

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KEV

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Palivové částice TRISO v tlakovodním reaktoru VVER-440

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Robert BOČEK**
Osobní číslo: **E18B0046P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Palivové částice TRISO pro reaktory typu VVER-440**
Zadávající katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

V rámci vývoje jaderného paliva s vyšší inherentní jadernou bezpečností (accident-tolerant fuel, ATF) lze uvažovat i použití palivových částic TRISO používaných ve vysokoteplotních reaktorech pro klasické lehkovodní reaktory. Cílem práce je úvodní srovnání stávajícího keramického paliva UO₂ s palivem TRISO pro reaktory VVER-440 z pohledu reaktorové fyziky.

1. Proveďte rešerši na téma nových typů paliva ATF.
2. Seznamte se s metodikou výpočtů vyhořívání paliva v kódu Serpent.
3. Navrhněte palivový soubor VVER s palivovými částicemi TRISO na základě srovnání s návrhy palivových souborů PWR podle literatury.
4. Srovnajte průběh vyhořívání jaderného paliva UO₂ a TRISO pro VVER-440.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. J. Leppänen, Serpent a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code, Users Manual, 2015.
2. N. R. Brown a kol., Neutronic evaluation of a PWR with fully ceramic microencapsulated fuel. Part I: Lattice benchmarking, cycle length, and reactivity coefficients, Annals of Nuclear Energy 62 (2013) 5387547.
3. J. Porta a kol., Coated particle fuel to improve safety, design, economics in water-cooled and gas-cooled reactors, Progress in Nuclear Energy 38 (2001) 407-410.
4. J. Matoušek: Využití paliva na bázi TRISO částic v lehkovodních reaktorech, diplomová práce, FJFI ČVUT v Praze, 2018.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Lovecký**
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na srovnání průběhu vyhořívání tradičního jaderného paliva s palivem s TRISO částicemi v lehkovodních reaktorech VVER-440. Jako příklad keramického paliva, zde bylo použito palivo Gd-2M+ z JE Dukovany. V rámci práce je popsáno několik druhů nových typu paliv a pokrytí (ATF), které jsou dostupné na trhu nebo jsou v raném vývoji či výzkumu mezi ně patří palivo FCM. V bakalářské práci jsou zmíněny různé společnosti a instituce, které se podílí na vývoji právě těchto paliv a pokrytí. Dále je zde proveden výzkum FCM paliv, které byly porovnány s tradičním keramickým palivem UO_2 . Pro výpočetní účely byl v této práci použit výpočetní kód Serpent.

Klíčová slova

TRISO, paliva tolerantní proti nehodám (ATF), lehkovodní reaktor VVER-440, Dukovany, Serpent

Abstract

This bachelor thesis focuses on the comparison of the burnup of traditional nuclear fuel with TRISO particle fuel in VVER-440 light water reactors. As an example of ceramic fuel, Gd-2M+ fuel from the Dukovany nuclear power plant was used here. Several new types of fuel types and coverage (ATF) that are available on the market or are in early development or research are described within the scope of this thesis, including FCM fuel. Various companies and institutions involved in the development of these fuels and coverages are mentioned in the thesis. Furthermore, research on FCM fuels is conducted and compared with the traditional ceramic fuel UO₂. For computational purposes, the Serpent computer code has been used in this work.

Key words

TRISO, accident tolerant fuel, VVER-440, Dukovany, Serpent

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské, je legální.



.....
podpis

V Plzni dne 23.5.2021

Robert Boček

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Martinu Loveckému za cenné rady, čas, ochotu a především trpělivost, kterou mi věnoval při vedení této práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 ATF – „ACCIDENT-TOLERANT FUEL“	11
1.1 KONCEPTY ATF.....	11
1.1.1 <i>Koncepty Paliva</i>	11
1.1.2 <i>Koncepty Pvlaků</i>	12
1.2 TYPY JADERNÝCH PALIV.....	13
1.2.1 <i>Keramické palivo UO₂</i>	14
1.2.2 <i>Palivo vysokoteplotních reaktorů (HTR – high temperature reactor)</i>	14
1.2.3 <i>Palivo s TRISO částicemi pro lehkovodní reaktory</i>	15
1.3 PALIVO FCM – FULLY CERAMIC MICRO-ENCAPSULETED.....	16
1.4 TVEL ATF.....	17
1.4.1 <i>První experiment s ATF</i>	18
1.4.2 <i>Nový projekt firmy TVEL</i>	18
1.5 WESTINGHOUSE ATF.....	18
1.5.1 <i>Technologie</i>	19
1.5.2 <i>Program EnCore Fuel</i>	20
1.6 AREVA.....	21
1.6.1 <i>Technologie</i>	22
1.7 ALVEL.....	25
2 PALIVO V JE DUKOVANY	26
2.1 JE DUKOVANY.....	26
2.1.1 <i>Části palivového cyklu</i>	26
2.1.2 <i>Palivový cyklus JE Dukovan</i>	27
2.2 PROJEKTOVÁ PALIVOVÁ VSÁZKA.....	27
2.3 PALIVO GD-2M+.....	28
2.4 VVER-440.....	29
3 SIMULACE V KÓDU SERPENT	31
3.1 ÚVOD DO SYNTAXE.....	32
3.2 MODELOVÁNÍ TRADIČNÍHO PALIVA UO ₂	36
3.3 MODELOVÁNÍ PALIVA S TRISO ČÁSTICEMI.....	36
3.4 POROVNÁNÍ PALIVA UO ₂ S PALIVEM FCM.....	37
ZÁVĚR	40
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	1

Úvod

V tlakovodních reaktorech se používá palivo nízkoobohacenného uranu ve formě keramických palivových pelet z UO_2 . V roce 2011 po havárii jaderné elektrárny Fukušima 1 se rozšířil světový zájem o vývoj pokročilých paliv, které mají zvýšit bezpečnost a spolehlivost při provozních i havarijních podmínkách. Palivo s TRISO částicemi bylo vyvinuto pro vysokoteplotní plynem chlazené reaktory a mají odolnost při vysokých teplotách a schopnost udržet štěpné produkty při havarijních podmínkách, díky těmto vlastnostem jsou jedním z kandidátů právě na tyto pokročilá paliva.

Tato bakalářská práce se zabývá typy pokročilých paliv a opláštění od různých institucí po celém světě. Přesněji se zaměřuje na plně mikro-zapouzdřené palivo (FCM), protože vývoj tohoto paliva pokročil zatím nejdále. Toto palivo je unikátní v tom, že jeho konstrukce by umožňovala nasazení to nyníjších lehkovodních reaktorů bez významných úprav palivových souborů [4]. V praktické části je použit finský výpočetní kód Serpent [19, 20], ve kterém byla vytvořena geometrie paliva pro VVER-440 a paliva s TRISO částicemi, a poté bylo palivo s TRISO částicemi vloženo do palivového proutku VVER-440. Po vložení paliva s TRISO částicemi do palivového proutku byla provedena simulace vyhořívání paliva. Pro potřeby výpočtů se vycházelo z provozních parametrů elektrárny Dukovany.

Cílem bakalářské práce je srovnání tradičního paliva UO_2 s palivem obsahující TRISO částice a seznámit se s výpočetním kódem Serpent.

Seznam symbolů a zkratk

Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
ATF	Paliva tolerantní proti nehodám
ATR	Pokročilý testovací reaktor (Advanced Test Reactor)
Cr	Chrom
Cr ₂ O ₃	Oxid chromitý
FCM	Keramické palivo s povlékanými mikročásticemi (Fully ceramic microencapsulated fuel)
Fe	Železo
FeCrAl	Kanthal
IAEA	Mezinárodní agentura pro atomovou energii (International Atomic Energy Agency)
JE	Jaderná elektrárna
LWR	Lehkovodní reaktor (low water reactor)
MIR	Nová generace sovětsko-ruských reaktorů VVER
Mo	Molybden
PCI	Vzájemná interakce mezi peletami a pokrytím (Pellet-cladding interaction)
PWR	Tlakovodní reaktor
PyC	Pyrolytický uhlík (Pyrolytic carbon)
SiC	Karbid křemíku
TRISO	Tří-izotropní (Tri-isotropic)
U ²³⁵	Izotop uranu
UO ₂	Oxid uraničitý
VVER-440	Ruský energetický reaktor o výkonu 440 MW (Vodo-vodjanoj energetičeskij reaktor)
Zr	Zirkonium

1 ATF – „Accident-tolerant fuel“

Nehoda v roce 2011 v japonské jaderné elektrárně Fukušima 1 byla nejhorší jaderná havárie po Černobyli, následkem nehody v Japonsku došlo k zahájení kampaně na vývoj nového typu paliva. ATF neboli accident-tolerant fuel jsou paliva odolná proti nehodám. Jedná se o soubory nových technologií, které by dokázali odolat scénáři závažné havárie, například té ve Fokušimě Daiiči. Hlavním důvodem vývoje tohoto paliva je zamezení tavení paliva nebo minimalizovat produkci výbušného vodíku, když teplota paliva vzroste v parním prostředí. Výhodou těchto paliv není jen zvýšení bezpečnosti v jaderných elektrárnách, ale i zlepšení výkonu při běžném provozu, poskytnutí operátorovi více času při havárii a na její zvládnutí. Jak už z názvu vyplývá jedná se o technologie paliv a palivových pokrytí, které vznikají z různých kombinací materiálů nebo z úplně nových materiálů. Navrhované koncepty paliva nebo pokrytí musí být pečlivě prostudovány, aby bylo možné posoudit, zda vyhovují kritériím. Poté přijdou na řadu krátkodobé a dlouhodobé testy, které mohou trvat i několik let.

1.1 Koncepty ATF

V dnešní době existuje spousta různých organizací a firem (WESTINGHOUSE, TVEL, AREVA atd.), který se zabírají vývojem paliv odolným proti nehodám neboli ATF. Nejen, že dochází k vylepšení celé řady paliv, ale i opláštění.

1.1.1 Koncepty Paliva

Dopované pelety (Cr_2O_3 -oxid chromitý, Al_2O_3 -oxid hlinitý...)

Výkon standardního UO_2 je dnes většinou omezen fenoménem interakce s peletami (PCI-Pellet-cladding interaction), bobtnáním paliva a uvolňováním štěpného plynu [14]. Dopad těchto jevů se zvyšuje s rostoucím vyhořením, zatímco problematika PCI je nejvýraznější v polovině vyhoření, skutečnou tendencí je proto vyrábět pokročilá paliva. U pelet o velké zrnitosti UO_2 klesá rychlost uvolňování štěpného plynu (např. Krypton a Xenon) [14]. Studie provedené ve výzkumu paliv prokázaly, že jednou z možností, jak zvýšit velikost zrna pelet bez zvýšení teploty a času slinování, je přidání malého množství přísad. Přidáním určitých dopantů v prášku UO_2 (např. Nb_2O_5 , Cr_2O_3 , Al_2O_3 atd). Velikost zrna, poréznost a střední volná difúzní dráha jsou zvýšeny, zatímco hraniční oblast zrn je snížena.

Přidání práškového oxidu dopujícího během slinování je ekonomicky nejúčinnější [14]. Jeden z nejčastěji používaných a v současné době zkoumaných dopantů v jaderný výzkum a vývoj je Cr_2O_3 pro zvětšení zrna paliv z oxidu uraničitého. Zejména doping UO_2 s Cr_2O_3 byl v posledním desetiletí předmětem mnoha studií, které přinesly produkty dostupné na trhu s palivy. Další koncepty jsou například vysokohustotní paliva (karbidy, kov, křemičitany, nitridy) a FCM (TRISO).

