického původu.....	36
3.4.1.3 Zpracování plyných odpadů.....	36
3.4.2 Přepřerování vyhořelého jaderného paliva.....	36
3.4.2.1 Technologie PUREX.....	36
3.4.2.2 Technologie MOX	37
3.4.2.3 Transmutační technologie	38
3.4.3 Úprava nízko a středně aktivních radioaktivních odpadů.....	38
3.4.3.1 Bitumenací	38
3.4.3.2 Cementací	39
3.4.3.3 Polymerací	39
3.4.4 Úprava vysoce aktivních odpadů.....	39
3.4.4.1 Vitřifikací	39
3.4.4.2 Keramickými hmotami	40
3.4.5 Ukládání radioaktivních odpadů.....	40
3.4.5.1 Obalové soubory pro radioaktivní odpady.....	41
3.4.5.2 Obalový soubor CASTOR	41
3.4.5.3 Skladování radioaktivních odpadů.....	42
3.4.6 Skladování vyhořelého jaderného paliva.....	42
3.4.6.1 Vyhořelé jaderné palivo v České republice.....	42
3.4.5 Úložiště provozovaná v České republice.....	42
3.4.6.1 Úložiště Richard	43
3.4.6.2 Úložiště Bratrství	44
3.4.6.3 Úložiště Dukovany	44
3.4.6.4 Úložiště Hostim	45
3.4.7 Hlubinné úložiště	46
4. Závěr	48
5 Seznam literatury	49
6 Seznam zkratk	56

1 Úvod

Prvním impulsem k napsání bakalářské práce se pro mě stal hojně medializovaný problém hlubinného úložiště jaderných odpadů. Sama jsem se o záležitosti kolem jaderné energetiky zajímala, a proto mě překvapil přístup veřejnosti. Výhody, které pramení z využívání nejen jaderné energetiky, ale i medicíny a průmyslu přece využíváme všichni, nejsme však schopni přijmout odpovědnost za radioaktivní odpady, které tím vznikají. Přitom samotné úložiště by při spolupráci obcí se Správou úložišť mohlo přinést mnoho pozitiv v podobě nových pracovních míst, rozvoje infrastruktury nebo občanské vybavenosti. Důvodem je neinformovanost, občané, a dokonce ani představitelé obcí mnohdy netuší, jak dochází ke zpracování radioaktivních odpadů, aby byla maximálně snížena rizika s nimi spojená.

V České republice zastupuje úlohu kontrolního orgánu Státní úřad pro jadernou bezpečnost. Jeho činnost byla kladně hodnocena i Mezinárodní agenturou pro atomovou energii. V oblasti radiační bezpečnosti jsou činné i další instituce a poskytují dostatek ověřených informací, které jsou každému dostupné. Je zajištěna maximální průhlednost jednotlivých činností spojených s ionizujícím zářením a veškeré subjekty s nimi pracující jsou zahrnuty ve veřejné evidenci. Neméně důležité je stanovení právního rámce, jehož základem je Atomový zákon, který byl vypracován ve spolupráci se SÚJB. Snahou bylo proto popsat nejen nároky na bezpečnost odpadů v souvislosti s technickým řešením, ale ukázat i institucionální zajištění celé problematiky zaměřené na systém používaný v České republice. Uvedeny jsou i zdroje, kde mohou občané pokládat dotazy, případně získat další informace.

Práce je rozčleněna tak, že postupně ukazuje jednotlivé fáze nakládání s radioaktivními odpady. Nejprve jsou shrnuta základní fakta o radioaktivitě, jejím vzniku a dopadech na živé organismy. Rovněž jsou zde popsány druhy radioaktivního odpadu a jejich dělení. V kapitole je ukázáno i členění v některých dalších zemích, které je odlišné od charakterizace používané v České republice. Následuje předúprava, kde dochází k uvedení odpadů do podoby vhodné k dalšímu zpracování. Dále dochází k samotné úpravě odpadů, které je v práci rozděleno podle jejich skupenství. Patrně nejdůležitější je stabilizace odpadů a zde je popsáno několik nejvyužívanějších metod. Posledním stádiem je uložení odpadů v přípovrchovém nebo hlubinném úložišti, jsou zde uvedena i úložiště provozovaná na území České republiky.

2 Cíl práce

Cílem bakalářské práce bude vytvořit shrnutí základních faktů o radioaktivitě, radioaktivních. Práce bude vypracována formou literární rešerše. Literární přehled bude zaměřen na problematiku radioaktivních odpadů, jejich vzniku, nakládání s nimi, jejich zpracováním a možnostmi immobilizace a likvidace. Práce ukáže i postupy používané v České republice. Budou zde shrnuta i některá fakta o radioaktivitě a jejím vlivu na živé organismy a člověka. Zahrnuta bude i kapitola zabývající se institucemi jaderné bezpečnosti v České republice

3 Přehled literární rešerše

3.1 Radioaktivita

3.1.1 Historie objevu radioaktivity

Radioaktivita, i když provází lidstvo od jeho počátků, byla objevena až v roce 1896 Henri Becquerelem. Na počátku byly uranové soli, které vědec umístil na fotografické desky, zakryl je, aby nedošlo ke slunečnímu ozáření. Na základě pokusu zjistil, že uranové soli ozářily fotografické desky, a to i skrz různé materiály. Ernest Rutherford se zabýval radioaktivním rozpadem, v roce 1903 definoval beta rozpad. Na základě práce Becquerela, vypracovala svůj doktorát Marie Curie. Povedlo se jí najít další prvky vyzařující paprsky jako uran. Zavedla pojem radioaktivita. Později, spolu se svým manželem Pierrem, extrahovala ze smolince nový prvek polonium. Gama záření bylo objeveno v roce 1900 Paulem Villardem při pokusu s odchýlením paprsků pomocí magnetického pole. Postupně byly definovány všechny tři druhy záření, jejich názvy jsou odstupňované podle průniku paprsků látkou. Jednalo se o první a zásadní kroky na poli jaderné fyziky a radiochemie (Tayal, 2009; Pant, 2008).

3.1.2 Základní pojmy

Před tím, než se zaměříme na samotnou radioaktivitu je nejprve nutné si osvětlit několik termínů, které se k tomuto tématu váží. Základem jsou elementární částice, nejmenší nedělitelné útvary. V průběhu historie se představa elementární částice měnila. Původní pojetí atomu bylo nahrazeno teorií, která počítala s několika elementárními částicemi až po současnost, kdy jich je objeveno přibližně sto a k nim příslušné antičástice (Hála, 2009).

Částice se dělí na dvě skupiny leptony (lehké částice) a hadrony (tvrdé částice). Leptony jsou v současnosti považovány za fundamentální a jsou bez náboje nebo mají záporný náboj. Existuje šest leptonů - elektron, mion a tauon a k nim příslušné anitleptony. Hadrony se dělí na mezony a baryony. Mezi baryony (těžké částice) patří rovněž protony a neutrony, které jsou složeny z dalších menších částic nazývaných kvarky. Pro příklad protony i neutrony se skládají ze tří kvarků označovaných u a d a to následovně proton uud a neutron udd. Jednotlivé kvarky mají zlomkové náboje pro d je to $-1/3$ a pro u $2/3$. Složení je naznačeno níže. (L'annunziata, 2012)

$$\mathbf{n} = \mathbf{u}^{+2/3} + \mathbf{d}^{-1/3} + \mathbf{d}^{-1/3}$$

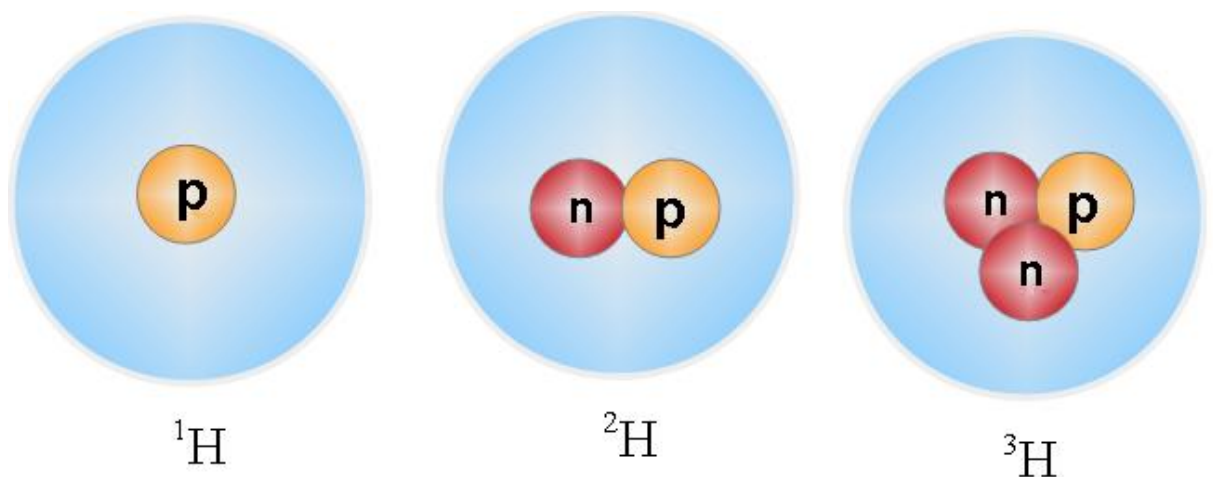
$$p+ = u^{+2/3} + u^{+2/3} + d^{-1/3}$$

Jak z rovnice vyplývá po sečtení jednotlivých kvarků u neutronu získáme výsledný náboj 0 a u protonu kladný náboj rovný 1. Soudržnost kvarků je vysvětlována pomocí takzvané virtuální částice, která má velmi krátký život. V momentě, kdy je uvolněna jedním kvarkem je okamžitě absorbována jiným, tím mezi nimi vzniká silové pole. Částice, která působí mezi kvarky se nazývá gluon (Hála, 2009).

Jádro atomu se tedy skládá z protonů a neutronů neboli nukleonů označovaných A. Počet protonů udává protonové (atomové) číslo Z a počet neutronů, neutronové číslo N. Vlastnosti jednotlivých prvků jsou při tom určovány atomovým číslem. Složení jádra je naznačeno v rovnici (Choppin, 2013).

$$A = N + Z$$

V přírodě se nachází atomy prvků, které mají stejné protonové číslo, pokud bychom měli látku, která se skládá jen ze stejných prvků se stejným N i Z jednalo by se o nuklidy. Běžně se setkáme i s prvky, které mají rozdílný počet protonů a neutronů, ty jsou nazývány izotopy. Například neon, jehož atomy ve většině případů mají deset neutronů, se může vyskytnout ve formě s dvanácti neutrony. Velmi známé a využívané jsou izotopy ^3H a ^2H , proto se pro ně vžilo označení tritium a deuterium (viz obrázek. 1)



Obrázek 1 Izotopy vodíku

Pokud dojde k výskytu izotopu s přebytečnou energií důsledkem čehož dochází k samovolné přeměně, jedná se o radioizotop (Choppin, 2013).

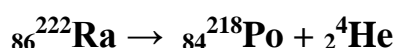
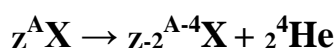
V samotném jádře působí silné odpuzivé síly, které musí být překonány jinou silou, jež umožňuje soudržnost jádra. Jedná se o jaderné síly, což je vlastně neustálá interakce mezi kvarky, výměnou virtuální částice. Samotné jaderné síly mají krátký dosah, poloměr jádra, čímž jsou omezeny právě na tuto oblast (Dlouhý 2009).

3.1.3 Radioaktivní přeměny

Radioaktivita je samovolná přeměna na jiný nuklid, při kterém dojde k uvolnění vysokoenergetického záření. Radionuklidy lze rozdělit podle jejich rozpadu a energie. Důležitým parametrem je poločas rozpadu, který určuje dobu, za kterou se rozpadne polovina z celkového množství látky značí se $T_{1/2}$. Doba může být různě dlouhá od několika vteřin až po miliony let. Radioaktivní rozpad se projevuje v podobě elektromagnetického záření a kinetické energie. Pro radioaktivní přeměnu je důležitý poměr v počtu protonů a neutronů. Pokud se jádro vychýlí z optimálního poměru dochází k samovolnému přechodu na jiné jádro (Choppin, 2013).

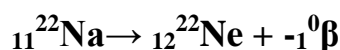
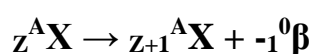
3.1.3.1 Přeměna alfa

Dochází k vyzáření shluku dvou protonů a dvou neutronů. V podstatě se jedná o jádro He zbavené elektronového obalu. Tento typ přeměny se vyskytuje především u těžších prvků s atomovým číslem větším než 83. Platí při tom, že částice s vysokou energií alfa záření mají krátké poločasy rozpadu a ty s nízkou energií mají naopak dlouhé poločasy (L'annunziata, 2012).



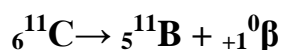
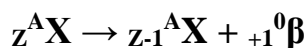
3.1.3.2 Přeměna beta

K přeměně dochází, pokud je v jádru nadbytek neutronů, jenž se v jádru přemění na proton, a přitom uvolní β^- částice neboli elektron, elektronové antineutrino. Dochází vlastně k přeměně kvarku d na kvark u. Nastává změna neutronového čísla při zachování nukleonového (Dlouhý, 2009).



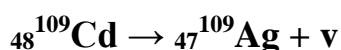
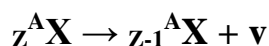
3.1.3.3 Pozitronová přeměna

Vyskytuje se u jader připravených jadernými reakcemi s nadbytkem protonů. Při přeměně se jeden z protonů mění na neutron a při tom je z jádra emitován pozitron a elektronové neutrino. Při přeměně se zvyšuje poměr N/Z (Dlouhý, 2009).



3.1.3.4 Elektronový záchyt

Tímto způsobem se jádro zbavuje přebytku protonů, kdy se proton mění na neutron zachycením elektronu z orbitalu. K. Tento typ reakce se vyskytuje pouze s jiným druhem přeměny. Z jádra je emitováno jen neutrino. Běžnými detektory ionizujícího záření nelze elektronový záchyt pozorovat, je možné jej zjistit až následných jevů (Choppin, 2013).



3.1.3.5 Emise těžších jader

Stejně, jako u přeměny alfa, dochází v jádru radionuklidu k vytvoření shluku protonů a neutronů. Na rozdíl od předchozího případu, vytváří se zde jádro těžší, které za splnění hmotnostní podmínky může překonat potenciálovou bariéru a být emitováno. Tyto přeměny však nejsou příliš časté, daleko více převažuje přeměna alfa (Dlouhý, 2009).

3.1.3.6 Samovolné štěpení

Nuklidy aktinoidů jsou charakteristické vysokým počtem protonů a elipsoidním tvarem jádra, pokud je splněna hmotnostní podmínka, může dojít k rozštěpení na dvě nová. Při tom dochází k uvolnění dvou nebo tří neutronů. V některých případech může nastat i stav, kdy se neuvolní žádný neutron. (Dlouhý, 2009).

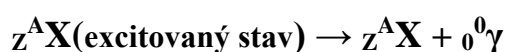
3.1.3.7 Emise nukleonů

V základním stavu jádra k této přeměně nedochází. Možná je pouze v případě velkého nadbytku protonů nebo neutronů, vazebná energie nejvýše položených nukleonů je malá. Zároveň je hmotnost jádra poměrně vysoká. Excitovaná jádra s nadbytkem protonů nebo

neutronů vznikají jako produkty po přeměně beta. Jádra v excitovaném stavu mohou emitovat neutrony se zpožděním. Vyskytují se ve zplodinách jaderného štěpení (Dlouhý, 2009).

3.1.3.8 Přeměna gama a vnitřní konverze

Většina jader vzniklá radioaktivními přeměnami se nachází v excitovaném stavu. Dochází k tomu při změně počtu nukleonů, které se teprve později přeskupují do energeticky výhodnějších stavů a nastává deexcitace jádra. Nadbytek energie je vyzářen, většinou za pomoci fotonů elektromagnetického gama záření. Pokud je gama záření emitováno se zpožděním vzniká jaderný izomer, jedná se o nuklid v excitovaném stavu s delším poločasem přeměny. (Choppin, 2013).



3.1.4 Přírodní radionuklidy

V přírodě se běžně vyskytuje asi 70 radionuklidů. Můžeme je rozdělit do tří skupin: kosmogenní, primordiální, sekundární (Dlouhý, 2009).

3.1.4.1 Kosmogenní radionuklidy

Vznikají působením kosmického záření při průchodu atmosférou. Probíhají zde jaderné reakce za zrodu radioaktivních prvků. Patrně nejdůležitějším je ${}^{14}\text{C}$, který vzniká srážkou neutronu s ${}^{14}\text{N}$. Hladina radioaktivního uhlíku je v živých organizmech konstantní po celou dobu jejich života. Po smrti začíná jeho rozpad, čehož se využívá při datování stáří archeologických nálezů. Při interakci záření s dusíkem a kyslíkem vznikají další prvky jako jsou ${}^7\text{Be}$ a tritium ${}^3\text{H}$. Nicméně původ tritia není zcela přírodní. Po atmosférických testech jaderných zbraní došlo k jeho masivnímu nárůstu. V současnosti jeho přítomnost v prostředí opět klesá (Eisenbud and Gesell, 1997).

3.1.4.2 Primordiální radionuklidy

Vznikaly při formování samotného vesmíru a jsou součástí naší planety od jejího vzniku. Dnes můžeme v přírodě nalézt pouze ty s velmi dlouhými poločasy rozpadu. ${}^{40}\text{K}$ je jedním z těchto prvků a zároveň má největší zastoupení v zemské kůře. Mezi další prvky patří ${}^{232}\text{Th}$, ${}^{238}\text{U}$ a ${}^{235}\text{U}$. Uran je důležitým prvkem pro jadernou energetiku, používá se jako jaderné palivo (Eisenbud and Gesell, 1997).

