VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

VNĚJŠÍ ČÁST PALIVOVÉHO CYKLU JADERNÝCH ELEKTRÁREN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

RADKA WINTEROVÁ

BRNO 2012

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student:	Radka Winterová	***ID:***	125705
Ročník:	3	***Akademický rok:***	2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Vnější část palivového cyklu jaderných elektráren

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zpracujte rešerši na téma Palivový cyklus jaderných elektráren, diskutujte rozdíly typické pro jednotlivé JR.
2. Podrobně se věnujte přední a zadní části jaderného palivového cyklu, fabrikací paliva pro lehkovodní jaderné reaktory, recyklací a přepracování a výrobě paliva REPU a MOX.
3. Přehledně shrňte celosvětové postupy k problematice palivových cyklu, zejména jeho zadání části.
4. Diskutujte množství uzavření palivového cyklu s reaktory generace III. a III.+.
5. Popište konkrétní stav přední a zadní části palivového cyklu v České republice i s ohledem na plánované hlubinné uložiště.
6. Proveďte kvantitativní analýzu meziskladování v České republice.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání:	6.2.2012	***Termín odevzdání:***	25.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

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 trestně právních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb

Bibliografická citace práce:

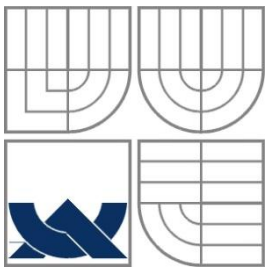
WINTEROVÁ, R., *Vnější část palivového cyklu jaderných elektráren,* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Poděkování:

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu Karlovi Katovskému, Ph.D. za odborné vedení a přínosné rady během přípravy této práce, a taky své rodině a svým přátelům za jejich trpělivost a podporu během celého studia.

Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma 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.

……...……



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

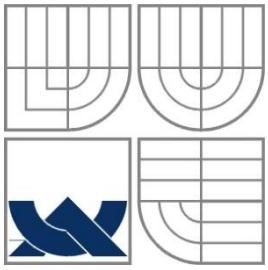
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VNEJŠÍ ČÁST PALIVOVÉHO CYKLU JADERNÝCH ELEKTRÁREN

RADKA WINTEROVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE: ING. KAREL KATOVSKÝ, Ph.D.

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY, FEKT VUT V BRNĚ, 2012



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

BACHELOR´S THESIS

FRONT AND BACK END OF THE NUCLEAR FUEL CYCLE

BY

RADKA WINTEROVÁ

SUPERVISOR: ING. KAREL KATOVSKÝ, Ph.D.

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2012

ABSTRAKT

V této bakalářské práci se autorka zabývá tématem palivového cyklu jaderných elektráren a jednotlivými rozdíly, které jsou typické pro dané jaderné reaktory. Autorka si klade za cíl podrobněji popsat jak přední, tak především zadní částí jaderného palivového cyklu, fabrikaci paliva pro lehkovodní jaderné reaktory, recyklaci a přepracování paliva, a následně také výrobou paliva na bázi REPU a MOX.

Práce by měla také seznámit s celosvětovými přístupy k problematice palivového cyklu, zejména jeho zadní části.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Uran; jaderné palivo; palivový cyklus; REPU; MOX; přední a zadní část jaderného paliva

ABSTRACT

In this bachelor thesis author deals with the topic of nuclear power fuel cycle and the particular differences that are typical for each nuclear reactor types. The author aims to describe in detail both - the front and especially the back end of the nuclear fuel cycle, fuel fabrication for light water nuclear reactors, fuel reprocessing and recycling, and consequently fuel production based on REPU and MOX. Thesis should also get familiar with global approaches to fuel cycle, especially the back end.

KEY WORDS:

Uranium; nuclear fuel; fuel cycle; REPU; MOX; front and back end of nuclear fuel cycle

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ **10**

SEZNAM TABULEK **10**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK **11**

1 ÚVOD **13**

2 PALIVOVÝ CYKLUS A ROZDÍLY PRO JEDNOTLIVÉ JADERNÉ REAKTORY **14**

2.1 PALIVOVÝ CYKLUS JADERNÉ ELEKTRÁRNY **14**

2.2 ZPŮSOBY ZACHÁZENÍ S JADERNÝM PALIVEM **16**

2.2.1 OTEVŘENÝ PALIVOVÝ CYKLUS 16

2.2.2 UZAVŘENÝ PALIVOVÝ CYKLUS 16

2.3 ROZDÍLY PALIVOVÝCH CYKLŮ PRO JEDNOTLIVÉ JADERNÉ REAKTORY **17**

2.3.1 PWR – VVER 17

2.3.2 BWR 17

2.3.3 PHWR/CANDU 17

2.3.4 RBMK/LWGR 17

2.3.5 AGR/GCR 18

2.3.6 FBR 18

3 PŘEDNÍ A ZADNÍ ČÁST JADERNÉHO PALIVOVÉHO CYKLU **19**

3.1 POPIS URANOVÝCH PALIVOVÝCH CYKLŮ **19**

3.1.1 PŘEDNÍ ČÁST JADERNÉHO PALIVOVÉHO CYKLU 19

3.1.2 STŘEDNÍ ČÁST JADERNÉHO PALIVOVÉHO CYKLU 20

3.1.3 ZADNÍ ČÁST JADERNÉHO PALIVOVÉHO CYKLU 20

3.2 JEDNOTLIVÉ ČÁSTI URANOVÉHO JADERNÉHO CYKLU **21**

3.2.1 CHLAZENÍ POUŽITÉHO JADERNÉHO PALIVA 21

3.2.2 PŘEPRAVA POUŽITÉHO PALIVA 22

3.2.3 MEZISKLADOVÁNÍ 22

3.2.4 PŘEPRACOVÁVÁNÍ 23

3.2.5 TRVALÉ ULOŽENÍ JADERNÉHO ODPADU 23

4 FABRIKACE PALIVA PRO LEHKOVODNÍ JADERNÉ REAKTORY **25**

4.1 JADERNÝ REAKTOR **25**

4.1.1 LEHKOVODNÍ JADERNÉ REAKTORY 25

4.1.2 OBOHACOVÁNÍ A VÝROBA PALIVA PRO LEHKOVODNÍ JADERNÉ REAKTORY 26

4.2 RECYKLACE A PŘEPRACOVÁNÍ PALIVA **27**

4.2.1 RECYKLACE JADERNÉHO PALIVA 27

4.2.1.1 Přínosy recyklace jaderného paliva 28

4.2.2 ZPĚTNÉ VYUŽITÍ JADERNÉHO ODPADU 28

4.2.3 TECHNOLOGIE ADTT 28

4.3 MOŽNOSTI UZAVŘENÍ PALIVOVÉHO CYKLU S REAKTORY GENERACE III. A III+ **29**

5 VÝROBA PALIVA NA BÁZI REPU A MOX **30**

5.1 VÝROBA PALIVA NA BÁZI REPU 30
5.2 VÝROBA PALIVA NA BÁZI MOX 30
5.2.1 PALIVO MOX 30
5.2.2 VÝROBA PALIVA MOX 31
5.2.3 POUŽITÍ PALIVA MOX 31
5.2.4 PŘEPRACOVÁNÍ PŘEPRACOVANÉHO MOX PALIVA 32

6 KVANTITATIVNÍ ANALÝZA MEZISKLADOVÁNÍ V ČR S OHLEDEM NA PLÁNOVANÉ HLUBINNÉ ULOŽIŠTĚ 33
6.1 SKLADOVÁNÍ VYHOŘELÉHO PALIVA V ČESKÉ REPUBLICE 33
6.1.1 ULOŽIŠTĚ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ – DUKOVANY, TEMELÍN 34
6.1.1.1 Výpočty – Dukovany 35
6.1.1.2 Výpočty – Temelín 39
6.2 PLÁNOVANÉ HLUBINNÉ ULOŽIŠTĚ 41
6.2.1 HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ V ČR 42
6.2.1.1 Koncept hlubinného uložiště v ČR 42
6.2.1.2 Výběr lokality hlubinného uložiště 44

7 CELOSVĚTOVÉ PŘÍSTUPY K PROBLEMATICE PALIVOVÉHO CYKLU, ZEJMÉNA JEHO ZADNÍ ČÁSTI 45
7.1 BUDOUCNOST JADERNÉ ENERGETIKY V EVROPĚ 45
7.2 BUDOUCNOST HLUBINNÉHO UKLÁDÁNÍ V ZEMÍCH EU 45
7.2.1 BELGIE 46
7.2.2 FINSKO 46
7.2.3 FRANCIE 46
7.2.4 MAĎARSKO 47
7.2.5 NĚMECKO 47
7.2.6 SLOVENSKO 47
7.2.7 VELKÁ BRITÁNIE 47

8 ZÁVĚR 48

9 POUŽITÁ LITERATURA 49

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Pelety oxidu uraničitého [14] *14*
Obr. 2: Palivové proutky [14] *15*
Obr. 3: Palivová kazeta VVER [14] *15*
Obr. 4: Uranový palivový cyklus [14] *19*
Obr. 5: Bazén použitého paliva [14] *21*
Obr. 6: Sklad použitého paliva [14] *22*
Obr. 7: Výroba paliva [6] *26*
Obr. 8: Jímka se sudy – JE Dukovany [16] *35*
Obr. 9: Graf 1 - Závislost celkově vyvezených kazet za jednotlivé roky [14] *37*
Obr. 10: Graf 2 - Závislost průměrně vyvážených kazet na blok za jednotlivé roky [14] *37*
Obr. 11: Koncept hlubinného uložiště v ČR [16] *42*
Obr. 12: Povrchový areál hlubinného uložiště [16] *43*

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Počty vyvezených kazet na jaderné elektrárně Dukovany [14] *36*

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol/zkratka	Význam
ADTT	Accelerator Driven Transmutation Technology – Urychlovač řízený transmutační technologii
AGR	Advanced Gas Cooled – plynem chlazený reaktor
BWR	Boiling Water Reactor – varný reaktor, druh reaktoru podobný PWR, ale voda se uvnitř reaktoru vaří přesně jako ve varném kotli
CANDU	CANada Deuterium Uranium – kanadský těžkovodní reaktor, který pracuje s přírodním uranem jako palivem, moderátorem je těžká voda, obsahující deuterium
EPR	European Pressurized Reactor – Evropský tlakovodní reaktor, nová generace reaktorů s vodou pod vysokým tlakem
FBR	Fast Breeder Reactor – rychle množivý reaktor
GCR	Gas Cooled Reactor – plynem chlazený reaktor
HEU	Highly – Enriched Uranium, vysoce – obohacený uran
JE	Jaderná elektrárna
LEU	Low – Enriched Uranium, nízko – obohacený uran
LWGR	Light Water cooled Graphite moderated Reactor – grafitový reaktor
MOX	Mixed oxide fuel – přepracované jaderné palivo z oxidu uranu a oxidu plutonia
PHWR	Pressurised Heavy Water Reactor – těžkovodní reaktor
PWR	Pressurized Water Reactor - tlakovodní reaktor, nejvíce používaný ve světě
RBMK	Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj – grafitový reaktor
REPU	REProcessed Uranium – přepracované jaderné palivo
^{235}U	Základní palivo pro jaderné elektrárny
^{238}U	Izotop uranu nejčastěji se nacházející v přírodě
U	Uran – v přírodním stavu může být používán jako palivo v těžkovodních reaktorech
UF_6	Hexafluorid uranu, molekula složená z jednoho atomu uranu a šesti atomů fluoru

Symbol/zkratka	Význam
UO_2	Oxid uraničitý
VJP	Vyhořelé jaderné palivo
VVER	Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor – tlakovodní reaktor ruského typu

1 ÚVOD

Fyzika obecně zná pouze jediný zdroj energie. Tímto zdrojem energie je energie jaderná, která v přírodě vzniká v důsledku syntézy lehkých jader[1] nebo při štěpení jader těžkých – např. uranu. Všechny čisté či obnovitelné zdroje energie, jak se někdy nazývají, existují díky těmto dvěma jaderným procesům[2]. Energie skrytá v jádře atomů představuje jeden z energetických zdrojů, který je schopen nahradit fosilní paliva. Jaderná energetika dnes uspokojuje přes 17 % potřeb elektrické energie ve světě. Spojené státy produkují jednu třetinu jaderné energie ve světě, Francie vyrábí 95 % své elektřiny bez spalování paliva na bázi uhlíku, a to až z 80 % v jaderných reaktorech. Obecně lidstvo spotřebovává energii krajně nerovnoměrně. Zatímco bohatých 20 % lidstva spotřebovává kolem 80 % energie, zbývá 20 % energie na 80 % chudých lidí [4].

Při dnešním tempu spotřeby fosilních paliv budou zásoby vyčerpány během cca. 100 let. Energii ovšem na rozdíl od všech ostatních „surovin“ nelze ničím nahradit. Brzy bude stále vzácnější a potřebnější. Problematika jaderné energie se stala jedním z nejkontroverznějších témat 21. století, proto má taky jaderná fyzika a s ní spřízněné obory nelehký úkol vysvětlovat základy jaderné energie a odstraňovat mnohdy zbytečné obavy vzniklé na dezinterpretaci celé problematiky, o což se bude autorka také snažit.

