



ÓBUDAI EGYETEM  
ÓBUDA UNIVERSITY

# DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS TÉZISFÜZETE

**FARKAS RÓBERT**

Atomerőművi fűtőelemek anyagszerkezetének  
változása baleseti körülmények között

Témavezető: Dr. Hózer Zoltán

Készült a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpontban

**ANYAGTUDOMÁNYOK ÉS  
TECHNOLÓGIÁK DOKTORI ISKOLA**

Budapest, 2026. március

## Tartalomjegyzék

1	A kutatás előzményei .....	3
2	Célkitűzések .....	4
3	Vizsgálati módszerek .....	5
4	Új tudományos eredmények.....	6
	1. tézispont .....	6
	2. tézispont .....	6
	3. tézispont .....	6
	4. tézispont .....	7
	5. tézispont .....	7
	6. tézispont .....	7
	7. tézispont .....	7
5	Az eredmények hasznosítási lehetősége .....	8
6	Irodalmi hivatkozások listája/ Irodalomjegyzék .....	9
7	Publikációk.....	9
	7.1 A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények.....	9
	7.2 További tudományos közlemények.....	10

# 1 A kutatás előzményei

Az atomenergia a globális villamosenergia-termelés egyik meghatározó pillére, amely alacsony szén-dioxid-kibocsátás mellett biztosítja a nagy mennyiségű, folyamatos energiatermelést. A nukleáris technológia alkalmazása azonban kiemelt biztonsági követelményekkel jár, mivel az atomerőművi üzemzavarok és balesetek potenciális következményei rendkívül súlyosak lehetnek. A biztonság szempontjából kulcsszerepet tölt be a fűtőelemek burkolata, amelyek elsődleges feladata a hasadási termékek visszatartása, valamint az üzemanyag és a hűtőközeg közötti közvetlen kapcsolat megakadályozása.

A könnyűvízes reaktorokban a burkolati anyagként alkalmazott cirkóniumötvözetek egyedülálló nukleáris és anyagtudományi tulajdonságaik révén váltak általánosan elterjedté. Alacsony neutronbefogási keresztmetszetük, jó korrózióállóságuk és magas olvadáspontjuk hozzájárul a reaktorok hatékony és biztonságos működéséhez [Northwood, 1985; Ivanov et al., 1958; Olander et al., 2017]<sup>a,b,c</sup>. Baleseti körülmények között ugyanakkor – például hűtőközegvesztéses-balesetek (LOCA- Loss-of-Coolant Accident), reaktivitásvezérelt tranziensek (RIA- Reactivity-Initiated Accident) vagy teljes feszültségkiesések (SBO- Station Blackout) során – a burkolat extrém mechanikai, termikus és kémiai igénybevételnek van kitéve. Az oxidáció, a nitridképződés, a hidrogénfelvétel és a mikroszerkezeti átalakulások együttesen a burkolat integritásának elvesztéséhez, szerkezetének károsodásához vezethetnek, amely veszélyeztetheti az erőmű és a lakosság biztonságát. A fukusimai baleset tapasztalatai világosan igazolták, hogy a burkolatanyagok baleseti viselkedése meghatározó tényező a súlyos következmények kialakulásában. E tapasztalatok indokolták olyan új nemzetközi kutatási programok elindítását, amelyek célja az úgynevezett balesettűrő üzemanyagok (angolul: Accident Tolerant Fuel, ATF) fejlesztése volt [Terrani, 2018; Tang et al., 2017; Brachet et al., 2020; Steinbrück et al., 2020]<sup>d,e,f,g</sup>. Az ATF-burkolatok a hagyományos cirkóniumötvözetekhez képest nagyobb ellenálló-képességet biztosítanak extrém körülmények között, ezáltal növelve az atomerőművek biztonsági tartalékait. Az értekezés célja a cirkónium alapú burkolatok anyagszerkezeti változásainak részletes vizsgálata baleseti körülmények között. A kutatás középpontjában különböző összetételű, gyártástechnológiájú és falvastagságú burkolatok összehasonlító elemzése áll. A vizsgálatok a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpontban működő CODEX kísérleti berendezésen zajlottak, amelyen lehetőség van az atomreaktorok súlyos baleseti folyamatainak integrális, laboratóriumi szimulációjára.

