

Kritikussági számítások az új paksi blokkokra a KARATE-1200 program rendszerrel

Temesvári Emese, Hegyi György

HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

Jelen munkában a VVER-1200 reaktorzóna kritikusságát vizsgáljuk a kezdeti és egyensúlyi kampányra, hideg, meleg és üzemi állapotokban. A számításokat a KARATE-1200 stationer programmal végeztük ENDF/B-VI. (ver 6.) nukleáris adatkönyvtárral. Célunk a kódrendszer verifikálásának folytatása volt a szakirodalomban elérhető újabb adatok alapján. A zónaállapot jellemzői (bórsav-, moderátorhőmérséklet és -sűrűség, a töltet kiégettsége) hatással vannak a reaktor gyors leállítását eredményező abszorbens rudak értékességére. Ezeknek a paramétereknek ismerete a kampányok biztonságos tervezésének egyik fontos eleme.

A tervezett blokkok harmadik generációs erőművek, amelyekre szigorú nemzetközi előírások vonatkoznak. Ezek egyikét, az úgynevezett rekritikussági hőmérséklet értékét részletesen is megvizsgáljuk.

Bevezetés

A harmadik generációs reaktorok esetében (EPR, AP1000, VVER-1200 típusok) a biztonságos üzemelés korlátaira vonatkozóan az eddigieknél szigorúbb feltételeket már a reaktor tervezésénél figyelembe kell venni [1-2]. A hatékonyabb üzemeltetés érdekében a kampány a naptári évnél hosszabb, a reaktorteljesítmény az eddigieknél magasabb. Ennek egyik következménye, hogy az üzemanyagpálcák dúsítása magasabb (jelenleg a limit 5 %) és a többletreaktivitás megkötésére gadólinium (Gd) kiegészítő mérge kerül a kazettákba. Ezek a feltételek mind szükségessé teszik a reaktorfizika oldaláról, hogy folyamatosan figyelemmel kísérjük és szimuláljuk az elérhető reaktorméréseket, és vizsgáljuk a reaktor biztonságát nukleáris szempontból.

A tervezett paksi új blokkok megfelelnek a WENRA 2010-ben megfogalmazott biztonsági célkitűzéseinek [3-5]. Ismereteink szerint az orosz Novovoronyezs II atomerőmű két, már üzemelő blokkját a paksihoz hasonló elvek alapján építették. Ezekre a blokkokra 2016 óta több átfogó publikáció jelent meg, amelyekben részletes fizikai méréseket [6], üzemviteli és biztonsági kérdéseket, és információkat találhatunk a primer- és szekunderköri jellemzőkre is [7].

Ezekkel kapcsolatban az üzemeltetés biztonságát növelheti egy olyan hazai fejlesztésű kódrendszer, amely egyrészt a szakirodalomban rendelkezésre álló mérések eredményeit megfelelő pontossággal visszaadja, másrészt realizisztikus modellszámításokkal bizonyítja az előírt paraméterek realitását. Egy ilyen eszköz a KARATE-1200 hazai kódrendszer, amelyet a VVER típusú reaktorok stationer fizikai és termohidraulikai kérdéseire fókuszálva fejlesztettünk. A program alapja az 1990-es évek óta használt KARATE programrendszer [8]. A fejlesztés 2016-ban kezdődött, figyelembe véve az AER együttműködésben összegyűjtött tapasztalatokat is. Az új, nagyobb méretű és anyagukat tekintve összetettebb kazetták kevéscsoport könyvtárát továbbra is a MULTICELL kód biztosítja, a

zónaszámítás (GLOBUS-1200) és a finomhálós kazettaszámítás (SADR-1200) moduljai átalakultak az összetettebb kevéscsoport paraméterezés és technikai feltételeknek megfelelően. A fejlesztésről és az első eredményekről több fórumon beszámoltunk, és készült a NUKLEON számára is három összefoglaló [9-11].

