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

JADERNÉ REAKTORY CHLAZENÉ TEKUTÝMI SOLEMI

MOLTEN SALT COOLED NUCLEAR REACTORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Martin Dzurňák

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. Karel Katovský, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Martin Dzurňák ***ID:*** 220761

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

NÁZEV TÉMATU:

Jaderné reaktory chlazené tekutými solemi

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zpracování rešerše dříve provozovaných reaktorů s tekutými solemi
2. Zpracování rešerše současných projektů reaktorů s tekutými solemi
3. Výpočetní srovnání vlastností tekutých solí

DOPORUČENÁ LITERATURA:

1) Bahman Zohuri: Molten Salt Reactors and Integrated Molten Salt Reactors, Oxford, 2021
2) MSRE, MSBR - dokumentace národní laboratoře ORNL
3) Diplomové práce z daného tématu, odborné články a další literatura dle doporučení vedoucího práce

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

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

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

Práca sa zaoberá problematikou reaktorov s tekutými soľami, podáva informáciu o historických a súčasných projekoch a v praktickej časti sa venuje moderačným vlastnostiam vybraných izotopov a ich solí zistených výpočtom.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

Reaktor, roztavená soľ, izotop, NJOY21, moderačné vlastnosti, účinný prierez.

ABSTRACT

The thesis deals with the issue of liquid salt reactors, gives information on historical and current projects and in the practical part deals with the moderating properties of selected isotopes and their salts found by calculation.

KEYWORDS

Reactor, molten salt, isotope, NJOY21, moderating properties, effective cross section.

Vysadené pomocou balíčku `thesis` verzie 4.07; `http://latex.feec.vutbr.cz`

DZURŇÁK, Martin. *Jaderné reaktory chlazené tekutými solemi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2022, 74 s. Bakalárska práca. Vedúci práce: doc. Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora:	Martin Dzurňák
VUT ID autora:	220761
Typ práce:	Bakalárska práca
Akademický rok:	2021/22
Téma závěrečnej práce:	Jaderné reaktory chlazené tekutými solemi

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 trestnoprávnych 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

Rád by som sa poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi doc. Ing. Karlovi Katovskému, Ph.D. za odbornú pomoc, konzultácie a podnetné nápady pri realizácii tejto práce.

Obsah

Úvod **19**

Ciele práce **21**

1 Teoretická časť práce **23**
1.1 Popis jadrového reaktoru s tekutými soľami 23
1.2 Výhody, nevýhody a použitie MSR 23
1.3 Tóriovo-uránový palivový cyklus 25
1.4 Historické projekty 26
1.5 Súčasné projekty 28
1.5.1 Copenhagen Atomics Waste Burner 30
1.5.2 Energy Well 31

2 Praktická časť práce **35**
2.1 Základné fyzikálne parametre 35
2.2 Fyzikálne parametre z nukleárneho pohľadu 35
2.3 Zdroje jadrových dát a spracovanie údajov 37
2.4 Voľba izotopov a základné fyzikálne vlastnosti 39
2.5 Ručný výpočet moderačných vlastností 39
2.6 Výpočet účinných prierezov programom NJOY21 42
2.7 Výsledky strojových výpočtov 43

Záver **47**

Literatúra **49**

Zoznam symbolov a skratiek **51**

Zoznam príloh **53**

A Moderačné vlastnosti izotopov a ich solí **55**
A.1 Moderačné vlastnosti izotopov a ich solí pre tepelné neutróny 55
A.2 Moderačné vlastnosti izotopov a ich solí pre rezonančné neutróny . . 58
A.3 Moderačné vlastnosti izotopov a ich solí pre rýchle neutróny 61

B Nukleárne vlastnosti izotopov a ich solí **65**
B.1 Nukleárne vlastnosti izotopov a ich solí pre tepelné neutóny - ručný výpočet 65

B.2 Nukleárne vlastnosti izotopov a ich solí pre tepelné neutróny - NJOY21 67
B.3 Nukleárne vlastnosti izotopov a ich solí pre reznonančné neutróny - NJOY21 69
B.4 Nukleárne vlastnosti izotopov a ich solí pre rýchle neutróny - NJOY21 71

C NJOY21 **73**
C.1 Input file 73
C.2 Prostredie NJOY21 74

Zoznam obrázkov

1.1 Schématické znázornenie reaktora MSR [4] 24
1.2 Rez reaktorom ARE [14] 27
1.3 Reaktor MSRE a jeho zariadenia v schématickom znázornení [11] . . 28
1.4 Schématické znároznenie projektu MSBR [2] 29
1.5 Vonkajší pohľad na reaktor Waste Burner [5] 30
1.6 Schématické znázornenie reaktora Waste Burner a ostatných zariadení [5] 32
1.7 Plán rozloženia výrobne Energy Well [1] 33
1.8 Usporiadanie kaziet v reaktore a usporiadanie paliva v kazete [1] . . . 33
1.9 Schématické znázornenie okruhov elektrárne [1] 34
2.1 Porovnanie koeficientu spomalenia chloridov a fluoridov - ručný výpočet 43
2.2 Koeficient spomalenia chloridových solí pre neutróny rôznych energií . 44
2.3 Koeficient spomalenia fluoridových solí pre neutróny rôznych energií . 45
A.1 Porovnanie chloridov a fluoridov pre tepelné neutróny - NJOY21 . . . 57
A.2 Porovnanie chloridov a fluoridov pre reznonančné neutróny 60
A.3 Porovnanie chloridov a fluoridov pre rýchle neutróny 63
C.1 Prostredie programu NJOY21 74

Zoznam tabuliek

2.1 Základané fyzikálne vlastnosti chloridov [14],[15] 36
2.2 Základné fyzikálne vlastnosti fluoridov [14],[15] 36
2.3 Moderačné vlastnosti vybraných izotopov 40
2.4 Moderačné vlastnosti chloridov - ručný výpočet 41
2.5 Moderačné vlastnosti fluoridov - ručný výpočet 41
A.1 Moderačnosté vlastnosti vybraných izotopov pre tepelné neutróny . . 55
A.2 Moderačné vlastnosti chloridov pre tepelné neutróny 56
A.3 Moderačné vlastnosti fluoridov pre tepelné neutróny 56
A.4 Moderačné vlastnosti vybraných izotopov pre rezonančné neutróny . 58
A.5 Moderačné vlastnosti chloridov pre reznonančné neutróny 59
A.6 Moderačné vlastnosti fluoridov pre reznonančné neutróny 59
A.7 Moderačné vlastnosti vybraných izotopov pre rýchle neutróny 61
A.8 Moderačné vlastnosti chloridov pre rýchle neutróny 62
A.9 Moderačné vlastnosti fluoridov pre rýchle neutróny 62
B.1 Nukleárne vlastnosti vybraných izotopov pre tepelné neutróny - ručný výpočet 65
B.2 Nukleárne vlastnosti chloridov pre tepelné neutróny - ručný výpočet . 66
B.3 Nukleárne vlastnosti fluoridov pre tepelné neutróny - ručný výpočet . 66
B.4 Nukleárne vlastnosti vybraných izotopov pre tepelné neutróny 67
B.5 Nukleárne vlastnosti chloridov pre tepelné neutróny 68
B.6 Nukleárne vlastnosti fluoridov pre tepelné neutróny 68
B.7 Nukleárne vlastnosti vybraných izotopov pre rezonančné neutróny . . 69
B.8 Nukleárne vlastnosti chloridov pre rezonančné neutróny 70
B.9 Nukleárne vlastnosti fluoridov pre reznonančné neutróny 70
B.10 Nukleárne vlastnosti vybraných izotopov pre rýchle neutróny 71
B.11 Nukleárne vlastnosti chloridov pre rýchle neutróny 72
B.12 Nukleárne vlastnosti fluoridov pre rýchle neutróny 72

Úvod

Vstupom ľudstva do 21. storočia sa započala nová éra aj v oblasti energetiky. Vzhľadom na pokračujúci nárast počtu obyvateľov na Zemi a prirodzenou požiadavkou ľudstva zabezpečiť pre každého človeka dôstojné životné podmienky, rastie okrem materiálnych potrieb aj potreba po energii. Preto sa ľudstvo hlavne v posledných niekoľkých dekádach zaoberá možnosťami získavania dostupnej energie. Podmienkami dostupnej energie sú hlavne cena a fyzické možnosti jej obstarávania v konkrétnej oblasti. V neposledom rade je potrebné brať ohľad aj na životné prostredie a prírodné zásoby nerastného bohatstva. Vzhľadom na to, že obnoviteľné zdroje zatiaľ nedokážu v plnej miere a stabilne pokryť potreby ľudstva po energii, je potrebné hľadať spôsob ako ekologicky získavať energiu z neobnoviteľných zdrojov, ideálne bez použitia fosílnych palív. Jednou z možností a najviac diskutovanou možnosťou je získavanie energie z jadier atómov. Jadrová energetika prešla prudkým vývojom od jej vzniku v 30. rokoch minulého storočia. Okrem noviniek tohto tisícročia v podobe fúznych reaktorov, sa jadrová energetika v oblasti klasických štiepnych reaktorov posunula do štvrtej generácie. V rámci štvrtej generácie jadrových reaktorov sú okrem iných vyvíjané aj jadrové reaktory chladené tekutými soľami, ktorými sa táto práca zaoberá podrobnejšie.

Ciele práce

Cieľom tejto práce bolo uviesť čitateľa do problematiky reaktorov chladených tekutými soľami, vysvetliť základný príncíp fungovania takýchto reaktorov a oboznámiť čitateľa s historickými a súčasnými projektami reaktorov s tekukými soľami. Cieľom praktickej časti bolo výpočtovou metódou vytvoriť prehľadové tabuľky moderačných vlastností vybraných izotopov a ich solí pre neutróny rôznych energií, vyniesť tieto hodnoty do grafov, vyhodnotiť rozdiely a určiť vhodnosť použitia takýchto solí pre rôzne typy soľných reaktorov.

1 Teoretická časť práce

Teoretcká časť tejto práce je rozdelená do troch podkapitol. V prvej podkapitole sa zaoberá všeobecným úvodom do problematiky jadrových reaktorov s tekutými soľami, ich popisom a popisom činnosti. Druhá podkapitola sa venuje významným historickým projektom jadrových reaktorov, ktoré mali zásadný vplyv na ďalší vývoj technológie soľných reaktorov. Posledná podkapitola sa venuje súčasným projektom soľných reaktorov realizovaných hlavne v rámci vývoja štvrtej generácie jadrových reaktorov.

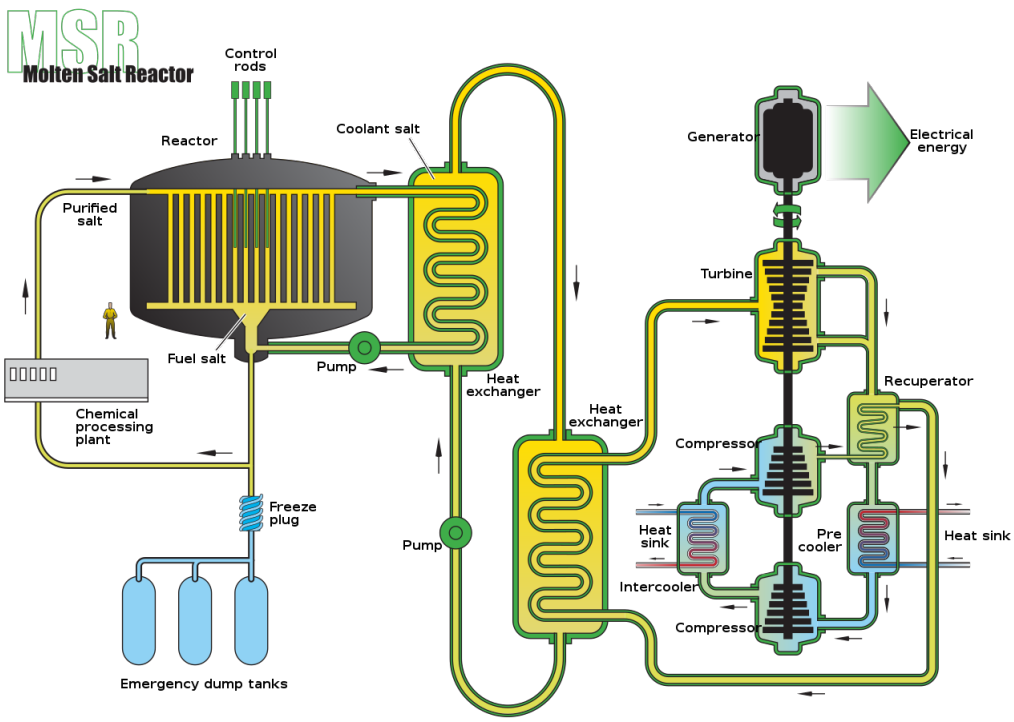
1.1 Popis jadrového reaktoru s tekutými soľami

Technológia jadrového reaktoru s tekutými soľami sa od konvenčne používaných reaktorov líši spôsobom chladenia reaktoru a spôsobom využívania paliva. Na rozdiel od štandardne používaných energetických reaktorov chladených vodou alebo plynom (CO_2) sa v jadrových reaktoroch s tekutými soľami (MSR) využíva, ako už názov napovedá, zmes roztavených solí. Jedná sa hlavne o fluoridové a chloridové soli. Takéto reaktory je možné rozdeliť do dvoch podskupín: reaktory využívajúce zmes roztavených solí len ako chladivo a reaktory, ktoré v zmesi roztavených solí majú aj palivovú soľ. Základný princíp fungovania reaktora s tekutými soľami vidíme na obrázku 1.1.

MSR sú prevažne moderované grafitom, pretože pracovná teplota MSR sa pohybuje okolo 700°C a grafit poskytuje dostatočné tepelné a mechanické vlastnosti vhodné pre moderovanie pri takejto teplote. Primárny okruh výrobne s MSR pozostáva z komponentov, ktoré cirkulujú roztavenú soľ a výmenníka tepla, ktorý odovzdáva teplo sekundárnemu okruhu. Ako bolo vyššie spomenuté, MSR pracujú pri teplotách niekoľko násobne vyšších ako pracuje konvenčná elektráreň, čo je aj dôvod prečo sa v sekundárnom okruhu nepoužíva voda ako teplonosná látka. Spravidla sa s výhodou využívajú opäť roztavené soli (zvyčajne v inom pomere a inom zložení ako v primárnom okruhu; v prípade, že je v primárnom okruhu použitá palivová zmes solí, v sekundárnom okruhu je vždy zmes bez paliva) alebo plyn v superkritickom stave. Výrobne s MSR majú spravidla aj terciárny okruh – väčšinou sa využíva Braytonov cyklus.

1.2 Výhody, nevýhody a použitie MSR

Medzi hlavné výhody reaktorov MSR patria predovšetkým ich prevádzkové parametre a široká škála veľkostí a výkonov. Keďže soľné zmesi sa tavia pri teplotách nad 500°C a prevádzková teplota reaktora sa pohybuje okolo 700°C, teplo vyvinuté



Obr. 1.1: Schématické znázornenie reaktora MSR [4]

reaktorom MSR je možné využiť nie len na výrobu elektrickej energie, ale aj na iné industriálne účely, napr. výrobu vodíka. Je nutné poznamenať, že dané teploty solí sú pri atmosférickom tlaku. To je z pohľadu MSR veľkou výhodou, pretože možnosť činnosti reaktora pri atmosférickom tlaku znižuje náročnosť na mechanickú pevnosť materiálov, a zvyšuje inherentnú bezpečnosť. Okrem bezpečnostných a materiálových výhod existuje aj rad ekonomických – najmä to, že pri vyšších teplotách sa účinnosť premeny energie (tepelnej na mechanickú) zvyšuje.