1.1.2 Koncepty Povlaků

Pokročilé materiály (FeCrAl, Mo-slitiny, SiC – duplex, triplex)

Současné lehkovodní reaktory (LWR) používají slitiny Zr jako opláštění, díky jeho vynikajícím vlastnostem jako je nízký průřez absorpce neutronů a dobrá odolnost ozáření neutrony za provozních podmínek reaktoru. Nicméně, slitiny Zr rychle reagují s horkou párou produkovanou během těžkých havárií jako jsou havárie ztráty chladicí kapaliny, procházející významnou recesí a degradací mechanické pevnosti a produkující masivní vodík. Existuje několik nových konstrukčních konceptů pokrytí paliv pro LWR, které jsou kategorizovány podle konceptů založených na Zr jako je SiC nebo slitina Zr s fázovým povlakem MAX, SiC kompozit + slitina Zr nebo sendvičový hybrid Zr – Mo – Zr, a koncepty plně nahrazující například Fe – Cr – Al slitiny, slitiny Mo, SiC triplex a nerezové oceli [16]. Většina nových konceptů zvažovala použití SiC keramiky jako své složky, protože rychlost uvolňování vodíku SiC je stokrát nižší než u slitin Zr. Kromě toho má SiC a jeho kompozity ve srovnání se slitinami Zr vynikající mechanické vlastnosti při vysokých teplotách, nízký průřez absorpce neutronů, vysokou teplotu tání a dobrou odolnost vůči ozáření neutrony.

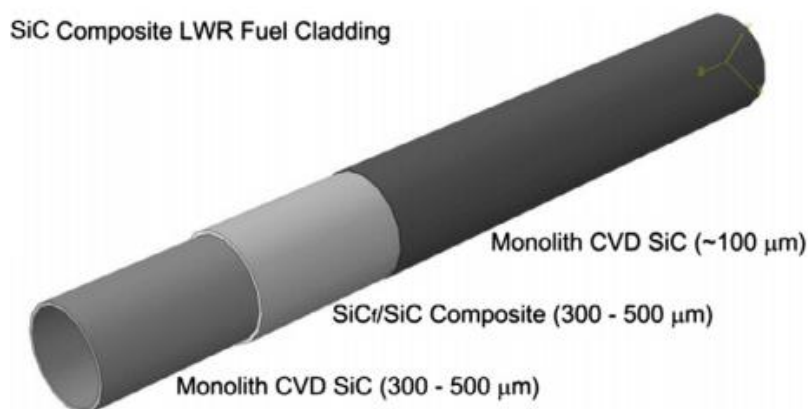
Duplex

Duplexní metoda je způsob nanášení ochranných vrstev na substrát ze slitiny zirkonia, protože slitiny zirkonia rychle reagují s párou při vysokých teplotách 1100 °C, kvůli tomu dochází k vzniku oxidu zirkoničitého a vodíku. Vyprodukovaný vodík touto reakcí tlačí na nádobu a mohl by uniknout, což by vedlo k potenciálně výbušné atmosféře, poté k výbuchu, tím dojít k disperzi štěpných produktů mimo kontejnment. Duplexní metoda poskytuje způsob vytvoření korozivzdorné vrstvy na substrátu, která je z chromu (Cr), slitiny Cr a jejich kombinací. Částice korozivzdorné vrstvy mohou mít průměr 100 mikronů nebo méně. Pokud jsou částice vrstvy odolné proti korozi slitiny na bázi chromu, mohou obsahovat 80

až 99 % atomů chromu [15]. V různých aspektech může slitina na bázi chromu zahrnovat alespoň jeden prvek vybraný ze skupiny sestávající z prvků křemíku, yttria, hliníku, titanu, niobu, zirkonia a přechodných kovů v kombinovaném obsahu 0,1 až 20 atomových %. V různých aspektech může být Cr slitina z FeCrAlY nebo FeCrAl.

Triplex

Palivový obklad SiC triplex se skládá z monolitické vnitřní vrstvy SiC, kompozitní mezivrstvy SiC / SiC a vnější vrstvy monolitického SiC [16]. Primární funkcí vnitřní vrstvy SiC je zabránit radioaktivním štěpným produktům unikající palivo do chladicí kapaliny zvyšuje kompozitní vrstva SiC / SiC pevnost obkladové trubky a poskytuje lepší lomovou houževnatost a vnější vrstva SiC chrání kompozitní vrstvu před korozi chladicí vodou při vysokých teplotách. Aby se během ozařování neutronů projevila nejlepší výkonnost, měla by být každá vrstva čistá, dobře krystalizovaná a téměř stechiometrická.



Obr. 1.1: Koncept trubice SiC triplex pro aplikaci opláštění palivem LWR [18]

1.2 Typy jaderných paliv

- Keramické palivo UO_2
- Palivo s TRISO částicemi

1.2.1 Keramické palivo UO₂

Nízko obohacené (se štěpným U²³⁵) jaderné palivo, které se používá v komerčních lehkovodních reaktorech, je vyrobeno z oxidu uraničitého UO₂. Štěpení U²³⁵ generuje lehké a těžké štěpné fragmenty, které narušují síť kation-kation a kation-anion v palivové matici. Chování všech štěpných produktů má zásadní význam při provozu jakéhokoli jaderného reaktoru a výkonu palivových tyčí. Nicméně s dlouhou historií a dobře zavedenou výrobní základnou jsou palivové pelety z oxidu uraničitého standardní palivo pro většinu lehkovodních reaktorů v provozu po celém světě. Výhody oxidické keramiky jsou vysoká teplota tání, teplotní stabilita (až do teploty tání nevykazuje žádné fázové změny), dobře zadržuje štěpné produkty, je velmi dobře korozně odolná, a radiačně stabilní. Nevýhodou je nízká hustota štěpných jader, nízká tepelná vodivost, nízká odolnost vůči rychlým teplotním změnám, a křehkost. Vlastnosti, které ovlivňují chování paliva z UO₂ jsou hustota, porozita (tvar pórů, velikostní rozložení), stechiometrický poměr kyslíku a uranu, štěpením způsobené zhušťování (změna hustoty) a restrukturalizace.

Tab. 1.1: Přehled reaktorů využívajících oxidické keramické palivo:

PWR	<i>pressurized water reactor</i>	tlakovodní reaktor západního typu
PHWR	<i>pressurized heavy-water reactor</i>	těžkovodní reaktor s tlakovými kanály
VVER	<i>vodo-vodjanoj energetičeskij reaktor</i>	tlakovodní reaktor východního typu
BWR	<i>boiling water reactor</i>	varný reaktor
AGR	<i>advanced gas-cooled reactor</i>	zdokonalený plynem chlazený reaktor
RBMK	<i>reaktor bolšoj moščnosti kanalnyj</i>	reaktor s varnými kanály

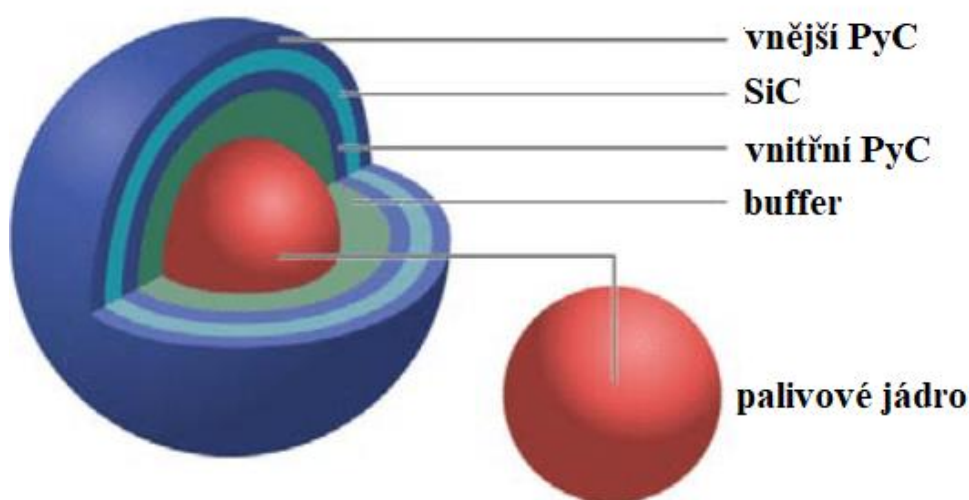
1.2.2 Palivo vysokoteplotních reaktorů (HTR – high temperature reactor)

Pracovní teplota těchto reaktorů se pohybuje mezi 750 °C a 950 °C. Palivem vysokoteplotních reaktorů jsou tzv. TRISO částice. TRISO částice mají průměr menší než 1 mm. Každá částice má jádro cca 0,5 mm z UO₂ nebo z UCO (oxidu karbidu) obohaceného do 20 % U²³⁵. Jádro je obaleno 3 ochrannými vrstvami, z nichž každý má tloušťku přibližně 35-40

μm . Ochranné vrstvy mají za úkol uchovat štěpné produkty uvnitř částice. Vnitřní ochranná vrstva je první, skládá se z pyrolytického uhlíku (PyC). Vnitřní vrstva brání úniku plynných štěpných produktů. Další vrstva je z karbidu křemíku (SiC) a zajišťuje mechanickou pevnost TRISO částice, také zabraňuje úniku štěpných produktů, jelikož štěpné produkty snadno difundují vrstvou z pyrolytického uhlíku. Vnější vrstva je také z pyrolytického uhlíku (PyC), jež chrání vrstvu z karbidu křemíku před vnějším mechanickým poškozením. TRISO částice jsou ve vysokoteplotním reaktoru rozptýlené v grafitové matici, která má většinou podobu šestihraných hranolových bloků nebo koulí. Reaktory HTR mohou využívat palivo i na bázi thoria, tj. vysoko či nízko obohacený U^{235} s ThO_2 , ^{233}U s ThO_2 nebo PuO_2 s ThO_2 . Díky vysokoteplotním reaktorům máme zkušenosti s palivy na bázi thoria.

1.2.3 Palivo s TRISO částicemi pro lehkovodní reaktory

Jeden z hlavních důvodů, proč použít palivo s částicemi TRISO v lehkovodních reaktorech, je zvýšení jaderné bezpečnosti. Dalšími důvody jsou například dosažení vyššího vyhoření a nižší produkce plutonia. Mezi nejvýznamnější paliva s TRISO částicemi patří keramické palivo FCM [Fully Ceramic Microencapsulated] a vývoj tohoto typu paliva pokročil zatím nejdále. Palivo FCM je unikátní v tom, že jeho konstrukce by umožňovala nasazení do nynějších lehkovodních reaktorů bez významných úprav palivových souborů [21].



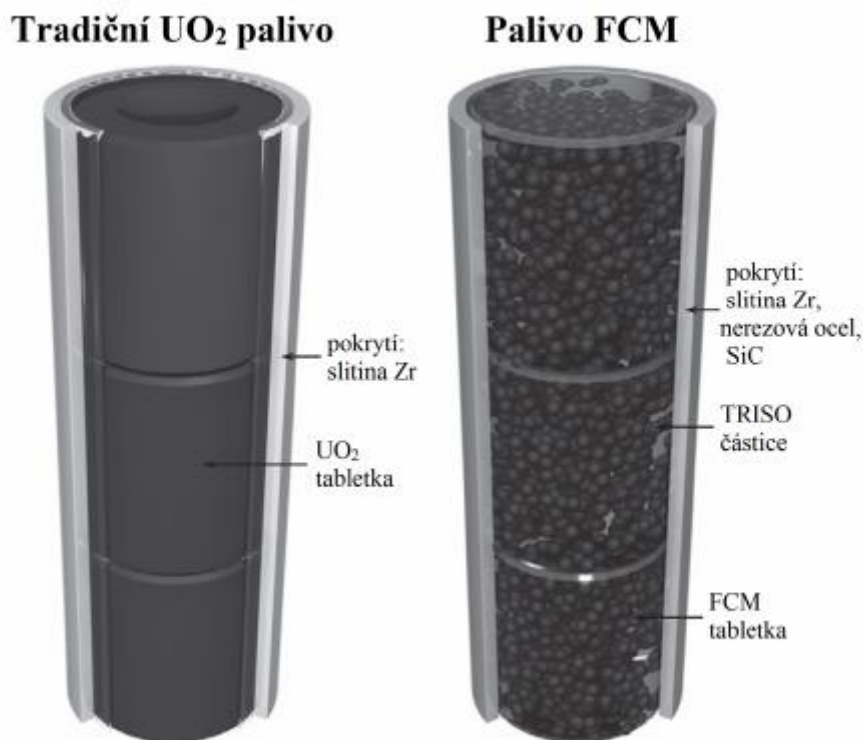
Obr. 1.2: TRISO částice [3]

