



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

MOŽNOSTI TRANSMUTACE VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA S POMOCÍ POKROČILÝCH JADERNÝCH REAKTORŮ

POSSIBILITIES OF TRANSMUTATION OF SPENT NUCLEAR FUEL WITH ADVANCED NUCLEAR REACTORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Ošust

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Karel Katovský, Ph.D.

BRNO 2024



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Marek Ošust

ID: 240780

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Možnosti transmutace vyhořelého jaderného paliva s pomocí pokročilých jaderných reaktorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- Zpracujte přehled technologií pro transmutaci vyhořelého jaderného paliva.
- Popište technologii transmutatoru řízeného urychlovačem s kuličkovým terčem.
- Vytvořte databázi materiálů vhodných pro použití v terči.
- Výpočetně zhodnoťte vlastnosti vybraných materiálů, zejména na bázi thoria/wolframu a berylia/uhlíku. Srovnajte s dostupnými daty z literatury.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

doporučená literatura podle pokynů vedoucího a konzultantů závěrečné práce

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 29.5.2024

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

Konzultant: Ing. Ondřej Šťastný, Ing. Pavel Máca

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

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa venuje problematike transmutácie vyhoreného jadrového paliva. Opisuje urýchľovačom riadený transmutor, ako aj jeho jednotlivé komponenty. Sú uvedené aj príklady konkrétnych projektov, ako sú MYRRHA a CiADS. Hlavným cieľom práce je skúmanie materiálov spalačného guľôčkového terča. Porovnávali sa fyzikálne vlastnosti materiálov, produkcia neutrónov generovaných interakciou s dopadajúcim protónovým zväzkom a výsledné energetické spektrum neutrónov. Výpočty boli robené pomocou programu TALYS.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Transmutácia, ADS, MYRRHA, CiADS, urýchľovač, spalačný guľôčkový terč, jadrový transmutor, spalačná reakcia

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the issue of transmutation of spent nuclear fuel. It describes the accelerator driven transmutator as well as its individual components. Examples of specific projects such as MYRRHA and CiADS are also given. The main objective of the thesis is the investigation of material properties of the spallation granular target. Compounds of heavy and light elements have been considered. Their physical properties, the number of neutrons generated by interaction with impinging proton beam and the resulting neutron energy spectrum were compared. The calculations were performed using the TALYS program.

KEYWORDS

Transmutation, ADS, MYRRHA, CiADS, accelerator, granular spallation target, nuclear transmutor, spallation reaction

Bibliografická citácia

OŠUST, Marek. Možnosti transmutace vyhořelého jaderného paliva s pomocí pokročilých jaderných reaktorů [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-27]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159546>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Karel Katovský.

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Marek Ošust
VUT ID autora: 240780
Typ práce: Bakalárska práca
Akademický rok: 2023/24
Téma záverečnej práce: Možnosti transmutácie vyhoreného jadrového paliva pomocou pokročilých jadrových reaktorov

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce pánovi doc. Ing. Karlovi Katovskému Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci. Taktiež ďakujem konzultantovi Ing. Ondřejovi Šťastnému za pomoc pri výpočtoch v programe TALYS, odborné konzultácie a návrhy na vylepšenie práce.

Obsah

Úvod	12
1 Prepracovanie vyhoreného jadrového paliva	13
1.1 Palivo MOX	14
1.1.1 RepU	14
1.1.2 REMIX	14
1.2 Transmutácia	15
1.2.1 Transmutácia aktinoidov	16
2 Urýchľovačom riadené systémy	18
2.1 Spalačná reakcia	19
3 Technológie pre transmutáciu vyhoreného jadrového paliva	21
3.1 Urýchľovačom riadený jadrový transmutor	21
3.1.1 Urýchľovač	21
3.1.2 Terč	21
3.1.3 Reaktor	22
3.2 Historické transmutačné projekty	23
3.2.1 Projekty v Rusku	23
3.2.2 Projekty v Európe a Spojených štátoch amerických	26
3.3 Súčasnú transmutačné projekty	28
3.3.1 HYPER	28
3.3.2 ADAM	29
3.3.3 EUROTRANS	30
3.4 Súčasnú transmutačné systémy	30
3.4.1 MYRRHA	30
3.4.2 ADANES	32
3.5 Spalačné zdroje	34
3.5.1 Európsky spalačný zdroj	34
3.5.2 Spalačný neutrónový zdroj	36
4 Gulôčkový terč	37
4.1 Gulôčkový terč systému CiADS	37
4.2 Materiál gulôčkového terča	38
4.2.1 Lhké prvky	38
4.2.2 Ťažké prvky	40
4.3 Vhodné zlúčeniny	43

5	Výpočty	45
5.1	Produkcia neutrónov	45
5.1.1	Výpočet produkcie neutrónov a účinného prierezu v zlúčeninách	46
5.2	Energetické spektrum	47
	Záver	49
	Zoznam symbolov a skratiek	53
	Zoznam príloh	55
A	Periodická tabuľka prvkov	56
B	Účinné prierezy prvkov uvažovaných pri návrhu guľôčkového terča	57
B.1	Lahké prvky	57
B.2	Ťažké prvky	58
C	Grafy a tabuľky k výpočtom	63
C.1	Produkcia neutrónov a účinný prierez	63
C.2	Energetické spektrum	68

Zoznam obrázkov

1.1	Zloženie vyhoreného jadrového paliva (upravené) [2]	13
1.2	Schéma transmutácie ^{99}Tc (upravené) [1]	16
1.3	Schéma transmutácie ^{237}Np (upravené) [1]	17
2.1	Rovnice transmutácie ^{232}Th a ^{238}U [7]	18
2.2	Schéma spalačnej reakcie [1]	19
3.1	Urýchľovačom riadený transmutor (upravené) [10]	23
3.2	Urýchľovač fázotrón [8]	24
3.3	Spalačný terč QUINTA [4]	25
3.4	Principiálna schéma energetického zosilňovača (upravené) [4]	28
3.5	Prototyp lineárneho urýchľovača [10]	33
3.6	Systém CiADS vo výstavbe [19]	34
3.7	Projekt ESS (fotené vo februári 2022) [21]	35
4.1	Schematické znázornenie funkcie guľôčkového terča (upravené) [20]	37
A.1	Periodická tabuľka prvkov[28]	56
B.1	Účinný prierez ^{12}C v závislosti na energií neutrónu [25]	57
B.2	Účinný prierez ^{13}C v závislosti na energií neutrónu [25]	57
B.3	Účinný prierez ^{181}Ta v závislosti na energií neutrónu [25]	58
B.4	Účinný prierez ^{180}W v závislosti na energií neutrónu [25]	58
B.5	Účinný prierez ^{182}W v závislosti na energií neutrónu [25]	59
B.6	Účinný prierez ^{183}W v závislosti na energií neutrónu [25]	59
B.7	Účinný prierez ^{184}W v závislosti na energií neutrónu [25]	60
B.8	Účinný prierez ^{186}W v závislosti na energií neutrónu [25]	60
B.9	Účinný prierez ^{232}Th v závislosti na energií neutrónu [25]	61
B.10	Účinný prierez ^{235}U v závislosti na energií neutrónu [25]	61
B.11	Účinný prierez ^{238}U v závislosti na energií neutrónu [25]	62
C.1	Závislosť účinného prierezu a produkcie neutrónov na energií protónu pre prírodnú zmes uránu	65
C.2	Závislosť účinného prierezu a produkcie neutrónov na energií protónu pre prírodnú zmes uhlíku	65
C.3	Závislosť účinného prierezu na energií protónu pre rôzne pomery uránu v zlúčenine UC	66
C.4	Závislosť produkcie neutrónov na energií protónu pre rôzne pomery uránu v zlúčenine UC	66
C.5	Závislosť účinného prierezu na energií protónu pre rôzne zlúčeniny s pomerom 90% ťažký prvok a 10%C	67
C.6	Závislosť produkcie neutrónov na energií protónu pre rôzne zlúčeniny s pomerom 90% ťažký prvok a 10%C	67

C.7	Energetické spektrum neutrónov z prvku ^{238}U	69
C.8	Energetické spektrum neutrónov z prvku ^{12}C	69
C.9	Energetické spektrum neutrónov pre rôzne pomery uránu v zlúčenine UC	70
C.10	Energetické spektrum neutrónov pre rôzne zlúčeniny s pomerom 90% ťažký prvok a 10%C	70
C.11	Detail energetického spektra neutrónov pre rôzne zlúčeniny s pome- rom 90% ťažký prvok a 10%C	71

Zoznam tabuliek

3.1	Parametre projektu CiADS	34
4.1	Stabilné izotopy lítia	39
4.2	Stabilné izotopy bóru	39
4.3	Stabilné izotopy uhlíku	40
4.4	Stabilné izotopy tantalu	41
4.5	Stabilné izotopy volfrámu	41
4.6	Stabilné izotopy uránu	42
C.1	Ukážka výpočtu účinného prierezu a počtu neutronov pre prírodnú zmes uránu	63
C.2	Ukážka výpočtu účinného prierezu a počtu neutronov pre karbid uránu (UC)	64
C.3	Ukážka výpočtu energetického spektra pre uhlík	68

Úvod

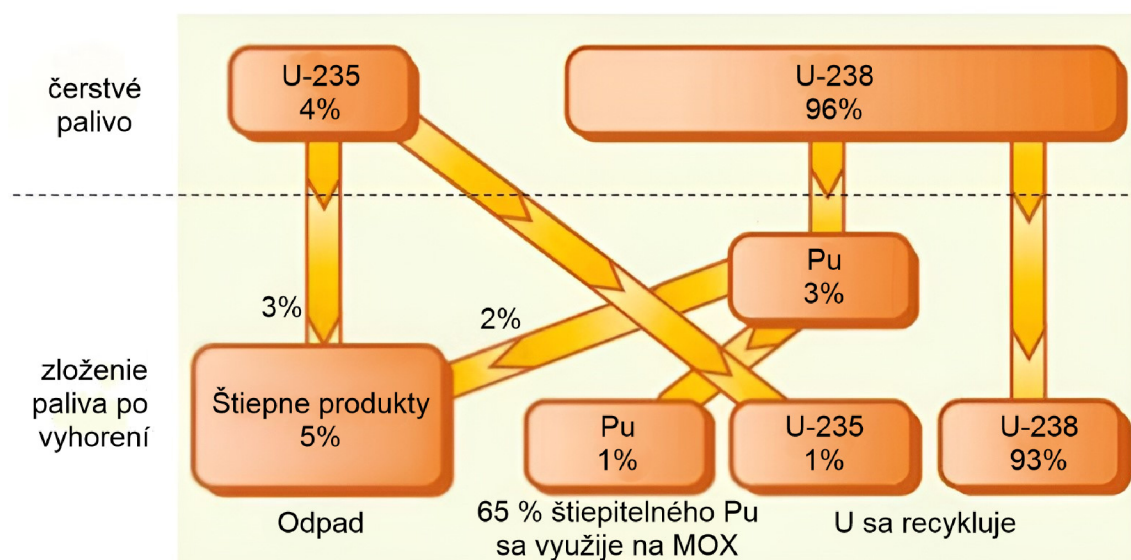
V dnešnej dobe sa čím ďalej tým viac hovorí o tom, čo budeme robiť s vyhoreným jadrovým palivom. Z uholných elektrární prechádzame na jadrové. V ázijských krajinách ako napríklad Čína a India sa stavajú jadrové elektrárne vo veľkom tempe. To bude znamenať väčší dopyt po jadrovom palive a teda aj väčší objem použitého paliva.

Máme viacero možností ako naložiť s vyhoreným jadrovým palivom. Prvou z nich je dlhodobé uloženie paliva do hlbinného úložiska. Keďže toto palivo obsahuje ešte veľké množstvo štiepneho materiálu, bola by ho škoda nevyužiť. Ďalšou je prepracovanie a opätovné využitie takéhoto paliva. Poslednou je transmutácia. Tá sa v minulosti mohla javiť ako technologicky nedostupná a príliš drahá avšak postupným výskumom sa nám otvárajú nové cesty k tomu ako ju využiť.

Jednou z možností transmutácie je použitie urýchlovačom riadeného transmutatoru. Súčasťou transmutatoru je aj spalačný terč. Vedci v Číne sa snažia o vyvinutie nového typu terča. Jeho materiál bude v tvare guľôčok.

1 Prepracovanie vyhoreného jadrového paliva

Pod pojmom prepracovanie použitého jadrového paliva si môžeme predstaviť znovuzískanie plutónia a uránu a jeho ďalšie spracovanie na nový typ paliva. Jedná sa o separáciu od zvyšných štípných produktov a aktinoidov, ktoré sa v palive nachádzajú. Percentuálne zastúpenie jednotlivých prvkov vo vyhorenom palive môžeme vidieť na priloženom obrázku 1.1. Takto získaný urán sa môže obohatiť a spolu s plutóniom sa môže použiť na výrobu paliva MOX [1].



Obr. 1.1: Zloženie vyhoreného jadrového paliva (upravené) [2]

Vo svete sa nachádza niekoľko prepracovacích tovární. Keďže prepracovanie je veľmi drahý proces nachádzajú sa hlavne v ekonomicky silných krajinách. Môžeme spomenúť Veľkú Britániu (Sellafield), Rusko (Majak) alebo Japonsko (Rokkasho-Mura). Továreň Sellafield bola zatvorená v roku 2022. Rokkasho-Mura ešte len čaká na svoje spustenie. V najväčšom množstve sa prepracovaniu venujú vo Francúzsku. Krajina má až 56 jadrových reaktorov. Vo všetkých sa používa palivo z prepracovacej stanice v La Hague, ktorá patrí medzi najväčšie na svete. Stanica La Hague vznikla v roku 1976. Od tej doby ňou prešlo vyše 40 000 ton paliva [3], [4].

1.1 Palivo MOX

MOX, alebo v angličtine mixed oxide fuel, je relatívne nový typ paliva a vzniká prepracovaním už použitého paliva. Skladá zo zmesi oxidu uraničitého (UO_2) a oxidu plutoničitého (PuO_2). Prvýkrát bolo použité v roku 1963. Jeho komerčné využívanie začalo až v 80. rokoch 20. storočia. Používa sa väčšinou v tlakovodných reaktoroch v Belgicku, Francúzsku a Japonsku. MOX tvorí obvykle tretinu aktívnej zóny. Do budúcnosti sa počíta aj s väčším podielom paliva. Aj v prípade, že palivo MOX bude pokrývať 50% aktívnej zóny, bude reaktor pracovať na svojich nominálnych parametroch. Akurát nám zrastie počet riadiacich tyčí. Výhodou je, že koncentráciu štiepiteľnej zložky môžeme ovplyvniť množstvom plutónia v palive. Použitím tohto paliva sa taktiež znižuje objem odpadu, ktorý bude treba trvalo uložiť [2].

Špecifické vlastnosti paliva MOX

- Vyššia absorpcia tepelných neutrónov
- Nižší podiel oneskorených neutrónov
- Nižšia účinnosť riadiacich a regulačných prvkov
- Vyššia prevádzková teplota
- Vyšší obsah aktiniodov v ožiarenom palive [4]

1.1.1 RepU

Zloženie prepracovaného uránu (RepU) závisí od počiatočného obohatenia a času, počas ktorého bolo palivo v reaktore. Väčšinu z paliva (približne 96%) tvorí urán. Z tohto uránu je menej ako 1% štiepny izotop ^{235}U . Ďalšou dôležitou zložkou je plutónium, ktorého je až 1%. Oba prvky sa dajú recyklovať ako čerstvé palivo, čím sa ušetrí až 30 % prírodného uránu. RepU je cenný najmä pre svoju schopnosť premieňať ^{238}U na ^{239}Pu . Vznikne nám teda ďalší štiepny materiál [5].

1.1.2 REMIX

Palivo REMIX (Regenerated Mixture) sa vyrába priamo zo zmesi recyklovaného uránu a plutónia. Túto zmes získame z prepracovaného použitého paliva. Týmto procesom získame palivo s približne 1% ^{239}Pu a 4% ^{235}U . Palivo vydrží vyhorenie 50 GWd/t počas štyroch rokov. Po ochladení a opätovnom spracovaní sa urán a plutónium opäť recyklujú. Avšak musíme do neho pridať aj mierne obohatený urán. Takýmto spôsobom ho môžeme až päťkrát prepracovať. V porovnaní s palivom MOX sú náklady na výrobu paliva vyššie kvôli vysokým úrovňam aktivity [6].

1.2 Transmutácia

Transmutácia označuje fyzikálny proces, pri ktorom dochádza k premene jedného prvku na iný. Je to teda proces, ktorý vedie ku kratšiemu polčasu premeny alebo dokonca k úplnej stabilite vznikajúcich jadier. V súvislosti s riešením jadrových odpadov o nej hovoríme ako o „spaľovaní“ jadrového odpadu zvýšeným neutrónovým tokom. Navyše pri procese štiepenia alebo radiačného záchytu neutrónov môžeme uvoľňovať tepelnú energiu použiteľnú na výrobu elektrickej energie [1].

Štiepne produkty, ktoré vzniknú jadrovými reakciami vo vyhorenom palive, sú väčšinou nad pásmom stability. Aby sa z nich stali stabilné nuklidy, musia prejsť niekoľkonásobným záchytom neutrónov. Transmutácia prebieha podľa nasledovnej schémy:

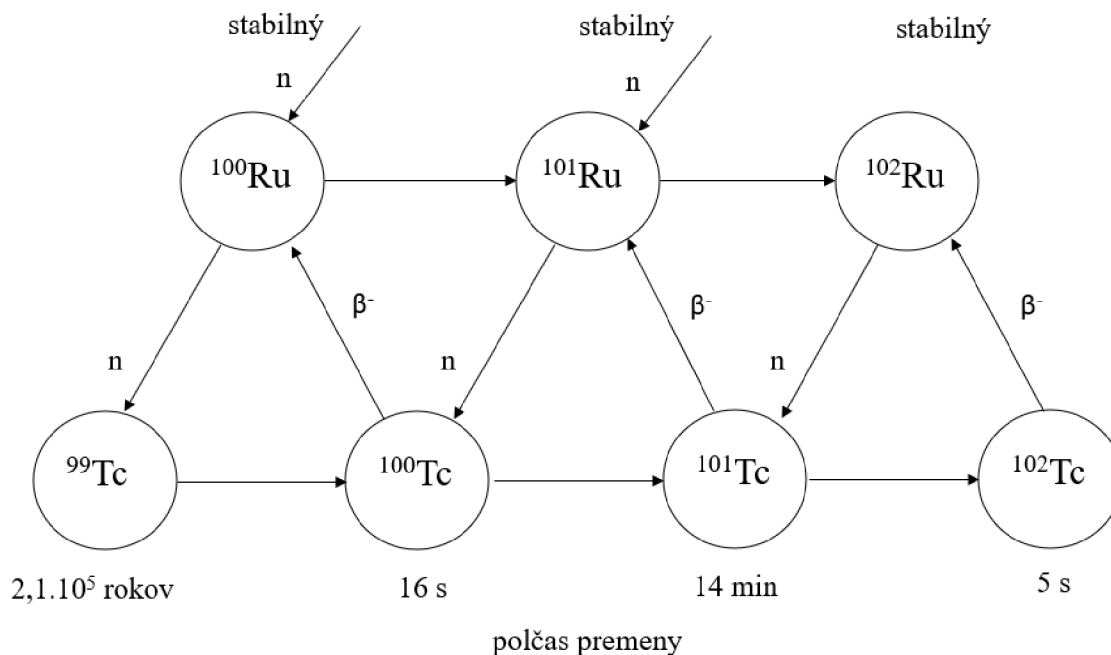
- jadro (Z, A) absorbuje neutrón a v dôsledku radiačného záchytu sa premení na $(Z, A+1)$,
- jadro $(Z, A+1)$ je vo veľkej väčšine rádioaktívne a β^- rozpadom sa mení na jadro $(Z+1, A+1)$ [1].

Pričom písmeno Z sa označuje ako protónové číslo a písmeno A označuje nukleónové číslo. Platí tu rovnica:

$$A = Z + N \quad (1.1)$$

,kde N označuje počet neutrónov.

Transmutáciu si môžeme ukázať na príklade dvoch rádioaktívnych nuklidov. Jedná sa o technécium ^{99}Tc a jód ^{129}I . Oba nuklidy sú charakterizované veľmi dlhým polčasom premeny. Problémom je, že nemôžu byť štandardne uložené pod zem do hlbinného úložiska. Lahko sa rozpúšťajú v podzemnej vode a tým pádom sa jednoducho dostávajú do ekosystému. Riešením je ich transmutácia. Ožiarenie technécia ^{99}Tc neutrónmi spôsobí, že absorbuje jeden neutrón a stane sa z neho ^{100}Tc , ktoré sa za pár minút premení na stabilné ruténium ^{100}Ru . V prípade, že na ^{100}Tc príde pred β^- premenou k záchytu neutrónu, vznikne nám izotop ^{101}Tc . Podobný proces je aj pri vzniku izotopu ^{102}Tc . Oba tieto izotopy sa za relatívne krátky čas dokážu premeniť na stabilné ^{101}Ru , respektíve ^{102}Ru . . Podobne prebieha aj transmutácia jódu ^{129}I na stabilný xenón [1]. Transmutácia technécia ^{99}Tc je znázornená na obrázku 1.2.



