

Válaszok

Szalóki Imrének az „Atomerőművi fűtőelemek integritása üzemzavarok és balesetek során” című MTA doktori értekezésemhez készített bírálatára

Dr. Szalóki Imre egyetemi docens a bírálatában tételesen 12 megjegyzést és kérdést fogalmazott meg, amelyekre az alábbi válaszokat kívánom adni.

1. 12. o.: Az E110 és E110G ötvözetek milyen tulajdonságaiban különböznek egymástól? Mivel a vizsgálatok tárgya három cirkónium ötvözet volt, hasznos lett volna a három anyagtypusról egy összefoglaló táblázatot, vagy részletesebb leírást beilleszteni a szövegbe.

Az orosz gyártmányú, nióbiummal ötvözött E110 és E110G burkolatok elsősorban abban különböznek egymástól, hogy eltérő gyártástechnológiával készülnek.

- Az E110 cirkónium ötvözetet elektrolitikus és jódos módszerrel gyártják. A jódos módszer lényege, hogy a gáz halmazállapotú cirkónium-tetraiodidból 1500°C-os volfrám felületen kiválik a Zr fém (ez a "van Arkel-de Boer" eljárás). Az elektrolitikus eljárásban K_2ZrF_6 -ot kevernek össze olvadt sókkal (pl. KCl, NaCl) és az olvadékból válik ki a cirkónium. A jelenleg használt E110 burkolat ezzel a két eljárással (kb. 60-40% arányban) gyártott fémből készül.
- Néhány éve az orosz gyártó megkezdte az E110G ötvözet gyártását a nyugati gyártók által eddig is használt „Kroll” eljárással. Ennek során cirkónium-tetra-kloridból magnézium segítségével nyerik ki a cirkónium fémet. A magnézium eltávolítása vákuumos eljárással történik. Az így kapott végtermék szivacsos szerkezetű. Ez az eljárás olcsóbb, mert meg lehet takarítani vele az 1500°C-os hőkezelés költségét. A szivacsból készült anyagot keverik a jódos eljárásban előállított anyaggal. Az új ötvözet nevében a „G” betű az orosz gubka azaz szivacs szóra utal.

Az eddigi tapasztalatok szerint a két ötvözet normál üzemi viselkedése a reaktorban nagyon hasonló, mind a korrózió-, mind a sugárállóság tekintetében. Kismértékű eltérés tapasztalható a mechanikai tulajdonságokban.

Üzemzavari és baleseti helyzetekben az E110G ötvözetben nem jön létre leváló oxidréteg, ezért ez az ötvözet sokkal jobban viseli a magas hőmérsékletű körülményeket. A dolgozat 3. fejezetében ennek illusztrációjaként szerepel számos olyan mérés, ami a két ötvözet viselkedését mutatja be üzemzavari és baleseti állapotokban.

Az ónnal ötvözött Zircaloy-4 burkolatot az USA-ban fejlesztették ki. Az ötvözet sugár- és korrózióállósága, mechanikai tulajdonságai eltérnek az orosz gyártmányú E110 és E110G ötvözetektől, de mind a három említett ötvözet alkalmas arra, hogy atomreaktorokban használják őket a fűtőelemek burkolataként. Az üzemanyag kiegészésének növekedése és a hosszabb reaktorban töltött idő miatt a korróziós folyamatok jelentik a Zircaloy-4 ötvözetek felhasználhatóságának a határát, ezért a

nyugati gyártók is fejlesztenek – az orosz ötvözetekhez hasonló, jó korrózióálló – nióbiummal ötvözött burkolatokat.

A három ötvözet összetételét az I. táblázatban megadott adatokkal szeretném illusztrálni. Az E110 és az E110G között lényeges különbség két elem esetében van:

- Az E110G ötvözetben 100 ppm-ről 10 ppm-re csökkentették a neutronelnyelő hafnium tartalmát, ami reaktorfizikai szempontból előnyös.
- Az E110G megnövelt vastartalma (45 ppm helyett 500 ppm) a sugárzás hatására bekövetkező méretváltozás mértékét csökkenti.

