

Balesettűrő nukleáris üzemanyag koncepciók fejlesztése

Slonszki Emese

Energiatudományi Kutatóközpont

1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

A Fukushima Daiicsi atomerőműben 2011-ben bekövetkezett súlyos reaktorbaleset után nemzetközi szinten, megújult erővel indult meg az atomerőművek üzemeltetésének biztonságosabbá és gazdaságosabbá tételét célzó balesettűrő üzemanyagok fejlesztése. Rövid távon adalékos tablettákat, bevonatos és FeCrAl burkolatokat, míg hosszú távon szilicid üzemanyagokat és SiC burkolatokat fejlesztenek. Jelenleg a legelőrehaladottabb állapotban az Amerikai Egyesült Államokban, Kínában, Oroszországban, Dél-Koreában és Japánban tartanak. 2018-ban kezdődött meg a rövid távú ATF (Accident Tolerant Fuel – balesettűrő üzemanyag) koncepciók kereskedelmi reaktorokban történő tesztelése, kereskedelmi könnyűvízes reaktorba történő bevezetése pedig már a közeli években várható. Engedélyezésük egy összetett folyamat eredményeként a hatóságok és a nukleáris szakemberek együttműködésével jön létre. A Nemzetközi Atomenergetikai Ügynökség (NAÜ) projektjei keretében az Energiatudományi Kutatóközpont is részt vesz ATF fejlesztésre irányuló kísérletekben.

Bevezetés

A 2011-ben Fukusimában bekövetkezett súlyos reaktorbaleset hatalmas lökést adott a balesettűrő üzemanyagok fejlesztésének nemzetközi szinten. Az eseményt követően újult erővel indult meg az atomerőművek használatának biztonságosabbá és gazdaságosabbá tételét célzó balesettűrő üzemanyag fejlesztése, amely kiterjedt mind a tablettára, mind pedig a burkolatra.

Bár világszerte számos fejlesztést folytatnak rövid és hosszú távon egyaránt, jelen cikkben a legelőrehaladottabb koncepciókról számolok be, melyek az Amerikai Egyesült Államokban (USA), Kínában, Oroszországban, Dél-Koreában és Japánban folynak nemzeti vagy nemzetközi együttműködések keretében. Mindezek mellett áttekintem az új üzemanyagok engedélyezéséhez szükséges teendőket, valamint a még hiányzó kísérleti adatokat is.

Rövid és hosszú távon megvalósítható balesettűrő üzemanyag-koncepciók

Az ATF fejlesztések alapvetően két szakaszra tagolódnak. Az első egy rövid távú evolúciós megoldásból áll, amely javítja a biztonságot és az üzemanyagciklus gazdaságosságát, valamint relatíve rövid időn belül kereskedelmi reaktorban használható fűtőelemet eredményez [1]. Az üzemanyag balesettűrő képességének növekedése alapvetően a burkolat változásaiból származik, ami bizonyos anyagoknál fokozott neutronelnyeléssel társul, viszont ez kompenzálható az üzemanyag-tabletta megváltoztatásával. A rövid távon megvalósítható koncepciók közé tartoznak az adalékos tabletták, a bevonatos és a FeCrAl burkolatok (1. táblázat).

Egy esetlegesen bekövetkező baleset vagy sérülés során az ATF burkolata késleltetheti és/vagy jelentősen csökkentheti a hidrogénképződést; csökkentheti a burkolat gőzzel való reakciójának mértékét, javíthatja a hasadási termékek

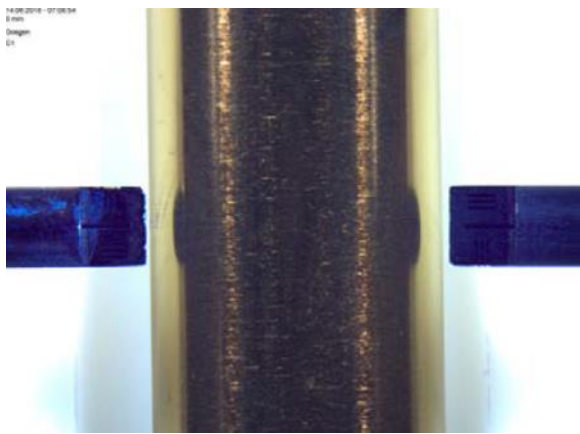
visszatartását. Az ATF lehetővé teszi nagyobb üzemanyag-kiégés elérését és a tabletták nagyobb dúsítását, ennek következtében pedig gazdasági előny jelentkezhet.

