

Biztonsági elemzések a Budapesti Kutatóreaktor fűtőelem-konverziójához

Keresztúri András, Hegyi György, Maráczy Csaba, Pataki István, Trosztel István

MTA Energiatudományi Kutatóközpont

1525 Budapest 114, Pf. 49, tel.: 392 2222

A Budapesti Kutatóreaktor 36%-os dúsítású fűtőelemeinek cseréje alacsonyabb, 19,75%-os dúsítású fűtőelemekre, valamint ezzel kapcsolatban az aktív zóna méretének és átrakási sémáinak megváltozása szükségessé tették a biztonsággal kapcsolatos számítások egy jelentős részének megismétlését. A dúsításcsökkentés engedélyezési folyamata előtt a hatóság (Országos Atomenergia Hivatal) előírta az elemzési módszerek modernizálását, és elemzések párhuzamos elvégzését mind a régi, mind a csökkentett dúsítású zónák esetére. A biztonság értékelése két szinten történt. Egyrészt vizsgálni kellett a normál üzemi zónatervezési számítások reaktorfizikai keretparamétereit, másrészt a legkedvezőtlenebb esetekre meg kellett ismételni az üzemzavar elemzéseket. Tekintettel az aktív zóna változásaira a vizsgálatok során a reaktivitás üzemzavarok elemzése és az üzemzavari védelem nélküli események (ATWS: „Anticipated Transient Without Scram”) alapvető szerepet játszottak. A cikk ismerteti a biztonság igazolásának feltételeit, az elemzések céljára alkalmazott számítógépes modelleket, módszereket, valamint áttekintést ad az elvégzett üzemzavar-elemzésekről.

Az engedélyezést megalapozó biztonsági feltételek

A biztonság igazolása során az elfogadási kritériumok, azok teljesülésének bizonyítása alapvető szerepet játszanak.

Az elfogadási kritériumok különböző fizikai és korróziós folyamatokhoz kapcsolódó, rendszerint számszerűsített feltételek, melyek az általános biztonsági célok (a fűtőelem inhermetikussá válásának elkerülése, hűthetőség, abszorbensek mozgathatósága) elérésének elégséges feltételei. Az elemzések során ezek egyrészt - a reaktor elhelyezkedésének megfelelően - az erőműveknél alkalmazottaknál szigorúbbak voltak, valamint a mélységi védelem alapelvei szerint különböztek a normál üzemre (NO: „Normal Operation”), a várható üzemi eseményekre (AOO: „Anticipated Operational Occurrence”), valamint az üzemzavarokra (PA: „Postulated Accident”):

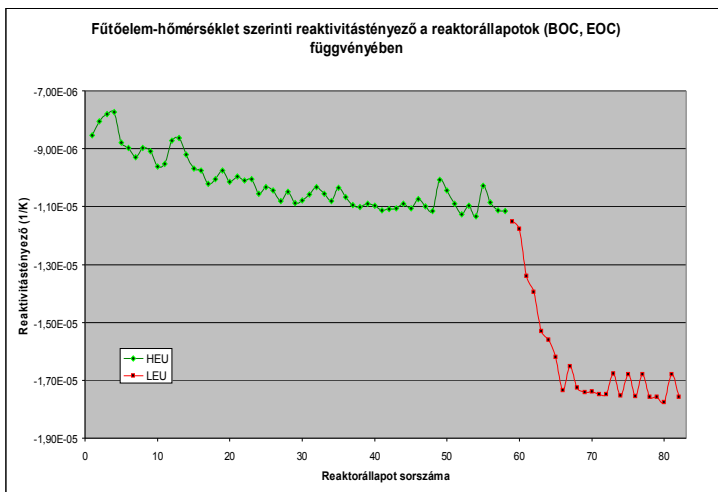
- Normál üzem (NO) és várható üzemi események esetén szükséges a forrás (ONB: „Onset of Nucleate Boiling”) hosszabb idejű - perces nagyságrendű - fellépésének elkerülése a fűtőelem burkolatán a hermetikusság biztosítása céljából.
- Üzemzavarok (PA) esetén szükséges az olvadáspont elérésének elkerülése.