Tab. 1.2: Rozměry TRISO částic [21]

materiál	vrstva	r [cm]	ρ [g/cm ³]
UO ₂	jádro	0,0250	10,5
C	buffer	0,0340	1,1
C	IPyC	0,0380	1,7
SiC	vrstva SiC	0,0415	3,2
C	OPyC	0,0455	1,7

1.3 Palivo FCM – fully ceramic Micro-encapsulated

FCM je plně keramické mikro-zapouzdřené palivo, které je vyvíjeno ve společnostech Oak Ridge a Ultra Safe Nuclear. Základem tohoto paliva jsou částice TRISO (viz Obr. 1.2). Na rozdíl od paliva ve vysokoteplotních reaktorech, kde jsou tyto částice rozptýlené v grafitové matici jsou u paliva FCM rozptýlené v matici z karbidu křemíku. Matrice tvoří palivovou tabletu FCM paliva, která má velice výborné vlastnosti. Tato kombinace poskytuje extrémně robustní a stabilní palivo s mimořádně vysokou tepelnou stabilitou a je odolná proti korozi a radiačnímu poškození. Slouží také jako ochranná bariéra proti úniku štěpných produktů. U paliva FCM se předpokládá, že se budou vyrábět palivové tablety stejné jako standardní tablety v lehkovodních reaktorech. Tyto tablety by se tedy daly naskládat do současných palivových proutků (viz Obr. 1.3), tím paliva FCM získávají jednu z hlavních výhod. FCM se vyrábí lisováním za tepla, kde se do grafitové formy nasype směs TRISO částic a karbidu křemíku v práškové formě. Navržené částice paliva TRISO zkoumané pro FCM se podstatně liší od historických částic TRISO. Částice, které prošly kvalifikací v rámci programu jaderné elektrárny nové generace (NGNP), používají palivová jádra UCO o průměru 500 μm , tloušťce vyrovnávací vrstvy PyC kolem 100 μm , tloušťce IPyC a OPyC kolem 40 μm a tloušťce vrstvy SiC kolem 35 μm [4]. UCO je směs paliva urania (UO₂) a karbidu uranu (UC). Některé koncepty FCM používají podobné částicové vzory, ale jiné používají větší jádra a podstatně tenčí povlaky: tloušťky vyrovnávací vrstvy 25–75 μm , tloušťky vrstvy IPyC 15–20 μm a tloušťky vrstvy SiC až 30 μm . Ne všechny tyto tloušťky budou možné pro všechny designy částic nebo ozařování, ale zkoumá se celá řada, aby se pochopil dostupný návrhový prostor.



Obr. 1.3: Tradiční palivo a palivo FCM [21]

1.4 TVEL ATF

ATF je jaderné palivo, které je odolné vůči závažným nehodám na JE se ztrátou chladicí kapaliny v reaktoru. Mělo by i v případě selhání odvodu tepla v aktivní zóně reaktoru udržet svou integritu po dlouhou dobu, aniž by reakce zirkonia s párou vyvolala uvolňování vodíku. Tyto paliva odolné vůči nehodám mají zásadní význam pro zvyšování bezpečnosti a spolehlivosti jaderné energie. Bochvarský technologický vědecký institut zajišťuje ve společnosti TVEL Fuel Company výzkum, návrh a testování.

První ruské jaderné palivové kazety s experimentálními tyčemi odolnými proti nehodám (ATF) pro komerční reaktory byly vyrobeny v roce 2019. Prošly kontrolou v závodě Novosibirsk Chemical Concentrates Plant, který je výrobním závodem společnosti Rosatom TVEL Fuel Company. V prvním čtvrtletí roku 2020 byly naloženy do reaktoru VVER-1000 na JE Rostov. V každé třetí palivové kazetě modelu TVS-2M je obsaženo 12 palivových tyčí ATF. Tyto palivové kazety mají dva různé materiálové obklady, buď je obklad ze slitiny zirkonia s chromovým povlakem nebo slitina chromu a niklu. Obě možnosti vylepšují tepelnou odolnost.

1.4.1 První experiment s ATF

V roce 2019 společnost TVEL dokončila první fázi testování ATF ve výzkumném reaktoru MIR. V samostatných vodních smyčkách byly ozářeny experimentální palivové soubory s palivovými tyčemi typu VVER a PWR. V souboru je 24 palivových tyčí. Tyče se skládali z různých typů paliva a ze čtyř různých kombinací obkladových materiálů. Palivové pelety byly z tradičního oxidu uraničitého a také ze slitiny uranu a molybdenu se zvýšenou hustotou a tepelnou vodivostí. Po každém ozařovacím cyklu jsou některé palivové tyče z palivové kazety odstraněny z důvodu dalších studií a místo nich jsou instalovány nové neozařené vzorky.

V roce 2021 výzkumný ústav atomových reaktorů (NIIAR) dokončil druhý cyklus ozařování experimentálních palivových souborů a palivových tyčí typu VVER/PWR ve výzkumném reaktoru MIR.

1.4.2 Nový projekt firmy TVEL

Institut Bochvar zahájil projekt na vývoj technologie výroby granulí silicidu uranu (U_3Si_2) jako další možnost pro palivovou matici ATF. Pro další výrobu prášku a pelet byl vyroben experimentální ingot U_3Si_2 .

Hlavním důvodem, proč tento projekt vznikl, jsou výhody silicidu uranu. Mezi tyto výhody patří například vysoká hustota a obsah uranu. To umožňuje prodloužení palivových cyklů bez zvýšení úrovně obohacení nebo vyšší tepelnou vodivost a nižší tepelnou kapacitu, což znamená méně akumulovaného tepla v aktivní zóně reaktoru a nižší teplotu opláštění tyčí. Jako poslední výhoda je nižší provozní teplota, a to může zlepšit výkonové charakteristiky paliva.

1.5 Westinghouse ATF

Vývojový program ATF Westinghouse je průmyslovým lídrem v oboru ATF už od roku 2004. Jejich primární program se zaměřuje na pokročilé palivové technologie a pokrytí. Společnost Westinghouse se v základu drží tří kritérií, mezi které patří bezpečnost, spolehlivost a nízké pořizovací ceny. Firma Westinghouse navrhuje palivo, tak aby byly splněny

všechny tři kritéria. Ve spolupráci s technologickými partnery plánuje Westinghouse dlouhodobě testovat a také si nechat licencovat tyto paliva.

Současné návrhy paliv fungovaly velmi dobře při provozních podmínkách, ale ne při nehodách. Těžké nehody mohou vést ke zničení palivového pokrytí a uvolnění štěpných produktů. ATF palivo může výrazně zvýšit toleranci těžkých nehod. Jejich očekávání je, želepší bezpečnost a spolehlivost jaderných elektráren.

1.5.1 Technologie

Westinghouse ATF technologie zlepšují odolnost proti oxidaci a tepelnou vodivost díky novým obkladovým materiálům a novým peletám. Uvažují o šesti kombinacích opláštění a pelet. Tyto úvahy vycházejí z dlouholetého výzkumu, který byl zahájen v roce 2003. V roce 2016 se sledovaly různé dvě kombinace.

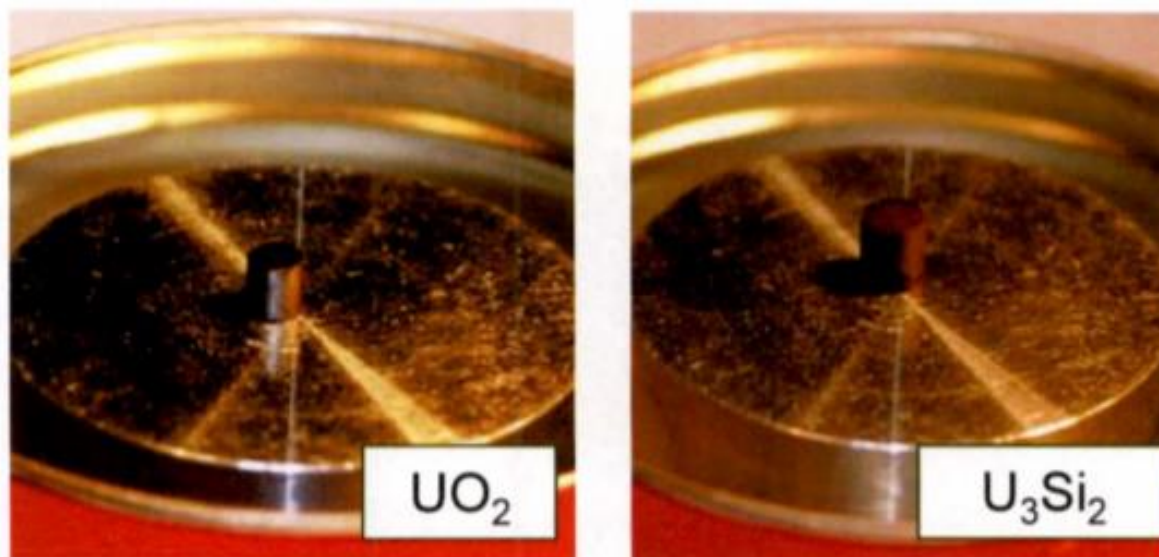
Vlastnosti technologie pokrytí

Kompozity karbidu křemíku zvyšují maximální toleranci teploty pokrytí a to nad 2000 °C, tím palivo získává výhodu nákladů na cyklus a odolnost proti korozi

- Zachování pevnosti v tahu až do 2500 °C.
- Pomalá reakce s párou při > 1700 °C.
- Eliminuje teplotní špičky způsobené oxidací.
- Bod tání > 2500 °C.
- Přiměřeně malý průřez pro neutrony.
- Dobré radiační chování

Vlastnosti technologie paliva

- Uranový silicid (U_3Si_2) zvýší [obohatí] U^{235} o 17 %. To 5x zvýší tepelnou vodivost.
- Vodotěsný (U15 N) zvýší U^{235} o 35 %. To 10x zvýší tepelnou vodivost
- Výsledek je vylepšení nákladů na palivový cyklus, což je silná finanční pobídka



Obr.1.4 Porovnání dvou pelet [18]

1.5.2 Program EnCore Fuel

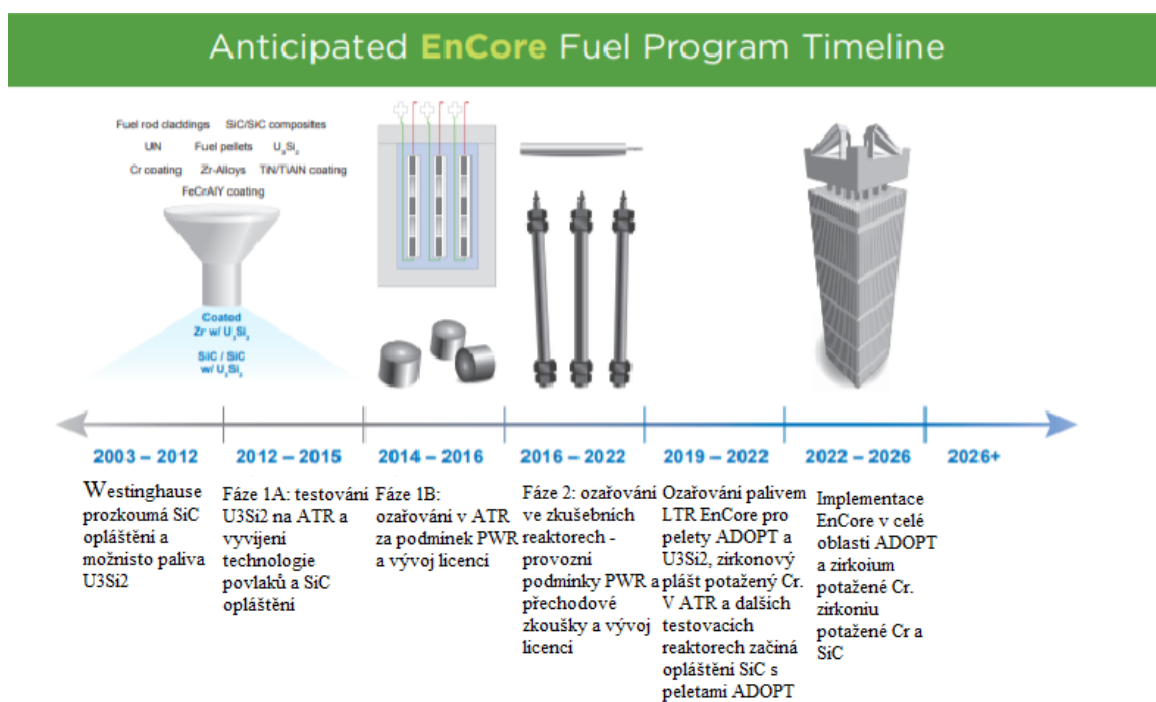
Tento program se zaměřuje na použití vysoce výkonných funkcí a je rozdělen do dvou fází. Původní palivový produkt EnCore se skládá z potažených tyčí s palivovými peletami ADOPT. V programu se také vyvíjí pokročilé materiály palivových tyčí. Například se jedná o vrstvu z karbidu křemíku, který má extrémně vysokou teplotu tání a minimalizuje reakci vody a páry. Z dlouhodobého hlediska program EnCore Fuel zahrnuje také pelety z nitridu uranu, jež nabízí o 40% vyšší hustotu oproti UO_2 a výrazné lepší tepelné vlastnosti [6].

