

A CODEX-NITRO integrális, atomerőművi súlyos baleseti kísérlet

Nagy Imre¹, Farkas Róbert¹, Vér Nóra¹, Hózer Zoltán¹, Szabó Péter¹, Szabó Gergely¹,
Kostka Pál², Lajtha Gábor², Téchy Zsolt²

¹MTA Energiatudományi Kutatóközpont
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

²NUBIKI Nukleáris Biztonsági Kutatóintézet
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

A CODEX-NITRO kísérletben egy olyan atomerőművi balesetet szimuláltak egy hét rúdból álló elektromosan fűtött köteggel, amelyben a primerköri csőtörés után a hidroakkumulátorokból nitrogén is beáramlik a reaktor aktív zónájába. A kísérlet során a maximális hőmérséklet meghaladta az 1700 °C-ot. A nitrogén jelenléte felgyorsította a cirkónium-komponensek vízgőzös oxidációját. Az alacsony gőzforgalom következtében gőzhiányos állapot állt elő, és ebben az időszakban a köteg felső részén intenzív nitrogén-cirkónium reakció ment végbe. Az előkészítő számítások jól előre jelezték a hőmérsékletprofil átrendeződését a mérés utolsó szakaszában, valamint a cirkónium-nitridek képződését.

Bevezetés

A Cirkónium Anyagtudományi Kutatások (CAK) projekt keretében – számos kisléptékű kísérlet mellett – olyan integrális kísérletekre is sor kerül, amelyeket az atomreaktor súlyos baleseti állapotát modellezik. A magas hőmérsékletű folyamatok a fűtőelemek burkolatát képező cirkóniumcsövek jelentős degradációját eredményezhetik. A CODEX berendezésen korábban végzett LOCA és súlyos baleseti kísérletek folytatásaként az MTA EK olyan körülményeket kívánt vizsgálni, amelyek egyrészt kapcsolódnak a biztonsági elemzésekben értékelt baleseti forgatókönyvekhez, másrészt olyan érdekes folyamatok kísérik, amelyek az előző mérésekben nem jelentek meg. Az első integrális kísérlet a CODEX-NITRO nevet kapta, amelyhez a NUBIKI előkészítő számításokat végzett.

A modellezett atomerőművi folyamat

Egy hipotetikus atomerőművi súlyos baleset során a hidroakkumulátorok kiürülése után, ha lezárásuk nem tökéletes, a nyomást biztosító nitrogén bekerülhet a primerkörbe, illetve a zónába. Amennyiben erre akkor kerül sor, amikor a fűtőelemek már szárazra kerültek és felmelegedtek, a nitrogén befolyásolhatja a cirkónium-vízgőz reakció lefolyását. Ilyen folyamat akkor fordulhat elő, amikor a törésen kiáramló közeg mennyisége az első pár száz másodperc után képes elvinni a maradványhőt. A csőtörés mérete azonban nem olyan nagy, hogy a hidroakkumulátorokból a víz gyorsan bejut a primerkörbe, hanem a primerköri nyomás lassan csökken, így mindig csak annyi víz jut a primerkörbe, amennyi elfolyik. Ahhoz, hogy a nitrogén lassan áramoljon át a zónán, és ne szökjön el, a törésnek alacsony helyen, a gőzfejlesztőhöz közel, a hidegágban, de a hidegági vízzár után kell lennie. A NUBIKI számításai azt mutatták, hogy a 73 mm-es csőtörés

esetén ZÜHR működés nélkül a zóna felmelegedése közben várható a nitrogén bekerülése a zónába. A PSA (valószínűségi biztonsági) elemzés alapján [1] ez a törés abban a mérettartományban van, ami nem elhanyagolható hozzájárulást ad a zónasérüléssel járó baleseti folyamatokhoz.