Obr. 1.2: Schéma transmutácie ^{99}Tc (upravené) [1]

1.2.1 Transmutácia aktinoidov

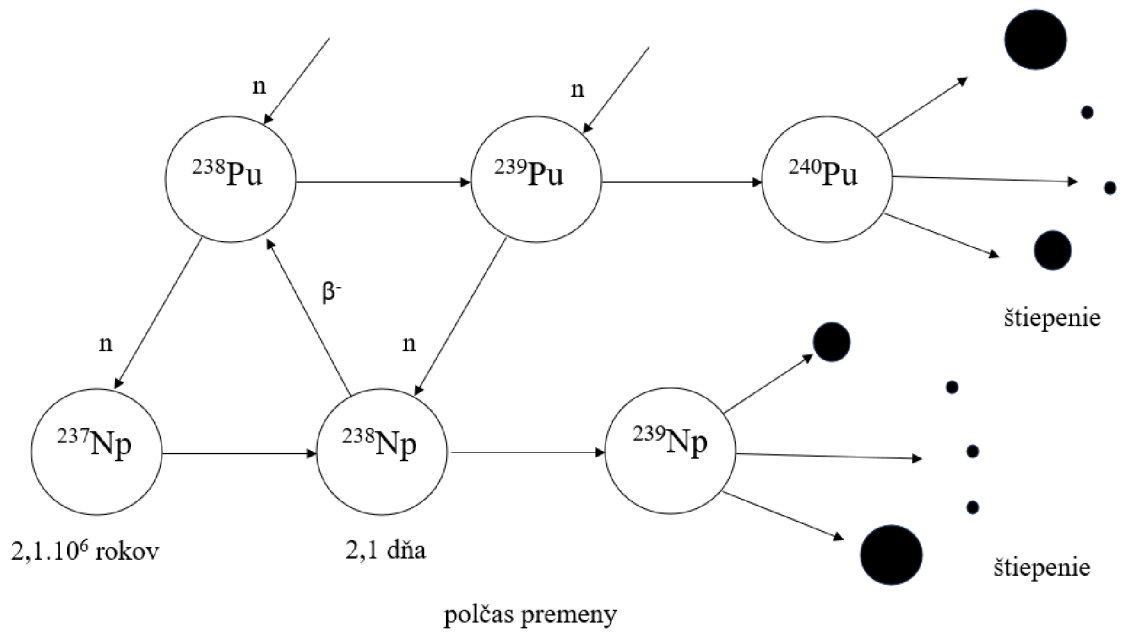
Ďalšou skupinou rádioaktívnych nuklidov vo VJP sú nuklidy s polčasom rozpadu niekoľko tisíc až miliónov rokov. Nazývame ich aktinoidy (alebo transurány). Patria sem napríklad izotopy plutónia, neptúnia, amerícia a cúria [1].

K transmutácií takýchto jadier môže dochádzať len pomocou štiepenia. Je to z toho dôvodu, že žiadny ťažší prvok nemá stabilný izotop. Ako príklad si ukážeme transmutáciu neptúnia ^{237}Np [1]. Tento proces je ukázaný na obrázku 1.3.

Pri vysokej hustote neutrónového toku, približne $10^{16} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, dochádza na izotope ^{237}Np k radiačnému záchytu za vzniku izotopu ^{238}Np . Po ďalšom záchyte neutrónu vznikne ^{239}Np , ktorý sa už môže štiepiť. Pri vysokom toku neutrónov sa ^{237}Np stáva palivom [1].

Avšak, ak je izotop neptúnia ^{237}Np vystavený neutrónovému toku s nižšou hustotou, tak sa izotop ^{238}Np premení na neštiepiteľné plutónium ^{238}Pu . Musí teda prísť k ďalšiemu radiačnému záchytu za vzniku ^{239}Pu a následnému štiepeniu cez izotop ^{240}Pu . Pri nízkom toku neutrónov teda potrebuje až 4 neutróny na to aby mohlo prísť k štiepeniu. Z toho vyplýva, že pri nízkej hustote toku sa z ^{237}Np stáva jed,

alebo inak povedané, parazitný absorbátor neutrónov [1].

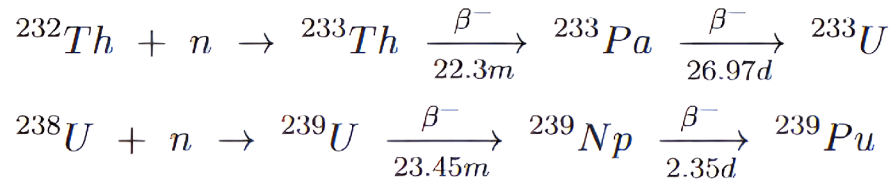


Obr. 1.3: Schéma transmutácie ^{237}Np (upravené) [1]

2 Urýchľovačom riadené systémy

Systém ADS (accelerator driven system v preklade systém poháňaný urýchľovačom) má za úlohu vysporiadať sa s 2 hlavnými problémami. Je to hlavne nedostatok ^{235}U , ktorý by mohol nastať v budúcnosti ak budeme stavať stále viac veľkých jadrových elektrární. Druhým problémom je toxicita paliva a žiarenie dlhodobo žijúcich izotopov [7].

Prvý systém na princípe ADS bol navrhnutý v päťdesiatych rokoch 20. storočia. Prebiehal pod vedením E. O. Lawrence, ktorý chcel pomocou neho produkovať štiepny urán ^{233}U z nuklidu thória ^{232}Th a taktiež štiepny izotop plutónia ^{239}Pu z ^{238}U [4]. Popisujú to rovnice z obrázku 2.1.



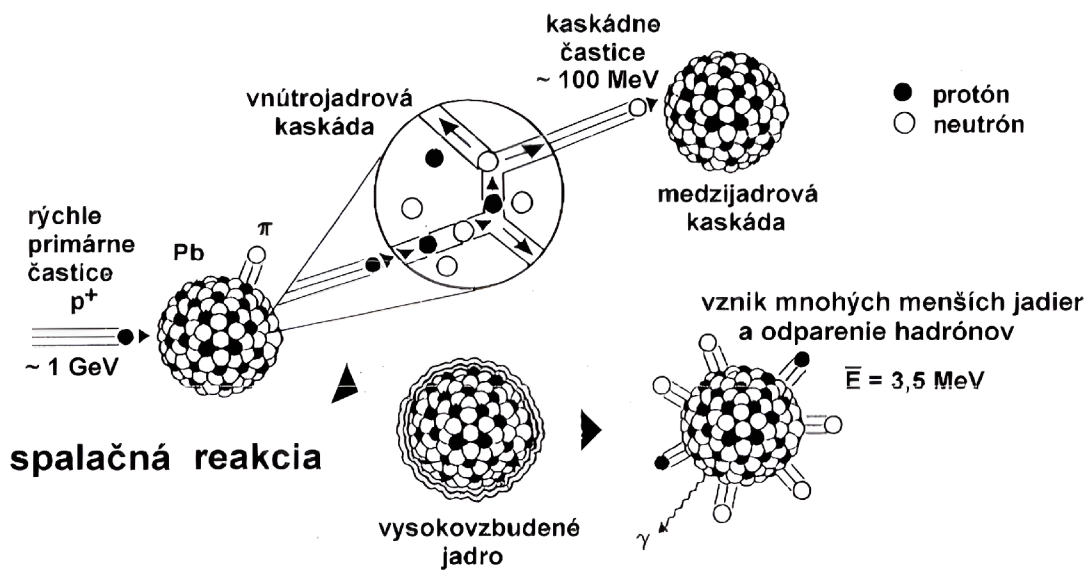
Obr. 2.1: Rovnice transmutácie ^{232}Th a ^{238}U [7]

Tento projekt mal vyriešiť problémy Spojených štátov amerických s nedostatkom materiálu na výrobu jadrových hlavíc. V tom čase mali Spojené štáty malý počet uránových nálezísk. Avšak s postupným objavovaním nových nálezísk bol projekt po niekoľkých rokoch zastavený [4].

Neskôr, v deväťdesiatych rokoch 20. storočia, začali skúmať vedci z Japonska, Spojených štátov a Európy možnosti systémov ADS. V rovnakej dobe sa objavili ďalšie dva koncepty urýchľovačom riadených systémov. Prvým je projekt C.D. Bowmana v laboratóriu v Los Alamos v USA. Ten bol zameraný na transmutáciu rádioizotopov s dlhým polčasom rozpadu. Tie vznikali z jadrového odpadu pomocou tepelných neutrónov. Druhým bol výskum C. Rubbia z európskeho inštitútu CERN sídliaceho vo Švajčiarsku. Tento bol primárne zameraný na transmutáciu ^{232}Th na izotop uránu ^{233}U a získavania energie z jeho štiepenia [4]. Oba tieto projekty budú detailnejšie popísané v kapitole 3.2.2.

2.1 Spalačná reakcia

Spalačná (tiež nazývaná aj trieštivá) reakcia nastáva v prípade, že sa vysokoenergeticky nabitá častica stretne s jadrom ťažkého materiálu (napríklad Pb, Bi, W, Th, U, Ne alebo Am). Nabité častice pritom dosahujú až rýchlosť svetla. Tieto častice reagujú s nukleónmi a nie jadrom ako celkom. Priebeh tejto reakcie je znázornený na obrázku 2.2. Pri interakcii jadra ťažkého materiálu a častice vznikne veľa nových voľných častíc, mnoho menších jadier (odštepkov) a γ žiarenie [1], [4].



Obr. 2.2: Schéma spalačnej reakcie [1]

Spalačná reakcia sa skladá z troch po sebe idúcich fáz. V prvej fáze sa urýchlené častice zrážajú s nukleónmi v jadre ťažkého materiálu. Znamená to že častica narazí do skupiny nukleónov ktoré sú pohromade. Pri zrážke odovzdá energiu na tieto nukleóny, ktoré ju môžu odovzdať ešte ďalej. Tento proces sa nazýva vnútrojadrová kaskáda. V tejto fáze sa produkuje približne tretina všetkých neutrónov. Ich energie sa pohybujú v stovkách MeV [4], [8].

Nasleduje druhá fáza, ktorú nazývame predrovnovážna emisia nukleónov. Pri nej vyletujú nukleóny s energiou pohybujúcou sa v rozmedzí 10-100 MeV. Napriek tomu, že táto energia je pomerne veľká, nestačí na vyvolanie ďalšej spalačnej reakcie. Predovšetkým ide o neutróny, ktoré nemusia prekonávať Coulombovu bariéru vytváranú nábojom jadra. Coulombova bariéra predstavuje energetickú bariéru, ktorú musí častica prekonať aby mohla prebehnúť jadrová reakcia. Energia častíc sa teda

rovnomerne rozloží a vznikne vysoko ohriata kvapalina [4], [8].

Poslednú fázu nazývame odparovania. V nej sa jadro zbavuje energie vyparováním neutrónov. V tejto fáze sa produkuje najviac neutrónov. Ich energia dosahuje 1-2 MeV. Tá je približne rovnaká aj pri štiepení jadra. Stredný počet neutrónov vyprodukovaných v jednej spalačnej reakcii sa líši v závislosti na energii urýchlenej častice a type ťažkého prvku [4], [8].

3 Technológie pre transmutáciu vyhoreného jadrového paliva

3.1 Urýchľovačom riadený jadrový transmutor

Skladá sa z troch základných častí. Prvou je protónový urýchľovač. Druhou je terč, na ktorý dopadajú urýchlené protóny. Tretou časťou je reaktor, ktorý obklopuje terč [8]. Každú z týchto častí si teraz rozoberieme podrobnejšie. Schéma transmutoru je znázornená na obrázku 3.1.

3.1.1 Urýchľovač

Urýchľovače sú nevyhnutnými komponentmi všetkých podkritických systémov ADS. Požaduje sa spoľahlivosť, vysoká energia a vysoká intenzita zväzku. Lineárny urýchľovač (LINAC) je jediný typ urýchľovača, ktorý spĺňa požadované vlastnosti. Lineárne urýchľovače sú schopné urýchliť protóny s prúdom rádovo 100 mA až na niekoľko GeV. V praxi sa pritom používajú výkony s veľkosťou niekoľko stoviek MW [1].

Na dosiahnutie požadovanej intenzity neutrónov, ktoré sa uvoľňujú zo spalačného terča, musí byť intenzita zväzku protónov vysoká. Tá sa udáva pomocou prúdu. Predpokladá sa, že prúdy v urýchľovačoch používaných v zariadeniach ADS by mali dosahovať desiatky až stovky miliampér, čo zodpovedá rádovo 10^{17} až 10^{18} protónov za sekundu [8].

Ďalšou možnosťou ako by sme mohli produkovať vysokoenergetické protóny pre mierne podkritické systémy sú kruhové urýchľovače (napríklad cyklotróny alebo synchrotróny). Avšak tie sú obmedzené na maximálne energie v stovkách MeV a prúdy len v niekoľkých mA. Možným kompromisom na dosiahnutie požadovaných parametrov urýchľovača by mohlo byť spojenie zväzkov z dvoch alebo viacerých kruhových urýchľovačov do jedného, ktorý by bol následne vedený do terča [1].

Bez ohľadu na typ použitého urýchľovača by mal byť zväzok protónov stabilný. Tým sa minimalizujú výkyvy výkonu v podkritickom súbore. V oblastiach blízkych kritickým je totiž veľká citlivosť na zmenu výkonu [1].

3.1.2 Terč

Pri interakciách častice s terčom dochádza k rôznym fyzikálnym procesom a mechanizmom ktoré menia vlastnosti terča a častice. Jedným z nich sú aj jadrové reakcie.

Môže tu dochádzať ku vzniku a emisii nových častíc a elektromagnetického žiarenia. Terč obsahuje aj rôzne prídavné zariadenia ktorými môžu byť napríklad chladenie terča, držiak terča, nastavovače polohy a podobne [1].

Základnou vlastnosťou terča je, že jeho atómy obsahujú veľký počet nukleónov. To zaisťuje produkciu veľkého množstva neutrónov pri spalačnej reakcii. Veľkým problémom, ktorý tu vzniká, je odvod tepla. Teplo vzniká pri zastavení protónov, keď sa ich kinetická energia premieňa na tepelnú. Tepelný výkon, ktorý musíme z terča odvádzať sa pohybuje v desiatkach MW. Preto sa väčšinou predpokladá, že terč bude z tekutého materiálu a bude zároveň spĺňať aj funkciu chladiča. Takýto terč môže byť buď z olova alebo zo zmesi olovo-bizmut. Túto zmes sme si bližšie popíšeme v kapitole 3.4.1. Určitou nevýhodou použitia bizmutu je produkcia rádioaktívneho polónia (jedná sa hlavne o jeho izotop 210) [8].

Okrem kvapalného terča, ktorý je použitý pri projektoch MYRRHA a SNS, môže byť terč aj v inej podobe. Momentálne sa skúma rotačný pevný terč z volfrámu na projekte ESS. Čínsky vedci, pracujúci na systéme CiADS, sa zase zaoberajú vyvinutím guľôčkového terča [9].

3.1.3 Reaktor

Tretou súčasťou transmutoru je reaktor, v ktorom je uložený spalačný terč. Konkrétne usporiadanie paliva, transmutovaného rádioaktívneho odpadu a prípadného moderátora bude závisieť od zamerania systému. Existujú tri možnosti:

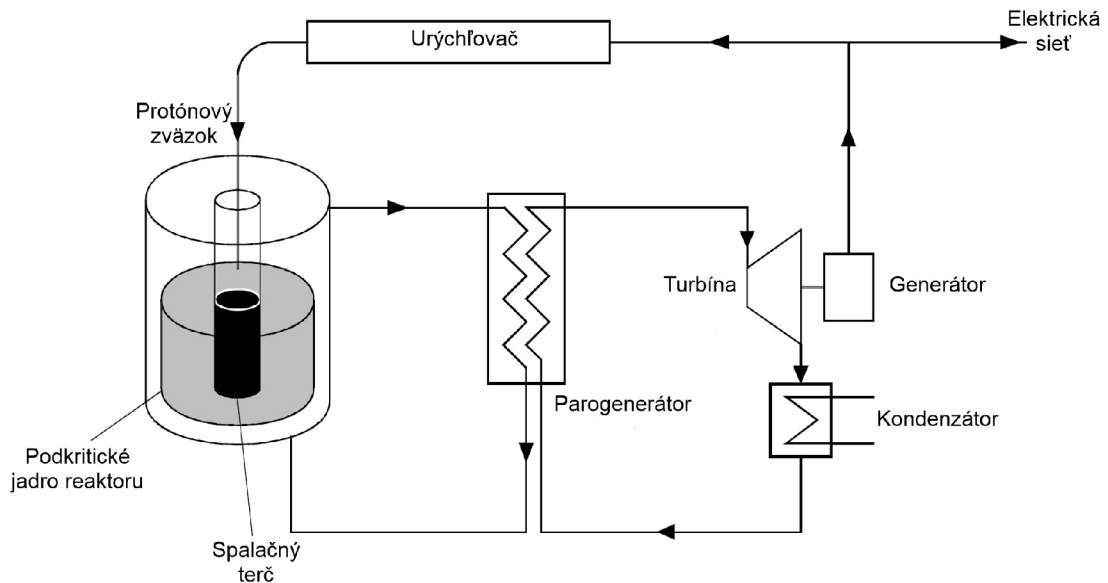
1. Výroba energie prostredníctvom transmutácie ^{232}Th na ^{233}U alebo ^{238}U na ^{239}Pu a ich následného štiepenia. Tieto rovnice transmutácie sú ukázané v kapitole 2.
2. Transmutácia rádioaktívnych prvkov z vyhoreného jadrového paliva. Keďže sa vo veľkej miere jedná aj o izotopy uránu a transuránov, energia sa získava ich štiepením.
3. Veľmi efektívne spaľovanie plutónia, ktoré by mohlo byť použité na výrobu zbraní [8].

Spektrum rýchlych neutrónov vznikajúce v spalačnom terči uprostred reaktora je vhodné pre transmutáciu z dvoch dôvodov:

1. Rýchle neutróny štiepia takmer všetky aktinoidy. Pritom poskytujú ďalšie rýchle neutróny a tým zvýšia pravdepodobnosť transmutácie plutónia a iných aktinoidov.

2. V rýchlom spektre vyprodukuje transmutor nadbytok neutrónov, ktoré po spomalení môžu transmutovať štiepne produkty s dlhodobým polčasom rozpadu. Napríklad sa jedná o prvky technécium a jód [1].

Pre rýchle spektrum neutrónov sa ako chladivo používa kvapalný kov. Najčastejšie ide o zmes olova a bizmutu (LBE). Teplota topenia LBE je 125°C . Ako chladivo môžeme použiť aj sodík, ktorý má teplotu topenia 98°C [1].



Obr. 3.1: Urýchľovačom riadený transmutor (upravené) [10]

3.2 Historické transmutačné projekty

3.2.1 Projekty v Rusku

Výskum týchto projektov prebiehal hlavne v Spojenom ústave jadrového výskumu v Dubne. Nachádza sa v Rusku na severnej hranici Moskovskej oblasti. Hlavným iniciátorom výstavby bol Igor Vasilievič Kurčatov. V roku 1946 sa soviety rozhodli postaviť protónový urýchľovač, ktorý nazvali Synchronocyclorón [4]. Postupne sa do prevádzky dostávali aj iné urýchľovače, o ktorých si podrobnejšie povieme v ďalších kapitolách.

Sychrofázotrón

Tento urýchľovač dokázal urýchliť protóny až na energiu 10 GeV. S použitím deuterónov prichádza aj požiadavka na náročnejšiu konštrukciu urýchľovača. Je to hlavne kvôli tomu, že s rastúcim nábojom prvku sa zväčšuje množstvo energie, ktorá sa premení na teplo. Komora pre urýchľovanie deuterónov mala priemer 0,5m. Pre usmernenie zväzku urýchlených častíc sa museli použiť magnety, ktorých hmotnosť bola 36 000 ton. V roku 2000 bol z ekonomických dôvodov vyradený z prevádzky [4], [8].

