

Óbudai Egyetem

Doktori (PhD) értekezés tézislevele



Atomerőművekben használt cirkónium ötvözetek magas hőmérsékletű oxidációja

Készítette: Perezné Feró Erzsébet

Témavezető: Dr. Hózer Zoltán

Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola

Készült:
Energiatudományi Kutatóközpont



Budapest, 2021. május

I. A kutatás előzményei

A cirkónium alapú ötvözetek fő felhasználója a nukleáris ipar, ahol fűtőelem-burkolatként és kazetták szerkezeti elemeiként alkalmazzák őket (Brown et al., 2005). A fűtőelem-burkolatnak fontos szerepe van az atomerőműben keletkező hasadási termékek környezetbe történő jutásának megakadályozásában, normál és baleseti körülmények között egyaránt. A fűtőelem-burkolat céljára kifejlesztett cirkónium ötvözetek normál üzemi körülmények között kiváló korrózióállósággal és nagyon jó mechanikai tulajdonságokkal bírnak. Üzemzavari és baleseti helyzetekben azonban magas hőmérséklet és korrozív atmoszféra (pl. vízgőz, vízgőz-hidrogén, levegő, vízgőz-nitrogén) jöhet létre, ami a burkolat gyors oxidációjához vezethet. Az oxidáció a burkolat mechanikai tulajdonságainak romlását és extrém esetben akár a burkolat sérülését is okozhatja.

Hűtőközegvesztéses baleset (LOCA) során a burkolat oxidációja tiszta vízgőz atmoszférában megy végbe. A cirkónium-vízgőz reakció eredményeképpen a burkolat külső felületén oxidréteg keletkezik. Az oxidációt intenzív hidrogénképződés kíséri. A képződött hidrogén egy része a cirkóniumban elnyelődik (Frecka et al., 1995), ami hozzájárul a burkolat elridegedéséhez. Bizonyos helyzetekben a fűtőelem-burkolat környezetében hidrogénben gazdag vízgőz atmoszféra is létrejöhet (pl. a paksi atomerőmű 2. blokki tisztítótartályának üzemzavaránál). Ilyenkor a burkolat a gáznemű környezetből nagy mennyiségű hidrogént abszorbeálhat (Hózer et al., 2003). A pihentető medence hűtővíz kimaradásos üzemzavara esetén vagy a reaktortartály súlyos baleset következtében történő meghibásodásakor végbemehet a burkolat levegőben vagy vízgőz-levegő elegyben történő oxidációja. Kis valószínűséggel ugyan, de a fűtőelem-burkolat nitrogénnel vagy nitrogént tartalmazó vízgőzzel is kölcsönhatásba kerülhet a hidroakkumulátorok meghibásodása folytán (Kostka, 2018; Nagy, 2018).

Az atomerőművek biztonságos üzemeltetése érdekében szükség van a fentiekben említett folyamatok alapos megismerésére, feltérképezésére. Világszerte számos kísérletet folytattak már a cirkónium ötvözetek oxidációjával kapcsolatban és korábban az MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézetben (AEKI) is végeztek ilyen típusú vizsgálatokat (Frecka et al., 1995; Frecka et al., 1997; Matus, 2000). Időközben azonban új cirkónium ötvözetek jelentek meg, valamint a vizsgálatukhoz alkalmazott módszerek is fejlődtek, ami indokoltá tette új kísérletsorozatok végrehajtását.

PhD dolgozatom alapját az Energiatudományi Kutatóközpont Fűtőelem és Reaktoranyagok Laboratóriumában (2004-től napjainkig) végzett tudományos kutatómunkám képezte.

II. Célkitűzések

Kutatómunkám fő irányát az E110 és E110G típusú cirkónium fűtőelem-burkolatok magas hőmérsékletű oxidációjának tanulmányozása jelentette.

