

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

MOŽNOSTI UKLÁDÁNÍ RADIOAKTIVNÍHO ODPADU

OPTIONS FOR RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Andrea Veličková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radomír

Chýlek

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Studentka: **Andrea Veličková**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Radomír Chýlek**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Možnosti ukládání radioaktivního odpadu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tato práce se zaměřuje na analýzu a popis současné problematiky spojené s úpravou, skladováním a ukládáním radioaktivního odpadu. Zejména se bude věnovat zkoumání různých konceptů hlubinných úložišť v celosvětovém kontextu, variant konstrukce těchto úložišť a technik solidifikace jaderného odpadu.

Tato rešeršní práce bude popisovat řešení pro dlouhodobé a bezpečné ukládání radioaktivního odpadu a efektivní metody pro jeho stabilizaci. V rámci této práce budou analyzovány a zhodnoceny různé přístupy k tomuto komplexnímu problému, s důrazem na globální perspektivu.

Cíle bakalářské práce:

Popis a rozdělení radioaktivního odpadu a metod pro jeho přepracování, zpracování, skladování a ukládání.

Podrobnější popis možností ukládání radioaktivního odpadu a metod pro jeho trvalé ukládání.

Porovnání jednotlivých metod pro ukládání odpadu.

Seznam doporučené literatury:

LEE, William E.; OJOVAN, Michael I. a JANTZEN, Carol M. Radioactive waste management and contaminated site clean-up: Processes, technologies and international experience. Woodhead Publishing, 2013. ISBN 978-0-85709-744-6.

POSPÍŠKOVÁ I., KRAJŇÁK M., VOZÁR M. (2022): Rešeršní studie pro umapování přístupu k ukládání vysokoaktivních odpadů a ostatních odpadů obsahujících dlouhodobé radionuklidy – MS SURAO TZ 610/2022, Praha.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zaměřuje na analýzu problematiky radioaktivních odpadů, jejich klasifikaci a metod pro jejich zpracování, skladování a uložení. Práce popisuje možnosti ukládání radioaktivních odpadů a metody pro jejich bezpečné uložení. Odpady jsou rozděleny podle skupenství, doby izolace, aktivity a původu, což určuje vhodné metody předúpravy, zpracování, úpravy, skladování, přepravy a uložení. Krátkodobé odpady mohou být vráceny do životního prostředí, zatímco dlouhodobé radionuklidy vyžadují hlubinná úložiště v solných, jílových nebo žulových horninách. Méně nebezpečné odpady bývají ukládány do povrchových nebo přípovrchových úložišť. Porovnání jednotlivých možností ukládání ukazuje, že povrchová úložiště jsou ekonomičtější, ale méně bezpečná než hlubinná úložiště, která zajišťují dlouhodobou izolaci. Přeprocessing vyhořelého paliva, používané pokročilými státy, vyžaduje specializovaná zařízení a přináší rizika. Bezpečné nakládání s radioaktivním odpadem je klíčové pro mírové využívání jaderné energie. Pokračující výzkum, inovace a globální spolupráce jsou nezbytné pro udržitelnou budoucnost.

Klíčová slova

radioaktivní odpad, jaderný palivový cyklus, úložiště radioaktivních odpadů, hlubinné úložiště, vyhořelé jaderné palivo

ABSTRACT

This work focuses on the analysis of the problem of radioactive waste, its classification and methods for its treatment, storage, and disposal. The work describes options of disposal of radioactive waste and methods for its safe disposal. Waste can be classified by its physical state, half-life, radioactivity level and origin, which determines the appropriate methods for pretreatment, treatment, conditioning, storage, transport, and disposal. Short-lived wastes can be returned to the environment, while long-lived radionuclides must be disposed of in deep geological repositories in salt rock, clay, or granite geological formations. Less dangerous wastes are usually disposed of in surface or near-surface repositories. A comparison of individual disposal options shows that the surface repositories are more economical but less secure than deep geological repositories, which provide long-term isolation. Reprocessing of the spent nuclear fuel, used by advanced nations, requires specialized facility and carries risks. The safe management of the radioactive waste is the key to the peaceful use of nuclear energy. Continued research, innovation and global collaboration are essential for a sustainable future.

Key words

radioactive waste, nuclear fuel cycle, radioactive waste repository, deep geological repository, spent nuclear fuel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VELIČKOVÁ, Andrea. Možnosti ukládání radioaktivního odpadu. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/158181>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Radomír Chýlek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Možnosti ukládání radioaktivního odpadu** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Andrea Veličková

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu této práce Ing. Radomíru Chýlkovi, PhD. za jeho neustálou ochotu a odborné rady v průběhu psaní celé této práce. Dále bych také chtěla poděkovat své rodině, za její podporu, a mému příteli, za jeho zkušené rady.

OBSAH

ÚVOD	11
1 Popis, rozdělení a metody pro přepracování, zpracování, skladování a ukládání radioaktivního odpadu.....	12
1.1 Radioaktivita a záření.....	12
1.2 Rozdělení odpadů.....	12
1.2.1 Podle skupenství	12
1.2.2 Podle doby, po kterou je musíme izolovat.....	13
1.2.3 Podle aktivity	13
1.2.4 Podle místa vzniku.....	14
1.2.5 Dělení radioaktivních odpadů v České republice	14
1.3 Procesy před uložením odpadu	15
1.3.1 Předúprava	15
1.3.2 Zpracování	15
1.3.3 Úprava.....	18
1.3.4 Skladování.....	20
1.3.5 Přeprava	20
1.4 Ukládání.....	21
1.4.1 Povrchová a přípovrchová úložiště.....	22
1.4.2 Hlubinné úložiště	25
2 Jaderný palivový cyklus.....	29
2.1 Přední část palivového cyklu	29
2.2 Střední část palivového cyklu.....	32
2.3 Zadní část palivového cyklu	32
2.3.1 Přepracování.....	33
2.3.2 Uložení.....	34
3 Způsoby rozdělení a hlubinné ukládání radioaktivních odpadů pro jednotlivé státy	35
3.1 Belgie	35
3.2 Čína	35
3.3 Finsko.....	35
3.4 Francie.....	36
3.5 Japonsko.....	37
3.6 Jihoafrická republika.....	38
3.7 Kanada	38
3.8 Maďarsko	38
3.9 Německo	39
3.10 Nizozemsko.....	39
3.11 Rusko	39
3.12 Slovensko.....	41
3.13 Spojené státy americké.....	41
3.14 Švédsko	42
3.15 Švýcarsko	42
3.16 Velká Británie	44
DISKUSE.....	45

ZÁVĚR.....	46
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	47
SEZNAM POUŽITÝCH JEDNOTEK.....	51
SEZNAM OBRÁZKŮ	52
SEZNAM TABULEK	53

ÚVOD

Abychom mohli pokračovat v mírovém používání jaderné energie, musíme někam uložit odpady, které vznikají při jaderném palivovém cyklu. U některých radioaktivních odpadů je poločas tak krátký, že je možné je po určité době vypustit zpět do životního prostředí. Jiné radionuklidy mají tak dlouhý poločas přeměny, že je musíme izolovat od životního prostředí po několik desítek milionů let. Řešením jsou úložiště, kterých existuje několik typů, do kterých se odpady dělí podle toho, jaké záření emitují a jak aktivní odpad je.

Předtím než je odpad uložen však musí projít několika procesy, které zajistí, že zůstane stabilní. Těmito procesy jsou: předúprava, zpracování, úprava, skladování a přeprava. Ve chvíli, kdy je odpad přepravován do úložiště, je odpad v pevném skupenství, má menší objem a je v obalovém souboru, ve kterém bude uložen nebo vložen do přebalu. Stav, ve kterém je odpad při uložení a jeho obalový soubor tvoří část tzv. multibariérového systému, který má v úložištích zajistit, že i při selhání jedné bariéry, budou další izolovat odpad, aby se nedostal do životního prostředí.

Jak se radioaktivní odpad dělí? A čím si radioaktivní odpad musí projít předtím, než může být uložen? Kam ho můžeme uložit? Toto jsou hlavní otázky, kterými se v této bakalářské práci budeme zabývat. Postupně rozebereme, na co se odpady dělí a co se s jednotlivými kategoriemi děje, kam mohou být uloženy a jaký přístup volí jednotlivé státy. Zmíníme také jaderný palivový cyklus, který je hlavním zdrojem radioaktivních odpadů.

Cílem této bakalářské práce je popsat rozdělení radioaktivního odpadu a metod pro jeho přepracování, zpracování, skladování a ukládání. Předpokládáme, že metody nakládání s radioaktivním odpadem budou ve světě podobné, zvláště v Evropské unii, kde bude snaha o sjednocení přístupu k problému, který radioaktivní odpad představuje. Zaostalejší národy se zřejmě budou snažit učit z procesů a pokroků vyspělejších národů a případně neopakovat jejich chyby.

1 Popis, rozdělení a metody pro přepracování, zpracování, skladování a ukládání radioaktivního odpadu

Radioaktivní odpad je podle § 3 odst. 2 písm. a) zákona č. 263/2016 Sb., atomový zákon – ve znění platném k 01. 01. 2024, definován jako: „*věc, která je radioaktivní látkou nebo předmětem nebo zařízením ji obsahujícím nebo ji kontaminovaným, pro kterou se nepředpokládá další využití a která nesplňuje podmínky stanovené zákonem č. 263/2016 Sb. pro uvolňování radioaktivní látky z pracoviště.*“ [1]

Radioaktivní odpad má vyšší koncentrace nebo aktivitu než předepsané meze a nemáme pro něj žádné další využití. Nebezpečí, které z něj plyne, záleží na koncentraci a povaze radionuklidů, přičemž ty, které emitují vyšší energetické záření nebo jsou více toxické pro život jsou ty nejnebezpečnější. [2]

1.1 Radioaktivita a záření

Radiotoxicita udává nebezpečí, které pro nás radioaktivní objekt představuje. Když se nestabilní prvky rozpadají, vydávají záření, které může poškodit živé buňky. Existují čtyři typy záření [2, 3]:

Alfa – alfa částice jsou velmi ionizující a když přijdou do kontaktu s atomy v živé tkáni, způsobují mutace, rakovinu a chemické reakce, které jsou pro tělo neobvyklé. Zastaví je však list papíru i kůže, takže největší riziko představují při pozření nebo vdechnutí. Jedná se o nejméně nebezpečnou formu záření a využíváme ji například v detektorech kouře.

Beta – radiace, kterou tvoří elektrony o velké energii a rychlosti. Je nebezpečná, jelikož ji nezastaví kůže a může proniknout do těla a ozářit buňky i přesto, že je méně ionizující než záření alfa. Zastaví je tenká vrstva hliníku a v průmyslu je používáme k měření tloušťky.

Gama – jedná se o elektromagnetické vlny o malé vlnové délce a vysoké frekvenci, které nejsou hmotné a nemají náboj. Vycházejí z jádra při rozkladu atomu snažícího se být stabilnější. Z typů záření mají gama paprsky největší průnikovou sílu a zastaví je až několik centimetrů olova nebo několik metrů betonu. Používáme je pro jejich schopnost zabíjet živé buňky při sterilizaci nebo ke zneškodnění rakovinných buněk.

Neutronové – jedná se o neutrony, které jsou vyzářeny z jádra při štěpné reakci. Lze je rozlišit na pomalé (také označováno jako tepelné, mají energii od 10 eV až do 20 MeV) a rychlé (neutrony s vyšší energií). Mimo štěpení atomů v reaktorech vzniká neutronové záření i při spontánním rozpadu, v radioizotopových a foto-neutronových zdrojích.

Tyto druhy záření se dají rozdělit do dvou skupin: záření nabitých částic (alfa a beta) a neutrální záření (gama a neutronové). [3]

1.2 Rozdělení odpadů

Existuje mnoho různých způsobů, jak dělit radioaktivní odpady. Obecně jsme schopni je dělit podle: skupenství; doby, po kterou je musíme izolovat; aktivity a místa vzniku. [4]

Odpady můžeme také dělit na kontrolované a nekontrolované. Nekomtrolované odpady vznikají při situacích, kdy nedošlo k dostatečnému zabezpečení a došlo k radioaktivnímu úniku do okolí. Například se jednalo o uložení do nevhodných nádob nebo uložení do otevřené nádrže, kde pak vnější vlivy způsobily změnu složení odpadu. Mezi katastrofálnější případy spadají havárie v Černobylu a Fukušimě. Všechny nekontrolované odpady poukazují na to, co musíme lépe zabezpečit a pomáhají nám předcházet dalším podobným událostem. [2]

1.2.1 Podle skupenství

Skupenství nám udává, jaký způsob úpravy a zpracování bude použit. [2]

Pevné – jedině odpady pevného skupenství můžeme uložit do úložiště bez dodatečných procesů. Obecně se dá říct, že čím vyšší aktivitu odpad má, tím více procesy musí projít, tedy velmi nízkoaktivní odpady nemusí mít speciální opatření předtím, než jsou uloženy

a vysokoaktivní odpady musí mít speciální nádobu, která zaručí bezpečnost po dobu danou pro tento typ odpadu. Pevné odpady dále dělíme podle aktivity. [2]

Kapalně – aby se mohly uložit, musí se napřed zafixovat do matrice. Ta zajistí, že odpady budou v pevné formě a během doby, kdy budou uloženy, nebude hrozit únik kapaliny z nádoby, ve které budou uloženy. [2]

Plynně – odpady nemají definovaný objem, velmi špatně by se nám ukládaly, proto plyny z hlídaných prostor a plyny vzniklé při úpravě a zpracování jiných typů odpadů (například při spalování), filtrujeme a filtry považujeme za finální produkt, který putuje do úložiště. [2]

1.2.2 Podle doby, po kterou je musíme izolovat

Hlavní rozhodující parametr u tohoto rozdělení je poločas rozpadu cesia-137, který je udáván jako 30,17 let. [2]

Krátkodobé – mají poločas rozpadu kratší než cesium-137 a stačí je uložit do kontrolovaného skladu po dobu, kdy jsou aktivní a po přeměně na stabilní prvky s nimi můžeme nakládat jako s neradioaktivním odpadem. [2]

Dlouhodobé – poločas rozpadu je delší než 30,17 let a může dosahovat i několika miliard let. Podle aktivity se rozhodne, jestli budou uloženy na povrchu nebo v hlubinných úložištích. [2]

1.2.3 Podle aktivity

Mezinárodní agentura pro atomovou energii (dále jen MAAE) udává obecné rozdělení pro členské státy, teprve jednotlivé státy si specifikují kritéria jednotlivých kategorií. Rozdělení podle MAAE [5]:

Odpad osvobozený od další radiační kontroly – splňuje podmínky pro osvobození od další radiační kontroly, jelikož úroveň aktivity odpovídá normální úrovni aktivity prostředí. Odpad nesmí překročit předpokládanou dávku na osobu 10 $\mu\text{Sv/r}$ a musí platit, že ve vzdálenosti jednoho metru od zdroje je dávka menší než 1 $\mu\text{Sv/h}$.

Přechodně aktivní odpady – poté co jsou na několik let uloženy v tzv. vymíracích komorách, v České republice na dobu pěti let, je jejich aktivita podobná nebo stejná jako aktivita okolního prostředí a odpad dále považujeme za neaktivní, nakládáme s ním jako s komunálním odpadem [4].

Velmi nízkoaktivní odpady – nesplňují kritéria osvobozeného odpadu, ale nepotřebují vysokou úroveň izolace a můžou být uloženy v přípovrchovém nebo povrchovém úložišti. Odpady tohoto typu obsahují jen málo vysoceaktivních a dlouhodobých radionuklidů.

Nízkoaktivní odpady – mají jen limitované množství dlouhodobých nuklidů. Tento typ musí být uložen i několik set let, proto musí mít schránku, která zajistí, že po tuto dobu bude izolován a nekontaminuje své okolí. Může být uložen v povrchových i přípovrchových úložištích.

Středněaktivní odpady – jejich obsah dlouhodobých radionuklidů je příliš velký na to, aby mohly být uloženy v úložišti přípovrchovém nebo na povrchu, zvláště kvůli alfa zářičům. Musí být uloženy v řádu desítek až stovek metrů pod povrchem. Mnoha státy byla přijata průměrná intenzita záření 400 Bq/g s maximem pro jednotlivé soubory 4000 Bq/g. Pro dlouhodobé beta a gama zářiče může být povolená hranice až několik desítek kBq/g, ale velmi záleží na typu úložiště. [2]

Vysokoaktivní odpady – obsahují tolik dlouhodobých nuklidů, že mají nezanedbatelnou generaci tepla (na rozdíl od středněaktivních odpadů, kde ke generaci tepla dochází pouze v zanedbatelném měřítku), při ukládání musíme zvolit prostředí, které nebude ovlivněno změnou teploty nebo bude ovlivněno v náš prospěch. Jediná současná možnost uložení je ve stabilním souvrství minimálně několik set metrů pod povrchem.

1.2.4 Podle místa vzniku

Radioaktivita se používá v mnoha odvětvích, obecně je dělíme na:

Institucionální – do této kategorie řadíme vše, co nesouvisí s mírovým používáním jaderné energie. Náleží sem odpady, které vzniknou v průmyslu, zdravotnictví, výzkumu a zemědělství. Je důležité před uložením zjistit, jestli obsahují radionuklidy přírodní nebo umělé. [4]

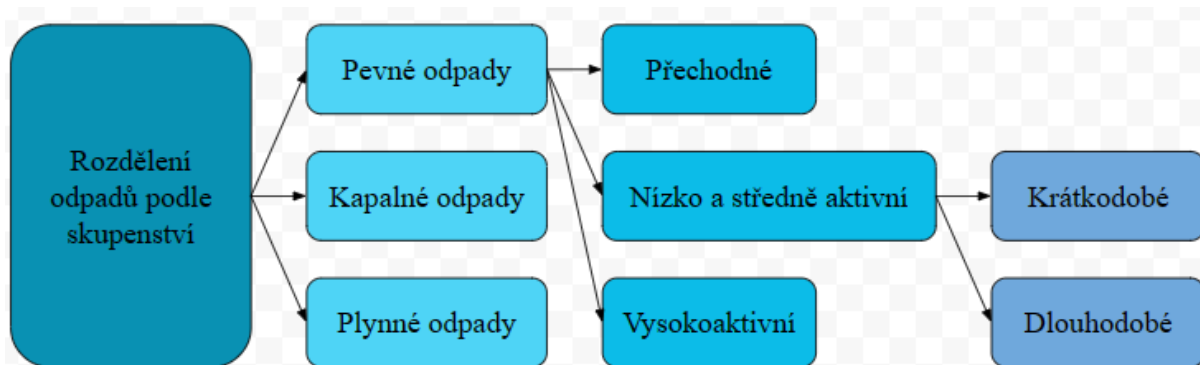
Provozní odpady z jaderných elektráren – zahrnuje všechny odpady, které jaderná elektrárna vygeneruje za dobu svého fungování. Jedná se o největšího producenta radioaktivních odpadů z hlediska objemu i rozmanitosti vlastností. [2]

Vyhořelé jaderné palivo – poté, co se palivové kazety vysunou z reaktoru a uloží se do bazénu vedle reaktoru, dokud se neschladí, je na ně pohlíženo dvěma způsoby. První způsob je, že se jedná o cenný materiál, který je stále plný štěpitelných atomů. V druhém případě se pro nás jedná o nebezpečný vysokoaktivní odpad s nezanedbatelnou generací tepla, který musí být uložen dostatečně hluboko, aby neohrozil budoucí generace. [2]

1.2.5 Dělení radioaktivních odpadů v České republice

Radioaktivní odpad se nejprve rozlišuje podle skupenství, to odpovídá rozdělení v podkapitole 1.2.1. Následně se pevné odpady klasifikují do tří základních kategorií: přechodné (po dlouhodobém skladování – maximálně 5 let – vykazují úroveň nižší, než úroveň potřebná k uvolnění), nízko a středně aktivní (vše, co nespadá pod přechodné nebo vysokoaktivní odpady) a vysokoaktivní (při skladování a ukládání je zohledněno uvolňování tepla). Nízko a středně aktivní odpady jsou dále rozděleny na krátkodobé a dlouhodobé (rozdělení odpovídající podkapitole 1.2.2). Pro krátkodobé je omezena hmotnostní aktivita dlouhodobých alfa zářičů (pro jednotlivé obalové soubory maximálně 4000 kBq/kg a střední hodnotě 400 kBq/kg pro celkový objem odpadů vyprodukovaných v kalendářním roce). Na obr. 1 lze vidět toto rozdělení. [6]

