VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2022 Jaroslav Michalica

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

STUDIE ALTERNATIVNÍHO KONCE JADERNÉHO PALIVOVÉHO CYKLU V ČR

STUDY OF ALTERNATIVE ENDING OF NUCLEAR FUEL CYCLE IN THE CZECH REPUBLIC

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Jaroslav Michalica

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Ondřej Šťastný

SUPERVISOR

BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Jaroslav Michalica ***ID:*** 211120

Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Studie alternativního konce jaderného palivového cyklu v ČR

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rešerše problematiky hlubinných úložišť (HÚ) a přepracování vyhořelého jaderného paliva (VJP)
2. Popis problematiky VJP na českých jaderných elektrárnách a jeho množství
3. Porovnání přibližných nákladů na uložení VJP v HÚ s variantou jeho přepracování a uložení vzniklých radioaktivních odpadů v přípovrchovém úložišti

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 7.2.2022 ***Termín odevzdání:*** 31.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Šťastný

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá alternatívnym koncom jadrového palivového cyklu v Českej republike. Na začiatku práce je vysvetlený jadrový palivový cyklus, rádioaktívny odpad, ako vzniká a ako ho rozdeľujeme. Nasleduje kapitola, ktorá sa zaoberá od vyvezenia vyhoretého paliva z reaktora cez jeho dočasné skladovanie až po jeho konečné uloženie v hlbinnom úložisku. V práci je následne vysvetlená aj alternatíva priameho ukladania vyhoretého jadrového paliva a to prepracovanie vyhoretého jadrového paliva. Sú tu vysvetlené metódy na prepracovanie vyhoretého jadrového paliva, ktoré existujú a ktoré sa v súčasnosti aj využívajú a aj to, kde sa nachádzajú závody na prepracovanie vyhoretého jadrového paliva. Záver práce sa venuje ekonomickému porovnavaniu priameho uloženia vyhoretého jadrového paliva s prepracovaním a uložením rádioaktívnych odpadov.

Kľúčové slová

Vyhoreté jadrové palivo, jadrový palivový cyklus, hlbinné úložisko, prepracovanie použitého jadrového paliva, jadrová elektráreň

Abstract

This bachelor thesis deals with the alternative end of the nuclear fuel cycle in the Czech Republic. At the beginning of the work, the nuclear fuel cycle is explained, then the radioactive waste, how it is produced, and how we divide it. This is followed by a chapter that deals with the removal of the used nuclear fuel, from its extraction from the reactor through its temporary storage until its final disposal in an underground waste repository. The work then explains the alternative of direct disposal of used nuclear fuel, namely reprocessing of used nuclear fuel. It explains the existing methods for the reprocessing of used nuclear fuel which are currently being used, and where the used nuclear fuel reprocessing plants are located. The conclusion of the thesis deals with the economic comparison of direct final disposal of used nuclear fuel with reprocessing and final disposal of radioactive waste.

Keywords

Used nuclear fuel, nuclear fuel cycle, deep geological repository, reprocessing of used nuclear fuel, nuclear powerplant

Bibliografická citácia

MICHALICA, Jaroslav. *Studie alternativního konce jaderného palivového cyklu v ČR*. Brno, 2022. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142382. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Ondřej Šťastný

Prehlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko študenta:	*Jaroslav Michalica*
VUT ID študenta:	*211120*
Typ práce:	*Bakalárska práca*
Akademický rok:	*2021/22*
Téma záverečnej práce:	*Studie alternativního konce jaderného palivového cyklu v ČR*

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práca a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobitných a som si plne vedomí následkov, porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúceho autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávnych dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa: 30. mája 2022 .....

podpis autora

Poďakovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Ondřejovi Šťastnému za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa: 30. mája 2022 .....

podpis autora

Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV **8**

ZOZNAM TABULIEK **9**

ÚVOD **10**

1. RÁDIOAKTÍVNY ODPAD A ZAOBCHÁDZANIE S NÍM **12**

1.1 JADROVÝ PALIVOVÝ CYKLUS 12
1.2 ROZDELENIE RÁDIOAKTÍVNEHO ODPADU 14
1.3 VYHORETÉ JADROVÉ PALIVO 15

2. UKLADANIE VYHORETÉHO JADROVÉHO PALIVA **16**

2.1 MEDZISKLAD VJP A RAO 16
2.1.1 Mokrý medzisklad *16*
2.1.2 Suchý medzisklad *17*
2.1.3 Medzisklady a sklady v ČR *17*
2.2 HLBINNÉ ÚLOŽISKO 19
2.2.1 Princíp návrhu *20*
2.2.2 Bariérový systém v hlbinných úložiskách *21*
2.2.3 Hlbinné úložisko v ČR *22*
2.2.4 Hlbinné úložiská v Európe *25*

3. PREPRACOVANIE VYHORETÉHO JADROVÉHO PALIVA **27**

3.1 PROCESY NA SEPARÁCIU URÁNU A PLUTÓNIA OD OSTATNÝCH ŠTIEPNYCH PRODUKTOV 28
3.1.1 Proces PUREX *29*
3.2 PALIVÁ VYROBENÉ Z ODSEPAROVANÉHO URÁNU A PLUTONIA 29
3.2.1 Palivo MOX *29*
3.2.2 Palivo ERU *30*
3.2.3 Palivo REMIX *30*
3.3 ZÁVODY NA PREPRACOVANIE VJP 30
3.3.1 Veľká Británia *31*
3.3.2 Francúzsko *31*
3.3.3 Rusko *32*

4. EKONOMIKA PREPRACOVANIE VS. PRIAME ULOŽENIE VJP V HLBINNOM ÚLOŽISKU **33**

4.1 PRIAME ULOŽENIE VJP V HLBINNOM ÚLOŽISKU 33
4.2 PREPRACOVANIE VJP A JEHO ULOŽENIE PO VIACNÁSOBNOM PREPRACOVANÍ 36
4.3 CELKOVÉ POROVNANIE NÁKLADOV 40
4.4 POROVNANIE NÁKLADOV NA PRIAME ULOŽENIE HÚ S VARIANTOU PREPRACOVANIA A ULOŽENÍM PRE ČR 43

5. ZÁVER **46**

LITERATÚRA **49**

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK **53**

ZOZNAM OBRÁZKOV

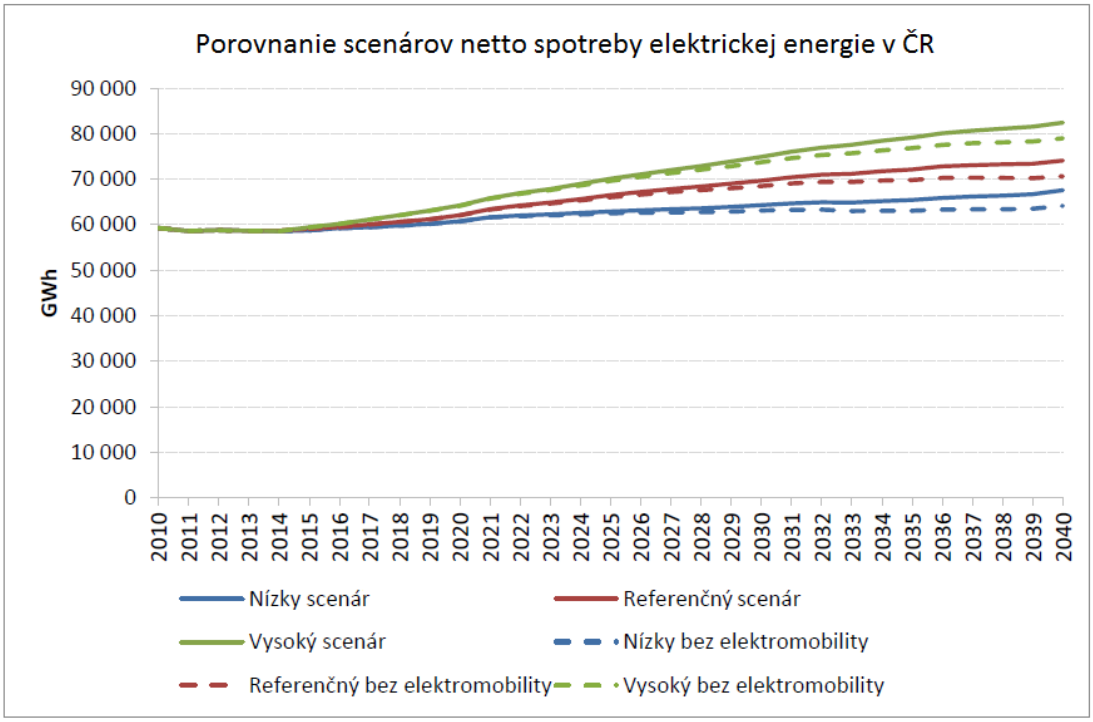
0.1 Porovnanie scenárov netto spotreby elektrickej energie v ČR [1] 10
1.1 Jadrový palivový cyklus [8] 13
1.2 Skladba pôvodného a vyhoretého jadrového paliva [12], upravené 15
2.1 Celková schéma hlbinného úložiska [23], upravené 21
2.2 Vybrané lokality v ČR pre hlbinné úložisko [24], upravené 24
2.3 Schéma hlbinného úložisko vo Fínsku [29], upravené 26
3.1 Rozpad rádioaktívneho odpadu v čase [30], upravené 27
3.2 Skladba paliva MOX [31], upravené 30
3.3 Závod na prepracovanie VJP v La Hague [36] 32
3.4 Závod RT-2 na prepracovanie VJP v Zheleznogorsku [38] 32
4.1 Vývoj nákladov na hlbinné úložisko [30], upravené 34
4.2 Vývoj nákladov na prepracovanie [30], upravené 37
4.3 Cenové rozpätie nákladov v $/kgTK použitých na prepracovanie VJP a následné uloženie RAO s nákladmi na priame uloženie VJP do HÚ 42
4.4 Celkový odhad nákladov na nakladanie s RAO a VJP [2] 44
4.5 Porovnanie celkových nákladov, ktoré by ČR zaplatila za HÚ alebo prepracovanie VJP a uloženie RAO pre existujúce zdroje s predĺženou životnosťou na 60 rokov 44
4.6 Porovnanie celkových nákladov, ktoré by ČR zaplatila za HÚ alebo prepracovanie VJP a uloženie RAO pre existujúce zdroje s predĺženou životnosťou na 60 rokov a nové zdroje 45

ZOZNAM TABULIEK

1.1 Typické množstvo rádioaktívnych odpadov vznikajúcich v jednotlivých etapách jadrového palivového cyklu, vzťahujúca sa na jednotkovú produkciu v jadrových elektrárňach * Objemy odpadov vzťahujúce sa na celé zariadenia, ktoré sú predmetom vyraďovania z prevádzky, závisle na ich výkone [7] 12
2.1 Predpokladaný harmonogram prípravy, výstavby a prevádzky hlbinného úložiska [2] 23
3.1 Komerčné závody na prepracovanie VJP vo svete a ich ročná kapacita v tonách [3] 27
4.1 Výsledky štúdií aktualizované do roku 2011 [30], upravené 33
4.2 Odhady nákladov na jednotlivé časti palivového cyklu a analýza citlivosti cien uránu a prepracovaného uránu [39] 35
4.3 Vypočítané hodnoty nákladov na priame uloženie VJP v HÚ 36
4.4 Vypočítané hodnoty nákladov na prepracovanie VJP a jeho uloženie 39
4.5 Bilancia VJP určeného k uloženiu do hlbinného úložiska [2] 43

ÚVOD

Elektrická energia je v dnešnej dobe tak dôležitá, že si väčšina ľudstva nevie bez nej predstaviť život a patrí ku každodennému životu každého z nás. Vo svete stúpa dopyt po elektrickej energii či už v priemysle, doprave, domácnostiach, energetike, stavebníctve, poľnohospodárove, atď. V každej domácnosti sa nachádza čoraz viac spotrebičov, v priemysle nastáva tzv. "robotizácia", v doprave pribúdajú autá na čisto elektrický alebo hybridný pohon. Aj vďaka tomuto trendu stúpa spotreba elektrickej energie a v najbližších desaťročiach tomu nebude inak nielen vo svete, ale aj v Českej republike, ako môžeme vidieť na obrázku 0.1. Na obrázku sú viaceré scenáre spotreby elektrickej energie, kde nízky scenár predpokladá spomalenie hospodárskeho rozvoja a rastu HDP, referenčný scenár mierny rast hospodárstva a vysoký scenár predpokladá zvýšený rast hospodárstva. Výrobcovia sa snažia zvýšiť účinnosť spotrebičov a propagovať úspornejšie spotrebiče a snahou každej krajiny je, aby sa stala sebestačnou a čo najmenej elektrickej energie nakupovala zo zahraničia.



Obrázok 0.1 Porovnanie scenárov netto spotreby elektrickej energie v ČR [1]

Existujúce jadrové elektrárne sa budú musieť v najbližších desaťročiach nahradiť novými jadrovými elektrárňami. A keďže celá Európska únia, do ktorej patrí aj Česká republika sa zaviazala na dosiahnutí nízkouhlíkového hospodárstva a najmä na nízkouhlíkovej energetike do roku 2050, budú uhoľné zdroje elektrickej energie postupne nahradzované nízko emisnými zdrojmi energie, medzi ktoré patrí aj energia vyrobená v jadrových elektrárňach, ktorá by v prípade ČR mala postupne nahradzovať

energiu vyrábanú spaľovaním uhlia. Z tohto dôvodu má výroba elektrickej energie z jadra budúcnosť, keďže pri štiepení jadra sa neprodukuje CO_2 do ovzdušia a preto je takto vyrobená energia ekologickejšia. Medzi ďalšie výhody jadrových elektrární patrí dlhá životnosť, vysoký faktor využitia, spoľahlivá, lacná a predvídateľná prevádzka, na úkor vysokej ceny výstavby, ktorá trvá desaťročia. Vďaka týmto výhodám sa Česká republika rozhodla ďalej rozširovať výrobu elektrickej energie z jadra, ktorou dnes dodáva 33% vyrábanej elektrickej energie. Ak to dovolí technický stav jadrovej elektrárne Dukovany bude jej predĺžená životnosť v existujúcich štyroch blokoch na 50 až 60 rokov. Nasledovne bude prebiehať príprava a následná realizácia nových jadrových blokov v existujúcich lokalitách jadrových elektrární s celkovým výkonom do 2500 MW, respektíve s ročnou výrobou vo výške cca 20 TWh. Jadrová energia by dlhodobo mohla presiahnuť 50% podielu na výrobe elektrickej energie a nahradiť tak významnú časť uhoľných elektrární. Pred odstavením jadrovej elektrárne Dukovany (po roku 2040) bude postavená nová elektráreň, pre ktorú budú lokality pripravené v najbližších desaťročiach [1]. Kvôli tomuto trendu sa Česká republika rozhodla ísť cestou ukladania vyhoretého jadrového paliva priamo do hlbinného úložiska, bez možnosti prepracovania. Do roku 2025 sa rozhodne o lokalite, kde sa bude nachádzať hlbinné úložisko [2]. Česká republika sa tak vyberie smerom, ktorým idú aj štáty ako napríklad Fínsko a Švédsko, kde sa už začalo s výstavbou hlbinného úložiska. Druhou alternatívou vyhoretého jadrového paliva je jeho prepracovanie, keďže obsahuje veľa cenných surovín, ktoré sa dajú využiť. Hlavnými výhodami prepracovania je zníženie objemu vysoko rádioaktívneho odpadu zhruba na jednu pätinu, úroveň rádioaktivity prepracovaného vyhoretého jadrového paliva je oveľa menšia a asi po 100 rokoch klesá rýchlejšie než pri neprepracovanom vyhoretom palive [3]. V nami zvolenom alternatívnom scenári by Česká republika odviezla vyhoreté palivo na prepracovanie do zahraničia (napríklad do Francúzska). Po viacerých prepracovaniach VJP, keď by už palivo nebolo ďalej možné prepracovať, bolo by uložené do povrchového úložiska, ktoré by sa nachádzalo v lokalite vyradených jadrových blokov.

Cieľom tejto bakalárskej práce je zaoberať sa problematikou hlbinných úložísk a prepracovaním vyhoretého jadrového paliva. Popísať problematiku vyhoretého jadrového paliva v českých jadrových elektrárňach. Zhodnotiť a porovnať približné náklady na uloženie v hlbinnom úložisku s variantov prepracovania a uloženia vzniknutých rádioaktívnych odpadov v povrchovom úložisku.

1. RÁDIOAKTÍVNY ODPAD A ZAOBCHÁDZANIE S NÍM

Rádioaktívny odpad predstavuje nevyužiteľný materiál, ktorý pre obsah rádionuklidov v ňom, alebo pre kontamináciu rádionuklidmi nie je možné uviesť do životného prostredia. Materiál obsahujúci rádionuklidy v množstve nepresahujúcom príslušné limity, stanovené predpismi, nie je považovaný za rádioaktívny odpad a môže byť uvoľnený do životného prostredia ako nerádioaktívny [4]. Rádioaktívny odpad vzniká vo všetkých fázach jadrového palivového cyklu. Rádioaktívne materiály sa vo veľkej miere používajú i v medicíne, poľnohospodárstve, výskume a výrobe. Na rozdiel od iných nebezpečných priemyselných odpadov sa úroveň rádioaktivity v rádioaktívnych odpadoch časom znižuje [5].