Ďalšou nespornou výhodou MSR je, že sa dajú vyrobiť v širokej škále veľkostí a dajú sa skladať do modulov. Tejto vlastnosti sa využíva v prípade IV. generácie reaktorov, kde sa uvažuje o malých modulárnych reaktoroch (SMR).

Nevýhodou MSR je predovšetkým to, že z princípu pracujú s roztavenou aktívnou zónou. Pri licencovaní takýchto reaktorov a ich uvedení do prevádzky sa objavujú predovšetkým legislatívne problémy a častokrát aj problémy spojené s verejnou mienkou. Funkčných MSR bolo od dôb ich vzniku len niekoľko a nové projekty sa ťažko uvádzajú do praxe práve kvôli politickým, ale aj ekonomickým problémom. Keďže neexistuje verejná požiadavka a ochota stavať menšie jadrové zdroje energie, častokrát aj v blízkostí aglomerácií, investor (či už štát alebo aj súkromník) nemá motiváciu financovať takéto projekty. Napriek verejnému nezáujmu o malé jadrové zdroje však stále rastie celosvetový dopyt po lacnej, ľahko dostupnej a ekologickej

energii. Preto sa aj vývoj MSR zameral na to, ako využiť výhody pôvodných projektov a odstrániť nevýhody, ktoré spôsobujú legislatívne problémy a negatívnu verejnú mienku. Vývoj sa rozdelil na dve skupiny: MSR pôvodného konceptu so zvýšenou bezpečnosťou (väčšinou inherentne) a MSR s palivom v tuhej forme, a roztavené soli využívajúc len ako chladivo. Využitie MSR spočíva v zásobovaní odľahlých oblastí energiou. Jedná sa hlavne o krajiny tretieho sveta, odľahlé oblasti rozľahlých krajín, no využitie môžu nájsť aj ako zdroje energie pre základne na svetových póloch. Oblasť využitia je však oveľa širšia a to v závislosti na technológii MSR. Existujú projekty, ktoré sú špecificky určené na autonómnu prevádzku – nachádzajú využitie najmä v krajinách, kde je potenciál na ich zneužitie na vojenské účely. Inou oblasťou je využitie MSR na opätovné použitie vyhoreného jadrového paliva. Tu sa využíva hlavne tóriovo-uránový palivový cyklus, kde sa vyhorené jadrové palivo s výhodou využije ako zdroj neutrónov potrebný na množenie uránu z tória. Samotný cyklus je popísaný v nasledujúcej kapitole. Okrem využitia v extrémnych podmienkach sa v budúcnosti predpokladá využitie MSR aj v bežných podmienkach. Počíta sa s hustejším rozložením výrobní po krajine, čím sa posilní stabilita rozvodnej siete.

1.3 Tóriovo-uránový palivový cyklus

Zloženie prírodných rezerv, ktoré môžu slúžiť ako palivo jadrových reaktorov, je veľmi nepriaznivý. Najbežnejším palivom pre jadrové reaktory je urán. Prírodný urán sa skladá hlavne z dvoch izotopov a to z približne 0,7% štiepneho ^{235}U a ^{238}U tvoriaceho okolo 99,3%. Izotop ^{238}U sa označuje ako fertilný, pri reakcii však zachytáva pomalé neutróny a stáva sa z neho štiepne plutónium ^{239}Pu. Vďaka obrovským zásobám (približne 3krát viac ako urán) sa do popredia ako primárny zdroj energie dostáva tórium. Tórium sa nachádza vo forme izotopu ^{232}Th, ktorý má dlhý polčas rozpadu a preto nie je samostatne pre jadrovú reakciu veľmi priaznivý. Avšak po prijatí neutrónu transmutuje na izotop uránu ^{233}U, ktorý má veľmi dobré štiepne vlastnosti. Je potrebné teda pridať iný štiepny materiál ako budič (driver), ako zdroj neutrónov, ktorý spustí štiepenie a premenu ^{232}Th na ^{233}U. Nejedná sa teda o čisto tóriový cyklus, ale U-Th cyklus (poprípade Pu-Th), čím sa komplikuje príprava a fabrikácia paliva [10]. V reaktoroch s tekutými soľami však problém s prípravou a výrobou paliva odpadá. Keďže palivová zmes je roztavená, uránová soľ a tóriová soľ sa jednoducho zmiešajú. Samotná premena ^{232}Th na ^{233}U neprebieha priamo. Najprv vzniká izotop ^{233}Th, ktorý sa rozpadá β žiarením s polčasom rozpadu 22 minút. Tento izotop sa potom premieňa na protaktínium ^{233}Pa a to sa premieňa na ^{233}U opäť β žiarením s polčasom rozpadu 27,4 dňa. Ilustratívnejšie toto vyobrazuje rozpadová rovnica:

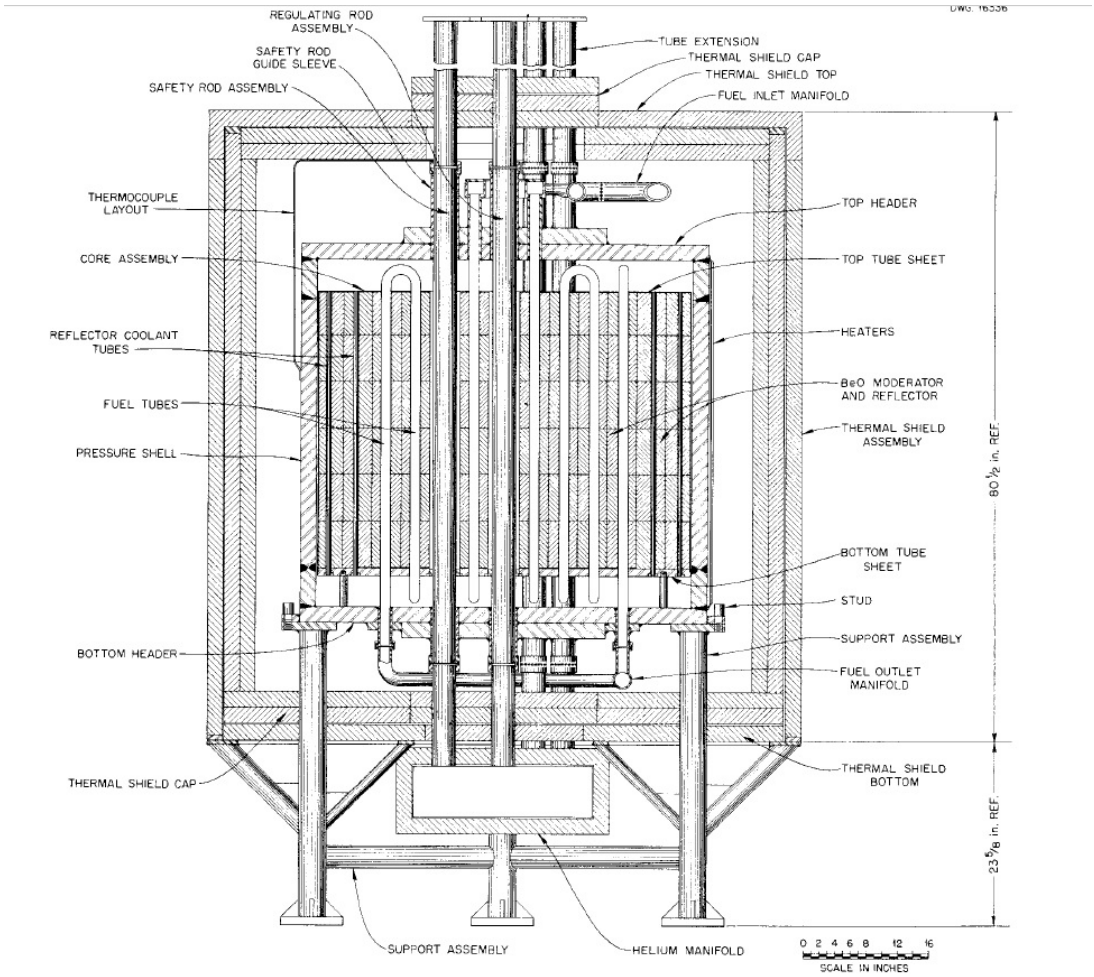
$$^{232}Th +^{1}_{0} n \rightarrow^{233} Th \frac{\beta}{22\ minút} \rightarrow^{233} Pa \frac{\beta}{27,4\ dní} \rightarrow^{233} U. \tag{1.1}$$

Tóriový palivový cyklus je vhodný pre reaktory na báze tepelných neutrónov. Narozdiel od plutóniového cyklu stačí na udržanie množenia aj pomalý neutrón, keďže ^{233}U je štiepiteľný práve pomalými neutrónmi. Toto je možné dosiahnuť práve v reaktore s tekutými soľami. Súčasné reaktory s pevným palivom využívajú obohatený urán, čiže vyťažený prírodný urán ^{238}U obohatený o určité množstvo ^{235}U (väčšinou do 5% v závislosti na type reaktora, usporiadaní paliva a pod.). Tu prebieha práve plutóniový palivový cyklus, no keďže bežné reaktory využívajú pomalé tepelné neutróny, množstvo neutrónov po štiepení plutónia nestačí na udržanie množenia a štiepnej reakcie.

1.4 Historické projekty

S vývojom MSR sa začalo v 50. rokoch 20. storočia. Myšlienka vzniku MSR pochádzala z potreby malých reaktorov pre letectvo. Úlohou vyvinúť takýto reaktor dosalo laboratórium ORNL (Oak Ridge National Laboratory) v Oak Ridge, Tennessee, USA. Ako prvý bol realizovaný projekt ARE – Aircraft Reactor Experiment. Tento projekt sa začal realizovať v roku 1954 a položil základy pre ďalší výskum MSR. Jednalo sa o pokusný reaktor, ktorý bol moderovaný pomocou BeO a roztavené soli využíval ako palivo a čiastočne aj ako chladivo. Teplo malo byť pôvodne odvádzané aj pomocou tekutého reflektora z roztaveného sodíka, no pokusy ukázali, že ešte neexistuje konštrukčný materiál, ktorý by odolal korozívnym vlastnostiam roztaveného sodíka. Tento reaktor pracoval len 221h a vyrobil celkovo 96MWh energie, no priniesol značný pokrok do vývoja MSR. Výstupom z projektu boli hlavne technológie predhrievania roztavených solí, mechanické riešenie obehov reaktora a vývoj zliatin odolávajúcich korózii spôsobenou chemickou abrazivitou roztavených solí. Konkrétne bola vyvinutá zliatina Inconel – vysokoniklovaná oceľ patentovaná priamo pre použitie v MSR.

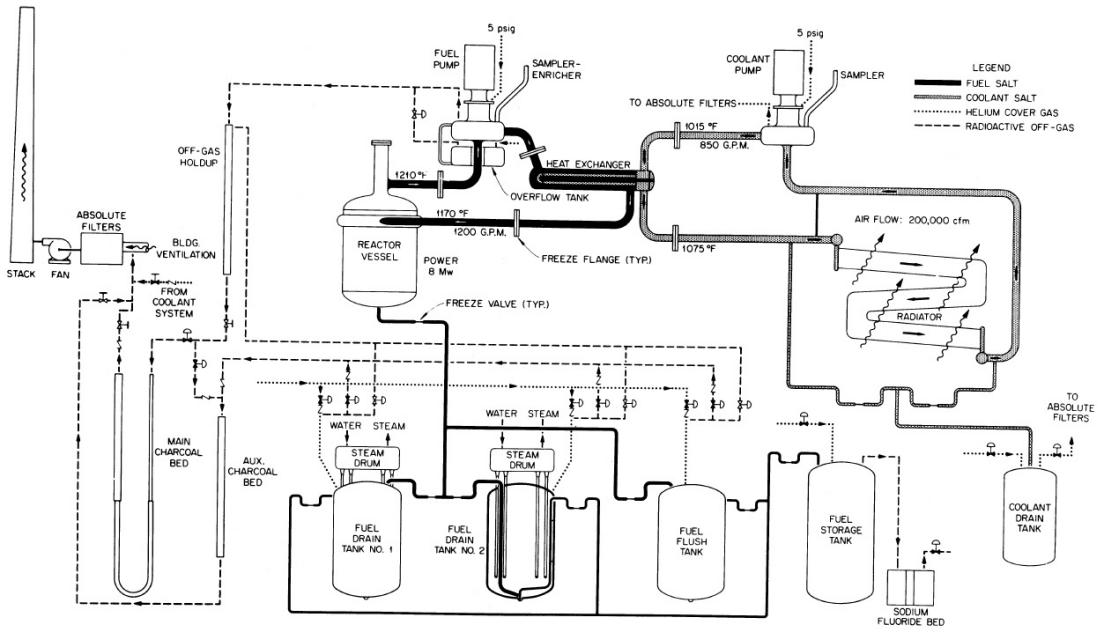
Nástupníckym projektom ARE bol projekt MSRE – Molten Salt Reactor Experiment. Keďže sa úspešným zvládnutím projektu ARE prišlo na to, že MSR sa s výhodami dajú použiť v energetike, pristúpilo sa k vývoju reaktora určeného pre energetiku. MSRE bol najvýznamnejší projekt realizovaný v ORNL a veľkou mierou prispel k technológii využívanej v dnešných MSR. Reaktor MSRE bol reaktor využívajúci zmes roztavených fluoridových solí. Reaktor bol grafitom moderovaný a ako soľnú zmes využíval LiF-BeF_2-ZrF_4-UF_4.Projektovaný bol tak, aby bolo možné použiť štandardnú zmes s U-235 alebo zmes s podielom Th-232. Využitie tória pomocou tóriovo-uránového palivového cyklu znamenalo značný pokrok v oblasti energetiky,



Obr. 1.2: Rez reaktorom ARE [14]

keďže prírodných zásob tória je asi 3x viac ako uránu. Samotný reaktor mal 8MW tepelného výkonu, ktorý bol odvádzaný do vzduchu. MSRE nemal terciárny okruh; sekundárny okruh bol zakončený trubicovým výmenníkom roztavená soľ/vzduch. Vzduch bol do výmenníka vháňaný pomocou dvoch turboventilátorov a odvádzaný pomocou „komína“. V sekundárnom okruhu bola použitá zmes LiF-BeF_2, ktorá sa dodnes používa pod menom FLiBe. Pokusy s tóriovou soľou nikdy neboli realizované, no boli realizované pokusy s U-233, ktorý je produktom premeny Th-232. Pokus bol spustený v roku 1965 a ukončený v roku 1969. reaktor bol celkovo kritický 17 655h a celkovo vyrobil 105 777 MWh_{th}.