Célul tűztem ki annak felderítését, hogy az oxidáció körülményei milyen hatással vannak az E110 és E110G ötvözetek oxidációs kinetikájára, a felületen képződő oxidréteg minőségére és esetenként a burkolat által felvett hidrogén mennyiségére. Kutatásaim során az üzemzavari, illetve baleseti körülmények között potenciálisan kialakuló atmoszférák hatásának vizsgálatára helyeztem a hangsúlyt. Ezért a kísérleteket vízgőz, hidrogéndús vízgőz, illetve nitrogéntartalmú atmoszférában (levegő, levegő-vízgőz elegy, nitrogén, nitrogén-vízgőz elegy) terveztem végrehajtani. Célom volt továbbá a két ötvözet magas hőmérsékletű oxidációs viselkedésének összehasonlítása.

Mivel az oxidréteg felhasadásával járó oxidációt egy esetlegesen bekövetkező LOCA esemény egyik fő problémájának tartják, kiemelt figyelmet fordítottam az oxidréteg felhasadásával járó breakaway oxidáció tanulmányozására, nyomon követésére. Ezen túlmenően választ kerestem arra a kérdésre, hogy a vizsgált fűtőelem-burkolatok milyen hőmérséklet-tartományban hajlamosak ilyen típusú oxidációra. Az E110 burkolat ún. 'breakaway oxidációs térképének' elkészítése is céljaim között szerepelt. Ennek érdekében olyan módszer kidolgozására törekedtem, amellyel gyorsan és egyértelműen megállapítható, hogy a különböző hőmérsékleteken mikor következik be az oxidréteg felhasadása.

III. Vizsgálati módszerek

Magas hőmérsékletű oxidációs tesztek

Az oxidációs kísérletekhez kvarccsővel ellátott magas hőmérsékletű csökemencét használtam. A kísérleti berendezés gőzfejlesztőből, gázrendszerből (argon, hidrogén, nitrogén és levegő betápláláshoz), vízszintes elrendezésű háromzónás ellenállás-kemencéből és kondenzáló rendszerből állt. A kemence opcionálisan összekapcsolható egy hővezetőképességi detektorral (TCD), ezáltal lehetőség nyílik a csökemencéből kiáramló gázkeverék (vivőgáz és képződött hidrogén) hidrogéntartalmának folyamatos követésére.

A tesztek különböző oxidáló atmoszférában hajtottam végre 600 °C és 1200 °C közötti hőmérséklet-tartományban, izoterm körülmények között. A hőmérséklet és a gázáram stabilizálódása után a mintát egy kvarccsónakban a kemence fűtött zónájába toltam. Az oxidáció végén a mintát a berendezés hideg részére kihúztam. A kísérletek során a mintadarabok külső és belső felülete egyaránt oxidálódott. A kémiai reakciók során végbement változásokat (elsősorban az oxidáció mértékét) a mért tömegnövekedéssel jellemeztem.

Post-test vizsgálatok

Optikai mikroszkópiát (OM), pásztázó- és transzmissziós elektronmikroszkópiát (SEM és TEM), továbbá energiadiszperzív röntgen mikroanalízist (EDX) alkalmaztunk morfológiai vizsgálatokhoz és néhány kiválasztott minta elemvizsgálásához.

A műgyantába ágyazott mintákat a mechanikai polírozás után 0,5%-os hidrogén-fluoriddal marattuk, így láthatóvá vált az anyag szemcseszerkezete. A keresztmetszeti csiszolatok metallográfiai vizsgálatát Reichert Me-F2 optikai mikroszkóppal végeztük.

Az előkészített mintákat vékony szénréteg porlasztásával vezetővé tettük. A vízgőzben oxidált minták morfológiai vizsgálatára JEOL Superprobe 733 típusú elektronsugaras mikroanalízist használtunk visszaszórt elektron (BEI) üzemmódban. Néhány esetben közvetlenül, műgyantába ágyazás nélkül is végeztünk elektronmikroszkópos vizsgálatokat egy Philips SEM 505 típusú pásztázó elektronmikroszkóppal. A közvetlenül vizsgált mintadarabokról másodlagos elektron (SEI) felvételeket készítettünk.