Fázotrón

Tento urýchľovač bol svojho času najväčší na svete keď dokázal produkovať protóny s energiou až 560 MeV. Jeho veľkou výhodou bola tiež vysoká intenzita protónov. Na urýchľovači prebiehal výskum jadrových reakcií, fyzika pevných látok a medicínsko-biologický výskum zameraný na onkologické choroby, ktorý bol úspešný. V roku 2005 ho zachvátili plamene, ktoré zničili vývod zväzku. Býval využívaný k onkologickým terapiám. Taktiež bol použitý k ožarovaniu spalačného terču QUINTA [4]. Urýchľovač fázotrón je ukázaný na obrázku 3.2.



Obr. 3.2: Urýchľovač fázotrón [8]

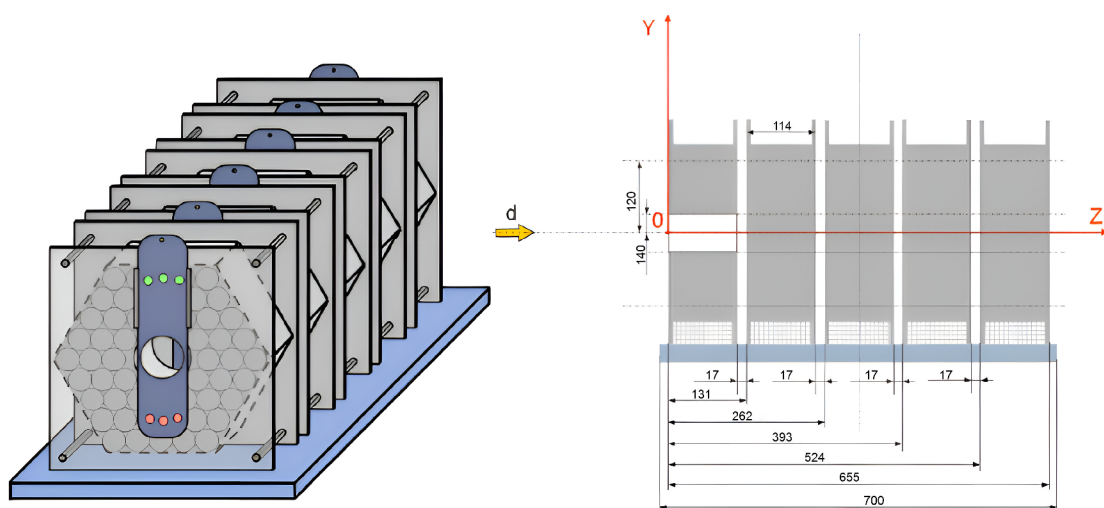
Nuklotrón

Nuklotrón nahradil v priebehu deväťdesiatych rokov už dosluhujúci synchrofázotrón. Urýchľovacia komora má priemer 251,5 m. Dokáže urýchliť protóny na energiu 12,8 GeV a slúži k urýchlenie ťažkých iónov. Chladenie je zaistované pomocou hélia. Na urýchľovači prebieha výskum v oblasti jadrovej a medicínskej fyziky. Tiež sa tu skúma oblasť dozimetrie [4].

QUINTA

Spalačný terč QUINTA je nástupcom terču E+T (Energia+Transmutácia), ktorý sa využíval pre potreby synchrofázotronu a nuklotrónu. Zariadenie QUINTA sa skladá z terča z prírodného uránu. Ako môžeme vidieť na obrázku 3.3, modul sa skladá z piatich sekcií. Každá časť má dĺžku 114 mm. Medzi jednotlivými sekciami je medzera 17mm. Do nich sa umiestňujú špeciálne hliníkové dosky na ktorých sú pripevnené vzorky [4].

Celková hmotnosť modulu je 540kg, z čoho 512 kg predstavuje hmotnosť prírodného uránu. Jednotlivé sekcie sú umiestnené v hliníkových nádobách tvaru šesťhranu. Urán je zapuzdrený v hliníkovom pokrytí vo forme tyčí. V prvej sekcii sa ich nachádza 54. Tyč má priemer 36 mm, dĺžku 104 mm a hmotnosť 1,72 kg. Celková hmotnosť prvej sekcie je 92 kg. Ostatné 4 sekcie sú zložené zo 61 tyčí. Potom jedna sekcia váži 105 kg. Spalačný terč je zo všetkých šiestich strán obklopený olovenými tehľami šírky 100 mm [4].



Obr. 3.3: Spalačný terč QUINTA [4]

3.2.2 Projekty v Európe a Spojených štátoch amerických

ADTT (Accelerator Driven Transmutation Technology) je všeobecný názov pre urýchlovačom riadené transmutačné technológie. Zahŕňa to niekoľko názvov technológií, ktoré pracujú na rovnakom princípe. Patria sem projekty ADEP (Accelerator Driven Energy Production) a ATW (Accelerator Transmutation of Waste), ABC (Accelerator Based Conversion (of plutonium)) a APT (Accelerator Production of Tritium) [4]. Tieto systémy boli uvedené do prevádzky v deväťdesiatych rokoch 20. storočia a popíšeme si ich v nasledujúcich odstavcoch.

ATW

Projekt ATW (urýchlovačom riadená transmutácia odpadu) prebiehal z väčšej časti v Los Alamos, v USA, kde ho viedol C.D. Bowman. Tento systém používa fluidné palivo. Jeho súčasťou bol lineárny urýchlovač s energiou 1,6 GeV a prúdmí okolo 250 mA. Jeho najväčšími výhodami boli podkritickosť systému a tiež fakt že dokázal pracovať s aktinoidmi, aj so štiepnymi produktmi [4], [11].

ADEP

Skratku ADEP môžeme do slovenčiny preložiť ako urýchlovačom riadená produkcia energie. Tento systém sľuboval alternatívu vo výrobe elektrickej energie. Bol veľmi bezpečný aj v prípade úplnej straty chladenia. Jeho reaktor používal ako moderátor grafit a energia bola produkovaná pomocou štiepenia. Ako chladivo sa používala tekutá soľ na báze zmesi fluoridu lítia (LiF) a fluoridu berýlia (BeF). To dávalo systému vysokú efektívnosť a možnosť riadiť reaktor aj pri vysokých teplotách. Tento projekt bežal vo výskumom ústave CERN vo Švajčiarsku. Jednalo sa o podkritický reaktor, ktorý pracoval na báze Th-U cyklu. Ďalšou výhodou bolo, že zásoby tória sú takmer nevyčerpatelné [4], [11].

ABC

Skratka ABC znamená urýchlovačom riadená premena plutónia. Systém bol navrhnutý tak, aby skrátil polčas rozpadu niektorých produktov podobne ako tomu bolo pri projekte ATW. V reaktore sa štiepilo ^{239}Pu , ktoré bolo použité v jadrových zbraňach a tiež vzniká ako produkt štiepenia v komerčných reaktoroch. V súčasnosti sa táto technológia dostala do úzadia z dôvodu uprednostnenia výroby paliva MOX [4], [11].

APT

Význam skratky APT je urýchľovačom riadená produkcia trícia. Výskum spojený so systémom APT prebiehal hlavne v USA vo výskumných strediskách v Los Alamos, Brookhavene a národnom laboratóriu Sandia. Ich cieľom bolo vytvoriť systém, ktorý bude alternatívou k jadrovým reaktorom. Systém v Los Alamos tvoril urýchľovač s výkonom 1,7 GeV a prúdom 100 mA. Po náraze urýchlených protónov do terča sa uvoľnili spalačné neutróny, ktoré boli dôležité pre udržanie štiepnej reakcie. Ako moderátor sa používala buď ľahká alebo ťažká voda. V minulosti sa trícium skúmalo z dôvodu výroby vodíkovej bomby [4], [11].

Energetický zosilňovač

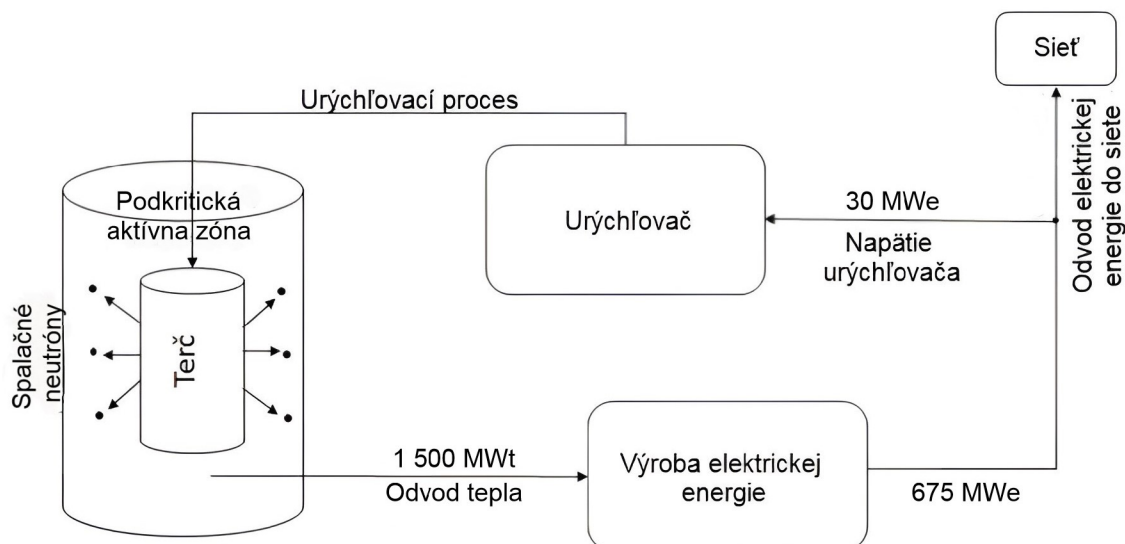
Je to návrh, ktorý využíva tórium ako hlavný typ paliva pri výrobe elektrickej energie. Pritom produkuje minimum rádioaktívneho odpadu. Jeho anglický názov je Energy Amplifier (skratka EA). Navrhol ho taliansky vedec Carlo Rubbia. Projekt mal vytýčených päť cieľov:

- Vysoká miera inherentnej bezpečnosti;
- Minimálna produkcia dlho žijúcich rádionuklidov a z toho vyplývajúca nepotrebnosť využitia hlbinného úložiska;
- Zabezpečenie čo najnižšej miery množenia jadrových materiálov;
- Efektívnejšie využívanie prírodného paliva namiesto toho, aby sa muselo obohacovať;
- Čo najnižšie možné náklady na vyrobenú elektrickú energiu a najvyššia možná prevádzková teplota v porovnaní s doteraz používanými klasickými ľahkovodnými reaktormi [4].

Čo sa týka spotreby paliva, tak EA je zhruba 250-krát účinnejší ako klasické reaktory. Je to hlavne kvôli tomu, že aktinoidy vo vyhorenom tóriu slúžia ako základ ďalšieho cyklu [4].

Základná schéma sa príliš nelíši od ostatných projektov postavených na princípe ADS. Táto schéma je ukázaná na obrázku 3.4. Urýchľovač je konštruovaný tak, aby zaistoval energiu protónov 1 GeV. Samotný energetický zosilňovač sa skladá z nádoby s priemerom 6 metrov a výšky 30 metrov. Nádoba je naplnená tekutým olovom. Teplo produkované jadrovou kaskádou je odvádzané pomocou štyroch tepelných výmenníkov. Cirkulácia olova je zaistovaná prirodzenou konvekciou. Palivo v aktívnej zóne je vo forme peliet. Tie sú umiestnené v tenkých ocelových tyčiach, ktoré tvoria palivové súbory. Aktívna zóna je tvorená tromi súmernými oblasťami. Prvá oblasť,

ktorú tvorí spalačný terč, neobsahuje žiadne palivo. Druhá oblasť je oblasť s pali-
vom a tretia je množivá oblasť zaplnená prepracovaným oxidom toričitým (ThO_2).
Nominálny výkon zosilňovača je 1500 MWt [4].



Obr. 3.4: Principiálna schéma energetického zosilňovača (upravené) [4]

3.3 Súčasné transmutačné projekty

3.3.1 HYPER

Skratka HYPER pochádza z anglického HYbrid Power Extraction Reactor a do slo-
venčiny by sa dala preložiť ako hybridný reaktor na získavanie energie. Je to projekt
Kórejského inštitútu pre výskum atómovej energie (The Korea Atomic Energy Rese-
arch Institute, skratka KAERI), ktorý sa zaoberá transmutáciou jadrového odpadu
a výrobou elektrickej energie prostredníctvom transmutácie.

Systém je navrhnutý tak aby sa mohlo vymieňať palivo za prevádzky. Tým by sa
mal dosiahnuť konštantný výkon systému. Pre tento koncept je navrhnuté palivo v
tvare dutého valca. Ako chladivo, a taktiež ako materiál spalačného terča, sa použila
zmes olova a bizmutu. Pre správnu funkciu systému bol navrhnutý urýchľovač s vý-
konom 1 GeV a prúdom 16mA. Projekt HYPER by mal byť schopný transmutovať
380 kg jadrového odpadu za rok [12].

Projekt HYPER mal byť postavený do roku 2006. V prvej fáze (1997-2001) bolo úlohou vytvoriť koncept transmutačného systému a vyvinúť kľúčové technológie. V druhej fáze (2002-2006) sa malo navrhnúť a vybudovať malé skúšobné zariadenie, ktoré malo výkon približne 5 MWt [13].

3.3.2 ADAM

Skratku ADAM, prebranú z anglického Accelerator-Driven subcritical fission in A Molten salt core, môžeme do slovenčiny preložiť ako urýchľovačom riadené podkritické štiepenie jadra roztavenej soli. Výskumom sa zaoberal hlavne profesor Peter McIntyre, ktorý pôsobí na univerzite v Texase [14].

Projekt ADAM vyvíja metódu, ktorá by využívala štiepenie v jadrách roztavených solí (v angličtine známe ako molten salt) na zničenie transuránov alebo štiepenie uránu vo vyhorenom jadrom palive [15].

Systém pracuje v podkritickom režime. Teda systém sa nemôže prehriať ani pri výpadku napájania. Sústavu urýchľovačov tvoria 3 cyklotróny. Je možné meniť veľkosť prúdu v rozmedzí 9-12 mA pre dosiahnutie konštantného výkonu. Projekt sa môže pýšiť tým, že má najrýchlejšie neutrónové spektrum, aké bolo kedy navrhnuté. Neutróny dosahujú energie až 1 MeV [14].

Použitie paliva z roztavenej soli má niekoľko výhod:

- eliminuje tepelný šok,
- optimalizuje vyhorevanie transuránov,
- slúži zároveň ako spalačný terč, moderátor a tiež ako zásoba štiepneho materiálu [14]

Projekt ADAM zničí rovnaké množstvo transuránov ako jadrová elektrárň s elektrickým výkonom 1 GWe. Pri tomto procese taktiež vyprodukuje 280 MW elektrickej energie. Je bezpečný na prevádzku a neexistuje žiadna porucha, ktorá by mohla mať katastrofálne následky. Predpokladaná cena jedného zariadenia je 1 miliarda dolárov. Preto bolo cieľom vytvoriť menšiu verziu tohto projektu s označením "baby-ADAM", ktorá mala byť dokončená v roku 2019. Do prevádzky sa mala dostať v roku 2022 [14].

3.3.3 EUROTRANS

EUROTRANS (z anglického European Research Programme for the Transmutation of High-Level Nuclear Waste in an Accelerator Driven System) je spoločný projekt niektorých štátov Európy, ktorý sa zaoberá transmutáciou vysokoaktívneho jadrového odpadu v systéme poháňanom urýchľovačom (ADS). Podieľa sa na ňom celkovo 17 štátov vrátane Českej Republiky [16].

Aby sme mohli zaviesť metódu P&T vo väčšom rozsahu, musia sa splniť tieto štyri podmienky:

- Projekt by mal preukázať schopnosť spracovať značné množstvo vyhoreného paliva z ľahkovodných reaktorov s cieľom oddeliť plutónium, urán a minoritné aktinoidy.
- Preukázať schopnosť vyrábať potrebné množstvo paliva do konkrétneho transmutačného zariadenia.
- Navrhnuť a skonštruovať jeden alebo viac špecializovaných transmutačných zariadení.
- Skúmať iné zariadenie, ktoré spracuje palivo z transmutoru po ukončení jeho cyklu [17].

Projekt sa zameriava na demonštráciu transmutácie v modernom 50 až 100 MW experimentálnom zariadení poháňanom urýchľovačom. V rámci tohto projektu sa použije spalačný terč navrhnutý v meste Mol v Belgicku, kde sa nachádza aj projekt MYRRHA, o ktorom si viac povieme v kapitole 3.4.1. V strede podkritického jadra sa nachádza spalačný terč. Ten sa musí zmestiť do priestoru, ktorý vznikne odstránením troch palivových kaziet [16].

3.4 Súčasné transmutačné systémy

3.4.1 MYRRHA

Názov pochádza z anglického „Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Application“. Ide o prvý veľký urýchľovačom poháňaný systém na svete. Toto výskumné stredisko vzniklo v roku 1952 a nachádza sa v Belgicku blízko mesta Mol. Skladá sa zo štyroch komponentov a to z lineárneho urýchľovača (LINAC), reaktoru chladeného zmesou olova a bizmutu (LBE), zariadenia, kde sa pracuje s lúčom protónov (The Proton Target Facility) a zariadenia, ktoré je orientované na výskum v oblasti jadrovej fúzie (Full Power Facility) [18]. Každý si môžeme v skratke popísať.

1. **Lineárny urýchlovač** - Má dĺžku 400 m a dodá do reaktora protóny s energiou 600 MeV. Výhoda lineárneho urýchlovača oproti kruhovému (cyklotrónu) je v stabilite lúča protónov. Z urýchlovača sa do reaktoru dostáva 4 mA protónový zväzok, ktorý generuje tok rýchlych neutrónov prostredníctvom spalačnej reakcie. Súčasne sa protóny privádzajú aj do viacúčelového zariadenia protónových terčov (the Proton Target Facility) a do fúznej terčovej stanice (the Fusion Target Station). V súčasnosti je konštruovaný a testovaný v cyklotrónovom centre v belgickom meste Louvain-la-Neuve [18].

2. **Reaktor** - Reaktor v MYRRHe je špeciálny z niekoľkých dôvodov. Je to bazénový typ reaktora, ktorý je chladený 7800 tonami zmesi olova a bizmutu. Všetky primárne systémy sa nachádzajú v reaktorovej nádobe. Tá má výšku 16 metrov a šírku 10 metrov [18].

Štandardne pracuje v podkritickom režime. Z bezpečnostných dôvodov je konštrukcia reaktora vybavená pasívnym chladením. Teda v prípade elektrickej poruchy alebo pri zastavení reaktora je chladenie reaktora zabezpečené prirodzenou cirkuláciou zmesi olova a bizmutu. Predpokladá sa že reaktor bude mať maximálny výkon 100 MWt [18].

Zmes olova a bizmutu (LBE) bola vybraná ako chladivo z niekoľkých dôvodov:

- Široký rozsah prevádzkových teplôt - v porovnaní s jednotlivými zložkami chladiva (olovo 327 °C, bizmut 271 °C) má ich zmes relatívne nízku teplotu topenia (125 °C) a bod varu má na teplote 1670 °C.
- Vynikajúca tepelná vodivosť
- Radičné tienenie - predovšetkým olovo je vynikajúci radiálny štít, ktorý pohlcuje gama žiarenie.
- Použitie ako spalačný terč - je ideálnym médiom ako zdroj spalácie vo vnútri reaktora, kde sa protónový lúč z urýchlovača premieňa na neutróny potrebné na udržanie štiepnej reakcie.
- Mix paliva - chladivo umožňuje okrem uránu 235 a 238 používať širokú škálu palív vrátane paliva MOX.
- Úspora paliva - reaktory chladené olovom a bizmutom používajú oveľa menej paliva a taktiež produkujú málo rádioaktívneho odpadu [18].

3. **The Proton Target Facility** - srdcom tohto zariadenie je systém na separovanie izotopov (ISOL-Isotope Separation On-Line). V ňom sa bude jadrovými reakciami protónového zväzku s materiálom vyrábať široká škála rádioizotopov. Nakoniec sa jeden špecifický rádioizotop s vysokou čistotou dopraví do

laboratória na ďalšiu manipuláciu. Môžeme tu napríklad veľmi detailne sledovať jeho rádioaktívny rozpad [18].

4. **Full Power Facility** - je to výskumné zariadenie, ktoré pozostáva z kontajneru s tečúcou vodou. Po jeho spustení bude jeho úlohou skúmať poškodenia materiálov, ktoré budú spôsobené ožiarení. Tiež bude môcť skúmať materiály súčasne vystavené mechanickému zaťaženiu a ožiareniu. Zariadenie sa predovšetkým zameria na výskum perspektívnych a inovatívnych materiálov a posúdenie účinkov ožarovania na materiály [18].

