

A paksi atomerőmű jelenleg üzemelő négy VVER-440¹ típusú blokkjának üzemideje 2032 és 2037 között lejár. A leállításra kerülő reaktorok teljesítményének pótlására két VVER-1200 típusú reaktort fognak építeni, amelyek a tervek szerint 2025-ben és 2026-ban lépnek üzembe.

A világon üzemelő legtöbb erőművi reaktorhoz és a jelenlegi paksi blokkokhoz hasonlóan az új reaktorok is urán-dioxid üzemanyaggal fognak működni. A VVER-1200 üzemanyag-kazetta sok hasonlóságot mutat a VVER-1000 reaktorok kazettáival. Kifejlesztésekor támaszkodtak a VVER üzemanyagok gyártásának és erőművi használatának több évtizedes tapasztalataira.

A VVER-440 üzemanyag fejlesztése

A paksi atomerőmű reaktorainak aktív zónájában jelenleg használt kazetták sok tekintetben eltérnek attól az üzemanyagtól, amivel a blokkok a nyolcvanas években elindultak. Az orosz fűtőelemgyárak 1997-ig olyan kazettákat gyártottak, amelyek fűtőlemeiben azonos dúsítású tabletták voltak. 1998-tól megjelentek az úgynevezett profilírozott kazetták, amelyekben szigorú elrendezés szerint, különböző dúsítású fűtőelemek voltak elhelyezve. 2003 után megkezdődött a Gd (gadolinium) kiégőmérget² tartalmazó kazetták gyártása is. Jelenleg Pakson és más VVER-440 erőművekben is Gd-tartalmú, profilírozott kazettákkal üzemelnek. Ezeket a fejlesztéseket elsősorban a gazdaságosabb üzemanyag-felhasználás és a teljesítménynövelés motiválta. A továbbfejlesztett kazettákkal egyre nagyobb kiégéseket érnek el, csökken a kampányonként cserélendő kazetták száma, a fűtőelemek egyre hosszabb időt töltenek a reaktorban, és mindezzel együtt csökken az egységnyi villamos energia előállításához felhasznált természetes urán mennyisége [1]. A VVER-440 üzemanyag továbbfejlesztése teszi lehetővé azt is, hogy a paksi atomerőműben áttérjenek a 15 hónapos kampányokra a jelenlegi 12 hónapról [2].

¹ VVER (oroszul: ВВЭР – водо-водяной энергетических реактор) szovjet, majd orosz fejlesztésű és gyártmányú nyomottvízes reaktortípus-család, amely 440, 1000 és 1200 MW teljesítményű változatokat tartalmaz. A VVER típus alapelveit Szavelij Frejberg dolgozta ki a Kurcsatov Intézetben 1954-ben.

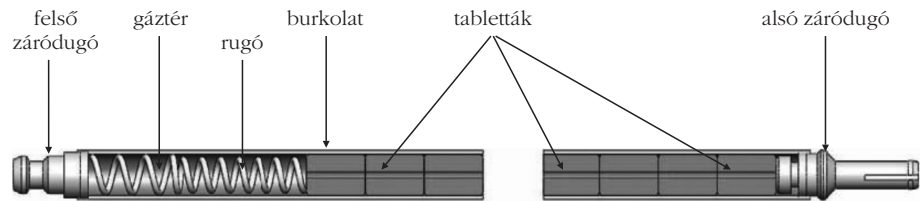
² Kiégőmérget: olyan anyag, amely nagy hatáskeresztmetszettel nyeli el a neutronokat, és ezáltal olyan izotóppá alakul, amely további neutronot már csak kis valószínűséggel nyel el. Egy friss kazettába a sok hasadóképes anyag reaktivitásának „lekötésére” ilyen „mérgeket” tesznek. Ezek az anyagok a reaktorüzem során a hasadóanyaggal párhuzamosan fogynak, „kiégnek”, így az ilyen kötegeket tartalmazó reaktorzónákkal az eredeti szabályozórendszer változtatása nélkül is nagyobb teljesítmény vagy hosszabb üzemidő érhető el.