A vízgőz – nitrogén elegyben oxidált minták mikroszkópos vizsgálatához LEO 1540XB típusú pásztázó elektronmikroszkópot alkalmaztunk, amely gallium fókuszált ionnyalábbal (Ga FIB) van felszerelve. Ezzel néhány mikrométer mélységű metszeteket állítottunk elő a nitrogén és az oxigén mélységbeli eloszlásának vizsgálatára. A nitridek és oxidok egyedi kristálméreteinek meghatározásához Thermo Scientific gyártmányú Themis 200 gömbhibakorrigált transzmissziós elektronmikroszkópot használtunk.

Az energiadiszperzív elektronsugaras mikroanalízist (EDX) RÖNTEC gyártmányú, vékonyablakos analizátorral, valamint a Thermo Scientific Scios2 Dual Beam típusú mikroszkóp Oxford X-Mac-20 analizátorával végeztük.

Hidrogéntartalom meghatározás

Az oxidált cirkónium minták által elnyelt hidrogén mennyiségének meghatározását – magas hőmérsékleten végzett deszorpció (ún. forró extrakció) után – hővezetőképességi

detektor segítségével végeztem. A deszorpció megvalósítása kvarccső betéttel rendelkező csökemencében történt 1150°C-on.

Néhány esetben az elnyelt hidrogén mennyiségi meghatározását ELTRA gyártmányú, ELEMENTRAC® OH-p típusú, oxigén-hidrogén elemanalizátorral végeztem.

IV. Új tudományos eredmények

1. Az oxidréteg felhasadásával járó breakaway oxidáció izoterm körülmények között történő vizsgálatára online mérési módszert dolgoztam ki. Kísérletekkel bizonyítottam, hogy a cirkónium ötvözetek magas hőmérsékletű vízgőzös oxidációja során felszabaduló hidrogén folyamatos detektálása jól alkalmazható a breakaway oxidáció nyomon követésére. Ezzel a módszerrel gyorsan és egyértelműen megállapítható, hogy adott hőmérsékleten mikor következik be az oxidréteg felhasadása, ami a fűtőelem-burkolat oxidációjának gyorsulásához vezet. A breakaway folyamat bonyolultsága ellenére a mérés ezen módszerrel jól reprodukálható [1].
2. Elkészítettem az E110 típusú atomerőművi fűtőelemburkolat vízgőz atmoszférára vonatkozó, ún. „breakaway oxidációs térképét” és meghatároztam azt a hőmérséklet-tartományt (900 – 1050 °C), ahol az E110 burkolat breakaway oxidációja rövid idő alatt (300 – 500 s) bekövetkezik. A kidolgozott online módszer segítségével igazoltam, hogy az E110G burkolat a vizsgált hőmérséklet-tartományban (800 – 1200 °C), vízgőzben oxidálva nem mutat breakaway oxidációt [1][2][3].
3. Megállapítottam, hogy a hidrogén jelenléte a vízgőz atmoszférában nem gyorsítja az E110 és E110G ötvözetek magas hőmérsékletű oxidációs kinetikáját. Kísérletekkel igazoltam, hogy a vizsgált tartományban (900 – 1100 °C, ≤65% hidrogéntartalom) az E110 ötvözet vízgőzös oxidációját a hidrogéndús atmoszféra lassítja, az E110G oxidációjára nincs kimutatható hatással [4][5].
4. Megállapítottam, hogy az E110 burkolat hidrogén abszorpciója sokkal intenzívebb hidrogéndús vízgőzben, mint tiszta vízgőz atmoszférában. Mérésekkel kimutattam, hogy a hidrogéndús vízgőzben oxidált E110 burkolat hidrogéntartalma akár többszöröse is lehet a tiszta vízgőzben ugyanolyan mértékben oxidált burkolat hidrogéntartalmának [4].
5. Kísérletekkel igazoltam, hogy magasabb levegőtartalmú (50%) vízgőzben és tiszta levegő atmoszférában az E110 és az E110G ötvözetek oxidációja a vizsgált hőmérsékleteken gyorsabb, mint levegőmentes vízgőzben. A levegőtartalmú oxidáló közeg E110 ötvözetre

gyakorolt hatása jelentősebb. Részletes mérésekkel mindkét ötvözetre létrehoztam azt az adatbázist, amivel a levegős oxidáció kinetikája 10, 50 és 100% levegőtartalomnál jellemezhető [6].