Abychom mohli odpady vypustit do životního prostředí, musí mít hodnoty nižší než uvolňovací úroveň. § 91 odst. 2 vyhlášky č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně – znění platné od 01. 12. 2012 definuje: „Pro pevné nerozpustné látky nebo látky s nízkou vyluhovatelností, u kterých lze předpokládat, že v rozpadových řadách jsou dlouhodobé radionuklidy přibližně v rovnováze, je uvolňovací úroveň pro uvolňování přírodních radionuklidů do životního prostředí z pracovišť, kde může dojít k významnému zvýšení ozáření z přírodních zdrojů, stanovených v § 87 písm. e), hodnota indexu hmotnostní aktivity rovna 2.“ [7] pro ostatní typy látek nám § 91 odst. 3 vyhlášky č. 307/2002 Sb. o radiační ochraně – znění platné od 01. 12. 2012 definuje: „V případě ostatních typů látek, zejména látek rozpustných, u kterých je v rozpadových řadách radioaktivní rovnováha dlouhodobých radionuklidů výrazně narušena, jsou uvolňovací úroveň pro uvolňování přírodních radionuklidů do životního prostředí z pracovišť, kde může dojít k významnému zvýšení ozáření z přírodních zdrojů, stanovených v § 87 písm. e), stanoveny takto:“ [7]. Tyto zákony nám říkají, že při uvolňování pevných látek není v žádném kilogramu látek překročena hodnota součtu podílů průměrných hmotnostních aktivit rovna 2, při vypouštění odpadních vod do povrchových vod není překročena pro žádný litr celková objemová aktivita alfa větší než 0,5 Bq/l ani celková objemová aktivita beta větší než 1 Bq/l (po odečtení příspěvku ^{40}K), při vypouštění odpadních vod do kanalizace pro potřebu veřejnosti není překročena pro žádný litr celková objemová aktivita alfa větší než 50 Bq/l ani celková objemová aktivita beta větší než 100 Bq/l (po odečtení příspěvku ^{40}K) a při ukládání na skládky musí být odpad uložen takovým způsobem, aby ve vzdálenosti jednoho metru od povrchu skládky nevyšel příkon fotonového dávkového ekvivalentu o více než 0,2 mSv/h a aby celkový příkon fotonového dávkového ekvivalentu nebyl vyšší než 0,4 mSv/h. [7]



Obr. 1 – Rozdělení radioaktivních odpadů v ČR, [6] vlastní zpracování

1.3 Procesy před uložením odpadu

Procesy, kterými si odpad projde před uložením se liší stát od státu, ale základ, ze kterého vychází je pro všechny země stejný: musíme vědět o jaký odpad se jedná. Do procesů před uložením spadá: vyřazování z provozu (*decommissioning*), předúprava (*pre-treatment*), zpracování (*treatment*), úprava (*conditioning*), imobilizace (*immobilisation*), skladování (*storage*) a přeprava (*transport*). Zároveň máme také danou hierarchii, která ukazuje, jaké nakládání s odpadem preferujeme a které bereme jako poslední možnost: hledání způsobů minimalizace odpadu (první možnost); opakované používání nebo recyklace; zpracování odpadu; balení; skladování a jako poslední možnost transport a uložení. [2]

Minimalizace odpadu – jedná se o proces, kdy se snažíme snížit jak množství objemu, tak i jeho aktivitu. Aplikujeme ji ve všech fázích zpracování jaderné energie a spadá pod ni snižování generace odpadu, recyklace, opětovné používání a zpracování. Největší množství je nízkoaktivních odpadů a je vytvářeno při produkci jaderné energie. To jsme byli schopni mezi roky 1990 a 2010 snížit desetinásobně, a to hlavně díky vývoji v jaderné energetice a zavádění metod pro minimalizaci a recyklaci odpadu. V roce 2013 to bylo 100 m^3 ročně za každý 1 GW energie. [2]

Recyklace – znamená využívání odpadů na výrobu nových produktů. U radioaktivních odpadů jsme limitováni, jelikož získat radionuklidy z odpadů je mnohem náročnější a pokud se rozhodneme je z materiálu získat, bývá to jejich koncentrováním do menšího objemu, který také bývá nebezpečnější, proto k recyklaci u radioaktivních odpadů moc často nedochází a bývají rovnou upravovány. Jeden z příkladů recyklace, která se provádí u radioaktivních odpadů je přepracování použitého jaderného paliva. Celosvětově se přepracuje jen minimum paliva, a to jen ve státech jako jsou Francie a Velká Británie, i když státy s velkým množstvím jaderných elektráren jako je Rusko a Čína plánují navýšit své kapacity na přepracování použitého jaderného paliva. [2]

1.3.1 Předúprava

V některých případech se přidává tento krok, aby se modifikovala forma odpadu a byla vhodnější pro další zpracování. Typicky se jedná o změnu chemických vlastností (neutralizace pH, eliminace organických částí v odpadu atd.) kapalných odpadů. Dále se také za předúpravu považuje sběr, segregace (nebo také třídění), dekontaminace, chemická úprava a fragmentace (například stříhání a drcení). [2, 8]

1.3.2 Zpracování

Jedná se o první ze dvou hlavních kroků přetváření radioaktivního odpadu na formu vhodnou k uložení. Hlavní funkcí zpracování je změnit vlastnosti odpadu nebo zmenšit jeho objem tak, aby byl produkt vhodný k úpravě. V některých případech nemusí být jasné, jestli se jedná o

zpracování nebo úpravu, jelikož zákony udávající zabezpečení radioaktivního odpadu se liší národ od národa. [2]

Hlavní rozhodující parametr pro výběr metody zpracování je koncentrace aktivity a skupenství odpadu. V jaderných elektrárnách se vytvářejí hlavně dva typy odpadu: kapalné a pevné (do pevných řadíme i filtry, které zachycují plynné odpady). Oba typy odpadu bývají zpracovány v komplexu elektrárny. Do kapalného odpadu patří kaly, sedimenty, iontové měniče na bázi pryskyřice a další odpady s vysokým podílem vody. [2]

Kapalné odpady – při zpracování kapalných odpadů existují dva přístupy. První je ředění a rozptylování nízkoaktivních odpadních vod a poté, co splní normy jsou vypuštěny zpět do přírody. Druhý je solidifikace a uložení, aby byl odpad izolován od biosféry. Druhý způsob bývá aplikován na vysokoaktivní, středněaktivní a nízkoaktivní kapalné odpady. V zásadě jsou dvě metody, jak naložit s kapalným odpadem: difuze a skladování. [9]

Zpracování se většinou zaměřuje na radioaktivní kovy, které mohou být odstraněny chemickou reakcí, zároveň za pomoci technologií jako je flokulace, absorpce a obohacování prostřednictvím rostlinných mikroorganismů může také odstranit radioaktivní částice ve vodě. [9]

Odpady s krátkodobými beta a gama zářiči jsou skladovány, dokud nejsou na takové úrovni, že mohou být vypuštěny do vnějšího prostředí. [10]

Metody také můžeme roztřídit podle toho, jak ovlivňují chemický charakter a na jakém principu fungují, takto nám vzniknou tři skupiny: separace – za pomoci různých sil jsou od sebe odděleny jednotlivé znečišťující látky bez pozměnění chemického charakteru; konverze – chemickými nebo biochemickými procesy je pozměněn chemický charakter látky; ředění – neoddelí polutanty ani nezmění chemický charakter látky, pouze mícháním a ředěním koncentrátů jsou rozředěny natolik, že již nejsou nebezpečné. [9]

Při výběru metody zpracování musíme zhodnotit několik parametrů: obsah a vlastnosti látek v kapalině, přípustná úroveň pro vypuštění do přírody, existující metody a jejich náklady, možnosti úpravy po zpracování, a skladování a uložení upravených koncentrátů. Máme tři hlavní technologické postupy. [11, 12]

Iontová výměna – může být použita pro odpady s vyšší úrovní aktivity nebo s dlouhodobými nuklidy. Jde o proces, kdy mezi roztokem (odpadem) a pevnou maticí dochází k výměně iontů. Jakmile je matrice naplněna, je s ní nakládáno jako s radioaktivním odpadem. Případy, na které metodu můžeme použít se liší podle toho, jakou matici použijeme. [11]

Chemické srážení – tato metoda není citlivá k roztokům s vysokým obsahem soli, může mít negativní efekt, když je použita pro kapalinu s obsahem olejů, čistících prostředků a komplexotvorných látek. Může být použita spolu s vypařováním, ultrafiltrací. Používá se pro nízkoaktivní a středněaktivní odpady a využívá nerozpustitelné pevné materiály k odstranění radionuklidů, materiál většinou vzniká na místě chemickou reakcí. Většinou se využívá hydroxidů kovů při neutrálních nebo zásaditých podmínkách. Obvykle sestává ze čtyř fází: přidání činidla, flokulace, sedimentace, separace pevné a kapalné části. [11]

Odpařování – pomocí této metody se dosahuje největšího snížení objemu a největší dekontaminace. Vodní část kapaliny je odpařena a zbylá část je ve formě soli v pevném skupenství. Tato metoda je natolik účinná, že v některých případech může být po tomto kroku vypuštěna do přírody. Například na našich jaderných elektrárnách je tato voda dále odplyňována, čímž se odstraní potenciale radioaktivní vzácné plyny, čpavek a další rozpuštěné plyny. [10, 12, 13]

Metody jako ultrafiltrace/reverzní osmóza jsou používány zeměmi s malým atomovým programem nebo s atomovým programem ve vývinu, existují také další metody jako je například extrakce, mikrofiltrace, oddělování pevných částic, extrakce rozpouštědlem, adsorpce, absorpce, membránová separace, elektrolýza a jiné. [9, 10, 11]

Organické kapalné odpady – v případě organického původu kapalina vystává na povrch mnoho problémů, musíme při výběru metody zpracování zhodnotit rizika jako jsou náchylnost k radiolýze a biodegradaci, hořlavost, těkavost, toxicita a biohazard. Cílem zpracování je převést kapalinu do pevného skupenství, zmenšení objemu a dekontaminace pro případ dalšího využití. Mezi metody zpracování patří spalování (dosahuje se velkého zmenšení objemu, eliminuje riziko infekce), emulgace (jelikož u organických kapalin bývá problém s cementací, používá se emulgace), absorpce (promíchání se savým materiálem), odpařování a mokrá oxidace (metoda, při které se rozkládají organické látky na oxid uhličitý a vodu při teplotách znatelně nižších, než by požadovalo spalování). [2, 10]

Plynné odpady – na rozdíl od kapalných a pevných odpadů nemají plyny definovaný objem a jejich rozšíření v prostoru je velice rychlé. Důležité pro zachycení je dobrý ventilační systém s důkladnou filtrací na výstupu. Nejčastěji jsou používány HEPA filtry, pro zachycení těkavých látek se používají sorpční rohože s aktivním uhlím. Například v našich jaderných elektrárnách se používají jodové filtry s náplní ze skelné vaty, zeolitové filtry a aktivní uhlí. Po zpracování plynného odpadu vznikne sekundární kapalný nebo pevný odpad. [2, 13]

Pevné odpady – hlavním údělem zpracování nízko a středně aktivního odpadu je zmenšit jeho objem, jelikož tyto odpady obsahují široké spektrum materiálů, je třeba kombinovat techniky zpracování. Obvykle odpady dělíme do čtyř kategorií: spalitelné, nespalitelné, lisovatelné a nelisovatelné. Nejčastěji se používá nízkotlaké lisování (zmenší objem, ale nedojde k změně vlastností odpadu). Ze zkušeností s radioaktivním odpadem vyplývá, že 50 až 80 % pevných odpadů lze považovat za spalitelné (díky spalování jsme schopni snížit objem, ale i homogenizovat výsledný odpad). [2, 12]

Lisování – používá se tlaku 0,2 až 80 MPa. Máme možnosti vakuového lisování (je vhodné pro nízkoaktivní odpady a pro odpady z nemocnic, dochází alespoň ke dvojnásobnému zmenšení), nízkotlaké lisování (používá se ke snadnému vlisování odpadu do 200l sudů, dochází až k pětinasobnému zmenšení objemu), vysokotlaké lisování (občas také nazývané superlisování, zde dochází až k desetinásobnému zmenšení), vysokotlaký lis lze vidět na obr. 2 a lisování sudů (sudy, které obsahují lisovatelný materiál jsou lisovány). [11, 14]



Obr. 2 – Vysokotlaký lis používaný na Slovensku, převzato z [15]

Spalování – hlavním cílem spalování je způsobit kompletní spálení organických částí na anorganickou hmotu. Spalovna musí zajistit, aby neunikly žádné plyny a páry, toho je obvykle docíleno tlakem nižším, než je ve vnějším prostředí. [11]

Biologický/zdravotnický odpad – obvykle představuje další nebezpečí, proto je potřeba s ním zacházet se speciální opatrností. [11]

Spalování – preferovaná metoda pro zpracování biologického odpadu, jedná se o jedinou plně vyvinutou metodu. [11]

Macerace/pulverizace – pokud nemůžeme použít spalování, nebo je odpadu tak malé množství, že se spalování nevyplatí. Tato metoda změní pevné odpady na kapalné, na které se dále použijí metody pro zpracování kapalného radioaktivního odpadu. [11]

Chemické metody – máme dvě různé metody: mumifikaci (pevné odpady jsou vloženy do igelitových sáčků, ty jsou zmrazeny, nebo je doporučeno přidat do sáčku piliny, které absorbují unikající kapaliny; také je možnost přidat formaldehyd, který zabrání rozkladu, po mumifikaci je produkt uložen do sudů a zalit cementovou maltou; tato metoda není doporučena) a rozpouštění (pokud neexistuje jiná volba, je zvolena tato metoda; používá se koncentrovaná kyselina k rozpouštění pevného odpadu). [11]

1.3.3 Úprava

Úprava je druhý hlavní krok přetváření odpadu na formu vhodnou k uložení. Důvod tohoto procesu je zapouzdřit odpad do matrice nebo do obalu, který má dostatečně dobré vlastnosti na to, aby splňoval funkci bariéry, která izoluje odpad od vnějšího prostředí. Existuje mnoho možností matrice, do které může být odpad zakomponován, zvláště pro kapalné a mokré odpady, proto musíme volit dle vlastností a druhu odpadu. Produkt, který nám vzejde z úpravy odpadu je stabilní, nerozpustný a zamezuje rozptylu radionuklidů do okolního prostředí. [2, 11, 16]

Proces úpravy sestává z výběru vhodné matrice (bitumen, cement, polymer a borosilikátové sklo), která zaručí stabilitu radioaktivního odpadu po dostatečnou dobu; imobilizaci odpadu smícháním s matricí; balení imobilizovaného odpadu. Proces imobilizace spadá pod úpravu. [16]

Cementace – metoda, která je používána k imobilizaci mnohých toxických a nebezpečných látek i mimo jadernou energetiku. Používají se anorganické materiály, které ztvrdnou reakcí s vodou – cement. Pro nízko a středně aktivní odpady se jedná o levnou metodu imobilizace radionuklidů, která se dá použít jak pro pevné, tak pro kapalné odpady. [2, 11]

Jedna z možností míchání odpadu s cementem je míchání přímo v nádobě, ve které má být odpad uložen. Složky jsou míchány, dokud nevznikne homogenní směs a poté se čeká, než se usadí. Po zalití čerstvým cementem (k minimalizaci dutin a zabránění kontaminaci okolí) je sud uzavřen. Míchadlo bývá buď zanecháno uvnitř nebo je znovu použito. [11]

Jako jedna z dřívějších metod pro míchání kapalného odpadu bylo míchání v sudu, kdy bylo ponecháno dostatek volného místa na to, aby došlo k promíchání složek během toho, co se sud otáčel kolem osy symetrie. Tato metoda již není používána. [11]

Na podobném principu funguje i další metoda, kdy se do sudu vloží dodatečné závaží, které napomáhá promíchání, a celý sud je otáčen přes stranu s víkem do úplného promíchání. Metoda poskytuje lepší promíchání než otáčení kolem osy symetrie sudu. [11]

Poslední metoda míchá látky před tím, než jsou uloženy do nádoby, ve které bude odpad uložen. Složky jsou podávány do míchačky odděleně: cement šnekovým podavačem a odpad objemovým čerpadlem. Směs je poté přelita přímo do nádoby k uložení, jejíž úroveň naplnění je kontrolována, nádoba je uzavřena, dekontaminována a poslána ke skladování. [11]

Bitumenace – jedná se o ověřenou metodu imobilizace. Používá se jak dávkově, tak i v nepřetržitém chodu (ten je preferován, kvůli vyšší výkonnosti). Odpady jsou vloženy do roztaveného bitumenu a zapouzdřeny, jakmile bitumen vychladne. Zadržovací schopnost bitumenu je lepší než ta cementu. [2, 11]

Polymerace – do určité míry byly používány jako imobilizační metoda pro radioaktivní odpady, hlavně pro iontové měniče na bázi pryskyřice. Ve většině případů musí být odpad napřed vysušen, než jsou použity polymery, jako imobilizační matrice. [11]

Vitrifikace – tato technika je zajímavá objemem finálního produktu, který je velmi malý, jeho odolností a širokou škálou radionuklidů, na které ji lze použít. Velká chemická odolnost skla zajišťuje, že zůstává stabilní po dlouhou dobu i v korozivním prostředí. U radioaktivního

odpadu se nejčastěji používají borosilikátová nebo fosfátová skla. Odpady jsou vloženy do roztaveného skla, které je poté vlito do ocelových nádob, které jsou po vychladnutí uzavřeny. [2, 16]

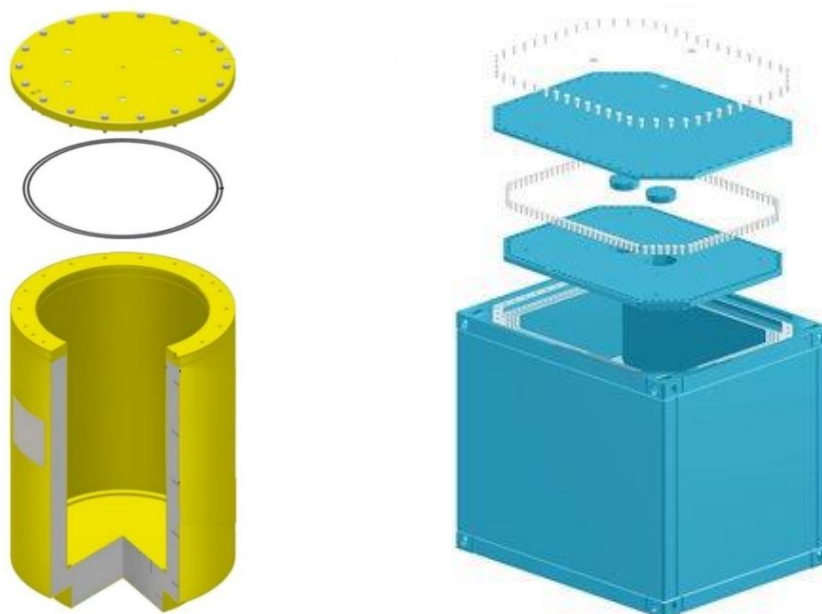
Dále jsou metody úpravy, které používají jako matrici kompozity nebo „synroc“ (v překladu syntetický kámen). Některé metody se liší podle druhu odpadu, stejně jako u zpracování, existují jiné metody úpravy pro biologické odpady, organické odpady a další vybrané kategorie, na které se nedají aplikovat standardní postupy. [11, 16]

Obalové soubory – pro kapaliny a mokrý odpad se obvykle používají 200l sudy z uhlíkové oceli. Hlavní účel nádoby je poskytnout integritu během přepravy, skladování a uložení. Obal musí poskytnout minimálně dvě na sobě nezávislé bariéry, mělo by být snadné s ním manipulovat (neměl by být příliš těžký nebo velký), měl by být nepropustný a voděodolný, měl by být dostatečně pevný, aby jich mohlo být skladováno více na sobě. [11]

Ve Velké Británii se zkoumají možnosti MPC (*Multi Purpose Container*, v překladu víceúčelový kontejner), který by byl vhodný jak pro skladování a transport, tak i pro uložení použitého jaderného paliva i méně aktivních odpadů. V Evropě se také velmi často používají *Yellow Box* (žlutá krabice, na obr. 3a), které poskytují dobré odstínění a dají se transportovat. Dále existuje obalový soubor MOSAIK (na obr. 3b), který je určen pro uložení ionexů, kalů a koncentrátů, UBA (na obr. 4a) a SBbox (na obr. 4b). [2, 17]



Obr. 3 – a) *Yellow box* (vlevo), b) *MOSAIC* (vpravo), převzato z [18]



Obr. 4 – a) *UBA* (vlevo), b) *SBbox* (vpravo), převzato a upraveno z [18]

Pokud použité jaderné palivo není přepracováno a je rozhodnuto, že vyhořelé jaderné palivo bude uloženo, musí být zapouzdřeno. Samotné palivo je ve formě tablet, které jsou stabilně uloženy v palivových proutcích, které jsou v palivové kazetě. Palivové kazety jsou vloženy do kovového kontejneru. Více se o nakládání s vyhořelým jaderným palivem zmíníme v kapitole 2.3. [16]

