

Pihentető medence hűtőközeg veszteses súlyos balesete – BWR – PWR égésterjedéses számítások

Horváth L. Gábor

NUBIKI Nukleáris Biztonsági Kutatóintézet Kft.

1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33, tel.: + 36 1 392 2222/2109

A pihentető medence teljes hűtőközeg vesztese esetén a cirkónium (Zr) fűtőelemek levegőben történő oxidációja várható. A Sandia National Laboratory BWR és PWR fűtőelemekkel kísérleteket végzett erre az állapotra. A PWR kísérletek az OECD égiszke alatt Sandia Fuel Project (SFP) néven futnak. A jelenség a fűtőelemek remanens hő miatti levegőn történő felhevülésével kezdődik, majd a Zr burkolat hőfejlődéssel járó oxidációja ezt felgyorsítja. Ezután a folyamat végső fázisa következik, az ún. megszaladás (breakaway), azaz a Zr lavinászerű oxidációja – ami a fűtőelemek roncsolódását eredményezi. A cikkben a folyamatra végzett MELCOR 1.8.6 termohidraulikai számításokat mutatjuk be, külön kitérve egy forró (zónából nemrég kikerült) kötegtől való Zr égés tovaterjedésére a mellette lévő hideg (hosszú ideje tárolt) kötegekre.

Bevezetés

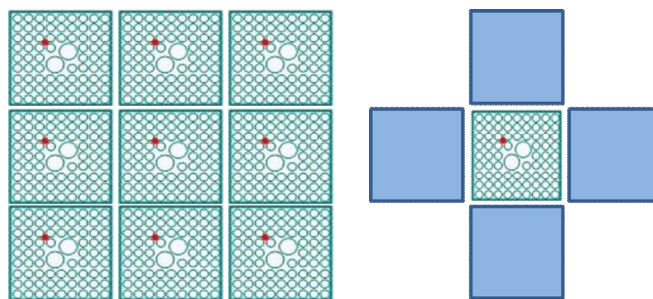
Az US NRC megbízására a Sandia National Laboratory BWR (boiling water reactor – forralóvízes reaktor) és PWR (pressurized water reactor – nyomottvízes reaktor) fűtőelemekkel kísérleteket végzett, amelyek során a fűtőelemek pihentető medencében, száraz körülmények között, levegőben történő oxidációját vizsgálták. E munka célja olyan validált kód létrehozása, amellyel lehetővé válik a paksi pihentető-medence oxidációs baleseteinek elemzése.

Ennek keretében végeztük a cikkünkben szereplő számításokat. A kísérleti program prototipikus BWR és PWR cirkónium (Zr) kötegeket ölelt fel végtelen köteg rács, illetve inhomogén köteg rács geometriai elrendezésben. A felhasznált ötvözet Zircaloy-4 volt.

A kötegek elektromos fűtésűek voltak, UO_2 helyett tömörített MgO -t használtak, aminek a hőkapacitása csaknem azonos volt az UO_2 -vel.

A kötegméretetek is azonosak voltak az eredeti BWR, ill. PWR fűtőelemekkel. A levegő áramlását a fűtés következtében a természetes cirkuláció határozta meg. A kötegek alul és felül nyitottak, oldalt pedig szigeteltek voltak. A végtelen rács geometriát a köteg körüli közvetlen szigeteléssel érték el, az inhomogén köteg eloszlást pedig egy fűtött és az azt körülvevő 4 fűtetlen köteg jelentette.

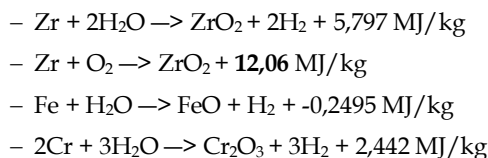
A többlettől eltérést jelentett az 1+4 köteges inhomogén BWR rácsosztás kísérlet, amely axiális irányban a magasság egy kritikus rövid szakaszát modellezte: azt a részt, ahol a megszaladást tapasztalták az 1 köteges esetben. Itt a hűtőközeg belépési hőmérséklete sem a kísérleti tartály hőmérséklete volt, hanem annál magasabb. A mérések legfontosabb információi a hőmérsékletek és a tömegáramok voltak.



