



# Energiatudományi Kutatóközpont

## *Balesettűrő nukleáris üzemanyag koncepciók fejlesztése*

Slonszki Emese, Barsy Eszter

TSO Szeminárium, OAH, 2022. június 14.



2011. **Fukushima Daiichi** atomerőmű súlyos reaktorbaleset



**Balesettűrő** üzemanyagok fejlesztése nemzetközi szinten



**Korábbi** és **új** tablettá és burkolatkonceptiók fejlesztése



Bemutatni:

- **hol tart** az egyes balesettűrő üzemanyag koncepciók fejlesztése, azok közül
- **mely anyagok** jutottak el az erőművi tesztelés szintjére,
- a **nukleáris hatóságok** hogyan kezelik a balesettűrő fűtőelemek engedélyezését.



### Rövid távú ATF koncepciók:

az üzemanyag ciklus biztonságosabbá és gazdaságosabbá tétele

**adalékos tableta**

**bevonatos burkolat**

**FeCrAl burkolat**

### Hosszú távú ATF koncepciók:

olyan üzemanyag előállítása, ami drasztikus javulást mutat egy tervezési alapon túli baleset esetén is

**szilicid tableta**

**SiC burkolatok**

### Legelőrehaladottabb rövid és hosszú távú ATF koncepciók:

- ❖ Amerikai Egyesült Államok
- ❖ Kína
- ❖ Oroszország
- ❖ Korea
- ❖ Japán



# USA

	<b>General Electric/Global Nuclear Fuel</b>	<b>Westinghouse</b>	<b>Framatome</b>
<b>Tabletta</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• meglévő UO<sub>2</sub> technológia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• adalékos UO<sub>2</sub> (ADOPT™)</li> <li>• nagy sűrűségű (pl. U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>) nagy hővezetőképességű tabletták</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> adalékos UO<sub>2</sub></li> </ul>
<b>Burkolat</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bevonatos Zr (ARMOR™),</li> <li>• FeCrAl (IronClad™)</li> <li>• ODS technológiával felületmódosított FeCrAl</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• krómbevonatos Zirlo</li> <li>• SiC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• krómbevonatos M5</li> <li>• SiC</li> </ul>



## GNF

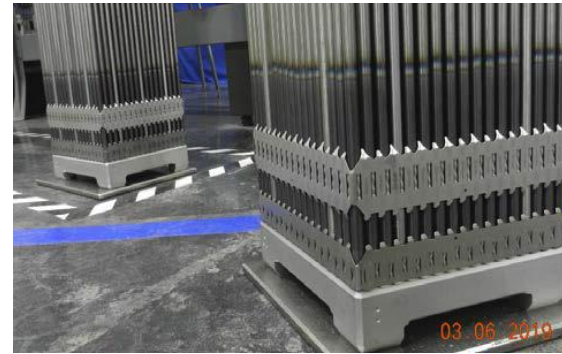


FeCrAl burkolat mintadarab egy kereskedelmi  
üzemanyag-kazettában [1]

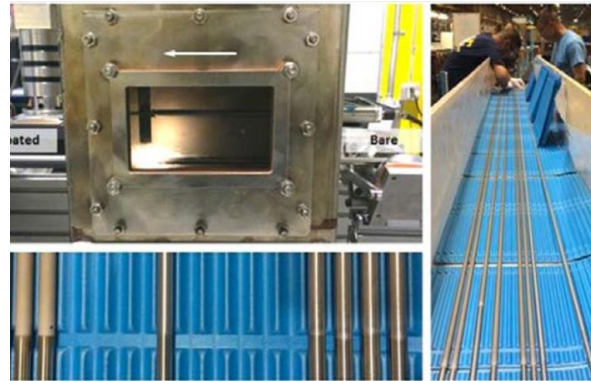


Néhány bevezető pálca behelyezése a Hatch  
atomerőmű 1. blokki pihentető medencéjébe (Fotó:  
Southern Nuclear [2])

## Westinghouse



EnCore üzemanyaggal töltött kazetták a  
Byron Atomerőmű 2. blokkján [3]

