



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

POUŽITÉ JADERNÉ PALIVO – INVENTÁŘ, IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ A ZBYTKOVÝ VÝKON

IONIZING RADIATION, RESIDUAL HEAT GENERATION, AND INVENTORY OF SPENT NUCLEAR FUEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Barbora Hájková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karel Katovský, Ph.D.

BRNO 2020



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Studentka: Barbora Hájková

ID: 203558

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Použití jaderné palivo - inventář, ionizující záření a zbytkový výkon

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Definujte použité (vyhořelé) jaderné palivo.
2. Seznamte se složením VJP z lehkovodních jaderných reaktorů, zejména s ohledem na reaktory VVER-440.
3. Analyzujte vývoj zbytkového výkonu, inventář a emise ionizujícího záření z VJP.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

1. NEA a IAEA reporty
2. Lamarsh: Introduction to Nuclear Engineering, 2014
3. Murray: Nuclear Energy, 2014

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 10.6.2020

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

doc. 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.

Bibliografická citace práce:

HÁJKOVÁ, Barbora. *Použité jaderné palivo – inventář, ionizující záření a zbytkový výkon* [online]. Brno, 2020. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127253>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Karel Katovský.

Poděkování:

Tímto bych ráda poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Karlu Katovskému, Ph.D. za cenné profesionální rady a připomínky. Dále bych mu ráda poděkovala za to, že stal mým průvodcem programem UWB₁, měl se mnou trpělivost a byl vstřícný zodpovědět všechny mé dotazy. Děkuji Ing. Peteru Mičianovi za poskytnutí svých zkušeností s programem UWB₁.

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Použité jaderné palivo – inventář, ionizující záření a zbytkový výkon jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor 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.“

V Brně dne: 10. 6. 2020

.....

ABSTRAKT

V bakalářské práci na téma Použité jaderné palivo – inventář, ionizující záření a zbytkový výkon se seznamujeme především s jadernou fyzikou, druhy ionizujícího záření a poločasem rozpadu jednotlivých izotopů, které obsahuje jaderné palivo. Dále pomocí kódu UwB_1 simulujeme vyhořívání jaderného paliva používaného v jaderné Elektrárně Dukovany od vložení paliva do reaktoru až po uložení do hlubinného úložiště v roce 2065.

KLÍČOVÁ SLOVA: uran; poločas rozpadu; palivový cyklus; jaderná fyzika; jaderná Elektrárna Dukovany; Kód UwB_1 ; vyhořelé jaderné palivo; efektivní multiplikační koeficient

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with ionizing radiation, residual heat generation, and inventory of spent nuclear fuel. It introduces types of ionizing radiation and half-life of isotopes, which are contained in the nuclear fuel. Furthermore, using code UwB_1 , a simulation of the burning of nuclear fuel used at the Dukovany Nuclear Power Plant from the introduction of fuel into the reactor to its storage in deep repositories in 2065, is carried out.

KEY WORDS: uranium; half-life; fuel cycle; nuclear physics; Dukovany Nuclear Power Plant; Code UwB_1 ; spent nuclear fuel; effective multiplier coefficient

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	7
SEZNAM TABULEK	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
1 ÚVOD	11
2 PŘEDPOKLÁDANÉ MNOŽSTVÍ VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA.....	12
3 CESTA URANOVÉHO PALIVA	14
3.1 VYHOŘÍVÁNÍ PALIVA V REAKTORU	15
3.2 ROZPADOVÉ ŘETĚZCE	16
4 ZÁKLADY JADERNÉ FYZIKY.....	20
4.1 RADIOAKTIVNÍ PŘEMĚNY.....	21
4.2 JEDNOTKY	22
5 ŠTĚPENÍ JADER ²³⁵ U	24
6 DUKOVANY VVER 440 - PALIVO	26
6.1 EFEKTIVNÍ MULTIPLIKAČNÍ KOEFICIENT – KEF	32
7 PROGRAM U_{wB_1}	33
7.1 VÝPOČET PARAMETRŮ PRO VSTUP U_{wB_1}	33
7.2 VSTUP U_{wB_1}	36
7.3 VÝSTUP U_{wB_1}	38
7.4 VÝSLEDKY SIMULACE	39
7.4.1 EFEKTIVNÍ MULTIPLIKAČNÍ KOEFICIENT V PRŮBĚHU VYHOŘÍVÁNÍ	39
7.4.2 POROVNÁNÍ PODLE DÉLKY PALIVOVÉHO CYKLU.....	43
7.4.3 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH NUKLIDŮ MEZI TYPY PALIVA.....	46
8 ZÁVĚR.....	53
POUŽITÁ LITERATURA	54
PŘÍLOHY	57

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3-1 Uzavřený palivový cyklus</i>	14
<i>Obr. 3-2 Standardní reakce paliva UO_2</i>	15
<i>Obr. 3-3 Proces vyhořívání jaderného paliva a vznik nových prvků</i>	17
<i>Obr. 3-4 Rozpadový řetězec ^{235}U</i>	18
<i>Obr. 3-5 Rozpadový řetězec ^{238}U</i>	19
<i>Obr. 5-1 Výtěžek štěpného produktu v závislosti na nukleonovém čísle</i>	25
<i>Obr. 5-2 Periodická soustava prvků</i>	25
<i>Obr. 6-1 Typy palivových vsázek podle délky cyklu</i>	26
<i>Obr. 6-2 Struktura palivového souboru v řezu (3,82 %)</i>	27
<i>Obr. 6-3 Struktura palivového souboru v řezu (Gd-1)</i>	28
<i>Obr. 6-4 Struktura palivového souboru v řezu (Gd-2)</i>	28
<i>Obr. 6-5 Struktura palivového souboru v řezu (Gd-2+)</i>	29
<i>Obr. 6-6 Struktura palivového souboru v řezu (Gd-2M)</i>	29
<i>Obr. 6-7 Struktura palivového souboru v řezu (Gd-2M+)</i>	30
<i>Obr. 6-8 Struktura palivového souboru v řezu (Gd-2X)</i>	30
<i>Obr. 6-9 Model vyhořívání paliva s a bez vyhořívajícího absorbátoru</i>	32
<i>Obr. 7-1 Ukázka rozložení obsahu jedné sloučeniny na jednotlivé nuklidy (palivo)</i>	34
<i>Obr. 7-2 k_{ef} pro palivo se středním obohacením 3,82 %, 3 roky v reaktoru</i>	39
<i>Obr. 7-3 k_{ef} pro palivo 3,82 %, 3 roky v reaktoru a 64 let uskladněné ve skladu VJP</i>	39
<i>Obr. 7-4 k_{ef} pro palivo Gd-1, 4 roky v reaktoru a 57 let uskladněné ve skladu VJP</i>	40
<i>Obr. 7-5 k_{ef} pro palivo Gd-2, 4 roky v reaktoru a 55 let uskladněné ve skladu VJP</i>	40
<i>Obr. 7-6 k_{ef} pro palivo Gd-2+, 4 roky v reaktoru a 53 let uskladněné ve skladu VJP</i>	41
<i>Obr. 7-7 k_{ef} pro palivo Gd-2M, 5 let v reaktoru a 49 let uskladněné ve skladu VJP</i>	41
<i>Obr. 7-8 k_{ef} pro palivo Gd-2M+, 5 let v reaktoru a 44 let uskladněné ve skladu VJP</i>	42
<i>Obr. 7-9 k_{ef} pro palivo Gd-2X, 5 let v reaktoru a 38 let uskladněné ve skladu VJP</i>	42
<i>Obr. 7-10 Průběh jaderné hustoty vybraných nuklidů, tříletý palivový cyklus</i>	43
<i>Obr. 7-11 Průběh jaderné hustoty vybraných nuklidů, čtyřletý palivový cyklus</i>	44
<i>Obr. 7-12 Průběh jaderné hustoty vybraných nuklidů, pětiletý palivový cyklus</i>	45
<i>Obr. 7-13 Časový průběh jaderné hustoty ^{238}U</i>	46
<i>Obr. 7-14 Časový průběh jaderné hustoty ^{235}U</i>	47
<i>Obr. 7-15 Časový průběh jaderné hustoty ^{129}I</i>	47
<i>Obr. 7-16 Časový průběh jaderné hustoty ^{90}Sr</i>	48

<i>Obr. 7-17 Časový průběh jaderné hustoty ^{137}Cs</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 7-18 Časový průběh jaderné hustoty ^{237}Np.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 7-19 Časový průběh jaderné hustoty ^{239}Pu.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 7-20 Časový průběh jaderné hustoty ^{242}Pu.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 7-21 Časový průběh jaderné hustoty ^{249}Cf.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 7-22 Časový průběh jaderné hustoty ^{241}Am.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 7-23 Časový průběh jaderné hustoty ^{241}Pu.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 7-24 Časový průběh jaderné hustoty ^{238}Pu.....</i>	<i>52</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Množství radioaktivního odpadu z typických provozů pro stádia palivového cyklu.....</i>	<i>13</i>
<i>Tab. 4-1 Vlastnosti nejdůležitějších radioaktivních nuklidů</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 5-1 Výtěžek štěpných produktů.....</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 6-1 Složení jednotlivých typů palivových souborů v g/palivový soubor</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 6-2 Vlastnosti jednotlivých typů palivových souborů.....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 7-1 Procentuální zastoupení jednotlivých izotopů z prvku</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 7-2 Relativní atomové hmotnosti jednotlivých izotopů</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 7-3 Jaderné hustoty, výkon a poloměry zadávané do programu UwB₁</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 7-4 Nuklidy vybrané k porovnání.....</i>	<i>38</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

CVŘ	<i>Centrum výzkumu Řež</i>
ČEZ, a.s.	<i>Společnost provozující české jaderné elektrárny (dříve České energetické závody)</i>
ČR	<i>Česká republika</i>
ČVUT	<i>České vysoké učení technické</i>
EDU	<i>jaderná Elektrárna Dukovany</i>
FJFI	<i>Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská</i>
JE	<i>Jaderná elektrárna</i>
LR-0	<i>Lehkododní reaktor nulového výkonu provozovaný v CVŘ</i>
LVR-15	<i>Lehkododní reaktor provozovaný v CVŘ</i>
MOX	<i>Mixed oxid fuel – Smíšené palivo</i>
RAO	<i>Radioaktivní odpad</i>
ÚJV, a.s.	<i>Společnost zabývající se výzkumem a vývojem (dříve Ústav jaderného výzkumu)</i>
VJP	<i>Vyhořelé jaderné palivo</i>
VR-1	<i>Výukový reaktor provozovaný na FJFI</i>
VVER	<i>Vodou chlazený a moderovaný energetický reaktor</i>

1 ÚVOD

Loňský rok v letních měsících došlo k výběru devíti možných hlubinných úložišť radioaktivního odpadu. Což znamená, že téma radioaktivní odpady je zcela aktuální pro bezpečnost a ochranu životního prostředí. Vzhledem k postupnému prodlužování životnosti jaderných reaktorů, vzniká mnohem více radioaktivního odpadu, než bylo původně plánováno. Vypočítané obsahy úložišť tak nebudou dostačující.

Ačkoliv se vyhořelé jaderné palivo nazývá „vyhořelé“, jsou z něj využity pouze 4 %. Po odstavení reaktoru dochází v aktivní zóně stále k rozpadům. U tlakovodních reaktorů se tvoří minutu po odstavení více než 1 % tepelné energie tvořené za chodu. Tuto energii je stále potřeba odvádět, aby nedocházelo k varu chladiva a přehřátí palivových elementů. Po vyvezení paliva z reaktoru jej necháme několik let ve vodě, čímž se chlazením zbavíme vznikajícího tepla. Po uložení paliva do úložiště VJP však v palivu stále probíhají reakce, takzvaný „zbytkový výkon“ paliva, který postupem času ztrácí na velikosti, podle poločasů a typů rozpadu jednotlivých látek, které palivo obsahuje.

Bakalářská práce je zaměřena na tento „zbytkový výkon“ paliva a na ionizující záření, které je jeho nedílnou součástí. Podrobně popisuje změny palivových vsázek na Jaderné elektrárně Dukovany a následně pomocí programu UwB_1 simuluje průběh vyhořívání paliva od vložení paliva do reaktoru až po plánované uložení do hlubinného úložiště. K uložení do hlubinného úložiště by mělo dojít v roce 2065, do té doby bude VJP uskladněné ve skladu VJP.

2 PŘEDPOKLÁDANÉ MNOŽSTVÍ VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA

Vyhořelé jaderné palivo (VJP) se nachází na konci jaderného palivového cyklu. Nejedná se pouze o reaktory určené pro výrobu energie, ale také o veškeré výzkumné reaktory kromě těch, které mají příliš malý výkon. Každá země využívající jadernou energii z jaderných reaktorů s ním zachází podle svého. Problém začíná hned po vyvezení VJP z aktivní zóny reaktoru. Končí až uložením nebo přepracováním, podle přístupu jednotlivých zemí. Výběr technologie konečného nakládání s VJP je velmi komplikovaný a záleží především na dopadu na životní prostředí, na fyzikálních a chemických vlastnostech, dostupnosti skladování, ale také na tom, co je v zemi povoleno z hlediska politického a ekonomického. [1]

Jaderná zařízení v ČR k říjnu roku 2014 [2], doplňující informace [1]

Jediný provozovatel jaderně-energetických reaktorů je společnost ČEZ, a.s., patří jí jaderná Elektrárna Dukovany a jaderná Elektrárna Temelín. Obě elektrárny jsou postaveny podle ruských projektů s typem reaktorů VVER, což jsou vodou chlazené a moderované Energetické Reaktory. Dále se v ČR nachází výzkumné a školní reaktory.

- JE Dukovany: 4 reaktory typu VVER 440/213, celkový nominální elektrický výkon 2040 MW, výstavba zahájena v roce 1979, roku 1985 uvedení do provozu 1. bloku, po aplikování projektových rezerv zvýšení elektrického výkonu každého bloku na 510 MW.
- JE Temelín: 2 reaktory typu VVER 1000/320, celkový nominální elektrický výkon 2110 MW, výstavba zahájena v roce 1987, roku 2000 uvedení do provozu 1. bloku.
- V areálu jaderné elektrárny Dukovany: Mezi sklad vyhořelého paliva a Sklad vyhořelého paliva.
- V areálu jaderné elektrárny Temelín: Sklad čerstvého jaderného paliva, Sklad vyhořelého jaderného paliva.
- Výzkumný reaktor LVR-15, do výkonu 10 MW tepelných bez produkce elektrického výkonu, provozován od roku 1957, užíván pro výrobu radioizotopů a značených látek, ozařovací experimenty, hodnocení chemických režimů parovodních cyklů, pro neutronovou zachytovou a radiační terapii, vybaven doplňujícími experimentálními zařízeními.
- Výzkumný reaktor LR-0, nulový výkon, využíván pro měření neutronově fyzikálních charakteristik energetických reaktorů.
- Školní reaktor VR-1, nulový výkon, slouží pro výuku studentů na FJFI ČVUT a dalších 9 fakultách, pro přípravu pracovníků ČEZ a.s.
- V areálu ÚJV Řež, a. s.: Sklad vysoce aktivního odpadu.
- V bývalém dole Richard u Litoměřic: Ukládání radioaktivních odpadů institucionálního původu ze zdravotnictví, průmyslu, zemědělství, výzkumu.
- Úložiště Bratrství v Jáchymově: Ukládání odpadů obsahujících pouze přirozené radionuklidy.

Jak je patrné z *Tab. 2-1*, palivový cyklus můžeme rozčlenit na tři stádia. Prvním stádiem je výroba paliva, druhým stádiem je provoz jaderného reaktoru a třetí stádium představuje dění po vytažení paliva z reaktoru. Jelikož mluvíme o radioaktivních odpadech z těchto stádií, můžeme

zadní část palivového cyklu rozdělit do dvou skupin. Použité jaderné palivo může být buď uloženo do trvalého úložiště, nebo může být alespoň část z něj přepracována. Největší množství radioaktivního odpadu však zpracováváme po odstavení a plném vyřazení reaktoru z provozu.

U přední části palivového cyklu a u provozu jaderného reaktoru se uvádí množství odpadu v jednotkách objemu vztaženého na jednotkovou produkci elektřiny v jaderných elektrárnách. Tuto jednotku je možné použít i u přepracovaného paliva. U etapy vyřazení jaderného reaktoru z provozu už používáme pouze jednotku objemu.

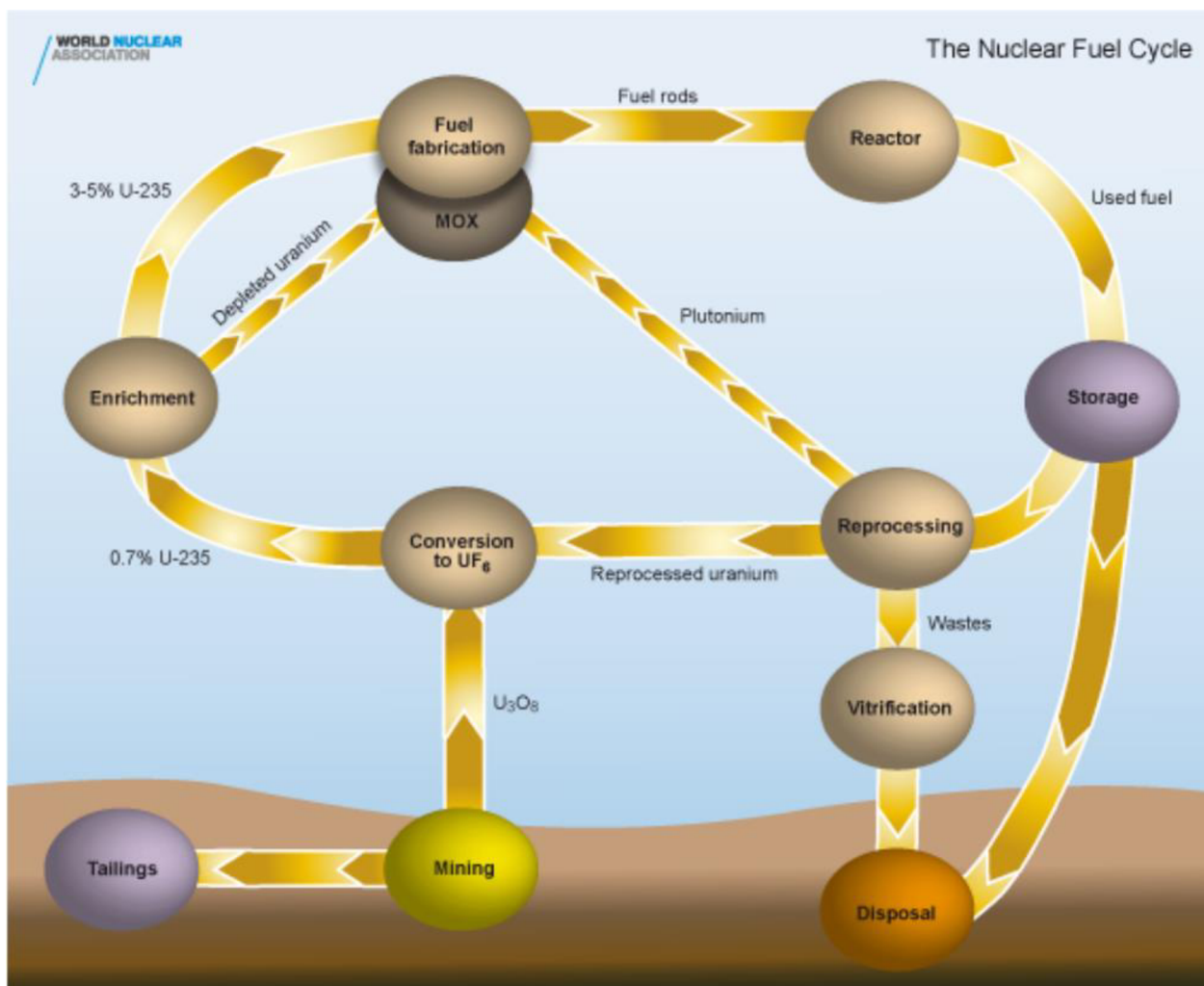
Tab. 2-1 Množství radioaktivního odpadu z typických provozů pro stádia palivového cyklu [10]

Druh odpadu	Skupenství odpadu	Množství odpadu
Přední část palivového cyklu		
Konverze na hexafluorid	kapalný, pevný	30-70 m ³ /GWrok
Obohacení	kapalný, pevný, plynný	15-40 m ³ /GWrok
Výroba dioxidu uranu	kapalný, pevný	60-80 m ³ /GWrok
Výroba směsného paliva	kapalný	5-10 m ³ /GWrok
Jaderný reaktor za provozu		
Koncentráty	kapalný	40-80 m ³ /GWrok
Kaly	pevný (mokrý)	5-20 m ³ /GWrok
Ionexy	pevný (mokrý)	6-10 m ³ /GWrok
Dekontaminační roztoky	kapalný	2-10 m ³ /GWrok
Pevné odpady	pevný	100-300 m ³ /GWrok
Zadní část palivového cyklu – Přepracování		
Obaly palivových proutků	pevný	12-20 m ³ /GWrok
Tritiové výpusti	kapalný	50-70 m ³ /GWrok
Vysoce aktivní odpady	kapalný	20-30 m ³ /GWrok
Středně aktivní odpady	kapalný	15-30 m ³ /GWrok
Nízkoaktivní odpady	kapalný, pevný	50-100 m ³ /GWrok
Zadní část palivového cyklu – přímé uložení		
Palivové články	pevný	30 tun/GWrok
Zadní část palivového cyklu – Vyřazování z provozu celého zařízení		
Výroba paliva	pevný	5-10 m ³
Jaderný reaktor	pevný	300-500 m ³
Přepracování paliva	pevný	5-20 m ³

3 CESTA URANOVÉHO PALIVA

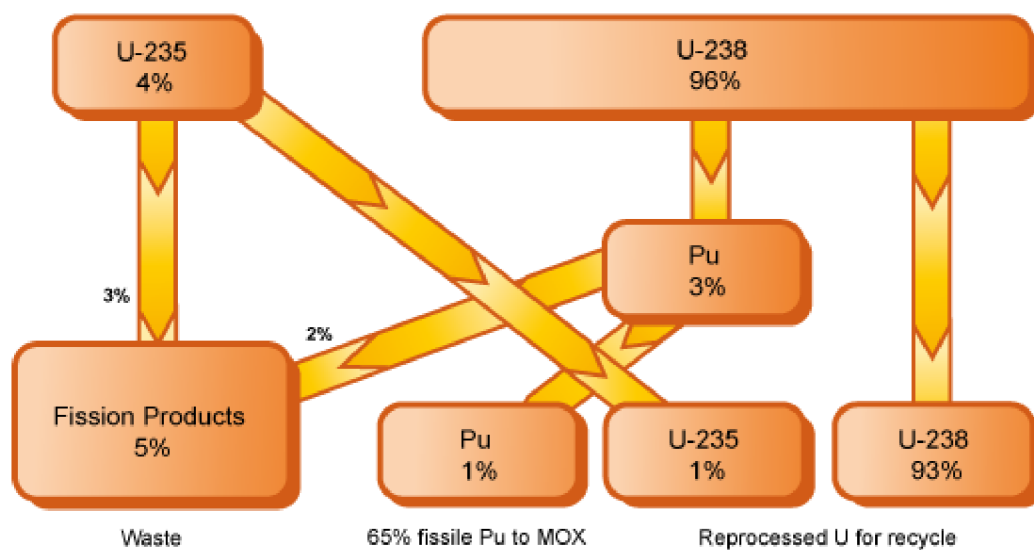
Nejprve je zapotřebí palivo vytěžit. Je několik způsobů těžby uranu. Prvním způsobem je povrchový lom, druhým způsobem jsou hlubinné doly a třetím způsobem je chemické loužení.