A második, hosszabb távú szakasz célja, egy olyan áttörő jellegű fűtőelem kifejlesztése, mely drasztikus javulást eredményez a tervezési alapon túli balesetek esetében. A hosszú távon megvalósítani kívánt ATF koncepciók a szilicid üzemanyagok és a SiC burkolatok.

Az alábbiakban a legeredményesebb, legígéretesebb fejlesztések jelenlegi helyzetét ismertetem.

USA

A rövid távú fejlesztések jelenleg legeredményesebbjei az amerikaiak, akik az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériumának Nukleáris Energiaügyi Hivatala által 2012-ben kidolgozott 10 éves program keretében végzik ATF fejlesztésüket [1], [2]. E munkálatokban három ipari csapat, a GNF (Global Nuclear Fuel), a Westinghouse és a Framatome vesz részt. A GNF a meglévő UO₂ tablettáját használja az új fejlesztésű ARMOR (bevonatos Zr), az IronClad (FeCrAl) és az ODS (Oxide Dispersion Strengthened - oxiddiszperzióval erősített) technológiával felületmódosított FeCrAl burkolataihoz. A Westinghouse urán-szilicid tablettát fejleszt krómbevonatos Zirlo és SiC (hosszú távon) burkolattal. A Framatome ATF koncepciója pedig az adalékos UO₂ tabletták krómbevonatos M5 (1. ábra) és SiC (hosszú távon) burkolattal. 2019 elején a Framatome a világon elsőként töltötte be kereskedelmi reaktorba teljes hosszúságú, krómtartalmú üzemanyag-tablettákkal és krómbevonatos burkolattal ellátott, ATF üzemanyagpálcáival szerelt bevezető tesztkazettáját. Ahogy azt az 1. táblázat is mutatja, már 2019 végéig, vagyis három évvel az eredeti ütemterv vége előtt mindhárom ipari csapatnak volt kereskedelmi reaktorban tesztelhető rövid távú ATF koncepciója, és ezeket mára már minden csapat el is kezdte tesztelni (1. táblázat és 2. ábra).



1. ábra: Krómbevonatos M5 Framatome burkolat pálca a Göszen reaktorban eltöltött 2 besugárzási ciklus után [2]



2. ábra: A Westinghouse EnCore üzemanyaggal töltött kazettái a Byron Atomerőmű 2. blokkján [3]

1. táblázat: Az USA rövid távú ATF koncepcióinak tesztelési szintjei

	RÖVID TÁVÚ ATF KONCEPCIÓ	TESZTELÉS KUTATÓREAKTORBAN	TESZTELÉS KERESKEDELMI REAKTORBAN	KERESKEDELMI REAKTORBA TÖLTÉS VÁRHATÓ IDEJE ENGEDÉLYEZTETÉS UTÁN
GNF	IronClad (FeCrAl burkolat)	✓	Edwin I. Hatch - 2018 Clinton - 2020	2022
	ARMOR (bevonatos Zr burkolat) + UO ₂ tablettá	✓		2022
Westinghouse	krómbevonatos Zr burkolat + ADOPT tablettá (adalékos UO ₂)	✓	Byron - 2019	2022
	krómbevonatos Zr burkolat+ U ₃ Si ₂ tablettá	✓		nincs adat
Framatome	krómbevonatos M5 burkolat + Cr ₂ O ₃ adalékos UO ₂ tablettá	✓	Vogtle - 2019 Göszen - 2019 ANP - 2019	2021 (Calvert Cliff)