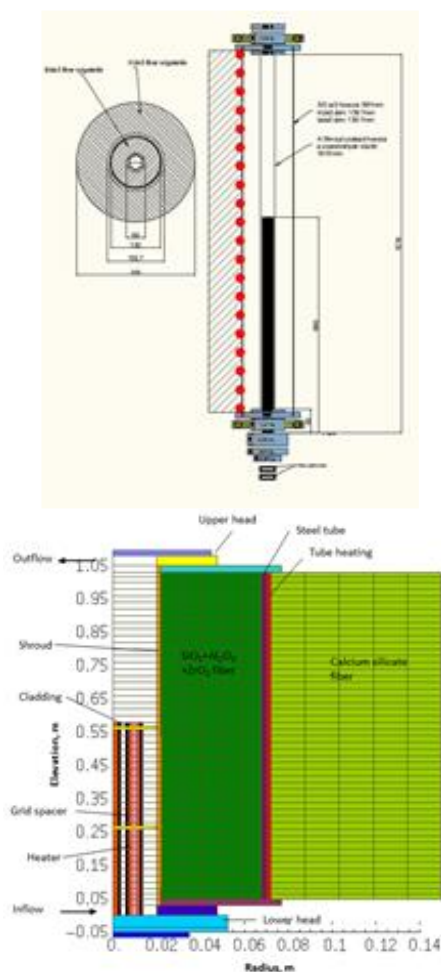
A kiválasztott folyamat tehát egy közepes méretű csőtörés volt az atomerőmű primerkörében nitrogénbekerüléssel az aktív zónába. A folyamat végén nem következik be vizes elárasztás. A tervezett mérés a zóna degradációs folyamatának egy közbenső állapotáig terjed, amit lassú lehűtéssel lehet megőrizni.

Előkészítő számítások

A NUBIKI az ASTEC súlyos baleseti programrendszerrel [2][3] elvégezte a meghatározott erőművi folyamat számítását. Ennek alapján az MTA EK-val közösen, a kísérleti berendezés lehetőségeinek figyelembe vételével meghatározták a CODEX-NITRO kísérlet méreteihez javasolt kísérleti paramétereket: a zónában keletkező maradványhő mennyiségét és a zónába beáramló víz-gőz és nitrogén tömegáramát, valamint a hőmérsékletet az idő függvényében.

Elkészítették a CODEX berendezés [4][5] numerikus modelljét az ASTEC V2.1.1 kódhoz. A mérőszakaszt axiális irányban 58 nódusra osztották. A berendezés teljes magassága 1,161 m a -0,065 m és a 1,096 m közötti szintek között. A fűtőelem-rudak alsó pontja a 0 m szinten helyezkedik el. A központi, fűtetlen és a külső, fűtött rudakat (ROD) a kazetta (SHROUD) által körülvevett központi csatornába (CHANNEL) helyezték. A gázáram belépési pontja a csatornába 0,032 m szinten, a kilépés az 1,066 m szinten van. A modell tartalmazza az alsó és a felső szigetelés nélküli tartószerkezetet. A nodalizációt az 1. ábra

mutatja. A modell a kód alapértelmezett hőátadási modelljeit (konvekció, hővezetés, sugárzás) alkalmazza. A gőzös közegben történő oxidációt a kódban választható 'Sokolov' modellel számolták. A számítás során figyelembe vették a cirkónium-nitrogén reakciókat, amit a kód gőzhiányos állapotban számol.



1. ábra: A CODEX berendezés nodalizációja a NITRO kísérlethez

Az előkészítő számításokat az alábbi peremfeltételek mellett végezték:

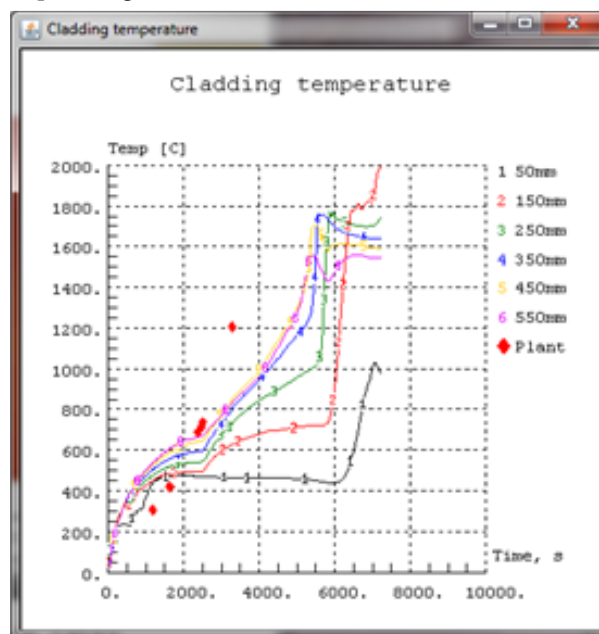
- fűtő rudak fűtési teljesítménye: 600 W a $t = 0$ s-től a számítás végéig (7200 s)
- védő cső fűtési teljesítménye: 800 W a $t = 0$ s-től a számítás végéig (7200 s)
- belépő gázok és gőz hőmérséklete: 400 °C
- argon tömegáram: 0.5 g/s ($t = 0$ és 1200 + 1320 s között) 0,05 g/s, ezt követően
- gőz tömegáram: 0,5 g/s ($t = 0$ és 1200 + 1320 s között) 0,05 g/s ezt követően
- nitrogén tömegáram: 12 mg/s ($t = 1200 + 1180$ s után)
- a berendezés kezdeti hőmérséklete 20 °C
- környezeti hőmérséklet 20 °C

A felépített modellel az ASTEC kód számolta a szerkezeti elemek felmelegedését, a Zr-gőz reakciót, a gőzhiány fellépését és az ennek következtében a ZrO-N reakcióból keletkező ZrON mennyiségét. Modelllezte még a

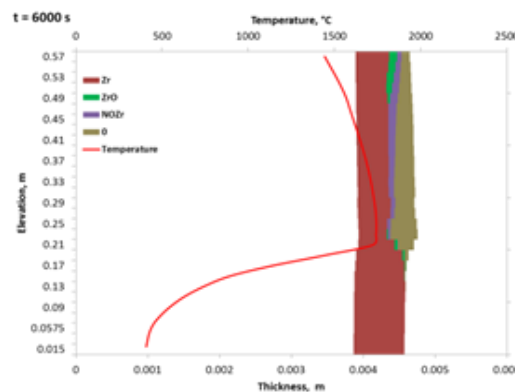
fűtőelemek és a védő cső elektromos fűtését, a radiális és axiális hővezetést a szerkezetekben, a sugárzásos hőátadást a fűtőelem-rudak és a kazettafal között, a hőátadást és ezáltal a hőveszteségeket az alsó és felső szigetetlen lezáró szerkezetek felé.

Az oxidáció a $t=2100$ s-nál kezdődik, amikor a burkolat hőmérséklete a felső részen meghaladja a 650 °C-t (2. ábra). Ezt követően az oxidáció lassan halad előre a burkolat felső részén. A folyamat 4000 s után gyorsul fel, amikor a hőmérséklet meghaladja a 900 °C-t. Az intenzív oxidáció miatt a felső részen gőzhiány alakul ki, és megjelenik a ZrON réteg (3. ábra), ami a ZrO réteg fogyásával jár. A burkolat alsó részén, ahol nincs gőzhiány, az oxidáció tovább folytatódik. A nitrogén és gőz hatására a Zr oxidációja 1200 °C elérése után tovább gyorsul, és a berendezés hővesztesége ellenére is - a reakcióból keletkező hő hatására - a burkolat helyenként eléri a 2000 °C-t, az oxidált Zr-réteg vastagsága pedig megközelíti az 1 mm-t. Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy teljesen oxidálódik a fűtőelem burkolata (4. ábra).