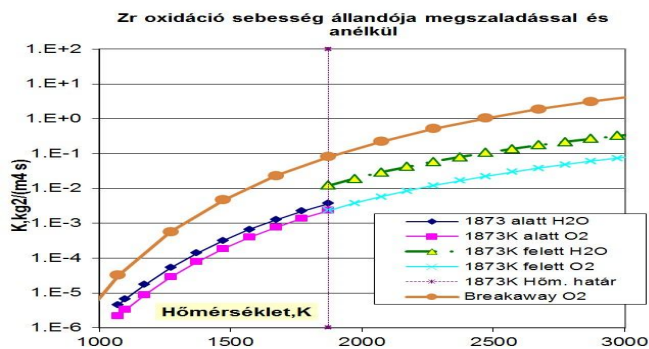
1. ábra: Végtelen és inhomogén köteg rács elrendezés.

Breakaway / megszaladás jelensége

A vízhűtés nélkül maradt és szárazra került - a remanens hő miatt felhevült - kötegek gőzben és levegőn oxidálódnak. Az oxidációs reakció hője azután a kötegeket tovább melegíti, ami végül a kötegek elroncsolódásához vezethet. Az oxidációs reakció hője levegőn a legnagyobb. Az alábbi adatok 298 K referencia hőmérsékleten érvényesek és egységnyi Zr fémre vonatkoznak.



A reakciók sebessége viszont erősen hőmérsékletfüggő. A függést Arrhenius típusú függvényvel írhatjuk le. A 2. ábra azt mutatja, hogy az oxidáció sebessége gőzben is ugrásszerűen nő a megszaladás jelensége nélkül is 1873 K felett, viszont levegőn a sebesség még nagyobb és a jelenség minőségileg különbözik a gőzben való oxidációtól.

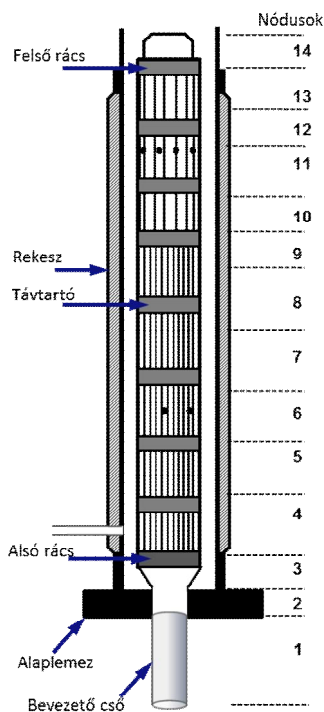


2. ábra: Zircaloy oxidáció sebessége gőzben és levegőn a hőmérséklet függvényében megszaladással és anélkül.

Míg a gőzben való oxidáció során egy bizonyos hőmérséklet fölött növekszik ugrásszerűen a reakciósebesség, addig levegőn ez az átmenet nem csak a hőmérséklettől, hanem a hőmérsékleten eltöltött időtől is függ. Ezt nevezzük breakaway (megszaladás) jelenségnek, amikor az oxidáció lavinaszerűen felgyorsul. A jelenség az oxidréteg változásával függ össze.

Egyköteges BWR és PWR kísérletek és MELCOR szimuláció

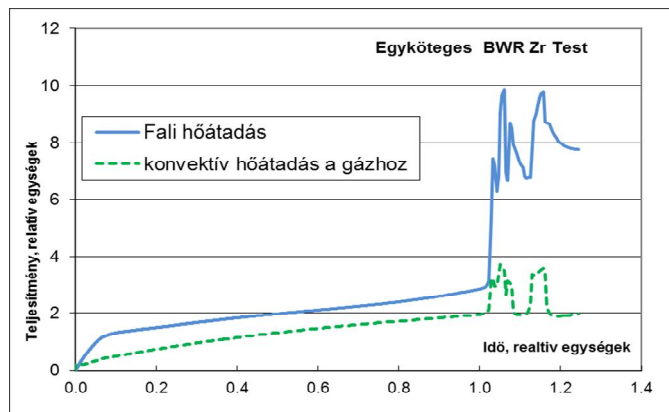
Az egyköteges, teljes léptékű, Zircaloy anyagú kívülről szigetelt BWR és PWR köteg modellezését a MELCOR 1.8.6 YT1010 [1] változatával végeztük el, amely alkalmas az előző fejezetben leírt, levegőn történő Zr oxidáció megszaladásos jelenségének kezelésére. A számítási elrendezést – nodalizációt a 3. ábra mutatja.