Jak je vidět na *Obr. 3-1* vytěžíme U_3O_8 ve formě žlutého prášku (koláče), následuje sublimací převod na plyn UF_6 . Přírodní uran obsahuje pouze 0,7 % izotopu ^{235}U . Po obohacení UF_6 dostaneme 3-5 % ^{235}U ve formě nažloutlého plynu. Poté následuje převod na černý prášek UO_2 . Ve výrobně paliva se směs lisuje do peletek a ty se uloží do hermeticky uzavřených palivových proutků. Proutky se vloží do palivových kazet a do reaktoru. Použité jaderné palivo vyjmeme z reaktoru a přemístíme do bazénu vyhořelého jaderného paliva, kde zůstane několik let. Po několika letech se VJP ukládá do skladu VJP nebo může být palivo přepracováno a vráceno zpět ke konverzi U-koncentrátu. (U odpadu z přepracovaného uranu dojde k vitrifikaci a uložení RAO do úložiště.) [4]



Obr. 3-1 Uzavřený palivový cyklus [4]

Standardní průběh reakcí paliva UO_2 vidíme na *Obr. 3-2*. Počáteční vsázka do reaktoru UO_2 se skládá ze 4 % ^{235}U a 96 % ^{238}U . V reaktoru se spotřebují 3 % ^{235}U zbylé 1 % jde k recyklaci přepracováním. Dále se také v reaktoru „spálí“ 3 % ^{238}U , ze kterých se stane plutonium. Z plutonia se pak 1 % využije na směsné palivo MOX a zbylá 2 % jsou produktem štěpení. [6]

Reaction in Standard UO₂ Fuel

Basis: 45,000 MWd/t burn-up, ignores minor actinides

Obr. 3-2 Standardní reakce paliva UO₂ [6]

Mixed Oxide fuel (MOX) neboli směsné palivo je součástí téměř 5 % dnes používaného jaderného paliva. Palivo MOX se vyrábí z plutonia získaného z použitého paliva v reaktoru smíchané s ochuzeným uranem, čímž se nahradí čerstvé palivo UO₂ a uzavře se tak palivový cyklus, Obr. 3-1. [6]

V každém jaderném reaktoru je jak štěpení izotopů, jako je ²³⁵U, tak tvorba nových izotopů v důsledku zachycení neutronů primárně pomocí ²³⁸U. Většina hmoty v reaktoru je ²³⁸U, který se může přeměnit na plutonium ²³⁹Pu a postupně pak vzniká také ²⁴⁰Pu, ²⁴¹Pu a ²⁴²Pu. Z nichž jsou štěpné jako ²³⁵U pouze ²³⁹Pu a ²⁴¹Pu. Podobně z ²³⁵U vzniká ²³⁶Pu a ²³⁸Pu, jde však o velmi malé množství. Přibližně polovina ²³⁹Pu se „spálí“ v reaktoru, což poskytuje asi jednu třetinu celkové energie. Čím vyšší je vyhoření, tím méně štěpného plutonia zůstává v použitém palivu. V použitém palivu je asi 1 % plutonia, ze kterého jsou dvě třetiny štěpné (cca 50 % ²³⁹Pu a 15 % ²⁴¹Pu). [6]

3.1 Vyhořívání paliva v reaktoru

Jadernou energii získáváme reakcemi, při nichž vznikají středně těžká jádra buď štěpením velmi těžkých jader nebo syntézou velmi lehkých jader. Jaderná energie lze také definovat jako část vazební energie uvolněná při jaderných interakcích na úkor hmotnostního úbytku. [5]

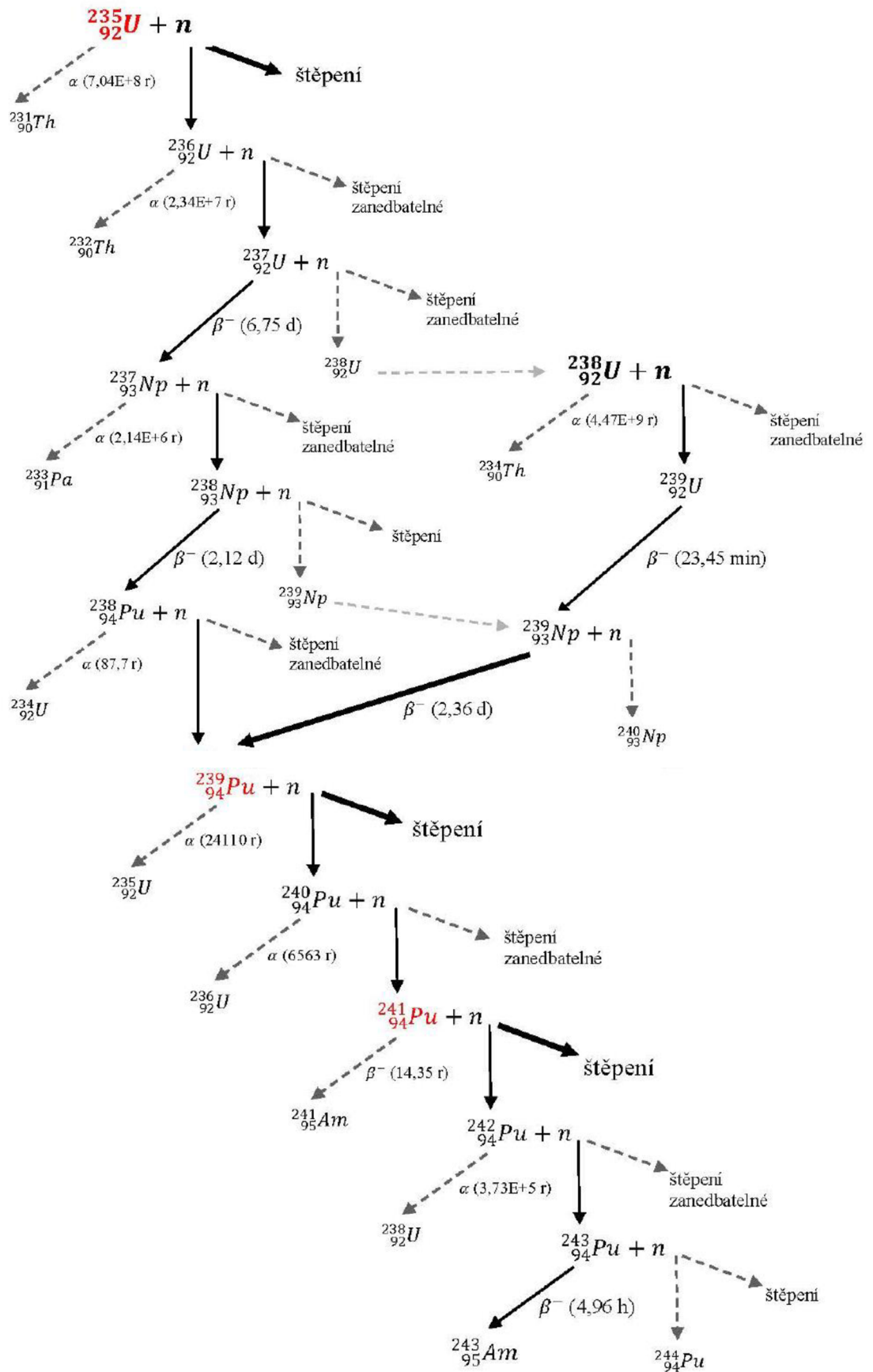
Pro příklad vezmeme tlakovodní reaktor VVER-440. V tomto reaktoru každý palivový proutek obsahuje cca 1,06 kg UO₂ tj. 0,93 kg uranu. Celkově je tedy v reaktoru 42 tun uranu. Počáteční obohacení paliva uranem ²³⁵U je 3-5 %. Proutek obsahuje palivové tablety. V každé palivové tabletě je uprostřed otvor, který snižuje tepelné namáhání paliva. UO₂ má malou tepelnou vodivost, proto provozujeme palivové tyče při teplotě vyšší než 1000 °C. S rostoucím vyhořením roste vnitřní tlak proutku na 8 MPa až 15 MPa. To vede k tomu, že se počáteční komplex tablet 2,42 m dlouhý prodlouží na 2,48 m. [5]

Při provozu jaderného reaktoru dochází ke změnám izotopického složení paliva. Pokud dojde k zachytu neutronu izotopem ^{235}U , pak se buď jádro rozštěpí nebo dojde k radiačnímu zachytu bez štěpení, při kterém vznikne ^{236}U . Pravděpodobnost vzniku ^{236}U je však malá asi 6:1. Zachytem neutronu izotopem ^{238}U dochází ke vzniku ^{239}Pu . Izotop ^{239}Pu se také účastní štěpení jako ^{235}U . Část ^{239}Pu dokáže radiačním zachytem zachytit neutron bez štěpení a přeměnit se tak na ^{240}Pu . Pokud ^{240}Pu zachytí neutron bez štěpení, přemění se na ^{241}Pu , které je oproti ^{240}Pu štěpitelné teplejšími neutrony. Z izotopu ^{241}Pu pak dále vzniká neštěpitelné plutonium ^{242}Pu . V aktivní zóně reaktoru tedy postupem času vznikají čtyři izotopy plutonia: ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu a ^{242}Pu . Izotopy uranu ^{236}U a plutonia ^{242}Pu mají velmi malou pravděpodobnost ke vzniku dalších izotopů, kvůli svému malému účinnému průřezu. Radioaktivní jsou všechny ostatní izotopy: ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu a ^{241}Pu . [5]

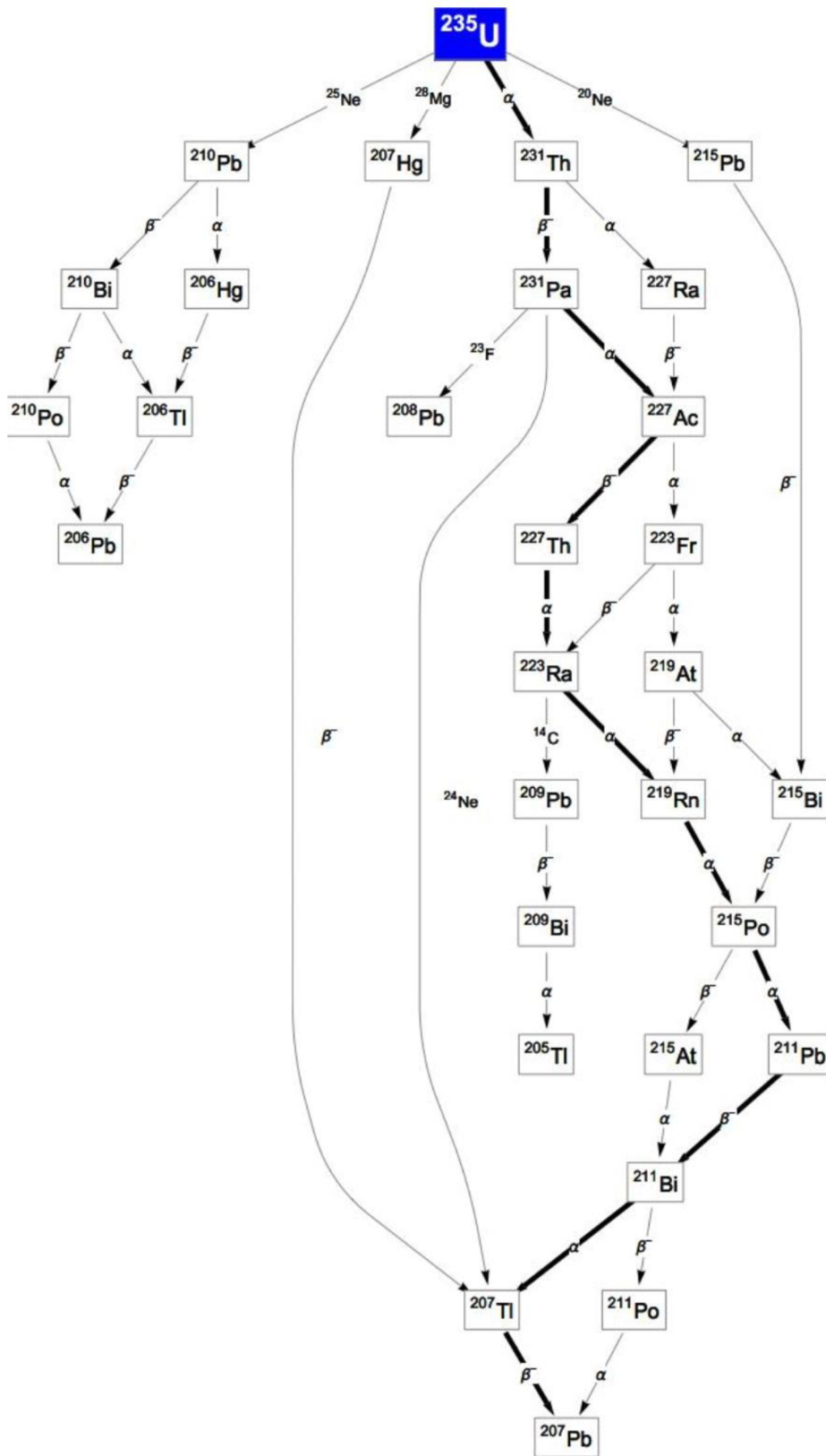
3.2 Rozpadové řetězce

Jak znázorňuje diagram na *Obr. 3-3*, skutečný proces vyhořívání je mnohem složitější. Při vyhořívání jaderného paliva vzniká spousta nových prvků. V diagramu jsou pouze ty nejdůležitější. V každém případě se však jedná o princip tři způsobů dělení. Každý izotop, ať už počáteční nebo časem vzniklý, se může buď radioaktivně přeměnit, nebo absorbovat neutron, což vede buď k rozštěpení jádra nebo k jeho zachycení izotopem. Způsob, kterým se cyklus vyvíjí, je dán poločasem rozpadu daných izotopů a účinným průřezem pro zachyt a štěpení.

Kompletní rozpadový řetězec ^{235}U vytvořený pomocí Wolfram research, převzatý z [26] je na *Obr. 3-4* a ^{238}U na *Obr. 3-5*.

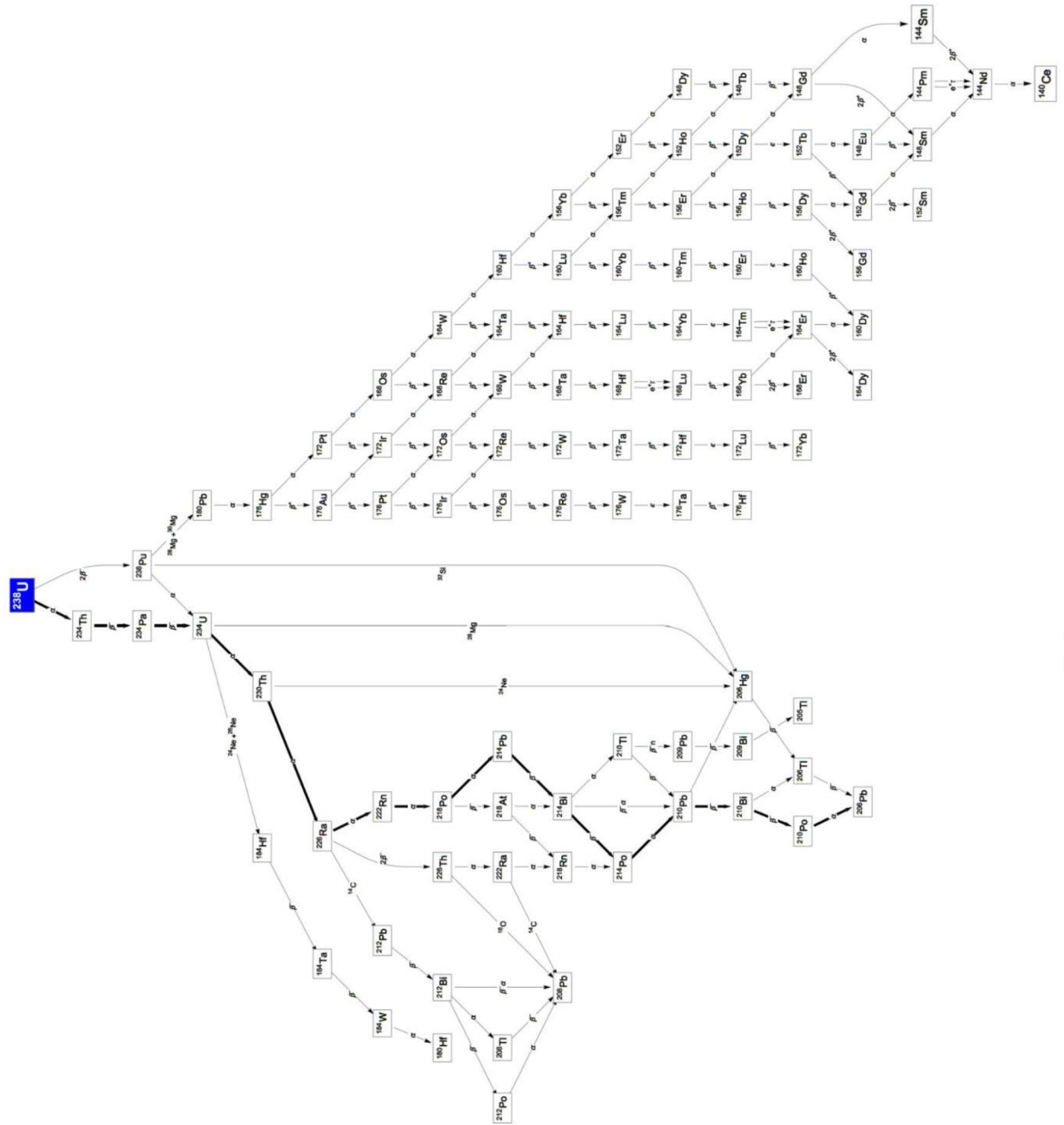


Obr. 3-3 Proces vyhořívání jaderného paliva a vznik nových prvků [8]



Generated by Mathematica
© 2017 Theodore Gray

Obr. 3-4 Rozpadový řetězec ^{235}U , převzato [26]



Obr. 3-5 Rozpadový řetězec ^{238}U , převzato [26]

4 ZÁKLADY JADERNÉ FYZIKY

Vycházíme ze základních pojmů a zjednodušených obecně známých vztahů. Dále ze zdroje [3] doplněné o informace z [5]. U fyzikálních veličin či jednotek, které vychází z jiného zdroje, je zdroj přímo uveden.

Atom – nejmenší částice chemického prvku, má kladně nabitě jádro a záporně nabitý obal

Atomové jádro – centrální část atomu, průměr jádra je řádově 10^{-15} až 10^{-14} m, jádro je složeno z protonů a neutronů (výjimkou je vodík H_2)

Neutron – bez elektrického náboje, neutrální částice

Proton – kladný jednotkový elementární elektrický náboj, $e = 1,60219 \cdot 10^{-19}$ C, p^+

Elektron – obal kolem atomového jádra, záporný elektrický náboj, e^-

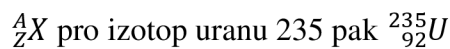
Nukleony – společný název pro protony a neutrony

Hmotnostní číslo A (nukleonové) – součet protonů a neutronů v atomovém jádře, určuje fyzikální vlastnosti prvku

Atomové číslo Z (protonové) – počet protonů v atomovém jádře, určuje chemické vlastnosti prvků a pořadí v periodické tabulce

Neutronové číslo N – počet neutronů v jádře

Příklad zápisu:



Atomová jednotka hmotnosti - $1 \text{ u} = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Klidové hmotnosti a relativní atomové hmotnosti základních částic:

Proton $1,67265 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	→	1,007277 u
Neutron $1,67495 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	→	1,008665 u
Elektron $9,10953 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	→	0,000548 u

Izotopy – prvky, které mají stejná atomová čísla Z, ale odlišná hmotnostní čísla A a shodné chemické, ale odlišné fyzikální vlastnosti

Klíčový prvek jaderné energetiky je uran, který se v přírodě vyskytuje ve složení ze tří izotopů: ${}^{238}\text{U}$ (99,282 %), ${}^{235}\text{U}$ (0,712 %) a ${}^{234}\text{U}$ (0,006 %)

Poločas rozpadu – $T_{1/2}$ je střední doba, za kterou se z počátečního počtu atomů radionuklidu samovolně přemění právě polovina

Jestliže je radioaktivita statický děj, lze jí vyjádřit diferenciální rovnicí:

$$\frac{dn}{dt} = -\lambda \cdot n (\text{s}^{-1}) \quad (4.1)$$

Kde n je počet původních atomů daného radionuklidu v čase t (s) a λ je rozpadová (přeměnová) konstanta (s^{-1}). Řešením této rovnice dostaneme rovnici zákona radioaktivního rozpadu:

$$n(t) = n_{(0)} \cdot e^{-\lambda t} \quad (4.2)$$

Ze zákona radioaktivního rozpadu pak vyplývá rovnice pro poločas rozpadu:

$$0,5 \cdot n_{(0)} = n_{(0)} \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}} \rightarrow 2 = e^{\lambda \cdot T_{1/2}} \rightarrow T_{1/2} = \ln \frac{2}{\lambda} \quad (4.3)$$

Poločasy rozpadu radioaktivních nuklidů jsou různé. U některých se jedná o nepatrné zlomky sekundy, u jiných až o miliardy let. Dlouhodobě existujícími radioaktivními nuklidy jsou např. ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K , těmi krátkodobými jsou např. ^3H nebo ^{14}C , viz *Tab. 4-1*.

Tab. 4-1 Vlastnosti nejdůležitějších radioaktivních nuklidů [5]

Radioaktivní nuklid	Přeměna	Poločas rozpadu	Energie vyletujících částic (MeV)
Tritium ^3H	β^-	12,3 roku	0,018
Uhlík ^{14}C	β^-	5570 roků	0,155
Draslík ^{40}K	β^-	$4,5 \cdot 10^8$ roků	1,3
Polonium ^{210}Po	α	138 dní	4,9
Radon ^{222}Rn	α	3,8 dne	5,5
Radium ^{226}Ra	α	1622 roků	4,7
Thorium ^{232}Th	α	$1,39 \cdot 10^{10}$ roků	4,1
Uran ^{235}U	α	$7,1 \cdot 10^8$ roků	4,5
Uran ^{238}U	α	$4,5 \cdot 10^9$ roků	4,2

Aktivita radioaktivního zdroje (zářiče) – Základní veličina, která ukazuje míru radioaktivity. Jde o podíl středního počtu samovolných radioaktivních přeměn z daného energetického stavu v určitém množství radioaktivního nuklidu za krátkou dobu.

4.1 Radioaktivní přeměny

Rozpad α

Probíhá u většiny přirozených radioaktivních prvků, ale charakteristický je hlavně u těžkých prvků. Při tomto rozpadu je z jádra radioaktivního prvku uvolněno jádro helia (helion) s dvojnásobným kladným elementárním nábojem. Energie této částice je mezi 4 MeV a 9 MeV. Čím vyšší energie, tím rychlejší přeměna. Ze začátku je energie částice velmi velká, ale postupem času se snižuje ionizováním prostředí a rozptylem. Při rozpadu vzniká nový prvek a mění se atomové i hmotnostní číslo. Záření je velmi malé, pohltí jej i list papíru.

Rozpad β^-

Z jádra radioaktivního prvku je vystřelen záporný elektron. Hmotnostní číslo po rozpadu zůstává stejné, atomové číslo ale vzroste o 1, protože vznikl další proton a s ním tak nový prvek. Záření tohoto rozpadu je silnější než záření α . Svou energii snižuje především ionizací prostředí, rozptylem a brzdým zářením. Toto záření pohltí například silnější hliníkový plech.

Rozpad β^+

Z jádra radioaktivního prvku je vystřelen kladný pozitron. Aby vznikl pozitron, je potřeba celkem vysoká energie větší než 1,02 MeV, o kterou následně poklesne energie původního jádra. Vystřelený pozitron po čase zpomalí a reaguje s elektronem. Společně pak vyzáří dvě kvanta gama záření o celkové energii 1,02 MeV. S rozpadem vznikne nový prvek a jeho atomové číslo bude o 1 menší, protože v jádru dochází k přeměně protonů na neutron.

Záření γ

Záření nastává při přeskupování nukleonů s různými energetickými hladinami vyzářením fotonu z jádra. Atomové ani hmotnostní číslo se při záření nemění. Často však záření doprovází rozpad α i β . Je to elektromagnetické záření s velmi krátkou vlnovou délkou řádově 10^{-11} až 10^{-13} m. K utlumení záření je potřeba silná vrstva například olova.

Zachycení elektronu jádrem (zachycení K)

Nastává u jader s přebytkem protonů o nižších energiích. Jádro zachytí elektron až na výjimky vždy z nejnižší sféry K. Na volné místo pak přejde elektron z nižší sféry a uvolní se energie ve formě roentgenova záření.

Neutronová emise

Vzniká v rozpadových řetězcích, když vazební energie nově vzniklého vybuzeného jádra nestačí k udržení neutronu. Hmotnostní číslo se snižuje o 1 a atomové číslo se nemění. K regulaci jaderného reaktoru je neutronová emise velmi důležitá, protože při ní vznikají zpožděné neutrony.

Radioaktivní přeměna

Atomová jádra mají schopnost samovolně se přeměňovat za současného vzniku ionizujícího záření nazývaného radioaktivita. Radioaktivní přeměna závisí pouze na vnitřním stavu jádra. Nezávisí na tom, kolik atomů se již přeměnilo a vždy se přemění stejná část ještě nepřeměněných atomů. Pro práci jaderného reaktoru má význam přeměna β .