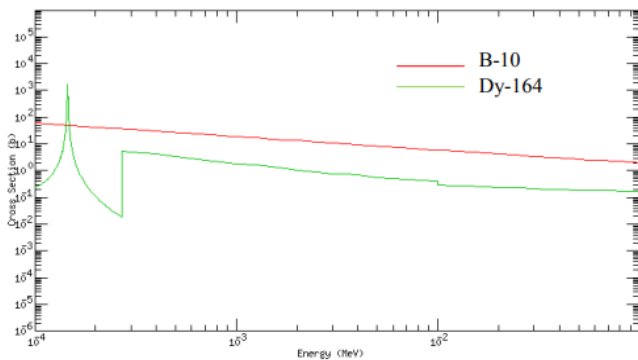
A cikk első fejezete részletezi a VVER-1200 zóna néhány olyan technikai részletét, amit eddig nem mutattunk be.

Ezután az újonnan megismert mérések szimulációját mutatjuk be, majd az utolsó részben a reaktorbiztonság egy általánosságban kevéssé vizsgált paraméter értékét reprodukáljuk a biztonsági kritériumok alapján.

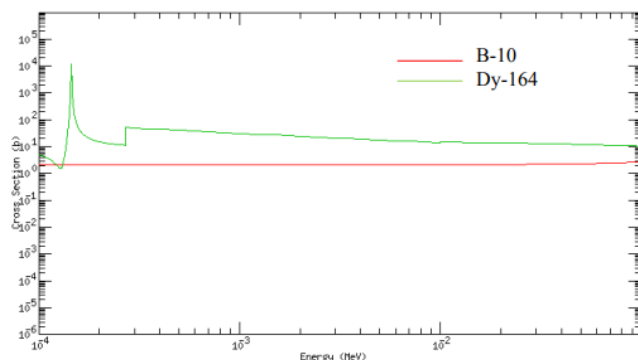
Szabályozó és biztonságvédelmi rudak (SZBV) a VVER-1200 reaktorban

Az Atomenergopojekt a 2000-es évek elején indított egy átfogó programot AES-2006 néven a VVER reaktorok hatékonyabb és biztonságosabb üzemelésének vizsgálatára. Ennek során különböző, axiálisan és radiálisan profilírozott kazettatípusok és abszorbens pálcák tulajdonságait vizsgálták. Az egyik feladat az eddigieknél reaktívabb kazetták tervezése, a másik, hogy olyan zónákat lehessen kialakítani, amelyeknél a teljesítménykövetés minél kisebb teljesítménytorzulást eredményez, ugyanakkor a reaktor lezárása biztonságos. Reaktorfizikai szempontból tehát az abszorbens pálcát szűríteleni kellett (kisebb ^{10}B tartalom), ugyanakkor a számukat növelni, hogy összeségében a zóna lezárása biztonságos legyen.

A szakirodalomban jelenleg különböző típusú stratégiák találhatók. Ebben a cikkben a Novovoronyezs II zónájára jellemző elrendezés a kiindulási alap, mert erre vannak mérések, és a ROSATOM európai ajánlata is ezt tartalmazza. A VVER-1200 abszorbens rúdjai axiálisan két részből állnak: a felső rész B_4C , az alsó, rövidebb rész $\text{Dy}_2\text{O}_3\text{TiO}_2$. Ez utóbbi a teljes rúd 10 %-a [17]. A ^{10}B és a ^{164}Dy izotópok abszorpcióját az 1. ábra, a szórását a 2. ábra mutatja.



