

A novovoronyezsi rekritikussági kísérlet szimulációja a KARATE programrendszerrel

Hegyi György

Energiatudományi Kutatóközpont

1525 Budapest 114. Pf. 49.

Egy nyomottvoizes erőműben feltételezett gőzvezetéktrés esetében a szekunder oldalon kialakuló folyamatos hűtés következménye a zóna hűtőközegének gyors hőmérséklet-csökkenése. Ilyenkor elképzelhető, hogy a zóna újra kritikus állapotba kerül. Ezt a helyzetet legjobban a zónában található moderátor átlaghőmérséklete, az ún. rekritikussági hőmérséklet jellemzi, amely erősen függ a reaktor termohidraulikai és reaktorfizikai állapotától, és csak a térbeli jelenségeket jól modellező reaktorfizikai kóddal lehet meghatározni. A rekritikussági hőmérséklet gyakorlatilag nem mérhető, bizonytalanságát nehéz megjósolni.

Tervezési követelmény, hogy ilyen baleseti helyzet ne fordulhasson elő. A szakirodalomban régóta ismert néhány novovoronyezsi mérés, amelyben ezt a helyzetet szimulálták. A megfelelő üzemviteli adatok felbukkanása a szakirodalomban lehetőséget adott az egyik ilyen mérés szimulációjára, amit a KARATE-440 programrendszerrel el is végeztünk. A mérés sikeres modellezése a programrendszer új validációs elemének tekinthető.

Bevezetés

A nukleáris biztonsággal és az üzemanyag-gazdálkodással foglalkozók körében általános az egyetértés abban, hogy a gyakorlatban használt reaktorfizikai kódok folyamatos minősítése fontos eleme a nukleáris biztonságnak. Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy lehetőség szerint minden elérhető kísérletet érdemes szimulálni a saját kódrendszerünkkel és az eredményeket összehasonlítani a mért adatokkal.

A KARATE-440 programrendszert, amely a cellaszintű számításoktól a zónamodellig bezáróan tartalmaz modulokat [1-2], a 90-es évek közepe óta folyamatosan használjuk VVER-440 blokkok kampánytervezése során szükséges kevéscsoport könyvtárak, kazetta- és zónaszintű eloszlások és üzemviteli paraméterek meghatározására. Programjaink validálásához azóta igyekszünk a nemzetközi szakirodalom alapján összegyűjteni és megoldani az elérhető benchmarkokat, tesztfeladatokat, valamint szimulálni jól dokumentált méréseket. A mérés és számítás összehasonlítás fontos célja a biztonsági elemzések számára meghatározandó adatok bizonytalanságának meghatározása.

Ezeket az ún. keretparamétereket minden új típusú üzemanyag esetében kiszámítjuk, hiszen értékük változása biztonsági kérdéseket vethet fel. Néhány számított paraméter pontatlanságát közvetlen mérések hiányában igen nehéz becsülni, ilyenkor konzervatív feltételezésekkel határozzuk meg a megfelelő biztonsági korlátot.

Egy feltételezett gőzvezetéktrés esetében a szekunder oldalon kialakuló folyamatos hűtés következménye a zóna hűtőközegének hőmérséklet-csökkenése. A negatív hőmérséklet szerinti reaktivitás-együtthatók miatt ez reaktivitást növelő effektus. Feltételezve, hogy a tranziens elején a biztonságvédelmi rudak beestek a zónába (nagy negatív reaktivitás-bevitel), felmerülhet a kérdés, hogy a hűtés következménye nem okozhatja-e, hogy a zóna újra kritikus állapotba kerül. A feltételezett baleseti helyzet leírásából

látható, hogy az esemény függ a rudak értékességétől, a hőmérséklet-változástól és a reaktivitás-együtthatóktól.

Bár szokványos kiépítésű reaktorban ez a jelenség kísérletileg nem vizsgálható, néhány orosz mérés régóta ismert a szakirodalomban [5]. Most a megfelelő üzemviteli adatok – egy másik (Post-Irradiation Examination - PIE) nemzetközi benchmark alapján ([7], [13]) – közismertté váltak, így lehetőség adódott a két publikáció alapján az egyik mérés szimulációjára.

Először röviden összefoglaljuk a rekritikussági hőmérséklet keretparaméterének számítási módját, majd a mérés ismertetésével rámutatunk annak speciális feltételeire, és bemutatjuk ezek szimulációját.