1.3.4 Skladování

Pro skladování radioaktivního odpadu existuje několik důvodů: u krátkodobých radionuklidů se čeká na vymřetí, aby mohly být uvolněny do životního prostředí; nahromadění dostatečného množství odpadu k převozu nebo uložení; snížení množství generovaného tepla u vysokoaktivních odpadů; dlouhodobé skladování v zemích, kde neexistuje vhodné úložiště. Skladování, na rozdíl od ukládání, by mělo umožňovat vyzvednutí odpadu ze skladiště pro další účely. [19]

Skladiště radioaktivního odpadu by mělo být v řídké osídlené oblasti, která poskytuje dostatečné krytí a je daleko od dalších skladišť nebezpečného materiálu a která je dobře dostupná pro transportní vozy. Musí být odstíněno, mít dobrý ventilační systém, v rozumné míře protipožární ochranu a ochranu proti vniknutí neoprávněných osob. Čím větší je skladiště, tím více opatření musí mít, například kontrolu teploty, kontrolu radiace v okolí a jiné. [19]

Dlouhodobé skladování nastává v případě, že je odpad skladován po delší dobu, než bylo předpokládáno a na něž byly navrženy kontejnery. Pro tento případ je důležité zvážit další parametry, jako nápisy a popisy, které budou čitelné po několika generacích, údržba systémů a bariér, lepší zabezpečení skladiště. [19]

Použité jaderné palivo právě vytažené z reaktoru se skladuje v bazénu, ten se nachází v reaktorovém sálu. Voda zajišťuje odstínění paliva a zároveň odvádí teplo, které generuje. Alespoň pět let je palivo pod vodou, poté je převezeno do meziskladu (více o meziskladech v kapitole 2.3), kde je skladováno dalších 40 až 60 let, dokud není rozhodnuto o jeho přepracování nebo uložení do hlubinného úložiště. V meziskladu jsou palivové kazety vloženy do obalového souboru pro použité palivo neboli také CASTOR (*cask for storage and transport of radioactive material*), které zabraňují úniku radionuklidů, odstiňují záření vznikající při přirozeném rozpadu a odvádějí vznikající teplo, zároveň zabraňují interakci vnějšího prostředí s palivem. V České republice od roku 2018 používáme kontejnery ze ŠKODA JS, které nazýváme „ŠKODORY“, přestože společnost nejdříve na designu spolupracovala se společností GNS, modely, které se dodávají do našich elektráren jsou již plně vyvinuty v ŠKODA JS. Do jaderné elektrárny Temelín jsou dodávány kontejnery ŠKODA 1000/19 (obr. 5a), které mají kapacitu na 19 palivových souborů a do roku 2035 jich bude do elektrárny dodáno 58 kusů. Jaderná elektrárna Dukovany od roku 2021 odebírá kontejnery ŠKODA 440/84 (obr. 5b), které mají kapacitu na 84 palivových souborů a do roku 2048 jich bude dodáno 91 kusů. Stěny kontejnerů mají tloušťku 41 cm, jejich těsnost je zaručena na minimálně 60 let, vydrží pád z výšky 9 m, tlak vodního sloupce o výšce 200 m a žár 800 °C po dobu 30 minut. [2, 20, 21, 22, 23, 24]

1.3.5 Přeprava

Při přepravě radioaktivního odpadu vzniká riziko vystavení okolí záření. Přeprava může probíhat jak na zemi, tak i vzduchem a po vodě. MAAE se stará o to, aby v členských státech probíhala přeprava, co nejbezpečněji, její regulace zahrnují obal odpadu, jeho složení a označení a mnoho dalších. Díky těmto regulacím nedošlo ve více než padesáti letech k žádnému úniku, který by ohrozil bezpečí lidí. [25]



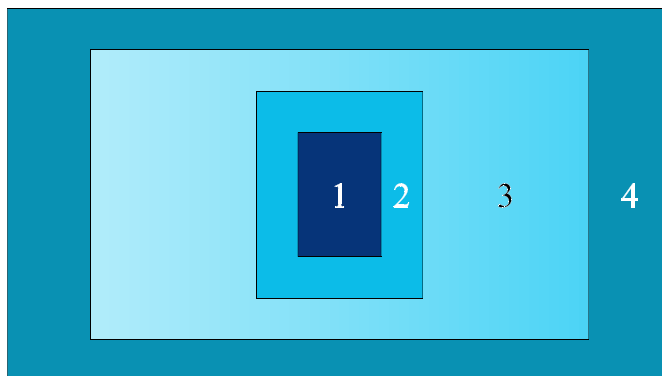
Obr. 5 – Kontejnery: a) ŠKODA 1000/19 (vlevo), převzato z [24];
b) ŠKODA 440/84 (vpravo), převzato z [26]

1.4 Ukládání

Uložení je finální proces, kterým si radioaktivní odpad projde, po jeho uložení se neuvažuje o tom, že by byl odpad znovu přemístěn. Jeho cílem je zabezpečit odpad a zabránit rozptýlu radionuklidů do biosféry. Radioaktivní odpady různé aktivity vyžadují různé způsoby uložení a abychom mohli postavit dostatečně robustní úložiště, musíme zvážit několik aspektů, které jsou vzájemně provázané. [2, 27]

Procesy před uložením úzce souvisejí s tím, jak moc musíme zabezpečit úložiště, například pokud máme odpad v kvalitním obalu, místo uložení nemusí být zcela vyhovující, v opačném případě, kdy máme slabou obálku, musíme vybrat lepší a bezpečnější místo. Celé úložiště funguje na principu čtyř bariér (některé bariéry jsou přírodní, některé vytvořené člověkem – inženýrské bariéry), jak jde vidět na obr. 6, které se navzájem doplňují: samotný stav, ve kterém materiál je (1); kontejner, ve kterém je odpad uchováván (2); kontrola prostředí, ve kterém jsou kontejnery s odpadem uloženy (3); a finální bariérou je struktura úložiště (4). Tento způsob ochrany se nazývá multibariérový systém a aplikuje se ve většině úložišť. [2]

Během doby, po kterou bude odpad uložen, je nevyhnutelná změna vlastností kontejneru, proto s tím musíme počítat a zaručit, že nevznikne nebezpečí. Neexistuje žádný dokonalý způsob, metody a bariéry, které fungují v jednom úložišti nemusí fungovat v jiném. Různé způsoby uložení mají různé potřeby funkce jednotlivých prvků, například ve Velké Británii do velkých betonových staveb ukládají neodstíněné nádoby, ale stejně tak dobře mohou fungovat málo zabezpečená úložiště s velmi dobře odstíněnými nádobami. [2]



Obr. 6 – Schéma bariér v úložišti, upraveno z [2]

Plánování úložiště má několik fází: přípravu, do které spadají geologické práce, monitoring, projektové řešení areálů, získávání dat pro dlouhodobou bezpečnost a dialog s veřejností v místě zamýšleného úložiště; výstavbu – stavba laboratoře pro kontrolu masivu, stavbu úložiště, povrchového areálu, dopravu a využití rubaniny, omezení vlivu na okolí; provoz úložiště; uzavírání úložiště. [4]

1.4.1 Povrchová a přípovrchová úložiště

Tato úložiště se nacházejí buď na povrchu nebo až do hloubky 60 m pod povrchem a jsou vhodná pro většinu nízkoaktivních a nízko až středně aktivních odpadů. Používají se po celé Evropě, ve Spojených státech i v Japonsku. Je potřeba do úložišť zakomponovat inženýrské bariéry, aby nedošlo k úniku a k odklonění dešťové vody. [2]

Povrchová úložiště jsou ta, která leží na povrchu, mohou to být příkopy, budovy a jiné s různými stupni složitosti zabezpečení a izolace, tato úložiště často mívají přísnější kontrolu po jejich uzavření. Přípovrchová úložiště mohou být kaverny desítky metrů pod povrchem. Stavba těchto úložišť se řídí několika principy: ochrana lidského zdraví, ochrana přírody, ochrana budoucích generací, snížení zátěže na budoucí generace a bezpečnost zařízení. [28]

Pro vhodné uložení odpadu jsou důležité informace o vlastnostech odpadu a jeho obalu, a informace o lokalitě úložiště. V lokalitě úložiště jsou pro nás důležité informace o přístupu vody, stabilita podloží a další faktory, jako existence izolujících materiálů (například jílu). [28]

Velmi důležitá je kontrola vody, jelikož jediný způsob, jak by nás mohly radionuklidy z odpadu ohrozit, je v případě, že by unikly do životního prostředí. Úložiště je stavěno tak, aby radionuklidy z odpadu nemohly uniknout na povrch dříve, než je radioaktivní rozpad učiní neškodnými. Další způsob, jakým by nás odpad mohl ohrozit, je ve formě radonu, radioaktivního vzácného plynu, který je velice mobilní. Nejnebezpečnější je však případ, kdy by nám k odpadu vnikla voda, která by přenesla radionuklidy do podzemních vod. Hlavním účelem inženýrských bariér může být definována minimalizace vodního toku, sběr a filtrace vody, která do úložiště pronikla. Ochrany před vodou můžeme taky dosáhnout místem, kde je úložiště postaveno, může být nad úrovní povodně, jindy mohou být postaveny pod maximální hladinou podzemních vod. Důležitý je také sběr dešťové vody, buď ke kontrole množství srážek, nebo k odklonění vody od úložiště. [2, 28]

Strategie „koncentrovat a uzavřít“ se aplikuje pro ukládání radioaktivního odpadu, koncentrace odpadu dosáhneme zmenšením jeho objemu během zpracování a přemístěním na jedno místo – do úložiště, uzavření je zaručeno imobilizací odpadu v obalu – kdy se snažíme snížit emise radionuklidů mimo kontejner na nulu a izolací odpadu od biosféry v úložišti. [28]

Úložiště musí splňovat tři funkce: izolaci – dlouhodobá izolace odpadu od životního prostředí (tuto funkci obvykle splňují inženýrské bariéry a materiál nad odpadem, jako je skála, střecha a jiné); zadržení – prevence jakéhokoli úniku radiace, která však nemůže být zaručena po celou dobu uložení; omezení a zpomalení – v případě, že by došlo k částečnému nebo úplnému selhání schopnosti úložiště zadržet unikající radionuklidy, mělo by úložiště průnik radionuklidů zpomalit a omezit jejich rozšíření do prostoru. [28]

Povrchové a přípovrchové úložiště v ČR – v České republice se o ukládání radioaktivního odpadu stará SÚRAO (Správa úložišť radioaktivních odpadů), které je financováno z prostředků jaderného účtu, do kterého ze zákona přispívají původci radioaktivního odpadu. Na území našeho státu se nacházejí čtyři úložiště, z nichž je již jedno uzavřené a zbylé tři stále funkční. Na obr. 7 lze vidět jejich rozmístění po republice. [4]

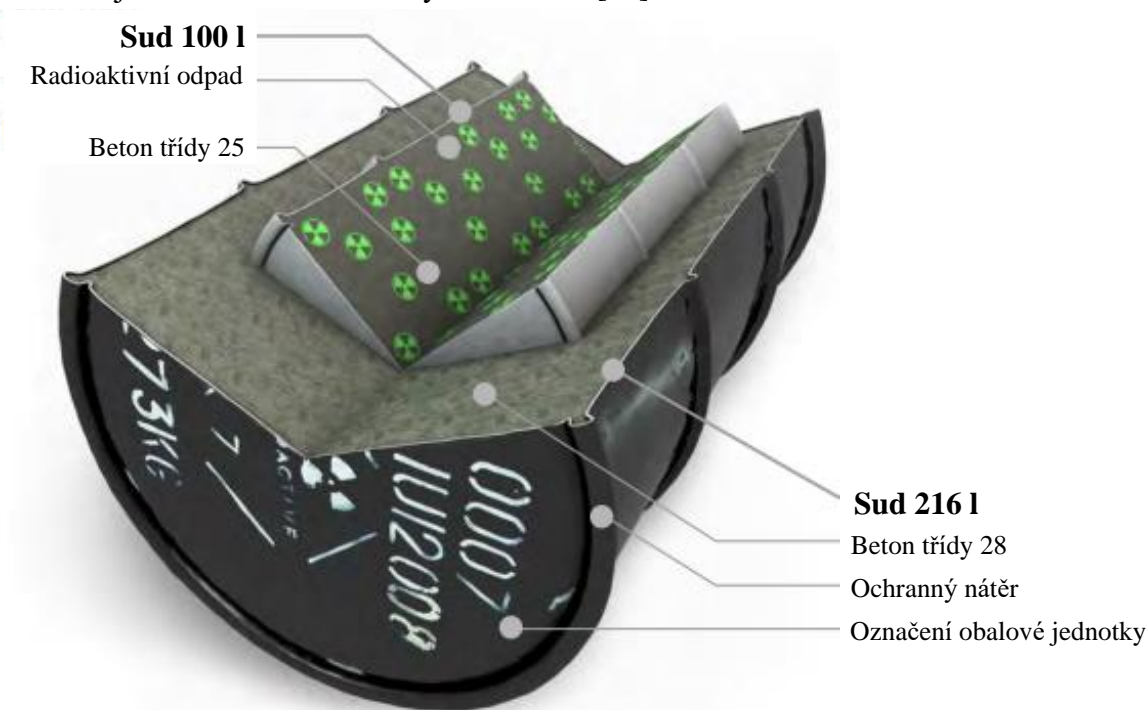
Úložiště Hostim – bylo uzavřeno v roce 1997 a od této doby je pravidelně monitorováno. Jedná se o starý vápencový důl, jehož objem chodeb i s odpady činí 1690 m³. Chodby byly při uzavření vyplněny betonovou směsí. [4]



Obr. 7 – Mapa povrchových a přípovrchových úložišť v ČR (i uzavřených), převzato a upraveno z [29]

Úložiště Richard – stejně jako v případě úložiště Hostim se jedná o bývalý vápencový důl, do kterého se od roku 1964 ukládají institucionální odpady. Úložiště nedávno prošlo rekonstrukcí zajišťující, že nepoužívané prostory byly upraveny do podoby vhodné ukládání odpadu. Kapacita tohoto úložiště je 12 500 m³ a měla by vystačit na dalších 10 let. [4]

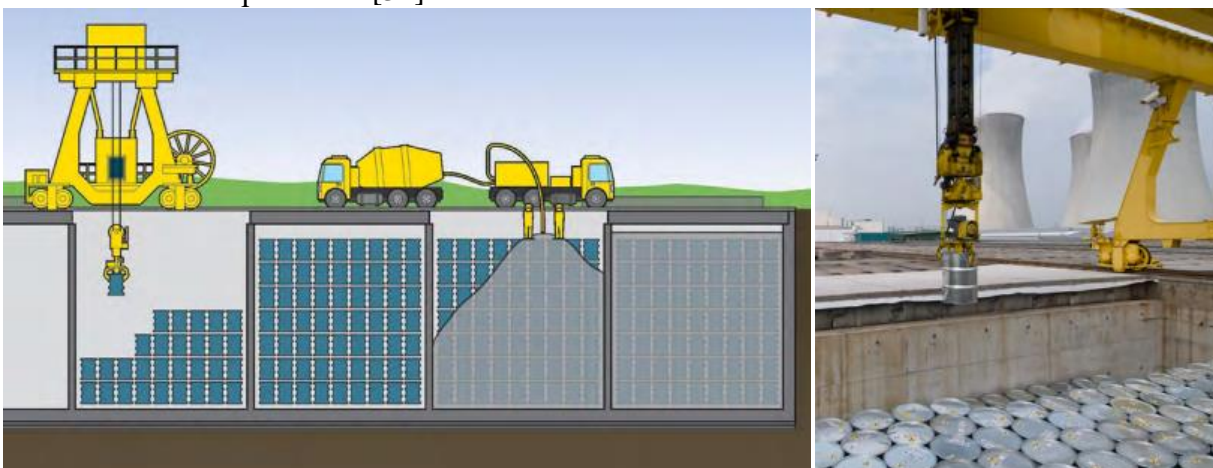
V tomto úložišti je obalový soubor téměř identický tomu, který je v úložišti Bratrství, jediným rozdílem zde je, že větší ze sudů má 216 l a ne 200 l (zobrazeno na obr. 8). V areálu úložiště je také zkušebna obalových souborů. [30]



Obr. 8 – Způsob ukládání sud v sudu, používaný v úložišti Richard, převzato a upraveno z [30]

Úložiště Dukovany – jedná se o nejmladší české úložiště, fungující od roku 1995, které je používáno výhradně pro ukládání nízkoaktivních odpadů z provozu Temelína a Dukovan. Objem úložných prostor je 55 000 m³ a měl by vystačit po celou dobu životnosti elektráren i po výstavbě dalších bloků. Jedná se o jediné povrchové úložiště u nás. [4]

Odpady do tohoto úložiště se vkládají v 200l pozinkovaných sudech, ty jsou vkládány do jímek. V Dukovanech je 112 železobetonových jímek a do každé se vejde 1600 sudů (znázorněno na obr. 9a a 9b). Do jímků sudy pokládá portálový jeřáb a jakmile je plná, jsou zbylá místa naplněna betonovou směsí a celá jíмка je překryta silnostěnným polyethylenem, který brání vniknutí dešťové vody. Poté je překryta ještě dalšími izolačními a drenážními vrstvami. Po 300 letech by měla radioaktivita v tomto úložišti poklesnout natolik, že již nebude ohrožovat životní prostředí. [31]



Obr. 9 – Úložiště Dukovany: a) koncept (vlevo), b) ukládání odpadu (vpravo), převzato z [31]

Úložiště Bratrství – úložiště fungující od roku 1974, do kterého se ukládají výhradně odpady obsahující přírodní radionuklidy. V dnešní době je toto úložiště už téměř zaplněno a odpady v něm zabírají 1200 m³. Jedná se o bývalý stříbrný a uranový důl, s tím se musí uvažovat při monitorování lokality, jelikož se v ní nachází určité množství radionuklidů i bez ohledu na uložený odpad. [4]

Do tohoto úložiště se ukládají odpady jako „sud v sudu“, to znamená že se odpad uloží do 100l sudu, který se následně vloží do 200l sudu. Prostor mezi dvěma sudy je zalit betonem (vzniká tedy asi 5 cm silná vrstva betonu z každé strany), stěna většího sudu je z obou stran pozinkována a zvenku natřena protikorozním nátěrem. [29]



Obr. 10 – Ukládání odpadu v úložišti Bratrství, převzato z [29]

1.4.2 Hlubinné úložiště

Nejideálnější způsob uložení vysokoaktivního odpadu (hlavně vyhořelého jaderného paliva) a dlouhodobých radionuklidů je uložení do vytěžených podzemních šachet, hloubka, ve které se úložiště nachází, je 500 až 1500 m. Vyvíjejí se dvě koncepce tohoto úložiště: mokrá, která počítá s tím, že je nevyhnutelné, aby voda vnikla do komplexu, zvažují se jak měkké horniny (například jíly, užití ve Francii a Belgii), tak i tvrdé horniny (například žula, která je užitá ve Švédské a Čínské koncepci); suchá, která byla zvažována v USA. [2]

Mimo hlubinné úložiště byly zkoumány i jiné možnosti ochrany biosféry před nebezpečím vysokoaktivního odpadu. Některé možnosti ukládání byly: pod oceánským dnem, na dně oceánu, v ledovcových oblastech a mimo Zemi (možnost ukládání vysokoaktivního odpadu ve vesmíru byly studovány NASA, ale byly zavrhnuté, kvůli neekonomičnosti a nebezpečí, i přesto byla tato metoda předělána a vylepšena v nové studii v Koreji, kde kvůli velkému zalidnění a nevhodným geografickým podmínkám není možné implementovat hlubinné úložiště). Jeden z představených konceptů úložiště byl uložit odpady do hloubky větší, než jsou tři kilometry, kde by byl jakýkoli přenos radionuklidů velmi limitovaný. Zároveň, kdyby tento koncept úložiště byl proveden v žule, generování tepla z vysokoaktivního odpadu by v okolní hornině mohlo způsobit reakci a vytvořit kolem odpadu něco jako sarkofág. [4, 32, 33, 34]

Existují různé koncepce hlubinného úložiště podle toho, v jaké hornině by mělo být postaveno. Jsou zkoumány: tvrdé horniny, jako je žula (Kanada, Finsko, Španělsko, Švédsko a další); měkké horniny, jako je jíl (Belgie, Francie, Nizozemsko a jiné); solné horniny (Německo a Nizozemsko); a vulkanické horniny, jako je tuf (USA). Dále se úložiště mohou lišit tím, jestli se odpad ukládá horizontálně nebo vertikálně. [32]

Stavba hlubinného úložiště je iterační proces, kde se snažíme vybrat tu nejlepší možnost, jelikož dokonalá možnost neexistuje. Většina zemí se rozhodla pro přístup s hlubinným úložištěm společně s multibariérovým systémem. Prvním krokem je výběr vhodného geologického útvaru (například v Německu jsou vhodné možnosti solné horniny, krystalické horniny a jíly, zatímco v severovýchodních zemích je možnost pouze krystalické horniny), zde se musí počítat s tím, že hornina může mít různé defekty, které bude potřeba kompenzovat inženýrskými bariérami tak, aby vytvořily dlouhodobě stabilní kombinaci. [27]

Při vybírání lokace úložiště je důležité pečlivě zvážit současný stav místa, jeho pravděpodobný přirozený vývoj a možné přírodní události, zároveň musíme vzít v potaz lidské plány a činnosti v okolí, které úložiště mohou ovlivnit. Musíme také zhodnotit poznatky o bezpečnosti jednotlivých prvků, událostí a procesů souvisejících s lokalitou a úložištěm. Výběr správné lokace může trvat desítky let a dá se rozdělit do několika kroků: koncepční a plánovací fáze; fáze průzkumu oblasti; fáze průzkumu lokace; fáze podrobné charakterizace lokace vedoucí k potvrzení výstavby. Tyto kroky musíme provést, abychom zjistili informace důležité pro bezpečnost úložiště, jako: geologické, hydrologické, geochemické a mechanické procesy. Dalším krokem je návrh úložiště a inženýrských bariér tak, aby udržely odpad a riziko s ním spojené, byly fyzikálně i chemicky s okolním prostředím kompatibilní a byly schopné splňovat svou funkci i po uzavření úložiště. [35]

Zároveň je také velmi důležitým faktorem při výběru lokality diskutování o všech parametrech s širokou veřejností, která by měla chápat rizika a mít možnost hlubinné úložiště odmítnout. Toto téma by mělo být otevřeno pro diskusi a všechny informace o plánování úložiště by měly být známé a dobře dostupné, aby došlo k navázání důvěry mezi ohroženou společností a správou úložiště. Podle Lersowa a Waggita je jeden z důvodů, proč jsou severské státy natolik pokročilé z hlediska hlubinného úložiště oproti například Německu je právě pochopení společnosti a její důvěra. [32, 27]

Hlubinné úložiště v ČR – aktuálně v České republice probíhají výzkumné práce spojené s hledáním vhodné lokace pro úložiště, při výběru nejlepší lokality se zohledňuje 13 kritérií [4]:

Velikost využitelného horninového masivu – úložiště bude uloženo v krystalické hornině (žula nebo rula) v hloubce 500 m pod povrchem, toto kritérium v sobě zahrnuje informace o jednodolitosti horniny a její tepelné vlastnosti a je důležité, jelikož potřebujeme dostatečně velký a celistvý masiv, u nějž známe všechny jevy, které v něm probíhají nyní i v budoucnosti.

