

**Atomerőművi fűtőelemek integritása üzemzavarok és balesetek során**

című MTA doktori értekezésének bírálata

Hózer Zoltán MTA doktori értekezésének témája az atomerőművek egyik fajsúlyos biztonsági problémájával, a cirkónium burkolattal rendelkező fűtőelemek integritásának vizsgálatával és elemzésével foglalkozik. A kérdéskör egyértelműen a nemzetközi nukleáris kutatások fókuszában van, hiszen a fűtőelemek burkolata képezi azt a gátat, amely megakadályozza az atomreaktorok működése során képződött radioaktív anyagok kijutását a primer körbe normál üzemi és baleseti helyzetekben is. Ezért, nagy szükség van a burkolat anyagában lejátszódó fizikai folyamatokkal kapcsolatos minél szélesebb körű ismeretekre, gyakorlati tapasztalatokra, ami az értekezésben leírt kutatómunka egyik motivációját adja. Ennek legfontosabb eleme, hogy a kísérleti tapasztalatokból egy részletes adatbázis jöjjön létre, ami megalapozhatja a fűtőelem burkolatok viselkedésének megbízható leírását különböző üzemi körülmények között, illetve közvetlen gyakorlati segítséget ad a hazai nukleáris ipar szakemberei számára is.

A dolgozat 86 oldalon, hat fejezetben foglalja össze a szinte teljesen kísérleti jellegű vizsgálatok leírását, eredményeit és az azokból levont végső következtetéseket. A szerző az általa vezetett kutatócsoportjával kiterjedt és részletes összehasonlító vizsgálatokat végzett a hazai nukleáris energiatermelésben is alkalmazott E110 és a 2005-től bevezetett E110G, valamint a Zirkaloy-4 ötvözetekből készült burkolattípusokra. A vizsgálataik elsődleges célja a burkolatfelhasadás és különböző extrém fizikai körülmények között lejátszódó oxidációs folyamatok mechanizmusának szisztematikus feltárása volt. A dolgozatban, a szerző külön fejezetet szánt a 2003. évi paksi üzemzavar során a tisztítótartályban lejátszódott események kísérleti úton történt vizsgálataira. Egyszerűsített kísérleti modelleken végzett vizsgálatai eredményeire alapozva rekonstruálta a fűtőelem sérülés lehetséges okait és a tisztító tartályban lejátszódott lehetséges fizikai-kémiai folyamatokat. Végül az utolsó fejezetben a sérült fűtőelemek tárolására kifejlesztett tartályok zártági tulajdonságait elemezte, szintén célzottan kialakított kísérletek eredményeire támaszkodva.

A 8. fejezetben a szerző ismerteti a hat tézispontot és azok közvetlen hasznosulási módját a hazai és nemzetközi nukleáris szakmai gyakorlatban. Az eredményei részét képezik számos nemzetközi szerkesztésű, a nukleáris ipar számára ajánlott adatbázisnak és módszertani ismertetőknak. A kísérleti vizsgálatainak eredményeit és kutatásainak következtetéseit különböző validált nukleáris baleseti kódokba is beépítették, illetve újabb, súlyos nukleáris baleseti kutatás kiindulópontját, motivációját képezték. A dolgozat szerzője meghatározó szakmai vezetője és irányítója a fűtőelemek üzemi és baleseti körülmények közötti viselkedésének tanulmányozására az MTA Energiatudományi Kutatóközpontban felépített Fűtőelem és Reaktoranyagok Laboratóriumnak. Irányította az értekezése témáját adó vizsgálati projekteket, amik eredményeit nemzetközi folyóiratokban és konferenciákon publikált, valamint tevékeny részese volt a vizsgálatok eredményeinek hasznosításában különböző baleseti kódokban. Ez utóbbi tény nagy szakmai elismerés, ami egyértelműen jelzi a jelölt munkásságának kiemelkedő értékét nemzetközi viszonylatban is, és a meglátásom szerint, a szerző munkájának egyik nagy erőssége.