A VVER-1000 üzemanyag fejlesztése

A VVER-1000 reaktorokban megőrizték a fűtőelemek háromszög-rácsos elrendezését, de a hatszög-keresztmetszetű kazetták mérete és konstrukciója jelentősen eltér a VVER-440 kazettától. Az első VVER-1000 reaktor a novovoronyezsi erőmű ötös blokkja volt. A prototípus fejlesztésének tapasztalatai alapján a szériában gyártott VVER-1000 blokkok zónája és üzemanyaga jelentősen változott. A novovoronyezsi reaktorban 151 kazettából állt a zóna, egy kazettában 317 fűtőelem és 12 szabályozó és biztonságvédelmi (SzBV) rúd volt. A kazettát 1,5 mm vastag cirkónium kazettafal vette körül. A további blokkon elhagyták a kazettafalat, a zónát pedig 163 darab olyan kazettából állították össze, amelyekben 312 fűtőelem és 18 SzBV-rúd volt [3]. A VVER-1000 kazetták további fejlesztéseinek indokai között megjelent a kazetták megbízható működésének elősegítése, a teljesítménynövelés, a kampányhossz növelése, a kiégés növelése és a teljesítménykövető üzemmód bevezetése. A jelenleg használt kazetták átlagos ²³⁵U dúsítása megközelíti az 5%-ot [1]. A kazetta stabilitásának növelésére merev szerkezetet alakítottak ki. Törmelékiszűrőt építettek be az idegen tárgyak bejutásának megakadályozására és antivibrációs rácsokat fejlesztettek ki a rezgések csökkentésére [1]. Továbbfejlesztették a fűtőelem burkolatát és a kazetta szerkezeti anyagát képező cirkónium-ötöveteket a sugár- és korrózióállóság növelésére. Keverőrácsot építettek be a hőátadás javítására. A gázkibocsátás és a tablettaburkolat kölcsönhatás csökkentésére megnövelték az UO₂ szemcsék méretét [4]. A fűtőelemes fejlesztések fontos szerepe volt abban, hogy az oroszországi VVER-1000 erőművek többségében 2012 és 2014 között áttértek a 18 hónapos kampányokra [5].

A kazetták szerkezeti elemeinek egy része kezdetben acélból készült, 1998-ban tértek át a cirkóniumkomponensekre. Ezekkel párhuzamosan bevezették a Gd kiégőmérget tartalmazó kazettákat is, és az eredetileg fix fejrészt levehetőre cserélték. A levehető fejrésszel lehetővé vált a kazetták szétszerelése és a szivárgó fűtőelemek eltávolítása az erőművekben. A kazetta szerkezetének rögzítéséhez a TVSA jelű kazettáknál függőleges sarokpántokat is használtak. A TVS-ALFA típusnál vékonyabb burkolatot és tömör tablettákat vezettek be. A 2006-tól gyártott TVS-2M típusnál masszív távtartórácsok rögzítik a fűtőelemeket. E típus fűtőelemei 150 mm-rel hosszabbak a korábbi kazetták fűtőelemeinél. A VVER-1200 reaktor jelenlegi terveiben szereplő kazetta a TVS-2M kazetta továbbfejlesztésének tekinthető, mivel a két konstrukció csak abban különbözik, hogy az új kazetta fűtőelemei 5 cm-rel hosszabbak (és ugyanennyivel rövidebb az új kazetta fejrésze) [1].