Fontos felhívni a figyelmet arra a tényre, hogy az ismertetett kísérlet és a rekritikussági hőmérséklet definíciója között a xenon tekintetében nagy az eltérés. A mérés jelentőségét a sokféle rúdmozgás és a nagy hőmérsékletváltozás hatásának vizsgálata adja.

A mérés és a számítás jó egyezése – a régebben megoldott feladatokkal együtt – jól mutatja a KARATE-440 program rugalmas alkalmazhatóságát a nem szokványos reaktorállapotokra. Bár egy eset nem ad elegendő alapot a bizonytalanság csökkentésére, annak erősen konzervatív voltára jogosan rá lehet mutatni.

A rekritikussági hőmérséklet általános számítási módja a VVER-440-es reaktorok esetében

A rekritikussági hőmérsékletet két KARATE számítás eredménye alapján határozzák meg [3-4]. Az első számítás a 60 fokos, kiegészi lépéseket tartalmazó könyvtár bóros, kampányvégi állapota (általában 280-300 effektív kiegészi nap környékén, lásd [4]) feltéve, hogy a szabályzó és biztonságvédelmi (SZBV) rendszer hatodik munkacsoportja a legalacsonyabb megengedhető szinten, $H_6=125,0$ cm-en

található. A második számítás kiinduló pontja az előbb említett könyvtárelem 360 fokba kiterített eloszlása. Ebben a számításban az összes abszorbens bent van a zónában, de a legértékesebb SZBV szabályozó köteg fennakadását feltételezzük. A belépési hőmérsékletet változtatva keressük a kritikus állapotot. A 360 fokos esetben a következő paraméterek mellett végeztük a számítást:

- bóros, kampányvégi állapot, a xenon koncentráció befagyasztva a teljes teljesítménynek megfelelő értéken, 0,1 MW-os teljesítmény,
- a bórsav értéke megfelel a kezdeti állapothoz tartozó értéknek, közel 0,0 g/kg,
- a belépési hőmérsékletet változtattuk a kritikus állapot megkereséséhez,
- SCRAM helyzet van, egy kivételével valamennyi SZBV rúd alsó véghelyzetben ($H_{1..6}=0,0$ cm), de a legértékesebb csoport egy eleme fennakad: $H=250,0$ cm.

A rekritikusági hőmérsékletet és annak számítását bizonytalanságát a következő egyszerű modell segítségével határoztuk meg a 90-es években, figyelembe véve a fizikai indítás méréseinek szimulációja alapján a hőmérséklet szerinti reaktivitás-együtthatóira és a rúdértékességre adódott hibabecslést. Az alább felhasznált paraméterek az [1], [2], [3], [4] és [11] referenciákból adódnak, hazai és nemzetközi VVER-440-es adatok alapján.

A vizsgált eset kampányvégi állapot kihúzott rudakkal, amikor a bórsav elfogyott ($C_B=0,0$ g/kg). Ebben az esetben a hőmérséklet szerinti reaktivitás-együttható abszolút értékben a legnagyobb. A számításnál használt paraméter értékek:

- $\delta\rho/\delta T_{\text{mod}} \approx -35,0$ pcm/K,
- $\delta\rho/\delta T_{\text{fuel}} \approx -3,5$ pcm/K.

Az SZBV rudak (36 darab) beesésével bevitt reaktivitás-értéke is konzervatív módon kicsi érték: $\delta\rho \approx 5,1$ %.

Az üzemanyag hőmérséklet-együtthatójának bizonytalansága 1,0 pcm/K, míg a hűtőközegé 5,4 pcm/K a mérés - számítás összevetése alapján ([1] és [4]).

A tranziens elején a nominális üzemanyag-hőmérséklet 550 °C, míg a moderátorra vonatkozó átlag 285 °C (1375 MW-os hőteljesítményből kiindulva). A fenti adatok segítségével a következő egyszerű reaktivitás-egyenlet adódik:

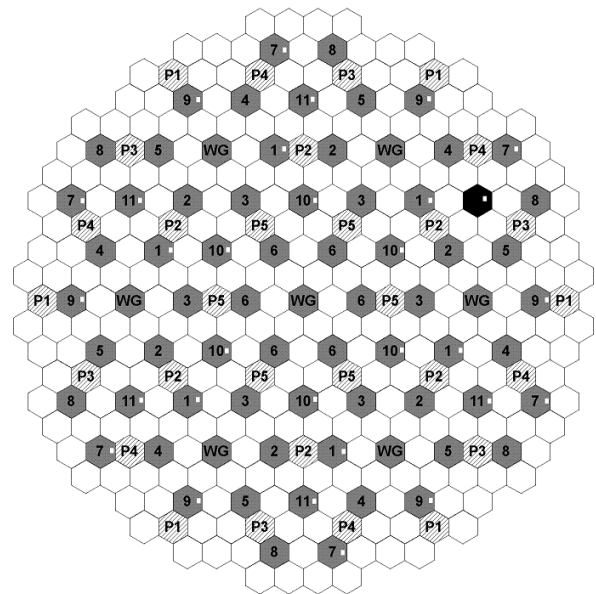
$$\Delta\rho_{\text{SCRAM}} = \left| \frac{\partial\rho}{\partial T_{\text{mod}}} \right| (285,0 - T_c) + \left| \frac{\partial\rho}{\partial T_{\text{fuel}}} \right| (550,0 - T_c)$$