3.1.4.3 Sekundární radionuklidy

Vznikají rozpadem primordiálních radionuklidů, je možné pozorovat rozpady alfa i beta za vzniku dalších radionuklidů. Tento proces vytváří rozpadové řady. Známe tři, respektive čtyři rozpadové řady a to ^{232}Th (thoriová), ^{238}U (uran - radiová), ^{235}U (uran - aktiniová) a ^{237}Np (neptuniová někdy nazývána umělá), která měla krátké poločasy rozpadu a v přírodě se proto běžně nevyskytuje, je možné ji vytvořit uměle. (Eisenbud and Gesell, 1997).

3.1.5 Umělé radionuklidy

Umělá radioaktivita byla objevena v roce 1934 Irene Curie Joliot a jejím manželem. K pokusu použili polonium, které vyzařuje alfa částice, a jím ostřelovali bor a hliník a vytvořili tak první umělé radionuklidy. Objev našel široké uplatnění v různých oblastech lidského života. Umělé radionuklidy jsou využívány v medicíně, ale dají se jimi sledovat i průběhy chemických reakcí. Obecně lze říci, že radionuklidy vznikají v momentě, kdy jsou jádra bombardována projektily jako jsou například neutrony nebo alfa částice. Vzniklé produkty jsou ve většině případů radioaktivní a nestabilní tzn. podléhají dalšímu rozpadu. Existuje několik způsobů, jakým vznikají umělé radionuklidy. Jednou z variant je i štěpná reakce, jako je tomu v energetických reaktorech. Rovněž je možné použít neutrony s vyšší energií, které se vysílají na terčik. z něho vyráží protony, které pronikají do jádra jiných částic a vytváří radionuklidy (Rao, 2009).

3.2 Ionizující záření

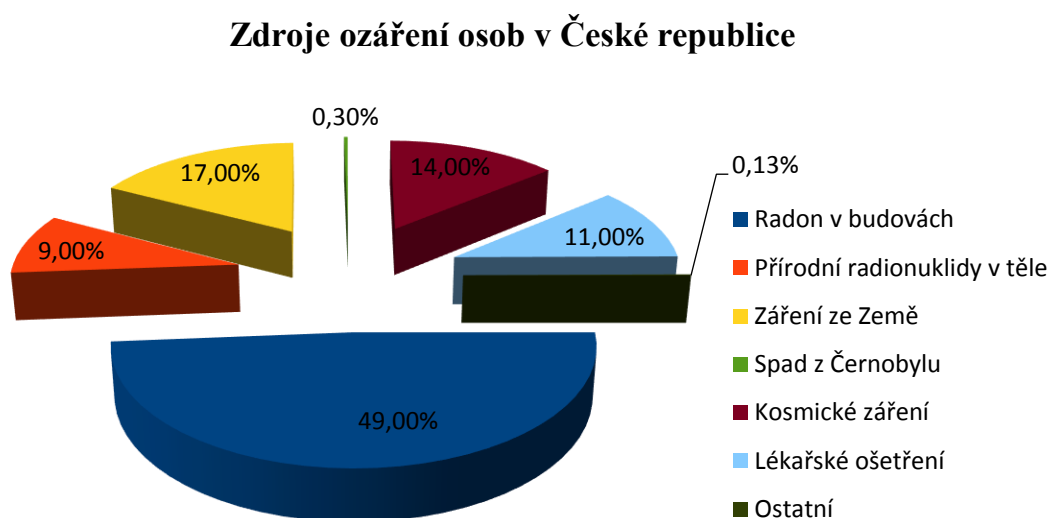
3.2.1 Co je ionizující záření

Ionizující záření je paprskem nabitých částic nebo fotonů s energií větší než 10 kVe. Nabitě částice při průchodu hmotou reagují s negativně nabitými elektrony a pozitivně nabitým jádrem. Tím dochází k vyrážení elektronů – ionizaci. Vznikají tak volné elektrony, které mohou rovněž způsobovat sekundární ionizaci. Pro to, aby mohlo dojít k ionizaci, je potřeba předat elektronu větší energii, než je jeho vazebná energie v atomu. Jinak by nemohl být uvolněn z elektronového obalu. Ionizace má určitý dosah, který je závislý na druhu záření a materiálu, kterým prochází. Pronikáním může být předána veškerá energie nebo jen část, na výstupu je potom energie záření nižší. Obecně lze říci, že silnější vrstva s vyšší hustotou pohltí více energie (Massiot, Jimonet et al., 2009).

Energie sdělená látce, je energie, která je předána od všech částí ionizujícího záření v určitém objemu. Jednotkou je Gray (Gy). Je charakterizována jako jednotka joulu předaná jednomu kilogramu látky. Oproti tomu dávkový příkon vyjadřuje rychlost, s jakou je energie předávána (Gy s^{-1}). Ionizace vzduchu fotonovým zářením je označována jako expozice. Dříve byla používána jednotka rentgen (R). Dnes se jedná o coulomb/kg (C/kg). Další používanou jednotkou je aktivita, které značí počet radioaktivních přeměn v látce za jednotku času. Dříve používaná jednotka curie (Ci) byla nahrazena Becquerelem (Bq), který je vztažen na jednotku objemu, plochy nebo hmotnosti. (Hála, 1998).

3.2.2 Účinky ionizujícího záření

Jak bylo popsáno výše, ionizující záření způsobuje ionizaci, tady vytváří na své cestě materiálem ionty. Stejně je i působení v organismech, kde vznikají kladně i záporně nabitě atomy. Následkem čehož může dojít k odlišnému průběhu některých biochemických dějů. Na člověka běžně působí ionizující záření z mnoha zdrojů. Z kosmu, ze země, z lékařských ošetření, podstatnou částí se pak na přijaté dávce podílí radon (Kelsey et al., 2013). Průměrné přijaté dávky pro obyvatelstvo České republiky viz graf 1

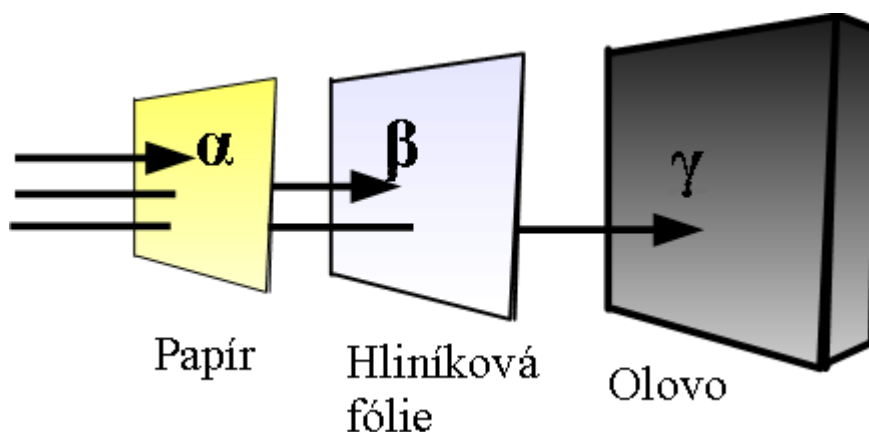


Graf 1 Podíl dávek z jednotlivých zdrojů pro obyvatele ČR
(zdroj: <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz>)

Jednotlivé druhy záření je možné zbrzdit různými materiály o určité tloušťce. Alfa záření velice rychle ztrácí svoji energii a je zbrzděno několika centimetry vzduchu nebo lidskou pokožkou, kde neproniká hlouběji než jeden milimetr. Spolehlivě jej odstíní list papíru viz obrázek 2 (Kelsey et al., 2013).

Beta částice jsou lehčí než alfa a dochází k jejich snadnému rozptylu, jejich dráha není přímá. Mají menší energii a jejich ionizace je slabší. Více pronikají hmotou, v lidském těle se jedná o centimetry. Běžně stačí k jejich odstínění vrstva hliníkového plechu obrázek 2 (Kelsey et al., 2013).

Látky s vysokým atomovým číslem jsou účinné pro zastavení gama záření. Nejčastěji jsou využívány olovo, beton s příměsí barytu nebo ocel viz obrázek 2. Pro lidský organismus jsou rovněž nebezpečné rychlé neutrony, proto je nutné jejich zpomalení, což mohou zajistit materiály s vysokým obsahem vodíku. Gama záření má značnou pronikavost lidskou pokožkou. Dostává se několik centimetrů hluboko. Průnik je vyšší u materiálů s malou hustotou než u těch s vyšší. Proto bude průchodnost větší například u tukové tkáně než u kostí (Powsner et al., 2013).



Obrázek 2 Pronikavost jednotlivých druhů záření

3.2.2.1 Biologické účinky ionizujícího záření

Účinek na buňku může být buď přímý nebo nepřímý. O přímém účinku se hovoří v případech, kdy je ionizujícím zářením zasažena přímo určitá část, u které dochází k poškození. Jedná se tedy o dopad energie samotného záření.

Účinky ionizujícího záření se projevují u všech živých organismů i když ne vždy ve stejné míře. Odezva však není dána jen druhem organismu, ale i dávkou záření. Lidské tělo samo obsahuje 75 – 85 % vody. Tím že je vodný roztok ionizován dochází k hydrolýze vody a vytváří se volné radikály, které reagují mezi sebou, ale také s dalšími molekulami jako jsou DNA a RNA (Massiot, Jimonet et al., 2009).

DNA může být poškozena několika způsoby. Často dochází k ovlivnění syntézy enzymů, které pak nemohou plnit svoji funkci. Případně vznikají cizorodé bílkoviny, pro

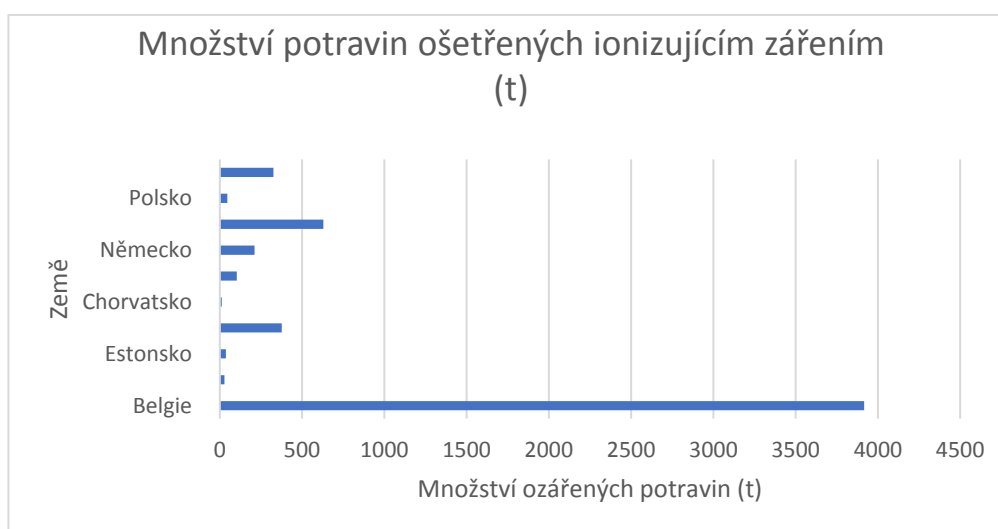
buňku toxické. Dále se mění propustnost buněčných membrán. Rovněž mohou být poškozeny chromozomy. Největší dopady má záření na buňky s větší schopností dělení a ty nově vytvořené a málo diferencované. Odolnější jsou buňky pomalu se dělící nebo ty které se nerozmnožují. Jejich poškození nastává až při vyšších dávkách. Molekulární smrt se dostaví při hodnotách nad 10^3 Gy. Pokud je DNA zasaženo jen v malé míře, zvládnou samoopravné procesy v buňce napravit vzniklé škody. Při překročení dané hranice již nedochází k opravě. Nastává situace, kdy se DNA replikuje s chybou a vzniká nekontrolovatelné bujení (Massiot, Jimonet et al., 2009).

Pro určení dopadu záření na organismus se užívá ekvivalentní dávka. Jednotkou je sievert (Sv) a nahrazuje dříve používaný rem. $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$. Jedno záření může způsobit větší poškození než jiné při stejné absorbované dávce. Ekvivalentní dávka se rovná absorbované dávce vynásobené biologickou účinností (Helicon, 2004).

3.2.2.1 Účinky ionizujícího záření na mikroorganismy

Mikroorganismy vykazují vysokou odolnost vůči záření, a proto se pro jejich odstranění musí použít dávky 10^4 Gy. Ionizující záření se uplatňuje zejména pro sterilizaci zdravotních potřeb (Hála, 1998).

Jiným uplatnitelným využitím je ošetření potravin. Dochází při tom k likvidaci patogenních organismů a prodloužení trvanlivosti produktů. Mikroorganismy mohou mít negativní vliv na lidské zdravé, ale mohou i snižovat kvalitu produktů a znehodnocovat je, zkracovat dobu jejich skladovatelnosti. Jsou stanoveny tři druhy záření o předepsané energii tak, aby bylo zamezeno negativnímu vlivu radiace. (Tayal, 2009)



Graf 2 Ozařování potravin v EU (zdroj: Evropská komise, 2016)

V České republice bylo v roce 2015 registrováno jedno místo pro ozařování potravin. Celkem bylo ošetřeno 28,3 t produktů, což činí 0,5 % z celkového množství. Ozařují se aromatické byliny, zelenina a dochucovadla, vše v sušeném stavu. Aplikovány jsou dávky 6,3 Gy. Podíl množství ozařovaných potravin v jednotlivých zemích EU viz graf 2 (Evropská komise, 2015).

3.2.2.2 Účinky ionizujícího záření na rostliny

Účinky závisí na mnoha faktorech. Obecně platí, že čím rychleji rostlina roste tím je pro ni snazší vyrovnat se se zářením působícím po delší dobu. Naopak pomalu rostoucí rostliny odolávají daleko lépe vyšší jednorázové dávce (Hála, 1998). Jeden ze způsobů vytváření nových zemědělských plodin je radiační šlechtění. Dochází k mutacím a některé mají potenciál pro produkční plodiny, a proto jsou dále šlechtěny a selektovány. Vznikají nové odrůdy s vyššími výnosy, větší stabilitou výnosů, větší odolnosti vůči změně klimatu, chorobám a škůdcům (Tayal, 2009).

3.2.2.3 Účinky ionizujícího záření na hmyz

Hmyz vykazuje mnohem vyšší odolnost vůči záření oproti člověku. Nedochází u něho k růstu a diferenciaci buněk, které jsou jen zvětšovány. Ohroženy jsou proto jen gonády. (Hála, 1998).

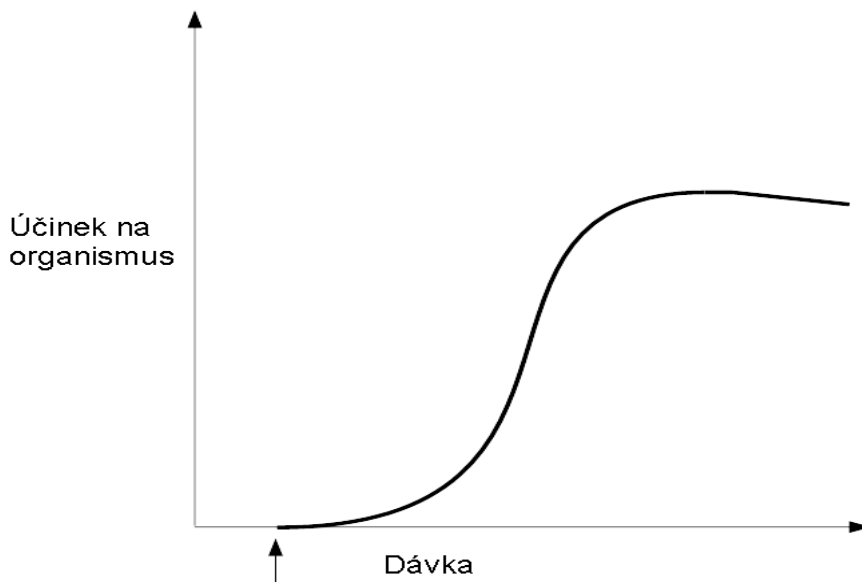
IAEA se ve spolupráci s FAO snaží o likvidaci škodlivých hmyzích škůdců za pomoci sterilizace. Samečci jsou v laboratoři sterilizováni pomocí ionizujícího záření. Následně jsou vypouštěni do přírody. Velkou výhodou je, že do ekosystému nejsou zanášeny insekticidy. V Tanzanii se tímto způsobem povedlo eliminovat mouchu tse-tse. Široké použití našla metoda při likvidaci ovocných mušek (Florida, Kalifornie, Argentina, Chile, Jižní Afrika, Španělsko...) (Sterile insect technique, 2016)

3.2.2.4 Účinky ionizujícího záření na člověka

Účinky na lidský organismus se zpravidla dělí na stochastické a nestochastické.

3.2.2.4.1 Nestochastické účinky

Nestochastické neboli deterministické účinky mají prahovou hodnotu, což znamená, že po ozáření těla určitou dávkou se projeví příznak závisující právě na obdržené dávce. Při laboratorních testech bylo zjištěno, že se vzrůstající dávkou se zvyšuje i poškození organismu, až do momentu, kdy dosáhne své hranice. Pak nastává k natolik závažná destrukce buněk, že vyšší záření již nezpůsobuje větší poškození viz obrázek 3 (Rahman, 2008).