Dostupnost infrastruktury – vytěžený materiál by se měl nacházet do 20 km od úložiště, je tedy potřeba dostupnost silnic a kolejnic, popřípadě i připojení k elektrické energii.

Popsatelnost a predikovatelnost horninových bloků – masiv, který hodláme využít musíme znát do detailů, zároveň musíme studovat i široké okolí.

Variabilita geologických vlastností – odborníci studují, zda je v okolí masivu hornina stejná nebo se liší.

Charakteristika proudění vody v okolí úložiště a transportní charakteristiky – vhodné je, aby v horninovém masivu proudilo co nejmenší množství vody a co nejpomaleji, zároveň je posuzována rychlost pronikání vody do podzemí a případně zpátky na povrch, jelikož voda je v případě hlubinného úložiště nejpravděpodobnější nosič radionuklidů.

Identifikace a umístění drenážních bází – potřebujeme znát místa, kde voda z podzemí vyvěrá na povrch pro případ, že by došlo k její kontaminaci.

Seismická a geodynamická aktivita – masiv by se měl co nejméně hýbat a lokalita by neměla ležet v oblasti, kde dochází k zemětřesení, k erozi by mělo docházet pomalu.

Charakteristiky, které by mohly vést k narušení úložiště budoucími aktivitami člověka – účelem úložiště je zamezit úniku radionuklidů po několik stovek tisíc let, ale zásahy člověka by mohly tuto činnost narušit, proto by se úložiště nemělo nacházet na místě, kde jsou zásoby pitné vody nebo nerostných surovin.

Jevy ovlivňující šíření radioaktivity, provoz jaderného zařízení – spadá sem hustota zalidnění a délka trasy mezi jadernou elektrárnou a úložištěm pro případ mimořádné události.

Vliv na povrchové vody a vodní zdroje – důležité jsou vlivy, které může mít stavba úložiště na zdroje vody.

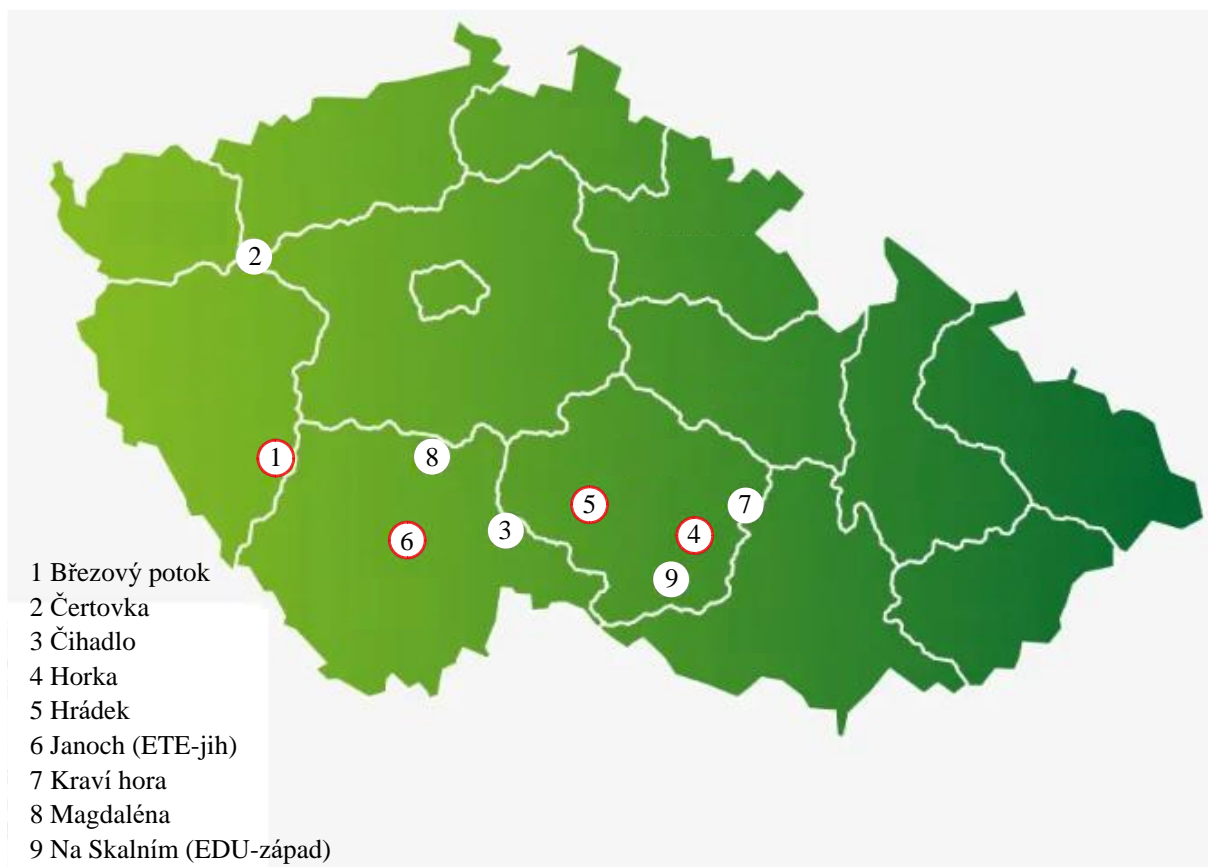
Vlivy na ochranu přírody a krajiny – ideální je, aby stavba měla minimální negativní dopad na krajinu a přírodu v okolí, záleží na blízkosti obydlených míst i na trasách divoké zvěře. Cílem je, aby úložiště co nejméně ovlivňovalo okolí.

Vlivy na zemědělský a půdní fond a pozemky určené k plnění funkcí lesa – záleží na jaké půdě se povrchový areál úložiště bude rozkládat.

Vlivy na obyvatelstvo, hmotný majetek a ochranu památek – měl by být co nejmenší zásah do běžného chodu okolních obcí, počítá se i s opatřeními jako jsou například protihlukové stěny.

Všechny práce spojené s plánováním a provozováním úložišť, stejně jako finanční příspěvky samosprávám, kterých se dotýká příprava hlubinného úložiště, jsou placeny z jaderného účtu, kam musí ze zákona přispívat každý původce radioaktivního odpadu (například provozovatel jaderné elektrárny odvádí 55 Kč za každou MWh elektrické energie, kterou vyrobí). K 31. 12. 2023 na jaderném účtu bylo 40,16 miliard Kč. [4]

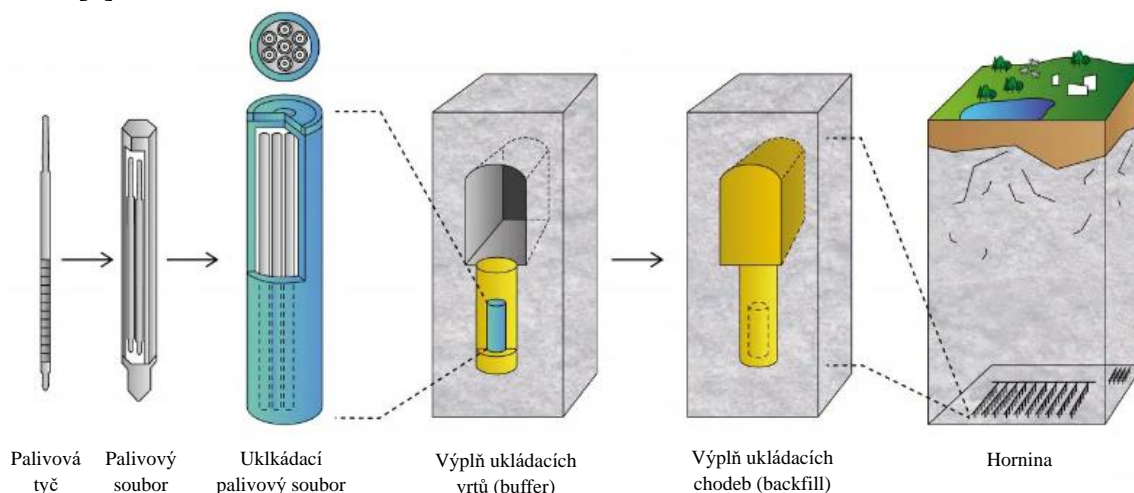
Původně bylo vybráno celkem devět lokalit (znázorněny na obr. 11), po průzkumech byl tento počet v roce 2020 zúžen na čtyři lokality, které se zkoumají dále, jedná se o: Březový potok (vyrovnané hodnocení všech kritérií, velký rozměr horninového masivu, malá rychlost proudění podzemní vody), Horku (výborné geologické vlastnosti, žádné významné vodní zdroje, homogenní hornina), Hrádek (výborné geologické vlastnosti, málo zlomy narušená hornina, velká mocnost žulového masivu) a Janoch (výborné geologické vlastnosti, homogenní hornina, žádné významné vodní zdroje). [4]



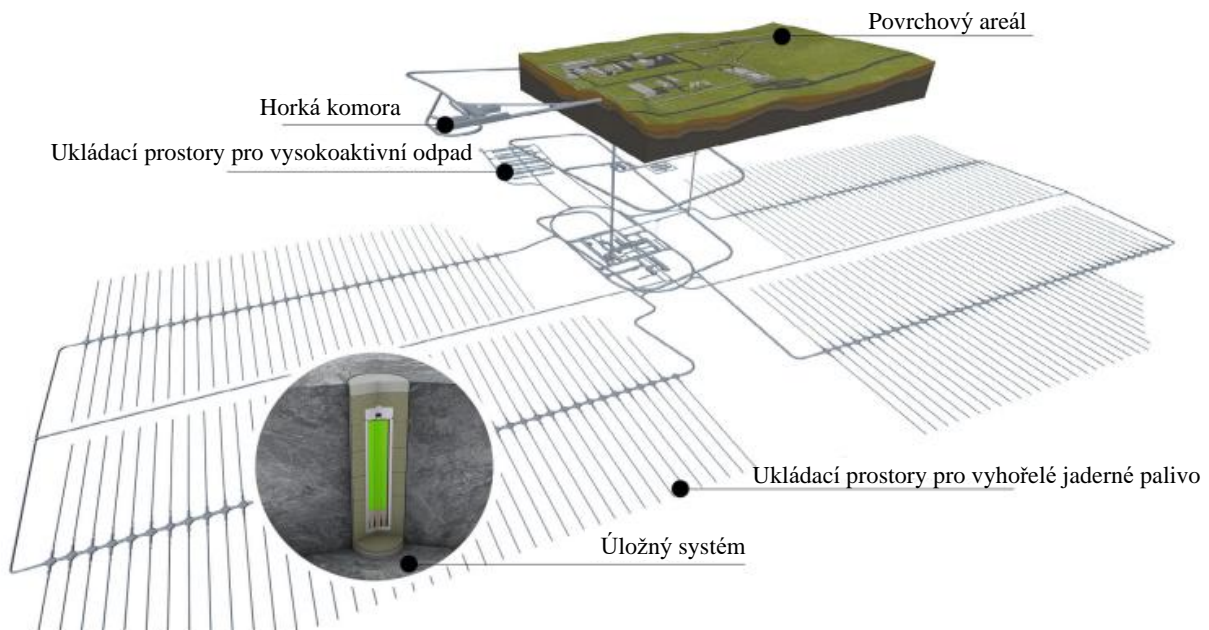
Obr. 11 – Všechny lokality zvažované pro stavbu hlubinného úložiště (červeně zvýrazněné jsou lokality, mezi kterými se vybírá od roku 2020), převzato a upraveno z [4]

Nejvýznamnější bariérou kolem odpadu, bude 500 m horniny nad odpadem doplněných inženýrskými bariérami jako jsou samotné ukládací kontejnery (ty by měly být dvouplášťové – za dvou ocelí, jedna by byla nerezová a druhá uhlíkatá) a vyplň z bentonitu. [4]

Do úložiště se mimo vyhořelé jaderné palivo bude ukládat také ostatní vysokoaktivní odpad, který bude mít své samostatné komory oddělené od prostor pro ukládání paliva, to lze vidět na obr. 13. Samostatný úložný systém bude proveden vertikálními vrtů, do kterých se uloží obalový soubor s vyhořelým jaderným palivem, ten po naplnění bude zasypán bentonitem a po zaplnění ostatních vrtů, bude i chodba zasypána bentonitem, to lze vidět na obr. 12. [4]

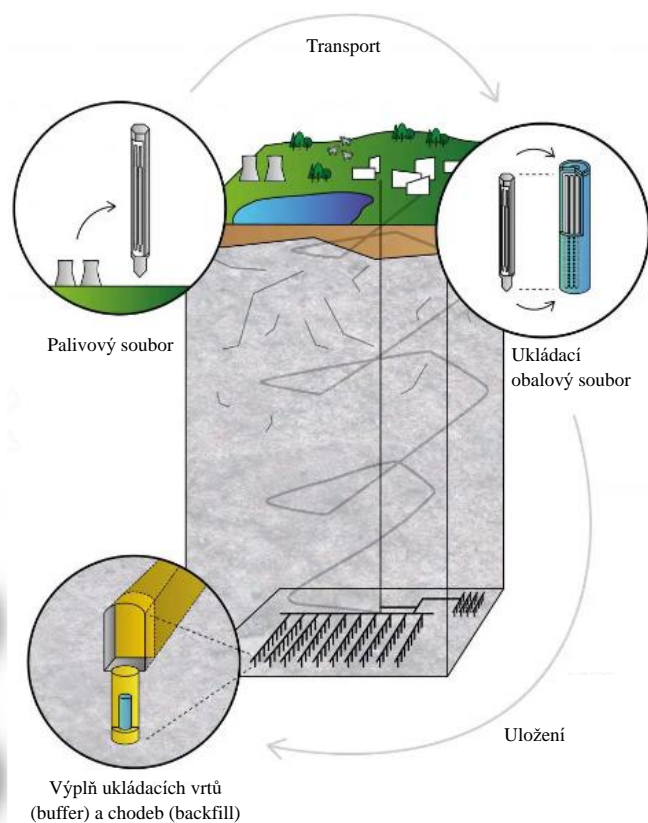


Obr. 12 – Způsob ukládání vyhořelého jaderného paliva do úložiště, převzato a upraveno z [4]

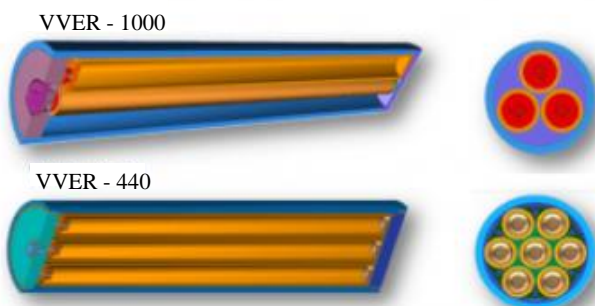


Obr. 13 – Model plánovaného hlubinného úložiště, převzato a upraveno z [4]

Z obrázku 12 se dá také konstatovat, že vyhořelé jaderné palivo nebude ukládáno v obalových souborech, ve kterých bude skladováno a transportováno, z obr. 14a a 14b, lze dedukovat, že v případě paliva z Temelínské elektrárny, budou do ukládacího obalového souboru uloženy tři palivové soubory, že v případě Jaderné elektrárny Dukovany, bude do kontejneru vloženo sedm palivových souborů a že k tomuto procesu dochází v komplexu úložiště. [4]



Ukládací obalový soubor



Obr. 14 a) naplnění ukládacích obalových souborů pro jednotlivé elektrárny, b) postup před uložením paliva do vrtů, převzato a upraveno z [4]

Jakmile nastane čas k vyřazování jaderných elektráren z provozu, dá se předpokládat, že vysokoaktivní odpady budou uloženy v hlubinném úložišti a středně a nízko aktivní odpady budou uloženy do přípovrchových a povrchových úložišť.

2 Jaderný palivový cyklus

Jaderný palivový cyklus označuje koloběh jaderného paliva od jeho vytěžení až po jeho finální uložení. Rozlišujeme tři části cyklu: přední, střední a zadní, kdy přední část cyklu je vše, co se s rudou a později s palivem děje před tím, než je vloženo do reaktoru, střední část sestává z využívání paliva v reaktoru a zadní část nastává poté, co se palivo vytáhne z reaktoru. [32, 20]

Postupy a metody v jednotlivých částech palivového cyklu závisí na typu přístupu. Máme možnost otevřeného palivového cyklu („*once-through*“), kdy se vyhořelé jaderné palivo uloží do hlubinného úložiště a už se znovu nepoužije, nebo uzavřeného cyklu, kdy se palivo přepracuje (je možnost palivo přepracovat jednou, ale i vícekrát) a zbytek štěpitelného materiálu se využije na výrobu dalšího paliva. [32]

Důvod, proč palivový cyklus zmiňujeme v této bakalářské práci je ten, že v každém kroku každé části vytvoříme nezanedbatelné množství odpadu.

2.1 Přední část palivového cyklu

Přední část palivového cyklu má čtyři stádia: těžbu a mletí, zpracování, obohacení a jako poslední výrobu samotného paliva [36]. Česká republika přestala těžit uran v roce 2016 [37].