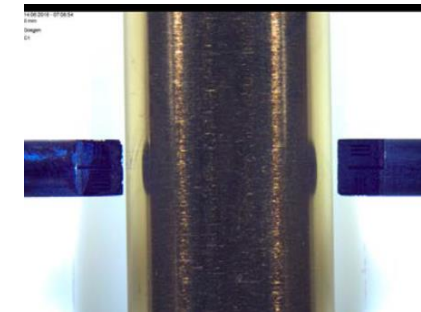


Krómbevonatos fűtőelempálcák [3]

## Framatome



Teljes hosszúságú krómbevonatos M5  
Framatome burkolat pálca [4]



Krómbevonatos M5 Framatome burkolat pálca a  
Gösgen reaktorban eltöltött 2 besugárzási ciklus  
után [4]



# Kína

2015 óta fejleszt többféle balesettűrő burkolatot és tablettát könnyűvízes reaktorokhoz:

- **bevonatos cirkóniumötvözet**
- **vas-króm-alumíniumötvözet**
- **bevonatos molibdénötvözet**
- **szilícium-karbid burkolatok**
- **nagy hővezető képességű urán-oxid tabletták**

2019. január 20-án töltötték be a Kínai Mianyang Kutatóreaktorba a "2SF PI-A" (S2FM-Super Safe Fuel) ATF üzemanyagukat.



Először sugároztak be kínai fejlesztésű ATF-et.



# Oroszország

Kétféle tablettá és burkolat négy eltérő kombinációban:

**hagyományos urán-dioxid / urán-molibdén ötvözet tablettá**  
+  
**krómbevonatos cirkónium / króm-nikkel ötvözet burkolat**

2019. kísérleti kazetták besugárzása a MIR kutatóreaktorban.

Kereskedelmi reaktorban történő besugárzást a Rostov atomerőműben terveznek: már legyártottak három teljes méretű, TVS-2M, VVER-1000 üzemanyag-kazettát két eltérő burkolatanyag koncepcióval.

Hosszú távú fejlesztés: **urán-szilicid tablettá** és **SiC burkolat**.





# Korea

**Cr-10Al bevonatos burkolat** fejlesztése ATF burkolataként.

Reaktoron kívül és rövid ideig tartó besugárzással reaktoron belül tesztelték a haldeni reaktorban.



Az eddigi eredmények ígéretesek.

2024-ig tervezik befejezni ATF koncepciójuk fejlesztését, és addig is folytatják az engedélyeztetését.

KAERI kétféle nagy hővezető képességű  $UO_2$  tablettá + gyártási technológia kifejlesztése



**fémes mikrocellás és fémes mikrolemezes tablettá**

(a fémes fázis elrendeződésének mintázatában térnek el)



# Japán

ATF burkolat:

- **FeCrAl-ODS acél**
- **szilícium-karbid kompozit**



Kísérleti munkák + az üzemanyag-viselkedés előrejelzésére használt modellek fejlesztése már kész.

Nincsenek kutatóreaktoraik ezért a besugárzás hatását vizsgáló kísérleteik még hiányoznak.