Ako posledný veľký projekt mal byť realizovaný projekt MSBR – Molten Salt Breeder Reactor. Tento projekt mal vychádzať z úspešného projektu MSRE a mal byť jeho niekoľkokrát väčšou kópiou. Primárne mal využívať palivo namnožené z Th-232, mal byť zakončený plnohodnotným parným terciárnym okruhom s turbínou a generátorom a mal dodávať výkon do elektrickej siete. Celkový tepelný výkon MSBR

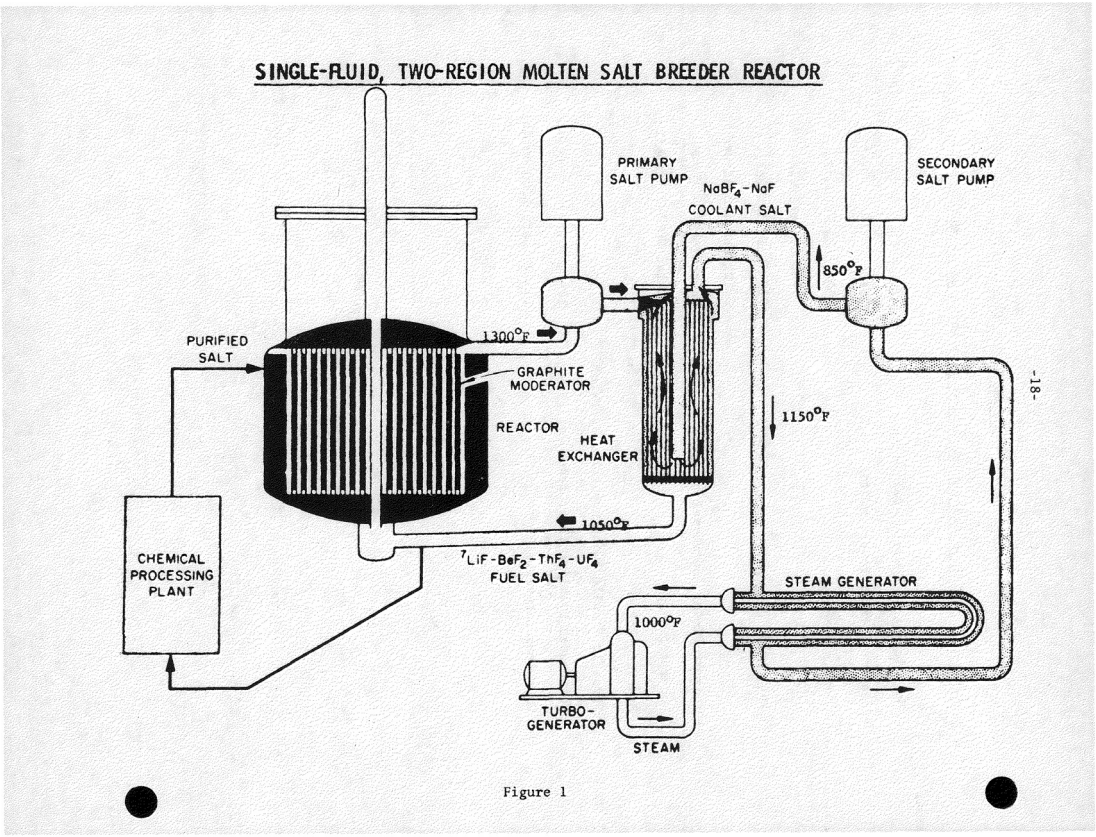


Obr. 1.3: Reaktor MSRE a jeho zariadenia v schématickom znázornení [11]

mal byť 2250MW a elektrický výkon 1000MW. K realizácii tohto projektu však nedošlo, americká vláda odmietla financovať ďalší výskum MSR a tak na dlhú dobu vývoj MSR nepokračoval.

1.5 Súčasné projekty

V rámci príchodu IV. generácie jadrových reaktorov sa v poslednom desaťročí opäť začala venovať pozornosť MSR. Myšlienka využiť tekuté soli prišla vhodná hlavne preto, lebo sa v súčasnej dobe tlačí hlavne na bezpečnosť a rentabilitu – obidva tieto požiadavky MSR spĺňajú. V rámci každoročného prehľadu súčasných projektov MSR od IAEA boli pre potreby tejto práce vybrané dva projekty, a to: Wasteburner od firmy Copenhagen Atomics a projekt Energy Well na ktorom pracuje česká firma ÚJV Řež a.s.. Wasteburner bol vybraný najmä preto, lebo repezentuje vývojovú vetvu „klasických“ soľných reaktorov – reaktorov s roztavenou soľou ako palivom aj ako chladivom. Zároveň tento projekt vyžíva tóriovo-uránový palivový cyklus a patrí do skupiny malých kompaktných reaktorov. Naopak Energy Well je predstaviteľom MSR s pevným palivom a bez možnosti množenia paliva. Zachováva si však modulárnosť a tak podobne ako Wasteburner, patrí do skupiny SMR.



Obr. 1.4: Schématické znázornenie projektu MSBR [2]

Obr. 1.5: Vonkajší pohľad na reaktor Waste Burner [5]

1.5.1 Copenhagen Atomics Waste Burner

Reaktor Waste Burner je reaktor o výkone 50MW$_{th}$, pracujúci s roztavenou fluridovou soľou a moderovaný ťažkou vodou. Jedná sa o kompaktný reaktorový blok obsahujúci reaktor, odlučovač nežiadúcich štiepnych produktov, primárny výmenník tepla, hnacie čerpadlá a nádrž s héliom, ktoré slúži ako „krycí“ plyn pri odlučovaní nežiadúcich prvkov. Celý tento blok je uzavretý do oplechovania o rozmeroch štandardného prepravného kontajnera (40ft container – cca 12,2m). Reakorový blok je teda možné priamo prepravovať bez nutnosti použiť špeciálne balenie. Na obrázku 1.5 je možné vidieť ako reaktor vyzerá z vonkajšej strany.

Generácie reaktora Waste Burner 2.0 a vyššie sú množivé reaktory, ktoré využívajú použité jadrové palivo (transurány z použitého paliva) na začatie tóriového cyklu. Tento reaktor využíva palivovú soľ LiF-ThF$_4$, ktorá je na začiatku obohatená o už spomínané transurány. Použitie tohoto typu reaktora je pomerne rozsiahle, očakáva sa jeho využitie najmä v nasledovných oblastiach:

- Ako doplnková jednotka k už existujúcim jadrovým zariadeniam v kombinácii s jednotkou na prepracovanie použitého jadrového paliva
- Napájanie plavidiel
- Výroba biopalív a výroba energie pre odsoľovacie procesy
- Zdroje energie v základnom zaťažovacom pásme pre africké a ázijské krajiny [5].

Reaktor je vybavený metódou on-line odstraňovania štiepnych produktov, ktorá spočíva vo vákuovom sprejovaní horúcim héliom. Metóda spočíva vo vyparovaní

vzácnych plynov a prchavých zlúčenín v palivovej soli. Táto metóda dokáže odstrániť zhruba polovicu nežiadúcich produktov. Mokré chemické prepracovanie sa vyžaduje raz za 3-5 rokov na odstránenie zvyšku štiepnych produktov [5]. Okrem odstraňovania štiepnych produktov sa vákuovou metódou odstraňuje aj trícium, pre ktoré sú kovové povrchy pomerne porézne a ľahko by sa dostalo mimo primárny okruh. Podobná stratégia je zvažovaná aj pre on-line odstraňovanie protaktínia, ktoré je medziproduktom pri tóriovom cykle.

Reaktor je navrhnutý tak, že ako sekundárne teplonosné médium využíva taktiež roztavenú soľ a následne v druhom výmenníku tepla sa teplo odovzdáva vzduchu, pričom sa počíta s využitím Braytonovho cyklu.

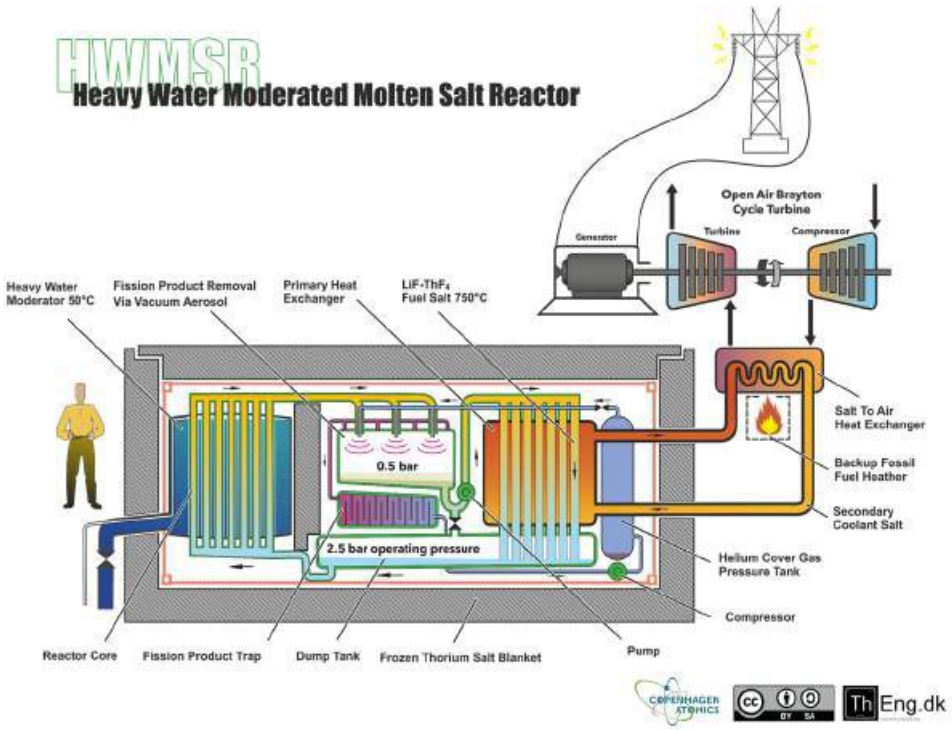
Bezpečnosť reaktora je opäť zabezpečená inherentne. Reaktivita reaktora je riadená tekutým moderátorom, ktorý je možné vypustiť v priebehu sekúnd. Ďalej odpadá nutnosť použitia tzv. „freeze plugs“ čiže mraziacich ventilov, ktoré musia byť za prevázky konštantne chladené. Zbytkové teplo a rozpadové teplo z tekutej soli aj teplo z hélia sa odvádzajú do zeme pomocou sústavy trubíc naplnených olejom. Ďalšou bezpečnostnou zložkou je dvojitý kontajnment. Prvý kontajnment pozostáva z tuhej tóriovej soli a druhý predstavuje oceľový prepravný kontajner [5]. Náčrt zloženia reaktora vidíme na obrázku 1.6.

Reaktor sa momentálne nachádza v štádiu konceptu, no už boli uskutočnené skúšky s roztavenou soľou a stále sú skúmané možnosti moderovania a chladenia rôznymi látkami a spôsobmi. Tento reaktor má veľký potenciál byť zdrojom energie hlavne na odľahlých miestach a na miestach, kde politické, sociálne a ekonomické dôvody neumožnujú výstavbu masových výrobných komplexov na výrobu energie, čím je spôsobený jej nedostatok.

1.5.2 Energy Well

Energy Well je malý modulárny reaktor (SMR) chladený roztavenou soľou s použitím tuhého paliva vo forme plátov usporiadaných do zvláštneho šesťuholníkového uloženia. Tento reaktor vyvíja Skupina ÚJV na čele s materskou firmou ÚJV Řež a.s..

Hlavnými požiadavkami na reaktor boli: modulárnosť, pasívna bezpečnosť, obmedzenie ľudskej chyby vysokou mierou automatizácie, nezávisloť na okolitej infraštruktúre a hlave modulárnosť. Reaktor má výkon 20MW$_{th}$, teda jedná sa o reaktor malého výkonu a primárne je určený na ostrovnú prevádzku. Celá výrobňa je navrhnutá tak, aby ju bolo možné poskladať do štandardných lodných kontajnerov a prepraviť celú technológiu na odľahlé miesta. Jedná sa hlavne o použitie pre výskumné účely, napr. na základniach v Antarktíde, či iných odľahlých miestach, no môže slúžiť aj ako zdroj energie pre menej vyspelé štáty bez potrebnej kvalitnej in-

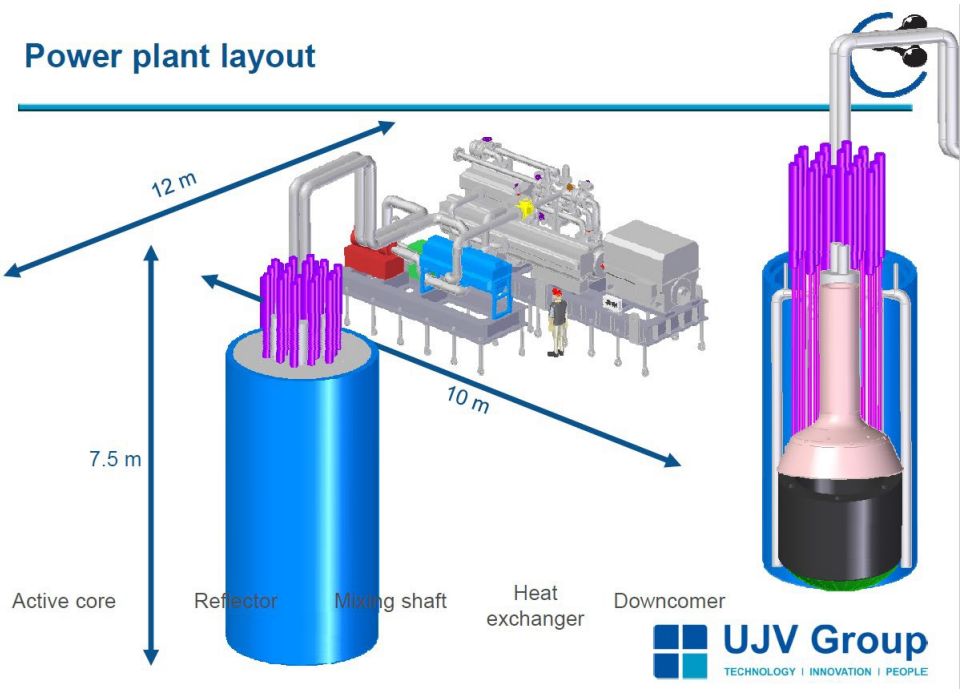


Obr. 1.6: Schématické znázornenie reaktora Waste Burner a ostatných zariadení [5]

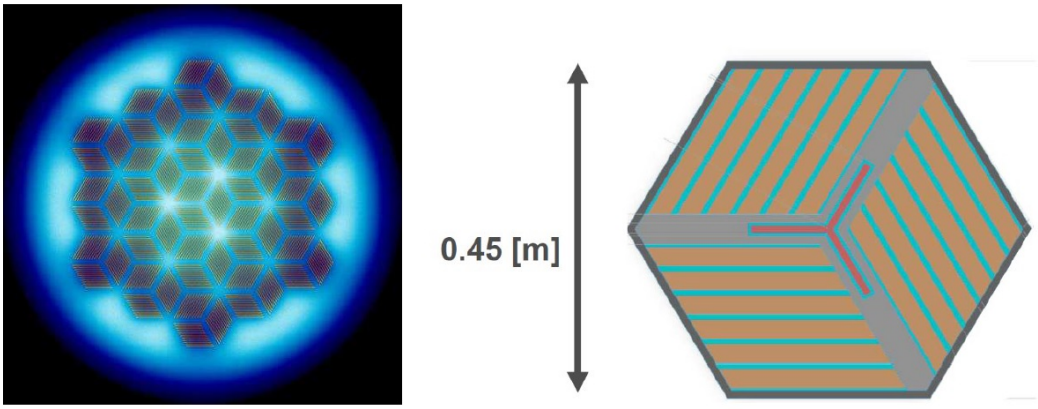
fraštruktúry na napájanie rôznych výrobných závodov. Približné rozmery elektrárne s reaktorom a celou technológiou sú 12m x 10m x 7,5m.

Palivo pre reaktor Energy Well je uložené v špeciálnych kazetách. Samotné palivo je umiestnené v grafitových doskách, ktoré plnia úlohu jednak plniva a základu pre palivové častice a jednak plnia úlohu moderátora. Dva takéto pláty sú potom umiestnené do kazety a medzi nimi sa nachádza doska čistého grafitu, ktorá slúži ako moderátor. Dosky sa usporiadajú tak, že v priereze majú tvar kosodĺžnika a tri takéto rovnaké súbory sú umiestnené do kazety v tvare šesťuhlníka. Priestor medzi súbormi a kazetami je vyplnený chladivom.