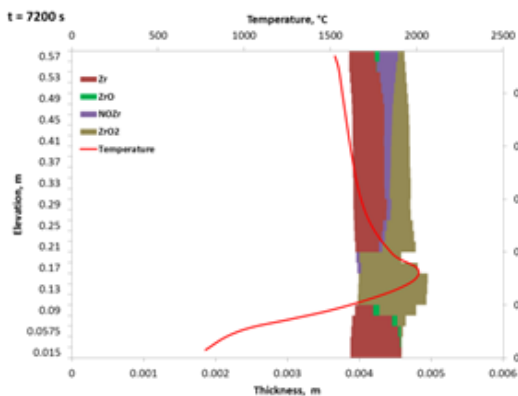
A burkolathőmérséklet az erőművi számításokhoz képest lassabban emelkedik főleg a fellépő hőveszteségek és az - elsősorban a folyamat második felében - alacsonyabb belépő közeghőmérsékletek miatt.



2. ábra: Burkolathőmérséklet (a piros rombuszok az erőművi számítás során adódó burkolathőmérsékletet mutatják)



3. ábra: ZrON keletkezése a burkolatban



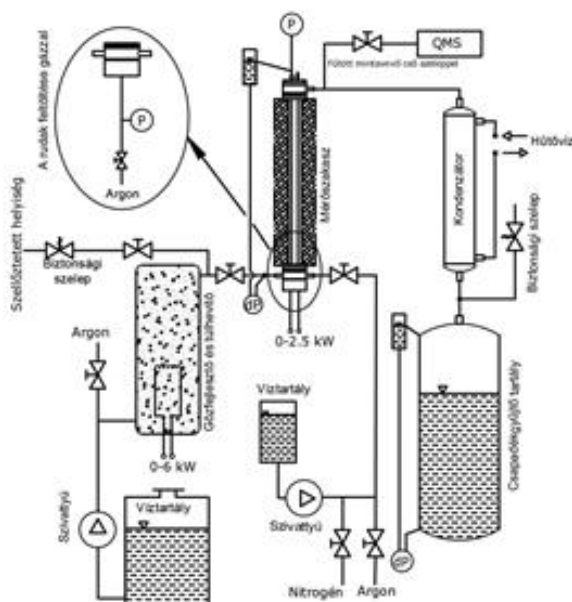
4. ábra: Cirkónium-burkolat oxidációja a számítás végén

A számítás a fűtőelemek alsó részén nagyon jelentős cirkónium-oxidációt jósolt, amihez a bejutó nitrogén katalizátorként hozzájárulhat. Az előzetes számítások alapján a kísérleti berendezésben lejátszódó folyamatok hasonlóak az erőműben számolt folyamatokhoz.

A CODEX berendezés

A CODEX (Core Degradation Experiment) berendezés [4][5] központi eleme a kísérleti köteg, amelyet olyan terheléseknek kell alávetni a vizsgálatok során, amilyenek tranzienst állapotokban várhatóak. A mérési körülmények létrehozásához a kísérleti köteghez több részegységet is csatlakoztatni kell, amelyek a következők (5. ábra):

- A mérőszakasz magában foglalja a kísérleti köteget, rendelkezik a fűtéshez és a nyomásszabályozáshoz szükséges csatlakozásokkal és olyan hőszigeteléssel, ami lehetővé teszi a kívánt magas hőmérsékletek elérését; a mérőszakaszon külső fűtést is alkalmaztak ebben a mérésben.
- A gőzfejlesztő a mérőszakasz aljához csatlakozik, és biztosítja a megfelelő állapotú és összetételű közegek beáramoltatását.
- A kondenzátor a mérőszakasz felső részéhez csatlakozik, és fő feladata a kiáramló forró hűtőközeg lehűtése, illetve az abban lévő gőz lekondenzálása.



5. ábra: A CODEX berendezés fő komponensei

A mérőszakasz tartalmazza mindazokat az eszközöket, amelyek a vizsgált fűtőelem rudakat fizikailag összetartják, valamint a valós reaktorteknikai geometriát és a hőtechnikai viselkedést a lehető legpontosabban modellezik.

A kísérleti köteg hét darab, elektromosan fűtött fűtőelem-szimulátorból áll. A modellben a fűtőelem-rudakhoz háromfajta burkolatot használtak fel:

- E110 ötvözet, amelyet jelenleg is használnak a Paksi Atomerőműben,
- E110G ötvözet, ami új, szivacsos technológiával készül, és az új, vékony falú fűtőelemekkel együtt várható a bevezetése az erőműben a következő években,
- E110ocs ötvözet, amely a tradicionális eljárással készült, de csökkentett hafnium tartalma van.