Cílem práce bude vysvětlit, co se děje s palivem předtím než se vůbec dostane do reaktoru a následně popsat děje a procesy odehrávající se s palivem po jeho vyjmutí z reaktoru. Více se autorka bude zabývat zadní části jaderného cyklu na úkor předního, který by vyžadoval chemické znalosti pro dokonalé posouzení celé problematiky.

Život začal zhruba před čtyřmi miliardami let za podmínek mnohem silnější radioaktivity, než jakou dávají na přetřes dnešní ekologové, kteří se obávají převážně o bezpečnost jaderných elektráren. Přitom je jedna třetina nákladů na jaderný reaktor vyčleněna pro bezpečnostní systémy a infrastrukturu. Otázkou ovšem zůstává, zdali bychom měli pojímat jaderné elektrárny jako jaderné zbraně a výrazně omezit jejich výskyt. Jelikož dle mínění autorky bychom se měli naučit zacházet s radioaktivním odpadem a využít recyklaci jaderného paliva, což je následně obsahem také této práce [4].

---

[1] Tak zvaná termojaderná fúze.

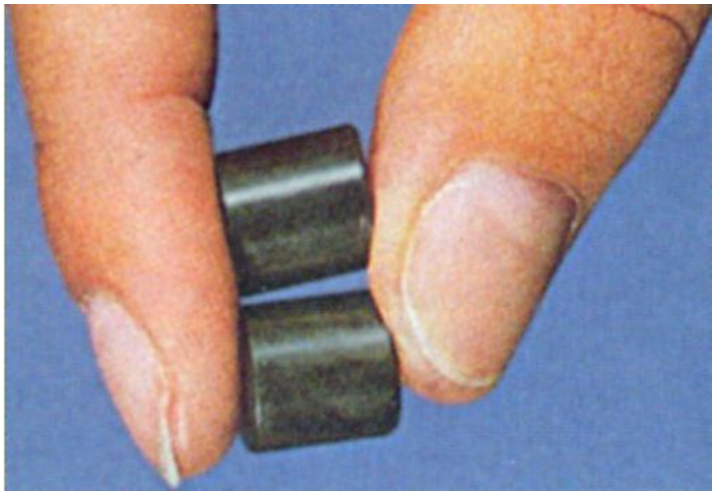
[2] Zejména díky energii Slunce.

2 PALIVOVÝ CYKLUS A ROZDÍLY PRO JEDNOTLIVÉ JADERNÉ REAKTORY

2.1 Palivový cyklus jaderné elektrárny

Palivový cyklus je poměrně složitý. Zjednodušeně v sobě zahrnuje několik základních části, které počínají těžbou nejdůležitější suroviny - uranové rudy, která je nezbytnou částí pro provoz jaderné elektrárny. K získání 1 kg takovéhoto paliva jsou třeba 2 až 4 tuny uranové rudy. Přičemž se tímto nahradí až 100 tun kvalitního černého uhlí. Ruda se nejdříve rozemele a z rozemleté rudy se získává žlutý koncentrát oxidu uranu U_3O_8, který obsahuje minimálně 65 % přírodního uranu [11].

Výroba samotného paliva začíná přeměnou na oxid uraničitý UO_2, který je lisován do peletek, viz Obr. 1, mající hmotnost něco kolem 5 gramů.



Obr. 1: Pelety oxidu uraničitého [14]

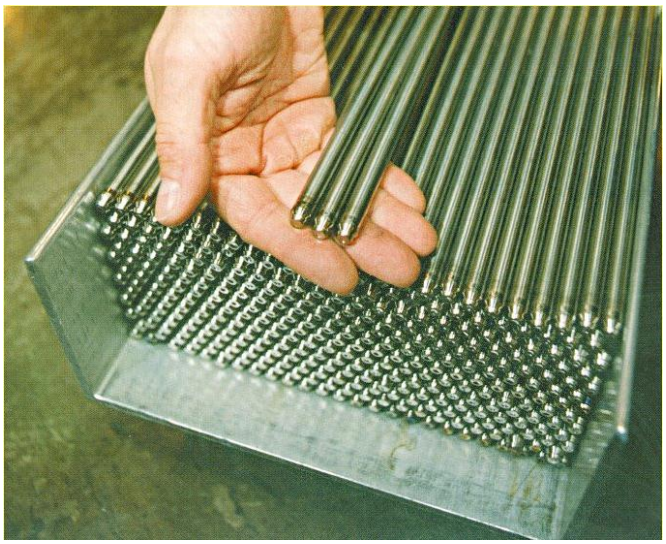
Peletky se pak vkládají do hermeticky uzavřených trubek ze slitiny zirkonia a niobu, slitiny zirkonia a niobu pro pokrytí používají východní výrobci, zatímco západní výrobci používají různé jiné slitiny na bázi zirkonia. Tím se vytvářejí tzv. palivové pruty, viz Obr. 2. Svazek takovýchto palivových proutků tvoří tzv. palivovou kazetu[3], viz Obr. 3. Aktivní zóna např. reaktoru VVER-440 pak tedy obsahuje: 312 palivových kazet, které jsou pevné a 37 regulačních kazet, které jsou naopak pohyblivé. Přičemž jedna palivová kazeta obsahuje dále 126 palivových proutků. Počty kazet a proutků se liší od typu jednotlivých reaktorů [11].

Výměna paliva je součástí palivového cyklu jaderné elektrárny. U tlakovodních jaderných reaktorů se provádí kampaňovitě, tzn., že reaktor se po určité době provozu[4] odstaví, vychladí

[3] Někdy též označováno jako palivový článek, soubor.

[4] Doba provozu závisí na stupni vyhoření paliva a bývá zpravidla necelý rok. V jaderných elektrárnách umístěných na Západě se jedná o rok a půl.

a otevře se pro výměnu paliva. U reaktorů typu VVER předpokládal původní palivový cyklus využívání paliva ve tříletých cyklech. Tento způsob výměny paliva se ukázal jako neekonomický a proto se přistoupilo k cyklu čtyřletému. Čtyřletý cyklus je typický především tím, že na okraj aktivní zóny se zavádí nejvíce vyhořelé palivové kazety a do středu naopak úplně nové. Později (asi od roku 2003) se začaly používat nové kazety, které obsahují vyhořívající absorbátory, které výrazně zlepšují provozní vlastnosti jaderného reaktoru. Tento druh palivových kazet umožňuje pětiletý palivový cyklus [11].



Obr. 2: Palivové proutky [14]

Obr. 3: Palivová kazeta VVER [14]

Po uplynutí 5 let je palivo (palivové kazety) dále vyvezeno do bazénu pro skladování vyhořelého paliva, kde zůstává 5 až 10 let. Poté je palivo ve speciálních kontejnerech posíláno do meziskladu vyhořelého paliva[5] na 40 až 100 let. Odkud se může dostat do přepracovacího závodu nebo rovnou do trvalého uložiště vyhořelého paliva až na 70 milionu let.

Takovýto postup je znám pod již zmiňovaným názvem jaderný palivový cyklus. Nejčastěji se rozděluje na přední, střední a zadní část palivového cyklu (viz níže). Pojem cyklus je ovšem dost zavádějící. Další nezpracování vyhořelého jaderného paliva nám takovýto pojem vylučuje. I přesto se palivový cyklus, jakožto pojem, běžně používá [11].

2.2 Způsoby zacházení s jaderným palivem

Podle způsobů zacházení s jaderným palivem rozdělujeme palivový cyklus na dva základní druhy:

1. Otevřený palivový cyklus
2. Uzavřený palivový cyklus

2.2.1 Otevřený palivový cyklus

Jedná se o cyklus vyhořelého paliva, kde se již toto palivo nadále využívat nebude. Palivo je po vytažení z reaktoru umístěno do bazénů s vodou, které jsou budovány v těsné blízkosti reaktorů. Zde palivo postupně chladne. Vyhořelé palivo dále produkuje teplo (stále pokračuje jeho přirozená ra přeměna). Použité palivo putuje po jeho částečném vychladnutí z bazénu pro vyhořelé palivo do trvalého uložiště.

2.2.2 Uzavřený palivový cyklus

Je-li palivo po svém vyhoření i nadále přepracováváno, jedná se o palivový cyklus uzavřený.

Přepracování – neboli získání využitelného ^{235}U a případně i plutonia již z vyhořelého paliva - je proces složitý a velice nákladný. Některé země např. Francie a Velká Británie ovšem tyto přepracovávací závody vlastní. Je zde přepracováno i vyhořelé palivo z dalších zemí.

Nicméně ani přepracování není bezodpadové. Vznikají při něm vysoko-radioaktivní odpady, které je nutno bezpečně oddělit od životního prostředí. Jelikož prozatím nikde na světě

[5] Železobetonová stavba odolná proti extrémním přírodním vlivům.

není v provozu definitivní úložiště[6], musejí být tyto odpady skladovány stejně jako vyhořelé palivo v meziskladech [11].

2.3 Rozdíly palivových cyklů pro jednotlivé jaderné reaktory

2.3.1 PWR – VVER

Jaderným palivem pro tento typ reaktoru je obohacený uran ve formě UO_2[7]. Obohacení uranu se pohybuje mezi 3,1 % až 4,95 % (např. JE Mochovce) [10], jde o obohacení izotopem ^{235}U. Moderátorem i chladivem je lehká voda. Výměna paliva probíhá při odstaveném reaktoru zpravidla jednou za rok (nahradí se jedna čtvrtina až jedna třetina použitého paliva).

2.3.2 BWR

Jaderným palivem je mírně obohacený uran, obohacení uranu na 2,1 % až 3,5 %. Stejně jako u předchozího (PWR) může být jaderným palivem MOX i REPU. Palivo se mění stejně často jako v případě PWR. Moderátorem i chladivem je lehká voda [10].

2.3.3 PHWR/CANDU

Jaderným palivem takovéhoto těžkovodního reaktoru je přírodní (neobohacený) uran ve formě oxidu uraničitého. Chladivem i moderátorem je těžká voda [10].

2.3.4 RBMK/LWGR

Palivem reaktoru typu RBMK (známá je také zkratka LWGR) je přírodní nebo slabě obohacený uran (obohacení uranu cca od 1,2 % po 2,4 %) ve formě oxidu uraničitého. Palivem může být i REPU. Moderátorem je grafit, chladivem je lehká voda [10].

---

[6] Jakožto uložiště pro odpady z energetických jaderných zařízení.

[7] Jaderným palivem v takovémto druhu jaderného reaktoru může být i MOX.

2.3.5 AGR/GCR

Pokročilý plynem chlazený reaktor AGR využívá paliva obohaceného izotopem ^{235}U ve formě oxidu uraničitého (obohacení uranu zde bývá podobné jako u RBMK a to od 1,2 % až po 2,6 %), zatímco reaktor Magnox využívá přírodního uranu. Moderátorem je grafit, chladivem oxid uhličitý. Palivo se vyměňuje za provozu [10].

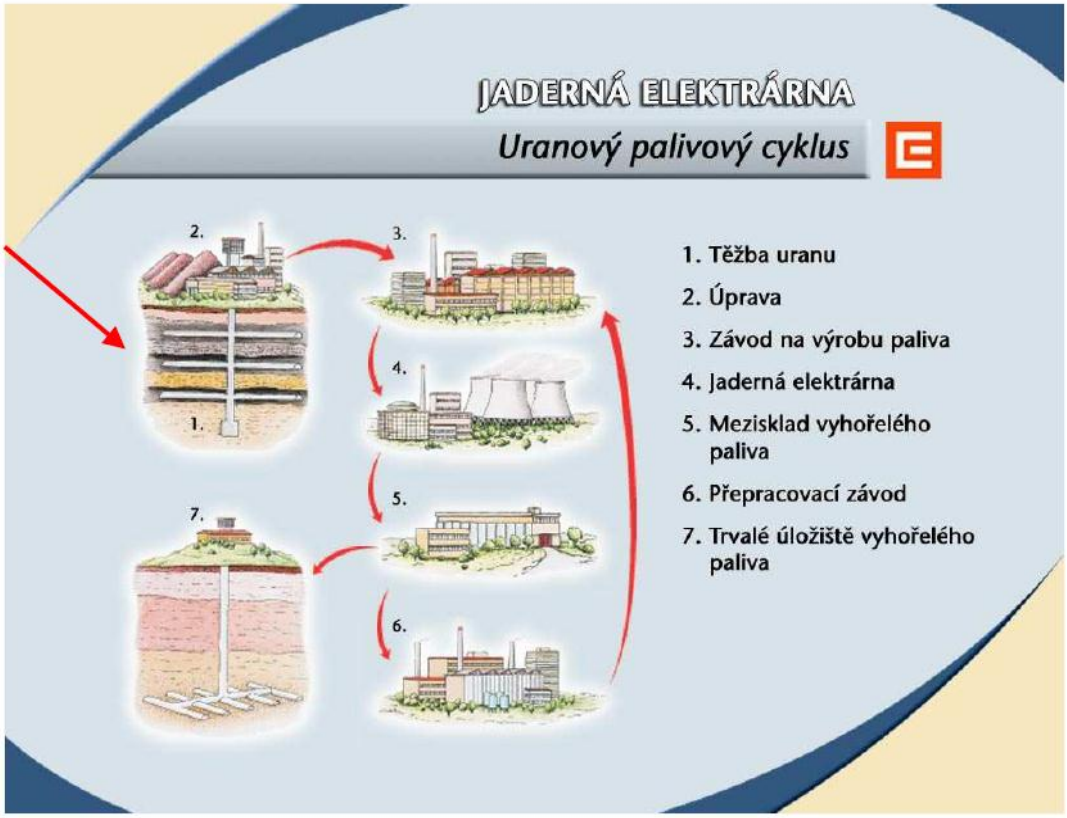
2.3.6 FBR

U rychlého množivého reaktoru FBR je palivem plutonium ve směsi oxidu plutoničitého a uraničitého, někdy také MOX. Možnost využití přepracování paliva i s aktinidy nebo thoriem. Palivo je obohaceno o štěpitelný izotop ^{239}Pu či ^{235}U na 20 – 50%. Během provozu vyprodukuje více plutonia, než sám spálí. Reaktor nemá moderátor, chladivem může být tekutý kov, např. sodík, olovo, slitina Pb-Bi a nejnověji se uvažuje i o chladivu plynu (He) [10].

