

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2021

Tomáš Hrbáček



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

VÝZKUM A VÝVOJ INOVOVANÉ MATRICE URANOVÉHO JADERNÉHO PALIVA

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF INNOVATIVE URANIUM NUCLEAR FUEL MATRICES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Hrbáček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Karel Katovský, Ph.D.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Tomáš Hrbáček

ID: 211453

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Výzkum a vývoj inovované matrice uranového jaderného paliva

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou jaderného paliva pro energetické jaderné reaktory. Proveďte komplexní rešerši současných trendů ve výzkumu a vývoji matrice jaderného paliva.
2. Zaměřte se na problematiku zvyšování tepelné vodivosti a hustoty jaderného paliva.
3. Vyberte perspektivní inovativní druhy palivových pelet, vypočtete vliv příměsí či inovovaných matic na reaktivitu a průběh vyhořívání jaderného paliva. Použijte výpočetní program UWB1.
4. Na základě výsledků navrhnete jeden materiál pro výrobu testovací výzkumné pelety s náhradním materiálem (uran je nahrazen cerem). Svůj výběr zdůvodněte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- 1) Foral, Š.: Dizertační práce, VUT v Brně, 2019
- 2) Ševeček, M.: Dizertační práce, ČVUT v Praze, 2018
- 3) Materiály NEA, IAEA, MIT, WNA

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 1.6.2021

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

Konzultant: Ing. Peter Mičian

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

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku jaderného paliva určeného pro jaderné reaktory. Věnuje se rešerši současných trendů jaderných pelet. Jsou zde popsány kvalitativní parametry jaderných paliv, převážně však tepelná vodivost a hustota jaderného paliva. Zvláštní kapitola je věnována simulaci příměsí paliva a jeho průběhu vyhořívání. Závěrečná část bakalářské práce je věnována konkrétnímu návrhu materiálu pro testovací výzkumnou peletu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Jaderné palivo, palivové pelety, palivové modifikace, příměsí, tepelná vodivost, hustota jaderného paliva, program UWB1.

ABSTRACT

The bachelor thesis is focused on the issue of nuclear fuel used for nuclear reactors. It is dedicated to research of current trends in nuclear pellets. The qualitative parameters of nuclear fuels are described here, predominantly thermal conductivity and density of nuclear fuel. A special chapter of this thesis is devoted to the simulation and fuel additives during burnout. The final part of the bachelor thesis is dedicated to a specific design of material for a test research pellet.

KEYWORDS

Nuclear fuel, fuel pellets, fuel modifications, additives, thermal conductivity, nuclear fuel density, UWB1 program.

HRBÁČEK, Tomáš. *Výzkum a vývoj inovované matrice uranového jaderného paliva*. Brno, 2021, 60 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce: doc. Ing. Karel Katovský, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Výzkum a vývoj inovované matrice uranového jaderného paliva“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce, panu doc. Ing. Karlovi Katovskému, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Děkuji Ing. Peteru Mičianovi za poskytnutí svých rad a materiálů pro dokončení této práce.

Obsah

1	Princip funkce reaktoru	12
1.1	Palivový cyklus	13
1.2	Rozdělení paliva v reaktoru	13
1.2.1	Absorbátory	14
1.2.2	Palivové tyče	14
1.2.3	Palivové pelety	16
2	Alternativní druhy jaderných paliv	18
2.1	Silicid uranu	18
2.2	Oxid thoričitý	19
2.3	Mononitrid uranu	21
2.3.1	Kombinace s oxidem uraničitým	21
2.3.2	Nitrid gadolinitý	22
2.4	Karbid uranu	24
2.5	Supravodivé sloučeniny v jaderném palivu	25
3	Palivové modifikace	27
3.1	Molybden	27
3.2	Uhlíkové nanotrubičky	29
3.3	Karbid křemíku	29
3.3.1	Porovnání metody SPS a oxidační slinování	30
3.3.2	Experimenty CVD a AHPCS	30
3.4	Diamant	32
3.4.1	Experimentální výroba	32
3.5	Oxid berylnatý	34
3.6	Mikrobuňka	36
3.6.1	Kovová mikrobuňka	36
3.6.2	Keramická mikrobuňka	37
3.7	Příměsi Mo a Cr v peletě z mikrobuněk	38
3.7.1	Vlastnosti peletek	38
3.8	Oxid hlinitý	40
3.9	Nanotechnologie	41
3.9.1	Nanotechnologie v jaderném palivu	41
4	UWB1	42
4.1	Datové knihovny	42
4.2	Postup výpočtu	43

4.3	Vstup UWB1	45
5	Výsledky simulace	47
5.1	Porovnání paliv	47
5.2	Simulace paliv s příměsí Mo	49
5.3	Simulace paliva s příměsí SiC	50
5.4	Návrh testovací pelety	51
	Závěr	52
	Literatura	53
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	57
A	Příloha	58

Seznam obrázků

1.1	Princip reakce jaderného štěpení	12
1.2	Reaktor VVEN	13
1.3	Jaderný reaktor	15
1.4	Palivové proutky	15
1.5	Peleta z UO_2	16
1.6	Chování paliva při ozařování	17
2.1	Tepelná vodivost ThO_2	20
2.2	Tepelná vodivost různých hustot ThO_2	20
2.3	Výsledky velikosti zrn ThO_2 při teplotách 1600°C a 1700°C	21
2.4	Závislost teplotní vodivosti pelet $UN - UO_2$ s různými hodnotami příměsí	22
2.5	Závislost teplotní vodivosti pelet s Gd_2O_3	23
2.6	Závislost teplotní vodivosti pelet s GdN	23
2.7	Vlastnosti pelet UC, UN, SiC, UO_2, ZrC	24
2.8	Tepelná vodivost UC, UN a UO_2	24
2.9	Teplotní vodivost UGe_2	25
2.10	Závislost multifikačního koeficientu na vyhoření sloučenin UTe_2 a UGe_2	26
2.11	Závislost multiplikačního koeficientu na vyhoření u sloučeniny UGe_2 s různým obohacením uranu	26
3.1	Obrázek pelety s roztroušeným typem a se sandwichovým typem	27
3.2	Teplotní vodivosti peletek v porovnání s konvenčním typem	28
3.3	Rozdíl mezi SPS a Oxidačním slinováním	30
3.4	Peleta SiC vyrobena pomocí AHPCS	31
3.5	Peleta po experimentu CVD	31
3.6	Vyrobená peleta UO_2 - diamant metodou SPS	32
3.7	Grafitizace řezem pelety	33
3.8	Rozdíl ve složení pelet	34
3.9	Rozdíl tepelné vodivosti na procentuální v příměsí BeO při různých typech pelety	35
3.10	Rozdíl tepelné vodivosti experimentální pelety a čisté pelety UO_2	35
3.11	Ukázka složení pelety micro-cell UO_2	36
3.12	Keramická a metalická micro-cell peleta	37
3.13	Micro-cell peleta s příměsí Cr	38
3.14	Graf součinitele tepelné vodivosti příměsí Mo a Cr proti UO_2	39
3.15	Snímek velikosti zrn při různé koncentraci Al_2O_3 v UO_2	40
4.1	Snímek vstupního souboru UWB1	44
4.2	Vstupní soubor UWB1	45

5.1	Graf porovnání paliv	48
5.2	Graf porovnání paliv s příměsí molybdenu	50
5.3	Graf porovnání paliv s příměsí karbidu křemíku	51

Seznam tabulek

4.1	Hodnoty jaderných hustot jednotlivých prvků v palivu	44
5.1	Procentuální zastoupení izotopů v palivu	47
5.2	Jaderné hustoty příměsi molybden	49
5.3	Jaderné hustoty příměsi karbidu křemíku	50
A.1	Hodnoty výstupu druhů paliv	58
A.2	Hodnoty výstupu s prvkem molybden	59
A.3	Hodnoty výstupu s karbidem křemíku	60

Úvod

Od prvního použití jaderného paliva v 60. a 70. letech došlo k mnoha pokrokům, jak vylepšení palivových pelet, tak i pokrytí. Palivo nyní běžně dosahuje přibližně trojnásobného vyhoření oproti dřívějším návrhům paliv. Zvýšené vyhoření paliva, dlouhá životnost a provozní zkušenosti byly doprovázeny významným zlepšením bezpečnosti paliva, proto jsou poruchy za normálního provozu nebo za přechodných podmínek v současné době velmi vzácné.

Zkušenost s havárií ve Fukušimě v Japonsku však zdůraznila zranitelnost zirkonia. Při této nehodě došlo na mnoho dní ke ztrátě chlazení a přehřátí, pokrytí reagovalo s párou za vzniku vodíku. Stoupání teploty vyvolalo tavení paliva a výbuchu vodíku.

V reakci na tuto událost je považováno za důležité prozkoumat další návrhy paliv, které by byly odolnější vůči takovým těžkým nehodám, při zachování jejich spolehlivosti a energetického potenciálu současného paliva.

Dnes se v tlakovodních reaktorech používá palivo ve formě keramických peletek UO_2 . Jeho výhody jsou vysoký bod tavení, dobrá stabilita při vysokých teplotách, chemická kompatibilita s pokrytím, chladičem a odolnost vůči záření. Jeho nevýhodou je proti alternativním palivům nízká teplotní vodivost. Tato nízká vodivost má za následek vysokou teplotu ve středu pelety, která vede ke znehodnocení pelety.

Mnoho států, využívajících jaderného průmyslu, nyní zvažuje nové typy paliv, která sahají od použití oxidačně odolných ochranných vrstev zirkoniového pokrytí, alternativních paliv až po materiály ochranných vrstev. Tato nová vyvíjená paliva, či ochranné vrstvy musí být před průmyslovým nasazením licencována, a proto se provádějí výzkumy s cílem posoudit jejich chování v různých podmínkách. [1]

Tématem této bakalářské práce je seznámení se s používaným palivem v jaderných reaktorech, popis jeho výhod a nevýhod. Další část práce je věnována popisu alternativních paliv a příměsí do palivových peletek, které mají za cíl zlepšení vlastností paliva.

Ve finální části je popis programu UWBI, práce v programu s inovovanými jadernými palivy a jejich popis při analýze ozařování. Následně jsou podle výsledků v průběhu simulace vybrány paliva, která mohou posloužit jako vzorek experimentu chování paliva při ozařování.

1 Princip funkce reaktoru

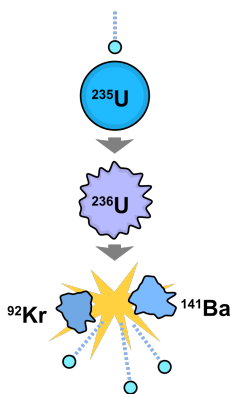
Jaderný reaktor se využívá v jaderné energetice pro výrobu tepelné energie, ze které se poté vytváří energie elektrická. Jaderná energetika nám v dnešní době dává veliký přínos energie, který je proti například uhelným elektrárnám mnohem ekologičtější a efektivnější. Jaderné reaktory mají rozdílné principy činnosti, konstrukce i oblasti využití.

V této práci je použit jako příklad tlakovodní reaktor VVER, který můžeme najít v obou našich jaderných elektrárnách, v jaderné elektrárně Temelín a jaderné elektrárně Dukovany.

Jaderný reaktor využívá štěpné reakce těžkých atomových jader, například ^{235}U , zasažené pomalými neutrony, které se rozpadají na jádra lehčích prvků (odštěpky, fragmenty). Současně se při každém štěpení uvolní 2 až 3 rychlé neutrony. Fragmenty se vzájemně odpuzují a velkou rychlostí se od sebe rozlétají. Při jejich zabrzdění srážkami s ostatními atomy paliva se kinetická energie mění na teplo, kvůli kterému se materiál silně zahřívá. Uvolněné neutrony se zpomalují pomocí srážek s moderátorem (nejčastěji voda). [2]

Pouze zpomalováním a neregulováním štěpné reakce by došlo k exponenciálnímu růstu počtu štěpení a k neřízené řetězové reakci. Pro záchyt přebytečných neutronů mohou sloužit například jádra atomů boru, který se ve formě kyseliny borité přidává do chladiva primárního okruhu. Štěpná reakce se také řídí pomocí tyčí absorbujících neutrony (regulační tyče), které se buď zasouvají nebo vytahují z aktivní zóny reaktoru. [3] [4]

Jaderný reaktor se skládá z palivových souborů, v nichž jsou skládány palivové tyče, ve kterých se nachází nejdůležitější část, a to jaderné pelety, kterými se tato práce zabývá.



Obr. 1.1: Princip reakce jaderného štěpení [4]

1.1 Palivový cyklus

Palivový cyklus jaderných elektráren je poměrně složitý. Začíná těžbou uranové rudy a jejím chemickým zpracováním. K získání 1 kg jaderného paliva jsou třeba 2 až 4 tuny uranové rudy. Nahradí se tím až 100 tun kvalitního černého uhlí.

Z rozemleté uranové rudy se získá žlutý koncentrát oxidu uranu U_3O_8 , obsahující minimálně 65 % přírodního uranu. Uran je nejprve přeměněn na plynný hexafluorid UF_6 a obohacuje se izotopem $^{235}_{92}U$ z přírodních 0,7 % na 2,5 až 5 %.

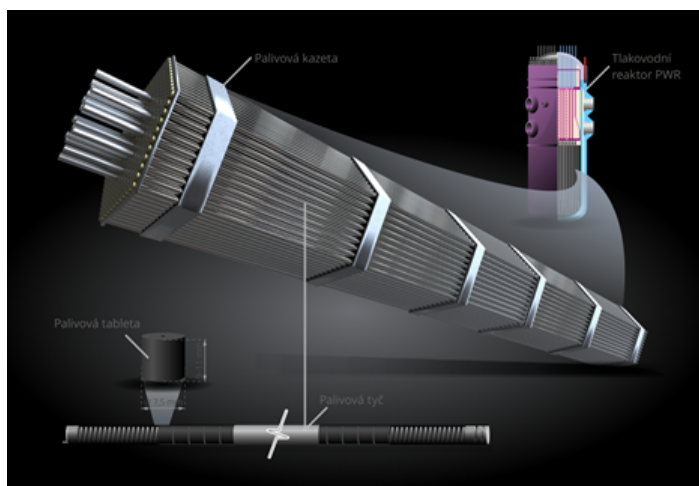
Výroba paliva začíná přeměnou na oxid urančitý UO_2 , který se lisuje do malých pelet (o hmotnosti asi 5 g). Použité palivo obsahuje v průměru 95% $^{238}_{92}U$, 3% štěpných produktů, 1% $^{235}_{92}U$ a asi 1% směsi izotopů plutonia od $^{238}_{94}Pu$, až po $^{244}_{94}Pu$, kde $^{239}_{94}Pu$ tvoří asi 60%.

Pouze 3% štěpných produktů je možné považovat za skutečný jaderný odpad, protože zbytek může být po přepracování znovu využito jako palivo.

Přepracování je však v současné době technicky i ekonomicky velmi náročné a provádí se jen v několika málo zemích. U nás se po několika desítkách let předpokládá trvalé uložení použitého paliva do hlubinného konečného úložiště. [2]

1.2 Rozdělení paliva v reaktoru

Vyrobené pelety ze slitiny UO_2 se uzavírají do hermeticky uzavřených trubek ze zirkoniové slitiny a spolu tak vytvářejí palivový proutek. Svazek palivových proutek tvoří palivovou kazetu (palivový soubor, palivový článek). Například v každém reaktoru JE Temelín je uloženo 163 palivových kazet, každá kazeta je sestavena z 312 palivových proutek. Každý proutek obsahuje asi 370 pelet. [2]



Obr. 1.2: Vnitřní pohled na palivovou kazetu VVER [2]

1.2.1 Absorbátory

Provozní regulace reaktoru se provádí pohybem tyčí z absorbujícího materiálu. Vhodnost absorbátorů se posuzuje dále podle mechanických vlastností, odolnosti proti korozi v daném prostředí a chemické stabilitě. Absorbující tyče mohou být vyrobeny také tak, že materiál pohlcující neutrony tvoří pouze výplň konstrukce a požadavek ostatních vlastností splňuje obal absorbátoru nebo matrice.

Regulace absorpčními tyčemi se rozšířila zejména vzhledem k jednoduchosti provedení, nízkým provozním nákladům a spolehlivosti. Nevýhodou absorbujících materiálů je samozřejmě to, že regulace jimi je ztrátová. Dále, že způsobují značnou nerovnoměrnost v rozložení neutronového toku v aktivní zóně.

Pro kompenzaci velkých přebytků reaktivity se používají absorbující materiály v kapalném stavu. Například v reaktorech typ PWR se provádí roztokem H_3BO_3 ve vodě v koncentracích 0-12 g na litr.

Absorbující materiály mají mít vysokou radiační stabilitu, mechanickou a chemickou stálost, přiměřené mechanické vlastnosti, dobrou tepelnou vodivost, tepelnou stabilitu a dobrou technickou zpracovatelnost. [5]

V současné době se používají absorbátory pro použití v tyčích bór, kadmium, indium, stříbro a hafnium. A pro použití, jako vyhořívajících absorbátorů jen ZrB_2 , Gd_2O_3 a Er_2O_3 .

Vyhořívající absorbátory se přidávají přímo do paliva a jsou to prvky s vysokým účinným průřezem pro záchyt neutronů, který se po absorpci neutronu mění na izotop s malým nebo zanedbatelným účinným průřezem tak, že již další neutrony nezachytává. Použití vyhořívajících absorbátorů je mj. výhodné i z důvodu vyšší bezpečnosti při přepravě a skladování čerstvého paliva.