Samotné palivo sa nachádza v špeciálnych malých časticiach TRISO (TRistructural ISOtropic fuel particle – trojzložková izotropická palivová častica). Tieto častice sú malé guličky, ktoré pozostávajú z troch vrstiev. Základná vrstva pozostáva zo samotného paliva (typicky oxid, karbid alebo oxikarbid) obklopeného vyrovnávacou vrstvou porézneho grafitu, ktorý slúži na absorbciu radiačného poškodenia, kompenzuje pučanie paliva a vytvára priestor pre štiepne plyny vytvorené pri ožarovaní. Túto vrstvu obaľuje vnútorná vrstva pyrolytického uhlíka, ďalej vrstva karbidu kremíka a vonkajšia vrstva pyrolytického uhlíka. Vnútorná vrstva pyrolytického uhlíka zmenšuje ťahové napätie vo vrstve karbidu kremíka, bráni chemickej reakcii predchádzajúcich vrstiev a vytvára dodatočnú bariéru pre rozptyl štiepnych produktov v materiále. Vrstva karbidu kremíka predstavuje tlakovú ochranu pre predchádzajúce



Obr. 1.7: Plán rozloženia výrobne Energy Well [1]

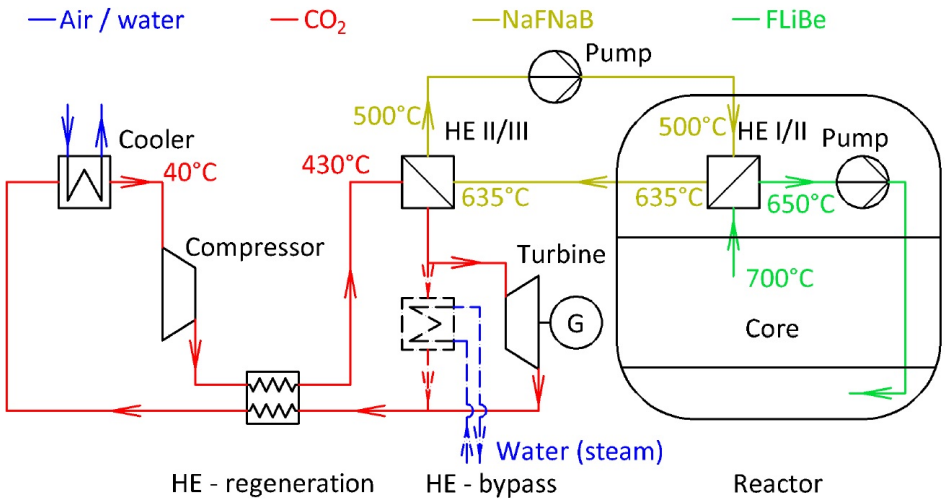


Obr. 1.8: Usporiadanie kaziet v reaktore a usporiadanie paliva v kazete [1]

vrstvy a predstavuje primárny obal pre kovové a plynné štiepne produkty. Vonkajšia vrstva pyrolytického uhlíka má rovnakú funkciu ako vnútorná, no zároveň predstavuje vonkajší obal pre časticu TRISO a chráni pred vonkajším poškodením [10].

V reaktore Energy Well sa počíta s využitím chladiva FLiBe, pretože v ÚJV Řež a.s. majú dlhoročné skúsenosti s touto soľnou zmesou, ktorej pracovná teplota je 650 – 700°C a chemické zloženie je 2LiF-BeF2. Ďalšou z výhod využitia tohoto paliva je inherentná bezpečnosť. Testy preukázali, že toto chladivo dokáže udržať prirodzenú cirkuláciu (konvekciou) v prípade výpadku napájania, prípadne obehového čerpadla [1].

Elektráreň je koncipovaná ako trojokruhová – z primárnej soli FLiBe sa teplo odovzdáva do sekundárnej soli NaFNaB, ktorá zabezpečuje ochranu pred radiáciou a má podobné fyzikálne vlastnosti ako FLiBe a tým umožňuje prenášať teplo s pomerne vysokou účinnosťou (42%). Terciálny okruh je riešený pomocou uzavretého Ericsonovho-Brytonovho cyklu s využitím superkritického CO2. Na obrázku 1.9 vidíme schématické znázornenie jednotlivých okruhov elektrárne.



Obr. 1.9: Schématické znázornenie okruhov elektrárne [1]

Projekt je stále vo vývoji a podľa dostupných informácií úspešne pokračuje. Koncept bol patentovaný a čiastočne bolo zabezpečené financovanie. Momentálne sa pracuje na konkrétnych detailoch projektu a v spolupráci s Technologickou agentúrou Českej republiky sa pracuje na vývoji kompatibilných materiálov. Ďalej sa riešia vlastnosti chladiacej soli FLiBe, a v neposledom rade sa riešia aj otázky bezpečnosti, ekonomickej efektivity a výroby zariadení [1].

2 Praktická časť práce

Teoretická časť práce sa hlavne popisu reaktorov s roztavenými soľami, ich výhodami a nevýhodami a projektami, ktoré sa realizovali, či budú realizovať. Praktická časť sa venuje priamo soliam, ktoré sa v reaktoroch používajú. Keďže soli, ktoré sa uvažujú pre použitie v MSR musia mať nejaké parametre. A to parametre fyzikálne z pohľadu mechaniky, fyzikálne z nukleárneho pohľadu a chemické parametre. Táto práca sa bude zaoberať hlavne fyzikálnymi parametrami z nukleárneho pohľadu a bude uvedené aj porovnanie niektorých základných fyzikálnych parametrov. Chemické parametre solí nie sú obsahom tejto práce vzhľadom na jej zameranie.

2.1 Základné fyzikálne parametre

Základné fyzikálne parametre roztavených solí sú pre návrh reaktora a zloženia solí, podobne ako aj v iných strojníckych projektoch, potrebné hlavne z dôvodu dimenzovania mechanických častí. Pri pevnom jadrovom palive je kľúčová hlavne jeho pevnosť, krehkosť a hustota. Pevné jadrové palivo je stacionárne a jeho pohyb je nežiadúci. V MSR sa naopak využíva prúdenie solí. Existuje niekoľko konceptov spôsobu cirulácie solí, hlavne:

- samovoľne - konvekciou
- nútene - pomocou obehového čerpadla.

Aby bolo možné správne navrhnúť systém chladenia reaktora, je nutné poznať aspoň vlastnosti solí, ku ktorým patrí: teplota topenia, teplota varu, a hustota. Okrem iného je dôležité poznať aj viskozitu solí (resp. soľnej zmesi); tú je však potrebné určiť samostatne pre každý projekt, keďže je závislá od teploty a dokonca sa môže meniť aj v rámci samotného reaktora vzhľadom na teplotný gradient. Základné parametre chloridových a fluoridových solí sú uvedené v tabuľkách 2.1 a 2.2 .

Niektoré parametre (označné pomlčkou) nebolo možné zistiť, pravdepodobne z dôvodu nezmerateľnosti daných parametrov.

2.2 Fyzikálne parametre z nukleárneho pohľadu

Roztavené soli v reaktore MSR pôsobia podobne ako voda v štandardných tlakovodných reaktoroch. Jednak slúžia ako teplonosná látka, zároveň však vykonávajú funkciu moderátora. Moderačné vlastnosti vody sú všeobecne známe. V prípade roztavených solí však potrebujeme stanoviť, aké moderačné vlastnosti má daná soľ.

[1] U-233
[2] U-235
[3] Neobohatené lítium

Tab. 2.1: Základané fyzikálne vlastnosti chloridov [14],[15]

Zlúčenina	Bod topenia (°C)	Bod varu (°C)	Hustota ρ (kg/m^3)
$AlCl_3$	192,6	180	2480
$BeCl_2$	415	482	1900
$CaCl_2$	775	1935	2150
KCl	771	1411	1988
LiCl	610	1383	2070
$MgCl_2$	714	1412	2325
NaCl	800,7	1465	2170
$ZrCl_4$	437	331	2800
$^1UCl_4$	589	791	4870
$^2UCl_4$	589	791	4870
$ThCl_4$	770	921	4590
^{3}LiCl	610	1383	2070

Tab. 2.2: Základné fyzikálne vlastnosti fluoridov [14],[15]

Zlúčenina	Bod topenia (°C)	Bod varu (°C)	Hustota ρ (kg/m3)
AlF_3	1040	1291	3100
BeF_2	552	1283	2100
CaF_2	1418	2500	3180
KF	858	1502	2480
LiF	848,2	1673	2640
MgF_2	1263	2227	3148
NaF	993	1695	2560
ZrF_4	910	-	4430
$^1UF_4$	960	1417	6700
$^2UF_4$	960	1417	6700
ThF_4	1068	1680	6100
^{3}LiF	848,2	1673	2640

Neexistuje však univerzálne pravidlo, ako určiť či je žiadúce alebo nežiadúce, aby bola soľ moderátorom. Dobrý moderátor je charakterizovaný nasledujúcim správaním neutróna v moderátore:

- stratí čo najviac energie na jednu zrážku - to definuje logaritmický dekrement energie ξ
- prekoná čo najviac zrážok na jednotku vzdialenosti - to definuje spomaľovacia schopnosť $\xi\Sigma_s$
- má malú pravdepodobnosť absorpcie - to definuje koeficient spomalenia $\xi\Sigma_s/\Sigma_a$.

V niektorých typoch reaktorov sa využíva na reguláciu výkonu práve zmena polohy moderátora (reaktor Wasteburner od Copenhagen Atomics reguluje výkon pomocou zmeny hladiny ťažkej vody ako moderátora) a v takomto prípade je nežiadúce, aby soľ sama o sebe bola moderátorom. Naopak, v prípade reaktorov so štandardnou reguláciou pomocou absorpčných tyčí je vyššia moderačná schopnosť soli výhodou. Nie je potrebné také veľké množstvo dodatočného moderátora, čím sa šetrí objem a financie.

Ďalším spôsobom ako určiť, či je soľ vhodná na použitie v danom type reaktora je princíp reaktora. V prípade pomalých reaktorov využívajúcich tepelné neutróny je vhodné, aby mala soľ dobré moderačné vlastnosti a efektívne spomaľovala neutróny. Naopak v prípade rýchlych reaktorov je vhodné, aby soľ čo najmenej moderovala neutróny v rýchlej oblasti.

Samostatnou kapitolou je vplyv palivových solí. V tomto prípade je potrebné, aby soľ čo najmenej moderovala neutróny a preto je žiadúci malý koeficient spomalenia. V prípade množivých solí je zásadná aj oblasť energií kde dochádza k absorpcii. V takom prípade je nutné upraviť zloženie použitých solí tak, aby boli neutróny moderované práve na takú energiu, na ktorej sa najviac absorbujú do množivej soli.

2.3 Zdroje jadrových dát a spracovanie údajov

Ako bolo uvedené v predchádzajúcich kapitolách, na určenie moderačných vlastností solí sa používa logaritmického dekrementu energie ξ, spomaľovacej schopnosti $\xi\Sigma_s$ a koeficientu spomalenia $\xi\frac{\Sigma_s}{\Sigma_a}$. Výpočet koeficientu spomalenia sa prevedie podľa nasledujúcej rovnice:

$$\xi = 1 + \frac{\alpha \cdot \ln \alpha}{1 - \alpha} \tag{2.1}$$

kde alfa sa vypočíta zo vzťahu:

$$\alpha = \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2} \tag{2.2}$$

kde A je relatívna atómová hmotnosť. Pre získanie spomaľovacej schopnosti a následného koeficientu spomalenia je nutné poznať makroskopický účinný prierez pre rozptyl Σ_s a makroskopický účinný prierez pre absorpciu Σ_a. Makroskopický účinný prierez sa v oboch prípadoch získa pomocou nasledujúceho vzťahu:

$$\Sigma = N \cdot \sigma \tag{2.3}$$

kde σ je mikroskopický účinný prierez a N je počet molekúl danej látky v jednotke objemu. Počet molekúl látky v jednotke objemu sa vypočíta podľa vzorca:

$$N = \frac{\rho}{A \cdot u} \tag{2.4}$$

kde ρ je hustota danej látky, A je relatívna atómová hmotnosť a u je atómová hmotnostná konštanta (1,661*10^{-27} kg). Je vhodné poznamenať, že mikroskopický účinný prierez sa väčšinou udáva v jednotke barn, čo zodpovedá 10^{-28} m^2. Pre výpočty moderačných vlastností je nutné dosadzovať hodnoty sigma v m^2. Na získavanie mikroskopických účinných prierezov bola vybraná knižnica JEFF 3.3, ktorá je v súčasnosti najnovšou európskou knižnicou jadrových dát. V prípade výpočtov moderačných vlastností solí je potrebné zohľadniť percentuálny podiel jednotlivých izotopov a počet atómov daného prvku v molekule. Výpočet stredného logaritmického dekrementu energie pre molekulu sa prevedie podľa vzorca:

$$\xi = \frac{x_1 \cdot (\frac{P_{11}}{100} \cdot \xi_{11} \cdot \sigma_{11} + \frac{P_{12}}{100} \cdot \xi_{12} \cdot \sigma_{12}) + x_2 \cdot (\frac{P_{21}}{100} \cdot \xi_{21} \cdot \sigma_{21} + \frac{P_{22}}{100} \cdot \xi_{22} \cdot \sigma_{22})}{\sigma_{11} + \sigma_{12} + \sigma_{21} + \sigma_{22}} \tag{2.5}$$

kde x_1 je počet atómov prvého prvku, x_2 počet atómov druhého prvku, P_{11} je percentuálny podiel prvého izotopu prvého prvku, P_{12} je percentuálny podiel druhého izotopu prvého prvku, P_{21} je percentuálny podiel prvého izotopu druhého prvku, P_{22} je percentuálny podiel druhého izotopu druhého prvku, σ_{11} – σ_{22} sú príslušné mikroskopické účinné prierezy pre rozptyl. Ako príklad je uvedený výpočet pre $AlCl_3$:

$$\xi_{AlCl_3} = \frac{1 \cdot (\frac{P_{27Al}}{100} \cdot \xi_{27Al} \cdot \sigma_{27Al}) + 3 \cdot (\frac{P_{35Cl}}{100} \cdot \xi_{35Cl} \cdot \sigma_{35Cl} + \frac{P_{37Cl}}{100} \cdot \xi_{37Cl} \cdot \sigma_{37Cl})}{\sigma_{27Al} + \sigma_{35Cl} + \sigma_{37Cl}} \tag{2.6}$$

Výpočet účinných prierezov sa prevedie podľa vzorca:

$$\sigma = x_1 \cdot (\frac{P_{11}}{100} \cdot \sigma_{11} + \frac{P_{12}}{100} \cdot \sigma_{12}) + x_2 \cdot (\frac{P_{21}}{100} \cdot \sigma_{21} + \frac{P_{22}}{100} \cdot \sigma_{22}) \tag{2.7}$$

Príklad výpočtu pre $AlCl_3$:

$$\sigma_{s\,AlCl_3} = 1 \cdot (\frac{P_{^{27}Al}}{100} \cdot \sigma_{s^{27}Al}) + 3 \cdot (\frac{P_{^{35}Cl}}{100} \cdot \sigma_{^{35}Cl} + \frac{P_{^{37}Cl}}{100} \cdot \sigma_{^{37}Cl}) \tag{2.8}$$

Výpočet relatívnej atómovej hmotnosti sa vypočíta podľa vzorca:

$$A = x_1 \cdot (\frac{P_{11}}{100} \cdot A_{11} + \frac{P_{12}}{100} \cdot A_{12}) + x_2 \cdot (\frac{P_{21}}{100} \cdot A_{21} + \frac{P_{22}}{100} \cdot A_{22}) \tag{2.9}$$

kde A_{11} – A_{22} sú príslušné atómové hmotnosti daných izotopov. Príklad výpočtu pre $AlCl_3$:

$$A_{AlCl_3} = 1 \cdot (\frac{P_{^{27}Al}}{100} \cdot A_{^{27}Al}) + 3 \cdot (\frac{P_{^{35}Cl}}{100} \cdot A_{^{35}Cl} + \frac{P_{^{37}Cl}}{100} \cdot A_{^{37}Cl}) \tag{2.10}$$

Vzhľadom na komplikovanosť dohľadateľnosti presných relatívnych atómových hmotností pre každý izotop, je možné pri výpočte relatívnych atómových hmotností namiesto relatívnych atómových hmotností daných izotopov uvažovať nukleónové čísla izotopov. Odlišnosti sú minimálne a pri výpočtoch spôsobujú chybu v prijateľnom rozmedzí.