Kína

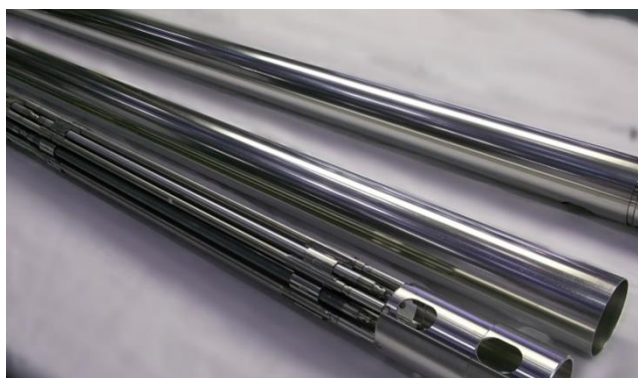
Kína az ATF programja keretében 2015 óta többféle balesettűrő burkolatot és tablettát fejleszt könnyűvízes reaktorokban történő felhasználásra, ideértve a bevonatos cirkónium-ötvözetet, a vas-króm-alumínium ötvözeteket, a bevonatos molibdén-ötvözetet, a szilícium-karbid burkolatokat, valamint a nagy hővezetőképességű urán-oxid tablettákat. A "2SF PI-A" (S2FM-Super Safe Fuel) ATF üzemanyagukat 2019. január 20-án töltötték be a Kínai Mianyang Kutatóreaktorba, ezzel első ízben besugározva kínai fejlesztésű ATF-et (3. ábra, [4]).



3. ábra: Az ATF pálca betöltése a kínai Mianyang kutatóreaktorba [4]

Oroszország

Az orosz ATF koncepciók kétféle tablettából és burkolatból állnak: hagyományos urán-dioxid vagy urán-molibdén ötvözetből álló tabletták, és/vagy krómbevonatos cirkónium vagy króm-nikkel ötvözet burkolat (4. ábra és [5], [6]). A négy eltérő kombinációjú üzemanyag-pálcájukat tartalmazó kísérleti kazettákat a MIR kutatóreaktorban 2019 januárjában kezdték el besugározni. A kereskedelmi reaktorban történő besugáráshoz már legyártottak három teljes méretű, TVS-2M, VVER-1000 üzemanyag-kazettát, melyek mindegyike 12 ATF fűtőelem-pálcát tartalmaz két eltérő burkolatanyaggal, tehát vagy krómbevonatos cirkónium vagy Cr-Ni-ötvözet burkolatút [7]. A VVER reaktorba töltendő teljes méretű üzemanyag-kazetták tesztüzemének engedélyezése jelenleg folyamatban van. A tesztüzemet a Rosztovi Atomerőműben tervezik elvégezni. Oroszország hosszú távú ATF koncepciót is fejleszt, így pl. az urán-szilicid üzemanyagot és a SiC burkolatot.



4. ábra: A MIR reaktorban tesztelendő ATF fűtőelemek [5]

Dél-Korea

A KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute – Koreai Atomenergia Kutatóintézet) kutatói a Cr-10Al bevonatos burkolatkoncepciót fejlesztik ATF burkolatként, amit már teszteltek reaktoron kívül, és rövid ideig tartó besugárással reaktoron belül is a haldeni reaktorban (5. ábra), ahol már nem volt lehetőség a hosszabb távú besugárással elvégzésére annak bezárása miatt [8]. Az eddigi eredmények ígéretesek. A tervek szerint 2024-ig befejezik ATF koncepciójuk fejlesztését, és addig is folytatják az engedélyeztetését. ATF tablettaként kétféle nagy hővezetőképességű UO_2 tablettát fejlesztett ki azok gyártási technológiájával együtt, mégpedig a fémes mikrocellás és a fémes mikrolemezes tablettát, melyek a fémes fázis elrendeződésének mintázatában térnek el.