6. Nitrogéntartalmú vízgőzben végzett oxidációs kísérletek alapján megállapítottam, hogy a nitrogén jelenléte bizonyos körülmények között gyorsítja az E110 és E110G ötvözetek tömegnövekedését a tiszta vízgőzös oxidációhoz képest, és rámutattam az ötvözetek eltérő viselkedésére. Megállapítottam, hogy az E110G ötvözet a vizsgált hőmérsékleteken (1200 °C kivételével) hasonlóan vagy kedvezőbben viselkedik, mint az E110 ötvözet. Megállapítottam továbbá, hogy magas nitrogéntartalmú (50%) vízgőzben az E110G ötvözetnél is bekövetkezhet breakaway oxidáció [7][8].

V. Az eredmények hasznosítási lehetősége

Az atomerőművek biztonságának megőrzéséhez nélkülözhetetlen a fűtőelem-burkolatokban üzemzavari és baleseti körülmények között lezajló folyamatok, jelenségek vizsgálata és minél alaposabb megismerése. Az E110 és E110G burkolatok magas hőmérsékletű oxidációjával és hidrogénfelvételével kapcsolatos kutatási eredmények fűtőelem-viselkedési folyamatok számítógépes modellezéséhez használhatók.

Az E110G burkolattal végrehajtott kísérletek alapján az MTA EK-ban új oxidációs korrelációkat dolgoztak ki az E110G vízgőzös oxidációjának leírására, amelyek bekerültek a biztonsági elemzésekhez használt FRAPTRAN és TRANSURANUS kódokba (Kozsda-Barsy, 2016). Ezzel egyidejűleg az E110 burkolatra alkalmazott oxidációs korreláció is pontosításra került a breakaway tartományon kívül végbemenő oxidációra (Király, 2014).

A tiszta vízgőzben végzett kísérletek során kapott eredmények hozzájárulhatnak az új LOCA kritériumok alátámasztásához [22].

A hidrogéndús vízgőzben végrehajtott kísérletek eredményei elősegítették a paksi atomerőmű 2. blokki tisztítótartályának üzemzavaránál lezajlott folyamatok megértését [5].

A nitrogéntartalmú oxidáló közegben végzett nagyszámú kísérlet új, részletesebb adatokat szolgáltat az atomerőművi súlyos baleseti állapotok kinetikai modellezéséhez. A súlyos baleseti kódok többsége jelenleg nem rendelkezik olyan modellel, amely szimulálja a cirkónium-nitrogén reakciót, ezért is fontosak ezek az eredmények. Az oxidált mintadarabok mikroszerkezeti vizsgálata hozzájárul a súlyos baleset során létrejövő anyagszerkezetek részletes jellemzéséhez.