## 2 Célkitűzések

Jelen kutatás fő célja az atomerőművi fűtőelemek burkolatát alkotó cirkóniumötvözetek anyagszerkezeti változásainak átfogó és rendszerezett vizsgálata baleseti körülmények között. Az üzemzavarok és a súlyos balesetek során fellépő extrém hőmérséklet-, nyomás- és kémiai hatások nagymértékben befolyásolják a fűtőelem burkolatának mechanikai és kémiai stabilitását, ezért e folyamatok megértése kiemelt jelentőségű a nukleáris biztonság szempontjából. A kutatás törekvése, hogy feltárja a különböző összetételű, gyártástechnológiájú és falvastagságú burkolati anyagok (E110, E110G, vékonyfalú E110G, OptZirlo™, valamint krómbevonatos változatok) viselkedését a tervezési határértékeket meghaladó baleseti körülmények között, és részletes képet adjon a szerkezetükben, mikroszerkezetükben, oxidációs mértékükben, valamint hidrogénfelvételi tulajdonságaikban bekövetkező változásokról.

Célul tűztem ki, hogy megtervezem és létrehozom a CODEX berendezésen azokat a kísérleti konfigurációkat, amelyek lehetővé teszik a különböző üzemzavari és baleseti körülmények vizsgálatát. Ehhez kísérleti kötegeket állítottam össze eltérő ötvözetű fűtőelempálcákból, különböző geometriai elrendezésekben.

Az adott kísérletek célja sokrétű volt. Egyrészt vizsgáltuk, hogy egy hűtőközegvesztéses-üzemzavar nem vezet-e a fűtőelemek sérüléséhez. Másrészt súlyosbaleseti, légbetöréses folyamatot modelleztünk extrém körülmények között, gőz- és oxigénhiányos környezetben. Metallográfiai vizsgálatokkal és online mérési adatok segítségével vizsgáltuk, hogy eközben milyen kémiai reakciók mennek végbe a cirkóniumburkolatban, milyen mértékű a cirkónium oxidációja és nitridizációja a folyamat során, továbbá végbemegy-e a cirkónium-nitridek újraoxidációja is.

Az említett kísérleti berendezésen modelleztem egy olyan üzemzavart is, amely során nitrogén kerül a reaktor aktív zónájába. Ebben az esetben azt vizsgáltam, hogy nitrogén jelenlétében heterogén nitrid- és oxidrétegek létre jönnek-e a fűtőelem burkolatában, és ez felgyorsítja-e a cirkóniumkomponensek vízgőzös oxidációját. Továbbá, hogy a nitrogén magashőmérsékleten (1000 °C felett) komoly kémiai reakciót eredményez-e a cirkóniummal, vagy csak nemkondenzálódó gázként jelenik meg?

Integrális kísérlettel vizsgáltam, hogy magas hőmérsékletű súlyosbaleseti körülmények között a burkolat milyen degradációt mutat. A kísérleti kötegekben kétféle burkolat típust használtunk,

majd összehasonlítottam a kétféle ötvözetet a nagyon magas hőmérsékletű tranziens során. Céлом volt, hogy meghatározzam az oxidáltságuk mértékét.

Hűtőközegvesztés-mérést végeztem a VVER-440 reaktorokban nemrég bevezetett új típusú, vékonyfalú burkolattal annak ellenőrzésére, hogy a vékonyabb burkolattal sem következik be a fűtőelem felhasadása üzemzavari körülmények között. Továbbá vizsgáltuk a szivacsos technológiával készült újfajta burkolat oxidációs viselkedését is.

Krómbevonatos (balesetálló) és hagyományos cirkóniumburkolatból összeállított köteggel is végeztem méréseket egyrészt annak vizsgálatára, hogy 1300 °C fölött mindkét típusú burkolat megsérülhet-e, másrészt, hogy milyen degradációs folyamatok jönnek létre az egyes típusoknál. Bizonyítani szerettem volna, hogy amíg a hagyományos burkolatnál a cirkónium oxidációja miatt a ridegedés a meghatározó folyamat, addig a krómbevonatos burkolat esetében a króm-cirkónium eutektikum képződése vezet a burkolat sérüléséhez.