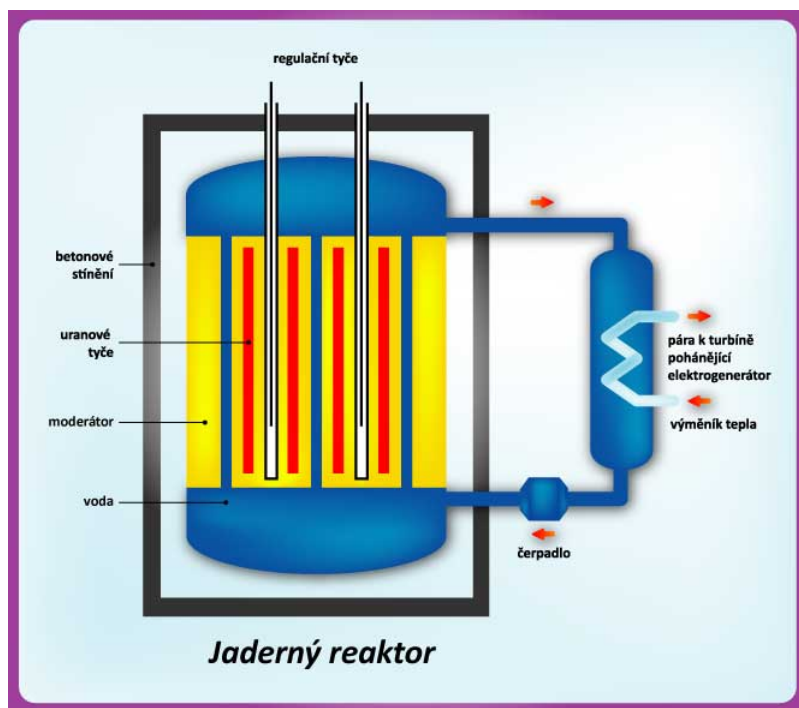
Vyhořívající absorbátor se buď umísťuje jako integrální, v tom případě se jedná o vyhořívající absorbátor, který je v tenké vrstvě přímo na povrchu pelety nebo v peletě. Diskrétní se už prakticky nepoužívá. [6]

1.2.2 Palivové tyče

Palivové tyče, neboli palivové proutky jsou „pouzdra“, do kterých je uloženo jaderné palivo ve formě peletek. Tyče jsou vyrobeny tak, aby co možná nejlépe vedly teplo a chránily primární okruh od jejich štěpných produktů nebo fragmentů, aktivačních produktů a aktinoidů, které vznikají při štěpení. [8]

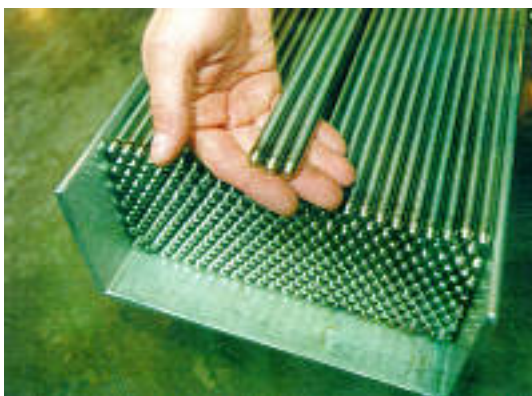
Tyče obsahují zirkonium, hlavní legovací slitiny jsou Nb a Sn, v menší míře Ni, Fe, Al, Cr. Jedna z možných slitin používaných pro PWR a BWR se nazývá zirkaloy.

Zirkonium je vhodné pro jeho uspokojivé mechanické vlastnosti a zejména nízký účinný průřez absorpce neutronu.



Obr. 1.3: Jaderný reaktor [7]

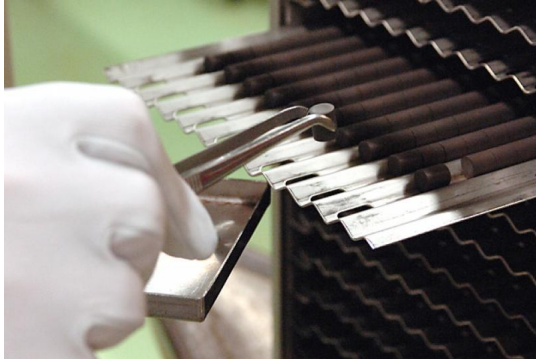
Bohužel, při havarijní teplotě nad (800°C), což je vysoko nad provozní teplotou, může vzniknout reakce zirkonium - pára, která uvolňuje vodík, který může vyvodit při smíchání s kyslíkem výbuch, který vznikne v kontejnmentu, nebo v reaktorové hale, viz. Fukušima. Proto jsou vysoké nároky na modifikace palivových tyčí, jenž by tomuto nepříjemnému stavu zabránil. [3]



Obr. 1.4: Palivové proutky [8]

1.2.3 Palivové pelety

Momentálně jediné používané jaderné pelety jsou UO_2 (keramická peleta typu oxidu uraničitého). Peletky mají tvar válce o výšce 10 až 15 mm a průměru 8 až 15 mm.



Obr. 1.5: Peleta z UO_2 [9]

Vlastnosti, které ovlivňují chování paliva z UO_2 jsou hustota, porozita (tvar pórů, velikostní rozložení), stechiometrický poměr kyslíku a uranu, štěpením způsobené zhušťování (změna hustoty) a restrukturalizace. [9]

Výhody oxidické keramiky:

- vysoká teplota tání
- teplotní stabilita (až do teploty tání nevykazuje žádné fázové změny)
- dobré zadržení štěpných produktů
- velmi dobrá korozní odolnost
- radiační stabilita

Nevýhody oxidické keramiky:

- nízká hustota štěpných jader
- nízká tepelná vodivost
- nízká odolnost vůči rychlým teplotním změnám
- křehkost

Cílem vývoje těchto keramických materiálů bylo zajistit vysoké vyhoření při malém objemovém růstu v podmínkách PWR, VVER reaktorů nebo reaktorů s vysokým měrným výkonem. Znamenalo to především vyvinout materiály s vysokou teplotou tavení. Na druhé straně nevýhodou keramických materiálů jsou horší teplotní vlastnosti (ve srovnání s kovovým palivem), hlavně jejich nízký koeficient tepelné vodivosti, který způsobuje, že pro používané povrchové teploty asi 350°C až 500°C se v centru palivového článku dosahuje teplot asi 1200°C. Povrchové teploty 500°C a vyšší dosahují v britských grafitových reaktorech, ale s použitím pokrytí z oceli a proutek je chlazen i uvnitř. Veliký rozdíl teplot znamená, že během ozařování nastávají po průřezu palivového článku velké strukturální změny a růst zrn, především v radiálním směru. Demonstrace změn palivového článku jsou znázorněny na obr.1.6. [3]



Obr. 1.6: Chování paliva při ozařování [9]

Palivové pelety jsou neustále modifikovány a postupně zlepšovány. Hlavně jejich bezpečnost a jejich fyzikální vlastnosti. Dalšími druhy, či modifikovanými peletami se budou postupně věnovat další kapitoly této práce.

2 Alternativní druhy jaderných paliv

Jak bylo vysvětleno v předchozích kapitolách, tak momentálně používané jaderné palivo z oxidu uraničitého má nemalé množství negativ, jako jsou tepelná vodivost, nestálost pelety při štěpení, atd... Jedním z východisek je nahrazení používaného paliva jiným chemickým složením, nebo jiným druhem paliva (kovová, keramická, kapalná). Na světě jsou spousty výzkumných reaktorů, používající tyto druhy jaderných paliv, například ruský reaktor BR-10.

Právě tyto druhy paliv mají být nastupcem UO_2 pelet pro palivo FNR u reaktorů 4. generace, které byly původně koncipovány tak, aby efektivněji spalovaly uran a prodloužily jeho zásoby. [19]

Těmto palivům bude věnován následující text této práce.

2.1 Silicid uranu

První možnost změny palivových pelet je peleta silicidu uranu U_3Si_2 . Touto strukturou palivové pelety se zabývá firma Westinghouse s názvem ATF palivo EnCore. [43]

Hlavní výhoda pelety silicidu uranu je její součinitel tepelné vodivosti. Součinitel tepelné vodivosti UO_2 je $2-5 W/m \cdot K$ a pro U_3Si_2 až $15-30 W/m \cdot K$. Toto se může výrazně projevit ekonomickým přínosem, pokud jde o nižší obohacení, prodloužení délky cyklu při stejném výkonu. Ekonomické výhody U_3Si_2 mohou také umožnit nákladově efektivní přijetí koncepcí pokrytí odolných proti nehodám.

Vyšší tepelná vodivost se také projevuje menším oteplením samotné pelety při stejném tepelném výkonu, což zapříčiňuje menší praskání a unikání plynu při štěpení z pelety. Větší hustota uranu v peletě ($11,3 gU/cm^3$ pro U_3Si_2 oproti $9,7 gU/cm^3$ u UO_2) je ekonomicky atraktivnější, přispívá vyššímu vyhoření, a díky tomu prodloužení vnitřního palivového cyklu. Dosavadní práce ukazují, že U_3Si_2 je náchylnější k chemickým reakcím než UO_2 .

Výzkumem pelet byla pozorována „vrstvená struktura korozních produktů“ na povrchu U_3Si_2 vystaveného kontaktu s vodou při $300^\circ C$ po dobu až 24 hodin. Autoři dále uváděli interdifúzi U_3Si_2 - zirkaloy při testování na $800^\circ C$ po dobu 100 hodin.

Prvky Fe a Cr tvořené na pokrytí se slitinou $ZrSi_2$ a místy bohatých na uran v tyčích zirkaloy.

Autoři naznačili, že jsou zapotřebí další studie, ale je jasné, že U_3Si_2 je aktivnější než UO_2 . Odolnost oxidace pelety U_3Si_2 mohla být zvýšena přidáním prvku hliníku, která však snížila obsah uranu. Snížila se tak předchozí výhoda pelety, kvůli nižšímu podílu uranu v peletě. [1]

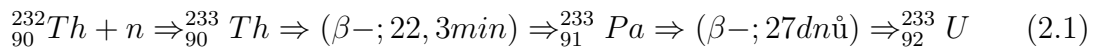
Další nevýhodou pelety je také menší teplota tavení (1 664,85°C), která zapříčňuje možnost plyných bublin, ke kterým dochází při změně z krystalického do amorfního stavu. Tato změna však nemusí nastat při normálních teplotních zatíženích reaktoru.

Mikrografy U_3Si_2 ozářené při teplotách energetického reaktoru v roce 1965 ze společnosti Shimizu prokázaly, že materiál si zachovává polykrystalickou strukturu.

Další studie ozářeného paliva odhalilo výsledky, které zahrnují omezené praskání ve srovnání s očekávaným chováním pelety UO_2 při stejné úrovni výkonu. [1]

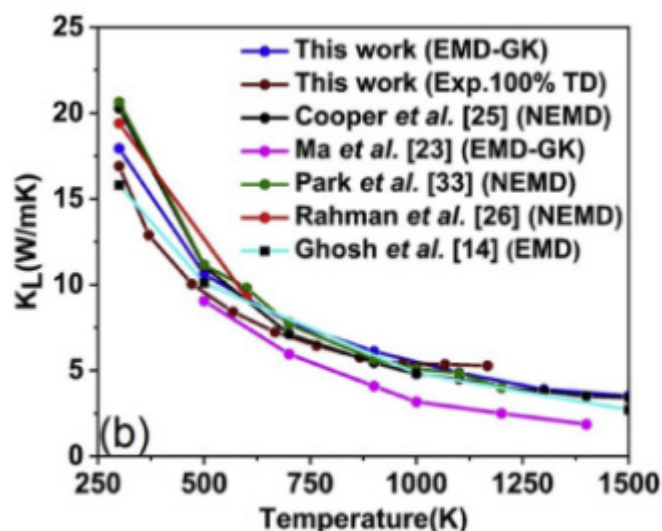
2.2 Oxid thoričitý

Oxid thoričitý hraje ve světě roli jako budoucí vhodnější a bezpečnější náhrada momentálně používaného oxidu uraničitého, například pro použití do reaktorů 4. generace. Samotná atomová jádra ^{232}Th jsou pouze α -zářiči a nemůže u nich proběhnout štěpná reakce. Záchytem neutronu se však přemění na ^{233}U , který je vynikajícím jaderným palivem. [20]



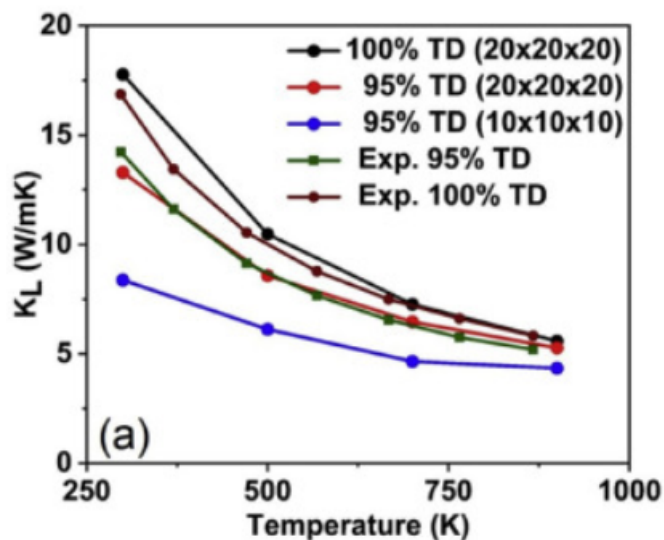
ThO_2 přesahuje oxid uraničitý u termofyzikálních vlastností, jako jsou vyšší teplota tavení, vyšší tepelná vodivost a nižší koeficient tepelné roztažnosti. V přírodě se thorium vyskytuje jako izotop ^{232}Th , který má ve srovnání s uranem 238 vyšší absorpční průřez pro tepelné neutrony. ThO_2 je relativně inertní, neoxiduje a má vyšší odolnost vůči radiačnímu poškození než UO_2 . ThO_2 také produkuje méně transuránových prvků než paliva na bázi uranu. Kromě toho, že se jedná o jaderné palivo, používá se ThO_2 také v jiných aplikacích, jako jsou svařovací elektrody a tepelně odolné materiály.

V literatuře se nachází několik experimentů zabývajících se měřením tepelné vodivosti ThO_2 [21, 22, 23, 24, 25, 26] mezi teplotami 300-1873 K a hustotou 92-100% ThO_2 , viz obrázek 2.1.



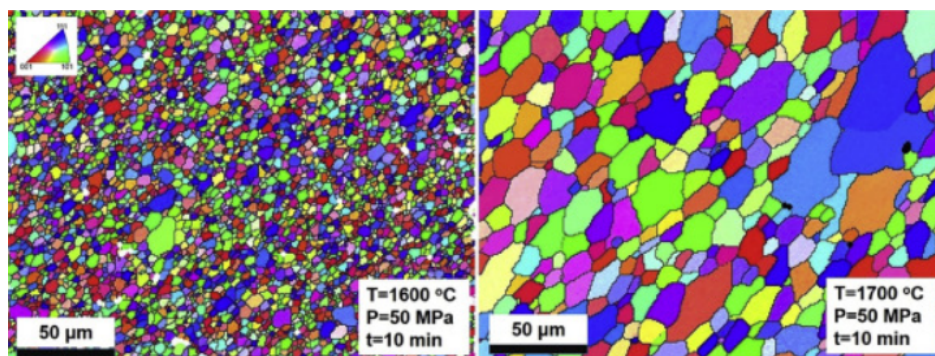
Obr. 2.1: Tepelná vodivost ThO_2 [27]

Při experimentální analýze [27] se úspěšně podařilo vyrobit peletu metodou SPS a byla změřena tepelná vodivost různých hustot ThO_2 pomocí laseru, viz obrázek 2.2.



Obr. 2.2: Tepelná vodivost různých hustot ThO_2 [27]

Při tomto experimentu byla dále pozorována nutnost použití větší krystalové struktury pro úspěšné modelování porézního ThO_2 a měření chování zrn při teplotách 1600°C a 1700°C, viz obrázek 2.3.



Obr. 2.3: Výsledky velikosti zrn ThO_2 při teplotách 1600°C a 1700°C [27]

2.3 Mononitrid uranu

Formy paliva z mononitridu uranu byly zkoumány v ruském reaktoru chlazeném sodíkem BR-10 už přibližně 20 let, stejně tak v testovacích reaktorech FFTF a EBR-II.

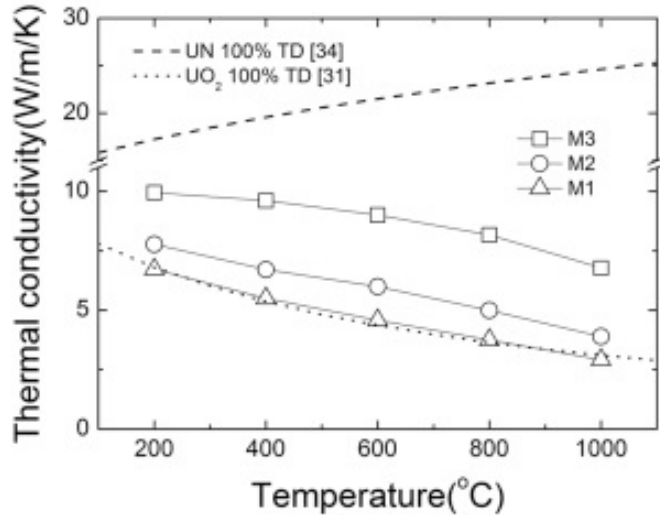
Kromě ekonomických benefitů spojených s nitridem uranu, jsou také žádoucí jeho termofyzikální vlastnosti podporující toleranci vůči nehodám. UN palivo podporuje provoz při vysokých výkonech, zvětšení délky cyklů a umožňuje vyšší vyhoření ve srovnání s tradičním palivem, kvůli atributům jako jsou vysoký bod tavení (2762°C), dobré tepelné vodivosti (20.5 $W/m \cdot K$ při 500°C), vysoké hustotě uranu (13.5 g/cm^3) a nižší teplotní kapacitě (230 $J/kg \cdot K$ při 500°C).