5. ábra: A KAERI PWR körülmények között a Halden reaktorban tesztelt CrAl bevonatos burkolatmintája [8]

Japán

Japánban a FeCrAl-ODS acélt és a szilícium-karbid kompozitot vizsgálják ATF burkolat jelöltként. Számos kísérleti munkát és az üzemanyag-viselkedés előrejelzésére

használt modelleik fejlesztését is elvégezték már [9]. Azonban kutatóreaktor hiányában hiányoznak még a besugárási hatását vizsgáló kísérleteik. Japánban nemcsak belső, hanem nemzetközi együttműködés is szükséges a besugárási vizsgálatok elvégzéséhez, mivel a világon is csak korlátozott számú kutatóreaktor áll rendelkezésre.

Engedélyezés

A nukleáris biztonság fenntartása érdekében az engedélyezéshez számos biztonsági kritérium teljesülése szükséges úgymint üzemelési határértékek, teljesítményi előírások, üzemzavari határértékek, fűtőelem paraméterek. E kritériumok felülvizsgálatát az OECD NEA CSNI (Organization of Economic Co-operation and Development Nuclear Energy Agency Committee on the Safety of Nuclear Installations – Gazdasági Együttműködési és Fejlesztési Szervezet Nukleáris Energia Ügynökség Nukleáris létesítmények biztonságával foglalkozó bizottsága) akciócsoportja kezdte meg 1996-ban. Az új típusú fűtőelemek fejlődése miatt időszzerűvé vált a meglévő kritériumok alkalmazhatóságának ellenőrzése, az új anyagviselkedésekhez és jelenségekhez új mérőszámok kidolgozása, adatok gyűjtése és mindezekhez nemzetközi együttműködések tervezése [10].

Az OECD NEA CSNI értékelt a fent említett rövid, illetve hosszú távon fejlesztendő koncepciók engedélyezésre vonatkozó helyzetét, így a bevonatos cirkónium, a FeCrAl és a SiC burkolatokat, valamint az adalékos és a szilicid tablettákat. Az új típusú üzemanyagok engedélyezéshez elengedhetetlen a hatóságok és a fejlesztők együttműködése. Bár a fejlesztők folyamatosan végeznek alátámasztó, igazoló kísérleteket reaktoron belül és kívül egyaránt [11], az új anyagok engedélyezéséhez még számos vizsgálatra van szükség [12]. Az alábbiakban röviden azon hiányosságok kerültek összefoglalásra, amelyeket az új anyagokra vonatkozó engedélyhez még pótolni kell.

- A bevonatos cirkónium burkolatoknál a legnagyobb adathiány a termékspecifikus értékekben van, mivel a gyártók nem szeretnék felfedni a termékeiket. Jelenleg besugárási eredményből is kevés van, mivel még folyamatban vannak az ezirányú kísérletek, valamint a kritikus hőfluxust is vizsgálni kell, mivel ezt befolyásolja a burkolatok felületkezelése.
- FeCrAl burkolatoknál vizsgálni kell a tabletták és a burkolat közötti kölcsönhatást, a tranzienzeseteket, a vas esetleges oxidációját, a felhasadási geometriát, a besugárási hatását. Továbbá az α' -kiválás képződése miatti ridegdedést számos anyagösszetételre, hőmérséklettartományra, besugárási értékre kell ellenőrizni.
- A SiC burkolatoknál számos mérésre és tesztre van még szükség RIA (Reactivity-Initiated Accident – reaktivitás-üzemzavar) és LOCA (Loss of Coolant Accident – hűtőközegvesztéses-üzemzavar) esetén a fém- és a kerámiaburkolat magas hőmérsékletű viselkedésének jelentős eltérése miatt, és új biztonsági kritériumot kell kidolgozni, mely a hűthető geometria fennmaradására vonatkozik. Iterációs eljárással kell fejleszteni a modelleket a kísérletekkel párhuzamosan.
- Az adalékos tabletták esetében szükség van még a tabletták középvonali hőmérsékletének és az üzemanyag

