

# Nyomottvizes atomreaktorok fűtőelem-kötegeinek elhajlása

## Áttekintés

Horváth Ákos

AREVA NP GmbH

D-91052 Erlangen, Paul-Gossen-Str. 100

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Repülőgépek és Hajók Tanszék

1111 Budapest, Stoczek utca 6., Tel.: +36 30 397 55 04

Az 1990-es évek közepén számos nyomottvizes reaktorral szerelt atomerőmű üzemeltetője számolt be a szabályozó rúdnyalábok elakadásáról azok fűtőelem-kötegebe történő beejtése során. Akkor a vizsgálatok kiderítették, hogy a jelenség fő oka a fűtőelem-kötegek jelentős deformációja (oldalirányú elhajlása), amely miatt a szabályozó rudak és azok vezető csövei között a súrlódás jelentősen megnövekszik, ezzel lassítva, vagy megakadályozva azok mozgását.

Jelen áttekintés célja az, hogy a problémát, mint a biztonságos működést befolyásoló jelenséget általánosságban bemutassa, illetve az ahhoz kapcsolódó – a nyílt szakirodalomban publikált – tanulmányokat és azok eredményeit összefoglalja. A deformációt befolyásoló paraméterek és folyamatok feltárására, illetve megértésére irányuló kutatási irányok és módszerek is bemutatásra kerülnek.

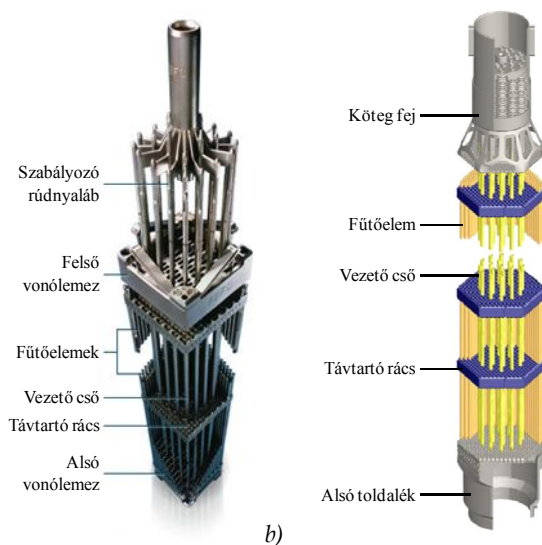
## Bevezetés

Az atomreaktorokban a reaktivitás kompenzálására, illetve szabályzására neutron abszorbens anyagokat alkalmaznak, amelyek feladata a reaktivástartalék kompenzálása és/vagy a sokszorozási tényező, illetve a reaktivitás kívánt irányú változtatása [1]. A kiegészítő abszorbensek és a hűtővízben feloldott anyagok mellett az aktív zónához képest mozgatható szabályozó elemek – amelyek lehetnek rudak vagy kötegek (kazetta) – alkalmasak erre a célra. A szabályozó rudak gyors negatív reaktivitást biztosítanak, amelynek tranziens vagy baleseti helyzetben van jelentősége, ezért a mindenkori működőképességük biztosítása elsődleges fontosságú.

A nyugati nyomottvizes (PWR) és a VVER-1000-es reaktorokban a reaktivitás szabályzására, illetve a reaktor leállítására olyan szabályozó rudakat használnak, amelyek a fűtőelem kötegeken belül, egyes fűtőelemek helyén kialakított ún. vezető csövekben mozognak. Egy kötegen belül – típustól függően – 5-24 darab ilyen cső található, azonban nem minden kötegehez csatlakozik szabályozó rúd. Általában néhány szabályozó rudat (4-24) nyalábba fognak össze azok felső végénél egy csatlakozó elemmel (spider), így azok együtt mozognak a köteg(ek)ben. Az 1/a és az 1/b. ábrán négyzet-, illetve hatszöggrács (TVS-2 típus) elrendezésű fűtőelem kötegek robbantott ábrája látható.