Bylo také zjištěno, že přidáním přísad například UO_2 , dokáže zabránit chemické reakci UN s vodou při jeho vystavení. [28]

2.3.1 Kombinace s oxidem uraničitým

Pelety s vysokou hustotou UO_{2-x} ($6 < x < 39$) v UN byly vyrobeny slisováním rozžhavených $UO_2 - UN$ prášků. Byly vyrobeny pelety ve formě disků, které měly téměř 100% teoretickou hustotu a s malým množstvím U_2N_3 .

Jedním z hlavních vlastností kompozitních paliv $UO_2 - UN$ je kompabilita s vodou, která by se vyhnula vážným zhoršením strukturální integrity pelety. Hustota a teplotní vodivost byla při experimentu naměřena a porovnána s momentálně používaným palivem, z výstupu bylo zaznamenáno zvýšení uranové hustoty o 13% a tepelná vodivost pelety se zvýšila až o 100%. Toto zvýšení hustoty uranu má stejný efekt jako zvýšení obohacení ^{235}U v UO_2 peletách. Tyto výsledky potvrdily při nahrazení kompozitů $UO_2 - UN$ za aktuální palivo UO_2 zvýšení bezpečnostních rezerv, zvýšení ekonomiky palivového cyklu a ke snížení množství vyhořelého paliva. [29]



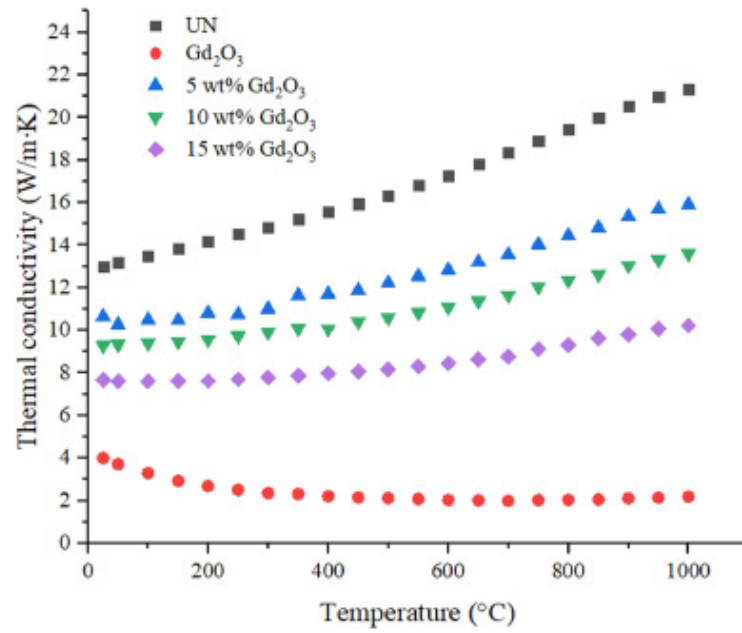
Obr. 2.4: Závislost teplotní vodivosti pelet $UN - UO_2$ s různými hodnotami příměsí [29]

2.3.2 Nitrid gadolinitý

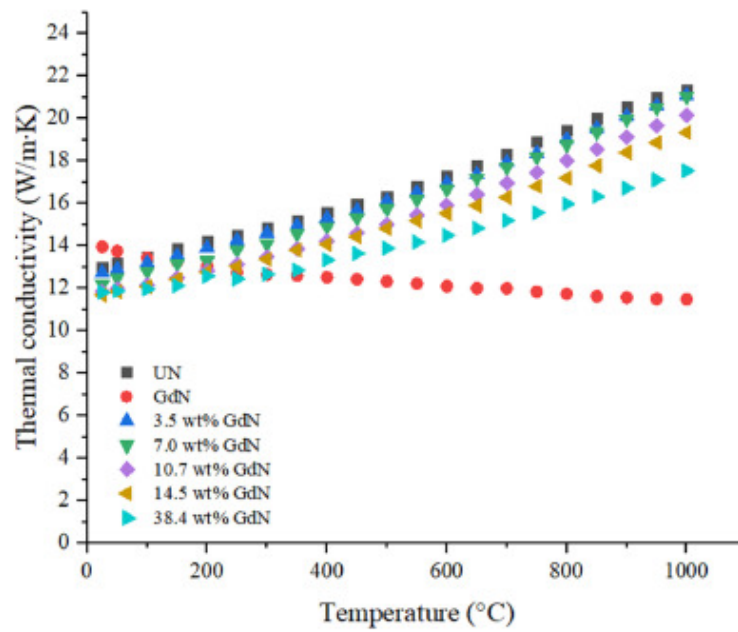
Během aplikace paliva UN v LWR je primárně nutné přidat do paliva vyhořivací absorbátor (VA), aby se omezila nadměrná reaktivita na začátku cyklu a aby se reguloval výkyv reaktivity během cyklu. Obecně je gadolinium široce používáno v komerčních LWR v chemické formě Gd_2O_3 , který je homogenně smíchán s konvenčním palivem UO_2 za vzniku pevného roztoku $(U_{1-x}, Gd_x)O_2$.

Kompozity absorbátoru UN/GdN a UN/Gd_2O_3 byly vybrány jako potenciální kandidáti pro UN jako vyhořivající absorbátor pro lehkovodní reaktory. Jako první se porovnávaly teplotní vodivosti kompozitů s vysokou hustotou až 97% UN/GdN a UN/Gd_2O_3 pelety s různými hustotami GdN (3.5–38.4 %) a Gd_2O_3 (5.0–15.0 %), které byly vyrobeny pomocí metody SPS při teplotě 1800°C

Teplotní vodivosti pelet byly měřeny v rozmezí teplot 25°C to 1000°C pomocí laseru, které monotónně klesaly se zvyšujícím se obsahem Gd . Nicméně kompozity měly zvyšující se tendenci se zvyšující se teplotou. Charakteristiky měření teplotní vodivosti, které objevily u dvou-fázové struktury UN/GdN pelety, která byla o 88% vyšší než používaný UN/Gd_2O_3 při 1000°C. Pevná fáze $(U_{1-x}, Gd_x)N$ obsahující UN/GdN pelety, které byly získány z teploty slinování (2000°C) projevily lehce nižší teplotní vodivost než pelety dvou-fázové UN/GdN , ale i přes to měly o 65% vyšší teplotní vodivost při 1000°C. V kombinaci s faktem, že nitrid gadolinitý má o 31% vyšší absorpci neutronu než oxid gadolinitý, experiment zjistil, že kompozit GdN má značnou výhodu oproti používanému Gd_2O_3 , jako vyhořivající absorbátor. [30]



Obr. 2.5: Závislost teplotní vodivosti pelet s Gd_2O_3 [30]



Obr. 2.6: Závislost teplotní vodivosti pelet s GdN [30]

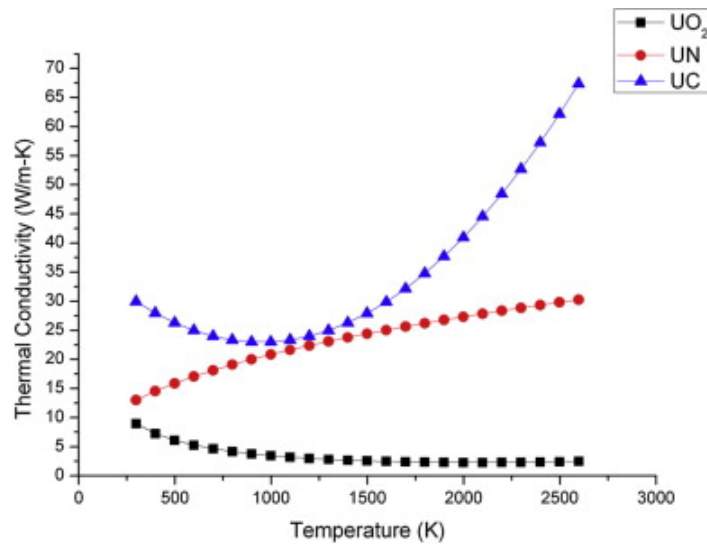
2.4 Karbid uranu

Aktinidové nitridy a karbidy mají velkou pozornost, kvůli jejich potenciálnímu užití u vylepšených jaderných paliv pro čtvrtou generaci jaderných reaktorů.

UC je alternativní materiál pro palivo UO_2 , kvůli o 30% vyšší hustotě uranu a až šestinásobně větší tepelné vodivosti, která dokonce přesahuje teplotní vodivost nitridu uranu. Tato vylepšení umožňují ozařování při vyšších výkonech, které mohou zmenšit při stejném výkonu zónu reaktoru a tím také redukovat finanční náklady. Avšak užití UC paliva ve vodou chlazených reaktorech je vyloučeno kvůli rychlé reakci paliva s chladivem. [31] [33]

	UO_2	UN	UC	SiC	ZrC
Density (kg/m^3)	10,600	14,000	13,000	3200	6590
Melting temperature ($^{\circ}C$)	2850	2850	2350	2700	3500
Thermal conductivity ($W/m\cdot K$)	8.67	13.0	25.3	20	20

Obr. 2.7: Vlastnosti pelet UC , UN , SiC , UO_2 , ZrC [32]

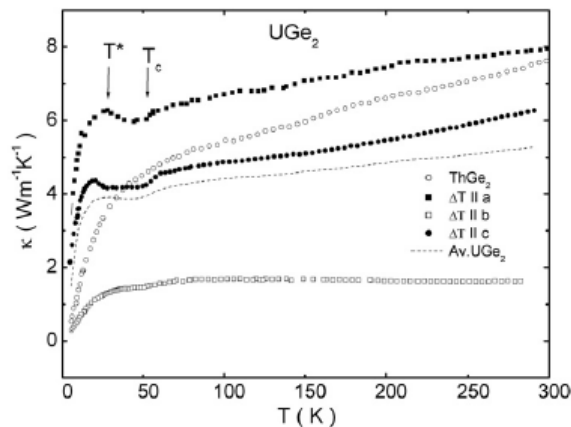


Obr. 2.8: Tepelná vodivost UC , UN a UO_2 [32]

2.5 Supravodivé sloučeniny v jaderném palivu

Nedávný objev supravodivosti sloučenin na bázi uranu, telluridu uraničitého UTe_2 a germanidu uraničitého UGe_2 , vyvolal veliký zájem použití těchto vlastností materiálů v informačních kvantových zařízeních. Supravodivost těchto sloučenin vzniká párováním takzvaných spin-tripletů, které existují v přírodě jen velice zřídka.

Tyto sloučeniny byly podrobeny experimentům v poměrně nízkých rozmezích teplot 4,2K-300K, právě z výstupu tohoto experimentu můžeme pozorovat graf na obrázku 2.9. Na tomto grafu můžeme pozorovat zvyšující se součinitel teplotní vodivosti germanidu uraničitého po počátečním vrcholu u teploty T^* . [16]



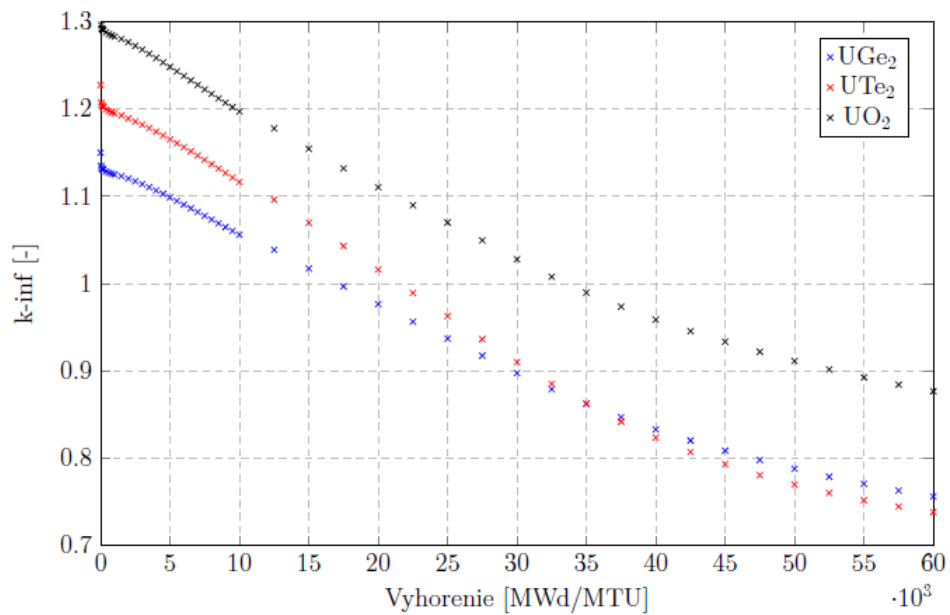
Obr. 2.9: Teplotní vodivost UGe_2 [16]

Co se týká použití těchto sloučenin jako jaderného paliva, není mnoho výzkumů. Jedním takovým se zabývá práce [16], která počítá se zjednodušenou simulací vyhořívání paliva v reaktoru programem UWB1, který bude využit i v této práci.

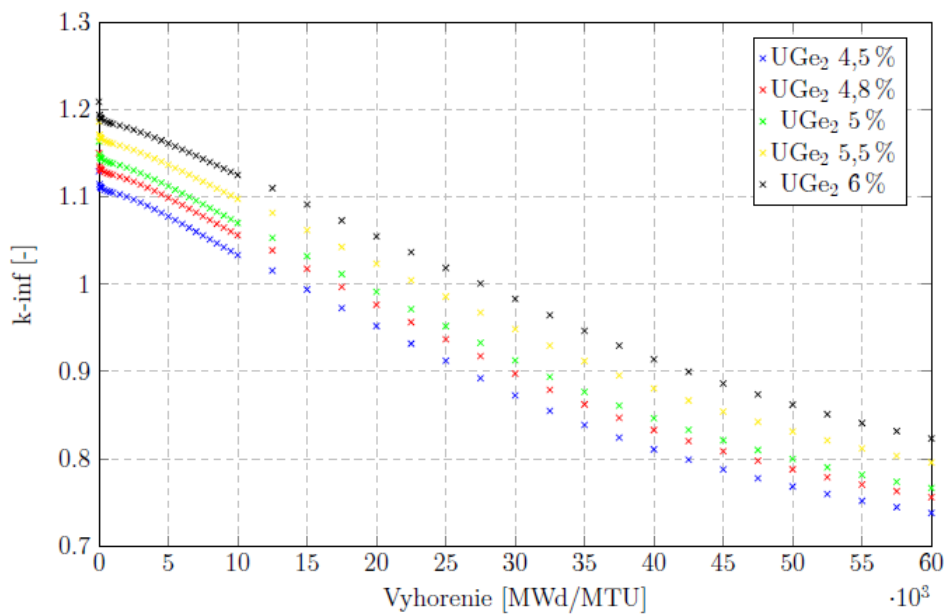
První částí zmíněné simulace byl výzkum s 4,8% obohacením uranu 235 u sloučenin UGe_2 a UTe_2 viz obrázek č. 2.10.

Na tomto grafu závislosti je možné pozorovat větší hodnotu k_{inf} , která může být způsobena různými průřezy Te a Ge . Toto má za následek snížení multiplikačního koeficientu pod hodnotu 1 dříve, než u UO_2 . Dále rychleji se snižující koeficient u sloučeniny UTe_2 , což může být následek vzniku různých izotopů s jiným účinným průřezem proti UGe_2 . [16]

Další část simulace se zabývá chováním sloučenin s různým obohacením uranu, které při vyšší koncentraci začínaly na vyšší hodnotě multiplikačního koeficientu s průběhem obdobným jako v předchozí závislosti. [16]



Obr. 2.10: Závislost multiplikačního koeficientu na vyhoření sloučenin UTe_2 a UGe_2 [16]



Obr. 2.11: Závislost multiplikačního koeficientu na vyhoření u sloučeniny UGe_2 s různým obohacím uranu [16]

3 Palivové modifikace

Další možností zlepšení vlastností paliva, je přidávání příměsí materiálů, jako molybden, nebo chrom s vlastnostmi, jež výrazně vylepší vlastnosti UO_2 pelet. Pelety UO_2 se smíchají s procentuální směsí prvku, nebo se vytvoří pokrytí pelety.

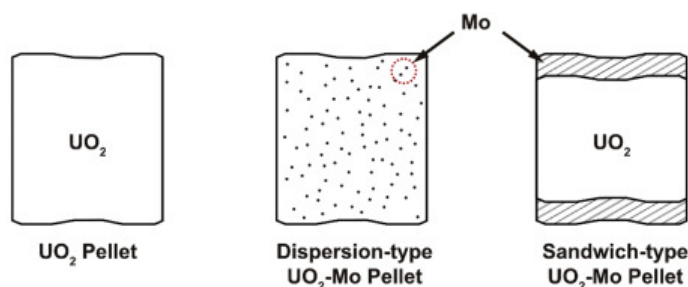
Touto cestou se zabývají například společnosti, jako ROSATOM pro výrobu paliva TVEL, nebo KAERI.

3.1 Molybden

Molybden, jako kandidát na přísadu pro ATF paliva je zkoumán zejména pro jeho vysokou teplotu tání (2623°C), vysokou tepelnou vodivost ($139 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) a přiměřenou neutronovou absorpci (2.48 barn) [34, 35].