Obrázek 3 Nestochastické účinky záření (zdroj: Rahman, 2008)

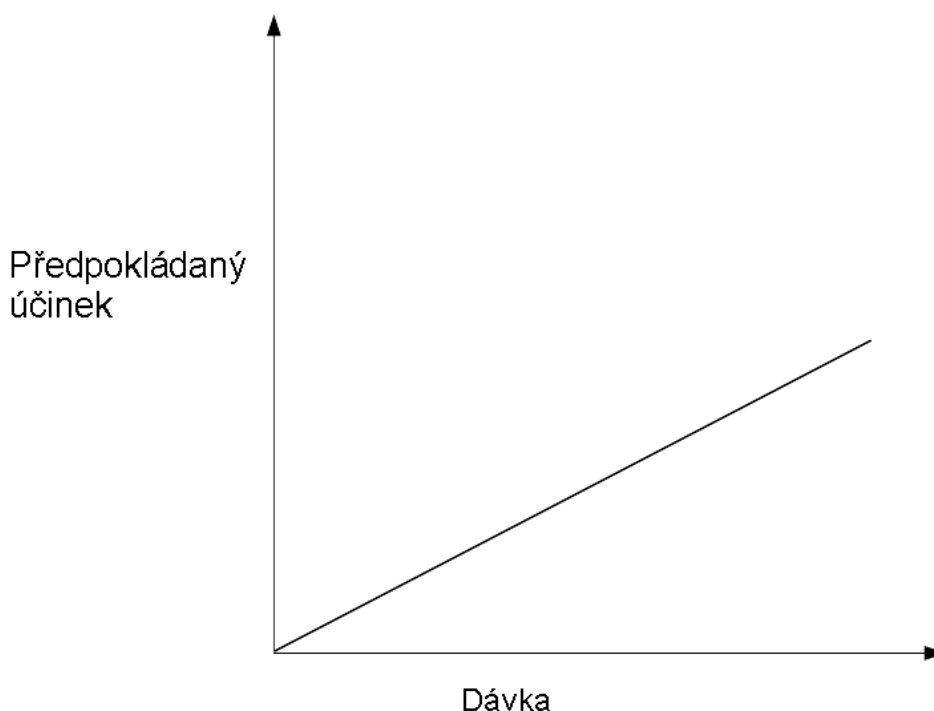
Akutní nemoc z ozáření (akutní radiační syndrom)

Nastává při ozáření celého těla vysokými dávkami radiace. První projevy nastávají při 1 Sv, jedná se o nevolnost a změny krevního obrazu. Při hodnotách do 6 Sv je úmrtnost 80 %. Dávky 7 Sv jsou spojeny se změnami na kůži, bolestmi v krku a krvácivými průjmy nad 10 Sv se úmrtnost blíží 100 % nastává porucha nervového systému, dezorientace (Eisenbud and Gesell, 1997; Hála, 1998). Záření rovněž způsobuje poškození plodu, způsobuje neplodnost nebo zakalení oční čočky.

Kromě vnějšího ozáření je důležité věnovat pozornost tomu vnitřnímu. Příčinou může být radioaktivní jód který vzniká jako štěpný produkt v reaktorech. V případě nehody proniká do lidského organismu a ukládá se ve štítné žláze odkud dochází k vnitřnímu ozařování. Proto se v případě nehod reaktorů podávají vysoké dávky jódu, aby štítná žláza nepřijímala radioaktivní izotop. Užívání má smysl jen v prvních dnech po nehodě, protože jód má krátký poločas rozpadu.

3.2.2.4.2 Stochastické účinky

Stochastické účinky jsou oproti nestochastickým bezprahové. V podstatě to znamená že i po ozáření jedné buňky může dojít k poškození, a to i při podprahovém ozáření, při němž nedochází k projevu nestochastických účinků. Dopad není pozorovatelný okamžitě, ale projeví se až dlouhou dobu po ozáření. Hodnota obdržené dávky při tom nijak nemění závažnost projevu na organismu jen se zvyšuje pravděpodobnost projevu určitého poškození viz obrázek 4. Může se jednat o nádorová onemocnění, poškození imunity, kardiovaskulární onemocnění a další (Rahman, 2008).



Obrázek 4 Stochastické účinky (zdroj: Rahman, 2008)

3.2.3 Zajištění jaderné bezpečnosti a ochrany obyvatelstva

Na mezinárodní úrovni je IAEA (International Atomic Energy Agency) organizací, která dohlíží na dodržování Smlouvy o nešíření jaderných zbraní. Provádí kontroly, aby bylo v jednotlivých členských zemích zajištěno dodržování smlouvy. Poskytuje metodologickou podporu a věnuje se výzkumné činnosti. Významnou měrou se angažuje v oblasti radioaktivních odpadů. Právě na základě Smlouvy o nešíření zbraní u nás vznikl SÚJB (Státní ústav pro jadernou bezpečnost).

Veškeré činnosti spojené s radiačním rizikem jsou kontrolovány právě SÚJB a úřad vydává povolení k jejich provozu (jedná se například i o RTG u lékaře, nebo zařízení pro kontrolu kvality výrobků). Vydává povolení pro výrobu, dovoz, vývoz a přípravu výrobků

obsahujících radionuklidy (ionizační hlásiče). Zároveň ukládá povinnost zpětného odběru těchto zařízení. Provádí dozor v oblasti plánování, umístování a provozu jaderných elektráren. Schvaluje i dodavatele jaderného paliva. Na stránkách ČEZ, a.s. pravidelně uveřejňuje informace o výkonech jednotlivých bloků jaderných elektráren. Stejně informace jsou dostupné i na stránkách SÚJB, kde jsou navíc zveřejňovány podrobnosti o událostech (neplánování odstávky, rychlé odstavení, snižování výkonu...) z provozu JE. Stanovuje povinnost havarijních plánů pro jednotlivá pracoviště s ZIZ. Obě JE mají stanoveny vnitřní i vnější krizové plány. Ve vnějších krizových plánech jsou stanoveny havarijní zóny v plánech jsou stanoveny postupy, která mají minimalizovat rizika spojená s ozářením osob. Jsou jasně vymezeny úkoly a povinnosti pro jednotlivé orgány (stát, vedení elektrárny, bezpečnostní složky státu, kraj i obce). Obyvatelstvo je proškolen a v zónách se konají pravidelná cvičení. Obyvatelstvu, školám, obecním úřadům a dalším klíčovým organizacím byly rozdány jodové tablety.

Na internetových stránkách SÚJB je široké veřejnosti přístupná mapa s údaji o radiační situaci na území České republiky (MonRaS – Monitorování radiační situace). Je zde možné získat informace koncentracích ^{137}Cs , ^{90}Sr v ovzduší, vodě, mléce, potravinách... SÚJB je možné kontaktovat v případě jakýchkoli otázek nebo nejasností přes formulář na jejich stránkách. Zároveň mají občané právo vyžádat si informace například podrobnosti o provozu jaderných elektráren, o správních řízeních vedených s JE o vydaných povoleních a podobně.

SÚRAO má působnost v oblasti nakládání s radioaktivními odpady provozuje ÚRAO na našem území. Zodpovídá za jejich bezpečnost a monitoring okolí. Jednou z činností je i vývoj nových technologií v oblasti nakládání s radioaktivními odpady a v neposlední řadě i provádí činnosti v souvislosti s připravovaným hlubinným úložištěm. S tím je spojena i spolupráce s obcemi a poskytování informací veřejnosti.

V oblasti radiační ochrany je dalším činným orgánem SÚRO Státní ústav radiační ochrany. Zajišťuje radiační monitorovací síť (RMS), která je zdrojem dat i pro MonRaS. Zabývá se i problematikou radonu, přírodního ozáření a lékařského ozáření. Na jejich stránkách jsou přístupné informace o radiační situaci v České republice, která zahrnuje monitoring ovzduší, radionuklidy ve vodě půdě a potravinách. V médiích se občas objeví zpráva o zvýšeném výskytu některého radionuklidu v ovzduší. SÚRO poté vydává zprávu, kde jsou další informace o množství radionuklidu a jeho zdrojích.

3.3 Radioaktivní odpady

Riziko radioaktivních odpadů se odvíjí od jejich aktivity a druhů radionuklidů v nich obsažených. Nepochází jen z průmyslu, výzkumu a medicíny, ale v některých zemích představují výrazný podíl i staré zátěže z vojenského využití zejména plutonia. Velkým problémem zůstává i kontaminace životního prostředí po jaderných haváriích v Černobylu (obrázek č 5), Fukušimě nebo přepracovatelském zařízení Mayak a dalších (Ojovan and Lee, 2013). Zpracování radioaktivního odpadu a nakládání s ním je kromě rizik spojeno i s finanční náročností. Je důležité omezovat jeho vznik a nebezpečnost. Podstatný je i dohled nad ním nejen v současnosti, ale tuto povinnost předáváme i následujícím generacím, jedná se o zátěž, která zde bude desetitisíce let. Je nezbytné maximálně využívat veškeré technologie které jej mohou bezpečně omezovat, likvidovat, recyklovat a imobilizovat (Bayliss and Langley, 2003).



Obrázek 5 Černobylská zakázaná zóna

3.3.1 Historie vzniku radioaktivních odpadů

Radioaktivita je přirozenou součástí přírody, každý je denně vystavován účinků, ozáření. I když radioaktivita je objevem poměrně nedávným, její vliv na člověka byl pozorován již dávno. V roce 1556 byla publikována práce, která se zabývala vyšší úmrtností horníků. Jednalo se o vliv radonu a příčina byla odhalena až v roce 1944. Mnohé radioaktivní sloučeniny byly vyžívány, aniž by bylo známo jejich nebezpečí. Oxid thoričitý byl používán do žárovek a oxidy uranu zase na barvení glazur v keramických dílnách (Eisenbud and Gesell, 1997).

U pracovníků rentgenu se objevovala nádorová onemocnění. Známy je i případ Radiových dívek ve 20. letech 20. století. Rádiem se malovaly ciferníky vojenských hodinek. Ženy při práci nepoužívaly žádné ochranné pomůcky, a dokonce olizovaly štětce, aby nedocházelo k jejich třepení. Postupem času jim začaly vypadávat zuby a vlasy a objevovala se u nich nádorová onemocnění. V soudním procesu se jim povedlo získat odškodné (Clark, 1997).

První výzkumy v oblasti štěpení atomů, a to jak pro energetické, tak pro vojenské využití s sebou přinesly vznik odpadů. Problematice nebyla věnována dostatečná pozornost, veškeré soustředění bylo věnováno rychlému vývoji atomové zbraně. Nicméně v této fázi nelze zatím pozorovat zásadní negativní vlivy na životní prostředí. Problémem se stalo masivní testování atomových zbraní, především atmosférické testy, které roznášely radionuklidy na velké vzdálenosti. Docházelo ke kontaminacím a prostoupení do potravních řetězců. Teprve na konci šedesátých let se pozornost zaměřila na negativní dopady. Započal výzkum vlivu radioaktivity na člověka i celé ekosystémy, jejich transport v atmosféře a prostupnost potravními řetězci (Dlouhý, 2009).

S masivním rozvojem jaderných reaktorů došlo i k nárůstu radioaktivních odpadů. Jejich vznik provází celý proces výroby paliva. Od těžby po přepracování až po samotné jeho vyhoření. Radioaktivní odpady byly rozděleny do tří kategorií vysoce, středně a nízko aktivní (v podstatě stejně je tomu i dnes). Podstatným rozdílem bylo nakládání s ním. Nízko aktivní se běžně vypouštěly do životního prostředí. Středně aktivní se řízeně vsakovaly do půdy. Vysoce aktivní se ukládaly do betonových nádrží odstíněných vrstvou olova, ze kterých bylo odváděno teplo a vnikající plyny (Eisenbud and Gesell, 1997).

Teprve v roce 1973 uskutečnila Agentura pro atomovou energii první konferenci týkající se RAO. Do té doby se stávalo, že se vzniklými odpady bylo neadekvátně zacházeno a do prostředí se tak uvolnilo velké množství kontaminujících látek (Harrison, Hester et al., 2011).

3.3.2 Dělení radioaktivních odpadů

Podle zákona o mírovém využití jaderné energie a ionizujícího záření je RAO definován následovně: Jedná se o odpadní látky, předměty nebo zařízení nevyužitelné jejich vlastníkem, jejichž povrchové znečištění radionuklidy překračuje hodnoty umožňující jejich uvedení do životního prostředí. Vyhořelé jaderné palivo (VJP) není považováno za radioaktivní odpad, protože i po vyřazení z provozu obsahují řadu složek, které je možné

znovu využít. VJP se stává odpadem pouze v případě, že je za něj prohláší jeho vlastník (Zákon č. 263/2016 Sb.). RAO lze kategorizovat podle mnoha hledisek Podle fyzikálních a chemických vlastností nebo jejich rizikovosti (korosivnost, výbušnost, toxicita). (Dlouhý, 2009).

Přesto že bylo IAEA stanoveno doporučené třídění RAO jednotlivé země si klasifikaci uzpůsobily. V České republice jsou zavedeny tři kategorie odpadů a zároveň je brán ohled i na jejich skupenství. První kategorií jsou přechodné prvky, které po určité době skladování vykazují pokles aktivity na takovou míru, že je možné je vypouštět do životního prostředí. Do druhé kategorie spadají nízko aktivní (NAO) a středně aktivní odpady (SAO) a jsou rozdělovány podle poločasu rozpadu obsažených radionuklidů. Krátkodobé radionuklidy mají poločas rozpadu kratší než třicet let a dlouhodobé delší. Poslední kategorií je vysoce aktivní odpad (VAO) kam spadá i vyhořelé jaderné palivo (VJP) (Národní zpráva, 2014).

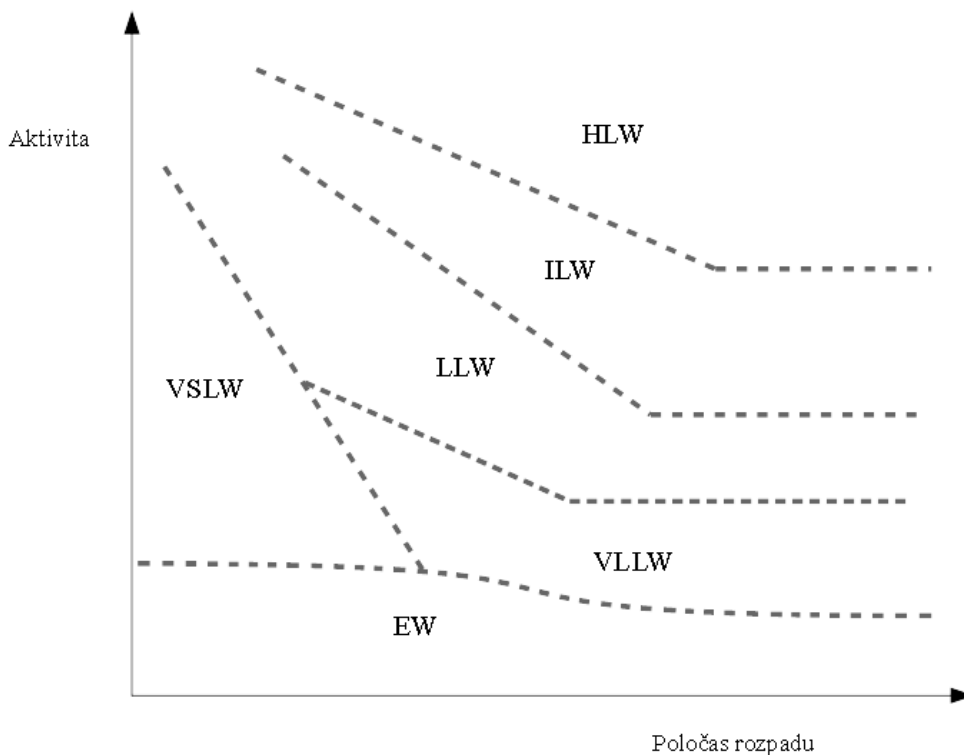
Ve Velké Británii dělení bere v potaz jen aktivitu jednotlivých RAO a zahrnuje kategorie velmi nízko aktivní, nízko aktivní, středně aktivní a vysoce aktivní. Nevýhodou systému je nezohlednění poločasů rozpadu, mohly by se tak snížit náklady na RAO, protože u některých by po určité době skladování poklesla aktivita natolik, že by nemusely být určeny pro umístění do hlubinného úložiště.

Ve Francii jsou odpady rozděleny do tří kategorií označených A, B a C. Třída A zahrnuje nízko aktivní odpady s poločasy rozpadu pod třicet let, omezení se stanovuje na obsah alfa zářičů. Ve skupině B jsou nízko a středně aktivní RAO a rozdělují se podle životnosti radionuklidů s hranicí třicet let, zároveň nesmí vyzařovat vyšší množství tepla. C jsou vysoce aktivní odpady s obsahem dlouhodobých radionuklidů a vyzařující velké množství tepla, které je nutné odvádět (Rahman, 2008).

V Rusku byla v roce 2012 předložena nová klasifikace radioaktivních odpadů, která zahrnuje dvě hlavní složky. V první je RAO určené ke zpracování a následnému uložení, jeho další členění je upraveno podle doporučení IAEA. Druhou skupinou jsou speciální RAO, které pochází ze starých zátěží a havárií. S jejich likvidací se nepočítá kvůli vysokým ekonomickým nárokům a neúměrnému riziku při jejich odstraňování (Zpráva Ruská federace, 2014).

3.3.2.1 Dělení podle International Atomic Energy Agency

IAEA stanovila jednotlivé kategorie RAO v roce 1994 a v roce 2008 došlo k úpravě. Samotné dělení je značně problematické. Pro jeho přiřazení do jednotlivých kategorií bylo nutno vymezit hranice a tím určit způsob, jak s nimi bude nakládáno (Dlouhý, 2009). Rozdělení naznačeno na obrázku 6



Obrázek 6 Rozdělení radioaktivních odpadů (zdroj: IAEA, 2007)

3.3.2.1.1 Odpady o radioaktivitách nižších než uvolňovací úroveň

V obrázku pod zkratkou EW – exempt waste. Mohou se uvolňovat do životního prostředí bez omezení. Obsažené radionuklidy nesmí přesahovat stanovenou mez aktivity. Je určena hranice – efektivní dávka by neměla přesáhnout 0,01 mSv (Dlouhý, 2009). Hodnota pro uvolnění byla stanovena na doporučení IAEA, kde došlo při výzkumech ke stanovení uvolňovací úrovně na základě kolektivních a individuálních dávek. Je zakázáno RAO naředit, tak aby došlo ke splnění limitu pro uvolňovací úroveň (Ojovan and Lee, 2013).