1.1 Jadrový palivový cyklus

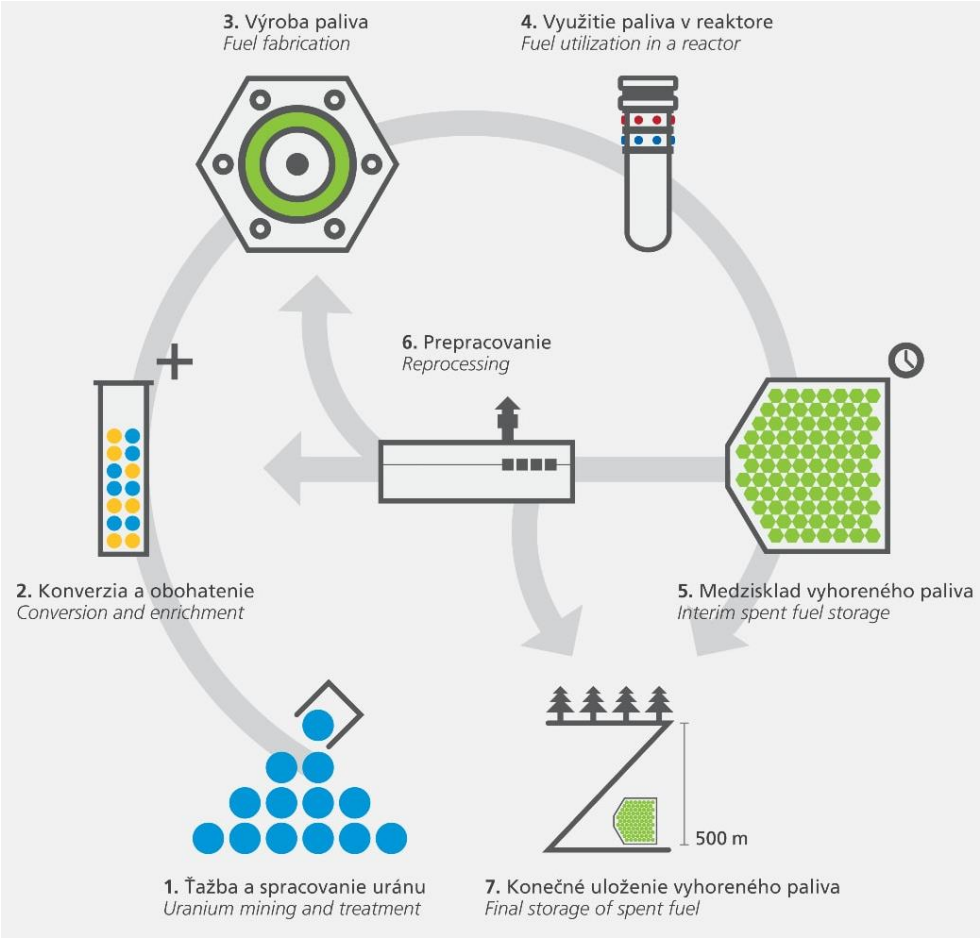
Palivový cyklus začína v baniach a lomoch na uránových a tóriových náleziskách, postupuje cez úpravu rudy k chemickej rafinácii jadrových palív, k ich izotopickému obohateniu a k výrobe palivových článkov. Uzatvára sa v závodoch na chemické prepracovanie vyhoretých jadrových palív. Fakticky však končí až v zariadeniach na likvidáciu a dlhodobé uskladnenie rádioaktívnych odpadov [6]. Cyklus sa delí na dve časti. Prednú časť tvorí ťažba, obohatenie a výroba paliva. Zadnú časť tvoria procesy s vyhoretým jadrovým palivom od vyvezenia z reaktora cez transport, dočasné skladovanie v medzisklade, prepracovanie až po trvalé uloženie v hlbinnom úložisku. Typické priemerné množstvo rádioaktívnych odpadov vzťahujúce sa na produkciu jadrovej energie je v tabuľke 1.1.

Tabuľka 1.1 Typické množstvo rádioaktívnych odpadov vznikajúcich v jednotlivých etapách jadrového palivového cyklu, vzťahujúca sa na jednotkovú produkciu v jadrových elektrárňach * Objemy odpadov vzťahujúce sa na celé zariadenia, ktoré sú predmetom vyraďovania z prevádzky, závisle na ich výkone [7]

Štádium palivového cyklu	Typ odpadu	Objem [m^3/GW]
Predná časť palivového cyklu		
Konverzie na hexafluorid	Kvapalný, pevný	30-70
Obohatenie	Plynný, kvapalný, pevný	15-40
Výroba dioxidu uránu	Kvapalný, pevný	60-80
Výroba zmesového paliva	Kvapalný	5-10
Prevádzka jadrových reaktorov		
Koncentráty	Kvapalný	40-80
Kaly	Pevný (mokrý)	5-20
Ionexy	Pevný (mokrý)	6-10
Dekontaminačné roztoky	Kvapalný	2-10
Pevné odpady	Pevný	100-300

Zadná časť palivového cyklu		
Prepracovanie		
Obaly palivových prútikov	Pevný	12-20
Tritiové výpuste	Kvapalný	50-70
Vysoko aktívne odpady	Kvapalné	20-30
Stredne aktívne odpady	Kvapalné	15-30
Nízko aktívne odpady	Kvapalné, pevné	50, 100
Priame uloženie		
Palivové články	Pevný	30 t ťažkého kovu
Vyradenie z prevádzky		
Výroba paliva	Pevný	5-10*
Jadrový reaktor	Pekný	300-500*

Palivový cyklus sa delí na uzavretý a otvorený. Pri uzavretom cykle sa vyhoreté palivo prepracuje a znovu použije. Vďaka prepracovaniu je oveľa menej vysoko rádioaktívneho odpadu. U otvoreného cyklu sa palivo neprepracováva, prehlási sa za rádioaktívny odpad, ktorý po určitej dobe skladovania je priamo uložený do vhodného hlbinného úložiska [7].



Obrázok 1.1 Jadrový palivový cyklus [8]

1.2 Rozdelenie rádioaktívneho odpadu

Existuje niekoľko spôsobov ako klasifikovať rádioaktívny odpad. Môžeme ich rozdeliť podľa fyzikálnych vlastností na odpady pevné, kvapalné a plynné alebo na odpady lisovateľné a nelisovateľné, spáliteľné a nespáliteľné. Podľa chemických vlastností rozoznávame odpady anorganické a organické, korozívne a nepodliehajúce korózii. Odpady môžeme klasifikovať aj podľa ich miesta vzniku [7].

Klasifikáciou rádioaktívnych odpadov sa zaoberá Medzinárodná agentúra pre atómovú energiu IAEA. V súčasnosti je platná kategorizácia rádioaktívnych odpadov:

Odpady o rádioaktivitách nižších než uvoľňovacie úrovne (EW) - u tohto druhu odpadu je rádioaktivita zanedbateľná a nevyžaduje kontrolu regulačného úradu [9].

Veľmi krátkodobý odpad (VSLW) - do tejto triedy patrí odpad obsahujúci rádionuklidy s veľmi krátkym polčasom rozpadu (do 100 dní). Odpad je rádioaktívny len niekoľko rokov [9].

Veľmi nízko aktívny odpad (VLLW) - obsahuje rádioaktívne materiály v množstve, ktoré nie je škodlivé pre ľudí a okolité prostredie. Sú to materiály ako betón, sadra tehly, kov atď., pochádzajúce z demontáže jadrových, chemických, oceliarskych priemyselných areálov. Odpad sa likviduje s domovým odpadom, ale krajiny ako Francúzsko v súčasnosti vyvíjajú špeciálne navrhnuté zariadenia na zneškodnenie takýchto odpadov [5].

Nízko aktívny odpad (LLW) - má rádioaktívny obsah nepresahujúci 4 GBq/t alfa žiarenia alebo 12 GBq/t beta-gama žiarenia. Patria tu zvyšky z rádioaktívnych prevádzok, ako sú kovy, papierové a plastikové obaly, náradie a ochranné obleky. Takýto odpad si nevyžaduje tienenie počas manipulácie a prepravy, je vhodný ja uloženie do povrchových úložísk. Spáliteľná časť týchto odpadov býva pred uložením spopolnená [5]. Polčas rozpadu nízkoaktívnych odpadov je asi 30 rokov [10].

Stredne aktívny odpad (ILW) - odpad je viac rádioaktívny, vyžaruje aj tepla (< 2 kW/m^3) na rozdiel od nízkoaktívneho odpadu [5]. Jedná sa o servisné materiály, ako sú povlaky paliva, konštrukčné materiály palivových súborov, nečistoty vo forme kalov, náplne kolón chemickej úpravy chladív, moderátorov, ale aj zariadenia na úpravu vyhoreného jadrového paliva. Počas manipulácie a prepravy tohto materiálu je nutné tienenie. Niektoré z týchto odpadov vyžadujú trvalé uloženie v hlbinnom úložisku, v ostatných prípadoch je možné použiť povrchové úložisko [10].

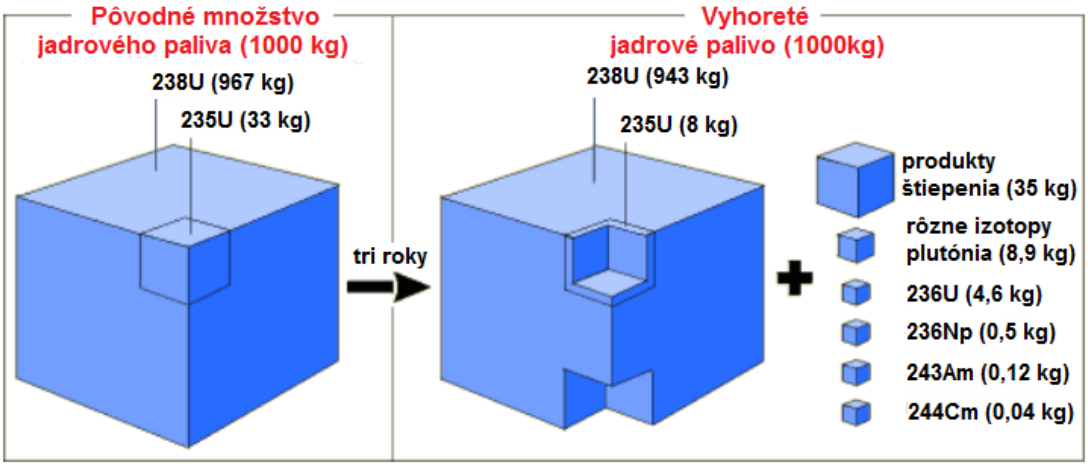
Vysokoaktívny odpad (HLW) - je to dostatočne rádioaktívny odpad nato, aby vyžarujúce teplo (> 2kW/m^3) významne zvýšilo jeho teplotu a aj teplotu okolia. Vysokoaktívny odpad predstavuje iba 3 % celkového množstva, ale až 95% celkovej rádioaktivity vyprodukovaného odpadu. Existujú dva druhy tohto odpadu: použité vyhorené palivo, ktoré bolo označené ako odpad a odpad z prepracovania použitého paliva. Počas manipulácie a prepravy vyžaduje nielen tienenie, ale aj chladenie [10].

Takýto odpad sa ukladá do úložísk.

Väčšina štátov používa starší, mierne odlišný systém klasifikácie odpadu, ktorý kombinuje úroveň aktivity a polčas rozpadu [9].

1.3 Vyhoreté jadrové palivo

O vyhoretom palive hovoríme, keď sa koncentrácia štiepnych fragmentov a ťažkých prvkov v palive zvýši natoľko, že už nie je praktické pokračovať v jeho používaní. Výmena paliva prebieha väčšinou pri zastavenom reaktore raz za 1 až 1,5 roku. Nahradí sa 1/4 až 1/3 palivových kaziet, ktoré sa nachádzali v reaktore 3 až 5 rokov za kazety s čerstvým palivom. Množstvo energie, ktoré sa vyrába z palivovej kazety sa líši podľa typu reaktora (VVER 440, VVER 1000, CANDU, atď.). Použité palivo sa navonok nelíši od čerstvého paliva, ale zmení sa jeho vnútorná štruktúra. Vyhoreté jadrové palivo stále obsahuje asi 96% pôvodného izotopu uránu ^{238}U, štiepny izotop uránu ^{235}U bol znížený na menej ako 1%. Asi 3% použitého paliva tvoria odpadové štiepne produkty a minoritné aktinidy, zvyšné 1% tvorí štiepny izotop plutónia ^{239}Pu [11]. Na obrázku 1.2 vidíme porovnanie pôvodného paliva a vyhoretého paliva.



Obrázok 1.2 Skladba pôvodného a vyhoretého jadrového paliva [12], upravené

Po odstránení z reaktora sa vyhoreté jadrové palivo premiestni do špeciálneho bazéna. Tu sa skladuje kvôli emitovaniu tepla zo štiepnych fragmentov. Špeciálny bazén môže byť typu AR (“at reactor“), teda bezprostredne susediaci s reaktorom. Bazén je naplnený demineralizovanou vodou s prímesou kyseliny boritej alebo niektorých antikoróznych prísad. Kvapalina chráni okolie pred žiarením a absorbuje teplo, ktoré sa odvádza cirkuláciou vody. Keďže dochádza k zaplneniu kapacity bazénov, jedným z riešení je budovanie medziskladov, tzv. skladovanie typu AFR (“away from reactor“), teda skladovanie mimo reaktor, mimo jadrovú elektráreň. Môžeme použiť veľkokapacitné bazény alebo rôzne typy suchých skladov o veľkej kapacite [7][13].

2. UKLADANIE VYHORETÉHO JADROVÉHO PALIVA

Základným cieľom ukladania VJP je jeho oddelenie od biosféry takým spôsobom, aby po celú dobu rizika kontaminácie okolitého prostredia nemohlo prísť k ohrozeniu človeka a životného prostredia. Konkrétne je treba zabrániť kontaktu odpadov s podzemnou vodou, ktorá predovšetkým môže sprostredkovať transport kontaminantu k človeku. Uloženie musí byť bezpečné a maximálne ekonomické. Bezpečnosť je zaisťovaná technickými opatreniami, ako je úprava odpadov do stabilných a nerozpustných foriem a ich ukladanie do hlbinných, geologických a stabilných formácií [13].

Najväčší pokles tepla je v prvom roku, pretože hneď po vyvezení z reaktora VJP produkuje približne $1{,}4 \times 10^6$ W/tU, zatiaľ čo po prvom roku $8{,}98 \times 10^4$ W/tU a po 100 rokoch už len $7{,}4 \times 10^2$ W/tU. V praxi to znamená, že nie je možné VJP hneď po vyvezení z reaktora ukladať do kontajnerov a následne potom do úložiska, pretože teplota steny kontajneru by vysoko prevyšovala teplotu 100 °C. Dochádzalo by k zohrievaniu okolia, k odparovaniu podzemnej vody, ku zvýšenej korózii kontajneru. Preto, rovnako ako v prípade prepracovania VJP, i pred uložením je pre VJP nutná určitá doba chladnutia, ktorá prebieha najskôr v bazénoch priamo v jadrovej elektrárni a ďalej v medziskladoch a skladoch, kde je VJP umiestnené v kontajneroch, alebo bazénoch, závisí od toho, ktorý spôsob skladovania si daná krajina zvolí. Najčastejšie sa predpokladá, že k definitívnemu uloženiu VJP do hlbinného úložiska by malo prísť približne po 40 až 50 rokoch od vyvezenia z reaktora, kedy klesne rádovo nielen produkcia tepla, ale aj celková rádioaktivita [13].

2.1 Medzisklad VJP a RAO

Medzisklad je zariadenie pre bezpečné skladovanie vyhoretého jadrového paliva. Funkcia medziskladu nespočíva len v tom, že tu vyhoretému jadrovému palivu alebo vysoko rádioaktívnemu odpadu klesne teplota na požadovanú úroveň, ale príde k jeho akumulácii a do hlbinného úložiska bude uložené jednorázovo viac množstva naraz, čo je považované za ekonomicky výhodnejšie. Palivový cyklus obsahuje viacero stupňov medziskladov, avšak pod týmto pojmom je označovaný posledný stupeň. Po tomto stupni sa VJP a RAO uloží do hlbinného úložiska. Medzisklady môžeme rozdeliť podľa toho, či sú kontajnery s VJP alebo RAO chladené vodou alebo vzduchom na suchý a mokrý [13].

2.1.1 Mokrý medzisklad

VJP a RAO sú skladované v bazénoch. Bazény majú vnútorné steny z nehrdzavejúcej ocele a voda v bazénoch je podrobovaná recirkulácii a katinuálnemu čisteniu. Vlastné zariadenie na skladovanie palivových článkov sa skladá z mreží. Ich konštrukcia zabezpečuje minimálnu vzdialenosť medzi palivovými článkami 25,3 cm. Vzniku štiepnej reakcie bráni vrstva vody medzi článkami, ktorá umožňuje udržiavať neutrónový

koeficient násobenia na úrovni 0,90 alebo nižšej. Voda, ktorá sa používa k odvodu tepla v mokrých skladoch je demineralizovaná, poprípade s prímesou kyseliny boritej alebo niektorých antikoróznych prísad [7].

Príkladom mokrého skladu je centrálny švédsky podzemní medzisklad CLAB. Medzisklad leží na pobreží Baltického mora v blízkosti jadrovej elektrárne Oskarshamn. Nachádza sa približne 25 m pod zemským povrchom a tvorí ho 120 m dlhá chodba, v ktorej sú vybudované 4 bazény. Bazény sú hlboké 7 až 12 metrov, aby umožnili pokrytie skladovaných palivových kaziet niekoľkými metrami vody. Sú určené pre uskladnenie 5000 t VJP, počíta sa aj s rozšírením kapacity na 8000 t VJP, aby medzisklad pojal všetko palivo použité vo švédskych jadrových elektrárňach do roku 2010. Cirkulujúca voda ochladzuje a chráni palivo. Bazény sú vyrobené z hrubého železobetónu s oceľovými vložkami [13][14].

2.1.2 Suchý medzisklad

V posledných rokoch je suchý medzisklad populárnejší než predchádzajúci mokrý spôsob skladovania. Jeho hlavnou výhodou sú minimálne požiadavky na obsluhu, na rozdiel od predchádzajúceho spôsobu, kde je nutné kontinuálne chladenie a čistenie vody. Suché medzisklady používajú prirodzený systém chladenia. Ďalšou výhodou je, že nevznikajú žiadne emisie do ovzdušia, ktoré by predstavovali významný vplyv na okolie. Z ekonomického hľadiska sú investičné náklady väčšie, kvôli zaobstaraniu obalových súborov, v ktorý vydrží VJP desiatky rokov. Prevádzkové náklady sú oveľa nižšie než u spomínaného mokrého skladovania [7][15].