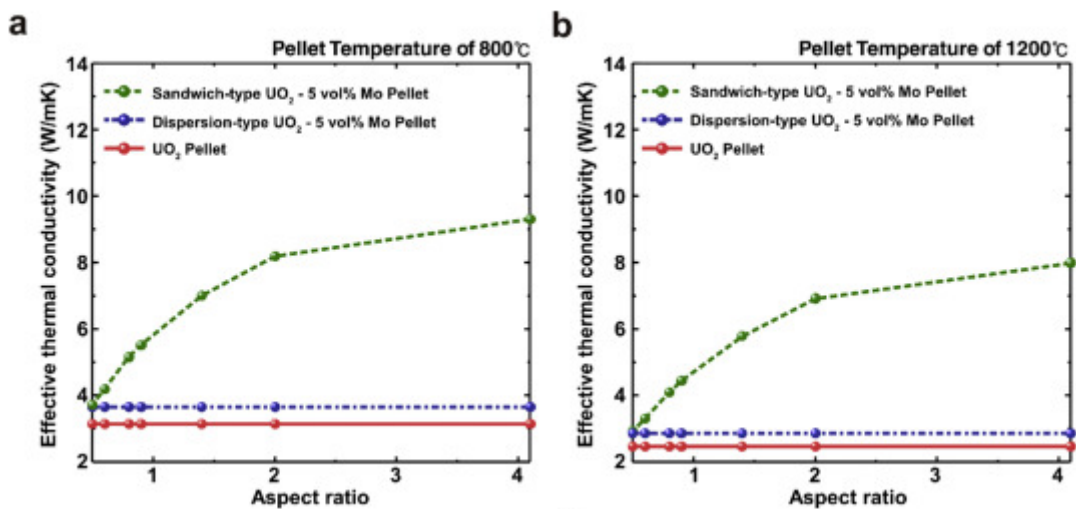
Při experimentech s molybdenem byly vyrobeny dvě různé pelety, peleta s roztroušeným molybdebem a peleta se sandwichovou konfigurací molybdenu viz obrázek 3.1.

Poměr slinování peletek byl 95% UO_2 prášku a 5% z 99,9% čistého molybdenu. $UO_2 - 5\%Mo$ se sandwichovou konfigurací byly vyrobeny, tak že vrstvy molybdenu byly položeny na vrchní a spodní část pelety, která byla vyrobena kvůli směru toku tepla v palivu LWR. Druhý typ pelety byl vyroben konvekční metodou slinování. [36]



Obr. 3.1: Obrázek pelety s roztroušeným typem a se sandwichovým typem [35]

Výsledky experimentů prokázaly 3 a 2,5 násobně větší tepelnou vodivost při 800°C a 1200°C slinutých pelet s roztroušeným typem a u sandwichového typu pelety. Další výsledky dokázaly efektivní snížení tepelného gradientu průřezem pelety. Co se týče teplotní vodivosti pelety, rozložení tepla, termomechanických vlastností ve srovnání se standardní UO_2 a $UO_2 - 5\text{vol}\%Mo$ roztroušeného typu pelety. Z výsledků vyšlo 3/3,2 a 2,5/2,8 násobně vyšší tepelnou vodivost v 800/1200°C, než standartní UO_2 pelety a rozptýleného typu pelety. Výrazné zlepšení vlastností pelety s upravenou konfigurací ukázala vhodnost v pokládání vysoce konduktivních materiálů při výrobě pelety. Tohle zlepšení teplotní vodivosti efektivně snížilo vnitřní teplotní gradient pelety a také znatelné snížení maximální napětí v tahu. [36]



Obr. 3.2: Teplotní vodivosti peletek v porovnání s konvenčním typem [36]

3.2 Uhlíkové nanotrubičky

Krystalický uhlík vykazuje nejvyšší naměřenou hodnotu tepelné vodivosti ze všech známých materiálů a to $2000 - 2500 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Tepelná vodivost grafitu při pokojové teplotě může dosáhnout hodnoty až $2000 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Pro uhlíkové nanotrubičky se předpokládají hodnoty podobné nebo i vyšší. [37]

CNT jsou chemicky inertní a jsou odolné vůči silným kyselinám nebo zásadám. Tepelná vodivost i teplotní roztažnost jsou u CNT anizotropní. Ve směru os nanotrubiček jsou hodnoty obou parametrů vyšší než ve směru kolmém na osu trubky. Uhlíkové nanotrubičky mají díky vazbě uhlík – uhlík, také velice vysokou mechanickou pevnost, jedná se o nejpevnější materiál, který byl kdy vyroben a Youngův modul pružnosti může dosahovat hodnot až 1000 GPa , což je přibližně pětkrát víc než má ocel. [38,39]

Potenciál pro CNT ke zvýšení teplotní vodivosti keramických kompozitních pelet, byl dříve demonstrován na systému založeném na Al_2O_3 . CNT se osvědčily v několika průmyslových odvětvích. V literatuře zatím neexistuje mnoho zdrojů zabývajících se experimenty v odvětví jaderných paliv, ale díky jejich vlastnostem mohou dokázat velmi slibný přínos [39]

3.3 Karbid křemíku

Na problematiku tepelné vodivosti keramických peletek se zaměřuje také příměs karbidu křemíku SiC. Tento koncept začlenění materiálu s vysokou tepelnou vodivostí do pelety UO_2 , byl studován a karbid křemíku byl považován za jednoho z hlavních kandidátů. Při porovnání je teplotní vodivost monokrystalického SiC měřená při pokojové teplotě $490 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, což je vyšší než má měď a to $398 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Hlavními výhodami karbidu křemíku jsou nízký účinný průřez pro absorpci neutronů, vysoká tepelná vodivost, chemická stabilita (silná odolnost proti oxidaci a vlhkosti vzduchu) a vysoká teplota tání (2973°C).

Další nezanedbatelnou výhodou SiC je jeho netoxický a izotropní účinek (má stejné vlastnosti nezávisle na směru) oproti alternativám, jako je oxid berylnatý.

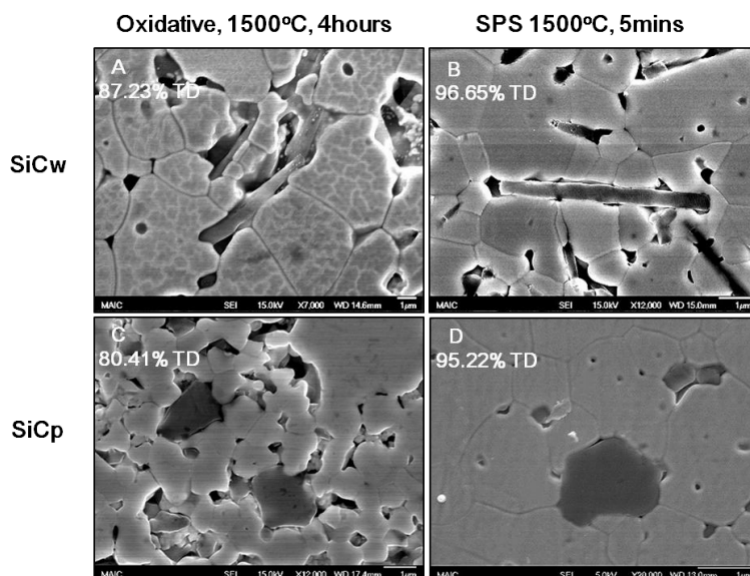
Pro výrobu pelet byly použity mnohé způsoby, jako například nízkoteplotní oxidační slinování, Spark Plasma Sintering (SPS), CVD (chemická depozice par), AHPCS (prekeramický polymer). Výsledky těchto experimentů budou dále popsány v následujících kapitolách. [10]

3.3.1 Porovnání metody SPS a oxidační slinováním

Pelety $UO_2 - SiC$ vyrobené metodou SPS poskytují oproti oxidační metodě nejen vyšší rychlost slinování, přibližně 30 minut provozní doby na peletu, ale také umožňuje až o 10% vyšší hustotu vyrobené pelety ve srovnání s peletami připravenými jinou metodou.

Analýza na $UO_2 - SiC$ pelety odhalila, že slinování SPS zmírňuje obavy z reakcí mezi těmito dvěma látkami, které byly hlášeny nad $1370^\circ C$. V důsledku toho byly navzdory malým zrnům pelety $UO_2 - SiC$ vyrobené metodou SPS se zvýšenou tepelnou vodivostí až o 62,1% ve srovnání s peletami UO_2 .

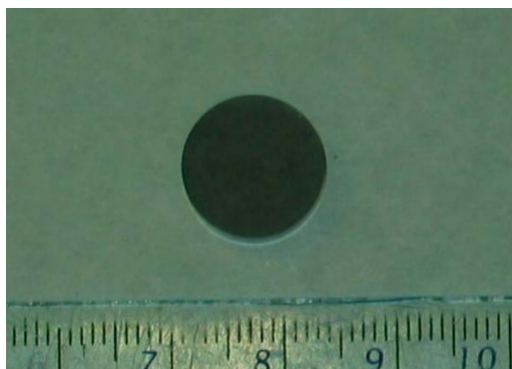
Na druhou stranu oxidační slinuté pelety měly nižší tepelnou vodivost než pelety UO_2 a nedosáhly požadované hustoty nad 95%. Tyto experimentální výsledky naznačují, že technika SPS je více vhodná pro slinování jaderného paliva se zvýšenou tepelnou vodivostí $UO_2 - SiC$. [10]



Obr. 3.3: Rozdíl mezi SPS a Oxidačním slinováním [10]

3.3.2 Experimenty CVD a AHPCS

Předkeramický polymer SiC použitý při výzkumu je AHPCS, také nazývaný „SMP-10“ kapalina s jasně oranžovou barvou. Při výrobě pelety šlo o první experiment. Oxid uranu $UO_{2,27}$ byl smíchán s 10% hmotnostními AHPCS v hexanu. Po skončení experimentu se peleta rozpadla na kusy. Důvodem byla oxidace předkeramického polymeru práškem $UO_{2,27}$. [11]



Obr. 3.4: Peleta SiC vyrobená pomocí AHPCS [11]

Chemická depozice par je chemický proces k výrobě pevné látky vysoké čistoty disociací nebo chemickými reakcemi plynných reaktantů (prekurzorů) v aktivní látce. V tomto výzkumu byly použity prekurzory TMS i MTS k nanášení vrstvy SiC na uhlíkem potažený povrch částice oxidu uranu. Vyrovňovací uhlíková vrstva byla uložena na částice oxidu uranu pomocí rozkladu propanu (C_3H_8). Výsledek XRD experimentu nevedl žádné vrcholy v SiC, pouze vrcholy UO_2 .

Možným důvodem, proč nebyly ve výsledku XRD nalezeny žádné vrcholy SiC, bylo to, že se prekurzor TMS nebo MTS již rozložil, než dosáhl uhlíkem potažených částic UO_2 .

Proces CVD není dále studován kvůli možnému problému slinování a úspěchu při výrobě. [11]



Obr. 3.5: Peleta po experimentu CVD [11]

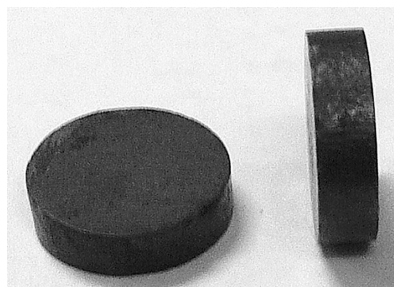
3.4 Diamant

V rámci tepelného zvýšení materiálu jsou zajímavé kompozitní pelety UO_2 s diamantem kvůli extrémně vysoké tepelné vodivosti diamantu. Díky vynikajícím tepelným vlastnostem se diamant a materiály související s diamantem používají v mnoha vysokoteplotních zařízeních, jako jsou světelné zářiče, vysokoteplotní elektronika a mikroelektromechanické systémy.

Pelety v jaderném reaktoru podléhají teplotám až 1600°C , a proto je stabilita diamantu při vysokých teplotách důležitým faktorem. [12]

3.4.1 Experimentální výroba

Během experimentu výroby UO_2 - diamant byla použita stejná metoda slinutí prášku SPS. Tato metoda byla zvolena díky úspěšně vyrobeným kompozitním peletám s vysokou hustotou, jako byl například karbid křemíku (SiC).

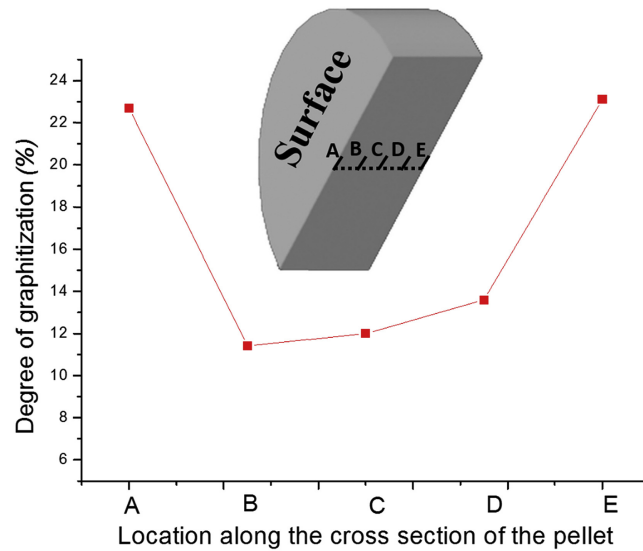


Obr. 3.6: Vyrobená peleta UO_2 - diamant metodou SPS [12]

Z výsledku bylo pozorováno, že na všech měřených místech v peletě bylo více než 10% diamantu transformováno na grafit. Také byl pozorován velký rozdíl ve stupni grafitizace mezi částicemi diamantu na povrchu a částicemi uvnitř pelety. Na horním i spodním povrchu bylo asi 22% diamantu transformováno na grafit, zatímco uvnitř pelety bylo transformováno pouze 12% - 14% diamantu.

Tvorba grafitu má obrovský negativní vliv na tepelné a mechanické vlastnosti pelety. Proto je důležité pečlivě zvážit důsledky těchto výsledků na použití palivových pelet s diamantovým kompozitem UO_2 v jaderných reaktorech. [12]

Očekává se také, že velká odchylka ve stupni grafitizace diamantu v peletě byla výsledkem metody SPS. Podobný výsledek byl pozorován při slinování čistého UO_2 pomocí SPS, kde došlo k přehnanému růstu zrn na horním povrchu pelety, a to kvůli vyšší teplotě než uvnitř pelety. Vnější povrch UO_2 - diamantového kompozitu měl během SPS vyšší teplotu než vnitřek práškového kompaktu vedoucí k vyššímu stupni grafitizace diamantu. [12]



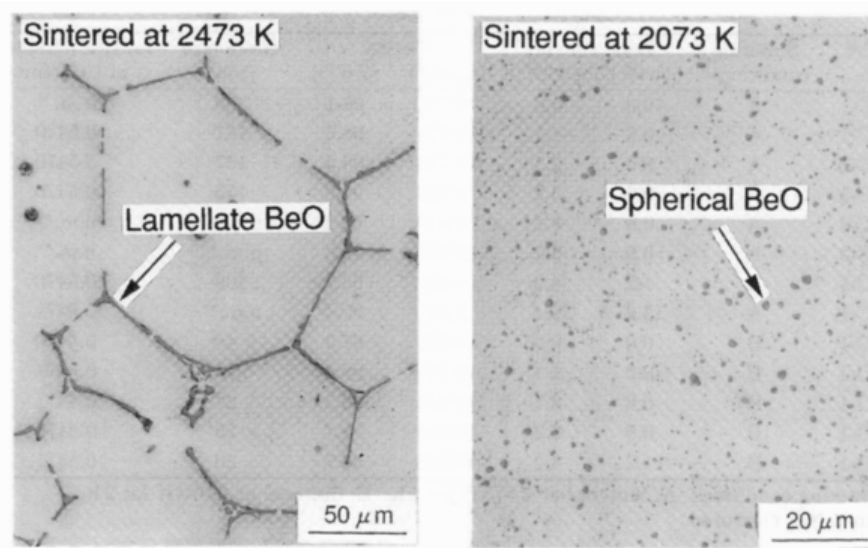
Obr. 3.7: Grafitizace řezem pelety [12]

3.5 Oxid berylnatý

Oxid berylnatý má vysokou teplotu tání, nízkou absorpci neutronů, nízký koeficient tepelné roztažnosti a chemickou kompatibilitu se současnými palivy UO_2 , což z něj činí vhodný materiál pro zvýšení tepelné vodivosti.