3.3.2.1.2 Přechnodné odpady

Označované zkratkou VSLW – very short low waste. Jsou skladovány po takovou dobu, než jejich aktivita poklesne natolik, že jsou považovány za neradioaktivní. Jejich poločas rozpadu je kolem 100 dní a mohou být izolovány po dobu maximálně 5 let. Většinou se jedná o látky z výzkumných laboratoří nebo z nemocnic (Ojovan and Lee, 2013).

3.3.2.1.3 Velmi nízko aktivní odpady

Jedná se o odpady, které mají velmi nízkou aktivitu, ale již nespĺňují kritéria pro uvolňovací úroveň. Používá se pro ně zkratka VLLW – very low level waste. Bylo by neekonomické ukládat je do úložišť radioaktivního odpadu, a proto jsou pro ně vytvářeny jednodušší uskladňovací systémy. Může se jednat o odpady z první fáze palivového cyklu (Dlouhý, 2009).

3.3.2.1.4 Nízko aktivní odpady

Mají vyšší aktivity, a proto nemohou být uvolněny do životního prostředí. (V obrázku pod zkratkou LLW – low level waste.) Navíc obsahují určité množství dlouhodobých radionuklidů, které musí být kontrolovány (IAEA, 2009). Poločas rozpadu obsažených radioizotopů je menší než třicet let. Musí být izolovány od životního prostředí po dobu 300-500 let (Hejhal, 2015). Jsou proto ukládány do přípovrchových úložišť a izolovány od okolí pomocí bariér. Při manipulaci s těmito odpady je nutné stínění. Hranice jejich ekvivalentního dávkového příkonu je stanovena na 2 mSv/h. Odpad neprodukuje natolik vysoké odpadní teplo, aby bylo nutné jej odvádět (IAEA, 2009).

3.3.2.1.5 Středně aktivní odpady

Neboli ILW – intermediate level waste. Obsahují vyšší podíl dlouhodobých radionuklidů než předchozí kategorie. Poločasy rozpadu jsou delší než 30 let. Je nutné je uchovávat odděleně od životního prostředí po dobu tisíce až desetitisíce let. Jejich aktivita nepoklesne po dlouhou dobu, čímž by mohl vyvstat problém dohledem nad nimi (mohou překročit životnost firem, které je vyprodukovaly) (Hejhal, 2015).

Jsou často umístovány do úložišť několik metrů pod zemí. Vzhledem k nižším aktivitám není potřeba odvádět zbytkové teplo. Hranice mezi nízko a středně aktivními odpady je tenká, proto jejich rozdělení často závisí na podmínkách přijetí pro jednotlivá úložiště (Ojovan and Lee, 2013).

3.3.2.1.6 Vysoce aktivní odpady

Osnačeny jako HLW – high level waste. V RAO neustále probíhají přeměny, při kterých dochází k uvolňování tepla. Při jejich skladování a manipulaci s nimi proto musí být přebytečné teplo odváděno. Jejich aktivita se pohybuje v rozmezí 5×10^4 - 5×10^6 TBq/m³ (IAEA, 2009). Jedná se především o vyhořelé jaderné palivo, jež bylo vlastníkem prohlášeno za odpad. Musí být izolováno po statisíce let (Hejhal, 2015). Pro zajištění bezpečnosti jsou

vysoce aktivní odpady ukládány několik stovek metrů pod zem do geologických útvarů. Před samotnou stavbou prochází vybrané místo řadou průzkumů, aby splňovalo veškerá kritéria pro bezpečné uložení (IAEA, 2009).

Materiály, které pochází z těžby uranové rudy, jejího zpracování a prvních fází přípravy jaderného paliva a obsahují pouze přírodní radionuklidy se nepovažují za RAO. Vztahuje se na ně zákon O ochraně nerostného bohatství (Národní zpráva, 2014).

3.3.2.2 Dělení podle původu

Podle původu rozeznáváme dva druhy odpadu. Jedná se o odpady z provozu jaderných elektráren, kam jsou zahrnuty i odpady vzniklé během jaderného palivového cyklu. Druhou skupinou jsou veškeré odpady, které vznikly mimo jaderné elektrárny. Jsou označovány jako institucionální.

3.3.2.2.1 Institucionální radioaktivní odpady

Běžně se pro ně používá zkratka IRAO: Jedná se o odpady pocházející např. z průmyslu, zemědělství, výzkumu, zdravotnictví a podobně. Spadá sem i vyhořelé jaderné palivo, které nepochází z energetického průmyslu, ale například ze školních reaktorů. Důležité je dbát na třídění odpadů již v místě vzniku, aby došlo k oddělení radioaktivních a neradioaktivních materiálů. Problematické může být jejich složení, o které v mnoha případech co do fyzikálních a chemických vlastností není příliš známo (Dlouhý, 2009.)



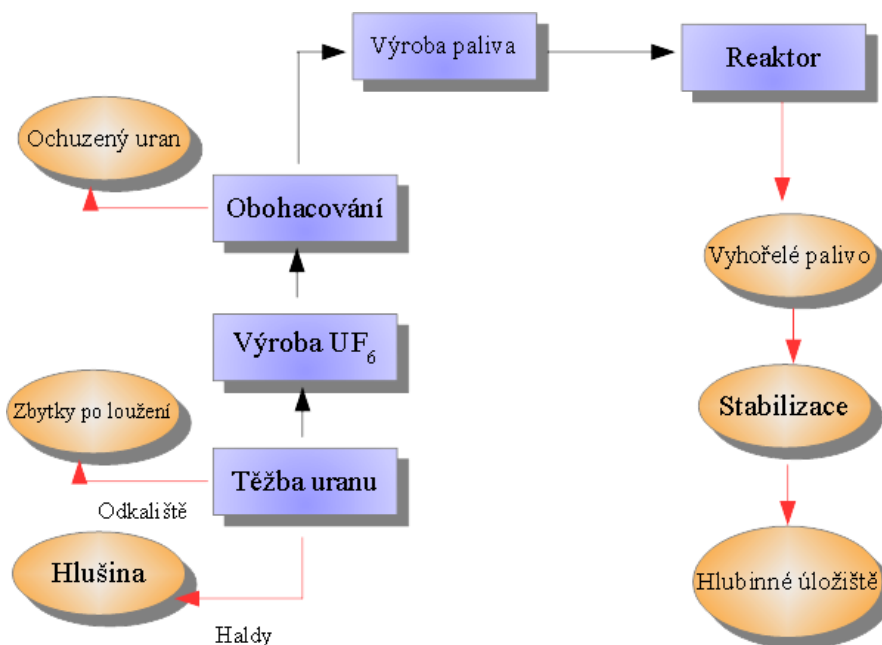
Obrázek 7 Institucionální odpady ÚJV Řež (zdroj: Podlaha 2002)

Ve většině případů se jedná o materiály s nízkými aktivitami. V současnosti je jejich produkce 100 sudů za rok. Každý ze sudů má objem 200 l.

V České republice shromažďuje a zpracovává IRAO od drobných producentů Ústav jaderného výzkumu Řež. Obrázek 7 ukazuje institucionální odpady v ÚJV Řež (Podlaha, 2003). ÚJV je největším producentem IRAO podílí se na něm přibližně 60 % a zpracovává 90 % všech IRAO. Zahrnuje kompletní systém zajištění odpadů od jeho převzetí přes přepravu až po samotné zpracování a následné uložení nebo skladování. ÚJV je vybaven i zařízeními pro charakterizaci RAO, což je výhodné vzhledem k jeho různorodosti. Vysoce aktivní odpad pochází z výzkumného reaktoru, který je provozován samotným ÚJV (Podlaha, 2003).

3.3.3 Jaderný palivový cyklus

Celý jaderný palivový cyklus provází vznik radioaktivních odpadů. Na začátku převažuje nízko aktivní v podobě odpadu z těžby uranové rudy. Na konci cyklu, který může být otevřený nebo uzavřený, jsou zastoupeny především vysoce aktivní RAO. V České republice je v současnosti otevřený palivový cyklus tzn. po vyjmutí paliva z reaktoru nedochází k jeho přepracování, ale počítá se s jeho likvidací v hlubinném úložišti. Viz obrázek

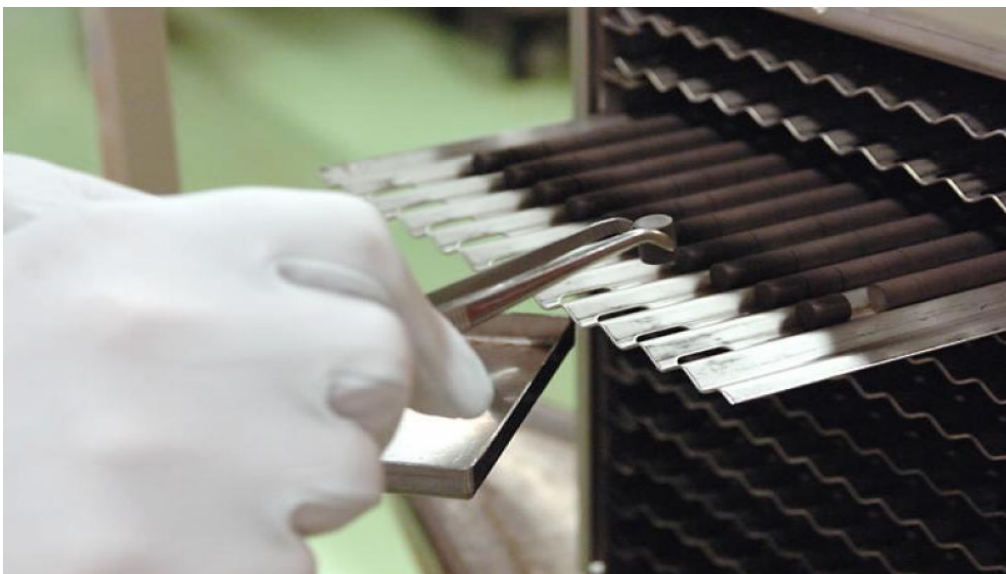


Obrázek 8 Otevřený palivový cyklus (zdroj: Hore-Lacy, 2006)

3.3.3.1 Zpracování uranových rud a výroba paliva

Pokud se v hornině vyskytuje více než 0,5 % uranu je považována za uranovou rudu. Těžba probíhá buď důlním způsobem, kdy jsou jednotlivé části horniny vyváženy na povrch. Nebo se provádí loužení, pomocí kyselých roztoků je uran rozpuštěn a čerpán na povrch. Metoda má značný negativní vliv na životní prostředí a často dochází ke kontaminaci podzemních vod (Dlouhý, 2009). V České republice probíhalo získávání uranu na několika místech. Prováděla se hlubinná i povrchová těžba a na některých lokalitách i chemické loužení s využitím H_2SO_4 jako loužicí látky a HNO_3 – oxidační činidlo. V současnosti jsou veškeré doly uzavřeny a uran není produkován komerčně, pouze jako vedlejší produkt při sanaci (DIAMO).

Po vyloužení se extrahuje uran v podobě diuranátu amonného neboli žlutého koláče. Pro energetiku je zásadní izotop ^{235}U , který je štěpitelný tepelnými neutrony. V uranové rudě jej nalezneme v zastoupení 0,7 %. Jeho poměr k neštěpitelnému ^{238}U je během výroby paliva nutné navýšit. Pro upravení poměru štěpitelného uranu se převádí na formu hexafluorid uranu, jedná se o plyn a obohacení probíhá většinou pomocí plynové odstředivky. Po obohacení vzniká ochuzený uran. UF_6 je převeden na UO_2 , následně se lisuje do pelet (viz obrázek 9) a skládá do palivových proutků, které jsou pohlávkány ocelí nebo materiálem s obsahem zirkonia. Povrchová úprava má účinně přenášet teplo. Další parametry se liší podle typu reaktoru (Hore-Lacy, 2006).



Obrázek 9 Palivové pelety (zdroj: <https://www.iaea.org/newscenter/multimedia/photoessays/training-nuclear-watchdogs-0>)

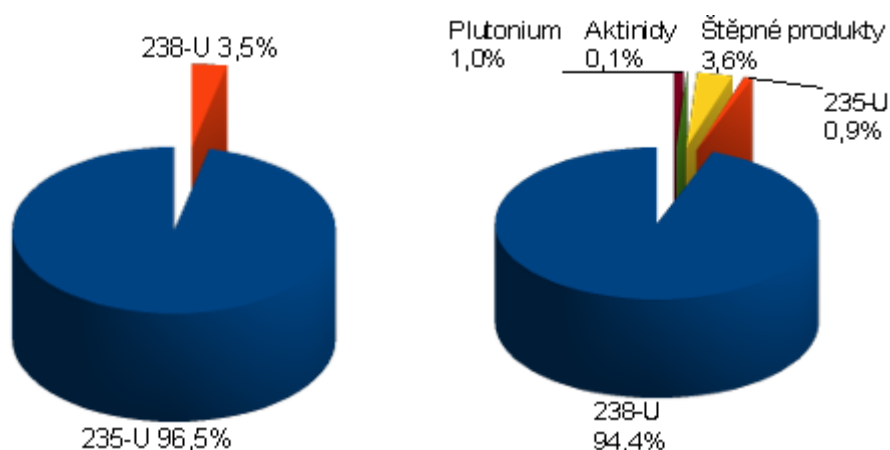
3.3.3.2 Odpady pocházející ze zpracování uranové rudy

Hlušina obsahuje přírodní velmi nízkou aktivitu radionuklidů. Následně může být použita na rekultivaci dolů po ukončení těžby. Zbytky po loužení jsou umísťovány na odkaliště, a překrývány fólií, aby nedocházelo k uvolňování plyných radionuklidů. Obsahují velké množství solí a mají kyselé pH, což je problém i důlních vod, které musí být přečerpávány a upravovány (Dlouhý, 2009).

Značné množství odpadu představuje ochuzený uran. Jeho ukládání zvyšuje ekonomickou náročnost celého palivového cyklu, proto bylo v minulosti hledáno jeho další využití. Ukázalo se, že vzhledem ke svým vlastnostem je možné jej používat k výrobě strel a obecně ve vojenském průmyslu. I když jsou jeho aktivity poměrně nízké, má vysokou toxicitu. Dnes na územích bývalých válečných konfliktů představuje vážnou hrozbu kontaminace a zdravotních rizik (Klicpera, 2002).

3.3.3.3 Vyhořelé jaderné palivo jako radioaktivní odpad

Chemické složení vyhořelého jaderného paliva (VJP) je typické pro každý reaktor. (poměr radionuklidů viz graf 3). RAO během provozu vzniká především v kapalně formě. Nejčastěji se jedná o chladivo, které je odpouštěno, dále zahrnuje i kapaliny z čistících stanic a úpraven chladicí vody a z chemických laboratoří. Odpady dosahují zpravidla nižších a středních hodnot. VRO pochází přímo z aktivní zóny a jedná se ve většině případů o samotné palivo (Dlouhý, 2009).



Graf 3 Obsah radionuklidů v jaderném palivu před vyhořením a po něm (zdroj: Caurant et al., 2009)

3.3.4 Bezpečnost nakládání s radioaktivním odpadem

IAEA zformulovala deset základních pravidel při nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem

1. Odpovědnosti za bezpečnost

Osoba nebo organizace, která obdržela licenci na provoz zařízení je odpovědná ze jeho bezpečnost. Svoje povinnosti při tom nesmí převádět na nikoho jiného. Zodpovídá za patřičné proškolení a připravenost personálu stejně jako za technický stav zařízení a provádí pravidelné bezpečnostní kontroly (IAEA, 2006).

2. Úloha státních orgánů v bezpečnostních otázkách

Stát vytváří právní normy a dohlíží na jejich dodržování. Ustanovuje nezávislý kontrolní úřad. Nese odpovědnost nejen vůči vlastnímu území, ale i ostatním státům. Je zodpovědný za dodržování mezinárodních smluv a standardů. Povinnost dozoru se nevztahuje jen na nově vznikající odpady, ale i na ty historické. Nezbytné je zajištění dostatečných finančních rezerv na výstavbu hlubinného úložiště a na vyřazování jaderných elektráren z provozu (IAEA, 2006). V České republice je zřízen ústřední orgán v oblasti jaderné bezpečnosti a radiační ochrany Státní úřad pro jadernou bezpečnost SÚJB. Ve státním rozpočtu je samostatná položka určená na chod SÚJB. V čele stojí předseda jmenovaný vládou ČR (Zpráva, 2014).

3. Vedoucí postavení managementu v oblasti bezpečnosti

Management má odpovědnost za bezpečnost při nakládání s radioaktivním materiálem. Hlavním úkolem je zpracování bezpečnostní dokumentace, stejně jako vypracování postupů v případech, kdy by mohlo dojít k ohrožení obyvatel nebo životního prostředí. Dalším bodem je vývoj úložného systému RAO. Posouzení jeho vlivu na okolí a stanovení standardů pro jeho bezpečné zpracování, převoz a uložení (Dlouhý, 2009).

4. Oprávněnost zařízení a činností

U zařízení vykazující možnost radiačního rizika musí zisky výrazně převyšovat možné nežádoucí dopady. Odpovědnost za jadernou politiku má vláda. Rozhodnutí o ozařování a podávání radiofarmak pacientům je v rukou lékařů (IAEA, 2006).

5. Optimalizace ochrany

K zajištění bezpečnosti musí být použity veškeré dostupné prostředky, tak aby riziko bylo minimalizováno a byla zajištěna dostatečná ochrana osob. Důležité je vzít v úvahu veškeré faktory jako jsou dávka ozáření, doba expozice (IAEA, 2006).

6. Omezování rizika osob

Hlavním cílem je stanovit limity pro civilní obyvatelstvo i pracovníky se zdroji ionizujícího záření, které mají zamezit zdravotní újmě. Týká se to i konečného uložení RAO, u kterého je nutné zabezpečit ochranu zdraví i pro budoucí generace. Z toho důvodu byly prováděny výzkumy a vyhodnocování vlivu radioaktivity na lidské zdraví a jako výstup jsou stanoveny roční limity přijatých dávek pro civilní obyvatelstvo a pracovníky se zářením (Ojovan and Lee, 2013).