V první fázi je při zavedení palivových tyčí EnCore využíváno pochromované pokrytí. Toto pokrytí je potřeba k dosažení bezpečnosti, která mění konstrukční základ. Předpoklad je snížená oxidace, prodloužení životnosti pokrytí, zvýšení maximální teploty o (250-300) °C a zvýšenou odolnost proti opotřebení. Potažené pokrytí také vydrží dlouhodobé vystavení vysokoteplotní páře a vzduchu o (1300-1400) °C během havárie. Nedávné testy ukázaly, že chromový povlak má vynikající odolnost proti korozi a ozařovací stabilitu, stejně tak zlepšení mechanického výkonu při vysoké teplotě. Tento povlak byl například použit na testovací tyče (LTR).

Ve druhé fázi se projekt EnCore Fuel zabývá vývojem pokrytí z karbidu křemíku (SiC), jehož cílem je poskytnout průlomové zlepšení bezpečnostních rezerv. Pokrytí z karbidu křemíku reaguje 10 000krát pomaleji s vodou a párou než zirkonium při 1200 °C. To má za následek minimální tvorbu vodíku a tepla během nehody.

Palivové pelety ADOPT

jsou pelety z UO_2 dopované chromem (Cr_2O_3) a oxidem hlinitým (Al_2O_3). Pelety ADOPT budou vylepšeny pro první fázi palivového programu. Vylepšené pelety dosahují vyšší účinnosti uranu, díky zvýšené hustotě štěpného produktu, také dosahují vyšší tepelné stability, vyšší rychlosti tečení než standardní UO_2 při vyšších teplotách. Společnost Westinghouse má více než 20 let zkušeností s výrobou ADOPT pelet, proto dodává více než 2700 palivových souborů s ADOPT. Ve druhé fázi chce EnCore Fuel představit pokročilejší konstrukci palivových pelet. Jako silicid uranu, nitrid uranu nebo pelety s vysokou tepelnou vodivostí oxidu uraničitého. Tyto pokročilejší konstrukce umožní zabalit více uranu do stejného objemu než současný UO_2 . [8]



Obr. 1.5: Program EnCore Fuel do roku 2026+ [6]

1.6 AREVA

Po havárii ve Fukušima-Daiiči bylo zahájeno několik mezinárodních programů s cílem prozkoumat a vyvinout inovativní koncepce pohonných hmot, které by vykazovaly zvýšenou odolnost proti náhodným podmínkám. V tomto rámci se AREVA aktivně podílí na vývoji několika koncepcí povlaků a pelet prostřednictvím projektů spolupráce v rámci programu DOE EATF a francouzského třídílného výzkumu a vývoje s CEA a EDF. U povlaků se zkoumají tři hlavní koncepty: povlaky na slitinách zirkonia (M5 povlak Cr a fázové povlaky Cold

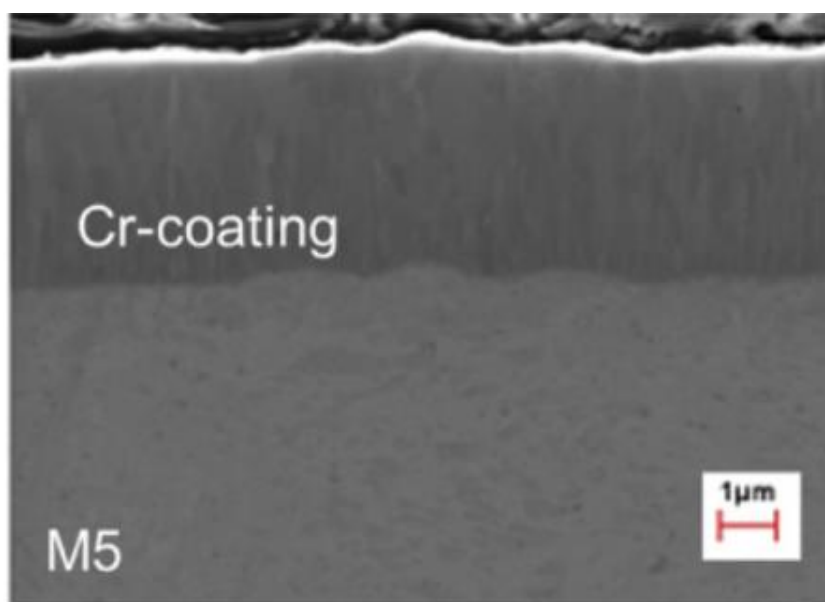
Spray MAX), EPRI molybdenový povlak a sendvičový povlak CEA SiC / SiC. U pelet AREVA ve spolupráci s Floridskou univerzitou vyvíjí pelety se zvýšenou tepelnou vodivostí obsahující SiC nebo přísady diamantových částic, také má AREVA projekt na keramické paliva UO_2 dopované Cr_2O_3 . Celkově koncepty zkoumaly rozsah od evolučních řešení po dlouhodobé.

Projekt IMAGO v reaktoru Gosgen zahájil ozařování v červnu 2016 a je prvním ozařením roztoků EATF v komerčním reaktoru. Další ozařování palivových destiček bylo plánováno ve výzkumných reaktorech (HALDEN a ATR) na roky 2017 a 2018, aby se prozkoumalo celkové chování palivových tyčí potažených Cr. Nakonec bylo potvrzeno, že pokrytí M5 potažené Cr může poskytnout významné výhody za normálních provozních podmínek a tyto programy umožňují společnosti AREVA NP využívat své síly ve všech regionech ve společném úsilí o urychlení implementace jejích koncepcí.

1.6.1 Technologie

Opláštění M5

Nejpokročilejší a nejvyspělejší technologie pokrytí pro AREVA NP je pokrytí M5 potažené Cr, které se skládá z 15 mm silné krycí vrstvy Cr nanesené na povrchu pokrytí. Stejným způsobem několik dalších institucí na celém světě vyvíjí povlaky, zejména povlaky Cr, jako krátkodobé řešení EATF. Povlak se nanáší technikou fyzikální depozice par, které nemění mikrostrukturu podkladového zirkonového substrátu. Tato technika vytváří velmi hustý povlak, který nemá ani trhliny ve vrstvě Cr, ani pórovitost na rozhraní Cr – Zr. Takto vyrobený povlak je velmi přilnavý, a proto je velmi ochranný. Pokrytí M5 bylo vyvinuto spolu s CEA a EDF ve francouzském programu jaderného výzkumu. Pokrytí potažené chromem ukázalo vynikající výsledky, což naznačuje zvýšenou spolehlivost, zvýšenou provozní flexibilitu, zlepšenou odolnost vůči oxidaci parou při vysokých teplotách a lepší ekonomiku za provozních podmínek. Například proto, že chrom je tvrdší než zirkon, chromový povlak poskytuje pokrytí výrazně lepší odolnost proti opotřebení [12].



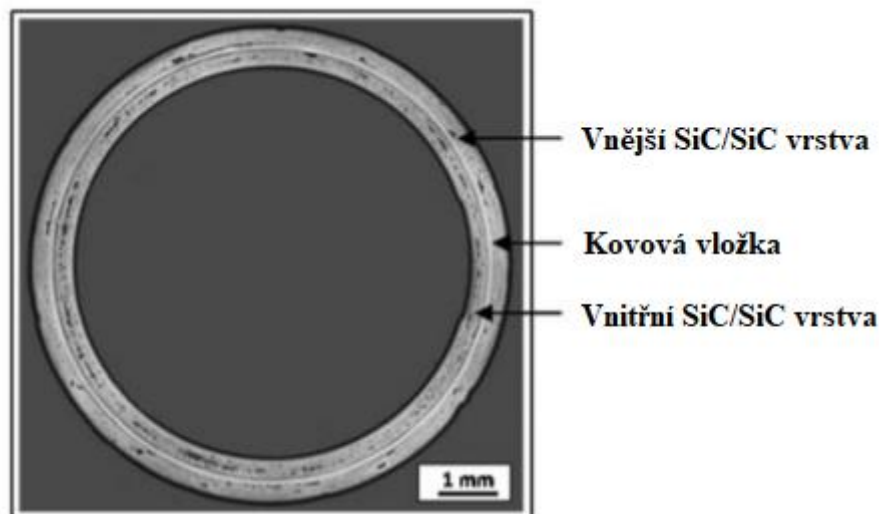
Obr. 1.6: řez vrstvou Cr uloženou na substrátu M5 [12]

Aby se potvrdilo vynikající chování pokrytí ze zirkoniové slitiny s povlakem Cr, byl v roce 2016 zahájen ozařovací program v švýcarském Gösgenově reaktoru, který byl prvním ozařováním konceptů EATF v komerčním reaktoru. Tento ozařovací projekt se jmenoval IMAGO, což je zkratka pro ozařování materiálů pro paliva odolná proti nehodám v reaktoru Gösgen. Cílem IMAGO je ověřit chování konceptů EATF v reprezentativních podmínkách PWR, zejména korozní chování, mikrostrukturní vývoj při ozáření a některé mechanické vlastnosti. Získaná data budou sloužit jako vstup pro zdůvodnění budoucího ozáření palivových tyčí.

Pokrytí SiC/SiC

Kompozitní pokrytí SiC / SiC bylo nejprve zkoumáno pro použití generace IV v plynem chlazených rychlých reaktorech kvůli jeho velmi dobrým vysokoteplotním vlastnostem a rozměrové stabilitě. Od akce ve Fukušimě Daiiči v roce 2011 je tento koncept přizpůsoben pro použití v lehkovodních reaktorech (LWR) s cílem zvýšit bezpečnostní rezervy během havarijních podmínek. Hlavní výhody použití SiC ke zlepšení tolerance nehod jsou například vysoká pevnost při vysoké teplotě a vysoká teplota sublimace. Koncept obsahuje tenkou (50-100 μm) žáruvzdornou kovovou vložku mezi dvěma SiC kompozitními vrstvami, jak je vidět na obr. 2.3. Tato tzv. sendvičová konstrukce nabízí mnoho výhod, jelikož kovová vložka poskytuje těsnost pokrytí a vylepšené mechanické vlastnosti. Studie korozního chování SiC kompozitu za podmínek PWR prokázaly velmi malou oxidaci ve srovnání s konvenčními

slitinami zirkonia a také mechanické vlastnosti SiC pláště byly zachovány po takové oxidaci [18].



Obr. 1.7: Sendvičová konstrukce opláštění SiC/SiC [18]

Kromě těchto výhod ukázaly ještě vysokoteplotní testy, že kompozitní trubky SiC vykazují malou změnu hmotnosti až do 110 h v páře 1200 ° C, zatímco standardní trubice byla rozložena do 4 hodin. Výsledky poukazují na velký potenciál tohoto materiálu, ale vzhledem k novým poruchovým režimům ve srovnání s konvenčními kovovými pokrytími jsou stále nutné významné studie a vývoj, což by rovněž vedlo k novým konstrukčním pravidlům.