### **3 Vizsgálati módszerek**

Az integrális kísérletek elvégzéséhez a HUN-REN EK telephelyén álló CODEX kísérleti berendezést használtam. Az egyes kísérletekhez tartozó forgatókönyvek alapján a berendezésen a szükséges átalakításokat az egyes kísérletek során elvégeztem. A mérőszakasz tartalmazza mindazokat az eszközöket, amelyek a vizsgált fűtőelem pálcákat fizikailag összetartják, valamint a valós reaktortechnikai geometriát és a hőtechnikai viselkedést a lehető legpontosabban modellezik. A kísérleti köteg hét darab, elektromosan fűtött fűtőelemből áll. Minden kísérlet előtt létrehoztam a fűtőelem-burkolatból álló kísérleti köteget. A kísérleti munka jelentős része a köteg megalkotása volt. A pálcát belső fűtéssel láttam el, ami egy U geometriájú volfrám szállal valósult meg. Távtartónak a burkolat és a volfrám között Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, illetve ZrO<sub>2</sub> pelletet választottam, amelyek hőtechnikai paraméterei hasonlóak az UO<sub>2</sub> tablettákéhoz. A nyomásállóság biztosítására a pálcák egyik végét cirkónium dugóval hegesztettem le, a másik végét grafit tömítéssel zártam le. Az egyes pálcákat kapilláris csövekkel láttam el, amin keresztül a belső nyomás változtatható, illetve a hozzá csatlakozó nyomásmérővel online mérhető. A pálcák felszínét különböző pozíciókban K-típusú és magas hőmérsékletű W-Re hőmérőkkel láttam el, amelyek pontos adatokat szolgáltatnak a köteg különböző részein kialakult hőmérsékletekről. A berendezéshez szükségessé vált gőzfejlesztőt és túlhevítőt építeni, ami a kísérlet során szolgáltatja a túlhevített gőzt. A fűtőtestek elektromos teljesítményét egy kalibrált, analóg szorozáramkör segítségével mértük. A kötegből kilépő gáz

összetételét egy Pfeiffer OmniStar GSD 320 O2 típusú kvadrupól tömegspektrométerrel mértük. Az adatgyűjtő rendszer gyűjtötte és tárolta a mérési eredményeket a kísérletek során, valamint részt vett a szabályozásban is. A kísérlet után a köteget PCE-VE típusú endoszkóppal megvizsgáltuk, majd műgyantával kiöntöttük, és feldaraboltuk. A vízszintes metszeten – megfelelő polírozás után – metallográfiai vizsgálatokat végeztünk.

## **4 Új tudományos eredmények**

### **1. tézispont**

Megterveztem és létrehoztam a CODEX berendezésen azokat a kísérleti konfigurációkat, amelyek lehetővé tették különböző üzemzavari és baleseti körülmények vizsgálatát. Kísérleti kötegeket hoztam létre különböző atomerőművekben használt burkolatanyagokból (E110, E110G, optZIRLO™, krómmal bevont optZIRLO™), különböző geometriai elrendezésekben. Kialakítottam azokat a műszaki megoldásokat, amelyek lehetővé tették a kísérletek során a szükséges határfeltételek biztosítását és az online adatgyűjtést. [S1][S2][S3][S4][S5][S6][S7][S8][S9][S10][S11] [S12]

### **2. tézispont**

A VVER-440 reaktorokban használt E110 és E110G burkolatanyagokkal végzett kísérletsorozat alapján megerősítettem, hogy tervezési üzemzavari körülmények között egy hűtőközeg-vesztés esemény nem vezet a fűtőelemek sérüléséhez. A CODEX-LOCA-200, a CODEX-LOCA-200B és a CODEX-LOCA-E4 kísérletekben megfigyelt burkolatsérülések olyan körülmények között léptek fel, amikor a belső nyomás meghaladta a tervezési üzemzavar során várható értéket, illetve amikor a magas hőmérsékletű vízgőzös oxidáció hosszabb ideig történt, mint ami a referencia forgatókönyv szerint elképzelhető. A CODEX-LOCA-E4 kísérlet jelezte azt is, hogy az új technológiával gyártott fűtőelem-burkolat kevésbé oxidálódik és tovább megőrzi épségét a tervezési alapon túli balesetek során. [S1][S2]