7. Ochrana současných i budoucích generací

Současná generace by se měla s RAO vypořádat, tak aby nepřenášela riziko na tu další. Jedná se především o bezpečné a konečné uložení odpadů, a to takovým způsobem, aby nepředstavovalo zátěž pro obyvatelstvo a životní prostředí v budoucnosti nejen samotným ionizujícím zářením, ale případnými doprovodnými riziky, jako je chemické znečištění apod. (Dlouhý, 2009). Vybudování úložiště a dohled nad ním je zátěží pro mnoho generací. Je nutné vyvíjet nové technologie, aby bylo možné vypořádat se se současnou problematikou RAO. Proto se v současnosti shromažďují finance, které budou využity až v budoucnu k zajištění trvalého uložení odpadů (Ojovan and Lee, 2013). V České republice jsou vedeny dva samostatné účty pro vypořádání se s jaderným odpadem. Jedním z nich je Jaderný účet spravovaný ministerstvem financí a je určený k vybudování hlubinného úložiště. Další je pod dohledem ČEZ, a.s. jako jediného provozovatele jaderných elektráren. Jedná se o vytváření finanční rezervy na vyřazení elektráren z provozu (Zpráva, 2014).

8. Předcházení haváriím

Po černobylské havárii byla vypracována řada studií. IAEA vydala nová opatření pro zamezení dalších havárií se stejně katastrofálními dopady. Zároveň, pokud by k nějaké nehodě došlo, je kladen důraz na maximální zmírnění jejích negativních dopadů. Neméně důležité je proškolení personálu, pravidelné kontroly zařízení a provádění nedestruktivních testů (Dlouhý, 2009).

9. Havarijní připravenost a havarijní odezva

Zahrnuje personální a organizační opatření, která mají správně a včas zafungovat v případě nehody. Plány jsou vypracovány na místní, regionální i nadregionální či mezinárodní úrovni. Veškeré organizace, kde může dojít k radiačnímu ohrožení musí mít vyhotoveny havarijní plány (Dlouhý, 2009). Podstatné je stanovení řídicích pracovníků, kteří v případě nehody přebírají zodpovědnost. Klíčová je spolupráce jak mezi pracovníky, tak i mezi jednotlivými organizacemi a složkami státu (IAEA, 2006). V České republice je havarijní připravenost zajištěna pomocí krizových plánů. Jako hlavní orgán v oblasti krizových situací je zřízena bezpečnostní rada státu BRS. Radiační havárie spadají pod Výbor pro civilní nouzové plánování VCNP a Ústřední krizový štáb. Členem VCNP je i předseda SÚJB (Zpráva, 2014).

10. Ochranná opatření ke snížení existujícího nebo neřízeného rizika

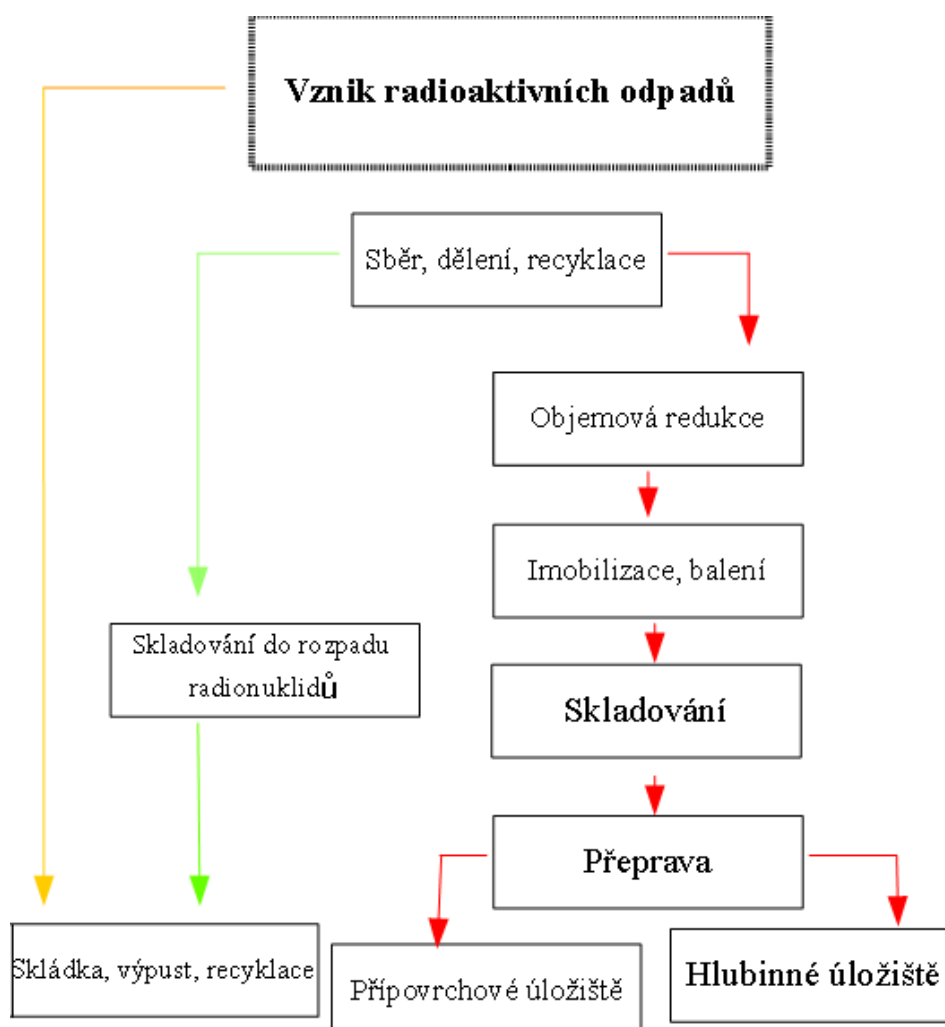
Rizika vzniklá v souvislosti s ionizujícím zářením je třeba snížit a zamezit tak ohrožení pro civilní obyvatelstvo. Patří sem například problematika spojená s radonem. Dalším možným ohniskem ozáření je těžba radioaktivních rud a staré zátěže po její těžbě. V takových případech je nutné posoudit veškeré faktory, jako je rizikovost, finanční nákladnost a dále například enviromentální vliv. Podle vyhodnocení je teprve možné podnikat potřebná opatření (IAEA, 2006).

3.3.5 Nakládání s radioaktivními odpady před jejich zpracováním

Nakládání před zpracování v sobě spojuje činnosti, které mají zmenšit objem RAO, snížit jejich aktivitu, změnit fyzikální nebo chemické složení. Zajišťují bezpečnější, ekonomičtější a snadnější manipulaci (Ojovan and Lee, 2013). Důležitým faktorem je snaha o minimalizaci odpadů u samotných zdrojů, nutno říci, že samotní producenti RAO mají zájem na co největším omezení vzniku odpadů. Důvodem jsou značné finanční náklady na zpracování a uložení. Zvláště pak pokud se jedná o vysoce aktivní kapalné odpady, které jsou hůře zpracovatelné než ty pevné. Nakládání s odpady znázorňuje obrázek 10.

Při konstrukci jaderných elektráren je lepší volit materiál s nízkým obsahem niklu a uhlíku, neutronovým tokem tak nedochází k přeměně na jejich radioaktivní izotopy, které potřebují dlouhodobé skladování a zvyšují tím celkové náklady na vyřazení jaderné elektrárny z provozu (Dlouhý, 2009).

Některé materiály lze dekontaminovat, zejména pokud se jedná o povrchovou kontaminaci radionuklidy. Vhodnou metodu je třeba vybrat podle materiálu a zároveň s ohledem na případný vznik druhotných radionuklidů (např. dekontaminační roztoky). Odstranění radionuklidů z povrchu lze docílit pomocí chemických látek buď v podobě roztoků nebo v jiné formě jako jsou gely nebo pěny. Používají se i mechanické postupy s využitím páry nebo proplachování vodou (Rahman, 2008).



Obrázek 10 Schéma nakládání s RAO (zdroj: Dlouhý, 2009)

3.3.5.1 Shromažďování radioaktivních odpadů

Způsob shromažďování RAO se liší u jednotlivých producentů, hlavně s ohledem na množství vyprodukovaných odpadů a jejich charakteru. Důležité je pečlivě oddělit radioaktivní a neradioaktivní odpady. Každé pracoviště, kde vznikají RAO má místo k jeho uložení, tak aby materiál nepředstavoval riziko ani pro člověka ani pro životní prostředí.

V provozech běžně vznikají kapalně odpady, které pochází jednak z chemických laboratoří, ale dále se jedná například o dekontaminační roztoky, zachycené odtoky ze sprch a prádelen, zbytky radiofarmak atd. Tyto kapaliny se skladují v nádržích obvykle odděleny od organických kapalin (Dlouhý, 2009).

Pevné odpady zahrnují mnoho různorodých materiálů: plast, papír, sklo, kovy nebo například filtry ze vzduchotechniky. Pro jejich uskladnění se používají ve většině případů standardní obalové soubory, což jsou sudy o objemu 200 litrů. Mrtvá těla pokusných zvířat mohou být zabalena do igelitových pytlů a zmrazena. Upřednostňuje se třídění odpadů v místě vzniku, aby během přepravy nedošlo k jejich míšení a byla minimalizována rizika pro personál (Ojovan and Lee, 2013).

Některé kapaliny pocházející především z medicínských zařízení jsou vypouštěny přímo do kanalizace, pokud splňují podmínky pro radiační ochranu, nebo jsou v některých případech shromažďovány v nádržích do doby, než jejich aktivita poklesne na uvolňovací úroveň. Je při tom zakázáno ředit kapaliny tak, aby dosáhly hodnot pro vypuštění do životního prostředí (Dlouhý, 2009).

V ÚJV Řež dochází ke shromažďování institucionálních odpadů, jak od externích producentů, tak i těch které vznikají na pracovišti ústavu. Jednotlivé RAO jsou shromažďovány v obalových souborech s vyznačenými informacemi o druhu nebo skupině odpadu. Materiály nesmí obsahovat látky výbušné, korozivní, extrémně hořlavé nebo jinak nebezpečné. Pevné odpady jsou shromažďovány buď v PE pytlích nebo ve 100 litrových sudech. Zvláště jsou umístovány lisovatelné a nelisovatelné. Rovněž jsou separovány materiály obsahující přírodní a umělé radionuklidy.

Kapalně RAO jsou přechovávány v PE lahvích o objemu 25 l. Opět se oddělují zvláště kapaliny kontaminované přírodními a umělými radionuklidy a také organické kapaliny. (Podlaha, 2003).

3.3.5.2 Třídění radioaktivních odpadů

V České republice je 140 původců radioaktivních odpadů. Největším producentem je ČEZ, a.s. jehož roční bilance je 2000 obalových souborů (SÚRAO).

Třídění je důležité pro eliminaci odpadů a jejich správnou likvidaci, případně recyklaci. Kritéria pro posuzování odpadů zahrnují jejich aktivitu, druhy radionuklidů, poločasy rozpadu, chemické a fyzikální vlastnosti (Bayliss and Langley, 2003).

V ÚJV Řeži se provádí třídění odpadů na pevné lisovatelné a nelisovatelné dále kapalné a speciální. Do pevných nelisovatelných jsou zařazeny zejména technologická zařízení a jedná se z velké části o kovový odpad. V lisovatelných je zahrnut papír, buničina, textil atd. Dále se dělí na přechodné nízkou a středně aktivní. Podle kontaminace jsou odpady tříděny na ty s přírodními radionuklidy a s umělými a to alfa, beta a gama – radionuklidy. Ohled je brán i na kontaminace a fixaci kontaminantu na povrchu, tvarové a materiálové parametry. Speciální RAO je rozdělen podle způsobu jeho dalšího zpracování a patří sem např. oleje, maziva, organická rozpouštědla... (Podlaha, 2003).

3.3.5.3 Charakterizace radioaktivních odpadů

Charakterizace je důležitá zejména pro zachování bezpečnosti celého procesu nakládání s RAO a zajištění splnění parametrů pro úložiště. Ovlivňuje i volbu dalšího zpracování a způsobu uložení včetně nároků na obaly. Ještě důležitější je provést charakterizaci u RAO z dřívějších zátěží, které nemají dostatečnou průvodní dokumentaci (IAEA, 2007). V ÚJV Řež jsou laboratoře a v případě potřeby poskytují služby v oblasti charakterizace odpadů a je možné provést široké spektrum analýz, jako jsou: měření příkonu dávkového ekvivalentu, měření povrchové kontaminace, gamaspektrometrické měření a další (Podlaha, 2003).

3.3.5.4 Recyklace radioaktivních odpadů

Jedná se o přepracování a opětovné využití materiálů. Cílem je snížit celkové množství odpadů ke konečnému uložení. Vzhledem k nebezpečí radioaktivity je jejich znovupoužití problematické. Jedna z možností je přepracování vyhořelého jaderného paliva i když tato metoda sebou nese vznik druhotných odpadů (Ojovan and Lee, 2013).

Při rozhodování o provedení recyklace se bere v potaz několik faktorů. Důležitá je ekonomická návratnost a hodnota materiálů určených k recyklaci. Porovnává se s náklady, které by bylo potřeba vynaložit na uložení RAO. Podstatné je zaměřit se na dávky, které by mohli pracovníci při recyklaci obdržet. Při zpracování by mělo být zabráněno vzniku druhotných odpadů. V mnoha případech není hlavním problémem radioaktivita, ale toxicita či karcinogenita materiálů.

Ve většině případů se recykluje ochuzený uran a kyselina fluorovodíková. V jedné tuně UO_2 je přibližně 0,9 tuny ^{235}U . Převedením na kov je možné využít jej jako stínícího materiálu. Kyselina fluorovodíková je v plynném skupenství promývána v pračce plynů.

Znovu využít je možné i chladiivo, moderátor, ionexy, ale i nádoby na uchovávání odpadů a nástroje potřebné pro údržbu. Při vyřazování jaderných elektráren z provozu vzniká velké množství nízko aktivních odpadů, jedná se především o suť, kov nebo beton tento materiál je možné využít stejně jako jiný stavební odpad například jako podloží při stavbě komunikací (Dlouhý,2009).

3.4 Zpracování radioaktivních odpadů

Jedním z prvotních cílů je snížení jejich objemu, tak aby bylo dosaženo maximální finanční úspory při pozdějším trvalém ukládání. Upravuje se jejich chemické složení a zároveň nesmí celý proces zpracování produkovat nadměrné množství druhotných odpadů a zároveň neúměrně nenavyšuje radiační riziko.

3.4.1 Zpracování podle skupenství

Skupenství má zásadní vliv na zpracování RAO a na jejich celkovou mobilitu a s tím spojené riziko úniku do životního prostředí.

3.4.1.1 Zpracování kapalných radioaktivních odpadů

Pro zpracování kapalných RAO jsou klíčové jejich vlastnosti s ohledem na solnost roztoku a dále obsah rozpuštěných i nerozpuštěných látek. Pro jednotlivé typy jsou vhodné různé způsoby zpracování. Organické kapaliny jsou často spalovány, případně se provádí jejich emulgace (Dlouhý, 2009). Cílem je získat dvě složky. První o malém objemu, ve kterém by bylo obsaženo co největší množství radioaktivity. Druhá část velkého objemu s nízkou aktivitou, ideálně tak, aby dosáhla uvolňovací úrovně (Ojovan and Lee, 2013).

3.4.1.1.1 Chemickou úpravou

Hlavní výhodou chemické úpravy jsou nízké náklady. Nedostatkem je poměrně malá účinnost, dekontaminační faktor se pohybuje mezi 10 až 100 u aktinoidů kolem 1000. Dalším problémem je i citlivost k chemickému složení (Dlouhý, 2009). Kromě úpravy pH dochází k vysrážení. Po chemické úpravě je nezbytné mechanické odstranění vzniklého kalu, ten může obsahovat většinu radionuklidů, následně je nutné jej převést do stabilní formy vhodné k uložení (Ojovan and Lee, 2013).

3.4.1.1.2 Odpařování

Metodou lze dosáhnout dobrého dekontaminačního faktoru. Při procesu se přebytečná voda odpaří a zůstanou pouze soli a radionuklidy. Problematické je použití u kapalin, které obsahují těkavé radionuklidy. Zbylý kondenzát se dále upravuje stabilizací v matrici. Dekontaminační faktor je $10^4 - 10^6$ (Ojovan and Lee, 2013). Odpařovací zařízení je na obrázku 11. Vzhledem k tomu, že proces vyžaduje teplotu až $150\text{ }^\circ\text{C}$ jsou vyšší náklady na energii a tím i větší finanční náročnost. V některých případech musí být kapalina předem upravena. Jedná se zejména o neutralizaci silných kyselin nebo vysrážení určitých složek (Rahman, 2008).



Obrázek 11 Odpařovací zařízení v ÚJV Řež
(zdroj: Podlaha 2002)

3.4.1.1.3 Sorpcí a iontovou výměnou

Pracuje na podobném principu jako domácí čističky vody. Radioaktivní kapalina je propouštěna skrz sorpční materiál a radionuklidy jsou zachycovány na povrchu (Ojovan and Lee, 2013). Při procesu se vyměňují ionty mezi sorbentem a kapalinou. Pro absorbování látky jsou využívány nerozpustné materiály často minerály. Další možnost představuje zachycení komplexů (Bajzíkova a kol., 2015). Dekontaminační faktor může dosáhnout až hodnoty 10^4 (Dlouhý, 2009).