4.2 Jednotky

Elektronvolt (eV) – je kinetická energie, kterou získá elektron při průchodu potenciálním rozdílem 1 voltu ve vakuu ($1 \text{ eV} = 1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{ J}$)

Watt-den na tunu uranu (Wd/tU) – v této jednotce se uvádí vyhoření jaderného paliva, udává energii získanou z paliva [1]

Barn (b) – v této jednotce je udáván účinný průřez [9]

Sievert (Sv) - jednotka pro dávkový ekvivalent (H) záření, udává absorbovanou dávku, respektive označuje energii jednoho joulu pohlcenou v jednom kilogramu látky násobenou činitelem Q zahrnujícím druh a energii záření,

$$H = D \cdot Q \tag{4.4}$$

kde Q je jakostní činitel a nabývá hodnot:

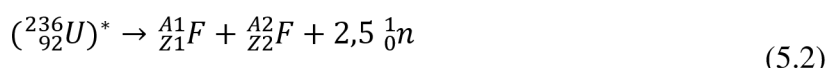
- Pro fotony gama a elektrony $Q = 1$
- Pro neutrony a protony $Q = 10$
- Pro částice alfa $Q = 20$

a D charakterizuje množství energie, která se ukládá v látce, která byla vystavena působení ionizujícího záření. [10]

Becquerel (Bq) – je jednotkou radioaktivity, při níž dojde k jedné přeměně radionuklidu za jednu sekundu, jedná se o převrácenou hodnotu sekundy [10]

5 ŠTĚPENÍ JADER ^{235}U

Jaderná reakce štěpením jader ^{235}U převzato z [5]:

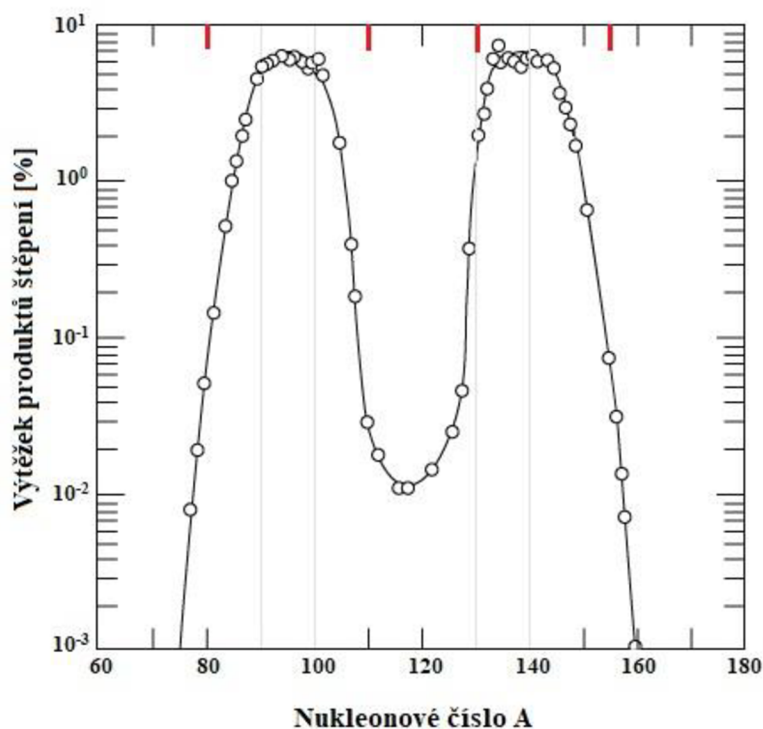


Hvězdička značí jaderný excitovaný stav. Za každý spotřebovaný neutron ${}_0^1n$ při štěpné reakci vznikne průměrně 2,5 nového neutronu. ${}_{Z_1}^{A_1}\text{F}$ a ${}_{Z_2}^{A_2}\text{F}$ jsou takzvané odštěpky, které vznikají při štěpení a jsou to atomy různých nuklidů z periodické tabulky. Jedno z jader je nejčastěji ze skupiny lehkých produktů označené na *Obr. 5-2* modře a druhé ze skupiny těžkých produktů označené červeně. Minoritní aktinoidy, které jsou označené zeleně, vznikají záchytem na ^{238}U . Skutečná uvolněná energie má víc jak 40 možných způsobů uvolnění, přesně tolik možností kolika způsoby se může jádro rozštěpit. Průměrná hodnota uvolněné energie každého rozštěpeného jádra ^{235}U je 198 MeV. [5] Nejčastějšími produkty štěpení ${}_{Z_1}^{A_1}\text{F}$ a ${}_{Z_2}^{A_2}\text{F}$ jsou ^{137}Cs , ^{93}Zr , ^{99}Tc , ^{90}Sr , ^{131}I , ^{137}Xe . Křivka procentuálního výskytu štěpných produktů v závislosti na nukleonovém čísle A má charakteristiku dvouvrcholového tvaru, viz *Obr. 5-1*. Nejpravděpodobnější případy štěpení jsou kombinací ${}_{Z_1}^{A_1}\text{F}$ s nukleonovým číslem 80-110 a ${}_{Z_2}^{A_2}\text{F}$ s nukleonovým číslem 125-155. Vzhledem k tomu, že jádra, která vznikají štěpením, jsou menší než původní těžké jádro, je poměr počtu neutronů a protonů menší než v původním jádře. Vzniká tedy přebytek neutronů, a proto je většina štěpných produktů radioaktivní. Dále se rozpadají na 2-3 další dceřiné izotopy. Radionuklidy s krátkým poločasem přeměny se rychle rozpadají a po několika dnech dominuje ^{131}I , následně například ^{137}Cs a ^{90}Sr . Dlouhodobé radionuklidy například ^{99}Tc , ^{93}Zr a ^{135}Cs tvoří obtížnou a nebezpečnou složku vyhořelého jaderného paliva, které proto dlouhodobě skladujeme. [24]

Další zajímavostí je, že 54,4478 % vznikajících jader, která mají poločas přeměny kratší než jeden rok, nejsou radioaktivní. Zbýlých 45,5522 % jsou radioaktivní a můžeme je dále rozdělit procentuálně podle poločasu přeměny, viz *Tab. 5-1*. [26]

Tab. 5-1 Výtěžek štěpných produktů [26]

$T_{1/2}$ (roky)	Výtěžek (%)
1-5	2,7252
10-100	12,5340
200 000-300 000	6,1251
1 500 000 – 16 000 000	13,4494



Obr. 5-1 Výtěžek štěpného produktu v závislosti na nukleonovém čísle [25], upraveno

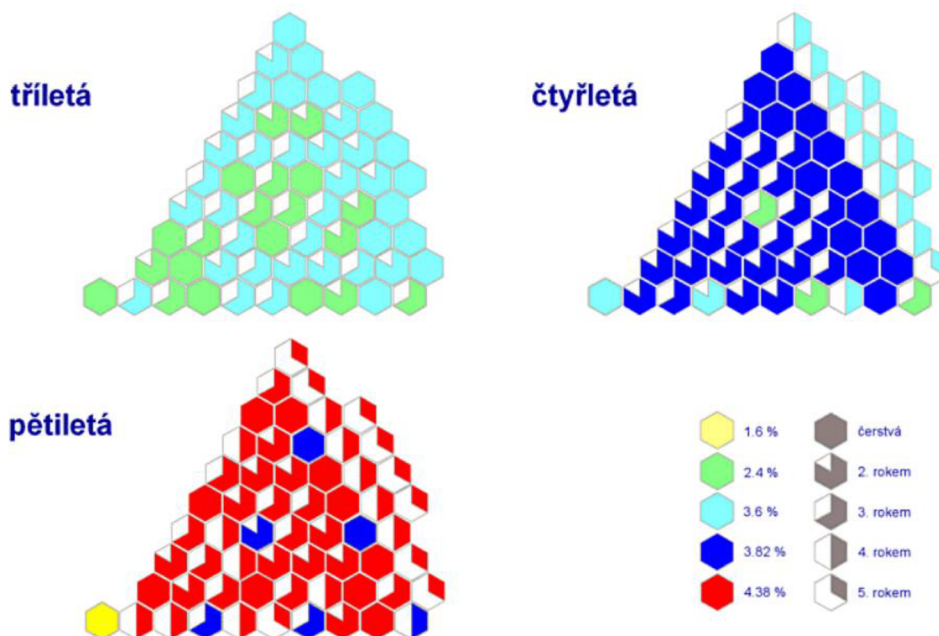
R ₂ O RH		RO RH ₂		R ₂ O ₃ RH ₃		RO ₂ RH ₄		R ₂ O ₅ RH ₅		RO ₃ H ₂ R		R ₂ O ₇ HR					
1 I. A													18 VIII. A				
Periodická soustava prvků																	
1	2											13	14	15	16	17	18
1,0079 1H Vodík	4,00 2He Helium											10,81 5B Bor	12,01 6C Uhlík	14,01 7N Dusík	16,00 8O Kyslík	19,00 9F Fluor	20,18 10Ne Neon
6,94 3Li Lithium	9,01 4Be Berylium											26,98 13Al Hliník	28,09 14Si Křemík	30,97 15P Fosfor	32,06 16S Síra	35,45 17Cl Chlor	39,95 18Ar Argon
22,99 11Na Sodík	24,31 12Mg Hořčík	44,96 21Sc Skandium	47,88 22Ti Titan	50,94 23V Vanad	52,00 24Cr Chrom	54,94 25Mn Mangan	55,85 26Fe Železo	58,93 27Co Kobalt	58,69 28Ni Nikl	63,55 29Cu Měď	65,38 30Zn Zinek	69,72 31Ga Gallium	72,61 32Ge Germanium	74,92 33As Arzen	78,96 34Se Selen	79,90 35Br Brom	83,80 36Kr Krypton
85,47 37Rb Rubidium	87,62 38Sr Stroncium	88,91 39Y Yttrium	91,22 40Zr Zirkon	92,91 41Nb Niobium	95,94 42Mo Molybden	~98 43Tc Technecium	101,07 44Ru Ruthenium	102,91 45Rh Rhodium	106,42 46Pd Palladium	107,87 47Ag Stříbro	112,41 48Cd Kadmium	114,82 49In Indium	118,71 50Sn Cín	121,75 51Sb Antimon	127,60 52Te Tellur	126,90 53I Jod	131,29 54Xe Xenon
132,91 55Cs Cesium	137,33 56Ba Bariem	178,49 72Hf Hafnium	180,95 73Ta Tantal	183,85 74W Wolfram	186,21 75Re Rhenium	190,20 76Os Osmium	192,22 77Ir Iridium	195,08 78Pt Platina	196,97 79Au Zlato	200,59 80Hg Rtuť	204,38 81Tl Thallium	207,20 82Pb Olovo	208,98 83Bi Bismut	~209 84Po Polonium	~210 85At Astat	~222 86Rn Radon	~222 86Rn Radon
~223 87Fr Francium	~226,05 88Ra Radium	~267 104Rf Rutherfordium	~268 105Db Dubnium	~269 106Sg Seaborgium	~270 107Bh Bohrium	~269 108Hs Hassium	~278 109Mt Meitnerium	~281 110Ds Darmstadtium	~281 111Rg Roentgenium	~285 112Cn Copernicium	~286 113Nh Nihonium	~289 114Fl Flerovium	~288 115Mc Moscovium	~293 116Lv Livermorium	~294 117Ts Tennessin	~294 118Og Oganesson	~294 118Og Oganesson
6	Lanthanoidy																
138,91 57La Lanthan	140,12 58Ce Cer	140,91 59Pr Praseodym	144,24 60Nd Neodym	~145 61Pm Promethium	150,36 62Sm Samarium	151,96 63Eu Europium	157,25 64Gd Gadolinium	158,93 65Tb Terbium	162,50 66Dy Dysprosium	164,93 67Ho Holmium	167,26 68Er Erbium	168,93 69Tm Thulium	173,04 70Yb Ytterbium	174,04 71Lu Lutetium			
7	Aktinoidy																
227,03 89Ac Aktinium	232,04 90Th Thorium	231,04 91Pa Protaktinium	238,03 92U Uran	~237,05 93Np Neptunium	[244] 94Pu Plutonium	~243 95Am Americium	~247 96Cm Curium	~247 97Bk Berkelium	~251 98Cf Kalifornium	~252 99Es Einsteinium	~257 100Fm Fermium	~258 101Md Mendelevium	~259 102No Nobelium	~260 103Lr Lawrencium			

Obr. 5-2 Periodická soustava prvků [7], upraveno

6 DUKOVANY VVER 440 - PALIVO

Následující kapitoly uvádějí popis palivového souboru VVER 440 používaného v Jaderné elektrárně Dukovany. Od samého počátku je jediným dodavatelem jaderného paliva pro elektrárnu Dukovany největší východní výrobce jaderných paliv ruská společnost TVEL. Pro tuto společnost palivo konkrétně vyrábí Mašinstrojitelnyj závod ve městě Elektrostal nacházející se cca 60 km východně od Moskvy. [13]

Při provozu jaderného reaktoru se štěpením jader uvolňuje tepelná energie a vznikají štěpné produkty, které se v palivu shromažďují. Časem dochází k tak silné koncentraci, že je potřebné palivo vyměnit. U jaderné elektrárny Dukovany se začínalo s tříletým palivovým cyklem výměny paliva, následoval čtyřletý a aktuálně je palivo zaváženo v plně pětiletých cyklech. Na Obr. 6-1 je přesné umístění palivových vsázek. Důležitým faktorem je navyšování délky palivových cyklů, tedy zvýšení maximální doby provozu jaderného paliva v reaktoru.



Obr. 6-1 Typy palivových vsázek podle délky cyklu [16], převzato

Palivové soubory jsou uspořádány v trojúhelníkové mříži s roztečí 14,4 cm. V reaktoru je těchto souborů neboli pracovních kazet 312 a každý soubor se skládá ze 126 palivových proutků. Dalších 37 souborů je regulačních a jsou spojené s palivovým souborem. Tento soubor je zavěšen na absorpčních částech souboru. Absorpční plášť z oceli má stejný tvar jako palivové soubory. Uvnitř pláště jsou vložky z bórové oceli, které jsou ze dvou hmotnostních procent z bóru. V absorpční části je trubka, která umožňuje účinnější odvod tepla. Uprostřed palivové kazety je centrální trubka ze zirkonia. Palivový proutek reaktoru VVER 440 se středním obohacením 3,82 % je 2536 mm dlouhý a sloupek paliva v něm u proutku pracovního souboru je 2420 mm (1087 g) a u proutku z regulačního souboru je 2320 mm (1041 g). Jednotlivé proutky jsou udržovány v přesném geometrickém uspořádání a jsou upevněny ve spodní mřížce. Palivové proutky obsahují palivové tablety složené v povlakové trubce, která je z obou stran hermeticky uzavřena koncovkami. V horní části je navíc umístěna distanční pružina, která má za úkol udržet tablety

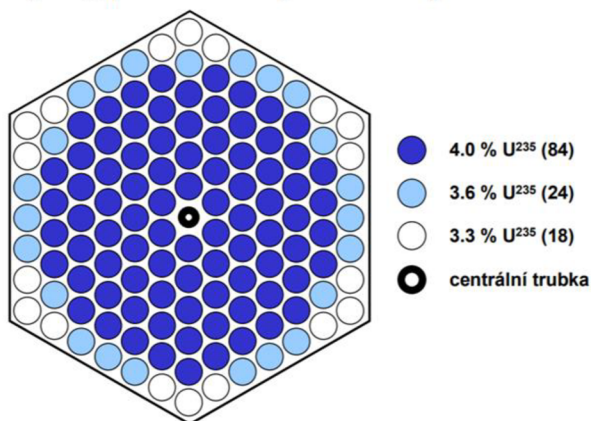
v pracovní poloze. Dále je také palivový proutek naplněn héliem s přetlakem 500 – 700 kPa. Tabletky jsou vysoké 9 – 11 mm a jejich vnější průměr je 7,5 mm. [13]

První reaktorový blok byl uveden do provozu v květnu 1985 a zbylé tři bloky byly spouštěny do července 1987 tedy 4 x 440 MW. Celkový výkon elektrárny byl 1760 MW. Mezi lety 2005 až 2012 došlo k modernizaci a výkon každého reaktoru byl zvýšen na 510 MW. Dohromady 2040 MW. [15] Dále se uvažuje do budoucna navýšení na 522 MW u každého reaktoru, což je 107 % původní kapacity. [19]

Do roku 1987 probíhalo v EDU původní tříleté schéma palivového cyklu. V prvním tříletém cyklu se čerstvé palivové soubory zavázely na okraj aktivní zóny a po jednotlivých letech se při výměnách kazety přesouvaly směrem ke středu aktivní zóny. Tento způsob se však neukázal jako příliš ekonomický, protože byla vyšší hustota neutronového toku u kraje aktivní zóny, a to má dopad na životnost reaktorové nádoby. Z hlediska radiační zátěže docházelo k její degradaci. Průměrně se v těchto letech ročně zavázelo 116 čerstvých palivových souborů, a to v prvním a druhém roce 114 a ve třetím roce 121, z nichž 36 souborů bylo s obohacením 2,4 % (včetně 12 palivových částí regulačních souborů) a 80 pracovních souborů s obohacením 3,6 %. Hned při první vsázce paliva, kdy bylo nutné simulovat přítomnost vyhoření paliva v celém provozu, se rozhodlo, že zavážené palivo bude mít různou míru obohacení ^{235}U . Tedy byly použity neprofilované palivové soubory s obohacením 1,6 %, 2,4 % a 3,6 %. V jednotlivých souborech měly proutky stejné obohacení až do roku 1998, kdy se začaly zavázet soubory s radiálně profilovaným obohacením, ve kterých jsou kombinovány proutky s obohacením 3,3, 3,6 a 4,0 % ^{235}U . Dále byl také zúžen centrální otvor tabletek z 1,6 mm na 1,4 mm. [11]

V roce 1987 začal přechod na čtyřletý palivový cyklus. [16] U čtyřletého palivového cyklu se nejvíce vyhořelé jaderné palivo zaváží na okraj aktivní zóny, a to vede ke snížení neutronové hustoty na okrajích o více než 40 %, což vede k menšímu zatížení stěny reaktorové nádoby a zvýšení její životnosti. Kvůli zavádění delšího cyklu bylo zapotřebí zmenšit tloušťku obálky souborů ze 2 mm na 1,5 mm, aby se zlepšila neutronová bilance v aktivní zóně. Také se vyměnily ocelové mřížky za zirkoniové. K plnému přechodu na čtyřletý palivový cyklus došlo v roce 1998. Od této doby se ročně zavázelo průměrně 87 souborů, z čehož je 5 palivových částí regulačních souborů s obohacením 3,6 %, 6 s obohacením 2,4 % a 76 profilovaných palivových souborů s obohacením 3,82 %. Od roku 1999 mají i palivové části regulačních souborů profilované obohacení 3,82 %, jak je znázorněno na Obr. 6-2. [11]

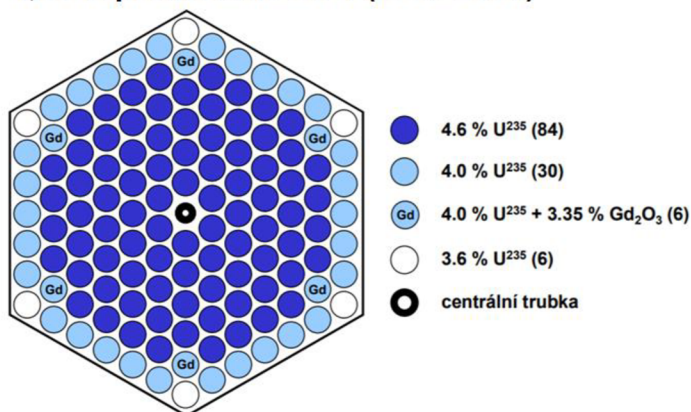
3,82 % profilované (1998-2003)



Obr. 6-2 Struktura palivového souboru v řezu (3,82 %) [11], [16], [17], upraveno

Od roku 2003 se začaly zavážet palivové soubory s vyhořívajícími absorbátory na bázi gadolinia Gd_2O_3 se středním obohacením 4,38 % ^{235}U (viz Obr. 6-3). Toto palivo označujeme jako Gd-1. [16] Gadolinium umožňuje na začátku cyklu lepší vyrovnávání výkonu a zvyšuje podkritičnost skladovaných čerstvých souborů. Tyto palivové soubory umožnily zahájení pomalého přechodu na pětiletý cyklus. [14]

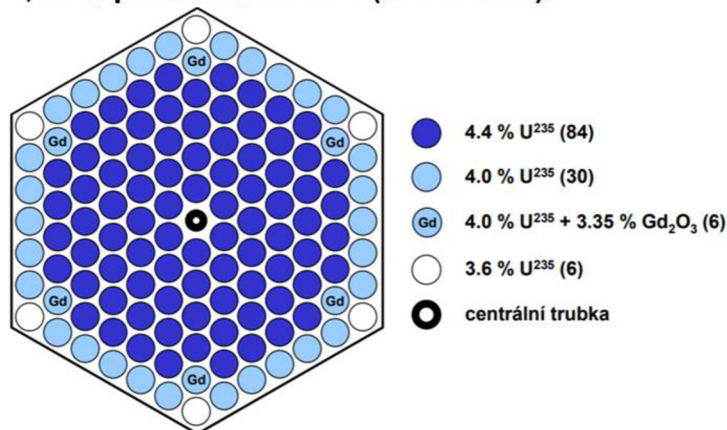
4,38 % profilované Gd-1 (2003-2005)



Obr. 6-3 Struktura palivového souboru v řezu (Gd-1) [11], [16], [17], upraveno

Jako další proběhla inovace palivových souborů, kdy se prodloužily palivové sloupce o 6 cm a zmenšila se tloušťka palivových proutků. Došlo také ke zvětšení rozteče mezi proutky na 12,3 mm z původních 12,2 mm. Průměr jednotlivých tablet paliva se zvýšil o 0,03 mm a centrální otvor se zúžil o 0,2 mm. [11] Všechny tyto inovace umožnily snížení středního obohacení na 4,25 % ^{235}U , viz Obr. 6-4. Toto palivo bylo zaváženo od roku 2005 a označujeme ho jako Gd-2. Byl zachován stejný multiplikační koeficient k_{ef} jako u souborů typu Gd-1. [16] Jak již bylo řečeno, tak na počátku provozu bylo ročně zaváženo průměrně 116 palivových souborů. Při úplném pětiletém cyklu se zaváží jen 72 palivových souborů ročně. [11]

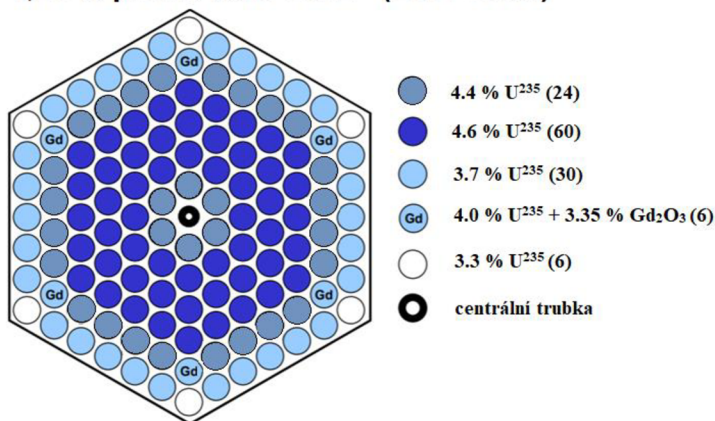
4,25 % profilované Gd-2 (2005-2007)



Obr. 6-4 Struktura palivového souboru v řezu (Gd-2) [11], [16], [17], upraveno

Po zavedení paliva Gd-2 bylo důležitým faktorem zachování délky odstávek a zároveň udržení pětiletého palivového cyklu. Z toho důvodu došlo k optimalizaci radiálního profilování obohacení Gd-2, které vidíme na *Obr. 6-5* a označujeme ho jako Gd-2+. Tento druh paliva byl zavážen od roku 2007. Struktura paliva Gd-2+ byla naprosto vyhovující, ale velmi drahá, protože obsahovala spoustu různých obohacení. [11]

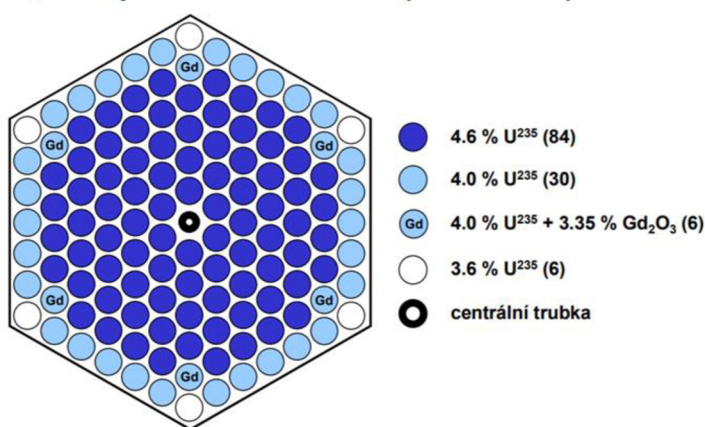
4,25 % profilované Gd-2+ (2007-2009)



Obr. 6-5 Struktura palivového souboru v řezu (Gd-2+) [11], [17], upraveno

Další změna paliva byla nutná z důvodu zvýšení výkonu na 105 % jmenovitého výkonu. Konstrukčně se toto palivo shoduje s palivem předchozím Gd-2+. Obohacení má stejné jako palivo Gd-1 a to 4,38 % (viz *Obr. 6-6*). Toto palivo označujeme jako Gd-2M a poprvé bylo zaváženo v roce 2009. [11]

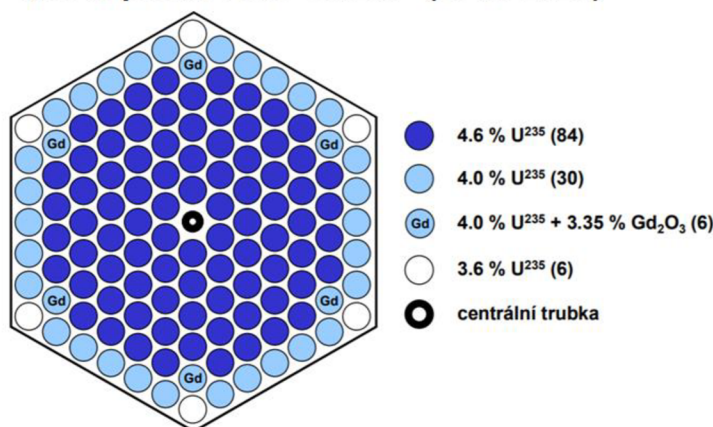
4,38 % profilované Gd-2M (2009-2014)



Obr. 6-6 Struktura palivového souboru v řezu (Gd-2M) [11], [16], [17], upraveno

V roce 2014 došlo k další změně paliva. Tentokrát se úplně odstranil centrální otvor u peletek, tedy kromě peletek s gadoliniovým vyhořívajícím absorbátorem. Konce peletek jsou nově čokovitěho tvaru. U peletek byl také zvětšen vnější průměr o 0,2 mm z původních 7,6 mm na 7,8 mm. Toto palivo označujeme jako Gd-2M+ a má střední obohacení 4,38 % (viz Obr. 6-7). Také se zvětšila zrna, která peletky obsahují. Z původní velikosti 10 μm na 25 μm . Větší velikost zrn v peletkách vede k menšímu úniku štěpných produktů z nitra peletek. Všechny tyto uvedené změny způsobily navýšení ^{235}U o 9 kg. Momentálně je tedy v aktivní zóně 47,2 tun uranu, což je o 12,3 % více než počáteční naprojektované množství. Délka cyklu zůstala pětiletá. [17]

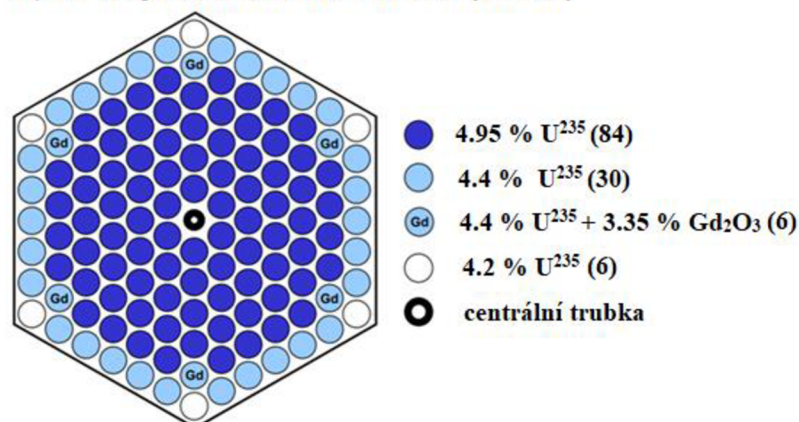
4,38 % profilované Gd-2M+ (2014-2020)



Obr. 6-7 Struktura palivového souboru v řezu (Gd-2M+) [11], [16], [17], upraveno

Na přelomu roku 2019 a 2020 se začal zavážet do reaktorů nový typ paliva. Oproti palivu Gd-2M+ má vyšší střední obohacení 4,76 % ^{235}U (viz Obr. 6-8). Navýšením středního obohacení bylo možné prodloužit kampaň z bývalých 12 měsíců na 16. Tento druh paliva, který je aktuálně zavážen, označujeme jako Gd-2X. [19]

4,76 % profilované Gd-2X (2020)



Obr. 6-8 Struktura palivového souboru v řezu (Gd-2X) [17], upraveno

V blízké době se plánuje zvýšení výkonu na 1485 MW. Projektová životnost jaderné Elektrárny Dukovany byla 30 let. Díky projektu „Dlouhodobý provoz“ se momentálně mluví o uzavření v roce 2037, ale nevylučuje se ani prodloužení životnosti až do roku 2047. [19]

V následující Tab. 6-1 jsou vypsané prvky, které palivové soubory obsahují v hmotnostní jednotce gram na jeden palivový soubor. Hodnoty jsou pouze přibližné a slouží k přiblížení jednotlivých druhů paliva. Dle předpokladu palivové soubory obsahují největší množství ^{238}U , zirkonia, které je součástí obalu palivových tablet a kyslíku, který se nachází v palivu i moderátoru. Zavedením vyhořívajících absorbátorů na bázi gadolinia se zvýšilo množství gadolinia v souboru z 0,18 g na 197,37 g.