V modelových a simulačních pracích se ukázalo, že UO_2 - BeO jaderné palivo se zvýšenou tepelnou vodivostí má schopnost snižovat teploty paliva, zvyšovat celkovou vodivost mezery, snižovat uvolňování štěpného plynu, snižovat tlak mezery/přetlaku. Dále snižovat redistribuci kyslíku a usnadňovat snížení interakce pokrytí pelety snížením tepelného namáhání, které má za následek praskání, přemístování a bobtnání paliva. Uvedenými vlastnostmi by se zvýšila bezpečnost provozu reaktoru. [13]

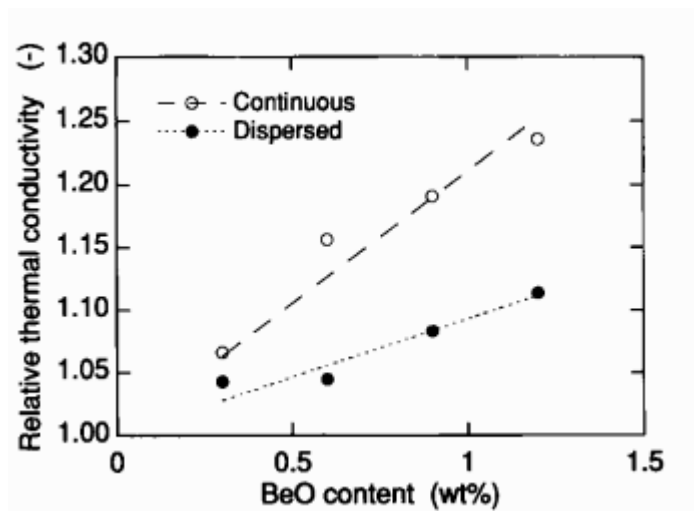
Tato kapitola je věnována dvěma typům experimentálních pelet UO_2 dopovaných oxidem berylnatým. Pelety, ve kterých se vysrážela lamelová vrstva BeO téměř nepřetržitě podél hranice zrna, byla získána slinováním nad eutektickou teplotou (nejnižší bod ve kterém je látka v kapalném stavu) $UO_2 - BeO$ a je označený jako plynule rozložený typ BeO . Jako druhý typ experimentální pelety, ve které byly jemné sférické sraženiny BeO rozptýleny náhodně v matici při slinování pod eutektickou teplotou, byla označena jako rozptýlený typ. [13]



Obr. 3.8: Rozdíl ve složení pelet, vlevo plynule rozložený typ, vpravo rozptýlený typ [13]

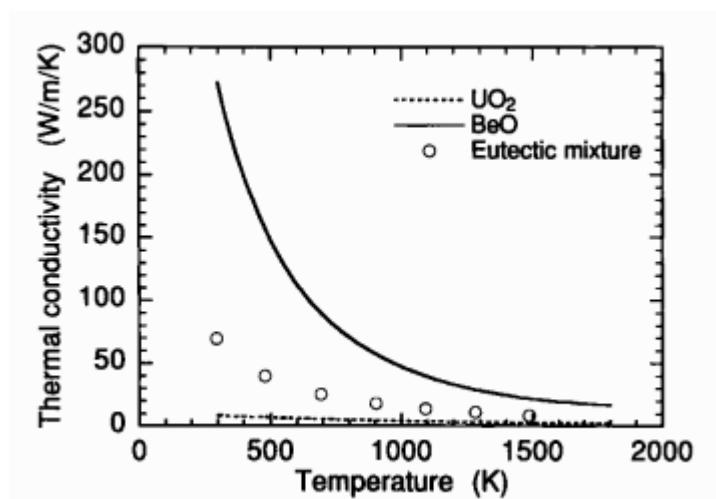
Při průběhu experimentu se tepelná vodivost UO_2 - BeO s obsahem BeO zvýšila. Tepelná vodivost u pelety BeO spojitého typu byla vyšší, než u rozptýleného typu, zejména při nižších teplotách. Pro UO_2 -1,2% hmotnosti BeO při 1100 K byla tepelná

vodivost vyšší než u čistého UO_2 až o 25% pro peletu plynule rozloženého typu, a o 10% pro peletu rozptýleného typu.



Obr. 3.9: Rozdíl tepelné vodivosti na procentuální příměsi BeO při různých typech pelety [13]

Tepelné vodivosti plynule rozloženého typu příměsi BeO se jasně zvýšily při nižších teplotách, zatímco při vyšších teplotách poměr zmenšoval. Tepelná vodivost u pelety rozptýleného typu příměsi BeO se také zvýšila, ale velikost nárůstu byla menší, než u BeO plynule rozloženého typu. [13]

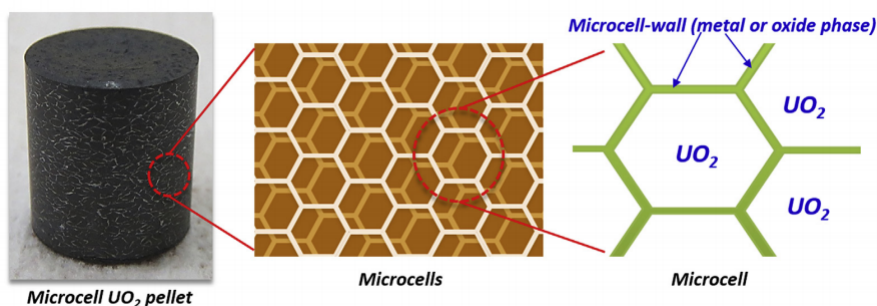


Obr. 3.10: Rozdíl tepelné vodivosti experimentální pelety a čisté pelety UO_2 [13]

3.6 Mikrobuňka

Na vývoji pelety mikrobuňky- UO_2 , jako ATF paliva se začal zabývat institut KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute), který má za cíl posílit toleranci jaderných paliv za havarijních podmínek a zvýšení vyhoření paliva za normálních provozních podmínek reaktoru.

Mikrobuňka se skládá z UO_2 zrn, či granulí obalených tenkými buněčnými stěnami. Viz obr. 3.11.



Obr. 3.11: Ukázka složení pelety micro-cell UO_2 [14]

Hlavním účelem mikrobuněk UO_2 pelet je minimalizování uvolňování vysoce radioaktivních a korozivních štěpných produktů (Cs a I) a snížení teploty pelety pro lepší bezpečnost.

Existují dva druhy pelet s mikrocelly UO_2 ve vývoj v KAERI, klasifikované podle typu materiálu tvořícího buněčné stěny: kovové mikrobuňky UO_2 pelety a keramické mikrobuňky UO_2 pelety. Obě varianty nabízí odlišné vlastnosti. [14]

3.6.1 Kovová mikrobuňka

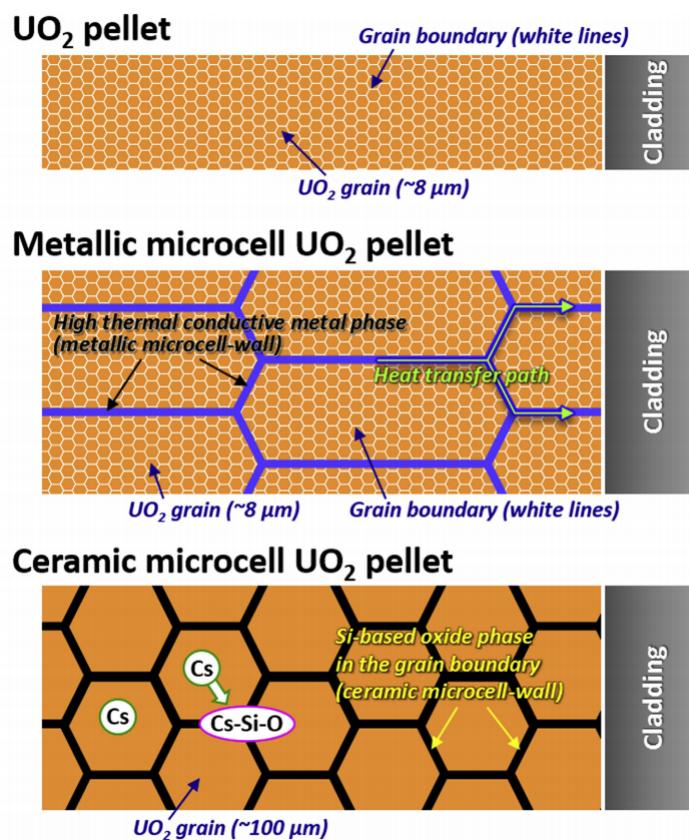
Tato peleta byla primárně vytvořena, jako peleta s vysokou tepelnou vodivostí s kontinuálně spojenou kovovou stěnou viz obr. 3.12. Studená peleta snižuje uvolňování štěpného produktu zpomalením difúze, to znamená, že mobilita štěpných plynů je snížena o nižší teplotní gradient v palivové peletě UO_2 . Snížený teplotní gradient zmírňuje pokrytí pelet a tudíž mechanické interakce během přechodným jevům kvůli snížení tepelné namáhání pelety. Mikrobuňka UO_2 peleta s vysokou tepelnou vodivostí také výrazně zvyšuje bezpečnostní rezervu při nehodách, jako je například nehoda se ztrátou chladicí kapaliny, a také umožňuje provoz při vyšších teplotních zatížení. [14]

3.6.2 Keramická mikrobuňka

Keramická stěna z keramických mikrobuněk UO_2 je složena z oxidové fáze se vztahem k těkavým štěpným produktům (Cs a I), který působí jako několik „pastí“ pro znehybnění těkavých látek štěpných produktů obr. 3.12. Tímto způsobem keramické mikrobuňky stěny blokuji migraci štěpných produktů na venek pelety.

Zvýšená schopnost držení štěpných produktů snižuje korozní praskání na vnitřním povrchu pokrytí, a tím snížení tlaku na tyče. Měkká keramická stěna navíc usnadňuje rychlou plazivou deformaci pelet, čímž snižuje mechanické namáhání opláštění při provozních přechodových jevů.

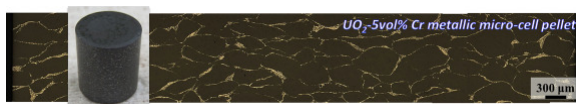
Očekává se, že tyto výhody zvýší odolnost palivové tyče při těžké nehodě i při normálním provozu. [14]



Obr. 3.12: Keramická a metalická micro-cell peleta [14]

3.7 Příměsi Mo a Cr v peletě z mikrobuněk

Bylo hodnoceno mnoho prvků pro kovový materiál stěn z mikrobuněk. Prvky Mo a Cr byly primárně vybrány jako materiály kovové buněčné stěny, protože mají relativně vysokou teplotu tání, vysokou tepelnou vodivost a dostačující účinný průřez pro absorpci neutronů. Kromě toho je požadováno, aby Mo a Cr byly kompatibilní s maticí UO_2 za podmínek slinování procesu výroby pelet. [14]



Obr. 3.13: Micro-cell peleta s příměsí Cr [14]

Na příkladu obr. 3.13 můžeme pozorovat mikrostrukturu 5% kovové fáze Cr obsahující kovové mikrobuněky UO_2 pelety, ve kterých byl koncept mikrobuněk úspěšně implementován.

Materiály stěn keramické mikrobuněky také vykazují chemickou afinitu k Cs. Protože štěpný výtěžek Cs je zhruba desetkrát větší než u jodu, může chemická afinita stěny k cesiu hluboce ovlivnit akumulanci schopnost štěpných produktů. [14]

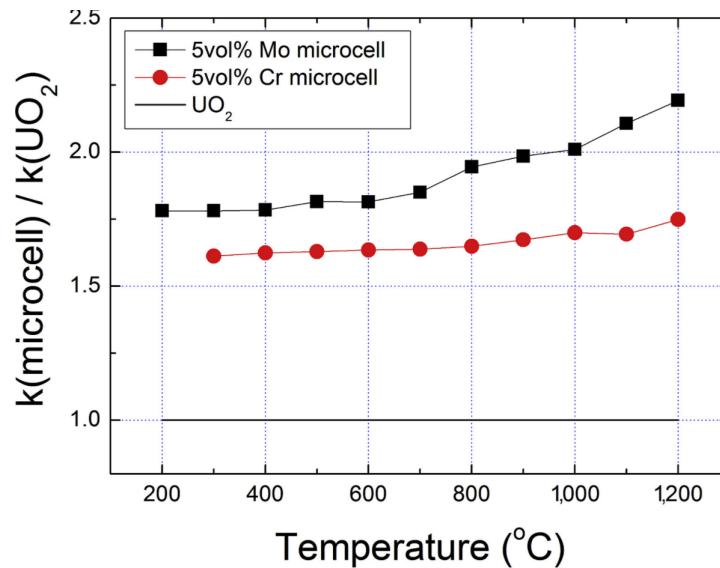
3.7.1 Vlastnosti peletek

Byly provedeny různé testy k vyhodnocení termofyzikálních vlastností a chování paliva za provozních podmínek a za podmínek případné nehody.

Na základě těchto poznatků byla měřena tepelná vodivost a lineární tepelná roztažnost kovových mikrobuněk UO_2 .

Tepelná vodivost pelet byla pozoruhodně zvýšena u 5% obj. Mo kovové pelety UO_2 z mikrobuněk až o 100% při 1 000°C. Lineární koeficient tepelné roztažnosti pelety UO_2 s kovovou mikrobuněkou Mo se snižoval se zvyšujícím se obsahem Mo kvůli nižšímu koeficientu tepelné roztažnosti Mo ($4,8E^{-6}$ K při 25°C) než u UO_2 ($10E^{-6}$ K).

Zachování strukturní stability pelet v prostředí vysokoteplotní páry je důležitou vlastností palivových pelet. Proto bylo zkoumáno chování pelet oxidace páry kovových mikrobuněk UO_2 s molybdenem. Při oxidačním testu v páře 500–800°C byla v peletách Mo kovových mikrobuněk UO_2 zpomalena dokonce i fragmentace a rozmělnění na prášek v důsledku oxidace. Povrch čistých pelet UO_2 byl poškozen v důsledku oxidace podél hranice zrn, zatímco pelety Mo mikrobuněk UO_2 si udržovaly zdravou morfologii povrchu. [14]



Obr. 3.14: Graf součinitele tepelné vodivosti příměsi Mo a Cr proti UO_2 [14]

Jelikož jsou teploty tání jak Cr (1 907°C), tak Mo (2 263°C), nižší, než teploty tání UO_2 (2 865°C) tak bylo dále zkoumáno chování pelety UO_2 s kovovou mikrobuňkou, za podmínek zvýšení teploty, než je teplota tání kovové stěny. Byl proveden test tepelného přechodného žíhání, aby se ověřila strukturální integrita, jak kovových pelet s mikrobuňkami obsahujícími Cr, tak Mo. Výsledky potvrdily, že peleta s mikrobuňkami byla dobře zachována, a to i po žíhání při vyšší teplotě, než je teplota tání stěny.

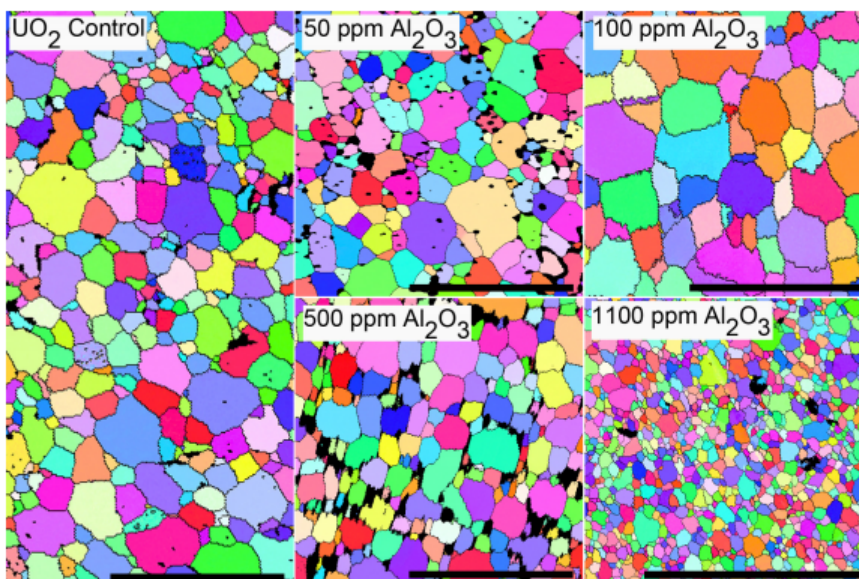
U keramické pelety UO_2 z mikrobuňek ukázaly výsledky testu tepelné difuze a tepelné roztažnosti, že tepelné vlastnosti pelety UO_2 z keramické mikrobuňky byly podobné vlastnostem pelety UO_2 .

Kromě toho byla deformace v tlaku za studena u keramických mikrobuňkových pelet při vysoké teplotě rychlejší než u UO_2 pelet. Rychlá deformace pelety také naznačuje, že keramické pelety z mikrobuňek mohou snížit mechanické namáhání pokrytí během přechodného stavu nebo nehody, jakož i během normálního provozu. [14]

3.8 Oxid hlinitý

Dalším konceptem příměsí je přidání Al_2O_3 do pelety UO_2 . Tento koncept byl vybrán pro studii vlastnosti pelety UO_2 , při zvětšování zrn materiálu pelet, jako známý inhibitor růstu zrn. Tato příměs při vlastním spékání pelety vytváří větší zrna, čímž se zvyšuje tepelná vodivost samotné pelety.

V experimentu se zkoumaly čtyři různé koncentrace Al_2O_3 a její účinek na zvětšení zrn. Po úspěšném vytvoření pelet $UO_2+Al_2O_3$ se potvrdilo zvětšení zrn, než je to v samotné peletě UO_2 , pouze u koncentrace 100 ppm (parts per milion). Tento efekt můžeme pozorovat na mikroskopickém snímku obr. 3.15 [15]



Obr. 3.15: Snímek velikosti zrn při různé koncentraci Al_2O_3 v UO_2 [15]

Na snímku můžeme pozorovat, že při koncentraci nad 100 ppm se dále zrna nezvětšují. Tento jev je popsán jako solid solution limit, který udává koncentraci materiálu, při které se zrna nadále nezvětšují ale zmenšují, což je demonstrováno na přiloženém obrázku.

Pozorování tepelné vodivosti v rozsahu teplot $200^\circ C$ - $1700^\circ C$ je podrobněji popsáno při 75% hustotě UO_2 a to, že tepelná vodivost klesá do $1700^\circ C$ a dále je konstantní. Při 85% teoretické hustotě UO_2 byl experiment dále zkoumán až při teplotě $2100^\circ C$, ve které bylo dále dokázáno snižování vodivosti až do vrcholové teploty. [16]

3.9 Nanotechnologie

V jaderném průmyslu materiály paliv zahrnují širokou škálu uranových a transuranových prvků a jejich sloučenin, proto je důležitým úkolem vytvořit nové palivové, konstrukční materiály, nové metody analýz a testování materiálů. Pro termín „nano“ zaslouží pouze struktury a systémy, které v první řadě mají alespoň jeden rozměr v intervalu 1 nm až 100 nm, vzájemnými kombinacemi mohou vytvářet složitější a větší struktury, jejichž vlastnosti se projevují i v makrosvětě.