A megfelelő geometriai elrendezés kialakításához szintén eredeti, az orosz gyártótól beszerzett cirkónium (Zr1%Nb) távtartórácsot használtak fel. A köteg alsó végét a szerelőtárcsa tartotta fixen, a kötegből így 580 mm szabad hossz maradt meg. A kötegben csak a hat külső rudat fűtötték volfrám fűtőszállal, a középső rúd fűtetlen volt. A nyomásállóság biztosítására a hét cső egyik végét egy-egy hegesztett Zr dugó zárta le. A modellben a fűtőelem-rudakat ZrO₂ tablettákkal töltötték fel, amelyek hőtechnikai paraméterei hasonlóak az UO₂ tablettákéhoz. A kísérleti köteget cirkónium (Zr2,5%Nb) köpeny (kazettafal) veszi körbe, amit a hőveszteségek csökkentésére Al₂O₃ szigetelés borít.

A kötegbe közel húsz darab K-típusú és magas hőmérsékletű W-Re termoelemet építettek be, amelyek pontos adatokat szolgáltatnak a köteg különböző részein kialakult hőmérsékletekről. A fűtőtestek elektromos teljesítményét egy kalibrált, analóg szorzóáramkör segítségével mérték. A kötegből kilépő gáz összetételét egy quadropole típusú tömegspektrométerrel mérték. Az adatgyűjtő rendszer gyűjtötte és tárolta a mérési eredményeket a kísérletek során, valamint részt vett a szabályozásban is.

A CODEX-NITRO kísérlet végrehajtása

A kísérlet előkészítő szakaszában bekapcsolták a gőzfejlesztőt, majd megkezdtek az argon betáplálást. Ezzel párhuzamosan elindították a kondenzátor hűtését, és megkezdődött az adatgyűjtés. A forró gőz a berendezés jelentős részét 400 °C körüli hőmérsékletre fűtötte fel. A kísérlet előkészítő szakasza szándékosan hosszú ideig tartott, hogy a berendezés egyenletesen felmelegedjen. Ezért a mérés időskáláján nézve - az előkészítő számításokhoz képest - kb. 12000 másodperccel később kezdődött az üzemzavar modellezése.

Következő lépésként 5200 s után (6. ábra) bekapcsolták a 800 W teljesítményű külső fűtést, és megkezdődött a rudak belső fűtése alacsony teljesítményen (200 W). A berendezés felűtése 500 °C-on zárta le az előkészítő szakaszt (7. ábra) 14000 s-nál.

A vízgőzös oxidáció beindulásához csökkentették az argon forgalmát, és megnövelték a teljesítményt. 600°C elérésekor (14800 s) a tömegspektrométer már mutatta a hidrogén

megjelenését a kilépő gázban (8. ábra), ami a cirkónium vízgőzös oxidációjának beindulását jelezte.

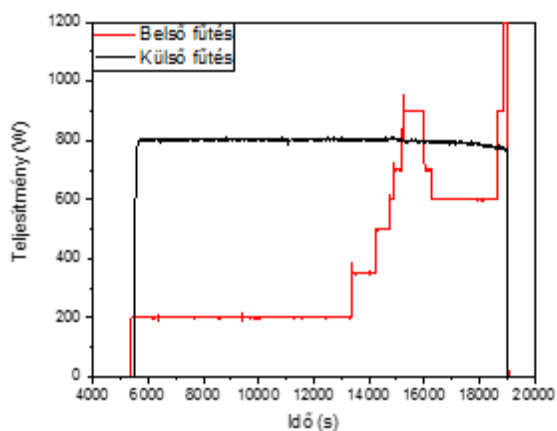
700 °C elérése után (15500 s) megkezdődött a nitrogén betáplálása a gőzfejlesztőn keresztül, majd öt perccel később elzárták a gőzfejlesztő csatlakozását a mérőszakaszhoz. A további hűtőközeg betáplálás (víz, argon, nitrogén) közvetlenül a mérőszakasz aljába történt előmelegítés nélkül.