1. ábra: A ¹⁰B és ¹⁶⁴Dy izotópok abszorpciós hkm-e

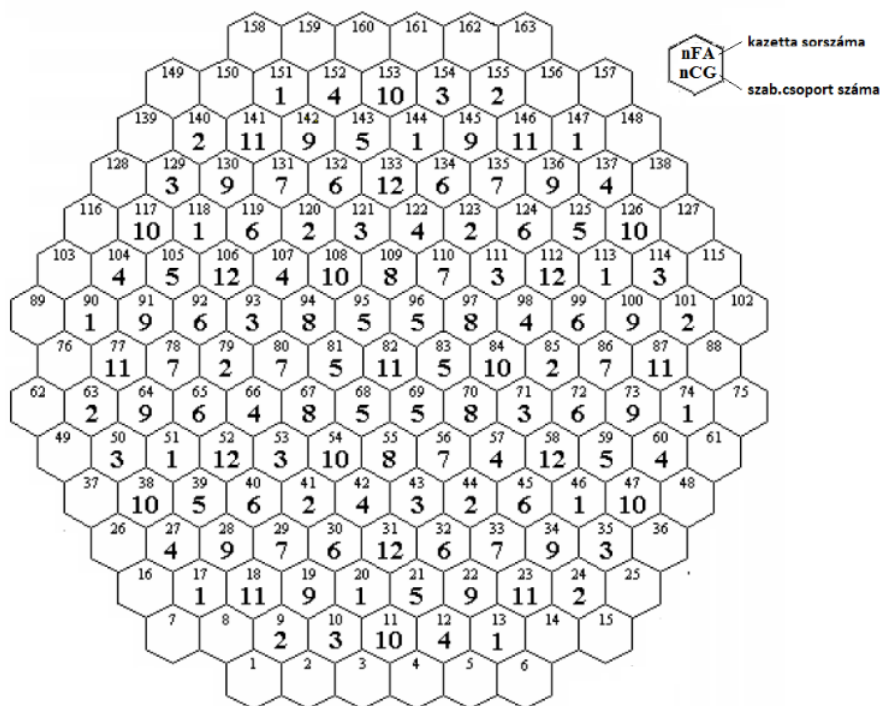


2. ábra: A ¹⁰B és ¹⁶⁴Dy izotópok szórási hkm-e

Ezekből leolvasható, hogy a bór szinte a teljes spektrumban erősebben abszorbeál, mint a diszprózium, míg a szórás esetében az arány fordított. A kisebb abszorpciós, de nagyobb szórási hatáskeresztmetszetű anyag használata a neutronfluxus és a teljesítmény kisebb csökkenéséhez vezet az üzemanyagpálcák környezetében. Összességében így a neutronfluxus-profil laposabb és jobb energiaeloszlást eredményez a zónában. Ez teszi lehetővé a sokféle üzemmód kialakítását. Egy kazettában 18 pálcá mozog párhuzamosan. A reaktorban 121 kazettához tartoznak abszorbens rudak 12 csoportba osztva. Üzemszerűen a 12. csoport segítségével szabályozzák a teljesítményt, ez a zóna felső 10-20%-ában van betolva, azaz a diszpróziumos rész van a zónában. Az SZBV csoportok elhelyezkedése a 3. ábrán látható. Megjegyezzük, hogy gyakorlatban az 1.-8. rúdcsoportok a biztonságvédelmet, a 9.-12. a teljesítményszabályozást szolgálják. A kazetták számozása a hatszög tetején, az SZBV csoportok számozása alatta található. Az üzemvitel során leggyakrabban használt

(11. és 12.) csoportok 60 fokban szimmetrikusak, de a legtöbb csoportra ez nem jellemző.

A nagyszámú SZBV rudak a feltételezett baleseti helyzetek tekintetében újszerű kérdéseket vetnek fel. Úgy tűnik, a konzervatív SCRAM kérdését ennél a reaktornál érdemes átgondolni. Egyrészt jóval több a fennakadás lehetősége, mint az eddigi reaktoroknál, másrészt a fennakadt rúd vagy rudak pozíciója is meggondolandó. Egy sikeres SCRAM esetében csak a kis teljesítményű és kiégett szélső kazettákban nincs abszorbens, azaz a reaktor lezárása optimális. Eddig gyakorlatilag az egymástól távoli rudak fennakadása a migrációs területhez viszonyított nagy távolság miatt nagyon hasonló sokszorozási tényezőhöz vezetett, mint az egy abszorbens fennakadása. Itt egy másik jelenséget figyelhetünk meg: ha egy vagy két abszorbens fennakad a zóna belsejében, a környezet erősen abszorbeáló jellege miatt a perturbáció hatása kicsi.