	Zircaloy-4	E110	E110G
Sn	1,2–1,7%	–	–
Nb	–	1%	1%
Mg	20 ppm	0,5 ppm	1,5 ppm
Al	75 ppm	0,5 ppm	10 ppm
Si	120 ppm	1 ppm	35 ppm
Cr	700–1300 ppm	10 ppm	30 ppm
Mn	50 ppm	0,1 ppm	5 ppm
Fe	1800–2400 ppm	45 ppm	500 ppm
Ni	70 ppm	15 ppm	15 ppm
Cu	50 ppm	0,5 ppm	5 ppm
Hf	100 ppm	100 ppm	10 ppm

I. táblázat: A Zircaloy-4¹, az E110² és az E110G² cirkónium burkolatok ötvöző- és szennyezőanyagai

2. 13.o.: Milyen típusú termoelemeket használtak a felfűvódásos kísérletek során a hőmérséklet méréséhez?

A felfűvódásos kísérletek előkészítő méréseiben két termoelemet használtunk: az egyiket a mintadarab belsejében, a másikat pedig a mintadarab alatt helyeztük el. A két termoelem között csak minimális különbséget (3 °C) tapasztaltunk, ezért a mérések többségében csak az egyik termoelemet vettük igénybe.

A mérésekre 700–1200 °C közötti hőmérsékleti tartományban került sor, ezért „K” típusú (NiCrNi) termoelemeket használtunk.

¹ Az ATI WahChang gyár adatai, www.atimetals.com

² Az MTA EK mérései, Z. Hózer, E. Perez-Feró, T. Novotny, I. Nagy, M. Horváth, A. Pintér-Csordás, A. Vimi, M. Kunstár, T. Kemény: *Experimental Comparison of the Behavior of E110 and E110G Claddings at High Temperature*, Zirconium in the Nuclear Industry, 17th International Symposium, STP 1543, Robert Comstock and Pierre Barberis, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA 2015.3 (2015) 932–951.

3. 14. o.: A vizsgálati minták előállításában alkalmazott hegesztési technológia követte-e az eredeti gyári eljárást?

A fűtőelemgyárakban évente több százezer fűtőelemet gyártanak, ennek megfelelően ipari berendezéseket használnak a hegesztéshez. Az ellenállás-hegesztést hélium atmoszférában végzik, lezárás előtt a fűtőelem-rudakat ezzel a gázzal töltik fel.

A kísérletekhez viszonylag kevés hegesztést kell elvégezni, ezért nem volt szükségünk hasonló ipari berendezésre. Másfelől az ipari berendezés nem is lenne megfelelő a kísérleti minták gyártására, hiszen a felfúvódásos mérésekben nem csak két dugót kell behegeszteni a cirkónium mintadarabba, hanem sok mérésnél a gázrendszer csatlakozó vezetékét is.

A felfúvódásos mérésekhez használt csövek egyik végét záródugóval láttuk el. A másik végébe olyan dugót helyeztünk el, amelyen egy vékony cirkónium csövet vezetünk át. A cirkóniumból esztergált dugók és a vékony cső rögzítéséhez korábban elektronsugaras vákuumhegesztést alkalmaztunk, az utóbbi években pedig áttértünk az argon védőgázos ívhegesztésre. A záródugó geometriája sem volt azonos a gyári dugóval, de ez nem jelentett problémát, hiszen nem a dugó viselkedését, hanem a burkolat felfúvódását vizsgáltuk a kísérletekben.

4. 15.-16. o.: Az ebben a fejezetben leírt kísérletek során a rúdon belül és kívül lévő nyomások különbsége közelítette-e a nukleáris energiatermelő reaktorokban, üzemszerű viszonyok között fennálló állapotokat?

Az említett fejezetben a fűtőelemek üzemszerű állapotok között létrejövő felfúvódását vizsgáló kísérleteket mutattam be.