Těžba a mletí – celosvětově se nejvíce uranu těží v Kazachstánu (v roce 2022 vyprodukoval 43 % z celosvětové produkce), následuje Kanada (15 % světové produkce) a Namibie (11 % světové produkce) [37]. Používá se několik způsobů těžby uranové rudy:

Povrchová těžba – v případě, že se ložiska uranové rudy nachází do 120 m pod povrchem, vykopají se důlní jámy a v nich se provádí těžba. Odstraní se nepotřebná hornina a sulfidické soli pro získání uranu a zbylá hlušina se ponechá v blízkosti dolu. Jelikož se jedná od horninu, kde stále jsou zbytky uranové rudy, považuje se za nízkoaktivní odpad. [2, 20, 38, 39]

Výhody: dobrá ventilace vzduchu, je levnější než hlubinné doly uranu, doly musí splňovat přísná kritéria ekologie a bezpečnosti, a držet se předem připraveného plánu těžby. Regulují se úroveň radonu a prašnosti i těžební jámy. [39]

Nevýhody: zásah do krajiny, velké množství nízkoaktivních odpadů (hornina), prachové částice radioaktivních materiálů se mohou dostat do atmosféry, sanace zasažené oblasti je finančně a časově náročná, obnova zasažených vod je finančně náročná, okolní populace a zaměstnanci dolu jsou vystaveni zdravotním rizikům. [39]

Hlubinná těžba – pokud je ruda příliš hluboko pro povrchový důl, horníci musí vykopat šachty, které dosáhnou do potřebné hloubky. Poté se vytěžená ruda musí rozdrtit na menší úlomky, které je možné přepravit na povrch. [38, 39]

Výhody: menší zásah do přírody, méně radioaktivní horniny, v dnešní době se používají pokročilé postupy, které zajišťují bezpečí dělníků (např. kvalitní ventilační systém, robotická těžba a sledování radioaktivity). [39]

Nevýhody: velmi nákladné (vyplatí se pro vyšší koncentrace rudy v zemi, než pro povrchové doly), větší nebezpečí zasažení podzemních vod a drahá sanace půdy, v dřívějších dobách doly představovaly velké zdravotní nebezpečí pro pracující dělníky, kvůli radonu, naftovým výparům a špatnému odvětrávání. [39]

Mletí – u obou tradičních metod těžby (povrchové a hlubinné) musíme řešit malou koncentraci uranu ve vytěžené hornině (méně než 0,3 %). Proto musí být rozdrcena a rozmělněna na velmi malé částice, ze kterých přidáním vody vytvoříme kaši. Tu poté smísíme s kyselinou sírovou nebo alkalickým roztokem, aby se uvolnil uran z horniny. Tímto procesem lze získat obsah uranu až 98 %. Pomocí kyseliny nebo alkalického roztoku se vysráží oxid uranu (nebo také „žlutý koláč“ – tento název je odvozen od sytě žluté barvy výsledného produktu), produkt je poté převezen k následnému kroku konverze. [36, 39]

Metoda in situ leaching (ISL)/ in situ recovery (ISR) – do země, kde se nachází uranová ruda se napumpuje voda s rozpuštěným oxidačním činidlem (ideální pH roztoku je mezi 6,5

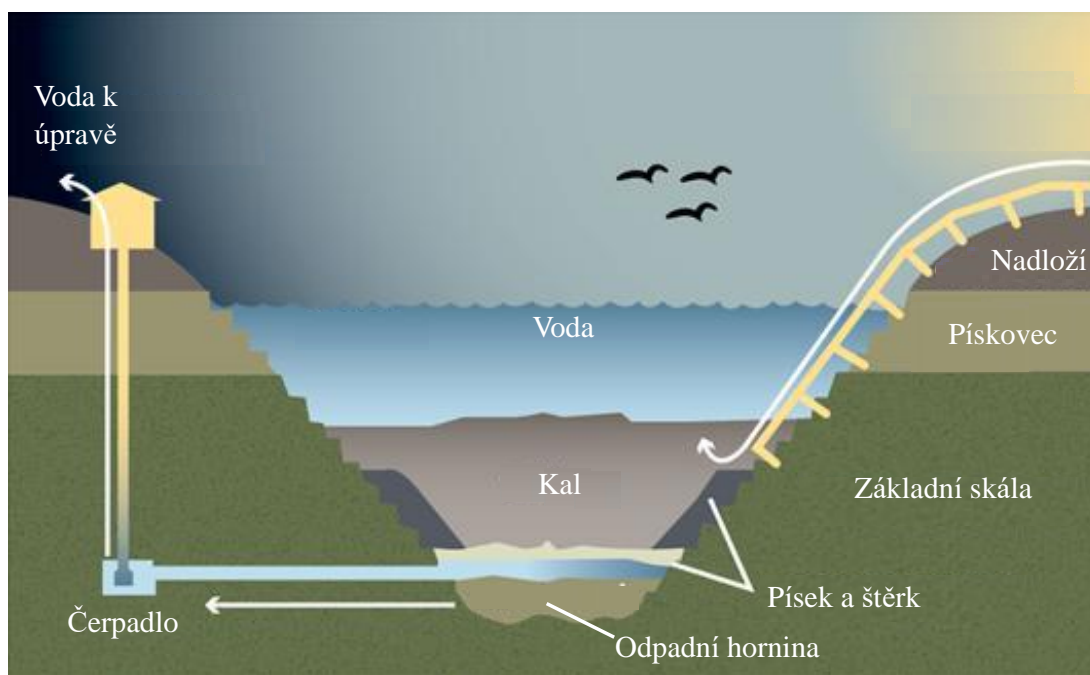
a 7,0). V některých případech obsahuje roztok i uhličitanovou fázi jedlé sody pro lepší uvolnění uranu. Roztok zapřičiňuje oxidaci uranu v porézním prostředí a jeho následné uvolnění do roztoku. Pro celý proces jsou vytvořeny dva vrty, jedním se vtlačuje dovnitř roztok s oxidačním činidlem a druhý (hnací) vrt slouží k „vyhánění“ uranu na povrch. Vrt je monitorován, aby se zabránilo vniku vody s činidlem a uranem mimo vymezenou oblast. Poté, co je produkt vyčerpán, je přefiltrován a regenerován pomocí oxidantů a uhličitanů, přečištěný roztok je navrácen do vrtu a proces se opakuje do vytěžení uranu (zbývá hornina s koncentrací uranu přibližně 0,1 %). Po vytěžení musí být vrt vyčištěn a ošetřen, aby nedošlo k zasažení podzemních vod (Austrálie s Kazachstánem nemají povinnost čistit využitě doly, i přesto že používají kyselinu sírovou jako rozpouštědlo). V roce 2022 bylo touto metodou získáno 55 % z celosvětové produkce uranu, jedná se tedy o převládající metodu. [39, 37]

Výhody: malý zásah do krajiny, malá produkce hlušiny, nižší sanační náklady, menší radiační dávky pro zaměstnance, méně zaměstnanců. [39]

Nevýhody: nebezpečí lokálního znečištění podzemních vod, nedůvěra veřejnosti. [39]

Heap leaching – metoda, kdy se propouští kyselý nebo zásaditý louh přes haldu nadrcené rudy. Celý proces je velmi dlouhý, jelikož louh musí protéct celou haldou skrz porozity, pro haldy o výšce 6 až 9 m trvá protečení jeden rok. Výměnou iontů má roztok vytékající z haldy vysoký obsah uranu, ten je dále zpracován. [40, 41]

Jak již bylo zmíněno, hornina, která obsahuje uran, se považuje za nízkoaktivní odpad, který je uložen v blízkosti dolu a představuje nebezpečí při vdechnutí či pozření. Během této první části palivového cyklu ovšem nemáme jen pevný odpad, vznikne nám také kapalný odpad – kal, ten bývá ukládán ve vytěžených povrchových dolech nebo na povrchu v kalových nádržích (například na obr. 15), které k zadržení hlušiny využívají geografické prvky, jako jsou hráze. [39, 42]



Obr. 15 – Kanadská kalová nádrž, převzato a upraveno z [42]

Konverze – neboli také zpracování je proces, jehož cílem je získat fluorid uranový (UF_6) ze žlutého koláče (U_3O_8). Důvodem je obsah štěpitelného materiálu (^{235}U) ve smolinci, který je 0,71 %, palivo musí mít obsah 3 až 5 %. Abychom uranový koncentrát mohli obohatit, musíme ho převést na UF_6 a to ze dvou hlavních důvodů: fluor má jediný přirozeně se

vyskytující izotop a při separaci ^{238}U a ^{235}U neovlivňuje hmotnostní rozdíl, sloučenina UF_6 sublimuje při $56,5\text{ }^\circ\text{C}$ a je tedy při obohacování v plynném skupenství. [40, 43]

Obohacování – základem každého způsobu obohacování je rozdělit vstupující proud na dva vystupující: proud, který je do určitého stupně obohacen o žádoucí prvek a proud, který má žádoucího izotopu méně. Abychom byli schopni obohatit palivo na požadovanou úroveň musíme mít tisíce těchto procesů po sobě. [40, 43, 44]

Plynná difúze – jelikož jsou atomy ^{235}U lehčí než atomy ^{238}U , projdou každou bariérou o něco snadněji než ^{238}U . Na tomto principu je založena tato metoda, kdy do zařízení vniká proud pod velkým tlakem a uvnitř proniká filtry a membránami, za kterými je podtlak. Tento proces je velice energeticky náročný a považuje se za překonaný. [40, 43, 45]

Plynná odstředivka – využívá stejného principu, jako plynná difúze. Těžké atomy ^{238}U se odstředivými silami přesouvají na vnější okraj odstředivého válce, zatímco lehčí atomy ^{235}U zůstávají blíže středu, takto jsou rozděleny na dva proudy. [40, 43, 45]

Elektromagnetická separace izotopů – používá podobný princip jako hmotnostní spektrometr. Při pohybu magnetickým polem se atomy ^{238}U pohybují po dráze o jiném poloměru než atomy ^{235}U a mohou být odděleny. Tato metoda je přibližně desetkrát energeticky náročnější než plynná difúze. [40, 43, 45]

Aerodynamická separace – podobný princip jako plynná odstředivka v tom, že těžší částice putují ke kraji. UF_6 se smísí heliem nebo vodíkem, aby plyn mohl dosáhnout vyšší rychlosti. Směs tlakem získá vysokou rychlost a prochází potrubím, kde dochází k oddělování atomů. Jedná se o nejméně ekonomickou metodu. [45]

Laserová separace – pracuje se schopností laseru vyzařovat paprsek jedné vlnové délky. Existují různé metody využívající laseru: parní metoda separace izotopů (AVLIS), kdy laser je nastaven tak, aby ionizoval atomy ^{235}U , které se shromažďují na záporně nabitě desce; molekulová separace izotopů (MLIS), kdy je opět atomům ^{235}U dodána energie laserem, mění jejich vlastnosti a umožňuje oddělení, druhý laser uvolní atom fluoru a dá za vznik sloučenině, která kondenzuje; SILEX; CRISLA. [40, 43]

Výroba paliva – na palivo jsou kladeny vysoké nároky, kvůli prostředí, kterému je v aktivní zóně vystaveno. Geometrie palivového souboru musí zůstat stabilní i v aktivní zóně a zůstat na požadovaném místě, nesmí se smístit chladivo s palivem a štěpnými produkty, musí splnit tepelně-hydraulické požadavky a předávat chladivu energii z reakce, musí být kompatibilní s radioaktivním prostředím, nesmí mít vysoké nároky na údržbu a skladování, měl by být přijatelný pro skladování a pro možnosti přepracování, a umožnit odebrání zbytkového tepla při krizových situacích. [46]



Obr. 16 a) Palivové pelety, převzato z [47], b) kuličkové TRISO palivo, převzato z [48]

V tomto kroku je obohacený uran převeden na prášek oxid uraničitý (UO_2) a lisován do malých keramických pelet, ty jsou vloženy do palivového proutku ze zirkonia a ty jsou následně sestaveny do palivové kazety, jejich počty a specifikace záleží na typu reaktoru. [36]

Používá se několik typů paliv: keramické – slinované pelety UO_2 (na obrázku 16a), kovové – tento typ se již neužívá, MOX – palivo ze směsi oxidu uraničitýho a oxidu plutoničitýho, TRISO – palivo je ve formě kuliček (na obr. 16b), hydridové palivo s vazbou kapalina-kov – jedná se o stejnou generaci paliva jako v případě MOX, používá se do výzkumných reaktorů, a jiné. [36, 40, 49]

2.2 Střední část palivového cyklu

Tato část se odehrává od uskladnění paliva v elektrárně až po skladování použitého paliva v bazénu v reaktorovém sále. Poté, co je palivo vloženo do reaktoru, záleží na délce kampaně elektrárny, jak dlouho palivo v reaktoru zůstane. Při výměně vyhořelého paliva za čerstvé se nevymění všechno palivo. Část paliva je vyměněna a zbylé je rozmístěno tak, aby bylo v aktivní zóně, co nejideálněji (rozmístění paliva ovlivňuje efektivitu reaktoru, stínění reaktorové nádoby a mnoho dalších důležitých aspektů), toho může být dosaženo dvěma metodami, které se liší podle toho, jestli je čerstvé palivo umístěno doprostřed nebo na okraje. [50]

V této fázi palivového cyklu se odehrávají neutronové interakce, které štěpením mění izotopické složení. Rozštěpením jádra uranu vzniknou dva štěpné produkty s velkou energií, která je předávána okolí ve formě tepla, a zároveň se uvolní dva až tři neutrony, které dál napomáhají štěpení. [20]

V této části dochází také ke kontrole netěsností palivových proutků – kontrola se nazývá sipping a provádí se dvěma způsoby: on-line (kvalitativním měřením se zjišťuje, který palivový soubor je poškozen) a off-line (kvantitativním měřením poškozeného palivového souboru se zjišťuje rozsah poškození. K tomu, že vůbec k nějakému poškození došlo se zjišťuje měřením aktivity chladicí vody reaktoru, ta by neměla překročit $3,7 \cdot 10^9$ Bq/l. [51]

Takto poškozené palivo je vyjmuto z reaktoru a už se nepoužívá pro výrobu energie. ŠKODA JS vyvinula obalový soubor pro netěsné vyhořelé palivo, do kterého lze vložit celý obalový soubor, bez potřeby vyjmout jednotlivé palivové proutky. Vývoj tohoto obalového souboru založila na obalovém souboru typu ŠKODA 1000/19M (obalový soubor pro Temelínskou elektrárnu) se speciální pozorností k bezpečnému odbavení na elektrárně. [52]

2.3 Zadní část palivového cyklu

Po vytažení z reaktoru je palivo přesunuto na minimálně pět let (obvykle pět až deset let) do bazénu vyhořelého paliva, během které se samovolným rozpadem snižuje jeho aktivita. Po tomto období je obvykle vloženo do transportního kontejneru a přemístěno do meziskladu vyhořelého paliva. Všechna manipulace s palivem se děje pod vodou a po naplnění kontejneru je vakuově vysušen. Existují dvě varianty meziskladů – mokré (skladují palivo v bazénech) a suché (skladování v kontejnerech) – zde jaderné palivo zůstává až 60 let a poskytuje možnost počkat s výběrem finální strategie. Strategie máme dvě: přepracování a uložení, většina zemí volí však „třetí“ strategii vyčkávání. [20]

Mokrý mezisklad – voda je použita jako tepelný vodič. Palivo může být vloženo do bazénu v reaktorové síni (na obr. 17a) nebo v jiném speciálním bazénu, pokud dojde místo, je snadné ho navýšit vložení jiného stojanu, kde budou palivové kazety blíže k sobě, druhou možností je přesunout palivo do centrálních bazénů, nebo konstrukce dalších. Jelikož použité palivo generuje značné množství tepla (po vytažení 2000 kW, po jednom roce 10 kW a po deseti letech 1 kW), musí být bazén vybaven čerpadly a tepelnými měniči, aby voda zůstala chladná. Mokrých meziskladů využívají například na Slovensku v Jaslovských Bohunicích. [2, 53]

Suchý mezisklad – tento mezisklad je používán ve většině světa a na rozdíl od mokrého meziskladu využívá inertního nebo lehce reaktivního plynu u použitého paliva, aby se zabránilo jeho oxidaci. Nádoba, ve které je palivo s plynem poskytuje nepropustné uložení s další vrstvou kovu nebo betonu, která poskytuje stínění. Chlazení je poskytováno přirozeným prouděním vzduchu. Tento mezisklad může být v několika provedeních: kovové nádoby se skladují v dírách v podlaze skladiště; kovové nádoby v betonových silech; a skladování v nadzemních skladech z oceli nebo betonu v nádobách, které mohou být z kovu (ocel, litina, olovo a měď) nebo betonu (používají se různé směsi písku, šterku, cementu, vody a železa pro výztuhu), toto provedení na obr. 17b. [53]



Obr. 17 a) bazén vyhořelého jaderného paliva, převzato z [54], b) suchý mezisklad, převzato z [55]

2.3.1 Přepřacování

Jinak také „uzavřený palivový cyklus“. Palivo je po chlazení v bazénu v reaktorovém sále převezeno na přepřacování, kde je uran a plutonium z paliva extrahováno procesem zvaným PUREX (*plutonium and uranium redox extraction*), který je jediný komerčně používaný způsob přepřacování. Proces začíná rozpuštěním použitého paliva v kyselině dusičné. Touto metodou jsou z paliva odstraněny minoritní aktinoidy a štěpné produkty, které jsou vitrifikovány a považovány za vysokoaktivní odpad. Objem odpadu, který vznikne během přepřacování je velmi blízký tomu, kdybychom vyhořelé jaderné palivo rovnou uložili. Extrahované plutonium může být využito v MOX (*mixed oxides*) palivu, které bylo v roce 2017 používáno přibližně v 10 % světových reaktorů. Extrahovaný uran (REPUOX – *reprocessed uranium oxide*) může být použit k obohacování paliva, avšak jelikož extrahovaný uran je mnohem radioaktivnější než ten vytěžený, byl by proces nákladnější a složitější, proto přepřacovaný uran obvykle bývá pouze skladován. [32]

V dnešní době jsou všude po světě vyvíjené nové metody přepřacování, existují dvě větve vývoje: technologie na bázi PUREX s pokročilými metodami extrakce jednotlivých komponent a technologie, které se snaží z použitého paliva extrahovat pouze uran. [32]

Vyvíjené technologie jsou následovné: UREX (*uranium extraction*) se snaží o extrahování pouze uranu, pod tuto metodu spadají také UREX+, UREX+1 a UREX+2; COEX (*combined extraction*), který extrahuje plutonium a uran zároveň; DIAMEX (*diamide extraction*); TRUEX (*transuranic elements extraction*); SANEX-N a SANEX-S (*selective actinide extraction process*); SESAME (*selective extraction and separation of americium by means of electrolysis*); CSEX; SREX; CCD-PEG; GANEX. Mimo tyto metody je ještě metoda OREOX (*oxidation and reduction of oxide fuel*), která je speciálně zaměřená na vytváření paliva CANDU (*Canada deuterium uranium*). [32]

Doposud zmíněné procesy a metody byly všechny s využitím kyseliny, existují však také metody, které využívají kovy a soli za vysokých teplot. Další využívají jejich kombinace například FLUOREX (*fluoride volatility and solvent extraction*) nebo AIROX (*atomics international reduction oxidation*). [32]

2.3.2 Uložení

V tomto případě se jedná „otevřený palivový cyklus“. Tento konec palivového cyklu je popsán v kapitole 1.4.2. Zahrnuje se sem pouze hlubinné úložiště, jelikož je to nejzodpovědnější přístup k uložení vysokoaktivního odpadu.

3 Způsoby rozdělení a hlubinné ukládání radioaktivních odpadů pro jednotlivé státy

V první kapitole bylo řečeno, že radioaktivní odpady rozdělujeme několika možnými způsoby, právě tato rozdělení jsou potřebná k tomu, abychom rozhodli, jak odpad uložíme.