Vylepšené palivo

AREVA zkoumá s University of Florida přidání SiC (jako prášek) nebo diamantových částic do UO₂ pelet, aby se zvýšila jeho tepelná vodivost, protože zvýšením tepelné vodivosti pelet se sníží průměrná teplota paliva, též se sníží radiální teplotní gradient, což sníží tepelné namáhání a praskání pelet. V důsledku toho by takový vývoj snížil produkci a uvolňování štěpného plynu.

Tyto doplňkové materiály (SiC jako prášek a částice nano-diamantů) byly vybrány pro jejich malý průřez absorpcí neutronů, chemickou stabilitu a vysokou tepelnou vodivost. Množství přísad je omezeno na 10 % objemových, protože poskytuje významné zlepšení vodivosti neozářených vzorků (přibližně 40 %) [17], aniž by došlo k porušení hranice obohacení 5 %. Kompozitní pelety se vyrábějí pomocí techniky Spark Plasma Sintering, která snižuje dobu výroby a zvyšuje hustotu pelet, aby se získalo průměrně 95% teoretické

hustoty. Tyto kompozitní pelety (jak $\text{UO}_2 - \text{SiC}$, tak $\text{UO}_2 - \text{diamantové}$ pelety) budou ozářeny jako tobolky v Advanced Test Reactor (ATR), jak je plánováno programem DOE. Hlavním cílem tohoto ozáření je posoudit dopad ozáření na tepelnou vodivost pelet.

1.7 ALVEL

ALVEL je česká soukromá firma, která se také podílí na výrobě nebo testech paliv odolným proti nehodám. Především se zaměřuje na modifikaci současných ATF povlaků. Díky unikátním technologiím jsou nanášeny různé ochranné vrstvy (Cr, CrAl, CrN, TiN a CrN + Cr) na slitiny používané v současných tlakovodních reaktorech VVER. Technologie nanášení a složení vrstev jsou průběžně modifikovány s cílem zlepšení vlastností. Ochranné vrstvy jsou velmi tenké, lze je kombinovat, mohou mít různé funkce a výhody. Například ochrana před korozí, zlepšení mechanických vlastností nebo zvýšení odolnosti proti otěru a zabránění interakce jednotlivých součástí. Ochranné vrstvy jsou vybrány na základě mnoha omezení. Průběžné testy jsou zatím prováděny na neozářených materiálech.

2 Palivo v JE Dukovany

2.1 JE Dukovany

Jaderná elektrárna Dukovany je nejstarší elektrárna v České republice. V elektrárně jsou 4 výrobní bloky s tlakovodními reaktory VVER-440 typu V213 s výkonem bloků 440 MWe a 1375 MWt. První reaktorový blok byl uveden do provozu v květnu 1985 a od července 1987 jsou v provozu všechny 4 bloky. V roce 2021 je nominální výkon jednoho bloku 510 MWe a 1444 MWt.

2.1.1 Části palivového cyklu

Palivový cyklus má 3 části: přední, střední a zadní

Přední palivový cyklus

Jde o těžbu uranu až po zavezení palivového souboru do skladu jaderných paliv. Nejvýznamnější část cyklu je technologie obohacování uranu, jelikož se významně podílí na ceně.

Střední část cyklu

Jinými slovy energetické využití paliva v reaktoru, což znamená doba paliva v reaktoru. Zdroje také uvádí, že začátek středního cyklu začíná už ve skladu. Ukončení palivového středního cyklu lze chápat vyvezením paliva z reaktoru do skladovacího bazénu, ale bohužel tato definice není úplně přesná. Například v Dukovanech je palivo uloženo ve skladovacím bazénu, které je opět zaváženo do reaktoru, takže konec cyklu je až, když se palivo zaveze do meziskladu vyhořelého paliva.

Zadní část

Jde o nakládání s vyhořelým palivem od doby, co bylo vyvezeno z reaktoru. Pojem vyhořelé palivo je trochu zavádějící, protože ve skutečnosti bylo využito jen zlomek paliva. Jde to chápat tedy jako stav, kdy se v daném reaktoru palivo nedá dále využívat.

2.1.2 Palivový cyklus JE Dukovan

Reaktor VVER-440/213 je reaktor druhé generace a jedná se tlakovodní reaktor východního typu. Nominální výkon je 510MWe a 1444MWt. V aktivní zóně reaktoru je 312 palivových kazet hexagonálního průřezu. Do vybraných palivových kazet na 37 pozicích v aktivní zóně jsou zasouvány regulační klastry. Díky těmto klastrům a kyseliny borité regulujeme výkon reaktoru. Chladivo a moderátor se používá demineralizovaná lehká voda. Teplota chladiva na vstupu do aktivní zóny je 267 °C a na jejím výstupu 297 °C. Jaderná elektrárna Dukovany je momentálně provozována na pětiletý cyklus. V budoucnosti je plán přejít na šestiletý cyklus.



Obr. 2.1: Chování paliva při ozařování [22]

2.2 Projektová palivová vsázka

Na začátku provozu JE Dukovany se předpokládalo, že využití jaderného paliva bude v tzv. tříletém cyklu. To znamenalo, že každá palivová kazeta bude každý rok na jiném místě v reaktoru po dobu tří let. Po tříletém cyklu byla kazeta vyměněna za novou a byla umístěna do bazénu použitého paliva. Za rok byla teda vyměněna 1/3 palivových kazet. Schématem překládky bylo umístění nových palivových kazet na okraj aktivní zóny a po letech je přesouvat ke středu aktivní zóny. Toto schéma nebylo z ekonomického ani ze zatěžovacího hlediska ideální, protože nové palivo má vyšší výkon, a to přispívalo k degradaci reaktorové

nádoby. Díky zlepšení parametrů paliva mohly Dukovany přejít v roce 1996 z tříletého na čtyřletý cyklus. V roce 2003 dokonce na pětiletý cyklus.

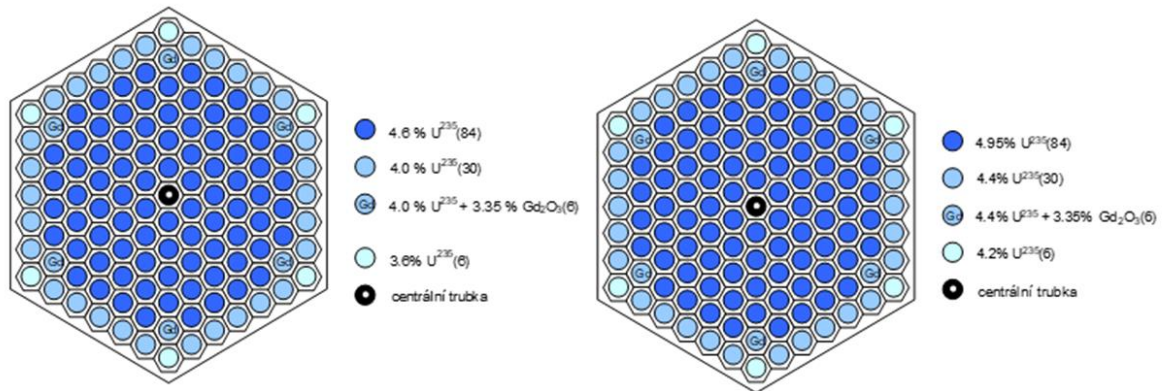
2.3 Palivo Gd-2M+

Palivo Gd-2M+ je jaderné palivo od firmy TVEL, které se používá v JE Dukovany. Je to modernizovaná verze uran-gadoliniového paliva druhé generace. V září roku 2014 dostal první blok právě toto palivo. Optimalizace tohoto paliva spočívá v konstrukci palivového proutku a jeho palivové tabletky, která byla mírně zvětšena, také už není vyráběna s centrálním otvorem. Díky těmto optimalizacím se zvyšuje obsah uranu v palivovém souboru až o 9 kilogramů. Současně je vyšší i obohacený uranem 235 na 4,76 % oproti 4,38 %. Tato změna umožní zachování pětiletého palivového cyklu.

Palivová kazeta paliva Gd-2M+ má šestiúhelníkové průřez. V kazetě je uloženo 126 palivových proutků rozmístěných v trojúhelníkové mříži. Další základní parametry jsou shrnuty v Tab.2.1.

Tab. 2.1: Základní parametry palivového souboru Gd-2M+ [23]

Palivová tabletky	Gd-2M+	Gd-2M+ 4,76
Vnější průměr [mm]	7,70	7,70
Vnitřní průměr [mm] "díрка"	0/1.2	0/1.2
Výška tablet [mm]	10 - 12	10 - 12
Palivová kazeta		
Střední obohacení kazety [%]	4.38	4.76
Max.obohacení proutku v kazetě [%]	4.60	4.95
Střední vyhoření [MWd/tU] souboru kazet	53000	58000*
Max. vyhoření [MWd/tU] souboru kazet	57400	60000*
Maximální proutkové vyhoření		64000*
Rozměr klíče [šestihřanný tvar] [mm]	145	145
Celková hmotnost [kg]	225	225
Hmotnost paliva [kg U]	135.5	135.5
Délka [včetně pružných kolíků] [mm]	3217	3217
Délka sloupce tablet [mm]	2480	2480
Materiál obálky kazety	Zr+2.5%Nb	Zr+2.5%Nb
Tloušťka obálky kazety [mm]	1,5	1,5
Počet palivových elementů v kazetě	126	126
Materiál povlaku	Zr+1%Nb	Zr+1%Nb
Průměr palivového elementu [mm]	9.10	9.10
Rozteč pal. elementů [mm]	12.3	12.3
Tloušťka povlaku [mm]	0,60	0,58



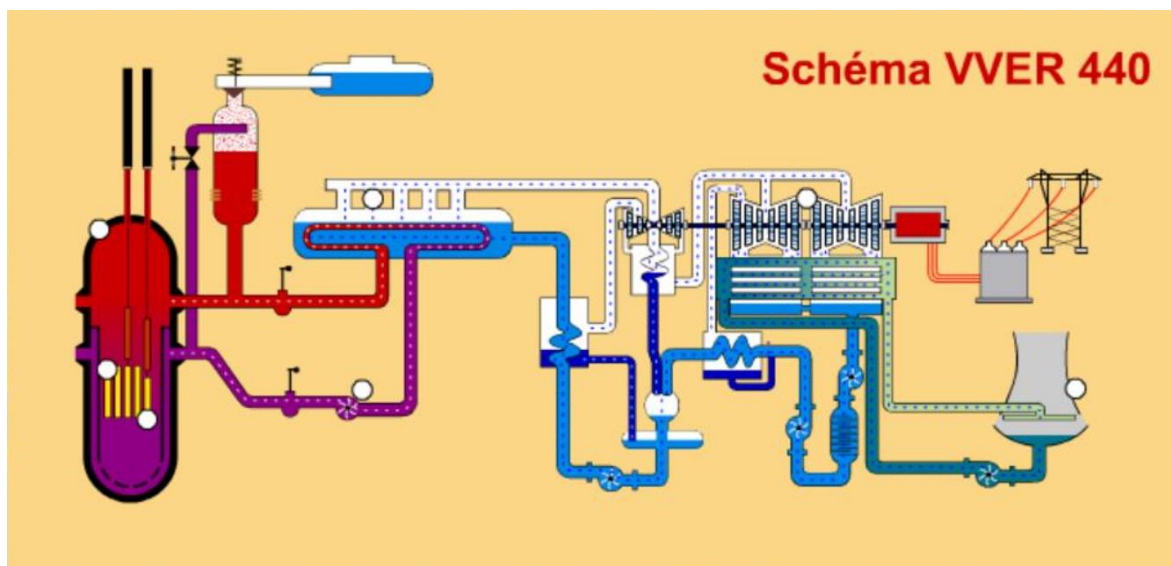
Obr. 2.2: Palivo Gd-2M+ JE Dukovany [23]