- Ha „üzemszerű viszonyok” alatt az atomerőmű normál üzemelését értjük, akkor az említett kísérleti nyomáskülönbség sem nagyságában, sem előjelében nem közelítette a reaktorra jellemző állapotokat. Normál üzemelés során a hűtőközeg nyomása egy nyomottvízes atomreaktorban 125–150 bar. A fűtőelemekben a belső gáz nyomása ezt az értéket nem haladhatja meg. A valóságban a fűtőelemek belső nyomása akár több mint 100 bar-ral is alacsonyabb lehet, mint a hűtőközeg nyomása. Így a nyomáskülönbség hatására nem fúvódhat fel a fűtőelem burkolata.
- A felfúvódásos mérések tervezésekor arra törekedtünk, hogy a jellemző paraméter tartományok az üzemszerű állapotok körülményeit fedjék le. A paksi atomerőműre végzett elemzések szerint a hűtőközegvesztéses LOCA folyamatok során a legforróbb fűtőelemek belső nyomása kb. 20 bar-t ér el. A hűtőközeg oldali nyomás pedig az atmoszférikus érték közelébe eshet le. A mérésekben a nyomáskülönbség néhány esetben meghaladta a 100 bar-t is. A szükségesnél tágabb mérési tartomány lehetővé tette általánosabb összefüggések, modellek felállítását.

5. 27. o.: Említés történik a cirkónium mintadarabok oxidációjának mértékéről, amit a szerző és munkatársai az ECR mennyiséggel jellemeztek. Milyen mérési eljárást használtak ennek a paraméternek a meghatározására? A gyűrűtöréses vizsgálatokhoz miért 8 mm hosszú mintákat alkalmaztak, illetve van-e számottevő hatása a gyűrű alakú minta hosszának a mérések eredményeire?

A cirkónium mintadarabok oxidációjának mértékét az ECR (Equivalent Cladding Reacted) mennyiséggel jellemezzük, ami megadja, hogy a fém eredeti tömegének (pontosabban a burkolat eredeti vastagságának) hány százaléka oxidálódott, feltételezve, hogy az oxidáció során kizárólag cirkónium-dioxid keletkezett. Az ECR megállapításához meg kell mérni a mintadarab tömegét az oxidáció előtt és után. Az oxidáció mértéke a minták tömegnövekedése alapján, az alábbi módon számolható:

$$\text{ECR} = \frac{A_{\text{Zr}} \cdot \Delta m}{M_{\text{O}_2} \cdot m_i} \cdot 100$$

ahol:

- A_{Zr} (g/mol) – a cirkónium moláris tömege = 91,22
 M_{O_2} (g/mol) – az oxigén moláris tömege = 32,0
 m_i (g) – a Zr gyűrű oxidáció előtti tömege
 Δm (g) – az oxidáció utáni tömegnövekedés

Az ECR érték származtatható a burkolat eredeti vastagságából is egy hasonló kifejezéssel, de ahhoz pontos adattal kell rendelkezni a falvastagságról. Mivel a tömegmérés sokkal pontosabban végrehajtható, mint a vastagságmérés és a két kifejezés nagyon hasonló eredményt ad, a méréseink többségében a fenti összefüggést használjuk.

Integrális kísérletekben nincs lehetőség arra, hogy oxidáció előtt és után megmérjük a mintadarabok (nagyobb fűtőelemek, kötegek) tömegét. Ezért ezeknél a méréseknél oxidációs korrelációkkal becsüljük meg az ECR értékét.

A gyűrűroppantásos mérésekhez azért használunk 8 mm hosszú gyűrűket mert ez a hossz egyrészt elegendő ahhoz, hogy reprezentatív legyen a fűtőelem felületére, másrészt pedig sok mérés elvégzésére ad lehetőséget viszonylag kevés anyag felhasználásával. A gyűrű méretével kapcsolatban alapvetően két kérdés merülhet fel:

- A mechanikai vizsgálatot megelőző oxidáció során nem csak a cső palástja és belső felülete oxidálódik, hanem a vágási felületek is. A vágási felület nagysága ugyan jóval kisebb mint a palást és belső csőfelület, de az oxidációs kinetika paraméterek meghatározásánál figyelembe kell venni.
- A gyűrűroppantás során nagyobb erőt kell alkalmazni a hosszabb mintadaraboknál mint a rövid mintadarabok esetében. A különböző hosszúságú mintadarabok azonban egységesen kiértékelhetőek a dolgozat 3.4 fejezetében javasolt fajlagos sérülési energia használatával.

Néhány külföldi laboratóriumban hosszabb (30–60 mm) mintadarabokat oxidálnak és azokból vágják ki a 7-8 mm-es gyűrűket a mechanikai vizsgálatokhoz. Ennek a megoldásnak az az előnye, hogy a gyűrűk vége nincs oxidálódva. Ugyanakkor az oxidált

minták vágása okozhat olyan kellemetlen sérüléseket, amelyek hatással lehetnek a mechanikai vizsgálatok eredményeire.

