

A VVER-1200 üzemanyagciklus-hosszabbításának vizsgálata Monte Carlo programban a ^{155}Gd -izotóp kiegészítő mérge alkalmazásával

Bársony Szabolcs

Paks II Atomerőmű Zrt.

7030 Paks, Gagarin utca 1. 3. emelet 302/B

A gadolínium-oxidot (Gd_2O_3) kiegészítő mérgeként számos könnyűvízes reaktorban alkalmazzák nagy neutronabszorpciós hatáskeresztmetszete és urán-dioxidban való jó elkeverhetősége miatt. A Gd_2O_3 azonban csökkenti az $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ üzemanyag hővezető képességét, ami magasabb tablettahőmérsékletet eredményez. Ennek elkerülése érdekében jelenleg a kiegészítő mérget tartalmazó üzemanyag-tablettákban alacsonyabb ^{235}U -dúsítást alkalmaznak. Azonban a legnagyobb abszorpciójú Gd-izotópokkal (^{155}Gd és ^{157}Gd) dúsított gadolínium felhasználása lehetővé teszi az üzemanyag gadolíniumtartalmának csökkentését, ami javítja az üzemanyag-tabletta hővezető képességét és az üzemelés gazdaságosságát.

Ebben a cikkben a ^{155}Gd -izotóppal dúsított gadolínium-oxidot tartalmazó, VVER-1200 típusú reaktor kazettamodellje, valamint a Novovoronyezi Atomerőműben alkalmazott, természetes gadolíniumot tartalmazó üzemanyag-kazetta modelljei kerülnek összehasonlításra az MCU-PTR Monte-Carlo-alapú program segítségével, a kiegészítő végtelen sokszorozási tényező, az izotópkoncentrációk és a neutronfluxus alapján.

Bevezetés

Az atomerőművekben a nukleáris üzemanyagból származó energia kinyerése több, egymás után ismétlődő lépésben valósul meg, melyet kampánynak neveznek. A kampány hosszának növelése javítja az erőmű gazdasági mutatóit, ezért már az 1990-es években általános tendencia volt a hosszabb üzemanyagciklusok alkalmazása. Az akkori elérendő 15 hónapos kampányhossz helyett a jelenlegi fejlesztések már a 18, valamint a 24 hónapos kampányok elérését tűzték ki célul [1, 2, 3]. A magyar nukleáris ipar is követte ezt a tendenciát, mely eredményeként a Paksi Atomerőműben 2015-től kezdődően áttértek a 15 hónapos kampányra.

A kampányhossz növelésének reaktorfizikai feltétele a dúsítás növelése, azonban ennek határt szab a bórsavkoncentráció, amely a kampány kezdetén meghaladná a jelenleg megengedett határértéket. A megnövelt dúsításból fakadó nagyobb kezdeti reaktivitás kompenzálására további neutronabszorbens anyagok, pl. gadolínium, alkalmazása jelenti a megoldást. Ezek a nagy abszorpciós hatáskeresztmetszetű anyagok a kampány során kisebb abszorpciójú anyagokká alakulnak át, azaz kiegésznek. A legideálisabb kiegészítő mérge az, melynek kiegészése után nem marad parazitaabszorpció a reaktorban [4].

A kiegészítő mérget kétféle módon használják: az üzemanyag-tablettában elkeverve, vagy különálló pálcákban. Kutatásom az üzemanyagba kevert gadolíniummal foglalkozik a VVER-1200-as reaktorra, mivel a VVER reaktorokban néhány kivétellel a kiegészítő mérget ebben a formában használják.

Cikkemben az irodalmi áttekintést a vizsgálatokhoz használt Monte-Carlo-szimulációs program (MCU-PTR) ismertetése követi, majd bemutatom a kód validálására

használt OECD NEA VVER-1000 benchmark-ot. Ezután ismertetem a kereskedelmi VVER-1200 üzemanyag-kazettákban alapuló elméleti kazettamodelleket, a Monte-Carlo-szimuláció eredményeit, illetve összehasonlítom az elméleti és a jelenleg használatban levő VVER-1200 kazettakialakításokat.

A kiegészítő mérge izotópok dúsításának alapötlete

A természetes gadolínium kiegészítő mérgeként történő alkalmazásának pozitív tulajdonságai mellett van két nemkívánatos hatása. A Gd_2O_3 egyik hátránya az, hogy csökkenti az üzemanyag-tabletta ($\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$) olvadáspontját és hővezető képességét, ami magasabb hőmérsékletet eredményez az üzemanyagban és végeredményben károsíthatja a fűtőelemet [5, 6]. A probléma leküzdésének elméleti módja, a Gd_2O_3 -tartalom ~2%-ra való redukálása a hasadóanyag-dúsítás módosítása nélkül [7]. Azonban a kis mennyiségű gadolínium nem köti le elegendő mértékben a kezdeti reaktivástartalékot, így a feladat megoldásának gyakorlati módja az, hogy az ilyen üzemanyagpálcákban alacsonyabb urándúsítást alkalmaznak. Például, a leendő Paks II-es blokkokhoz hasonló, szintén VVER-1200-as típusú Novovoronyezs 2. blokk Z44B2 és Z33Z2 jelű kazettái 5% és 8%-os természetes gadolíniumtartalommal rendelkeznek, mindemellett az urándúsítás csupán 3,6% és 2,4% tömegszázalék [8].

A másik probléma az, hogy azok az izotópok, amelyek nem égnék ki teljes mértékben, parazitaabszorpciót jelentenek az üzemelés teljes ideje alatt, különösen a kampány végén, rontva a hatékony működést. Erre megoldást jelenthet a nagy neutronabszorpciós hatáskeresztmetszetű izotópokkal dúsított gadolínium alkalmazása. A gadolíniumizotópok abszorpciós hatáskeresztmetszeteit az 1. táblázat mutatja.

1. táblázat: A gadolíniumizotópok mikroszkópikus abszorpciós hatáskeresztmetszete [9]

Izotóp	Előfordulási arány az elemben, %	Abszorpciós hatáskeresztmetszet, barn
term. Gd		49000
¹⁵² Gd	0,20	1100
¹⁵⁴ Gd	2,18	85
¹⁵⁵ Gd	14,80	61000
¹⁵⁶ Gd	20,47	1,5
¹⁵⁷ Gd	15,65	254000
¹⁵⁸ Gd	24,84	2,5
¹⁶⁰ Gd	21,86	0,77

A gadolínium legnagyobb termikus neutronabszorpciós hatáskeresztmetszettel rendelkező izotópjai a ¹⁵⁵Gd és a ¹⁵⁷Gd. Bejmer és Seveborn a svédországi Ringhals 3 nyomottvízes reaktorra vizsgálták a 70%-os ¹⁵⁷Gd-vel dúsított Gd₂O₃ alkalmazásának a hatását, és azt találták, hogy a dúsított Gd a kampányhossz növelése mellett nem befolyásolja negatívan a reaktivitás-együtthatókat [10]. A ¹⁵⁷Gd-izotóp dúsított alkalmazásával kapcsolatban Yilmaz és társai a kedvező abszorpciós hatáskeresztmetszet mellett azt is igazolták, hogy az izotóp gyors kiegészése viszont sérti a pálcateljesítmény egyenlőtlenségi tényezőjének határértékét [11].