2.4 VVER-440

VVER (Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor) je ruský tlakovodní jaderný reaktor, který je instalován v českých jaderných elektrárnách. Tlakovodní reaktory představují cca 60 % všech světových energetických reaktorů. Díky své vysoké bezpečnosti se tlakovodní reaktory používají k pohonu v jaderných ponorkách. Palivem tlakovodního reaktoru jsou pelety z oxidu uraničitého (UO_2), který je obohacen 3-5 % U^{235} . Pelety jsou uspořádány do palivových tyčí a ty jsou v souborech vloženy do aktivní zóny reaktoru [13]. Moderátor a chladivo je obyčejná voda, která proudí v primárním okruhu pod velkým tlakem a o teplotě cca. 300 °C. Voda z primárního okruhu ohřívá v parogenerátoru vodu sekundárního okruhu, která se mění v páru a přivádí se na vysokotlaký díl turbíny, poté je pára přehřívána v ohříváči a přivádí se na 3 nízkotlaké díly turbíny. Celé schéma tlakovodního reaktoru je ukázáno na [Obr. 2.2]

Typické parametry reaktoru **VVER-440**:

- Obohacení U^{235} na 4.38 % až 4,76 %
- Maximální vyhoření paliva 60 MWd/kg
- Rozměry aktivní zóny 3,08 m v průměru a 3,93 m výška
- Teplota vody na výstupu z reaktoru 297 °C
- Tlak vody 12,25 MPa



Obr. 2.3: Tlakovodní reaktor VVER-440 []

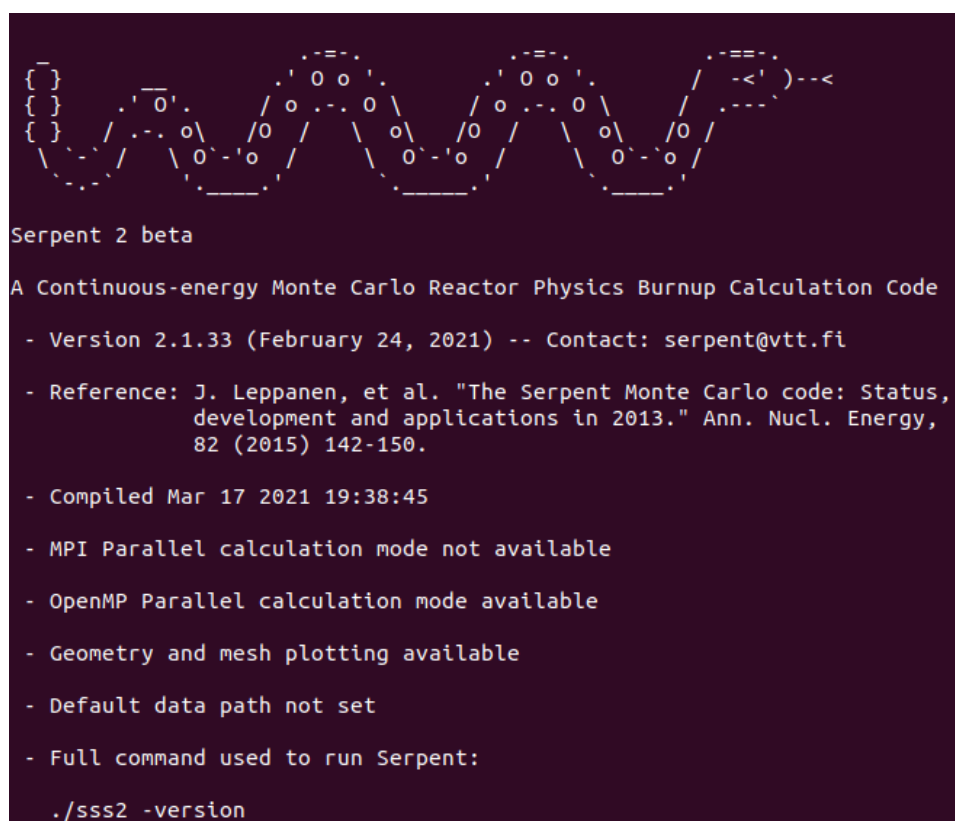
3 Simulace v kódu Serpent

Jedná se o finský výpočetní kód, který počítá a simuluje transportní rovnice palivových cyklů, kritičnost a simuluje transport neutronů a fotonů. Serpent je vyvíjen od roku 2004 institutem VTT Technical Research Centre of Finland. Dříve se jednalo o jednoduchý kód, ale postupem času došlo k vylepšení na aktuální verzi Serpent 2, jež je použita v této bakalářské práci. Serpent je napsán v jazyce ANSI-C a je určen pro systém Linux, ale lze použít i na Mac. Kód využívá metody Monte Carlo. Metoda Monte Carlo je založena na principu generátoru náhodných čísel, při které výpočet simuluje cestu neutronu náhodným generováním. Postupně si tyto informace ukládají, poté se tento proces opakuje a na základě těchto informací vyhodnotí správný výsledek [19, 20].

Přesnost výsledku je možné ovlivnit užitím následných parametrů:

- Správný algoritmus výpočtu
- Kvalitní generátor náhodných čísel
- Počet iterací
- Kontrola získaného výsledku
- Knihovny jaderných dat

Jak už bylo řečeno Serpent se spouští v Linuxovém terminálu příkazem `./sss2` po volání konkrétní složky, která Serpent obsahuje. Zároveň příkaz `sss2` lze spustit se zhruba dalšími dvaceti volbami, které nabízejí možnosti přeskočit určité kroky při zpracování vstupního souboru, přiřadit počet jader procesoru výpočtu, nebo speciální příkazy, které vykonávají samostatnou operaci bez nutnosti použití vstupního souboru. Pomocí příkazu `./sss2 -version` se dostaneme do základního rozhraní Serpentu (Obr.3.1), kde zjistíme aktuální verzi, OpenMP paralelní výpočet a hlavně, zda jsou propojená jaderná data s databází Serpent. Výstupní simulací je několik výstupních souborů, které obsahují číselná data s výsledky, také je možný grafický výstup ve formě PNG [19, 20].



```
{ }
{ }
{ }
Serpent 2 beta
A Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code
- Version 2.1.33 (February 24, 2021) -- Contact: serpent@vtt.fi
- Reference: J. Leppanen, et al. "The Serpent Monte Carlo code: Status,
development and applications in 2013." Ann. Nucl. Energy,
82 (2015) 142-150.
- Compiled Mar 17 2021 19:38:45
- MPI Parallel calculation mode not available
- OpenMP Parallel calculation mode available
- Geometry and mesh plotting available
- Default data path not set
- Full command used to run Serpent:
./sss2 -version
```

Obr.3.1: Základní rozhraní kódu Serpent [vlastní tvorba]

3.1 Úvod do syntaxe

Palivo (UO₂, TRISO)

Ve výpočetním kódu Serpent se definuje palivo dvěma způsoby. Pro tuto práci byly použity oba způsoby definice. V PWR reaktorech v našem případě se jedná o reaktor VVER-440 jsou paliva ve formě palivových tyčí obsahující palivové proutky. Palivové proutky jsou definovány pomocí příkazu *pin*. Příkaz *pin* vytváří univerzum ve formě nekonečně dlouhých sousých válců, kde uživatel zadává materiál a tloušťku příslušné vrstvy. Další typem jsou paliva vícevrstevných částic TRISO (viz. kapitola 1.2.2), pro které se používá příkaz *particle*. Tento příkaz tvoří universum plášťů koulích, kdy prostor mezi pláští je vyplněn daným materiálem, tím se vytváří vícevrstvá částice [19, 20].

Syntaxe příkazu *pin*:

```
pin <id>
  <mat 1> <r1>
  <mat 2> <r2>
```


...

<mat n>

Kde

<id> označení,
 <mat 1> <mat 2> je materiál,
 <r1> <r2> je vnější průměr,

Syntaxe příkazu *particle*

particle U <mat 1 R1> <mat 2 R2> ...

Kde

U značí číslo universa částic,
 <mat 1 ... mat N> je materiál příslušných vrstev,
 <R1 ... R N-1> je vnější průměr vrstev částice,

Pomocí příkazu *pbed* jsou nahrány jednotlivé částice do simulace a pomocí universa a příkazu *fill* vloženy do buňky [19,20]. Příklad vytvoření paliva:

```
particle 1
fuel          0.0250
buffer        0.0340
IPyC          0.0380
SiC           0.0415
OPyC          0.0455
matrix

pbed u10 2 "xyz1.txt"
```

První řádky definují rozměry a materiály klasické TRISO částice (viz obr.1.1) Příkaz *pbed* připojuje externí soubor podobně jako příkaz *include*, ale slouží pouze pro vytvoření modelu paliva v reaktorech HTGR.

Povrchy

Povrchy nebo rozhraní jsou určeny k definování tvaru a rozměru buňky. Serpent nabízí různé typy povrchů přes geometrické tvary ve dvou rozměrech až po trojrozměrná tělesa zahrnující krychle, koule a válce až po základní plochy kolmých na osy třídimenzionálního systému. Tyto povrchy jsou předem známé a jsou uvedeny v manuálu Serpent [19, 20]. Syntaxe příkazu surf je následující:

```
surf <id> <type> <param 1> <param 2> ...
```

Kde

<id>	je identifikátor (název) povrchu
<type>	je typ povrchu
<param 1> <param 2> ...	jsou parametry povrchu (rozměry)

Buňky

Definování buněk patří k dalšímu kroku po vytvoření základních obrysů objektu pomocí povrchů. Určení, zda je buňka definována z vnitřní nebo z vnější strany povrchu určuje znaménko plus (značí vnější stranu) či mínus (značí vnitřní prostor ohraničený povrchem) [19, 20]. Syntaxe buňky je popsána dále:

```
cell <name> <u0> <mat> <surf 1> <surf 2> ...
```

Kde

<name>	je název buňky,
<u0>	je prostor (univerzum),
<mat>	je materiál,
<surf 1> <surf 2> ...	jsou povrchy,

Rozmístění palivových částic (-disperse)

V reaktorech HTR jsou obsaženy desítky až stovky tisíc palivových elementů a tento element obsahuje až několik tisíc mikroskopických pokrývaných částic. Kvůli tomu byl v kódu Serpent vyvinut speciální script, který náhodně rozmístí kulovité částice a vytvoří nový soubor. Spouští se přímo v terminálu operačního systému s příponou příkazu *./sss2 -disperse* [19, 20]. V Serpentu se toto palivo konstruuje skládáním kulových materiálových

vrstev o různých poloměrech (viz tabulka 1.1). Rozložení částic v matici lze modelovat třemi způsoby. V našem případě se jedná o explicitní model rozložení, protože se tento typ nejvíce podobá skutečnosti.

```

robert@robert-VirtualBox:~/Plocha/Serpent/sss2132$ ./sss2 -disperse

Random particle distribution file generator launched...

1 Enter volume type: 1 = sphere
                  2 = cylinder
                  3 = cube
                  4 = annular cylinder
                  5 = cuboid
                  6 = parallelepiped

2

2 Enter cylinder radius (cm): 0.3780
3 Enter cylinder bottom coordinate (cm): 0
4 Enter cylinder top coordinate (cm): 1
5 Enter number of particles (> 1) or packing fraction (< 1): 0.4
6 Enter particle radius (cm): 0.0455
7 Enter particle universe: 1

8 More particles? (y/n): n

9 Enter file name: xyz_1

10 Use grow and shake algorithm? (y/n): y

11 Enter particle shake factor (fraction of particle radius): 0.05
    Enter particle growth rate (fraction of particle radius): 0.05

```

Obr.3.2 speciální script (-disperse) [vlastní tvorba]

Po zadání příkazu uživatel vybírá v (1) předem definovanou podobu prostoru, ve kterém budou částice rozmístěny. Následně uživatel definuje rozměr daného prostoru (2-3). V dalším kroku je zadán počet částic, či podíl, který budou částice ve vymezeném prostoru zaujímat (5). Dále definujeme rozměr částice a její univers (6-7). Krokem (8) je možný přidat další částice, tím by se krok (2-4) opakoval. Krok (9) je pojmenování souboru. Krok (10-11) je algoritmus, který všemi částicemi posouvá do všech směrů a bude zkoušet, zda nedochází ke kolizi. Výstupem této simulace je textový soubor se souřadnicemi jednotlivých částic, kde jeden řádek představuje jednu částici [19, 20]

$$N \quad \langle XN \rangle \quad \langle YN \rangle \quad \langle ZN \rangle \quad \langle RN \rangle \quad \langle UN \rangle$$

Kde

N	je číslo částice,
$\langle XN \rangle \quad \langle YN \rangle \quad \langle ZN \rangle$	jsou souřadnice částice N v XYZ,
$\langle RN \rangle$	je průměr částice,

<UN>

je universum částice.