6. 30. o.: Az oldal utolsó mondata nem teljesen érthető, mert a 19. ábra két grafikonján három cirkónium ötvözet szerepel, míg a kérdéses mondat csak az E110 és Zircaloy-4 típusokat említi a hidrogéntartalom szempontjából.

A kérdéses mondatban egy elírás történt, amiért elnézést kérek. A mondat helyesen:

A 19. ábra baloldali grafikonján szereplő E110 mintadarab hidrogéntartalma 2990 ppm, míg a jobboldali grafikonon látható E110 burkolaté 3990 ppm volt, miközben a két grafikonon látható E110G és Zircaloy-4 mintákban a hidrogéntartalom a 100 ppm-s mérési határ alatt maradt.

Tehát a 100 ppm alatti hidrogéntartalom az E110G és a Zircaloy-4 ötvözetekre egyaránt vonatkozik.

7. 42. o.: A CODEX-AIT-1 kísérletben, illetve a CODEX-AIT mérőberendezés leírásában szerepel egy aeroszol mintavevő, aminek a célja az oxidáció során képződött aeroszolok gyűjtése volt. Milyen impaktort alkalmaztak és milyen részecskeosztályokat vizsgáltak a későbbi SEM elemzésekkel? A szerző az értekezésben, uránban gazdag szemcséket említ, de nem esik szó azok Zr tartalmáról. Hogyan becsülték a mintavételezés eredményeiből a teljes uránkibocsátás mennyiségét.

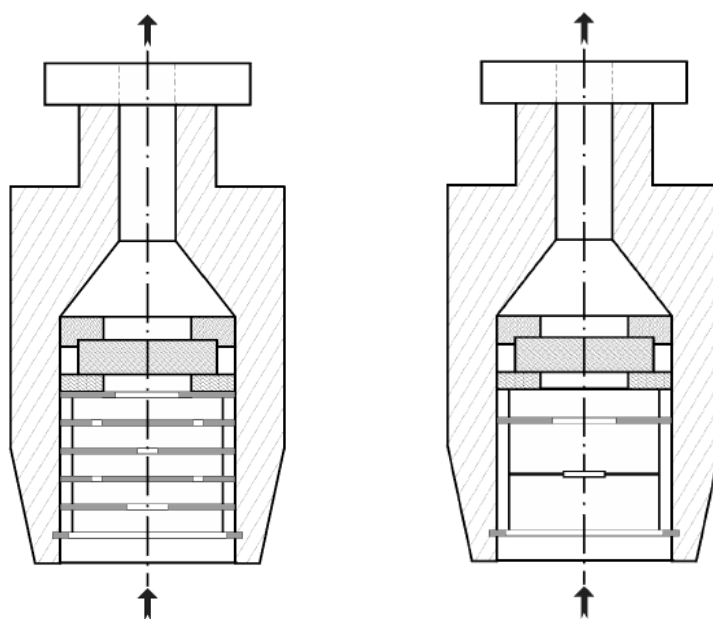
A CODEX-AIT-1 és CODEX-AIT-2 kísérletekben az 1. ábrán látható kaszkád impaktorokat alkalmaztuk, amelyek szilíciummal és szénnel bevont lemezeket, valamint kvarc szűrőket tartalmaztak. Az impaktorokon keresztül a mérések megfelelő szakaszaiban áramoltattuk át a köteg felől érkező hűtőközeget. A berendezésen belül több nikkellal lemezt is elhelyeztünk, amelyek nem egy adott időszakban, hanem a mérés teljes időtartama alatt keletkezett aeroszolokat gyűjtötték.

A részecskeosztályokról elsősorban a lézeres részecskeszámláló adott információt, amely az alábbi hat csoportra vonatkozó adatokat gyűjtötte a kísérletek során:

>10 µm	5–10 µm	3–5 µm
1–3 µm	0,5–1 µm	0,3–0,5 µm

A pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálatok kisméretű (0,8–1 µm) és nagyobb (5–6 µm) szemcséket egyaránt jeleztek, de megfigyelhetőek voltak 100 µm nagyságú, több szemcséből álló részecskék is.