A fűtőelem-kötegek, illetve vezető csövek deformációja (elhajlás) hatással van a szabályozó rúdnyalábok mozgására: azok lassabban esnek le a végállásukba, illetve szélsőséges esetben el is akadhatnak úgy, hogy nem képesek a láncreakció leállításához szükséges negatív reaktivitást

biztosítani. Emellett a fűtőelem-kötegek elhajlása miatt azok között olyan vízrések alakulhatnak ki, amelyek lokálisan és globálisan is befolyásolhatják a reaktor teljesítményszintjét illetve -eloszlását. Következésképpen a biztonsági korlátok betartásának igazolásához a fűtőelem-kötegek deformációját is figyelembe kell venni. További probléma, hogy a kötegek átrakása során az elhajolt, deformálódott kötegek kezelése nehezebb, több időt vesz igénybe, illetve a sérülés kockázata nagyobb.



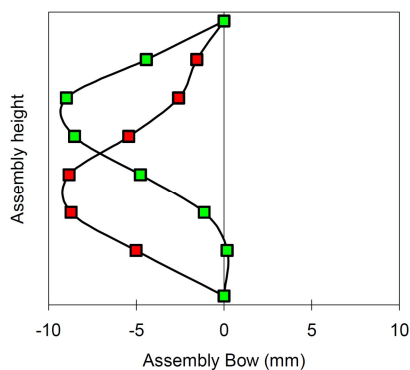
1. ábra: a) Négyzetrács elrendezésű fűtőelem-köteg szabályozó rúdnyalábbal nyugati nyomottvizes reaktorhoz [23]  
b) Hatszöggrács elrendezésű fűtőelem-köteg VVER-1000 reaktorhoz (TVSz-2 típus) [2]

## Történeti áttekintés

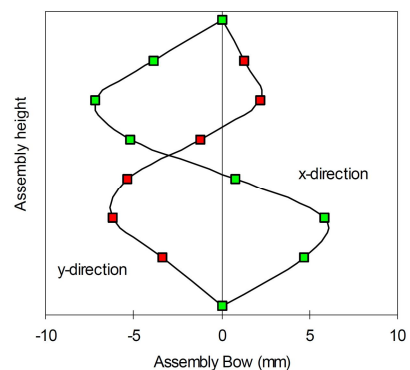
Az 1990-es évek közepén a világon számos nyomott vizes reaktorral szerelt atomerőmű üzemeltetője és a fűtőelem-kötegek szállítója számolt be szabályozó rúdnyalábok elakadásáról vagy határértéknél hosszabb esési idejükről a blokk leállítása, vagy a szabályozó rúdnyaláb tesztelése alkalmával.

Az első eset Svédországban, a Ringhals atomerőmű 4-es blokkjában történt 1994. augusztus 24-én, amikor is egy szabályozó rúdnyaláb elakadt a reaktor leállítása során [3], [4], [5]. Az azt követő teszt során további három rúdnyaláb akadt el a végállás előtt. A hiba okának feltárására intenzív vizsgálatokat folytattak le. Kiderítették, hogy a szabályozó rúdnyalábok elakadását a fűtőelem-kötegek jelentős 'S' alakú deformációja ( $\approx 20$  mm-es amplitúdó) okozta, mivel a súrlódásból származó erő a szabályozó rúd és a vezető csöve között megnövekedett a deformáció miatt. Továbbá az is kiderült, hogy a reaktor összes fűtőelem-kötege elhajolt valamennyire, és nem csak a 4-es, hanem a 3-as blokkban is. A 2-es blokkban 2000-ben figyelték meg először a fűtőelem-kötegek elhajlását [3]. A 2-es és 3-as blokkokban a fűtőelem-kötegek többnyire 'C' (2/a ábra), a 4-es blokkban pedig 'S' alakban (2/b ábra) deformálódtak. Azonos amplitúdó esetén az 'S' alakú elhajlás nagyobb kockázatot jelent a szabályozó rudak elakadása szempontjából, mert kisebb hajlítási sugár alakul ki.