3 PŘEDNÍ A ZADNÍ ČÁST JADERNÉHO PALIVOVÉHO CYKLU

3.1 Popis uranových palivových cyklů

Palivové cykly bývají dvojího druhu. Schematicky, je takovýto uranový palivový cyklus lépe pochopitelný z Obr. 4.



Obr. 4: Uranový palivový cyklus [14]

3.1.1 Přední část jaderného palivového cyklu

Přední část tohoto cyklu představuje veškeré činnosti, počínající těžbou uranové rudy až po konečnou konstrukci palivových článků.

Jednotlivé pod body související s touto částí jaderného palivového cyklu [2]:

1. Těžba uranové rudy
2. Mechanická a chemická úprava rudy[8]
3. Konverze
4. Obohacování uranu – provedení tohoto procesu možné několika způsoby:
   (a) Plynná difúze – nejstarší známá metoda obohacování
   (b) Centrifugace – odstřeďovací metoda
   (c) Laserová metoda – III. generace obohacovacích technologií
5. Zpětná konverze fluoridu uranového
6. Výroba kompletních palivových článků pro jaderný reaktor

3.1.2 Střední část jaderného palivového cyklu

Střední část jaderného palivového cyklu souvisí s činnosti spojenou s energetickým využitím paliva v samotném jaderném reaktoru. Začíná zavezením paliva do aktivní zóny reaktoru a končí jeho vyvezením do bazénu vyhořelého paliva. Tato fáze jaderného cyklu je považována za nejužitečnější, jelikož se v ní jedná o samotnou výrobu elektrické energie.

3.1.3 Zadní část jaderného palivového cyklu

Zadní část jaderného palivového cyklu se zabývá aktivitami souvisejícími s použitým jaderným palivem a s jeho následným nakládáním. Jde o proces velice komplikovaný a časově velmi náročný. Jsou zde uvažována hlediska, která se týkají přehledu ekonomického i ekologického. Je nutné komplexní řešení daného problému[9].

---

[8] Účel této úpravy je jednoduchý – získání uranového koncentrátu, tzv. žlutý koláč.

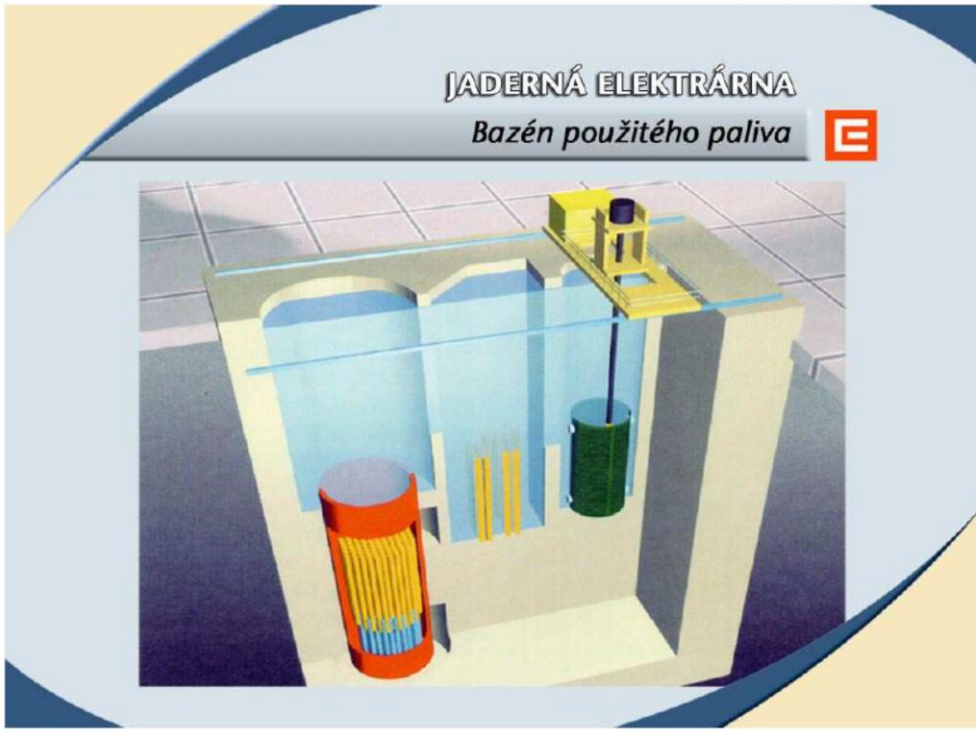
[9] Obecně se traduje, že pokud by člověk za celý svůj život využíval pouze jadernou energii (včetně dopravy, potřebného tepla apod.), vešel by se příslušný jaderný odpad do golfového míčku.

3.2 Jednotlivé části uranového jaderného cyklu

3.2.1 Chlazení použitého jaderného paliva

Použité palivové kazety se po vyjmutí z reaktoru uloží do bazénu použitého paliva, viz Obr. 5, palivo je uloženo pod vrstvou vody, která slouží jako vrstva stínícího záření, ochrana obsluhy jaderné elektrárny i jako chladivo, které odvádí zbytkové teplo. V bazénech u reaktorů klesne radioaktivita vyhořelého paliva v závislosti na délce skladování zhruba na polovinu hodnoty, jakou má bezprostředně po vyjmutí z reaktoru. Přes okruh chlazení se zbytkové teplo předává do chladicích bazénů technické vody.

Kapacita bazénu použitého paliva např. v jaderné elektrárně Temelín je 680 míst pro palivové kazety a 25 míst pro hermetická pouzdra [14]. Použité palivo je tedy možné v bazénu skladovat po dobu až deseti let. Použité jaderné palivo se poté převeze v transportním kontejneru do skladu použitého paliva. Tam je bezpečně uloženo až do přepracování nebo konečného uložení.



Obr. 5: Bazén použitého paliva [14]

3.2.2 Přeprava použitého paliva

Každé jaderné palivo časem doslouží a vyžaduje transport. Takovéto vyhořelé jaderné palivo je obvykle přepravováno z jaderné elektrárny do meziskladu, poté je popřípadě dováženo do přepracovávacích závodů anebo rovnou do místa jeho trvalého uložiště, viz kapitola 3.2.5. Podle polohy jaderné elektrárny se jedná o přepravu v rámci státu nebo se může jednat o přepravu mezinárodní.

Přeprava radioaktivního materiálu funguje již nějaký čas. Na světě se za jeden rok přepraví přibližně 10 miliónů tun radioaktivních látek, z toho v zemích EU 1,5 miliónu. 60 % z těchto radioaktivních látek tvoří látky, které jsou určené pro lékařské nebo výzkumné účely. Látky s vysokou aktivitou (pocházející z palivového cyklu) představují pouhé 0,5 % [13].

3.2.3 Meziskladování

Vyhořelé jaderné palivo můžeme přepracovávat nebo rovnou skladovat. V této kapitole uvažujeme, že po vyjmutí jaderného paliva z reaktoru a následně i z bazénu použitého paliva, je palivo přemístěno do tzv. meziskladu, viz Obr. 6.

Obr. 6: Sklad použitého paliva [14]

Klesá-li v bazénech vyhořelého paliva radioaktivita materiálu na polovinu, v meziskladech se radioaktivita takovéhoto paliva dále snižuje. Po zhruba 50. letém skladování je radioaktivita a produkce tepla na takové úrovni, že umožňuje definitivní uložení vyhořelého paliva v konečném uložišti [2].

Na světě jsou známé a často používané pouze dvě metody skladování vyhořelého paliva:

1. Mokrá metoda – využívala se hodně dříve.
   Použité palivo je zde ponořeno v hlubokých vodních bazénech, kde chladící médium je demineralizovaná voda. Takovéto bazény přitom zajišťují odvod tepla a ochranu před radiačním zářením. Výhodou této metody je snadná kontrola, zatímco nevýhodami jsou vysoká cena výstavby a provozu s produkováním kapalných radioaktivních odpadů. Mokrá metoda je hodně rozšířena v severských zemích [12].

2. Suchá metoda[10] – modernější a finančně výhodnější, přidala se k ní i ČR.
   Palivo je skladováno ve stíněných kontejnerech, které jsou hermeticky uzavřeny. Při takovéto metodě je vyhořelé palivo chlazeno vzduchem, přirozeně cirkulujícím uvnitř v meziskladu. Při suchém skladování nejsou produkovány žádné kapalné radioaktivní odpady [12].

3.2.4 Přepracovávání

Způsob nakládání s vyhořelým jaderným palivem začíná v okamžiku jeho vyvezení z aktivní zóny reaktoru a končí jeho uložením, popř. jeho přepracováním.

Přetrvává stále kladení důležitosti na skladování jaderného vyhořelého paliva. Musíme myslet na jistou nepřipravenost zařízení konečného uložení vyhořelého paliva. Nicméně je třeba také přemýšlet o omezené kapacitě a vysoké ceně přepracovávacích závodů.

České jaderné elektrárny Temelín a Dukovany vyprodukují ročně necelých 100 tun vyhořelého jaderného paliva, které se řadí do vysokoaktivních odpadů – ročně je to v přepočtu na jednoho obyvatele necelých 10 gramů, viz kapitola 4.2 [14].

3.2.5 Trvalé uložení jaderného odpadu

Sklad vyhořelého jaderného paliva je považován za jaderné zařízení. Proto se na výstavbu, provoz i konečnou likvidaci (schválením výběru lokality, souhlas příslušných úřadů k uvedení do provozu, až po schválení způsobu odstranění tohoto jaderného zařízení) vztahují přísné podmínky, které jsou dány danou legislativou.

---

[10] V Maďarsku zvolena netradiční koncepce suché metody bez masivních kontejnerů, ale pomocí tenkých pouzder – kobek. Každá palivová kazeta je zasunuta do jedné kobky, kobka je hermeticky těsná a vyrobena z uhlíkové oceli [12].

Přes zvláštnosti jednotlivých zemí, můžeme říci, že mezi základní požadavky na bezpečný provoz patří vždy [1]:

1. Prokázat, že sklad vyhořelého jaderného paliva nebude ohrožovat bezpečnost obyvatelstva.
2. Nebude mít negativní vliv na životní prostředí.

Posuzování vlivu jaderných zařízení na životní prostředí se stalo zákonným požadavkem. U jaderných elektráren platí základní princip „ochrany do hloubky“. Tento princip lze pro případ skladování vyhořelého jaderného paliva chápat jako vytvoření vícenásobné bariéry, která nám zaručí stínění a těsnění. Dále pak plní základní požadavky na zajištění jaderné bezpečnosti podle stanoveného zákona [14].

4 FABRIKACE PALIVA PRO LEHKOVODNÍ JADERNÉ REAKTORY

4.1 Jaderný reaktor

Jaderný reaktor je zařízení, ve kterém se při štěpení jader uvolňuje energie a přeměňuje se tak na energii tepelnou. Ta se pak využívá k výrobě energie elektrické.

Reaktory mají různé konstrukce, principy činností a oblasti využití. V této podkapitole se budeme zabývat pouze jadernými reaktory lehkovodními [15].

4.1.1 Lehkovodní jaderné reaktory

Lehkovodní jaderné reaktory jsou dvojího druhu:

1. VVER / PWR
Nejznámější a nejtypičtější reaktor, který je chlazen vodou o vysokém tlaku. Obyčejná voda je také moderátorem celé reakce a je zde výrazným prvkem. Pokud není voda v reaktoru – reakce je zastavena. Pára, která je potřebná jako pohon turbogenerátoru se vytváří mimo reaktor, přesněji v parogenerátoru. Vysokotlaká voda primárního okruhu uvádí do varu vodu v sekundárním okruhu a pro turbínu vyrábí sytou páru o podstatně nižším tlaku.

2. BWR
Druhým nejrozšířenějším typem reaktoru je BWR. Zde je chladivem i moderátorem opět voda. BWR je značně podobný předcházejícímu typu VVER, ale k varu vody dochází přímo v tlakové nádobě reaktoru. Pára, která zde vzniká, přímo pohání turbínu. Jaderné elektrárny s takovýmito reaktory jsou jednookruhové. Tyto reaktory mají vyšší energetickou účinnost, ale zase nižší koeficient bezpečnosti [11], [15].

