A bór kiégése nyomottvizes reaktorokban

Hegyi György[1], Temesvári Emese[2]

[1]AEMI
1121. Budapest, Konkoly-Thege M. út 29-33.

[2]HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, AEKI
1121. Budapest, Konkoly-Thege M. út 29-33.

Az előző években a kampány hossza megnőtt, elsősorban gazdasági tényezők hatására. A ciklus során azonban szokatlan eltérés figyelhető meg a mért és a számított bórsav-koncentráció között. A kampány elején (BOC) és végén (EOC) jó az egyezés, de a különbség először növekszik, majd idővel csökken. Bár ez az eltérés nem veszélyezteti a biztonsági kritériumokat, a mögöttes okok további vizsgálatot igényelnek.
Számos tanulmány vizsgálta a mért és számított bórsav-koncentrációk közötti eltérést, és a problémát a ^{10}B-izotóp kiégésének mérése és modellezése során tapasztalt bizonytalanságra vezette vissza. Egyes reaktorfizikai kódok nem követik kifejezetten a ^{10}B kiégését a ciklus során, és a KARATE-440 kód validációs tanulmányai nem tartalmazták a bór izotóp-összetétel mérését. A VVER-440 reaktorok ^{10}B viselkedésének részletes elemzése szükségtelen volt, mivel ezek a reaktorok viszonylag kis teljesítménnyel működtek, és 2010 előtt rövidebb ciklushosszuk volt.

Bevezetés

Esetünkben a bórkiégési modellek szigorú validálása nem kivitelezhető, mert nincs elegendő kísérleti adat és korlátozottak a mérési lehetőségek is. Ez a cikk először áttekinti a bór legfontosabb tulajdonságait a reaktor működésében, és tárgyalja a modellezési problémákat. Összegyűjtöttük a mérésekre vonatkozó tanulmányokat, és végül közelítő ad-hoc számításokat mutatunk be VVER típusú reaktorokra.

Általában elmondható, hogy az utóbbi időben az atomerőművek kampányhossza növekedett. Ennek egyik oka a gazdaságosság, de fontos tényező a mérnöki tapasztalat és a rektorfizikai ismeretek bővülése is, ami lehetővé tette, hogy a reaktorba nagyobb reaktivitástartalékot építsenek be. Ugyanakkor megfigyelhető, hogy a mért bórsav-koncentráció és a számolt érték a kampány alatt eltérést mutat. A kampány elején (BOC) az egyezés megfelelő, a kampány végére elfogy a bór, az egyezés is újra elfogadható. A különbség a két végpont között először növekszik, majd csökken. A számítások alábecsülik a mért értéket, de az eltérés mértéke nem befolyásolja a biztonsági kritériumot.

A reaktorra vonatkozóan a mért és számított bórsav tekintetében számos tanulmány született, ami a ^{10}B-kiégés mérésében és modellezésében találta meg az okot [1-3]. Valóban, a tervezőszoftverek egy része nem követi a bórsav kiégését a kampány alatt [4], és a KARATE-440 kód validálása során sem voltak olyan mérések, ahol a bór izotóp-összetételét vizsgálták volna. Az irodalomból ismert modellek esetén azok validáltsága sem egyértelmű. A VVER-440 reaktorokat használó országok vonatkozásában általában elmondható, hogy nincs részletes elemzés a ^{10}B-izotópra, amit 2010 előtt indokolt a relatív kis teljesítmény és a rövid kampányhossz.

Hangsúlyozni szeretnénk, hogy a szigorú értelemben vett validálásra [5] jelenleg nincs mód, ahhoz a ^{10}B mérési lehetőségek mélyebb ismerete és a bórkiégés paraméterezésének módszere sem áll rendelkezésre.

A cikkben először röviden áttekintjük a bór reaktor szempontjából fontos tulajdonságait, majd a modellezés nehézsége mellett néhány nemzetközi mérési tapasztalatot ismertetünk. Végül néhány ad-hoc, hozzávetőleges számítást mutatunk a VVER típusú reaktorokra.