A két kísérletben a kötegből kikerült részecskékből több mintagyűjtővel vettünk mintát. A részecskék a kérdésben említett U és Zr mellett számos más elemet is tartalmaztak. A II. táblázatban a CODEX-AIT-2 mérés során, a mérőszakasz felső részében és a hűtő tetején elhelyezett mintagyűjtőkből származó szemcsék összetételét mutatom be.



I. ábra: A CODEX-AIT-1 (bal) és CODEX-AIT-2 (jobb) mérésekben használt kaszkád impaktor sémája

Elem	A mérőszakasz felső részében elhelyezett mintagyűjtő (µg)	A hűtő tetején elhelyezett mintagyűjtő (µg)
Mg	100	150
Al	1200	850
Si	1800	2000
Ca	8	4
Cr	160	500
Mn	30	100
Fe	850	1400
Ni	60	60
Zn	3	5
Zr	1300	6000
Mo	1,4	3
Sn	36	90
Hf	20	30
Pb	2,5	1,5
W	2	15
U	1,5	0,65

II. táblázat: A CODEX-AIT-2 mérésben gyűjtött részecskék elemi összetétele (tömegspektrométeres mérések alapján)³

³ Z. Hózer, P. Windberg, I. Nagy, L. Maróti, L. Matus, M. Balaskó, B. Alföldy, A. Czitrovsky, P. Jani: (2002) *CODEX-AIT-2 Experiment: Core Degradation Test with Steam Oxidation and Air Ingress*. KFKI REPORT, KFKI-2. pp. 1-83. <http://real.mtak.hu/12864/>

A CODEX-AIT-1 és CODEX-AIT-2 mérésekben a teljes urán kikerülést a mintagyűjtőkön mért urán tömegek alapján, a mintagyűjtők felületének és teljes áramlási keresztmetszet arányának felhasználásával becsültük meg. Az impaktorokon található urán mennyisége – a rövid mintavételezési idő miatt – elhanyagolható volt a mérés teljes ideje alatt működő mintagyűjtőkön mért mennyiségekhez képest.

8. 44. o.: A 36. ábrán szereplő fotókon feltehetően SEM vizsgálati eredmények láthatóak, azonban a mérések kísérleti körülményeiről, részleteiről nem esik szó. Hogyan történt az egyes felületi rétegek (ZrN, ZrO₂, UO₂) azonosítása és a nitrogéntartalom meghatározása? Végeztek esetleg energia-diszperzív röntgen-fluoreszcens elemzést a SEM vizsgálatok során, vagy ettől függetlenül röntgen-diffrakciós méréseket?

A 36. ábrán metallográfiai felvételek láthatóak. A köteg metszeteinek vizsgálatokor a tablettá-burkolat kölcsönhatás értékeléséhez, valamint az aeroszol minták elemzéséhez alkalmaztunk pásztázó elektronmikroszkópot (SEM) energia-diszperzív röntgen-analizátorral (EDS)⁴. A nitrogéntartalom mérését – az említett SEM/EDS mérésekkel együtt – Pintérné Csordás Tóth Anna végezte egy JEOL Superprobe 733 típusú mikroszondával 10 kV gyorsító feszültség mellett, bór-nitrid standard felhasználásával. Az ő munkája volt a ZrN, ZrO₂, UO₂ rétegek azonosítása is röntgen-diffrakciós mérésekkel, amelyekhez egy Philips 1730 típusú diffraktométert használt.

9. 47. oldal: Az 50. oldalon szereplő 3. táblázat a CODEX-AIT-1 és CODEX-AIT-2 kísérletek legfontosabb paramétereit foglalja össze, viszont az első hivatkozás ezekre az eredményekre már a 47. oldalon megtörténik. Hasznos lett volna valahogy közelebb szerkeszteni a szövegbeli leírást a táblázat elhelyezésével.

Az említett oldalakon több ábra is szerepel a táblázaton kívül, amelyekre ugyancsak történik utalás a szövegben. A sok ábra miatt nem sikerült táblázatot a magyarázó szöveghez közelebb elhelyezni.