Tab. 6-1 Složení jednotlivých typů palivových souborů v g/palivový soubor [17] upraveno

Typ paliva	Neprofilované palivové soubory			Profilované palivové soubory						
	1.60%	2.40%	3.60%	3.82%	Gd-1	Gd-2	Gd-2+	Gd-2M	Gd-2M+	Gd-2X
Používáno v letech	1985-1998			1998-2003	2003-2005	2005-2007	2007-2009	2009-2014	2014-2020	2020
U^{238}	118276	117315	115872	115608	114864	120849	120935	120766	129565	129050
Zr	54979	54979	54979	50874	51351	49743	49743	49743	45108	45108
O	16164	16166	16168	16169	16170	17020	17020	17020	18229	18229
Fe	2708	2708	2708	2543	2543	2546	2546	2546	2546	2546
U^{235}	1923	2884	4327	4591	5264	5367	5364	5533	5935	6450
Nb	817.4	817.4	817.4	712.1	716.9	700.6	700.6	700.6	639.7	639.7
Cr	778	778	778	736	736	737	737	737	737	737
Ni	435	435	435	411	411	412	412	412	412	412
Mn	75.2	75.2	75.2	71.7	71.7	71.8	71.8	71.8	71.8	71.8
Ca	18.03	18.03	18.03	18.03	18.03	18.95	18.95	18.95	20.33	20.33
Hf	16.74	16.74	16.74	15.48	15.63	7.81	7.81	7.81	7.81	7.81
Cu	4.81	4.81	4.81	4.81	4.81	5.05	5.05	5.05	5.42	5.42
Cl	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.89	1.89	1.89	2.03	2.03
Er	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.26	1.26	1.26	1.36	1.36
He	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.6	0.6
Gd	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	197.37	197.37	197.37	197.37	197.37

Následuje Tab. 6-2 se shrnutím důležitých změn parametrů, které během provozu na EDU probíhaly, a které jsou popisovány v celé kapitole 8.

Tab. 6-2 Vlastnosti jednotlivých typů palivových souborů [17], [11] upraveno

Používaný typ paliva	Neprofilované palivové soubory			Profilované palivové soubory						
	1.60%	2.40%	3.60%	3.82%	Gd-1	Gd-2	Gd-2+	Gd-2M	Gd-2M+	Gd-2X
Střední obohacení U^{235} (%)	1.6	2.4	3.6	3.82	4.38	4.25	4.25	4.38	4.38	4.76
Tepelný výkon (MW)	1375	1375	1375	1375	1375	1375	1444	1444	1444	1444
Instalovaný výkon (MW)	1760	1760	1760	1760	1760	1760	1760	1760/2040	2040	2040
Výška sloupce paliva (mm)	2420	2420	2420	2420	2420	2480	2480	2480	2480	2480
Krok mříže proutků (mm)	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3
Průměr palivové tablety max. (mm)	7.6	7.6	7.6	7.57	7.57	7.6	7.6	7.6	7.8	7.8
Centrální otvor palivové tablety (mm)	1.6	1.6	1.6	1.4	1.4	1.2	1.2	1.2	0	0

6.1 Efektivní multiplikační koeficient – kef

K udržení štěpné řetězové reakce je potřeba, aby každé rozštěpené jádro poskytlo alespoň jeden neutron potřebný k rozštěpení dalšího jádra. Vznikají tak po sobě jdoucí generace neutronů o určité střední době života. Z toho vyplývá multiplikační koeficient k , který značí poměr počtu neutronů dvou po sobě jdoucích generací. [5]

$$k = \frac{n_k}{n_{k-1}} \quad (6.1)$$

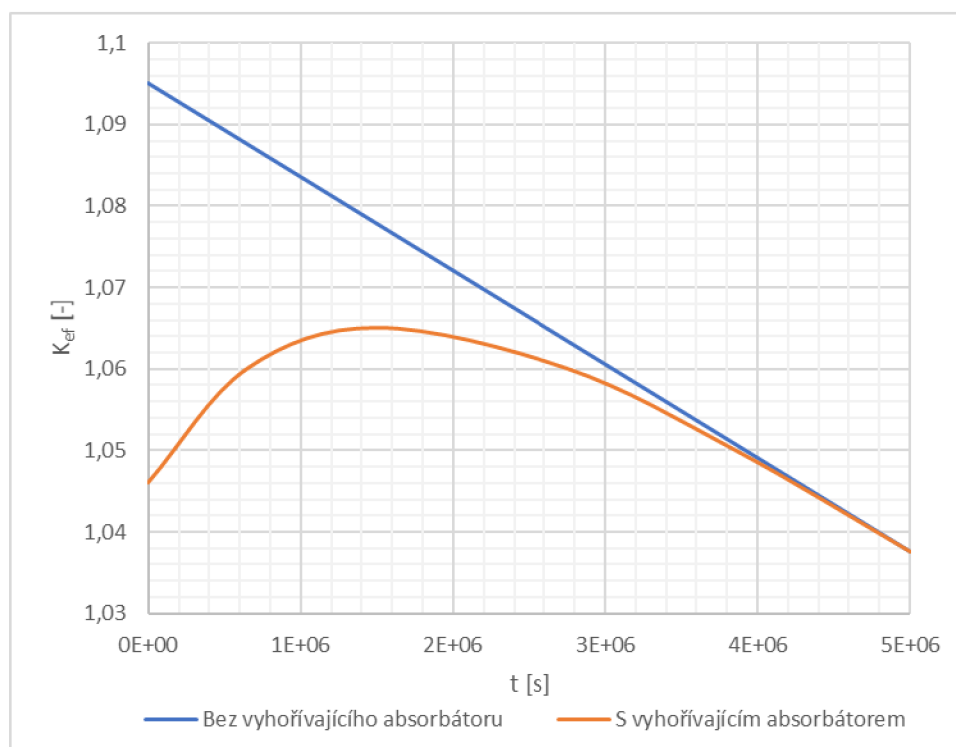
Mohou nastat tři stavy:

$k < 1$ – v soustavě klesá počet neutronů (podkritický stav)

$k = 1$ – v soustavě se udržuje konstantní počet neutronů (kritický stav)

$k > 1$ – v soustavě lavinově roste počet neutronů (nadkritický stav)

K dlouhodobému regulování jaderného reaktoru se primárně používá vyhořívající absorbátor. U čerstvého paliva je nutné kompenzovat jeho vysokou reaktivitu. Čím vyšší je obohacení paliva, tím vyšší je počáteční přebytečná reaktivita. Tento přebytek částečně kompenzujeme pomocí bóru ve formě kyseliny borité H_3BO_3 v moderátoru a bórových tyčí, ale hlavním kompenzačním činitelem je vyhořívající absorbátor na bázi gadolinia Gd_2O_3 . Na počátku vyhořívání se reaktivita paliva s vyhořívajícím absorbátorem zvyšuje, až dosáhne maxima a poté se začne postupně blížit ke křivce paliva bez vyhořívajícího absorbátoru. Na konci vyhořívání jsou tedy tyto dvě křivky téměř totožné, jak je vidět na Obr. 6-9. V časovém průběhu se totiž koncentrace tohoto absorbátoru snižuje. [18]



Obr. 6-9 Model vyhořívání paliva s a bez vyhořívajícího absorbátoru [18], upraveno

7 PROGRAM U_{WB1}

Kód U_{WB1} naprogramoval v rámci své dizertační práce pan Ing. Martin Lovecký, Ph.D. v roce 2016 na Západočeské univerzitě v Plzni. Je to program, který simuluje vyhořívání jaderného paliva pomocí Batemanových rovnic. Transportní rovnice je řešena Monte Carlo solverem. Ten pomocí generátoru náhodných čísel simuluje průběh jaderných reakcí, počet a transport neutronů a jejich distribuci mezi generacemi. [22]

Kód U_{WB1} je napsaný v jazyce Fortran 90. Vstupním souborem je textový dokument obsahující informace o jaderném palivu v čerstvém stavu a o časovém průběhu vyhořívání včetně výkonů v jednotlivých zvolených intervalech. [20]

Výstupem je textový dokument určený k dalšímu zpracovávání v některém z „tabulkových“ programů. Samotný výstupní text je nepřehledná řada čísel, ale pokud se otevře například v aplikaci Notepad, dostane strukturu a řád. Ve výstupním souboru jsou hlavními daty: efektivní koeficient násobení, hustota toku neutronů a koncentrace všech 3820 nuklidů pro každou předem určenou oblast zvlášť. To vše v časových intervalech a krocích vyhořívání. [20] Doplněné o informace z [18]

7.1 Výpočet parametrů pro vstup U_{WB1}

Většina parametrů je jasně dána a není třeba nic dopočítávat. Jedná se pouze o jednoduché výpočty výkonu v MW/MTU nebo poloměru palivových tablet.

Zásadním parametrem, který je třeba dopočítat je jaderná hustota jednotlivých nuklidů jak v palivu, tak v případném pokrytí paliva a moderátoru.

Pokud pro příklad výpočtu jaderné hustoty vezmeme palivo bez vyhořívajícího absorbátoru na bázi gadolinia Gd_2O_3 , tedy palivo, které se používalo do roku 2003, pak palivo, jeho pokrytí a moderátor v čerstvém stavu obsahují tyto nuklidy *Tab. 7-1*:

Tab. 7-1 Procentuální zastoupení jednotlivých izotopů z prvku [23]

Palivo	
^{235}U	3,82%
^{238}U	96,18%
^{16}O	99,76%
^{17}O	0,04%
^{18}O	0,20%

Pokrytí paliva	
^{90}Zr	51.450%
^{91}Zr	11.220%
^{92}Zr	17.150%
^{94}Zr	17.380%
^{96}Zr	2.800%
^{93}Nb	100%
^{174}Hf	0.162%
^{176}Hf	5.206%
^{177}Hf	18.606%
^{178}Hf	27.297%
^{179}Hf	13.629%
^{180}Hf	35.100%

Moderátor	
^{16}O	100%
^1H	100%
^{79}B	50.69%
^{81}B	49.31%

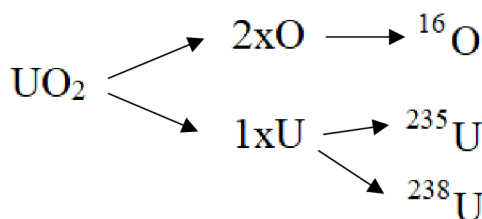
Pro naše zjednodušené výpočty budeme uvažovat pouze modře označené nuklidy. Palivo obsahuje velmi malé množství jak ^{17}O , tak ^{18}O a u moderátoru je obsah bóru diskutabilní, protože na počátku chladicí voda obsahuje mnohem více bóru než na konci vyhořívání. Musela by se tedy uvažovat střední hodnota počátečního obsahu bóru, nebo porovnat alespoň tři hodnoty obsahu bóru. Rozhodli jsme se počítat vyhořívání bez bóru v chladivu.

U dalších typů paliva, která již obsahují vyhořívající absorbatory na bázi gadolinia, budeme uvažovat tytéž nuklidy jako u zmiňovaného paliva bez absorbatóru, protože tyčí s vyhořívajícími absorbatory je v každém souboru pouze 6, což je pro náš výpočet a simulaci zanedbatelné. Rozhodli jsme se počítat vyhořívání pouze v proučkách bez Gd_2O_3

Vztah pro výpočet jaderné hustoty N_i je převzatý a upravený z [21] vzorec (22):

$$N_i = \frac{\rho \cdot \omega \cdot z \cdot N_A}{A_r \omega} \quad (7.1)$$

Dále pro výpočet jaderné hustoty potřebujeme znát relativní atomovou hmotnost jednotlivých prvků ve sloučenině A_r (Tab. 7-2), množství zastoupení nuklidů ve sloučenině (ukázka Obr. 7-1), hustotu celé sloučeniny $\rho_{\text{UO}_2(25^\circ\text{C})}$, Avogadrovu konstantu N_A , hmotnostní podíl ω a procentuální poměr izotopů jednotlivých prvků z , který je uvedený v Tab. 7-1.



Obr. 7-1 Ukázka rozložení obsahu jedné sloučeniny na jednotlivé nuklidy (palivo)

Tab. 7-2 Relativní atomové hmotnosti jednotlivých izotopů

Palivo	
^{235}U	235,0439
^{238}U	238,0508
U	238,029
^{16}O	15,9949

$$N_A = 6,02214076 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

$$\rho_{\text{UO}_2(25^\circ\text{C})} = 10,97 \text{ g/cm}^3$$

$$1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

Vztah pro výpočet hmotnostního podílu prvku U v UO_2 :

$$\omega = \frac{ArU^{238}}{ArU^{238} + 2 \cdot ArO^{16}} \quad (7.2)$$

Po dosazení relativních atomových hmotností dostaneme:

$$\omega = \frac{238,029}{238,029 + 2 \cdot 15,9949} = 0,8815 \quad (7.3)$$

Dále vypočítáme jadernou hustotu ^{238}U : Pro poměr (3,82 % ^{235}U , 96,18 % ^{238}U)

$$N_i = \frac{10,97 \cdot 0,8815 \cdot 0,9618 \cdot 6,022 \cdot 10^{23}}{238,0508} = 2,3528 \cdot 10^{22} \quad (7.4)$$

Jaderná hustota je počet jader na centimetr krychlový a do programu UWBI se zadává v jednotce $1/\text{barn} \cdot \text{cm}$, tudíž výslednou hodnotu N_i vynásobíme jedním barnem:

$$N_i = 2,3528 \cdot 10^{22} \cdot 1 \cdot 10^{-24} = 2,3528 \cdot 10^{-2} \frac{1}{\text{barn} \cdot \text{cm}} \quad (7.5)$$

Stejným způsobem vypočítáme jadernou hustotu i pro ostatní členy sloučeniny paliva. Jaderná hustota ^{235}U : Pro poměr (3,82 % ^{235}U , 96,18 % ^{238}U)

$$N_i = \frac{10,97 \cdot 0,8815 \cdot 0,0382 \cdot 6,022 \cdot 10^{23}}{235,0439} = 9,4642 \cdot 10^{20} \quad (7.6)$$

$$N_i = 9,4642 \cdot 10^{20} \cdot 1 \cdot 10^{-24} = 9,4642 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{barn} \cdot \text{cm}} \quad (7.7)$$

Jaderná hustota ^{16}O :

$$\omega = \frac{2 \cdot 15,9949}{238,029 + 2 \cdot 15,9949} = 0,1185 \quad (7.8)$$

$$N_i = \frac{10,97 \cdot 0,1185 \cdot 0,9976 \cdot 6,022 \cdot 10^{23}}{15,9949} = 4,8825 \cdot 10^{22} \quad (7.9)$$

$$N_i = 4,8825 \cdot 10^{22} \cdot 1 \cdot 10^{-24} = 4,8825 \cdot 10^{-2} \frac{1}{\text{barn} \cdot \text{cm}} \quad (7.10)$$

Máme vypočítané všechny jaderné hustoty pro palivo se středním obohacením 3,82 %. V následující tabulce *Tab. 7-3* jsou dopočítány stejným způsobem jaderné hustoty pro ostatní druhy paliva a další parametry zadávané do vstupního dokumentu *UwB₁*. Je důležité poznamenat, že simulaci budeme provádět pouze u profilovaného paliva, tedy od roku 1998.

Tab. 7-3 Jaderné hustoty, výkon a poloměry zadávané do programu UwB₁

Druh paliva		3.82	Gd-1	Gd-2	Gd-2+	Gd-2M	Gd-2M+	Gd-2X
Střední obohacení (%)		3.82	4.38	4.25	4.25	4.38	4.38	4.76
Jaderná hustota (1/bcm)	²³⁵ U	9.4642E-04	1.0852E-03	1.0530E-03	1.0530E-03	1.0852E-03	1.0852E-03	1.1793E-03
	²³⁸ U	2.3528E-02	2.3391E-02	2.3423E-02	2.3423E-02	2.3391E-02	2.3391E-02	2.3298E-02
	¹⁶ O	4.8825E-02	4.8825E-02	4.8825E-02	4.8825E-02	4.8825E-02	4.8825E-02	4.8825E-02
Tepelný výkon (MWt)		1375	1375	1375	1444	1444	1444	1444
Výkon (MW/MTU)		28.896	28.896	28.896	26.919	26.919	26.919	26.919
Vzdálenost středů dvou proutků (cm)		0.6375	0.6375	0.6427	0.6427	0.6427	0.6427	0.6427
Poloměr tablety (cm)		0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.39	0.39
Poloměr s obalem (cm)		0.455	0.455	0.455	0.455	0.455	0.455	0.455

7.2 Vstup UwB₁

Jak již bylo řečeno, vstupním parametrem pro program *UwB₁* je textový dokument obsahující informace potřebné k simulaci vyhořívání. V této kapitole je podrobně popsáno, jaké parametry se do jakého řádku v textovém dokumentu zapisují. Jednotlivé vstupní dokumenty naleznete v příloze (A – G).

- 1 – název reaktoru
- 2 – počet vláken
- 3 – počet neutronů v generaci
- 4 – počet vynechaných generací neutronů
- 5 – celkový počet neutronových generací
- 6 – počet válcových vrstev kolem paliva (včetně paliva)
- 7 – soustředné poloměry válcových oblastí
- 8 – krok mříže (polovina vzdálenosti dvou středů proutků)
- 9 – typ mřížování (uspořádání) 1=čtvercové, 2=trojúhelníkové
- 10 – počet intervalů vyhořívání
- 11 – výkon, kterým bylo palivo ozařované (MW/MTU)
- 12 – dny výkonu ozařování
- 13 – vyhořívání regionů (0=nevyhořívá, 1=vyhořívá pomocí výkonu, 2=vyhořívá pomocí změny toku)
- 14 – transportní knihovna nebo knihovna vyhořívání
- 15 – maximální teploty v regionech v kelvinech
- 16 – cesta ke složkám s knihovnami
- 17 – počet nuklidů v palivovém regionu
- 18 – počet nuklidů v obalu paliva
- 19 – počet nuklidů v moderátoru
- 20 – jaderná hustota paliva (tolik řádků kolik je nuklidů v palivovém regionu)

- 21 – jaderná hustota obalu paliva (tolik řádků kolik je nuklidů v obalu paliva)
 22 – jaderná hustota moderátoru (tolik řádků kolik je nuklidů v moderátoru)
 23 – eof – značí konec (dál už program nic nečte)

Jako příklad vezmeme palivo se středním obohacením 3,82 %, které bylo zaváženo ve tříletých palivových cyklech. Tudiž budeme uvažovat, že palivo bylo tři roky v reaktoru (2001-2004) a následně bylo vyjmuta a uskladněno ve skladu VJP až do plánovaného uložení do hlubinného úložiště roku 2065. V simulaci budeme pro období 2004-2065 počítat s nulovým výkonem.

Pro přehlednost v zápise jsou parametry na ukázkou uvedené přesně podle jednotlivých řádků v textovém dokumentu.

Název simulace - uwbl vver440 depletion test

```

2- 4
3- 10000
4- 5
5- 105
6- 2
7- 0.38 0.455
8- 0.6375
9- 2
10- 30
11- 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 ..... 0.00000E+00
12- 1.00000E+00 2.00000E+00 3.00000E+00 ..... 2.33600E+04
13- 1 0 0
14- 1 2 2
15- 900.0 625.0 578.0
16- "/mnt/c/UWB/testcases/uwbllibs/"
17- 3
18- 12
19- 2
20- 15      86      80160  4.88250E-02
      362     3514   922350  9.46420E-04
      365     3518   922380  2.35280E-02
21- 117     1039   400900  2.19170E-02
      118     1041   400910  4.77956E-03
      119     1042   400920  7.30565E-03
      121     1044   400940  7.40363E-03
      123     1046   400960  1.19276E-03
      124     1081   410930  4.22623E-04
      304     2594   721740  1.05594E-08
      305     2596   721760  3.47139E-07
      306     2597   721770  1.22753E-06
      307     2600   721780  1.80037E-06
      308     2603   721790  8.98867E-07
      309     2606   721800  2.31514E-06
22-  1      1      10010  5.01551E-02
      15     86      80160  2.50775E-02
23- eof
  
```

Zadávané teploty mohou být jen přibližné, protože program UwB₁ pro výpočet vybere nejbližší teplotu, pro kterou má vytvořenou knihovnu. Teploty, pro které má knihovny vytvořené, jsou

293 K, 600 K, 900 K a 1200 K. [22] V řádcích 20-22 jsou vedle sebe vždy čtyři hodnoty. První a druhá hodnota značí umístění v knihovně, třetí je identifikační kód ZAID jednotlivých izotopů a čtvrtá je jaderná hustota.

7.3 Výstup UwB₁

Z výstupních dat nás bude zajímat průběh efektivního multiplikačního koeficientu v čase vyhořívání a také si pro porovnání vybereme několik izotopů, které jsou zajímavé především z hlediska vyhořelého jaderného paliva. Vybrané izotopy prvků jsou uvedené v Tab. 7-4. ZAID je kód izotopu složený z výpočtu: $10\,000 \cdot Z + 10 \cdot A + m$. [22] Energie přeměny a produkty přeměny jsou z [27].

Tab. 7-4 Nuklidy vybrané k porovnání

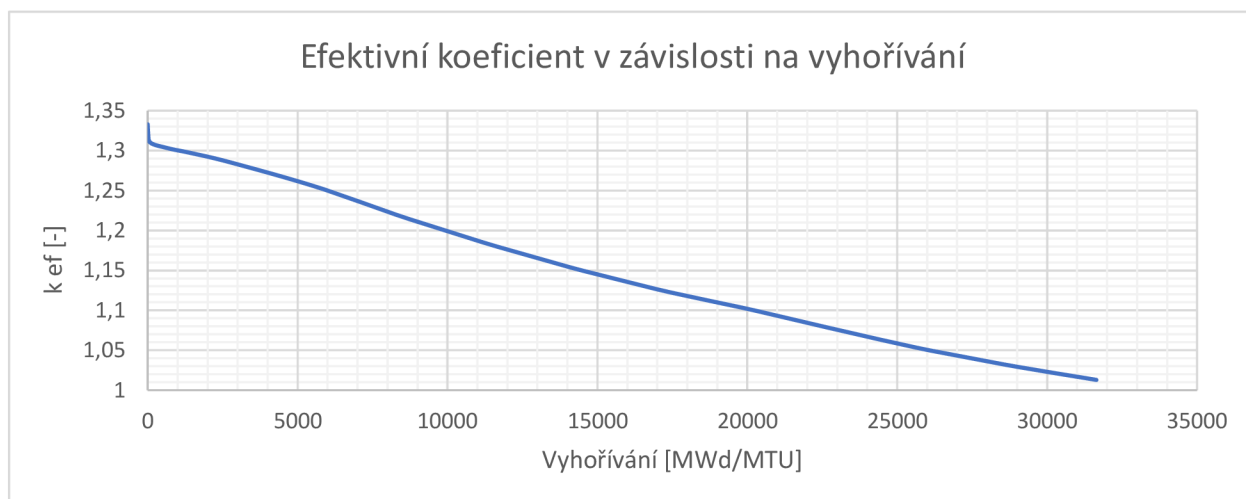
Nuklid	ZAID	Poločas přeměny	Způsob přeměny	Energie přeměny	Produkt přeměny
$^{129}_{53}\text{I}$	531290	$1,57 \cdot 10^7$ let	β^-	194 keV	^{129}Xe
$^{90}_{38}\text{Sr}$	380900	28,79 let	β^-	546 keV	^{90}Y
$^{137}_{55}\text{Cs}$	551370	30,07 let	β^- γ	512 keV 661,7 keV	$^{137\text{m}}\text{Ba}$, ^{137}Ba
$^{237}_{93}\text{Np}$	932370	$2,144 \cdot 10^6$ let	α	4,9583 MeV	^{233}Pa
$^{238}_{94}\text{Pu}$	942380	87,7 let	α	5,593 MeV	^{234}U
$^{239}_{94}\text{Pu}$	942390	24 110 let	α	5,245 MeV	^{235}U
$^{241}_{94}\text{Pu}$	942410	14,35 let	β^-	20,78 keV	^{241}Am
$^{242}_{94}\text{Pu}$	942420	$3,733 \cdot 10^5$ let	α	4,984 MeV	^{238}U
$^{249}_{98}\text{Cf}$	982490	351 let	α	6,296 MeV	^{245}Cm
$^{241}_{95}\text{Am}$	952410	432,2 let	α γ	5,486 MeV 59,54 keV	^{237}Np
$^{235}_{92}\text{U}$	922350	$7,038 \cdot 10^8$ let	α	4,678 MeV	^{231}Th
$^{238}_{92}\text{U}$	922380	$4,468 \cdot 10^9$ let	α	4,269 MeV	^{234}Th

7.4 Výsledky simulace

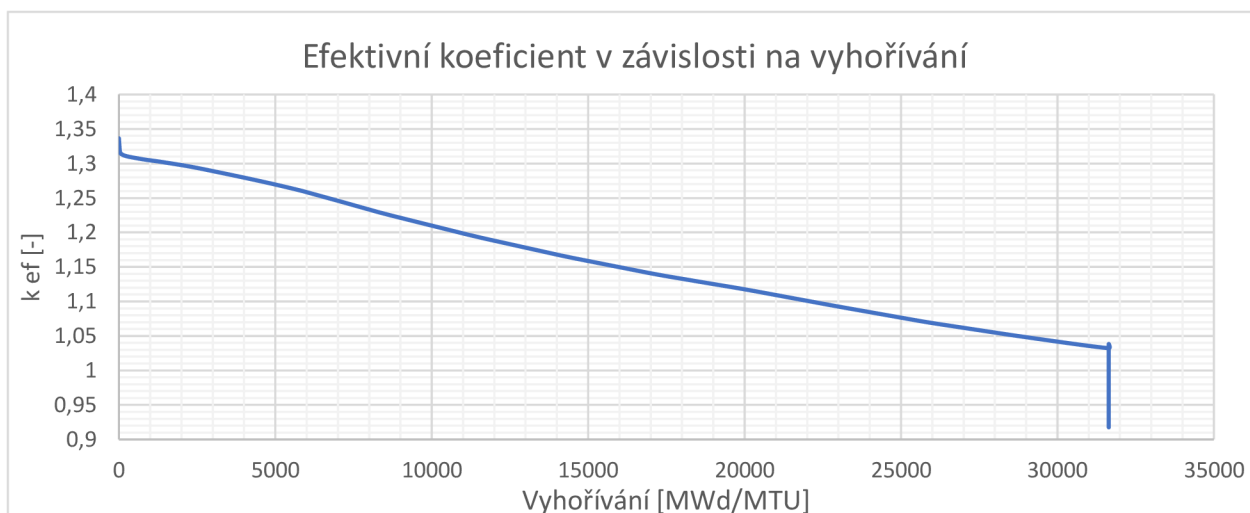
Bylo odsimulováno sedm jaderných paliv, která byla použita v jaderné Elektrárně Dukovany. Simulací jsme provedli osm, protože u prvního paliva 3,82 % jsme uskutečnili dvě simulace. Jednu, kde jsme uvažovali palivo pouze tři roky v reaktoru a druhou včetně pokračování s nulovým výkonem až do roku 2065, kdy pravděpodobně dojde k přesunu VJP do hlubinného úložiště. U ostatních paliv se simulovala již jen celková časová osa – od zavezení paliva do reaktoru po rok 2065.