Dalle és társai a ¹⁵⁷Gd gyors kiegészése miatt inkább a ¹⁵⁵Gd izotópot vizsgálták [12]. Megállapították, hogy az 1,5% és 4,0% közötti gadolínium-oxid-tartalmú, 100%-os ¹⁵⁵Gd-összetételű és 15%-os ²³⁵U-dúsítású üzemanyaggal nagyon hosszú kiegészés során is magas és stabil reaktivitási szintet lehet fenntartani. Khoshahval a gadolíniumizotópok kiegészését vizsgálta egy Westinghouse 17x17 geometriájú kazettánál [13]. Megállapította, hogy a 157-ös gadolínium 11 MWnap/kgU közelében ég ki, míg a ¹⁵⁵Gd 17 MWnap/kgU környékén. Továbbá a dúsított ¹⁵⁵Gd-ot tartalmazó kazetta reaktivitás-változása simább, ellentétben a dúsított ¹⁵⁷Gd-ot tartalmazó változatokéval. Dalle-hoz hasonlóan ő is arra jutott, hogy a leglaposabb reaktivitási görbét és a leghosszabb kampányhosszt 100%-os ¹⁵⁵Gd-dúsítás alkalmazásával lehet kapni.

Végezetül néhány szó a gazdasági kérdésekről. Egy 17x17-es Westinghouse-kazetta esetén, ha a Gd kiegésző méreg csak ¹⁵⁵Gd-ot tartalmaz, akkor az üzemanyagciklus teljes költsége 2%-kal csökken, amennyiben a Gd dúsítás költsége 30 USD/gramm [11]. D. Campolia és társai szerint az Angra 2 1350 MW villamos teljesítményű nyomottvízes reaktorban a dúsított ¹⁵⁵Gd alkalmazása négy millió amerikai dollár extra profitot termelne. Ez azt jelenti, hogy 371 USD/gramm ¹⁵⁵Gd-ár mellett is még nullszaldós volna a fejlesztés [14]. Viszonyításképp: az arany jelenlegi ára mintegy 62 USD/gramm.

MCU-PTR Monte Carlo számítási környezet

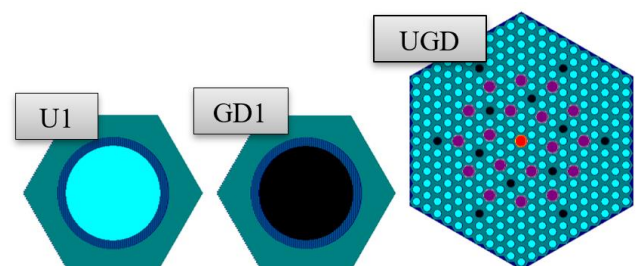
A cikkben ismertetett vizsgálatokhoz az MCU-PTR nevű Monte-Carlo-módszeren alapuló programot alkalmaztam. A sztochasztikus megközelítés a transzportegyenlet megoldásának közvetlen módszere a neutronok mozgásának szimulálásával. Kellően nagy számú neutron

pályájának a követésével tetszőlegesen pontos eredmény érhető el.

Az MCU projekt (Monte Carlo Universal) egy olyan kód kifejlesztésére és gyakorlati alkalmazására irányuló fejlesztésként indult 1982-ben a Kurcsatov Intézetben, amely a neutronok, fotonok, elektronok, pozitronok háromdimenziós rendszerekben történő transzportjának szimulálására szolgál a Monte-Carlo-módszer segítségével [15].

Az MCU-5 csomag moduljait és az MDBPTR50 adatbázist felhasználó MCU-PTR program célja a kiegészés vizsgálata, az effektív sokszorozási tényezőnek, a neutroneloszlásnak valamint egyéb, a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) besorolása szerint főként medencetípusú kutatóreaktorok jellemzőinek kiszámítása. Az MCU-PTR programban a geometriai modul szolgál a számítási modell háromdimenziós geometriájának leírására és a részecskepályák egyenes vonalú szakaszainak megkonstruálására az egymást követő ütközések között. A részecskepályák modellezése során a részecskék anyaggal való kölcsönhatásának koordinátáit a geometriai, az eredményt pedig a fizikai modul határozza meg, amely kiszámítja a részecske energiáját és mozgásának irányát az ütközés után. A fizikai modul három almodulból áll, melyek a gyors, a rezonancia és a termikus tartományban írják le a neutronkölcsönhatásokat [16].

Az MCU-PTR-t még nem alkalmazták VVER-1200-es kazetta modellezésére, ezért első lépésként azt vizsgáltam meg egy nemzetközi benchmark feladat megoldásával [17], hogy az MCU-PTR alkalmas-e a VVER-1200-es kazetta vizsgálatára.