3. ábra: A VVER-1200 zóna a 12 SZBV csoport elhelyezkedésével

A 3. ábra és a 1. táblázat alapján a következőket érdemes észrevenni:

- Az 1-től 4-ig tartó csoportok 12 klasztert tartalmaznak, amelyek két koncentrikus körben találhatóak, mindegyikben 6 klaszter 60 fokos forgásszimmetriában. Az egyik kör a perifériához közel van, ahol a külső oldalán csak rúd nélküli szerelvények találhatóak. A másik kör a zónán belül van,
- A többi csoportnak, a 10-es számú csoport kivételével, csak a zóna belsejében vannak elemei, távol a perifériától.

A konzervatív SCRAM esetek vizsgálatát itt nem részletezzük, a nagyszámú meghibásodás néhány tanulsága az utolsó fejezetben található.

A kezdeti és az egyensúlyi zónák esetében az irodalomban megtalálható jelöléseket használjuk, amit a 2. táblázatban foglaltunk össze. Megjegyezzük, hogy a töltetek 60 fokos forgási szimmetriát mutatnak a külső peremen a reaktívabb, friss kazettákkal.

1. táblázat: Az SZBV kazetták elhelyezkedése a zónában

Csoport	szimmetria	belső	középső	külső	Össz. kazetta szám
		részén a zónának			
1	60 fokos forgási szimmetria	-	6 darab	6 darab	12 darab
2	60 fokos forgási szimmetria	6 darab	-	6 darab	12 darab
3	60 fokos forgási szimmetria	6 darab	-	6 darab	12 darab
4	60 fokos forgási szimmetria	6 darab	-	6 darab	12 darab
5	60 fokos forgási szimmetria	6 darab	6 darab	-	12 darab
6	30 fokos forgási szimmetria	-	12 darab	-	12 darab
7	nincs	3 darab	6 darab	-	9 darab
8	60 fokos forgási szimmetria	6 darab	-	-	6 darab
9	nincs	-	12 darab	-	12 darab
10	nincs	3 darab	-	6 darab	9 darab
11	nincs	1 darab	6 darab	-	7 darab
12	60 fokos forgási szimmetria	-	6 darab	-	6 darab

2. táblázat: A cikkben használt kazetták elnevezése és jellemzői

Kazetta neve	profilírozás	a UO ₂ pálcák száma /dúsítása, [w/o %]	a Gd pálcák száma / (Gd ₂ O ₃ /UO ₂), [w/o %]
Z13	nincs	312 / 1.30	-
Z24	nincs	312 / 2.40	-
Z40	nincs	312 / 4.00	-
Z33Z2	csak radiális	300 / 3.30	12 (8/2.4)
Z33Z9	csak radiális	303 / 3.30	9 (8/2.4)
Z49Y9	csak radiális	303 / 4.95	9 (8/3.6)
Z44B2	csak radiális	300 / 4.40	12 (5/3.6)
Z49B6	csak radiális	306 / 4.95	6 (5/3.6)
Z44Y7	radiális és axiális	285 / 4.40	27 (8/3.6)
Z49Y7	radiális és axiális	285 / 4.95	27 (8/3.6)

Üzemviteli adatok a Novovoronyezs II 1. blokkjáról

A KARATE-1200 kódrendszer a kevéscsoport készítésétől a zóna staciner számításáig tartalmaz modulokat, amelyeket a publikált információk alapján folyamatosan verifikálunk [9-11]. A novovoronyezsi 1200-as blokk első kampányáról és a tervezett egyensúlyi betöltésről [6, 12-13] talált adatok alapján sikerült a referenciákkal jól egyező kampánymeneteket előállítani.