hővezetésének mérésére nagy kiégések esetén. A PCI (Pellet Cladding Interaction – a tableta és a burkolat közötti kölcsönhatás) teljeskörű vizsgálatához további rámpatesztet (a teljesítmény gyors változtatásával járó teszt) és tranzienstesztet kell végezni. Az üzemzavari folyamatok vizsgálatok adatait kell gyűjteni a tableta fragmentációjáról, relokációjáról és szétszóródásáról, valamint a radiológiai következményekről egészen olyan szélsőséges esetig is, mint a zónaolvadás.

- A szilicid tabletták adatbázisai még nagyon hiányosak. Többek között szükség van besugárzásos tesztekre közepes kiégéseken, rámpatesztekre, burkolatsérüléssel tesztekre. Külön kísérleteket kell végezni az olvadt üzemanyaggal is, mivel a szilicid tabletták olvadáspontja alacsonyabb, mint az UO₂ tablettáké.

Jól látható, hogy a fenti új burkolat- és tablettakoncepciók engedélyezéséhez még számos vizsgálati eredményre van szükség.

ATF burkolatfejlesztésben való EK részvétel

Az Energiatudományi Kutatóközpont (EK) is részt vesz ATF fejlesztésre irányuló kísérletekben nemzetközi együttműködések keretében. Ilyen volt például a NAÜ „Fokozott balesettűrű vízűtűtes reaktorok üzemanyag

lehetőségeinek elemzése és kísérleti vizsgálata” című összehangolt kutatási projektjének egyik kulcsfontosságú akcióterve, melyben az ATF burkolat jelölt anyagainak „round robin” körmérése (RRT) lett elvégezve. Ekkor a vizsgálat tárgya a krómbevonatos E110 burkolatanyag volt, magas hőmérsékletű oxidáció hatásának kitéve (1100 °C-os gőznek 60 és 180 percig, 1200 °C-os gőznek 30, 45 és 60 percig). A kísérleti eredményeket a [13] ACTOF TECDOC tartalmazza. Egy másik NAÜ projektben való EK részvétel során (Testing and Simulation for Advanced Technology and Accident Tolerant Fuels (ATF-TS) [14]) az ATF mechanikai vizsgálata kiterjed a tableta és a burkolat közötti kölcsönhatás tanulmányozására mandrelmérések keretében, valamint felfűvódásos és felhasadásos kísérletekre magas hőmérsékletű kemencében. E projekt befejezése 2024-re várható.

Összegzés

Megállapíthatjuk, hogy az ATF üzemanyagkoncepciók fejlesztése rövid távon máris eredményes, hosszú távon pedig rendkívül ígéretes, és akár 10 éven belül meg is valósulhat. Az új ATF-jelölt anyagok engedélyezéséhez még sokféle és nagyszámú kísérlet, vizsgálat elvégzése szükséges reaktoron kívül és belül egyaránt. Az Energiatudományi Kutatóközpont is részt vesz ATF fejlesztésre irányuló kísérletekben NAÜ projektek keretében.