VI. Irodalmi hivatkozások listája

- Brown, P., Curti, E., Grambow, B., & Ekberg, C. (2005). Chemical Thermodynamics 8. Chemical Thermodynamics of Zirconium.
- Frecska, J., Konczos, G., Maróti, L., Matus, L. (1995). Oxidation and Hydriding of Zr1%Nb Alloys by Steam. KFKI-1995-17/G Report.
- Hózer, Z., Győri, Cs., Matus, L., Windberg, P. (2003,October). Cleaning tank incident at Paks NPP. QUENCH Workshop, Karlsruhe.
- Kostka Pál, Lajtha Gábor, Téchy Zsolt. (2018). Számítások a CODEX-NITRO kísérlethez. Kutatási jelentés, 211-619-00/2.
- Nagy Imre, Farkas Róbert, Vér Nóra, Hózer Zoltán, Szabó Péter, Szabó Gergely. (2018). A CODEX-NITRO integrális atomerőművi súlyos baleseti kísérlet. Kutatási jelentés, MTA EK-FRL-2018-235-1-1-M0.
- Frecska, J., Matus, L., Vasáros, L., Maróti, L. (1997). Hydrogen uptake of Zr1%Nb cladding by steam oxidation during loss of coolant accident, IAEA research contract 9284/R0, Final report.
- Matus Lajos, Horváth Lászlóné, Vasáros László. (2000). Zr1%Nb és Zircaloy-4 összehasonlítása vízgőzös oxidációban, Kutatási jelentés, OAH-ABA-41/00.
- Kozsda-Barsy Eszter, Kulacsy Katalin. (2016). Az E110G burkolatanyag magas hőmérsékletű oxidációját leíró modell beépítése a TRANSURANUS kódba. Kutatási jelentés, MTA EK FRL-2016-272-01-01-M0.
- Király Márton, Kulacsy Katalin, Perezné Feró Erzsébet. (2014). Az E110 és az E110G magas hőmérsékletű vízgőzben történő oxidációjának kinetikája. Kutatási jelentés, EK-FRL-2014-712-01/02-M1.

VII. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [1] **Perez-Feró, E.**, Novotny, T., Pintér-Csordás, A., Kunstár, M., Hózer, Z., Horváth, M., & Matus, L. (2016). Experimental results on the breakaway oxidation of the E110 cladding alloy under high-temperature isothermal conditions. Progress in Nuclear Energy, 93, 89-95. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.08.006>
IF:1,313

- [2] **Perezné F. E.**, Horváth, L., Hózer, Z., Kraczk, G., Kunstár, M., Nagy, I., Novotny, T., Pintérné Csordás, A., Vimi, A., Windberg, P. (2013, március). E110G jelű üzemanyag burkolat viselkedése LOCA körülmények között. NUKLEON 6, Paper 129.
- [3] **Perez-Feró, E.**, Novotny, T., Hózer, Z., & Kunstár, M. (2013, September). High temperature oxidation experiments with sponge base E110G cladding. 10th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support. Sandanski, Bulgária. Bulgarian Academy of Sciences, Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy (INRNE), 274-278.
- [4] **Perez-Feró, E.**, Gyóri, C., Matus, L., Vasáros, L., Hózer, Z., Windberg, P., ... & Novotny, T. (2010). Experimental database of E110 claddings exposed to accident conditions. Journal of Nuclear Materials, 397(1-3), 48-54. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2009.12.005> **IF:1,275**
- [5] Hózer, Z., Horváth, M., Kunstár, M., Matus, L., Nagy, I., Novotny, T., **Perez-Feró, E.**, ... & Windberg, P. (2011). Experimental simulation of the Paks-2 cleaning tank incident through separate effect and integral tests. Nuclear Engineering and Design, 241(3), 573-581. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.04.010> **IF:0,765**
- [6] **Perez-Feró, E.**, Novotny, T., Horváth, M., Kunstár, M., Vér, N., & Hózer, Z. (2014, September). High temperature behaviour of E110G and E110 fuel claddings in various mixtures of steam and air. Proceedings of 2014 Water Reactor Fuel Performance Meeting (Top fuel). Sendai, Japán, Atomic Energy Society of Japan, 1-4.
- [7] **Perez-Feró, E.**, Novotny, T., Horváth, M., Pintér-Csordás, A., Illés, L., Hózer, Z. (2018, September). High Temperature Oxidation of E110G and E110 Fuel Claddings in Nitrogen-containing Atmospheres. Proceedings of Nuclear Energy for New Europe (NENE). Portorož, Slovenia. Nuclear Society of Slovenia.
- [8] **Perez-Feró, E.**, Pintér-Csordás, A., Novotny, T., Hózer, Z., Illés, L., Radnóczy, Z. (2019, September). Oxidation of zirconium cladding in air, nitrogen and nitrogen rich steam atmospheres. Proceedings of 2019 Light Water Reactor Fuel Performance Conference. Seattle, WA. American Nuclear Society, 610-616.