1995. december 18-án a South Texas (USA) atomerőmű 1-es blokkjában, 1996. január 30-án a Wolf-Creek (USA) atomerőműben akadt el néhány szabályozó rúdnyaláb a blokkok leállítása során [4], [6]. A későbbiekben hasonló esemény következett be Spanyolországban (Almaraz), Belgiumban (Doel és Tihange) és Franciaországban (Nogent, Paluel és számos más atomerőmű) [6], [7], [8].



a) 'C' alakú elhajlás a Ringhals-3 blokkból



b) 'S' alakú elhajlás a Ringhals-4 blokkból

2. ábra: Példák fűtőelem-köteg elhajlására [3]

A VVER-1000-es blokkok esetében is a 90-es évek közepétől kezdődően merültek fel problémák a szabályozó rudakkal, elsősorban a 3 éves üzemanyag ciklusidőre átalált erőművekben [6][9][10]. A rudak esési ideje több esetben túllépte a 4 másodperces határértéket, illetve néhány el is akadt a kötegek alsó részében. A Balakovo (Oroszország) atomerőmű 2-es blokkjában lefolytatott első vizsgálatok a túlságosan nagy súrlódó erőt jelölték meg a hibák okaként [10], amelyet a Zaporozhie (Ukraina) atomerőmű 1-es blokkjából származó két hibás fűtőelem-kötegen lefolytatott vizsgálatok (Hot Laboratory of RIAR) meg is erősítettek: a fűtőelemek-kötegek 18–20 mm-es amplitúdóval elhajoltak [6] a nyugati PWR-ekben megfigyeltekhez hasonló módon.

Ellentétben az orosz, ukrán<sup>1</sup> és bulgár VVER-1000-es blokkokkal, amelyekbe az orosz TVEL cég szállította a fűtőelem-kötegeket, a cseh Temelín-i atomerőmű indulásakor mindkét blokkot a Westinghouse látta el VVantage-6 típusú fűtőelem-kötegekkel. Az első kampány során nem volt gond a szabályozó rudakkal, azonban a kötegek besugárzás miatti növekedése a felső határértékhez közel volt [6]. A második kampány (2004) során a 2-es blokkban már 10 esetben fordult elő a határértéknél hosszabb esési idő, amelyek száma tovább nőtt a 3. és 4. kampányok során, mindkét blokkban. 2006 júniusában a 4. kampányt meg kellett szakítani az 1-es blokkban, mert egy teszt során két szabályozó rúdnyaláb is elakadt a kötegekben a minimum szint (hidraulikus ütközés csillapító (*dashpot*)) felett [6][11].

## A fűtőelem-kötegek elhajlásának mechanizmusa

A fűtőelem-kötegek elhajlásának mechanizmusa nagyon összetett, és a mai napig nem teljesen ismert folyamat, amelynek megértéséhez anyagszerkezeti (besugárzási tartósfolyás, duzzadás), neutronfizikai (üzemanyag management), mechanikai és hidraulikai (reaktor és fűtőelem-köteg konstrukció) szempontokat is figyelembe kell venni. A vizsgálatok azt mutatták, hogy a besugárzási tartósfolyás jelentős mértékben hozzájárul a deformációhoz, amelyet számos dolog befolyásol [6]:

- a fűtőelem-köteget leszorító, axiális irányú erő;
- vezető csövek és fűtőelemek besugárzási duzzadása (hossznövekedés);
- kezdeti deformáció;
- kiegészi szint;
- fűtőelem-köteg mechanikai merevsége;
- szerkezeti anyagok besugárzási tartósfolyási tulajdonságai;
- a fűtőelem-kötegre ható hidraulikai erők;
- a szomszédos kötegekkel, illetve a zónapalásttal történő kölcsönhatás.

<sup>1</sup> A Dél-ukrán atomerőmű (Yuzhnoukrainsk) 3-as blokkjába 2005-ben 6 db fűtőelem köteget szállított a Westinghouse teszt üzemre, amelyeket 2010 és 2011 márciusában 42-42 db követett. A 2-es blokkba először 2011 augusztusában került 42 db Westinghouse köteg [24]. 2012 májusában a 2-es és 3-as blokk összes fűtőelem kötege kirakásra került a Westinghouse által szállított fűtőelem kötegek eddigi tisztázatlan hibája miatt [25].

Ezen tényezők ráadásul általában nem külön-külön jelentkeznek, hanem összetett formában, és egymásra is hatással vannak (pl. szélsőséges hossznövekedés növeli a lezorító erő nagyságát). Egyes esetekben a fűtőelem köteget lezorító erő túl nagy mivolta (Ringhals-2, -3, -4) [2], [3], [5], más esetben a szélsőséges hossznövekedés (Wolf-Creek) [6] okozta a problémát.