3. ábra: BWR köteg részei

A köteg hidraulikai ellenállását első lépésben a SANDIA által elvégzett előkísérleti adatok alapján, valamint MELCOR érzékenységvizsgálatok alapján határoztuk meg. A kötegben számított hőfejlődést a 4. ábra mutatja.

A kísérleti adatok ismeretében mondhatjuk, hogy a MELCOR – korlátai ellenére – a folyamatot jól reprodukálni tudta. Számítások szerint a hőfejlődéshez legnagyobb hozzájárulást az oxidáció jelentette, az oxidáció megindulása után. A 4. ábra szerint ennek legnagyobb része a köteget határoló falakon nyelődött el. A gáz (levegő) által elvitt konvektív hőátadás jelentősége kisebb.



4. ábra: Egyköteges Zr BWR kötegben adódó számított teljesítmény eloszlások jellege, mértékegységek nélkül.

Egyköteges PWR kísérletek és MELCOR szimuláció

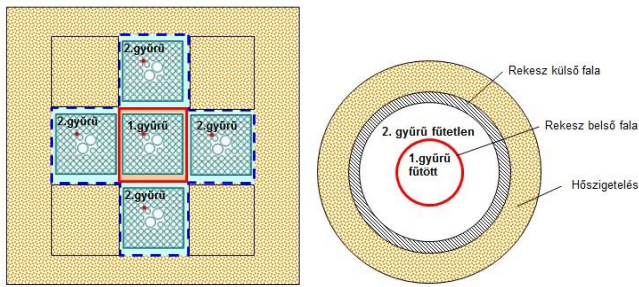
A BWR kísérletekhez hasonlóan végeztük az egyköteges, teljes léptékű, Zircaloy anyagú PWR kötegek tesztelését. Ennek modellezését is a MELCOR 1.8.6 YT1010 változatával végeztük el. A mérés elrendezése és a MELCOR szimuláció is az egyköteges BWR esethez volt hasonló (3. ábra).

A kísérletek eredményei is a BWR-hez hasonlóak voltak. A MELCOR számítások is jól reprodukálni tudták a folyamat lényeges részeit.

1+4 rövid köteges BWR kísérletek és MELCOR szimuláció

Az 1+4 rövid köteges, Zircaloy anyagú, kívülről szigetelt BWR köteg elrendezése a többitől eltérően a belépésnél fűtött levegőárammal működött. A rövid köteg és a fűtött belépés a korábbi egyköteges kísérletek során tapasztalt megszaladás körülményeit volt hivatott reprodukálni. A MELCOR 1.8.6-ban a radiális felosztást 2 gyűrűvel, a függőleges felosztást pedig 14 szakasszal modelleztük, az utóbbit a 3. ábrához hasonló módon.

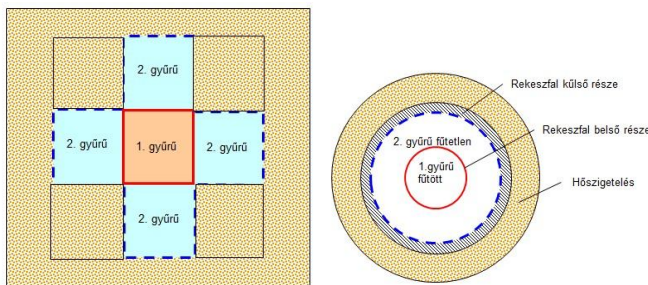
A modellezést a MELCOR 1.8.6 YT1010 változatával végeztük el, amelynek modellje eltér a 5. ábrán lévő eredeti geometriától. A köteget elválasztó acél rekeszfal – amely további termikus ellenállást jelent a fűtött központi köteg és a fűtetlen szélső kötegek között – nincs a MELCOR modellben. Ezt a kötegfal felületének kétszeres, illetve a teljesítménynek csekély (18%) növelésével kompenzáltuk, hogy a kísérleti adatokhoz közel kerüljünk.