10. 50. o.: 3. táblázat: Az egyes nitrid rétegek vastagsága közötti jelentős különbségek interpretálására hasznos lett volna valamilyen, a lehetséges okokat alátámasztó kísérleti adatsor megjelenítése, pl. az aeroszol szemcséken vagy a vizsgált cirkónium ötvözeteken utólagosan végzett szerkezetre és/vagy összetételre vonatkozó mérések eredményeiből.

A két mérésben tapasztalt különbségek magyarázatához sok, egymással párhuzamosan lezajló folyamatot kell értékelni. Ez évekkel a kísérletek után is komoly kihívást jelent a szakembereknek és a számítógépes kódoknak egyaránt. A nitrid képződés egy ilyen kísérletben oxigénhiányos állapotban léphet fel, ami lokálisan tud kialakulni a kötegben. Az oxigénhiányos állapot után a cirkónium-nitrid reakcióba léphet az oxigénnel. Ha a

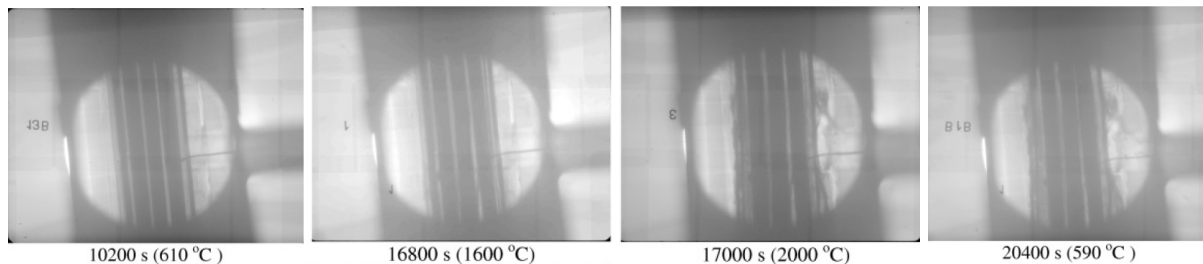
⁴ A. Pintér-Csordás, L. Matus, L. Maróti, A. Czitrovsky, P. Jani: *Aerosols released at high temperature oxidation of a nuclear reactor core model*, Journal of Aerosol Science, 30, (1999), S105-S106

folyamat végén a vészhűtőrendszer vizet táplál be (ezt a két CODEX-AIT kísérletben nem modelleztük), akkor jelentős mennyiségű nitrogénképződés léphet fel⁵.

Külföldi szakértők is úgy gondolják, hogy a levegős oxidáció és nitridizáció – a folyamatok összetett jellege miatt – további kutatásokat igényel. Ezért 2016 júniusában Budapesten sor kerül egy olyan nemzetközi értekezletre, ahol egy újabb légbetöréses CODEX mérés forgatókönyvét fogjuk egyeztetni.

11. 53. o.: A CODEX-B4C berendezés leírásában is említés történik arról, hogy lézeres részecskeszámlálás, valamint impaktoros részecskegyűjtés is történt, illetve dinamikus radiográfiai felvételek készültek. A további kiértékelés során viszont ezeknek a méréseknek az eredményeiről, illetve a fejezet bevezető szakaszában, magáról a mérések legfontosabb paramétereiről nem esik szó. Hasznos lett volna ezeknek a módszereknek a számszerű eredményeit is feltüntetni az értekezésben. A kilépő gázok összetételének tömeg-spektrométerrel történt meghatározását közvetlenül a kísérletek időtartama alatt, in-situ módon, vagy utólagos vizsgálatokkal végezték?

A lézeres részecskeszámlálást a CODEX-B4C mérésben Czitrovsky Aladár, Nagy Attila és Jani Péter végezte. A dinamikus radiográfia alkalmazása ilyen extrém körülmények között pedig Balaskó Márton érdeme volt (II. ábra).



II. ábra: A CODEX-B4C kötegről a kísérlet során készített röntgen radiográfiai felvételek⁶

A dolgozatban fontosnak tartottam megemlíteni, hogy ilyen unikális mérésekre is sor került a kísérlet során. Ugyanakkor próbáltam azokra az eredményekre koncentrálni, amelyekben személyesen nagyobb szerepem volt. Ezért a dolgozatba nem kerültek be az említett fontos eredmények, amelyeket az említett kollégákkal közösen jegyzett publikációban⁶ természetesen megjelentettünk és amelyek megtalálhatóak a mérésről készített adatbázisban⁷ is.