Výstavba komplexu je rozdelená do troch fáz. V prvej fáze by mal urýchľovač dosiahnuť 100 MeV. Ukončenie tejto fáze je naplánované na rok 2026. Neskôr, do roku 2033, by sa energia mala zvýšiť na 600 MeV. V poslednej fáze by sa mal skonštruovať reaktor. Táto fáza by mala skončiť v roku 2036 [18].

3.4.2 ADANES

Systém ADANES (z anglického accelerator-driven advanced nuclear energy system, čo v preklade znamená pokročilý systém jadrovej energie poháňaný urýchľovačom), pozostáva z niekoľkých podsystémov. Jedným z týchto projektov je ADRUF (z anglického accelerator-driven recycle of used fuel), ktorý sa zaoberá znovuvyužitím vyhoreného paliva a teda uzavretým palivovým cyklom. Ďalším projektom je CiADS (anglicky China initiative Accelerator Driven System), ktorému sa budeme bližšie venovať v ďalšej kapitole [10].

CiADS

Čínsky iniciatívny urýchľovačom riadený systém bude prvým prototypom zariadenia ADS na svete na úrovni megawattov, ktoré bude skúmať bezpečné a správne technológie na likvidáciu jadrového odpadu [19]. Jeho parametre sú uvedené v tabuľke 3.1. Výstavba zariadenia CiADS je ukázaná na obrázku 3.6.

Projekt sa nachádza v inštitúte modernej fyziky v meste Lanzhou v Číne. Zaoberajú sa tam predovšetkým štyrmi oblasťami:

- venujú sa technológiám vysokoenergetických, vysokointenzívnych a vysokopolahlivých supravodivých lineárnych urýchľovačov,
- podporujú výskum neutrónovej a materiálnej vedy,
- skúmajú a vyvíjajú technológie štvrtej generácie pre jadrovú energetiku,
- skúmajú techniky transmutácie megawattového ADS [19].

Systém CiADS pozostáva zo štyroch komponentov:

1. **Supravodivý lineárny protónový urýchlovač (sc-LINAC)** - 350 metrov dlhý lineárny urýchlovač bude poskytovať lúč protónov s energiou 500 MeV a výkonom 2,5 MW. Súčasťou bude zdroj iónov, linka na transport zväzku s nízkou energiou, linka na transport zväzku so strednou energiou, supravodivý urýchlovač a linka na transport zväzku s vysokou energiou. Pri modernizácii by sa mohol dostať až na 1,5 GeV [19]. Prototyp lineárneho urýchlovača je ukázaný na obrázku 3.5.



Obr. 3.5: Prototyp lineárneho urýchlovača [10]

2. **Vysoko výkonný spalačný terč z LBE** - bude spojený s reaktorom a navrhnutý tak, aby vydržal maximálny výkon lúča 2,5 MW. Bude obsahovať telo terča, systém spojenia urýchlovača s terčom a systém diaľkovej prevádzky a údržby na výmenu okna terča. Neskôr by sa mala vyvinúť technológia gravitačného hustého guľôčkového terča [19].
3. **Podkritický reaktor** - Nachádza sa v ňom zmes olova a bizmutu, ktorá funguje ako chladivo, okno spalačného terča a aj spalačný terč. Na zaistenie jeho podkritickosti v prípade havárie sa použije pasívny systém tepelnej izolácie [19].
4. **Experimentálne koncové zariadenia** - budú rozdelené do viacerých oblastí podľa rôznych úrovní výkonu a bezpečnosti [19].

Projekt je rozdelený na niekoľko fáz a dokončený by mal byť už v roku 2030. Prvá fáza sa týkala skúmania technológií súvisiacich s transmutáciou a recyklovaním paliva (2011 - 2016). V druhej fáze, v rokoch 2018 - 2024, sa začalo s výstavbou vysokovýkonného výskumného zariadenia CiADS [7]. Tretia fáza predpokladá zavedenie technológie ADS ako neoddeliteľnej súčasť uzavretého jadrového palivového cyklu v Číne. Cieľom tohto čínskeho programu je znížiť objem vysokoaktívneho odpadu o 96 % a skrátiť jeho polčas rozpadu o 500 rokov [10].

Tab. 3.1: Parametre projektu CiADS [20]

Parameter	Hodnota
Typ urýchľovača	supravodivý lineárny urýchľovač
Urýchľená častica	protón
Energia (MeV)	500
Prúd (mA)	5
Výkon zväzku (MW)	2,5
Typ terča	guľôčkový
Materiál terča	zliatina volfrámu
Výkon terča (MW)	2,5
Typ reaktora	rýchly, podkritický
Výkon reaktora (MW)	7,5
Palivo	UO ₂
Chladivo	LBE
Efektívny multiplikačný koeficient	približne 0,75



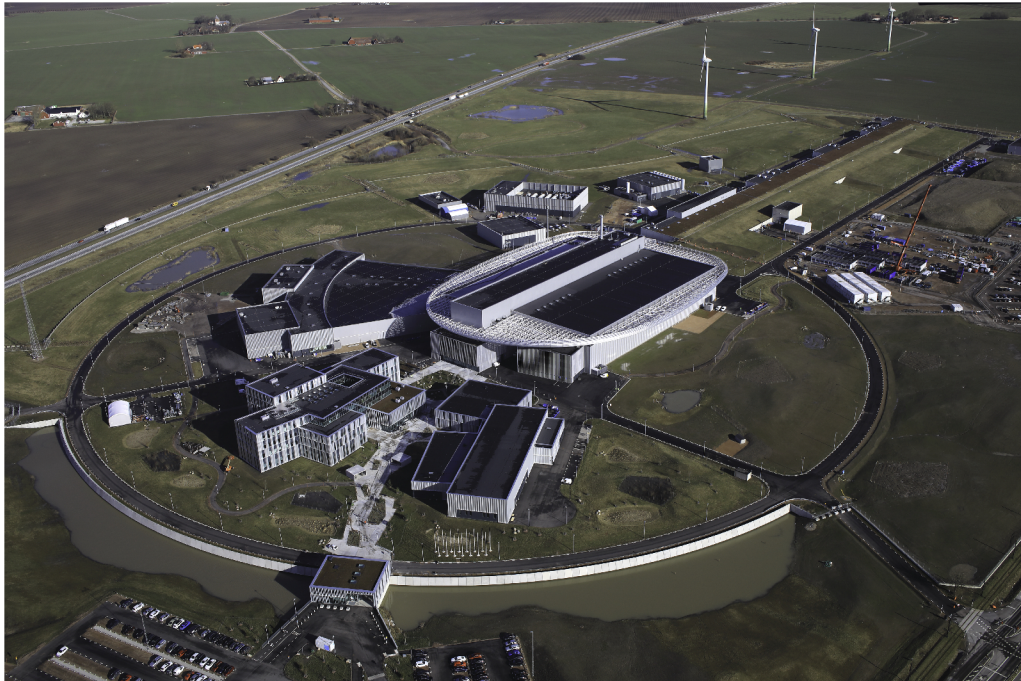
Obr. 3.6: Systém CiADS vo výstavbe [19]

3.5 Spalačné zdroje

3.5.1 Európsky spalačný zdroj

Názov vychádza z anglického European Spallation Source (skratka ESS). Objekt ESS sa nachádza v blízkosti mesta Lund vo Švédsku. Manažérske a softvérové centrum

sa nachádza v Kodani. ESS pozostáva z 23 budov na celkovej rozlohe 70 hektárov. Začiatok výstavby bol v roku 2014 a posledná budova bola dokončená v decembri 2021. Do projektu je zapojených 13 štátov vrátane Českej republiky [21]. Komplex európskeho spalačného zdroja je ukázaný na obrázku 3.7.



Obr. 3.7: Projekt ESS (fotené vo februári 2022) [21]

V zdroji iónov sa produkujú protóny. Proces je založený na princípe odparovania. Z plynného vodíka sa odparí elektrón a zostane nám len samotný protón. Tieto protóny sú potom sústredené do zväzkov a urýchlené v lineárnom urýchľovači. Urýchľovač má dĺžku 600 m a je rozdelený na teplú a chladnú sekciu. Na chladenie sa používa tekuté hélium, ktoré má teplotu 2 kelviny. Po urýchlení narážajú protóny do terču z volfrámu ktorý má tvar kruhu. Vzniknuté spalačné neutróny sú zmoderované a putujú do výskumných hál. Tam narazia do vzorky materiálu umiestnenej v prístrojoch. V roku 2022 malo ESS celkovo 15 takýchto prístrojov. Plán do budúca počítal s výstavbou ďalších 7 [21].

Po náraze sledujú vedci zmenu neutrónov pomocou detektorov. Odhaduje sa, že po dokončení všetkých prístrojov bude možné urobiť až 800 experimentov za rok. Výskum je zameraný hlavne na výrobu nových, lepších a odolnejších materiálov v oblasti nových zdrojov energie, transportu a medicíny [21].

3.5.2 Spalačný neutrónový zdroj

Spalačný neutrónový zdroj (anglicky Spallation Neutron Source, skratka SNS) sa nachádza v Oak Ridge, USA. Výstavba tohto projektu trvala od roku 1999 a skončila v roku 2006. Jedná sa o jeden z najväčších zdrojov spalačných neutrónov [4].

Pomocou iónového zdroja produkuje záporne nabité ióny vodíku. Tieto ióny sú potom vstrekané do lineárneho urýchľovača s energiou 2,5 MeV. Sú tu použité 3 etapy urýchľovania. Prvé dve etapy predstavujú urýchľovače vyrobené z medi. Pracujú na izbovej teplote a urýchľujú zväzok na 200 MeV. Treťou etapou je urýchľovač s nióbovými dutinami. Tieto dutiny sú chladené tekutým héliom. Pri chladení sa dosahuje teploty 2 kelviny. V urýchľovači sa energia častíc zvýši až na 1000 MeV. Po urýchlení putujú častice do akumulátorového prstenca. Tu sa z iónov vodíka stanú protóny, ktoré sú usporiadané do zväzku. Tieto zväzky ostreľujú terč až 60 krát za sekundu. Na materiál terču sa používa kvapalná ortuť [22].

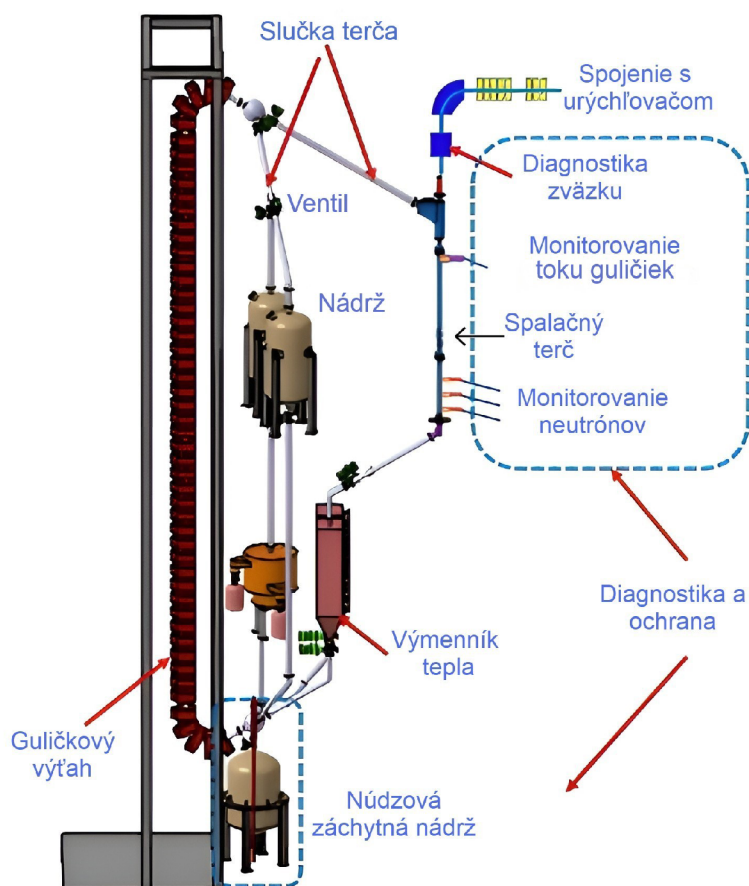
Neutróny sú moderované dvomi spôsobmi. Prvým je voda, ktorá ich zmoderuje na úroveň tepelných neutrónov a druhým je vodík, ktorý ich dostane až na úroveň chladných neutrónov. Spôsob moderácie závisí na tom na aké účely chceme tieto neutróny použiť. Zdroj neutrónov je udržiavaný v podkritickom stave [23], [4].

Neutróny ktoré vzniknú smerujú do moderných prístrojov, ktoré slúžia na rôzne výskumy v oblasti fyziky, chémie, biológie či materiálovej vedy [22].

4 Gulôčkový terč

4.1 Gulôčkový terč systému CiADS

Po náraze urýchlenej častice do gulôčky prebieha spalačná reakcia. Počet uvoľnených neutrónov a ich energia závisí od materiálu terča a tiež na energií urýchlených častíc [9]. V nasledujúcich kapitolách si popíšeme princíp funkcie gulôčkového terča, ktorý vyvíjajú vedci v Číne a taktiež jeho výhody oproti terčom z iných materiálov. Princíp funkcie tohto terča je znázornený na obrázku 4.1.



Obr. 4.1: Schematické znázornenie funkcie gulôčkového terča (upravené) [20]

Vo vnútri terča sa nachádzajú malé gulôčky s priemerom 1 mm. Testovanie preukázalo sľubný výkon pri použití zliatiny volfrámu a niklu. Preto sa ako hlavný materiál gulôčkového terča sa uvažuje práve volfrám [20].

Gulôčky dôsledkom gravitačnej sily padajú nadol. Interakcia gulôčok s urýchlenou časticou trvá len 1 sekundu. Počas tejto doby vzniká pomocou spalačnej reakcie

veľké množstvo neutrónov. Keďže sa trubka s guľôčkovým terčom nachádza v strede reaktoru, vyprodukované neutróny môžu hneď reagovať s palivom [20]. Reakcia neutrónu a paliva môže prebiehať dvomi spôsobmi. Buď sa jedná o transmutáciu alebo o štiepenie. To, ktorá reakcia prebehne, závisí na energií neutrónov a zložení paliva [9].

Následkom veľkého množstva energie, ktorá vzniká pri spalačnej reakcii, sa guľôčka zohreje. Guľôčky majú pri vstupe do reaktora teplotu 250°C. Priemerná výstupná teplota je nižšia ako 330°C. Túto tepelnú energiu ďalej predáva oleju vo výmenníku tepla. Následne je guľôčka pomocou elektromagnetického výtahu dopravená na vrch spalačného terča. Tento cyklus sa opakuje [20].

Núdzová záchytná nádrž je umiestnená na samom konci systému. Jej úlohou je bezpečne zachytiť všetky guľôčky v prípade akejkoľvek mimoriadnej udalosti (napr. zemetrasenia) [20].

Od hustého guľôčkového terču (skratka DGT) sa očakáva odstránenie nevýhod oloveného terču. Jedná sa hlavne o termodynamickú nestabilitu, koróziu a toxicitu. DGT má v porovnaní s terčmi z ťažkých kvapalných kovov veľa výhod. Napríklad vyšší neutrónový výťažok, už spomínanú nízku toxicitu a koróziu a vysokú tepelnú vodivosť [20].

4.2 Materiál guľôčkového terča

Pri výbere vhodného materiálu pre guľôčkový terč sa uvažuje o zmesi ľahkého a ťažkého prvku. Tie by sa mali navzájom doplniť a vytvoriť ideálnu zmes na výrobu guľôčok. Z ťažkého materiálu získame väčší počet uvoľnených neutrónov s nízkou energiou. Neutrónov z ľahkého materiálu bude síce menej, ale budú mať vyššie energie [9].

4.2.1 Ľahké prvky

V prípade ľahkých prvkov sa uvažuje predovšetkým o lítiu (chemická značka Li), berýliu (chemická značka Be), bóre (chemická značka B) a uhlíku (chemická značka C). Pri pohľade na periodickú tabuľku A.1 môžeme vidieť, že prvky vodíku a hélia sú príliš ľahké na použitie v terči. Teraz sa pozrime na prvky s väčším protónovým číslom ako má uhlík. Prvky dusík, kyslík, fosfor a neón sú plyny a bolo by ťažké použiť ich pri výrobe terču, keďže potrebujeme pevný materiál. Prvky nasledujúce za neónom už nepovažujeme za ľahké a teda nie sú vhodné pre použitie v terči [9]. Účinné prierezy jednotlivých izotopov v závislosti na energií neutrónu sú uvedené

v prílohe B.1. Tieto grafy boli získané pomocou programu JANIS [24], konkrétne z jeho knižnice ENDF/B-VIII.0 [25].

Lítium

Lítium má tri protóny. Je to ľahký kov striebornej farby a patrí medzi alkalické kovy. Má dva stabilné izotopy, ktoré sa vyskytujú v prírode [26]. Tieto izotopy sú ukázané v tabuľke 4.1.

Tab. 4.1: Stabilné izotopy lítia [27]

Izotop	Percentuálne zastúpenie v prírode (%)
${}^6\text{Li}$	7,2
${}^7\text{Li}$	92,5

Lítium používame napríklad v batériách, medicíne alebo pri výrobe skla. Pre nás má aj dve veľké nevýhody. Je horľavé a taktiež spôsobuje koróziu [26]. Tieto vlastnosti znemožňujú jeho použitie v guľôčkovom terči.

Berýlium

Berýlium sa nachádza v periodickej tabuľke hneď za lítium. Má štyri protóny a patrí medzi kovy. Má len jeden izotop, ktorý sa vyskytuje v prírode. Jedná sa o ${}^9\text{Be}$, ktorého účinný prierez je ukázaný v prílohe [26].

Je to ľahký a lesklý kov, ktorý môžeme získať napríklad elektrolýzou halogenidu. Berýlium nie je magnetické a je dobrým tepelným vodičom. Používa sa ako prídavok do rôznych zliatín. Tieto zliatiny majú vynikajúce tepelné, mechanické a elektrické vlastnosti. Taktiež má dobré vlastnosti z hľadiska generovania neutrónov. Avšak pre naše použitie neprípadá do úvahy. Jeho zlúčeniny sú vysoko toxické a vdychovanie berýliového prachu vedie k berylióze, zápalu pľúc [26].

Bór

Bór patrí medzi polokovy a má protónové číslo 5. V prírode má dva stabilné izotopy ktoré sú ukázané v tabuľke 4.2.

Tab. 4.2: Stabilné izotopy bóru [27]

Izotop	Percentuálne zastúpenie v prírode (%)
${}^{10}\text{B}$	19,9
${}^{11}\text{B}$	80,1

Tak ako predchádzajúce prvky, ani bór nie je vhodný materiál do guľôčkového terča. Po prvé, bórové tyče a kyselina boritá sa používajú v ľahkovodných reaktoroch ako absorbátory neutrónov. Od materiálu guľôčkového terča je požadovaný presný opak, a to, aby z neho vyletelo čo najviac neutrónov. Po druhé, patrí medzi dráždivé látky, čo je jeho ďalšia nevýhoda [26].

Uhlík

Uhlík patrí medzi nekovy a má protónové číslo 6. V prírode sa vyskytuje v dvoch štruktúrálnych formách a to ako grafit alebo diamant. Podobne ako bór a lítium má len 2 stabilné izotopy, ktoré nájdeme v tabuľke 4.3. Závislosť účinného prierezu uhlíku na energií neutrónov je ukázaná v prílohe B.1 a B.2.

Tab. 4.3: Stabilné izotopy uhlíku [27]

Izotop	Percentuálne zastúpenie v prírode (%)
^{12}C	98,9
^{13}C	1,1

Jeho forma grafitu je dobre známa hlavne kvôli použitiu v určitých typoch jadrových reaktorov, kde je jeho funkciou moderovať neutróny. Forma diamantu patrí k najtvrdším známym materiálom. Tiež je známa kvôli odolnosti voči korózií a dobremu odvodu tepla [26].

Na rozdiel od ostatných mäkkých materiálov nemá toxické ani dráždivé účinky. Nie je ani rádioaktívny. Preto je to jediný ľahký materiál vhodný pre využitie v guľôčkovom terči [26].

4.2.2 Ťažké prvky

V prípade ťažkých prvkov je zoznam potencionálnych materiálov širší. Uvažujeme materiály s vysokým protónovým číslom, nukleónovým číslom a hustotou. To, že má prvok vysoké nukleónové číslo znamená, že má vo svojom jadre veľké množstvo neutrónov, ktoré by sa mohli uvoľniť pomocou spalačnej reakcie. Je to vlastnosť ktorú po danom materiáli požadujeme [9].