Irodalomjegyzék

- [1] F.J. GOLDNER, W. MCCAUGHEY, S.L. HAYES, D.M. WACHS, K.A. TERRANI, A.T. NELSON, K.J. MCCLELLAN, AND C.R. STANEK: *The U.S. Accident Tolerant Fuels Program – A National Initiative Coming Of Age*, 2019, Seattle, Washington, USA, 2019. szeptember 22-26.
- [2] V. REBEYROLLE, N. VIOUJARD, A.C. SCHOLER, R. KIEWER, J. REED: *PROtect Fuel: The Leading E-ATF Solution Delivered by Framatome*, TopFuel 2019, Seattle, Washington, USA, 2019. szeptember 22-26.
- [3] ROBERT OELRICH, ZESSES KAROUTAS, PENG XU, JAVIER ROMERO, HEMANT SHAH, JORIE WALTERS, ED LAHODA, MICHAEL SIVACK, JOHN LYONS, LUKE CZERNIAK, FRANK BOYLAN, RAGHU ÁVALI, ANDREW BOWMAN, MAGNUS LIMBÄCK, ANTOINE CLAISSE, JONATHAN WRIGHT: *Overview of Westinghouse Lead Encore® Accident Tolerant Fuel Program*, TopFuel 2019, Seattle, Washington, USA, 2019. szeptember 22-26.
- [4] <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Chinese-developed-ATF-undergoing-irradiation-tests>; A megjelenés dátuma: 2019.01.24.
- [5] <https://www.rosatom.ru/en/press-centre/news/rosatom-starts-testing-of-accident-tolerant-fuels-for-light-water-reactors-/>; A megjelenés dátuma: 2019.01.28.
- [6] <https://rosatom-centraleurope.com/hu/journalist/news/a-rosatom-megkezde-az-orosz-s-a-k-lf-ldi-k-nny-vizes-reaktorok-sz-m-ra-kifejlesztett-baleset-ll-to/>; A megjelenés dátuma: 2019.01.28
- [7] https://www.rosatom.ru/en/press-centre/news/rosatom-has-manufactured-first-russian-accident-tolerant-fuel-for-commercial-reactors/?sphrase_id=1605542; A megjelenés dátuma: 2019.12.26.
- [8] HYUN-GIL KIM, IL-HYUN KIM, YANG-IL JUNG, DONG-JUN PARK, JUNG-HWAN PARK, YOUNG-HO LEE, AND, BYUNG-KWON CHOI: *Status of ATF cladding development at KAERI*, TopFuel 2019, Seattle, Washington, USA, 2019. szeptember 22-26.
- [9] S. YAMASHITA, I. IOKA, Y. NEMOTO, T. KAWANISHI, M. KURATA, Y. KAJI, T. FUKAHORI, T. NOZAWA, D. SATO, N. MURAKAMI, H. SATO, T. KONDO, K. SAKAMOTO, K. KUSAGAYA, S. UKAI, A. KIMURA, A. YAMAJI: *Overview of accident-tolerant fuel R&D program in Japan*, TopFuel 2019, Seattle, Washington, USA, 2019. szeptember 22-26.
- [10] NEA (2012), „Nuclear Fuel Safety Criteria Technical Review” Second Edition, ISBN 978-92-64-99178-1
- [11] NEA (2020), „CSNI Technical Opinion Papers: Applicability of Nuclear Fuel Safety Criteria to Accident Tolerant Fuel Designs” Manuscript
- [12] NEA (2018), „State-of-the-Art Report on Light Water Reactor Accident-Tolerant Fuels”, NEA No. 7317
- [13] M. ŠVEVEĚK, J. KREJĚÍ, A. CHALUPOVÁ, J. KABÁTOVÁ, F. MANOCH, J. KOĚÍ, L. CVRĚEK, C. TANG, M. STEINBRÜCK, M. GROSSE, S. PENTTILÄ, J.-M. AUTIO, J. LYDMAN, A. TOIVONEN, B. SARTOWSKA, W. STAROSTA, L. WALICE, A. KRZECENIAK, E. PAŃCZYK, P. KALBARCZYK, K. KULISA, J. SMOLIK, J. MIZERACKI, Z. HÓZER, T. NOVOTNY, E. PEREZNE FERÓ, A. PINTÉR CSORDÁS, M. HORVÁTH, P. SZABÓ, C. GIOVEDI, P. Xu: *Round robin exercise of the candidate atf cladding materials within the ACTOF project, Modelling of Fuel Behavior in Design Basis Accidents and Design Extension Conditions*, IAEA-TECDOC-1913, 2020
- [14] <https://www.iaea.org/projects/crp/t12032>; A projekt indulásának dátuma: 2020.04.06.