Jedním z moderních disciplín je právě nanotechnologie, která se v poslední době začala používat prakticky ve všech pokročilých oblastech technologie a změnila se na interdisciplinární oblast vědy a techniky. [17]

V jaderném průmyslu nanotechnologie najde mnoho uplatnění od samotného paliva, v chladiivu až po samotný konstrukční materiál.

3.9.1 Nanotechnologie v jaderném palivu

Hlavní výhodou těchto druhů materiálů pelet ve srovnání s konvenčními palivy je schopnost zachytit hlavní štěpné plyny a vykazovat tím menší mechanické zatížení díky vyšší plasticitě, stejně jako větší odolnost vůči radiačnímu poškození díky jejich nanostruktuře.

Druhá vlastnost byla v předkládané práci posílena vysokou stabilitou a zanedbatelným bobtnáním plynových bublin, které vykazoval materiál za intenzivního bombardování ionty Xe.

Je ovšem možné zhoršení termofyzikálních vlastností vlivem hraničních účinků zrn. Tepelnému odporu a poklesu bodu tání lze však zabránit udržováním velikosti zrn nad 100 nm v rozmezí od 200 do 300 nm. [18]

4 UWB1

Program UWB je vyvíjen, jako výpočetní program, ke studiu vyhořívajících absorbátorů na Západočeské univerzitě v Plzni.

Výzkum vyhořívání paliva si klade za cíl vývoj a zavedení pokročilých typů vyhořívajících absorbátorů v jaderném palivu. Vyhořívající absorbatory kompenzují počáteční přebytečnou reaktivitu a delší palivové cykly s vyšším obohacením paliva. Vylepšené typy vyhořívajících absorbátorů v jaderném palivu vyžaduje rychlý vyčerpávací kód, který by byl schopný počítat s širším spektrem prvků, nuklidů a jejich kombinací. Aktuálně vyvinutý kód pro výpočet vyhořívání UWB1 zahrnuje transportní a vyhořívací výpočet, který funguje s 2sPC (Two-step predictor-corrector method) metodou, kvůli rychlému výpočtu u vyhořívání jaderného paliva. [40]

Avšak tento kód je možné využívat i pro jiný druh výpočtu, jako například výpočty vyhořívání paliva procesů v čase a následné vyhodnocení obsahu všech nuklidů nacházející se v palivu. Například výpočet multiplikačního koeficientu v čase vyhoření může být využitý pro ověření nových návrhů paliv. [16]

4.1 Datové knihovny

Datové knihovny obsahují hlavní jaderná data, jako účinné průřezy, rozpadové konstanty a vlastnosti nuklidů. K použití programu je nutné mít přehled ohledně zápisu z knihoven a možnosti výběru hledaného prvku. Tato knihovna obsahuje informace z knihovny ENDF/B-VII.1. Kód při výpočtech vyhoření pracuje až s 3820 různými nuklidy, při transportních výpočtech s 423 nuklidy.

Data v této knihovně jsou ve formátu ASCII kódu, obsahují tři různé identifikátory, který určují konkrétní nuklid. První identifikátor určuje pozici mezi 423 nuklidy, druhý identifikátor určuje pozici mezi 3820 nuklidy a poslední identifikátor je ZAID. Číslo ZAID je definováno, jako $10000*Z+10*A+m$. Například pro thorium 232 je jeho ZAID 902320, a nebo pro uran 235 je ZAID 922350. [41]

4.2 Postup výpočtu

Při zadávání složení paliva ve vstupním souboru je nutné definovat atomovou hustotu.

Výpočet atomových hustot jednotlivých izotopů je prováděn následně popsáním postupem. Při určování hmotnostních koncentrací jednotlivých izotopů ^{232}Th a ^{16}O v palivu bylo uvažováno nahrazení určité části ^{232}Th , štěpným ^{233}U .

$$\omega = \frac{Ar_{hl}}{Ar_{celk}} = \frac{Ar_{Th232}}{Ar_{Th232} + 2 \cdot Ar_{O16}} = \frac{232,038}{232,038 + 2 \cdot 15,99} = 0,878872 \quad (4.1)$$

Následně můžeme určit a vypočítat obohacení thoria štěpným uranem 233 s 4,38% procentuálním zastoupením.

$$\omega_{Th232} = \omega \cdot x\% = 0,878872 \cdot 0,9562 = 0,840377 \quad (4.2)$$

Následný výpočet jaderné hustoty, pro kterou je nutné znát hustotu kompozitu pelety ρ a konstatu $N_A = 0,6022142 \cdot 10^{24}$.

$$\begin{aligned} N_{iTh} &= \frac{\rho \cdot \omega_{Th232} \cdot N_A}{Ar_{Th232}} = \frac{\rho_{ThO2} \cdot \omega_{Th232} \cdot N_A}{Ar_{Th232}} \\ &= \frac{10 \cdot 0,840377 \cdot 0,6022142 \cdot 10^{24}}{232,038} = 2,1811 \cdot 10^{22} \text{cm}^{-1} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Pro hodnotu, doplňující se do vstupního souboru je potřeba převést hodnotu $N_i(\text{cm}^{-1})$ na $(\text{barn}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$.

$$N_I = N_i \cdot 1 \cdot 10^{-24} = 2,1811 \cdot 10^{22} \cdot 10^{24} = 2,1811 \cdot 10^{-2} \text{barn}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \quad (4.4)$$

Pro ^{233}U :

$$\omega_{U233} = \omega \cdot x\% = 0,878872 \cdot 0,0438 = 0,038488 \quad (4.5)$$

$$N_{iTh} = \frac{\rho \cdot \omega_{U233} \cdot N_A}{Ar_{U233}} = \frac{10 \cdot 0,038488 \cdot 0,6022142 \cdot 10^{24}}{233,05} = 9,9455 \cdot 10^{20} \text{cm}^{-1} \quad (4.6)$$

$$N_I = N_i \cdot 1 \cdot 10^{-24} = 9,9455 \cdot 10^{20} \cdot 10^{24} = 9,9455 \cdot 10^{-4} \text{barn}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \quad (4.7)$$

Pro ^{16}O :

$$\omega = \frac{Ar_{hl}}{Ar_{celk}} = \frac{2 \cdot Ar_{O16}}{Ar_{Th232} + 2 \cdot Ar_{O16}} = \frac{2 \cdot 15,99}{232,038 + 2 \cdot 15,99} = 0,12113 \quad (4.8)$$

$$N_{iTh} = \frac{\rho \cdot \omega_{O16} \cdot N_A}{Ar_{O16}} = \frac{10 \cdot 0,12113 \cdot 0,6022142 \cdot 10^{24}}{15,99} = 4,5619 \cdot 10^{22} \text{cm}^{-1} \quad (4.9)$$

$$N_I = N_i \cdot 1 \cdot 10^{-24} = 4,5619 \cdot 10^{22} \cdot 10^{24} = 4,5619 \cdot 10^{-2} \text{barn}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \quad (4.10)$$

3				number of nuclides in region 1 (fuel)
12				number of nuclides in region 2 (clad)
4				number of nuclides in region 3 (mod)
15	86	80160	4.56161E-02	nuclear densities in region 1 (fuel)
349	3459	902320	2.18100E-02	
360	3512	922330	9.94549E-04	

Obr. 4.1: Snímek vstupního souboru UWB1

Tab. 4.1: Hodnoty jaderných hustot jednotlivých prvků v palivu

UO_2			
$^{238}U[barn^{-1} \cdot cm^{-1}]$	$^{235}U[barn^{-1} \cdot cm^{-1}]$	$^{16}O[barn^{-1} \cdot cm^{-1}]$	$\rho[g/cm^3]$
$2,339 \cdot 10^{-2}$	$1,085 \cdot 10^{-3}$	$4,895 \cdot 10^{-2}$	10,97
ThO_2			
$^{232}Th[barn^{-1} \cdot cm^{-1}]$	$^{233}U[barn^{-1} \cdot cm^{-1}]$	$^{16}O[barn^{-1} \cdot cm^{-1}]$	$\rho[g/cm^3]$
$2,181 \cdot 10^{-2}$	$9,945 \cdot 10^{-4}$	$4,562 \cdot 10^{-2}$	10
UN			
$^{238}U[barn^{-1} \cdot cm^{-1}]$	$^{235}U[barn^{-1} \cdot cm^{-1}]$	$^{14}N[barn^{-1} \cdot cm^{-1}]$	$\rho[g/cm^3]$
$3,274 \cdot 10^{-2}$	$1,452 \cdot 10^{-3}$	$3,424 \cdot 10^{-2}$	14,33
U_3Si_2			
$^{238}U[barn^{-1} \cdot cm^{-1}]$	$^{235}U[barn^{-1} \cdot cm^{-1}]$	$^{28}Si[barn^{-1} \cdot cm^{-1}]$	$\rho[g/cm^3]$
$2,537 \cdot 10^{-2}$	$1,177 \cdot 10^{-3}$	$1,764 \cdot 10^{-2}$	11,31
UC			
$^{238}U[barn^{-1} \cdot cm^{-1}]$	$^{235}U[barn^{-1} \cdot cm^{-1}]$	$^{12}C[barn^{-1} \cdot cm^{-1}]$	$\rho[g/cm^3]$
$3,139 \cdot 10^{-2}$	$1,456 \cdot 10^{-3}$	$3,283 \cdot 10^{-2}$	13,63

4.3 Vstup UWB1

```

1.    uwbl vver50 depletion test
2.    4                                prl_threads - number of threads
3.    10000                             npg - number of neutrons per generation
4.    5                                 nsng - number of skipped neutron generations
5.    105                               tngng - total number of neutron generations
6.    2                                 n_ccregion - number of concentric cylinder regions
7.    0.38 0.455                       rccregion - concentric cylinder region radii
8.    0.6375                             hpitch - half pitch
9.    2                                 lat - lattice type (1=square, 2=hexagonal)
10.   43                                idepl - number of depletion intervals
11.   4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01
    4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01
    4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01
    4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01
    4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01
    4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01
    4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01
    4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01
    4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01
    4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01
    4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01
    4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01
    4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01 4.00000E+01
    1.00000E+00 2.00000E+00 3.00000E+00 4.00000E+00
12.   5.00000E+00 1.00000E+01 1.50000E+01 2.00000E+01
    2.50000E+01 3.75000E+01 5.00000E+01 6.25000E+01
    7.50000E+01 8.75000E+01 1.00000E+02 1.12500E+02
    1.25000E+02 1.37500E+02 1.50000E+02 1.62500E+02
    1.75000E+02 1.87500E+02 2.00000E+02 2.12500E+02
    2.25000E+02 2.37500E+02 2.50000E+02 3.12500E+02
    3.75000E+02 4.37500E+02 5.00000E+02 5.62500E+02
    6.25000E+02 6.87500E+02 7.50000E+02 8.12500E+02
    8.75000E+02 9.37500E+02 1.00000E+03 1.06250E+03
    1.12500E+03 1.18750E+03 1.25000E+03
13.   1 0 0                             depl_time - irradiation days
    1 2 2                             depl_type - regions depletion
    (0=no depletion, 1=power depletion, 2=flux depletion)
14.   1 2 2                             reg_libtype - regions transport/burnup
    libraries position
15.   900.0 625.0 578.0                 maxwell_kelvin - regions maxwell temperatures
16.   "/home/hrbacek/uwbllibs/"         folder with uwbl libraries
17.   3                                 number of nuclides in region 1 (fuel)
18.   12                                number of nuclides in region 2 (clad)
19.   4                                 number of nuclides in region 3 (mod)
20.   15      86      80160  4.56161E-02  nuclear densities in region 1 (fuel)
    349 3459 902320 2.18100E-02
    360 3512 922330 9.94549E-04
21.   117 1039 400900 2.19170E-02  nuclear densities in region 2 (clad)
    118 1041 400910 4.77956E-03
    119 1042 400920 7.30565E-03
    121 1044 400940 7.40363E-03
    123 1046 400960 1.19276E-03
    124 1081 410930 4.22623E-04
    304 2594 721740 1.05594E-08
    305 2596 721760 3.47139E-07
    306 2597 721770 1.22753E-06
    307 2600 721780 1.80037E-06
    308 2603 721790 8.98867E-07
    309 2606 721800 2.31514E-06
22.   1      1      10010  5.01551E-02  nuclear densities in region 3 (mod)
    10     41     50100  4.98826E-06
    11     42     50110  2.00784E-05
    15     86     80160  2.50775E-02
eof

```

Obr. 4.2: Vstupní soubor UWB1

- 1) Název;
- 2) počet jader, na kterých chceme výpočet spustit;
- 3) počet neutronů v jedné neutronové generaci;
- 4) počet prvních generací, které se neuvažují do výpočtu;
- 5) počet neutronových generací;
- 6) počet vrstev kolem paliva ve výpočtu (1 znamená pouze palivo a chladivo);
- 7) poloměr palivových částí (od nejmenšího průměru do nejvyššího v cm);
- 8) krok mříže - polovina vzdálenosti mezi středy sousedních proutků;
- 9) typ mříže - trojúhelníková (VVER), čtvercová (PWR, BWR);
- 10) počet časových kroků vyhořívání;
- 11) výkon, na kterém palivo vyhořívá v i-tém časovém kroku;
- 12) délka i-tého časového kroku;
- 13) vyhořívání regionů
(0=nevyhořívá, 1= vyhořívá pomocí výkonu, 2= vyhořívá pomocí změny toku);
- 14) transportní knihovna nebo knihovna vyhořívání;
- 15) teploty regionů v Kelvinech;
- 16) cesta ke knihovnám;
- 17) počet nuklidů v i-tém regionu;
- 18) počet nuklidů v obalu paliva;
- 19) počet nuklidů v moderátoru;
- 20) jaderná hustota paliva (tolik řádků kolik je nuklidů v palivovém regionu);
- 21) jaderná hustota obalu paliva (tolik řádků kolik je nuklidů v obalu paliva);
- 22) jaderná hustota moderátoru (tolik řádků kolik je nuklidů v moderátoru). [42]

5 Výsledky simulace

Výpočetní část práce byla zaměřena na porovnání alternativních paliv s používaným UO_2 palivem. Vybrané paliva jsou UN , UC , U_3Si_2 , ThO_2 . Pro výpočet a porovnání paliv byl zvolen výpočetní program UWB1, který je podrobněji popsán v předchozích kapitolách.

Simulace paliv proběhla se stejnými poměry obohacením štěpného materiálu, což byl ^{235}U a ^{233}U s poměrem 4,38% na palivo.

Druhá část simulace byla věnována přímo palivu thoria s různými koncentracemi SiC a následně s příměsí molybdenu.

Výsledky simulací jsou převážně zaměřeny na multiplikační koeficient a do vyhoření 50000 MWd/MTU, jako výchozí hodnota programu. Práce s programem UWB1 a jeho výsledky mohou být ovlivněny více zjednodušeními a omezeními, například při výpočtech zanedbání izotopů kyslíků ^{17}O , ^{18}O a ^{234}U , dále se při vyhořívání nemění výkon, který by v reálných podmínkách postupem vyhořívání nezůstal konstantní.

5.1 Porovnání paliv

V první části je řešeno srovnání momentálně používaných paliv a paliv experimentálních. Jedná se o čisté složeniny izotopů prvků viz tabulka 5.1.

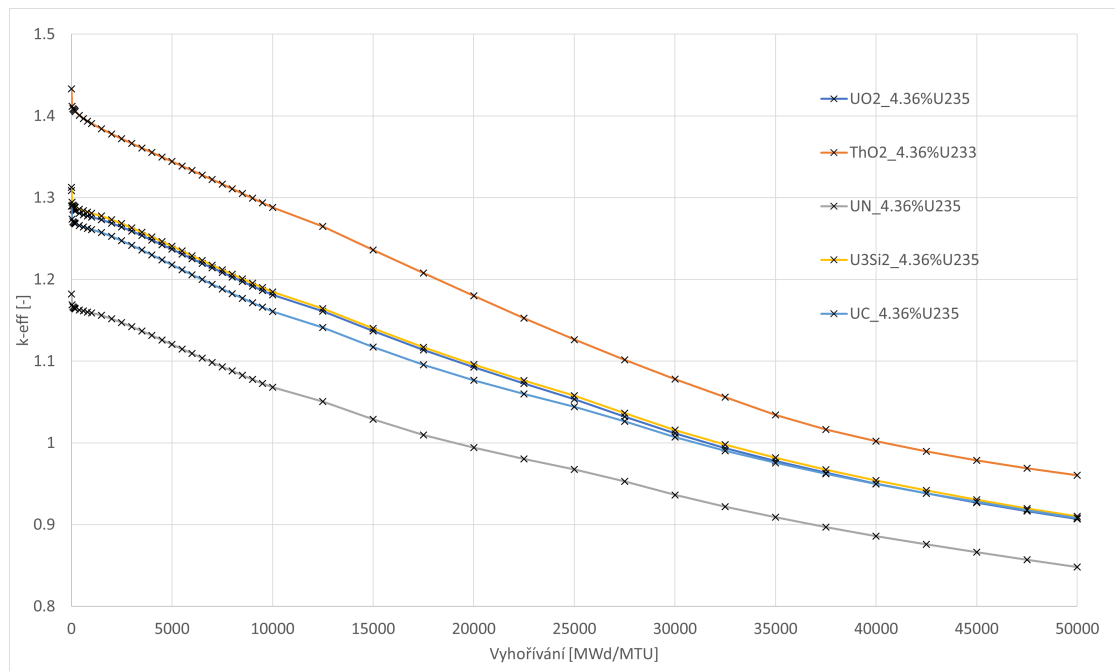
Tab. 5.1: Procentuální zastoupení izotopů v palivu

UO_2		
^{238}U [%]	^{235}U [%]	^{16}O [%]
95,62	4,38	100
ThO_2		
^{232}Th [%]	^{233}U [%]	^{16}O [%]
95,62	4,38	100
UN		
^{238}U [%]	^{235}U [%]	^{14}N [%]
95,62	4,38	100
U_3Si_2		
^{238}U [%]	^{235}U [%]	^{28}Si [%]
95,62	4,38	100
UC		
^{238}U [%]	^{235}U [%]	^{12}C [%]
95,62	4,38	100

Na prvním grafu simulace, obrázek 5.1, je zřejmý u každého paliva podle očekávání rychlejší pokles multiplikačního koeficientu, než na jeho konci. Nejvyšší koeficient má palivo thoria, který používá štěpný ^{233}U , naopak nejnižší koeficient na začátku kampaně zase palivo nitridu uranu. Paliva jako silicid uranu a karbid uranu vykazují obdobný průběh vyhořívání, jako palivo oxidu uraničitého.