Ugyancsak a mélységi védelem alapelveinek megfelelően már a normál üzem során is olyan feltételeket biztosítunk, amelyek enyhítik a potenciális üzemzavarok következményeit, sőt ezek „teljessége” azt is lehetővé teszi, hogy az elemzéseket ne kelljen minden átrakás után megismételni. Az üzemzavar elemzések speciális, főleg reaktorfizikai jellegű normál üzemi kiindulási feltételei,

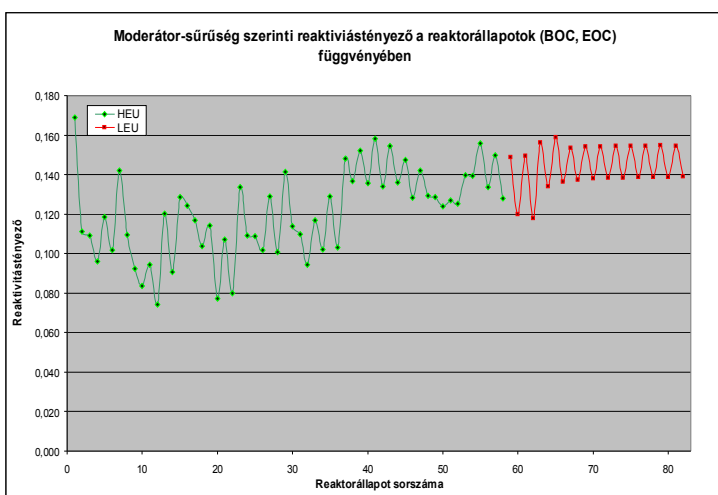
azok burkoló értékei az alábbi keretparaméterek korlátozásával valósulnak meg.

- Maximális reaktor- és fűtőelem teljesítmény
- Maximális hő-fluxus
- Moderátor sűrűség szerinti reaktivitástényező értéke
- Fűtőelem hőmérséklet szerinti reaktivitás tényező értéke
- Lezárási és tartalék reaktivitás
- Abszorbens rudak maximális értékessége
- A biztonságvédelmi rudak minimális értékessége
- A későneutron hányad minimális értéke

Az 1. és 2. ábrák az eddigi és a tervezett átmeneti, valamint az egyensúlyi kampányokra a fenti keretparaméterek közül a reaktivitás-tényezőket mutatják. Látható, hogy a fűtőelem-hőmérséklet szerinti reaktivitás-tényező értékei a kisebb dúsítású zónákra való áttérés során („HEU” „LEU” átmenet) a biztonság szempontjából sokkal kedvezőbben alakulnak, valamint a moderátor-sűrűség szerinti reaktivitás-tényező legkedvezőtlenebb értékei a kétfajta zónára egybeesnek, vagyis a keretparamétereket nem kellett módosítani.



1. ábra: Fűtőelem hőmérséklet szerinti reaktivástényezők az egymás utáni kampányok kezdetére („BOC”) és végére („EOC”)



2. ábra: Moderátor sűrűség szerinti reaktivás-tényezők az egymás utáni kampányok kezdetére („BOC”) és végére („EOC”)

A vizsgált üzemzavarok és az alkalmazott modellek

A kezdeti eseményeket és az azok elemzéseikhez használt kódokat az 1. táblázat ismerteti.

1. táblázat Kezdeti esemény csoportok, az elemzett limitáló kezdeti esemény

Kezdeti esemény csoport	A legkedvezőtlenebb eredményt adó "fedőesemény"	Az elemzéshez használt számítógépes program
Primerkörü forgalomcsökkenés	Teljes feszültségkiesés	ATHLET
A szekunderkörü hő-elvitel csökkenése		
Reaktivitás üzemzavarok (RIA)	Minden lényeges eset elemezve lett (lásd alább)	KIKO3D, ATHLET-KIKO3D
Csőtöréses üzemzavarok	Az összes változat	LOCASYM

Az elemzett reaktivitás üzemzavarok (üzemzavari védelemmel és anélkül) a következők voltak:

- Nem tervezett reaktivitás növekedés a xenon koncentráció erős csökkenésének fázisában történő felterhelés után
- Hideg-víz betörés
- Abszorbens rúd hirtelen nem tervezett kirántása
- Besugárzó berendezés nem tervezett eltávolítása
- Nem tervezett reaktivitás-bevitel átrakás alatt
- Abszorbens csoport nem tervezett, hosszúidejű kihúzása normál üzemi sebességgel
- Nem tervezett, aszimmetrikus teljesítmény-eloszláshoz vezető abszorbens pozíciók