4.1.2 Obohacování a výroba paliva pro lehkovodní jaderné reaktory

Palivo takovéhoto reaktoru je obohacený uran, který je ve formě oxidu uraničitého UO_2. Moderátorem i chladivem je obyčejná voda, viz kapitola 4.1.1. [5].

Přírodní uran je složen ze dvou izotopů, které mají následující nukleonová čísla: 235 a 238 – ^{238}U se dále přeměňuje na ^{234}U. Pro štěpení je vhodný jenom izotop s nukleonovým číslem 235. Toho je v přírodním uranu pouze 0,7 % a proto se musí jaderné palivo tímto izotopem uměle obohacovat.

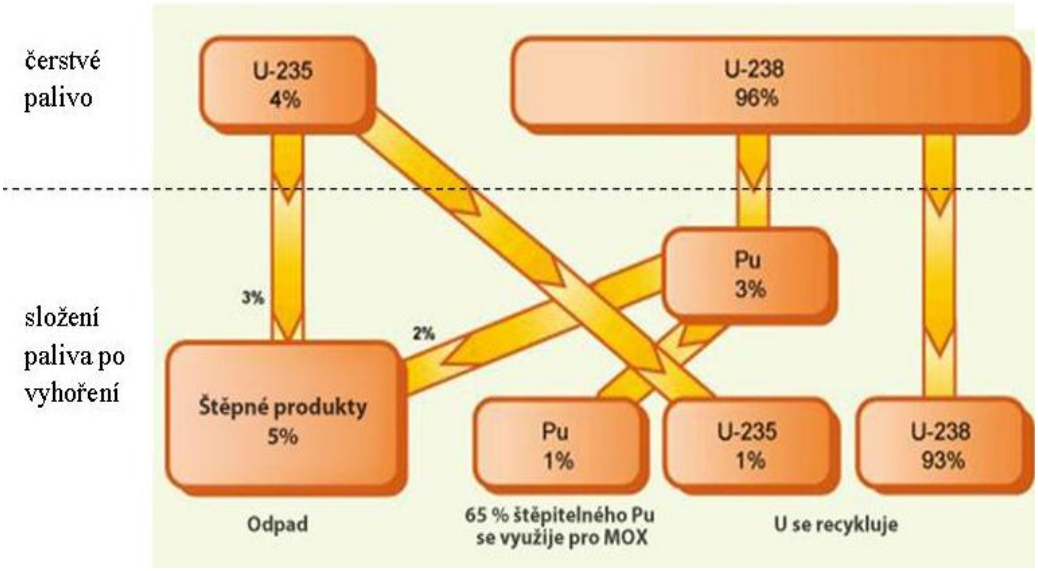
Typ reaktorů VVER, který je používán v ČR, potřebuje uran obohacený na cca 4 % obsahu ^{235}U. Jiné typy reaktorů např. výzkumné, potřebují jako palivo uran, který je obohacen od 30 % do 95 % obsahu ^{235}U.

Obohacení paliva:

1. LEU – mírně obohacený uran, koncentrace ^{235}U nižší než 20 %.
2. HEU – vysoce obohacený uran, má větší koncentraci než 20 % ^{235}U nebo ^{233}U.

Toto obohacování se děje v tzv. obohacovacích závodech. Tam se z původní vsázky plynného hexafluoridu UF_6 obohatí asi jedna šestina (a to v případě, že chceme, aby obsah ^{235}U byl 4 %). Zbytek tvoří takzvaný ochuzený uran, který obsahuje zejména neštěpitelný izotop uranu ^{238}U. Již obohacený plynný hexafluorid UF_6 se pak ve speciálních kontejnerech přepravuje do závodu, kde se vyrábí palivové články. Takovýchto obohacovacích závodů je v provozu pouze několik, stačí ovšem zásobovat velký počet elektráren.

V závodě na výrobu palivových článků se pak zpracovává obohacený plynný hexafluorid případně plutonium získané přepracováním nebo ze zbraní, viz kapitola 4.2.[5].



Obr. 7: Výroba paliva [6]

Surovina se zde přeměňuje na pevný oxid uraničitý UO_2, z něj se vyrábí malé tablety o průměru asi 1,5 cm a délce pouze několika cm. Tyto tablety se ukládají do několika metrů dlouhých „trubek“, které jsou vyrobené ze speciální slitiny. Ty se potom po desítkách montují do palivových kazet. V aktivní zóně reaktoru je několik set takovýchto kazet, viz kapitola 2.1. Obohacování jaderného paliva je samozřejmě u každého typu reaktoru jiné. Postup výroby jaderného paliva pro jiné typy reaktorů je v zásadě stejný [5], [7].

4.2 Recyklace a přepracování paliva

4.2.1 Recyklace jaderného paliva

Některé země s jaderným programem podstatně rozsáhlejším než ČR se rozhodly pro přepracování použitého jaderného paliva. V provozu jsou přepracovací podniky např. v La Hague a v Marcoule ve Francii, v Sellafieldu ve Velké Británii, Rakasho, Majak a Krasnojarsk v Rusku. Kapacita takovýchto podniků představuje 25 % použitého paliva z provozujících jaderných elektráren. Francie např. vypočítala, že recyklace 10 až 11 tun plutonia, z vyhořelých palivových článků za rok, se rovná 11 milionům tun ropy [14].

Část ^{235}U můžeme v jaderných elektrárnách nahradit plutoniem v palivových článcích, např. pro nejběžněji používané tlakovodní reaktory. Použité palivo, které obsahuje plutonium, je totiž možné přepracovat a vyrábět z něj palivo nové. Je to tzv. MOX palivo (Mixed Oxide) - směs oxidů uranu a plutonia nebo palivo REPU (Reprocessed Uranium) – přepracovaný uran, viz kapitola 5.1.

Princip přepracování použitého paliva je znám již od 40. let minulého století. Z palivových kazet se odstraní ochranný zirkoniový obal a palivové články se rozdělí na kratší kusy. Vše se dělá pomocí dálkově řízených manipulátorů a robotů. Použité palivo se rozpustí v kyselině dusičné a z roztoku se chemicky oddělí jednotlivé složky. Plutonium se opět může použít jako palivo. Uran se uskladní nebo použije pro výrobu nového paliva. Zbytky kovového pokrytí palivových článků se zpracují jako středně-aktivní odpad. Štěpné produkty se oddělují a vitrifikují (vitrifikace = uskladnění radioaktivního odpadu zatavením do skla, dochází k zamezení šíření odpadu do prostředí). Z 1 tuny použitého paliva tak vzniká pouhých 115 kg vysoko-aktivního jaderného odpadu [5], [12].

4.2.1.1 Přínosy recyklace jaderného paliva

Recyklace paliva maximalizuje energii získanou ze zdrojů uranu [5].

1. Ušetří až 25 % přírodního uranu
2. Podporuje energetickou nezávislost:
   (a) přepracované plutonium je recyklováno do paliva tzv. MOX
3. Optimalizace konečného uložení:
   (a) snížení objemu konečného odpadu až 5x
   (b) snížení toxicity odpadu až 10x
4. Získává a udržuje přijatelnost s veřejností
5. Zvyšuje se odolnost při nešíření jaderného materiálu
6. Ekonomická konkurenceschopnost s jednorázovou strategií řízení nákladů

4.2.2 Zpětné využití jaderného odpadu

Jaderné palivo vyjmuté z reaktoru obsahuje ještě 95 % nespotřebovaného uranu. Z toho 1 % štěpitelného ^{235}U a 1 % štěpitelného izotopu plutonia ^{239}Pu. Hlavní podíl radioaktivity nesou štěpné produkty cesium ^{137}Cs a stroncium ^{90}Sr. Oba tyto prvky mají poločas rozpadu okolo 30. let. V důsledku radioaktivního rozpadu ztrácí použité palivo postupně radioaktivitu a radioizotopy přecházejí na neaktivní prvky [5], [12].

4.2.3 Technologie ADTT[11]

Možnost postupu využití použitého jaderného paliva je znám pod zkratkou ADTT (urychlovačem řízené transmutační technologie). Jde o vývoj technologií, které směřují k dalšímu využití jaderné energie. Současné typy reaktorů nedokáží uvolnit z paliva vše. Tato „nová“ technologie umožňuje tzv. jadernou přeměnu dlouho žijících radionuklidů[12]. To znamená, že se podstatně zkrátí doba, po kterou jsou jaderné odpady svou radioaktivitou nebezpečné pro životní prostředí [14].

Technologie ADTT umožňuje kromě použitého jaderného paliva využít i thorium. Ze 12 gramů thoria lze uvolnit tolik energie jako spálením 30 tun uhlí. Bude-li tento reaktor schopen přeměnit 99 % svých zplodin, bude k dispozici téměř neomezený a bezodpadový zdroj energie. Využití ADTT v současné době brání provozní technologické procesy přeměny neutronů pomocí urychlovače protonů a vysoká cena výstavby [18].

---

[11] Accelerator Driven Transmutation Technology

[12] Radionuklid – nuklid s nestabilním jádrem (s přebytečnou energií).

4.3 Možnosti uzavření palivového cyklu s reaktory generace III. a III+

U jaderných elektráren došlo od jejich vzniku k obrovskému vývoji jaderných reaktorů. Na úplném začátku se stavěly reaktory generace I., což byly první reaktory, které se začaly používat na začátku padesátých let. Na těchto jaderných reaktorech se zjišťovalo, zde je opravdu možné využívat reaktory k výrobě elektrické energie. Jednalo se o kusové prototypové reaktory. V dnešní době už nepracuje ani jeden z nich [21].

Největší podíl na výrobě elektrické energie, v rámci jaderných elektráren, mají reaktory generace II. Jsou to reaktory navazující na úspěšné modely první generace. Elektrárny se v této generaci staví v sériích, přičemž každá je jednotlivě projektována a konstruována. Existují však případy, kdy na sebe jednotlivé projekty navazovaly. Největším počtem reaktorů v této generaci, tedy i na světě, jsou lehkovodní tlakové reaktory. Patří mezi ně i reaktory VVER-440 a VVER-1000, které využívají naše dvě jaderné elektrárny Dukovany a Temelín.

Abychom zabránili vzniku jaderných havárií, popř. zajistili bezpečnější vlastnosti a ekonomiku provozu jaderných elektráren, bylo třeba navrhnout reaktory nové generace, III. generace. Jedná se generaci standardizovaných typů reaktorů mající jednodušší a robustnější konstrukci, lepší užitné vlastnosti, delší životnost (až šedesát let), především ale poskytují zmenšení spotřeby uranu (což představuje i minimální vliv na životní prostředí), prodloužení intervalu mezi výměnami paliva a velmi silně redukovanou možnost nehody s roztavením jádra. Tato generace by měla zajistit výrobu energie ve dvacátých a třicátých letech 21. století. V USA jsou již schváleny projekty reaktorů Systém 80+, ABWR a AP 600 (generace III.), zatímco ve schvalovací fázi jsou projekty reaktorů AP 1000 (generace III+).

Generace III+ je spojena s generací III., vyznačuje se lepšími ekonomickými parametry spolu s vyšší pasivní bezpečností. Což znamená, že v případě nestandartní situace se reaktor dostane do bezpečného stavu automaticky, bez pomoci aktivních částí. V rámci Evropské unie je připraven projekt EPR, tzv. evropský tlakovodní reaktor, který již má dvojitý kontejnment s odvodem tepla, oblast pro záchyt roztavené aktivní zóny aj. Reaktor je vyvíjen firmou AREVA a měl by využívat palivo MOX, obsahující plutonium z přepracovaného vyhořelého paliva [8], [20], [21].

5 VÝROBA PALIVA NA BÁZI REPU A MOX

5.1 Výroba paliva na bázi REPU

REPU neboli recyklovaný uran z vyhořelého paliva, přebytečných jaderných zbraní a odpadu z obohacování (ochuzený uran) [3]. Takovýto uran ve skutečnosti tvoří převážnou část materiálu, která je při přepracování oddělena.

Získání uranu z vyhořelého paliva se dnes provádí především v přepracovávacích závodech La Hague ve Francii a Sellafild ve Velké Británii. V dnešní době je k výrobě čerstvého paliva použita pouze malá část separovaného uranu a ani v blízké budoucnosti nelze očekávat velké změny.

Podle nedávných oznámení učinila společnost, mající na starost provoz jaderných elektráren ve Francii, opatření k dlouhodobému skladování přepracovaného uranu (REPU) po dobu až 250 let.

Použití přepracovaného uranu je problematické z několika důvodů. REPU obsahuje příměsi umělých izotopů ^{232}U a ^{236}U, což vyžaduje zvláštní opatrnost při jeho zpracování. Izotop ^{232}U a jeho rozpadové produkty zvyšují dávky záření, kterým je vystavena obsluha, v případě izotopu ^{236}U se jedná o absorbér neutronů a jeho přítomnost vyžaduje vyšší stupeň obohacení. V důsledku současné situace na trhu není využití REPU výhodné. Jeho přeměna je třikrát dražší než v případě přírodního uranu a navíc obohacení nemůže být provedeno v jediném obohacovacím závodě, aby nedošlo ke kontaminaci linky [3].