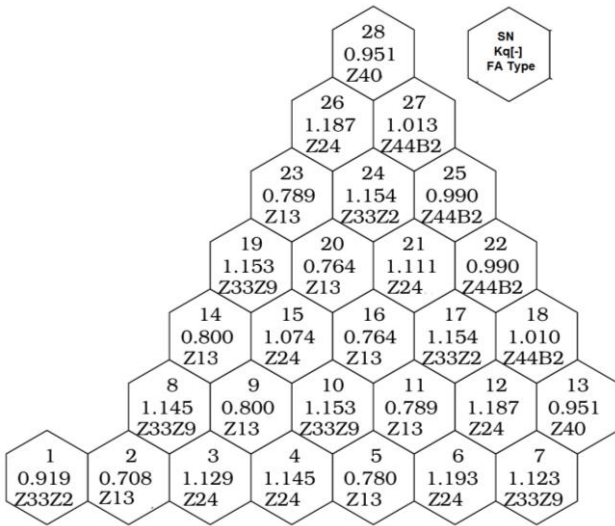
Az első töltet berakását és nominális értékek (3200 MW; 298,1 °C, 162,0 MPa) mellett a kezdeti teljesítményeloszlását a 4. ábrán mutatjuk be. A kampánymenet a 6. ábrán látható, a kampányhossz ~340 effektív napnak adódott.

Az egyensúlyi töltetet a [12] cikk alapján szimuláltuk. A definíciónak megfelelő berakást a 3. táblázatban találjuk. Az átrakást többször megismételve és 510 effektív napos

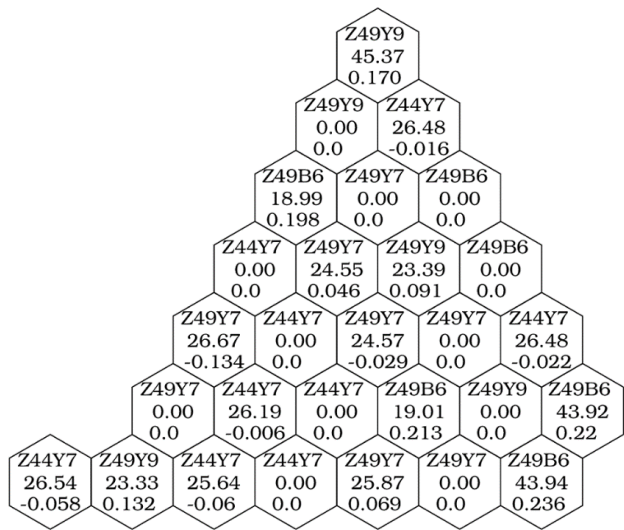
kampányhosszt feltételezve a 5. ábrán látható kiegészítést kaptuk, ami az irodalmi adattal jó egyezést mutat.

3. táblázat: Az egyensúlyi töltetre jellemző kazetta elrendezés (lásd [12])

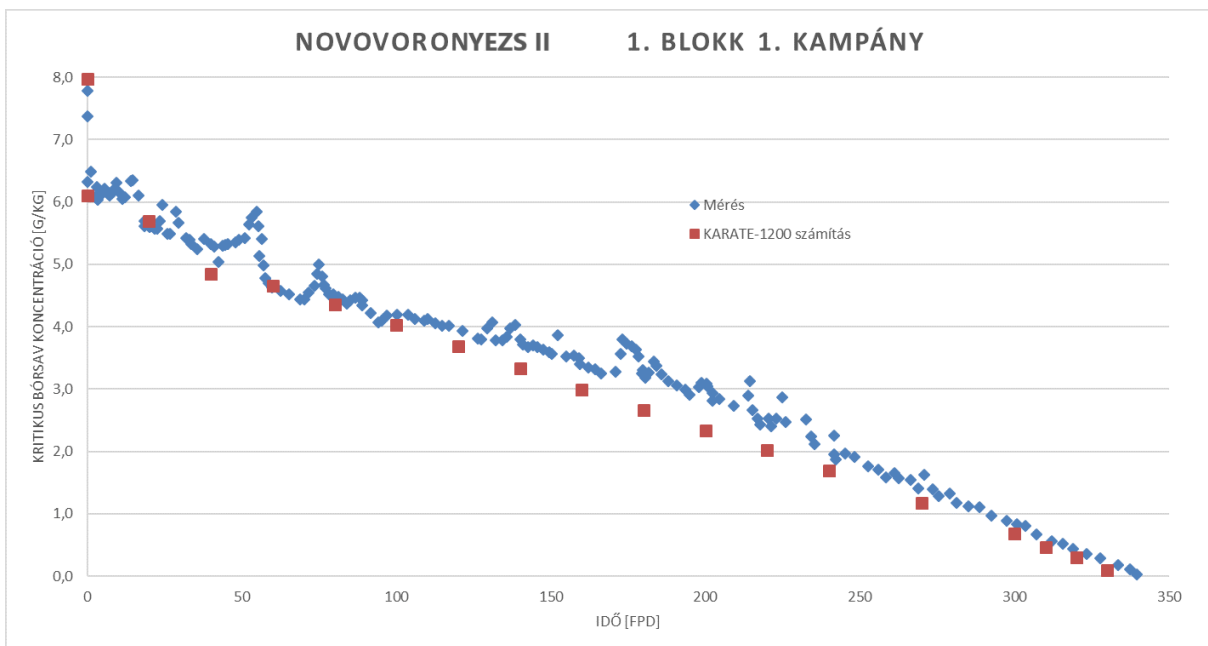
kampány / kazetta-típus	1	2	3
A49Y9	12	12	6
A49B6	12	12	12
A44Y7	25	24	-
A49Y7	24	24	-