### **3. tézispont**

A VVER-440 reaktorokban nemrég bevezetett vékonyfalú E110G (Zr1%Nb) ötvözetből készült új típusú burkolattal végzett hűtőközeg-vesztéses CODEX-SLIM méréssel rámutattam, hogy a vékonyabb burkolattal sem következik be a fűtőelem felhasadása üzemzavari körülmények között. Továbbá a szivacsos technológiával készült újfajta burkolat sokkal jobb oxidációs viselkedést mutatott, mint az eddig használt hagyományos ötvözet. [S8][S9]

#### **4. tézispont**

Súlyos baleseti, légbetöréses folyamatot modelleztem extrém körülmények között, gőz- és oxigénhiányos környezetben. A magas hőmérsékletű kémiai reakciók következtében összetett oxid- és nitridszerkezetek jöttek létre az E110G ötvözetből készült cirkóniumburkolatban. Az online mérési adatok és a köteg metallográfiai vizsgálata megerősítette, hogy a CODEX-AIT- 3 kísérletben nemcsak a cirkónium oxidációja és nitridizációja ment végbe a folyamat során, hanem a cirkónium-nitridek újraoxidációja is. [S3]

#### **5. tézispont**

A CODEX-NITRO kísérletben modelleztem egy olyan üzemzavart, amelynek során nitrogén kerül a reaktor aktív zónájába hűtőközeg-vesztéses üzemzavari körülmények között. Rámutattam, hogy nitrogén jelenlétében heterogén nitrid- és oxidrétegek jönnek létre az E110 és E110G ötvözetből készült fűtőelem-burkolatán, és ez felgyorsítja a cirkóniumkomponensek vízgőzös oxidációját. A kísérlet jelezte azt is, hogy amíg alacsonyabb hőmérsékleten (500 °C alatt) a nitrogén csak nemkondenzálódó gázként jelenik meg a baleseti folyamatban, addig magasabb hőmérsékleten (1000 °C felett) komoly kémiai reakciót eredményez a cirkóniumburkolattal. [S4][S5][S6]

#### **6. tézispont**

Integrális kísérlettel igazoltam, hogy egy atomerőműben a teljes feszültségkiesés következtében kialakuló, magas hőmérsékletű súlyos baleseti körülmények a fűtőelem-burkolat jelentős mértékű degradációját okozhatják. A CODEX-SBO kísérleti kötegben használt kétféle burkolat (E110 és E110G) összehasonlítása nem jelzett számottevő különbséget a nagyon magas hőmérsékletű tranziens során. Mindkét burkolattípus nagymértékben oxidálódott. [S6][S7]

#### **7. tézispont**

Krómbevonatos (balesetálló) és hagyományos optZirlo<sup>TM</sup> cirkónium burkolatból összeállított CODEX-ATF köteggel végzett integrális mérésből megállapítottam, hogy 1300 °C fölött mind a két típusú burkolat megsérülhet. A degradációs folyamatok azonban különbözőek: amíg a hagyományos burkolatnál a cirkónium oxidációja miatti ridegedés a meghatározó folyamat, addig a krómbevonatos burkolat esetében a króm-cirkónium eutektikum képződése vezet a burkolat sérüléséhez. [S10][S11][S12]

## 5 Az eredmények hasznosítási lehetősége

A munkám során az E110, E110G, vékonyfalú E110G, optZIRLO™ és krómbevonatos optZIRLO™ ötvözetekkel végzett integrális kísérletek során összegyűjtött kísérleti eredmények egyrészt támogatják a nukleáris biztonsági hatósági munkát, másrészt alapot adnak a fűtőelem-modellek számítógépes fejlesztéséhez. Segítik a súlyos baleseti folyamatok megértését, mert részletes adatokat adnak a cirkónium burkolatok oxidációjáról, nitridképződéséről és hidrogénfelvételéről különböző atmoszférában (gőz, levegő, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>), valamint segítik feltárni a fűtőelem-burkolat degradációjának mechanizmusait (oxidréteg felhasadás, breakaway oxidáció, nitridizáció–reoxidáció ciklus).