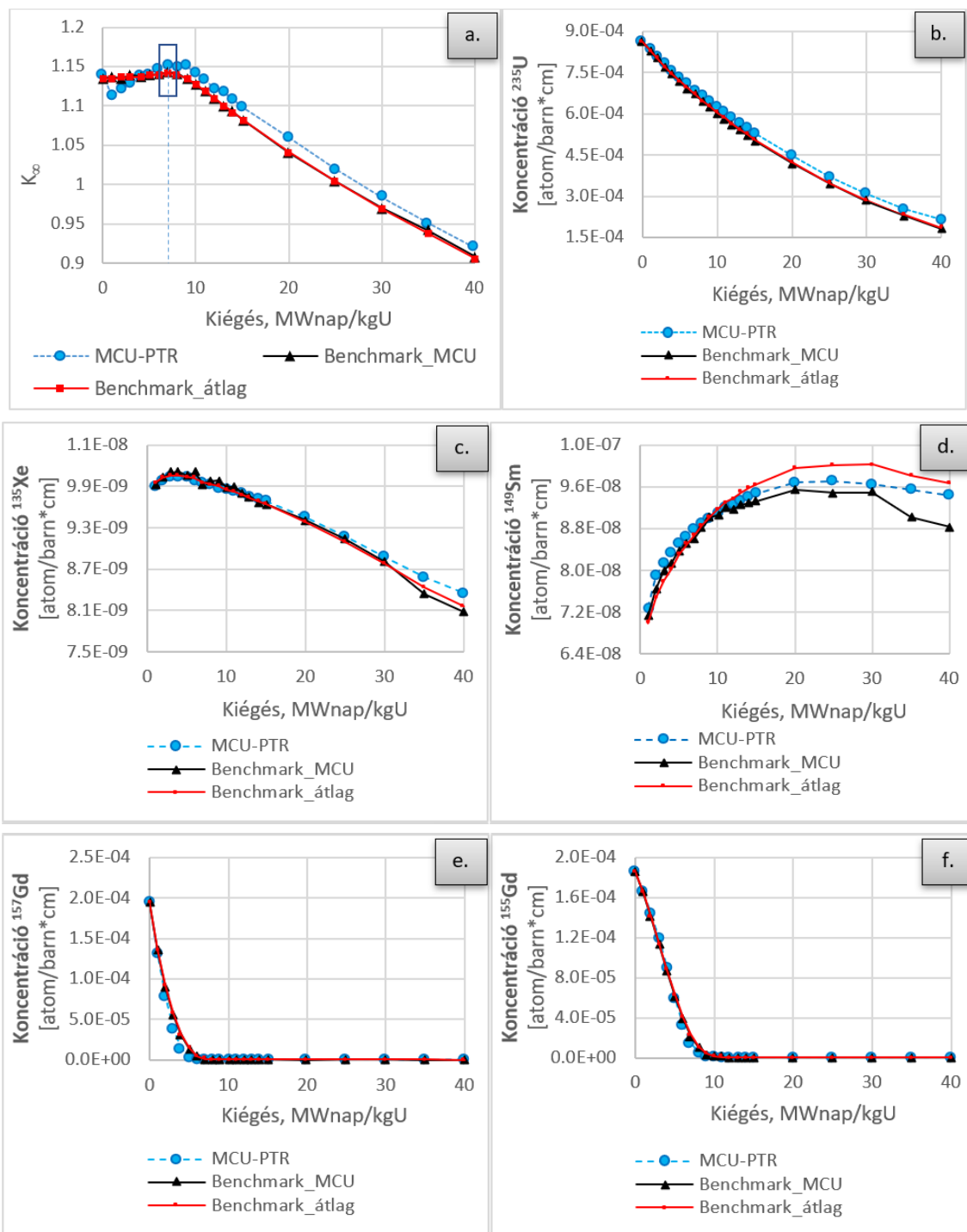
1. ábra: Üzemanyag-kazetta modellje az MCU-PTR programban (UO₂ (U1) és UO₂-Gd₂O₃ (GD1) pálcák, kazetta (UGD))

OECD NEA VVER-1000 benchmark

Az MCU-PTR számításon keresztüli validálására az OECD NEA által 2002-ben közzétett, kis dúsítású urán (LEU), illetve MOX üzemanyag-kazettákat leíró VVER-1000 Benchmark szolgált [17].

A benchmark-beli kazetta 331 darab, négyféle pálcátípusból áll egy hatszögletű rácson elhelyezve. 12 db pálcában van Gd₂O₃ kiégő méreg. A kazetta MCU PTR-beli modelljét a 1. ábra mutatja. Az üzemanyagpálcák dúsítása 3,7%, a kiégőmérleges pálcáké 3,6%, 4% Gd₂O₃-tartalom mellett. A hexagonális kazetta, valamint a pálca rácsosztása 23,6 cm és 1,275 cm.

A 2. ábra mutatja a végtelen sokszorozási tényező (k_{inf}) illetve néhány főbb nuklid koncentrációváltozását a kiégés függvényében a benchmark-ban megadott 2. üzemállapotnak megfelelően. A maximális kiégés 40 MWnap/kgU. A 2.a ábrán a k_{inf} eltér a referenciától, ahol bekeretezve a k_{inf} maximuma szerepel, melyet 7 MWnap/kgU-nál ér el. Továbbá, a 2.e-f ábrákon látható, hogy az eltérés az MCU-PTR és az MCU eredményei között, illetve az MCU-PTR és a benchmark átlag között minimális, más nuklidoknál pedig elfogadható mértéken belül van.

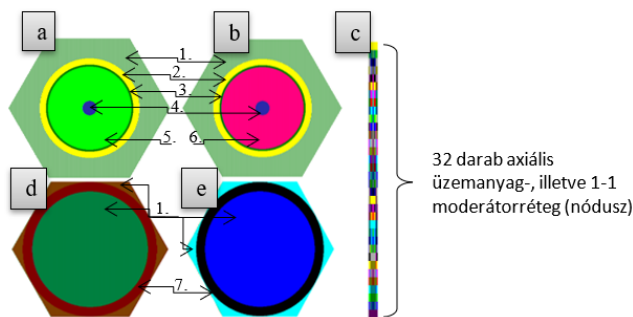


2. ábra: A benchmark-ban közétett, valamint az MCU-PTR programmal számolt nuklid-koncentrációk és a végtelen sokszorozási tényező változása a kiégés függvényében

VVER-1200 üzemanyag-kazettamodell

Az OECD NEA benchmark feladat alapján az MCU-PTR kód alkalmas a VVER kazetta további elemzésére, így az 1200-es típus vizsgálatára is. A VVER-1200 típusú blokk reaktorának jelenlegi terveiben szereplő kazetta a TVS-2M továbbfejlesztése. A kazetta 312 üzemanyagpalcát tartalmaz, valamint egy mérőcsövet és 18 vezetőcsövet.

Az üzemanyag elemicellájának modellje (3.a-b ábra) közepén található egy héliummal töltött központi furat, ezt veszi körbe az üzemanyag és a gázzrés, valamint az E110 cirkónium-ötvözetből álló burkolat. A burkolaton kívül bóros víz (moderátor és hűtőközeg) található. A számítási modell legkisebb egysége az elemicella-modell, mely 34 egyenlő nagyságú axiális rétegből (nódusz) áll; a 32 darab üzemanyagrést 1-1 moderátorréteg veszi körül a 3.c ábrán lilával és sárgával jelölve a pálca alsó és felső részének megfelelően. Egy nódusz 11,66 cm magasságú.