Az elemzések modelljei

Tekintettel az aktív zóna megváltozására és ezzel kapcsolatban a reaktivitás üzemzavarok kiemelt szerepére az alábbiakban nagyjából az erre a célra alkalmazott számítógépes programokat, modelleket ismertetjük. Mind a zónatervezés, mind a reaktivitás üzemzavarok elemzése során alapvető szerepet játszott a Budapesti Kutatóreaktor számításainak céljaira továbbfejlesztett KIKO3D program [1-4], amit összekapcsolva használtunk a primerkörü termohidraulikát modellező ATHLET kóddal [8]. A KIKO3D program részére a csoportállandókat a KARATE programrendszer [5-7] MULTICELL moduljával állítottuk elő. A KARATE programrendszer MULTICELL modulja spektrális transzport számításokat végez egy cellára és környezetére. A kódban az AEKI-ben kidolgozott egyedi megoldások találhatók a rezonancia-árnyékolás, valamint a nagyméretű heterogén tartományra kiterjedő, szintetikus magfüggvényen alapuló helyfüggő termalizáció problémájának gyors megoldására [5]. A program adatkönyvtára az ENDFB-VI nukleáris adatokból lett előállítva, és a MULTICELL technikával előállított első ütközési valószínűségekből adódó egyenletek oldódnak meg 70 energia-csoportban (MGCP modul). A kiegészítő modul lehetővé teszi minden egyes régióban 18 aktinoida és 160 hasadási termék koncentrációjának nyomon követését.

KIKO3D: A 3D reaktordinamikai program célja a reaktorok hely és időfüggő folyamatainak modellezése, feladata az időfüggő teljesítmény-eloszlás nódusonkénti meghatározása. A modell legfontosabb sajátosságai, feltételezései az alábbiak:

- nodális módszer, a nódusok az axiálisan felosztott üzemanyag kazetták,
- a nódusok határfelületein a neutronok repülési iránya szerinti lineáris anizotrópia feltételezése,
- az egyenletek megoldásából kiszámítandó ismeretlenek a nódus határoló lapokon vett skalár-fluxus felületi integrálok,
- a homogenizált nódusokon belül a két-csoport diffúziós egyenlet analitikus megoldásának alkalmazása,
- a megoldandó egyenletek a nódus-határok két oldalán számított nettó áramok egyenlőségéből adódnak,

- az időfüggő problémára és az időfüggő nodális egyenleteknek megfelelő általánosított rezponz-mátrixok alkalmazása,
- az általánosított rezponz-mátrixok származtatása két-csoport hatás keresztmetszetekből és diffúziós állandókból,
- az általánosított rezponz mátrixok paraméterezése a fűtőelem hőmérséklete, a hőhordozó termohidraulikai jellemzői, a kiegészés és a legfontosabb izotópkoncentrációk szerint,
- az időfüggő nodális egyenletek faktorizálása; alakfüggvény-egyenlet és a „pont-kinetikai egyenletek” származtatása, a pont-kinetikai egyenletekben a visszacsatolás figyelembevétele,
- az abszorbens és a reflektor nódusok előre számított albedó határfeltételek formájában való figyelembevétele,
- az alakfüggvény esetén GMRES típusú iterációs eljárás (minimalizálás a Krilov bázisban) Gauss-Seidel prekondicionálással,
- az amplitúdó függvény Runge-Kutta eljárással oldódik meg.

Az ATHLET programcsaládot [8] a német GRS-nél (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH) fejlesztették ki üzemi és üzemzavari tranziensek, kis-, közepes- és nagytérű csővezetékek törését követő termohidraulikai jelenségek vizsgálatára, könnyűvíz-hűtésű reaktorok esetén. Az AEKI 1993-tól kezdve számos projektben alkalmazta az ATHLET kódot mind PMK mérések elő- és utószámítására, mind VVER-440 erőművi tranziensekre. A kód fontosabb jellemzői:

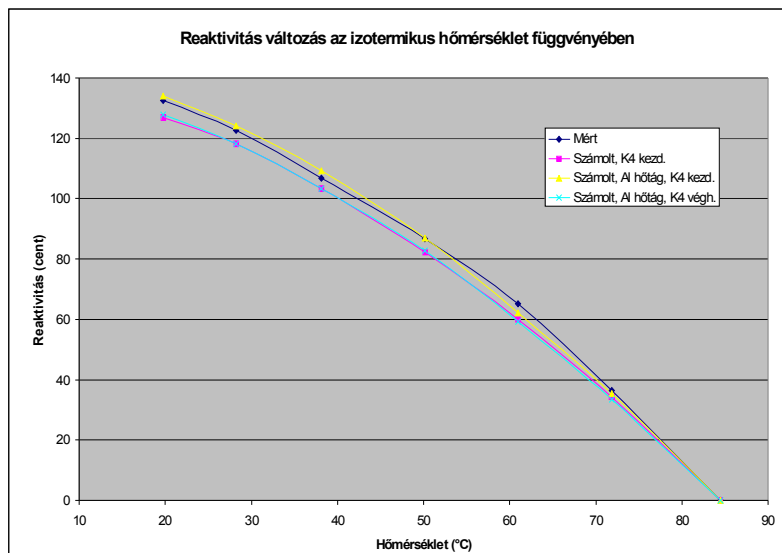
- fejlett termohidraulikai modellek,

- moduláris kódstruktúra,
- a fizikai modellek és a numerikus megoldás szétválasztása,
- elő- és utólagos eljárások a felhasználó-barát programkezelés érdekében,
- a fejleszthetőség biztosítása.

Validációs eredmények

Bár a felhasznált kódok alapvetően validáltak, az „alap-validáció” főleg erőmű-specifikus mérésekkel történt. Ezért a programokat az elemzések előtt a kutatóreaktoron végzett mérésekkel, vagy a kutatóreaktorra jellemző benchmark feladatok megoldásával validáltuk:

- A fizikai indítás alatt végzett mérések [3]. A 3. ábra ezek közül a reaktivitás hőmérsékletfüggésének mért és a KIKO3D kóddal végzett számítási eredményeit mutatja.
- Az ATHLET kód tesztelése a fizikai és az energetikai indítás termohidraulikai méréseivel [11].
- Rúdértékesség mérések kis teljesítményű kritikus állapotokban az egyes kampányok kezdetén és végén [3].
- Fólia aktivitás mérések az első kampány nominális teljesítményű állapotában [3].
- Az ATHLET kód tesztelése az Argonne National Laboratory PLTEMP/ANL V3.0 szubcsatorna termohidraulikai programjával [9].
- Összehasonlítások az első kampányra precíziós programokkal végzett referencia megoldásokkal, melyeket az MCNP, DIF3D és REBUS-3 programokkal kaptak [10].



3. ábra: A fizikai indítás számított és mért hőmérsékletfüggő reaktivitásai az alumínium burkolat hőtágulásával és anélkül, a K4 rúdcsoport különböző helyzetei esetén

Elemzési eredmények

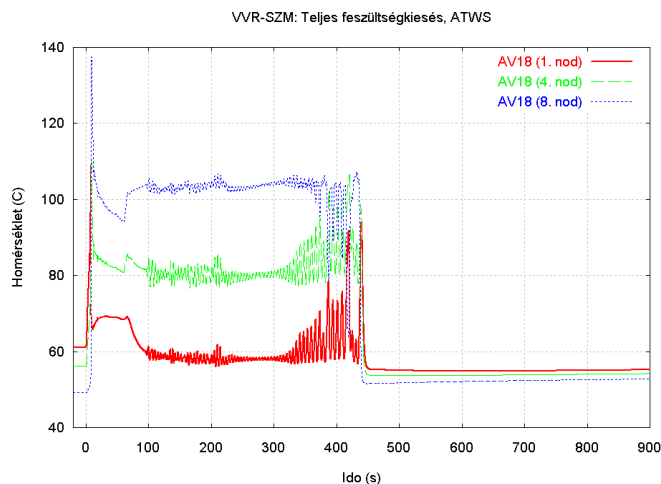
Az elemzési eredmények szerint az 1. táblázat összes kezdeti eseménye során teljesülnek az elfogadási kritériumok, vagyis a zónakonverzió teljesíti a biztonsági követelményeket. Példaképpen 4. és az 5. ábrán bemutatjuk a maximális burkolathőmérsékleteket.