Egyszerű átalakítások után a rekritikusági hőmérséklet és annak bizonytalansága meghatározható: (175 ± 23) °C (részletesebben lásd [10]-ben). Megjegyezzük, hogy az 1990-es években finn megfontolások alapján ennek a keretparaméternek az értéke 200 °C [8], míg a 6. AER benchmark feladat óta a 210 °C az elfogadott érték [9]. A fenti gondolatmenetben mért és számított adatok összevetéséről van szó, a bizonytalanságok háromszoros szigmának felelnek meg.

A novovoronyezsi mérés részletei

Az előző megfontolásokból látható, hogy egy feltételezett rekritikuságra vezető baleset esetén a reaktor gyors

lezárását biztosító összes biztonságvédelmi kazetta bent van a zónában. Az ismertetett mérést azért tudták biztonságosan végrehajtani, mert a novovoronyezsi atomerőmű két VVER-440-es blokkjában 73 SZBV kazetta található, azaz 36-tal több, mint a paksi VVER-440-es zónákban. Így nem jelentett problémát egy esetleges reaktivitásnövekedés 36 zónába ejtett SZBV kazetta mellett sem. Sajnos ebben a reaktorban a normál és a követő kazetták radiális elrendezése eltér a szokásos VVER-440 reaktorétól. Az SZBV rúdcsoportok számozása 1-től 11-ig tart, 6-6 szimmetrikus követő kazettát fog össze mindegyik csoport. A teljesítményszabályozó kazettákat "WG"-vel jelöljük (ez a 12. csoport). Ezek pozíciói ugyanazok, mint a paksi VVER-440 zóna esetében. A novovoronyezsi SZBV kazettákat szürkére színezett hatszögekkel jelöljük az 1. ábrán.



1. ábra: A kétféle zónában található SZBV kazetták pozíciója. A novovoronyezsi V-179-es reaktor SZBV kazettáit szürké hatszög jelöli, a V-213-as típusú VVER-440 zóna SZBV kazettáit sraffozott hatszögek. A mérés során felhasznált SZBV kazettákban kis üres négyzet található, a fennakadt SZBV kazetta fekete.

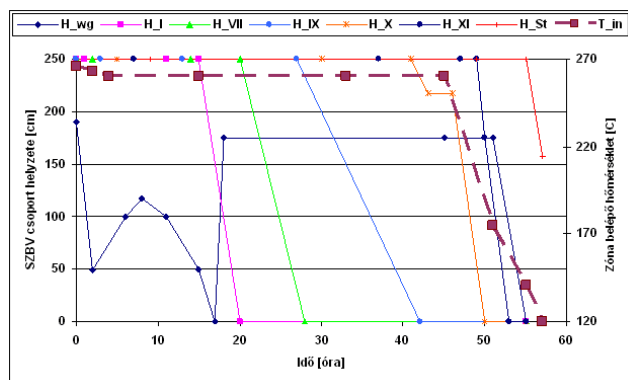
A kísérlet leírása alapján [5-6] igyekeztek a 11 csoportból azokat a kazettákat használni a mérés során, melyek a valóságban közel, illetve közel szimmetrikus pozícióban vannak a paksi típusú VVER zónákban található SZBV csoportok elrendezéséhez. A tranziens alatt mozgatót kazettákat az 1. ábrán üres kis négyzettel jelöltük meg, a fennakadt kazettát, amelyet a kísérlet végén használtak, fekete színnel emeltük ki. A könnyű összehasonlítás érdekében a standard VVER zóna biztonságvédelmi kazettáit haránt irányú csíkozással és P_n számmal jelöltük ($n=1..5$).

A mérés leírása hagy némi kívánnivalót maga után, de az események időrendje alapján volt mód olyan állapotok kiválasztására, melyek stacioner kóddal jól szimulálhatók voltak. Az összes SZBV pozíciót feltüntettük annak reményében, hogy ezzel jobban szemléltethető legyen az elrendezések közötti kapcsolat.