VIII. További tudományos közlemények

[9] Ševeček, M., Krejčí, J., Chalupová, A., Kabátová, J., Manoch, F., Kočí, J., **Perez-Feró, E.**,... Xu, P. (2020). Round robin exercise of the candidate ATF cladding materials within the IAEA ACTOF project. In 14th International Nuclear Fuel Cycle Conference, GLOBAL 2019 and Light Water Reactor Fuel Performance Conference, TOP FUEL 2019, 283–290.

[10] Király, M., Hózer, Z., Horváth, M., Novotny, T., **Perez-Feró, E.**, & Vér, N. (2019). Impact of thermal and chemical treatment on the mechanical properties of E110 and E110G cladding tubes. *Nuclear Engineering and Technology*, 51(2), 518–525. <http://doi.org/10.1016/j.net.2018.11.002>

[11] Petrik, P., Romanenko, A., Kalas, B., Péter, L., Novotny, T., **Perez-Feró, E.**, ... Hózer, Z. (2019). Optical Properties of Oxidized, Hydrogenated, and Native Zirconium Surfaces for Wavelengths from 0.3 to 25 μm – A Study by Ex Situ and In Situ Spectroscopic Ellipsometry. *Physica Status Solidi (a) Applications and Materials Science*, 216(8). <http://doi.org/10.1002/pssa.201800676>

[12] Petrik, P., Romanenko, A., Agócs, E., Kalas, B., Lohner, T., **Perez-Feró, E.**, ... Hózer, Z. (2019). Fűtőelemek cirkóniumburkolatának optikai felületvizsgálata. *NUKLEON*, XII(7), 32–35.

[13] Hózer, Z., Nagy, I., Vimi, A., Kunstar, M., Szabo, P., Novotny, T., **Perez-Feró, E.**,... Grosse, M. (2018). High-Temperature Secondary Hydriding Experiments with E110 and E110G Cladding. American Society for Testing and Materials Special Technical Publications, 1597, 1093–1113. <http://doi.org/10.1520/STP159720160031>

[14] Kozsda-Barsy, E., Kulacsy, K., Hózer, Z., Horváth, M., Kis, Z., Maróti, B., **Perez-Feró, E.**, ... Szentmiklósi, L. (2018). Post-test examinations on Zr-1%Nb claddings after ballooning and burst, high-temperature oxidation and secondary hydriding. *Journal of Nuclear Materials*, 508, 423–433. <http://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.05.072>

[15] Petrik, P., Agócs, E., Kalas, B., Fodor, B., Lohner, T., Nador, J., **Perez-Feró, E.**, ... Fried, M. (2017). Nanophotonics of biomaterials and inorganic nanostructures. *Journal of Physics: Conference Series*, 794(1). <http://doi.org/10.1088/1742-6596/794/1/012004>

[16] Petrik, P., Sulyok, A., Novotny, T., **Perez-Feró, E.**, Kalas, B., Agócs, E., ... Hózer, Z. (2017). Optical properties of Zr and ZrO₂. *Applied Surface Science*, 421, 744–747. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.11.072>