Suché medziskladovanie rozdeľujeme podľa dvoch od seba odlišných spôsobov:

a) palivové súbory sú hermeticky uzatvorené do kovových trubiek, ktoré sú vyplnené inertným plynom. Trubky sú uložené do betónových boxov, v ktorých cirkuluje chladiaci vzduch. Pri preprave sa trubky preložia do prepravných kontejnerov. Tento spôsob skladovanie sa používa v závode na prepracovanie paliva, v Sellafielde. Skladovanie paliva pozostáva z betónových boxov o rozmeroch axiálneho rezu, výške 20 m a šírke 15 m. V každom z boxov sú rovnomerne umiestňované kontajnery s rozvodom chladiaceho vzduchu, ktorý je po priechode boxom odvádzaný do komína. Kontajnery sú umiestňované do boxov pomocou špeciálnych zavážacích žeriavov [13].
b) palivové súbory sú skladované v masívnych kovových alebo betónových kontajneroch na voľnej ploche, ktorá môže byť krytá alebo nekrytá. Tu sú ochladzované prirodzenou cirkuláciou vzduchu. Tento spôsob skladovanie sa nazýva kontajnerový medzisklad [13].

2.1.3 Medzisklady a sklady v ČR

Medzi suché, kontajnerové medzisklady VJP patrí krytý medzisklad a sklad

v Dukovanoch a krytý sklad Temelíne. V oboch medziskladoch je používaný suchý obalový súbor na prepravu a skladovanie typu CASTOR [16][17][18]. Kontajner využívaný v Dukovanoch je CASTOR 440/84. Je to valcová nádoba o výške 4 m a priemere 2,6 m, ktorá je vyrobená z jedného kusu špeciálnej tvárnej liatiny s vnútorných povrchom pokrytým vrstvou niklu. Hrúbka steny je 37 cm a každý kontajner pojme 84 palivových kaziet reaktora typu VVER 440, to je celkom 10 ton VJP. Naplnený kontajner má hmotnosť okolo 120 t. Rozstupy jednotlivých kaziet vo vnútri kontajneru sú udržované špeciálnou vnútornou vstavbou. Po zaplnení a zakrytí primárnym vekom je vnútorný priestor zaplnený héliom, čím sa zaisťuje dobrý odvod tepla a antikorózne prostredie. Héliom je neskôr vyplnený aj priestor medzi primárnym a sekundárnym vekom s tým, že tlak medzi vekami je vyšší, než tlak vo vnútri kontajneru. Tlak medzi vekami je indikovaný signalizačným zariadením, ktoré obsluhe oznámi prípadný pokles [13]. Kontajnery sa nachádzajú v Dukovanoch v dvoch skladoch. Prvým je už zaplnený medzisklad vyhoretého jadrového paliva (MSVP), celková kapacita medziskladu je 60 kusov obalových súborov pre 600 t TK. Dňa 8.3. 2006 bol medzisklad zaplnený [16]. Druhý je sklad vyhoretého jadrového paliva (SVP), ktorý bol uvedený do skúškovej prevádzky v roku 2006 do prevádzky v apríli 2008. Skladovacia kapacita je 133 kusov obalových súborov pre 1340 t TK [17].

Vyhoreté jadrové palivo z JE Temelín je v sklade vyhoretého jadrového paliva (SVJP) v Temelíne uložené v kontajneroch typu CASTOR 1000/19 [18]. Je to valcová nádoba o 5,5 metra a vonkajšom priemere vrátanie rebier 2,33 m, hrúbka steny je 86 cm a hmotnosť kontajnera je 116 t. Systém sa skladá z dvoch nezávislých viečok, aby vytvoril systém dvojitej bariéry. Dutina je uzavretá primárnym a sekundárnym vekom, obe sú tesnené kovovými krúžkami a pripevnené skrutkami. Priestor medzi oboma viečkami je pod pretlakom naplnený héliom, pretlak je pravidelne kontrolovaný [19]. SVJP Temelín má projektovanú kapacitu 1370 t TK, čo vystačí na celú životnosť JE Temelín, ktorá obsahuje dva reaktory typu VVER 1000. Sklad je v prevádzke od decembra 2011 [18].

Tieto skladovacie kapacity sú dostatočné pre VJP z existujúcich blokov. Pre jadrovú elektráreň Dukovany je kapacita dostatočná na 45 rokov prevádzky, u jadrovej elektrárne Temelín na 30 rokov prevádzky. VJP bude skladované v skladoch a umiestnené v skladovacích obalových súboroch, až kým sa nesprevádzkuje hlbinné úložisko [2].

V Českej republike sa nachádza aj tzv. záložný medzisklad Skalka. Medzisklad Skalka bol v deväťdesiatych rokoch navrhnutý a bola postavená prvá fáza, bez komôr. Mal to byť centrálny medzisklad VJP pre všetky české jadrové elektrárne. V roku 1997 česká vláda rozhodla o tom, že medzisklady budú len v areály jadrových elektrární, aby boli obmedzené problémy s transportom použitého paliva. Skalka je naďalej v prevádzke a je vedená ako záložná možnosť ukladania VJP [20]. Podľa [21] je lokalita Skalka najvýhodnejším miestom pre podzemnú variantu skladu VJP.

2.2 Hlbinné úložisko

Hlavným cieľom hlbinného úložiska je zaistiť trvalú izoláciu uložených materiálov od životného prostredia. Do hlbinného úložiska sa ukladajú materiály, ktorých doba významnej nebezpečnosti presahuje stovky rokov, ako napríklad vysoko rádioaktívne odpady a vyhoreté jadrové palivo [7]. Úložiská sú budované v hlbinných geologických formáciách, spravidla v hĺbkach približne 500 až 1000 metrov, pričom minimálna hĺbka je 300 metrov. Hĺbka bude závisieť od konkrétnych geologických podmienok. Geologická formácia musí byť dlhodobo stabilná, čím sa rozumie doba v rozmedzí 10^4 až 10^5 rokov [13]. Dlhodobá bezpečnosť je v tomto prípade založená na izolačnej schopnosti prírodného prostredia a na inžinierskych bariérach, ktoré doplňujú účinnosť. Rádioaktivita uloženého VJP poklesne v priebehu desiatok tisíc rokov na mieru porovnateľnú s rádioaktivitou, ktorá prislúchala rovnakému množstvu prírodného uránu, z ktorého bolo jadrové palivo vyrobené. Preto sa za prijateľnú dĺžku časového obdobia, behom ktorého by bolo žiaduce sledovať chovanie úložiska a jeho prípadné pôsobenie na biosféru, považuje všeobecne 100 000 rokov. Niektoré krajiny však robia svoje bezpečnostné hodnotenia aj pre obdobie presahujúce túto hranicu. Výstavba hlbinných úložísk je časovo aj finančne náročná, vyžaduje splnenie všetkých veľmi prísnych požiadaviek radiačnej ochrany. Preto sa palivo skladuje najprv v medziskladoch, aby bol dostatočný priestor nájsť vhodnú lokalitu pre výstavbu hlbinného úložiska. Vývoj hlbinného úložiska môžeme rozdeliť do niekoľkých etáp:

1) Plánovacie a prípravné štádium
2) Výstavba
3) Prevádzka
4) Ukončenie prevádzky
5) Inštitucionálny dohľad

V priebehu plánovacieho a prípravného štúdia prebieha výber správnej lokality a práce na projekte úložiska. Spoločne s tým prebieha aj výskumná a demonštračná činnosť, ktorá zahŕňa experimenty v podzemných laboratóriách, prírodných a umelých činiteľov. Ich cieľom je preskúmať interakcie medzi horninovým prostredím, inžinierskymi bariérami a uloženými odpadmi, ďalej overovať technológie v reálnom meradle navrhnuté pre realizáciu úložiska. Výber správnej lokality so sebou prináša výber vhodnej geologickej formácie. Pre hlbinné úložiská bola vytipovaná a overená pomocou experimentov v podzemných laboratóriách. Vo svete boli skúmané magmatity (granitoidy a bazaltoidy), ílové formácie, soli. Vo všetkých druhoch horninových prostrediach bola overená možnosť výstavby a vo všetkých prípadoch bola preukázaná ich bezpečnosť. Pri výbere lokality sa vykoná geologické štúdium širších záujmových oblastí, ktoré sú postupne zužované na menšie areály a neskôr na jednotlivé lokality. Tieto lokality sú podrobované výskumu z hľadiska geológie, geofyziky, hydrogeológie, geochémie [7].

2.2.1 Princíp návrhu

Každé úložisko by malo pozostávať zo štyroch nasledovných častí:

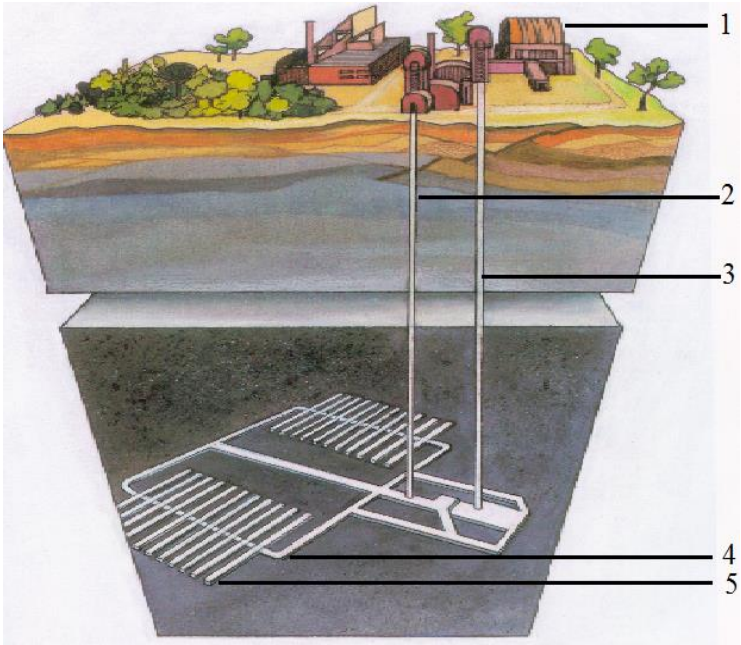
Nadzemný areál je zo začiatku zázemím pre vybudovanie podzemnej časti. Neskôr bude zaisťovať prevádzku hlbinného úložiska. Nadzemný areál má funkciu údržby, dodávky elektriny, ovládania vetrania úložiska, správnej budovy, sociálnych zariadení, ale aj informačného strediska pre verejnosť. Aktívna časť je areál slúži na príjem a prípadnú úpravu VJP a VAO. Ak nie je použitý len jeden druh kontajnerov, VJP sa tu prebalí do úložného obalového súboru [13]. Nadzemný areál by mal byť na ploche 23,4 ha z toho aktívna časť zaberá 2,1 ha čo je približne desatina percenta z plochy celého nadzemného areálu. Zbytok plochy tvoria administratívne budovy, zariadenia pre dodávku elektrickej energie, dielne na servis ťažobných zariadení, železnica a plochy pre manipuláciu s vyťaženou horninou. Ak by sa manipulovalo z horninou mimo areál, jeho plocha by sa zmenšila o viac ako polovicu svojej rozlohy [22].

Prístupové šachty a tunely budú spojovať nadzemný areál s úložiskom. Ich úlohou bude preprava ľudí, materiálu a vetranie podzemných priestorov. Podzemné ukladacie priestory budú spojené s povrchovým areálom pomocou zvislých šácht a tunelom vo tvare skrutkovice. Tým bude oddelená cesta pre dopravu úložných kontajnerov od ciest, ktoré budú slúžiť na ťažbu ukladacích priestorov, k prístupu pracovníkov do podzemia [22].

Spojovacie tunely a ukladacie priestory budú budované v stabilnej geologickej formácii, v hĺbke, ktorá závisí od geologických podmienok vybranej lokality, zhruba 500 metrov [22]. Budú zaberať najväčšiu časť podzemia. Bude sa jednať o horizontálnu sieť chodieb, z ktorých budú prístupné šachty pre definitívne uloženie VJP, prípadne VAO. Väčšina projektov predpokladá, že úložisko bude len na jednom poschodí a úložné šachty budú vŕtané kolmo na úrovne podláh horizontálnych spojovacích chodieb [13].

Inžinierske bariéry sú umelo vytvorené bariéry medzi VJP, prípadne VAO a stenou úložnej šachty. Funkciu bariéry zastáva stena kontajneru, poprípade výplňové a tlmiace materiály [13].

Je zrejmé, že správna funkcia hlbinného úložiska je závislá na vlastnostiach horniny, v ktorej je úložisko vybudované a aj na účinnosti inžinierskych bariér. Celkové schéma hlbinného úložiska môžeme vidieť na obrázku 2.1.



1 - nadzemný areál,
2 - dopravná šachta,
3 - vetracia šachta,
4 - centrálny spojovací tunel,
5 - spojovacie tunely a ukladacie šachty

Obrázok 2.1 Celková schéma hlbinného úložiska [23], upravené

2.2.2 Bariérový systém v hlbinných úložiskách

Forma odpadu

Predstavuje prvú bariéru. Ak by prišlo k strate hermetickosti kontajneru, podzemná voda sa môže dostať do kontaktu s VJP, alebo VAO. Vysoko aktívne odpady, aj oxidy uránu vo vyhoretom palive ľahkovodných reaktorov zaliate v roztavenej sklovine majú extrémne nízku rozpustnosť vo vode a trvá im veľmi dlho, zvyčajne milión až sto miliónov rokov než sa odpad úplne rozpustí. Rozpustenie môže urýchliť nevhodné chemické zloženie vody, tieto riziká sa vylučujú dôsledným výberom lokality, teda hostiteľskej horniny a prídavkom materiálu, ktoré vhodne regulujú oxidačnú rovnováhu [7].

Obalový kontejner

Predstavuje ďalšiu bariéru, ktorá poskytuje dočasnú izoláciu odpadu. Kontajnery sú vyrábané z materiálov, ktoré zaručujú funkčnosť niekoľko stoviek rokov (betón, polyetylén) až stotisíc rokov (titán, meď). Používajú sa aj ich špeciálne zliatiny. Zliatiny zabezpečujú odolnejší obalový súbor a chemické prostredie (liatina), štruktúrnu stabilitu (oceľ) a dlhú koróznu odolnosť (meď) [7]. Najvýhodnejšie sú podľa zdroju [13] tri druhy materiálov:

1) ocele vysoko legované niklom, titanom a chromom,
2) ocele s prímesou uhlíka, patrí sem aj CASTOR,
3) termodynamicky veľmi stále materiály, z ktorých ekonomicky je najdostupnejšia meď

Odolnosť kontajnerov závisí na chemickom prostredí v úložisku. Vhodná bariéra sa dôkladne vyberá pre hostiteľskú horninu [7].

Tlmiaci materiál

Je ním obklopený priestor medzi kontajnerom a okolitou horninou, ktorý sa nachádza v úložnej šachte. Tento materiál mechanicky podporuje kontajner a redukuje tok podzemných vôd okolo odpadov v úložisku. Najčastejšie sa používa bentonit s vysokým obsahom montmorilonitu s prímesou kremičitého piesku, čím sa získa tlmič so zvýšenou teplotnou vodivosťou [13]. Bentonit zväčšuje svoj objem pôsobením vody a tým zaplňuje dutiny a vytvára okolo kontajneru plastické zóny s veľmi nízkou hydraulickou vodivosťou [7].

Tesniaci materiál

Využívajú sa pre obmedzenie toku podzemnej vody, v miestach, kde je narušená kompaktnosť hostiteľskej horniny [13].

Vyplňovacie materiály

Sú nimi uzatvárané úložné priestory a tak oddeľované od prístupových chodieb. K tomuto účelu môže byť použitá zmes betónu a piesku, v tufových a soľných horninových formáciách vyťažená hornina [13].

Hostiteľská hornina

V hlbinnom úložisku hostiteľská hornina najmocnejšia bariéra. Musí dlhodobo spĺňať požiadavky na stabilitu, prúdenie vody, neporušiteľnosť. Úložisko je lokalizované v horninovej formácie, pretože rádionuklidy môžu migrovať mikrotrhlinami a pórmi. Skalný masív spomaľuje rozptyl a spomaľuje pohyb rádionuklidov smerom do biosféry. Väčšina rádionuklidov bude mať behom transportu dostatok času k premene na prijateľne nízku aktivitu [7].

2.2.3 Hlbinné úložisko v ČR

Návrh hlbinného úložiska v Českej republike je podobný ako v iných krajinách, ktoré úložisko plánujú. Avšak jeho konečná podoba ako je rozmiestnenie budov, celková rozloha do značnej mieri závisí na finálnej lokalite, kde sa bude úložisko nachádzať [25]. V Českej republike sa predpokladá výstavba hlbinného úložiska v kryštalických horninách (hlavne žuly a ruly) [7].

Lokalita HÚ v ČR

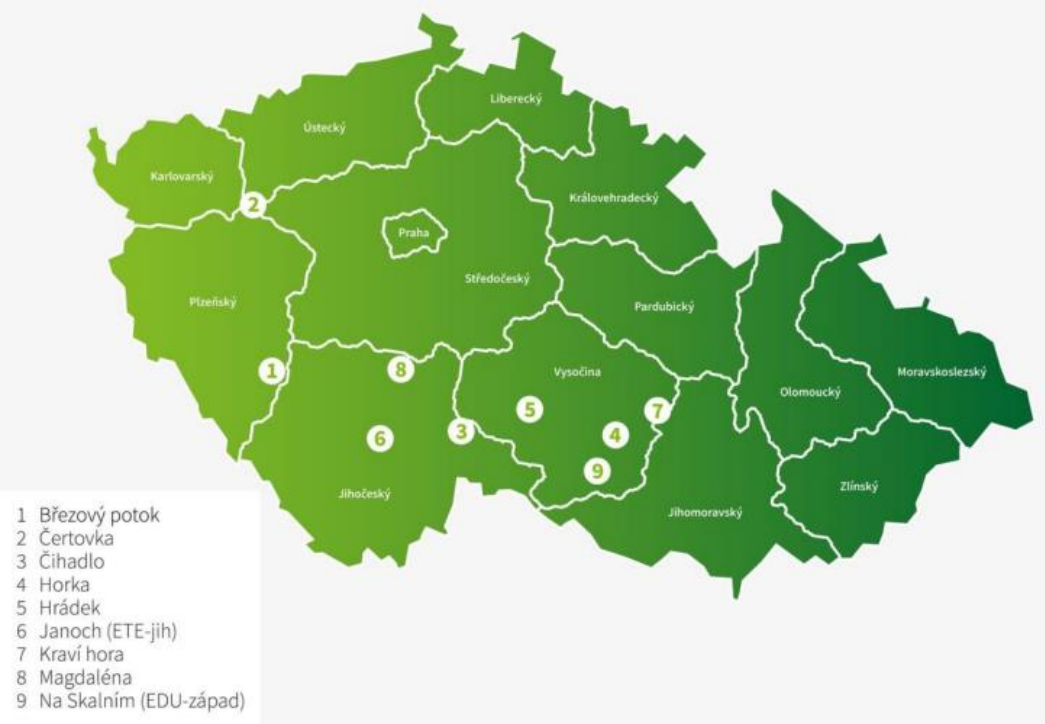
Koncepcia nariadení s VAO a VJP v Českej republike z roku 2002 ukladá pripravovať hlbinné úložisko, pričom jeho sprevádzkovanie je plánované v roku 2065 [2]. Avšak ČR ako aj ostatné štáty EÚ, ktoré majú v pláne pokračovať v jadrovej energetike aj po roku 2025 budú musieť výstavbu HÚ urýchliť. Dôvodom je, že európska komisia vydala začiatkom roku 2022 novú smernicu a tieto štáty, medzi ktoré patrí aj ČR musia sprevádzkovať HÚ už do roku 2050 [41].