A modellezett tranziens a novovoronyezsi IV. blokk 15. kampányának végén, kicsivel a 296. effektív nap után kezdődött [5-6]. Ekkor a zóna egyensúlyi állapotát a következő paraméterek jellemezték:

- Zónateljesítmény 75 %: ~ 1038,0 MW,
- Munkacsoport helyzete: 190,0 cm,
- Kritikus bórsav értéke: 0,03 g/kg,
- A zónába belépő hűtőközeg hőmérséklete és a forgalom nominális.

A tranziens időbeli eseményeit a 2. ábrán követhetjük nyomon. A kísérlet első két órája alatt a munkacsoport segítségével a zónát minimálisan ellenőrizhető teljesítmény (MET) állapotba hozták, a zónaforgalom nominális maradt, de a hőmérséklete 260 °C-ra lehűlt. A xenon tranziens kezdetben a munkacsoporttal kompenzálták.



2. ábra: A tranziens időbeli lefutása, az SZBV rudak helyzete és a hűtővíz belépő hőmérséklete (az ábrán római számokkal jelölték a rúdcsoportok)

A kezdeti 75%-os egyensúlyi állapot után a jódgödör hatását a munkacsoport kompenzálta. A xenon bomlása miatt (a jódgödör után) a kísérlet 19. órájában, amikor a munkacsoport az alsó véghelyzet közelébe került, a reaktivitás kompenzálását a kijelölt SZBV rudakkal kezdték kompenzálni, a munkacsoportot pedig 175 cm közeli állapotba visszahúzták a zónába. A moderátor hőmérsékletét közben állandóan 260 °C tartották. A xenon tranziens és a munkacsoport felhúzása után először az 1. majd az 7., a 9. és a 11. csoport került a zónába, biztosítva a kritikusságot.

Közben felkészültek a zóna további hűtésére. Mielőtt a munkacsoportot a 175 cm-es szintre benyomták volna a zónába, két órán keresztül operátori beavatkozás nélkül stationárius állapotban volt a zóna biztosítva, hogy kialakuljon az új egyensúlyi xenonkoncentráció.

A mérés szerint a 36 benyomott SZBV rúd mellett a zóna MET-en maradt a hűtőközeg 141 °C hőmérséklete mellett. Ezután a reaktort tovább hűtötték, és a fennakadt rudat is elkezdték benyomni a zónába. Az utolsó mért kritikus állapotban a belépő hőmérséklet 122 °C volt, és az eredetileg fennakadt rúd 158 cm-es szinten állt. A kritikus állapotot 58 órán keresztül tudták tartani.

A kísérletet 10 kampánnyal később újra megismételték. Ebben az esetben azonban nem állt rendelkezésünkre a töltetekkel kapcsolatban semmiféle adat, ezért nem tudtuk modellezni.

A mérésrel kapcsolatban kifogásolható, hogy idejétmúlt, ma már nem használatos kazettákból álló zónára vonatkozik, és a mérés során xenon tranziens is lejátszódott. Ez ugyan jogos észrevétel, de a mérés értékét és a levonható következtetéseket nem befolyásolja, hiszen anyagi összetétel és geometriai adatok alapján a kísérletből levonható következtetések általánosságban felhasználhatók.

A mérés szimulációja

A számításokhoz a KARATE-440 programcsomag moduljait használtuk. A munka érdemi része a kampány vizsgálata és a kampányvégi állapotszámítások sorozata. A teljes zónát 360 fokban számoló GLOBUS36 programmal végeztük a szimulációt. A következőkben leírt szimuláció alapját PIE méréseket tartalmazó anyagok képezik ([7], [12], [13]). A kampányszámításhoz szükséges adatokat ezekből az anyagokból vettük. Itt megtalálhatók a kampányokra vonatkozó üzemviteli adatok (átlagban 2-10 napos bontásban), továbbá az átrakási információk a vizsgált kampányra.

A kapott adatok alapján könnyen megtervezhető volt a kampányszámítás, mivel minden tervezett kiegészi lépésben ismert:

- a zónateljesítmény,
- a kazetta belépő hőmérséklet,
- a kazetta belépő forgalom,
- a munkacsoport helyzete.