2.4 Voľba izotopov a základné fyzikálne vlastnosti

Reaktory MSR od svojho vzniku používali predovšetkým fluoridové soli. Dnes je však kladená požiadavka, okrem iných, aj na cenu projektu a preto sa vývoj čím ďalej tým viac sústredí na chloridové soli, ktoré sú lacnejšie a dostupnejšie ako fluoridy. Preto pri výbere izotopov, budeme uvažovať izotopy fluóru aj chlóru. Ostatné prvky boli vybrané na základe dostupnosti daných solí, ich predošlého použitia v projektoch MSR ako aj na základe predošlých prác zaoberajúcich sa touto problematikou.

2.5 Ručný výpočet moderačných vlastností

Ako prvé boli moderačné vlastnosti vypočítané ručne. Hodnoty účinných prierezov boli získané pomocou programu JANIS z knižnice JEFF 3.3. Účinné prierezy boli stanovené pre tepelené neutróny, t.j. neutróny s energiou 0,025 eV. Následne boli hodnoty spracované pomocou tabuľkového editora MS Excel a výsledkom sú tabuľky

Tab. 2.3: Moderačné vlastnosti vybraných izotopov

Izotop	$\xi(-)$	$\xi\Sigma_s(m^{-1})$	$\xi\Sigma_s/\Sigma_a(-)$
^{35}Cl	0,0561	0,0065	0,0267
^{37}Cl	0,0531	0,0003	0,1407
^{19}F	0,1017	0,0020	39,6062
^{27}Al	0,0724	0,6330	0,4455
^{9}Be	0,2066	16,6181	152,6732
^{40}Ca	0,0492	0,3208	0,3335
^{42}Ca	0,0469	0,1280	0,0847
^{44}Ca	0,0448	0,5058	0,2413
^{39}K	0,0504	0,1093	0,0392
^{41}K	0,0480	0,2711	0,1464
^{6}Li	0,2990	1,2491	6,0095
^{7}Li	0,2602	1,2449	5,9297
^{24}Mg	0,0811	1,3537	6,1449
^{25}Mg	0,0779	0,8641	1,0691
^{26}Mg	0,0750	0,8714	5,6208
^{23}Na	0,0845	0,6542	0,4896
^{90}Zr	0,0221	0,5318	12,2273
^{91}Zr	0,0218	0,9322	0,1773
^{92}Zr	0,0216	0,6578	0,6729
^{94}Zr	0,0211	0,7639	3,6690
^{230}Th	0,0087	0,1627	0,0023
^{232}Th	0,0086	0,3414	0,0153
^{233}U	0,0086	0,5136	0,0002
^{235}U	0,0085	0,5846	0,0002

Tab. 2.4: Moderačné vlastnosti chloridov - ručný výpočet

Zlúčenina	$\xi(-)$	$\xi\Sigma_s(m-1)$	$\xi\Sigma_s/\Sigma_a(-)$
$AlCl_3$	0,1201	6,7393	0,0597
$BeCl_2$	0,1104	6,1559	0,0641
$CaCl_2$	0,0631	2,5957	0,0330
KCl	0,0355	1,0280	0,0180
LiCl	0,0509	2,5793	0,0262
$MgCl_2$	0,0669	3,5472	0,0359
NaCl	0,0463	1,9968	0,0262
$ZrCl_4$	0,0708	3,6706	0,0378
$^1UCl_4$	0,1090	6,5754	0,0118
$^2UCl_4$	0,1037	6,3753	0,0100
$ThCl_4$	0,1065	6,1419	0,0587

Tab. 2.5: Moderačné vlastnosti fluoridov - ručný výpočet

Zlúčenina	$\xi(-)$	$\xi\Sigma_s(m-1)$	$\xi\Sigma_s/\Sigma_a(-)$
AlF_3	0,2399	6,7598	11,4826
BeF_2	0,2054	7,7308	102,5778
CaF_2	0,0713	1,8003	1,6646
KF	0,0481	0,6882	0,1290
LiF	0,1361	3,9797	11,7865
MgF_2	0,0802	2,7040	10,7541
NaF	0,0939	2,3436	1,1895
ZrF_4	0,0476	1,6462	4,5172
$^1UF_4$	0,1021	3,6191	0,0048
$^2UF_4$	0,0920	3,4691	0,0039
ThF_4	0,0973	3,2508	0,3694

2.3, 2.4 a 2.5 kde je možné vidieť moderačné vlastnosti pre jednotlivé izotopy a moderačné vlastnosti pre soli. Grafické zobrazenie a porovnanie moderačných vlastností fluoridových a chloridových solí sa nachádza na obr. 2.1.

2.6 Výpočet účinných prierezov programom NJOY21

V reaktorovej fyzike sú používané hlavne tri skupiny neutrónov: pomalé (tepelné), rezonančné a rýchle. Do týchto skupín ich delíme podľa energií, ktorým prislúchajú. Tepelné neutróny prislúchajú energiám 0,025 eV – 1eV, rezonančné sú v rozmedzí 1eV - 1keV a rýchle v rozmedzí 1keV - 10MeV. Výpočet pre jednu energiu a to 0,025eV je teda nedostatočný a je potrebné vypočítať moderačné vlastnosti pre všetky tri tieto skupiny.

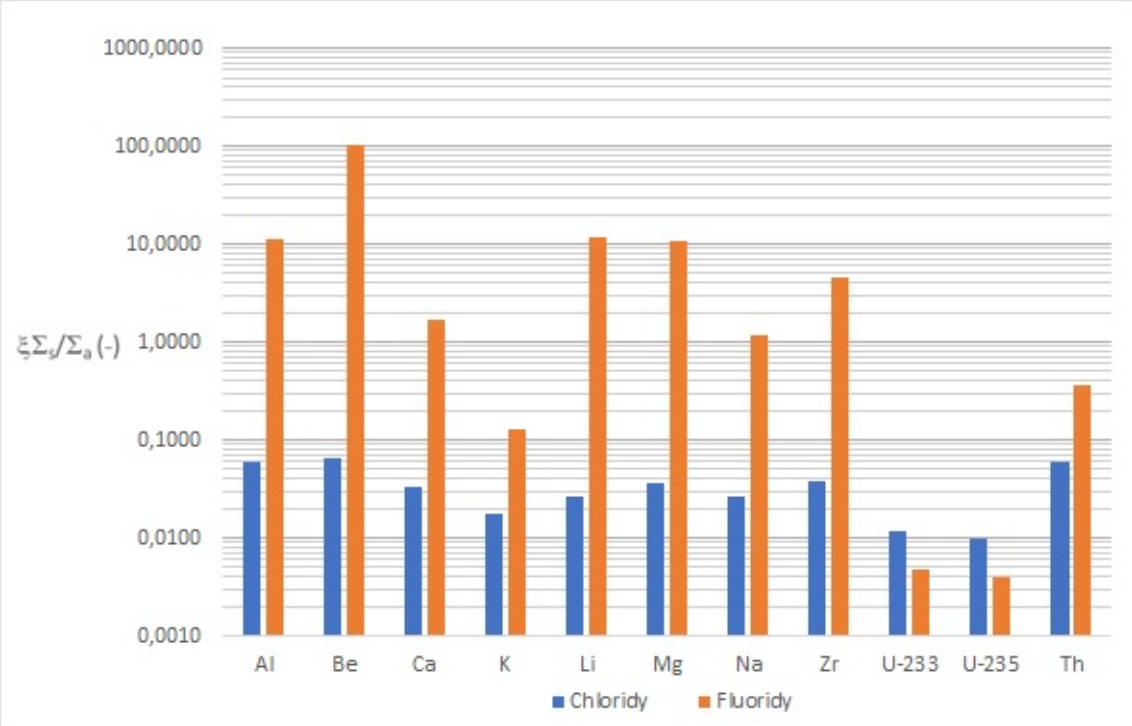
Na to slúži program NJOY21, ktorý vypočíta účinné prierezy pre každú skupinu neutrónov. NJOY21 je program určený pre jadrové výpočty, vyvýjaný od 70. rokov minulého storočia v Národnom laboratóriu v Los Almos, Nové Mexiko, USA.

Program NJOY najlepšie pracuje na operačnom systéme Linux. Inštalácia programu vyžaduje pomerne veľký výpočtový výkon. Na samotné výpočty v rámci tejto práce však stačí bežný počítač. NJOY bol spustený v emulovanom PC s operačným systémom Linux Ubuntu a to pomocou programu VirtualBox. Vzhľadom na náročnosť inštalácie bolo alokovaných 4GB pamäte RAM a 10GB pamäte pevného disku.

Program nemá grafické rozhranie, pracuje pomocou príkazov zadávaných do príkazového riadku. Namiesto postupného zadávania príkazov je možné vytvoriť vstupný súbor a nahrať ho pri prvom spustení programu pomovou príkazu. NJOY21 sa skladá z modulov, ktoré spracovávajú dáta zo vstupných súborov. Úplne prvým vstupným súborom je súbor "tape20", ktorý je vo formáte ENDF-6 a ďalej sa spracúva. Každý modul má svoj vstupný a výstupný súbor (výstupný súbor z predošlého modulu sa použije ako vstupný pre ďalší modul) a na konci tejto postupnosti sú výsledné dáta. Okrem toho vypočítané hodnoty NJOY vypisuje aj priamo do príkazového riadku, z ktorých je možné generovať output log.

Pre účely tejto práce boli ako vstupné súbory použité súbory formátu ENDF-6 z knižnice JEFF 3.3. Tieto súbory boli získané pre každý skúmaný izotop z databázy NEA. Vstupný súbor bol najskôr pomocou modulu RECONR konvertovaný do formátu PENDF, čiže bodového zobrazenia dát. Následne bol pomocou modulu BROADR upravený na teplotu 293 K čo odpovedá laboratórnej teplote 20°C. Ďalej boli pomocou modulu GROUPR vytvorené tri skupiny energií podľa vyššie uvedeného rozdelenia neutrónov a vypočítané stredné hodnoty účinných prierezov.

[1] U-233
[2] U-235



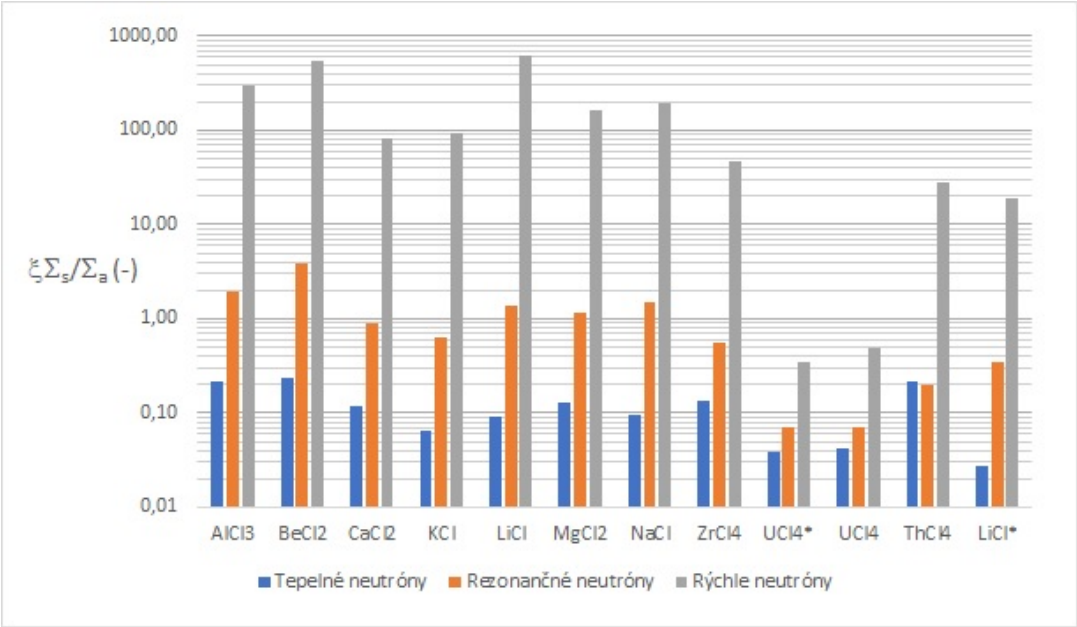
Obr. 2.1: Porovnanie koeficientu spomalenia chloridov a fluoridov - ručný výpočet

Ukážky zdrojového kódu, output logu a prostredia programu NJOY21 sú v prílohe A.

2.7 Výsledky strojových výpočtov

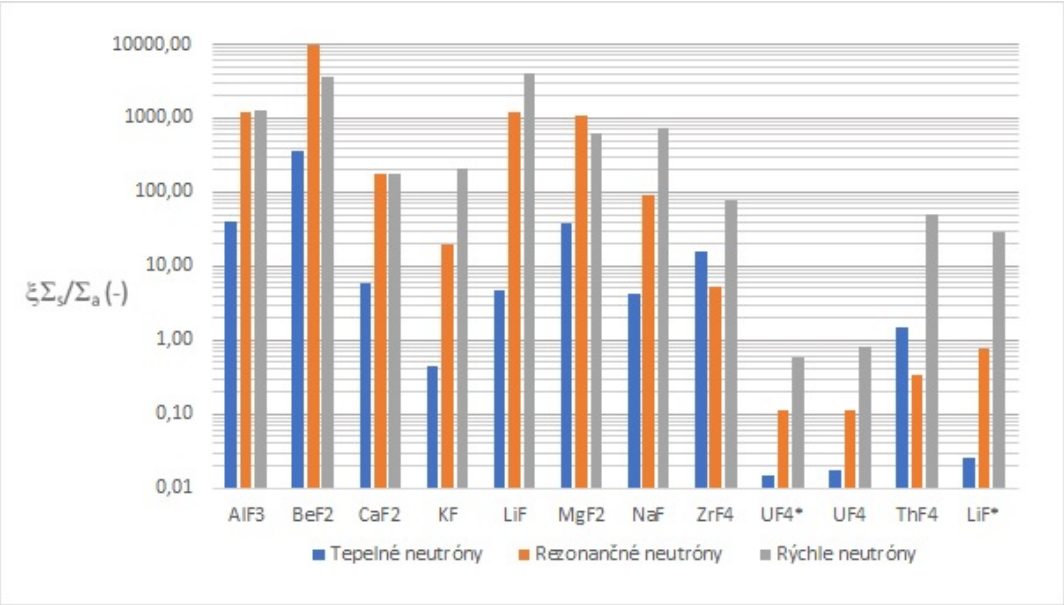
Po určení účinných prierezov programom NJOY21 pre každú skupinu neutrónov boli podobne ako pri ručných výpočtoch urobené prepočty moderačných vlastností jednotlivých prvkoch a zapísané do prehľadových tabuliek. Tabuľky obsahujúce moderačné a ostatné nukleárne vlastnosti pre jednotlivé izotopy, chloridové a fluoridové soli a pre každú skupinu neutrónov sú v prílohe B. Takisto sa v prílohe B nachádzajú aj grafy obsahujúce porovnanie chloridov a fluoridov pre jednotlivé skupiny neutrónov. Prehľadové grafy s koeficientom spomalenia pre chloridové a pre fluoridové soli sa nachádzajú na obrázkoch 2.2 a 2.3. (Soli označné hviezdičkou: U-233 a prírodné lítium.)