V minulých rokoch bolo po celkovom hodnotení území ČR navrhnutých a predbežných charakterizovaných deväť lokalít. V súčasnosti sa počet lokalít zúžil na šesť. Ako pracovne označené sú: Čertovka (Lubenec, Blatno - Ústecký kraj), Březový potok (Pačejov, Chanovice - Plzeňský kraj), Magdaléna (Jistebnice, Vlksice - Jihočeský

kraj), Čihadlo (Pluhův Žďár, Lodhéřov - Jihočeský kraj), Hrádek (Nový Rychnov, Rohozná - Kraj Vysočina) a Horka (Budišov, Oslavička - Kraj Vysočina). Na obrázku 2.2 môžeme vidieť pôvodných deväť lokalít. Vo všetkých lokalitách sa verejnosť postavila proti zámeru vybudovania hlbinného úložiska a ďalšie práce boli pozastavené do roku 2009. Neskôr sa však práce na hlbinnom úložisku sa obnovili. Tabuľka 2.1 nám hovorí o tom, ako to bude ďalej s hlbinným úložiskom v ČR [2].

Tabuľka 2.1 Predpokladaný harmonogram prípravy, výstavby a prevádzky hlbinného úložiska [2]

Vykonanie výskumných štúdií k nájdení ďalších potenciálne vhodných lokalít hlbinného úložiska vrátane revízií a prác vykonaných do roku 2020	2016
Výber dvoch kandidátnych lokalít na základe predbežných charakterizácií lokalít zo stanoviskom dotknutých obcí	2022
Výber finálnej lokality so stanoviskom dotknutých obcí a podanie žiadosti o územnú ochranu vybranej lokality	2025
Zahájenie procesu EIA pre podzemné laboratórium vo finálnej lokalite	2026
Podanie žiadosti o vydaní územného rozhodnutia pre podzemné laboratórium vo finálnej lokalite	2028
Zahájenie procesu EIA pre hlbinné úložisko	2035
Predloženie dokumentácie k územnému riadeniu pre hlbinné úložisko všetkým dotknutým orgánom vrátane SÚJB? (zadávacia bezpečnostná práca)	2040
Predloženie dokumentácie k stavebnému riadeniu	2045
Výstavba hlbinného úložiska (s prvou ukladacou sekciou) a ďalšie práce a príprava dokumentácie pre zahájenie prevádzky	2050 - 2064
Príprava dokumentácie k povoleniu prevádzky hlbinného úložiska, vydanie rozhodnutia	2063 - 2065
Zahájenie prevádzky hlbinného úložiska	2065



Obrázok 2.2 Vybrané lokality v ČR pre hlbinné úložisko [24], upravené

Priebeh ukladania VJP do HÚ

Ako prvé je nutné dopraviť VJP z jadrových elektrární do podzemného prekladišťa, ktoré je súčasťou hlbinného úložiska. Najvhodnejšou dopravou je železničná doprava, ktorá sa v súčasnej dobe považuje za najbezpečnejšiu a z pohľadu životného prostredia najšetrnejšiu. Do hlbinného úložiska príde vlak s prepravnými kontajnermi CASTOR. Pre maximálnu bezpečnosť sú kontejnery uložené vodorovne medzi tlmiče nárazu na špeciálnych vagónoch. V podzemnom prekladišti sa kontajnery za pomocou žeriavu zložia z vagónov, postavia do zvislej polohy a skontrolujú, či nie sú poškodené. Po kontrole a evidencii kontajnera sa presunie do horúcej komory, kde príde k preloženiu VJP do nového obalu. Bezpečná manipulácia s VJP je zaistená hermetickým uzatvorením horúcej komory a jej neprístupnosťou obsluhe počas manipulácie s kontajnermi a VJP. Všetku prácu vykonáva robotický manipulátor. Najprv sa z prepravného kontajneru CASTOR odstráni sekundárne veko a nasleduje odstránenie primárneho veka. Následne sa palivo preloží do kovového ukladacieho kontajneru. Tento kontajner s dlhou životnosťou, ktorý musí vydržať okolitý tlak a teplotu, dlhodobú tesnosť a odolnosť voči chemickému prostrediu. Musí tiež zaistiť jadrovú bezpečnosť a radiačnú ochranu. Obalový súbor je tvorený s dvomi plášťami. Vonkajší obal je z uhlíkovej ocele, pričom jeho hrúbka je taká, aby aj po korózii, ktorá prebieha niekoľko desaťtisíc rokov zaručil mechanickú stabilitu. Vnútorný plášť je z nerezovej ocele. Jeho hrúbka musí byť taká, aby zaručila mechanickú stabilitu aj po skorodovaní vonkajšieho obalu. Po naplnení kontajneru VJP sa vnútorný obal kontajneru naplní ochrannou atmosférou z hélia a pomocou privarovacieho automatu sa privarí primárne veko. Skontroluje sa tesnosť

vnútorného obalu pomocou héliovej skúšky. Následne sa naplní ochrannou atmosférou aj vonkajší obal a privarí sa sekundárne veko. Skontroluje tesnosť vonkajšieho obalu, prebehne vizuálna a röntgenová kontrola, ktorá overí či neprichádza k úniku hélia. Kontajner sa premiestni na linku povrchovej úpravy, kde sa kontajneru zhotoví antikorózny ochranný plášť na báze kovokeramických materiálov. Povrchovo upravený ukladací kontajner je uložený na vozidlo a transportovaný do prípravne superkontajnerov. Kde sa ukladací kontajner obloží ílovitým materiálom, ktorým je bentonit. Bentonit viaže rádioaktívne látky dobre odvádza teplo a neprepúšťa vodu. Vo vlhkom prostredí zväčšuje svoj objem a tým utesňuje kontajner v úložnom vrte a tak chráni kontajner pred kontaktom s vodou. Kontajner s bentonitovým obložením sa uzatvorí do špeciálneho oceľového koša a tým vznikne superkontajner. Superkontajner je prevezený k ukladacím vrtom, kde je uložený vo vodorovnej polohe. Medzi jednotlivé superkontajneri sa vloží zmes tvorená drvenou horninou a bentonitom. Po zaplnení vrtov sa natrvalo uzatvoria pomocou bentonitu [2][22][26].

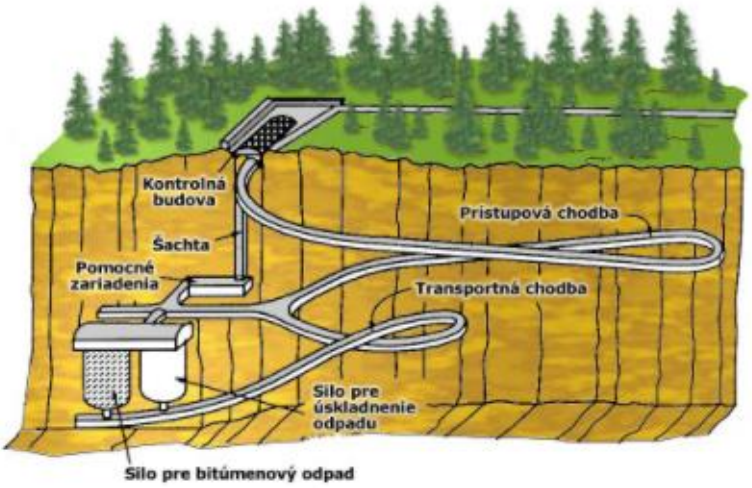
2.2.4 Hlbinné úložiská v Európe

Myšlienka spoločného regionálneho či medzinárodného úložiska je málo pravdepodobná. V mnohých krajinách je platná legislatíva, ktorá zakazuje dovoz rádioaktívnych odpadov z iných štátov. Výnimkou nie je ani Česká republika, kde tiež platí rovnaká legislatíva. V priatej smernici Rady 2011/70/Euratom je vývoz VJP dovolený za presne definovaných podmienok. Smernica umožňuje po dohode dvoch či viacerých štátov Európskej únie vybudovať spoločné hlbinné úložisko. Vývoz VJP a RAO z ČR a nasledovné uloženie v inom štáte EÚ je v súčasnosti málo reálny [2]. Avšak podľa zdroju [27] Slovenská republika a ani Česká republika nevylučujú spoločné hlbinné úložisko. Otázkou je kde by sa toto úložisko nachádzalo a či by prijímalo všetky odpady, ktoré sa nedajú uložiť do povrchových úložísk.

Práve kvôli týmto podmienkam sa viaceré krajiny rozhodli vybudovať vlastné hlbinné úložisko. Pre hlbinné úložisko vybudované v kryštalických horninách sa rozhodli vo Fínsku, Švédsku či Japonsku a v pevných ílovcových horninách zasa vo Francúzsku a Švajčiarsku [22].

Ako príklad hlbinného úložiska si môžeme uviesť hlbinné úložisko Onkalo vo Fínsku, ktoré ako prvé na svete dostalo licenciu k výstavbe. Úložisko je plánované blízko jadrovej elektrárne Olkiluoto v obci Eurajoki. Bude vybudované vo vyvretej hornine, ktorá je dve miliardy rokov stará. Úložisko sa bude nachádzať v hĺbke 400 až 450 metrov. V súčasnosti prebieha finálna bezpečnostná štúdia. Jeho spustenie do prevádzky sa očakáva v roku 2023. VJP bude vkladané do multibariérových systémov. Dvanásť palivových kaziet bude vložených do nádoby z bórovej ocele, ktorá bude uzavretá v palivovom súbore z medi. Každý palivový súbor bude umiestnený v ukladacej šachte, do vlastnej diery, kde bude následne zasypaný bentonutovým ílom. Výstavba ukladacích šácht bude postupná s prevádzkou. Úložisko bude mať kapacitu 6 500 ton

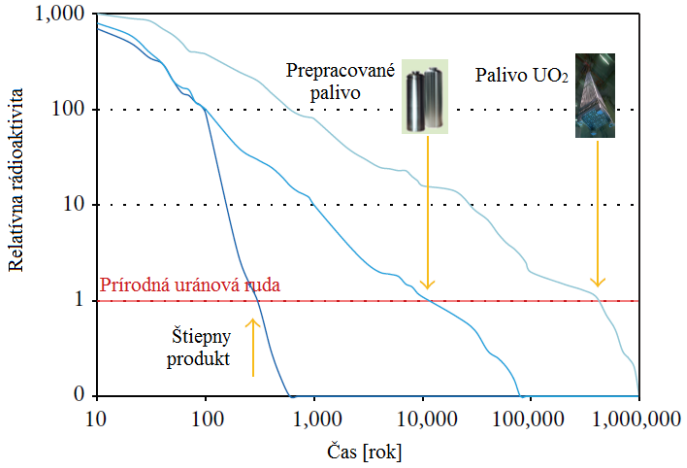
VJP, ale už teraz sa predpokladá o navýšenie tejto kapacity na 12 000 ton. Súčasné plány počítajú z dobou prevádzky úložiska do roku 2120, kedy sa úložisko uzatvorí [28].



Obrázok 2.3 Schéma hlbinného úložisko vo Fínsku [29], upravené

3. PREPRACOVANIE VYHORETÉHO JADROVÉHO PALIVA

Viac ako 90 % objemu vyhoretého jadrového paliva predstavuje materiál, ktorý po spracovaní môžeme využiť pre výrobu energie v reaktoroch vyššej generácie [40]. Hlavným dôvod prepracovania VJP je získanie nespotrebovaného uránu a plutónia z palivových článkov a tým uzavretie palivového cyklu. Ďalším dôvodom je zníženie objemu vysoko rádioaktívneho odpadu zhruba na jednu pätinu. Úroveň rádioaktivity prepracovaného vyhoretého jadrového paliva, ako môžeme vidieť aj na obrázku 3.1 je oveľa menšia a asi po 100 rokoch klesá rýchlejšie než pri neprepracovanom vyhoretom palive UO_2 [3]. Prepracovanie VJP ušetrí až 25 % uránovej rudy, čím sa zníži aj objem odpadu. Odpad z prepracovania vo vitrifikovanej forme vrátane produktov získaných štiepením sú pôvodne beta-gama žiaričmi a rádioaktivita sa u týchto odpadov zníži o päťsto rokov [30]. Preto krajiny ako sú Francúzsko, Spojené Kráľovstvo, Rusko, India či Japonsko dospeli k názoru, že vyhoreté jadrové palivo je zdrojom cenných surovín. Vybudovali na svojom území závody na prepracovanie paliva, ktoré môžeme vidieť s ročnou kapacitou v tabuľke 3.1 [3].



Obrázok 3.1 Rozpad rádioaktívneho odpadu v čase [30], upravené

Tabuľka 3.1 Komerčné závody na prepracovanie VJP vo svete a ich ročná kapacita v tonách [3]

Druh paliva	Krajina, kde sa palivo prepracováva	Ročná kapacita v tonách
Palivo z ľahkovodných reaktorov	Francúzsko, La Hague	1 700
	Spojené kráľovstvo, Sellafield	600
	Rusko, Ozersk	400
	Japonsko	800
	Celkovo	3 500

Ostatné jadrové palivá	Spojené kráľovstvo, Sellafield	1 500
	India	330
	Japonsko, Tokai	40
	Celkovo	1870
Celková kapacita		5 370

3.1 Procesy na separáciu uránu a plutónia od ostatných štiepnych produktov

Na prepracovanie vyhoretého jadrového paliva môžu byť použité viaceré metódy. Rozdelenie metód podľa procesu, zdroj [13]:

1) Zrážacie procesy - poznáme dva $BiPO_4$ a Fluorido-acetánový proces. Boli dôležité pri laboratórnom výskume štiepnych procesov a pri získavaní plutónia pre vojenské účely. Tieto metódy boli založené na ťažko-rozpustných zlúčeninách (Pu, Np a U) a to v závislosti na valencii týchto prvkov.
2) Kvapalne extrakčné procesy - REDOX, ktorý bol prvý kvapaline extrakčný proces na separáciu uránu a plutónia. Vo veľkom bol používaný v USA. Ďalšou metódou je TRIGLY, ktorý je tiež kvapalne extrakčný proces, ale vyvinutý v Kanade. Tieto dva procesy majú hlavnú nevýhodu, že do vodnej fáze je potrebné pridávať veľké množstvo vysolovacích činidiel, ktoré zvyšujú hmotnosť vysokoaktívnych odpadov. Pre tento dôvod bol lepší a úspešnejší proces BUTEX, v ktorom bol použitý dibutyl-karbitol ako organická fáza a vodná fáza bola roztokom získaného po rozpustení ožiareného uránu. Podrobnejšie sa budeme venovať v podkapitole 3.1.1 metóde PUREX, ktorá je v súčasnosti najviac priemyselne využívanou metódou vo svete. Ďalšou významnou metódou, je metóda THOREX, v ktorej sa prepracovávajú thorio-uránové palivové články.
3) Nevodné procesy - sú tri skupiny: Pyrometalurgické, pyrochemické a fluoridové (frakčné destilácie prchavých fluoridov). Boli vyvinuté po vodných procesoch za účelom obísť problémy s vodnými metódami. Ich výhodou od predchádzajúcich metód, že vyhoreté palivo môžeme prepracovať krátko po vyvezení z reaktora čím je menšie riziko radiačného poškodenia systému. Ďalšími výhodami je kompaktnejší priestor, ktorý je potrebné tieniť a možnosť prepracovávať väčšie množstvo vyhoretého paliva naraz. Avšak nevodné procesy preukázali viacero nevýhod, jednou z nich je, že nebola dosiahnutá dostatočná čistota uránu a plutónia. Urán a plutónium obsahovali štiepne produkty, vďaka ktorým bola zhoršená manipulácia s týmto palivom. Ďalšou nevýhodou je, že operácie s palivom sú vedené pri vysokých teplotách, musia byť použité vysoko kvalitné antikorozívne a finančne náročné konštrukčné materiály, ktorých údržba je tiež vysoko náročná a nákladná.

3.1.1 Proces PUREX

Všetky komerčné spracovateľské závody používajú hydrometalurgický proces PUREX. Proces efektívne separuje urán a plutónium, je založený na odseparovaní uránu a plutónia z paliva. Najprv sa použité palivo rozseká a rozpustí v horúcej kyseline dusičnej (HNO_3). Prvý krok oddeľuje urán a plutónium od štiepnych produktov pomocou vodného prúdu kyseliny dusičnej. Minoritné aktinidy sa odstránia protiprúdnou extrakciou pomocou tributylfosfátu rozpusteného v petroleji. Následne urán a plutónium vstupujú do organickej fázy, zatiaľ čo štiepne produkty zostávajú vo tributylfosfáte. V druhom kroku sa urán oddelí od plutónia. Plutónium sa prevedie do vodnej fázy, kde sa dusičnan plutónia koncentruje odparením, potom sa podrobí procesu zrážania a nasleduje kalcinácia, aby sa získal PuO_2 vo forme prášku. Dusičnan uránu sa koncentruje tiež odparením a kalcinuje. Vzniká prášok UO_3, ktorý sa redukciou vodíka prevedie na produkt UO_2. Odseparovaný urán a plutónium môžu byť znovu použité, pričom odseparovaný urán putuje do závodu na opätovné obohatenie a plutónium sa môže použiť na výrobu paliva MOX [3].