7.4.1 Efektivní multiplikační koeficient v průběhu vyhořívání

V následující kapitole budeme porovnávat multiplikační koeficient v průběhu vyhořívání mezi jednotlivými palivy. Na *Obr. 7-2* je průběh efektivního multiplikačního koeficientu v závislosti na vyhořívání pro palivo 3,82 %, které bylo tři roky v reaktoru. Hned pod ním, na *Obr. 7-3* je průběh k_{ef} stejného paliva s prodloužením do roku 2065. Zde je na první pohled viditelný rozdíl, a proto můžeme s jistotou říct, kde došlo k vyvezení paliva z reaktoru. Po vyvezení paliva z reaktoru byl $k_{ef} = 1,013$, poté ve skladu VJP při konstantním vyhoření až do roku 2065 dosáhl hodnoty $k_{ef} = 0,918$. To proto, že už nedochází k udržování štěpné reakce, tím klesá množství neutronů a v soustavě je podkritický stav.

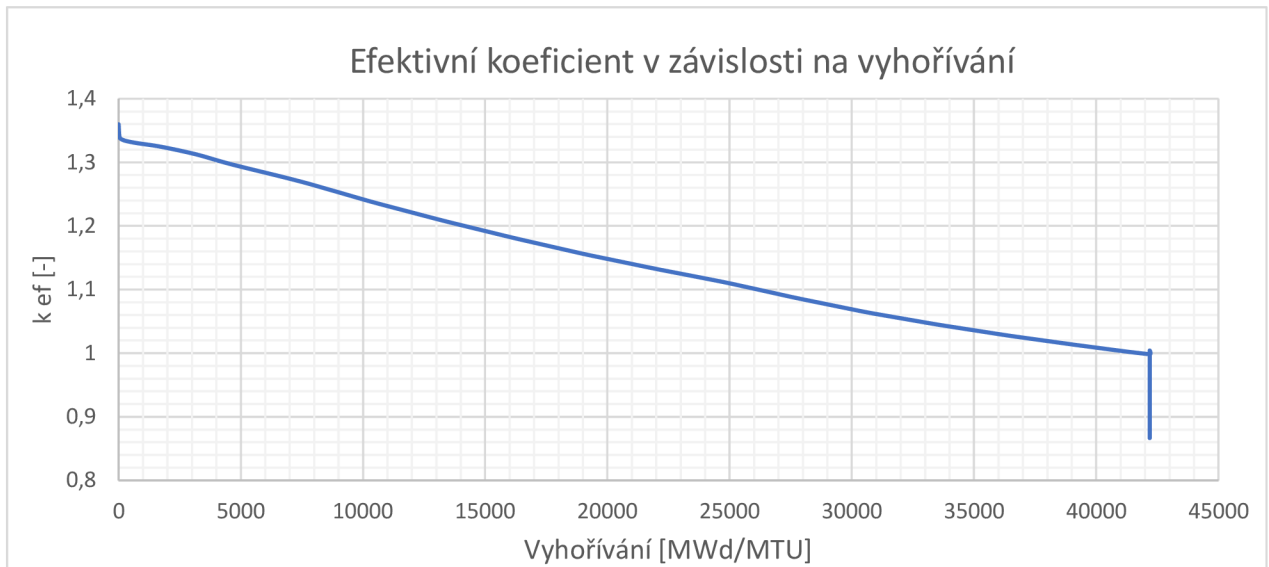


Obr. 7-2 k_{ef} pro palivo se středním obohacením 3,82 %, 3 roky v reaktoru



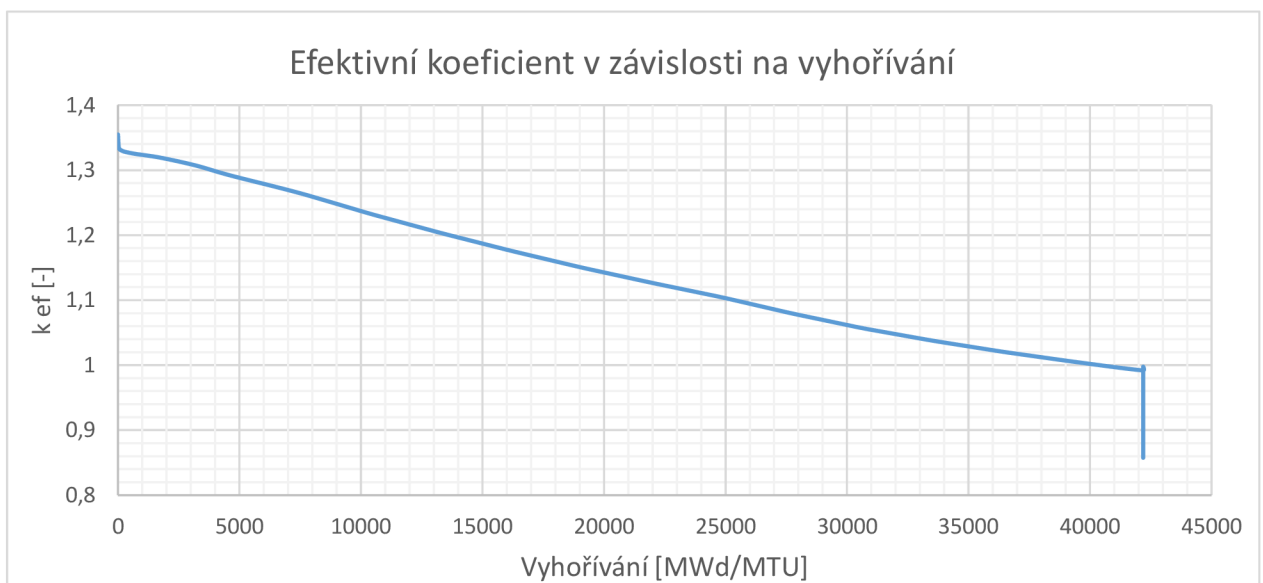
Obr. 7-3 k_{ef} pro palivo 3,82 %, 3 roky v reaktoru a 64 let uskladněné ve skladu VJP

První simulované palivo 3,82 % se zavázelo za doby tříletého palivového cyklu. U dalšího paliva Gd-1 již probíhal čtyřletý palivový cyklus. Na *Obr. 7-4* vidíme jeho k_{ef} v průběhu vyhořívání a po něm. Toto palivo mělo větší počáteční obohacení, ale strávilo v reaktoru delší časový úsek. Hodnota k_{ef} se tedy po vyvezení paliva z reaktoru téměř neliší $k_{ef} = 1,012$. Po dalších 57 letech bude mít dle simulace VJP $k_{ef} = 0,867$. Jelikož jsme zanedbali vyhořívající absorbátor na bázi gadolinia, má palivo Gd-1 lineární průběh jako palivo 3,82 %. Kdybychom uvažovali s vyhořívajícím absorbátorem, měl by k_{ef} průběh jako je na *Obr. 6-9*.



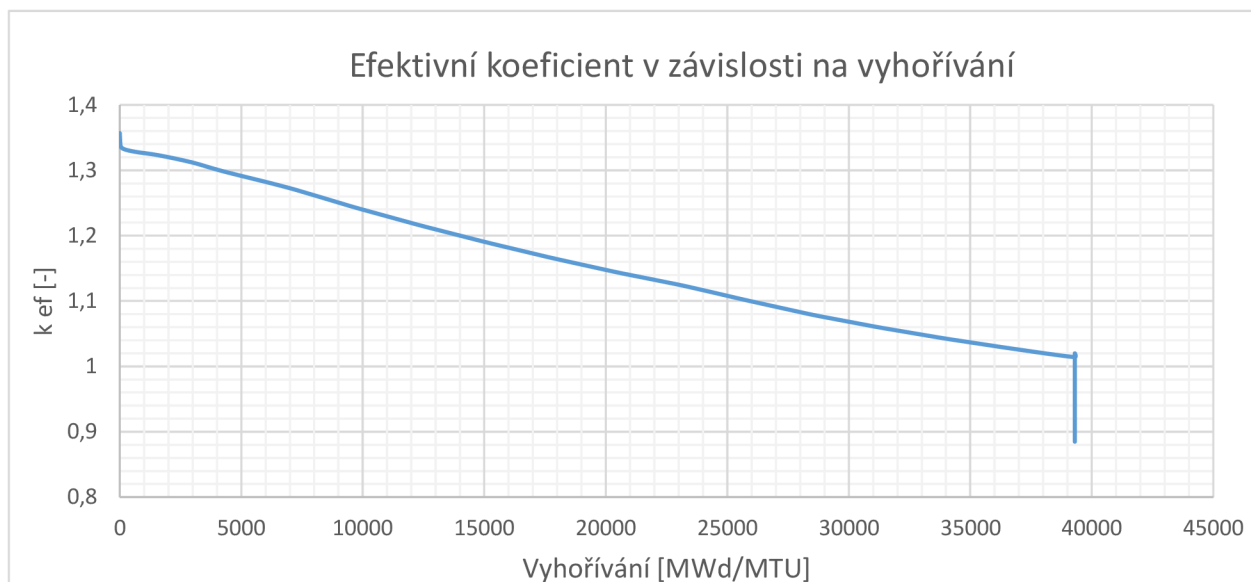
Obr. 7-4 k_{ef} pro palivo Gd-1, 4 roky v reaktoru a 57 let uskladněné ve skladu VJP

Palivo Gd-2 bylo také zaváženo ve čtyřletých palivových cyklech a mezi palivy Gd-1 a Gd-2 je rozdíl pouhých dvou let, tudíž k_{ef} má průběh téměř totožný (*Obr. 7-5*). Při vyvezení paliva z reaktoru $k_{ef} = 1,005$ a po dalších 55 letech $k_{ef} = 0,858$.



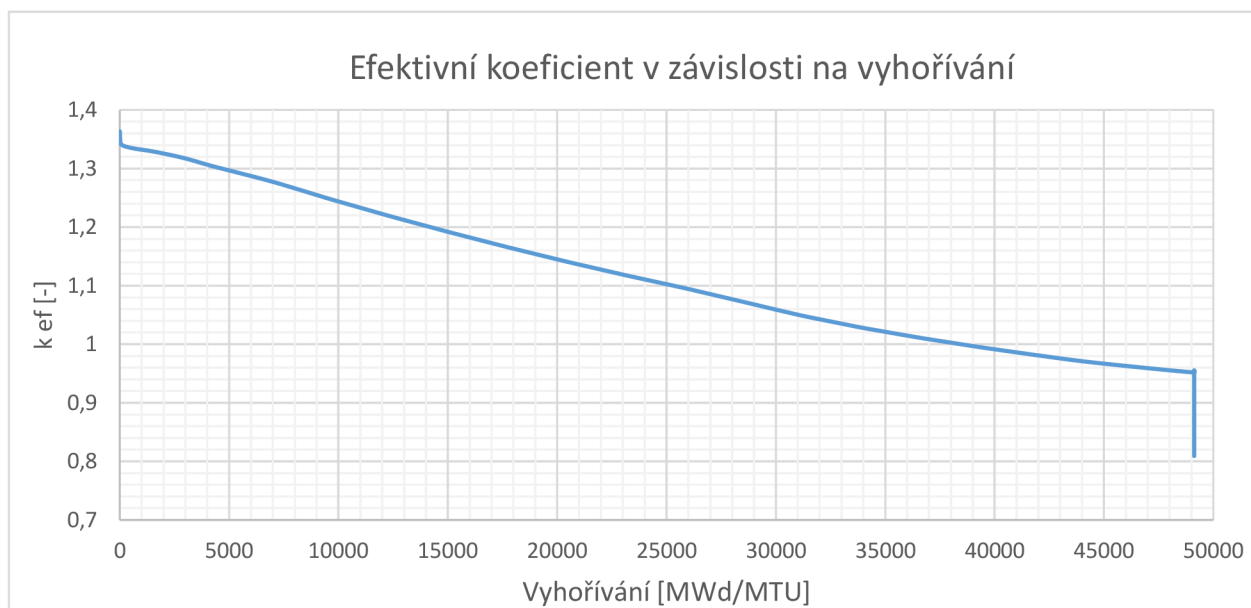
Obr. 7-5 k_{ef} pro palivo Gd-2, 4 roky v reaktoru a 55 let uskladněné ve skladu VJP

U paliva Gd-2+ jsme také uvažovali s čtyřletým palivovým cyklem, i když už docházelo k pomalému přechodu na pětiletý. Počáteční obohacení má stejné jako palivo Gd-2, ale došlo ke zvýšení výkonu, což, jak ukazuje *Obr. 7-6*, snižuje konečné vyhoření paliva. U paliva Gd-2 bylo konečné vyhoření 42 188,16 MWd/MTU a u paliva Gd-2+ je konečné vyhoření 39 301,7 MWd/MTU. Efektivní koeficient po ukončení udržování štěpné reakce je $k_{ef} = 1,028$ a v roce 2065 bude $k_{ef} = 0,885$.



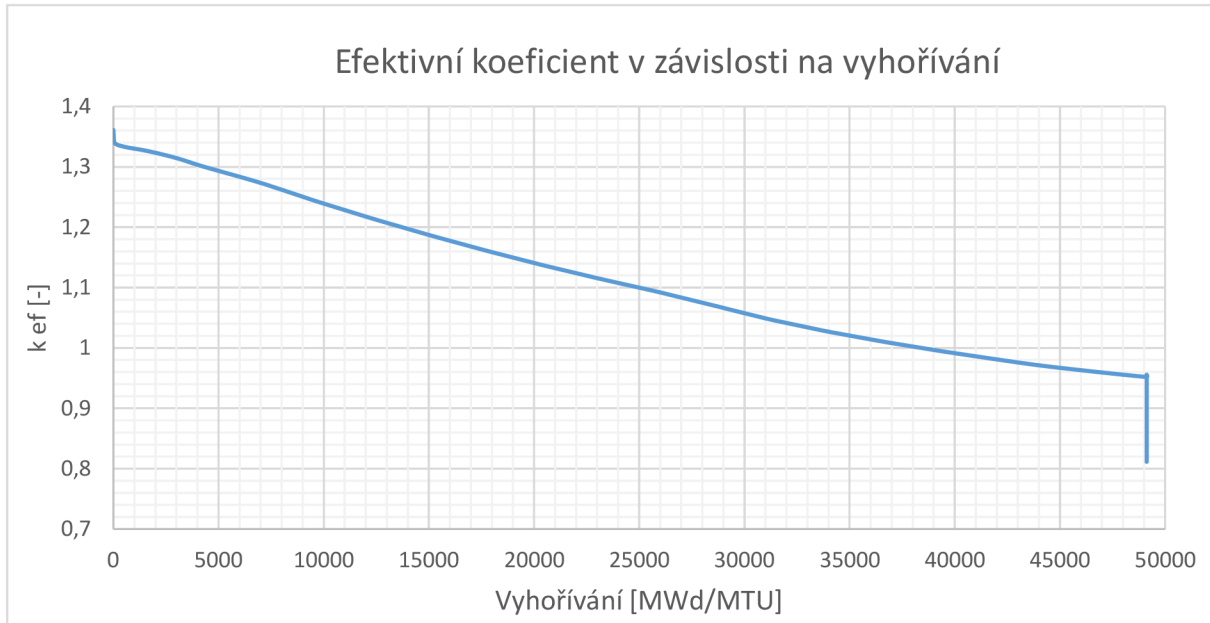
Obr. 7-6 k_{ef} pro palivo Gd-2+, 4 roky v reaktoru a 53 let uskladněné ve skladu VJP

Palivo Gd-2M má sice stejné obohacení jako palivo Gd-1, ale zde už počítáme s plně pětiletým palivovým cyklem. Tentokrát se efektivní koeficient dostal pod hodnotu 1, ještě když bylo palivo v reaktoru (viz *Obr. 7-7*). Při vyvážení paliva z reaktoru byl $k_{ef} = 0,968$ a v roce 2065 $k_{ef} = 0,809$. Toto palivo v roce 2065 dosáhne nejnižší hodnoty k_{ef} .



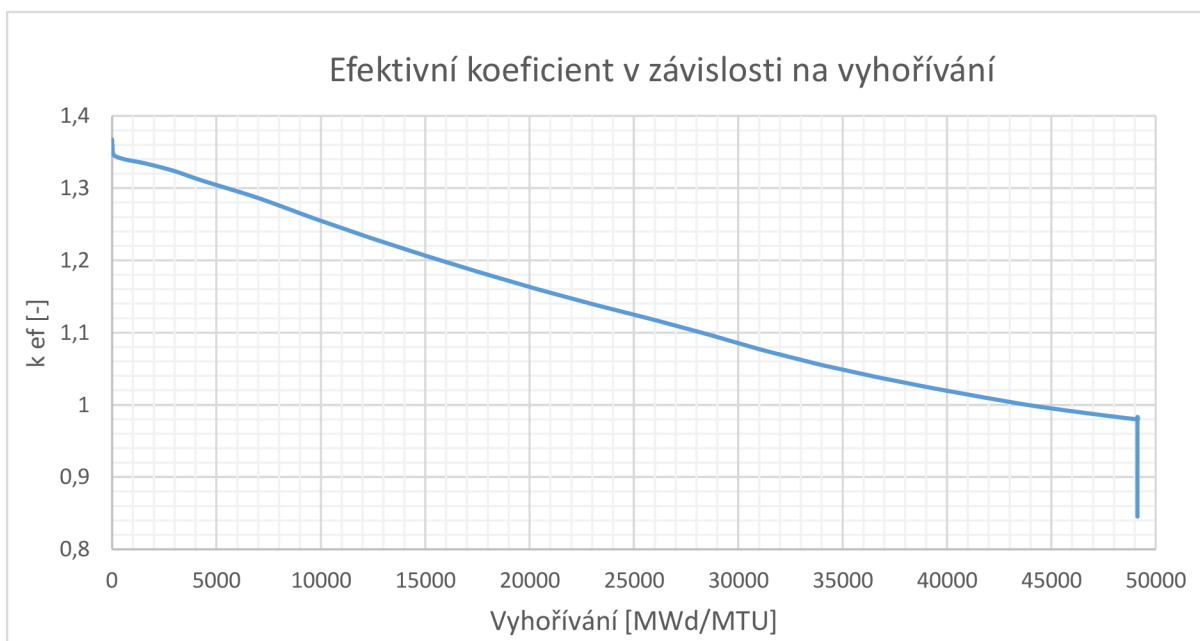
Obr. 7-7 k_{ef} pro palivo Gd-2M, 5 let v reaktoru a 49 let uskladněné ve skladu VJP

U paliva Gd-2M+ (Obr. 7-8) došlo ke zvětšení průměru palivové tablety. Průběh k_{ef} je téměř stejný, jako u předchozího paliva Gd-2M. Při vyvezení paliva z reaktoru je $k_{ef} = 0,968$ a v roce 2065 je $k_{ef} = 0,811$.



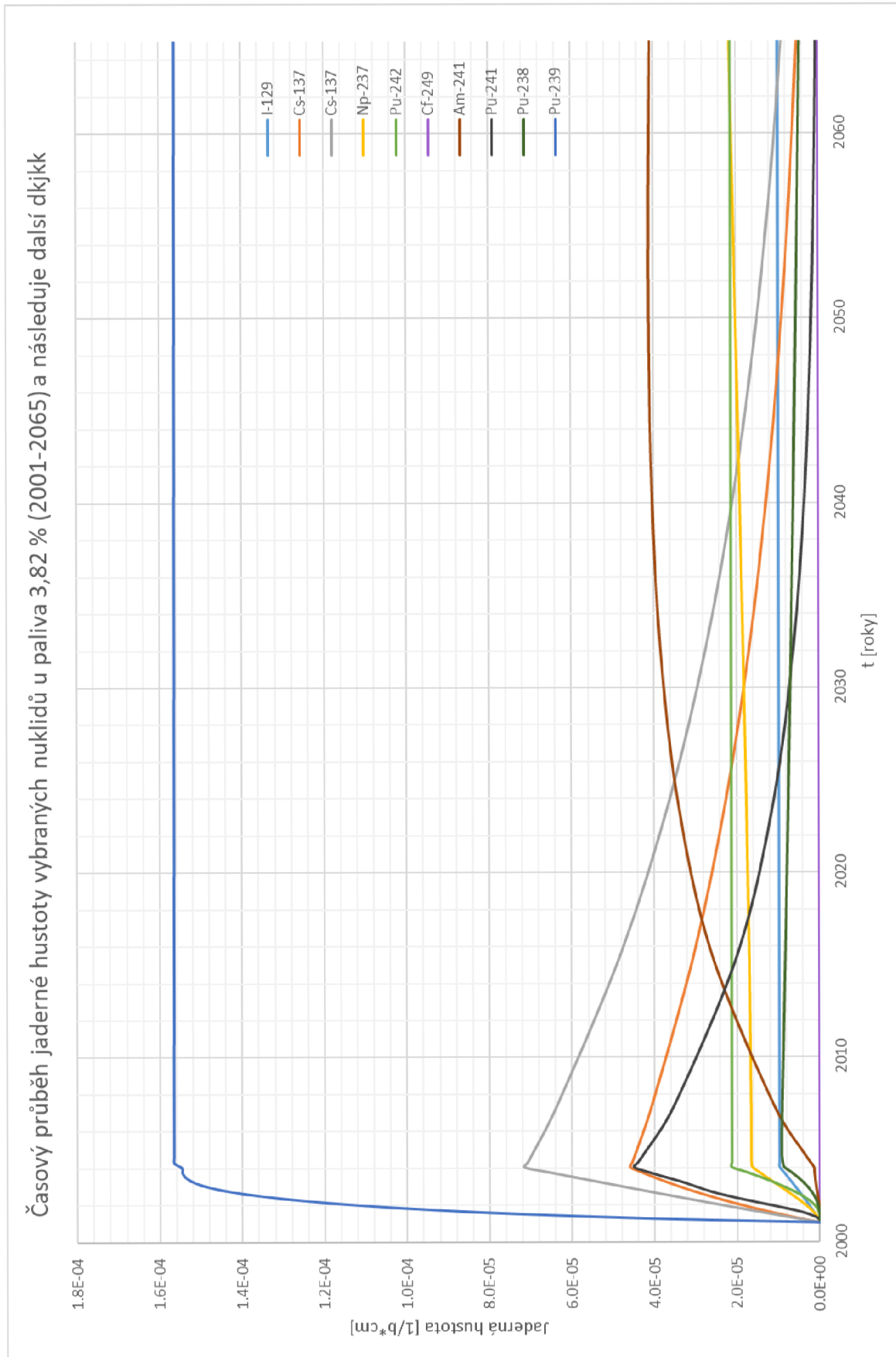
Obr. 7-8 k_{ef} pro palivo Gd-2M+, 5 let v reaktoru a 44 let uskladněné ve skladu VJP

Poslední palivo Gd-2X, které je aktuálně zavážené do reaktorů jaderné Elektrárny Dukovany, bude nejkratší dobu ve skladu VJP. Když porovnáme k_{ef} v průběhu vyhořívání prvního uvažovaného paliva, Obr. 7-3 s tímto Obr. 7-9, zjistíme, že jaderné palivo bylo v začátcích provozu podceňované a prodloužení palivových cyklů bylo efektivní a velmi ekonomické rozhodnutí. Prodlužováním cyklů se snižuje u VJP k_{ef} , z čehož vyplývá, že se snižuje počet neutronů, které vstupem do jader prostřednictvím jaderné reakce vyvolávají sekundární ionizaci.