Z nameraných hodnôt je možné dôjsť k niekoľkým záverom. V prvom rade sú chloridy vo všeobecnosti horším moderátorom ako fluoridy. Tejto vlastnosti je možné s výhodou využiť v prípade čoraz populárnejších rýchlych reaktorov, kde je moderácia nežiadúca. Výhodou chloridov je aj ich cena. Výnimkou je chlorid draselný, ktorý má oproti fluoridu draselnému lepšie moderačné vlastnosti, hlavne v oblasti tepelných neutrónov. Ďalšou zaujímavou vlastnosťou je v prípade fluoridov podobnosť



Obr. 2.2: Koeficient spomalenia chloridových solí pre neutróny rôznych energií

koeficientu spomalenia na rezonančných a rýchlych neutrónoch. Tejto vlastnosti je možné využiť hlavne v prípade klasických pomalých reaktoroch, keďže neutróny sa budú spomaľovať rovnomerne naprieč spektrom vysokých a stredných energií. Rozdiely je možné pozorovať aj v prípade palivových solí. V tomto prípade je moderácia nežiaduca naprieč všetkými spektrami. V palivových soliach by mala prevládať absopcia neutrónov a teda koeficient spomalenia by mal byť čo najmenší. Možno konštatovať, že uránové soli, ako synteticky vyrobené (s U-235) tak aj namnožené (s U-233) moderujú neutróny len minimálne. O niečo vyšší koeficient spomalenia má množivá tóriová soľ, na tepelných neutrónoch hlavne ThF_4. Hodnoty sú však minimálne a keďže tóriovo-uránového palivového cyklu sa využíva hlavne v pomalých reaktoroch, o málo zvýšená moderácia nepredstavuje zásadnú nevýhodu. S týmto je však nutné počítať v prípade návrhu reaktorov, ktorých reaktivita sa riadi zmenou miery moderácie, aby nedochádzalo k samovoľnému zvyšovaniu reaktivity vplyvom moderovania na palivovej soli. Ďalší výrazný rozdiel je možné pozorovať medzi obohatenými a prírodnými lítiovými soľami. Ako je možné z hodnôt usúdiť, prírodné lítium (s vyšším obsahom ^{6}Li) má veľký účinný prierez pre absorpciu, hlavne na tepelných neutrónoch. Preto chlorid lítny aj fluorid lítny s prírodným lítiom nie je vhodný na použitie v tepelných reaktoroch. Okrem nežiadúcich moderačných vlastností ma absorpcia za následok vznik trícia, ktoré ľahko preniká cez vysokoniklované ocele a kontaminuje sekundárny a terciárny okruh. V soľných reaktoroch sa teda výlučne používa soľ s obohateným lítiom (99,99+% ^{7}Li).



Obr. 2.3: Koeficient spomalenia fluoridových solí pre neutróny rôznych energií

Záver

Táto práca sa v najprv venovala projektom reaktorov chladených tekukými soľami a to historickými tak aj súčasnými. Je možné povedať, že projekty ARE, MSRE a MSBR boli významné projekty, ktoré prispeli veľkou mierou k súčasnému vývoju soľných reaktorov. Napriek tomu, že posledný projekt (MSBR) sa nedostal do štádia realizácie, technológia množenia paliva prispela veľkou mierou k súčasným projektom množivých soľných reaktorov. V prípade súčasných projektov je možné konštatovať, že využívajú myšlienky a nápady, ktoré boli v minulosti vyvinuté a s výhodou používajú napr. tóriovo-uránový palivový cyklus, ktorý šetrí prírodné zásoby uránu. Taktiež je možné pozitívne hodnotiť fakt, že aj Česká republika sa projektom Energy Well podieľa na vývoji MSR pre štvrtú generáciu jadrových reaktorov.

V praktická časť tejto práce sa zaoberala moderačnými vlastnosťami vybraných izotopov a ich solí určených výpočtovou metódou. Ručným výpočtom boli s výhodou určené moderačné vlastnosti izotopov a potom aj chloridových a fluoridových solí. Ďalej bol nainštalovaný výpočtový program NJOY21 a bol využitý na vypočítanie strednej energie pre dané skupiny neutrónov - pomalé, rezonančné, rýchle. Už po prvých výpočtoch bolo možné pozorovať rozdiely medzi výpočtom pre tepelné neutróny pomocou programu NJOY21 a ručným výpočtom. Keďže ručný výpočet uvažuje len energiu 0,025 eV, je menej presný a nezahŕňa neutróny s vyššími energiami. Po výpočtoch sa ukázali rozdiely hlavne medzi fluoridmi a chloridmi, chloridy sa ukázali ako vhodnejšie pre použitie v rýchlych reaktoch. Ďalej sa ukázalo, že palivo má na moderáciu neutrónov minimálny vplyv, čo je výhodou. Na záver bolo možné okrem niekoľkých iných sledovať rozdiely medzi lítnymi soľami s prírodným a obohateným lítiom. Ukázalo sa, že prírodné lítium má menší koeficient spomalenia a teda zlé moderačné vlastnosti a to hlavne preto, lebo izotop ^{6}Li má veľký účinný prierez pre absorpciu a absorpciou na tomto izotope vzniká nežiadúce trícium.

Napriek prvotným komplikáciám technického charakteru však možno zhodnotiť, že práca splnila svoje ciele - oboznámila čitateľa s historickými a súčasnými projektami MSR, uviedla ho do problematiky MSR a výsledkom praktickej časti je prehľad moderačných vlastností vybraných izotopov a ich solí.

Literatúra

[1] Energy Well: Conceptual Design of a Molten Salt Cooled Small Modular Reactor Energy. -.
URL https://e2.cvrez.cz/e2/uploads/article/491/rcr_energy_well_smr_concept.pdf

[2] AN EVALUATION OF THE MOLTEN SALT BREEDER REACTOR. 1972.
URL https://www.osti.gov/servlets/purl/4372873

[3] The periodic table of the elements. 1993.
URL https://www.webelements.com/compounds.html

[4] Molten salt reactor. 2001-.
URL https://en.wikipedia.org/wiki/Molten_salt_reactor

[5] Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. 2018.
URL https://aris.iaea.org/Publications/SMR-Book_2018.pdf

[6] NEA - JANIS. 2018.
URL https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_39910/janis

[7] NEA - JEFF-3.3. 2018.
URL https://www.oecd-nea.org/dbdata/jeff/jeff33/

[8] Periodická tabuľka - Ptable. 2022.
URL https://ptable.com/

[9] Burian, J.: *Experimentální a výpočetní výzkum vlastností solí pro jaderné reaktory typu MSR z pohledu jaderných dat.* Diplomová práca, VUT Brno, Brno, 2021.

[10] Hales, J.; Williamson, R.; Novascone, S.; ai.: Multidimensional multiphysics simulation of TRISO particle fuel. *Journal of nuclear materials*, ročník 443, č. 1-3, 2013: s. 531–543, ISSN 0022-3115, doi:10.1016/j.jnucmat.2013.07.070.
URL https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0022311513009586

[11] Haubenreich, P. N.; Engel, J. R.: Experience with the Molten-Salt Reactor Experiment. *Nuclear Applications and Technology*, ročník 8, č. 2, 1970: s. 118–136, ISSN 0550-3043, doi:10.13182/NT8-2-118.
URL http://www.thmfgrcs.com/NAT_MSREexperience.pdf

[12] Pioro, I. L.: *Handbook of generation IV nuclear reactors.* Amsterdam: Elsevier, prvé vydanie, 2016, ISBN 978-0-08-100149-3.

[13] Robertson, R.: MSRE DESIGN AND OPERATIONS REPORT. 1965.
URL `http://moltensalt.org/references/static/downloads/pdf/ORNL-TM-0728.pdf`

[14] Savage, H.; Whitman, G.; Cobb, W.; ai.: Components of the fused-salt and sodium circuits of the Aircraft Reactor Experiment. 1958.
URL `https://www.osti.gov/servlets/purl/4308571`

[15] Valigura, D.; Baran, P.; Boča, R.; ai.: *Chemické tabuľky.* Bratislava: Slovenská technická univerzita, druhé vydanie, 1997, ISBN 80-227-0960-3.

[16] Šimík, M.: *Moderní jaderné reaktory.* Bakalárska práca, VUT Brno, Brno, 2013.

Zoznam symbolov a skratiek

MSR Molten Salt Reaktor - Reaktor chladený roztavenými soľami

ARE Aircraft Reactor Experiment

MSRE Molten Salt Reactor Experiment

MSBR Molten Salt Breeder Reactor

NEA Nuclear Energy Agency - Agentúra pre jadrovú energiu

IAEA International Atomic Energy Agency - Medzinárodná agentúra pre atómovú energiu

USA Spojené štáty americké

GB Gigabajt

PC Osobný počítač

RAM Pamäť Random Access Memory

Cl Chlór

F Fluór

Al Hliník

Be Berílium

Ca Vápnik

K Draslík

Li Lítium

Mg Horčík

Na Sodík

Zr Zirkónium

Th Tórium

U Urán

A Relatívna atómová hmotnosť

ξ	Logaritmický dekrement energie
σ_{a}	Mikroskopický účinný prierez pre absorpciu
σ_{s}	Mikroskopický účinný prierez pre záchyt
σ	Mikroskopický účinný prierez
Σ_{s}	Makroskopický účinný prierez pre záchyt
Σ_{a}	Makroskopický účinný prierez pre absorpciu
Σ	Makroskopický účinný prierez
N	Počet molekúl v jednotke objemu

Zoznam príloh

A Moderačné vlastnosti izotopov a ich solí **55**

A.1 Moderačné vlastnosti izotopov a ich solí pre tepelné neutróny 55

A.2 Moderačné vlastnosti izotopov a ich solí pre rezonančné neutróny . . 58

A.3 Moderačné vlastnosti izotopov a ich solí pre rýchle neutróny 61

B Nukleárne vlastnosti izotopov a ich solí **65**

B.1 Nukleárne vlastnosti izotopov a ich solí pre tepelné neutóny - ručný výpočet 65

B.2 Nukleárne vlastnosti izotopov a ich solí pre tepelné neutróny - NJOY21 67

B.3 Nukleárne vlastnosti izotopov a ich solí pre reznonančné neutróny - NJOY21 69

B.4 Nukleárne vlastnosti izotopov a ich solí pre rýchle neutróny - NJOY21 71

C NJOY21 **73**

C.1 Input file 73

C.2 Prostredie NJOY21 74

A Moderačné vlastnosti izotopov a ich solí

(Soli a izotopy označené hviezdičkou: U-233 a prírodné lítium.)

A.1 Moderačné vlastnosti izotopov a ich solí pre tepelné neutróny

Tab. A.1: Moderačnosté vlastnosti vybraných izotopov pre tepelné neutróny

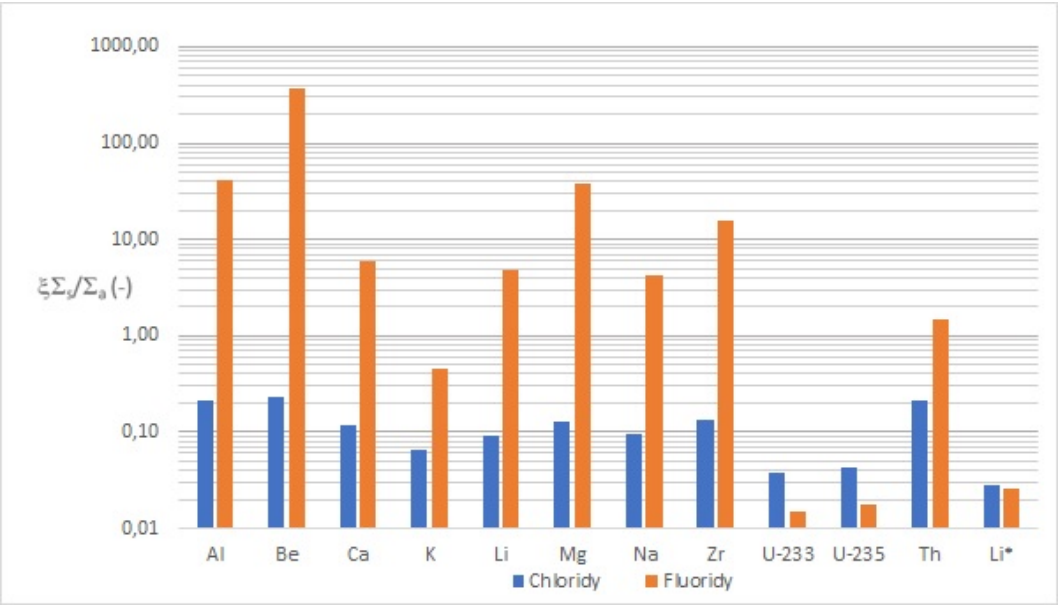
Izotop	$\xi(-)$	$\xi\Sigma_s(m^-1)$	$\xi\Sigma_s/\Sigma_a(-)$
^{35}Cl	0,0561	0,0064	0,0966
^{37}Cl	0,0531	0,0003	0,5010
^{19}F	0,1017	0,0020	140,7140
^{27}Al	0,0724	0,6330	1,6186
^{9}Be	0,2066	16,6181	552,8065
^{40}Ca	0,0492	0,3171	1,1921
^{42}Ca	0,0469	0,1266	0,3013
^{44}Ca	0,0448	0,5007	0,8608
^{39}K	0,0504	0,1080	0,1402
^{41}K	0,0480	0,2671	0,5248
^{6}Li	0,2990	1,1616	0,0008
^{7}Li	0,2602	1,1760	2,0189
^{24}Mg	0,0811	1,3284	21,7560
^{25}Mg	0,0779	0,8487	3,8251
^{26}Mg	0,0750	0,8565	19,9523
^{23}Na	0,0845	0,6415	1,7349
^{90}Zr	0,0221	0,5291	43,8158
^{91}Zr	0,0218	0,9271	0,6378
^{92}Zr	0,0216	0,6545	2,4119
^{94}Zr	0,0211	0,7602	13,1529
^{230}Th	0,0087	0,1454	0,0041
^{232}Th	0,0086	0,3361	0,0629
^{233}U	0,0086	0,4894	0,0006
^{235}U	0,0085	0,5524	0,0007

Tab. A.2: Moderačné vlastnosti chloridov pre tepelné neutróny

Zlúčenina	$\xi(-)$	$\xi\Sigma_s(m^-1)$	$\xi\Sigma_s/\Sigma_a(-)$
$AlCl_3$	0,1200	6,6224	0,2154
$BeCl_2$	0,1107	6,0876	0,2329
$CaCl_2$	0,0630	2,5479	0,1189
KCl	0,0355	1,0104	0,0649
LiCl	0,0505	2,5104	0,0924
$MgCl_2$	0,0669	3,4853	0,1297
NaCl	0,0463	1,9608	0,0946
$ZrCl_4$	0,0704	3,5869	0,1355
*UCl_4	0,1101	6,4948	0,0383
UCl_4	0,1051	6,3084	0,0430
$ThCl_4$	0,1065	6,0336	0,2132
*LiCl	0,0488	2,4236	0,0279

Tab. A.3: Moderačné vlastnosti fluoridov pre tepelné neutróny

Zlúčenina	$\xi(-)$	$\xi\Sigma_s(m^-1)$	$\xi\Sigma_s/\Sigma_a(-)$
AlF_3	0,2388	6,5841	40,6423
BeF_2	0,2054	7,6320	368,0279
CaF_2	0,0707	1,7498	5,8498
KF	0,0479	0,6715	0,4562
LiF	0,1353	3,8322	4,8506
MgF_2	0,0799	2,6362	37,9938
NaF	0,0939	2,2915	4,2034
ZrF_4	0,0469	1,5914	15,7981
*UF_4	0,1038	3,5535	0,0151
UF_4	0,0942	3,4114	0,0173
ThF_4	0,0967	3,1660	1,5023
*LiF	0,1164	3,2840	0,0262