Kódfejlesztésre és validációra is használhatóak a CODEX mérési adatok (ASTECC, MELCOR, ATHLET-CD, FRAPTRAN, TRANSURANUS). A legújabb fejlesztésű balesetálló fűtőelemek szimulálásához nélkülözhetetlen mérési adatok állnak a rendelkezésre a CODEX-ATF és CODEX-ATF-AIT kísérletekből. Ezeket a mérési adatokat a müncheni székhelyű Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) GmbH intézet munkatársai is felhasználták az ATHLET-CD kód oxidációs számításának pontosításához, továbbá a legújabb AC<sup>2</sup> (AC<sup>2</sup>=ATHLET+ATHLET-CD+COCOSYS) programcsomag krómréteggel bevont burkolat oxidációs számításának a fejlesztéséhez.

A mérések hozzájárulhatnak a LOCA kritériumok pontosításához, amely alapot adhat a magyar és nemzetközi szabályozások módosításához (pl. a LOCA során felhasadó fűtőelemek részaránya tekintetében). Ezzel segítik a hatóságokat abban, hogy megalapozott döntéseket hozzanak üzemanyag-engedélyezési és biztonsági kérdésekben.

A CODEX mérések adatbázisait használták több EU és NAÜ projektben. A nemzetközi összehasonlító tesztek (pl. QUENCH-CODEX párhuzamos mérés) validációs bázisként szolgálnak, és lehetővé teszik néhány fontos effektus hatásának az értékelését.

Az E110 és E110G ötvözetek összehasonlítása egyértelműen igazolja, hogy a paksi atomerőműben bevezetett E110G burkolat alkalmazása biztonsági szempontból előnyösebb. Megnyugtató választ ad arra kérdésre, hogy a vékonyabb burkolattal sem következik be a fűtőelem felhasadása üzemzavari körülmények között.

## 6 Irodalmi hivatkozások listája/ Irodalomjegyzék

- a D. O. Northwood: The Development and Applications of Zirconium Alloys. Materials and Design, Vol. 6, No. 2, p. 58-70 (1985)
- b O. S. Ivanov, V. K. Grigorovich: Structure and properties of zirconium alloys. Technical Report. Second International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1958.
- c Donald R. Olander, Arthur T. Motta, Brian Wirth: Light Water Reactor Materials, Volume 1: Fundamentals. American Nuclear Society (2017), Chapter 17.
- d K. Terrani, Accident tolerant fuel cladding development: promise, status, and challenges, J. Nucl. Mater., 501 (2018), pp. 13-30
- e C. Tang, M. Stueber, H. Seifert, M. Steinbrueck, Protective coatings on zirconium-based alloys as accident-Tolerant fuel (ATF) claddings, Corros. Rev., 35 (2017), pp. 141-165
- f J.C. Brachet, E. Rouesne, J. Ribis, T. Guilbert, S. Urvoy, G. Nony, C. Toffolon-Masclat, M. Le Saux, N. Chaabane, H. Palancher, A. David, J. Bischoff, J. Augereau, E. Pouillier, High temperature steam oxidation of chromium-coated zirconium-based alloys: kinetics and process, Corros. Sci., 167 (2020), Article 108537
- g M. Steinbrück, U. Stegmaier, M. Große, L. Czerniak, E. Lahoda, R. Daum, K. Yueh, High-temperature oxidation and quenching of chromium-coated zirconium alloy ATF cladding tubes with and w/o pre-damage, J. Nucl. Mater., 559 (2022), Article 153470