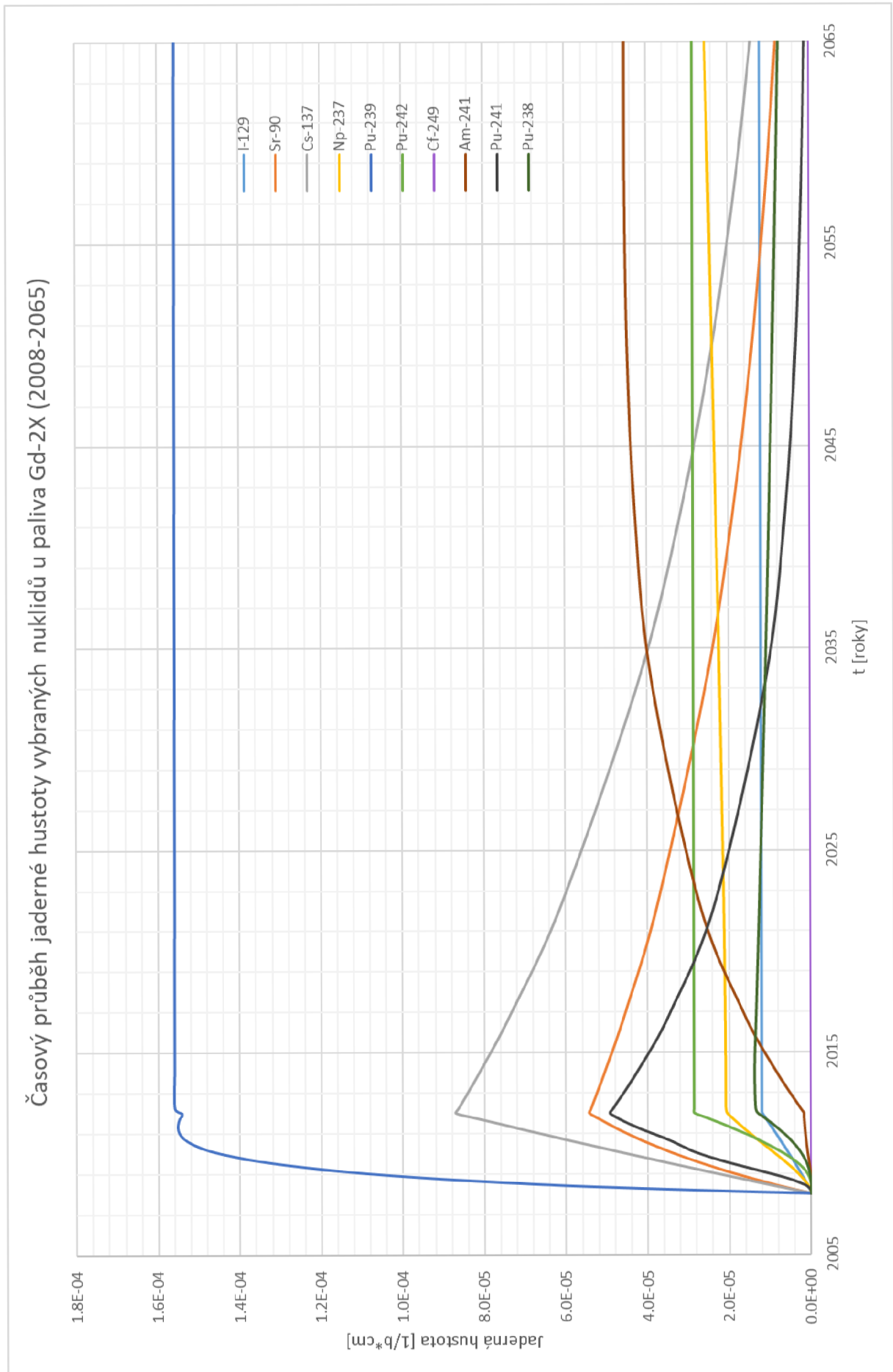


Obr. 7-9 k_{ef} pro palivo Gd-2X, 5 let v reaktoru a 38 let uskladněné ve skladu VJP

7.4.2 Porovnání podle délky palivového cyklu

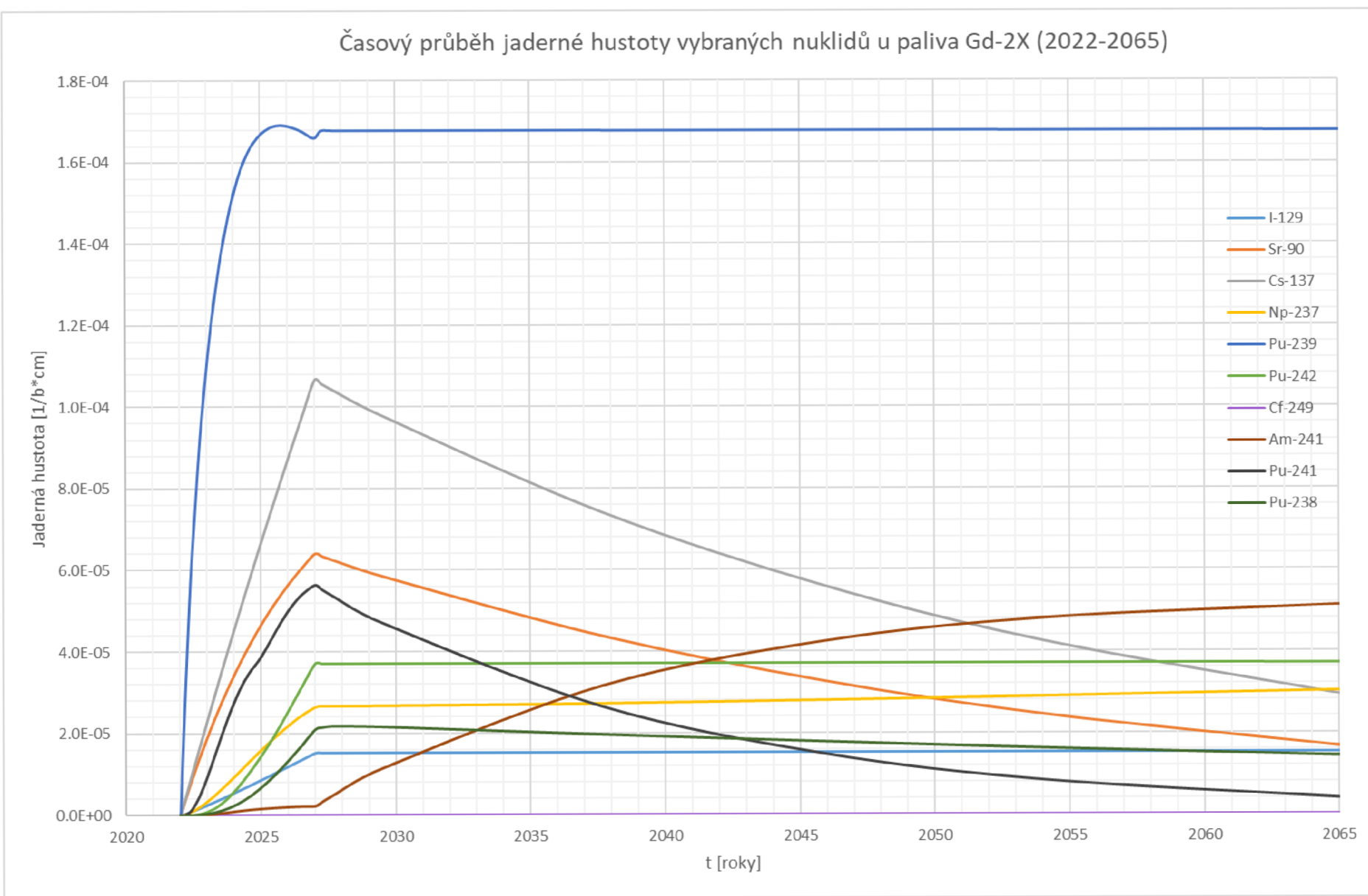


Obr. 7-10 Průběh jaderné hustoty vybraných nuklidů, tříletý palivový cyklus

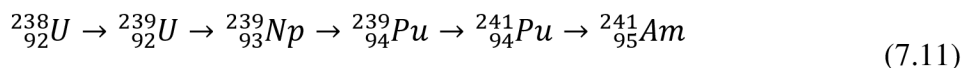


Obr. 7-11 Průběh jaderné hustoty vybraných nuklidů, čtyřletý palivový cyklus

Obr. 7-12 Průběh jaderné hustoty vybraných nuklidů, pětiletý palivový cyklus



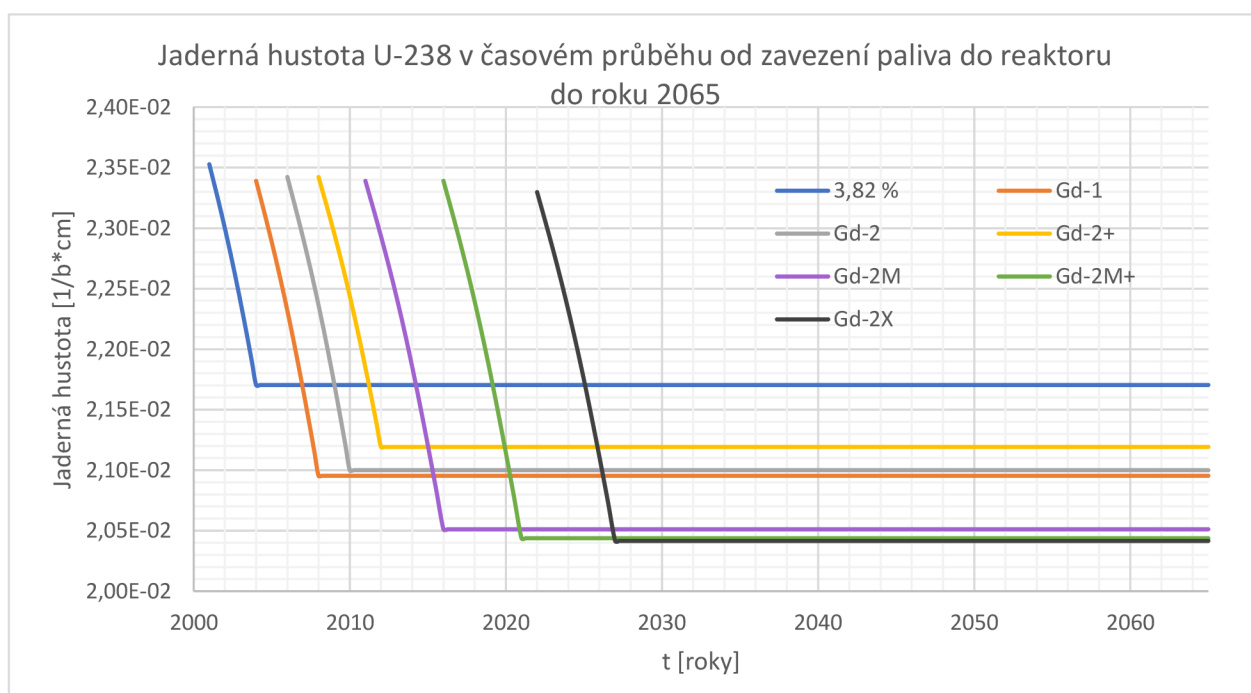
Průběhy jaderných hustot jednotlivých nuklidů na *Obr. 7-10*, *Obr. 7-11* a *Obr. 7-12* dokazují předpokládané poločasy přeměny z *Tab. 7-4*. Většina vybraných nuklidů dosáhne nejvyšší hodnoty právě na konci palivového cyklu, a poté se rozpadá každý podle svého poločasu přeměny. Nuklid, který se tomuto průběhu odlišuje, je ^{241}Am . Nevzniká přímo z uranu, ale z ^{239}Pu , a to podle následujícího jaderného procesu dle [28]:



Tudíž množství ^{241}Am začne více narůstat, až když začne docházet k rozpadům atomů ^{241}Pu . Maximální hodnoty dosáhne až přibližně za 70 let od vyvezení z reaktoru. [28] ^{241}Am je pro VJP velmi nebezpečné, protože je velice radioaktivní. Zároveň nuklid s nejvyšším počtem jader na cm^2 je po celou dobu ^{239}Pu , protože vzniká přeměnou ^{238}U , kterého je v palivu největší množství. Při porovnání celkového nárůstu jader nuklidů je z logiky věci jasné, že palivo, které bylo v reaktoru pouze tři roky, dosahuje nižších hodnot než palivo, které bylo v reaktoru pět let.

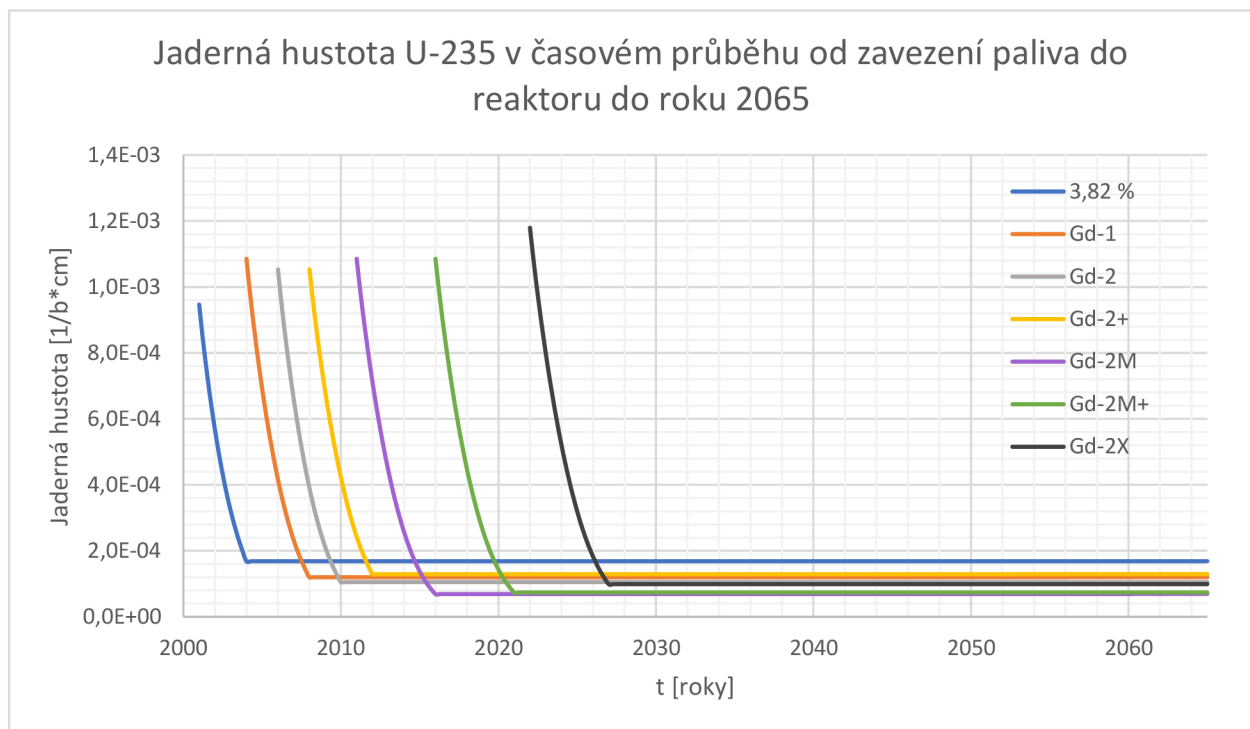
7.4.3 Porovnání jednotlivých nuklidů mezi typy paliva

V této kapitole budeme porovnávat jednotlivé nuklidy mezi stejnými sedmi druhy paliva, jako v předchozích kapitolách. Porovnááme 12 vybraných nuklidů s tím, že jsou použity dva různé způsoby průběhů. Průběh na *Obr. 7-13* ukazuje první způsob vynesení, a to takový, že na vodorovné ose jsou roky. Průběhy jaderných hustot pro jednotlivá paliva jsou od sebe „odskočená“ z důvodu rozestupů mezi použitými palivy. Jsou vyneseny od zavezení paliva do reaktoru po rok 2065, proto všechny průběhy končí ve stejném bodě. Nicméně rozdíly mezi nimi jsou i přesto znatelné. U ^{238}U jsou průběhy rozděleny podle délky palivových cyklů. U všech paliv se začínalo na téměř stejné hodnotě jaderné hustoty ^{238}U , avšak na konci palivového cyklu jsou jaderné hustoty rozdílné. Nejnižší jsou u posledních tří typů paliva, které byly zaváženy v pětiletých palivových cyklech.



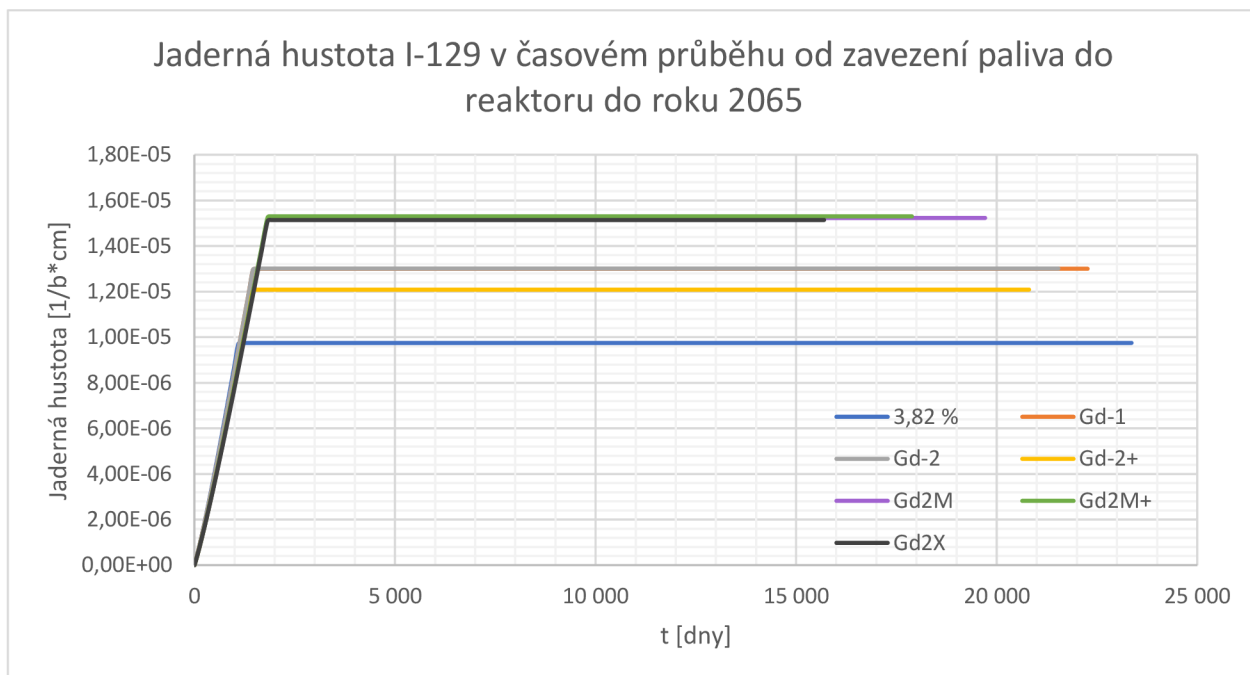
Obr. 7-13 Časový průběh jaderné hustoty ^{238}U

Na rozdíl od ^{238}U u ^{235}U nejsou tak znatelné rozdíly mezi jednotlivými palivy (viz Obr. 7-14). Zde bylo použito stejné časové vynesení jako u ^{238}U .



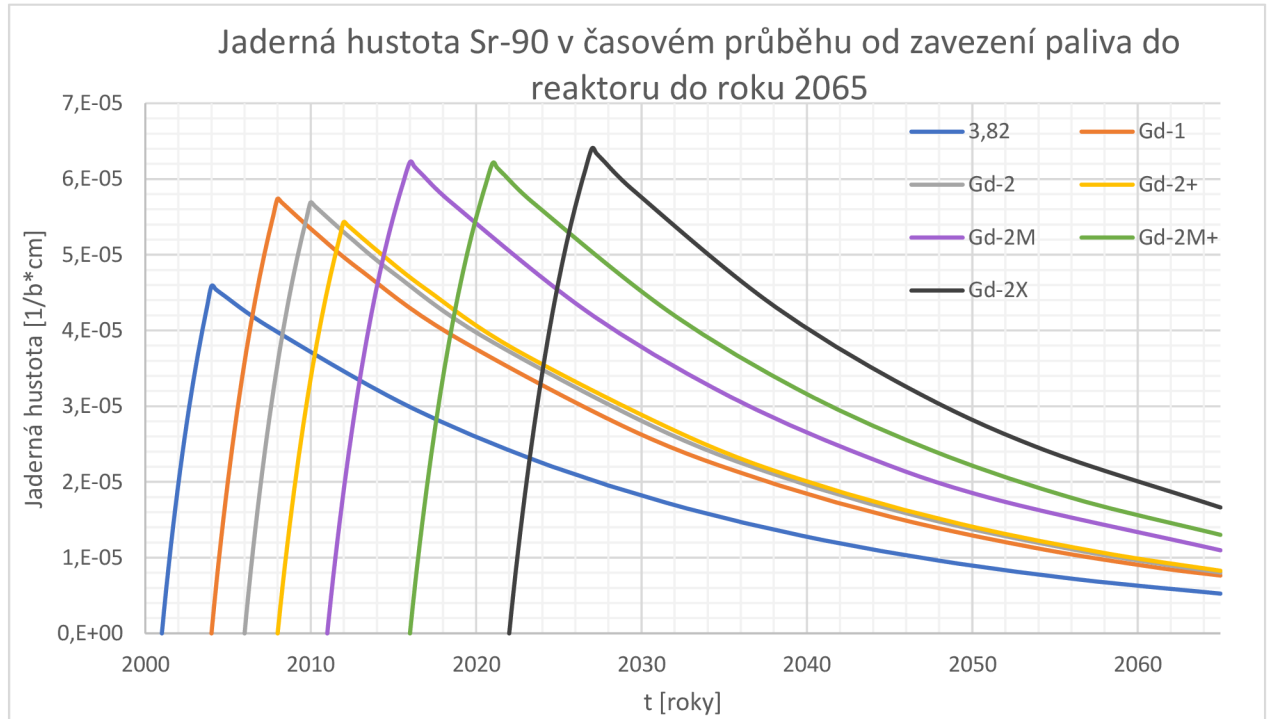
Obr. 7-14 Časový průběh jaderné hustoty ^{235}U

Dalším porovnávaným nuklidem je ^{129}I . Tyto průběhy jsou vynášeny druhým způsobem. Jsou přímo porovnávány mezi sebou v závislosti na dnech od zavezení do reaktoru, a proto každý končí na jiném počtu dnů. Například, jak je patrné z Obr. 7-15, poslední používané palivo Gd-2X bude nejkratší dobu ve skladu VJP. Izotop jódu ^{129}I má poločas rozpadu $1,57 \cdot 10^7$ let. Proto po celou dobu uskladnění zůstane jeho koncentrace stále stejně nebezpečná.

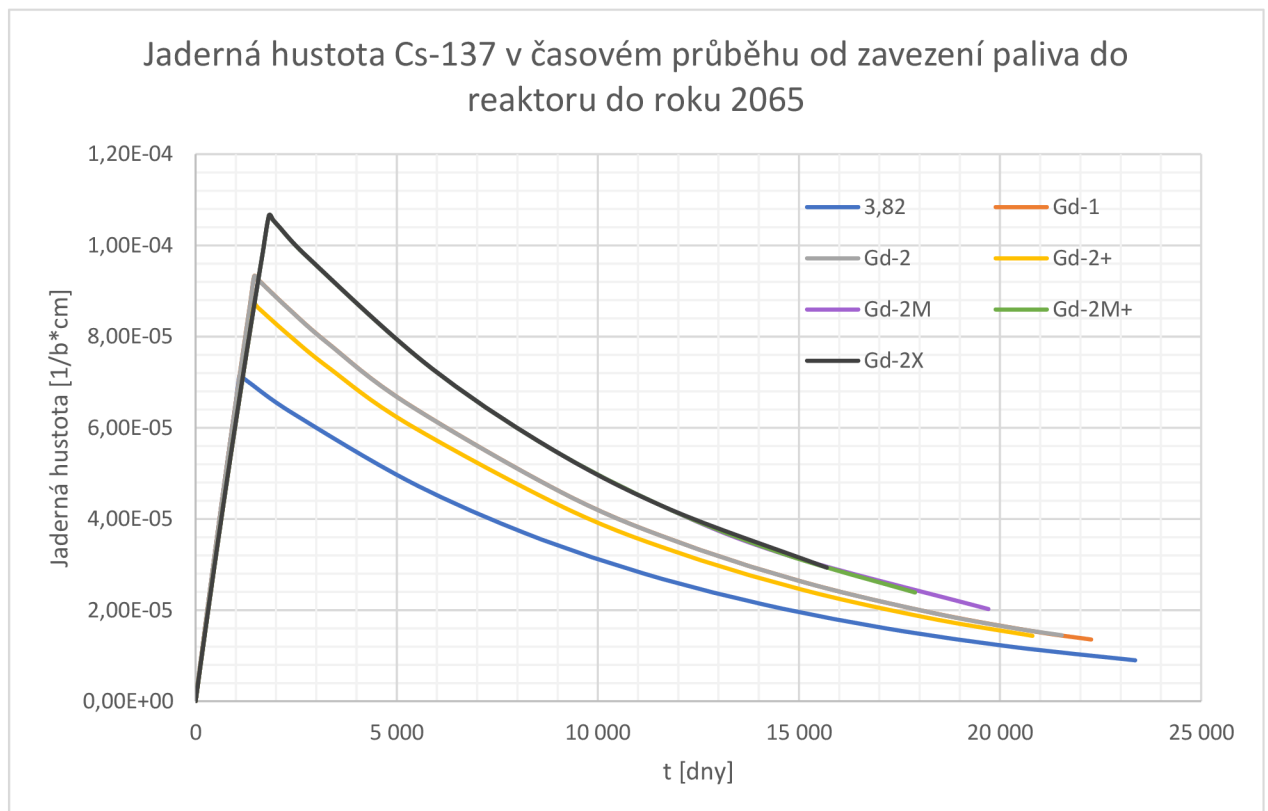


Obr. 7-15 Časový průběh jaderné hustoty ^{129}I

Na Obr. 7-16 je koncentrace izotopu ^{90}Sr vynesena prvním způsobem. ^{90}Sr má poločas rozpadu 28,79 let, tudíž vidíme, že u prvního použitého paliva z roku 2001, se jeho jaderná hustota do roku 2065 znatelně sníží. Stejně tak ^{137}Cs , které má jen o necelé dva roky delší poločas rozpadu a je vyneseno druhým způsobem na Obr. 7-17.