Az orosz fűtőelemgyártón kívül a Westinghouse is kifejlesztette a saját VVER-1000 kazettáját, amely természetesen az orosz kazettákhoz hasonló geometriai elrendezéssel rendelkezett [6]. A VVER kazettában hasznosították a korábbi PWR fejlesztések tapasztalatait. Tömör, dúsított UO_2 tablettákat használtak, de a fűtőelemekben elhelyeztek néhány lyukas, természetes urántartalmú tablettát is, a belső gáznyomás optimalizálására. A kazetta Zircaloy-4 és ZIRLO komponensekből állt. Az SzBV-rudak bór-karbidot és ezüst-indium-kadmium ötvözetet tartalmaztak. A tabletták egy részének külső felületére ZrB_2 kiégőmérégből képezett réteget vittek fel. A VVER-1000 kazettákat a PWR kazettákhoz hasonló masszív távtartórácsokkal látták el. A temelini erőműben 10 évig használtak Westinghouse üzemanyagot, majd a kazetták deformációja, elhajlása miatt áttértek az orosz üzemanyagra [7]. A Westinghouse üzemanyagot 2009-től Ukrajnában is kipróbálták.



1. ábra. A fűtőelem fő részegységei.

A VVER-440 és a VVER-1200 üzemanyagok összehasonlítása

A VVER-440 és a VVER-1200 reaktorok fűtőelemei nagyon hasonlóak. Mindkettőben 7,6 mm külső átmérőjű, lyukas UO_2 tablettákat helyeznek el 9,1 mm külső átmérőjű, cirkóniumburkolatból készített csövekben. A pálcákat alul és felül cirkónium-záródugókkal látják el. A gyártás során az alsó dugó behegesztése után betöltik a tablettákat a csőbe, felülre egy rugót tesznek be az üzemanyagoszlop hosszváltozásának kezelésére, a csövet héliummal töltik fel, majd a felső záródugó behegesztésével hermetikusan lezárják a fűtőelemet (1. ábra).

Az új reaktor fűtőelemei 1,4 méterrel hosszabbak és a lineáris hőteljesítményük is nagyobb (1. táblázat). A fűtőelemek háromszögárcs szerinti elrendezésben helyezkednek el mind a két típusnál és a kazetta keresztmetszete szabályos hatszög alakú. A VVER-440 kazettában 126 fűtőelem, míg a VVER-1200 kazettában 312 fűtőelem található. A jelenlegi paksi kazettákban a fűtőelemeket kazettafal veszi körül, míg az új kazettáknál nem alkalmaznak kazettafalat. Lényeges különbség, hogy a VVER-440 reaktorokban a szabályozó és biztonságvédelmi funkciót a kazetták felső részéhez csatlakozó bóracél-toldat látja el, a VVER-1200 reaktorokban pedig SzBV-rudakat alkalmaznak. Az SzBV-rudak bejutását a kazetta belsejében található megvezető csövek segítik elő.

A hazai szakemberek számára újdonság lesz, hogy az VVER-1200 kazetták szétszerelhetők. Az erőműben lesznek olyan eszközök, amelyekkel a kazettákon belül azonosítani lehet az inhermetikus fűtőelemeket, azokat el lehet távolítani és az érintett kazetta a reaktorban tovább üzemelhet.