A bór és vegyületei

A bór a periódusos rendszer 5. eleme, a földfémek csoportjába tartozik. Több allotróp módosulatban fordul elő, amelyek fizikai tulajdonságaikban jelentősen eltérnek egymástól. Reakcióképessége alacsony, de vízben jól oldódik, és aránylag magas hőmérsékleten olvad. A bórnak két stabil izotópja van, a ^{10}B és ^{11}B, ezek szerkezete a neutronszámban különbözik. Irodalmi adatok szerint [6] a természetes bór összetétele a ^{10}B és ^{11}B izotóparányra 19,9% és 80,1%, atomtömege 10,81 g. A két izotóp abszorpciós hatáskeresztmetszetét az 1. ábra szemlélteti, ahol megfigyelhető a jelentős (6 nagyságrend) eltérés a ^{10}B-izotóp javára.

A bórnak kémiai és magfizikai tulajdonságai alapján kulcsfontosságú szerepe van a nyomottvizes reaktorok működésében. Termikus neutron hatására a következő folyamatok zajlanak le:

$$^{10}\mathrm{B} + \mathrm{n_{th}} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He}^{2} + {}^{7}\mathrm{Li}^{3} + 2{,}31\mathrm{MeV} + \gamma(0{,}48)\ (94\%),$$

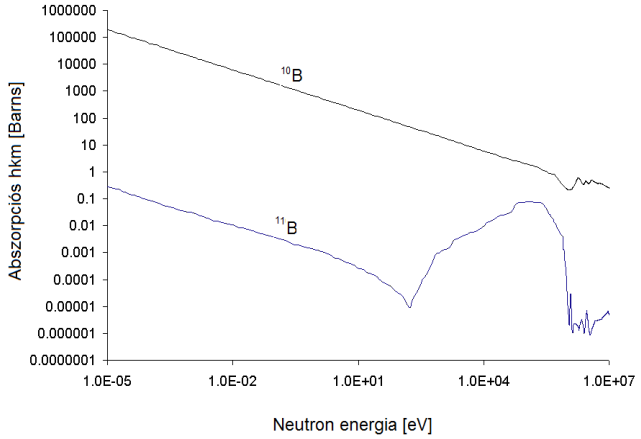
$$^{10}\mathrm{B} + \mathrm{n_{th}} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He}^{2} + {}^{7}\mathrm{Li}^{3} + 2{,}79\mathrm{MeV}\ (6\%).$$

A bór (^{10}B) neutronelnyelő képességét használjuk oldott formában (bórsav) a láncreakció moderálására, és szilárd formában a reaktor gyors leállítására (bóracél vagy bórkarbid) vészhelyzet esetén. Sugárvédelmi szempontból is jelentős a szerepe a reaktor külső köpenyében, ahol jelenléte a sugárzási szintet csökkenti. Ebben a cikkben csak a nyomottvizes reaktorok primer körében található bórsav szegényedésével foglalkozunk, ami a ^{10}B-kiégés következménye. A VVER-440 bóracél tartalmú abszorbens kazettáinak fizikai tulajdonságát régebben tárgyaltuk [7-8].

Kontakt: hegyi.gyorgy@ek.hun-ren.hu
© Magyar Nukleáris Társaság, 2025
Beérkezett: 2025. január 22.
Közlésre elfogadva: 2025. március 15.

Összegezve, a legfontosabb tények a következők:

- a kitermelés helyétől függően az izotóp-összetétel változik, a ^{10}B aránya 20,5-18,8 % között lehet a bórsavban [9],
- az izotóp-összetétel és annak megváltozása kémiai módszerekkel (titrálás) nem meghatározható,
- a nodális kódok számára készült kevéscsoport állandó könyvtárak előállítása során irodalmi adatokból indulnak ki, és mivel a kampány során előre nem tervezhető kémiai folyamatok játszódhatnak le, az izotóparány változását a könyvtárak nem tartalmazzák.