4. ábra: A Novovoronyezs II 1. blokkjának kezdeti töltete és a KARATE-1200 kóddal számolt normált teljesítmény eloszlás, induláskor. A hatszögek felső eleme a sorszám, középen a számolás eredménye, alul a kazetta típusa (lásd a 2. táblázatot)



5. ábra: A Novovoronyezs II blokk tervezett egyensúlyi kampánya 0. eff. napnál. A hatszögekben található adatok fentről lefelé: kazettatípus (lásd 2. táblázat), a KARATE-1200 kóddal számolt kazettakiégés és az eltérés a referencia értéktől



6. ábra: A számolt és mért (lásd [14]) kritikus bórsav változása a kiegészítő függvényében (kampányhossz: 340 effektív nap). A számítás során a 12. SZBV csoport helyzete állandó értéken volt $H_{12}=337,5$ cm

Izotermikus rekritikusági hőmérséklet meghatározása

A harmadik generációs reaktorokra biztonsági előírás, hogy ha üzemelő állapotból hirtelen le kell állítani az energiatermelést, a szubkritikuság hosszú távon is fennmaradjon, akár baleseti helyzetben is. A maghasadást leggyorsabban az SZBV rudak zónába ejtésével lehet megállítani. Azonban a szubkritikus zóna a primerkör részeként különböző okból újra kritikus állapotba kerülhet, amit meg kell akadályozni [1-3]. Ilyen baleseti helyzet, ha a szekunder kör miatt folyamatosan hűl a reaktor [10].

A VVER-1200 erőműre követelmény, hogy ilyen esetben 100 °C-ig ne forduljon elő kritikuság (bórbefecskendezés nélkül, amely általában 280 °C körül indul) [15].

Egyrészt érdekes megjegyezni, hogy az EPR reaktortípus esetében emiatt külön biztonsági szabályzást kellett beépíteni [16]. A nemzetközi biztonsági elemzések elfogadják ezt az állítást a VVER-1200 esetében, de ez csupán tényközlés [4-5], ezzel kapcsolatos vizsgálatokat nem említene. A Greenpeace erős kritikával él az állítással kapcsolatban [18].

Másrészt 1988-ban meglehetősen egyedi kísérleteket publikáltak a VVER reaktorok kritikussági hőmérsékletére [19]. Részben ezen adatok alapján került sor a KARATE-440 számítási rendszer egyik validálására. Ezeket a VVER kritikussági kísérleteket több mint 30 évvel ezelőtt végezték el azóta már nem használt kazetta típusok felhasználásával, azaz jelenleg itt csak a metodikára hivatkozhatunk [10].

A fizikai indítási és az üzemviteli adatokkal jó egyezést mutató KARATE-1200 programmal megvizsgáltuk a rekritikusságot a VVER-1200 reaktorra is hasonló módon, mint a VVER-440 esetében tettük: a SCRAM-hez tartozó szubkritikusság és a hűtés hatására bevitt reaktivitás meghatározásával [10]. A VVER-1200 esetén a konzervatív SCRAM meghatározása tartalmaz némi bizonytalanságot. Az érvényes feltételezés szerint egy klaszter meghibásodás miatt nem esik a zónába. Itt viszont sokkal több a SCRAM alatt beeső klaszterek száma, mint a régebbi reaktortípusoknál. Ezért a reaktor lezárását a következő esetekre szimuláltuk:

- minden rúd beesik a zónába (121 klaszter),
- egy klaszter abból az SZBV csoportból, ami a legerősebb perturbációt adja, fennakad a felső pozícióban,
- két klaszter akad fenn az erősebb konzervatívizmus érdekében.