Jelikož neexistuje dokonalé úložiště, tak se úložiště jednotlivých zemí liší – zvláště pro hlubinná úložiště je důležité najít kombinaci prostředí a bariér, která bude fungovat a bude pro dané místo a odpad ideální. [2]

Většina států se souhlasem MAAE přijala normu pro zabezpečení pro nízkoaktivní a průměrně aktivní odpady po dobu 300 až 500 let, jelikož do většiny přípovrchových úložišť ukládáme pouze nízkoaktivní a středněaktivní odpady, které mají poločas rozpadu kratší než 30 let. [2]

3.1 Belgie

Rozdělení radioaktivních odpadů

Belgie rozděluje do tří kategorií: A – nízko a středně aktivní odpady s krátkodobými radionuklidy; B – nízko a středně aktivní odpady s významným množstvím dlouhodobých radionuklidů, po době určené ke skladování mají zanedbatelné množství generace tepla; C – vysokoaktivní odpady s významným množstvím dlouhodobých radionuklidů s nezanedbatelnou generací tepla. [17]

Ukládání

Předpokládá se vybudování dvou typů úložišť: přípovrchové pro kategorie A, a hlubinné pro kategorie B a C (na obr. 18b). Hlubinné úložiště bude vybudováno v sedimentární hornině a bude zajištěno konstrukčními prvky z betonu, bude mít několik sekcí a odpady z kategorií B a C budou odděleny, ale uloženy ve stejné hloubce. Ukládací chodby budou maximálně 1 km dlouhé a přibližně 3 m široké, budou od sebe vzdáleny 50 až 100 m a až nastane čas jejich zavření, budou zaplněny výplňovým materiálem a uzavřeny betonovou zátkou. [17]

Odpady z kategorie C budou uloženy v superkontejnerech. Do kontejneru z uhlíkové oceli bude vložen primární obalový soubor, zalit betonem Portlandského typu a v místě uložení utěsněn bentonitem. Odpady kategorie B budou uloženy v monolitu. Primární obalový soubor bude zařezán v cementové zálivce v kesonech z Portlandského cementu. [17]

3.2 Čína

Rozdělení radioaktivních odpadů

Rozdělení odpadů pro uložení je následující: pevné vysokoaktivní odpady, pevné alfa zářiče – tyto dvě kategorie by měly být uloženy v centrálním hlubinném úložišti, pevné středněaktivní, pevné nízkoaktivní – tyto dvě kategorie by měly být uloženy regionálně, odpady z těžby a zpracování uranu (thoria), odpady s přirozeně se vyskytujícími radionuklidy – tyto dvě kategorie by měly být uloženy v povrchovém úložišti. [2]

Ukládání

Čínské hlubinné úložiště by mělo být postaveno kolem roku 2050 a počítá se s tím, že bude v žulové hornině. Odpady by měly být solidifikovány do skleněné nebo keramické matrice, vloženy do kovových kontejnerů. Poté by mělo být zasypáno bentonitem. Předpokládá se, že čínské hlubinné úložiště by mělo být v lokaci Beishan. [2]

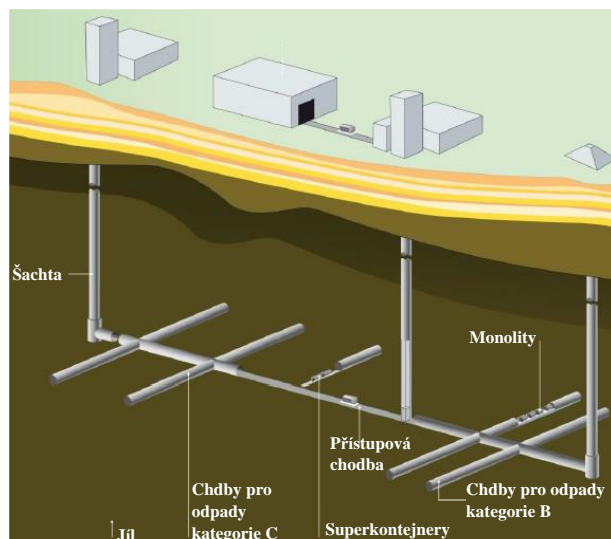
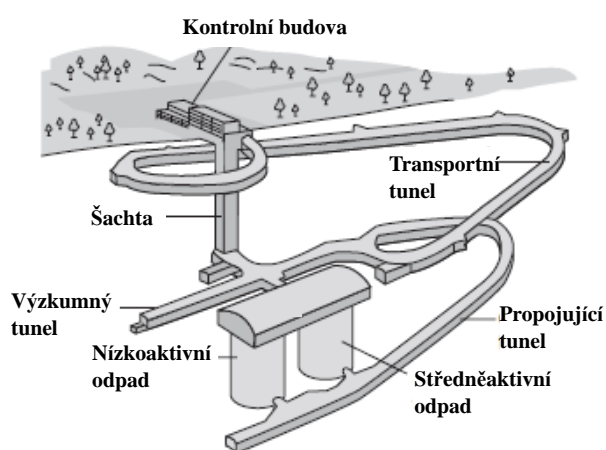
3.3 Finsko

Rozdělení radioaktivních odpadů

Odpady jsou ukládány podle následujícího rozdělení: vyhořelé jaderné palivo (patří do hlubinného úložiště), nízko a středně aktivní odpady – v této kategorii se dělí podle aktivity, pokud je menší než 100 kBq/kg, je odpad ukládán do přípovrchových úložišť nebo jeskyní, pokud je aktivita větší, měly by být uloženy středně hluboko pod povrchem. [17]

Ukládání

Podle Finských předpokladů, by měla úložiště nízko a středně aktivních odpadů vybudována v lokalitách blízkých jaderným elektrárnám Olkiluoto (obr. 18a) a Loviisa. V komplexu hlubinného úložiště, by v hloubce přibližně 180 m mělo být vybudováno úložiště nízko a středně aktivního odpadu. Podle očekávání, by zavážení vyhořelého jaderného paliva do úložiště mělo začít v roce 2025. Odpad bude ukládán ve velkoobjemových komorách, kde obalové soubory budou skládány na sebe. V přidavných betonových jímkách budou uloženy středněaktivní odpady. Když dojde k zaplnění komory, bude uzavřena a zasypana drcenou horninou. [17]



Obr. 18 – a) úložiště v Olkiluoto, převzato a upraveno z [2], b) úložiště v Belgii, převzato a upraveno z [17]

3.4 Francie

Rozdělení radioaktivních odpadů

Ve Francii dělí odpady podle tabulky 1.

Tab. 1 Rozdělení odpadů ve Francii [17]

Kategorie	Velmi krátkodobé odpady	Krátkodobé odpady	Dlouhodobé odpady
Velmi nízkoaktivní odpady	Uložení do vymíracích místností a jejich následné vypuštění do biosféry	Povrchové úložiště pro velmi nízkoaktivní odpad	
Nízkoaktivní odpady		Povrchové úložiště pro nízko a středně aktivní odpad	Přípovrchové úložiště
Středněaktivní odpady			
Vysokoaktivní odpady	Neaplikovatelné	Hlubinné úložiště	

Vysokoaktivní odpady pochází z přepracování použitého jaderného paliv a bývají fixovány ve skleněné matici. [17]

Ukládání

Koncept hlubinného úložiště předpokládá, že v něm budou uloženy společně vysokoaktivní odpady (pro tento typ budou vybudovány tunely přibližně 100 m dlouhé a jeden metr široké) i dlouhodobé středněaktivní odpady (ty budou uloženy v tunelech přibližně 500 m dlouhých a 10 m širokých), jak lze vidět v tab. 1, oba typy budou ve stejné hloubce. Po zaplnění budou tunely zasypany bentonitem a uzavřeny zátkami. [17]

Primární obalové soubory jsou kovové, pro dlouhodobé středněaktivní odpady je vnější obal betonový a pro vysokoaktivní odpady kovový. Předpokládá se, že všechny manipulace s odpadem v úložišti budou ovládány dálkově. [17]

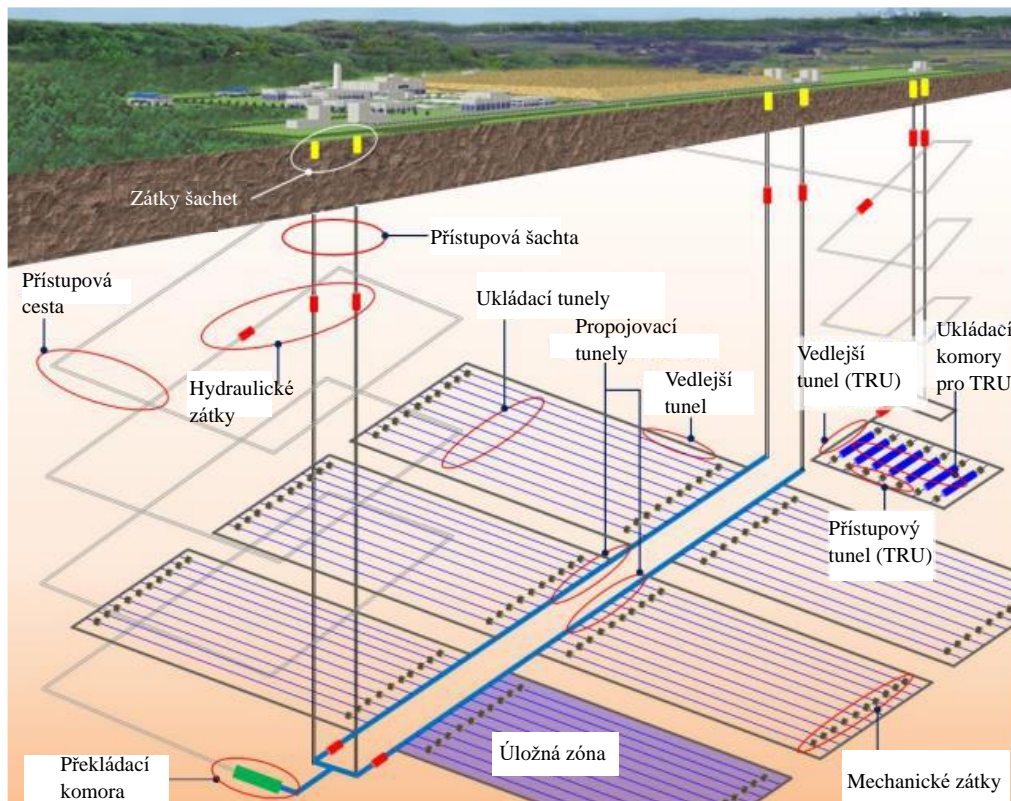
3.5 Japonsko

Rozdělení radioaktivních odpadů

V Japonsku jsou odpady děleny na dvě hlavní kategorie: vysokoaktivní (vitřifikovaný odpad z přepracování paliva) a nízkoaktivní (vše ostatní). Nízkoaktivní odpad je následně dělen do dalších čtyř kategorií: LLW3 (ekvivalentní velmi nízkoaktivním odpadům), LLW2 (nízkoaktivní odpady), LLW1 (středněaktivní odpady) a TRU odpady (kontaminovaný materiál z přepracování, který nespadá do hlavní kategorie vysokoaktivního odpadu). [17]

Ukládání

LLW3 může být uloženo ve vyhloubených příkopech bez dodatečné inženýrské bariéry, LLW2 bývá ukládán do 50 m pod zemí, LLW1 musí být uložen hlouběji než 50 m pod zemí a TRU odpady a vysokoaktivní odpady musí být uloženy v hlubinném úložišti. Vitřifikované odpady budou v úložišti uloženy ve vrtech, zasypány bentonitem a uzavřeny mechanickou zátkou. Jako alternativní výplňový materiál může sloužit pryskyřice nebo malta, ale jejich bezpečnost prozatím nebyla prověřena. Pracuje se na dvou metodách zavážení a zatěsňování obalových souborů do vrtu: H12, která předpokládá zavezení obalového souboru z uhlíkové oceli a utěsnění bentonitem; PEM, která předpokládá s použitím superkontejneru, který bude do úložiště zavezen jako celek. TRU odpady budou ukládány v horizontálních vrtech a podle aktivity a druhu odpadu budou zahrnovat inženýrské bariéry fixační matici v primárním obalovém souboru, ukládací obalový soubor, fixační materiál, konstrukční prvky z betonu a pro některé případy může být vhodným výplňovým materiálem i bentonit. Japonský koncept zobrazen na obr. 19. [17]



Obr. 19 – Koncept úložiště v Japonsku, převzato a upraveno z [17]

3.6 Jihoafrická republika

Rozdělení radioaktivních odpadů

Jihoafrická republika má šest základních tříd radioaktivního odpadu, které jsou podobné obecnému rozdělení odpadů podle MAAE: vysokoaktivní odpady, středněaktivní odpady, nízkoaktivní odpady, velmi nízkoaktivní odpady, odpady osvobozené od další radiační kontroly a přechodně aktivní odpady. [2]

Ukládání

Na národní úrovni zatím nebylo rozhodnuto o hlubinném úložišti, tedy žádné úložiště pro vysokoaktivní odpady není postaveno a prozatím pro něj neexistují žádné plány. [2]

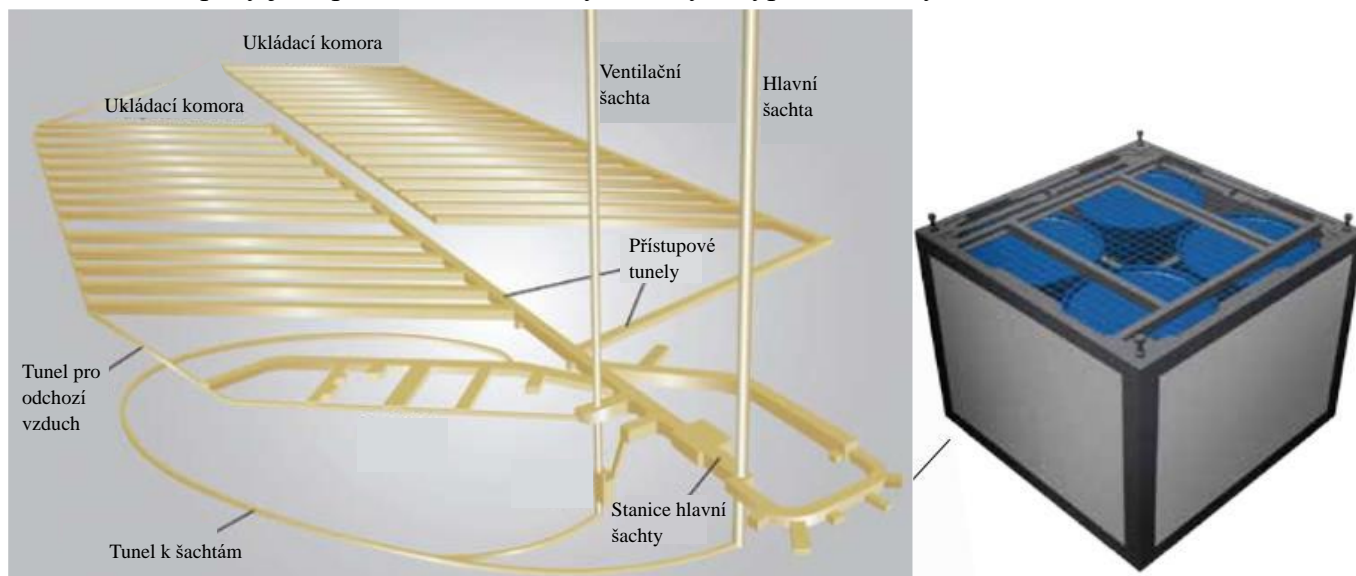
3.7 Kanada

Rozdělení radioaktivních odpadů

V kanadském systému rozeznáváme čtyři základní skupiny: nízkoaktivní odpady (obsahují hlavně krátkodobé radionuklidy), středněaktivní odpady (obsahují významné množství dlouhodobých radionuklidů), vysokoaktivní odpady (vyhořelé jaderné palivo) a odpad z těžby a zpracování uranu. [17]

Ukládání

Středněaktivní odpady mají být uloženy do samostatného hlubinného úložiště v krystalické hornině v hloubce 680 m, koncept je znázorněn na obr. 20a. Úložiště by mělo mít dvě sekce, které budou mít čtrnáct a sedmáct 250 m dlouhých komor s průřezem o výšce 7 m a šířce 8 m. Po zaplnění budou komory uzavřeny bentonitovou zátkou. Při uzavírání úložiště budou chodby zasypány materiálem na bázi cementu. V roce 2020 nebyla schválena lokalita úložiště. Odpady jsou prozatím skladovány v různých typech obalových souborů. [17]



Obr. 20 – a) koncept Kanadského hlubinného úložiště, převzato a upraveno z [17], b) obalové soubory používané v úložišti v Bataapáti, převzato z [17]

3.8 Maďarsko

Rozdělení radioaktivních odpadů

Maďarsko rozlišuje tři základní typy: nízko a středně aktivní odpady s limitovaným obsahem dlouhodobých radionuklidů a alfa zářičů, nízko a středně aktivní odpady s obsahem dlouhodobých radionuklidů, vysokoaktivní odpady. [17]

Ukládání

Účelem hlubinného úložiště v Maďarsku je uložení vyhořelého jaderného paliva a ostatních odpadů, které nejsou vhodné do národního úložiště. Toto hlubinné úložiště by se

mělo nacházet v jílové hornině a mělo by začít fungovat v roce 2064. Všechny informace zatím nebyly specifikovány, ale úložiště by mělo být v hloubce 500 až 800 m a chodby by měly být vyztuženy prvky na bázi cementu. Do vertikálních vrtů bude vyhořelé palivo ukládáno v obalových souborech s měděným přebalem a bude skládáno na sebe. Zmíněné národní úložiště (přesněji úložiště v Bátaappáti) je podpovrchové, v hloubce 200 až 250 m, a nachází se v granitové hornině. Odpad se do něj ukládá v primárních obalových souborech, které jsou vloženy do betonového kontejneru s ocelovou konstrukcí, ten je na obr. 20b. V obou úložištích při uzavírání dojde k zaplnění směsí bentonitu a vytěžené horniny o vhodné zrnitosti. [17]

3.9 Německo

Rozdělení radioaktivních odpadů

Klasifikace pro uložení v Německu odpovídá té MAAE, zmíněné v kapitole 1.2.3. [17]

Ukládání

Nízko a středně aktivní odpady budou uloženy v dole KONRAD. V hloubce 800 až 1300 m bude vykopáno 5 ukládacích komor, které budou mít každých cca 50 m oddělovací betonové stěny. Odpad bude stabilizován zálivkou z cementu. Podle typu odpadu budou různé druhy obalových materiálů: pro ionexy, koncentráty a kaly budou použité litinové soubory MOSAIK; pro pevný odpad je určen kovový obalový soubor UBA s betonovým stíněním. [17] Pokud by Německo stavělo hlubinné úložiště pro vysokoaktivní odpad, bylo by v solné hornině. Když Německo začínalo s hledáním úložiště pro vysokoaktivní odpad s generací tepla, byla vybraná lokalita Gorleben, ta je však se současnými zkušenostmi nevyhovující. [27]

3.10 Nizozemsko

Rozdělení radioaktivních odpadů

Nizozemský systém klasifikace je o něco komplikovanější než všechny doposud zmíněné. Odpad se primárně rozděluje na nízko a středně aktivní odpady (které se následně dělí na lisované odpady, imobilizované tekuté odpady, ochuzený uran a kapalné molybdenové odpady) a vysokoaktivní odpady (ty se dělí na ty se zanedbatelnou generací tepla a s zanedbatelnou generací tepla). Všechny tyto odpady jsou ještě děleny podle původu nebo způsobu zpracování. [17]

Ukládání

Předpokladem je, že provoz úložiště bude zahájen v roce 2130. Úložiště se bude nacházet v sedimentární hornině a bude zpevněno betonovými segmenty. Odpady do něj budou ukládány v superkontejnerech z uhlíkové oceli, ve kterých se budou nacházet dva primární obalové soubory s vysokoaktivním odpadem nebo jeden primární obalový soubor s vyhořelým jaderným palivem (na obr. 21 vpravo nahoře). Ten bude umístěn v betonovém kontejneru s nerezovým obalem. Na obrázku 21 jsou tři další varianty: vlevo nahoře – superkontejner s vitrifikovaným odpadem nebo s kovovým aktivovaným odpadem; vlevo dole – 1000l kontejnery z betonu nebo 200l kontejnery z magnetitu; vpravo dole – Kontejnery s ochuzeným uranem. Všechny typy odpadu budou ve stejné úrovni. Národní strategie předpokládá dobu skladování odpadu před uložením na 100 let. [17]