A dolgozat szerkesztése világos, áttekinthető és kellően tömör, nem veszik el a kisebb jelentőségű részletek ismertetésében és elemzésében. Habár, ez a dolgozatra végig jellemző



lényegre törő stílus néhány esetben már túlzottan is érvényesül és így nyitott kérdéseket hagy az olvasóban. Ezekkel kapcsolatban, néhány nem teljesen egyértelműen tisztázott, főleg mérés technikai problémákkal kapcsolatos kérdést fogalmaztam meg az alábbiakban.

Néhány tételes megjegyzés és kérdés:

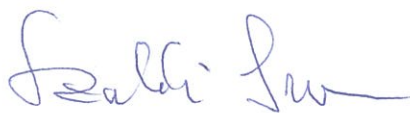
1. 12. o.: Az E110 és E110G ötvözetek milyen tulajdonságaiban különböznek egymástól? Mivel a vizsgálatok tárgya három cirkónium ötvözet volt, hasznos lett volna a három anyagtípusról egy összefoglaló táblázatot, vagy részletesebb leírást beilleszteni a szövegbe.
2. 13. o.: Milyen típusú termoelemeket használtak a felfűvódásos kísérletek során a hőmérséklet méréséhez?
3. 14. o.: A vizsgálati minták előállítása műveletében alkalmazott hegesztési technológia követte-e az eredeti gyári eljárást?
4. 15.-16. o.: Az ebben a fejezetben leírt kísérletek során a rúdön belül és kívül lévő nyomások különbsége közelítette-e a nukleáris energiatermelő reaktorokban, üzemszerű viszonyok között fennálló állapotokat?
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?
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.
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 aeroszokok 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.
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 ( $ZrN$ ,  $ZrO_2$ ,  $UO_2$ ) azonosítása és a nitrogéntartalom meghatározása? Végeztek esetleg energia-diszperzív röntgen-fluoreszcens elemzést a SEM vizsgálatok során, vagy ettől függetlenül röntgen-diffrakciós méréseket?
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.
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.

11. 53. o.: A CODEX-B4C berendezés leírásában is említés történik arról, hogy lézeres részecskeszámlálás, valamint impaktoros részecskegyűjtés is történt, illetve dinamikus radiográfiás 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?
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.

Szintén a disszertáció tömör stílusával függhet össze, hogy a bevezető első fejezetet, azaz a kutatások irányait és tartalmát megalapozó kérdéskör nemzetközi publikációkban közzétett eredményeinek áttekintését célszerű lett volna egy kicsit bővebben, részletesebben kifejteni. Pozitívumként kell megemlíteni, hogy az egyes kísérleti összeállításokat leíró ábrák, a mérési eredmények grafikus és táblázatos megjelenítése jól nyomon követhető és érthető. Ez alól az egyetlen kivétel a 26. és 27. ábrák, ahol a fajlagos sérülési energia egységének jelölése nem azonos: mJ/mm és J/m. A dolgozat végén összeállított jegyzékben alkalmazott rövidítések következetes használata szintén nagyban elősegíti a disszertáció áttekinthetőségét. A hat tézisponthoz tartozó, a szerző értekezésének témakörében megjelent saját közlemények listája a disszertációban bővebb, mint a tézisfűzetben lévő felsorolás. Ennek következtében az egyes tézisek alapját képező, kiemelt hivatkozások sorszáma a két forrásban nem azonos.

A disszertációban közzétett hat tézispont mindegyikét új tudományos eredménynek fogadom el és ezek alapján javaslom a dolgozat nyilvános vitára bocsátását és elfogadását az MTA doktora cím megszerzéséhez. Végső megállapításom, hogy Hózer Zoltánnak a disszertációjában foglalt tudományos eredményei jelentős nemzetközi elismertségre tettek szert és a jelölt munkája nagymértékben hozzájárult a nukleáris tudományág fejlődéséhez.

Budapest, 2016. március 28.



Dr. Szalóki Imre  
egyetemi docens, BME NTI