Pri pohľade na periodickú tabuľku A.1 budeme uvažovať prvky od tantalu (protónové číslo 73) až po bizmut (protónové číslo 83). Prvky s menším protónovým číslom ako tantal neuvažujeme kvôli tomu, že sú ľahké. Prvky s väčším protónovým

číslo od bizmutu sú rádioaktívne a teda ich nebudeme uvažovať. Výnimku tvoria len prvky tória a uránu (protónové čísla 90 a 92), ktoré budú tiež zahrnuté do užšieho výberu potencionálnych materiálov [9], [28].

Tantal

Je to sivý, ťažký a veľmi pevný kov [26]. V prírode sa nachádzajú dva jeho izotopy ukázané v tabuľke 4.4.

Tab. 4.4: Stabilné izotopy tantalu [27]

Izotop	Percentuálne zastúpenie v prírode (%)
^{180m}Ta	0,012
^{181}Ta	99,988

Tantal je takmer úplne odolný voči chemikáliám pri teplotách nižších ako 150°C. Túto vlastnosť ale nebudeme uvažovať, keďže z kapitoly 4 vieme, že guľôčky budú namáhané teplotou až 330°C. Nespornou výhodou môže byť jeho bod topenia, ktorý je až na úrovni 3017°C [28]. Ďalšou dobrou vlastnosťou je jeho veľká odolnosť voči korózií. Tú pomáha zabezpečiť oxidový povlak, ktorý sa tvorí na jeho povrchu [26].

Volfrám

Volfrám je sivobiely a lesklý kov [26]. V prírode sa nachádza až päť jeho stabilných izotopov, ktorých percentuálny podiel môžeme vidieť v tabuľke 4.5.

Tab. 4.5: Stabilné izotopy volfrámu [27]

Izotop	Percentuálne zastúpenie v prírode (%)
^{180}W	0,1
^{182}W	26,3
^{183}W	14,3
^{184}W	30,7
^{186}W	28,6

Volfrám má najvyšší bod tavenia zo všetkých materiálov. Dosahuje teploty až 3422°C. Tiež má vysokú odolnosť voči korózií. Nevýhodou je to, že oxiduje na vzduchu a teda musí byť chránený [28]. Ďalej je volfrám základom celého radu zliatin, ktoré sa používajú na radiačné tienenie, pretože majú väčšiu hustotu ako olovo [26].

Tórium

Čisté tórium je strieborno-biely lesklý kov, ktorý je na vzduchu stabilný. Tórium na vzduchu pomaly matnie. Postupne zmení svoju farbu až na čiernu. Tórium pomaly podlieha pôsobeniu vody. Nie je ho ľahké rozpustiť vo väčšine bežných kyselín okrem kyseliny chlorovodíkovej. Má veľmi vysokú teplotu topenia ktorá je až na hodnote 1750°C [28]. V prírode sa nachádza jediný jeho stabilný izotop. Jedná sa o ^{232}Th [27].

Urán

Urán má 92 protónov, je sivej farby a patrí do skupiny aktinoidov. Je známy predovšetkým kvôli tomu, že sa používa ako palivo do väčšiny jadrových reaktorov. Nie je mimoriadne vzácny a je bežnejší ako napríklad berýlium alebo volfrám. Teplotu topenia má na hodnote 1132°C [28]. Má 2 stabilné izotopy, ktoré sú ukázané v tabuľke 4.6.

Tab. 4.6: Stabilné izotopy uránu [27]

Izotop	Percentuálne zastúpenie v prírode (%)
^{235}U	0,72
^{238}U	99,28

Nevhodné prvky

V tejto kapitole si rozoberieme ostatné prvky zo skupiny ťažkých prvkov a povieme si prečo ich nebudem uvažovať ako materiál guľôčkového terča.

- Rénium - je to vzácny a tým pádom aj veľmi drahý prvok [26].
- Osmium - tetraoxid osmia (OsO_4), ktorý sa pomaly uvoľňuje s osmiového prášku, je veľmi toxický [28]. Osmium sa radí medzi horľavé prvky. Taktiež je korozívne a spôsobuje zdravotné problémy [26].
- Irídium - je veľmi vzácny a drahý prvok [26].
- Platina - podobne ako irídium je platina veľmi vzácny a drahý prvok [26].
- Zlato - je veľmi drahé [26].
- Ortuť - je to kovová kvapalina, ktorá je prchavá. Výpary ortute sú škodlivé. Taktiež by bolo náročné vytvárať ortuť do tvaru guľôčky [28].
- Tálium - je to veľmi mäkký kov podobný olovu. Bod topenia je na hodnote 304°C. To znamená že by sa nám guľôčky mohli začať topiť. Tálium je toxické a môže spôsobiť rakovinu [28].

- Olovo - je veľmi mäkké a nebezpečné pre zdravie [28].
- Bizmut - teplota topenia bizmutu je na hodnote 271°C, čo je problém pre jeho použitie v terči. Má aj malú tepelnú vodivosť, čo znamená, že by sa guľôčky mohli viac zahrievať [28].

4.3 Vhodné zlúčeniny

S pomocou zdrojov [29], [30] a znalosti vhodných prvkov boli vybrané nasledujúce zlúčeniny:

Karbid tantalu

Karbid tantalu (chemická značka TaC) má zlatohnedú farbu. Hmotnosť molekuly je 192,959 g/mol. Má o niečo menšiu hustotu ($14,3 \text{ g.m}^{-3}$) ako čistý tantal ($16,65 \text{ g.m}^{-3}$). Výrazne sa zníži jeho tepelná vodivosť z $54,4 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ na $22,0 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Čo môže byť výhodou tejto zlúčeniny je fakt, že má vysoký bod topenia a to až 3865°C [29].

Karbid ditantalu

Ďalšia zlúčenina tantalu, karbid ditantalu (značka Ta₂C), má podobné vlastnosti ako TaC. Najväčší rozdiel je v molekulárnej hmotnosti, ktorá vďaka dvom atómom tantalu vzrástla na 373,907 g/mol. Hustota Ta₂C je $15,1 \text{ g.m}^{-3}$. Podobne ako TaC má vysoký bod topenia a to 3327°C [29].

Karbid volfrámu

Má chemickú značku WC. Je to sivá tuhá zlúčenina. Pridaním uhlíku k volframu sa jeho hustota zmenší z pôvodných $19,3 \text{ g.m}^{-3}$ na $15,7 \text{ g.m}^{-3}$. Molekulárna hmotnosť zlúčeniny je 195,85 g/mol. Teplota topenia mierne poklesne z 3370°C na stále dostatočných 2800°C [29]. Má výbornú tepelnú vodivosť a to až $85 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Problémom tejto zlúčeniny môže byť fakt, že sa jedná o horľavú zlúčeninu. Dokonca existuje pravdepodobnosť samozohrievania, čo môže neskôr spôsobiť požiar. Dlhodobé vdychovanie výparov WC môže poškodiť pľúca [30].

Karbid divolfrámu

Má podobné vlastnosti ako karbid volfrámu. Jeho chemická značka je W₂C. Hustota je o niečo menšia ako pri WC. Dosahuje hodnoty $14,8 \text{ g.m}^{-3}$. Taktiež má nižšiu aj teplotu topenia. Má hodnotu 2785°C [29]. Podobne ako pri WC ide o horľavú

zlúčeninu. V zdroji [30] sa v rámci bezpečnostných opatrení píše aj o tom, aby nebola zlúčenina vystavená pôsobeniu tepla. Neuvádza sa však teplota, ktorá by už bola kritická [30].

Karbid tória

Jeho chemická značka je ThC. Hmotnosť molekuly je 244,049 g/mol. V porovnaní s predchádzajúcimi zlúčeninami má ThC najmenšiu hustotu. Konkrétne 10,6 g.m⁻³. Jeho výhodou môže byť stále vysoká teplota topenia, ktorá dosahuje 2500°C [29].

Dikarbid tória

Dikarbid tória (značka ThC₂) je žltá kryštalická látka. Molekulárna hmotnosť je 256,06 g/mol. Má ešte menšiu hustotu ako ThC a to len 9 g.m⁻³. Avšak aj tento prvok má vysokú teplotu topenia. Konkrétne 2650°C [29].

Karbid uránu

Má chemickú značku UC. Čo sa týka jeho vlastností, je to sivá kryštalická látka. Molekulárna hmotnosť má hodnotu 250,04 g/mol. Teplota topenia dosahuje vysokú hodnotu 2790°C [29].

Dikarbid uránu

Jeho chemická značka je UC₂. Je to taktiež sivá kryštalická látka. Keďže má o jeden atóm uhlíka navyše oproti UC, má aj vyššiu molekulárnu hmotnosť. Tá dosahuje hodnoty 262,051 g/mol. Hustota tejto zlúčeniny je 11,3 g.m⁻³. Teplota topenia je v porovnaní s ostatnými zlúčeninami relatívne nízka a to 2350°C [29].

Trikarbid diuránu

Taktiež ide o sivú kryštalickú látku. Má značku U₂C₃. Má najväčšiu molekulárnu hmotnosť zo všetkých zlúčenín. Dosahuje 512,091 g/mol. Jeho hustota je 12,7 g.m⁻³. Zdroj [29] udáva len hodnotu teploty rozloženia zlúčeniny, ktorá je 1700°C. Avšak nemusíme mať obavy. Ako bolo povedané v kapitole 4 po ožiarení lúčom protónov by mali mať guľôčky teplotu len okolo 330°C [29].

5 Výpočty

Aby sme mohli určiť, ktorá zlúčenina je pre použitie v guľôčkovom terči najvýhodnejšia bolo potrebné urobiť výpočty. Zamerali sme sa na dve veličiny.

1. Produkciu neutrónov ktoré vzniknú po náraze urýchlenej častice do spalačného terča.
2. Energetické spektrum neutrónov, uvoľnených zo spalačného terča.

Výpočty boli robené pomocou programu TALYS [31] a grafy v programe Microsoft Excel. TALYS je program na analýzu a predpovedanie jadrových reakcií. Pomocou jednoduchého príkazu vie vygenerovať veľké množstvo výstupných súborov. V našom prípade tieto súbory obsahovali podrobnejšie informácie o reakcií protónu s prvkom terča. Jednalo sa napríklad o jednotlivé typy účinných prierezov (účinný prierez pre absorpciu, účinný prierez pre štiepenie...), produkciu neutrónov v jednotlivých fázach spalačnej reakcie, informácie o ionizujúcom žiarení a informácie o energetickom spektre uvoľnených častíc (protón, neutrón, deutérium...) [31].

Je dôležité ešte podotknúť, že program TALYS vie počítať len s jednotlivými prvkami. Konečné výsledky pre zlúčeniny boli získane výpočtami v programe Microsoft Excel. Taktiež treba spomenúť, že TALYS neberie do úvahy geometriu materiálu. Takže sme nemohli zadať podmienku, že materiál terča má byť v tvare guľôčky.

5.1 Produkcia neutrónov

Príklad výstupu z programu TALYS je ukázaný v tabuľke C.1. Prvý stĺpec ukazuje energie urýchleného protónu. Druhý stĺpec účinný prierez daného materiálu (inak povedané mieru pravdepodobnosti reakcie prvku s neutrónom) a tretí celkovú produkciu neutrónov. Ako materiál terča sa používala prírodná zmes jednotlivých prvkov. To znamená, že jeho zloženie bolo rovnaké ako to je popísané v kapitole 4.2. Výpočty boli urobené pre prírodné zmesi prvkov Ta, W, U, Th a C.

Pre uhlík platí závislosť ukázaná na grafe C.2. Môžeme vidieť, že s rastúcou energiou protónu rastie aj počet uvoľnených neutrónov aj účinný prierez uhlíku. Počet uvoľnených neutrónov je síce malý (pri energií protónu 1000 MeV sa uvoľnia približne 2), ale zato majú väčšiu energiu ako neutróny uvoľnené z ťažkého materiálu. Energetické spektrum jednotlivých prvkov si ukážeme neskôr, v kapitole 5.2.

Rozdielny priebeh je pri ťažkých materiáloch. Ako príklad si uvedieme prírodnú zmes uránu. Ako môžeme vidieť na grafe C.1, približne do oblasti 500 MeV je závislosť skoro lineárna. Potom dochádza k prudkému nárastu oboch veličín až do oblasti

800 MeV. V okolí tejto energie dosahuje účinný prierez ťažkých materiálov svoje maximum. Aj napriek tomu, že pri vyšších energiách nám pravdepodobnosť interakcie protónu s daným prvkom klesá, oplatí sa nám časticu ešte viac urýchliť. Výsledkom je získanie väčšieho počtu uvoľnených neutrónov. Ak by sme častice urýchľovali ešte viac, počet uvoľnených neutrónov by sa zvyšoval len mierne a zároveň by nám klesal účinný prierez. Pretože urýchlenie na vyššie energie by nás stálo veľa rokov výskumu a peňazí, považujeme energiu 1000 MeV za hodnotu, na ktorú by sme chceli protóny urýchliť [9].

5.1.1 Výpočet produkcie neutrónov a účinného prierezu v zlúčeninách

Výpočet účinného prierezu a produkcie neutrónov v zlúčeninách sme robili pomocou priamej úmernosti. Zvolili sme si rôzne pomery jednotlivých prvkov v zlúčenine, pričom sme postupovali s rozdielom 10 %. Tu sa jedná o čisto teoretickú úvahu pre účely výpočtu a porovnanie jednotlivých pomerov. Takýmto spôsobom sme získali celkom 9 zlúčení s rôznym pomerom prvkov v zlúčenine. Neskôr sme spočítali obe veličiny pre všetky zlúčeniny.

Pre zlúčeninu UC sme vyniesli do grafov závislosti produkcie neutrónov na energiách protónu (C.4) a účinného prierezu na energiách protónu (C.3). Vidíme, že so zväčšujúcim sa podielom ťažkého prvku v zlúčenine rastú aj dané veličiny. Preto ako najvýhodnejší pomer volíme 90% ťažkého prvku a 10 % uhlíku.

Tabuľka s vypočítanými hodnotami karbidu uránu (UC) s pomerom jednotlivých prvkov 90% U a 10% C je ukázaná v prílohe C.2. Pri výpočtoch uvažujeme, že pokiaľ bude obsah uránu v zlúčenine 90% poklesnú veličiny (produkcia neutrónov a účinný prierez) na 90% pôvodnej hodnoty. Výpočet účinného prierezu karbidu uhlíka s pomerom 90%U a 10%C teda vyzerá nasledovne:

$$x_s(UC) = x_s(U) \cdot 0,9 + x_s(C) \cdot 0,1 \quad (5.1)$$

,kde x_s označuje účinný prierez.

Neskôr sme v grafoch C.5 a C.6 porovnali obe veličiny pre všetky zlúčeniny s pomerom 90% ťažkého prvku a 10 % uhlíku. Z týchto grafov je vidieť, že ako najvýhodnejší sa javia zlúčeniny W_2C , Ta_2C a U_2C_3 .

5.2 Energetické spektrum

Program TALYS nevedel vypočítať energetické spektrum pre prvok ako celok. Počítal energetické spektrum len pre jednotlivé izotopy. Preto sme za správne hodnoty považovali výpočty pri izotopoch, ktoré majú najväčšie zastúpenie v prírodnej zmesi, tak ako ukazuje kapitola 4.2. Pre prvok uránu ide o izotop ^{238}U , v prípade tória o jeho jediný stabilný izotop ^{232}Th , pre volfrám je to izotop ^{184}W , pre tantal ^{181}Ta a pre uhlík je to ^{12}C .

Ako sme si ukázali v predchádzajúcej kapitole 5.1, najvýhodnejšie je pre nás urýchliť protóny na energiu 1000 MeV. Preto v tejto kapitole budeme popisovať energetické spektrum jednotlivých prvkov a zlúčenín práve na energiách urýchlených protónov 1000 MeV. Príklad výstupu z programu TALYS je ukázaný v tabuľke C.3. Hodnoty energií pokračujú až k hodnote 1000 MeV, ale pre dlhý rozsah tabuľky sme sa rozhodli uviesť len jej časť. Z programu TALYS sme dostali hodnoty energií a účinného prierezu. Produkcia neutrónov bola zistená nasledujúcim spôsobom:

$$n = xs \cdot \frac{n_{celk}}{xs_{celk}} \quad (5.2)$$

kde: nje produkcia neutrónov pri danej energii

xsje účinný prierez prvku pri danej energii

n_{celk}je celková produkcia neutrónov

xs_{celk}je celkový účinný prierez

Celkovú produkciu neutrónov sme zistili už skôr. Pre zlúčeninu UC to boli hodnoty z tabuľky C.2. Celkový účinný prierez je súčet účinných prierezov v tabuľke C.3.

Ďalej v prílohe C.7 a C.8 môžeme vidieť porovnanie energetického spektra uhlíku ^{12}C a uránu ^{238}U . Z grafov vyplýva, že produkcia neutrónov s energiami do 10 MeV je vyššia pri uráne, ktorý patrí medzi ťažké prvky. Pri uhlíku, ako zástupcovi ľahkých prvkov, vznikajú neutróny s energiami nad 15 MeV častejšie ako je tomu pri uráne. Takže kombináciou ťažkého a ľahkého prvku dostaneme dostatočný počet neutrónov s väčším spektrom energií ako keby bol použitý len ťažký prvok.

Pre rôzne pomery uhlíku a uránu v zlúčenine karbidu uránu bol vypracovaný graf C.9. Na ňom vidíme, že pre čo najlepšie energetické spektrum je výhodné použiť zlúčeninu s čo najvyšším obsahom ťažkého prvku. Tým dosiahneme väčší počet uvoľnených neutrónov s nízkymi energiami. Pri energiách vyšších ako 12 MeV je už rozdiel medzi jednotlivými zlúčeninami zanedbateľný.

Aby sme mohli určiť, ktorá zlúčenina má najlepšie energetické spektrum, boli vypracované grafy C.10 a C.11. Sú na nich uvedené zlúčeniny s 90% obsahom ťažkého prvku a 10% obsahom ľahkého prvku. Na grafe C.10 je vidieť, že pre produkciu neutrónov s energiami okolo 2 MeV je najvýhodnejšie použiť zlúčeniny W_2C a Ta_2C . Pre produkciu neutrónov s energiami vyššími ako 6 MeV je výhodnejší prvok U_2C_3 . To môžeme vidieť aj na detaile grafu C.11, kde má pri energiách vyšších ako 10 MeV o niečo väčšiu produkciu neutrónov zlúčenina U_2C_3 .

Pomocou určenia produkcie neutrónov a ich energetického spektra sme zúžili výber na 3 zlúčeniny. Ide konkrétne o W_2C , Ta_2C a U_2C_3 . O tom, ktorá zlúčenina je najlepšia rozhodnú ich vlastnosti. Grafy v prílohe B nám popisujú závislosť účinného prierezu materiálu spalačného terča pre reakcie neutrónov na ich energií. Cieľom je, aby bol účinný prierez materiálu spalačného terča pre neutróny čo najnižší. Keďže uhlík je súčasťou každej zlúčeniny, budeme porovnávať len grafy B.3, B.7 a B.11. Zaujímá nás predovšetkým oblasť 1-10 MeV, v ktorej vzniká najviac neutrónov. Tá je pre všetky prvky približne rovnaká. Čo sa týka vlastností popísaných v kapitole 4.3 tak najlepšie vlastnosti má Ta_2C . Má najväčšiu hustotu aj teplotu topenia.

Záver

Cielom bakalárskej práce bolo spracovať prehľad technológií pre transmutáciu vyho- horeného jadrového paliva, popísať technológie ADS a vybrať vhodný materiál pre spalačný guľôčkový terč.

Teoretická časť práce sa zaoberá vysvetlením základných pojmov ako sú vyho- rené jadrové palivo, transmutácia, spalačná reakcia a urýchlovačom riadený systém. Neskôr boli podrobnejšie popísané niektoré transmutačné technológie a systémy. Momentálne je najmodernejším spalačným projektom CiADS, kde vedci skúmajú spalačný guľôčkový terč.

V experimentálnej časti sa skúmalo, aká zlúčenina by bola vhodná pre použitie v spalačnom terči. K výberu by som doporučil jednu zo zlúčenín Ta_2C alebo U_2C_3 . V prípade W_2C by sa musela viac preskúmať jeho horľavosť a do akej miery by bola problémom.

Zlúčenina Ta_2C má veľmi podobné vlastnosti ako W_2C , avšak nie je horľavá. Ďal- šími výhodami sú vysoká hustota a vysoký bod topenia. Táto zlúčenina má podobnú produkciu neutrónov ako W_2C a aj ich energetické spektrum je veľmi podobné. Zlú- čenina Ta_2C je najvýhodnejšia pre produkciu neutrónov s energiami okolo 2 MeV.

Ani pri U_2C_3 nie je problémom horľavosť. Čo však vyznieva v jej neprospech v porovnaní s W_2C a Ta_2C je fakt, že pri reakcií U_2C_3 s urýchleným protónom sa vyprodukuje výrazne menej neutrónov. Zlúčenina U_2C_3 je najvýhodnejšia pre produkciu neutrónov s energiami vyššími ako 6 MeV.