Az első két lehetőség hatását a 4. táblázatban összegeztük a vizsgált két VVER 1200-as kampányra. Ahogy várható volt, a konzervatív SCRAM értéke kis mértékben csökkent a feltételezett 1 meghibásodás miatt. A harmadik esetre a 4. táblázatból a két legerősebb rúd megakadását tételeztük fel. A kapott rekritikussági hőmérsékleteket az 5. táblázatban összegeztük. A számításaink alátámasztják a reaktor biztonsági jelentésében található adatokat abban az esetben, amikor egy klaszter fennakadását tételeztük fel.

A számítások mindkét töltetre EOC állapotban történtek.

Megjegyezzük, hogy számításaink célja csupán a tervezők által leírt adatok ellenőrzése volt, a VVER-440-hez hasonló szisztematikus vizsgálat nem volt célunk, az nem is volt lehetséges. Néhány fontos körülményre (például az SZBV rudak szerepére) szeretnénk volna felhívni a figyelmet. Az izotermikus rekritikussági keretparaméter bizonytalansága a VVER-440 esetében 25 °C. Valószínűsíthető, hogy a statisztikai jellegű relatív számítási pontosság a különböző reaktivitási komponensekre (rudak értékesége, termikus visszacsatolás paraméterei) itt is hasonló.

4. táblázat: *Reaktivitás-viszonyok csoportonként egy klaszter fennakadása esetén*

A perturbáció helye: csoport sorszáma (kazetta sorszáma)	Kezdeti betöltés		Egyensúlyi zóna	
	ρ [%]	$\Delta\rho$ [%]	ρ [%]	$\Delta\rho$ [%]
-	-16.92	0	-17.49	0
1(147)	-16.45	0.47	-17.26	0.23
2(101)	-16.45	0.47	-17.26	0.23
3(114)	-16.57	0.35	-17.22	0.27
4(137)	-16.57	0.35	-17.22	0.27
5(125)	-16.83	0.09	-17.36	0.13
6(124)	-16.86	0.06	-17.37	0.12
7(135)	-16.85	0.07	-17.37	0.12
8(97)	-16.89	0.03	-17.39	0.09
9(136)	-16.81	0.11	-17.35	0.17
10(126)	-16.60	0.32	-17.26	0.23
11(87)	-16.73	0.18	-17.30	0.19
12(112)	-16.86	0.06	-17.35	0.14

5. táblázat: *Az izotermikus rekritikussági hőmérséklet különböző konzervatív SCRAM feltételezéssel. A perturbációt okozó kazetta sorszáma a 2. és 3. oszlopban zárójelben van.*

	rekritikussági hőmérséklete [°C]	
	Első töltet	Egyensúlyi zóna
minden SZBV leesik	~ 30	< 20
a legértékesebb klaszter fennakad	96 (147)	32 (114)
két legértékesebb klaszter akad fenn ($\Delta\rho = 1.2\%$)	178 (147 és 126)	117 (147 és 126)

Összefoglalás

A KARATE-1200 programcsomag moduljait sikerült újabb novovoronyezsi adatokkal összehasonlítani. A kapott jó egyezések arra utalnak, hogy a program sikeresen alkalmazható a Paks II esetében is. Megvizsgáltuk a beruházó által Paksra szánt harmadik generációs orosz nyomottvízes reaktor esetére megadott izotermikus

rekritikussági hőmérséklet értékét. A nagyszámú SZBV rúd olyan nagy lezárási reaktivitást eredményez, ami igazolja a szokatlanul alacsony hőmérséklet értéket. A számítást elvégeztük a kezdeti és az egyensúlyi zónára is, mindkét esetben a megszokott konzervatívizmus mellett (egy SZBV rúd fennakad) teljesült a 100 °C korlát. Felvetődik a kérdés, ilyen nagy számú SZBV esetében is jogos-e feltételezni, hogy csak egy rúd fog hibásan működni.