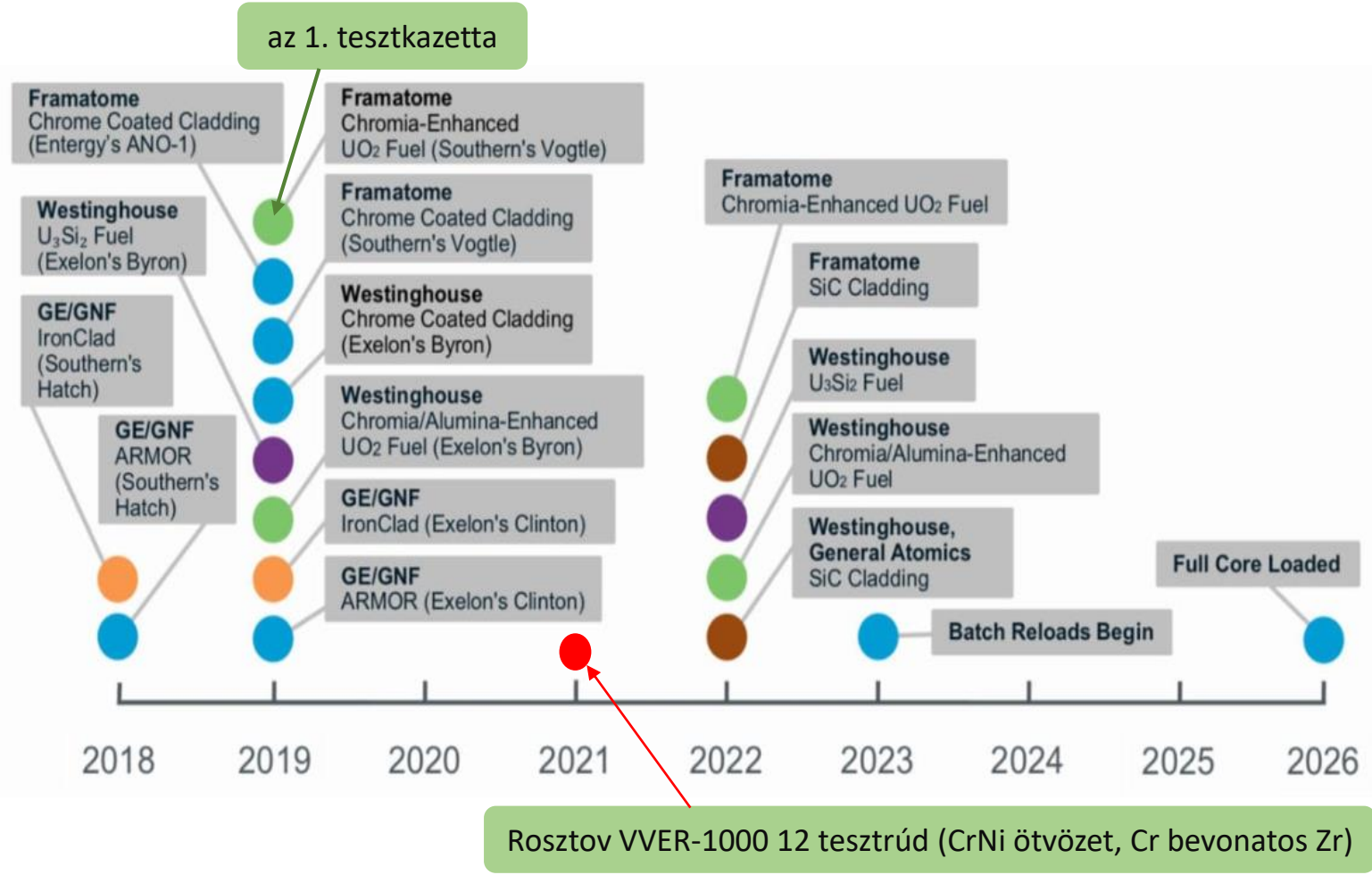


Belső és nemzetközi együttműködés is szükséges.



# Rövid távú ATF koncepciók tesztelési szintje

	Rövid távú ATF koncepció	Tesztelés kutatóreaktorban	Tesztelés kereskedelmi reaktorban	Kereskedelmi reaktorba töltés várható ideje engedélyeztetés után
GNF	IronClad (FeCrAl)	✓	Hatch 1 2018	2022
	ARMOR (bevonatos Zr) + UO <sub>2</sub> tablettá	✓	Clinton 2020	2022
Westinghouse	krómbevonatos Zr burkolat + ADOPT tablettá (adalékos UO <sub>2</sub> )	✓	Byron 2019	2022
	Zr burkolatból + U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> tablettá	✓		
Framatome	krómbevonatos M5 burkolat + Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> adalékos UO <sub>2</sub>	✓	Vogtle 2019 Gösgen 2019 ANP 2019	Calvert Cliff 2021
Kína		Kínai Mianyang Kutatóreaktor		
Oroszország		MIR		
Korea		Halden rektor		2024
Japán		-	-	



<https://www.powermag.com/vogtle-2-installs-worlds-first-accident-tolerant-nuclear-fuel-assemblies/>



# Engedélyezés

A nukleáris biztonság fenntartása érdekében az engedélyezéshez számos **biztonsági kritérium** teljesülése szükséges:



***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*) akciócsoportja kezdte meg 1996-ban.

Új típusú fűtőelemek miatt:

- meglévő kritériumok alkalmazhatóságának ellenőrzése,
- az új anyagviselkedésekhez és jelenségekhez új mérőszámok kidolgozása,
- nemzetközi együttműködések tervezése.