Egy másik – jól dokumentált – eltérés a megszokott VVER-440 és a novovoronyezsi reaktor között a már említett SZBV kazetták száma és elhelyezkedése. A 73 biztonságvédelmi kazetta pozicionálása jól ismert, a teljesítményszabályozáshoz használt munkacsoport elhelyezése azonos a kétféle zónában. Mivel a követő kazetták rövidebbek és modellezésük fontos, ezért ezeket az adatokat belevettük az input adatok közé. A [6] jelentés alapján egyértelműen kiderült, hogy a novovoronyezsi kazetták minden mérete egyezik a standard VVER kazettákéval.

A mérés a 15. kampány végén történt, ugyanakkor ismert, hogy a kampányvégi kiégettség a berakástól és a reaktor üzemviteli adataitól erősen függ. Először tehát a 15. kampány – amelynek végén a mérés történt – modellezéséről lesz szó, majd a mérés egyes lépéseinek szimulálásáról. Ha a reaktort valamely közbenső kampánytól kell számítani, általában a specifikációban megadott háromdimenziós kiegészi fájlból indul a szimuláció. Mivel ez az adat kódfüggő, a benchmark leírást kiegészítik néhány előzetes kampány megadásával. Ekkor nem csak a vizsgálandó kampányokra végezzük el a számítást, hanem azokra az előzetes kampányokra is, amelyekhez a kiegészi fájl tartozik. Sajnos ebben az esetben nem csak az induló kiegészi fájl hiányzik, de nem ismertek a vizsgált zónákban található bizonyos kazetták pontos jellemzői sem. A régi kazetták esetében egyáltalán nincs adatunk (E, F típus), az újonnan bekerülő kazetták esetében pedig csak az urándúsítás mértéke ismert (H, S típus), egyéb paraméterei nem. Szerencsére a vizsgálandó töltetekben a legtöbb kazetta G típusú, és ennek összes paramétere megtalálható a leírásban.

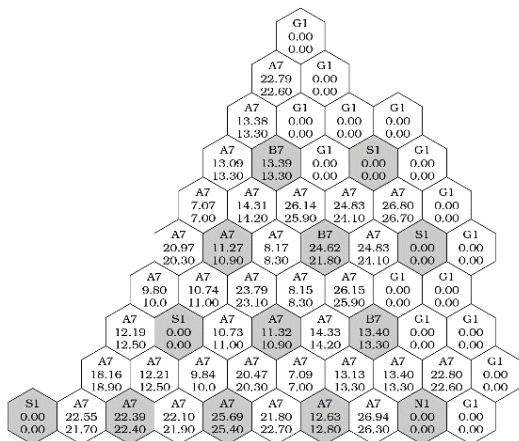
A feladat bizonytalanságát némileg enyhíti, hogy a specifikációban megadták a kezdő zónában megtalálható, az előző kampányban már használt kazetták átlagolt kiégettségét és teljesítményét. Így a kívánt számítások előtt egy fiktív kampányt modelleztünk, ahol a kezdeti kazetta kiegészés axiális eloszlását régebbi számításokból vettük át, és változtattuk a kazetták típusát és kezdeti kiegészését. Néhány iterációs lépés után aránylag jó kezdeti kiegészés eloszlást tudtunk kialakítani. Az előzetes kampány kazettáit megkülönböztetésként kezdetben "6 évesnek" definiáltuk. Az „A” típusú kazetta 3,6 %, míg a „B” típusú kazetta 2,4 % dúsítású volt.

A kampányszámítás eredménye

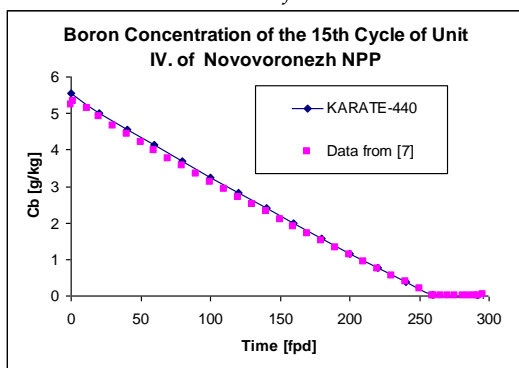
A feladattal kapcsolatban először az ismeretlen, ún. előzetes kampányt definiáltuk és számoltuk végig. Ennek eredménye valójában a négy vizsgálandó kampány közül hármat is befolyásolt, hiszen a régi kazetták egy része 4 évet is volt a zónában. Ennek a kampánynak értelemszerűen csak a vége jelenik meg a 15. átrakáskor.