⁵ L. Sepold, Z. Hózer, G. Schanz, U. Stegmaier, M. Steinbrück, J. Stuckert: *A QUENCH experiment including an air ingress phase prior to flooding*, T.Am.Nucl.Soc., 94 (2006) 140-141.

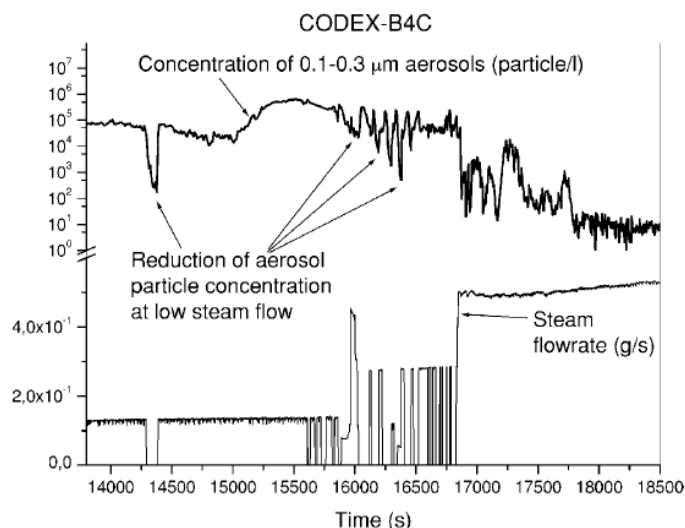
⁶ Z. Hózer, L. Maróti, P. Windberg, L. Matus, I. Nagy Gy. Gyenes, M. Horváth A. Pintér, M. Balaskó, A. Czitrovsky, P. Jani, A. Nagy, O. Prokopiev, B. Tóth B: *Behavior of VVER fuel rods tested under severe accident conditions in the CODEX facility*, Nucl.Technol., 154 (2006) 302-317.

⁷ Z. Hózer, I. Nagy, P. Windberg, M. Balaskó, L. Matus, O. Prokopiev, A. Pintér, M. Horváth, Gy. Gyenes, Gy. A. Czitrovsky, A. Nagy, P. Jani: (2003) *CODEX-B4C Experiment: Cored Degradation Test With Boron Carbide Control Rod* KFKI-2003-01/G (2003) <http://real.mtak.hu/14255/>

A kilépő gázok összetételét a kísérlet során on-line mértük egy kvadrupól tömegspektrométerrel. A méréshez szükséges elszívás a mérőszakasz felső kilépő csonkjához kapcsolódott. A CODEX berendezésből kilépő gázt palackokban gyűjtöttük, ami lehetővé tette volna a gázok összetételének mérését abban az esetben is, ha az on-line tömegspektrométeres mérés valamilyen ok miatt meghiúsult volna – de végül erre nem volt szükség.

12. 57. o.: Az 5. fejezet utolsó bekezdésének első mondata jelentős megállapítást tett az aeroszol kibocsátás (véltetően annak mértéke) és az oxidációs folyamatok (valószínűleg annak intenzitása) között, amit érdemes lett volna bevenni a 3. tézispont szövegébe is.

A CODEX-B4C kísérletben valóban nagyon érdekes korrelációt tapasztaltunk a gőzforgalom és aeroszol részecskeszám között. Az B₄C szabályozórúd oxidációját hosszabb ideig kívántuk fenntartani (a metán képződés elősegítésére), ezért a gőz ciklikus elvételével akadályoztuk meg a hőmérséklet megszaladást. A gőzhiányos állapotokban a részecskeszám látványosan csökkent, ami egyértelműen jelezte, hogy az aeroszolok képződése az oxidációs folyamatokhoz volt köthető (III. ábra).



III. ábra: Az aeroszol képződés és gőzforgalom közötti korreláció a CODEX-B4C kísérletben⁶

Ez az érdekes eredmény elsősorban a részecskeszámlálást végző kollégák munkájához kapcsolódik, ezért nem gondoltam arra, hogy saját eredményként szerepeltessem a 3. tézispontban.

Budapest, 2016. április 14.

Hózer Zoltán