Literatúra

- [1] Vladimír Slugeň et al. *JADROVO-ENERGETICKÉ ZARIADENIA*. Online, Skriptum. Bratislava: Slovenská Technická Univerzita, 2003. Dostupné z: <https://inis.iaea.org/search/39077448>. [cit. 2023-12-21].
- [2] Marie Dufková. „Co je to MOX“. In: *FyzWeb články* (2011). Online. Dostupné z: <http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=174> [cit. 2023-10-31].
- [3] Benjamin Mallet. *France seeks strategy as nuclear waste site risks saturation point*. Online. In: Reuters, 2023. Dostupné z: <https://www.reuters.com/business/environment/france-seeks-strategy-nuclear-waste-site-risks-saturation-point-2023-02-03/> [cit. 2023-11-12].
- [4] Miroslav Zeman. *Experimentální výzkum urychlovačem řízených jaderných reaktorů pro thoriovou jadernou energetiku*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. Dostupné z: <https://www.osel.cz/3743-co-to-jsou-urychlovacem-rizene-transmutory-a-budeme-je-nekdy-vyuzivat.html>.
- [5] *Processing of Used Nuclear Fuel*. Online. World Nuclear Association. 2020. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/processing-of-used-nuclear-fuel.aspx> [cit. 2023-12-29].
- [6] *Mixed Oxide (MOX) Fuel*. Online. WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. 2017. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuel-mox.aspx> [cit. 2023-11-12].
- [7] Svoboda Josef. *Monitoring a simulace chování experimentálních terčů pro ADS, vývinu tepla a úniku neutronů*. Dizertačná práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2021. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/135700>.
- [8] Vladimír Wagner. „Co to jsou urychlovačem řízené transmutory a budeme je někdy využívat?“ In: *Objective Source e-learning*. Online. 2008. Dostupné z: <https://www.osel.cz/3743-co-to-jsou-urychlovacem-rizene-transmutory-a-budeme-je-nekdy-vyuzivat.html> [cit. 2023-10-27].
- [9] Karel Katovský. *Osobná konzultácia s vedúcim práce*.
- [10] *China's next-generation solution for nuclear waste management and fissile material breeding – the ADS system*. Online. YANLIANG, Pan. RUS/CHN Nuclear Energy Newsletter. 2024. Dostupné z: <https://rcnuclear.substack.com/p/chinas-next-generation-solution-for> [cit. 2024-03-01].

- [11] *Accelerator driven transmutation technology*. Online. 1994, s. 11. Dostupné z: <https://www.oecd-nea.org/trw/docs/losalamos/adtt.pdf> [cit. 2023-11-12].
- [12] Park Won. *HYPER (Hybrid Power Extraction Reactor). A system for clean nuclear energy*. ResearchGate, 2000. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/221955961_HYPER_Hybrid_Power_Extraction_Reactor_A_system_for_clean_nuclear_energy [cit. 2024-03-16].
- [13] Park Chang. *The KOMAC*. Pdf. Korea Atomic Energy Research Institute. Dostupné z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/039/30039296.pdf [cit. 2024-03-16].
- [14] Peter McIntyre. *Accelerator-Driven subcritical fission in A Molten salt core: Closing the Nuclear Fuel Cycle for Green Nuclear Energy*. Pdf. 2013. Dostupné z: <https://www.adsthu.org/2014.ADSTHU/3.03.MCINTYRE.pdf> [cit. 2024-03-16].
- [15] Peter McIntyre. *Abstract Submitted for the TSF13 Meeting of The American Physical Society*. Pdf. 2013. Dostupné z: https://absimage.aps.org/image/TSF13/MWS_TSF13-2013-000006.pdf [cit. 2024-03-16].
- [16] A.G. Class. *XT-ADS Windowless spallation target thermohydraulic design & experimental setup*. Online. Science direct. 2011, s. 6. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311511004090#s0005> [cit. 2024-03-10].
- [17] Joachim Knebel. *EUROTRANS: European Research Programme for the Transmutation of High-Level Nuclear Waste in an Accelerator Driven System*. Pdf. 2006. Dostupné z: https://www.oecd-nea.org/pt/iempt9/Nimes_Presentations/KNEBEL.pdf [cit. 2024-03-10].
- [18] *Myrrha*. Online. 2023 Dostupné z: <https://myrrha.be/> [cit. 2023-11-12].
- [19] *CiADS*. Online. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences. Dostupné z: <https://english.imp.cas.cn/research/facilities/CIADS/> [cit. 2023-12-28].
- [20] Yuan He et al. *Development of Accelerator Driven Advanced Nuclear Energy (ADANES) and Nuclear Fuel Recycle*. Pdf. 2019. Dostupné z: <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2019/papers/tuypls2.pdf> [cit. 2024-03-01].
- [21] *European Spallation Source*. Online. Dostupné z: <https://europeanspallationsource.se/>. [cit. 2023-11-15].
- [22] *How SNS Works*. Online. Oak Ridge National Laboratory. Dostupné z: <https://neutrons.ornl.gov/content/how-sns-works> [cit. 2023-11-13].

- [23] Vladimír Wagner. *Studium produkce neutronů v tříštivých reakcích a jejich využití pro transmutaci jaderného odpadu*. Online. 2016 Dostupné z: <https://docplayer.cz/13212318-Studium-produkce-neutronu-v-tristivych-reakcich-a-jejich-vyuziti-pro-transmutaci-jaderneho-odpadu.html>.
- [24] *JANIS*. Online. Nuclear energy agency. 2024. Dostupné z: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_39910/janis. [cit. 2024-03-26].
- [25] A. Trkov, M. Herman a D.A. Brown. *ENDF-6 Formats Manual. Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data Files ENDF/B-VI, ENDF/B-VII and ENDF/B-VIII*. Online. 2018, s. 418. Dostupné z: <https://www.nndc.bnl.gov/endl-b8.0/endl-manual-viii.0.pdf>. [cit. 2024-03-26].
- [26] *Goodfellow*. Online. GOODFELLOW CAMBRIDGE LTD. 2024. Dostupné z: <https://www.goodfellow.com/>. [cit. 2024-03-26].
- [27] S.Y.F. Chu, L.P. Ekström a R.B. Firestone. *Nuclide search*. Online. 1998. Dostupné z: <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/nucSearch.asp>. [cit. 2024-03-26].
- [28] Mark Winter. *Webelements: THE periodic table on the WWW*. Online. THE UNIVERSITY OF SHEFFIELD AND WEBELEMENTS LTD. 1993. Dostupné z: <https://www.webelements.com/>. [cit. 2024-04-02].
- [29] LLC MATWEB. *MatWeb*. Online. 1996. Dostupné z: <https://www.matweb.com/index.aspx>. [cit. 2024-05-17].
- [30] NATIONAL LIBRARY OF MEDICINE. *PubChem*. Online. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>. [cit. 2024-05-17].
- [31] Arjan Koning, Stephane Hilaire a Stephane Goriely. *TALYS*. Online. TALYS & Related Software. 2020. Dostupné z: <https://nds.iaea.org/talys/>. [cit. 2024-05-17].

Zoznam symbolov a skratiek

ABC	Accelerator Based Conversion (Urýchlovačom riadená premena)
ADAM	Accelerator-Driven subcritical fission in A Molten salt core,(Urýchlovačom riadené podkritické štiepenie jadra roztavenej soli)
ADANES	Accelerator-driven advanced nuclear energy system (Pokročilý systém jadrovej energie poháňaný urýchlovač)
ADEP	Accelerator Driven Energy Production (Urýchlovačom riadená produkcia energie)
ADRUF	Accelerator-driven recycle of used fuel (Urýchlovačom riadená recyklácia použitého paliva)
ADS	Accelerator Driven Systems (Urýchlovačom riadené systémy)
ADTT	Accelerator Driven Transmutation Technology (Urýchlovačom riadené transmutačné technológie)
APT	Accelerator Production of Tritium (Urýchlovačom riadená produkcia trícia)
ATW	Accelerator Transmutation of Waste (Urýchlovačom riadená transmutácia odpadu)
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (Európska organizácia pre jadrový výskum)
CiADS	China initiative Accelerator Driven System (Čínsky iniciatívny urýchlovačom riadený systém)
DGT	Dense granular-flow target (Hustý gravitačný terč)
EA	Energy Amplifier (Energetický zosilňovač)
ESS	European Spallation Source (Európsky spalačný zdroj)
EUROTRANS	European Research Programme for the Transmutation of High-Level Nuclear Waste in an Accelerator Driven System
E+T	Energy+Transmutation (Energia a Transmutácia)

HYPER	HYbrid Power Extraction Reactor (Hybridný reaktor na získavanie energie)
ISOL	Isotope Separation On-Line (systém na separovanie izotopov)
KAERI	Korea Atomic Energy Research Institute (Kórejský inštitút pre výskum atómovej energie)
LBE	Lead-bismuth eutectic (Eutektikum olova a bizmutu)
LINAC	Linear accelerator (Lineárny urýchlovač)
MOX	Mixed Oxide fuel
MYRRHA	Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Application (Viacúčelový hybridný výskumný reaktor pre high-tech aplikácie)
P&T	Partitioning and Transmutation (Oddelenia a transmutácia)
REMIX	Regenerated Mixture
RepU	Reprocessed uranium
sc-LINAC	Superconducting proton linear accelerator (Supravodivý lineárny protónový urýchlovač)
SNS	Spallation Neutron Source (Spalačný neutrónový zdroj)
VJP	Vyhorené jadrové palivo

Zoznam príloh

A	Periodická tabuľka prvkov	56
B	Účinné prierezy prvkov uvažovaných pri návrhu guľôčkového terča	57
B.1	Lahké prvky	57
B.2	Ťažké prvky	58
C	Grafy a tabuľky k výpočtom	63
C.1	Produkcia neutrónov a účinný prierez	63
C.2	Energetické spektrum	68

A Periodická tabuľka prvkov

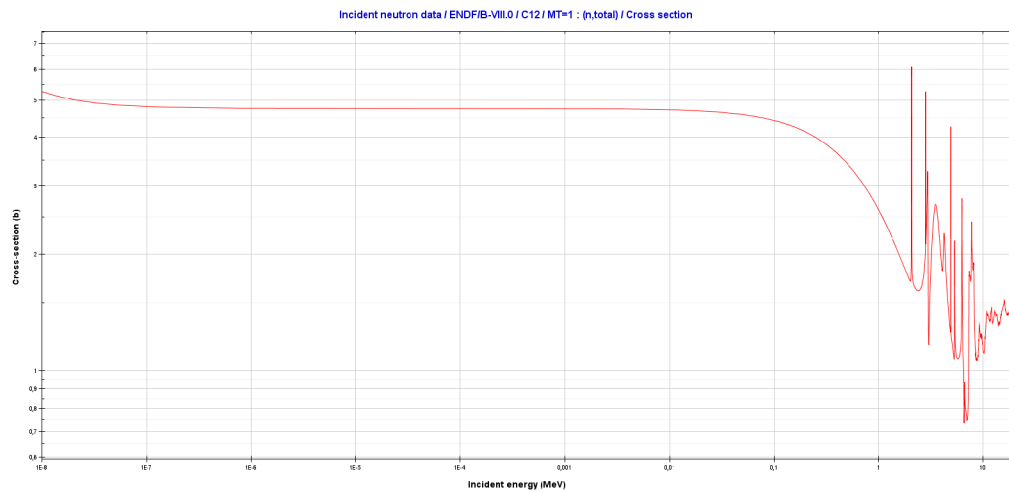
Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Period	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	2	
1	H 1.008 Hydrogen	He 4.005 Helium																	
2	Li 6.94 Lithium	Be 9.0122 Beryllium												B 10.81 Boron	C 12.011 Carbon	N 14.007 Nitrogen	O 15.999 Oxygen	F 18.998 Fluorine	Ne 20.180 Neon
3	Na 22.990 Sodium	Mg 24.305 Magnesium												Al 26.982 Aluminum	Si 28.086 Silicon	P 30.974 Phosphorus	S 32.06 Sulfur	Cl 35.45 Chlorine	Ar 39.948 Argon
4	K 39.098 Potassium	Ca 40.078 Calcium	Sc 44.956 Scandium	Ti 47.887 Titanium	V 50.942 Vanadium	Cr 51.996 Chromium	Mn 54.938 Manganese	Fe 55.845 Iron	Co 58.933 Cobalt	Ni 58.693 Nickel	Cu 63.546 Copper	Zn 65.38 Zinc	Ga 69.723 Gallium	Ge 72.630 Germanium	As 74.922 Arsenic	Se 78.971 Selenium	Br 79.904 Bromine	Kr 83.798 Krypton	
5	Rb 85.468 Rubidium	Sr 87.62 Strontium	Y 88.906 Yttrium	Zr 91.224 Zirconium	Nb 92.906 Niobium	Mo 95.94 Molybdenum	Tc 98.906 Technetium	Ru 101.07 Ruthenium	Rh 102.905 Rhodium	Pd 106.42 Palladium	Ag 107.868 Silver	Cd 112.411 Cadmium	In 114.818 Indium	Sn 118.710 Tin	Sb 121.757 Antimony	Te 127.60 Tellurium	I 126.905 Iodine	Xe 131.29 Xenon	
6	Cs 132.91 Cesium	Ba 137.33 Barium	Lu 174.967 Lutetium	Hf 178.49 Hafnium	Ta 180.95 Tantalum	W 183.85 Tungsten	Re 186.21 Rhenium	Os 190.23 Osmium	Ir 192.22 Iridium	Pt 195.08 Platinum	Au 196.967 Gold	Hg 200.59 Mercury	Tl 204.38 Thallium	Pb 207.2 Lead	Bi 208.98 Bismuth	Po 209 Polonium	At 209 Astatine	Rn 222 Radon	
7	Fr 223.02 Francium	Ra 226.03 Radium	Lr 260.11 Lawrencium	Rf 261 Rutherfordium	Db 262 Dubnium	Sg 263 Seaborgium	Bh 264 Bohrium	Hs 265 Hassium	Mt 266 Meitnerium	Ds 267 Darmstadtium	Rg 268 Roentgenium	Cn 269 Copernicium	Nh 270 Nihonium	Fl 271 Flerovium	Moscovium	Lv 272 Livermorium	Ts 273 Tennessine	Og 274 Oganesson	
	*Lanthanoids		La 138.91 Lanthanum	Ce 140.12 Cerium	Pr 140.91 Praseodymium	Nd 144.24 Neodymium	Pm 144.91 Promethium	Sm 150.36 Samarium	Eu 151.96 Europium	Gd 157.25 Gadolinium	Tb 158.93 Terbium	Dy 162.50 Dysprosium	Ho 164.93 Holmium	Er 167.26 Erbium	Tm 168.93 Thulium	Yb 173.05 Ytterbium			
	**Actinoids		Ac 227.03 Actinium	Th 232.04 Thorium	Pa 231.04 Protactinium	U 238.03 Uranium	Np 237.05 Neptunium	Pu 244.06 Plutonium	Am 243.06 Americium	Cm 247.07 Curium	Bk 247.07 Berkelium	Cf 251.08 Californium	Es 252.08 Einsteinium	Fm 257.10 Fermium	Md 258.10 Mendelevium	No 259.10 Nobelium			

Obr. A.1: Periodická tabuľka prvkov[28]

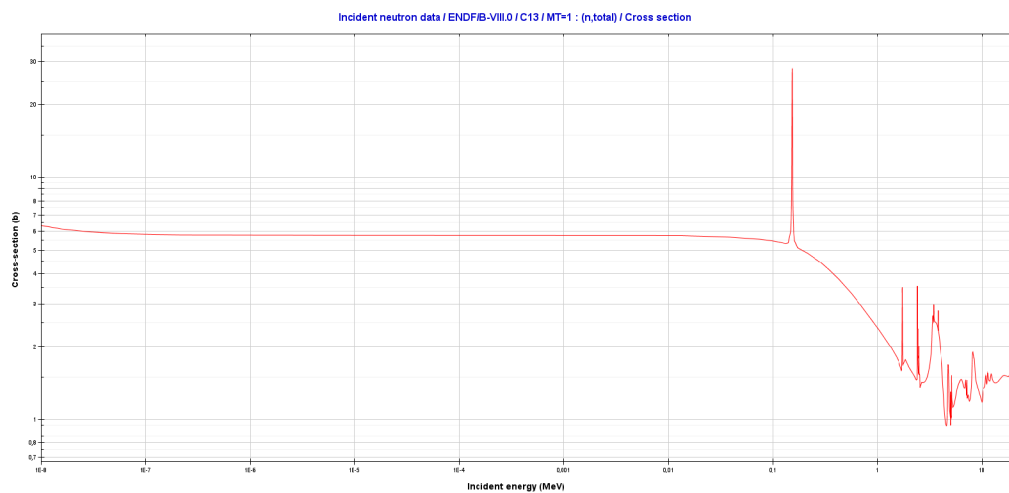
B Účinné prierezy prvkov uvažovaných pri návrhu guľôčkového terča

B.1 Ľahké prvky

Uhlík



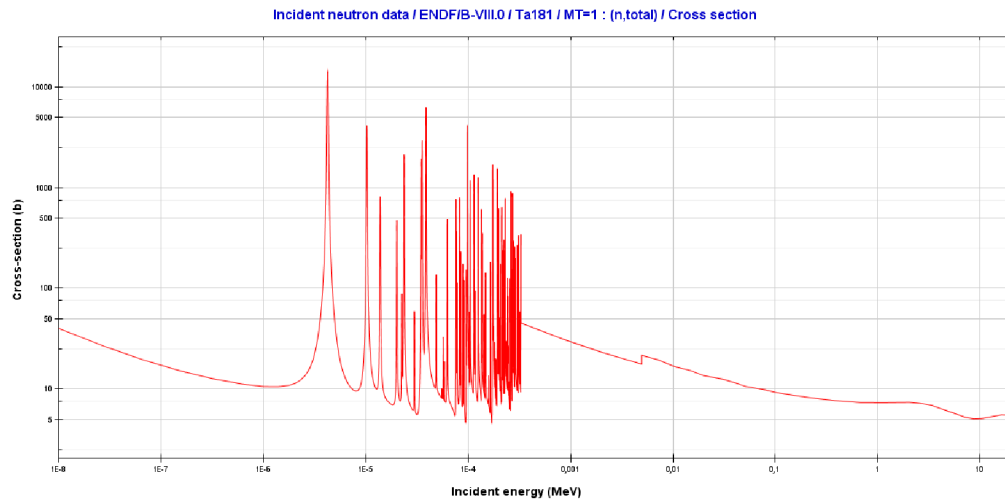
Obr. B.1: Účinný prierez ^{12}C v závislosti na energii neutrónu [25]



Obr. B.2: Účinný prierez ^{13}C v závislosti na energii neutrónu [25]

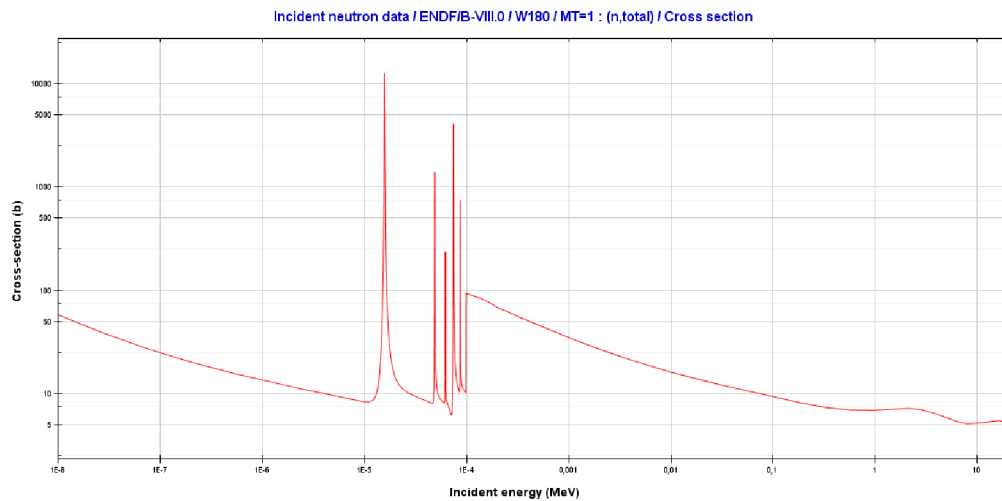
B.2 Ťažké prvky

Tantal

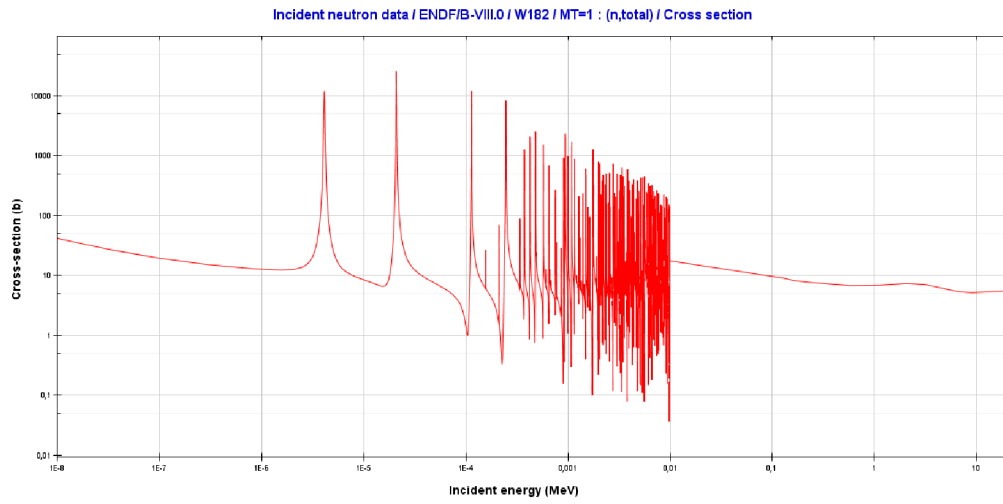


Obr. B.3: Účinný prierez ^{181}Ta v závislosti na energii neutrónu [25]