5.2 Výroba paliva na bázi MOX

5.2.1 Palivo MOX

Pod zkratkou MOX, označujeme druh jaderného paliva, které vzniká přepracováním paliva již jednou použitého. Skládá se ze směsi oxidů uraničitého a plutoničitého, které vznikají jako produkty jaderné reakce v reaktoru. Palivo MOX neboli směs UO_2+PuO_2, se také někdy vyrábí z náplní nepoužitých jaderných zbraní[13] [5].

Palivo v reaktoru tvoří z největší části ^{238}U. Záchytem neutronů, kterých v aktivní zóně létá při štěpení obrovské množství, se postupně může přeměnit na ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{241}Pu a ^{242}Pu. Izotopy plutonia 239 a 241 jsou štěpitelné, podobně jako ^{235}U.

Při provozu reaktoru tedy vyhořívají izotopy plutonia jako uran a můžeme říci, že asi $1/3$ celkově získané energie pochází z jejich štěpení [6]. Čím vyšší je vyhoření paliva, tím méně plutonia v použitém palivu zůstane – tvoří asi 1 % použitého paliva, z toho jen $2/3$ jsou štěpitelné

[13] Uran a plutonium z likvidovaných jaderných zbraní může nahradit celosvětovou potřebu čerstvého uranu na 3 roky.

izotopy. Na celém světě se vyjme z reaktorů ročně asi 70 tun plutonia v použitém palivu. Přepracováním paliva se dá využít nejen zbylý uran, ale i plutonium a z MOX paliva následně vyrobit další elektřinu [6].

Palivo MOX se při přepracovávání vyrábí co možná nejrychleji. Musí se předcházet hlavnímu problému s rozpadem krátkodobých izotopů plutonia [5]. Recyklací se tak zvýší využití původního uranu o 22 % [6].

5.2.2 Výroba paliva MOX

Přepracovací závody, které produkují palivo MOX jsou v dnešní době ve Francii a ve Velké Británii. Od roku 2015 by se k těmto dvěma státům mělo připojit Japonsko, brzké době i Čína. V Americe se takovýto závod už staví – v Savannah River. Bude zpracovávat především plutonium z již vyřazených zbraní. Nejznámějším výrobcem paliva MOX je pro rychlé reaktory především Rusko[14].

V dalším desetiletí života paliva MOX, by toto palivo mělo nahradit až 5 % celosvětových potřeb čerstvého jaderného paliva [6].

5.2.3 Použití paliva MOX

Palivo MOX se poprvé použilo zkušebně v sedmdesátých letech minulého století, ale používat se doopravdy začalo až v letech osmdesátých. Do dnešní doby se vyrobilo přibližně dva tisíce tun tohoto paliva, přičemž se používá ve více než třiceti tlakovodních (někdy i ve varných) reaktorech.

Země, ve kterých využívající tohoto paliva jsou následující [5]:

1. Belgie
2. Švýcarsko
3. Francie
4. USA – pouze zkušebně
5. Japonsko a Německo

S palivem MOX se počítá i v reaktorech označovaných: EPR a AP 1000. Pro palivo MOX je potřeba upravit zejména řídící a monitorovací systém reaktoru. Upravit metodiku zavážení čerstvého paliva a samozřejmě upravit chování a nakládání s tímto palivem, které je mnohem více aktivní než čerstvé palivo bez přepracování [5].

[14] Pro lehkovodní reaktory se v dnešní době vyrábí asi 250 tun MOX paliva.

Výhodou paliva MOX je především to, že štěpitelnou složku může snadno navýšit o přidání plutonia. O dražší záležitost se pak jedná při obohacování ^{235}U. Bude-li stále stoupat cena uranu, palivo MOX se v tomto případě stane ekonomicky výhodnějším palivem.

Další výhodou je fakt, že výroba MOX paliva snižuje množství vysokoaktivních odpadů, jelikož ze sedmi palivových kazet s UO_2 se dá vyrobit pouze jediná kazeta s palivem MOX, navíc se sníží vitrifikované zbytky a množství jaderných odpadů, které bude potřeba trvale uložit, až na 35 % [6].

5.2.4 Přepracování přepracovaného MOX paliva

Již přepracované palivo MOX se dá opět přepracovávat, o čemž víme od roku 1992 z přepracovávacího závodu ve Francii. Přepracování MOX paliva je možné jen omezeně, jelikož se začnou kumulovat sudé izotopy plutonia a palivo pak už není dále možné přepracovávat.

V dnešní době se ale palivo MOX ukládá a vyčkává se až na IV. generaci rychlých jaderných reaktorů [5].

6 KVANTITATIVNÍ ANALÝZA MEZISKLADOVÁNÍ V ČR S OHLEDEM NA PLÁNOVANÉ HLUBINNÉ ULOŽIŠTĚ

Obecné využití jaderné energie se stalo přirozenou součástí tzv. energetického mixu řady vyspělých států na naší planetě. Bezpochyby k těmto státům patří i Česká republika. Lze předpokládat, že jaderné elektrárny budou mít, i v budoucnu, zásadní vliv na rozvoj ekonomiky. Na celém světě zatím neexistuje žádný lepší energetický zdroj, který by pokryl rostoucí nároky na energii a přitom nepřispíval ke zhoršování životního prostředí [14].

Problém zajištění energetických zdrojů, řešení otázky globálního oteplování i nazírání na přijatelnost jaderné energie mezi obyvateli umožnily vytvoření příznivého ovzduší pro obnovení plánování jaderných elektráren i v ČR:

1. Zhruba do 30. let (dojde-li k omezení těžby z ekologického hlediska pak i dříve), dojdou České republice zásoby hnědého uhlí, na kterém je naše současná energetika postavena.
2. V ČR probíhá modernizace SKŘ (Obnova systému kontroly a řízení) JE Dukovany a současně jsou vedeny práce pro zvýšení výkonu této elektrárny ze 4 × 440 MW na 4 × 500 MW[15], s ohledem na prodlužování její životnosti [14].
3. Důležitým bodem je plánování, příprava i výstavba projektu, týkající se rozšíření JE Temelín na původně plánované čtyři jaderné bloky. Na výběr typu jaderného reaktoru a navazující technologie byl vypsán mezinárodní konkurs.
4. Stále pokračuje příprava lokality pro dlouhodobé úložiště vyhořelého paliva.

Pro udržení současného stavu úrovně nezávislosti na zahraničních energetických zdrojích a pro zajištění soběstačnosti v dodávkách elektřiny bude účelné vybudovat v ČR minimálně jednu novou jadernou elektrárnu[16] [19].

6.1 Skladování vyhořelého paliva v České Republice

Práce s radioaktivními látkami je spjatá se vznikem radioaktivních odpadů. Tyto odpady můžeme rozdělit do dvou skupin. První skupinu tvoří radioaktivní odpady, které vznikající v jaderné energetice – jako např. kapaliny, pomůcky nebo materiály, které přišly do kontaktu s radionuklidy (při provozu jaderné elektrárny). Může se jednat o vyhořelé jaderné palivo[17] [16].

Druhou skupinu tvoří tzv. institucionálními odpady – neboli odpady vznikající ve zdravotnictví, průmyslu, zemědělství či výzkumu. Takovými odpady jsou např. staré měřicí

---

[15] Po generálních opravách turbosoustrojí činí dnes celkový instalovaný výkon 500 MWe. V květnu roku 2009 začal modernizovaný 3. blok dosahovat nové úrovně výkonu cca 500 MW, v prosinci roku 2010 došlo k modernizaci 4. bloku na cca 500MW a v listopadu roku 2011 pak i k modernizaci 1. bloku.

[16] Názor odborníků z Ústavu jaderného výzkumu, a.s. (ÚJV) v Řeži u Prahy.

[17] Česká legislativa zatím nepovažuje vyhořelé jaderné palivo za odpad.

přístroje a radioaktivní zářiče, znečistěné pracovní oděvy, papír, atd. V ČR je evidováno několik set takovýchto institucionálních radioaktivních odpadů.

Podle intenzity záření a doby, po kterou toto záření produkuje, je možné radioaktivní odpad rozdělit do tří skupin:

1. Nízkoaktivní odpad – pevný odpad (např. kontaminované ochranné pomůcky, textil, balicí materiál, elektroinstalační materiál, stavební suť apod.) a odpadní vody.
2. Středně aktivní odpad
3. Vysoce aktivní odpad

Zneškodnění těchto tří skupin odpadů spočívá v zabezpečení jejich izolace od životního prostředí, a to po celou dobu, po kterou mohou pro člověka (a jeho životní prostředí) představovat riziko.

Takovéto izolace radioaktivních odpadů je dosaženo v úložištích, ve kterých je systém vzájemně se doplňujících a na sobě nezávislých bariér, bránících uvolnění nebezpečných látek do okolí. Radioaktivní odpady je třeba udržet pod kontrolou tak dlouho, dokud jejich radioaktivita neklesne na úroveň vylučující ohrožení [16].

6.1.1 Uložiště radioaktivních odpadů – Dukovany, Temelín

Uložiště v Dukovanech bylo vybudováno pro radioaktivní odpady, které vznikají v jaderné energetice a patří do kategorie nízkoaktivních a středněaktivních odpadů. Jedná se o největší úložiště radioaktivních odpadů v ČR. Svou konstrukcí i bezpečností odpovídá úložištím v západoevropských zemích.

Za bezpečné ukládání radioaktivních odpadů převzal zodpovědnost stát v roce 1997. Uložiště Dukovany jsou tedy ve vlastnictví státu, kde provoz zajišťuje Správa úložišť radioaktivních odpadů [16].

Úložiště leží v prostoru jaderné elektrárny Dukovany na území obce Rouchovany (Třebíč) a zabírá plochu cca 1,3 ha. Výstavbu tohoto úložiště zahájila společnost ČEZ, a. s., v roce 1987. V trvalém provozu je úložiště až od roku 1995. Jsou zde uloženy především sudy s provozními odpady z dukovanské i temelínské jaderné elektrárny.

Celkový objem úložných prostor 55 000 m^3 (cca 180 000 sudů) je dostatečný k uložení všech provozních odpadů z obou elektráren (i v případě prodloužení jejich plánované životnosti na 40 let). Uložiště je tvořeno 112 železobetonovými jímkami uspořádanými do čtyř řad po 28 jímkách (velikost jímky je cca 5 x 5,5 x 17,5 m), což znamená, že při optimálním využití prostoru jímky se do ní vejde cca 1 600 sudů o objemu 200 l.

Při ukládání je přesně evidována poloha každého sudu. Díky tomu je možné monitorovat, na kterém místě v úložišti se konkrétní sud s odpadem nachází a jak jsou radioaktivní látky v úložišti rozloženy. Když je jímka se sudy zcela zaplněna, zalijí se volné prostory mezi sudy betonovou směsí a jímka se překryje polyetylenem, který zabraňuje tomu, aby se do ní dostala srážková voda. Po zaplnění celého úložiště budou jímky zaizolovány shora několika izolačními vrstvami. Nakonec bude úložiště uzavřeno a střeženo, přičemž bude monitorován jeho vliv na životní prostředí. Doba, před uvolněním lokality k jiným účelům, se odhaduje asi na 300 let,

po jejich uplynutí již radioaktivita uložených odpadů poklesne natolik, že životní prostředí ohrožovat nebude.

Vysokoaktivní odpady z energetiky, průmyslu a zdravotnictví se v tomto úložišti ukládat nebudou. Stejně tak i vyhořelé jaderné palivo, o němž se v souvislosti s jadernou energetikou hodně diskutuje [16].

Obr. 8: Jímka se sudy – JE Dukovany [16]

6.1.1.1 Výpočty – Dukovany

Obě české jaderné elektrárny, Dukovany a Temelín, vyprodukují během své čtyřicetileté projektované životnosti dohromady asi 4 000 tun vyhořelého paliva. Pokud budou postaveny plánované dva nové bloky v elektrárně Temelín a jeden v elektrárně Dukovany, pak se množství odpadů k uložení zvýší na 9 000 tun vyhořelého jaderného paliva a 5 000 m^3 vysokoaktivních odpadů. Pro představu – uložení takového množství vyhořelého jaderného paliva představuje přibližně 6 000 ukládacích kontejnerů [16], [17].

Mezisklad v jaderné elektrárně Dukovany byl uveden do provozu 5. prosince 1995 zavezením prvního kontejneru typu Castor. Na přelomu roku 1996 a 1997 byly provedeny převozy použitého dukovanského paliva z Jaslovských Bohunic (Slovensko) do jaderné elektrárny Dukovany a byly uloženy v novém meziskladu vyhořelého paliva. V Dukovanské elektrárně jsou momentálně 2 mezisklady, první z nich s kapacitou 60 kontejnerů je již plně obsazen a druhý s kapacitou je 133 kontejnerů, je obsazen 20 kontejnery [14].