Az erőművekben végzett mérések és megfigyelések alapján kiderült, hogy a fűtőelem-kötegek nem véletlenszerűen, „össze-vissza” hajlanak el, hanem az adott reaktorra jellemző módon, vagyis egy ún. elhajlási minta (*core bow pattern*) alakul ki (3. ábra), amely kampányról kampányra nagyjából állandó [3], [6], [12]. Következésképpen egy fűtőelem köteg elhajlásának iránya és nagysága erőteljesen függ annak reaktoron belüli pozíciójától, és a kiegészi szint/hőmérséklet/teljesítmény eloszlás csak gyengén befolyásolja azt [4], [6], [12]. Továbbá a fűtőelem köteg típusa (más mechanikai és hidraulikai jellemzők) is befolyásolhatja az elhajlási mintát [12]. Mindezek azt bizonyítják, hogy a hidraulikai erőknek, amelyek nagysága és eloszlása különböző az egyes reaktorokban (típusokban), jelentős hatása van a kötegek elhajlására.

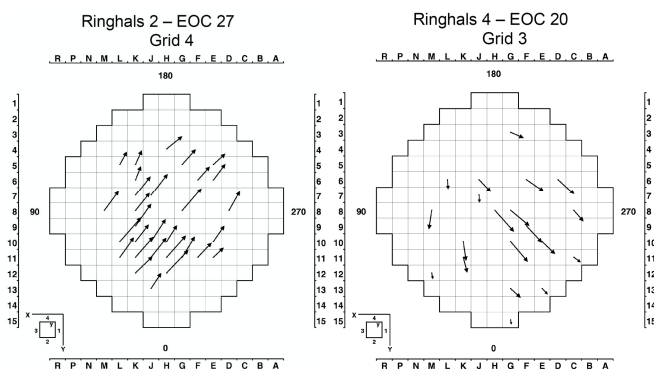
Mivel egy fűtőelem-köteg nem ugyanabban az irányban hajlik egész életciklusa során, hanem a fent leírtak szerint a reaktoron belüli pozíciója nagymértékben befolyásolja azt, ezért bizonyos szisztematikus üzemanyag átrakási sémákkal befolyásolni lehet a reaktor elhajlási mintáját [6], [12].