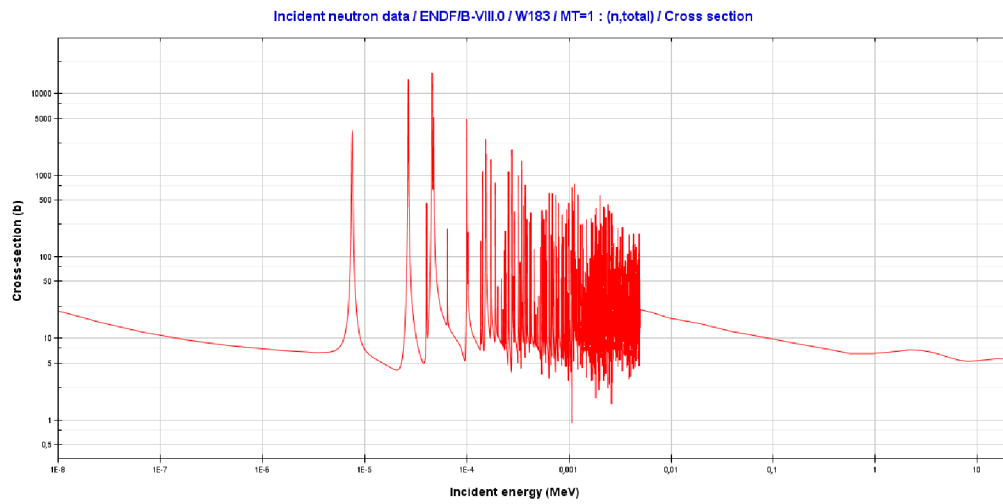
Volfrám



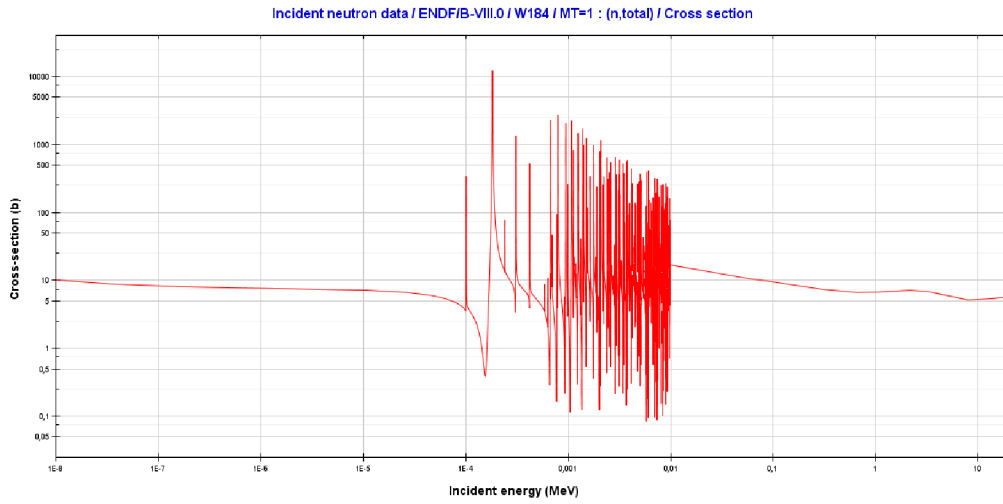
Obr. B.4: Účinný prierez ^{180}W v závislosti na energii neutrónu [25]



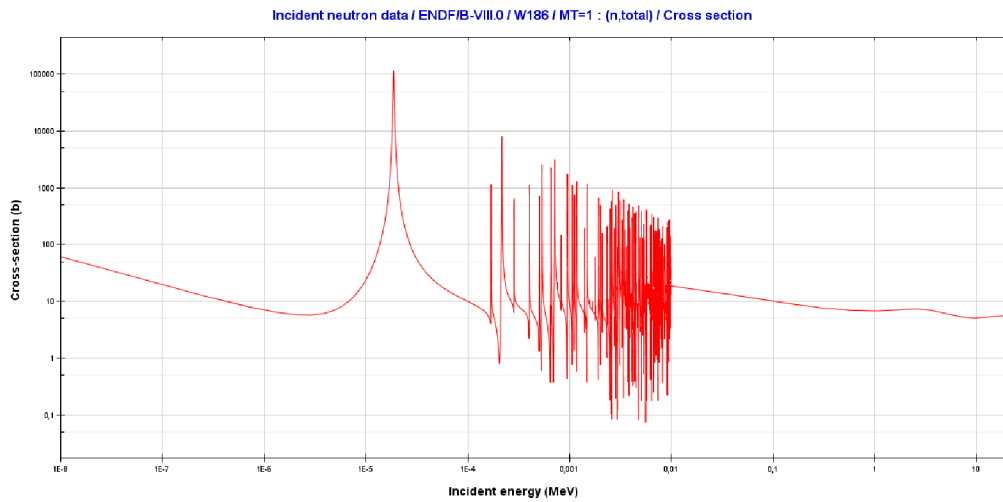
Obr. B.5: Účinný prierez ^{182}W v závislosti na energií neutrónu [25]



Obr. B.6: Účinný prierez ^{183}W v závislosti na energií neutrónu [25]

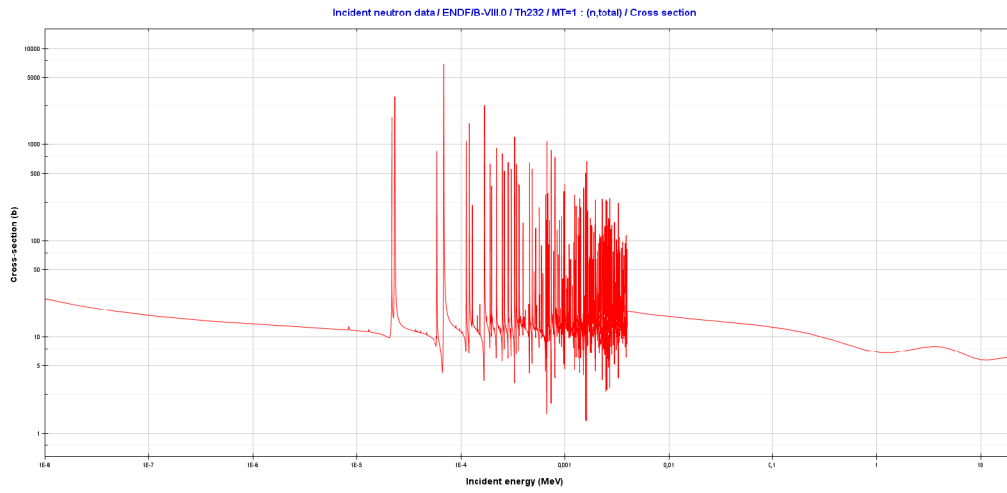


Obr. B.7: Účinný prierez ^{184}W v závislosti na energií neutrónu [25]



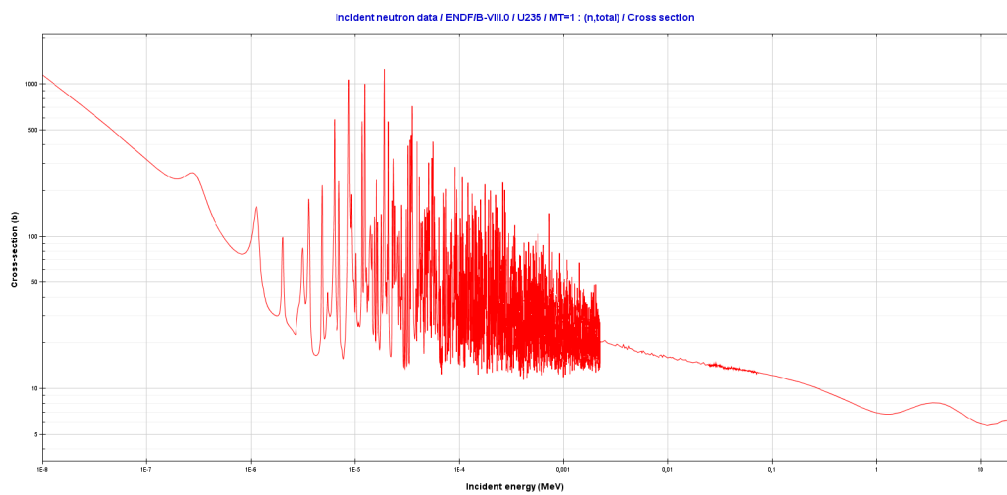
Obr. B.8: Účinný prierez ^{186}W v závislosti na energií neutrónu [25]

Tórium

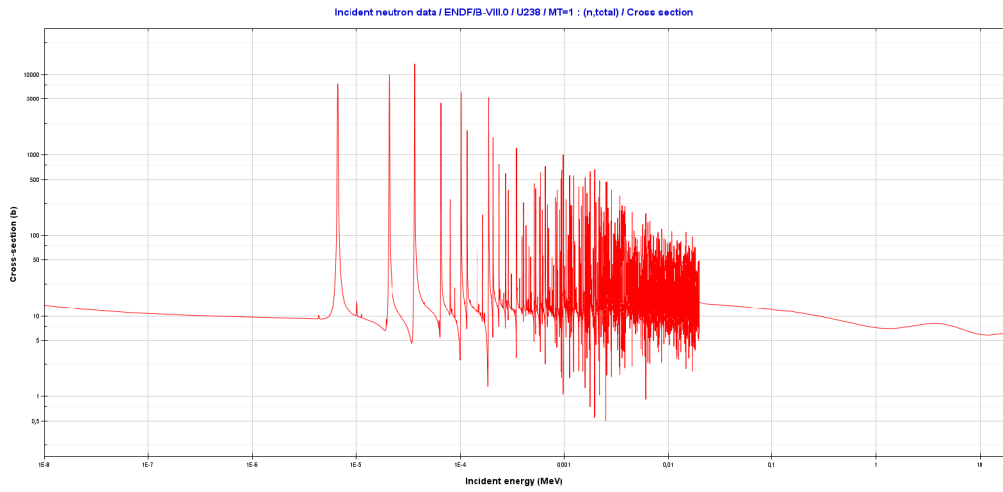


Obr. B.9: Účinný prierez ^{232}Th v závislosti na energii neutrónu [25]

Urán



Obr. B.10: Účinný prierez ^{235}U v závislosti na energii neutrónu [25]



Obr. B.11: Účinný prierez ^{238}U v závislosti na energii neutrónu [25]

C Grafy a tabuľky k výpočtom

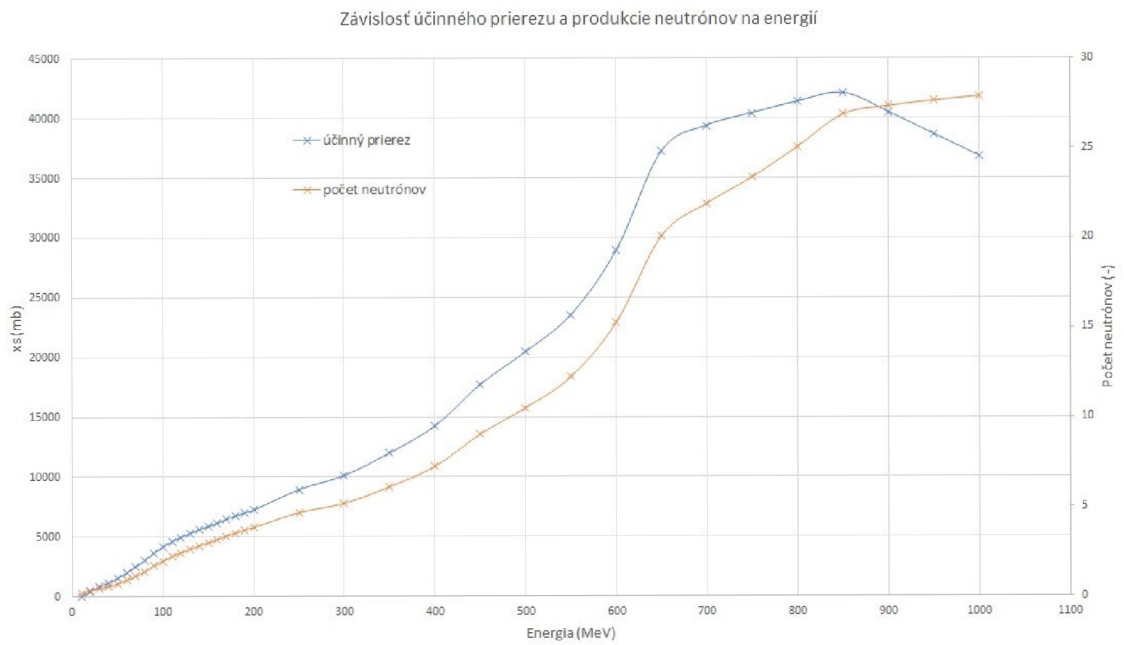
C.1 Produkcia neutrónov a účinný prierez

Tab. C.1: Výpočet účinného prierezu a produkcie neutronov pre prírodnú zmes uránu

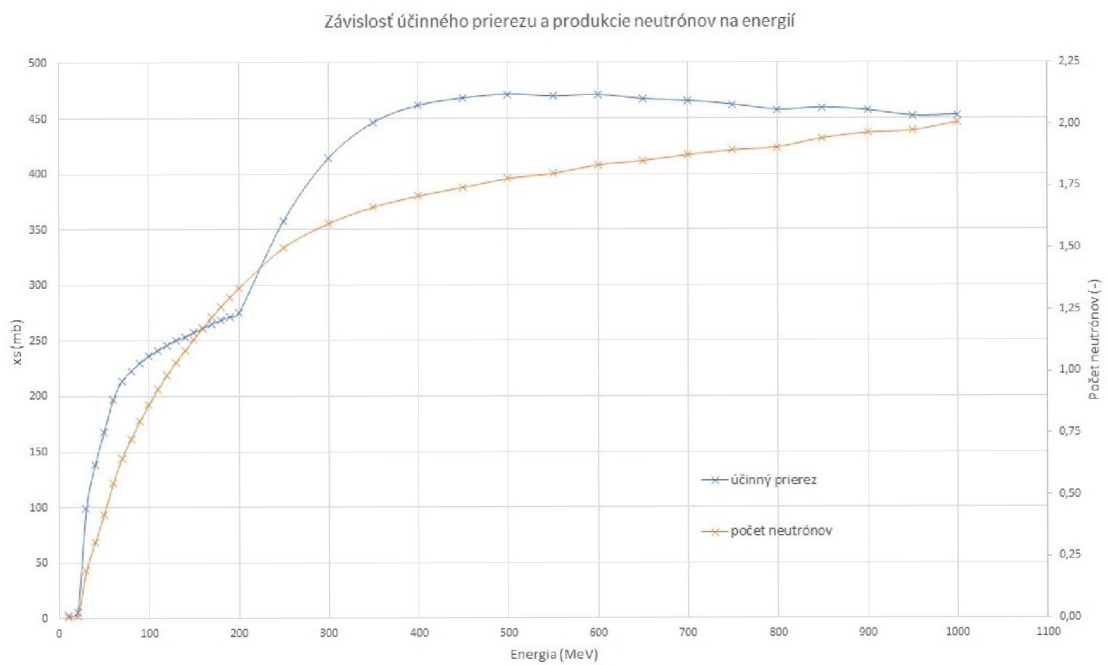
E (MeV)	xs (mb)	Produkcia neutrónov (-)
10,00	14,69	0,17
20,00	470,82	0,36
30,00	871,41	0,47
40,00	1180,66	0,57
50,00	1578,00	0,72
60,00	2044,81	0,92
70,00	2512,12	1,14
80,00	3054,83	1,41
90,00	3675,21	1,72
100,00	4192,30	2,00
110,00	4638,99	2,25
120,00	4981,32	2,45
130,00	5305,67	2,65
140,00	5613,59	2,84
150,00	5873,35	3,01
160,00	6162,64	3,19
170,00	6480,87	3,38
180,00	6762,14	3,55
190,00	7010,57	3,71
200,00	7249,95	3,86
250,00	8955,21	4,68
300,00	10133,62	5,20
350,00	12020,68	6,12
400,00	14263,80	7,26
450,00	17733,71	9,06
500,00	20458,04	10,52
550,00	23557,11	12,25
600,00	28951,19	15,30
650,00	37225,99	20,12
700,00	39355,48	21,92
750,00	40390,77	23,39
800,00	41358,09	25,08
850,00	42067,82	26,89
900,00	40456,23	27,35
950,00	38610,48	27,65
1000,00	36790,39	27,90

Tab. C.2: Výpočet účinného prierezu a produkcie neutronov pre karbid uránu (UC)

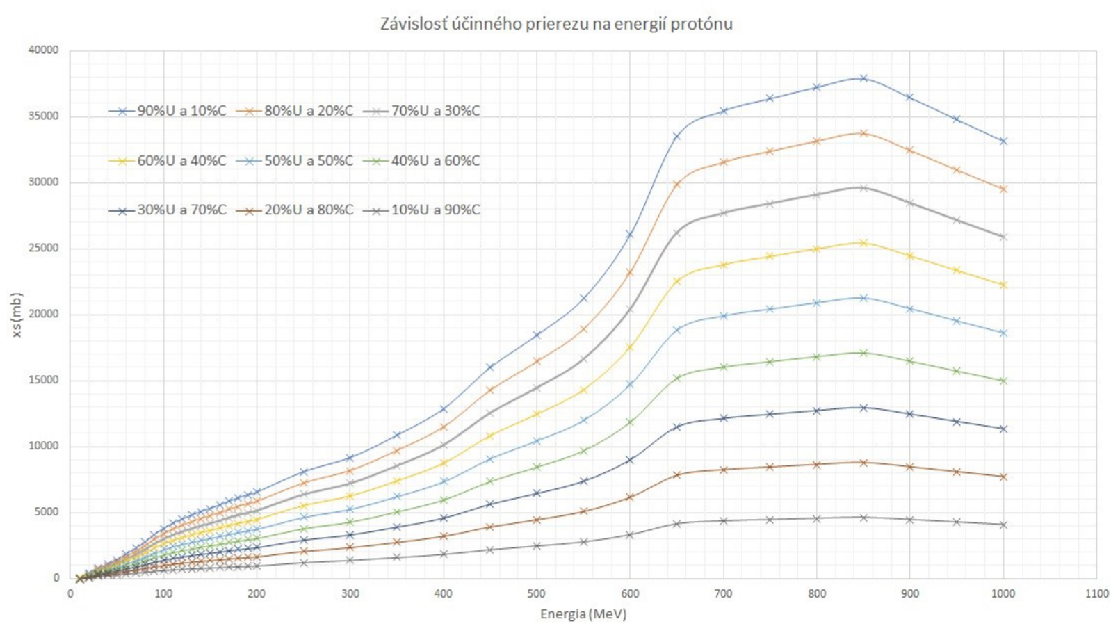
E (MeV)	xs (mb)	Produkcia neutrónov (-)
10,00	13,48	0,16
20,00	424,30	0,32
30,00	794,21	0,44
40,00	1076,49	0,54
50,00	1437,00	0,69
60,00	1860,03	0,89
70,00	2282,31	1,09
80,00	2771,63	1,34
90,00	3330,70	1,63
100,00	3796,70	1,89
110,00	4199,25	2,12
120,00	4507,81	2,31
130,00	4800,14	2,49
140,00	5077,57	2,67
150,00	5311,75	2,82
160,00	5572,49	2,99
170,00	5859,30	3,16
180,00	6112,77	3,32
190,00	6336,68	3,47
200,00	6552,43	3,61
250,00	8095,48	4,36
300,00	9161,68	4,84
350,00	10863,23	5,68
400,00	12883,57	6,70
450,00	16007,16	8,32
500,00	18459,39	9,65
550,00	21248,39	11,21
600,00	26103,18	13,95
650,00	33550,13	18,29
700,00	35466,50	19,92
750,00	36397,93	21,24
800,00	37268,03	22,77
850,00	37906,97	24,39
900,00	36456,31	24,81
950,00	34794,63	25,09
1000,00	33156,63	25,31