A kísérlet következő szakaszában körülbelül fél óra alatt (17200 s) elérték az 1200 °C-os hőmérsékletet a köteg felső részében. A további emelkedés is jelentős volt: gyorsan (1800 s) 1600 °C fölé emelkedtek a hőmérsékletek (7. ábra). Közben a kilépő gázban a vízgőz koncentrációja alaposan lecsökkent, és gőzhiányos állapot jött létre a köteg felső részében. Gőz hiányában leállt a cirkónium-vízgőz reakció, a köteg felső része már nem tudott tovább melegedni. A köteg középső és alsó részén viszont intenzív oxidáció ment végbe, ezért az axiális hőmérsékletprofil is megváltozott, és a maximum hőmérséklet a köteg tetejéről annak közepe felé tevődött át. A hőmérsékletprofil átrendeződését nagyon jól jelezték az előkészítő számítások is (4. ábra).

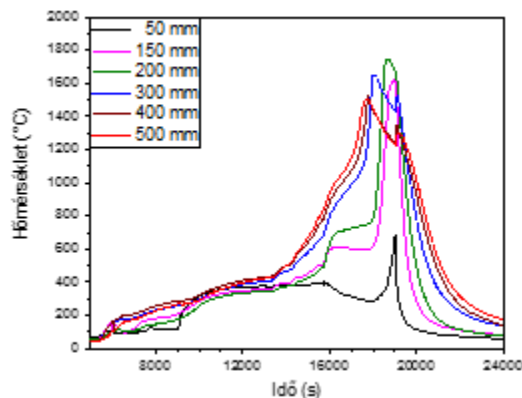
A gőzhiányos állapot idején a gázáramban kilépő hidrogén mennyisége állandósult, a nitrogéné pedig csökkent (8. ábra). Az utóbbi jelezte, hogy 17600 s után a nitridizáció is intenzíven mehetett végbe a cirkónium felületeken. A középső rúdon 200 mm magasságban jelentkezett a maximum hőmérséklet, amelynek értéke 1748 °C volt (18500 s, 7. ábra), ami a cirkónium olvadáspontja közelében van.

A mérés utolsó szakaszában a fűtést kikapcsolták, a nitrogén és vízgőz betáplálását megszüntették, és megemelt argon áramban hűtötték le a berendezést.

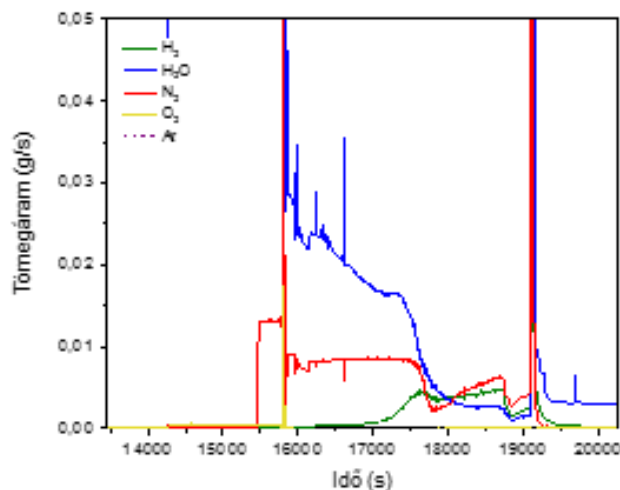
A kísérlet után a köteget műgyantával kiöntötték, és 50 mm-es darabokat vágtak ki belőle. A vízszintes metszeteken - megfelelő polírozás után - metallográfiai vizsgálatokat végeztek. A köteg metszetein jól látható, hogy a fűtőelemek burkolata és a kazettafal egyaránt jelentős mértékben oxidálódott (9. ábra). A magas hőmérséklet hatására a kazettafal 200-250 mm magasságban szemmel láthatóan deformálódott.