3.4.1.1.4 Extrakcí

Tento způsob se volí v případě, že výsledný produkt má být dále využíván. V této metodě se uplatňují zpravidla organická rozpouštědla, která rozloží některé složky. Nevýhodou je vznik sekundárních odpadů. Činidla mohou podléhat destrukci vysokou radiací. Způsob je využíván například pro získání aktinidů nebo jiných vzácných složek. Dekontaminační faktor je 10^4 . (Dlouhý, 2009)

3.4.1.1.5 Mikrofiltrací, ultrafiltrací a reverzní osmózou

Všechny metody zahrnují průchod kapaliny skrz membránu. Při mikrofiltraci jsou velikosti pórů od 0,1 do několik mikrometrů a tlak 0,1 MPa. Ultrafiltrace využívá membránu s 0,01 do 1 mikrometru a tlaku 0,5 MPa. Reverzní osmóza má ještě drobnější strukturu a to 0,001 do 0,01 a tlak až 10 MPa. Membrány jsou vyráběny z organických polymerů nebo z anorganických komponent (Ojovan and Lee, 2013).

3.4.1.1.6 Plazmovým hmotnostním filtrem

Celý postup je založen na principu plazmové odstředivky, kdy jsou jednotlivé ionty oddělovány na základě jejich hmotnosti. Předpokladem je, že ionty s vyšší radioaktivitou mají i vyšší hmotnost. Lehčí a tudíž méně radioaktivní ionty jsou zadrženy a dále propuštěny pouze ty více radioaktivní. Předpokládá se, že díky této metodě bude dosaženo výrazného snížení VAO, čímž se ušetří nemalé náklady na jeho druhotné zpracování vitrifikací. Nízko a středně aktivní odpady totiž mohou být zakonzervovány i levnější metodou jako je bitumenace nebo cementace. Další velkou výhodou je, že při zpracování nevznikají sekundární odpady a celý proces není závislý na chemickém složení odpadu. Technologie je zatím však ve vývoji a bude ještě nějaký čas trvat, než se jí povede zavést do běžné praxe (Gueroult et al., 2012).

3.4.1.1.7 Zpracování organických kapalin

Organické kapaliny mají odlišné vlastnosti a můžou představovat problém při jejich zpracování. Často se jedná o různá rozpouštědla a těkavé látky, a proto jsou upravovány. Je možné provést destilaci, emulgaci nebo kapaliny nasorbovat na vhodný materiál (IAEA, 2016). Vzhledem k problematice organických radioaktivních kapalin jsou ve vývoji různé metody jejich likvidace. Jedna z nich využívá kolonie bakterií, které nejen že odstraní organický obsah, ale zároveň likvidují i obsažené radionuklidy. Metoda je zatím vyzkoušena pouze v laboratorních podmínkách a malých objemech kapalin. V praxi ještě nejsou známi možnosti využití (De Pádua et al., 2012).

3.4.1.2 Zpracování pevných odpadů

Pevné odpady lze zpracovávat mechanicky, termicky nebo chemickou úpravou. Biologicky aktivní a infekční RAO je nutné upravit buď odvodněním nebo chemickou stabilizací případně desinfekcí. U jednotlivých metod se uvádí faktor redukce objemu, který je poměrem objemu odpadu před zpracováním a po něm (Ojovan and Lee, 2013).

3.4.1.2.1 Lisování

Patří mezi mechanické procesy, jedná se o jednoduchou metodu, která není konstrukčně ani finančně příliš náročná. Nízkotlaké lisy mají sílu 10 – 50 t, faktor redukce objemu je 2-5. U vysokotlakého se pracuje s tlakem až 1500 t a faktor redukce objemu je až 100 (Ojovan and Lee, 2013). ÚJV Řež používají nízkotlaký šroubovací list. Odpad je lisován přímo ve stolitrových sudech. Následně se umísťuje do dvousetlitrových a mezera je vyplněna cementem (Podlaha, 2013).

3.4.1.2.2 Fragmentací

Další způsob mechanického zpracování. Postup je využitelný při zpracování RAO, které jsou příliš rozměrné a jejich lisování není možné z kapacitních důvodů nebo kvůli nebezpečí poškození lisu. Rovněž jsou fragmentovány velké části při odstraňování jaderných zařízení z provozu. Obrázek 12 ukazuje zařízení v ÚJV Řež (Dlouhý, 2009)



Obrázek 12 Fragmentační a dekontaminační středisko ÚJV Řež (zdroj Podlaha, 2002)

3.4.1.2.3 Spalování

Tepelný proces úpravy pevných odpadů. Při tomto procesu dochází k výrazné objemové redukci a zároveň jsou odstraněny organické části a převedeny na anorganickou formu (Dlouhý, 2009). Spalovací zařízení je nejprve přehříváno, když dosáhne teploty 800 °C je do spalovací pece dávkován odpad po dvaceti kilogramech každých pět až deset minut. Pracovní teplota je 800 – 1000 °C. Plyny které odchází jsou čištěny, aby nedocházelo k úniku oxidu siřičitého a dioxinů. Rovněž jsou sledovány úrovně radiace. Po kontrole se plyn vypouští do ovzduší (Rahman, 2008). Účinnost spalování je udávána poměrem objemu odpadu před spalováním ku objemu popela. Tento poměr je u pevného odpadu 50 – 100 a u kapalného 500 – 1000. Popel obsahuje 90 – 95 % radionuklidů, 1 – 5 % sazí a desetinu procenta kondenzátu (Ojovan and Lee, 2013). Pyrolýza pracuje s nižšími teplotami 500 – 550 °C a je vhodná pro likvidaci organických materiálů. Pyrolýzní plyn je spalován v komoře a zbylé exhaláty jsou přečišťovány (Rahman, 2008).

3.4.1.2.4 Termickým rozkladem

Tepelné zpracování odpadů, oproti předchozí metodě se jedná o velice drahou metodu, která zároveň klade velké nároky na proškolení personálu. Lze takto účinně likvidovat i organické odpady. Dochází k termickému rozkladu v roztavených solích anebo přímo v tavenině zpracovávaných materiálů. Při procesu zároveň může dojít ke stabilizování odpadu a není tak potřeba jeho další úprava. Nevhodné je využití metodu pro odpady obsahující ³H, ¹⁴C nebo radioizotopy I a Cs (Dlouhý, 2009).

3.4.1.2.5 Tavením

Kovové odpady kontaminované radionuklidy vznikají hlavně při vyřazování jaderných elektráren z provozu. Jedná se o velké množství materiálu, které je potřeba bezpečně zlikvidovat. Jedna z možností snížení jeho objemu, případně úplná dekontaminace, je tavení. Při tavení mohou veškeré radionuklidy přejít do strusky a kovový materiál je pak možné recyklovat. Nebo dojde ke stabilizaci radionuklidů uvnitř roztaveného materiálu a po vychladnutí již není potřeba upravovat odpad jiným způsobem. Ukázalo se, že po některých úpravách (zejména odfiltrování těkavých radionuklidů) je možné využít indukční tavicí pece (Zherebtsov et al., 2013).

3.4.1.2.6 Chemickou úpravou

Nepředstavuje významnou redukci objemu odpadu, používá se k úpravě chemického složení odpadu tak, aby bylo možné jej dále zpracovávat nebo stabilizovat. Často se tím

oxidují organické sloučeniny na oxid uhličitý a vodu (Ojovan and Lee, 2013). Další z možností je využití MSO (Molten Salt Oxidation) neboli oxidaci v tavenině soli. Odpady jsou umístovány do roztavených karbonátů za přítomnosti oxidačního činidla. Dochází k odstranění organických látek. Veškeré další radionuklidy zůstávají v materiálu, ale pro jejich oddělení mohou být použity běžné metody jako je iontoměnič nebo rozpouštění ve vodě. Výhodou je, že nevznikají dioxiny, které je nutné při spalovacích procesech odlučovat (Kovařík a kol, 2014).

3.4.1.2.7 Zpracování odpadů biologického původu

Provádí se u odpadů, které mohou podléhat rozkladu. Jedná se především o odpad z laboratoří jako jsou tělní tekutiny, orgány nebo laboratorní zvířata. Je možné provést rozpuštění v kyselinách. Rozkladu se zamezuje vložením do formaldehydu, nebo chlorového vápna. Poté dojde k jejich stabilizaci například betonem (Dlouhý, 2009).

3.4.1.3 Zpracování plynných odpadů

Každé jaderné zařízení musí obsahovat vzduchotechniku, která je napojena na účinné filtry. Plynný radioaktivní materiál je tak vlastně převáděn na pevný odpad. Aktivita ve vzduchu je neustále monitorována. Druhou skupinou jsou odpadní plyny z výrobních procesů nebo likvidace odpadů. V takových případech je nutné zabudovat účinnější filtry, aby mohlo dojít k vypuštění do ovzduší (Ojovan and Lee, 2013). Plynné odpady vznikající při přepracování jaderného paliva jsou plněny do tlakových lahví a skladovány po dobu rozpadu radionuklidů pod uvolňovací úroveň (Dlouhý, 2009).

3.4.2 Přepracování vyhořelého jaderného paliva

Země využívající jadernou energetiku mají několik možností, jak nakládat s vyhořelým jaderným palivem (VJP). Jednou z variant je příprava paliva ke konečnému uložení. Vzhledem k velkému množství využitelných radionuklidů, obsažených ve VJP, je možné je dále přepracovat a znovu využít jako palivo v elektrárnách. Třetí možností je dočasné uskladnění paliva, než bude rozhodnuto, jak s ním bude naloženo, případně se vyčká na nové technologie zpracování (La Tourrette et al., 2010).

3.4.2.1 Technologie PUREX

PUREX je zkratkou ze slov Plutonium Uranium Extraction. Jedná se v současnosti o nejvyužívanější metodu přepracování VJP. První závod byl otevřen ve Francii. V současnosti je ve světě v provozu několik takových zařízení. Přepracování paliva se provádí mokrou

cestou (Dlouhý, 2009). Palivové proutky jsou nejprve nastříhány a zbaveny povlakového materiálu, uvolňují se při tom těžké radionuklidy, které je nutné zachytávat. Následně se zadržují do jejich rozpadu, než je bezpečné je vypouštět do životního prostředí (Suppes, Storvick et al., 2007). Poté se palivo rozpouští v HNO_3 . Rozpuštěné palivo se míchá s tributylfosfátem v inertním rozpouštědle, které pak obsahuje většinu štěpných produktů. Teprve poté dochází k oddělení plutonia a uranu. Kapalný odpad, který vzniká při přepracování je vysoce radioaktivní (Harrison, Hester et al., 2011). Uran i plutonium mohou být použity k výrobě paliva typu MOX. Přepracování umožňuje účinnou recyklaci, je možné získat až 99,8 % uranu a plutonia. V některých zemích byla aplikována i metoda UREX, kdy je recyklován pouze uran lze tak získat téměř čistý prvek (Suppes, Storvick et al., 2007).

3.4.2.2 Technologie MOX

MOX je složené ze slov Mixed Oxid. Jedná se o palivo, které obsahuje směs oxidů plutonia a uranu v poměru 7:93. Složení je naznačeno v tabulce 1 Suroviny jsou získávány z přepracování vyhořelého jaderného paliva nebo z jaderných zbraní. Využití recyklovaného paliva snižuje množství vzniklých RAO a ušetří přibližně 30 % nového uranu (Harrison, Hester et al., 2011).

Celosvětově je zastoupen 5 % v celkovém množství paliva používaného v reaktorech. Licenci na jeho použití má v Evropě čtyřicet reaktorů a je využíváno ve třiceti. V Japonsku byla licence udělena deseti reaktorům, ale ne ve všech je palivo osazeno v reaktorech. Použito je v lehkovodních reaktorech a zastupuje 1/3 paliva. V budoucnu se počítá s vývojem reaktorů schopných pracovat jen s MOX. Experimenty již probíhají v Číně a Rusku (WNA, 2017).

Zpracovatelnost paliva je do pěti let od jeho vyvezení z reaktoru. Štěpitelné plutonium je pouze ^{239}Pu a ^{241}Pu . Při dlouhodobém skladování dochází u ^{241}Pu k rozpadu na ^{241}Am , které uvolňuje gama záření a následně sťažuje manipulaci s ním (Harrison, Hester et al., 2011)

Složení jaderného paliva %				
	Uranové palivo	Vyhořelé uranové palivo	MOX palivo	Vyhořelé palivo MOX
Štěpné produkty	0,0	3,4	0,0	4,7
Uran	100,0	95,6	93,0	90,0
Plutonium	0,0	0,9	7,0	5,0
Aktinidy	0,0	0,1	0,0	0,3

Tabulka 1 Porovnání obsahu jednotlivých složek v uranovém palivu a v palivu MOX (zdroj: Harrison)

3.4.2.3 Transmutační technologie

Ve VJP se vyskytuje velké množství radionuklidů s dlouhou dobou životnosti. Cílem transmutační technologie je přeměnit tyto složky a zkrátit tak dobu potřebnou k jejich uložení (National Research Council, 1996).

Jaderné palivo je převedeno do tekuté formy a následně ostřelováno neutrony. Ty vznikají působením urychlených protonů na olovený terčik. Výsledný produkt by měl zahrnovat krátkodobé radionuklidy. Metoda není účinná pro beta zářiče (Dlouhý, 2009). Bylo prokázáno, že technologii je možné použít. Překážkou jsou však neúměrné finanční náklady, které by na výstavbu zařízení musely být použity. Vybudování zcela nové infrastruktury pro přepravu odpadů. Zavedení systému pro odvod nadbytečného tepla, proto je stále upřednostňováno hlubinné úložiště. Možnost však zůstává otevřená pro budoucí generace (National Research Council, 1996).

3.4.3 Úprava nízko a středně aktivních radioaktivních odpadů

Před přepravou a uložením odpadů je potřeba je stabilizovat zpevněním s pomocí některých materiálů. Výběr při tom závisí hlavně na vlastnostech odpadu a volí se podle jeho chemického složení případně dalších vlastností. Důležité je zachovat dlouhodobou fyzikální a chemickou stabilitu. Nesmí být agresivní vůči ostatním materiálům v úložném systému a zároveň musí být metoda ekonomicky přijatelná.

3.4.3.1 Bitumenací

Bitumen je látka, která vzniká z uhlí nebo ropy a je součástí asfaltu a dehtu. Roztavený bitumen se míchá s kapalným nebo pevným RAO při teplotě 110 – 230 °C. Při procesu se odpaří voda a hmota je následně umístěna do obalu. Je možné tak zpracovávat kaly, iontoměniče, organický odpad a další (Rahman, 2008). Bitumen uzavírá odpad ve své struktuře není zde chemicky vázaný. Jedná se o levnou a jednoduchou metodu. Plynné látky, které vznikají při zpracování jsou odváděny ventilací. V praxi se využívají dvě metody. Jedna je pomocí šnekového extrudéru a druhá je tenkovrstvá filmová odparka (Nuclear and Radiation Studies Board, 2011).

Filmová odparka byla vyvinuta v České republice. Tento způsob je využíván v jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín. Bitumenací je možné použít u odpadů do aktivity 10 GBq/l jinak by mohlo dojít k dekompozici asfaltu. Tepelné zpracování vytváří druhotné odpady v podobě par (Dlouhý, 2009). Problémem se může stát hořlavost materiálu.

V případě, že dojde ke změně chemického složení zpracovávaného odpadu, může v některých případech nastat chemická exotermní reakce. V takové situaci se může bitumenová matrice vznítit (Sázavský a kol, 2002).

3.4.3.2 Cementací

Cement je anorganický materiál, který tvoří pevnou strukturu a uzavírá v sobě RAO. Nejčastěji se jedná o směs vápna a oxidu křemičitého, železitého a hlinitého. Složení může být upraveno v závislosti na složení odpadu. Míchání směsi je prováděno přímo v nádobě určené k uložení nebo se do nich vlévá až po promísení (Nuclear and Radiation Studies Board, 2011). V ÚJV Řež vyvinuli mobilní cementační linky, které byly využity v Jaslovských Bohunicích, Černobylu a Dukovanech (Dlouhý, 2009).

Jedná se o levnou a celosvětově používanou metodu. Problém nastává v případě porušení celistvosti betonového celku, kdy může dojít u některých radionuklidů k jejich vylouhování a uvolnění do prostředí. Jde především o vysoce alkalické radionuklidy. Je proto důležité posoudit, kromě vlivu samotného zpracovávaného materiálu i dopady okolního prostředí na využití materiály (Satoshi et al., 2012).

3.4.3.3 Polymerací

Polymerace slouží rovněž ke stabilizaci kapalných RAO je možné ji využít při zpracování iontoměničů i organických kapalin. Jednotlivé složky jsou v polymeru mechanicky stabilizovány, ale nejsou součástí její struktury. Je možné je použít u odpadů s aktivitami nepřesahující jednotky GBq/l (Dlouhý, 2009).

Byly provedeny experimenty s kombinací polymeru, cementu a kaolinitu. Je možné buď smíchat cement přímo s polymerem nebo jím povléknout celou cementovou matrici. V prvním případě došlo ke zvýšení odolnosti proti tlaku ve druhém se snížila odolnost v tlaku, ale došlo ke zvýšení odolnosti proti vylouhování (Sakr et al., 2003).

3.4.4 Úprava vysoce aktivních odpadů

3.4.4.1 Vitřifikací

Při vitřifikaci se RAO smísí s látkami vytvářejícími sklo, následně dojde k tavení při vysokých teplotách, aby došlo k vytvoření skelné taveniny. Po vychladnutí je RAO stabilizován uvnitř skla. Vitřifikace se používá hlavně pro VAO (Rahman, 2008). Nejvyužívanější jsou skla borosilikátová a fosfátová. Složení se odvíjí od konkrétních

požadavků na výsledný produkt. Při zpracování se využívají teploty do 1200°C. Skelná hmota se vyznačuje vysokou radiační odolností, chemickou stabilitou a nízkou vyluhovatelností. Jedná se o široce využívanou a v praxi ozkoušenou metodu (Ojovan and Lee, 2013). Samotné tavení se provádí ve sklářských pecích buď s elektrickým ohřevem nebo v indukčních tavicích zařízeních. Pece jsou připojeny na systémy čistící exhaláty, záchyt úletů a těkavých radionuklidů. Tavenina je ukládána do nádob z oceli (Dlouhý, 2009). Výhodou je, že vzniklá matrice se již nemusí nijak upravovat, broušením nebo lisováním jako je tomu u keramických hmot. Další nespornou předností je malá citlivost na složení. Sklo je schopno pojmout různorodé složení kapalných odpadů, aniž by došlo k ovlivnění vlastností a schopnosti vzniklého skla imobilizace (Caurant et al., 2009).