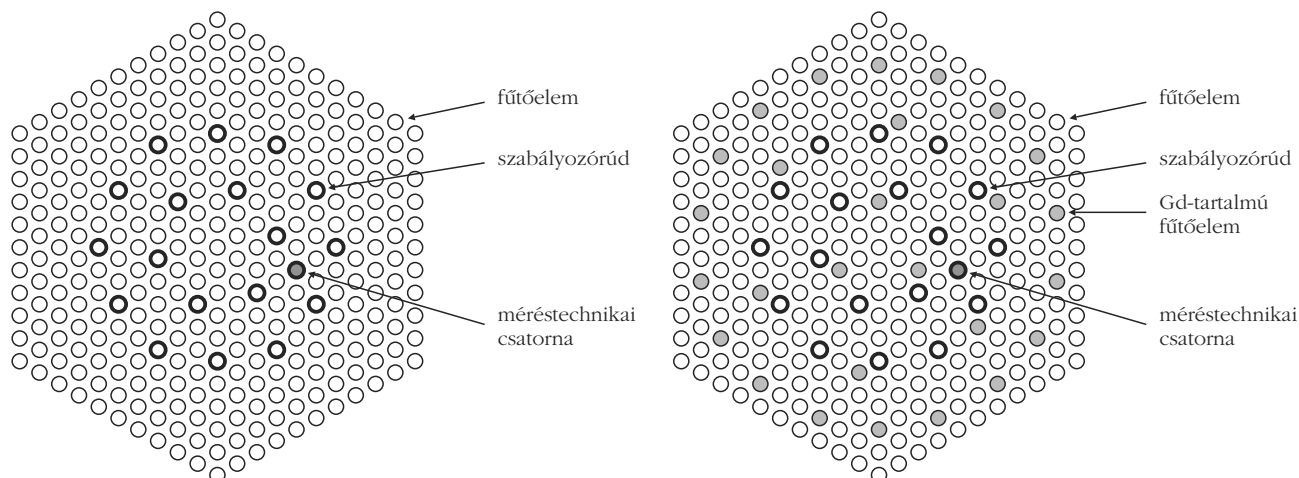
A VVER-1200 kazetta néhány jellemzője

A VVER-1200 reaktor zónája fő méreteit tekintve megegyezik a VVER-1000 zónájával, így a kazetták külső méretei is azonosak. A VVER-1200 kazettában 534 kg UO_2 van, ami 7 kg-mal több, mint a VVER-1000 kazettában. A 312 fűtőelem mellett 18 szabályozórúd kap helyet. Az új kazetta egyik különlegessége, hogy a mérés technikai csatornát nem a kazetta közepén, hanem attól valamivel kijebb helyezik el. A VVER-1200 zónába egyaránt terveznek gadolíniumos fűtőelemeket tartalmazó és csak UO_2 tablettákkal ellátott kazettákat is (2. ábra).

Az SzBV-rudak bór-karbid és $Dy_2O_3TiO_2$ szakaszokból állnak. A bór-karbidos részek a biztonságvédelmi funkció ellátásakor kerülnek a zónába. A diszprózium-titanát szakaszok – amelyekben nincs gázképződés a magreakciók következtében – a szabályozó funkciók ellátására szolgálnak.

Az új blokkoknak alkalmasnak kell lenniük arra, hogy teljesítménykövető üzemmódban működjenek. Ez ciklikus terhelést jelent a fűtőelemekre. Kulcskérdés, hogy a felterhelések során a tabletták és a burkolat közötti mechanikai kölcsönhatás ne vezethessen a burkolat sérüléséhez. Ezért úgy tervezik a fűtőelemeket, hogy a tabletták és a burkolat méretváltozásai a kiégés során ne vezethessenek intenzív kölcsönhatáshoz. Az üzemeltetés során pedig törekedni kell arra,

1. táblázat		
A VVER-440 és a VVER-1200 kazetták fő jellemzői [8, 9]		
	VVER-440	VVER-1200
a fűtőelem hossza	2600 mm	4033 mm
az üzemanyagoszlop hossza	2480 mm	3730 mm
a tabletták külső/belső átmérője	7,6/1,2 mm	7,6/1,2 mm
a burkolat külső/belső átmérője	9,1/7,8 mm	9,1/7,8 mm
a He töltőgáz nyomása	6 bar	20 bar
átlagos lineáris hőteljesítmény	13,8 kW/m	16,7 kW/m
maximális lineáris hőteljesítmény	32,5 kW/m	42 kW/m
a kazetta magassága	3217	4570 mm
kazettafal	van	nincs
fűtőelemek száma a kazettában	126	312
kulcsméret	145 mm	235 mm
SzBV-toldat	bóracél	nincs
SzBV-rudak	nincs	18 db



2. ábra. VVER-1200 kazetták keresztmetszeti képe és a kazetták fő komponensei.

hogyan a zónában ne keletkezzenek olyan egyenlőtlen-ségek, amelyek lokálisan magas mechanikai feszültségek kialakulásához vezethetnének a burkolatban.