A 15. kampányra megadjuk a kampány elején (BOC) a kazettára átlagolt kiegészítést és végén (EOC) a teljesítményeloszlást, továbbá az effektív napok függvényében a bórsav és a térfogati egyenlőtlenség maximális értékének változását. Ezek az adatok az irodalomból is ismertek. Az eloszlásokat tartalmazó ábrákon a kazetta specifikációja 2 karakter, ahol az első a kazetta típusának betűjele, a második a kazetta éveinek száma a zónában.

A kiegészi eloszlásban (a 3. ábrán) a maximális eltérés a specifikációban adott és a BIPR kóddal számolt értékek között általában százalék nagyságrendbe esik. A maximális eltérés 8%-nál kisebb. Az általunk számolt radiális teljesítmény-egyenlőtlenségek és a megadott értékek közötti eltérések az EOC esetben (6. ábra) 6,5 %-nál kisebbek, átlagosan 1%-kal egyenlők, ami a kiegésznövekedés kompenzáló hatásával magyarázható.

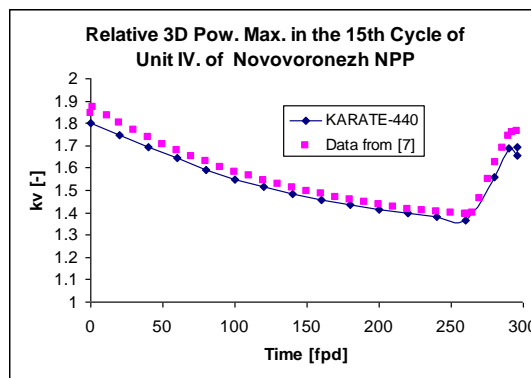


3. ábra: A kazettakiégés radiális eloszlása a novovoronyezsi IV. blokk 15. kampányának elején. Minden hatszögben a kazetta specifikációja alatt a számított, majd a specifikációból vett érték van feltüntetve

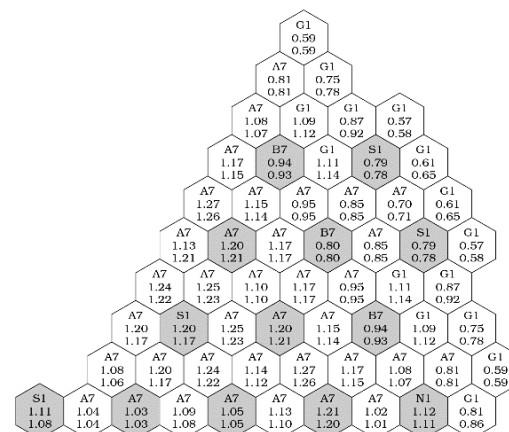


4. ábra: A számított és a specifikációban adott kritikus bórsav-koncentrációk a novovoronyezsi IV. blokk 15. kampányában

Az input adatok bizonytalansága alapján a bórsavgörbe (4. ábra) egyezése nagyon jónak mondható, kisebb az elfogadható 0,2 g/kg értéknél. A maximális teljesítmény-egyenlőtlenségek (5. ábra) jó egyezése is mutatja, hogy a hiányzó input adatokra feltételezett értékeket jól választottuk meg.



5. ábra: A számított és a specifikációban adott maximális 3D teljesítmény-egyenlőtlenség a novovoronyezsi IV. blokk 15. kampányában



6. ábra: A novovoronyezsi IV. blokk 15. kampányának végén a teljesítmény radiális eloszlása. Minden hatszögben a kazetta specifikációja alatt a számított, majd a specifikációból vett érték van feltüntetve.

A mérés szimulációjának eredménye

A kampány végén a kísérlettel kapcsolatos adatok arra utalnak, hogy a nominálisnál kisebb teljesítményen úgynevezett kampánynyújtás zajlott le, ezért a kezdeti állapotban a teljesítmény 75% volt. A méréssel kapcsolatban nem ismert a rúdmozgások sebessége és a grafikonon megadott rúdhelyzetek pontossága. Megjegyzendő, hogy a 2. ábra adatait az eredeti orosz anyag ábrái alapján, grafikus módszerrel határoztuk meg. A folyamat követésére olyan állapotokat választottunk, ahol a leírásnak megfelelően az SZBV csoportok lehetőleg teljesen bedugott, vagy kihúzott állapotban voltak, ezzel csökkentve a reaktivitás bizonytalanságát.

A kampányvégi állapot és a tranziens kezdetét jellemző adatok a leírásban nem különülnek el pontosan egymástól. [5] szerint a kampányvégi állapotban a kritikus bórsav értéke kisebb volt, mint: $C_B \approx 0,06 \text{ g/kg}$.