- [17] Király, M., Hózer, Z., Antók, D., Horváth, M., Nagy, I., Nagy, R., **Perez-Feró, E.**, ... Vér, N. (2016). Overview of the experiments performed with Russian claddings at MTA EK. In *Top Fuel 2016: LWR Fuels with Enhanced Safety and Performance*, 41–49.
- [18] Király, M., Kulacsy, K., Hózer, Z., **Perez-Feró, E.**, & Novotny, T. (2016). High-temperature steam oxidation kinetics of the E110G cladding alloy. *Journal of Nuclear Materials*, 475, 27–36. <http://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2016.03.007>
- [19] Novotny, T., & **Perez-Feró, E.** (2016). Hydrogenation and High Temperature Oxidation of Zirconium Claddings. In *Proceedings of the 11th International Conference on WWER Fuel - Performance, Modelling and Experimental Support*.
- [20] Hózer, Z., Nagy, I., Kunstár, M., Szabó, P., Novotny, T., **Perez-Feró, E.**, ... Vimi, A. (2015). Mechanical Testing of Balloned E110 and E110G Claddings after High Temperature Oxidation in Steam. In *TopFuel Reactor Fuel Performance 2015 (Vol. II., 373–379)*.
- [21] Hózer, Z., **Perez-Feró, E.**, Novotny, T., Nagy, I., Horváth, M., Pintér-Csordás, A., ... Kemény, T. (2015). Experimental Comparison of the Behavior of E110 and E110G Claddings at High Temperature. In *Zirconium in the Nuclear Industry: 17th International Symposium*, 932–951. <http://doi.org/10.1520/STP154320120165>
- [22] Yueh, H. K., Comstock, R. J., Dunn, B., Le Saux, M., Lin, Y. P., Lutz, D., Park, D.J., **Perez-Feró, E.**, & Yan, Y. . (2013). Loss of Coolant Accident Testing Round Robin. In *LWR Fuel Performance Meeting TopFuel 2013*.
- [23] Yueh, H. K., Comstock, R. J., Dunn, B., Lin, Y. P., Lutz, D., & **Perez-Feró, E.** (2013). Changes in Cladding Properties under LOCA Conditions. In *LWR Fuel Performance Meeting TopFuel 2013*.
- [24] Novotny, T., & **Perez-Feró, E.** (2012). High temperature oxidation of hydrogenated E110G cladding. In *18th International QUENCH Workshop Karlsruhe*.
- [25] Novotny, T., Somfai, B., Hózer, Z., Nagy, I., **Perez-Feró, E.**, Vimi, P., & Windberg, P. (2011). High Temperature Behaviour of E110 Cladding Produced by New Technology. In *2011 Water Reactor Fuel Performance Meeting*.
- [26] Hózer, Z., Aszódi, A., Barnak, M., Boros, I., Fogel, M., Guillard, V., **Perez-Feró, E.**,... Zvonarev, Y. (2010). Numerical analyses of an ex-core fuel incident: Results of the OECD-IAEA. *Nuclear Engineering and Design*, 240, 538–549. <http://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.09.031>

[27] Hózer, Z., Balaskó, M., Horváth, M., Kunstár, M., Matus, L., Nagy, I., **Perez-Feró, E.,...** Windberg, P. (2010). Quenching of high temperature VVER fuel after long term oxidation in hydrogen rich steam. *Annals of Nuclear Energy*, 37(1), 71–82. <http://doi.org/10.1016/j.anucene.2009.09.014>

[28] Pintér-Csordás, A., **Perez-Feró, E.**, & Novotny, T. (2010). Some examples from SEM-EDX studies related to the nuclear research. In *Magyar Mikroszkópos Konferencia*.

[29] Novotny, T., **Perez-Feró, E.**, Pintér-Csordás, A., Vér, N., & Matus, L. (2009). Steam Oxidation Experiments for Study of Breakaway Phenomena on Zirconium Surface. In *15th International QUENCH Workshop Karlsruhe Institute of Technology*.

[30] Vimi, A., Hózer, Z., Nagy, I., Windberg, P., **Perezné, F. E.**, Novotny, T., & Pintérné, C. A. (2009). A paksi üzemzavarhoz kapcsolódó rugós és kazettafelütközéses kísérletek. *NUKLEON*, 2.

[31] Győri, C., Schubert, A., van der Laar, J., Van, U. P., **Perez-Feró, E.**, Szabó, E., & Hózer, Z. (2008). Recent LOCA-specific Developments of the TRANSURANUS Fuel Performance Code. In *Enlarged Halden Programme Group Meeting. Proceedings*.