## 7 Publikációk

### 7.1 A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [S1] Zoltán Hózer, Imre Nagy, Nóra Vér, Róbert Farkas: Simulation of Loss-of-Coolant Accidents in the CODEX integral test facility, EHPG, Lillehammer, Norway, 25-28. September, 2017, paper F2.7
- [S2] Hózer, Zoltán; Nagy, Imre; Farkas, Róbert; Vér, Nóra; Horváth, Márta; Novotny, Tamás; Perez-Feró, Erzsébet; Király, Márton; Kis, Zoltán; Maróti, Boglárka et al. Experimental Simulation of the Behavior of E110 Claddings under Accident Conditions Using Electrically Heated Bundles In: Yagnik, Suresh K.; Motta, Arthur T., Zirconium in the Nuclear Industry: 19th International Symposium ASTM International (2021) pp. 813-832. Paper: STP162220190010, 20 p.
- [S3] R. Farkas, Z. Hózer, I. Nagy, N. Vér, M. Horváth, M. Steinbrück, J. Stuckert, M. Grosse: Effect of steam and oxygen starvation on severe accident progression with air ingress, Nuclear Engineering and Design 396, 2022
- [S4] Nagy, I ; Farkas, R ; Vér, N ; Hózer, Z ; Szabó, P ; Szabó, G ; Kostka, P ; Lajtha, G ; Téchy, Zs: A CODEX-NITRO integrális atomerőművi súlyos baleseti kísérlet NUKLEON 12 Paper: 222 (2019)
- [S5] R. Farkas, I. Nagy, N. Vér, Z. Hózer, M. Horváth, P. Szabó: The CODEX-NITRO experiment, 25th International QUENCH Workshop 22-24 October 2019 Karlsruhe, Institute of Technology Karlsruhe, Germany, Editor: Martin Steinbrück DOI: 10.5445/IR/1000100298
- [S6] R. Farkas, Z. Hózer, I. Nagy, N. Vér, P. Szabó, M. Horváth, P. Kostka, G. Lajtha: Experimental simulation of selected design extension condition scenarios without core meltdown (DEC-A) in the CODEX facility, Progress in Nuclear Energy, 161, 2023

- [S7] R. Farkas, I. Nagy, N. Vér, Z. Hózer, P. Szabó, G. Szabó, M. Horváth: The CODEX-SBO experiment, Proceedings of TopFuel 2022 Light Water Reactor Fuel Performance Conference ISBN: 978-0-89448-787-3
- [S8] Farkas R., Hózer Z., Kis Z., Perez-Feró E., Király M., Horváth L., Novotny T., Szabó P., Bubonyi T.: Hűtőközegvesztéses atomerőművi üzemenzavar kísérleti modellezése, *Anyagvizsgálók Lapja* 2023/III., 2023
- [S9] Farkas, R., Hózer, Z., Kis, Z., Perez-Feró, E., Király, M., Horváth, M., Novotny, T., Szabó, P., Bubonyi, T. (2024). Simulation of loss-of-coolant accident with thin-walled cladding tubes. *Nuclear Materials and Energy*, Volume 40, 101695.
- [S10] R. Farkas, N. Vér, B. Bürger, P. Szabó, Z. Hózer: The CODEX-ATF experiment, 28th International QUENCH Workshop 5-7 December, 2023 Karlsruhe, Institute of Technology Karlsruhe, Germany, Editor: Martin Steinbrück DOI: 10.5445/IR/1000152245
- [S11] Z. Hózer, R. Farkas, N. Vér, B. Bürger: CODEX-ATF: Integral Bundle Test With Accident Tolerant Fuel, Proceedings of TOPFUEL 2024, Grenoble, ENS
- [S12] Róbert Farkas, Nóra Vér, Berta Bürger, Péter Szabó, Anna Pintér Csordás, Levente Illés, Zoltán Kovács, Dávid Cinger, Zoltán Hózer: CODEX-ATF Test, Experimental Programme of Accident Tolerant and Advanced Technology Fuels (ATFs), Final Report of a Coordinated Research project (Vol. 1), IAEA TECDOC (megjelenés alatt)

## 7.2 További tudományos közlemények

- [S13] Hózer, Z; Nagy, I; Kunstár, M; Szabó, P; Vér, N; Farkas, R; Trosztel, I; Vimi, A: Experimental investigation of the coolability of blocked hexagonal bundles, *Nuclear Engineering and Design* 317 pp. 51-58., 8 p. (2017)
- [S14] Farkas Róbert: Hévíztermelő és visszasajtoló kutak által okozott hőmérséklet-változás modellezése, XXX. OTDK, 248. (2011)
- [S15] Farkas, Róbert, Lenkey László: Visszasajtoló kutak által okozott hőmérséklet-változás modellezése, *Hidrológiai Közlöny* 92: 3 pp. 74-78., (2012)