3. ábra: VVER-1200-es pálcamodelljének radiális és axiális keresztmetszetei az MCU-PTR programban:

(a) UO_2 -elemicella, (b) $UO_2 - Gd_2O_3$ elemi cella, (c) elemi cella axiális felosztása, (d) vezetőcső, (e) mérőcső;

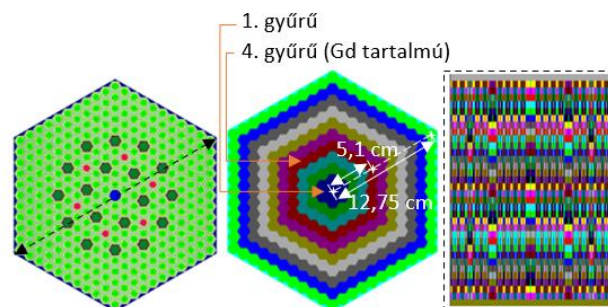
1 - moderátor, 2 - burkolat (E110), 3 - gázzrés, 4 - héliumos központi furat, 5 - üzemanyag, 6 - gadólium üzemanyag, 7 - vezetőcső/mérőcső burkolat (E635).

A kazettamodell szintén 34 darab axiális rétegre, valamint további 11 darab radiális gyűrűre is fel lett osztva, az üzemanyagkötegben kialakult folyamatok pontosabb szimulálása érdekében (4. ábra). Az egyes rétegek és gyűrűk metszeteként kapott régiókban külön-külön kerül kiszámításra a kiégés során az adott régióban kialakuló összes izotóp koncentrációja, illetve a neutronfluxus. Az első 7 pálcát tartalmazó radiális gyűrű, illetve „kör”, a kazetta közepén található, ezt követik a koncentrikus pálcasonként elrendeződő gyűrűk, melyet lezár a moderátorból álló legkülső radiális geometriai forma. Az axiális rétegek magasságának csökkentése javítja a kazettában lejároló változások pontosabb követését, ugyanakkor a számítás időtartamát lényegesen meghosszabbítja.

A természetes és a dúsított gadóliumtartalmú kazettamodellek összehasonlítása

Kiégés szempontjából a leggazdaságosabb kazettakialakítás megtalálása érdekében két elméleti, valamint három kereskedelmi, a gyakorlatban is alkalmazott VVER-1200-es kazettát hasonlítottam össze. A kereskedelmi

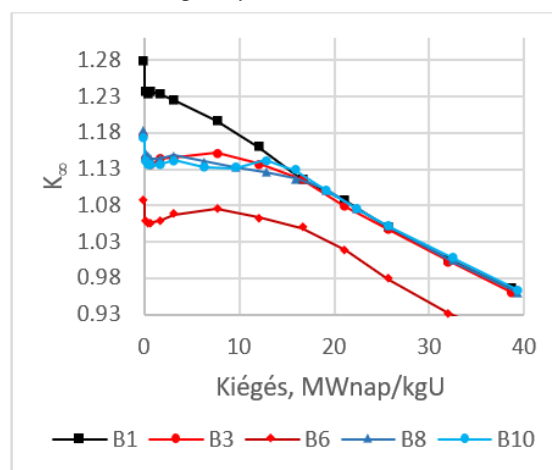
kazettatípusok közül kettő tartalmaz kiégő mérget (B3, B6). Az elméleti kazettatípusokban (B8, B10) a kiégőmérgek száma és kazettán belüli helye az előbbi kettővel azonos, a többi paraméter a 2. táblázatban meghatározottak szerint változik. A 6%-os urándúsítású üzemanyagmodellézést a Westinghouse adalékos UO_2 (ADOPT™)-tablettá fejlesztése inspirálta [18].



4. ábra: A Z44B2 típusú kazetta szerkezeti modellje (balra) annak radiális gyűrűkre (középen) és axiális rétegekre történő felosztása (jobbra)

Az 5. ábra mutatja a k_{inf} változását az elméleti és kereskedelmi üzemanyag-kazettákban. A várakozásoknak megfelelően a természetes izotóppozsítételű gadóliumot és a kisebb dúsítású uránt tartalmazó kazettának a legkisebb a végtelen sokszorozási tényezője.

A két elméleti kazetta összevetéséből látszik, hogy a ^{157}Gd esetén, a végtelen sokszorozási tényező a maximumát nagyobb kiégésnél éri el. A ^{155}Gd esetén a görbe menete sokkal simább és egyenletesebb, mely szintén összhangban van Khoshahval eredményeivel [14]. A végtelen sokszorozási tényező a kezdeti nagymértékű csökkenés után a kiégés előrehaladtával növekszik, addig a pontig, ameddig a ^{155}Gd és ^{157}Gd -izotópok nagyrészt ki nem égnék. Ezen izotópok eltűnésével a végtelen sokszorozási tényező ismét csökkenni kezd, közel kerülve a kiégő mérgek nélküli kazetta reaktivitási görbéjéhez.



5. ábra: k_{inf} változása a kiégés során az egyes kazettáknál

A 6. ábra a gadólium főbb izotópjainak kiégését mutatja a 2. táblázatban ismertetett kazettákban. Mindegyik kiégő mérget tartalmazó kazettatípusban a ^{157}Gd -izotópok gyorsabban égnék ki (11 MWnap/kgU), mint a ^{155}Gd (17 MWnap/kgU), továbbá jól látszik, ahogy ez a két izotóp teljes mértékben eltűnik, míg a többi izotóp megmarad