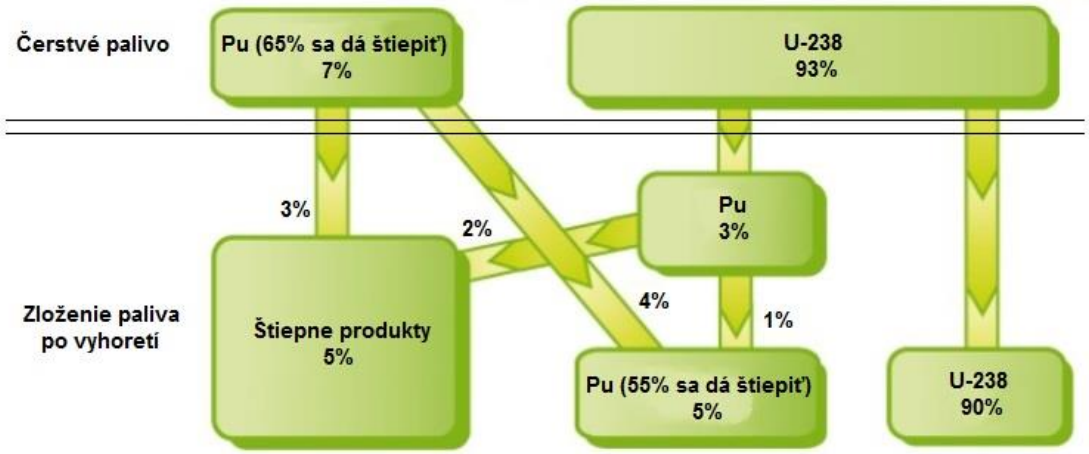
3.2 Palivá vyrobené z odseparovaného uránu a plutonia

Odseparovaný urán a plutónium môžeme použiť na výrobu palív MOX, ERU alebo REMIX. S príchodom týchto palív sa očakáva úspora nákladov na skladovanie a likvidáciu použitého paliva v porovnaní s otvoreným palivovým cyklom [31]. V nasledujúcich podkapitolách nájdeme v súčasnosti používané a do budúcna využívané palivá.

3.2.1 Palivo MOX

MOX je zmes oxidov plutónia z prepracovania a ochudobneného uránu z procesu obohacovania. Skladbu paliva vidíme na obrázku 3.2 je široko používané v Európe či Japonsku. Na používanie paliva MOX má v súčasnosti licenciu asi 10 reaktorov v Japonsku a asi 40 reaktorov v Európe. Tieto reaktory používajú palivo MOX v jednej tretine aktívnej zóny, ale v niektorých až 50 % aktívnej zóny tvorenej palivom MOX, pričom zvyšok aktívnej zóny tvorí uránové palivo [31].

Použité palivo MOX je možné ďalej prepracovať. Napríklad vo Francúzsku sa ďalej prepracováva palivo MOX z nemeckých a švajčiarskych reaktorov. Avšak Francúzskou politikou nie je opätovné spracovanie použitého paliva MOX, ale jeho skladovanie [31]. Francúzsko očakáva príchod reaktorov IV. generácie (reaktory na rýchle neutróny), v ktorých bude možné spaľovať všetky dlhodobé aktinidy vrátane uránu a plutónia [3].



Obrázok 3.2 Skladba paliva MOX [31], upravené

3.2.2 Palivo ERU

Jedná sa o uránové palivo, ktoré sa po prepracovaní obohatí o urán ^{235}U. Využíva sa v Rusku, kde sa po prepracovaní urán rozdelí podľa spaľovania. Urán z paliva z nízkym spaľovaním sa znovu obohatí v závode v meste Seversk (spoločnosť Siberian Chemical Combine) a používa sa v reaktoroch typu VVER 440 alebo VVER 1000. Urán z paliva so spaľovaním 35 až 55 GWd/t je taktiež obohatený v Seversku pridaním prírodného alebo mierne obohateného uránu. Palivo sa môže použiť v reaktoroch typu RBMK alebo VVER. Urán z paliva z vysokým spaľovaním (nad 55 GWd/t) putuje do závodu v meste Elektrostal. Urán sa zmieša z mierne obohateným uránom a môže sa použiť v reaktoroch typu RBMK [31].

3.2.3 Palivo REMIX

Palivo REMIX sa vyrába zmiešaním neseparovateľného podielu uránu a plutónia z prepracovaného použitého paliva s obohateným uránom. Palivo obsahuje asi 1 % ^{239}Pu, 4 % ^{235}U a 95 % ^{238}U. Použité palivo REMIX po 4 rokoch v reaktore sa obsahuje 2 % ^{239}Pu, 1 % ^{235}U. Palivo je možné až 5-krát prepracovať. V prípade použitia paliva REMIX sa znižuje spotreba prírodného uránu o 20 % pri každom prepracovaní v porovnaní s otvoreným palivovým cyklom. Náklady sú vyššie než u paliva MOX a o 25 až 30 % vyššie než u paliva UO_2. V porovnaní s používaním paliva MOX má za následok, že nespôsobí hromadenie prepracovaného uránu a ani separovaného plutónia. Palivo je v štádiu testovania, v júny, v roku 2016 boli naložené experimentálne palivové kazety v jadrovej elektrárni v meste Balakovo [31].

3.3 Závody na prepracovanie VJP

Prepracovanie je zložitý a nákladný proces, preto si ho môžu dovoliť iba ekonomicky silné štáty. Krajiny, ktoré majú zariadenia na prepracovanie sú Francúzsko, Rusko,

Veľká Británia, Japonsko, India, Pakistan a najnovšie aj Čína [30]. V závodoch sa prepracováva iba menšia časť VJP zo súčasných jadrových elektrární. V súčasnosti ponuka prekračuje dopyt po prepracovaní. To sa uskutočňuje na základe komerčných kontaktov, pričom zákazníci môžu byť aj z iných štátov [32]. To je príklad Holandska, ktoré VJP z jadrovej elektrárne v Dodewaarde prepracovávalo v britskom Sellafielde a z jadrovej elektrárne Borssele vo francúzskom La Hague [33]. Avšak vždy platí, že zákazník dostane naspäť nielen materiál na nové palivo, ale aj rádioaktívny odpad, ktorý vznikol pri prepracovaní a musí sa oň náležite postarať [2]. V Holandsku skladujú vitrifikovaný odpad v centralizovaných ukladacích zariadeniach. Má to na starosti spoločnosť COVRA HABOG, ktorá sídli neďaleko jadrovej elektrárne v Berssele. Stredisko má dve oddelenia, v prvom sa nachádza rádioaktívny odpad s nízkym a stredným stupňom rádioaktivity a v druhom vitrifikovaný vysoko rádioaktívny odpad vrátený po prepracovaní VJP [33]. Jedna tona prepracovaného VJP predstavuje úsporu dvoch ton prírodného paliva a z jednej tony VJP vznikne iba 115 litrov vysokoaktívneho odpadu vo vitrifikovanej forme [32]. V súčasnosti je prepracovaných asi 90 000 ton VJP z 290 000 ton VJP z komerčných reaktorov. Palivo MOX sa používa v ľahkovodných reaktoroch v rôznych krajinách po celom svete, ale najmä v európskych krajinách, ako sú Francúzsko, Nemecko, Švajčiarsko [30], či aj vyššie spomínané Holandsko, ktoré sa tak stalo šiestou európskou krajinou [33]. V ďalších podkapitolách nájdeme závody, v ktorých by aj Česká republika mohla svoje palivo prepracovávať.

3.3.1 Veľká Británia

Jediný závod na prepracovanie vo Veľkej Británii bol v Sellafielde. Do prevádzky bol uvedený v roku 1994. Prepracovalo sa tu 9 331 ton použitého vyhoretého jadrového paliva od 30 zákazníkov z 9 krajín sveta. Po 24 rokoch, 9. novembra 2018 sa prepracovala posledná várka paliva. V súčasnosti závod slúži len na skladovanie VJP [34].

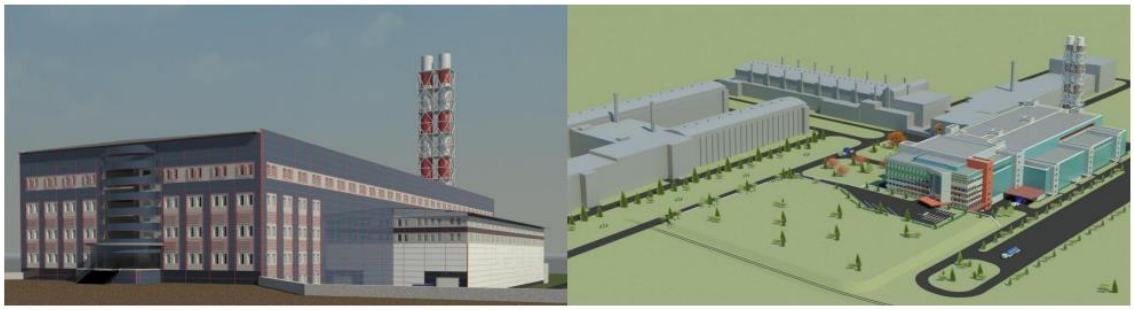
3.3.2 Francúzsko

Francúzsky závod sa nachádza v La Hague slúži na prepracovanie jadrového paliva. Závod prepracováva jadrový odpad aj zo zahraničných štátov, ako sú napríklad Nemecko, Belgicko, Švajčiarsko, Taliansko, Holandsko či Španielsko [35]. O väčšinu aktivít ako obohacovanie, prepracovanie a výroba zaobstaráva spoločnosť Areva. Závod na prepracovanie VJP Orano v La Hague patrí tiež pod spoločnosť Areva. Do prevádzky bol závod uvedený v roku 1990 a prevádzka by mala nepretržite trvať až do roku 2040. Prepracuje sa tu okolo 1 700 ton paliva ročne. Úprava paliva extrahuje 99,9 % plutónia a uránu. 3 % paliva z VJP je vysokoaktívny odpad [36].

Obrázok 3.3 Závod na prepracovanie VJP v La Hague [36]

3.3.3 Rusko

Rusko sa snaží uzavrieť palivový cyklus a ďalej využívať recyklovaný urán a plutónium v jadrovej energetike. Nachádza sa tu závod RT-1 na prepracovanie VJP v meste Mayak. Závod bol do prevádzky uvedený v roku 1971. Využíva sa tu metóda PUREX. Prepracuje sa tu 400 ton VJP ročne, palivo pochádzalo z jadrových elektrární na Ukrajine (Kola a Rovno), ktoré používajú reaktory typu VVER 440, z jadrovej elektrárne Beloyask a z námorných reaktorov. Od roku 2017 sa tu má prepracovávať aj palivo z Balakova, kde sa nachádza reaktor typu VVER 1000. V roku 2030 bude závod RT-1 vyradený z prevádzky a nahradí ho závod RT-2 v meste Zheleznogorsk. Závod RT-2 sa začal stavať už v roku 1984, avšak po prerušení stavby bol dokončený až v roku 2015. Závod RT-2 v súčasnosti prepracováva 250 ton VJP ročne, no do roku 2025 sa predpokladá navýšenie kapacity na 700 ton ročne. V závode sa bude prepracovávať palivo aj z reaktorov typu VVER-1000, RBMK a BN [37].



Obrázok 3.4 Závod RT-2 na prepracovanie VJP v Zheleznogorsku [38]

4. EKONOMIKA PREPRACOVANIE VS. PRIAME ULOŽENIE VJP V HLBINNOM ÚLOŽISKU

Prístup k nakladaniu s vyhoretým jadrovým palivom v jadrovej energetike je vo väčšine krajín veľmi kontroverznou politickou otázkou, čo do veľkej miery ovplyvňuje aj náklady. Preto je ekonomika pri tomto procese dôležitou súčasťou [30].

Väčšina krajín odložila svoje rozhodnutie týkajúce sa priameho uloženia VJP do hlbinného úložiska alebo jeho prepracovania a rozhodli sa použité palivo dočasne uskladniť. Medzi tieto krajina patrí Španielsko, Česko, či Slovensko [30]. Keďže je prepracovanie drahý a zložitý proces, viacero krajín sa rozhodlo pre priame uloženie v hlbinnom úložisku. Aj keď niektorí analytici v tvrdia, že náklady na prepracovanie a priame zneškodnenie sú podobné a že opätovné spracovanie bude čoskoro nákladovo efektívnejšie, kvôli zvýšeným cenám uránu. Podľa zdroju [39] to tak nie je. Rozdiel nákladov medzi priamou likvidáciou a prepracovaním je priveľký a bude pretrvávať ešte veľa desaťročí. Krajiny, ktoré si vybrali priamu likvidáciu čelia problému, kde hlbinné úložisko postaviť. Každé z hlbinných úložísk musí mať stále geologické podložie a obyvatelia krajiny, kde sa má toto úložisko nachádzať ho nechcú a boja sa negatívneho vplyvu na životné prostredie. Pri výbere nie je však ekonomika jediný faktor, ktorý ovplyvňuje rozhodnutie tykajúce sa prepracovania. Ďalším z faktorov je aj to, že recyklácia plutónia a uránu prispeje k energetickej bezpečnosti, budú vyriešené problémy s nedostatočnými priestormi na ukladanie VJP a tým sa prispeje k menšiemu zaťaženiu životného prostredia. Tieto problémy a faktory sú čoraz dôležitejšie, pretože veľa krajín stojí pred zásadným rozhodnutím o budúcom nakladaní s VJP [39]. V tabuľke 4.1 môžeme vidieť ceny uránu a náklady na hlbinné úložisko a prepracovanie od rôznych štúdií.

Tabuľka 4.1 Výsledky štúdií aktualizované do roku 2011 [30], upravené

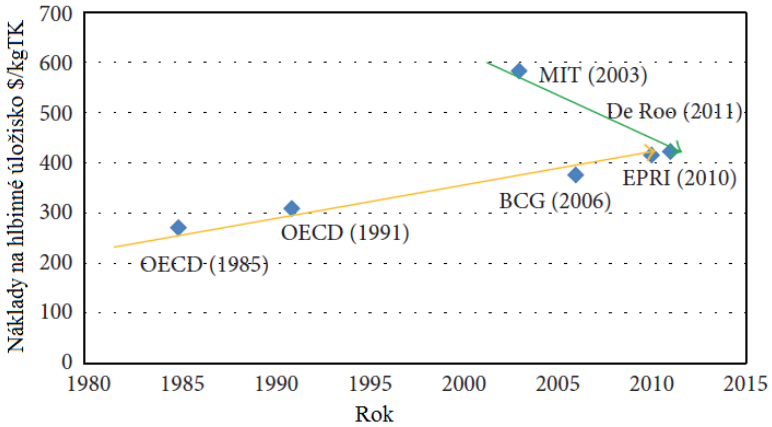
	NEA-OECD (1985)	NEA-OECD (1991)	MIT (2003)	BCG (2006)	EPRI (2010)	De Roo and Persons (2011)
Cena uránu ($/kgU)	149,8	81,0	43,7	80,6	276,5	89,0
Náklady na hlbinné úložisko ($/kgTK)	270,1	308,1	582,8	375,2	376,5	422,0
Cena za prepracovanie ($/kgTK)	1422,4	1248,3	1458,0	1602,6	1783,6	1169,7

4.1 Priame uloženie VJP v hlbinnom úložisku

Pri priamom uložení vzniknú prevádzkovateľovi reaktora náklady na dočasné skladovanie VJP pred uložením v hlbinnom úložisku, náklady na transport do úložiska a náklady na úpravu VJP, zapuzdrenie a uloženie. Prevádzkovateľ musí aj naďalej

kupovať nové palivo, v ktorom je zahrnutá cena za prírodný urán, jeho obohatenie a výrobu paliva [39].

Na obrázku 4.1 môžeme vidieť vývoj nákladov na hlbinné úložisko. Krivka má stúpajúcu tendenciu nákladov pre štúdie publikované OECD, BCG a EPRI, klesajúcu pre štúdie MIT a De Roo. Je to dané cenou hlbinného úložiska, ktorá je v štúdii MIT a De Roo porovnateľná, lebo vychádzajú z úložiska jadrového odpadu v Yucca Mountain, ktorý sa nachádza v Spojených štátoch amerických, v štáte Nevada. Tu má existovať hlbinné úložisko pre celé Spojené štáty americké [14]. Ako môžeme vidieť na hlbinné úložiská sa líšia v štúdiách o stovky dolárov za kilogram. Je to spôsobené, že prístupy jednotlivých krajín v budovaní hlbinného úložiska sa značne líšia so zvyšujúcimi sa neistotami spojenými, s technológiou, geologickými podmienkami a nákladmi. V najbližších rokoch sa krivka meniť nebude, ale v budúcnosti sa dá očakávať postupne klesajúci charakter kvôli technickým a ekonomickým vylepšeniam hlbinného úložiska [30].



Obrázok 4.1 Vývoj nákladov na hlbinné úložisko [30], upravené

Vzťah pre čisté náklady na priame zneškodnenie za kilogram vyhoretého paliva je prevzatý z [39] vzorec (A.2):

$$C_{dd} = \frac{C_{is}}{(1+i)^{t_{is}}} + \frac{C_{ds}}{(1+i)^{t_{ds}}} \ , \tag{4.1}$$

kde:

- C_{is} sú náklady na dočasné skladovanie VJP [$/kgTK], vrátane balenia prepravy,
- t_{is} je čas [rok], kedy je palivo vyvezené z reaktora. V tomto čase sú zaplatené náklady na dočasné skladovanie,
- C_{ds} sú náklady uloženie VJP do hlbinného úložiska vrátane prepravy [$/kgTK],
- t_{ds} je čas [rok], kedy je palivo premiestnené z dočasného úložiska (skladu/medziskladu) do konečného hlbinného úložiska. V tomto čase sú zaplatené náklady na uloženie do hlbinného úložiska,

- i je diskontná sadzba (slúži k prevodu peňažných tokov realizovaných v budúcnosti na ich súčasnú hodnotu. Je citlivejšia pri projektoch, pri ktorých sú vynaložené vysoké vstupné náklady za krátky časový okamžik a výnosy sú rozdelené do desiatok rokov. Toto platí aj v našom prípade. Používame tu sadzbu založenú na štátnych dlhopisoch, ktoré predstavujú sadzbu na skutočnej miere návratnosti. Používajú sa pre vnútroštátne investície určené na zvýšenie vládnych príjmov alebo zníženie vládnych výdavkov. Dôvodom použitia je, aby sme jasnejšie odlíšili prípad financovaný vládou od prípadu financovaného zo súkromných zdrojov. Nulová diskontná sadzba by sa mala používať po dobu nepresahujúcu jednu generáciu. Ak by sme použili nulovú diskontnú sadzbu zvýšili by sa náklady na prevádzku hlbinného úložiska počas dlhého obdobia [39]).