## Korrektációs lépések, új fűtőelem-köteg típusok

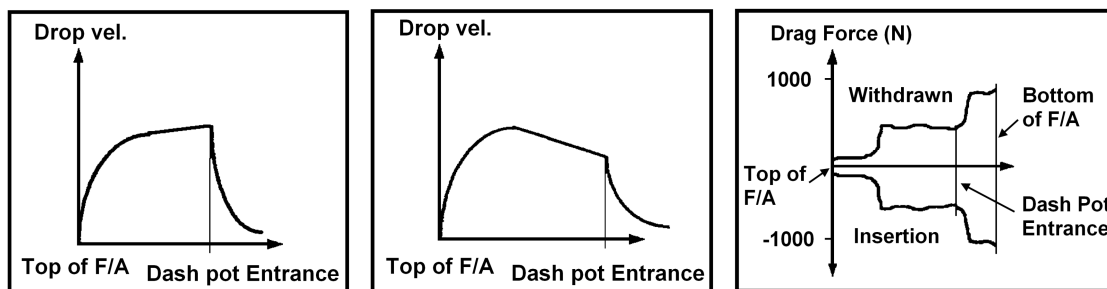
### Nyugati PWR-ek

A fűtőelem-kötegek jelentős elhajlásának csökkentése, illetve a biztonságos üzemvitel érdekében számos intézkedést hoztak. Az elsők közé tartozott a már besugárzott fűtőelem-kötegek lezorító rugóinak plasztikus deformálása, hogy a rugóerőt csökkentse [6], illetve olyan köteg pozícióba, ahol szabályozó rúdnyaláb van, csak meghatározott szintig kiegészített fűtőelem köteget (pl.: a Ringhals-3, -4 esetében <30 MWd/kgU [5]) raktak. Bizonyos fűtőelem-köteg típusok esetén találtak korrelációt a kiegészi szint és a deformáció nagysága (súrlódásból származó járulékos ellenállás erő, illetve esési idő) között, más kötegek esetén pedig nem [4], [5], [17]. A szabályozó rúdnyalábok megfelelő működésének ellenőrzésére minden esetben kampány közbeni tesztekert írtak elő. Ezek általában az esési sebességet, illetve időt vizsgálják a szabályozó rúd fűtőelem-kötegen belüli pozíciójának függvényében. Normál esetben (4/a ábra) a szabályozó rúd sebessége gyorsan nő egészen addig, amíg a hidraulikus erők ki nem egyenlítik a gravitációból származó erőt. Innentől kezdve a sebesség már csak lassan növekszik tovább a hidraulikus ütközéscsillapító eléréséig, ami hirtelen lefékezi a rudat. Ezzel szemben elhajolt (főleg „S” alakban) fűtőelem köteg esetén (4/b ábra) a kezdeti nagy sebesség elérése után a szabályozó rúd nem gyorsul tovább, hanem a sebessége csökkenni kezd. Ez a lassulás – amely nyilvánvalóan megnöveli a hidraulikus ütközéscsillapító eléréséhez szükséges időt – mutatja, hogy a rúdra a mozgásával ellentétes irányú járulékos erő hat, amely fékezi azt.

Az „S” alakú deformáció esetén kimért ellenállás-erő karakterisztikán (4/c ábra) a kezdeti csekély mértékű erő hirtelen ugrást mutat, amely a hidraulikus csillapító eléréséig nagyjából állandó marad. A hirtelen növekmény helye egybeesik az „S” alakú elhajlás felső felén lévő maximális amplitúdó pozíciójával.



3. ábra: Példák reaktorok elhajlási mintáira [3]



a) normális esési sebesség karakterisztika    b) elhajolt fűtőelem-kötegre jellemző esési sebesség karakterisztika    c) ellenállás erő karakterisztika „S” alakú elhajlás esetén

4. ábra: Szabályozó rúdnyaláb esési sebesség (a), (b), illetve ellenállás erő (c) karakterisztikája [5]

A fűtőelem-kötegek konstrukcióját is fejlesztették, hogy ellenállóbbak legyenek az elhajlással szemben. Az új lezorító rugók erejét optimalizálták (csökkentették), illetve a mechanikai merevség növelése is előtérbe került, amihez a beszállítók új vezető cső konstrukciókat is kidolgoztak.

Ezek általában megnövelt keresztmetszetű vezető csövek megerősített ütközéscsillapító résszel (pl. Monobloc™ konstrukció az AREVA-tól [13], vagy az RFA a Westinghouse-tól [14]). A vezető csövek és a távtartó rácsok kapcsolatát is megerősítették (ponthegeztés), hogy a fűtőelem köteg oldalirányú terheléssel (pl. hidraulikai erők) szembeni merevsége tovább nőjön.

A szerkezeti anyagok terén a Zircaloy-4-nél még kedvezőbb tulajdonságú (kisebb mértékű besugárzási duzzadás, tartósfolyással szembeni nagyobb ellenálló képesség) anyagokat fejlesztettek ki (M5<sup>TM</sup>, ZIRLO<sup>TM</sup>), amelyeket a vezetőcsövek, fűtőelem burkolatok és távtartó rácsok gyártásához is felhasználnak [13], [14]. A távtartó rácsok esetén a kis besugárzási duzzadási tulajdonsággal rendelkező anyagok használata lehetővé tette, hogy azok méretét (szélességét) megnöveljék, mert így a szomszédos fűtőelem kötegek között a távolság csökken, kevesebb helyet hagyva ezzel a fűtőelem kötegek elhajlásának. Továbbá a különböző szerkezeti elemek anyagának egyformára cserélésével a hőtágulásból származó feszültséget is csökkenteni tudták.

Az új fűtőelem köteg konstrukciók és az elhajlás szempontjából is optimalizált üzemanyag átrakási sémák alkalmazásával a szabályozó rúdnyalábokkal kapcsolatos problémák (elakadás, határértéknél hosszabb esési idő) száma fokozatosan csökken, azonban ez egy lassú, számos kampányon át tartó folyamat [6], [13].

### VVER-1000

Mivel a VVER-1000-es blokkokban a szabályozó rúdnyalábok elakadása, illetve hosszabb esési ideje ugyanazokra az okokra volt visszavezethető, mint a nyugati PWR-ek esetében, ezért azt hasonló módon kívánták megoldani.