V grafu můžeme také pozorovat pokles multiplikačního koeficientu pod 1, což znázorňuje hranici kritičnosti u paliva UN , již při vyhoření 20000 MWd/MTU a až 42500 MWd/MTU u paliva ThO_2 . Ostatní paliva mají přibližně pokles k-eff u hodnoty 32500 MWd/MTU.

Příčiny různých odchylek výsledků vyhořívání mohou být zapříčiněny, například různým průřezem neutronů, různé hustotě paliva u simulovaných variant paliv a nebo použitím jiného štěpného uranu, jako u paliva thoria. Zvýšení koeficientu paliv se v praxi může provést například zvýšením koncentrací štěpného materiálu, avšak z ekonomického hlediska se toto řešení nedoporučuje.



Obr. 5.1: Graf porovnání paliv

5.2 Simulace paliv s příměsí Mo

Druhá analýza paliv se bude týkat změny koeficientu paliva s přidáním různých příměsí. Výhodám a nevýhodám použití různých příměsí se již věnovaly dřívější kapitoly této práce.

Jako simulovanou příměs byl zvolen prvek molybdenu, který se při výrobním procesu implementuje do paliva. Jeho simulované jaderné palivo, které se zkombinuje s molybdenem bude palivo UO_2 , a palivo ThO_2 , oba druhy paliva podstoupí stejné koncentrace izotopů prvků a jako referenční hodnota bude znázorňovat křivka paliv bez příměsí, kvůli vhodnějšímu porovnání vlivům příměsí na palivo.

Pro paliva byly zvoleny koncentrace 5% Mo a 10% Mo. Na zobrazeném grafu v obrázku 5.2 je možné vidět pokles koeficientu se zvyšujícími koncentracemi prvku molybdenu, jak u oxidu uraničitého, tak i oxidu thoričitého.

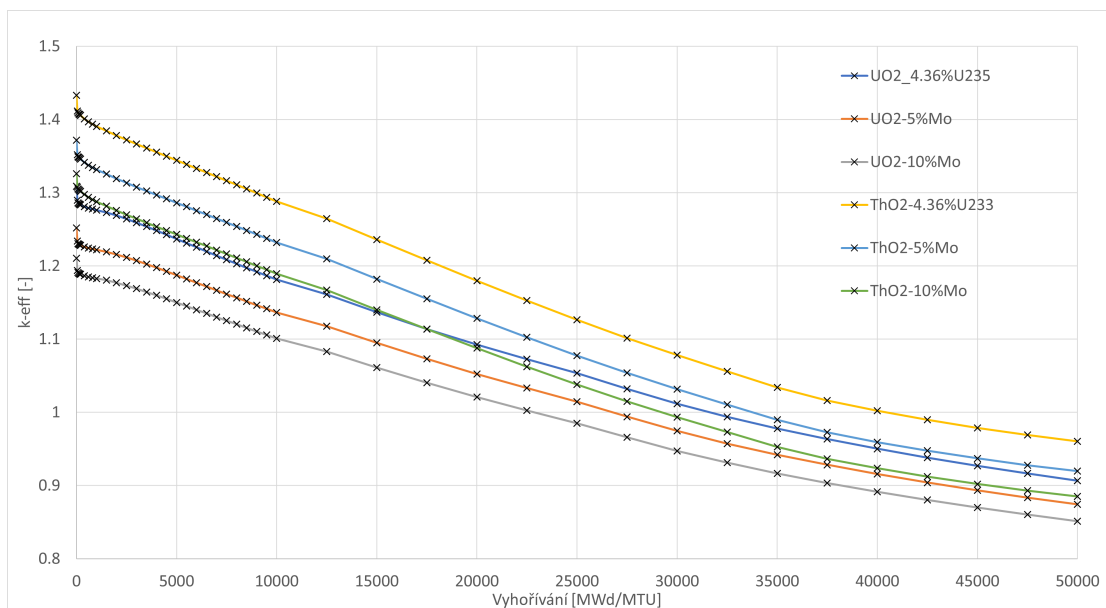
Tab. 5.2: Jaderné hustoty příměsí molybdenu

$Mo[barn^{-1} \cdot cm^{-1}]$			
100 [%]	5 [%]	10 [%]	$\rho[g/cm^3]$
$2,925 \cdot 10^{-2}$	$1,463 \cdot 10^{-3}$	$2,925 \cdot 10^{-3}$	4,66

U paliva thoria se u 5% koncentrace molybdenu dostane pod hranici kritičnosti kolem 33500 MWd/MTU a u 10% koncentrace molybdenu již při 32000 MWd/MTU, což by znamenalo 21% a 29,5% pokles oproti čistému palivu. Dále si můžeme všimnout u ThO_2 strmějšího průběhu vyhořívání oproti UO_2 , který můžeme pozorovat u 10% přísady Mo s thoriem a referenční hodnoty UO_2 .

Palivo oxidu uraničitého je možné pozorovat hranici kritičnosti u 5% koncentrace u 27500MWd/MTU a u 10% koncentrace u 25000MWd/MTU, což by znamenalo 15,4% a 23,1% pokles proti jeho referenční hodnotě.

Snižující se hodnoty mohou být zapříčiněny poklesem štěpného uranu a nebo horším průřezem neutronů u prvku molybdenu, který může zhoršit efektivitu paliva, co se týče multiplikačního koeficientu.



Obr. 5.2: Graf porovnání paliv s příměsí molybdenu

5.3 Simulace paliva s příměsí SiC

Třetí simulace byla přímo zaměřena na palivo oxidu thoričtého a vliv příměsí karbidu křemíku na multiplikační koeficient. Byly odměřeny celkem tři simulace karbidu křemíku a jeho vliv na simulované palivo, jedná se o koncentrace 5, 10 a 20% koncentrace v palivu.

Tab. 5.3: Jaderné hustoty příměsí karbidu křemíku

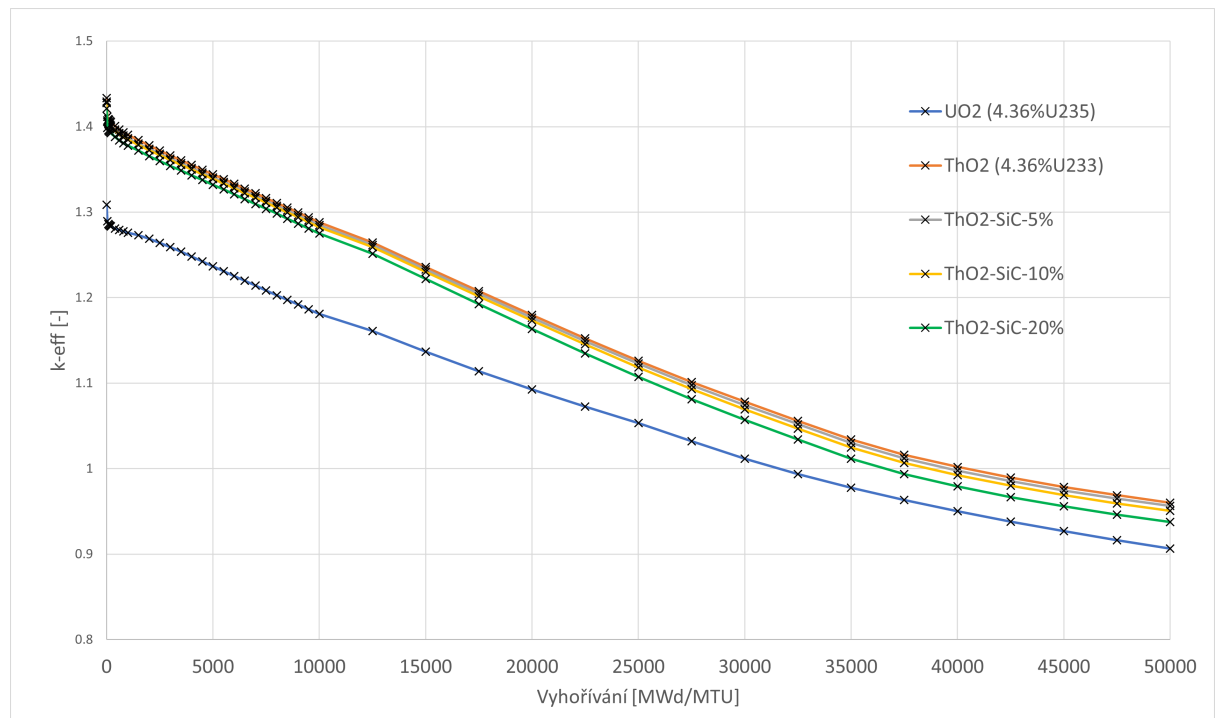
$Si[barn^{-1} \cdot cm^{-1}]$				
100 [%]	5 [%]	10 [%]	20 [%]	$\rho[g/cm^3]$
$4,821 \cdot 10^{-2}$	$2,4105 \cdot 10^{-3}$	$4,821 \cdot 10^{-3}$	$9,6423 \cdot 10^{-3}$	3,21
$C[barn^{-1} \cdot cm^{-1}]$				
100 [%]	5 [%]	10 [%]	20 [%]	$\rho[g/cm^3]$
$4,821 \cdot 10^{-2}$	$2,4105 \cdot 10^{-3}$	$4,821 \cdot 10^{-3}$	$9,6423 \cdot 10^{-3}$	3,21

Na obrázku číslo 5.3 je zobrazen graf, na kterém je znázorněn průběh vyhořívání paliva s příměsí SiC. Na grafu můžeme pozorovat, že přísady karbidu křemíku na vyhořívání paliva nemají příliš veliký negativní efekt, jako bylo pozorováno na grafu u obrázku 5.2.

U paliva s příměsí SiC je pozorován pokles kritičnosti u koncentrace 5, 10% až na hodnotě 40000 MWd/MTU, což je pouze 5,8% pokles oproti referenční hodnotě

ThO_2 a 20% koncentrace má pokles 11,7%.

V grafu je dále zobrazený průběh čistého UO_2 , který má stav kritičnosti stále o 10000 MWd/MTU horší, než palivo thoria s 20% přísadou Mo.



Obr. 5.3: Graf porovnání paliv s příměsí karbidu křemíku

5.4 Návrh testovací pelety

Pro návrh experimentálního řešení inovovaného jaderného paliva by byly použity vzorky ve spolupráci s brněnským institutem CEITEC, se kterým se již dříve spolupracovalo [42, 16].

Pro vzorek by byl použitý materiál ThO_2 s 5% příměsí SiC, popřípadně pak peleta UO_2 s 5% Mo, kvůli nahrazení uranu prvkem cer, pro jeho podobné vlastnosti. Tímto by se proces výroby zjednodušil, jelikož experiment nebude muset mít povolení pro práci s uranem.

Pro proces výroby by se použila metoda SPS, případně pak oxidační metoda spékání. Dále pro stanovení tepelné vodivosti je možné měřit pomocí tepelné difuzivity pelet, která měří pomocí metody laserových záblesků ve vakuu. Následně by bylo vhodné experimentálně ověřit radiační odolnost pelet. [16]

Závěr

Předmětem této bakalářské práce bylo seznámení a následný rozbor problematiky jaderného paliva. Práce se zaměřuje hlavně na keramické pelety oxidu uraničitého a jejich proces při štěpení v reaktoru. Nejvíce se zaměřuje na tepelnou vodivost a hustotu jaderného paliva.

V úvodní části práce je stručně vysvětlený popis funkce reaktoru, z čeho se skládá, popis funkčnosti jeho hlavních částí a jejich vliv na palivo s následným vysvětlením motivace úprav a modifikací pelet, například typu ATF.

Dalším cílem práce byl výběr a popis nejinovativnějších modifikací pelet, či úplnou změnou matrice jaderného paliva. Byly posuzovány metody výroby a jejich složení. V následující části práce jsou stručně vypsány typy příměsí k modifikacím jaderných pelet.

V kapitolách se nachází důvod zkoumání konkrétních typů jaderných paliv, jejich výzkum, či experimenty výroby pelet a poté vyhodnocení jejich použití v konkrétním odvětví jaderného průmyslu. Práce je doplněna obrázky a grafy demonstrující princip a chování materiálu.

Smyslem této bakalářské práce je získání přehledu o aktuálním stavu v oblasti jaderných paliv, seznámení možností a jejich následných testování.

Tato práce navazuje na semestrální práci a rozšiřuje její záběr v rámci simulace reaktivity a proces vyhořívání zkoumaných jaderných pelet ve výpočetním programu UWB1.

Dále mělo být navrženo jaderné palivo pro výrobu testovací pelety s využitím prvku cer a zdůvodnit parametry výběrů paliva. To je řešeno v páté kapitole.

Závěrem lze říci, že pro výběr perspektivního jaderného paliva považují palivo s obsahem oxidu thorčitého, který měl nejvyšší multiplikační koeficient paliva, tedy je neefektivnější z hlediska obsahu štěpného materiálu.

Do budoucna by bylo vhodné navázat na tuto řešeri bakalářské práce experimentem, který se nyní nemohl zrealizovat.

Literatura

- [1] *Analysis of Options and Experimental Examination of Fuels for Water Cooled Reactors with Increased Accident Tolerance (ACTOF)*. 1921. Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2020. ISBN 978-92-0-114120-0.
- [2] Jaderný reaktor. *CEZ* [online]. [cit. 2020-12-30]. Dostupné z URL: <<https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k35.htm>>.
- [3] BEČVÁŘ, J. *Jaderné elektrárny*. 2. vyd. Praha: SNTL/ALFA, 1981, 634 s
- [4] Nuclear fission. *Wikipedia* [online]. 2008, [cit. 2020-12-30]. Dostupné z URL: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/15/Nuclear_fission.svg>.
- [5] OTČENÁŠEK, P. a Jaderná a fyzikálně inženýrská fakulta. *Základy konstrukce a funkce jaderných elektráren*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02707-4.
- [6] JELÍNEK, M. *Studium nanomateriálů pro jejich použití v jaderné energetice a výzkumu*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015, 58 listů, [3] listy příloh : foto, grafy, tabulky + 1 CD.
- [7] Jaderný reaktor, jaderná elektrárna. In: *FYZIKA 007* [online]. [cit. 2020-12-30]. Dostupné z URL: <<http://www.fyzika007.cz/fyzika-mikrosveta/jaderny-reaktor-jaderna-elektrarna>>.
- [8] Palivová tyč. *Energyweb* [online]. 2002, [cit. 2020-12-30]. Dostupné z URL: <https://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=2&slovník_page=paliv_tyc.html>.
- [9] FOREJTOVÁ, A. Typy jaderného paliva. *Atominfo* [online]. 2016, [cit. 2020-12-30]. Dostupné z URL: <<https://atominfo.cz/2016/06/typy-jaderneho-paliva/>>.
- [10] SUNGHWAN, Y. *Uranium dioxide-silicon carbide composite reactor fuels with enhanced thermal and mechanical properties prepared by spark plasma sintering*. 2013. PhD Thesis. University of Florida.
- [11] WANG, J. *Developing a high thermal conductivity nuclear fuel with silicon carbide additives*. University of Florida, 2008.