3.4.4.2 Keramickými hmotami

Keramické hmoty jsou nekovové pevné materiály s krystalickou strukturou. Právě díky svému vnitřnímu uspořádání získávají pevnost a odolnost, osvědčili se tak při stabilizaci RAO. Mezi další vlastnosti patří odolnost proti oxidaci, tepelná odolnost, elektrická nevodivost (Bohre and Awasthi, 2014).

Keramické hmoty se zpracovávají při vysoké teplotě a tlaku. Odpad se smíchá s práškem a následně probíhá slínování. Výsledný produkt se dále zpracovává broušením. Následná úprava je nedostatkem vůči skelným hmotám, které se jen vlijí do připravené formy. Pro spojení výhod keramických hmot a vitrifikace byly vytvořeny postup kombinace skla keramiky. Ve skelné matrici jsou rozptýlené krystalky keramické hmoty se zafixovanými radionuklidy (Caurant et al., 2009).

3.4.5 Ukládání radioaktivních odpadů

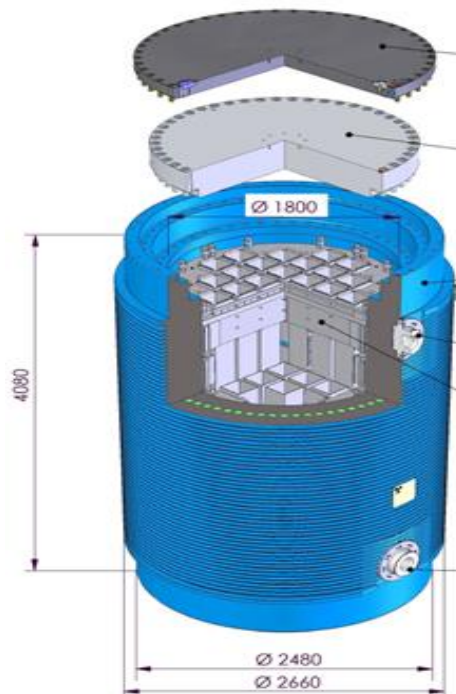
Radioaktivní odpady je potřeba izolovat, aby nedošlo k ohrožení člověka ani životního prostředí, aby bylo zamezeno riziku zneužití RAO. Odpady jsou buď likvidovány, což znamená trvalou izolaci nebo jsou skladovány mohou tedy být znovu využity a případně následně odstraněny. Trvalá úložiště mohou být přípovrchová nebo hlubinná. Středně aktivní odpady se obvykle skladují v přípovrchových úložištích, kde jsou izolovány po dobu do pěti set let. V hlubinném úložišti jsou plánována pro vysoko aktivní a odpady s dlouhými poločasy rozpadu, uložení je statisíce let (Ojovan and Lee, 2013).

3.4.5 1 Obalové soubory pro radioaktivní odpady

RAO jsou ukládány do obalových souborů, které podléhají přísným kontrolám. V České republice má dohled nad nimi SÚJB, který vydává licenci na jejich použití, a to na časově omezenou dobu, poté dochází k jejich dalšímu prověření. Uveřejňuje seznamy schválených typů obalových souborů s jejich technickými specifikacemi a toho pro jaké nakládání jsou určeny (přepravní, skladovací, úložné). Veškeré obaly musí splňovat přísná kritéria jako jsou odolnost tlaku, nárazu, teplotě až 800 °C, musí být nepropustné, schopné odvádět teplo. Důležitá je nekorozivnost a dostatečné stínění. Každý obal musí nést nezaměnitelné a neodstranitelné označení radioaktivního odpadu (Dlouhý, 2009).

3.4.5 2 Obalový soubor CASTOR

Jedná se o obalový soubor používaný v elektrárnách Dukovany a Temelín. Rozměry v milimetrech jsou naznačeny na obr. 13. Kontejnery jsou vyrobeny z litiny s obsahem grafitu a vnitřní povrchovou úpravou z niklu, aby došlo k maximálnímu zamezení koroze. Vnitřní prostor se vyplňuje heliem pro odvádění tepla. Uvnitř kontejneru je koš, do kterého se umisťují palivové proutky, aby nedošlo k jejich vzájemnému kontaktu (Dlouhý, 2009).



Obrázek 13 Obalový soubor CASTOR: (zdroj: <http://www.gns.de/language=en/29921/castor-440-84-mvk>)

3.4.5 3 Skladování radioaktivních odpadů

Způsob skladování se volí podle potřeb vyplývající z jednotlivých druhů skladovaného RAO. Zejména v závislosti na jeho skupenství a aktivitě, případně dalších nebezpečných vlastnostech např. hořlavost. Je třeba splnit požadavky na radiační bezpečnost personálu, bezpečnou manipulaci s odpady. Úložné obaly musí odpovídat předpisům. Plochy ve skladu musí být snadno dekontaminovatelné. Důležitá je volba materiálu, který by měl svou životností překračovat dobu po kterou jsou odpady skladovány. Případné úniky jsou zachycovány, tak aby nebyl možný jejich kontakt s okolím. O veškerých odpadech se vede evidence a jsou jasně a rozpoznatelně označeny (Dlouhý, 2009).

3.4.6 Skladování vyhořelého jaderného paliva

V současnosti není ve světě vybudováno žádné trvalé úložiště RAO. Nejblíže k zahájení výstavby jsou USA a Švédsko. Ve většině zemí bylo rozhodnuto o vybudování hlubinného úložiště v geologické formaci i když v některých zemích se znovu přezkoumávají alternativní způsoby. (Schweitzer et al., 2005).

VJP je po vyjmutí paliva z reaktoru se několik let skladuje v bazénku, a to buď přímo v reaktorové hale nebo mimo ni. Následně je přepraveno do meziskladu vyhořelého paliva. Při mokrému způsobu funguje voda k odstínění radioaktivity a zároveň k odvádění tepla. Při suchém skladování je odvod tepla zajištěn cirkulací vzduchu. Kontejnery pro uložení paliva umožňují dostatečné odstínění (Ojovan and Lee, 2013).

3.4.6.1 Vyhořelé jaderné palivo v České republice

V České republice jsou bazénky pro vyhořelé palivo umístěny přímo v reaktorové hale. VJP se v nich skladuje několik let, než aktivita poklesne natolik, aby byla možná bezpečná manipulace s ním. Schváleným obalem pro jejich ukládání je obalový soubor CASTOR. Skladování paliva probíhá v suchých skladech. Jedná se o haly s přirozenou cirkulací vzduchu. V ETE i EDU je doprava do skladů vyřešena jak silnicí, tak železniční vlečkou. Mezisklad v Dukovanech byl již naplněn, a proto byl vybudován nový sklad vyhořelého paliva. V prostorách elektráren bude palivo umístěno do doby, než dojde k vybudování hlubinného úložiště (Zpráva, 2014).

3.4.5 Úložiště provozovaná v České republice

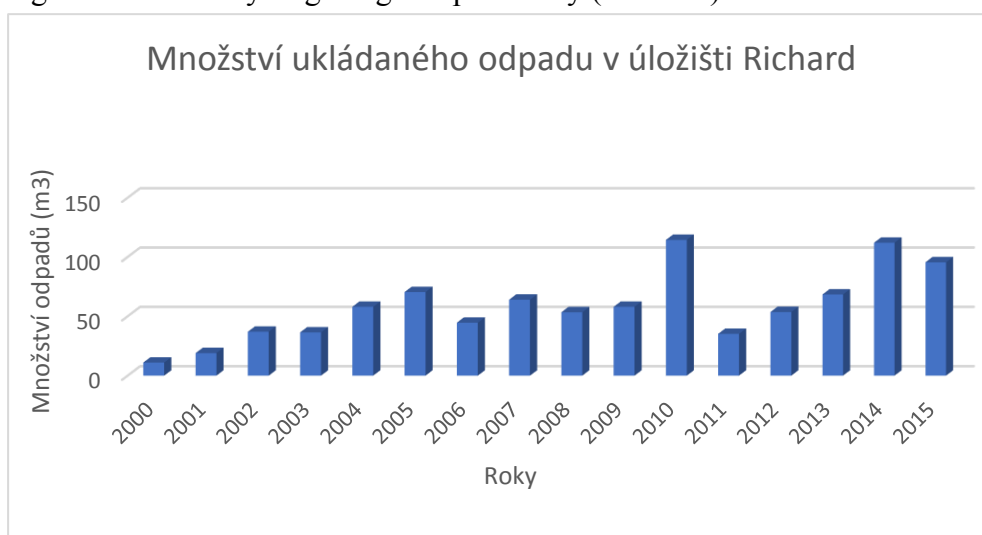
V České republice je provozováno šest reaktorů pro komerční účely, dále dva výzkumné reaktory v Řeži a jeden na fakultě jaderné fyziky ČVUT. Celkově je evidováno

kolem 140 původců RAO nicméně ne všichni původci jsou oprávněni odpady zpracovávat a následně předat ke konečnému uložení, tuto činnost za ně provádí firmy, které mají povolení.

V ČR vznikají radioaktivní odpady z VJP, které jsou zatím skladovány v jaderných elektrárnách Temelín a Dukovany. Provozní odpady z JE, jsou rovněž ukládány v prostorách elektráren. Dále se jedná o institucionální RAO, které jsou umísťovány do provozovaných přípovrchových úložišť radioaktivního odpadu (ÚRAO) nebo v prostorách ÚJV Řež (Zpráva, 2014).

3.4.6.1 Úložiště Richard

Úložiště je v provozu od roku 1964 a slouží k ukládání nízko a středně aktivních odpadů. Odpady jsou uskladněny metodou sud v sudu. Samotný radioaktivní materiál je uložen v sudu o objemu 100 l a následně umístěn do dalšího 200 l. Prostor mezi nimi je vyplněn 5 cm betonem. Sudy jsou pozinkované, natřené protikorozním materiálem a označené evidenčním číslem. Kapacita úložiště je přibližně 10 250 m³. Zatím bylo využito 70 % prostor. Celý komplex je vybudován v bývalých vápencových dolech, kolem samotných míst pro ukládání odpadů je nepropustná vrstva slínovců o mocnosti 50 m. Veškeré prostory jsou opatřeny stříkaným betonem a je zde zbudována kanalizace se soustavou jímek. Úložiště je odvětráváno a teplota je celoročně 10 °C. Vnitřní i vnější prostory jsou monitorovány, aby bylo zajištěno radiační bezpečí. Veškeré hodnoty jsou pod stanovenými normami. Zároveň se sledují i geotechnické a hydrogeologické parametry (SÚRAO).



Graf 4 Množství uloženého odpadu v úložišti Richard v jednotlivých letech (zdroj: SÚRAO)

V Úložišti jsou skladovány také odpady do doby výstavby hlubinného úložiště, jedná se většinou o radionuklidové zářiče (Zpráva, 2014). Poté co SÚRAO převzalo dohled nad

úložištěm, došlo ke kompletním bezpečnostním rozborům a byla vyhodnocena možná rizika (Dlouhý, 2009). Do roku 2000 bylo v úložišti Richard uloženo 4 790 m³ RAO, množství ukládána od roku 2000 jsou vyobrazena v grafu 4 (SÚRAO).

3.4.6.2 Úložiště Bratrství

Úložiště se nachází v bývalém uranovém dole na Jáchymovsku a v provozu je od roku 1974. Jsou zde ukládány pouze RAO obsahující v přírodě se vyskytující radionuklidy. Do roku 2000 zde bylo uloženo 603 m³ odpadu (SÚRAO). Ukládání od roku 2000 je ukázáno v grafu 5. Hlavní zastoupení zde mají materiály dříve využívané v lékařství (Dlouhý, 2009).



Graf 5 Množství uloženého odpadu v úložišti Bratrství v jednotlivých letech (zdroj: SÚRAO)

Odpady jsou skladovány rovněž metodou sud v sudu. Celkem je zde možné uložit 1 200 m³ a každoročně je přidáváno 30 obalových souborů. Prostory jsou upraveny betonem a celé úložiště je opatřeno kanalizací. Prostory jsou odvětrávány uměle, ale pouze v době, kdy jsou zde přítomni pracovníci. Ve štolách probíhá samovolné proudění v závislosti na ročním období buď ven z dolu nebo směrem do dolu. Monitorování zde neprobíhá nepřetržitě, ale operativně. Opět je sledována stabilita dolu. Kromě SÚJB zde provádí dozor i Báňský úřad (SÚRAO).

3.4.6.3 Úložiště Dukovany

Sklad slouží pro nízko a středně aktivní odpady z Dukovan a Temelína. Pevné odpady jsou tříděny a pokud je to možné lisovány a umístovány do dvousetlitrových sudů. Spalitelné odpady zpracovává spalovna ve Švédsku. Popel jako druhotný odpad je odeslán zpět do České republiky a rovněž je umístěn do sudů. Kapalné odpady jsou zahušťovány a stabilizovány

bitumenem. Úložiště je součástí areálu jaderné elektrárny a v provozu je od roku 1995, je zde možné uložit 55 000 m³. Prostory jsou tvořeny jednotlivými jímkami, každá s kapacitou pro 1 600 sudů. Po naplnění jsou meziprostory zality betonem a překryty fólií, několika drenážními a izolačními vrstvami. Nakonec je celý povrch uzavřen betonovými deskami (Zpráva, 2014). Prostory jsou neustále monitorovány, voda je sváděna do kontrolní jímky a v případě nadlimitních hodnot je zpracovávána jako druhotná odpad. Kromě ukládání sudů jsou zde umísťovány i nezpevněné odpady nebo větší části, které nejsou uloženy v obale. Úložiště by mělo také sloužit k ukládání odpadů z vyřazování JE z provozu (Dlouhý, 2009). Provoz úložiště je plánován do roku 2100, následně nastane období tří set let, po které bude muset být celý objekt sledován (Zpráva, 2014). V letech 1995 – 1999 bylo v úložišti Dukovany uloženo 1 468 m³ RAO. Ukládání v dalších letech je patrné z grafu 6 (SÚRAO).



Graf 6 Množství uloženého odpadu v úložišti Dukovany v jednotlivých letech
(zdroj: SÚRAO)

3.4.6.4 Úložiště Hostim

Jediné uzavřené ÚRAO v České republice. Bylo vybudováno v roce 1959 ve dvou štolách bývalého vápencového lomu. Prostory mají objem přibližně 1 600 m³. Uskladněny zde byly nízko a středně aktivní RAO. Provoz trval jen do roku 1964.

V letech 1991 – 1994 byl prováděn průzkum a inventarizace, při které byl odpad s vyšší aktivitou byl převezen do ÚRAO Richard. Prostor lomu byl vyplněn betonovou směsí a uzavřen. V současnosti je celý objekt zabezpečen a monitorován (SÚRAO).

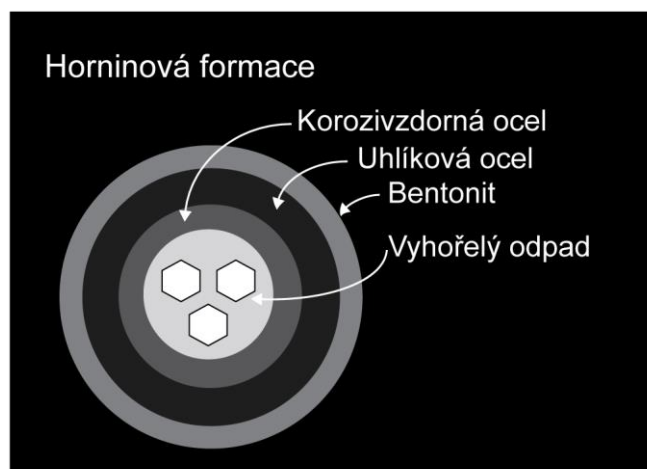
3.4.7 Hlubinné úložiště

Je důležité zajistit bezpečné uložení odpadů po tisíce let, proto se počítá s multibariérovým systémem. Samotný odpad je chráněn inženýrskou bariérou. Jedná se o systém vybudovaný lidskou činností, který by měl mít hlavně pasivní charakter. Dále se jedná o geologickou formaci, která podléhá přísnému výběru a chrání celé úložiště. Poslední vrstvou je samotná biosférická ochrana (Ojovan and Lee, 2013).

Česká republika má v energetickém průmyslu výrazné zastoupení jaderné energie, jedná se o 32 %. Při provozu jaderných elektráren a některých dalších zařízení (lékařství, výzkum) vznikají vysoce radioaktivní odpady a vyhořelé jaderné palivo. I v případě, že by v budoucnu bylo rozhodnuto o přepracování paliva, vznikne i tak určitá část vysoce radioaktivních odpadů. Počátek výstavby je plánován na rok 2050. Počítá se s kapacitou 9 000 t odpadů, přihlédnuto je při tom k množství vyprodukovaného vyhořelého paliva za dobu životnosti provozovaných reaktorů.

Nyní je palivo z reaktoru po vyjmutí vloženo do bazénku a následně překládáno do meziskladu. Plánované úložiště se bude skládat z nadzemní části ve které budou administrativní budovy a obslužná zařízení. Dále z podzemních prostor určených k uložení RAO. Předpokládaná hloubka je 500 m s ohledem na geologickou skladbu podloží. V současnosti probíhá výběr lokalit a je zřízeno i podzemní pracoviště v Bukově, kde se testují postupy a materiály pro hlubinná úložiště (SÚRAO).