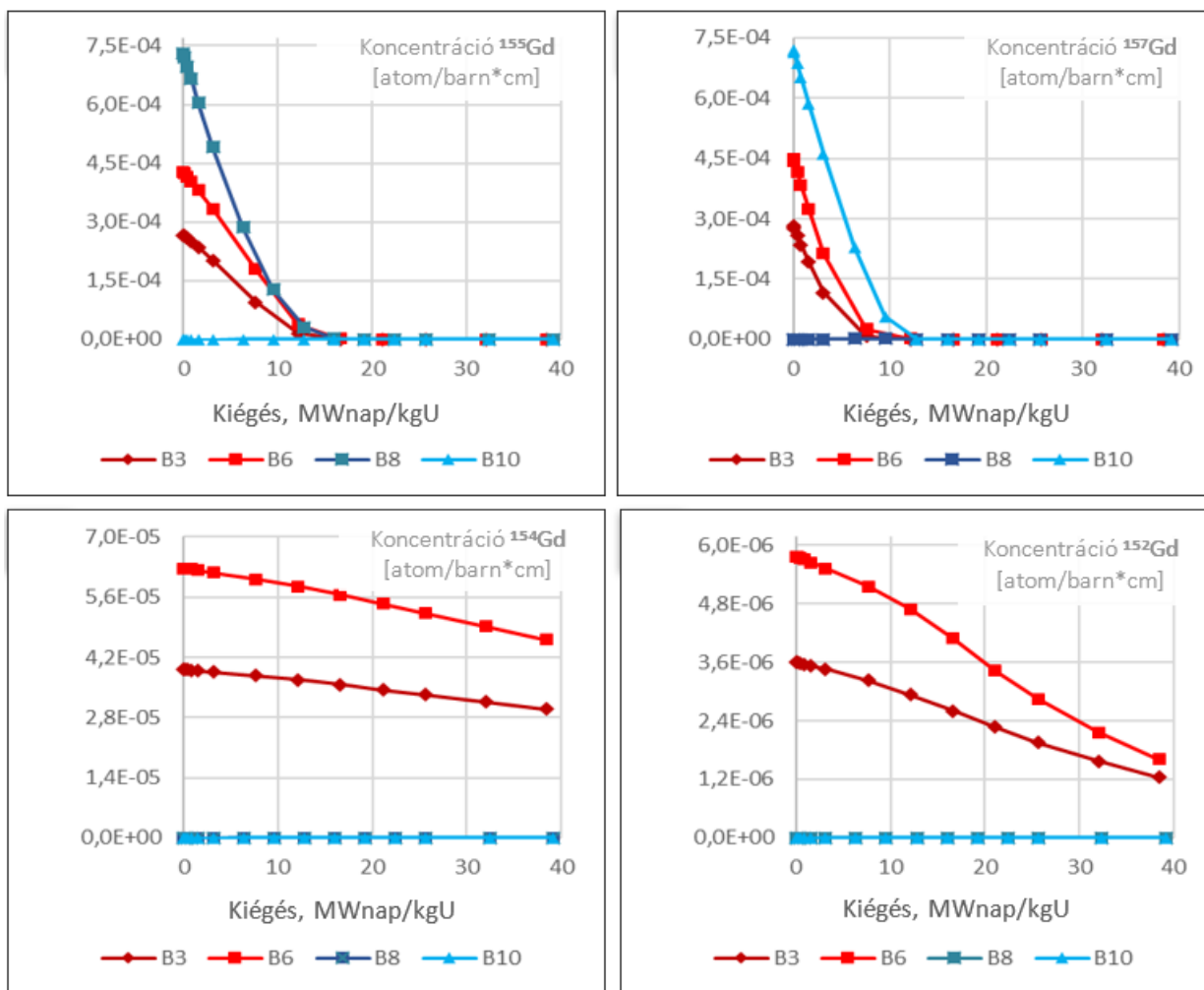
2. táblázat: A kazettatípusok pálcakiosztása

No	kiegőmérőes pálca (UO ₂ - Gd ₂ O ₃)				üzemanyagpálca (UO ₂)	
	pálca szám (db)	Gd ₂ O ₃ -tartalom (%)	Gd-összetétel	²³⁵ U-dúsítás (%)	pálca- szám (db)	²³⁵ U-dúsítás (%)
B1 (Z40)	-	0,0	-	4,0	312	4,4
B3 (Z44B2)	6	5,0	term. Gd	3,6	306	4,4
B6 (Z33Z2)	6	8,0	term. Gd	2,4	306	3,3
B8 (elméleti)	6	2,0	100% ¹⁵⁵ Gd	6,0	306	4,4
B10 (elméleti)	6	2,0	100% ¹⁵⁷ Gd	6,0	306	4,4

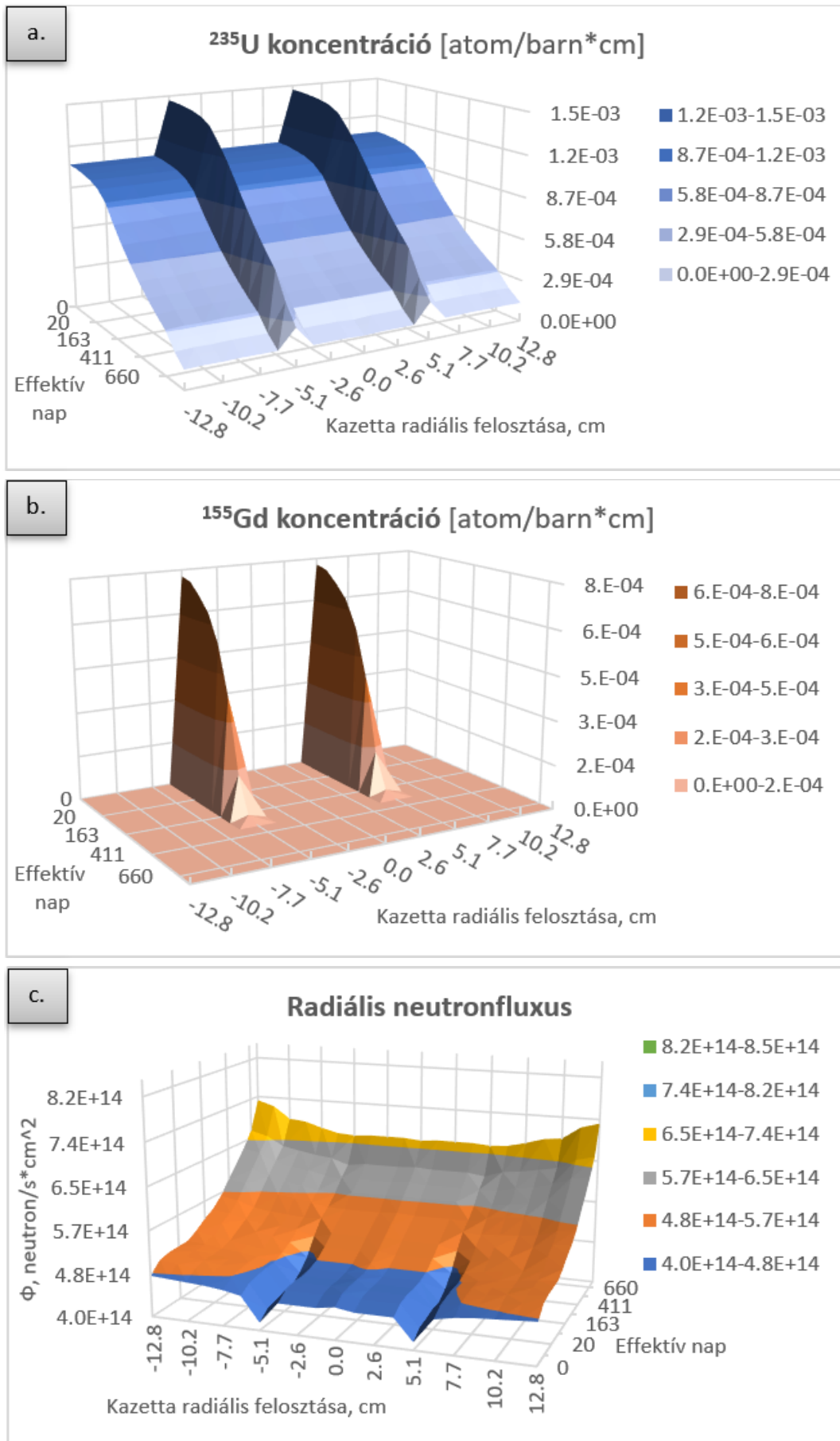
egészen a kampány végéig, parazitaabszorpciót okozva és rontva az üzemanyag-tabletta hővezetőképességét.