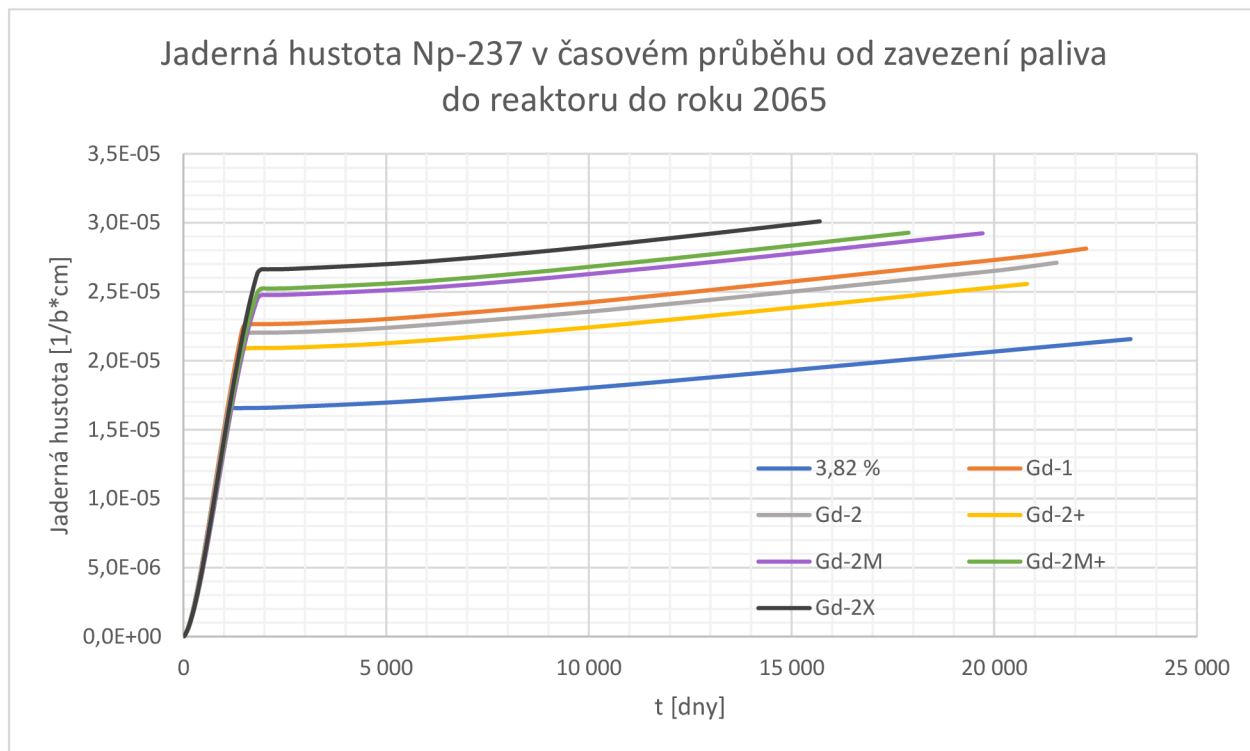


Obr. 7-16 Časový průběh jaderné hustoty ^{90}Sr

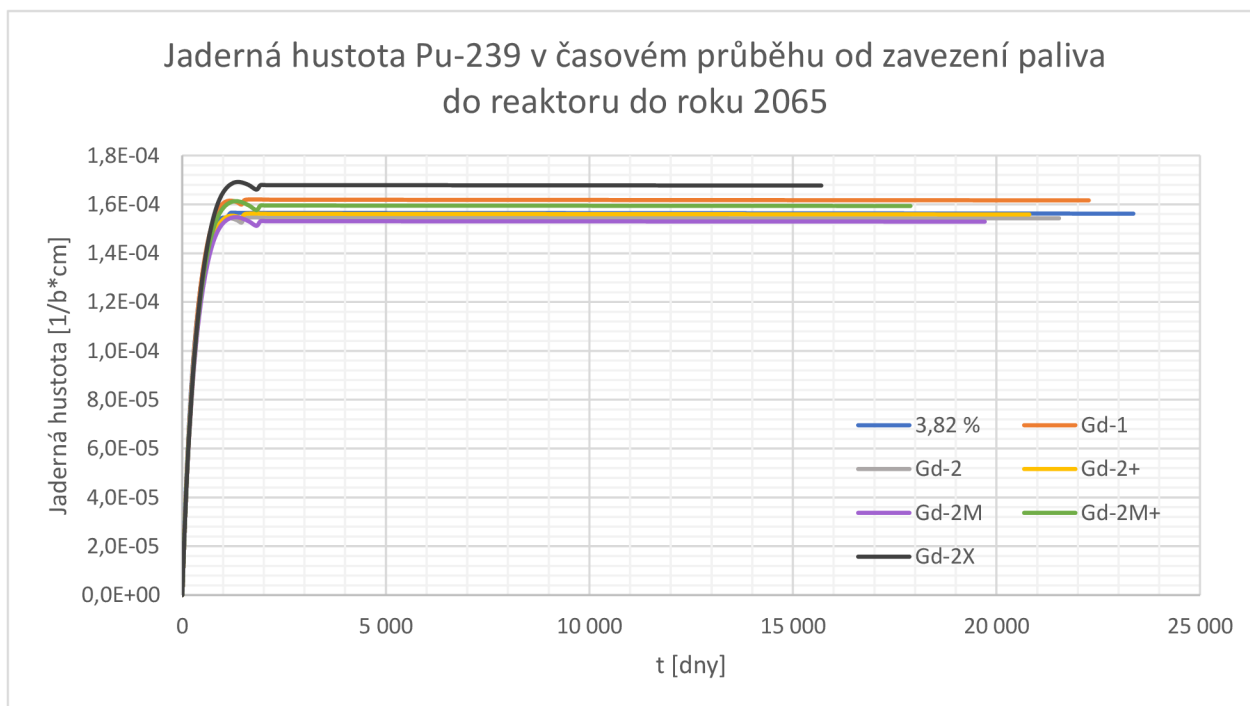


Obr. 7-17 Časový průběh jaderné hustoty ^{137}Cs

Naopak jaderná hustota ^{237}Np během uskladnění pomalu vzrůstá. Ve vyhořelém jaderném palivu je ^{237}Np rozpadovým produktem ^{241}Am , ale jeho koncentrace vzrůstá pomaleji než ^{241}Am , viz Obr. 7-18. Ze všech izotopů neptunia má nejdelší poločas rozpadu a je určen jako jeden z nejvíce aktivních a nebezpečných nuklidů ve VJP. [29] Nejvyšší jadernou hustotu má z vybraných nuklidů ^{239}Pu , viz Obr. 7-19, které má poločas rozpadu 24 110 let. V použitém jaderném palivu je cca 1 % Pu, z něhož je 50 % právě ^{239}Pu . Používá se k výrobě jaderných zbraní.

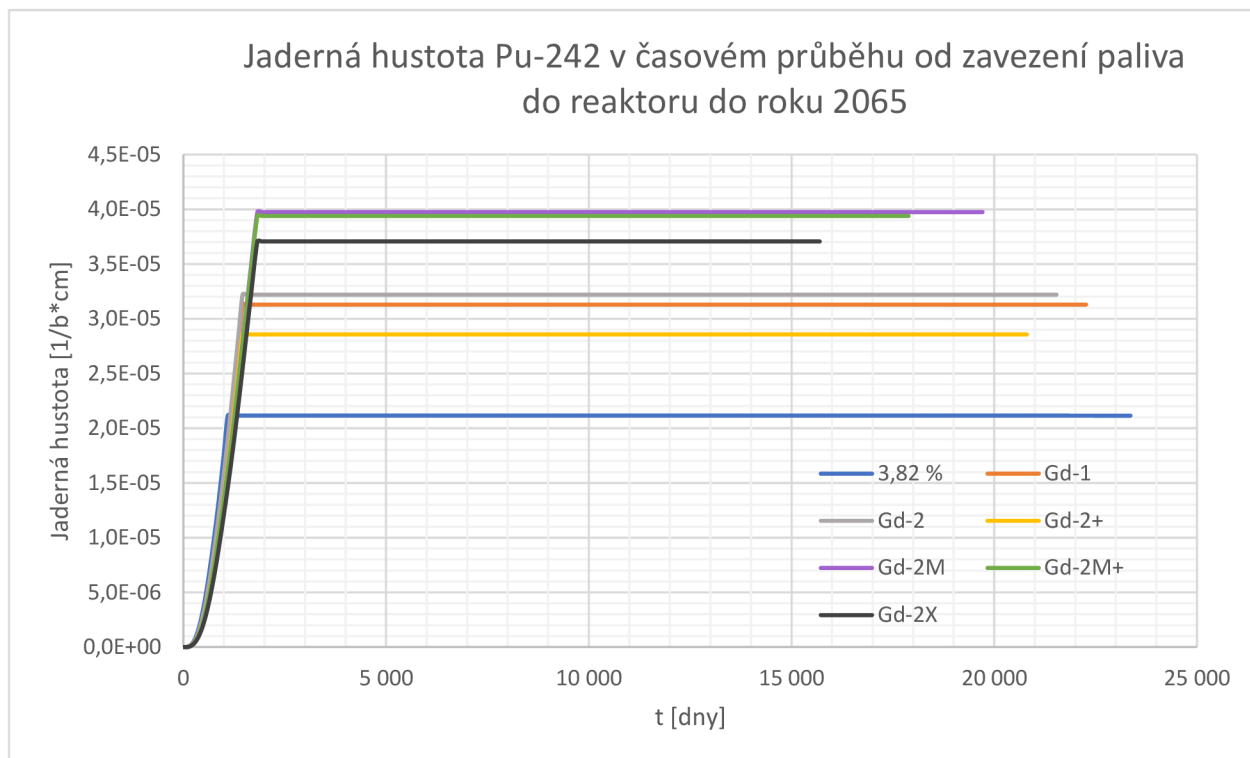


Obr. 7-18 Časový průběh jaderné hustoty ^{237}Np

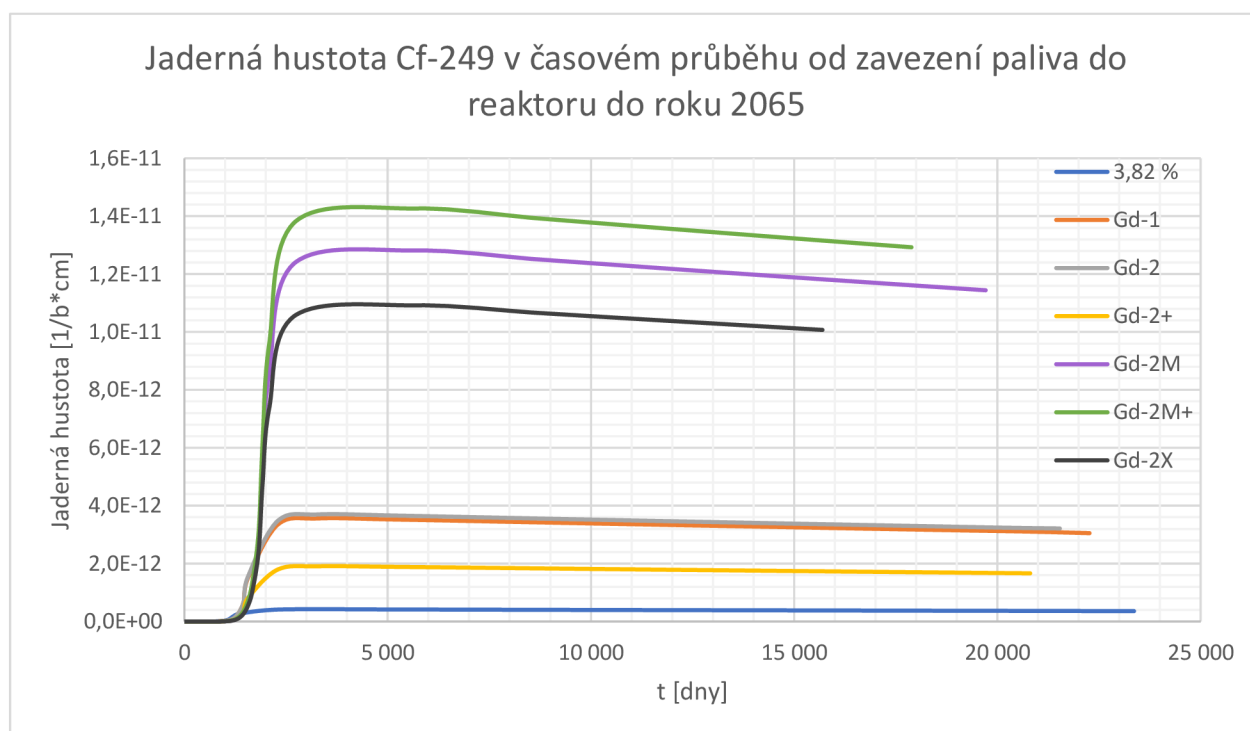


Obr. 7-19 Časový průběh jaderné hustoty ^{239}Pu

Plutonium ^{242}Pu není štěpitelné a je mnohem méně radioaktivní než ^{239}Pu , ale má několiknásobně delší poločas rozpadu. Na *Obr. 7-20* vidíme, že tentokrát není nejobsáhlejší v posledním palivu, ale v palivu Gd-2M, při kterém došlo ke zvýšení výkonu reaktoru, ale stále nebyl odstraněn centrální otvor tabletek. Dalším nuklidem je ^{249}Cf (viz *Obr. 7-21*), kterého vzniká nejméně z vybraných nuklidů, ale má nejvyšší energii přeměny. Rozpadá se přeměnou α s energií 6,296 MeV. Svou energii snižuje ionizováním prostředí. Jeho poločas rozpadu je 351 let.

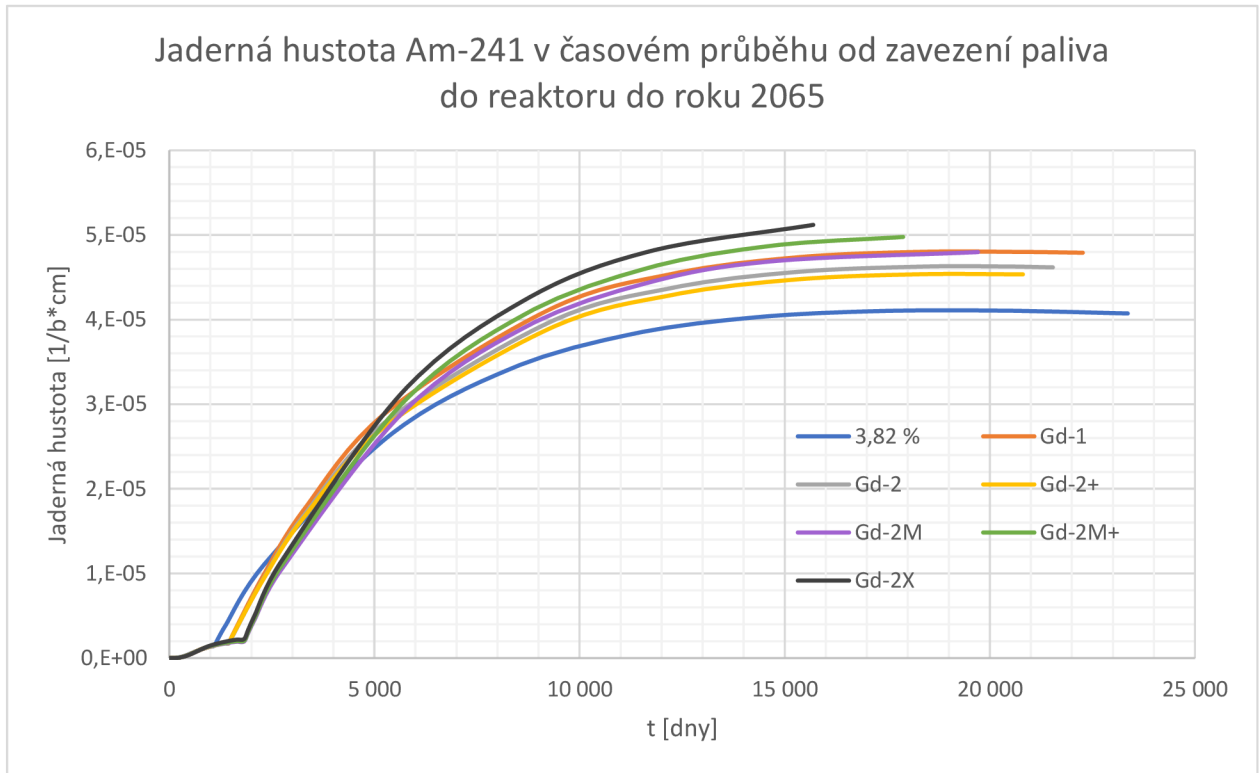


Obr. 7-20 Časový průběh jaderné hustoty ^{242}Pu

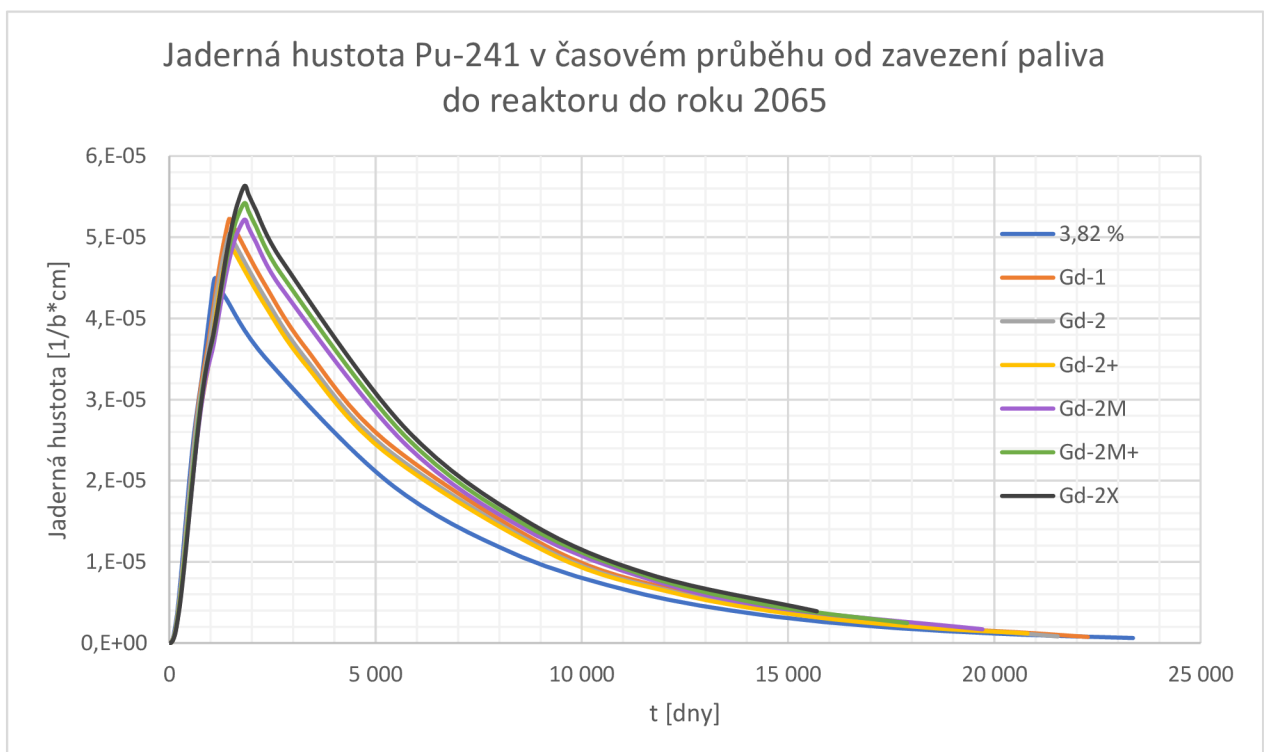


Obr. 7-21 Časový průběh jaderné hustoty ^{249}Cf

Jak již bylo řečeno ^{241}Am (viz Obr. 7-22) je velice nebezpečné z pohledu uskladňování VJP, protože se rozpadá prostřednictvím přeměny α s velkou energií doprovázené zářením gama. Nejvyšších hodnot dosáhne 70 let po vyvezení paliva z reaktoru. Na Obr. 7-23 je časový průběh koncentrace ^{241}Pu . Má krátký poločas rozpadu 14,35 let, tudíž u všech typů paliva bude jeho koncentrace v roce 2065 téměř nulová.

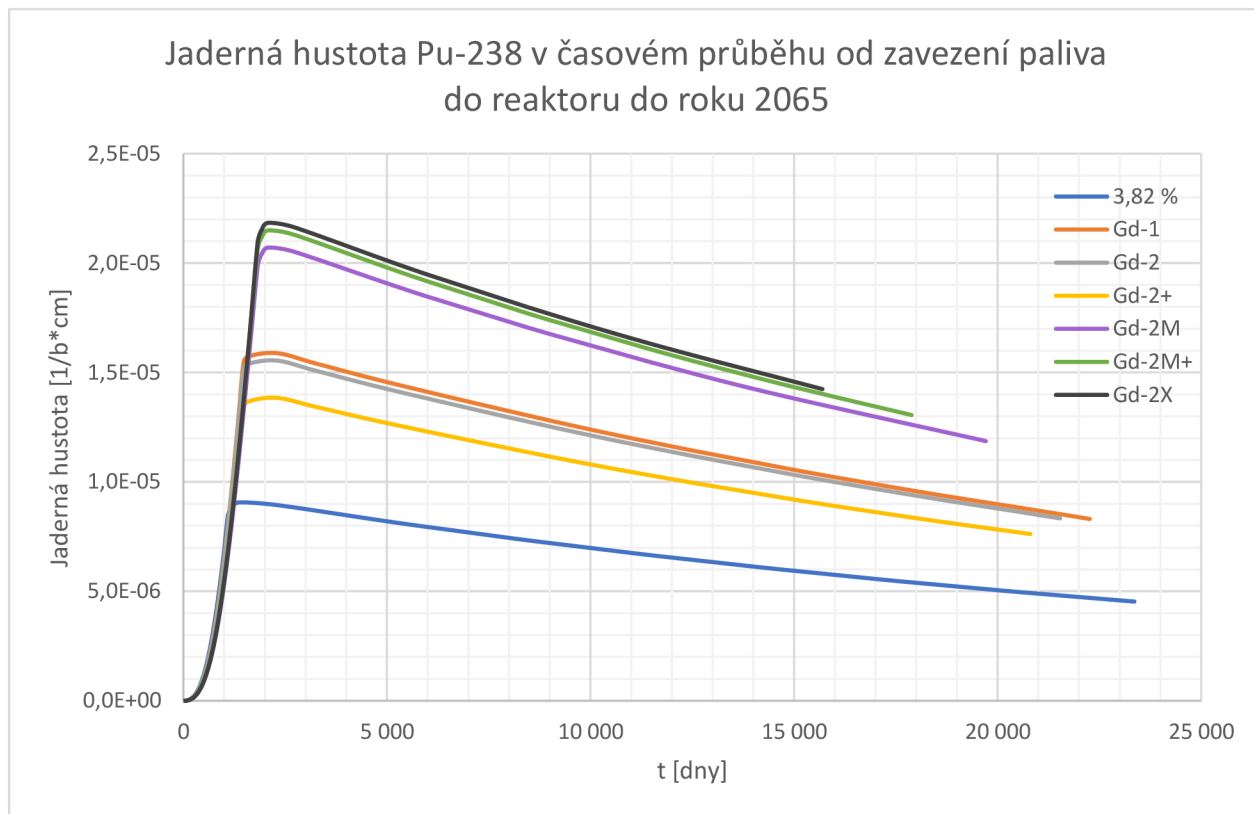


Obr. 7-22 Časový průběh jaderné hustoty ^{241}Am



Obr. 7-23 Časový průběh jaderné hustoty ^{241}Pu

Posledním porovnávaným izotopem plutonia je ^{238}Pu (viz Obr. 7-24), které se rozpadá prostřednictvím přeměny α s velkou energií 5,593 MeV na ^{234}U , tedy je také velmi nebezpečné z pohledu VJP, ale jeho poločas rozpadu je 87,7 let, takže poměrně „rychle“ dochází k jeho zanikání.



Obr. 7-24 Časový průběh jaderné hustoty ^{238}Pu

8 ZÁVĚR

Bakalářská práce měla za úkol podrobně prozkoumat palivový cyklus od těžby uranové rudy až po uložení použitého jaderného paliva do hlubinného úložiště. Dále měla obsahovat popis veličin jaderné fyziky a navázat na jednotlivé radioaktivní rozpady. Velice důležité pro zbytkový výkon bylo zmapovat poločasy a typy rozpadu látek, které obsahuje použité jaderné palivo, a které jsou nejnebezpečnější.