3.2 Modelování tradičního paliva UO₂

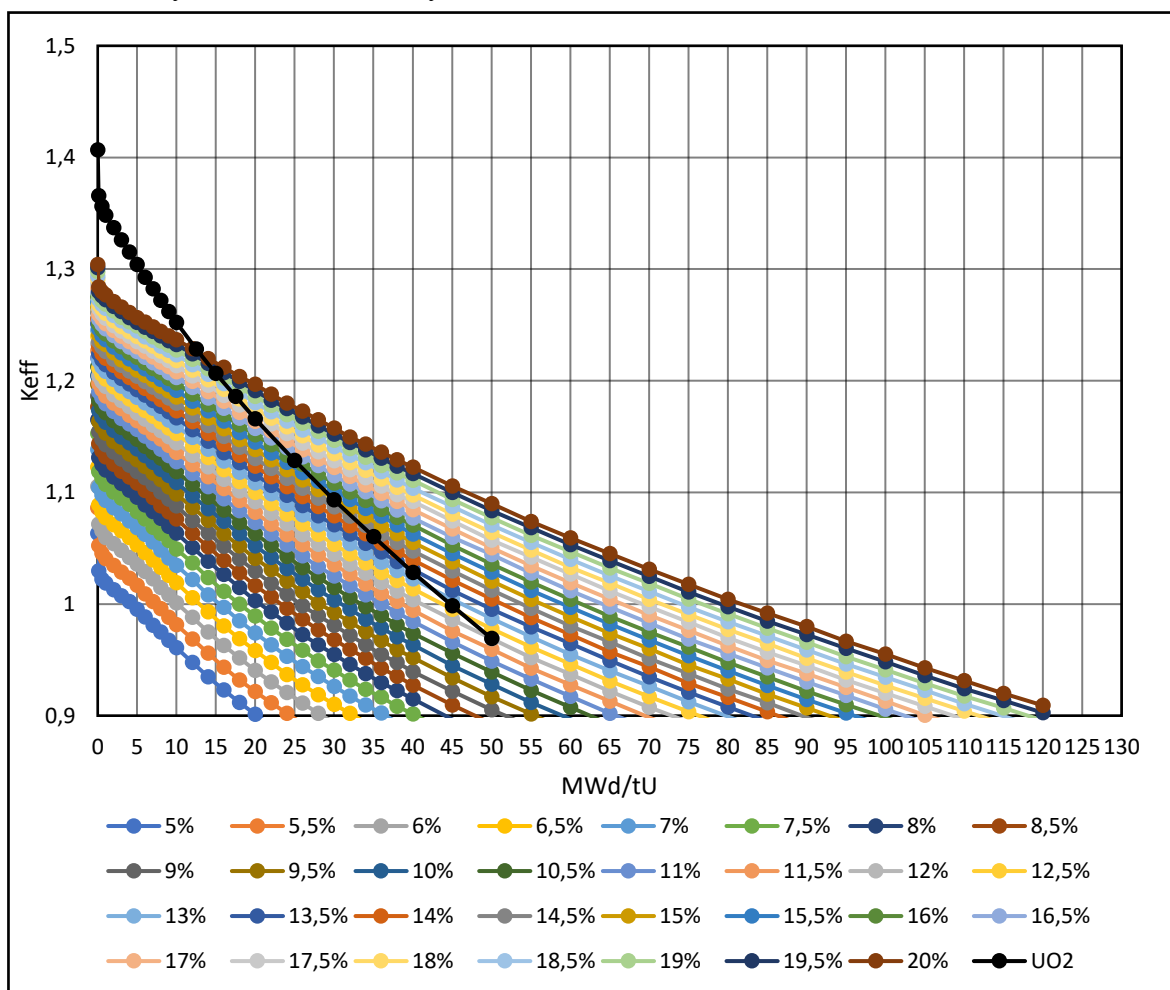
V první praktické části této bakalářské práce bylo pro vymodelování ve výpočetním kódu Serpent vybrán UO₂ (viz. kapitola 1.4). Prvním úkolem bylo vytvořit geometrii paliva UO₂ a palivového proutku VVER-440 a vypočítat efektivní koeficient násobení (Keff), který bude později použit a srovnán s palivem FCM. Jako palivo byl zvolen palivový soubor Gd-2M+ od firmy TVEL, který byl vyvinutý pro reaktory VVER-440 v jaderné elektrárně Dukovany, kde je také v současné době používán. U UO₂ paliva bylo zvoleno obohacení 4,76 %. Rozměry palivových tyčí souboru Gd-2M+ byly použity i pro palivo FCM.

3.3 Modelování paliva s TRISO částicemi

V další části bylo úkolem navrhnout geometrii FCM paliva (viz. kapitola 1.2), jak už bylo dříve řečeno TRISO částice se skládají z kulových materiálových vrstev s různými poloměry (viz. kapitoly 1.2.2, 3.1). Rozložení částic v matici, lze pak modelovat různými způsoby v našem případě byl vybrán explicitní (viz. kapitola 3.1), protože se nejvíce blíží skutečnosti abychom se vyhnuli zkreslení výsledků. V explicitním způsobu modelování je důležitým faktorem pro výpočet množství TRISO částic v palivových tyčích, které je definováno zlomkem stěsnání (pf, packing fraction). Tento zlomek pohybuje od 0 do 1. Pro koncept FCM paliva je optimistický zlomek stěsnání (pf=0,5 [11]), v této bakalářské práci byl zvolen pf=0,4 se střídajícím se obohacení U235 od 5 % do 20 %. Po vytvoření geometrie bylo za úkol vložit palivo s TRISO částicemi do palivového proutku VVER-440. Celková hmotnost uranu v jednom palivovém souboru je 8,53 kg, tím že se zvyšuje obohacení uranu kompenzujeme velké snížení celkové hmotnosti uranu v palivovém souboru. Pro představu u tradičního paliva je v palivovém souboru 135,5kg uranu.

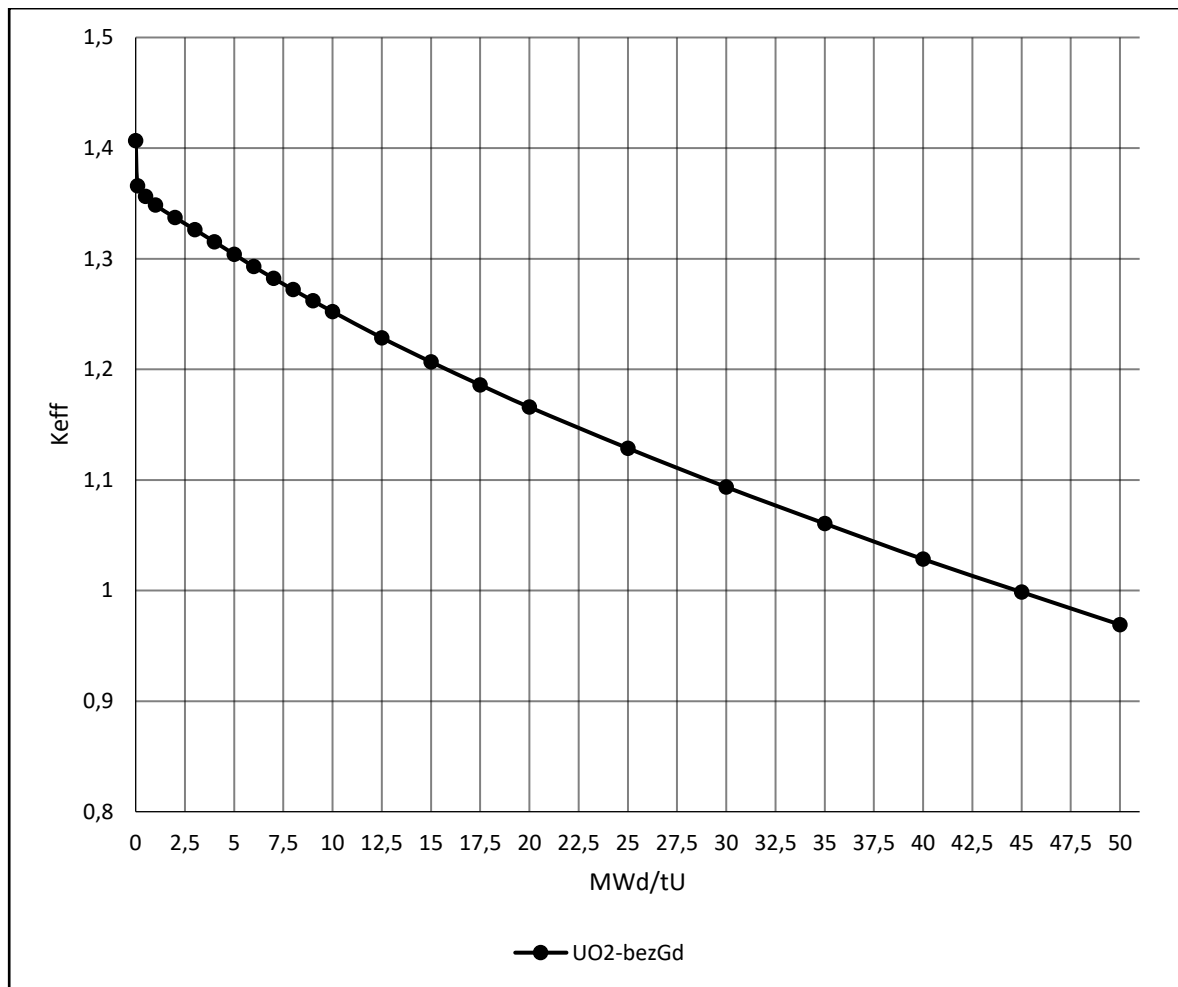
3.4 Porovnání paliva UO_2 s palivem FCM

Z výsledku simulací byl vytvořen graf, na kterém je vidět vyhořívání konceptů paliv (viz. obr. 3.3). U tradičního paliva UO_2 je obohacení 4,76 %. U paliva s TRISO částicemi je měnící se obohacení od 5 % do 20 %. Ve srovnání s UO_2 má palivo s TRISO částicemi nižší koeficient násobení, ale na druhou stranu je vidět, že palivo s TRISO částicemi má až 2x vyšší konečné vyhořívání, to je způsobeno vyšším obohacením. Bohužel vyšší obohacení s sebou nese vyšší finanční náklady.