A fűtőelem-kötegeket leszorító erő csökkentése érdekében a kötegek fej részét áttervezték (minden vezető csőnek saját leszorító rugó, új anyagból és megnövelt rugóúttal), a védőcsövek pozícióját beszabályozták [2]. Az acél helyett cirkónium ötvözeteket (E-110, E-635) kezdtek el használni a vezető csövekhez és távtartó rácsokhoz. Továbbá a szabályozó rúdnyalábokat nehezebbre, illetve a házukat kisebb hidrodinamikai ellenállásúra tervezték át [2]. A szabályozó rúdnyalábok esési idejét rendszeresen tesztelték/monitorozták, a fűtőelem-kötegek alakját átrakáskor megmérték, és az átrakási sémákat optimalizálták [6].

Ezen intézkedésekkel sikerült jelentősen csökkenteni a fűtőelem-kötegek elhajlásának mértékét a 90-es évek végére [10]. Azonban a még hosszabb üzemanyag ciklusok (4-6 év) bevezetéséhez már olyan, teljesen új konstrukciókra volt szükség, amelyek még nagyobb mechanikai merevséget biztosítottak. Ezen új konstrukciók a TVSA és a TVS-2 (2. ábra) fűtőelem kötegek, amelyekkel eddig nagyon kedvező („S” helyett többnyire „C” alakú elhajlás jelentősen kisebb amplitúdóval) tapasztalatok vannak [2], [15].

A Temelín-i atomerőműben a fűtőelem-köteg áttervezésével (megerősített hidraulikus ütközéscsillapító, Zircaloy-4 helyett ZIRLO<sup>TM</sup>, megerősített kapcsolat a távtartó rácsok és a vezető csövek között) sikerült mérsékelni a kötegek elhajlását, és 2007 óta nem akadt el szabályozó rúdnyaláb fűtőelem kötegekben [11]. 2010. augusztustól az 1-es blokkban, illetve 2011. májustól a 2-es blokkban is áttértek az orosz TVEL beszállító által gyártott TVSzA-T fűtőelem kötegre [11].

## Kutatási módszerek

A fűtőelem-kötegek elhajlását befolyásoló folyamatok és tényezők feltárására a kutatók analitikus/numerikus

számításokat és zárt áramlási csatornában végzett kísérleteket is alkalmaznak. Az előbbieket célja a kezdetekben főleg az okok feltárása és paramétervizsgálat volt. Manapság már inkább a reaktorban történő elhajlási minták előrejelzése, valamint optimális átrakási sémák meghatározása a cél. A probléma megjelenését követően a 90-es években főleg a kötegek mechanikai viselkedését leíró, kísérletekkel validált, nem lineáris végelemmodelleket fejlesztettek, amelyekkel számos, a deformációt befolyásoló tényezőt vizsgáltak (leszorító erő, távtartó rács és vezető csövek, illetve fűtőelemek kapcsolata, szerkezeti anyagok besugárzási tartósfolyási és duzzadási tulajdonságai, hőtágulás, stb.) [16], [17], [18]. A fűtőelem-kötegek kölcsönhatásának, illetve az azok között kialakuló - a nominálistól eltérő - vízrések vizsgálatához egyszerűsített fűtőelem-köteg sor modelleket építettek fel [18].

A számítástechnika fejlődésének köszönhetően a 2000-es évek elejétől kezdve egyre összetettebb kódokat, modelleket fejlesztettek ki (pl. SAVAN3D) [12], [19], amelyek már lehetővé teszik több kampányon át tartó szimulációk futtatását is. Az AREVA által fejlesztett un. Háló-modell (*Network modell*) már figyelembe veszi a szerkezet és áramlás egymásra hatását (*Fluid-structure interaction*) is, amely jelentős mértékben hozzájárul az elhajlási minták alakulásához [12]. A szabályozó rúd és vezető cső közötti sűrűlódás, illetve a szabályozó rúd esési karakterisztikájának vizsgálatára is fejlesztettek végelemmodelleket [19], [20].