5. ábra: 1+4 köteges Zr BWR rövid köteges teszt szigeteléssel. Eredeti (bal) ill. MELCOR (jobb) elrendezés. A központi köteg (1. gyűrű) fűtött, a 4 szélső (2. gyűrű) fűtetlen. Piros és kék vonal – rekeszfal; zöld – kötegfal

1+4 köteges PWR kísérletek és MELCOR szimuláció

Az 1+4 köteges teljes léptékű Zircaloy anyagú kívülről szigetelt PWR köteg-elrendezés alul és felül nyitott, fűtetlen levegőárammal működött. Az elrendezés kívülről szigetelve volt (6. ábra). A MELCOR 1.8.6-ban a radiális felosztást 2 gyűrűvel, a függőleges felosztást pedig 14 szakasszal modelleztük, az utóbbit a 3. ábrához hasonló módon.



4. ábra: 1+4 köteges teljes léptékű Zr PWR elrendezés szigeteléssel. Eredeti (bal) ill. MELCOR (jobb) elrendezés, nincs kötegfal, csak rekeszfal van. A központi köteg (1. gyűrű) fűtött, a 4 szélső (2. gyűrű) fűtetlen.

Fontos különbség, hogy a PWR (17x17 fűtőelem pálca) esetében nincs kötegfal, ami további termikus ellenállást jelentene. A számítás során – az 1+4 BWR rövid köteg-elrendezéstől eltérően – korrekciókat nem alkalmaztunk.

Összefoglalás

Cirkónium levegőn bekövetkező intenzív oxidációja során adódó megszaladási (breakaway) jelenséget a MELCOR 1.8.6 YT_1010 változatával számítani tudjuk.

Egyköteges BWR és PWR tesztek

- A teljes léptékű egyköteges BWR és PWR Zircaloy köteggel végzett kísérletet a kidolgozott MELCOR input-moddellel követni tudtuk a folyamat minden fontos szakaszában.
- Az első értékelések szerint a PWR kötegben az égési front terjedése nem különbözik lényegesen a BWR-tól, de az égés kezdet magassági pontja más, mivel a BWR köteg felső részén kisebb a hőteljesítmény. A Zr kötegfal hiánya tehát nem ad jelentős oxidációs kép módosulást.

1+4 köteges BWR és PWR tesztek

- A rövid köteges BWR teszteknel a tovaterjedést ugyan korrekciókkal, de a számítás is kiadta.
- A teljes léptékű PWR kötegeknél a tovaterjedés szintén megtörténik, de számított tovaterjedési késedelem nagyobb mint a mérésekben. A MELCOR modell finomítása szükséges több radiális gyűrű felvételével.

Modellek korlátai

A tapasztalatok szerint a kötegek közepe forróbb, ahol beindulhat az intenzív oxidáció, majd kifelé terjedhet. Az anyagokat egy axiális szinten egy tömegnek kezelő MELCOR-ban a hőmérséklet-eloszlás homogén, így ebből jelentős késedelmek adódnak az oxidáció terjedése során.

Ez a késedelem az egyköteges esetben nem olyan fontos, mint a 1+4 esetekben.

A nagy kiterjedésű pihentető medencék számítása esetén a több radiális gyűrű felvétele nehézkes, így célszerűnek látszik több lokális forró pont számítása.

Irodalomjegyzék

- [1] Gauntt, R.O. et al.: MELCOR Computer Code Manuals. Premier and User's Guides, Version 1.8.6 May, 2000, NUREG/CR-6119, SAND2000-2417/1