Tabuľka 4.2 Odhady nákladov na jednotlivé časti palivového cyklu a analýza citlivosti cien uránu a prepracovaného uránu [39]

	Hodnota parametra			Zlomová cena uránu (centrálna 368 $/kgU)		Zmena v porovnaní s centrálnou cenou
Parameter	Nízka	Stredná	Vysoká	Nízka	Vysoká	
Rozdiel v nákladoch na likvidáciu [$/kgTK]	300	200	100	298	438	±70
Výroba paliva MOX [$/kgTK]	700	1500	2300	302	434	±66
Dočasné skladovanie paliva [$/kgTK]	300	200	100	310	425	±57
Obohatenie [$/SWU]	150	100	50	338	404	-29 +36
Spaľovanie vyhoretého paliva [MWd/kgTK]	33	43	43	313	368	-54
Spaľovanie čerstvého paliva [MWd/kgTK]	53	43	43	350	368	-18
Laserové obohatenie	Áno	Nie	Nie	329	368	-39
Diskontná sadzba [%/rok]	8	5	2	353	380	-15 +13
Výroba paliva LEU [$/kgTK]	350	250	150	359	376	±8
Prémia za regenerovaný urán						
Konverzia [$/kgTK]	5	15	25	362	373	±5
Obohatenie [$/SWU	0	5	10	364	371	±3
Výroba paliva [$/kgTK]	0	10	20	367	369	±1
Konverzia [$/kgU]	8	6	4	367	639	±1

Do vzorca (4.1) sme postupne dosadili niektoré z hodnôt z tabuľky 4.2. Dosadili sme maximálnu a minimálnu hodnotu na náklady využité dočasným uskladnením a náklady na uloženie do hlbinného úložiska, ktorých rozmedzie je väčšie pretože sme počítali

s hodnotami pre viaceré štúdie. Ďalej sme uvažovali štvorročný palivový cyklus (t_{is} = 4). Kvôli zjednodušeniu analýzy, a aby sme zabezpečili rovnaké podmienky pre všetky výpočty sme uvažovali čisté náklady na geologické uloženie ihneď po vyvezení paliva z reaktora, t.j. že bude čiastka za geologické uloženie zaplatená ihneď po vyvezení paliva z reaktora (t_{ds} = 0). Diskontnú sadzbu sme uvažovali 5 % a 10 %. Výsledky výpočtov sú uvedené v tabuľke 4.3.

Tabuľka 4.3 Vypočítané hodnoty nákladov na priame uloženie VJP v HÚ

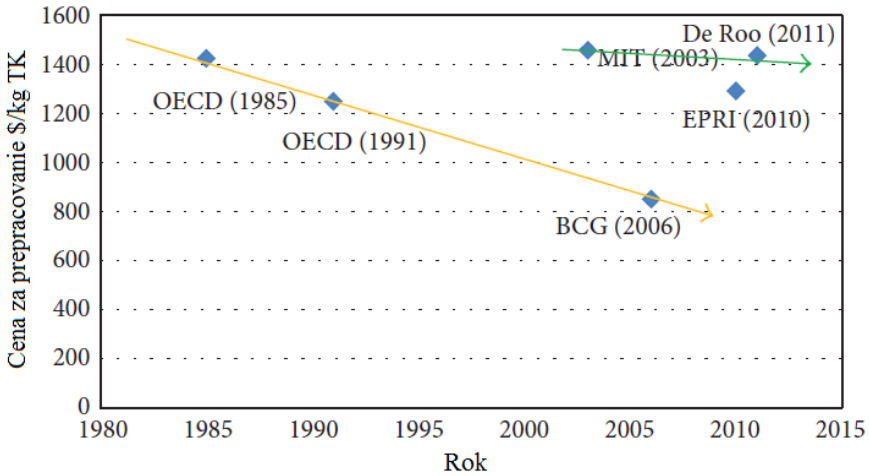
Vypočítané hodnoty	Dosadené hodnoty do vzorca				
C_{dd} [$/kgHM]	C_{is} [$/kgHM]	t_{is} [rok]	C_{ds} [$/kgHM]	t_{ds} [rok]	i [-]
947	300	4	700	0	0,05
547	300	4	300	0	0,05
782	100	4	700	0	0,05
382	100	4	300	0	0,05
905	300	4	700	0	0,10
505	300	4	300	0	0,10
768	100	4	700	0	0,10
368	100	4	300	0	0,10

Ako môžeme vidieť vypočítané hodnoty čistých nákladov na priame zneškodnenie za kilogram vyhoretého paliva sa líšia minimálne v porovnaní s hodnotami od rôznych štúdií uvedených v tabuľke 4.1.

4.2 Prepracovanie VJP a jeho uloženie po viacnásobnom prepracovaní

Druhou možnosťou je, že sa prevádzkovateľ reaktora vyberie cestou prepracovania. Pri prepracovaní nám vzniknú náklady na prepravu paliva do zariadenia na prepracovanie, náklady na samotné prepracovanie a ako posledné náklady na zneškodnenie odpadov z prepracovania, ktoré by mohlo byť v prípade Českej republiky vybudované v povrchovom úložisku v areáli už vyradených blokov jadrovej elektrárni Dukovany. Prevádzkovateľ získa po prepracovaní urán a plutónium. Ak bude chcieť vyrobiť z odseparovaných prvkov palivo, vzniknú mu ďalšie náklady spojené s prepravou, so zabezpečením paliva MOX, s licenciou na použitie paliva MOX v reaktoroch, zmeny v stratégii spaľovania, atď. [39].

Porovnanie nákladov za prepracovanie vidíme na obrázku 4.2. Obe krivky jednotlivých štúdií majú klesajúci trend. V prípade skupiny štúdií OECD a BCG je klesajúci trend oveľa výraznejší než u štúdií MIT a De Roo. Je to zapríčinené technickými a ekonomickými zlepšeniami technológie prepracovania. Tým sa stalo prepracovanie vyspelou technológiou, ktorej skúsenosti, výskum a vývoj vedú k znižovaniu cien za prepracovanie.



Obrázok 4.2 Vývoj nákladov na prepracovanie [30], upravené

Vzťah na prepracovanie a následné uloženie v hlbinnom úložisku má na rozdiel od predchádzajúceho vzťahu na priame uloženie v hlbinnom úložisku dve hlavné zložky. Prvou zložkou je cena za prepracovanie VJP a tou druhou zložkou je geologické zneškodnenie odpadu z prepracovania. Náklady sú kompenzované hodnotami plutónia a uránu, ktoré sme získali prepracovaním a môžu sa použiť na výrobu nového paliva MOX, REMIX, či ERU. Vzorec (4.2) pre náklady spojené s prepracovaním a uložením v hlbinnom úložisku za kilogram VJP je prevzatý z [39] vzorec (A.5):

$$C_{rr} = \frac{C_r}{(1+i)^{t_r}} + \frac{C_{dh}}{(1+i)^{t_{dh}}} - \frac{M_{Pu} \cdot C_{Pu}}{(1+i)^{t_{Pu}}} - \frac{M_{rU} \cdot C_{rU}}{(1+i)^{t_{rU}}}, \tag{4.2}$$

kde:

- C_r sú náklady na prepracovanie [$/kgTK], vrátane prepravy VJP, dočasného skladovania VJP a plutónia, úpravy a zneškodnenia nízko a stredne aktívnych odpadov z prepracovania,
- t_r je čas [rok], kedy je palivo vyvezené z reaktora. V tomto čase sú zaplatené náklady na prepracovanie,
- C_{dh} sú náklady uloženie VJP do hlbinného úložiska vrátane prepravy [$/kgTK],
- t_{dh} je čas [rok], kedy je palivo MOX vyvezené z reaktora. V tomto čase sú zaplatené náklady na geologické uloženie VJP vrátane prepravy VJP,
- M_{Pu} je hmotnosť regenerovaného plutónia na kilogram prepracovaného VJP [kg/kgTK],
- C_{Pu} je hodnota regenerovaného plutónia na kilogram plutónia [$/kg],
- t_{Pu} je čas [rok], kedy máme regenerované plutónium, teda po oddelení uránu, plutónia a ostaných štiepnych produktov, pred vyrobením paliva MOX,
- M_{rU} je hmotnosť regenerovaného uránu na kilogram prepracovaného VJP [kg/kgTK],
- C_{rU} je hodnota regenerovaného uránu na kilogram uránu [$/kg],

- t_{rU} je čas [rok], kedy máme regenerovaný urán, teda po oddelení uránu, plutónia a ostaných štiepnych produktov, pred vyrobením paliva MOX.

Do vzorca (4.2) sme postupne dosadili niektoré z hodnôt z tabuľky 4.2. Dosadili sme maximálnu a minimálnu hodnotu na náklady prepracovanie a náklady na uloženie do hlbinného úložiska, uvažovali sme štvorročný palivový cyklus (t_{is} = 4). Kvôli zjednodušeniu analýzy, a aby sme zabezpečili rovnaké podmienky pre všetky výpočty sme uvažovali čisté náklady na geologické uloženie ihneď po vyvezení paliva z reaktora (t_{ds} = 0). Tiež platí, že vyhoreté palivo MOX sa zneškodňuje bez opätovného prepracovania. Diskontnú sadzbu sme uvažovali 5 % a 10 %. Výsledky výpočtov sú uvedené v tabuľke 4.4.

Tabuľka 4.4 Vypočítané hodnoty nákladov na prepracovanie VJP a jeho uloženie

Vypočítané hodnoty	Dosadené hodnoty do vzorca										
C_{rr} [$/kgTK]	C_r [$/kgTK]	t_r [rok]	C_{dh} [$/kgTK]	t_{dh} [rok]	M_{Pu} [kg/kgTK]	C_{Pu} [$/kg]	t_{Pu} [rok]	M_{rU} [kg/kgTK]	C_{rU} [$/kg]	t_{rU} [rok]	i [-]
648	500	4	300	0	0,0104	2100	5	0,94	63	5	0,05
448	500	4	100	0	0,0104	2100	5	0,94	63	5	0,05
1059	1000	4	300	0	0,0104	2100	5	0,94	63	5	0,05
859	1000	4	100	0	0,0104	2100	5	0,94	63	5	0,05
1882	2000	4	300	0	0,0104	2100	5	0,94	63	5	0,05
1682	2000	4	100	0	0,0104	2100	5	0,94	63	5	0,05
591	500	4	300	0	0,0104	2100	5	0,94	63	5	0,10
391	500	4	100	0	0,0104	2100	5	0,94	63	5	0,10
933	1000	4	300	0	0,0104	2100	5	0,94	63	5	0,10
733	1000	4	100	0	0,0104	2100	5	0,94	63	5	0,10
1616	2000	4	300	0	0,0104	2100	5	0,94	63	5	0,10
1416	2000	4	100	0	0,0104	2100	5	0,94	63	5	0,10

4.3 Celkové porovnanie nákladov

Porovnanie nákladov medzi priamym zneškodnením VJP s nákladmi na opätovné prepracovanie a recykláciu si vyžaduje posúdenie nákladov počas celého životného cyklu. Otvorený palivový cyklus bude lepšou alternatívou ak náklady na prepracovanie VJP a následnú výrobu paliva MOX budú nižšie oproti cenám prírodného uránu a jeho obohatenia a ak by skladovanie, zapuzdrenie a uloženie VJP v povrchovom úložisku cenovo výhodnejšie než uloženie do hlbinného úložiska. V súčasnosti je však výhodnejší otvorený palivový cyklus pretože ceny prírodného uránu a jeho obohatenia sú podstatne nižšie než náklady na prepracovanie a výrobu paliva MOX [39].

Rovnica (4.3) predstavuje takzvanú zlomovú cenu. Zlomová cena je cena, pri ktorej sa náklady na oba palivové cykly rovnajú.

$$\begin{matrix}\textit{Náklady na medziskladovanie}\\ \textit{a likvidáciu VJP}\end{matrix} = \begin{matrix}\textit{Náklady na spracovanie}\\ \textit{a zneškodnenie VJP}\end{matrix} - \begin{matrix}\textit{Hodnota regenerovaného}\\ \textit{plutónia a uránu}\end{matrix}, \tag{4.3}$$

Výrazy na ľavej strane rovnice sa týkajú dočasného skladovania a koncového uloženia VJP. Pravá strana rovnice sa týka prepracovania a zneškodnenia odpadu z prepracovania. Hodnoty regenerovaného plutónia a uránu predstavujú hodnotu palív, ktoré sa z nich dajú vyrobiť, bez nákladov na výrobu a použitia týchto palív. Z rovnice vyplýva, že ak je cena uránu nižšia ako zlomová cena, tak je priame zneškodnenie lacnejšie a naopak, ak je zlomová cena vyššia ako cena uránu, tak je výhodnejšie opätovné prepracovanie. V skutočnosti je však rovnica oveľa zložitejšia, pretože cena získaného uránu a plutónia závisí od širokej škály faktorov.

Palivá vyrobené z prepracovaného uránu a plutónia môžu nahradiť palivá vyrobené z prírodného uránu. Hodnota uránu a plutónia získaného prepracovaním rastie spoločne s cenou prírodného uránu, pretože hodnota získaného uránu a plutónia prepracovaním vyplýva z ich potenciálu [39]. Hodnotu prepracovaných materiálov môžeme predstaviť rovnicou (4.4):

$$\begin{matrix}\textit{Hodnota regenerovaného}\\ \textit{uránu a plutónia}\end{matrix} = \begin{matrix}\textit{Náklady na palivo}\\ \textit{vyrobené z prírodného uránu}\end{matrix} - \begin{matrix}\textit{Náklady na palivo vyrobené}\\ \textit{z prepracovaného uránu a plutónia}\end{matrix}, \tag{4.4}$$

Pre porovnanie uzavretého a otvoreného palivového cyklu si môžeme uviesť jednoduché príklady, v ktorých budeme počítať s ilustračnými a zaokrúhlenými cenami z tabuliek 4.2 a 4.3. Pri výpočte sme nebrali do úvahy škálu ekonomických faktorov, ktoré musia byť v úplnom výpočte. Tieto faktory sú: zmeny v množstve uránu, izotopné zloženie uránu a plutónia, úrovne obohatenia uránu potrebné na dosiahnutie daného vyhorenia, atď. Ďalej uvažujeme, že VJP obsahuje 1% plutónia izotopu ^{239}Pu, 95% uránu izotopu ^{238}U a 4% tvoria odpadové štiepne produkty a minoritné aktinidy. Hodnota prepracovaného uránu je rovnaká ako hodnota čerstvého prírodného uránu, teda 63 $/kgTK. Odhad hodnoty plutónia je zložitejší, pretože je potrebné pre 1 kg nového paliva MOX pre ľahkovodné reaktory prepracovať 6 kilogramov VJP. V tomto prípade

by sa teda hodnota paliva MOX pohybovala okolo 2100 $/kgTK. Každý kilogram paliva MOX môže nahradiť kilogram uránového paliva v ľahkovodnom reaktore. Cenu paliva vyrobeného z prírodného uránu môžeme odhadnúť približne na 1326 $/kgTK. Pričom povedzme, že na výrobu 1 kg čerstvého paliva potrebujeme 7 kilogramov prírodného uránu, ktorého cena sa pohybuje okolo 63 $/kgTK, náklady na jeho premenu do formy, v ktorej sa obohacuje sa pohybujú približne okolo 5 $/kgTK a náklady na jeho obohatenie, ktoré obsahujú 6 separačných cyklov, pričom hodnota jednej je 100 $ a náklady výrobu jedného kilogramu vyrobeného paliva sú približne 250 $/kgTK.

Výsledná hodnota paliva vyrobeného z prírodného uránu je:

$$7 \cdot 63 + 7 \cdot 5 + 6 \cdot 100 + 250 = 1326\ \$/kgHM$$

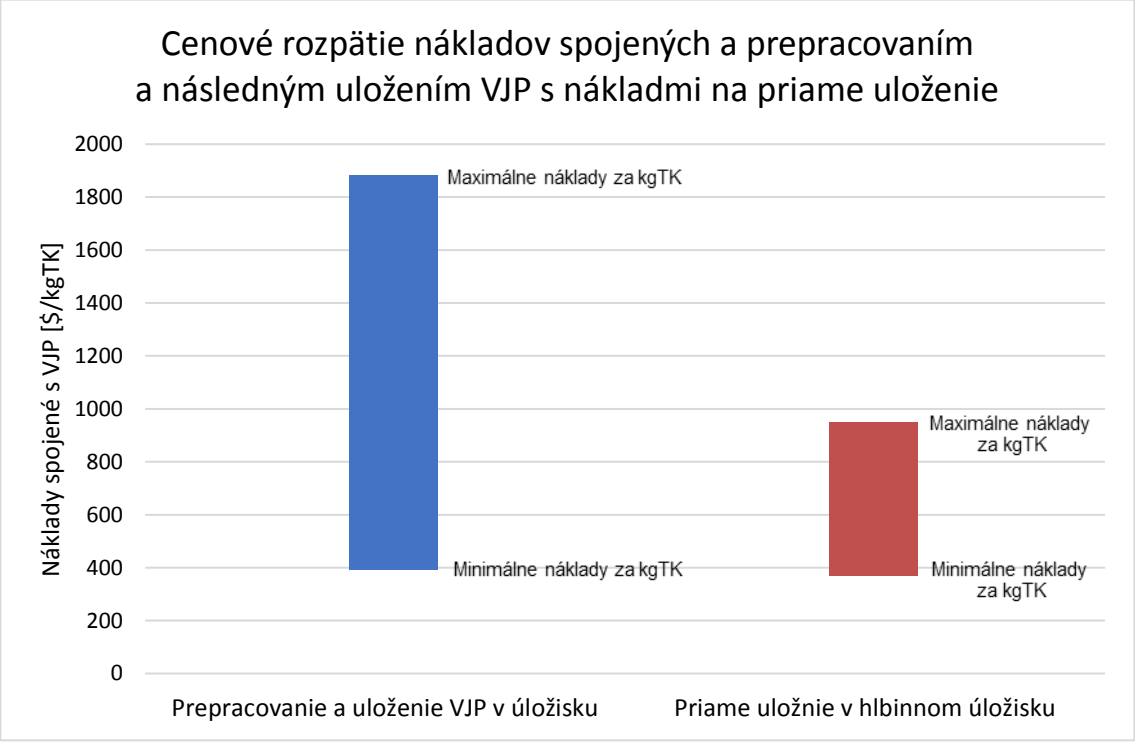
Ako prvé porovnáme nami vypočítané najnižšie ceny oboch cyklov. Môžeme odhadnúť, že náklady na dočasné skladovanie, kým nebude vybudované hlbinné úložisko (C_{is}) je 100 $/kgTK. Náklady na priame uloženie v hlbinnom úložisku (C_{ds}), tieto náklady zahŕňajú prepravu, enkapsuláciu a uloženie VJP do hlbinného úložiska, predstavujú 300 $/kgTK. Náklady na prepracovanie paliva (C_r) sú v našom prípade odhadované na 500 $/kgTK a náklady na likvidáciu odpadu z prepracovania (C_{dh}) sa odhadujú na 100 $/kgTK. Celkové náklady na priame hlbinné úložisko predstavujú v našom jednoduchom prípade 382 $/kgTK. Náklady na prepracovanie dosahujú porovnateľnú hodnotu, 448 $/kgTK. V tomto prípade dáva prepracovanie nielen ekologický zmysel, ale aj ekonomický zmysel.