A VVER-1200 üzemanyag fejlesztése a következő években is folytatódni fog [5]. A fűtőelemgyár tervezi tömör tabletták és vékonyabb burkolat bevezetését. Valószínűleg új típusú keverőrácsokat vezetnek be a hőelvitel optimalizálására. Vizsgálják az erbium kiégőmérő használatát, és folyik a cirkónium-ötvezetek továbbfejlesztése is. Az 5%-nál nagyobb ^{235}U dúsítás bevezetése is valószínűleg hamarosan napirendre kerül, ehhez azonban a fűtőelemgyárak számos, maximum 5% dúsításra tervezett berendezését is meg kell változtatni.

Az orosz szállító hosszú távú terveiben szerepel a kiégett üzemanyag újrahasznosítása is [10]. A REMIX (REgenerated MIXture of U, Pu oxides) típusú üzemanyagban a kiégett üzemanyagból kinyert plutóniumhoz és uránhoz természetes uránból származó dúsított uránt adnak. Az így létrehozott üzemanyagban körülbelül 1% ^{239}Pu és 3% ^{235}U hasadóanyag van. Ez a megoldás továbblépést jelent a jelenleg használatos MOX (Mixed Oxide) üzemanyaghoz képest, amely csak a plutóniumot hasznosítja a reprocessálás után.

Következtetések

Az új paksi reaktorok üzemanyagában hasznosul a VVER kazetták gyártásának és üzemeltetésének több évtizedes tapasztalata. Várható, hogy a tíz év múlva induló blokkokban a jelenlegi tervekben szereplő kazetták továbbfejlesztett változatai jelennek majd meg.

Irodalom

1. V. Molchanov: Nuclear fuel for NPPs, Current Status and Main Trends of Development. *10th Int. Conf. WVER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*, 2013, Bulgaria
2. Czibula Mihály: Üzemeltetési ciklus hosszabbítás az MVM PA Zrt. VVER-440 blokkokon. *XIII. Nukleáris Technikai Szimpózium*, Paks, 2014, http://nuklearis.hu/sites/default/files/docs/XIII_szimpozium/03.pdf
3. A. N. Prytkov, A. B. Tereshchenko, Yu. N. Kravchenko, N. V. Boldyrev, I. V. Pozychanyuk, D. I. Lisitsin, E. I. Golubev: Transition of Novovoronezh Unit 5 reactor VVER-1000 to uranium-gadolinium fuel and implementation of control based on local parameters. *10th Int. Conf. WVER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*, 2013, Bulgaria
4. A. Enin, Y. Bezborodov, D. Pluzhnikov: Improvement of VVER-1000 FA design and manufacturing techniques. Main operational results for VVER-1000 fuel assemblies fabricated at JSC NCCP. *10th Int. Conf. WVER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*, 2013, Bulgaria
5. Yu. Ryabinin, O. Novikova: Experience on new fuel implementation at VVER-1000 NPPs in Russia in course of the power up-rate program. *10th Int. Conf. WVER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*, 2013, Bulgaria
6. R. Svoboda: Implementation of New Fuel System at Temelin. *Nuclear Power for the People*, Nesebar 26–29 September, 2010, www.bgns.bg/web/pub/bgns/7_paper.doc
7. Horváth Á.: Nyomottvízes atomreaktorok fűtőelem-kötegeinek elhajlása. *Nukleon* (2013) 136. http://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/Nukleon_6_2_136_Horvath.pdf
8. Generation 2 Fuel Assembly TVS-2M. http://www.gidropress.podolsk.ru/files/booklets/en/TVS_angl.pdf
9. Nuclear Fuel for VVER reactors. http://tvel.ru/wps/wcm/connect/tvel/tvelsite.eng/resources/21e9e6804dca3578c7bfe6048932ed2/4_Brochure_VVER_ENG.pdf
10. Yu. S. Fedorov, O. V. Kryukov, A. V. Khapeskaya: Multiple Recycle of REMIX Fuel Based on Reprocessed Uranium and Plutonium Mixture in Thermal Reactors. *Int. Conf. Spent Fuel Management*, 15–19 June, 2015, Vienna



**SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY
A FIZIKA BARÁTJA!**

**Támogasd adód 1%-ával az Eötvös Társulatot!
Adószámunk: 19815644-2-41**