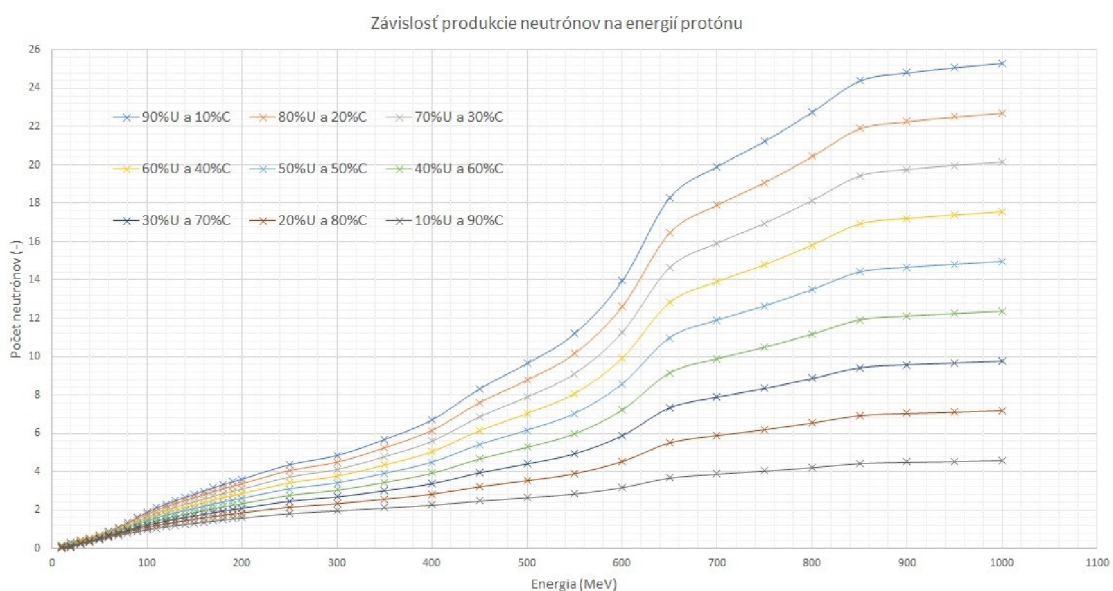
Obr. C.1: Závislosť účinného prierezu a produkcie neutrónov na energii protónu pre prírodnú zmes uránu



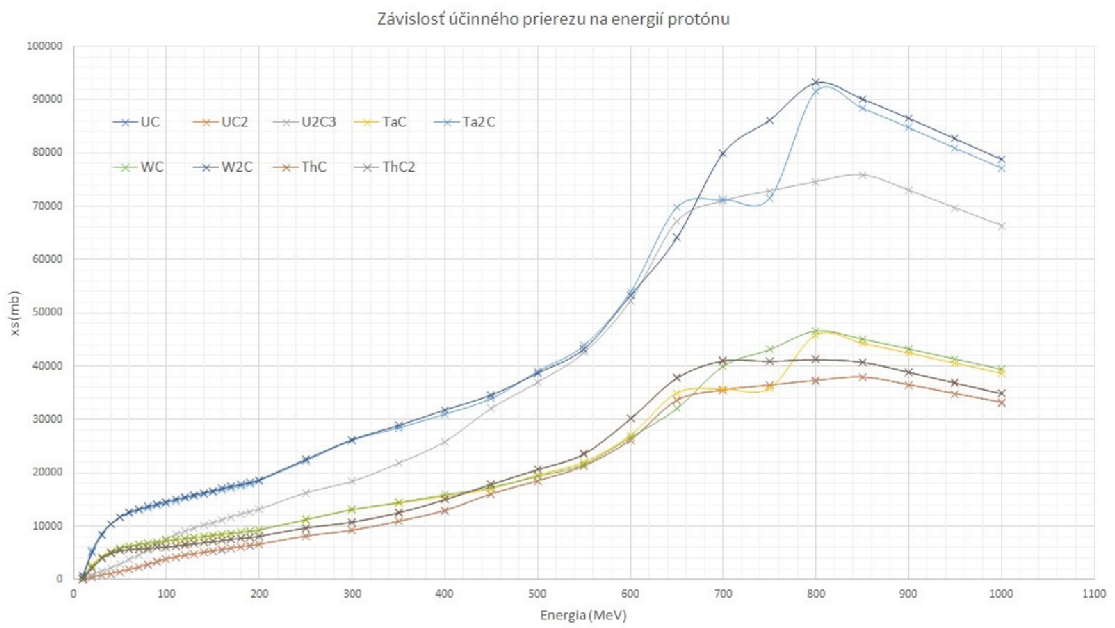
Obr. C.2: Závislosť účinného prierezu a produkcie neutrónov na energii protónu pre prírodnú zmes uhlíku



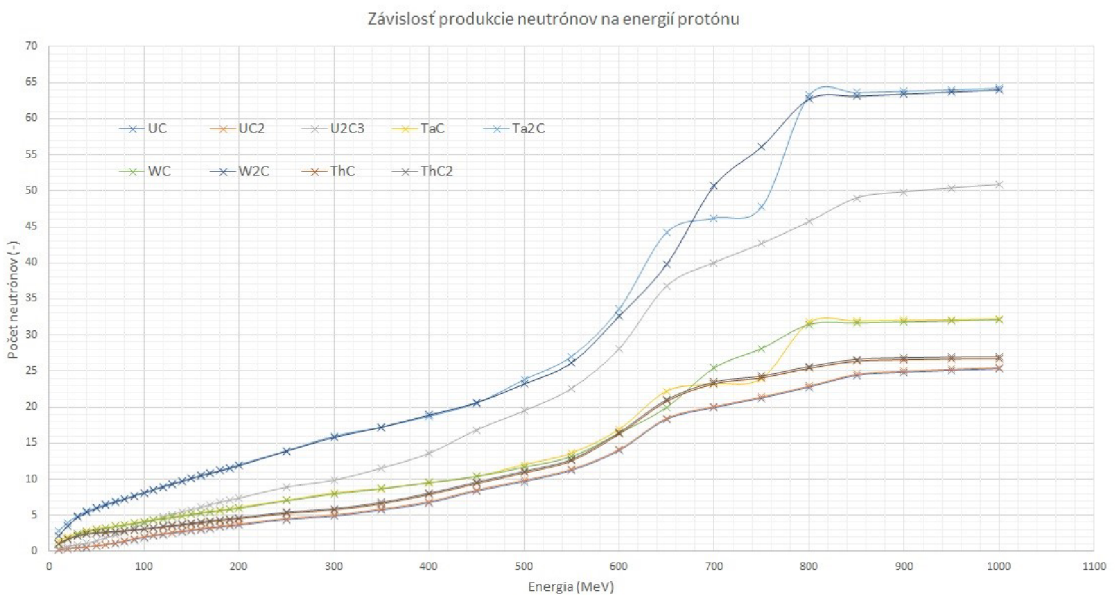
Obr. C.3: Závislosť účinného prierezu na energií protónu pre rôzne pomery uránu v zliučenine UC



Obr. C.4: Závislosť produkcie neutrónov na energií protónu pre rôzne pomery uránu v zliučenine UC



Obr. C.5: Závislosť účinného prierezu na energii protónu pre rôzne zlúčeniny s pomerom 90% ťažký prvok a 10%C

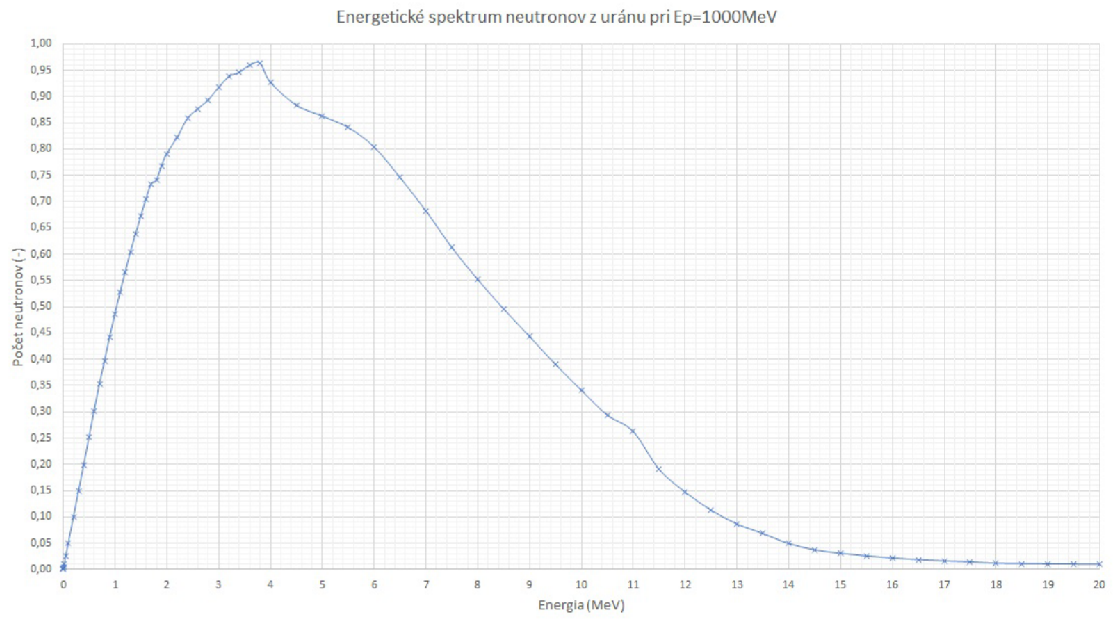


Obr. C.6: Závislosť produkcie neutrónov na energii protónu pre rôzne zlúčeniny s pomerom 90% ťažký prvok a 10%C

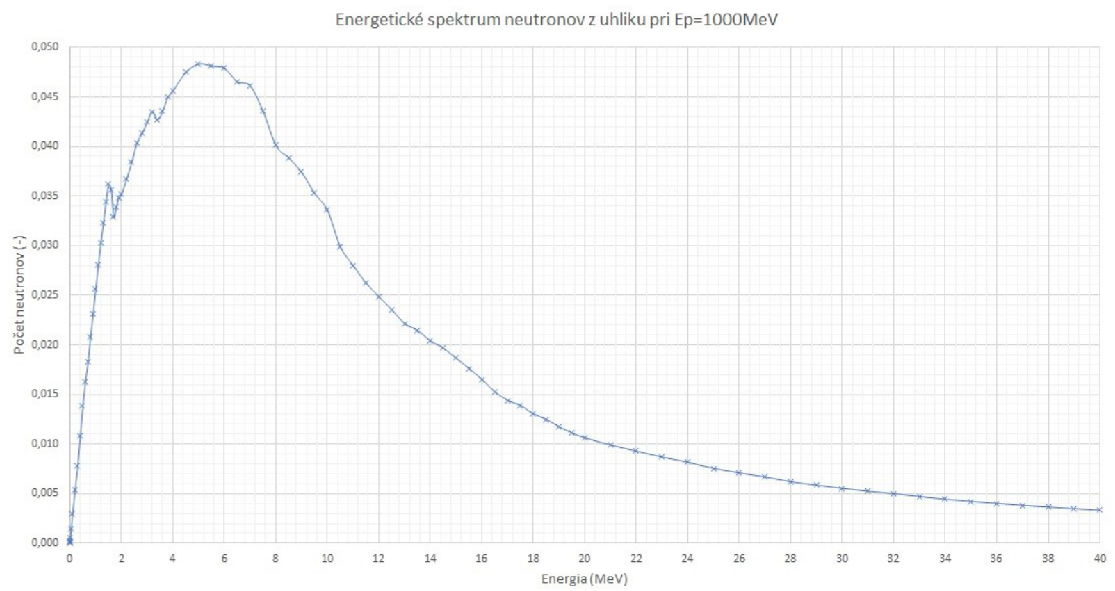
C.2 Energetické spektrum

Tab. C.3: Ukážka výpočtu energetického spektra pre uhlík ^{12}C

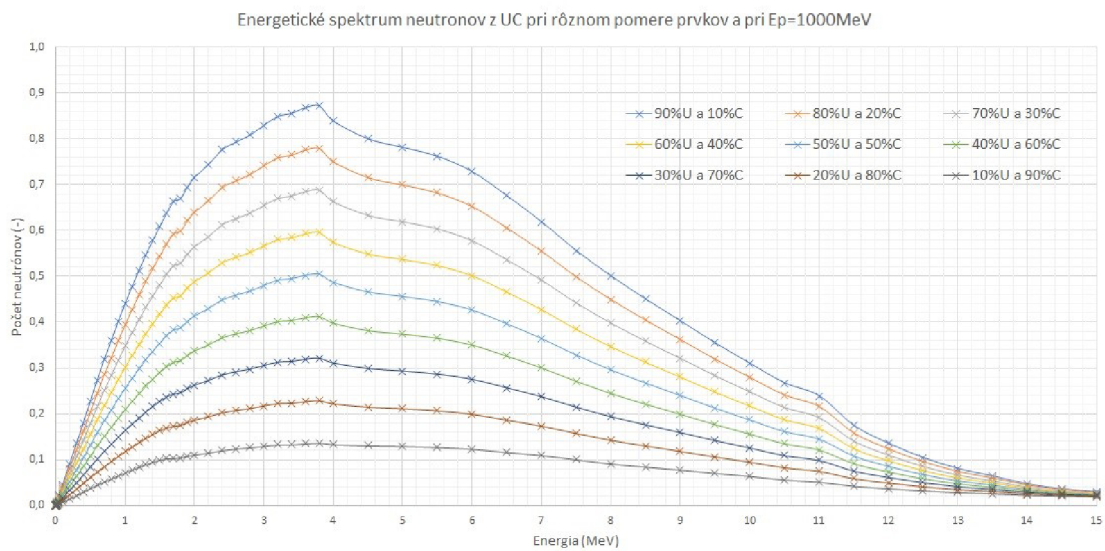
E (MeV)	xs (mb/MeV)	Produkcia neutrónov (-)
0,001	1,16E-02	2,74E-05
0,002	2,32E-02	5,46E-05
0,005	5,79E-02	1,36E-04
0,01	1,16E-01	2,72E-04
0,02	2,37E-01	5,57E-04
0,05	5,97E-01	1,40E-03
0,10	1,24E+00	2,92E-03
0,20	2,27E+00	5,33E-03
0,30	3,31E+00	7,79E-03
0,40	4,58E+00	1,08E-02
0,50	5,87E+00	1,38E-02
0,60	6,90E+00	1,62E-02
0,70	7,77E+00	1,83E-02
0,80	8,84E+00	2,08E-02
0,90	9,84E+00	2,32E-02
1,00	1,09E+01	2,56E-02
1,10	1,19E+01	2,80E-02
1,20	1,29E+01	3,02E-02
1,30	1,37E+01	3,23E-02
1,40	1,46E+01	3,44E-02
1,50	1,54E+01	3,62E-02
1,60	1,52E+01	3,57E-02
1,70	1,40E+01	3,29E-02
1,80	1,44E+01	3,39E-02
1,90	1,48E+01	3,48E-02
2,00	1,49E+01	3,52E-02
2,20	1,56E+01	3,67E-02
2,40	1,63E+01	3,84E-02
2,60	1,71E+01	4,03E-02
2,80	1,76E+01	4,13E-02
3,00	1,80E+01	4,25E-02
3,20	1,85E+01	4,35E-02
3,40	1,81E+01	4,27E-02
3,60	1,85E+01	4,36E-02
3,80	1,91E+01	4,50E-02
4,00	1,94E+01	4,56E-02
4,50	2,02E+01	4,75E-02
5,00	2,05E+01	4,83E-02



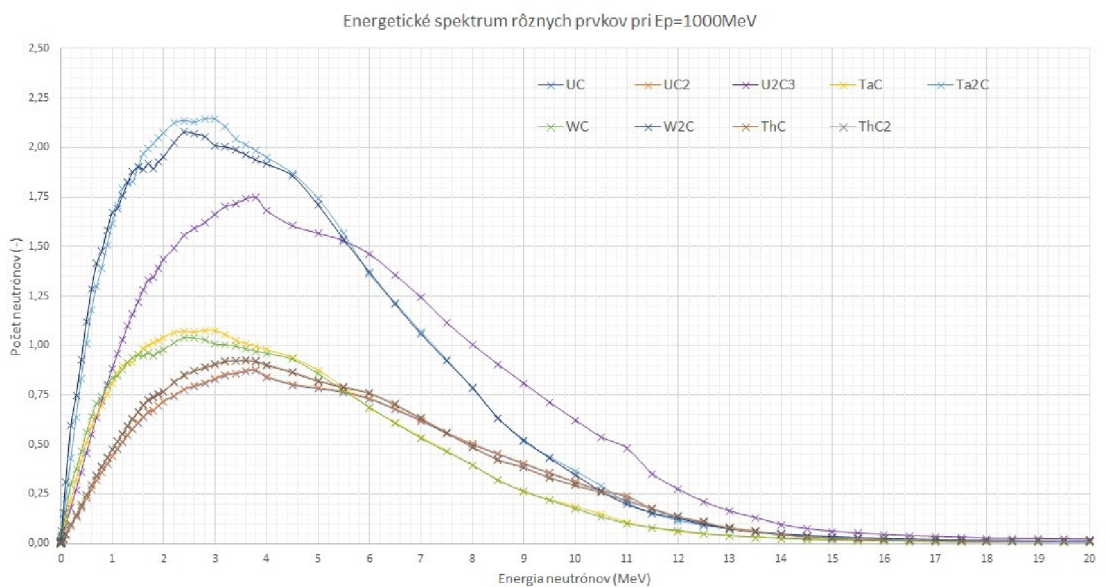
Obr. C.7: Energetické spektrum neutrónov z prvku ^{238}U



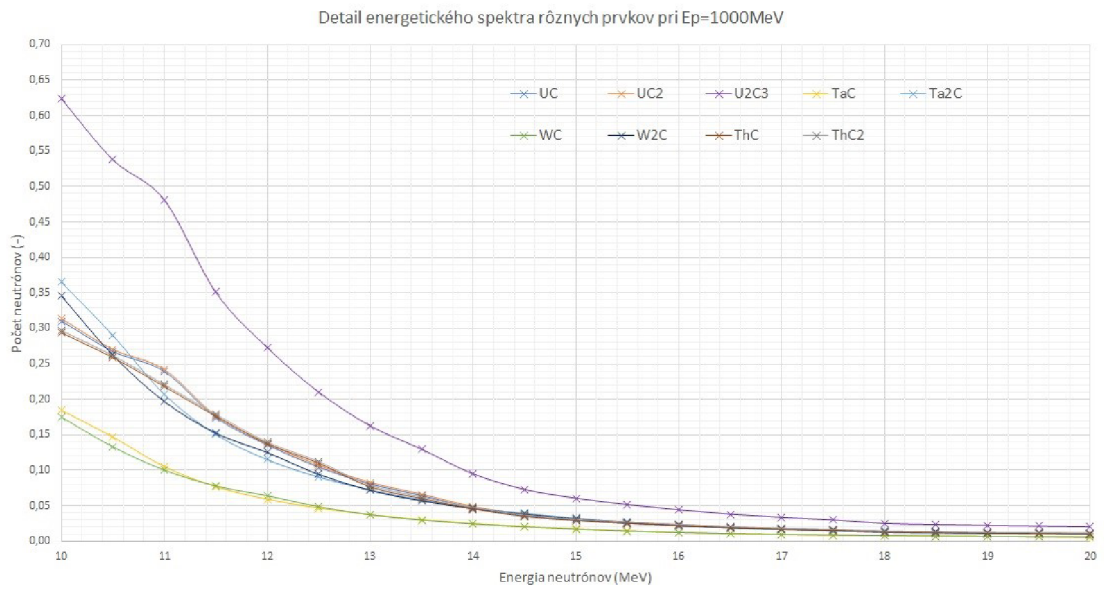
Obr. C.8: Energetické spektrum neutrónov z prvku ^{12}C



Obr. C.9: Energetické spektrum neutrónov pre rôzne pomery uránu v zlúčenine UC



Obr. C.10: Energetické spektrum neutrónov pre rôzne zlúčeniny s pomerom 90% ťažký prvok a 10%C



Obr. C.11: Detail energetického spektra neutrónov pre rôzne zlúčeniny s pomerom 90% ťažký prvok a 10%C