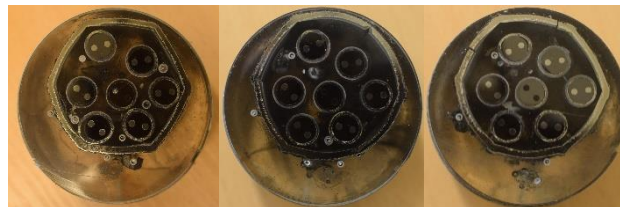
6. ábra: A köteg és a mérőszakasz külső fűtésének elektromos teljesítménye a CODEX-NITRO kísérlet során



7. ábra: A mért burkolat hőmérsékletek a CODEX-NITRO kísérlet során



8. ábra: A kilépő gáz összetétele a CODEX-NITRO kísérletben



150 mm 200 mm 250 mm

9. ábra: A CODEX-NITRO köteg metszetei különböző magasságokban

Összefoglalás

A CODEX-NITRO kísérletet 2018. december 7-én sikeresen végrehajtották. A kísérletben egy olyan atomerőművi balesetet szimuláltak egy hét rúdból álló elektromosan fűtött köteggel, amelyben a primerköri csőtörés után a hidroakkumulátorokból nitrogén is beáramlik a reaktor aktív zónájába.

A kísérlet során a maximális hőmérséklet meghaladta az 1700 °C-ot. A nitrogén jelenléte felgyorsította a cirkónium-komponensek vízgőzös oxidációját. Az alacsony gőzforgalom következtében gőzhiányos állapot állt elő, és ebben az időszakban a köteg felső részén intenzív nitrogén-cirkónium reakció ment végbe. A CODEX-NITRO kísérlet felhívta a figyelmet arra, hogy ha egy reaktorbaleset során az aktív zónába nitrogéngáz kerül, akkor a fűtőelemek

degradációja gyorsabban mehet végbe, és olyan kémiai reakciók indulnak be, amelyek tiszta vízgőz atmoszférában nem lépnek fel. Az előkészítő számítások jelentősen

megkönnyítették a kísérlet tervezését, és több fontos effektust (így a hőmérsékletprofil átrendeződését, a cirkónium-nitridek képződését) előre jeleztek.

Köszönetnyilvánítás

A munkát a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatta az NVKP_16-1-2016-0014 számú projekt keretében.

Irodalomjegyzék

- [1] Bareith A, Karsa Z, Lajtha G, Téchy Zs.: 2. szintű PSA aktualizálásával kapcsolatos jelentések készítése. A súlyos baleset során kialakuló erőmű sérülési állapotok (PDS-ek) meghatározásának aktualizálása. Konténment eseményfák aktualizálása. 212-026-00/1, NUBIKI, 2010. december
- [2] P. Chatelard, N. Reineke, S.Arndt, S. Belon, L.Cantrel, L.Carenini, K.Chevalier-Jabet, F.Cousin, J.Eckel, F.Jacq, C.Marchetto, C.Mun, L.Piar: ASTEC V2 severe accident integral code main features, current. V2.0 modelling status, perspectives Nuclear Engineering and Design Volume 272, June, p.119-135
- [3] S. Belon, L. Carenini, P. Chatelard, O. Coindreau, V. Topin: Draft Manual for ASTEC V2.1: ICARE Module. User Manual IRSN Rapport no PSN-RES/SAG/2016-00421, Mars, 20017
- [4] Hózer Z, Windberg P, Nagy I, Vimi A, Kunstár M, Vér N, Matus L, Perezné Feró E, Novotny T, Balaskó M, A paksi üzemzavar modellezése a CODEX berendezésen, Magyar Energetika 15:(5) pp. 20-23. (2007)
- [5] Hózer Z, Maróti L, Windberg P, Matus L, Nagy I, Gyenes G, Horváth M, Pintér A, Balaskó M, Czitrovsky A, Jani P, Nagy A, Prokopiev O, Tóth B: Behavior of VVER fuel rods tested under severe accident conditions in the CODEX facility, Nuclear Technology 154:(3) pp. 302-317. (2006)