## Az engedélyezéshez még szükséges **hiányosságok** általánosságban

### Bevonatos cirkónium burkolat:

***termékspecifikus értékek***

***besugárzásos eredmény*** kevés

***kritikus hőfluxust*** vizsgálni kell



a gyártók nem szeretnék felfedni a termékeiket még folyamatban vannak az ezirányú kísérletek ezt befolyásolja a burkolatok felületkezelése

### FeCrAl burkolat:

Vizsgálni kell:

**a tableta és a burkolat közötti kölcsönhatást,**

**a tranziens eseteket,**

**a vas esetleges oxidációját,**

**a felhasadási geometriát,**

**a besugárzás hatását,**

**az  $\alpha'$  kiválás képződése miatti ridegedést**

számos anyagösszetételre, hőmérséklettartományra, besugárzási értékre.

### SiC burkolat:

**RIA és LOCA tesztek**, a fém és a kerámia burkolat magas hőmérsékletű viselkedésének jelentős eltérése miatt.

**Új biztonsági kritérium** kidolgozása, mely a hűthető geometria fennmaradására vonatkozik.

**Modellek fejlesztése** a kísérletekkel párhuzamosan.



Az engedélyezéshez még szükséges **hiányosságok** általánosságban:

**Adalékos tabletták:**

Nagy kiégések esetén a **tabletta középvonali hőmérsékletének** és az üzemanyag hővezetésének mérése. További rámpa és tranziens tesztek elvégzésére van szükség a PCI teljeskörű vizsgálatához.

A **tabletta fragmentációjáról, relokációjáról és szétszóródásáról** kell még adatokat gyűjteni az üzemzavari folyamatok vizsgálatokor.

**Radiológiai következmények** adatgyűjtése is szükséges olyan szélsőséges esetig, mint a zónaolvadás.

**Szilicid tabletták:**

Még **nagyon hiányosak** az adatbázisai:

**besugárzásos tesztek** közepes kiégéseken,  
**rámpa tesztek,**

**burkolatsérüléssel tesztek** szükségesek.

**Olvadt üzemanyaggal végzett kísérletek** kellene, mivel a szilicid tabletták olvadáspontja alacsonyabb, mint az  $\text{UO}_2$  tablettáké.



**Számos vizsgálati eredményre van még szükség.**



## NAÜ projekteken való részvétel

### 1. Fokozott balesettűrésű vízhűtéses reaktorok üzemanyag lehetőségeinek elemzése és kísérleti vizsgálata című összehangolt kutatási projekt

- Round robin körmérés, az E110 referencia és a krómbevonatos E110 anyagok viselkedésének tanulmányozása:
  - 1100°C-os gőznek 60 és 180 percig,
  - 1200 °C-os gőznek 30, 45 és 60 percig kitéve.
- Oxidált mintákkal mechanikai kísérletek végzése.

### 2. Testing and Simulation for Advanced Technology and Accident Tolerant Fuels (ATF-TS) projekt

- Mechanikai vizsgálatok:
  - a tableta és a burkolat közötti kölcsönhatás szimulálása mandrel mérések segítségével, szobahőmérsékleten és normál üzemi hőmérsékleten (300 °C),
  - felfúvódásos, felhasadásos vizsgálatok magas hőmérsékletű kemencében.
- Round robin körmérésekben való részvétel.



**Jelentős kísérleti munkával tudunk hozzájárulni az új burkolatanyagok viselkedésének alátámasztására normál üzemi és üzemzavari körülmények között egyaránt.**




- [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] GNF\_First test cycle successfully completed at Hatch plant Some of the ATF lead test rods supplied by Global Nuclear Fuel have been removed from the reactor for evaluation, ANS, March 16, 2020, 12:03PM, <https://www.ans.org/news/article-31/first-test-cycle-successfully-completed-at-hatch-plant/>
- [3] Robert Oelrich, Zeses Karoutas, Peng Xu, Javier Romero, Hemant Shah, Jorie Walters, Ed Lahoda, Michael Sivack, John Lyons, Luke Czerniak, Frank Boylan, Raghu Āvali, 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] 102\_ V. Rebeyrolle, N. Vioujard, A.C. Scholer, R. Kliewer, J. Reed: PROtect Fuel: The Leading E-ATF Solution Delivered by Framatome, TopFuel 2019, Seattle, Washington, USA, 2019. szeptember 22-26.





Energiatudományi Kutatóközpont



Köszönöm a  
figyelmet!