Obr. A.1: Porovnanie chloridov a fluoridov pre tepelné neutróny - NJOY21

A.2 Moderačné vlastnosti izotopov a ich solí pre rezonančné neutróny

Tab. A.4: Moderačné vlastnosti vybraných izotopov pre rezonančné neutróny

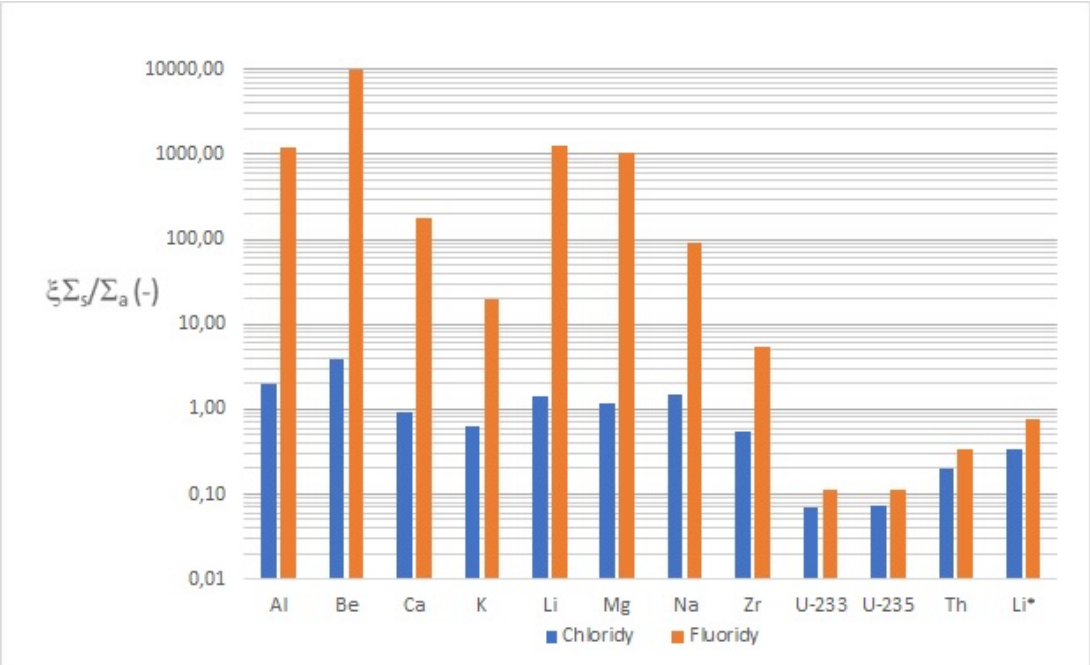
Izotop	$\xi(-)$	$\xi\Sigma_s(m^-1)$	$\xi\Sigma_s/\Sigma_a(-)$
^{35}Cl	0,0561	0,0017	0,8796
^{37}Cl	0,0531	0,0003	14,5601
^{19}F	0,1017	0,0020	3799,3488
^{27}Al	0,0724	0,6077	46,7382
^{9}Be	0,2066	15,7165	14238,5691
^{40}Ca	0,0492	0,3070	33,6375
^{42}Ca	0,0469	0,1147	8,9211
^{44}Ca	0,0448	0,4759	24,5860
^{39}K	0,0504	0,0814	4,2678
^{41}K	0,0480	0,1393	4,6904
^{6}Li	0,2990	1,1477	0,0233
^{7}Li	0,2602	1,2483	640,8500
^{24}Mg	0,0811	1,3247	610,4737
^{25}Mg	0,0779	0,8420	107,1645
^{26}Mg	0,0750	0,8530	570,8269
^{23}Na	0,0845	0,7019	40,2510
^{90}Zr	0,0221	0,5244	1095,3536
^{91}Zr	0,0218	1,4336	0,2230
^{92}Zr	0,0216	0,5731	65,3604
^{94}Zr	0,0211	0,7275	384,9825
^{230}Th	0,0087	1,3151	0,0383
^{232}Th	0,0086	0,5963	0,0275
^{233}U	0,0086	0,5160	0,0044
^{235}U	0,0085	0,4841	0,0042

Tab. A.5: Moderačné vlastnosti chloridov pre reznonančné neutróny

Zlúčenina	$\xi(-)$	$\xi\Sigma_s(m^-1)$	$\xi\Sigma_s/\Sigma_a(-)$
$AlCl_3$	0,1062	1,7541	1,9403
$BeCl_2$	0,1389	2,9924	3,8929
$CaCl_2$	0,0422	0,5709	0,9050
KCl	0,0311	0,2869	0,6305
LiCl	0,0682	1,0996	1,3932
$MgCl_2$	0,0496	0,9071	1,1480
NaCl	0,0533	0,9211	1,4966
$ZrCl_4$	0,0275	0,4939	0,5499
*UCl_4	0,0585	1,3742	0,0712
UCl_4	0,0600	1,3757	0,0718
$ThCl_4$	0,0406	1,2175	0,2007
*LiCl	0,0618	0,9921	0,3433

Tab. A.6: Moderačné vlastnosti fluoridov pre reznonančné neutróny

Zlúčenina	$\xi(-)$	$\xi\Sigma_s(m^-1)$	$\xi\Sigma_s/\Sigma_a(-)$
AlF_3	0,2406	6,5845	1207,8368
BeF_2	0,2054	7,4234	9711,5422
CaF_2	0,0729	1,7817	173,4251
KF	0,0610	0,7724	19,8807
LiF	0,1370	3,9214	1231,7966
MgF_2	0,0800	2,6310	1059,3538
NaF	0,0935	2,3750	92,7245
ZrF_4	0,0421	1,4489	5,4046
*UF_4	0,0998	3,4934	0,1134
UF_4	0,1032	3,5108	0,1149
ThF_4	0,0634	2,8255	0,3322
*LiF	0,1180	3,3598	0,7669



Obr. A.2: Porovnanie chloridov a fluoridov pre reznonančné neutróny

A.3 Moderačné vlastnosti izotopov a ich solí pre rýchle neutróny

Tab. A.7: Moderačné vlastnosti vybraných izotopov pre rýchle neutróny

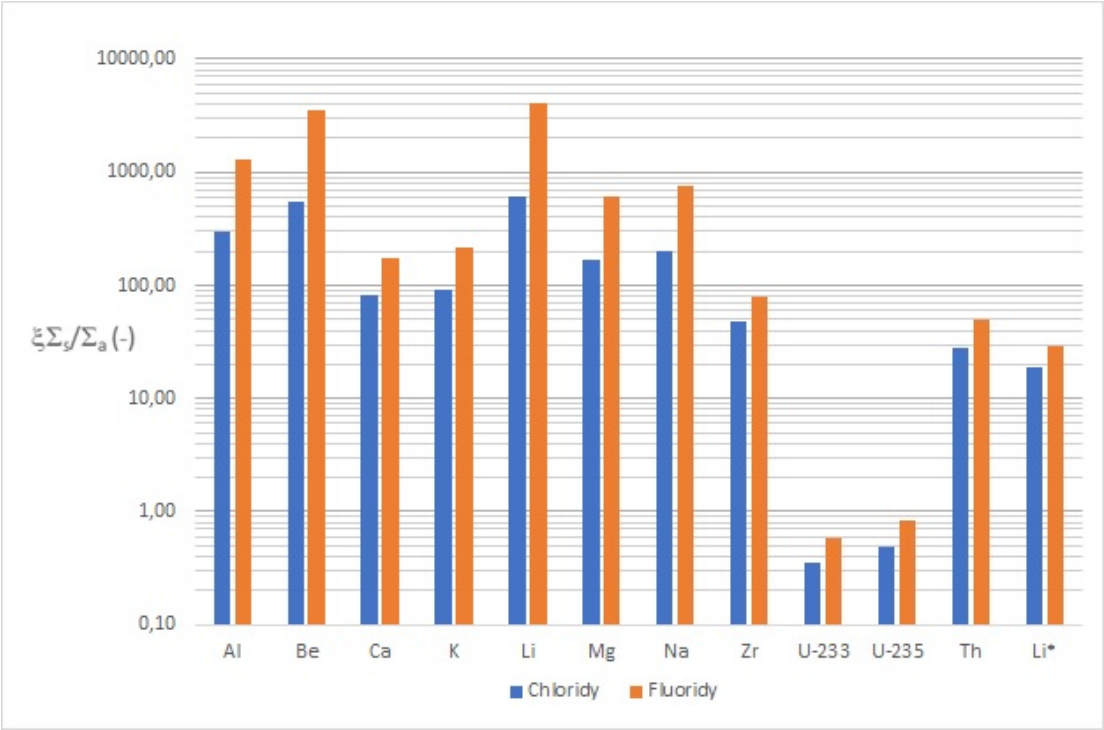
Izotop	$\xi(-)$	$\xi\Sigma_s(m^-1)$	$\xi\Sigma_s/\Sigma_a(-)$
^{35}Cl	0,0561	0,0006	181,3796
^{37}Cl	0,0531	0,0006	372,8831
^{19}F	0,1017	0,0008	1142,0461
^{27}Al	0,0724	0,7662	267,7514
^{9}Be	0,2066	4,5216	46490,7752
^{40}Ca	0,0492	0,2593	86,8034
^{42}Ca	0,0469	0,2190	38,7779
^{44}Ca	0,0448	0,2251	85,0822
^{39}K	0,0504	0,1362	177,0643
^{41}K	0,0480	0,1269	90,0454
^{6}Li	0,2990	2,0224	2,1678
^{7}Li	0,2602	1,9094	74254,7834
^{24}Mg	0,0811	0,5557	519,0879
^{25}Mg	0,0779	0,5311	612,5667
^{26}Mg	0,0750	0,5307	681,5023
^{23}Na	0,0845	0,3396	536,3239
^{90}Zr	0,0221	0,3192	11,8780
^{91}Zr	0,0218	0,3102	13,1292
^{92}Zr	0,0216	0,2823	17,4058
^{94}Zr	0,0211	0,2782	27,4066
^{230}Th	0,0087	0,1327	3,6868
^{232}Th	0,0086	0,1039	1,4660
^{233}U	0,0086	0,1697	0,0175
^{235}U	0,0085	0,1686	0,0245

Tab. A.8: Moderačné vlastnosti chloridov pre rýchle neutróny

Zlúčenina	$\xi(-)$	$\xi\Sigma_s(m^-1)$	$\xi\Sigma_s/\Sigma_a(-)$
$AlCl_3$	0,0784	0,6771	293,3255
$BeCl_2$	0,1002	0,8236	539,9506
$CaCl_2$	0,0312	0,2262	82,9704
KCl	0,0260	0,1681	91,4179
LiCl	0,0926	0,9730	620,2214
$MgCl_2$	0,0385	0,3153	165,7993
NaCl	0,0431	0,3441	197,6887
$ZrCl_4$	0,0301	0,2415	47,7910
*UCl_4	0,0585	0,5483	0,3547
UCl_4	0,0583	0,5446	0,4960
$ThCl_4$	0,0589	0,5190	27,6391
*LiCl	0,0753	0,7858	19,0096

Tab. A.9: Moderačné vlastnosti fluoridov pre rýchle neutróny

Zlúčenina	$\xi(-)$	$\xi\Sigma_s(m^-1)$	$\xi\Sigma_s/\Sigma_a(-)$
AlF_3	0,1792	2,4828	1278,1972
BeF_2	0,2051	2,6238	3565,0265
CaF_2	0,0517	0,6628	174,8841
KF	0,0454	0,4125	214,1970
LiF	0,1836	3,4644	4093,2022
MgF_2	0,0669	0,9321	610,8926
NaF	0,0928	1,0486	746,5956
ZrF_4	0,0471	0,6863	79,6412
*UF_4	0,1162	1,5166	0,5881
UF_4	0,1154	1,5022	0,8213
ThF_4	0,1173	1,3909	48,9673
*LiF	0,1297	2,4266	28,9864



Obr. A.3: Porovnanie chloridov a fluoridov pre rýchle neutróny

B Nukleárne vlastnosti izotopov a ich solí

(Soli a izotopy označené hviezdičkou: U-233 a prírodné lítium.)

B.1 Nukleárne vlastnosti izotopov a ich solí pre tepelné neutóny - ručný výpočet

Tab. B.1: Nukleárne vlastnosti vybraných izotopov pre tepelné neutróny - ručný výpočet

Izotop	$\sigma_a(b)$	$\sigma_s(b)$	$\alpha(-)$	N (m^{-3})	P (%)
^{35}Cl	44,000	20,990	0,892	5,53E+25	76,0
^{37}Cl	0,434	1,150	0,898	5,23E+25	24,0
^{19}F	0,010	3,740	0,810	5,38E+25	100,0
^{27}Al	0,236	1,452	0,862	6,02E+28	100,0
^{9}Be	0,009	6,503	0,640	1,24E+29	100,0
^{40}Ca	0,412	2,794	0,905	2,33E+28	97,0
^{42}Ca	0,680	1,228	0,909	2,22E+28	0,6
^{44}Ca	0,898	4,840	0,913	2,33E+28	2,0
^{39}K	2,110	1,639	0,903	1,32E+28	93,3
^{41}K	1,450	4,421	0,907	1,28E+28	6,7
^{6}Li	0,039	0,778	0,510	5,37E+28	7,8
^{7}Li	0,046	1,039	0,563	4,60E+28	92,2
^{24}Mg	0,051	3,828	0,846	4,36E+28	79,0
^{25}Mg	0,193	2,647	0,852	4,19E+28	10,0
^{26}Mg	0,039	2,885	0,857	4,03E+28	11,0
^{23}Na	0,527	3,054	0,840	2,54E+28	100,0
^{90}Zr	0,010	5,528	0,957	4,36E+28	51,5
^{91}Zr	1,220	9,912	0,957	4,31E+28	11,2
^{92}Zr	0,229	7,149	0,957	4,26E+28	17,2
^{94}Zr	0,050	8,658	0,958	4,17E+28	17,4
^{230}Th	23,100	6,093	0,983	3,07E+28	0,0
^{232}Th	7,337	13,044	0,983	3,04E+28	100,0
^{233}U	576,556	12,177	0,983	4,93E+28	-
^{235}U	684,181	14,088	0,983	4,88E+28	0,7

Tab. B.2: Nukleárne vlastnosti chloridov pre tepelné neutróny - ručný výpočet

Zlúčenina	$\sigma_a(b)$	$\sigma_s(b)$	A (-)	N (m^{-3})
$AlCl_3$	100,868	50,137	133,44	1,12E+28
$BeCl_2$	67,097	38,960	79,96	1,43E+28
$CaCl_2$	67,510	35,271	111,05	1,17E+28
KCl	35,610	18,054	74,61	1,61E+28
LiCl	33,590	17,267	42,48	2,94E+28
$MgCl_2$	67,152	36,063	95,28	1,47E+28
NaCl	34,071	19,282	58,48	2,24E+28
$ZrCl_4$	134,367	71,607	233,10	7,24E+27
*UCl_4	710,733	77,091	374,92	7,82E+27
UCl_4	818,358	79,002	376,92	7,78E+27
$ThCl_4$	141,514	77,958	373,92	7,39E+27

Tab. B.3: Nukleárne vlastnosti fluoridov pre tepelné neutróny - ručný výpočet

Zlúčenina	$\sigma_a(b)$	$\sigma_s(b)$	A (-)	N (m^{-3})
AlF_3	0,265	12,672	84,00	2,22E+28
BeF_2	0,028	13,983	47,00	2,69E+28
CaF_2	0,441	10,294	78,09	2,45E+28
KF	2,075	5,565	58,13	2,57E+28
LiF	0,055	4,779	26,00	6,12E+28
MgF_2	0,083	11,086	62,32	3,04E+28
NaF	0,537	6,794	42,00	3,67E+28
ZrF_4	0,228	21,653	167,18	1,60E+28
*UF_4	576,595	27,137	309,00	1,31E+28
UF_4	684,220	29,048	311,00	1,30E+28
ThF_4	7,375	28,004	308,00	1,19E+28