[32] Győri, C., Van, U. P., Schubert, A., van de Laar, J., **Perez-Feró, E.**, Szabó, E., ... Spykman, G. (2008). Model Developments for the Simulation of LOCA Events by means of the TRANSURANUS Code. In *VVER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support. 7th International Conference 2007*, 405–414.

[33] Hózer, Z., Windberg, P., Nagy, I., Matus, L., Vér, N., Kunstár, M., **Perez-Feró, E** ... Balaskó, M. (2008). CODEX-CT-2 experiment: Long term treatment in high temperature hydrogen and water quenching of a fuel bundle. *KFKI*, 2008(02/G), 1–78. <http://doi.org/10.13140/2.1.3655.7605>

[34] Hózer, Z., Windberg, P., Nagy, I., Matus, L., Vér, N., Kunstár, M., **Perez-Feró, E** ... Balaskó, M. (2008). CODEX-CT-1 experiment: Quenching of fuel bundle after long term oxidation in hydrogen rich steam. *KFKI*, 2008(01/G), 1–93. <http://doi.org/10.13140/2.1.4180.0482>

[35] Hózer, Z., Novotny, T., **Perez-Feró, E.**, & Horváth, M. (2008). Failure and Ductile-to-Brittle Transition of Oxidized Zirconium. In *Proceedings of the 2008 Water Reactor Fuel Performance Conference*.

[36] Novotny, T., & **Perez-Feró, E.** (2008). Oxidréteg felhasadása cirkónium felületen. In *VII. Nukleáris Technikai Szimpózium*.

[37] Hózer, Z., Windberg, P., Nagy, I., Vimi, A., Kunstár, M., Vér, N., Matus, L., **Perezné, F. E.**, Novotny, T., & Balaskó, M. (2007). A paksi üzemzavar modellezése a CODEX berendezésen. *Magyar Energetika*, 15(5), 20–23.

[38] Novotny, T., & **Perezné, F. E.** (2007). E110 burkolat rideg-képlékeny átmenetének meghatározása egyoldalú gőz oxidáció alapján. *Magyar Energetika*, 15(5), 110–112.

[39] **Perez-Feró, E.**, Hózer, Z., Windberg, P., Nagy, I., Vimi, A., Vér, N., ... Győri, C. (2007). Behavior of Zr1%Nb Fuel Cladding under Accident Conditions. In *LWR Fuel Performance/Top Fuel*.

[40] **Perez-Feró, E.**, Győri, C., Matus, L., Vasáros, L., Hózer, Z., Windberg, P., ... Novotny, T. (2007). Experimental database of E110 claddings under accident conditions. NEA-1799 IFPE/AEKI-EDB-E110.

[41] Novotny, T., & **Perez-Feró, E.** (2006). E110 burkolat rideg-képlékeny átmenetének meghatározása egyoldalú gőz oxidáció alapján. In *V. Nukleáris Technikai Szimpózium*.

[42] **Perez-Feró, E.**, Windberg, P., Hózer, Z., Horváth, M., Nagy, I., Pintér-Csordás, A., ... Kulacsy, K. (2006). Experimental Database of E110 Cladding Oxidized in Hydrogen Rich Steam. In *LWR Fuel Performance. Transactions of TopFuel 2006*. Salamanca, Spain, 112–116.

[43] Győri, C., Hózer, Z., **Perez-Feró, E.**, van Uffelen, P., Schubert, A., & Van, de L. J. (2005). Applying the TRANSURANUS Code to VVER Fuel under Accident Conditions. In *Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT 18)*, 512–523.

[44] **Perez-Feró, E.**, Vasáros, L., Windberg, P., Hózer, Z., & Horváth, M. (2005). Effects of oxidation and hydrogen uptake of E110 cladding oxidised in hydrogen rich steam atmosphere. In *Proceedings of the 11th International QUENCH Workshop, Karlsruhe*.