A 4. ábra a teljes feszültségkiesés kezdeti eseményére vonatkozik üzemzavari védelem működése nélkül. A forgalomcsökkenés egyrészt a negatív visszacsatoláson keresztül csökkenti a teljesítményt, másrészt a leromlott hűtés miatt a burkolat felmelegszik. Erre az esetre az

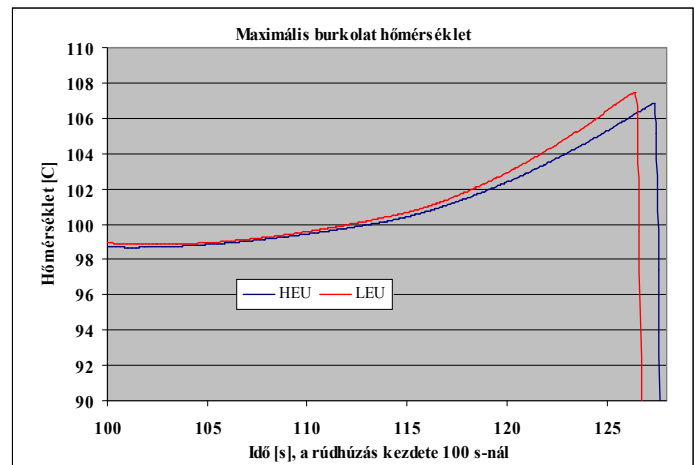
elfogadási kritérium a fűtőelem megolvadásának elkerülése, és sem a burkolat, sem az üzemanyag hőmérséklete nem éri el az olvadáspontot, ráadásul felületi forrás is csak rövid idejű alakul ki.

Az 5. ábra az „abszorbens csoport nem tervezett, hosszúidejű kihúzása normál üzemi sebességgel” kezdeti

esemény eredményét tartalmazza. Erre az esetre az elfogadási kritérium a hűtőközeg aláhűtött forrásának elkerülése. A burkolat hőmérséklete alatta marad a megfelelő termo-hidraulikai korreláció szerinti, adott nyomáshoz tartozó értéknek, így felületi forrás nem léphet fel.



4. ábra: A legterheltebb fűtőelem burkolat-hőmérséklete, feszültség-kiesés során, különböző axiális szinteken



5. ábra: A legterheltebb fűtőelem burkolat-hőmérséklete egy abszorbens csoport nem tervezett, hosszabb idejű kihúzása esetén

Irodalomjegyzék

- [1] A. Keresztúri, Gy. Hegyi, Cs. Maráczy, I. Panka, M. Telbisz, I. Trosztel and Cs. Hegedűs: *Development and validation of the three-dimensional dynamic code - KIKO3D* Annals of Nuclear Energy 30 (2003) pp. 93-120
- [2] A. Keresztúri, *Validation report of KIKO3D*, AEKI/PH208/R6 report, 1998.
- [3] Hegyi György, Telbisz Margit, Maráczy Csaba, *A Budapesti Kutatóreaktor számításaira használt KIKO3D program kézikönyve*, AEKI-RAL-2006-136/01/M0.
- [4] Hegyi György, Hordósy Gábor, Keresztúri András, Maráczy Csaba, Szilágyi Imre, Telbisz Margit, Temesvári Emese, Benkovics István, *A Budapesti Kutatóreaktor számításaira használt KIKO3D program validálási jelentése*, AEKI-RAL-2006/136/08-M0.
- [5] *General features and validation of the recent KARATE-440 code system*, Int. J. Nuclear Energy Sci. and Technology, Vol. 5, No. 3, (2010) 207-238.
- [6] A. Keresztúri, Cs. Hegedűs, Gy. Hegyi, G. Hordósy, M. Makai, M. Telbisz: *KARATE- A Code for VVER-440 Core Calculations*, Proceedings of the Fifth Symposium of AER, Dobogókő, 1995.
- [7] A. Keresztúri, Gy. Hegyi, Cs. Maráczy, L. Korpás: „Further Validation of the KARATE-440 Code System”, Proceedings of the Fifteen Symposium of AER, Znojmo, Czech Republic 3-7 October, 2005.
- [8] M. J. Burwell et al.: *The Thermalhydraulic Code ATHLET for Analysis of PWR and BWR Systems*. NURETH-4. Karlsruhe, 1989.
- [9] E. E. Feldman: *Steady-state thermal analysis for a benchmark problem specified by KFKI for the Budapest Research Reactor, RERTR Program*, Argonne National Laboratory, Argonne, IL 60349, USA, October 2006.
- [10] Jay Liaw: *Update - Preliminary Results for BRR Benchmark Study*, Argonne National Laboratory, 12 January, 2006.
- [11] Trosztel István: *A Budapesti Kutatóreaktor fizikai és energetikai indítása során végzett mérések validációs számítása az ATHLET kóddal*, AEKI-RAL-2006-136/09-M0.