A következőkben a Z33Z2 típusú kazettát ismertetem az elméleti kiegészítő mérőes pálcakiosztással (B8), melynek megfelelően a kiegészítő mérőes tartalmazó pálcákban a Gd₂O₃-tartalom 2%, ahol a Gd 100%-ban a ¹⁵⁵Gd-izotópból áll, a pálca ²³⁵U-dúsítása pedig 6%. A 7.a-b ábra mutatja a kiegészítő mérőes pálcák ²³⁵U-, és ¹⁵⁵Gd-koncentrációjának fogyását az effektív napok és a kazetta sugárirányú

felosztásának függvényében. A két-két kiemelkedő csúcsot a modell 4. radiális gyűrűjében elhelyezkedő hat darab vizsgált pálca eredményezi. Látható itt is, hogy a gadolíniumizotóp teljesen kiegészítő és nem hagy maga után semmi „salakanyagot”. Továbbá a Monte-Carlo-szimuláció jól kimutatja a gadolínium hatását, ahogy ezekben a radiális gyűrűkben a neutronfluxust lecsökkenti (7.c ábra). Voltaképp a fluxus a ¹⁵⁵Gd-koncentrációval fordítottan arányos, melynek magyarázata a gadolínium nagy neutronabszorpció hatáskeresztmetszete.



6. ábra: Az egyes gadolíniumizotópok koncentrációcsökkenése a különböző kazettamodellekben (B3, B6, B8 és B10) a kiégés függvényében



7. ábra: Radiális koncentráció- és fluxusváltozás a B8 üzemanyagkazettában

A kiégőmérgezes pálcák számának hatása a ²³⁹Pu-koncentrációra

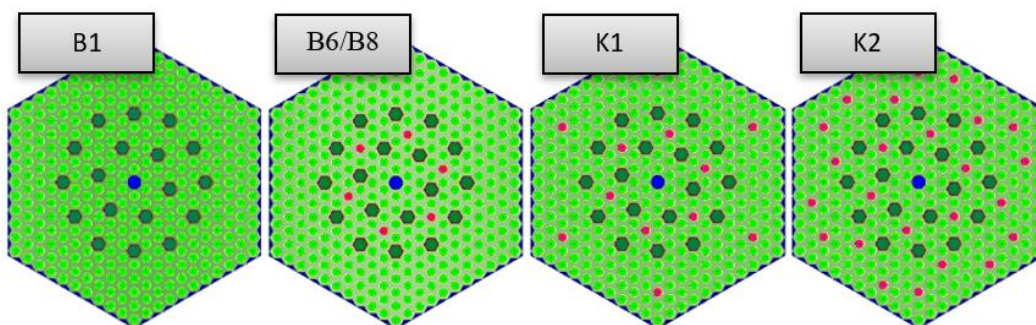
A gadolínium kiegészébeli minőségi vizsgálata után a következőkben a kiégő mérget tartalmazó pálcák darabszámának növelésére bekövetkezett változásokat vizsgálom.

A Gd alkalmazása növeli a termikus abszorpciót, ami a neutronspetrum keményedését eredményezi. A spektrum keményedése csökkenti az ²³⁵U hasadási reakciógyakoriságát, viszont növeli az ²³⁸U befogási reakciógyakoriságát. A befogások számának növekedése pedig javítja a ²³⁹Pu tenyésztését. Mivel a ²³⁹Pu az ²³⁵U-nél nagyobb termikus hasadási hatáskeresztmetszettel rendelkezik, valamint magasabb az egy hasadásban keletkező neutronok száma is, ezért a kiégőmérgezes pálcák

jelenléte a kazettában kampány közbeni reaktivitásnövekedést okoz [19]. A kiégőmérgezes pálcák elhelyezkedését a 8. ábra mutatja.

A korábban vizsgált kazettákkal (B1, B6, B8) összevetek további két ¹⁵⁵Gd-os összetételű 12, illetve 24 pálcát tartalmazó üzemyanyagköteget. A specifikációkat a 3. táblázat ismerteti.

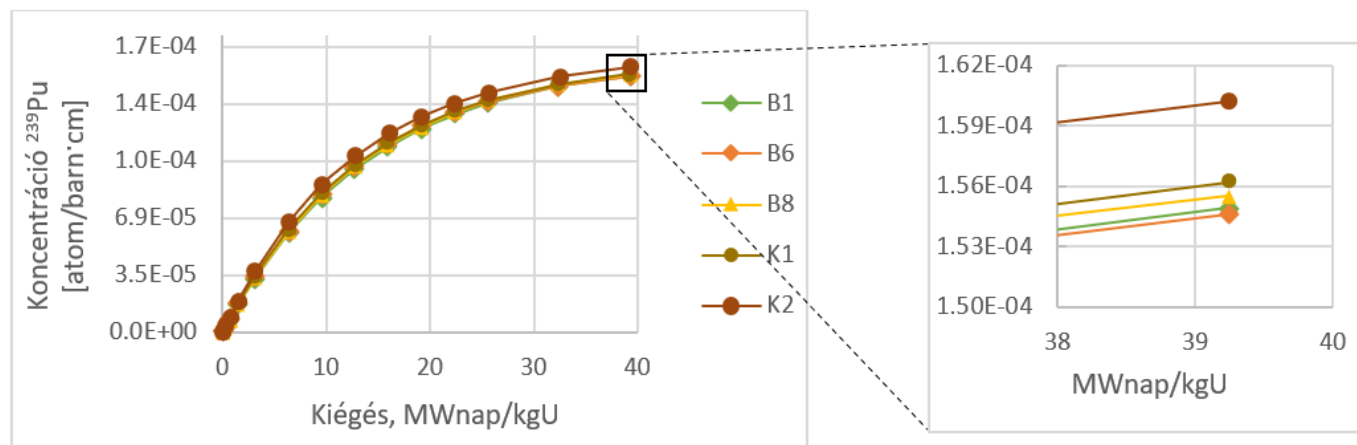
A plutóniumkoncentráció változását a kiégés függvényében a 9. ábra mutatja. A pálcaszám növelése a várakozásnak megfelelően növeli a ²³⁹Pu koncentrációját. Lényeges, hogy a kiégő mérgező nélküli kazettához (B1) képest a természetes összetételű Gd alkalmazása (B6) csökkenti a keletkezett ²³⁹Pu mennyiségét. Viszont azonos pálcaszám mellett a dúsított Gd alkalmazása (B8) nagyobb ²³⁹Pu-koncentrációt eredményez. Mindezek hatását a kampányhosszra a következő részben vizsgálom.