Pri porovnaní stredných nákladov oboch cyklov môžeme odhadnúť, že náklady na dočasné skladovanie, kým nebude vybudované hlbinné úložisko (C_{is}) je 100 $/kgTK. Náklady na priame uloženie v hlbinnom úložisku (C_{ds}), tieto náklady zahŕňajú prepravu, enkapsuláciu a uloženie VJP do hlbinného úložiska, predstavujú 700 $/kgTK. Náklady na prepracovanie paliva (C_r) sú v našom prípade odhadované na 1000 $/kgTK a náklady na likvidáciu odpadu z prepracovania (C_{dh}) sa odhadujú na 300 $/kgTK. Celkové náklady na priame hlbinné úložisko predstavujú v našom jednoduchom prípade 768 $/kgTK. Náklady na prepracovanie dosahujú porovnateľnú hodnotu, 1059 $/kgTK. Z nášho druhého ilustračného príkladu vyplýva, že odseparované plutónium nemá dostatočnú hodnotu. Hodnota kilogramu paliva, ktoré je vyrobené z prírodného uránu je 1326 $/kgTK a hodnota paliva MOX vyrobeného z odseparovaného plutónia je 2100 $/kgTK. Ak by všetky ceny zostali rovnaké, cena prírodného uránu by musela vzrásť na 460 $/kgTK alebo ak by cena za prepracovanie klesla z 1000 $/kgTK na 640 $/kgTK. V takomto prípade by sa prepracovanie stalo konkurencie schopné a mohli by sme o ňom uvažovať.

Pri porovnaní maximálnych nákladov oboch cyklov môžeme odhadnúť, že náklady na dočasné skladovanie, kým nebude vybudované hlbinné úložisko (C_{is}) je 300 $/kgTK. Náklady na priame uloženie v hlbinnom úložisku (C_{ds}), tieto náklady zahŕňajú prepravu, enkapsuláciu a uloženie VJP do hlbinného úložiska, predstavujú 700 $/kgTK. Náklady na prepracovanie paliva (C_r) sú v našom prípade odhadované na 2000 $/kgTK a náklady

na likvidáciu odpadu z prepracovania (C_{dh}) sa odhadujú na 300 $/kgTK. Celkové náklady na priame hlbinné úložisko predstavujú v našom jednoduchom prípade 947 $/kgTK. Náklady na prepracovanie dosahujú porovnateľnú hodnotu, 1882 $/kgTK. Z nášho tretieho ilustračného príkladu vyplýva, že odseparované plutónium nemá dostatočnú hodnotu. Hodnota kilogram paliva, ktoré je vyrobené z prírodného uránu je 1326 $/kgTK a hodnota paliva MOX vyrobeného z odseparovaného plutónia je 2100 $/kgTK. Ak by všetky ceny zostali rovnaké, cena prírodného uránu by musela vzrásť na 1330 $/kgTK alebo ak by cena za prepracovanie klesla z 2000 $/kgTK na 890 $/kgTK. V takomto prípade by sa prepracovanie stalo konkurencie schopné a mohli by sme o ňom uvažovať.

Môžeme si všimnúť, že náklady na prepracovanie ovplyvňuje z najväčšej časti zložka C_r teda zložka, ktorá zahŕňa náklady na prepracovanie, prepravu VJP, dočasného skladovania VJP a plutónia, úpravy a zneškodnenia nízko a stredne aktívnych odpadov z prepracovania. Predpokladá sa však, že táto zložka začne postupom času klesať a prepracovanie bude oveľa konkurencieschopnejšie s priamym uložením do hlbinného úložiska, avšak v niektorých prípadoch aj lacnejším spôsobom ako zaobchádzať s VJP.



Obrázok 4.3 Cenové rozpätie nákladov v $/kgTK použitých na prepracovanie VJP a následné uloženie RAO s nákladmi na priame uloženie VJP do HÚ

4.4 Porovnanie nákladov na priame uloženie HÚ s variantou prepracovania a uložením pre ČR

Ako vieme, v ČR sa nachádzajú dve jadrové elektrárne, jedna v Dukovanoch a jedna v Temelíne. V Dukovanoch sa nachádzajú štyri reaktory typu VVER 440 a v Temlíne dva reaktory typu VVER 1000. Hodnoty uvedené v tabuľke 4.5 nám hovoria o tom, koľko VJP jadrové elektrárne v ČR vyprodukujú za svoju plánovanú životnosť, koľko vyprodukujú ak bude ich životnosť predĺžená na 60 rokov a koľko vyprodukuje plánovaný nový jadrový zdroj.

Tabuľka 4.5 Bilancia VJP určeného k uloženiu do hlbinného úložiska [2]

Doba prevádzky	EDU 1 - 4	ETE 1, 2	NJZ (2+1)	Celkom
-	[tTK]	[tTK]	[tTK]	[tTK]
40 rokov	1 740	1 750	---	3 490
60 rokov	2 430	2 470	5 010	9 910

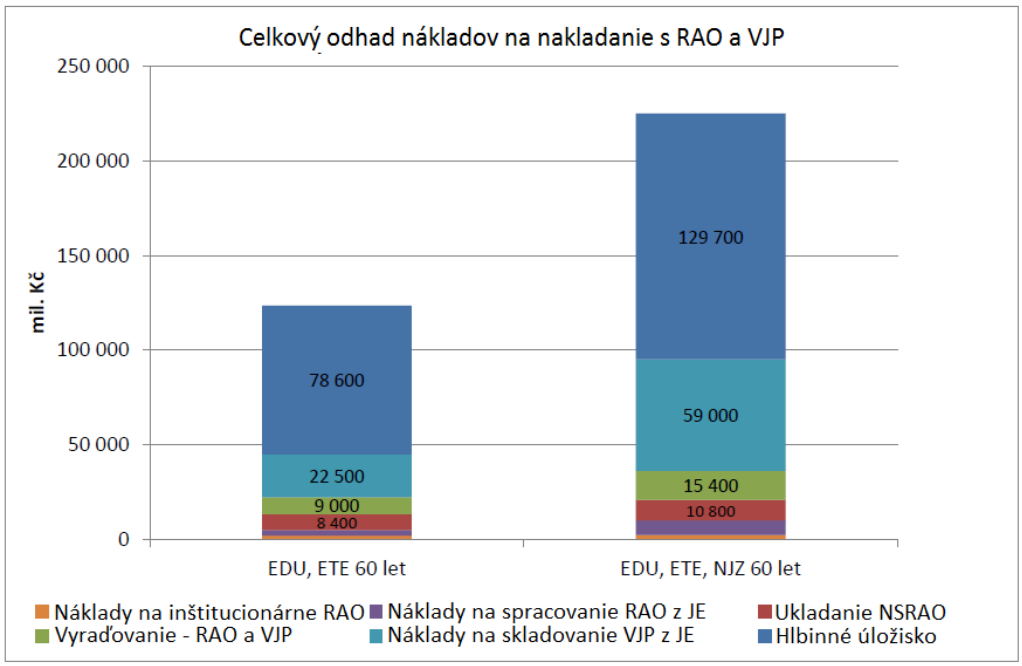
Pre odhadovanie nákladov na priame uloženie v HÚ alebo na prepracovanie a uloženie v povrchovom úložisku budeme počítať s VJP, ktoré jadrové elektrárne vyprodukujú počas svojej predĺženej životnosti na 60 rokov, teda s hodnotou 4 900 ton.

Pri porovnaní najnižších cien oboch cyklov, kde celkové náklady na priame hlbinné úložisko predstavujú 382 $/kgTK a náklady na prepracovanie dosahujú porovnateľnú hodnotu, 448 $/kgTK. Stavba hlbinného úložiska by vyšla v prepočte viac ako 45,1 miliárd korún. Prepracovanie a uloženie by vyšlo na takmer 52,9 miliárd korún.

Pri porovnaní stredných nákladov oboch cyklov, kde celkové náklady na priame hlbinné úložisko predstavujú 768 $/kgTK a náklady na prepracovanie dosahujú hodnotu, 1059 $/kgTK. V tomto prípade by vyšla stavba hlbinného úložiska v prepočte na 90,7 miliárd korún. Prepracovanie a následné uloženie by vyšlo na takmer 125,1 miliárd českých korún.

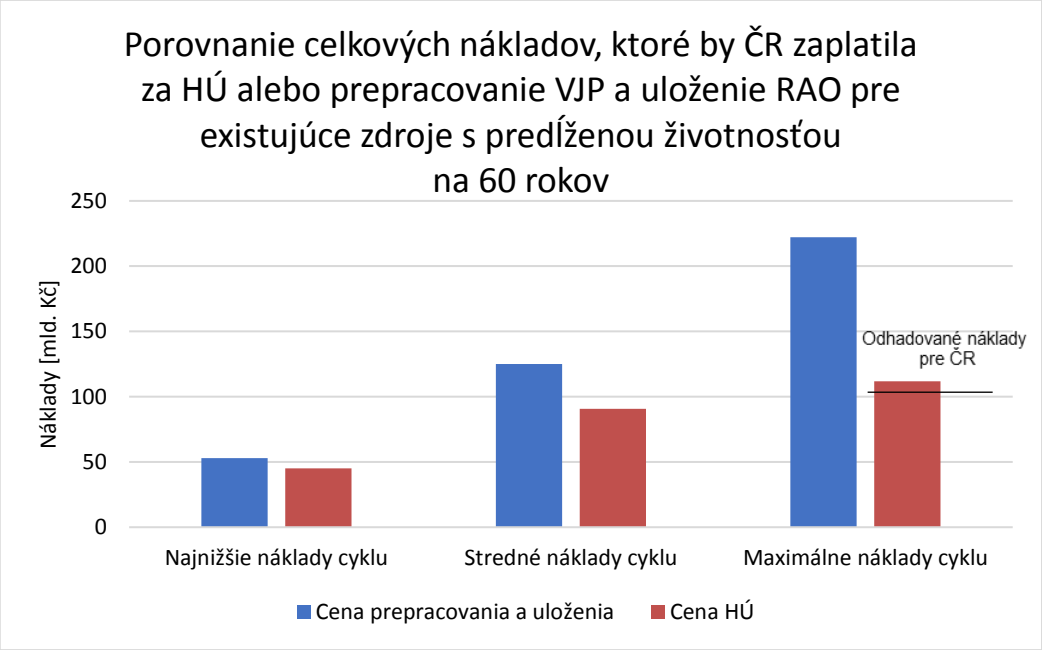
Pri porovnaní maximálnych nákladov oboch cyklov, kde celkové náklady na priame hlbinné úložisko predstavujú 947 $/kgTK a náklady na prepracovanie dosahujú hodnotu, 1882 $/kgTK. V takomto prípade by vyšla stavba hlbinného úložiska v prepočte na takmer 111,8 miliárd korún. Prepracovanie a následné uloženie by vyšlo na 222,2 miliárd českých korún.

Na obrázku 4.4 vidíme odhad nákladov na uloženie VJP a RAO do hlbinného úložiska.



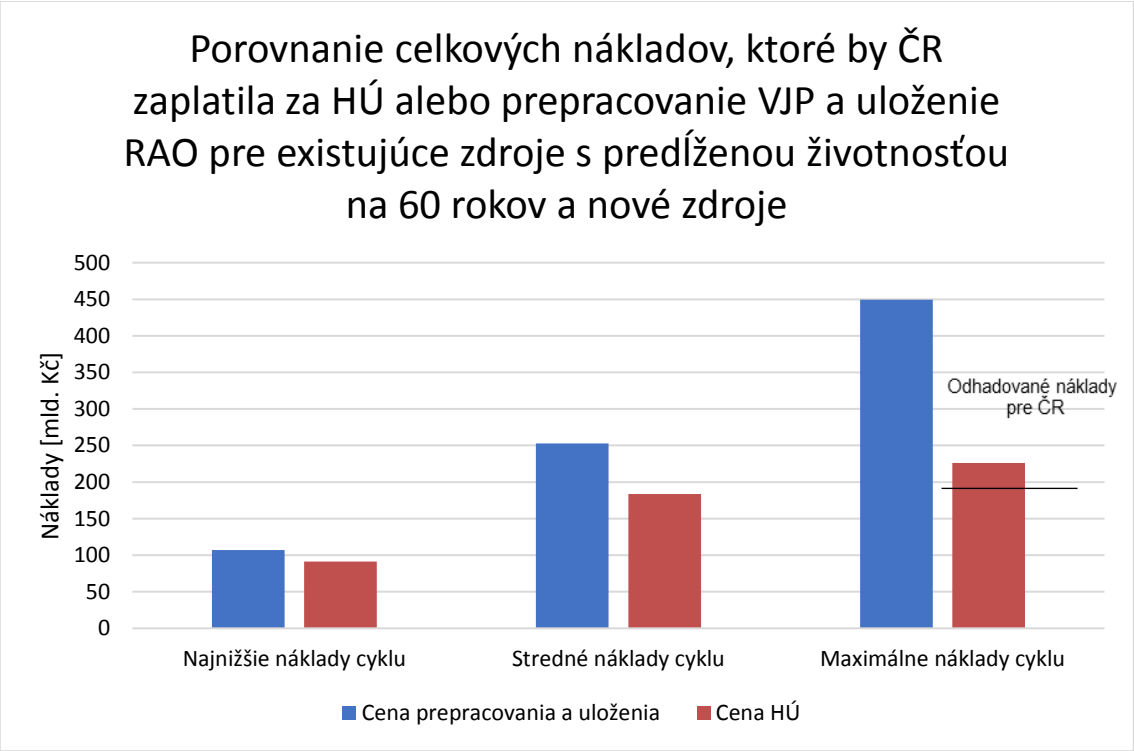
Obrázok 4.4 Celkový odhad nákladov na nakladanie s RAO a VJP [2]

ČR odhaduje náklady na skladovanie VJP, na vybudovanie a prevádzku hlbinného úložiska pre existujúce jadrové zdroje v Dukovanoch a Temelíne s predĺženou životnosťou na 60 rokov na 101,1 miliárd českých korún [2]. Na obrázku 4.5 môžeme vidieť porovnanie nami vypočítaných nákladov a nákladov odhadovaných v ČR.



Obrázok 4.5 Porovnanie celkových nákladov, ktoré by ČR zaplatila za HÚ alebo prepracovanie VJP a uloženie RAO pre existujúce zdroje s predĺženou životnosťou na 60 rokov

Odhad pre náklady na skladovanie VJP, na vybudovanie a prevádzku hlbinného úložiska pre existujúce jadrové zdroje v Dukovanoch a Temelíne s predĺženou životnosťou na 60 rokov a pre nový jadrový zdroj na je 188,7 miliárd českých korún [2]. Na obrázku 4.6 môžeme vidieť porovnanie nami vypočítaných nákladov a nákladov odhadovaných v ČR.



Obrázok 4.6 Porovnanie celkových nákladov, ktoré by ČR zaplatila za HÚ alebo prepracovanie VJP a uloženie RAO pre existujúce zdroje s predĺženou životnosťou na 60 rokov a nové zdroje

5. ZÁVER

Cieľom tejto bakalárskej práce je zaoberať sa problematikou hlbinných úložísk a prepracovaním vyhoretého jadrového paliva, ktoré je často označované ako odpad, pritom je to veľmi cenná surovina.

V práci je vysvetlený jadrový palivový cyklus, ako rozdeľujeme rádioaktívny odpad, čo je to vyhoreté jadrové palivo. Ďalej sa bakalárska práca zaoberá zadnou časťou palivového cyklu, skladovaním vyhoretého jadrového paliva v medziskladoch a skladoch. Tu sú popísané jednotlivé typy medziskladov a skladov, s ktorými sa môžeme vo svete stretnúť. Ako príklad tu je priblížený švédsky mokrý medzisklad CLAB, suchý medzisklad v Spojenom kráľovstve v obci Sellafield, v ktorom je vyhoreté jadrové palivo ukladané do betónových boxov a pri prevoze musí byť palivo preložené do kontajneru určeného na prevoz. Český, už zaplnení medzisklad v Dukovanoch a dva sklady, pričom sa jeden nachádza v Dukovanoch a jeden v Temelíne. V Dukovanoch sa používa kontajner typu CASTOR 440/84 a v Temelíne používajú kontajnery typu CASTOR 1000/19. Oba typy súborov sú vhodné aj na prepravu.