Irodalomjegyzék

- [1] M. J. Pazdera, J. Belac: „Safety Criteria and Their Comparison between WWER and PWR”, Conference: International conference on WWER fuel performance, modelling and experimental support, Varna (Bulgaria), 29. Sept. – 3. Oct. 2003.
- [2] Hashymov Artur, Oleksandr Sevbo (Energorisk): D3.1 - A comprehensive review of the available VVER data for verification and validation on neutronics and thermal-hydraulics codes {Horizont 2020 (Grant Agreement Number: 945081) CAMI VVER Version -16/04/2021}
- [3] H. Hirsch, A.Y. Indradiningrat: „Safety of New Nuclear Power Plants (Example: VVER-1200/V491)” Workshop on the Paks II.NPP Project Budapest, {CERVUS nuclear consulting}, Energiaklub, 08.10.2014
- [4] <https://indico.ictp.it/event/a04215/session/23/contribution/14/material/0/0.pdf>
- [5] https://www.wenra.eu/sites/default/files/publications/rhwg_safety_of_new_npp_designs.pdf
- [6] Noura Hafez, Hesham Shahbunder, Esmat Amin, S.A. Elfiki, A. Abdel-Latif: „Study on criticality and reactivity coefficients of VVER-1200 reactor”, Progress in Nuclear Energy, Volume 131, January 2021
- [7] Heba K. Louis, “Neutronic Analysis of the VVER-1200 under Normal Operating Conditions”, Journal of Nuclear and Particle Physics 2021;11(3): 53-66; doi:10.5923/j.jnpp.20211103.01
- [8] Gy. Hegyi, A. Keresztúri; Cs. Maráczy; I. Panka; E. Temesvári; “Current Developments of the VVER Core Analysis Code KARATE-440”, 25th Int. Conference NENE. Portoroz, Slovenia, 2016.
- [9] https://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/13_2_231_Hegyi.pdf
- [10] https://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/13_2_234_Hegyi.pdf
- [11] https://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/13_1_228_Hegyi.pdf
- [12] N E.Kosourov, A. Pavlovichev, E.Spirkin, E. Volkov, M.Sumarokov, V.Tsvetkov, „WWER-1000 Fuel Cycles: Current Situation and Outlook”, https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/50/006/50006667.pdf
- [13] T.M. Khashlamun, S.B. Vygovsky, S.T Leskin, A.S. Duman, “Determination of Parameters of an 18-month fuel cycle for the purpose of minimizing fuel costs based on operated actual designs in vver-1200 reactors”, Ядерная энергетика, DOI 10.26583/npe.2018.3.10---(540)
- [14] Soshitov N.P., Tomilov M.Y., Yasnopolskaya I.I., “Validation results of the BIPR-8A code, the new module of the software package KASKAD”, 29th Proc. of AER symposium October 14 – 18, 2019, NPP Mochovce, Slovakia
- [15] IAEA-TECDOC-1381 2003, https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1381_web.pdf
- [16] <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0479.pdf>
- [17] Mohammed S. Dwidar, Alya A. Badawi, Hanaa H. Abou-Gabal and Ibrahim A. El-Osery, “FROM VVER-1000 TO VVER-1200: INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE CHANGES IN CORE”, The Third International Conference on Physics and Technology of Reactors and Applications. Tetouan, Morocco, May 12-14, 2014, on CD-ROM(PHYTRA1.pdf)
- [18] Expert Statement on the Environmental Impact Study (EIS) of the PAKS II NPP Commissioned on Greenpeace Germany Oda Becker October 2015
- [19] V. F. Gorokhov, A. S. Doukhovensky, K. B. Kosourov, “Measuring of the recriticality Coolant temperature at the VVER-440 and VVER-1000 Type Reactors”, ICNC’95, Albuquerque, New Mexico, USA, 19-21 September 1995.