8. ábra: A kiégőmérgezes pálcák elhelyezkedése a kazettában (0, 6, 12, 24 db), vízszintes keresztmetszet

3. táblázat: A kazettamodellek pálcakiosztása

No	TVEG (UO ₂ - Gd ₂ O ₃)				TVEL (UO ₂)	
	pálcaszám (db)	Gd ₂ O ₃ (w%)	Gd-összetétel	²³⁵ U (%)	pálcaszám (db)	²³⁵ U (w%)
B1 (Z40)	-	0,0	-	4,0	312	4,4
B6 (Z33Z2)	6	8,0	természetes Gd	2,4	306	3,3
B8 (elméleti)	6	2,0	100% ¹⁵⁵ Gd	6,0	306	4,4
K1 (elméleti)	12	2,0	100% ¹⁵⁵ Gd	6,0	300	4,4
K2 (elméleti)	24	2,0	100% ¹⁵⁵ Gd	6,0	288	4,4

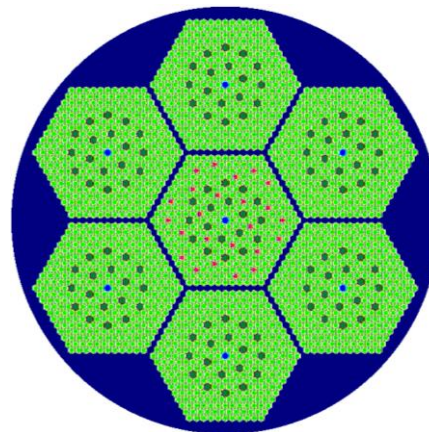


9. ábra: ²³⁹Pu változása a kiégés függvényében

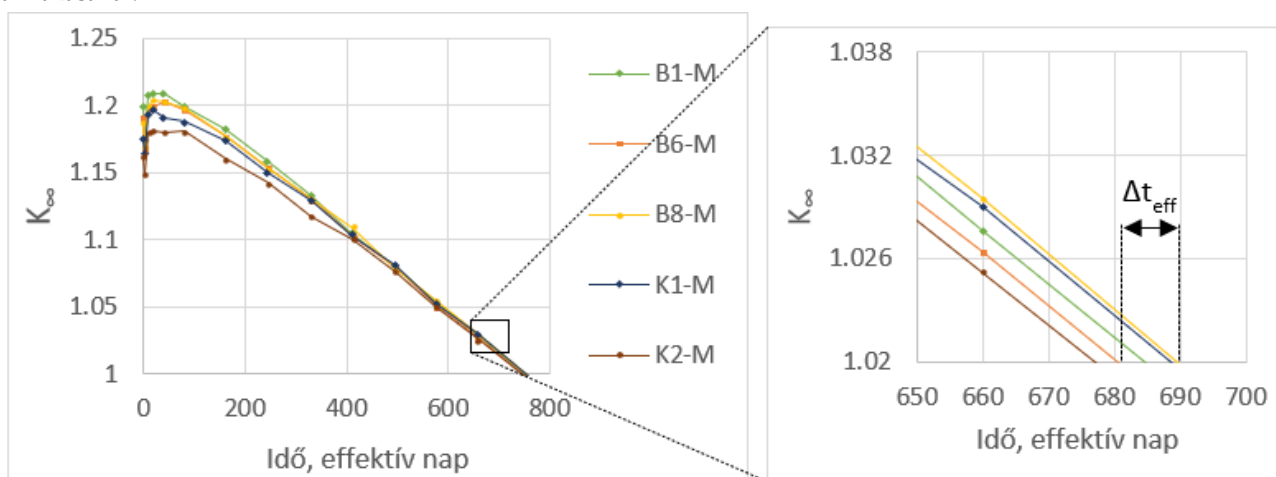
Elméleti „Minicore” modell

A teljes aktív zóna szimulációja időigényes, azonban a számítási idő az eredmények pontosságának romlása nélkül számottevően csökkenthető egy mini aktív zóna modell alkalmazásával. A 10. ábra mutatja a 7 darab kazettából álló Minicore modellt. A modell hat külső kötege nem tartalmaz kiégőmérget, a középen elhelyezkedő kazetta pálcakiosztása a korábban ismertetett 3. táblázatban bemutatott kazettatípusoknak megfelelően változik. A kapott eredményeket egy „M” jelöléssel különböztetem meg az egyedüli kazetta modell eredményeitől.

A 11. ábrán elkülöníthető az egyes kazetták adott mikro környezetben történő kiégése névleges reaktorteljesítményen kiszámítva. A 12 ill. 24 gadolíniumos pálcát tartalmazó üzemanyagkötegek túlzottan negatívan hatnak a neutronháztartásra (K1-M és K2-M), ezzel szemben az elméleti (B8-M) kazettatípussal a kampány kilenc effektív nappal hosszabb, mint a kereskedelmi (B6-M) kazettatípus alkalmazásával.



10. ábra: Elméleti Minicore modell az MCU-PTR programban



11. ábra: A Minicore modellek neutronsokszorozási tényezői az idő függvényében (balra), valamint az elért kampányhossz-nyereség (jobbra)

Összefoglaló

Jelen cikk a dúsított gadolíniumos kiégő mérgek használatának lehetőségeit vizsgálta a VVER-1200-as reaktor üzemanyag-kazettáiban. A vizsgálatokhoz a Monte-Carlo-módszeren alapuló MCU-PTR kódot alkalmaztam. Első lépésben megmutattam egy OECD NEA benchmark feladat megoldásán keresztül, hogy a kód alkalmas a VVER kazetták vizsgálatára.

Ezt követően elemeztem a különböző Gd_2O_3 -tartalmú és Gd-izotópösszetételű kiégőmérgek VVER-1200 üzemanyag-kazetta neutronháztartásra gyakorolt hatását. Azt találtam, hogy ha a kiégő mérgek csak ^{155}Gd -t tartalmaz, akkor a végtelen sokszorozási tényező változása, illetve a kampány

közbeni reaktivitásnövekedés kiegyenlítettebb, mint a tiszta ^{157}Gd , vagy a természetes összetételű Gd alkalmazása esetén.