A KARATE számítás szerint 1375 MW termikus teljesítmény mellett, kihúzott munkacsoport esetében a kritikus bórsav értéke: $C_B = 0,125 \text{ g/kg}$.

A tranziens kezdetén a teljesítmény a nominális 75 %-a (másutt 962,5 MWth), a munkacsoport 190 cm-n áll. A tranziens alatt kicsit magasabb teljesítményértékkel számoltunk: $C_B = 0,225 \text{ g/kg}$.

A xenon tranziensnél, majd a hűlés alatt az 1. táblázatban megadott paraméterek mellett végeztük az állapotszámítást,

melyet a 2. táblázatban foglaltunk össze. Az eredményekkel kapcsolatban megállapítható, hogy meglepően jó az egyezés a kiválasztott mérési pontokban. Megjegyezzük, hogy számításunk szerint a kísérletnek a nem használt 36 SZBV rúd biztonságos hátteret adott, mert a kísérlet végén ezek beejtésével $-10,7\%$ reaktivitást kaptunk.

A szimuláció végén $0,21\%$ -os eltérést kaptunk a kritikusságtól. Ahhoz, hogy ezt hőmérséklet-különbségben tudjuk kifejezni, meghatároztuk ebben az állapotban a zónára adódóan az izotermikus reaktivitás együtthatót, ami: $\partial\rho/\partial T_{in} \approx -28 \text{ pcm}/^\circ\text{C}$,

1. táblázat A mérésből felhasznált állapotok paraméterei

| Idő [óra] | 12. csoport [cm] | 1. csoport [cm] | 7. csoport [cm] | 9. csoport [cm] | 10. csoport [cm] | 11. csoport [cm] | fennakadt rúd [cm] | belépő hőmérséklet [$^\circ\text{C}$] |
|-----------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|--------------------|---|
| 0 | 190 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 266 |
| 2 | 49 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 263 |
| 6 | 100 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 261 |
| 8 | 117 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 260 |
| 11 | 100 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 260 |
| 15 | 50 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 260 |
| 20 | 175 | 0 | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 260 |
| 28 | 175 | 0 | 0 | 250 | 250 | 250 | 250 | 260 |
| 41 | 175 | 0 | 0 | 0 | 250 | 250 | 250 | 260 |
| 45 | 175 | 0 | 0 | 0 | 215 | 250 | 250 | 260 |
| 51 | 175 | 0 | 0 | 0 | 0 | 250 | 250 | 175 |
| 55 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 250 | 141 |
| 58 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 158 | 120 |

2. táblázat A KARATE-vel számolt állapotok kritikussága

| Idő [óra] | k_{eff} [-] | $\Delta k_{eff} = 1 - k_{eff}$ [%] |
|-----------|---------------|------------------------------------|
| 0 | 1,00003 | -0,003 |
| 2 | 1,00278 | -0,278 |
| 6 | 0,99829 | +0,171 |
| 8 | 0,99741 | +0,259 |
| 11 | 0,99714 | +0,286 |
| 15 | 0,99718 | +0,282 |
| 20 | 0,99752 | +0,248 |
| 28 | 0,99638 | +0,362 |
| 41 | 0,99783 | +0,217 |
| 45 | 0,99621 | +0,379 |
| 51 | 1,002091 | -0,209 |
| 55 | 1,001884 | -0,188 |
| 58 | 0,997933 | +0,207 |

A rúdhelyzet mérésének pontosságára vonatkozóan nincs adat. Ismereteink szerint ez néhány centiméter lehet. A fennakadt rúdra a mért állapot környékén, ebben a reaktorfizikai környezetben a KARATE számolás alapján:

$$\partial\rho/\partial H \approx -5 \text{ pcm/cm},$$

azaz a rúdhelyzet bizonytalanságából adódó reaktivitásváltozás 10 pcm körüli érték. A mérésből kapott bizonytalanság tehát kevesebb, mint $10 \text{ }^\circ\text{C}$, azaz az eddig használt hibabecslésünk erősen konzervatív. Természetesen egy mérésből nem szabad általános következtetést levonni.

Összefoglaló

A rekritikus hőmérsékletre vonatkozóan a szakirodalomban két VVER-440 atomerőművel kapcsolatos mérést találtunk. Ezek a kísérletek két részből álltak: a kampányvégi xenon tranzienzből, majd a nominális érték alá történő hűtésből. A folyamat során a reaktor végig kritikus állapotban volt. Néhány, az adott reaktortípusra nem jellemző extra SZBV rúd teszi az eljárást biztonságossá. Az első méréshez megfelelő bemeneti (kampány) adatokat nyertünk egy másik publikációból.