- [12] ZHICHAO, Ch, SUBASHI, G., TULENKO, J. S. Raman spectroscopic investigation of graphitization of diamond during spark plasma sintering of UO₂-diamond composite nuclear fuel. *Journal of Nuclear Materials*. 2016, **475**, 1 - 5. ISSN 0022-3115.
- [13] SHINJI, I., HIRAI, M., ITO, K., et al. Thermal Conductivity of UO₂-BeO Pellet. *Journal of Nuclear Science and Technology* [online]. Atomic Energy Society of Japan, 1996, **33**(2), 134-140 [cit. 2020-12-30]. ISSN 0022-3131.
- [14] DONG-JOO, K., KEON SIK, K., DONG SEOK, K., et al.. Development status of microcell UO₂ pellet for accident-tolerant fuel. *Nuclear Engineering and Technology*. 2013, **50**(2), 253-258. ISSN 1738-5733.
- [15] LECKIE, R. M., LUTHER, E. P. *Evolutionary Enhancements to UO₂*. Wikipedia [online]. Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States), 2013.
- [16] MIČIAN, P. *Analýza nových materiálů pro pokročilá jaderná paliva*. Pojednání k disertační práci. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2020, 46 stran.
- [17] IMANOVA, G. T. Nanostructured materials based on nano- ZrO₂ in the nuclear – power engineering. *Journal of Radiation Research*. 2014.
- [18] SPINO, J., SANTA CRUZ, H., JOVANI-ABRIL, R., et al. Bulk-nanocrystalline oxide nuclear fuels – An innovative material option for increasing fission gas retention, plasticity and radiation-tolerance. *Journal of nuclear materials*. 2012, **422**(1-3), 27-44. ISSN 0022-3115.
- [19] Reaktory 4. generace - rychlé reaktory FNR a další. *oEnergetice.cz - denní zpravodajství z energetiky* [online]. [cit. 2021-29-05]. Dostupné z URL: <<https://oenergetice.cz/elektrina/reaktory-4-generace-rychle-fnr-a-dalsi>>.
- [20] Thorium - World Nuclear Association. In: *World Nuclear Association* [online]. 2016 [cit. 30.05.2021]. Dostupné z URL: <<https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium.aspx>>.
- [21] SAOUDI, M., STAICU, D., MOURIS, J., et al. Thermal diffusivity and conductivity of thorium- uranium mixed oxides. *Journal of Nuclear Materials*. 2018, **500**, 381-388, ISSN 0022-3115.
- [22] YANG, J. H., KANG, K.W., SONG, K.W., et al. Fabrication and Thermal Conductivity of (Th,U)O₂ Pellets. *Nuclear Technology*. 2004, **147**, 113-119.

- [23] GHOSH, P. S., SOMAYAJULU, P.S., ARYA, A., et al. Thermal expansion and thermal conductivity of (Th,Ce)O₂ mixed oxides: A molecular dynamics and experimental study. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015, **638**, 172-181. ISSN 0925-8388.
- [24] GHOSH, P. S., SOMAYAJULU, P.S., KRISHNAN, K., et al. Thermal expansion and thermal conductivity of (Th,U)O₂ mixed oxides: A molecular dynamics and experimental study. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015, **650**, 165-177. ISSN 0925-8388.
- [25] COZZO, C., STAICU, D., SOMERS, J., et al. Thermal diffusivity and conductivity of thorium–plutonium mixed oxides. *Journal of Nuclear Materials*. 2011, **416**, 135-141. ISSN 0022-3115.
- [26] KUTTY, T. R. G, KULKARNI, R. V., SENGUPTA, P., et al. Development of CAP process for fabrication of ThO₂–UO₂ fuels Part II: Characterization and property evaluation. *Journal of Nuclear Materials*. 2008, **373**, 309-318. ISSN 0022-3115.
- [27] MALAKKAL, L., PRASAD, A., JOSSOU, E., et al. Thermal conductivity of bulk and porous ThO₂: Atomistic and experimental study. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019, **798**, 507-516. ISSN 0925-8388.
- [28] WATKINS, J. K., BUTT, D. P., JAQUES, B. J. Microstructural degradation of UN and UN-UO₂ composites in hydrothermal oxidation conditions. *Journal of Nuclear Materials*. 2019, **518**, 30-40. ISSN 0022-3115.
- [29] YANG, J. H., KIM, D. J., KIM, K. S., et al. UO₂–UN composites with enhanced uranium density and thermal conductivity. *Journal of Nuclear Materials*. 2015, **465**, 509-515. ISSN 0022-3115.
- [30] GYEONGHUN, K. and SANGJOON. Thermal conductivity of gadolinium added uranium mononitride fuel pellets sintered by spark plasma sintering. *Journal of Nuclear Materials*. 2021, **546**. ISSN 0022-3115.
- [31] JONES, R. W. URANIUM CARBIDE AS A NUCLEAR FUEL. *International Atomic Energy Agency*. 1971.
- [32] CHAUDRI, K.S., TIAN, W., SU, Y., et al. Coupled analysis for new fuel design using UN and UC for SCWR. *Progress in Nuclear Energy*. 2013, **63**, 57-65. ISSN 0149-1970.

- [33] PANDYA, J., PATEL, P. D., SHINDE, S., et al. Dependence of strain on the thermoelectric properties of Uranium Carbide. *Materials Today: Proceedings*. 2020. ISSN 2214-7853.
- [34] FINKELDEI, S. C., KIGGANS, J.O., HUNT, R.D., et al. Fabrication of UO₂-Mo composite fuel with enhanced thermal conductivity from sol-gel feedstock. *Journal of Nuclear Materials*. 2019, **520**, 56-64. ISSN 0022-3115.
- [35] BUCKLEY, J., TURNER, J. D., ABRAM, T. J. Uranium dioxide - Molybdenum composite fuel pellets with enhanced thermal conductivity manufactured via spark plasma sintering. *Journal of Nuclear Materials*. 2019, **523**, 360-368. ISSN 0022-3115.
- [36] HEUNG SOO, L., DONG-JOO, K., DONG-SEOK, K., et al. Evaluation of thermomechanical behaviors of UO₂-5 vol% Mo nuclear fuel pellets with sandwiched configuration. *Journal of Nuclear Materials*. 2020, **539**. ISSN 0022-3115.
- [37] HARRIS, P. J. F. *Carbon Nanotube Science: Synthesis, Properties and Applications*. Cambridge university press, 2009. ISBN 978-0-521-82895-6.
- [38] KOUTNÁ, M. *Uhlíkové nanotrubičky (CNT) a jejich aplikační možnosti*. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, fakulta teologická, 2014.
- [39] CARTAS, A. R. *An evaluation of UO₂-CNT composites made by SPS as an accident tolerant nuclear fuel pellet and the feasibility of SPS as an economical fabrication process for the nuclear fuel cycle*. A dissertation. University of Florida, 2014.
- [40] LOVECKÝ, M., JIŘIČKOVÁ, J., ŠKODA, R. ASSESSMENT OF BURNABLE ABSORBER FUEL DESIGN BY UWB1 DEPLETION CODE. *Acta Polytechnica CTU proceedings*. 2016, **4**. ISSN 2336-5382.
- [41] LOVECKÝ, M. UWB1 - users manual. *Acta Polytechnica CTU proceedings*. 2017.
- [42] HÁJKOVÁ, B. *Použití jaderné palivo - inventář, ionizující záření a zbytkový výkon*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2020.

Seznam symbolů, veličin a zkratk

JE	Jaderná elektrárna
PWR	Tlakovodní reaktor – Pressurized Water Reactor
BWR	Varný reaktor – Boiling water reactor
LWR	Lehkododní reaktor – Light Water Reactor
VVER	Tlakovodní reaktor – Vodo Vodjanoj Energetičeskij Reaktor
FFTF	Fast Flux Test Facility
SPS	Nízkoteplotní oxidační slinování – Spark Plasma Sintering
CVD	Chemická depozice par – Chemical Vapor Deposition
AHCPS	Prekeramický polymer – autologous hematopoietic progenitor cell support
TMS	Tetramethylsilan
XRD	Rentgenová krystalografie – X- ray Powder Diffraction
KAERI	Korejský institut pro výzkum atomové energie – Korea Atomic Energy Research Institute
ROSATOM	Statní korporace pro atomovou energii Rosatom
CEITEC	Evropské výzkumné vědecké centrum – Central European Institute of Technology
ATF	Palivo se zvýšenou odolností vůči haváriím – Accident tolerant fuel
FNR	Rychlý reaktor – Fast-neutron reactor
CNT	Uhlíková nanotrubiice – Carbon nanotubes

A Příloha

Tab. A.1: Hodnoty výstupu druhů paliv

-	UO_2	ThO_2	UN	U_3Si_2	UC
burnup [MWd/MTU]	k-eff [-]	k-eff [-]	k-eff [-]	k-eff [-]	k-eff [-]
0	1.30861	1.43315	1.18205	1.31265	1.28978
40	1.28954	1.41157	1.1689	1.29432	1.27381
80	1.28594	1.40888	1.16623	1.2908	1.27048
120	1.28483	1.40767	1.16529	1.2897	1.26941
160	1.28394	1.4065	1.1646	1.28882	1.26858
200	1.28317	1.40532	1.16403	1.28805	1.26787
400	1.28094	1.40076	1.16258	1.28581	1.26585
600	1.27904	1.39662	1.16129	1.28387	1.264
800	1.27749	1.3934	1.16008	1.28225	1.26235
1000	1.27604	1.39047	1.15877	1.28071	1.26067
1500	1.27301	1.38426	1.15599	1.27751	1.25724
2000	1.26877	1.37793	1.15188	1.2731	1.2525
2500	1.26403	1.37204	1.14717	1.26822	1.24723
3000	1.25894	1.36632	1.1421	1.263	1.24162
3500	1.2536	1.36072	1.13679	1.25754	1.2358
4000	1.24809	1.35518	1.13133	1.25193	1.22984
4500	1.24247	1.34966	1.12579	1.24621	1.2238
5000	1.23678	1.34416	1.12023	1.24044	1.21775
5500	1.23106	1.33865	1.11469	1.23466	1.21172
6000	1.22534	1.33312	1.10918	1.22888	1.20573
6500	1.21964	1.32757	1.10374	1.22313	1.1998
7000	1.21397	1.322	1.09837	1.21743	1.19394
7500	1.20835	1.3164	1.09308	1.21177	1.18817
8000	1.20279	1.31077	1.08787	1.20618	1.18249
8500	1.19728	1.30512	1.08276	1.20065	1.17689
9000	1.19184	1.29944	1.07772	1.19519	1.17139
9500	1.18646	1.29374	1.07278	1.1898	1.16598
10000	1.18115	1.28801	1.06792	1.18447	1.16067
12500	1.16107	1.26461	1.05043	1.1642	1.14102
15000	1.13672	1.23591	1.02886	1.13987	1.1173
17500	1.1137	1.2077	1.00964	1.1169	1.09535
20000	1.09243	1.17977	0.9941	1.09586	1.07663
22500	1.07265	1.15249	0.98017	1.07634	1.05977
25000	1.05341	1.12626	0.96739	1.05751	1.04418
27500	1.03196	1.10137	0.95271	1.03618	1.02633
30000	1.01155	1.07812	0.93625	1.01568	1.00702
32500	0.99362	1.05591	0.92181	0.99768	0.99025
35000	0.97773	1.03396	0.90888	0.98171	0.97546
37500	0.96334	1.01613	0.89677	0.96723	0.96196
40000	0.95012	1.00203	0.88569	0.9539	0.94953
42500	0.93805	0.98957	0.87575	0.94172	0.93828
45000	0.92683	0.9786	0.86626	0.9304	0.9277
47500	0.91639	0.96889	0.85702	0.91982	0.91757
50000	0.90672	0.9602	0.84804	0.90996	0.90788

Tab. A.2: Hodnoty výstupu s prvkem molybden

-	UO_2	$UO_2 5\% Mo$	$UO_2 10\% Mo$	ThO_2	$ThO_2 5\% Mo$	$ThO_2 10\% Mo$
burnup [MWd/MTU]	k-eff [-]	k-eff [-]	k-eff [-]	k-eff [-]	k-eff [-]	k-eff [-]
0	1.30861	1.25166	1.21029	1.43315	1.37146	1.32601
40	1.28954	1.23369	1.19379	1.41157	1.35166	1.30749
80	1.28594	1.23037	1.19066	1.40888	1.3491	1.30502
120	1.28483	1.22935	1.1897	1.40767	1.34795	1.3039
160	1.28394	1.22853	1.18894	1.4065	1.34683	1.30282
200	1.28317	1.22782	1.18828	1.40532	1.34571	1.30174
400	1.28094	1.22583	1.18647	1.40076	1.34134	1.29751
600	1.27904	1.2242	1.185	1.39662	1.33734	1.29361
800	1.27749	1.22292	1.18381	1.3934	1.33419	1.29051
1000	1.27604	1.22172	1.18269	1.39047	1.33132	1.28767
1500	1.27301	1.2192	1.18035	1.38426	1.32525	1.28168
2000	1.26877	1.21559	1.17695	1.37793	1.31906	1.27556
2500	1.26403	1.21151	1.17307	1.37204	1.31329	1.26985
3000	1.25894	1.20707	1.16883	1.36632	1.30771	1.26431
3500	1.2536	1.20237	1.16434	1.36072	1.30224	1.25889
4000	1.24809	1.19748	1.15965	1.35518	1.29684	1.25353
4500	1.24247	1.19247	1.15484	1.34966	1.29148	1.24821
5000	1.23678	1.18736	1.14994	1.34416	1.28613	1.2429
5500	1.23106	1.1822	1.14498	1.33865	1.28078	1.2376
6000	1.22534	1.17702	1.14001	1.33312	1.27543	1.23229
6500	1.21964	1.17184	1.13503	1.32757	1.27006	1.22696
7000	1.21397	1.16666	1.13006	1.322	1.26467	1.22163
7500	1.20835	1.16151	1.12512	1.3164	1.25926	1.21627
8000	1.20279	1.1564	1.12021	1.31077	1.25383	1.2109
8500	1.19728	1.15132	1.11534	1.30512	1.24838	1.20551
9000	1.19184	1.14629	1.11051	1.29944	1.24291	1.2001
9500	1.18646	1.1413	1.10573	1.29374	1.23742	1.19467
10000	1.18115	1.13637	1.101	1.28801	1.23191	1.18923
12500	1.16107	1.11762	1.08306	1.26461	1.20938	1.16708
15000	1.13672	1.0947	1.06115	1.23591	1.18189	1.14006
17500	1.1137	1.07288	1.0403	1.2077	1.15493	1.1136
20000	1.09243	1.05235	1.02082	1.17977	1.12829	1.08753
22500	1.07265	1.03311	1.00266	1.15249	1.10232	1.06217
25000	1.05341	1.01446	0.98512	1.12626	1.07736	1.03785
27500	1.03196	0.99394	0.96575	1.10137	1.05371	1.01483
30000	1.01155	0.97445	0.9473	1.07812	1.0316	0.99334
32500	0.99362	0.95728	0.93103	1.05591	1.01051	0.97293
35000	0.97773	0.94203	0.91656	1.03396	0.98965	0.95279
37500	0.96334	0.92822	0.90339	1.01613	0.97266	0.93646
40000	0.95012	0.91554	0.89128	1.00203	0.95926	0.92351
42500	0.93805	0.90394	0.88018	0.98957	0.94741	0.91204
45000	0.92683	0.89322	0.86983	0.9786	0.93698	0.90196
47500	0.91639	0.88328	0.86019	0.96889	0.92776	0.89303
50000	0.90672	0.87411	0.85123	0.9602	0.91951	0.88504

Tab. A.3: Hodnoty výstupu s karbidem křemíku

-	UO_2	ThO_2	$ThO_2 5\% SiC$	$ThO_2 10\% SiC$	$ThO_2 20\% SiC$
burnup [MWd/MTU]	k-eff [-]	k-eff [-]	k-eff [-]	k-eff [-]	k-eff [-]
0	1.30861	1.43315	1.42921	1.42766	1.42117
40	1.28954	1.41157	1.40734	1.4055	1.39843
80	1.28594	1.40888	1.40471	1.40289	1.3959
120	1.28483	1.40767	1.4035	1.40167	1.39466
160	1.28394	1.4065	1.40233	1.40049	1.39347
200	1.28317	1.40532	1.40115	1.3993	1.39226
400	1.28094	1.40076	1.39662	1.39477	1.38777
600	1.27904	1.39662	1.39254	1.39073	1.3838
800	1.27749	1.3934	1.38938	1.38758	1.38068
1000	1.27604	1.39047	1.38648	1.38469	1.37782
1500	1.27301	1.38426	1.38037	1.37861	1.37182
2000	1.26877	1.37793	1.37412	1.37236	1.36558
2500	1.26403	1.37204	1.36829	1.36652	1.35975
3000	1.25894	1.36632	1.36264	1.36086	1.35408
3500	1.2536	1.36072	1.3571	1.35531	1.34851
4000	1.24809	1.35518	1.35161	1.3498	1.34298
4500	1.24247	1.34966	1.34615	1.34432	1.33746
5000	1.23678	1.34416	1.34069	1.33884	1.33194
5500	1.23106	1.33865	1.33522	1.33334	1.3264
6000	1.22534	1.33312	1.32973	1.32782	1.32083
6500	1.21964	1.32757	1.32422	1.32228	1.31522
7000	1.21397	1.322	1.31868	1.3167	1.30957
7500	1.20835	1.3164	1.31311	1.31109	1.30389
8000	1.20279	1.31077	1.30751	1.30545	1.29817
8500	1.19728	1.30512	1.30188	1.29977	1.29241
9000	1.19184	1.29944	1.29623	1.29407	1.28662
9500	1.18646	1.29374	1.29054	1.28833	1.28078
10000	1.18115	1.28801	1.28483	1.28257	1.27492
12500	1.16107	1.26461	1.26161	1.25924	1.25151
15000	1.13672	1.23591	1.23289	1.2302	1.22184
17500	1.1137	1.2077	1.20461	1.20156	1.1925
20000	1.09243	1.17977	1.17657	1.17315	1.16336
22500	1.07265	1.15249	1.14914	1.14534	1.13482
25000	1.05341	1.12626	1.12274	1.11857	1.10732
27500	1.03196	1.10137	1.09769	1.09319	1.08129
30000	1.01155	1.07812	1.07428	1.06949	1.05702
32500	0.99362	1.05591	1.05192	1.04691	1.03401
35000	0.97773	1.03396	1.02987	1.0247	1.01153
37500	0.96334	1.01613	1.01198	1.00673	0.99346
40000	0.95012	1.00203	0.99787	0.99254	0.97922
42500	0.93805	0.98957	0.98543	0.98004	0.96672
45000	0.92683	0.9786	0.97452	0.9691	0.95582
47500	0.91639	0.96889	0.96488	0.95945	0.94623
50000	0.90672	0.9602	0.95629	0.95086	0.93769