A kísérleteket főleg a hidraulikai terhelések és kölcsönhatások meghatározására használják, illetve az egyre inkább terjedő numerikus áramlástani szimulációk validálásához szolgáltatnak mérési eredményeket [12], [21], [22]. Nélkülözhetetlenek, mert összetett jelenségek vizsgálatára alkalmasak, azonban legtöbbször a reaktorban uralkodó körülményektől eltérő környezetben (kisebb nyomás, alacsonyabb hőmérséklet). Továbbá az áramlási csatornák jellemző mérete alapján azok csak 1-2 db teljes méretű fűtőelem-köteg vizsgálatára alkalmasak, ezért csak közvetve szolgáltatnak információt a teljes reaktor viselkedésére az elhajlás szempontjából.

## Összefoglalás

A nyugati nyomottvízes és VVER-1000-es reaktorokban az 1990-es évek közepétől kezdődően a fűtőelem-kötegek nagymértékű elhajlása miatt számos szabályozó rúdnyaláb a határértéknél lassabban esett a helyére, vagy elakadt a kötegekben a reaktor leállítása során. A vizsgálatok rámutattak, hogy a besugárzási tartósfolyás, amely mértékét számos dolog befolyásolja, jelentős mértékben hozzájárul a probléma kialakulásához. Továbbá feltárták, hogy a fűtőelem-kötegek nem véletlenszerűen, hanem az adott reaktorra jellemző hidraulikai erők miatt meghatározott irányban hajlanak el. Új, az elhajlással szemben ellenállóbb fűtőelem-köteg konstrukciókkal, valamint az átrakási sémák optimalizálásával sikerült mind a nyugati PWR, mind a VVER-1000 blokkokban jelentősen csökkenteni az elhajlások mértékét, azonban a normál állapot elérése fokozatos, számos kampányon át tartó, hosszú folyamat.