A kísérletet a KARATE-440 kódcsomaggal szimuláltuk, figyelembe véve a térbeli kiégéeloszlást és a mérések további paramétereit. Időlépésenként kiszámítva a sajátértékeket, hibahatáron belüli jó egyezést kaptunk, ahogy ezt a korábbi tapasztalataink alapján vártuk is. A mérés és a számítás jó egyezése a régebben megoldott feladatokkal együtt jól mutatja a KARATE-440 program rugalmas alkalmazhatóságát a nem szokványos reaktorállapotokra. Bár egy eset nem ad elegendő alapot a rekritikus hőmérséklet eddig használt bizonytalanságának csökkentésére, annak erősen konzervatív volta rá lehet mutatni.

Irodalomjegyzék

- [1] A. Keresztúri, Gy. Hegyi, L. Korpás, Cs. Maráczky "Further Validation of the KARATE-440 Code System", *Proceedings of the 15th Symposium of AER, Znojmo, Czech Republic, 3-7 October 2005*, pp. 147-158.
- [2] A zónaszámítások programcsomagja (verziószám 5.0) aeki-ral-2007-706/03-M1, Atomenergia Kutató Intézet, Budapest, 2007.

- [3] Keretparaméterek számítása a módosított rácsosztású fűtőelemekkel kapcsolatos biztonsági elemzésekhez, Jelentés, Készítette: Hegyi Gy., Temesvári E., KFKI AEKI RAL, Budapest, 2002. november
- [4] A három gadolínium pálcát tartalmazó, új típusú, profilírozott kazettákból álló zónák keretparamétereinek meghatározása, Jelentés, Készítette: Hegyi Gy., Temesvári E., KFKI AEKI RAL-2007-732/18-M2, Budapest, 2007. december
- [5] V. F. Gorokhov, A. S. Doukhovensky, K. B. Kosourov, "Measuring of the recriticality Coolant temperature at the VVER-440 and VVER-1000 Type Reactors", ICNC'95, Albuquerque, New Mexico, USA, 19-21 September 1995.
- [6] V. S. Ionov, V. F. Gorokhov, Yu. A. Krainov, I. V. Saprykin, V. V. Saprykin, Yu. N. Poliakov, I. A. Boev, D. I. Lisicin, "Preparing and measuring of the recriticality temperature at the VVER-440 Reactor of fourth Unit of NV NPP at the end of the 25th Fuel Cycle", Proc. of the 10th Symp. of AER, Moscow, Russia, 18-22 October, 2000, pp.691-702, KFKI Atom Energia Kutató Intézet (2000)
- [7] L. J. Jardine: Radiochemical Assays of Irradiated VVER-440 Fuel for Use in Spent Fuel Burnup Credit Activities, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-TR-212202, April 2005, <http://www.llnl.gov/tid/lof/documents/pdf/319467.pdf>
- [8] E. Kaloinen: "Test problem on Calculation of Reactivity Coefficients in the Loviisa VVER-440 Reactors", Proc. of the XVI Symposium of VMK, Moscow, 20-26 September 1987.
- [9] S. Kliem, A. Seidel, U. Grundmann, "Definition of the 6-th dynamic AER Benchmark - MSLB in NPP with VVER-440", Proc. of the 10th Symp. of AER, Moscow, Russia, 18-22 October, 2000
- [10] Gy. Hegyi „Inter-comparison of the recriticality temperature calculated by the KARATE-440 code system with real plant data”, Annals of Nuclear Energy Vol. 38. Issues 2-3, pp. 203-211., (2010)
- [11] Nemes I., Korpás L., Keresztúri A., Siltanen P. 1995. Determination of reload design margins on the basis of safety analysis of NPP Paks. In: Proceedings of the 5th Symposium of AER, Dobogókő, Hungary, 15-19 October, 1995, pp. 441-450.
- [12] Gy. Hegyi, G. Hordósy, A. Keresztúri, Cs. Maráczy, E. Temesvári: Solution of the VVER Fuel Composition Benchmarks with the KARATE-440 Code System, Proceedings of The 2009 Nuclear Criticality Safety Division Topical Meeting on Realism, Robustness and the Nuclear Renaissance (NCSD 2009), Richland, Washington, September 13-17, 2009
- [13] F. HAVLUJ, "Updated Results of Simplified Benchmark Based on #2670 ISTC VVER PIE", Proc. of the 18th Symp. of AER, Eger, Hungary, 6-10 October, 2008, pp.539-556, KFKI Atomenergia Kutatóintézet (2008)