Kontejnery pro ukládání paliva jsou konstruované s ohledem na dlouhou dobu uložení a celkové namáhání materiálu. Důležitá je volba materiálu, který by měl být odolný a stálý po desetitisíce let. Jako vhodné materiály připadají v úvahu měď, titan a uhlíkatá ocel, která je v



Obrázek 14 Kontejner pro trvalé uložení RAO (zdroj: Černoušek a kol, 2013)

ČR testována. Její slabinou je možné poškození vodíkem, proto se počítá s dvouplášťovou úpravou, aby se zabránilo případnému úniku vodíku z uloženého materiálu. V úvahu připadá nerezavějící ocel. Současný koncept počítá s vytvořením dvou vrstev oceli, jedné nerezavějící a druhé uhlíkaté. Celý kontejner by měl zakrýt bentonit, který je inertní a nepropustný, je schopen odvádět teplo (Černoušek a kol., 2013). Kontejner je naznačen na obrázku 14

V současné době probíhá výběr lokalit pro výstavbu hlubinného úložiště. V následujících letech budou prováděny geologické průzkumy, ze kterých vzejdou dvě lokality a po dalších výzkumech bude vybrána konečná lokalita. V té se následně vybuduje podzemní výzkumné pracoviště a až následně se začne s výstavbou. Předpokládané zahájení provozu se plánuje na rok 2065. Nejprve bylo vybráno sedm lokalit (Březový potok, Čertovka, Čihadlo, Horka, Hrádek, Kraví hora, Magdaléna), následně byly přidány další dvě v blízkosti EDU a ETE (SÚRAO).

Dlouholetým monitorování stávajících ÚRAO bylo zjištěno, že nemají negativní vliv na obyvatelstvo ani životní prostředí. Stejně tak při výstavbě hlubinného úložiště je kladen důraz na maximální bezpečnost celého zařízení. Podle některých studií spočívá největší negativní dopad v psychickém stresu, který by mohli prožívat lidé v blízkosti úložiště. Důležitá je proto dostatečná informovanost veřejnosti spojená se získáním důvěry, aby došlo k omezení současného negativního postoje (Šuranský, 2003).

4. Závěr

Jaderná energetika se stala nedílnou součástí našich životů, ale nejen ona, medicína, průmysl ani zemědělství by se neobešly bez využití radioaktivity v podobě zářičů, radiofarmak nebo jiných zdrojů ionizujícího záření. Veškeré tyto činnosti jsou zdroji radioaktivních odpadů a je nutné se s nimi vypořádat, bezpečně a trvale je zlikvidovat.

I když se objevují odmítavé postoje vůči hlubinnému úložišti, je potřeba si uvědomit nezbytnost jeho vybudování. Politika České republiky v oblasti energetiky se i nadále přiklání k jaderným elektrárnám jako k důležitému zdroji elektrické energie a do budoucna se počítá s dalším rozšířením kapacit stávajících elektráren. I přes nevýhody vzniku radioaktivních odpadů je jaderná energetika stabilním zdrojem energie. Na malé ploše je možné získat mnohonásobně více energie než ze stejné plochy využitě pro solární panely. Navíc přísun energie je stabilní a není potřeba řešit nežádoucí výkyvy. Oproti elektrárnám na fosilní paliva neprodukuje exhaláty, což bylo ověřeno mnoha studiemi. Stejně tak bylo prokázáno, že do prostředí neuvolňuje nepřijatelné množství radionuklidů, výpusti podléhají kontrole. Samotní občané se o tom mohou přesvědčit pomocí měřících stanic.

V České republice přistupují zainteresované instituce k otázkám bezpečnosti velice zodpovědně. V práci jsou uvedeny zdroje, kde je možné se přesvědčit o aktuálním stavu jaderných elektráren i radiační situaci na celém území. Mnohdy není problém v nedostatku informací, ale v tom, že běžný občan ani neví, že má k informacím přístup. Což bylo i jedním z bodů práce, nejen vysvětlit samotné technické zabezpečení, ale ukázat průhlednost celého systému a vysoké zabezpečení celé problematiky v podobě institucí, kontrolních orgánů spolu s finančním zajištěním. V práci jsem se pokusila shrnout základní postupy při nakládání s radioaktivními odpady. Kromě technologií zpracování a ukládání odpadů jsou uvedeny i bezpečnostní standardy pro zacházení s radioaktivními odpady i s příklady aplikace v České republice. Je potřeba si uvědomit, že bezpečnost odpadů nelze eliminovat jen technickým zabezpečením, ale zároveň je potřeba stanovit pevná pravidla daná zákonem. Neméně důležité je poté stanovení nezávislých institucí a kontrolních orgánů a budovat důvěru občanů v tyto organizace. Hlavní snahou práce bylo podat dostupné informace tak, aby mohly být zdrojem k racionálnímu posouzení rizik spojených s radioaktivními odpady, protože v následujících letech nebude nejtěžším úkolem vypracovat technologie pro vybudování úložiště, ale změnit zamítavý postoj občanů a představitelů obcí k celé problematice.

5 Seznam literatury

Bajžíková, A., Smrček, S., Kozempel, J., Bárta, J. 2015. Příprava porézních materiálů pro záchyt radionuklidů. *Bezpečnost jaderné energie*. 23(11/12), 355-358.

Bayliss, C., Langley, K. 2003. Nuclear decommissioning, waste management, and environmental site remediation. Elsevier Science & Technology. Amsterdam. p. 351. ISBN 978-008-0537-788

Bohre, A., Awasthi, K. 2014. Immobilization of radioactive waste in ceramic based hosts. Diplomica Verlag. Hamburg. p 213. ISBN 978-395-4896-691

Caurant, D., Loiseau, P. P., Aubin, V., Chevaldonnet, Gourie, D., Majerus, O., Bardez, I. 2009. Glasses, glass-ceramics and ceramics for immobilization of highly radioactive nuclear wastes. Nova Science Publishers. New York p. 373. ISBN 978-161-2096-988

Clark, C. 1997. Radium girls, women and industrial health reform: 1910-1935. Chapel Hill, University of North Carolina Press. NC. p. 289. ISBN 08-078-4640-6

Černoušek, T., Kovařík, P., Votava, P., Dobrev, D. 2013. Studium korozních procesů pro hlubinné úložiště v České republice. *Bezpečnost jaderné energie*. 21(7/8), 245-249.

De Pádua, F., Vicente, R., Kazumi, S., Dutra, F., Patricia, Di Vitta, B., Tirollo TADDEI, Maria Helena M. H., Bellini, J., Marumo, J. T. 2012. Treatment of radioactive liquid organic waste using bacteria community. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. [online] 2012, 292(2), 811-817. [cit. 2018-04-03].

Dlouhý, Z. 2009. Nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem. VUTIUM. Brno. s. 220. ISBN 978-80-214-3629-9.

Eisenbud, M., Gesell, F. G. 1997. Environmental radioactivity: from natural, industrial, and military sources. 4th ed. Academic Press. San Diego. p. 683. ISBN 978-0-12 - 235154- 9.

Evropská komise. 2016. PDF online. Zpráva komise evropskému parlamentu a radě o potravinách a složkách potravin ošetřovaných ionizujícím zářením za rok 2015. Brusel.

Frybort, J., 2014. Comparison of the radiological hazard of thorium and uranium spent fuels from VVER-1000 reactor. Radiation Physics and Chemistry[online]. 104, 408-413 [cit. 2018-03-11].

Hála, J. 1998. Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie. Konvoj. Brno. s. 312. ISBN 80-856-15-6-8.

Harrison, R.M., Hester, R. E. (eds.). 2011. Issues in Environmental Science and Technology: Nuclear Power and the Environment. 32 nd Cambridge: Royal Society of Chemistry. Cambridge. p. 247. ISBN 978-184-9732-888

Hejhal, Martin, 2015. Analýza vytváření rezerv na budoucí vyřazování jaderných elektráren z provozu. Bezpečnost jaderné energie. 23(5/6), 174-179.

Helicon Publishing. 2004. The Hutchinson pocket dictionary of physics. Helicon Publishing. Abingdon. p. 142. ISBN 9781859865132.

Hore-Lacy, I. 2006. Nuclear Energy in the 21st Century. World Nuclear University Press. London. p. 169. ISBN 978-008-0497-532.

Choppin, G. R., Liljenzin, J., Rydberg, J., Ekberg, Ch. 2013. Radiochemistry and nuclear chemistry. 4th. Elsevier Science & Technology. Oxford. p. 867. ISBN 978-0-12-405897-2.

IAEA, 2016. Specific Safety Guide.: Predisposal Management of Radioactive Waste from Nuclear Power Plants and Research Reactors. IAEA. Vienna. p. 104. ISBN 9789201098153.

IAEA, 2007. Strategy and methodology for radioactive waste characterization. IAEA. Vienna. p. 180. ISBN 92-010-0207-6.

IAEA, 2006. Safety fundamentals: Guide: Fundamental safety principles. IAEA. Vienna: p. 37. ISBN 92-0110706-4.

IAEA, 2009. General Safety Guide : Classification of radioactive waste. IAEA. Vienna. p. 48 ISBN 978-92 -0-109209-0.

Kelsey, Ch. A., Heintz, H. P., Chambers, G.D, Sandoval, D. J., Adolphi, N. L., Kimberly, S. P. 2013. Radiobiology of Medical Imaging. Hoboken: John Wiley & Sons, Incorporated. New Jersey. p. 327. ISBN 9781118517130.

Klicpera, J. 2002. Radioaktivní odpady, problém politický sborník semináře České nukleární společnosti : 1.listopadu 2002: Jak je to s uranem, bombami a životním prostředím.[CD-ROM]

Kovařík, P., Navratil, J. D., John, J. 2014. Scientific and Engineering Literature Mini Review of Molten Salt Oxidation for Radioactive Waste Treatment and Organic Compound Gasification as well as Spent Salt Treatment. Science and Technology of Nuclear Installations. 2015, 1-10.

L'annunziata, M. F. ed., 2012. Handbook of radioactivity analysis. 3rd ed. Elsevier. Oxford. p. 1419. ISBN 978-0-12-384873-4.

Massiot, P. Jimonet, Ch. (eds.). 2009. European Radiation Protection Course: Basics. EDP sciences. France. p. 233. ISBN 978-2-7598-0703-1.

National Research Council, 1996. Nuclear wastes: technologies for separations and transmutation. National Academy Press. Washington, DC. p. 589. ISBN 978-030-9052-269.

Nuclear and Radiation Studies Board a National Research Council of the National Academies, 2011. Waste forms technology and performance final report. National Academies Press. Washington, D.C. p. 308. ISBN 978-030-9187-343.

Ojovan, M.I., Lee, W. E. 2013. An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation. 2nd ed. Burlington: Elsevier Science & Technology. Oxford. p. 377. ISBN 978-008-0993-935.

Pant, G.S. 2008. Basic Physics and Radiation Safety in Nuclear Medicine. Himalaya Pub. House. New Delhi. p.653. ISBN 978-935-0441-107.

Podlaha, J. 2003. Nakládání s institucionálními radioaktivními odpady v Ústavu jaderného výzkumu Řež a.s. Bezpečnost jaderné energie. 11(11/12), 380-387.

Podlaha, J. 2002. Radioaktivní odpady, problém politický sborník semináře České nukleární společnosti : 1.listopadu 2002: Nakládání s institucionálními radioaktivními odpady v ÚJV Řež a.s. [CD-ROM]

Powsner, R. A., Palmer M. R., Powsner E. R. 2013. Essentials of nuclear medicine physics and instrumentation. 3rd ed.. John Wiley & Sons, Ltd. West Sussex. p. 246. ISBN 978-111-84-3-559.

Rahman, A. 2008. Decommissioning and radioactive waste management. Whittles Publishing. Dunbeath. p. 462. ISBN: 9781904445975.

Rao, B.M. 2010. Radioactive Materials. 2nd ed. Himalaya Pub. House. New Delhi. p. 291. ISBN 978-93--0432-853.

Sakr, K., Sayed, M. S., Hafez, M. B. 2003. Immobilization of radioactive waste in mixture of cement, clay and polymer. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. (256), 179-184.

Sázavský, P., Selucký, P., Otcovský, T., Vild J., Hrubý, J. 2002. Bitumenace kapalných RAO a předprovozní kontroly pro zajištění její bezpečnosti. Bezpečnost jaderné energie. 10(7/8), 245-251.

Schweitzer, G. E., Chelsea, A., Sharber, 2005. An international spent nuclear fuel storage facility: exploring a Russian site as a prototype : proceedings of an international workshop. National Academies Press. Washington, D.C. p. 302. ISBN 978-030-9096-881.

Suppes, G. J., Storvick, T. S. (eds.). 2007. Sustainable nuclear power. Elsevier. Burlington. p. 416. ISBN: 9780080466453.

Šuranský, F., Duda, V. 2003. Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v ČR. Bezpečnost jaderné energie. 11(11/12), 375 - 377.

Tayal, D.C. 2009. Nuclear physics. Rev. ed. Mumbai: Himalaya Pub. House. New Delhi. p. 790. ISBN 978-818-31-9-910.

La Tourette, T., Light, T., Knopman, D., Bartiis, J.T.2010. Managing spent nuclear fuel strategy alternatives and policy implications., RAND. Santa Monica. p. 99. ISBN 978-083-3051-158.

Národní zpráva: pro účely Společné úmluvy o bezpečnosti při nakládání s vyhořelým palivem a o bezpečnosti při nakládání s radioaktivními odpady. [online]. 2014. [cit. 2018-04-03]. Česká republika. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/NZ_VP_RAO_4_0.pdf>

Zákon č. 263/2016 Sb. ze dne 14. 6. 2016 Atomový zákon. In.: Sbírka zákonů České republiky. 10. 8. 2016, Částka 102. s. 3938 – 4060. Dostupné z: <<https://www.sujb.cz/legislativa/nove-atomove-pravo/>>

Zherebtsov, A., Pastushkov, V., Poluektov, P., Smelova, T., Shadrin, A. 2013. The Use of Induction Melting for the Treatment of Metal Radioactive Waste – 13088. Waste Management Conference: International collaboration and continuous improvement. [online]. [cit. 2018-03-23]. Dostupné z: <<https://scholar.google.com>>

Zpráva Ruské federace, 2014. Radioactive waste management and decommissioning in the Russian federation. [online]. [cit. 2018-02-10]. Dostupné z: <<https://www.oecd-nea.org/>>

Internetové zdroje:

DIAMO. Spravované lokality. [online]. [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: <<https://www.diamo.cz/cs/spravovane-lokality#/all/all/0>>

IAEA. Sterile insect technique [online]. 2016. [cit. 2018-03-11]. Dostupné z:

<https://www.iaea.org/topics/sterile-insect-technique>

SÚRAO. ÚRAO Dukovany. 2014. PDF online. [cit. 2018-02-02]. Dostupné z: <<https://www.surao.cz/brozury>>

SÚRAO. ÚRAO Richard.2014. PDF online. [cit. 2018-02-02]. Dostupné z: <<https://www.surao.cz/brozury>>

SÚRAO. ÚRAO Bratrství. 2015. PDF online. [cit. 2018-02-02]. Dostupné z: <<https://www.surao.cz/brozury>>

SÚRAO. Hlubinné úložiště.2016. PDF online. [cit. 2018-02-02]. Dostupné z: <<https://www.surao.cz/brozury>>

WNA. Mixed Oxide (MOX) Fuel. [online]. September 2017. World Nuclear Association [cit. 2018-03-23]. Dostupné z: <<http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuelmox.aspx>>

6 Seznam zkratek

BRS – Bezpečnostní rada státu

EDU- Jaderná elektrárna Dukovany

ETE-Jaderná elektrárna Temelín

EW – Exempt waste

FAO - Food and Agriculture Organization

HLW – High level waste

IAEA - International Atomic Energy Agency

ILW – Intermediate level waste

IRAO – Institucionální radioaktivní odpad

JE – Jaderná elektrárna

LLW – low level waste

NAO – Nízko aktivní radioaktivní odpad

[SÚJB – Státní úřad pro jadernou bezpečnost](#)

SÚRAO – Správa úložišť radioaktivního odpadu

SÚRO – Státní ústav radiační ochrany

SAO – Středně aktivní radioaktivní odpad

VAO – Vysoce aktivní radioaktivní odpad

VCNP – Výbor pro nouzové plánování

VJP – Vyhořelé jaderné palivo

VLLW – Very low level waste

VSLW- Very short live waste

RMS – Radiační monitorovací síť

RAO – Radioaktivní odpad

ZIZ – Zdroj ionizujícího záření

Seznam grafů

Graf 1 Podíl dávek z jednotlivých zdrojů pro obyvatele ČR.....	9
Graf 2 Ozařování potravin v EU.....	11
Graf 3 Obsah radionuklidů v jaderném palivu před vyhořením a po něm	24
Graf 4 Množství uloženého odpadu v úložišti Richard v jednotlivých letech.....	43
Graf 5 Množství uloženého odpadu v úložišti Bratrství v jednotlivých letech	44
Graf 6 Množství uloženého odpadu v úložišti Dukovany v jednotlivých letech.....	45

Seznam obrázků

Obrázek 1 Izotopy vodíku.....	4
Obrázek 2 Pronikavost jednotlivých druhů záření.....	10
Obrázek 3 Nestochastické účinky záření	13
Obrázek 4 Stochastické účinky	14
Obrázek 5 Černobylská zakázaná zóna	16
Obrázek 6 Rozdělení radioaktivních odpadů	19
Obrázek 7 Institucionální odpady ÚJV Řež	21
Obrázek 8 Otevřený palivový cyklus.....	22
Obrázek 9 Palivové pelety	23
Obrázek 10 Schéma nakládání s RAO	28
Obrázek 11 Odpařovací zařízení v ÚJV Řež	32
Obrázek 12 Fragmentační a dekontaminační středisko ÚJV Řež.....	34
Obrázek 13 Obalový soubor CASTOR	41
Obrázek 14 Kontejner pro trvalé uložení RAO	46

Seznam tabulek

Tabulka 1 Porovnání obsahu jednotlivých složek v uranovém palivu a v palivu MOX	37
---	----