Tabulka 1: Počty vyvezených kazet na jaderné elektrárně Dukovany [14]

Rok	Vyvážené kazety / blok				Součty vyvezených kazet / blok	
	B1[18]	B2	B3	B4	Celkově vyvez.	Průměrně vyvez.
1986	114	0	0	0	114	114
1987	114	114	114	0	342	114
1988	121	114	114	114	463	116
1989	102	121	115	114	452	113
1990	114	114	109	109	446	112
1991	109	108	108	108	433	108
1992	102	109	102	102	415	104
1993	102	102	103	103	410	103
1994	102	102	102	102	408	102
1995	96	102	0	96	294	98
1996	90	102	90	90	372	93
1997	90	90	90	90	360	90
1998	90	90	102	90	372	93
1999	90	90	90	90	360	90
2000	84	84	90	78	336	84
2001	90	90	84	90	354	89
2002	91	78	85	96	350	88
2003	85	84	91	91	351	88
2004	108	78	79	90	355	89
2005	96	96	84	85	361	90
2006	73	67	67	73	280	70
2007	78	73	91	79	321	80
2008	73	78	84	72	307	77
2009	72	85	84	67	308	77
2010	90	85	67	73	315	79
2011	85	85	73	108	351	88

Celkově vyvezených kazet za rok 1988:

$$\sum_{B1}^{B4} Vyvezených\ kazet = 121 + 114 + 114 + 114 = 463 \text{ kazet} \qquad (6.1)$$

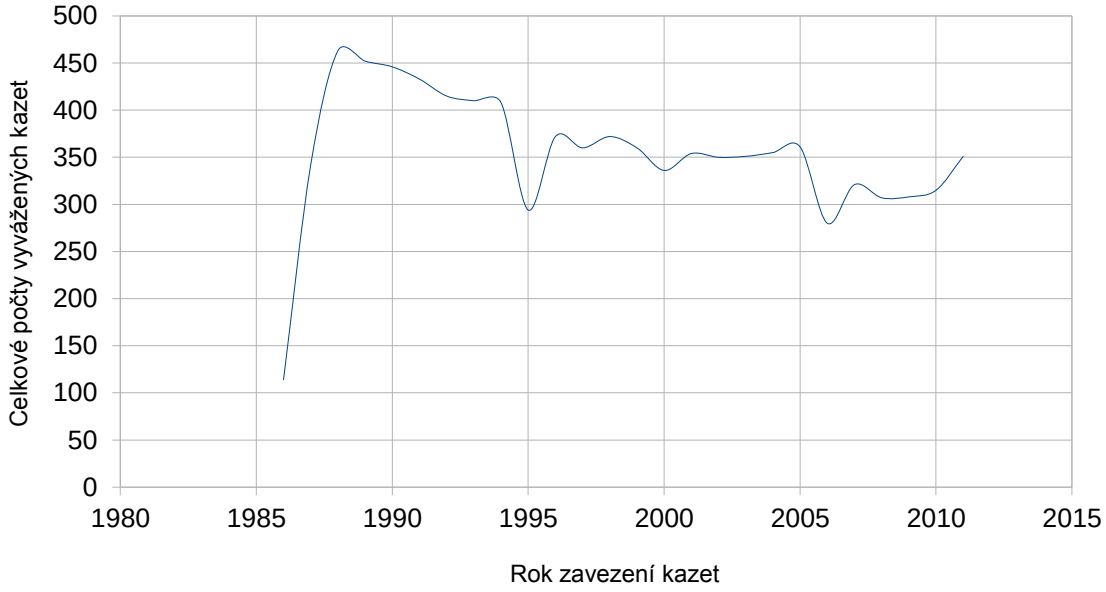
Průměrně vyvezených kazet na jeden blok za rok 1988:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i) = \frac{1}{4} \times (121 + 114 + 114 + 114) = 116 \text{ kazet} \qquad (6.2)$$

Celkový počet vyvezených kazet od roku 1986 do roku 2011:

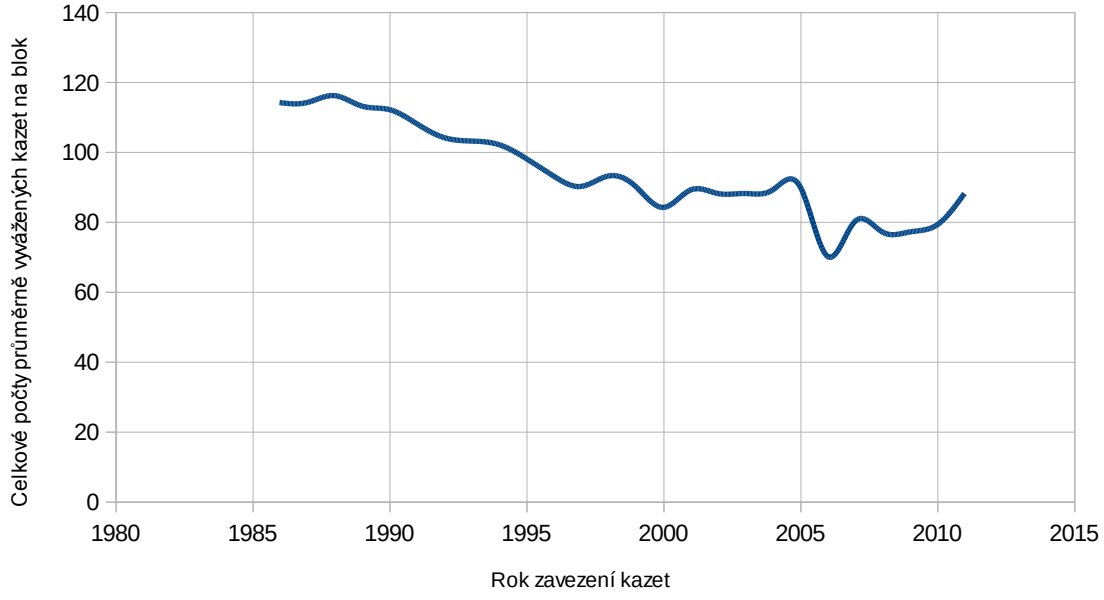
$$\sum_{B1}^{B4} Celkově\ vyvezených\ kazet = 9230 \text{ kazet} \qquad (6.3)$$

[18] Blok číslo 1 jaderné elektrárny Dukovany



Obr. 9: Graf 1 - Závislost celkově vyvezených kazet za jednotlivé roky [14]

Následující graf (Obr. 9) nám zobrazuje závislost celkově vyvezených kazet, ze čtyř reaktorů v jaderné elektrárně Dukovany, v rámci jednotlivých let. Můžeme na něm vidět, že od roku 1986 počet kazet téměř lineárně narůstal, až do roku 1988, kdy začalo pozvolné klesání. V roce 2006 byl počet vyvezených kazet nejmenší (280 kazet). Na druhém grafu (Obr. 10) můžeme pozorovat závislost průměrně vyvážených kazet na blok, ze čtyř reaktorů v jaderné elektrárně Dukovany, za jednotlivé roky. Kde opět můžeme pozorovat mírný pokles vyvážených palivových kazet z reaktorů.



Obr. 10: Graf 2 - Závislost průměrně vyvážených kazet na blok za jednotlivé roky [14]

Počet uložených kazet v Castorech typu 440/84 v jednotlivých skladech:

Mezisklad číslo 1:

kde:

C … počet castorů v meziskladu [ks]
P … počet vyhořelých palivových kazet

$$MZ(\text{č. } 1) = C \times P = 60 \times 84 = 5040 \text{ kazet} \tag{6.41}$$

Mezisklad číslo 2:

$$MZ(\text{č. } 2) = C \times P = 20 \times 84 = 1680 \text{ kazet} \tag{6.42}$$

Celkově uložených kazet:

$$\sum Celkově\ uložených\ kazet\ v\ meziskladu = 5040 + 1680 = 6720 \text{ kazet} \tag{6.4}$$

Z následujících rovnic (6.41), (6.42), (6.4) vyplývá, že celkově uložených palivových kazet, ve dvou meziskladech jaderné elektrárny Dukovany, je dohromady 6720. Což je přesně takový počet kazet, který se vejde do 80 kontejnerů, typu Castor 440/84.

Celkový počet palivových kazet v bazénech vyhořelého paliva:

kde:

PVP … celkový počet palivových kazet v bazénech vyhořelého paliva

Bazén vyhořelého paliva reaktoru číslo 1: 572 kazet
Bazén vyhořelého paliva reaktoru číslo 2: 577 kazet
Bazén vyhořelého paliva reaktoru číslo 3: 604 kazet
Bazén vyhořelého paliva reaktoru číslo 4: 553 kazet

$$\sum_{Bazén\ č.1}^{Bazén\ č.4} PVP = 572 + 577 + 604 + 553 = 2306 \text{ kazet} \tag{6.5}$$

Z rovnice (6.5) můžeme vidět, kolik palivových kazet je k momentálnímu datu (květen 2012) v bazénech vyhořelého paliva v jaderné elektrárně Dukovany.

Momentálně ve čtyřech reaktorech:

kde:

PKR … celkový počet kazet v reaktorech
R … počet reaktorů [ks]
ZK … počet zavezených palivových kazet

$$PKR = R \times ZK = 4 \times 349 = 1396 \text{ kazet} \quad (6.6)$$

Jaderné elektrárna Dukovany má 4 jaderné reaktory a v každém tomto reaktoru je momentálně 349 palivových kazet. Což znamená, že celkový počet palivových kazet ve všech čtyřech reaktorech je 1396.

Celkový počet palivových kazet na elektrárně Dukovany:

kde:

CPPK … celkový počet palivových kazet na jaderné elektrárně Dukovany

$$\sum CPPK = Celkově\ ulož.kazet + PVP + PKR = 6720 + 2306 + 1396 = 10422 \text{ kazet} \quad (6.7)$$

Z rovnice (6.7) vyplývá, že celkový počet palivových kazet se spočítá tím, že sečteme počet celkově uložených palivových kazet již uložených v kontejnerech a k tomuto počtu připočteme celkový počet palivových kazet v bazénech vyhořelého paliva a následně ještě připočítáme počet palivových kazet ve všech čtyřech reaktorech. Výsledný počet palivových kazet je pak 10422 kazet.

6.1.1.2 Výpočty – Temelín

V areálu jaderné elektrárny Temelín se nachází sklad vyhořelého jaderného paliva, který je ve zkušebním provozu od září roku 2010. Stejně jako v případě jaderné elektrárny Dukovany je i v jaderné elektrárně Temelín pro skladování vyhořelého paliva vyváženého z reaktoru určen v hlavním výrobním bloku skladovací bazén o objemu 1440 m^3. Vyhořelé jaderné palivo je skladováno po vyjmutí z reaktoru po dobu 5 až 12 let. Bazén skladování vyhořelého paliva je uspořádán do tří částí. Celý bazén umožňuje uskladnit 678 palivových kazet. Z toho 25 palivových kazet v hermetických pouzdrech (momentálně 10 míst obsazených). Z toho však v normálním skladovacím režimu musí zůstat vždy 163 míst neobsazených, pro případ nutného havarijního vyvezení celé aktivní zóny reaktoru.

Bazén skladování vyhořelého jaderného paliva na jaderné elektrárně Temelín obsahoval (k 31. 12. 2010) 478 palivových kazet na prvním bloku a 25 netěsných palivových proutků. Na druhém bloku se jednalo o 307 palivových kazet a 24 netěsných palivových proutků.

Kapacita skladu vyhořelého jaderného paliva Temelín je postačující k pokrytí produkce vyhořelého paliva po dobu 30 let provozu jaderné elektrárny Temelín. Skladování vyhořelého paliva je uskutečňováno v kontejnerech typu Castor-1000/19. Do tohoto typu kontejneru se vejde 19 palivových kazet [13].

Aktivní zóna reaktoru VVER-1000 obsahuje 163 palivových souborů. Firma Westinghouse dodávala palivo na čtyřletou kampaň. Každý rok se tedy vyměnilo 41 - 42 palivových souborů [14].

Celkový počet palivových kazet na elektrárně Temelín:

1 blok jaderné elektrárny Temelín:

Celkově vyvezených kazet (od roku 2002 – do roku 2006) = 163 kazet
Celkově vyvezených kazet (od roku 2006 – do roku 2009) = 163 kazet

2 blok jaderné elektrárny Temelín:

Celkově vyvezených kazet (od roku 2003 – do roku 2007) = 163 kazet
Celkově vyvezených kazet (od roku 2007 – do roku 2010) = 163 kazet

$$\sum_{B1}^{B2} Celkově\ vyvezených\ kazet = 4 \times 163 = 652 \text{ kazet} \quad (6.8)$$

Z 652 palivových kazet již je 19 palivových kazet uloženo v kontejneru typu Castor-1000/19 s celkovou možnou kapacitou 19 palivových kazet (k datu 31. 12. 2010). Kapacita skladu vyhořelého jaderného paliva je 152 kontejnerů.

V roce 2010 přechází jaderná elektrárna z amerického jaderného paliva (firmy Westinghouse) na palivo ruské (firmy TVEL) [14].

6.2 Plánované hlubinné uložiště

V případě pokračování rozvoje nových technologií zbyde z jaderné energetiky a různých průmyslových odvětví (i ze zdravotnictví) dané množství dlouhodobých, vysoko-radioaktivních odpadů, které je a stále bude třeba izolovat od životního prostředí [17].