Pomocí programu UwB_1 bylo odsimulováno sedm druhů paliv používaných v jaderné Elektrárně Dukovany. Pro tato paliva bylo nejdříve nutné vypočítat a shromáždit všechny potřebné parametry pro zadávání do vstupního dokumentu k programu. Byly porovnány efektivní multiplikační koeficienty jednotlivých paliv v průběhu vyhořívání. Počáteční vysoké hodnoty k_{ef} jsou způsobeny zanedbáním vyhořívajících absorbátorů. U VJP k_{ef} pouze klesá, protože vznikající prvky, jako ^{241}Am a ^{237}Np , na sebe vážou neutrony a výkon je nulový. U posledních tří paliv kleslo k_{ef} ještě před vytažením paliva z reaktoru pod hodnotu 1, tedy na podkritický stav. Což by samozřejmě v reálném reaktoru nastat nemělo. Chyba byla způsobena zanedbáním vyhořívajících absorbátorů na bázi gadolinia, kyseliny borité v chladivu, a hlavně neuvažováním doplňování čerstvého paliva v průběhu odstávek. Prodloužení palivových cyklů bylo možné díky změně vkládání čerstvého paliva místo na okraj aktivní zóny, směrem ke středu aktivní zóny, a zavedením vyhořívajících absorbátorů, tudíž pro lepší výsledky doporučuji příště s nimi počítat. Dále bylo porovnáno několik vybraných nuklidů, které jsou nebezpečné z pohledu VJP. Největší změny nastaly vždy při prodloužení palivového cyklu. S prodlužováním délky palivového cyklu docházelo k vyššímu, tedy lepšímu vyhoření paliva, čímž se však zvýšila koncentrace směsi štěpných produktů.

Vyhořelé jaderné palivo je jedním z nejnebezpečnějších materiálů, které se na světě vyskytují. Je potřeba jej neustále chladit z důvodu uvolňování tepla a také k utlumení záření stínit. Jeho dlouhodobá vysoká reaktivita a toxicita znamenají velké riziko pro veřejnost. Přestože se časem radioaktivní izotopy rozpadají a aktivita tedy postupně klesá, bude i po 10 000 letech VJP stále nebezpečné. Vyhořelé jaderné palivo z elektráren tvoří sice jen 1 % objemu celkového jaderného odpadu na světě, ale zároveň obsahuje z veškerých RAO 90 % veškeré radioaktivity.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MATEJKA, Karel, Vratislav FAJMAN, Miloslav HRON, Antonín KOLROS a Stanislav POLÁCH. *Vyhořelé jaderné palivo*. Svazek 5. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT Praha: Tiskárna Kleinwächter, 1996. ISBN 8070783524.
- [2] SÚJB: Jaderná bezpečnost - Jaderná zařízení v ČR. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. Praha 1, říjen 2014 [cit. 2019-11-6]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/jaderna-zarizeni/jaderna-zarizeni-v-cr/>
- [3] DOLEŽAL, Jaroslav. *Jaderné a klasické elektrárny*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 9788001049365.
- [4] World nuclear association: Nuclear fuel and its Fabrication. *World nuclear association* [online]. London, England, 2019, December 2019 [cit. 2019-11-06]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/fuel-fabrication.aspx>
- [5] RAČEK, Jiří. *Jaderné elektrárny*. Brno: Vysoké učení technické, 2002. Učební texty vysokých škol. ISBN 8021421584.
- [6] World nuclear association: Mixed oxid (MOX) Fuel. *World nuclear association* [online]. London, England, 2017, October 2017 [cit. 2019-11-6]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuel-mox.aspx>
- [7] Periodická soustava prvků dle IUPAC. *Osobní webové stránky Ladislava Nádherného na VŠCHT Praha* [online]. Praha: VŠCHT Praha, 2017 [cit. 2019-11-06]. Dostupné z: <http://web.vscht.cz/~nadhernl/psp.html>
- [8] SMOLA, L. *Model vyhořívání jaderného paliva v průběhu palivové kampaně*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Katovský, Ph.D.
- [9] BLAŽKOVÁ, MUNI SCI: PHYSICS.MUNI.CZ. *MUNI SCI* [online]. Masarykova univerzita Brno, 2019, [cit. 2019-11-06]. Dostupné z: <https://www.physics.muni.cz/~blazkova/dp/Reaktor4.htm>
- [10] DLOUHÝ, Zdeněk. *Nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2009. ISBN 9788021436299.
- [11] SMETANA, J. *Jaderná paliva pro tlakovodní jaderné reaktory*. Brno, 2014. 55 s. Bakalářská práce. Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně
- [12] Skupina ČEZ: *Historie a současnost EDU* [online]. EDU: Skupina ČEZ, 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/edu/historie-a-soucasnost>
- [13] BURKET, Daneš. *Palivové vsázky se zdokonaleným palivem na Jaderné elektrárně Dukovany* [online]. Dukovany, 2003 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <http://www.danes.burket.cz/files/burketdp.pdf>. Dizertační práce. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze. Vedoucí práce Prof. Ing. Karel Matějka, CSc.
- [14] Skupina ČEZ: *Technologie a zabezpečení. ČEZ, a. s.* [online]. Duhová 2/1444, Praha 4, 2020, 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní->

- zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/edu/technologie-a-zabezpeceni
- [15] OENERGETICE.cz Jaderné elektrárny: Dukovany fungují od 1985, kryjí pětinu české spotřeby elektřiny. *OM Solutions s.r.o.* [online]. 1. 5. 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderna-elektrarny/dukovany-funguji-od-roku-1985-kryji-petinu-ceske-spotreby-elektriny>
- [16] BURKET, Daneš a Stanislav DVOŘÁK. Zkušenosti s palivem s vyhořívajícími absorbátory na JE Dukovany. *Spolky.csvts.cz* [online]. 2005 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <http://spolky.csvts.cz/cns/news06/060223b.htm>
- [17] PENZINGER, Pavel. *Analýza zdrojového členu vyhořelého jaderného paliva JE Dukovany pro hlubinné úložiště s uvažováním variant LTO* [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=172832. Diplomová práce. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií UEEN VUT. Vedoucí práce Ing. Karel Katovský, Ph.D.
- [18] LOVECKÝ, Martin. *Zvyšování účinnosti jaderného paliva použitím vyhořívajících absorbátorů*. Plzeň, 2016. Dizertační práce. Fakulta elektroenergetiky a ekologie ZČU. Vedoucí práce Doc. Ing. Radek Škoda, Ph.D.
- [19] *Charakteristika paliva Gd-2X, parametry, osobní konzultace s panem Ing. Karlem Katovským, Ph.D.*
- [20] LOVECKÝ, Martin. *Zvyšování účinnosti jaderného paliva použitím vyhořívajících absorbátorů* [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/68334775-Autoreferat-dizertacni-prace.html>. Autoreferát dizertační práce. Fakulta elektrotechnická Katedra elektroenergetiky a ekologie. Vedoucí práce Doc. Ing. Radek Škoda, Ph.D.
- [21] MELKA, Jiří. *Porovnání výpočetních kódů pro vyhořívající absorbátory* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/18765/1/Melka_Jiri_-_Diplomova_prace.pdf. Diplomová práce. Fakulta elektrotechnická ZČU. Vedoucí práce Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.
- [22] LOVECKÝ, Martin. *UwB1 User's Manual*. Plzeň, 2017. Manuál. Faculty of electrical engineering univerzity of west Bohemia.
- [23] The Lund/LBNL Nuclear Data Search: version 2.0. *Scout Report* [online]. Lund University Sweden: LBNL, Berkeley, USA, 1999, 29. 4. 1998 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/listnuc.asp?sql=&Z=40>
- [24] ULLMANN, Vojtěch. *AstroNuklFyzika: Jaderné reakce a jaderná energie* [online]. Ostrava: Klinika nukleární medicíny FNŠP [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika3.htm>
- [25] Enpedie: Štěpná řetězová reakce. *Enpedie.cz* [online]. Tým Centra Výzkumu Řež, 21. 6. 2012 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: http://enpedie.cz/wiki/Štěpná_řetězová_reakce
- [26] Wikipedia: Fission product yield. *Wikipedia.org* [online]. 20. 2. 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fission_product_yield#cite_ref-5
- [27] GRAY, Theodore, Nick MANN a Max WHITBY. Periodictable. *Periodictable.com* [online]. 2017, [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://periodictable.com/Isotopes/094.241/index.dm.html>

- [28] Americium-241. *Wikipedia.org* [online]. 13. 4. 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Americium-241>
- [29] Isotopes of neptunium: Neptunium-237. *Wikipedia.org* [online]. 8. 6. 2020 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Isotopes_of_neptunium#Neptunium-237

PŘÍLOHY

Příloha A - Vstupní dokument pro palivo 3,82 %

```

4          prl_threads - number of threads
10000     npg - number of neutrons per generation
5         nsng - number of skipped neutron generations
105      tng - total number of neutron generations
2        n_ccregion - number of concentric cylinder regions
0.38 0.455 rccregion - concentric cylinder region radii
0.6375   hpitch - half pitch
2        lat - lattice type (1=square, 2=hexagonal)
30       idepl - number of depletion intervals
2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01
2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
depl_power - irradiation power
1.00000E+00 2.00000E+00 3.00000E+00 4.00000E+00 5.00000E+00 1.00000E+01 2.00000E+01 3.00000E+01 5.00000E+01 9.50000E+01
1.95000E+02 2.95000E+02 3.95000E+02 4.95000E+02 5.95000E+02 6.95000E+02 7.95000E+02 8.95000E+02 9.95000E+02 1.09500E+03
1.19500E+03 1.36000E+03 2.36000E+03 5.36000E+03 8.36000E+03 1.13600E+04 1.43600E+04 1.73600E+04 2.03600E+04 2.33600E+04
depl_time - irradiation days
1 0 0
1 2 2          depl_type - regions depletion (0=no depletion, 1=power depletion, 2=flux depletion)
900.0 625.0 578.0 reg_libtype - regions transport/burnup libraries position
"/mnt/c/UWB/testcases/uwb1libs/" maxwell_kelvin - regions maxwell temperatures
3          folder with uwbi libraries
12         number of nuclides in region 1 (fuel)
2         number of nuclides in region 2 (clad)
         number of nuclides in region 3 (mod)
         nuclear densities in region 1 (fuel)
         15      86      80160  4.88250E-02
         362    3514   922350  9.46420E-04
         365    3518   922380  2.35280E-02
         117    1039   400900  2.19170E-02 nuclear densities in region 2 (clad)
         118    1041   400910  4.77956E-03
         119    1042   400920  7.30565E-03
         121    1044   400940  7.40363E-03
         123    1046   400960  1.19276E-03
         124    1081   410930  4.22623E-04
         304    2594   721740  1.05594E-08
         305    2596   721760  3.47139E-07
         306    2597   721770  1.22753E-06
         307    2600   721780  1.80037E-06
         308    2603   721790  8.98867E-07
         309    2606   721800  2.31514E-06
         1      1      10010  5.01551E-02 nuclear densities in region 3 (mod)
         15      86      80160  2.50775E-02
eof

```

Příloha B - Vstupní dokument pro palivo Gd-1

```

4          prl_threads - number of threads
10000      npg - number of neutrons per generation
5          nsng - number of skipped neutron generations
105        tngng - total number of neutron generations
2          n_ccregion - number of concentric cylinder regions
0.38 0.455 rccregion - concentric cylinder region radii
0.6375     hpitch - half pitch
2          lat - lattice type (1=square, 2=hexagonal)
33         idepl - number of depletion intervals
2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01
2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01
2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
1.00000E+00 2.00000E+00 3.00000E+00 4.00000E+00 5.00000E+00 1.00000E+01 2.50000E+01 6.00000E+01 1.10000E+02 1.60000E+02
2.60000E+02 3.60000E+02 4.60000E+02 5.60000E+02 6.60000E+02 7.60000E+02 8.60000E+02 9.60000E+02 1.06000E+03 1.16000E+03
1.26000E+03 1.36000E+03 1.46000E+03 1.56000E+03 2.29200E+03 3.29200E+03 5.29200E+03 9.29200E+03 1.22920E+04 1.52920E+04
1.82920E+04 2.08050E+04 2.22650E+04 2.22650E+04
1 0 0      depl_time - irradiation days
1 2 2      depl_type - regions depletion (0=no depletion, 1=power depletion, 2=flux depletion)
reg_libtype - regions transport/burnup libraries position
900.0 625.0 578.0 maxwell_kelvin - regions maxwell temperatures
"/mnt/c/UWB/testcases/uwb1libs/" folder with uwb1 libraries
3          number of nuclides in region 1 (fuel)
12         number of nuclides in region 2 (clad)
2          number of nuclides in region 3 (mod)
15 86 80160 4.88250E-02 nuclear densities in region 1 (fuel)
362 3514 922350 1.08520E-03
365 3518 922380 2.33910E-02
117 1039 400900 2.19170E-02 nuclear densities in region 2 (clad)
118 1041 400910 4.77956E-03
119 1042 400920 7.30565E-03
121 1044 400940 7.40363E-03
123 1046 400960 1.19276E-03
124 1081 410930 4.22623E-04
304 2594 721740 1.05594E-08
305 2596 721760 3.47139E-07
306 2597 721770 1.22753E-06
307 2600 721780 1.80037E-06
308 2603 721790 8.98867E-07
309 2606 721800 2.31514E-06
1 1 10010 5.01551E-02 nuclear densities in region 3 (mod)
15 86 80160 2.50775E-02
eof

```

Příloha C - Vstupní dokument pro palivo Gd-2

```

4          prl_threads - number of threads
10000      npg - number of neutrons per generation
5          nsng - number of skipped neutron generations
105        tngng - total number of neutron generations
2          n_ccregion - number of concentric cylinder regions
0.38 0.455 rccregion - concentric cylinder region radii
0.6427     hpitch - half pitch
2          lat - lattice type (1=square, 2=hexagonal)
33         idepl - number of depletion intervals
2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01
2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01
2.88960E+01 2.88960E+01 2.88960E+01 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
1.00000E+00 2.00000E+00 3.00000E+00 4.00000E+00 5.00000E+00 1.00000E+01 2.50000E+01 6.00000E+01 1.10000E+02 1.60000E+02
2.60000E+02 3.60000E+02 4.60000E+02 5.60000E+02 6.60000E+02 7.60000E+02 8.60000E+02 9.60000E+02 1.06000E+03 1.16000E+03
1.26000E+03 1.36000E+03 1.46000E+03 1.56000E+03 2.29200E+03 3.29200E+03 5.29200E+03 9.29200E+03 1.22920E+04 1.52920E+04
1.82920E+04 2.02650E+04 2.15350E+04 2.15350E+04
1 0 0      depl_time - irradiation days
1 2 2      depl_type - regions depletion (0=no depletion, 1=power depletion, 2=flux depletion)
reg_libtype - regions transport/burnup libraries position
900.0 625.0 578.0 maxwell_kelvin - regions maxwell temperatures
"/mnt/c/UWB/testcases/uwb1libs/" folder with uwb1 libraries
3          number of nuclides in region 1 (fuel)
12         number of nuclides in region 2 (clad)
2          number of nuclides in region 3 (mod)
15 86 80160 4.88250E-02 nuclear densities in region 1 (fuel)
362 3514 922350 1.05300E-03
365 3518 922380 2.34230E-02
117 1039 400900 2.19170E-02 nuclear densities in region 2 (clad)
118 1041 400910 4.77956E-03
119 1042 400920 7.30565E-03
121 1044 400940 7.40363E-03
123 1046 400960 1.19276E-03
124 1081 410930 4.22623E-04
304 2594 721740 1.05594E-08
305 2596 721760 3.47139E-07
306 2597 721770 1.22753E-06
307 2600 721780 1.80037E-06
308 2603 721790 8.98867E-07
309 2606 721800 2.31514E-06
1 1 10010 5.01551E-02 nuclear densities in region 3 (mod)
15 86 80160 2.50775E-02
eof

```

Příloha D - Vstupní dokument pro palivo Gd-2+

```

4          prl_threads - number of threads
10000     npg - number of neutrons per generation
5         nsng - number of skipped neutron generations
105       tnng - total number of neutron generations
2         n_ccregion - number of concentric cylinder regions
0.38 0.455 rccregion - concentric cylinder region radii
0.6427   hpitch - half pitch
2        lat - lattice type (1=square, 2=hexagonal)
32       idepl - number of depletion intervals
2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01
2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01
2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
1.00000E+00 2.00000E+00 3.00000E+00 4.00000E+00 5.00000E+00 1.00000E+01 2.50000E+01 6.00000E+01 1.10000E+02 1.60000E+02
2.60000E+02 3.60000E+02 4.60000E+02 5.60000E+02 6.60000E+02 7.60000E+02 8.60000E+02 9.60000E+02 1.06000E+03 1.16000E+03
1.26000E+03 1.36000E+03 1.46000E+03 1.56000E+03 2.29200E+03 3.29200E+03 5.29200E+03 9.29200E+03 1.22920E+04 1.52920E+04
1.82920E+04 2.08050E+04 2.08050E+04 2.08050E+04 2.08050E+04 2.08050E+04 2.08050E+04 2.08050E+04 2.08050E+04 2.08050E+04
1 0 0     depl_time - irradiation days
1 0 0     depl_type - regions depletion (0=no depletion, 1=power depletion, 2=flux depletion)
1 2 2     reg_libtype - regions transport/burnup libraries position
900.0 625.0 578.0 maxwell_kelvin - regions maxwell temperatures
"/mnt/c/UWB/testcases/uwb1libs/" folder with uwb1 libraries
3         number of nuclides in region 1 (fuel)
12        number of nuclides in region 2 (clad)
2         number of nuclides in region 3 (mod)
15        86      80160 4.88250E-02 nuclear densities in region 1 (fuel)
362      3514   922350 1.05300E-03
365      3518   922380 2.34230E-02
117      1039   400900 2.19170E-02 nuclear densities in region 2 (clad)
118      1041   400910 4.77956E-03
119      1042   400920 7.30565E-03
121      1044   400940 7.40363E-03
123      1046   400960 1.19276E-03
124      1081   410930 4.22623E-04
304      2594   721740 1.05594E-08
305      2596   721760 3.47139E-07
306      2597   721770 1.22753E-06
307      2600   721780 1.80037E-06
308      2603   721790 8.98867E-07
309      2606   721800 2.31514E-06
1         1      10010 5.01551E-02 nuclear densities in region 3 (mod)
15        86      80160 2.50775E-02
eof

```

Příloha E - Vstupní dokument pro palivo Gd-2M

```

4          prl_threads - number of threads
10000     npg - number of neutrons per generation
5         nsng - number of skipped neutron generations
105       tnng - total number of neutron generations
2         n_ccregion - number of concentric cylinder regions
0.38 0.455 rccregion - concentric cylinder region radii
0.6427   hpitch - half pitch
2        lat - lattice type (1=square, 2=hexagonal)
34       idepl - number of depletion intervals
2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01
2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01
2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
1.00000E+00 2.00000E+00 3.00000E+00 4.00000E+00 5.00000E+00 1.00000E+01 2.50000E+01 6.00000E+01 1.10000E+02 1.60000E+02
2.60000E+02 3.60000E+02 4.60000E+02 5.60000E+02 6.60000E+02 7.60000E+02 8.60000E+02 9.60000E+02 1.06000E+03 1.16000E+03
1.26000E+03 1.36000E+03 1.46000E+03 1.56000E+03 1.66000E+03 1.82500E+03 1.92500E+03 2.08500E+03 2.71000E+03 5.71000E+03
1.71000E+03 1.17100E+04 1.47100E+04 1.97100E+04 1.97100E+04 1.97100E+04 1.97100E+04 1.97100E+04 1.97100E+04 1.97100E+04
1 0 0     depl_time - irradiation days
1 0 0     depl_type - regions depletion (0=no depletion, 1=power depletion, 2=flux depletion)
1 2 2     reg_libtype - regions transport/burnup libraries position
900.0 625.0 578.0 maxwell_kelvin - regions maxwell temperatures
"/mnt/c/UWB/testcases/uwb1libs/" folder with uwb1 libraries
3         number of nuclides in region 1 (fuel)
12        number of nuclides in region 2 (clad)
2         number of nuclides in region 3 (mod)
15        86      80160 4.88250E-02 nuclear densities in region 1 (fuel)
362      3514   922350 1.08520E-03
365      3518   922380 2.33910E-02
117      1039   400900 2.19170E-02 nuclear densities in region 2 (clad)
118      1041   400910 4.77956E-03
119      1042   400920 7.30565E-03
121      1044   400940 7.40363E-03
123      1046   400960 1.19276E-03
124      1081   410930 4.22623E-04
304      2594   721740 1.05594E-08
305      2596   721760 3.47139E-07
306      2597   721770 1.22753E-06
307      2600   721780 1.80037E-06
308      2603   721790 8.98867E-07
309      2606   721800 2.31514E-06
1         1      10010 5.01551E-02 nuclear densities in region 3 (mod)
15        86      80160 2.50775E-02
eof

```

Příloha F - Vstupní dokument pro palivo Gd-2M+

```

4 prl_threads - number of threads
10000 npg - number of neutrons per generation
5 nsng - number of skipped neutron generations
105 tnng - total number of neutron generations
2 n_ccregion - number of concentric cylinder regions
0.39 0.455 rccregion - concentric cylinder region radii
0.6427 hpitch - half pitch
2 lat - lattice type (1=square, 2=hexagonal)
34 idepl - number of depletion intervals
2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01
2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01
2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
1.00000E+00 2.00000E+00 3.00000E+00 4.00000E+00 5.00000E+00 1.00000E+01 2.50000E+01 6.00000E+01 1.10000E+02 1.60000E+02
2.60000E+02 3.60000E+02 4.60000E+02 5.60000E+02 6.60000E+02 7.60000E+02 8.60000E+02 9.60000E+02 1.06000E+03 1.16000E+03
1.26000E+03 1.36000E+03 1.46000E+03 1.56000E+03 1.66000E+03 1.82500E+03 1.92500E+03 2.08500E+03 2.71000E+03 5.71000E+03
8.71000E+03 1.17100E+04 1.47100E+04 1.78850E+04 2.17885E+04 2.57885E+04 2.97885E+04 3.37885E+04 3.77885E+04 4.17885E+04
1 0 0 depl_time - irradiation days
1 2 2 depl_type - regions depletion (0=no depletion, 1=power depletion, 2=flux depletion)
900.0 625.0 578.0 reg_libtype - regions transport/burnup libraries position
"/mnt/c/UWB/testcases/uwb1libs/" maxwell_kelvin - regions maxwell temperatures
3 folder with uwb1 libraries
12 number of nuclides in region 1 (fuel)
2 number of nuclides in region 2 (clad)
2 number of nuclides in region 3 (mod)
15 86 80160 4.88250E-02 nuclear densities in region 1 (fuel)
362 3514 922350 1.08520E-03
365 3518 922380 2.33910E-02
117 1039 400900 2.19170E-02 nuclear densities in region 2 (clad)
118 1041 400910 4.77956E-03
119 1042 400920 7.30565E-03
121 1044 400940 7.40363E-03
123 1046 400960 1.19276E-03
124 1081 410930 4.22623E-04
304 2594 721740 1.05594E-08
305 2596 721760 3.47139E-07
306 2597 721770 1.22753E-06
307 2600 721780 1.80037E-06
308 2603 721790 8.98867E-07
309 2606 721800 2.31514E-06
1 1 10010 5.01551E-02 nuclear densities in region 3 (mod)
15 86 80160 2.50775E-02
eof

```

Příloha G - Vstupní dokument pro palivo Gd-2X

```

4 prl_threads - number of threads
10000 npg - number of neutrons per generation
5 nsng - number of skipped neutron generations
105 tnng - total number of neutron generations
2 n_ccregion - number of concentric cylinder regions
0.39 0.455 rccregion - concentric cylinder region radii
0.6427 hpitch - half pitch
2 lat - lattice type (1=square, 2=hexagonal)
33 idepl - number of depletion intervals
2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01
2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01
2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01 2.69190E+01
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
1.00000E+00 2.00000E+00 3.00000E+00 4.00000E+00 5.00000E+00 1.00000E+01 2.50000E+01 6.00000E+01 1.10000E+02 1.60000E+02
2.60000E+02 3.60000E+02 4.60000E+02 5.60000E+02 6.60000E+02 7.60000E+02 8.60000E+02 9.60000E+02 1.06000E+03 1.16000E+03
1.26000E+03 1.36000E+03 1.46000E+03 1.56000E+03 1.66000E+03 1.82500E+03 1.92500E+03 2.08500E+03 2.71000E+03 5.71000E+03
8.71000E+03 1.17100E+04 1.56950E+04 1.96800E+04 2.36650E+04 2.76500E+04 3.16350E+04 3.56200E+04 3.96050E+04 4.35900E+04
1 0 0 depl_time - irradiation days
1 2 2 depl_type - regions depletion (0=no depletion, 1=power depletion, 2=flux depletion)
900.0 625.0 578.0 reg_libtype - regions transport/burnup libraries position
"/mnt/c/UWB/testcases/uwb1libs/" maxwell_kelvin - regions maxwell temperatures
3 folder with uwb1 libraries
12 number of nuclides in region 1 (fuel)
2 number of nuclides in region 2 (clad)
2 number of nuclides in region 3 (mod)
15 86 80160 4.88250E-02 nuclear densities in region 1 (fuel)
362 3514 922350 1.17930E-03
365 3518 922380 2.32980E-02
117 1039 400900 2.19170E-02 nuclear densities in region 2 (clad)
118 1041 400910 4.77956E-03
119 1042 400920 7.30565E-03
121 1044 400940 7.40363E-03
123 1046 400960 1.19276E-03
124 1081 410930 4.22623E-04
304 2594 721740 1.05594E-08
305 2596 721760 3.47139E-07
306 2597 721770 1.22753E-06
307 2600 721780 1.80037E-06
308 2603 721790 8.98867E-07
309 2606 721800 2.31514E-06
1 1 10010 5.01551E-02 nuclear densities in region 3 (mod)
15 86 80160 2.50775E-02
eof

```