B.2 Nukleárne vlastnosti izotopov a ich solí pre tepelné neutróny - NJOY21

Tab. B.4: Nukleárne vlastnosti vybraných izotopov pre tepelné neutróny

Izotop	$\sigma_a(b)$	$\sigma_s(b)$	$\alpha(-)$	N (m^{-3})	P (%)
^{35}Cl	11,975	20,626	0,892	5,53E+25	76,0
^{37}Cl	0,120	1,136	0,898	5,23E+25	24,0
^{19}F	0,003	3,650	0,810	5,38E+25	100,0
^{27}Al	0,065	1,452	0,862	6,02E+28	100,0
^{9}Be	0,002	6,503	0,640	1,24E+29	100,0
^{40}Ca	0,114	2,762	0,905	2,33E+28	97,0
^{42}Ca	0,189	1,215	0,909	2,22E+28	0,6
^{44}Ca	0,249	4,791	0,913	2,33E+28	2,0
^{39}K	0,582	1,620	0,903	1,32E+28	93,3
^{41}K	0,399	4,357	0,907	1,28E+28	6,7
^{6}Li	261,499	0,723	0,510	5,37E+28	7,8
^{7}Li	0,127	0,981	0,563	4,60E+28	92,2
^{24}Mg	0,014	3,756	0,846	4,36E+28	79,0
^{25}Mg	0,053	2,600	0,852	4,19E+28	10,0
^{26}Mg	0,011	2,836	0,857	4,03E+28	11,0
^{23}Na	0,146	2,994	0,840	2,54E+28	100,0
^{90}Zr	0,003	5,501	0,957	4,36E+28	51,5
^{91}Zr	0,337	9,858	0,957	4,31E+28	11,2
^{92}Zr	0,064	7,113	0,957	4,26E+28	17,2
^{94}Zr	0,014	8,616	0,958	4,17E+28	17,4
^{230}Th	11,594	5,445	0,983	3,07E+28	0,0
^{232}Th	1,756	12,839	0,983	3,04E+28	100,0
^{233}U	180,443	11,604	0,983	4,93E+28	-
^{235}U	152,040	13,312	0,983	4,88E+28	0,7

Tab. B.5: Nukleárne vlastnosti chloridov pre tepelné neutróny

Zlúčenina	$\sigma_a(b)$	$\sigma_s(b)$	A (-)	N (m^{-3})
$AlCl_3$	27,455	49,298	133,44	1,12E+28
$BeCl_2$	18,262	38,400	79,96	1,43E+28
$CaCl_2$	18,376	34,679	111,05	1,17E+28
KCl	9,700	17,751	74,61	1,61E+28
LiCl	9,256	16,930	42,48	2,94E+28
$MgCl_2$	18,277	35,436	95,28	1,47E+28
NaCl	9,276	18,943	58,48	2,24E+28
$ZrCl_4$	36,572	70,454	233,10	7,24E+27
*UCl_4	216,962	75,398	374,92	7,82E+27
UCl_4	188,559	77,106	376,92	7,78E+27
$ThCl_4$	38,275	76,633	373,92	7,39E+27
*LiCl	29,643	16,910	42,48	2,94E+28

Tab. B.6: Nukleárne vlastnosti fluoridov pre tepelné neutróny

Zlúčenina	$\sigma_a(b)$	$\sigma_s(b)$	A (-)	N (m^{-3})
AlF_3	0,073	12,402	84,00	2,22E+28
BeF_2	0,008	13,803	47,00	2,69E+28
CaF_2	0,122	10,082	78,09	2,45E+28
KF	0,573	5,453	58,13	2,57E+28
LiF	0,129	4,631	26,00	6,12E+28
MgF_2	0,023	10,839	62,32	3,04E+28
NaF	0,148	6,644	42,00	3,67E+28
ZrF_4	0,063	21,259	167,18	1,60E+28
*UF_4	180,453	26,204	309,00	1,31E+28
UF_4	152,050	27,912	311,00	1,30E+28
ThF_4	1,766	27,439	308,00	1,19E+28
*LiF	20,516	4,611	26,00	6,12E+28

B.3 Nukleárne vlastnosti izotopov a ich solí pre rezonančné neutróny - NJOY21

Tab. B.7: Nukleárne vlastnosti vybraných izotopov pre rezonančné neutróny

Izotop	$\sigma_a(b)$	$\sigma_s(b)$	$\alpha(-)$	N (m^{-3})	P (%)
^{35}Cl	0,3520	5,5220	0,8920	5,53E+25	76,0
^{37}Cl	0,0039	1,0607	0,8975	5,23E+25	24,0
^{19}F	0,0001	3,6391	0,8100	5,38E+25	100,0
^{27}Al	0,0022	1,3941	0,8620	6,02E+28	100,0
^{9}Be	0,0001	6,1502	0,6400	1,24E+29	100,0
^{40}Ca	0,0039	2,6739	0,9048	2,33E+28	97,0
^{42}Ca	0,0058	1,1007	0,9091	2,22E+28	0,6
^{44}Ca	0,0083	4,5544	0,9131	2,33E+28	2,0
^{39}K	0,0144	1,2214	0,9025	1,32E+28	93,3
^{41}K	0,0233	2,2718	0,9070	1,28E+28	6,7
^{6}Li	9,1757	0,7146	0,5102	5,37E+28	7,8
^{7}Li	0,0004	1,0418	0,5625	4,60E+28	92,2
^{24}Mg	0,0005	3,7460	0,8464	4,36E+28	79,0
^{25}Mg	0,0019	2,5795	0,8520	4,19E+28	10,0
^{26}Mg	0,0004	2,8240	0,8573	4,03E+28	11,0
^{23}Na	0,0069	3,2767	0,8403	2,54E+28	100,0
^{90}Zr	0,0001	5,4520	0,9565	4,36E+28	51,5
^{91}Zr	1,4917	15,2432	0,9570	4,31E+28	11,2
^{92}Zr	0,0021	6,2284	0,9575	4,26E+28	17,2
^{94}Zr	0,0005	8,2446	0,9583	4,17E+28	17,4
^{230}Th	11,1984	49,2373	0,9827	3,07E+28	0,0
^{232}Th	7,1285	22,7796	0,9829	3,04E+28	100,0
^{233}U	23,5787	12,2344	0,9830	4,93E+28	-
^{235}U	23,5335	11,6672	0,9831	4,88E+28	0,7

Tab. B.8: Nukleárne vlastnosti chloridov pre rezonančné neutróny

Zlúčenina	$\sigma_a(b)$	$\sigma_s(b)$	A (-)	N (m^{-3})
$AlCl_3$	0,8075	14,7479	133,44	1,12E+28
$BeCl_2$	0,5370	15,0527	79,96	1,43E+28
$CaCl_2$	0,5409	11,5939	111,05	1,17E+28
KCl	0,2835	5,7430	74,61	1,61E+28
LiCl	0,2689	5,4931	42,48	2,94E+28
$MgCl_2$	0,5375	12,4305	95,28	1,47E+28
NaCl	0,2753	7,7280	58,48	2,24E+28
$ZrCl_4$	1,2414	24,8259	233,10	7,24E+27
*UCl_4	24,6525	30,0395	374,92	7,82E+27
UCl_4	24,6073	29,4723	376,92	7,78E+27
$ThCl_4$	8,2022	40,5847	373,92	7,39E+27
*LiCl	0,9845	5,4676	42,48	2,94E+28

Tab. B.9: Nukleárne vlastnosti fluoridov pre reznonančné neutróny

Zlúčenina	$\sigma_a(b)$	$\sigma_s(b)$	A (-)	N (m^{-3})
AlF_3	0,0025	12,3114	84,0	2,22E+28
BeF_2	0,0003	13,4284	47,0	2,69E+28
CaF_2	0,0042	9,9695	78,1	2,45E+28
KF	0,0151	4,9308	58,1	2,57E+28
LiF	0,0005	4,6809	26,0	6,12E+28
MgF_2	0,0008	10,8061	62,3	3,04E+28
NaF	0,0070	6,9158	42,0	3,67E+28
ZrF_4	0,1680	21,5772	167,2	1,60E+28
*UF_4	23,5791	26,7907	309,0	1,31E+28
UF_4	23,5339	26,2235	311,0	1,30E+28
ThF_4	7,1288	37,3359	308,0	1,19E+28
*LiF	0,7162	4,6554	26,0	6,12E+28

B.4 Nukleárne vlastnosti izotopov a ich solí pre rýchle neutróny - NJOY21

Tab. B.10: Nukleárne vlastnosti vybraných izotopov pre rýchle neutróny

Izotop	$\sigma_a(b)$	$\sigma_s(b)$	$\alpha(-)$	N (m^{-3})	P (%)
^{35}Cl	0,0006	1,9409	0,892	5,53E+25	76,0
^{37}Cl	0,0003	2,1320	0,898	5,23E+25	24,0
^{19}F	0,0001	1,4917	0,810	5,38E+25	100,0
^{27}Al	0,0005	1,7577	0,862	6,02E+28	100,0
^{9}Be	0,0000	1,7694	0,640	1,24E+29	100,0
^{40}Ca	0,0013	2,2586	0,905	2,33E+28	97,0
^{42}Ca	0,0025	2,1015	0,909	2,22E+28	0,6
^{44}Ca	0,0011	2,1538	0,913	2,33E+28	2,0
^{39}K	0,0006	2,0428	0,903	1,32E+28	93,3
^{41}K	0,0011	2,0698	0,907	1,28E+28	6,7
^{6}Li	0,1737	1,2592	0,510	5,37E+28	7,8
^{7}Li	0,0000	1,5936	0,563	4,60E+28	92,2
^{24}Mg	0,0002	1,5715	0,846	4,36E+28	79,0
^{25}Mg	0,0002	1,6268	0,852	4,19E+28	10,0
^{26}Mg	0,0002	1,7570	0,857	4,03E+28	11,0
^{23}Na	0,0002	1,5851	0,840	2,54E+28	100,0
^{90}Zr	0,0062	3,3183	0,957	4,36E+28	51,5
^{91}Zr	0,0055	3,2979	0,957	4,31E+28	11,2
^{92}Zr	0,0038	3,0675	0,957	4,26E+28	17,2
^{94}Zr	0,0024	3,1529	0,958	4,17E+28	17,4
^{230}Th	0,0117	4,9678	0,983	3,07E+28	0,0
^{232}Th	0,0233	3,9685	0,983	3,04E+28	100,0
^{233}U	1,9737	4,0244	0,983	4,93E+28	-
^{235}U	1,4088	4,0640	0,983	4,88E+28	0,7

Tab. B.11: Nukleárne vlastnosti chloridov pre rýchle neutróny

Zlúčenina	$\sigma_a(b)$	$\sigma_s(b)$	A (-)	N (m^{-3})
$AlCl_3$	0,0021	7,7180	133,44	1,12E+28
$BeCl_2$	0,0011	5,7430	79,96	1,43E+28
$CaCl_2$	0,0023	6,2201	111,05	1,17E+28
KCl	0,0011	4,0314	74,61	1,61E+28
LiCl	0,0005	3,5804	42,48	2,94E+28
$MgCl_2$	0,0013	5,5710	95,28	1,47E+28
NaCl	0,0008	3,5719	58,48	2,24E+28
$ZrCl_4$	0,0070	11,1017	233,10	7,24E+27
*UCl_4	1,9759	11,9715	374,92	7,82E+27
UCl_4	1,4109	12,0112	376,92	7,78E+27
$ThCl_4$	0,0254	11,9156	373,92	7,39E+27
*LiCl	0,0141	3,5543	42,48	2,94E+28

Tab. B.12: Nukleárne vlastnosti fluoridov pre rýchle neutróny

Zlúčenina	$\sigma_a(b)$	$\sigma_s(b)$	A (-)	N (m^{-3})
AlF_3	0,0009	6,2326	84,00	2,22E+28
BeF_2	0,0003	4,7527	47,00	2,69E+28
CaF_2	0,0015	5,2298	78,09	2,45E+28
KF	0,0007	3,5362	58,13	2,57E+28
LiF	0,0001	3,0853	26,00	6,12E+28
MgF_2	0,0005	4,5807	62,32	3,04E+28
NaF	0,0004	3,0768	42,00	3,67E+28
ZrF_4	0,0054	9,1212	167,18	1,60E+28
*UF_4	1,9743	9,9910	309,00	1,31E+28
UF_4	1,4093	10,0307	311,00	1,30E+28
ThF_4	0,0238	9,9351	308,00	1,19E+28
*LiF	0,0137	3,0592	26,00	6,12E+28

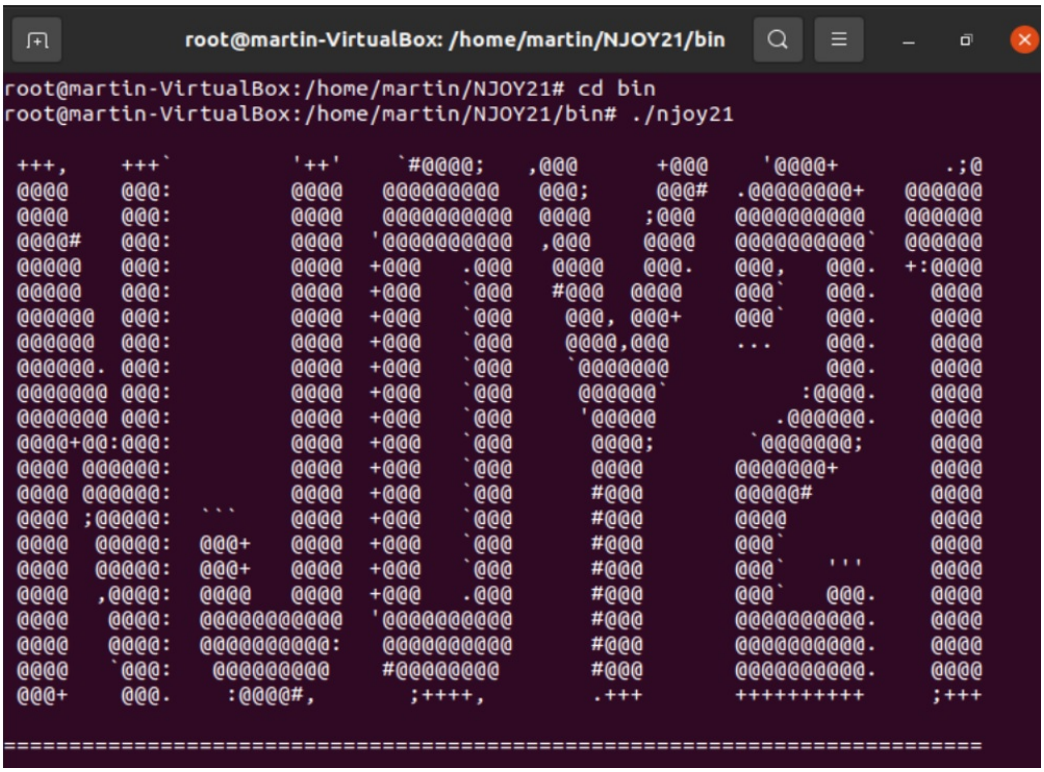
C NJOY21

C.1 Input file

```
reconr
20 21
'Be-9 PENDF from JEFF3.3'/
425 1/
.1/
'Be-9'/
0/
broadr
20 21 22
425 1/
0.1/
293.6
0/
groupr
20 22 0 23
425 1 0 2 5 1 1 1 1
'Groupwise'/
293.6/
0.001/
3/
0.025 1 1000 10e6/
3 102 'n,gamma'/
3 2 'elastic'/
0/
0/
plotr
24/
/
1/
'Berílium 9'/
'Účinný prierez'/
4/
/
/
/
```

```
/
6 22 425 3 2 293.6/
0 0 0 1/
2/
6 22 425 3 102 293.6/
0 0 0 2/
3/
1 23 425 3 102 293.6/
0 0 0 2/
4/
1 23 425 3 2 293.6/
0 0 0 1/
99/
viewr
24 25
stop
```

C.2 Prostredie NJOY21



Obr. C.1: Prostredie programu NJOY21