V zájmu občanů je vybudování hlubinného uložiště, jelikož energetický postoj ČR počítá s výrobou elektrické energie z jaderných zdrojů. Nová, ale i stávající zařízení jsou tedy zdrojem vyhořelého jaderného paliva a také vysokoaktivních odpadů, které nelze odstranit jinak než trvalým uložením do hlubinného úložiště.

Důvody pro vybudování hlubinného uložiště:

1. Vyhořelé palivo a vysokoaktivní odpady vznikají a budou vznikat ještě desítky let.
2. Jedná se o jediné řešení, které je jak technicky, tak ekonomicky vyhovující a proveditelné (celosvětově je s tím srozuměna odborná veřejnost).
3. Je nezákonné radioaktivní odpady vyvážet za hranice.
4. Ve vyhořelém jaderném palivu jsou obsaženy štěpitelné materiály, které se dají použít jako palivo (pro současné nebo nově vyvíjené reaktory), ale i tak je třeba odpad po přepracování ukládat do hlubinných úložišť.
5. Existují i radioaktivní odpady, které z různých důvodů (aktivita, forma) nesplňují podmínky přijatelnosti k uložení do úložišť radioaktivních odpadů [16].

Zodpovědností každého státu, který se rozhodl elektrickou energii vyrábět v jaderných elektrárnách, je především zneškodnění všech odpadů, které s touto činností souvisí. Proto všechny země (i Česká republika), přistupují k tomuto problému s vážností a hledají jakési konečné řešení. Existují různé výzkumné projekty, jak lépe a s menším množstvím odpadů stávající vyhořelé jaderné palivo energeticky využít. Ale i tak všechny tyto projekty počítají s tím, že vždy zůstanou odpady, které nepůjdou zneškodnit jinak než uložením v hlubinném úložišti. I Česká republika potřebuje hlubinné úložiště, protože i zde existují vysokoaktivní odpady z různých průmyslových odvětví a medicíny, které jinak než v hlubinném úložišti zlikvidovat nelze. Je tomu tak proto, že dlouhodobé skladování všech odpadů je sice technicky možné, ale ekonomicky by znamenalo vyšší náklady než uložení v hlubinném úložišti.

I kdybychom vyhořelé palivo vyváželi k vyššímu energetickému využití např. ke spálení v reaktorech budoucí IV. generace, nezbavujeme se tím zodpovědnosti k zneškodnění zbytkových odpadů.

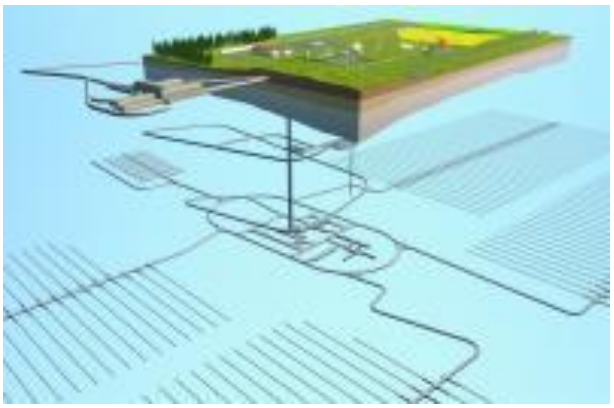
Hlubinné úložiště je jediné bezpečné, technicky realizovatelné a ekonomicky přijatelné řešení. I za pozitivního rozvoje nových technologií můžeme předpokládat, že výhody hlubinného úložiště spočívají v jeho bezpečnosti, technické realizovatelnosti a ekonomické přijatelnosti [16], [17].

6.2.1 Hlubinné úložiště v ČR

Podle geologických podmínek České republiky bude hlubinné úložiště s největší pravděpodobností vybudováno v žulovém masivu nebo tomuto prostředí podobných metamorfovaných horninách[19] – rulách. Především se bude jednat o seizmicky stabilní oblast. Vlastnosti hornin žuly a ruly jsou pro potřeby vývoje a vybudování hlubinného úložiště, dlouhodobě vědecky zkoumány. Jsou zkoumány hlavně v podzemních laboratořích ve Švédsku, Švýcarsku, Kanadě a v mnoha dalších zemích [16], [17].

6.2.1.1 Koncept hlubinného uložiště v ČR

Koncepční řešení hlubinného úložiště v České republice se příliš neliší od řešení v zahraničí. Idea řešení podzemní části je lépe znázorněna na Obr. 11, zatímco řešení povrchového areálu můžeme pozorovat na Obr. 12. Takto by areál měl vypadat v době provozu, kdy budou radioaktivní odpady a vyhořelé jaderné palivo současně přijímány, překládány do úložných souborů a následně přepravovány do podzemí s následným uložením. Kromě znázorněných objektů se v areálu budou vyskytovat i objekty zajišťující pobyt pracovníků, dále pak administrativní budovy, informační služby atd. Převážná část objektů je umístěna v tzv. neaktivní části areálu. Aktivní provoz je soustředěn do zvláštní části, která je zajištěna samostatnou bezpečnostní ochranou [16], [17].



Obr. 11: Koncept hlubinného uložiště v ČR [16]

Celková plocha takovéhoto nadzemního areálu je cca 30 hektarů. Z toho část, kde bude probíhat práce s vyhořelým palivem a vysokoaktivními odpady, zabírá pouhé cca 3 hektary. Zbývající náhradní a manipulační plocha bude použita jako staveniště, přičemž část bude zabírat i železniční vlečka pro transport.

[19] Metamorfované (přeměněné) horniny vznikají ze všech druhů hornin v důsledku vysokých teplot a tlaků, kterým jsou horniny v zemské kůře vystaveny.

Obr. 12: Povrchový areál hlubinného uložiště [16]

Podzemní část úložiště se následně bude skládat z přístupových a větracích šachet a dále pak z tunelů a ukládacích prostorů. Největší část těchto podzemních prostor však představuje rozsáhlá síť chodeb, v nichž budou ukládány kontejnery s vyhořelým jaderným palivem. Počítá se jak se svislým umístěním pod ukládací chodbou, tak s bočním vodorovným umístěním dovnitř stěny chodby. Všechny přístupové cesty by měly být utěsňovány postupně.

Pro úložiště je navrhováno několik bariér, vzájemně se doplňujících. Bezpečnost úložiště musí odpovídat daným normám i v případě, kdy jedna z bariér ztratí svou izolační schopnost. Kontejnery s vyhořelým palivem nebo s vysokoaktivními odpady jsou obklopeny tlumicími materiály a budou umísťovány v hloubce cca 500 metrů do míst vyhloubených v hornině. Tlumicí materiál bude nejen udržovat kontejner na místě, ale bude i zabraňovat případné korozi. Po ukončení životnosti kontejneru (kdy může dojít i k jeho poškození) bude tlumicí materiál omezovat transport radionuklidů z úložiště na povrch země. To platí obzvláště pro prvky s vysokou radioaktivitou a dlouhými poločasy rozpadu (např. americium nebo plutonium).

K izolaci přispívá také hornina a to tím, že obsahuje stabilní chemické a mechanické prostředí jak pro kontejner, tak i pro tlumicí materiál. Chemické podmínky v hornině mohou ovlivňovat budoucí transport radionuklidů jak k jeho urychlení, tak i ke zpomalení, či dokonce zastavení. Proto je jejich znalost jedna z nejdůležitějších, při prokázání bezpečnosti budoucího úložiště. Cílem je nalézt právě takové prostředí, které transport radionuklidů zpomalí a při tom bude poskytovat záruky dostatečné stability na tisíce let. Jestliže by izolační funkce úložiště byla nějakým způsobem narušena nebo by došlo k poškození pouzdra, má úložiště ještě další, zpomalovací funkci. Tím se rozumí, že pohyb radionuklidu z úložiště do biosféry bude dostatečně dlouhý a pomalý, aby jeho radioaktivita mohla mezitím poklesnout na velmi nízké, již přijatelné hodnoty.

Ke zpomalovací funkci úložiště přispívají tedy všechny bariéry. Dokonce i částečně poškozená pouzdra se mohou účinně podílet na zpomalování. K ověření těchto procesů proběhlo ve světě v podzemních laboratořích mnoho výzkumů. Také v rámci vývoje českého hlubinného úložiště tyto výzkumy musí být provedeny [16], [17].

6.2.1.2 Výběr lokality hlubinného uložiště

Výběr vhodné lokality je jedním z nejdůležitějších cílů vývoje hlubinného úložiště. Lokalita musí splňovat nejen požadavky na vlastnosti hornin (schopnost izolovat a zachycovat radioaktivní látky, viz 6.2.1.1), ale také řadu dalších požadavků, mezi něž patří např. střety zájmů, přijatelnost lokality veřejností, technické možnosti vybudování povrchového areálu úložiště a dostupnost lokality [17].

Geologický průzkum v ČR:

1990 – 1993: Je navrhnuto 27 lokalit, Českým geologickým ústavem, doporučených k dalšímu výzkumu.

1990 – 1998: Ústav jaderného výzkumu Řež vybírá z doporučených lokalit pouhých 13, nejperspektivnějších oblastí. Provádí analýzu archivovaných geologických informací a na základě analýzy se výběr opět zužuje a to na 5 oblastí, v nichž je vytipováno 8 lokalit.

2002 – 2003: SÚRAO (Správa uložišť radioaktivních odpadů) navazuje na předchozí práce a doplňuje je o regionální výzkum. Bylo doporučeno 11 lokalit.

2003 – 2005: SÚRAO uzavírá úvodní etapu výzkumů. Vybírá 6 nejvhodnějších lokalit, jež doporučuje do druhé etapy s využitím leteckého a družicového průzkumu. Jsou zpracovány studie o provedení umístění povrchového areálu budoucího hlubinného úložiště.

2005 – 2009: Vychází na povrch negativní stanoviska obcí, které vyvolaly přerušení prací do konce roku 2009. V roce 2008 je zadán geologický výzkum (s cílem vypracovat analýzu archivovaných geologických informací ve vojenských prostorech). Účelem tohoto výzkumu je rozšíření seznamu vhodných lokalit.

2010 – 2015: Bude vyhotovena podrobná geologická mapa lokality s cílem navrhnout místo pro hluboký vrt (zhruba do hloubky 1 km). Dále bude vymezen prostor o ploše cca 5 km^2 pro budoucí vlastní ukládání. Současně bude zpracováno technické řešení povrchového areálu, podzemního areálu a jejich propojení.

2015 – 2025: Na základě podrobných vrtných prací, výzkumu hornin a dalších výzkumných prací bude potvrzena vhodnost vybrané lokality. Záložní lokalita bude zkoumána pouze v případě, že hlavní lokalita z nějakých důvodů nebude splňovat původní předpoklady.

2025 – 2050: Následná výstavba podzemní laboratoře, vlastnosti a vhodnost horninového prostředí budou zkoumány přímo na lokalitě v horninovém komplexu. Cílem bude získat dostatečně věrohodný soubor dat k prokázání bezpečnosti lokality, aby mohlo být zažádáno o povolení k výstavbě hlubinného úložiště.

2050 – 2065: Výstavba podzemního komplexu i povrchového areálu úložiště, zahájení provozu [17].

7 CELOSVĚTOVÉ PŘÍSTUPY K PROBLEMATICE PALIVOVÉHO CYKLU, ZEJMÉNA JEHO ZADNÍ ČÁSTI

7.1 Budoucnost jaderné energetiky v Evropě

V současné době jsou v zemích Evropské unie uloženy téměř 2 miliony tun odpadů [14] – jak nízkoaktivního, tak středněaktivního. Zdrojem takovýchto odpadů je především odpad z jaderných elektráren, kde v souvislosti s nárůstem odstavovaných jaderných reaktorů (po 40 letech provozu) můžeme očekávat již v příštích 10. letech.

V současnosti existuje několik technických řešení skladů. Sklady použitého paliva v areálu českých jaderných elektráren (Dukovan a Temelína) mají koncepci řešenou třemi mezisklady, které se nachází na území těchto jaderných elektráren. Dukovany mají dva mezisklady, zatímco Temelín jeden.

Na rozdíl od USA nejsou obalové soubory umístěny volně (pod širým nebem na betonové ploše), ale jsou uzavřeny v chráněné stavbě.

Hlavní odlišnosti kontejnerů použitého paliva, např. pro belgické jaderné elektrárny, od kontejnerů plánových pro jadernou elektrárnu Temelín je především v systému těsnících vík. Odlišnosti místního skladu od skladu jaderných elektráren Dukovan a Temelína je také v odstranění plotu okolo budovy skladu. Belgická vláda není zcela rozhodnuta, jakých způsobem bude v budoucnosti ukládat použité jaderné palivo do trvalého uložiště.

Mezinárodní spolupráce při přípravě hlubinného ukládání vysokoaktivního jaderného odpadu probíhá v oblasti výzkumných prací. Široká mezinárodní spolupráce v daných oblastech sehraje významnou roli při vyhodnocování bezpečnosti hlubinného ukládání odpadů [14].