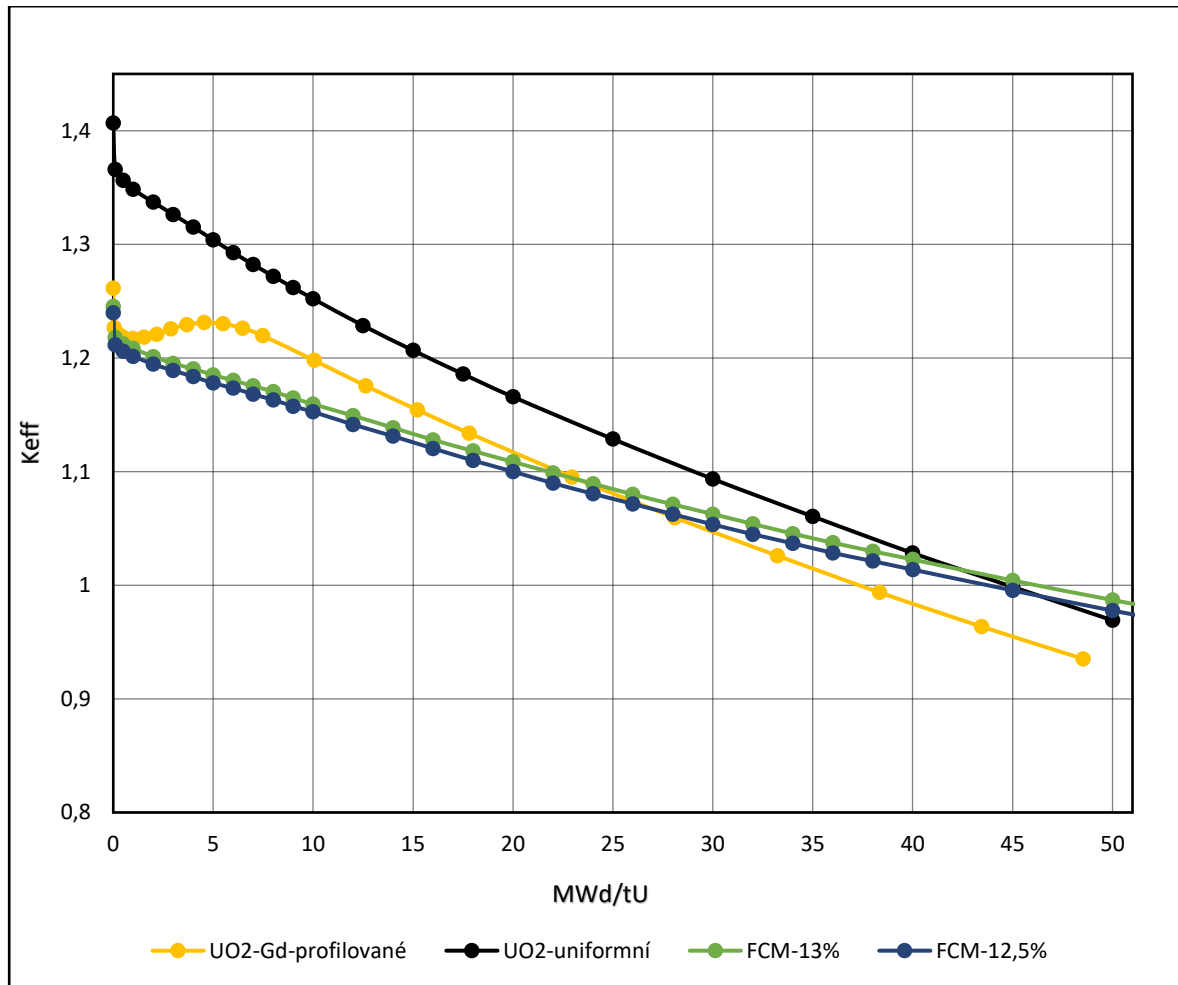


Obr. 3.3 Srovnání vyhořívání FCM paliva s tradičním UO_2 palivem pro všechna obohacení [vlastní tvorba]

V hodnotách $keff=1.0$ a 45MWd/tU se protínají křivky paliva s TRISO částicemi s křivkou tradičního paliva UO_2 (viz. obrázek 3.4). Tento výsledek ukazuje na fakt, že by tyto koncepty paliva s TRISO částicemi s obohacením 12,5-13 % U^{235} mohly nahradit právě tradiční palivo UO_2 .



Obr. 3.4 Vyhořívání tradičního UO₂ paliva bez Gd [vlastní tvorba]



Obr. 3.5 Srovnání vyhořívání FCM paliva s tradičním UO₂ palivem s/bez Gd [vlastní tvorba]

Průběh vyhořívání tradiční palivo UO₂ s obsahem Gd a bez Gd (Gadolinium) je zobrazen v grafu (Obr. 3.5). Průběhy se na začátku vyhořívání razantně liší, rozdíl je způsoben právě gadoliniem. Z grafu je patrné, že gadolinium způsobilo zvýšení koeficientu násobení (k_{eff}), který na hodnotách 2,5 do 8 MWd/tU stoupl až na ($k_{eff}=1,22$), poté jsou průběhy obou paliv stejné.

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo provést rešerši nových konceptů pokročilých paliv, které by zvýšily bezpečnost jaderných elektrárnách a snížily množství radioaktivního odpadu. Cílem také bylo seznámení se s konstrukcí současných palivových souboru pro tlakovodní reaktory VVER-440. Ve výpočetním kódu Serpent bylo úkolem vytvořit a srovnat nový koncept pokročilého paliva FCM s tradičním keramickým palivem UO_2 .

V průběhu celé historie se jaderný průmysl vyvíjel a modifikoval, to platí i o palivových souborech VVER-440. Kvůli havárii ve Fukušimě 1 se ukázalo, že je nutné stále vylepšovat a zabezpečovat jaderné elektrárny. Testování a vývoj ukázal, že palivo pro vysokoteplotní reaktory (HTR) je vhodný koncept pro pokročilá paliva, který může nabídnout vysokou bezpečnost. V kapitole 1 jsou popsány návrhy těchto pokročilých paliv. Ve 3 kapitole jsou popsána základní syntaxe a explicitní způsob modelování TRISO částic, který byl použit právě v kódu Serpent, dále je zde vybraný koncept FCM porovnávám s tradičním keramickým palivem v tlakovodních reaktorech. Koncept FCM paliva přejímá technologii částic z paliva pro HTR reaktory, jeho výzkum dosáhl zatím nejdále z pokročilých paliv, a proto se jeví jako nejlepší kandidát. Díky své podobnosti bylo vybráno FCM palivo s obohacením 12,5 až 13 % U^{235} . FCM palivo má lepší termofyzikální vlastnosti a 2x vyšší konečné vyhoření. Díky nižší hmotnosti paliva a vyššímu obohacení je tvořeno nižší množství radioaktivního odpadu. Tradiční palivo UO_2 má 135,5kg uranu v palivovém souboru, v našem případě nám pro palivo FCM vyšla celková hmotnost uranu 8,53kg na palivový soubor.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] TVEL., *Rosatom has manufactured first Russian accident-tolerant fuel for commercial reactors* [online] Dostupné z: https://tvel.ru/en/press-center/news/?ELEMENT_ID=7903. [cit. 2021-04-22].
- [2] TVEL., *Rosatom completes new stages in ATF development program*[online]. Dostupné z: https://tvel.ru/en/press-center/news/?ELEMENT_ID=8680. [cit. 2021-04-22].
- [3] ULTRA SAVE NUCLEAR., *FCM Fuel. Ultra Safe Nuclear Corporation* [online]. Dostupné z: <https://usnc.com/fcm-fuel/> [cit. 2021-04-22].
- [4] POWERS, Jeffrey J., *Fully Ceramic Microencapsulated (FCM) Fuel in FHRs: A Preliminary Reactor Physics Assessment* [online]. B.m.: Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States). Dostupné z: <https://www.osti.gov/biblio/1185562> [cit. 2021-04-22].
- [5] Nicholas R. Brown, Hans Ludewig, Arnold Aronson, Gilad Raitses, Michael Todosow, *Neutronic evaluation of a PWR with fully ceramic microencapsulated fuel. Part II: Nodal core calculations and preliminary study of thermal hydraulic feedback. Annals of Nuclear Energy* [online]. 62, 548–557. ISSN 0306-4549. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454913002831> [cit. 2021-04-22].
- [6] WESTINGHOUSE., *EnCore Fuel* [online]. Dostupné z: https://www.westinghouse-nuclear.com/Portals/0/about/stories/2017/Encore_fuel_brochure_8_page_062819.pdf?ver=2019-07-09-192913-707 [cit. 2021-04-22].
- [7] WESTINGHOUSE., *Fuel Innovation* [online] Dostupné z: <https://www.westinghouse-nuclear.com/operating-plants/nuclear-fuel/advanced-solutions> [cit. 2021-04-22].
- [8] WESTINGHOUSE., *Nuclear engineering international* [online]. Dostupné z: https://www.westinghousenuclear.com/Portals/0/operating%20plant%20services/fuel/NEI_Westinghouse0918_REPRINT.pdf [cit. 2021-04-22].
- [9] WESTINGHOUSE., *Accident-tolerant Fuel Game-changing Technology for Safety, Reliability and Lower Operating Cost.* [online]. Dostupné z: <https://www.westinghousenuclear.com/Portals/0/Technovation%20Stuff/Accident%20Tolerant%20Fuel%20Brochure%20.pdf> [cit. 2021-04-22].
- [10] WESTINGHOUSE., *Westinghouse EnCore® Accident Tolerant Fuel (ATF) Development and Licensing Approach* [online]. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/docs/ML1826/ML18261A203.pdf> [cit. 2021-04-22].
- [11] Nicholas R. Brown, Hans Ludewig, Arnold Aronson, Gilad Raitses, Michael Todosow., *Neutronic evaluation of a PWR with fully ceramic microencapsulated fuel. Part I: Lattice benchmarking, cycle length, and reactivity coefficients. Annals of Nuclear Energy* [online]. 62, 538–547. ISSN 0306-4549. 2013. Dostupné z:

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454913002818> [cit. 2021-04-22]
- [12] JEREMY Bischoff a další., AREVA NP's enhanced accident-tolerant fuel developments: Focus on Cr-coated M5 cladding. *Nuclear Engineering and Technology* [online] ISSN 1738-5733. Dostupné z: doi: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573317307945> [cit. 2021-04-22].
- [13] WWW.FG.CZ, FG Forrest, a s., Základní typy jaderných reaktorů. Skupina ČEZ - O Společnosti [online]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/zakladni-typy-jadernych-reaktoru> [cit. 2021-04-22].
- [14] Cyprian Mieszczyński. Atomic scale structural modifications in irradiated nuclear fuels. Other [online]. Université Paris Sud - Paris XI, 2014. English. ffNNT : 2014PA112069ff. fftel-01057120f. Dostupné z doj: https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/1057120/filename/VD2_MIESZCZYNSKI_CYPRIAN_11042014.pdf [cit. 2021-04-22].
- [15] LAHODA, Edward J., Peng XU, Robert OELRICH, Kumar SRIDHARAN, Benjamin MAIER a Greg JOHNSON,. Duplex Accident Tolerant Coating for Nuclear Fuel Rods [online]. Dostupné z: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf;jsessionid=E3109BA600E70E1C3F5E48931AF945EC.wapp1nB?docId=WO2018067425&tab=PCTDESCRIPTION> [cit. 2021-04-22].
- [16] Kim, Daejong & Lee, Hyun-Geun & Park, Jeong Yoon & Kim, Weon-Ju. Fabrication and measurement of hoop strength of SiC triplex tube for nuclear fuel cladding applications. *Journal of Nuclear Materials*. 458. 10.1016/j.jnucmat.2014.11.117. [cit. 2021-04-22].
- [17] YEO, S., McKENNA, E., BANEY, R., SUBBASH, G., TULENKO, J., Enhanced Thermal Conductivity of Uranium Dioxide-Silicon Carbide Composite Fuel Pellets Prepared by Spark Plasma Sintering (SPS), *J. Nucl. Mater.* 433 (2013) 66-73. [cit. 2021-04-22]
- [18] IAEA TECDOC SERIES., Accident Tolerant Fuel Concepts for Light Water Reactors [online]. Dostupné z: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE1797web.pdf> [cit. 2021-04-22].
- [19] Technical Research Centre of Finland., Serpent Wiki [online]. Dostupné z: https://serpent.vtt.fi/mediawiki/index.php/Main_Page#Getting_started [cit. 2021-04-22].
- [20] Serpent a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code [online]. Finland, 2010. Dostupné z: <http://montecarlo.vtt.fi/> [cit. 2021-04-22].
- [21] JIŘÍ, Matoušek. Využití paliva na bázi TRISO částic v lehkovodních reaktorech [online] 2018. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/76535> [cit. 2021-04-22].
- [22] ATOMINFO,. Typy jaderného paliva [online]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2016/06/typy-jaderneho-paliva/> ., 2016. [cit. 2021-04-22].
- [23] BOROVIČKA M., Gd-2M+, Presentace, michal.borovicka@cez.cz [cit. 2021-04-22].