3.11 Rusko

Rozdělení radioaktivních odpadů

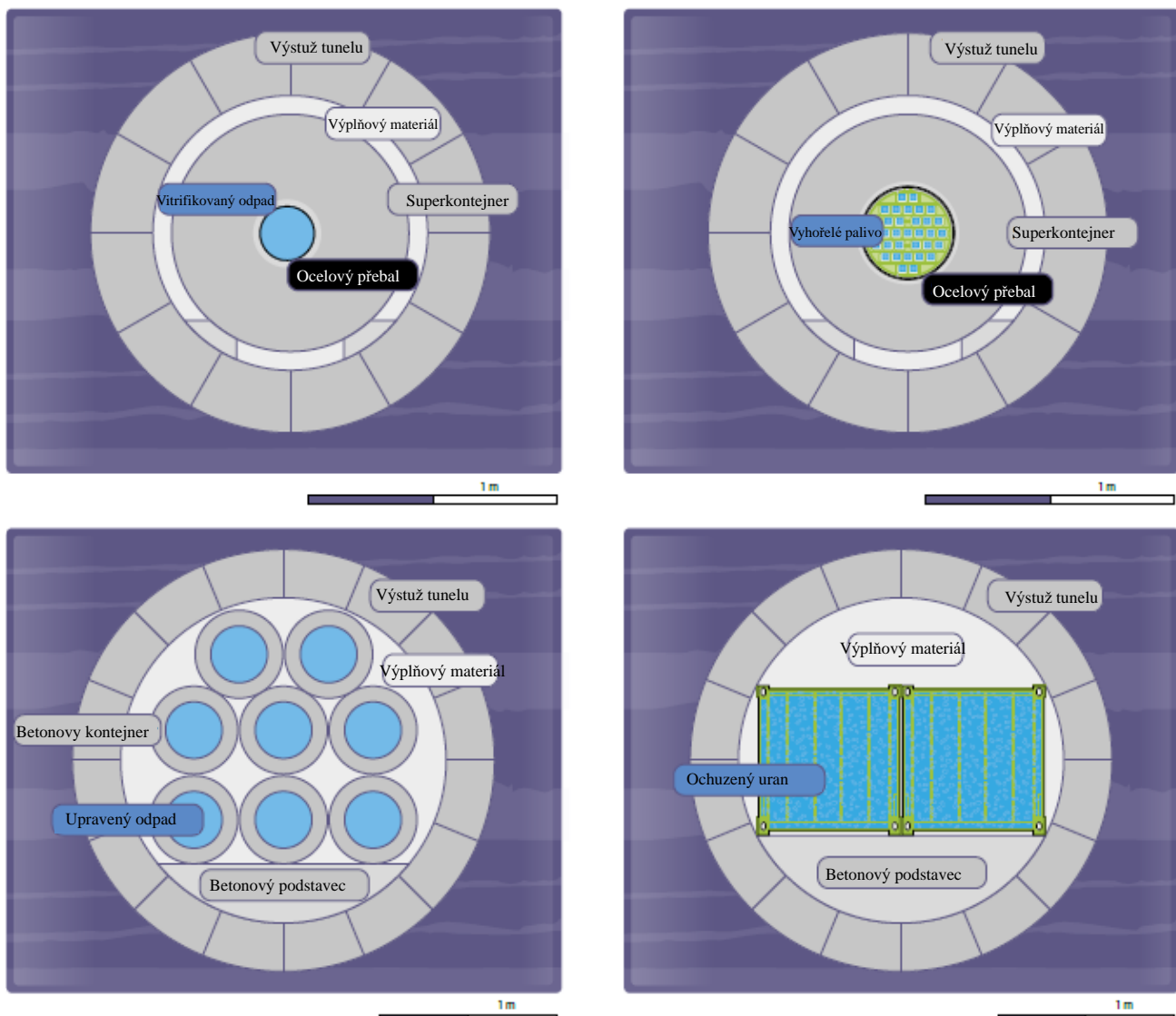
V ruském systému rozdělení existují dvě skupiny: speciální, které nemají další využití a vyjmutelné, které se dají dále využít. Vyjmutelné se dále dělí do dalších šesti: třída 1 jsou vysokoaktivní odpady s zanedbatelnou generací tepla; třída 2 jsou pevné středněaktivní a vysokoaktivní odpady, jejichž poločas přeměny je delší než 31 let, tento typ stále musí být uložen do hlubinného úložiště; třída 3 – nízko a středně aktivní odpady s dlouhodobými

radionuklidy, u kterých stačí úložiště v hloubce do 100 m; třída 4 – nízko a velmi nízko aktivní odpady vhodné do přípovrchových úložišť; třída 5 – kapalně nízko a středně aktivní odpady, které se injektují do vrtů; třída 6 – odpady vznikající při těžbě a zpracování uranové rudy. [17]

Ukládání

Rusko je jeden z mála států, které mají na svém území všechny části jaderného palivového cyklu. Upravené odpady jsou uloženy do nádob pro transport, které jsou zároveň vyplněny dalším materiálem, tyto balíky jsou uloženy do úložiště chráněného před vnikem vody, existují tři typy úložišť: přípovrchové, *well-type* a *drill-type*. Ty jsou dále zabezpečeny dalšími bariérami, které mají zamezit kontakt odpadu s venkovním okolím. [2]

Kolem roku 2011 byla dokončena stavba nového typu úložiště, jedná se o povrchový bunkr z železobetonu, který je uvnitř rozdělen na 20 autonomních částí. Úložiště je spolehlivě chráněno před deštěm a záplavami, údržba a sledování je jednodušší, a je možné vyzvednutí odpadu. Odpad je před uložením imobilizován v cementové matici a vložen do vyztužených kontejnerů s dlouhou životností a zalit speciálním betonem. Komplex je vybaven ventilací, třemi systémy pro odvodňování a filtraci vody. Odpad může být skladován po 50 let, pokud bude rozhodnuto bunkr využít jako úložiště, prostor mezi nádobami s odpadem bude zasypán bentonitem. [2]



Obr. 21 – Systém inženýrských bariér v Nizozemsku, převzato a upraveno z [17]

Předpokládá se, že hlubinné úložiště bude vybudováno v lokalitě Jenisejskij. Budou v něm společně uloženy odpady třídy 1 (budou uloženy ve vertikálních vrtech) a třídy 2 (odpad v ocelových kontejnerech bude umístěn v 15 až 20 m dlouhých chodbách). Přístupové chodby budou vyplněny drcenou horninou a samostatné vrty bentonitem. [17]

3.12 Slovensko

Rozdělení radioaktivních odpadů

Slovenský systém rozděluje radioaktivní odpady do pěti skupin: přechodně aktivní odpady, velmi nízkoaktivní odpady, nízkoaktivní odpady, středně aktivní odpady, vysokoaktivní odpady. Toto rozdělení odpovídá rozdělení podle MAAE, které je v kapitole 1.2.3 s výjimkou odpadů osvobozených od další radiální kontroly. [17]

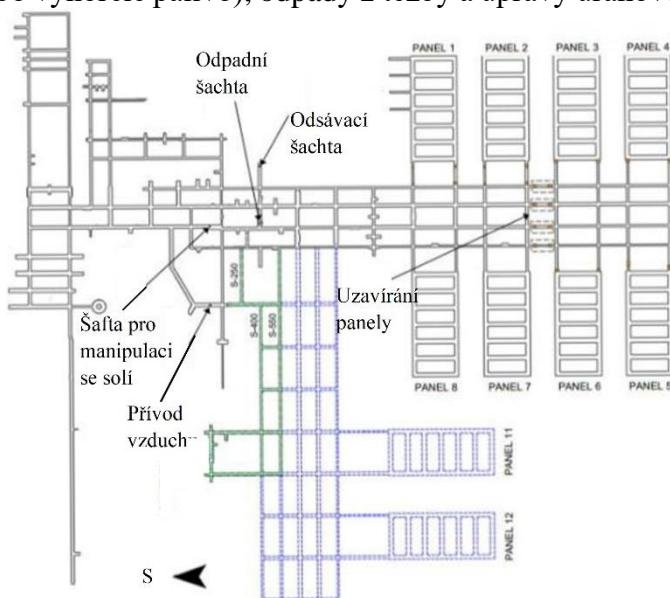
Ukládání

Slovensko volí tzv. „dvojitý přístup“, který počítá s alternativou k vlastnímu hlubinnému úložišti s mezinárodním hlubinným úložištěm. Ve vlastním úložišti by Slovensko skladovalo vysokoaktivní odpady a některé odpady z vyřazování jaderných elektráren, institucionální radioaktivní odpady a vyhořelé jaderné palivo. Úložiště by mělo být buď v krystalické nebo jílové hornině a v hloubce 500 m pod povrchem. Buď primárním obalovým souborem, nebo jako přebalem by byl vláknobetonový kontejner (na obr. 22a). Poté, co by komory v úložišti byly zaplněny, by byly vyplněny betonem nebo popílkem (směs jemně drcené horniny a pojiva), celá komora pak bude uzavřena betonovou příčkou s ocelovou trubkou u stropu, která slouží jako odvodušňovací a kontrolní otvor. [17]

3.13 Spojené státy americké

Rozdělení radioaktivních odpadů

Systém klasifikace odpadů v Americe je odlišný od klasifikace MAAE: nízkoaktivní odpad (zahrnující běžný provozní a institucionální odpad), TRU odpad (odpady z přepracování paliva), vysokoaktivní odpad (ozářené nebo vyhořelé palivo), odpady z těžby a úpravy uranové rudy. [17]



Obr. 22 – a) vláknobetonový kontejner, převzato a upraveno z [17], b) úložiště WIPP, převzato a upraveno z [17]

Ukládání

TRU odpad je ukládán přibližně 650 m v podzemí v úložišti WIPP (na obr. 22b) v solných formacích, je ukládán do oddělených sekcí. Sekce mají sedm 100 m od sebe vzdálených komor o výšce 4 m, šířce 10 m a délce 90 m. Po zaplnění se sekce uzavrou

betonovými přepážkami. Komory nejsou vyplněny, pouze do nich jsou umístěny pytle s absorbérem vlhkosti z MgO . Do úložiště je dopad ukládán v kovových přebalech, ve kterých může být i vyšší počet sudů. Spojené státy americké plánovaly postavit hlubinné úložiště pro vysokoaktivní odpad v Yucca Mountain, tento plán však nevyšel z mnoha důvodů a USA od něj odstoupily. [2, 17]

3.14 Švédsko

Rozdělení radioaktivních odpadů

Odpad je rozdělen do těchto kategorií: provozní nebo reaktorový odpad (sem spadá nízko a středně aktivní odpad, který vyžaduje izolaci minimálně po 500 let), odpad z vyřazování z provozu (tento odpad bude vznikat při vyřazování jaderných elektráren z provozu a bude do něj spadat hlavně nízko a středně aktivní odpad, který musí být izolován po tisíce let) a vyhořelé jaderné palivo. Mimo tyto hlavní kategorie jsou ještě odpady i výzkumu, průmyslu a zdravotnictví. [2]

Ukládání

Švédsko má v plánu vybudovat tři úložiště: jedno pro odpad s obsahem krátkodobých radionuklidů, další pro odpady s obsahem dlouhodobých radionuklidů a třetí pro vyhořelé jaderné palivo. Úložiště pro odpad s obsahem dlouhodobých radionuklidů bude mít dvě ukládací komory, které každá budou mít jiný systém inženýrských bariér. První komora bude sloužit pro odpad vyřazování jaderných elektráren a po naplnění bude zaplněna cementovým výplňovým materiálem. Tato komora bude přibližně 134 m dlouhá, široká 20,6 m a vysoká 19,6 m. Druhá komora bude pro odpad z výzkumu, průmyslu a medicíny, tato komora bude po svém naplnění zaplněna bentonitem. Komora pro tento odpad bude 170 m dlouhá, 20,6 m široká a 18,4 m vysoká. Toto úložiště bude v hloubce 500 m a při ukončení jeho provozu budou ukládací prostory uzavřeny zátkami k mechanickému uzavření i izolaci. Do první komory budou odpady v kontejnerech, jejichž parametry se mohou měnit podle typu odpadu. Do druhé komory budou odpady putovat v obalovém souboru spíše paletového typu. Toto úložiště by mělo začít fungovat v roce 2045. [17]

Ve Švédsku taky bylo postaveno první úložiště svého druhu SFR (obr. 23). Nachází se 50 m pod dnem Baltského moře a je naplněno bentonitem, aby se zabránilo vniknutí vody. Odpad do tohoto úložiště je solidifikován do cementové nebo bitumenové matrice a vložen do ocelových sudů. [2]

Při výběru úložiště pro vyhořelé jaderné palivo Švédsko vybíralo z osmi lokací a během jejich zkoumání bylo zjištěno, že pro vyhovující úložiště byly místní podmínky důležitější než specifické geologické prostředí. Esenciálním pro stavbu úložiště byla domluva s obyvateli v dané lokaci (několik lokalit bylo vyřazeno právě z důvodu odmítnutí místní komunity). V roce 2009 bylo rozhodnuto, že úložiště bude v lokalitě Forsmark. Do tohoto úložiště by se měly ukládat kontejnery s měděnou vrstvou pro chemickou stabilitu a železnou výztuž, která by měla zajistit mechanickou stabilitu. [2]

3.15 Švýcarsko

Rozdělení radioaktivních odpadů

Ve Švýcarsku rozdělují dvě hlavní kategorie radioaktivních odpadů: vysokoaktivní odpad (vyhořelé jaderné palivo a odpady z přepracování), nízko a středně aktivní odpad. [17]

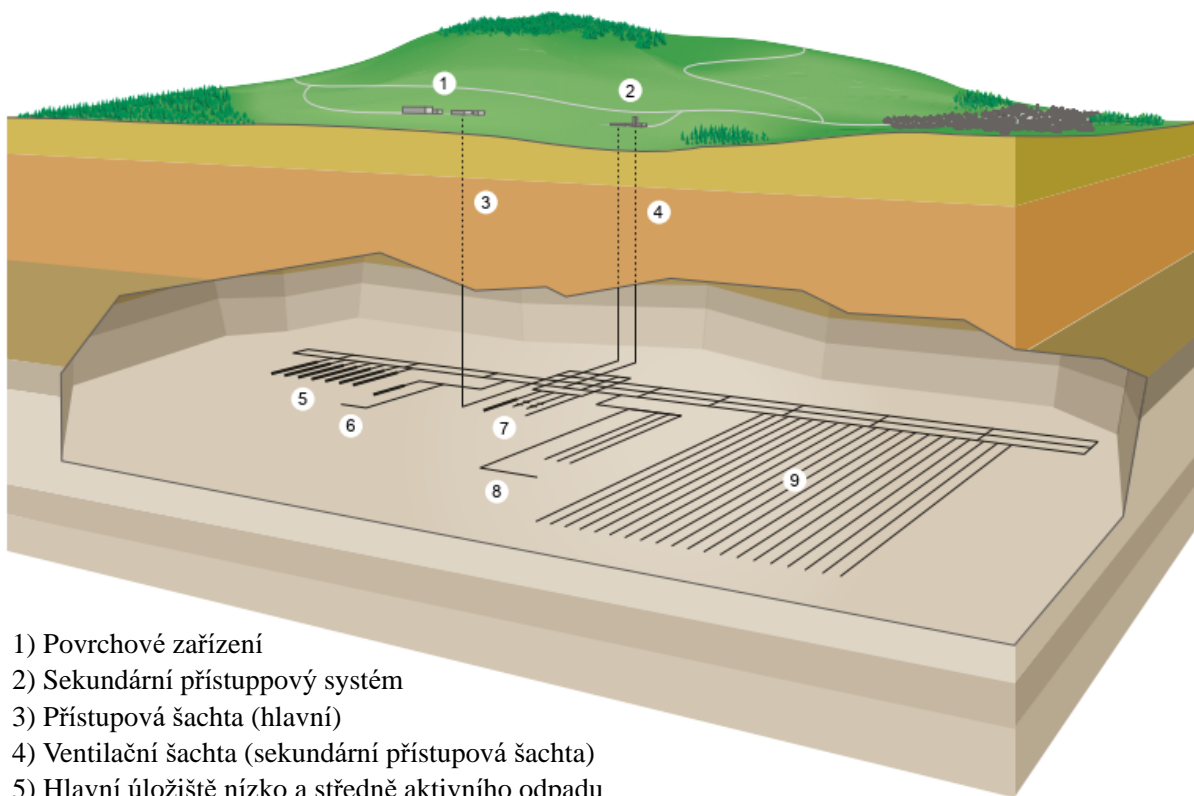
Ukládání

Oba zmíněné typy odpadu musí být uloženy v hlubinném úložišti, to chce Švýcarsko vybudovat v sedimentárních horninách (úložiště na obr. 24). Úložiště by mělo být rozděleno na části, aby od sebe kategorie odpadů byly odděleny, kvůli jejich různým vlastnostem, obě části by však měly být na stejném ukládacím horizontu se společnou obslužnou částí. Nízko a středně aktivní odpady budou uloženy v kavernách 150 až 300 m dlouhých a cca 8 m širokých. Odpad

v obalových souborech bude vkládán do betonových kontejnerů a ty budou skládány na sebe. Po zaplnění bude komora vyplněna cementovou maltou a uzavřena zátkou s mechanickou i těsnicí funkcí, takto bude při ukončení působení úložiště uzavřena i přístupová chodba. [17]



Obr. 23 – Úložiště SFR ve Švédsku, převzato z [56]



- 1) Povrchové zařízení
- 2) Sekundární přístupový systém
- 3) Přístupová šachta (hlavní)
- 4) Ventilační šachta (sekundární přístupová šachta)
- 5) Hlavní úložiště nízko a středně aktivního odpadu
- 6) Pilotní tábor pro nízko a středně aktivní odpad
- 7) Podzemní výzkumné a zkušební středisko
- 8) Pilotní tábor pto vysokoaktivní odpad
- 9) Úložiště vysokoaktivního odpadu

Obr. 24 – Koncept úložiště ve Švýcarsku, převzato a upraveno z [17]

3.16 Velká Británie

Rozdělení radioaktivních odpadů

V základu rozděluje Velká Británie odpady do čtyř kategorií: vysokoaktivní, středněaktivní, nízkoaktivní a velmi nízkoaktivní. Z pohledu konečného uložení odpadu, je pak rozděluje na další skupiny: odpad s nižší aktivitou (sem patří velmi nízkoaktivní odpad a nízkoaktivní odpad) a odpad s vyšší aktivitou (sem spadá vysokoaktivní, středněaktivní a část nízkoaktivního odpadu), ten se také dělí podle generace tepla na odpad s vysokou produkcí tepla (vyhořelé jaderné palivo a odpady z přepracování) a odpad s nízkou produkcí tepla (část nízko a středně aktivních odpadů, jako je ochuzený uran). [17]

Ukládání

Obě podkategorie odpadů s vyšší aktivitou se uvažuje umístit do stejného úložiště. Velká Británie zatím nemá vybranou horninu pro své hlubinné úložiště a shromažďuje informace o všech možnostech a teprve při výběru hostitelské horniny bude rozhodnuto o technických specifikacích. Prozatím se ví, že se úložiště bude nacházet v hloubce 500 až 650 m pod zemí a že sekce pro dvě podkategorie odpadu s vyšší aktivitou od sebe budou vzdáleny přibližně 500 m. Pro odpady s nízkou produkcí tepla existuje mnoho variant obalového souboru, ale hlavními možnostmi jsou: nestíněné obalové soubory, stíněné obalové soubory a robustní stíněné obalové soubory. [17]

Tab. 2 Způsob uzavírání úložiště ve Velké Británii, převzato a upraveno z [17]

	Krystalické horniny	Sedimentární horniny	Evapority
Výplňový materiál v sekci s vysokou produkcí tepla	Bentonit – bloky a pelety	Bentonit – pelety	Drcená hornina
Výplňový materiál v sekci s nízkou produkcí tepla	Portlandský cement s jemným kamenivem obsahující drcené vápencové plnivo a hydratované vápno (NRVB)	Cementová zálivka	Bez výplně, mimo absorberů vlhkosti
Zátky	Zhutněný bentonit s betonovými konstrukčními prvky	Zhutněný bentonit s betonovými konstrukčními prvky	Betonová stěna
Výplň přístupových chodeb	Drcená hornina	Bentonit s pískem	Drcená hornina

DISKUSE

Jak naložit s vyhořelým jaderným palivem je otázka, kterou si musí položit všechny národy, které používají jaderné elektrárny. Právě vyhořelé jaderné palivo je z radioaktivních odpadů nejnebezpečnější a musí být izolováno po nejdélejší dobu. Existuje zde možnost palivo přepracovat a využít zbylý štěpitelný materiál, to však s sebou přináší řadu problémů, jako je potřeba speciálního zařízení na přepracování a jeho zabezpečení pro zacházení s vysokoaktivním odpadem. Možnost přepracovat použité jaderné palivo si zvolili ve Velké Británii, Francii a Rusku [2]. V České republice se v tuto chvíli použité jaderné palivo nepřepřacovává a jestli se to někdy změní je mimo naše znalosti.

Druhá možnost, kterou volí většina národů a je nevyhnutelná i pro národy, které zvolily možnost přepracování, je hlubinné úložiště. Hlubinné úložiště bylo zvoleno jako nejlepší varianta bezpečného uložení vysokoaktivních odpadů s našimi současnými technologiemi a vědomostmi. Existuje možnost, že s pokroky ve vědě zjistíme, že existuje lepší a bezpečnější varianta, jak naložit s vyhořelým jaderným palivem. S tímto vývojem se v současnosti počítá, a proto mnoho zemí volí „vyčkávací metodu“, kdy vysokoaktivní odpad skladují bez rozhodnutí, jestli bude přepracován nebo uložen. Podle některých autorů je toto nezodpovědné vůči následujícím generacím [27].

Problematika hlubinného úložiště je v tom, že vyhořelé jaderné palivo je nebezpečné i po několika desítkách miliónů let a my musíme bezpečnost pro okolí ideálně po celou tuto dobu. Z některých nalezišť uranu, například ložisko 430 m pod Cigar Lake v Kanadě, je zřejmé, že hlubinné úložiště to může zaručit [4]. Tam se před 1,3 miliardami let vzniklo ložisko uranové rudy, to leží v žulovém masivu a je překryto 30m vrstvou jílu, což způsobuje, že na povrch žádný uran nepronikl [4]. Všechny národy, které jadernou energii používají několik desetiletí, plánovaly nebo plánují hlubinné úložiště. Obecně se dá říct, že i když se všechny úložiště velice liší, cíle a postup je vždy stejný. Přestože se geologie všech států liší, celosvětově se používají tyto horniny: měkké horniny (jíl), tvrdé horniny (žula), solné horniny. Vždy se jedná o horninu, která je chemicky stabilní a která se po dobu, po kterou v ní bude úložiště, nebude měnit a hýbat. Vždy se používá multibariérový systém, i když ne vždy ty stejné bariéry.