7.2 Budoucnost hlubinného ukládání v zemích EU

V dnešní době existuje v zemích s jaderně – energetickými programy řada projektů pro konečné ukládání vysokoaktivních odpadů a použitého jaderného paliva. Všechny země se shodují na tom, že nejbezpečnějším způsobem konečného uložení těchto materiálů je jejich umísťování v hlubinných uložištích. Rozdílné názory existují na to, zda má být použité palivo před uložením přepracováno či na hodnocení vhodných geologických podmínek. Vzhledem k malému objemu vysokoaktivních jaderných odpadů však zatím stačí budovat tzv. mezisklady [14].

7.2.1 Belgie

Belgie je zaměřena na přepracování vyhořelého paliva ve francouzském přepracovatelském závodě v La Hague a na možnosti uložení vzniklých odpadů do jílu. Vitrifikované odpady jsou skladovány ve výzkumném středisku v Molu, ale pozornost je nově věnována i možnosti přímého uložení použitého paliva.

Současný projekt předpokládá úložiště, do něhož by se ukládaly dané typy radioaktivních odpadů. Podobně jako v ostatních zemích je i v Belgii ukládání vysokoaktivních odpadů do hlubinných geologických formací založeno na tzv. multibarierovém principu [14].

7.2.2 Finsko

Ukládání radioaktivních odpadů ve Finsku je podle zákona nutno zajistit na území státu. Finská koncepce zneškodňování použitého jaderného paliva je založena na jeho přímém umístění do geologického úložiště jaderného odpadu vybudovaného v žule. Finský jaderný program je svým rozsahem i zvažovanou horninou blízký tomu českému, ale liší se časovým plánem jeho realizace: úložiště by mělo vstoupit do provozní fáze o cca deset let později.

Vlastní úložiště je tvořeno z několika tunelů spojených transportními chodbami. Kromě šachty sloužící pro transport kontejnerů je úložiště spojeno s povrchovými objekty pracovní šachtou a šachtou pro přepravu osob. Po umístění jsou kontejnery obklopeny jílem, jenž ve styku s podzemní vodou zvětšuje objem, a tím uzavře většinu netěsností v bariérovém systému. Po uzavření nebude úložiště vyžadovat žádný dozor [14].

7.2.3 Francie

Zneškodňování radioaktivních odpadů ve Francii je svěřeno známé státní organizaci AREVA, která již provozuje úložiště pro nízkoaktivní a středněaktivní krátkodobé odpady, schopné pojmout reaktorové odpady. V oblasti nakládání s použitým palivem je francouzská koncepce založena na přepracování veškerého paliva z provozovaných jaderných elektráren a na prozatímní skladování vitrifikovaných vysoce aktivních odpadů (které jsou skladovány v lokalitě La Hague) před vybudováním hlubinného úložiště.

Vláda se rozhodla přijmout koncepci úložiště tzv. reverzibilního typu, což znamená dát možnost budoucím generacím se rozhodnout o přeorientování úložného procesu, popř. vyjmout odpady v souvislosti s novým způsobem zneškodňování nebo přepracování [14].

7.2.4 Maďarsko

Od počátku existence jaderné elektrárny v Maďarsku se použité palivo vracelo do bývalého SSSR bez povinnosti odebrat zpět vysokoaktivní odpad. Tato dohoda však v devadesátých letech skončila. Pro jadernou elektrárnu vznikla nutnost řešit skladování použitého paliva, neboť kapacita skladovacích bazénů se měla již brzo vyčerpat. Proto se rozhodlo o zřízení dočasného suchého skladu na lokalitě elektrárny. V současné době je připravována koncepce přípravy hlubinného úložiště [14].

7.2.5 Německo

Německo patří k zemím, které mají největší zkušenosti s budováním i provozem hlubinných úložišť umístěných převážně v solných formacích.

V současné době jsou všechny politické strany v této zemi zajedno v tom, že je nezbytné upustit od jaderné energetiky. Je pro ně tedy nezbytně nutné vybudovat nové trvalé uložiště vyhořelého paliva [14].

7.2.6 Slovensko

Slovenský program přípravy hlubinného úložiště byl zahájen společně s českým programem. Výběr lokalit dospěl do stádia volby dvou horninových prostředí, sedimentárních a prachových jílovců, celkem bylo zvažováno pět lokalit.

Výstavba úložiště má být zahájena v roce 2028 [14].

7.2.7 Velká Británie

Velká Británie nemá schválený program trvalého zneškodňování použitého paliva a radioaktivního odpadu, přestože již řadu let provozuje na komerční bázi přepracovávatelský závod v Sellafieldu. Vitrifikační zařízení pro úpravu kapalných radioaktivních odpadů k uložení je v provozu už téměř dvacet let.

V současnosti se počítá se skladováním použitého paliva a vysoce aktivních odpadů po období v délce zhruba 50 – 100 let, což je doba postačující pro konečné rozhodnutí o uložení.

V devadesátých letech byla v Británii zahájena příprava hlubinného úložiště středně aktivních odpadů: pro tento účel byla zvolena lokalita Sellafield a jako náhradní lokalita Dounrey na severu Skotska; tam však byly kvůli široké veřejné opozici práce ukončeny [14].

8 ZÁVĚR

Budoucnost jaderné energie bude i přes zvyšování bezpečnostního opatření a jejímu praktickému využití nejspíše vždy určovat trh s elektřinou. Bude vyvíjen nátlak na jaderné elektrárny, aby vyráběly elektřinu, která bude konkurenceschopná s ostatními zdroji energie.

Jaderná energetika je dle autorky ekologicky zdaleka nejpříznivější zdroj okamžitě dostupné energie ve velkém množství. Abychom na začátku 21. století dosáhli světa lepšího a příznivějšího, musíme v oblasti energie zlepšit jak její výrobu, tak používání a měli bychom začít usilovat o co nejnižší a nejefektivnější spotřebu energie. Je nutné podporovat výzkum, šetření, alternativní zdroje a také reaktory pracující s rychlými neutrony, jadernou fúzi a nové energie, které mohou v budoucnosti produkovat ještě čistší energii v téměř neomezeném množství.

Svět je často rozdělen kvůli vyhlídkám do budoucnosti do tří základních oblastí [4]. Na Spojené státy americké, Evropu a východní Asii. V Americe je velká pozornost věnována prodlužování životnosti stávajících reaktorů. Díky vysoké technické úrovni amerických elektráren je cena energie z takovýchto zdrojů poměrně nízká. Z USA stále častěji přichází signály, že jaderná energie i zde může být ekonomicky zajímavá. Navíc v USA nebyla jaderná energetika nikdy politicky zatracena a do budoucna je s ní potřeba počítat. V Evropě je současná situace odlišná. Předpokládá se, že trh s energiemi „přinesl“ nadbytek jejich kapacity, a proto bude nutné počkat na tzv. renesanci jaderné energetiky, alespoň dalších pár let. Východní Asie prožívá dynamický rozvoj, ke kterému potřebuje dostatečné množství elektrické energie. Proto právě zde se i jaderná energetika odpovídajícím způsobem uplatňuje a rozvíjí.

Autorka ve své práci věnuje pozornost možnostem zacházení s použitým jaderným palivem, celkově se zabývá problematikou přepracování použitého paliva. Především uvádí do procesu spadajícího mezi činnosti probíhající v uzavřeném palivovém cyklu. V současnosti se odstoupilo od názoru, že dochází k tzv. renesanci jaderné energetiky (po havárii JE v Japonsku), ale i přes veškeré obavy obyvatelstva se i nadále hovoří o výstavbě dalších nových jaderných bloků. Stále proti sobě stojí problém odpadů, představující riziko a ovlivňování atmosféry v globálním měřítku. Autorka se domnívá, že budoucnost pro Českou republiku je především v přepracovávání jaderného odpadu a možnost inspirace od vyspělejších států – viz Francie. Využití ADTT je zatím stále v zárodku, ale v budoucnosti může představovat jednu z nejdůležitějších technologií pro získání čisté, téměř bezodpadové energie.

Příliš často mají lidé sklon být rozhodně pro nebo rozhodně proti jaderné energii. Otázka by neměla být stavěna tak, aby se na ni dalo odpovědět pouze pro nebo proti. Jaderné elektrárny na světě existují a hrají velice důležitou až nezastupitelnou roli. Dalo by se snad jen spekulovat o tom, zda pokračovat v tom, co bylo již započato a co produkuje pozitivní výsledky. Lepším postojem je v tomto případě zůstat jaderné problematice otevřený než přistoupit na extrém a být naprosto proti. Jednoduché myšlení a krátkozraké posudky jsou nesprávné až nebezpečné. Naše společnost nic nezíská, pokud debata o jaderné energii skončí bojem mezi pro a proti. Každý by měl mít možnost pochopit výhody, ale i rizika spojené s touto problematikou.

9 POUŽITÁ LITERATURA

[1] AREVA, *Areva, a global offer for power generation with less carbon* [on line]. In Summer instute 2011, [cit. 2011-04], 17 pp., form PDF

[2] BÁTĚK, D., *Paliva jaderných reaktorů a palivový cyklus*, Bakalářská práce. Brno: FSI VUT, 2010, 57 stran, vedoucí práce Ing. Hugo Šen

[3] BÖLL, H., *Jaderný palivový cyklus* [on line], Publikace tématické řady Jaderná energetika, No. 3, [cit. 2006-2], 42 stran, ve formě PDF

[4] COMBY, B., MOORE, P., LOVELOCK, J., *Environmentalisté pro jadernou energii*, přeloženo z angličitny Praha Pragma, 2007, 321 stran, ISBN 978-80-7349-042-3

[5] DELICHATSIONS, A., *Recyklace jako součást udržitelného jaderného palivového cyklu*. Odborná konference NERS 2010 – Recycling Business Unit, 10. 11. 2010, 44 stran, ve formě PDF

[6] DUFKOVÁ, M., *Co je to MOX, podle podkladů World Nuclear Asoociation*, Praha: Katedra didaktiky fyziky MFF UK, [cit. 2011-4-19], Přístup k internetu: URL: www.fyzweb.cz. ISSN 1803-4179.

[7] ENRICHMENT OF URANIUM, *Summer institute 2008* [on line], Ottawa, Canada, WNU SI 2008, 32 pp., ve formě PDF

[8] FROGGATT, A., *Bezpečnostní rizika jaderných reaktorů* [on line], Vydavatelství Heinrich Boll Foundation 2005, [cit. 2005-12], 37 stran, ve formě PDF

[9] KATOVSKÝ, K., *Palivový cyklus – Komprese II. /A* [on line], letní škola jaderného inženýrství Počátky u Pelhřimova, 2011, [cit. 2011-08], 31 stran, ve formě PDF

[10] MASTNÝ, P., *Přednáška č. 8 – Jaderné elektrárny* [on line], Brno: VUT FEKT 2011, [cit. 2011-05], 30 stran, ve formě PDF

[11] MATOUŠEK, A., *Výroba elektrické energie*, Brno: první vydání, 2007, VUT v Brně, Fakulta elektrotechnicky a informačních technologií, 139 stran, ISBN 987-80-214-3317-5

[12] NACHMILNER, L., *Principy nakládání s radioaktivními odpady* [on line], Vydavatelství ČVUT, [cit. 2000-12], 49 stran, ISBN 80-01-02258-7.

[13] NÁRODNÍ ZPRÁVA ČR, *Národní zpráva ČR pro účely společenské úmluvy o bezpečnosti při nakládání s vyhořelým palivem a o bezpečnosti při nakládání s radioaktivními odpady*, Revize 4.0, [cit. 2011-03], 129 stran

[14] PUBLIKAČNÍ SYSTÉM EDEECMS, Internetová agentura FG Forrest, a. s., 2011 ČEZ a. s., přístup k internetu: URL: www.cez.cz

[15] REICHEL, J., VŠETIČKA, M., *Encyklopedie fyziky* [on line], 2006 - 2012, poslední změna 18. 9. 2011 [cit. 2011-10-11], přístup k internetu: URL: www.fyzika.jreichl.com

[16] SPRÁVA ULOŽIŠŤ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ, *Přehled povinně zveřejňovaných informací v SÚRAO podle zákona č. 106/1999 Sb. a Standartu ISVA*, 2011, poslední změna 2010, přístup k internetu: URL: www.surao.cz

[17] STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST, *Forma uveřejňování informací v souladu s vyhláškou č. 64/2008 Sb.,* [cit. 2011-5-15], přístup k internetu: URL: www.sujb.cz

[18] ŠTASTNÝ, O., *Projekt SAD – Subcritical Assembly at Dubna*, Bakalářská práce, Praha: FJFI ČVUT, 2006, 70 stran, vedoucí práce Karel Katovský

[19] TANZER, M., *Stručný přehled energetických jaderných reaktorů* [on line], [cit. 2011-10-10], 45 stran, ve formě PDF

[20] VESECKÝ, R., BOUČEK, S., *Priority jaderné energetiky z hlediska vývoje reaktorů* [on line], Praha: ČVUT FEI, str. 4, ve formě PDF

[21] WÁGNER, V., *Reaktory III. generace aneb jaké reaktory se staví teď a budou stavět v nejbližších desetiletí*, Praha: ČVUT FJFI, ÚJF AVČR Řež, [cit. 2008-5-4], přístup k internet: URL: www.hp.ujf.cas.cz/~wagner/