## Irodalomjegyzék

- [1] Csom Gyula: *Atomerőművek üzemtana, II. kötet, Az energetikai atomreaktorok üzemtana, 1. rész; Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2005.*
- [2] I.N. Vasilchenko, A.A. Enin, V.M. Troyanov, V.L. Molchanov: *Design measures for providing geometrical stability of WWER reactor cores; Proceedings of IAEA Technical Meeting on Structural Behavior of Fuel Assemblies for Water Cooled Reactors, Cadarache, 2004, IAEA-TECDOC-1454, pp. 169–178, Vienna, 2005.*
- [3] T. Andersson, J. Almerger, L. Björnkvist: *A decade of assembly bow management at Ringhals; Proceedings of IAEA Technical Meeting on Structural Behaviour of Fuel Assemblies for Water Cooled Reactors, Cadarache, 2004, IAEA-TECDOC-1454, pp. 129–136, IAEA, Vienna, 2005.*
- [4] A. Gunstek, B. Kurinčić: *Evaluation of rod insertion issue for NPP Krško; Nuclear Energy in Central Europe '98, pp. 123–131, Terme Čatež, 1998.*
- [5] S. Jacobson, E. Francillon: *Incomplete control rod insertion due to extreme fuel element bow; Nuclear Fuel and Control rod: Operating Experience, Design Evolution and Safety Aspects, Madrid, 1996.*
- [6] *IAEA Nuclear Energy Series, No. NF-T-2.1: Review of fuel failures in water cooled reactors; IAEA, Vienna, 2010.*
- [7] J. R. León, A. Pérez-Navas, J. L. Buedo: *Experience in Spain with Fuel and Control Rods; Nuclear Fuel and Control rod: Operating Experience, Design Evolution and Safety Aspects, Madrid, 1996, pp. 79–88.*
- [8] J. J. Jadot, C. Frans, S. Goethals, H. De Baenst: *Incomplete rod insertion at DOEL 4 and TIHANGE 3, International LWR Fuel Performance Meeting, TopFuel 1999.*
- [9] D. Bekirev, A. Nikolov: *Kozloduy NPP nuclear fuel cycle experience, Proceedings of IAEA Technical Meeting on Structural Behaviour of Fuel Assemblies for Water Cooled Reactors, Cadarache, 2004, IAEA-TECDOC-1454, pp. 165–167, IAEA, Vienna, 2005.*
- [10] Vasilchenko, E. Demin: *Operational indices of VVER-1000 fuel assemblies and their improvements; Proceedings of 1st International Conference on VVER Reactor Fuel Performance, Modelling and Experimental Support, pp. 49, Varna, BAS, INRNE, Sofia, 1995.*
- [11] M. Mikloš, M. Malá, D. Ernst: *The role of CVR in the fuel inspection at Temelín NPP; IAEA Technical Meeting on Hot Cell Post-Irradiation Examination and Pool-Side Inspection of Nuclear Fuel, Smolenica, Slovakia, 2011.*
- [12] J. Stabel, B. Dressel, V. Marx, C. J. Muench, A. Horvath, C. Brun, E. Mery de Montigny, C. Song: *Advanced methodology to predict in-reactor bow of PWR fuel assemblies for efficient design optimization: background, validation, examples; 2011 Water Reactor Fuel Performance Meeting, Chengdu, China, 2011, T1-006.*
- [13] D. Gottuso, J. N. Canat, P. Mollard: *A family of upgraded fuel assemblies for PWR; International LWR Fuel Performance Meeting, TopFuel 2006, Salamanca, 2006.*
- [14] D. Chaplin, W. Rabenstein, M. Aulló, A. Cerracín, G. Boman: *EFG Fuel designs and experience in EDF reactors; International LWR Fuel Performance Meeting, TopFuel 2006, Salamanca, 2006.*
- [15] V.L. Molchanov, A.B. Dolgov, O.B. Samoylov, V.B. Kaydalov, V.S. Kuul, I.V. Petrov, A.V. Ivanov, G.A. Simakov, V.I. Aksenov, A.N. Lupishko: *The results of TVSA development and operation experience; Proceedings of IAEA Technical Meeting on Structural Behavior of Fuel Assemblies for Water Cooled Reactors, Cadarache, 2004, IAEA-TECDOC-1454, pp. 137–147, Vienna, 2005.*
- [16] J. Stabel, H.-P. Hübsch: *Fuel assembly bow: Analytical modeling and resulting design improvements; Trans. of the 13th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 13), Escola de Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, August 13–18, 1995.*
- [17] J. Stabel, H.-P. Hübsch: *Status of Fuel Assembly Bow Modeling and Hardware Consequences. Trans. of the 15th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 15), Seoul, Korea, August 15–20, 1999.*
- [18] H. Salaiün, J. P. Baleon, E. Francillon: *Analytical approach to PWR fuel assembly distortion.; Trans. of the 14th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 14), Lyon, France, August 17–22, 1997.*
- [19] S. Y. Jeon, J. H. Kim, K. L. Jeon, S. T. Hwang, A. Cerracin, M. A. Chaves, Y. Aleshin: *3D Analysis for the fuel assembly growth and bow evaluation; Trans. of the 21th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 21), New Delhi, India, November 6–11, 2011., Paper ID#246.*
- [20] D. Bosselut, H. Andriambololona, E. Longatte, J. Pauthenet: *Insertion and drop of control rod in assembly simulations and parametric analysis; Proceedings of IAEA Technical Meeting on Structural Behavior of Fuel Assemblies for Water Cooled Reactors, Cadarache, 2004, IAEA-TECDOC-1454, pp. 189–194, Vienna, 2005.*
- [21] G. Ricciardi, S. Bellizzi, B. Collard, B. Cochelin: *Fluid–structure interaction in a 3-by-3 reduced-scale fuel assembly network; Science and Technology of Nuclear Installations, Volume 2010, Article ID 517471, doi:10.1155/2010/517471.*
- [22] J. Peyberñes: *Evaluation of the Forces Generated by Cross-Flow on PWR Fuel Assembly. Proceedings of IAEA Technical Meeting on Structural Behavior of Fuel Assemblies for Water Cooled Reactors, Cadarache, 2004, IAEA-TECDOC-1454, pp. 13–21, Vienna, 2005.*
- [23] *Négyzetrács fűtőelem köteg*  
<http://www.aveva.com/EN/operations-807/fuel-production-integrated-expertise-from-a-to-z.html> (letöltés: 2012. november 8.)
- [24] *A Dél-ukrán atomerőmű és a Westinghouse együttműködése*  
<http://www.sunpp.mk.ua/en/energocomplex/history> (letöltés: 2012. november 18.)
- [25] *Fűtőelem köteg meghibásodás a Dél-ukrán atomerőműben*  
[http://www.world-nuclear-news.org/C\\_Energocomplex\\_dismissed\\_2108121.html](http://www.world-nuclear-news.org/C_Energocomplex_dismissed_2108121.html) (letöltés: 2012. november 18.)