Az is kitént, hogy a csak ^{155}Gd -izotópot tartalmazó kiégő mérgek teljes mértékben kiég nem hagyva maga után parazitaabszorpciót, ezzel elősegítve a gazdaságosabb üzemeltetést.

A mikro környezetben vizsgált, gazdasági szempontból előnyösebb kazetta (B8-M) – a ^{155}Gd kiégő mérgek, illetve ennek következményeképp megnőtt ^{239}Pu -keletkezés, valamint a 6%-os ^{235}U dúsítás miatt együttesen - 9 effektív nappal hosszabb üzemelést eredményezett, mint a kereskedelemben használt VVER-1200 kazetta.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, Mihail Szergejevics Kuznyecovnak, a Tomszki Műszaki Egyetem Nukleáris Fizika és Erőművek szakirányvezetőjének a hasznos tanácsaiért, akihez mindenkor fordulhattam a reaktorfizikát érintő bármilyen kérdéseimmel. Külön hálával tartozom diáktársaim, barátaim közül Tuan-Hoang Tran-nak, akivel folytatott eszmecsereimből sok ötlet merítetttem és Mohamed Atef Abed-nek, aki szabadidejét nem kímélve segített az MCU-PTR kód elsajátításában és megértésében.

Köszönöm a lehetőséget a Magyar Nukleáris Társaságnak, hogy a XIX. Nukleáris Technikai Szimpóziumon bemutathattam az elért eredményeimet, és Brolly Áronnak, akinek értékes stílusztikai és szakmai észrevételei tovább csiszolták ezt a munkát, hogy cikk születhessen belőle.

Irodalomjegyzék

- [1] Stewart, R., Blakely, C. and Zhang, H. (2021) 'Investigation of a two-year cycle pressurized water reactor core design with increased enrichment and extended burnup limits', *Nuclear Engineering and Design*, 376, p. 111132. doi:10.1016/j.nucengdes.2021.111132.
- [2] Alrwashdeh, M. and Alameri, S.A. (2023) 'A neutronics study of the initial fuel cycle extension in APR-1400 reactors: Examining homogeneous and heterogeneous enrichment design', *Arabian Journal for Science and Engineering* [Preprint]. doi:10.1007/s13369-023-07905-7.
- [3] *China's first hualong one nuclear reactor starts operations* (2020) Reuters. <https://www.reuters.com/article/us-china-nuclearpower-idUSKBN28706B> (Elérés: 05 September 2023).
- [4] Santala, M.I. et al. (1997) 'Odd-isotope enrichment studies of gd by double resonance laser-ionization for the production of Burnable Nuclear Reactor Poison', *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 64(3), pp. 339–347. doi:10.1007/s003400050182.
- [5] Tran, H.-N., Hoang, H.T.P. and Liem, P.H. (2017) 'Feasibility of using GD2O3 particles in VVER-1000 fuel assembly for controlling excess reactivity', *Energy Procedia*, 131, pp. 29–36. doi:10.1016/j.egypro.2017.09.442.
- [6] Fukushima, S. et al. (1982) 'The effect of gadolinium content on the thermal conductivity of near-stoichiometric (U,gd)o2 solid solutions', *Journal of Nuclear Materials*, 105(2–3), pp. 201–210. doi:10.1016/0022-3115(82)90375-0.
- [7] Schlieck, M., Berger, H.-D. and Neufert, A. (2001) 'Optimized gadolinia concepts for advanced in-core fuel management in pwr's', *Nuclear Engineering and Design*, 205(1–2), pp. 191–198. doi:10.1016/s0029-5493(00)00355-1.
- [8] Prytkov, A.N. et al. (2017) 'Specific features of initial fuel load of the innovative power unit under AES-2006 project', *Nuclear Energy and Technology*, 3(4), pp. 307–312. doi:10.1016/j.nucet.2017.11.006.
- [9] TY - BOOK, AU - Oprea, Cris, AU - Oprea, Ioan Alexandru, PY - 2014/05/27, T1 - Cross sections of Gadolinium isotopes in neutron transmission simulated experiments with low energy neutrons up to 100 eV (in press), DO - 10.13140/RG.2.1.4373.5122
- [10] Enriched Gadolinium as Burnable Absorber for PWR, Klaes-Håkan Bejmer, Ola Seveborn, Vattenfall Bränsle AB, S-162 87 Stockholm, Sweden; Sernanders väg 5-518, S-752 61 Uppsala, Sweden
- [11] Yilmaz, S. et al. (2006) 'Development of enriched GD-155 and GD-157 burnable poison designs for a PWR core', *Annals of Nuclear Energy*, 33(5), pp. 439–445. doi:10.1016/j.anucene.2005.11.011.
- [12] Hugo M. Dalle, João Roberto L. de Mattos and Marcio S. Dias (2013) 'Enriched gadolinium burnable poison for PWR Fuel - Monte Carlo Burnup simulations of reactivity', *Current Research in Nuclear Reactor Technology in Brazil and Worldwide* [Preprint]. doi:10.5772/53381.
- [13] Khoshahval, F. (2022) 'The effect of enriched gadolinia and its concentrations on the neutronic parameters of AP-1000 Fuel Assembly', *Radiation Physics and Chemistry*, 195, p. 110086. doi:10.1016/j.radphyschem.2022.110086.
- [14] Campolina, D. et al. (2018) 'Parametric study of enriched gadolinium in burnable neutron poison fuel rods for angra-2', *Annals of Nuclear Energy*, 118, pp. 375–380. doi:10.1016/j.anucene.2018.04.025.
- [15] MCU Project. <http://mcuproject.ru/eabout.html> (Hozzáférés: 2023 Szeptember 5.).
- [16] Alekseev, N.I. et al. (2011) 'MCU-PTR program for high-precision calculations of pool and tank type research reactors', *Atomic Energy*, 109(3), pp. 149–156. doi:10.1007/s10512-011-9337-0.
- [17] (No date a) *A VVER-1000 LEU and MOX Assembly Computational Benchmark: Specification ...* Available at: <https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-01/nsc-doc2002-10.pdf> (Hozzáférés: 2023 Szeptember 5.).
- [18] (2022) *Westinghouse announces next-generation nuclear fuel enhancement at U.S ...* Available at: <https://info.westinghousenuclear.com/news/next-gen-fuel-enhancements-announced> (Hozzáférés: 2023 Szeptember 5.).
- [19] Uguru, E.H. et al. (2020) 'A comparative study on the impact of GD2O3 Burnable neutron absorber in UO2 and (u, Th)O2 fuels', *Nuclear Engineering and Technology*, 52(6), pp. 1099–1109. doi:10.1016/j.net.2019.11.010.