Tato podobnost není náhodná a je způsobená MAAE, ta předepisuje doporučení a postupy, a většina členských států se jich drží. Proto jsou také viditelné podobnosti v rozdělení radioaktivního odpadu mezi jednotlivými státy.

Bylo řečeno, že úložiště bývají projektována a postavena obdobnými způsoby, a to způsoby, které jsou pro nás v dnešní době „best possible“ (v překladu nejlépe možné) a jaká je jejich reálná funkčnost se dozvíme až minimálně po několika desítkách let jejich aktivního fungování. Co se úložišť týče, je jedna věc jistá už nyní, se zkušenostmi, které máme: je důležitá otevřenost a upřímnost k zasažené veřejnosti. Při vybírání lokalit ve Švédsku měly jednotlivé lokality možnost odmítnout úložiště, a několik tak učinilo. Podle některých autorů, by měly všechny práce okolo stavby úložiště být veřejné, aby byla navázána důvěra mezi obyvateli a správou úložiště [27]. Také je podle nich možné, že výběr a plánování některých úložišť bylo zrušeno mimo jiné i kvůli nedůvěře obyvatelstva [27].

Otázka, na kterou si také nejsme schopni zodpovědět je, jestli by úložiště po svém uzavření mělo být nějak označeno. V tuto chvíli nejsme schopni říct, zdali za milión let bude stále existovat lidstvo, ale s jistotou víme, že vyhořelé palivo bude stále nebezpečné. Z tohoto důvodu se úložiště nestaví na místě potenciálních zdrojů, které by lidé v budoucnu mohli potřebovat (voda, rudy a další). Aby se nikdo nezkoušel do úložiště dostat, bylo by vhodné vytvořit varování, které vydrží po celou dobu, kdy vyhořelé jaderné palivo bude nebezpečné, v jazyce, který bude pochopitelný pro civilizaci, která v této době může být na zemi. Druhou myšlenkou však je, že by varování, ať už čitelná nebo ne, mohlo vzbudit zájem a zvědavost, v tomto případě by bylo lepší úložiště neoznačovat. [27]

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce byla zaměřená na komplexní analýzu problematiky radioaktivního odpadu, jeho rozdělení a metod pro přepracování, zpracování, skladování a trvalé uložení. Podrobná rešerše z mnoha zdrojů ukázala, že nakládání s radioaktivním odpadem je komplexní proces, který vyžaduje pečlivé plánování, dodržování přísných bezpečnostních opatření a aplikaci nejmodernějších technologií. Abychom byli schopni minimalizování rizik spojených s radioaktivním odpadem, je nezbytné kombinovat efektivní procesy, kterými si odpady projdou před svým uložením.

Radioaktivní odpady jsou rozdělovány podle skupenství, doby, po kterou je musíme izolovat, aktivity a původu, tyto způsoby dělení dále udávají, jakými metodami předúpravy, zpracování, úpravy, skladování, přepravování a ukládání radioaktivní odpad projde. Zpracování odpadu se soustředí na změnu vlastností odpadu a jeho zmenšení, úprava zajišťuje, aby odpad byl ve stavu vhodném k uložení. Odpady s krátkým poločasem přeměny lze eventuálně navrátit zpět do životního prostředí, ty, které mají obsah dlouhodobých radionuklidů, musíme izolovat po dlouhou dobu, nejčastěji v hlubinných úložištích. Detailní analýza ukázala, že nejvhodnější pro hlubinné úložiště jsou solné, jílové a žulové horniny, které poskytují stabilní izolované prostředí, které minimalizuje únik radioaktivních látek do biosféry. Méně nebezpečné radioaktivní odpady ukládáme do povrchových nebo přípovrchových úložišť. Klíčovou roli v bezpečném ukládání radioaktivních odpadů je multibariérový systém, který zajišťuje izolování odpadu i při selhání některé z bariér.

Porovnání jednotlivých metod ukládání odhalilo, že každý zvažovaný přístup může fungovat, pokud bude doplněn vhodnými inženýrskými bariérami. Neexistuje dokonalý přístup, který by fungoval pro každý národ. Pokud bychom porovnali jednotlivé typy úložišť, bylo by zřejmé, že povrchová a přípovrchová úložiště jsou ekonomičtější a snadněji přístupná, ale neposkytují takovou ochranu okolí, jako hlubinná úložiště, která jako jediná dokážou zajistit izolaci odpadu po potřebnou dobu. Hlubinná úložiště jsou prozatím jedinou metodou ukládání vyhořelého jaderného paliva, která se ve světě používá, přestože byly, jsou a budou studovány i jiné možnosti, s našimi současnými vědomostmi nejsme schopni lepšího přístupu. U vyhořelého jaderného paliva máme ještě druhou možnost a tou je přepracování, využívají ho pouze státy, které jsou velmi pokročilé v užívání jaderné energie. Samotný proces přepracování je velice nebezpečný a vyžaduje specializované zařízení, je to však způsob, jak lépe využít palivo.

Lze říct, že efektivní a bezpečné nakládání s radioaktivním odpadem, je nezbytné pro udržení mírového využívání jaderné energie. Pokračující výzkum a inovace v této oblasti jsou podstatné k zajištění bezpečnosti a ochrany životního prostředí. Úspěšné řešení problému radioaktivního odpadu vyžaduje globální spolupráci a sdílení nabytých znalostí, což nám umožní vyrovnat se s tímto náročným úkolem a zajistit udržitelnou budoucnost.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČESKO. § 3 odst. 2 písm. a) zákona č. 263/2016 Sb., atomový zákon - znění od 1. 1. 2024. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010–2024 [cit. 22. 4. 2024]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-263#p3-2-a>
- [2] LEE, William E.; OJOVAN, Michael I.; JANTZEN, Carol M. (ed.). *Radioactive waste management and contaminated site clean-up: Processes, technologies and international experience*. Elsevier, 2013.
- [3] OLŠANSKÝ, Václav. Příloha C – Obecný přehled radioaktivního záření a jeho zdrojů. In: *ČVUT DSpace* [online]. c2002-2016 [cit. 2024-04-22]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/104274/F2-D-2022-Olsansky-Vaclav-priloha-priloha%20C%20%281%29.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [4] SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ [SÚRAO]. *SÚRAO* [online]. c2024 [cit. 2024-03-25]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/>
- [5] *Classification of Radioactive Waste* [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009 [cit. 2024-05-11]. ISBN 978-92-0-109209-0. Dostupné z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1419_web.pdf
- [6] ČESKO. § 48 vyhlášky č. 307/2002 Sb., Státního úřadu pro jadernou bezpečnost o radiační ochraně - znění od 1. 12. 2012. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010–2024 [cit. 22. 4. 2024]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2002-307#p48>
- [7] ČESKO. § 91 vyhlášky č. 307/2002 Sb., Státního úřadu pro jadernou bezpečnost o radiační ochraně - znění od 1. 12. 2012. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010–2024 [cit. 22. 4. 2024]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2002-307#p91>
- [8] *Techniques and Practices for Pretreatment of Low and Intermediate Level Solid and Liquid Radioactive Wastes* [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1987 [cit. 2024-05-11]. ISBN 92-0-125087-8. Dostupné z: <https://www.iaea.org/publications/1375/techniques-and-practices-for-pretreatment-of-low-and-intermediate-level-solid-and-liquid-radioactive-wastes>
- [9] Radioactive Wastewater Treatment Technologies: A Review. *Molecules* [online]. 2023, **28**(4), 1-24 [cit. 2024-04-15]. ISSN 1420-3049. Dostupné z: doi:10.3390/molecules28041935
- [10] RAHMAN, R. O. Abdel, H. A. IBRAHIUM a Yung-Tse HUNG. Liquid Radioactive Wastes Treatment: A Review. *Water* [online]. 2011, **3**(2), 551-565 [cit. 2024-04-15]. ISSN 2073-4441. Dostupné z: doi:10.3390/w3020551
- [11] *Handling and Processing of Radioactive Waste from Nuclear Applications* [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001 [cit. 2024-05-11]. ISBN 92-0-100801-5. Dostupné z: <https://www.iaea.org/publications/6006/handling-and-processing-of-radioactive-waste-from-nuclear-applications>
- [12] Radioaktivní odpady. In: SKUPINA ČEZ. *Svět Energie* [online]. c2020 [cit. 2024-04-22]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jadernerne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/charakteristika-zdroje/radioaktivni-odpady>
- [13] KOLEKTIV. *Učební texty pro JE*. Chemie modul 2. Brno: 2024
- [14] BALÍČEK, Pavel. *Technologické možnosti vitrifikace radioaktivního materiálu* [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/22927/1/diplomova%20prace.pdf>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.

- [15] HORÚCKA, Róbert. Inovačné technológie na jadrovom zariadení TSÚ RAO. In: *Odpadové fórum* [online]. c2024 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://www.odpadoveforum.cz/TVIP2021/prispevky/123.pdf>
- [16] Treatment and Conditioning of Nuclear Waste. In: *World Nuclear Association* [online]. c2016-2023, updated April 2021 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/treatment-and-conditioning-of-nuclear-wastes.aspx>
- [17] POSPÍŠKOVÁ I., KRAJŇÁK M., VOZÁR M. (2022): Rešeršní studie pro zmapování přístupu k ukládání vysokoaktivních odpadů a ostatních odpadů obsahujících dlouhodobé radionuklidy – MS SURAO TZ 610/2022, Praha.
- [18] GNS GESELLSCHAFT FÜR NUKLEAR-SERVICE MBH. *GNS* [online]. b.r. [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.gns.de/en/>
- [19] *Storage of Radioactive Waste* [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006 [cit. 2024-05-11]. ISBN 92-0-106706-2. Dostupné z: <https://www.iaea.org/publications/7441/storage-of-radioactive-waste>
- [20] ZÁCHA, Pavel. Jaderná energetika (JE): Palivový cyklus. In: *Ústav energetiky Fakulty strojní ČVUT v Praze* [online]. [c2014-2024] [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/06/JE-prednaska-08-Zacha-LS-2015.pdf>
- [21] Storage and Disposal of Radioactive waste. In: *World Nuclear Association* [online]. c2016-2023, updated Tuesday, 30 April 2024 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-waste/storage-and-disposal-of-radioactive-waste>
- [22] BLAŽKOVÁ. Radioaktivní odpady a vyhořelé jaderné palivo. In: MUNI. *Monoceros* [online]. c2023 [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: <https://monoceros.physics.muni.cz/~blazkova/dp/Odpad.html>
- [23] Kontejnery pro transport a skladování použitého jaderného paliva. In: ŠKODA JS A.S. *ŠKODA JS* [online]. c2021 [cit. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://www.skoda-js.cz/reference/kontejnery-pro-transport-a-skladovani-pouziteho-jaderneho-paliva/>
- [24] Škoda JS vyvinula a dodala první vlastní kontejner na vyhořelé jaderné palivo. In: *Svaz průmyslu a dopravy České republiky* [online]. c2024 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://www.spcr.cz/muze-vas-zajimat/z-clenske-zakladny/12466-skoda-js-vyvinula-a-dodala-prvni-vlastni-kontejner-na-vyhorele-jaderne-palivo>
- [25] Transporting radioactive materials. In: *International Atomic Energy Agency* [online]. c1998-2023 [cit. 2024-05-06]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/topics/transporting-radioactive-materials>
- [26] Kontejnery pro skladování použitého paliva. In: *TechMagazin* [online]. 2020, 21. 2. 2020 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/47883>
- [27] LERSOW, Michael; WAGGITT, Peter. *Disposal of all forms of radioactive waste and residues*. Springer International Publishing, 2020.
- [28] *Safety of Radioactive Waste Disposal* [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2006 [cit. 2024-05-11]. ISBN 92-0-108206-1. Dostupné z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1261_web.pdf
- [29] *Úložiště Bratrství*. SÚRAO, 2015. Dostupné také z: https://www.surao.cz/wp-content/uploads/2019/03/brozura_BRATRSTVI_05.pdf
- [30] *Úložiště Richard*. SÚRAO, 2019. Dostupné také z: https://www.surao.cz/wp-content/uploads/2019/11/surao_brozura_richard_online.pdf
- [31] *Úložiště Dukovany*. SÚRAO, 2019. Dostupné také z: https://www.surao.cz/wp-content/uploads/2019/08/surao_brozura_dukovany_online-1.pdf

- [32] RODRÍGUEZ-PENALONGA, Laura; MORATILLA SORIA, B. Yolanda. A review of the nuclear fuel cycle strategies and the spent nuclear fuel management technologies. *Energies*, 2017, 10.8: 1235.
- [33] GIBB, Fergus GF. A new scheme for the very deep geological disposal of high-level radioactive waste. *Journal of the Geological Society*, 2000, 157.1: 27-36.
- [34] NEA Issue Brief: An analysis of principal nuclear issues. OECD. *Nuclear Energy Agency* [online]. c2024 [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.oecd-neo.org/brief/brief-03.html>
- [35] *Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste* [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2011 [cit. 2024-05-11]. ISBN 978-92-0-111510-2. Dostupné z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1483_web.pdf
- [36] LARSON, Lance N. *The front end of the nuclear fuel cycle: Current issues*. Congressional Research Service, 2019.
- [37] World Uranium Mining Production. In: *World Nuclear Association* [online]. c2016-2023, updated August 2023 [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx>
- [38] Radioactive Waste From Uranium Mining and Milling. In: U.S. EPA. *United States Environmental Protection Agency* [online]. last updated on february 15, 2024 [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/radtown/radioactive-waste-uranium-mining-and-milling>
- [39] PUCHNAR, Jiří. Těžba a zpracování uranu: část 1. In: OM SOLUTIONS S.R.O. *O energetice.cz* [online]. b. r. [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/tezba-zpracovani-uranu-cast-1>
- [40] TREBLÍK, Tomáš. *Palivový cyklus, efektivita a bezpečnost jaderných elektráren*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Pavel Milčák.
- [41] Heap Leach and Ion-Exchange Facilities. In: *United States Nuclear Regulatory Commission* [online]. b. r., Page Last Reviewed/Updated Wednesday, December 2, 2020 [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/materials/uranium-recovery/extraction-methods/heap-leach-ion-exchange.html>
- [42] Uranium mines and mills waste. In: GOVERNMENT OF CANADA. *Canada.ca* [online]. b. r., Date modified: 2023-08-09 [cit. 2024-04-08]. Dostupné z: <https://www.cnsccs.gc.ca/eng/waste/uranium-mines-and-millswaste/>
- [43] PUCHNAR, Jiří. Těžba a zpracování uranu: část 2. In: OM SOLUTIONS S.R.O. *O energetice.cz* [online]. b. r. [cit. 2024-04-08]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/tezba-zpracovani-uranu-cast-2>
- [44] KRASS, Allan S., et al. *Uranium enrichment and nuclear weapon proliferation*. Routledge, 2020.
- [45] MAKHIJANI, Arjun; CHALMERS, Lois; SMITH, Brice. Uranium enrichment. *Takoma Park, MD: Institute for Energy and Environmental Research for the Nuclear Policy Research Institute*, 2004.
- [46] CROSSLAND, Ian (ed.). *Nuclear fuel cycle science and engineering*. Elsevier, 2012.
- [47] Westinghouse rozšíří dodávky paliva na Ukrajinu. In: *Technický portál* [online]. b. r. [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodajstvi/westinghouse-rozsiri-dodavky-paliva-na-ukrajinu_28757.html
- [48] TRISO Particle Fuel. In: *Ultra Safe Nuclear* [online]. c2024 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://www.usnc.com/triso/>

- [49] OLANDER, D. Nuclear fuels—present and future. *Journal of Nuclear Materials*, 2009, 389.1: 1-22.
- [50] JEŽEK, Martin. *Palivový cyklus jaderné elektrárny Temelín* [online]. Brno, 2012 [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/11531>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Karel Katovský.
- [51] K problematice paliva na ETE. In: *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. 2007, 24. 05. 2007 [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://sujb.gov.cz/aktualne/detail/k-problematice-paliva-ete>
- [52] Projekce. In: *ŠKODA JS* [online]. c2021 [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://www.skoda-js.cz/reference/projekce/>
- [53] ROMANATO, Luiz Sergio, et al. Advantages of dry hardened cask storage over wet storage for spent nuclear fuel. 2011.
- [54] Čeští experti vyvinuli nové technologie pro budoucnost jaderné energetiky. In: *Technický portál* [online]. b. r. [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodajstvi/cesti-experti-vyvinuli-nove-technologie-pro-budoucnost-jaderne-energetiky_52976.html
- [55] Kam s jaderným palivem? Byznys za desítky miliard nabírá zpoždění. In: *Echo24.cz* [online]. c2024 [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://echo24.cz/a/iZ9fX/kam-s-jadernym-palivem-byznys-za-desitky-miliard-nabira-zpozdeni>
- [56] Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall behöver byggas ut. In: *SKB* [online]. b. r. [cit. 2024-05-22]. Dostupné z: <https://skb.se/projekt-for-framtiden/utbyggnad-av-sfr/>

SEZNAM POUŽITÝCH JEDNOTEK

Jednotky	Veličina
<i>eV, MeV, MWh</i>	Energie
<i>cm, m, km</i>	Délka
<i>W, kW, MW</i>	Výkon
<i>l, m³</i>	Objem
<i>°C</i>	Teplota
<i>MPa</i>	Tlak
<i>μSv/r, μSv/h, mSv/h</i>	Příkon dávkového ekvivalentu
<i>kBq/kg, Bq/g, kBq/g</i>	Měrná aktivita
<i>Bq/l</i>	Objemová aktivita

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 – Rozdělení radioaktivních odpadů v ČR, [6] vlastní zpracování
Obr. 2 – Vysokotlaký lis používaný na Slovensku, převzato z [15]
Obr. 3 – a) Yellow box (vlevo), b) MOSAIC (vpravo), převzato z [18]
Obr. 4 – a) UBA (vlevo), b) SBox (vpravo), převzato a upraveno z [18]
Obr. 5 – Kontejnery: a) ŠKODA 1000/19 (vlevo), převzato z [24]; b) ŠKODA 440/84 (vpravo), převzato z [26]
Obr. 6 – Schéma bariér v uložišti, upraveno z [2]
Obr. 7 – Mapa povrchových a přípovrchových úložišť v ČR (i uzavřených), převzato a upraveno z [29]
Obr. 8 – Způsob ukládání sud v sudu, používaný v uložišti Richard, převzato a upraveno z [30]
Obr. 9 – Úložiště Dukovany: a) koncept (vlevo), b) ukládání odpadu (vpravo), převzato z [31]
Obr. 10 – Ukládání odpadu v uložišti Bratrství, převzato z [29]
Obr. 11 – Všechny lokality zvažované pro stavbu hlubinného úložiště (červeně zvýrazněné jsou lokality, mezi kterými se vybírá od roku 2020), převzato a upraveno z [4]
Obr. 12 – Způsob ukládání vyhořelého jaderného paliva do úložiště, převzato a upraveno z [4]
Obr. 13 – Model plánovaného hlubinného úložiště, převzato a upraveno z [4]
Obr. 14 – a) naplnění ukládacích obalových souborů pro jednotlivé elektrárny, b) postup před uložením paliva do vrtů, převzato a upraveno z [4]
Obr. 15 – Kanadská kalová nádrž, převzato a upraveno z [42]
Obr. 16 – a) Palivové pelety, převzato z [47], b) kuličkové TRISO palivo, převzato z [48]
Obr. 17 – a) bazén vyhořelého jaderného paliva, převzato z [54], b) suchý mezisklad, převzato z [55]
Obr. 18 – a) úložiště v Olkiluoto, převzato a upraveno z [2], b) úložiště v Belgii, převzato a upraveno z [17]
Obr. 19 – Koncept úložiště v Japonsku, převzato a upraveno z [17]
Obr. 20 – a) koncept Kanadského hlubinného úložiště, převzato a upraveno z [17], b) obalové soubory používané v uložišti v Bataapáti, převzato z [17]
Obr. 21 – Systém inženýrských bariér v Nizozemsku, převzato a upraveno z [17]
Obr. 22 – a) vláknobetonový kontejner, převzato a upraveno z [17], b) úložiště WIPP, převzato a upraveno z [17]
Obr. 23 – Úložiště SFR ve Švédsku, převzato z [56]
Obr. 24 – Koncept úložiště ve Švýcarsku, převzato a upraveno z [17]

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Rozdělení odpadů ve Francii [17]

Tab. 2 Způsob uzavírání úložiště ve Velké Británii, převzato a upraveno z [17]