Práca sa ďalej zaoberá hlbinným úložiskom. Dozvieme sa, čo to je hlbinné úložisko. Je tu popísaný princíp návrhu hlbinného úložiska. Ako vieme, hlbinné úložisko je plánované aj v Českej republike. V súčasnosti sa hovorí o šiestich lokalitách, kde by sa malo hlbinné úložisko nachádzať. V roku 2050 je plánovaný začiatok výstavby a v roku 2065 by mala byť zahájená prevádzka úložiska [2]. Ale ČR ako aj ostatné členské krajiny EÚ, ktoré majú v pláne pokračovať v jadrovej energetike aj po roku 2025 musia výstavbu hlbinného úložiska urýchliť, pretože európska komisia začiatkom roku 2022 vydala novú smernicu, v ktorej tieto štáty musia uviesť do prevádzky hlbinné úložisko už do roku 2050 [41]. Krajinou, kde je úložisko už vo výstavbe je Fínsko. Zahájenie prevádzky sa predpokladá v roku 2023 a jej ukončenie v roku 2120 [28].

Tretia kapitola sa zaoberá prepracovaním vyhoretého jadrového paliva. Vyhoreté jadrové palivo obsahuje asi 96% pôvodného izotopu uránu ^{238}U, menej ako 1% štiepneho izotopu uránu ^{235}U, asi 3% odpadových štiepnych produktov a minoritných aktinidov. Zvyšné 1% tvorí štiepny izotop plutónia ^{239}Pu. Kvôli tomuto zloženiu sa krajiny ako Rusko a Francúzsko rozhodli vyhoreté palivo prepracovať. Prepracovaním paliva sa dosiahne aj k zníženiu objemu rádioaktívneho odpadu na pätinu. Úroveň rádioaktivity prepracovaného vyhoretého jadrového paliva je oveľa menšia a asi po 100 rokoch klesá rýchlejšie než pri neprepracovanom vyhoretom palive [11]. V jednotlivých podkapitolách sú uvedené spôsoby prepracovania. Pričom najpoužívanejšia metóda na prepracovanie je metóda PUREX, ktorá je v krátkosti vysvetlená v podkapitole 3.1.1. Ďalej sú v práci priblížené jednotlivé závody na prepracovanie VJP, v ktorých by mohla Česká republika prepracovávať svoje vyhoreté palivo.

Posledná kapitola sa venuje ekonomike otvoreného a zatvoreného palivového cyklu, cenovým porovnaním týchto dvoch cyklov. Náklady na zatvorený palivový cyklus sa

pohybujú od 391 $/kgTK do 1882 $/kgTK, pričom náklady na otvorený palivový cyklus, teda ak VJP ďalej neprepracovávame, ale priamo uložíme do hlbinného úložiska sa pohybujú od 368 $/kgTK do 947 $/kgTK. Porovnanie nákladov hlbinného úložiska s prepracovaním a uložením pre existujúce zdroje s predĺženou životnosťou na 60 rokov vystihuje graf na obrázku 4.5. Náklady na priame uloženie do hlbinného úložiska sa pohybujú od 45,1 do 111,8 miliárd Kč, zatiaľ čo náklady na zatvorený palivový cyklus sa pohybujú od 52,9 do 222,2 miliárd Kč. ČR odhaduje náklady na hlbinné úložisko na 101,1 miliárd Kč [2]. S oficiálnym odhadom je porovnateľná naša výsledná hodnota pri zohľadnení maximálnych nákladov (111,8 mld. Kč). Inak tomu nie je ani pri nákladoch na uzavretý palivový cyklus pre existujúce zdroje s predĺženou životnosťou na 60 rokov a nový jadrový zdroj, kde ČR odhaduje cenu skladovania VJP a ukladania do HÚ na 188,7 miliárd Kč [2]. S oficiálnym odhadom je porovnateľná naša výsledná hodnota pri zohľadnení maximálnych nákladov na skladovanie a ukladanie VJP do hlbinného úložiska (222,2 mld. Kč).

Z obrázku 4.3, na ktorom sa nachádza graf, ktorý porovnáva otvorený a zatvorený palivový cyklus môžeme vidieť, že prepracovanie nie je v súčasnosti konkurencie schopné priamemu uloženiu VJP v hlbinnom úložisku. Prepracovanie si môžu dovoliť len ekonomicky silné krajiny ako je Rusko, Francúzsko, Švajčiarsko, Belgicko. V budúcnosti však očakávame nové technológie a vylepšenia prepracovania VJP. Ak by sa tak stalo, náklady na prepracovanie VJP by mohli začali klesať rýchlejšie než náklady na HÚ. Prepracovanie VJP by sa stalo postupne konkurencie schopné otvorenému palivovému cyklu a mohli by si ho dovoliť aj ekonomicky slabšie štáty. Ale aj keď prepracovanie nie je ekonomicky výhodné, musíme zobrať do úvahy aj to, že prepracovaním sa zníži objem vysokorádioaktívneho odpadu zhruba na jednu pätinu, rádioaktivita prepracovaného vyhoretého jadrového paliva je oveľa menšia a asi po 100 rokoch klesá rýchlejšie než pri neprepracovanom vyhoretom palive UO_2 [3], prepracovaním VJP sa ušetrí až 25 % uránovej rudy, čím sa zníži aj objem odpadu, odpad z prepracovania vo vitrifikovanej forme vrátane produktov získaných štiepením sú pôvodne beta-gama žiaričmi a polčas rozpadu sa u týchto odpadov zníži o päťsto rokov [30]. Aj vďaka týmto výhodám má prepracovanie zmysel, možno nie až taký ekonomický, ale ľudstvo by sa malo správať voči planéte a životnému prostrediu ohľaduplne a zachovať ho pre budúce generácie čo najmenej znečistené. Preto by bolo dobré, ak by sa ČR vydala cestou prepracovávania VJP. Česká republika si v tomto prípade môže brať príklad z Belgicka, ktoré VJP prepracováva vo Francúzskom závode v meste La Hague a vitrifikovaný vysokorádioaktívny odpad skladuje v bazénoch meste Dessel [42]. ČR by mohla svoje palivo prepracovať napríklad vo Francúzsku. Prepracované palivo by mohlo byť použité v novopostavenej jadrovej elektrárni. Po viacerých prepracovaniach VJP, keď by už palivo nebolo ďalej možné prepracovať, by sa mohol vitrifikovaný odpad uložiť do povrchového úložiska nachádzajúceho sa v lokalite vyradených jadrových blokov. Avšak ČR sa s najväčšou pravdepodobnosťou

rozhodne pre otvorený palivový cyklus a až budúcnosť ukáže či bolo to správne rozhodnutie.

LITERATÚRA

[1] *Státní energetická koncepce České republiky.* In: . Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, Prosinec 2014. Dostupné také z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statni-energeticka-politika/2016/12/Statni-energeticka-koncepce-_2015_.pdf

[2] ČESKÁ REPUBLIKA. *KONCEPCE NAKLÁDÁNÍ S RADIOAKTIVNÍMI ODPADY A VYHOŘELÝM JADERNÝM PALIVEM V ČESKÉ REPUBLICE*. In: . Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2019, s. 1-67. Dostupné také z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/RAO/2019/12/Koncepce-nakladani-s-RaO-a-VJP-v-CR_2019.pdf

[3] Processing of Used Nuclear Fuel. *WORLD NUCLEAR ASSOCIATION* [online]. WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2018, Jún [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/processing-of-used-nuclear-fuel.aspx

[4] *Rádioaktívne odpady a ich latentné nebezpečie* [online]. [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: https://www.energyweb.cz/web/rao/sk/11.htm

[5] Radioactive Waste Management. *WORLD NUCLEAR ASSOCIATION* [online]. WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2020, Január [cit. 2020-10-27]. Dostupné z: https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx

[6] BAČVÁŘ, Josef. *Jaderné elektrárny.* Praha: SNTL, 1978. DT 621.311.25: 621.039.

[7] DLOUHÝ, Zdeněk. *Nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem.* Brno: VUTIUM, 2009. ISBN 978-80-214-3629-9.

[8] JADROVÝ PALIVOVÝ CYKLUS. In: *SLOVENSKÉ ELEKTRÁRNE* [online]. [cit. 2020-11-02]. Dostupné z: https://www.seas.sk/jadrovy-palivovy-cyklus

[9] *The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle.* OECD Nuclear Energy Agency, 2013. NEA No. 7061. Dostupné také z: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14764/the-economics-of-the-back-end-of-the-nuclear-fuel-cycle?details=true

[10] RADIOAKTIVNÍ ODPAD. *TŘÍDĚNÍ ODPADU.CZ* [online]. 1 [cit. 2020-10-27]. Dostupné z: https://www.trideniodpadu.cz/radioaktivni-odpad

[11] Nuclear Fuel Cycle Overview. *WORLD NUCLEAR ASSOCIATION* [online]. WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2020, Apríl [cit. 2020-10-27]. Dostupné z: https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview.aspx#ECSArticleLink11

[12] Použité jaderné palivo. In: *SVĚT ENERGIE* [online]. [cit. 2020-11-01]. Dostupné z: https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/jaderne-elektrarny/pouzite-jaderne-palivo

[13] ŠTAMBERG, Karel. *Technologie jaderných paliv II*. 3. Praha: ČVUT, 2017. ISBN 978-80-01-06077-3.

[14] Storage and Disposal of Radioactive Waste. *WORLD NUCLEAR ASSOCIATION* [online]. WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2021, Máj [cit. 2022-01-13]. Dostupné z: http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-waste/storage-and-disposal-of-radioactive-waste.aspx

[15] Dobudovanie skladovacej kapacity vyhoretého jadrového paliva v lokalite Jaslovské Bohunice. *Javys* [online]. 1 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: https://www.javys.sk/sk/o-spolocnosti/projekty/dobudovanie-skladovacej-kapacity-vyhoreteho-jadroveho-paliva-v-lokalite-jaslovske-bohunice

[16] Mezisklad vyhořelého paliva Dukovany. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/jaderna-zarizeni/sklady-vyhoreleho-jaderneho-paliva/mezisklad-vyhoreleho-paliva-dukovany/

[17] Sklad vyhořelého paliva Dukovany. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/jaderna-zarizeni/sklady-vyhoreleho-jaderneho-paliva/sklad-vyhoreleho-paliva-dukovany/

[18] Sklad vyhořelého jaderného paliva Temelín. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/jaderna-zarizeni/sklady-vyhoreleho-jaderneho-paliva/sklad-vyhoreleho-jaderneho-paliva-temelin/

[19] CASTOR® 1000/19: *Development and Design of a New Transport and Storage Cask*. In: . Interlaken, Švajčiarsko: IYNC, 2008, 1-7. Dostupné také z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/048/40048126.pdf

[20] VARMUŽA, Jan. *NAKLÁDÁNÍ S RADIOAKTIVNÍMI ODPADY*. VUT v Brne, 2020.

[21] *LOKALITA SKALKA* [online]. ČEZ, 2011, 1-2 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: https://www.cez.cz/webpublic/file/edee/2019/04/dl_skalka_screen.indd.pdf

[22] HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ. *Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO)*. Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO), 2016, 1-16 [cit. 2022-04-16]. Dostupné také z: https://www.surao.cz/wp-content/uploads/2019/03/HU_brozura_final.pdf

[23] Hlubinné úložiště jaderného odpadu Česká republika potřebuje. Vybrat pro něj lokalitu se musí otevřeně, rozumně a včas. *ATOM INFO.cz* [online]. 11.6. 2018n. l. [cit. 2020-11-26]. Dostupné z: https://atominfo.cz/2018/06/hlubinne-uloziste-jaderneho-odpadu-ceska-republika-potrebuje-vybrat-pro-nej-lokalitu-se-musi-otevrene-rozumne-a-vcas/

[24] Výsledky technického hodnocení potenciálních lokalit k umístění hlubinného úložiště VJP a RAO– podkladový materiál. *Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO)* [online]. Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO), 1-6 [cit. 2020-11-26]. Dostupné z: https://www.surao.cz/wp-content/uploads/2020/06/proces_vyberu_lokalit_web_novy.pdf

[25] Deep Geological Repository. *Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO)*. Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO), 2019, 1-20 [cit. 2022-03-12]. Dostupné také z: https://www.surao.cz/wp-content/uploads/2020/08/surao_brozura_HU_EN_online.pdf

[26] Fáze hlubinného úložiště. *Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO)* [online]. Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO), 1-3 [cit. 2022-03-12]. Dostupné z: https://www.surao.cz/wp-content/uploads/2020/05/zivotni-faze-HU-final.pdf

[27] ČR a SR by mohly řešit hlubinné jaderné úložiště společně. *OENERGETICE.CZ*. OENERGETICE.CZ, 2019 [cit. 2020-11-26]. Dostupné také z: https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/cr-a-sr-by-mohly-resit-hlubinne-jaderne-uloziste-spolecne

[28] Nuclear Power in Finland. *WORLD NUCLEAR ASSOCIATION* [online]. WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2022, Máj [cit. 2020-11-26]. Dostupné také z: https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/finland.aspx

[29] Hlbinné úložisko. In: *javis.sk* [online]. javis.sk [cit. 2020-11-26]. Dostupné z: https://www.javys.sk/sk/informacny-servis/energeticky-slovnik/H/hlbinne-ulozisko

[30] Recycling versus Long-Term Storage of Nuclear Fuel: Economic Factors. *Science and Technology of Nuclear Installations*. Hindawi Publishing Corporation, 2013, 1-8.

[31] Mixed Oxide (MOX) Fuel. *WORLD NUCLEAR ASSOCIATION* [online]. WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2017, Október [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuel-mox.aspx

[32] Prepracovanie paliva. *javis.sk* [online]. javis.sk [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: https://www.javys.sk/sk/informacny-servis/dolezite-pojmy/prepracovanie-paliva

[33] Nuclear Power in the Netherlands. *WORLD NUCLEAR ASSOCIATION* [online]. WORLD NUCLEAR ASSOCIATION [cit. 2021-03-06]. Dostupné z: https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/netherlands.aspx

[34] Reprocessing ceases at UK's Thorp plant. *World Nuclear News* [online]. 2018, 14 November [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Reprocessing-ceases-at-UKs-Thorp-plant

[35] *La Hague Nuclear Waste Reprocessing Plant – The Interim Storage* [online]. Dextra [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: https://www.dextragroup.com/activities/technical-solutions-for-construction/solutions/38-activities/construction/projects/nuclear/307-la-hague-nuclear-waste-storage-france

[36] Nuclear Power in France. *WORLD NUCLEAR ASSOCIATION* [online]. WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2021, Január [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france.aspx

[37] Russia's Nuclear Fuel Cycle. *WORLD NUCLEAR ASSOCIATION* [online]. WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2021, December [cit. 2022-02-19]. Dostupné z: https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-fuel-cycle.aspx

[38] SNF management system development and deployment in Russia. *POCATOM* [online]. POCATOM, 1-20 [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df10/day-3/02.Khaperskaya_Russia.pdf

[39] BUNN, Matthew, Steve FETTER, John HOLDREN a Bob van der ZWAAN. THE ECONOMICS OF REPROCESSING VS. DIRECT DISPOSAL OF SPENT NUCLEAR FUEL. *Project on Managing the Atom*. Harvard University: Harvard University, December 2003, 1-127.

[40] ČESKÁ REPUBLIKA. *Národní akční plán rozvoje jaderné energetiky v ČR*. In: . Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2015, s. 1-117. Dostupné také z: https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/54251/61936/640148/priloha001.pdf

[41] *PRÍLOHA k DELEGOVANÉMU NARIADENIU KOMISIE (EÚ)*. In: . Brusel: Európska komisia, 2022. Dostupné také z: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8cee7f13-a162-11ec-83e1-01aa75ed71a1.0015.02/DOC_2&format=PDF

[42] Nuclear Power in Belgium. *WORLD NUCLEAR ASSOCIATION* [online]. WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2022, Marec [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/belgium.aspx

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

AFR	Away from reactor mimo reaktor, teda mimo jadrovú elektráreň
AR	At reactor Pri reaktore
BUTEX	Dibutoxy diethylene glycol extration Extrakcia dibutyldietylénglykolom (metóda prepracovania vyhoretého jadrového paliva)
CANDU	Canada deuterium uranium Typ tlakovodného reaktora chladeného a moderovaného ťažkou vodou
ČR	Česká republika
EDU	Jadrová elektráreň Dukovany
EIA	Environmental Impact Assessment Posudzovanie vplyvov na životné prostredie
ERU	Enriched reprocessed uranium Palivo z obohateného prepracovaného uránu
ETE	Jadrová elektráreň Temelín
EÚ	Európska únia
EW	Exempt waste Vyňatý odpad (odpady o rádioaktivitách nižších než uvoľňovacie úrovne, spĺňa kritériá na odstránenie z regulačnej kontroly, ktorá bola pre účel radiačnej ochrany)
HLW	High-level waste Vysokoaktívny odpad
HÚ	Hlbinné úložisko
IAEA	International Atomic Energy Agency Medzinárodná agentúra pre atómovú energiu
ILV	Intermediate-level waste Stredne aktívny odpad
LLW	Low-level waste Nízko aktívny odpad
MOX	Mixed oxid fuel Zmesové oxidové palivo
MSVP	Mezisklad vyhoretého jadrového paliva Dukovany
NSRAO	Nízko a stredne rádioaktívny odpad
NJZ	Nový jadrový zdroj

PUREX	Plutonium uranium reduction extraction Redukčná extrakcia plutónia a uránu (metóda prepracovania vyhoretého jadrového paliva)
RAO	Rádioaktívny odpad
REDOX	Reduction oxidation Reduxová oxidácia (metóda prepracovania vyhoretého jadrového paliva)
REMIX	Regenerated mixture Regenerované zmesové palivo
SVP	Sklad vyhoretého jadrového paliva Dukovany
SVJP	Sklad vyhoretého jadrového paliva Temelín
TK	Ťažký kov
TRIGLY	Triglycol dichloride Metóda prepracovania vyhoretého jadrového paliva
VAO	Vysoko aktívny odpad
VJP	Vyhoreté jadrové palivo
VLLW	Very low-level waste Veľmi nízko aktívny odpad
VSLW	Very short-lived waste Veľmi krátkodobý odpad
VVER 440	Vodo-vodjanoj energetičeskij reaktor Vodo-vodný energetický reaktor Typ tlakovodného reaktora chladeného a moderovaného ľahkou vodou o projektovanom hrubom elektrickom výkone 440 MW
VVER 1000	Vodo-vodjanoj energetičeskij reaktor Vodo-vodný energetický reaktor Typ tlakovodného reaktora chladeného a moderovaného ľahkou vodou o projektovanom hrubom elektrickom výkone 1000 MW