1. ábra. A ^{10}B és ^{11}B-magok abszorpciós hatáskeresztmetszete

A bórkiégés modellezése

A reaktor kampánymenetét leegyszerűsítve úgy írhatjuk le, mint egy adott V_p térfogatú tartályt, ahol kezdetben C_0 koncentrációjú friss bórsav található [10]. Az oldatot – egyszerűség kedvéért- G(t) függvény szerint tiszta vízzel hígítjuk, de közben az össztömeg állandó marad, ezért biztosítanunk kell a megfelelő mennyiségű folyadék kivonását is. A mérlegegyenlet a következő egyszerű elsőrendű differenciál egyenlettel írható le, feltételezve a gyors, homogén elkeveredést:

$$\frac{d}{dt}V_pC(t) = -C(t)G(t), \qquad (1)$$

Ha a bórsav 10-es izotópjának koncentrációja C(t)=e(t)*B^{nat}(t), és az összefüggést a primer körre írjuk fel, az egyenlet a ^{10}B-kiégés miatt kiegészül egy kiégést tartalmazó taggal. Jelölje egyszerűség kedvéért B a természetes bórsavat /B=B^{nat} /:

$$\frac{d}{dt}\{V_pe(t)B(t)\} = -e(t)B(t)G(t) - V_ce(t)B(t) < \sigma_a^{10B}\emptyset >, \qquad (2)$$

A deriválást elvégezve:

$$V_p\left[\frac{d}{dt}e(t)\right]B(t)+V_pe(t)\frac{d}{dt}[B(t)] = -e(t)B(t)G(t) - V_ce(t)B(t) < \sigma_a^{10B}\emptyset >,$$

Beírva (1)-t ide :

$$V_p\left[\frac{d}{dt}e(t)\right]B(t) - e(t)B(t)G(t) = -e(t)B(t)G(t) - V_ce(t)B(t) < \sigma_a^{10B}\emptyset >,$$

Átrendezve az egyenletet, (1)-hez hasonló egyenlethez jutunk:

$$V_p\left[\frac{d}{dt}e(t)\right] = -V_ce(t) < \sigma_a^{10B}\emptyset >,$$

Így az (1) és (2) egyenlet segítségével megadható a ^{10}B-izotóp szegényedése erre az esetre:

$$e(t) = e(0)\exp\left[-\frac{V_c}{V_p}\int_0^t P_r(t)dt\right], \qquad (3)$$

ahol:

- e(0) a ^{10}B kezdeti izotóparánya (kezdetben: 19,9%)
- V_p a primer kör térfogata
- V_c a zóna térfogata
- P_r a zónában található ^{10}B fogyása:

$$\boldsymbol{P_r(t)=\int_0^V\{\sigma_a^1\emptyset^1 + \sigma_a^2\emptyset^2\}d^3}\mathrm{r} = \boldsymbol{P_r}$$

Megjegyzendő hogy a P paraméter, ebben a gondolatmenetben elégé egyszerű becslés eredménye lesz (állandónak vesszük), de ismert, hogy sok paramétertől függhet, úgymint:

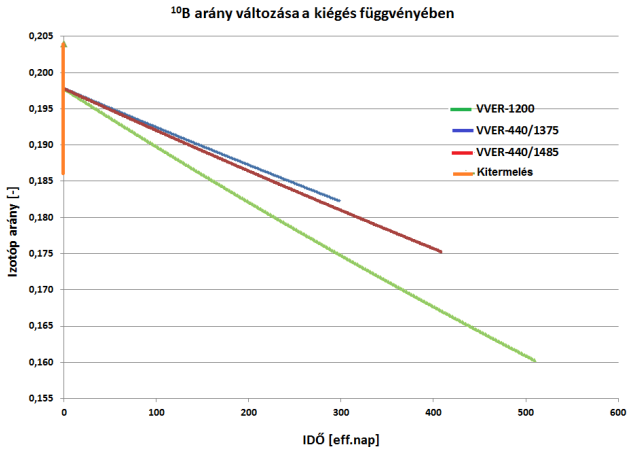
- **Neutronfluxus:** minél nagyobb a neutronfluxus, annál nagyobb a bomlás valószínűsége,
- **Üzemanyag-összetétel:** az üzemanyagban található egyéb neutronelnyelő anyagok (pl.: Gd) esetén kevesebb neutron éri el a ^{10}B-atommagokat,
- **Reaktor típusa és mérete:** A különböző típusú reaktorokban (PWR, VVER) eltérő a reaktor mérete, a neutronfluxus eloszlása és a hűtővíz keringése,
- **Termohidraulika:** A hűtővíz paraméterei befolyásolják a zóna viselkedését.

Az ismertetett modell lehetőséget ad az izotóparány becslésére a VVER-440-ben. A szükséges paramétereket a KARATE modell alapján határoztuk meg a régebbi (1375MW$_{th}$) és az újabb (1485 MW$_{th}$) zónákra, figyelembe véve, hogy régebben a kampányok rövidebbek voltak. A kiinduló adatokat az 1. táblázat, az időfüggést a 2. ábra mutatja. Összehasonlításnak megadjuk a VVER-1200 zónára vonatkozó adatokat is.

© Magyar Nukleáris Társaság, 2025

1. táblázat: VVER reaktorok reaktorfizikai paramétereinek átlagértékei

	VVER-440	VVER-440	VVER-1200
Reaktor term. teljesítménye [MW]	1375	1485	3200
Epitermikus fluxus [$cm^{-2}*sec^{-1}$]	$2{,}963*10^{+14}$	$3{,}2*10^{+14}$	$4{,}3*10^{+14}$
Termikus fluxus [$cm^{-2}*sec^{-1}$]	$2{,}77*10^{+13}$	$3{,}0*10^{+13}$	$4{,}0*10^{+13}$
^{10}B epitermikus absz. hkm [barn]	44		
^{10}B termikus absz. hkm [barn]	2100		
A primer kör térfogata [m^3]	~220		290
A zóna térfogata [m^3]	~10		13
Bórsav a kampány elején [g/kg]	7,0	7,5	8,5
Kampányhossz [effektív nap] (s)	300 ($25{,}9*10^{+6}$)	400 ($34{,}6*10^{+6}$)	510 ($44{,}1*10^{+6}$)

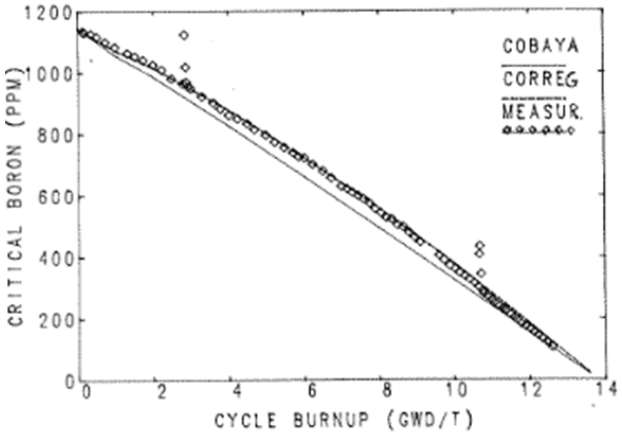


2. ábra. A ^{10}B szegényedése a VVER-440 reaktor régebbi és korszerűbb kampánya alatt. A kezdetiösszetétel-bizonytalanságot sárga színnel a függőleges tengelyen jelezzük

A 2. ábrából látszik, hogy a kisebb teljesítményű, rövidebb kampányok esetén a ^{10}B szegényedése kevésbé észrevehető, mint az új, korszerűbb kampányoknál, feltételezve, hogy minden kampány friss, természetes összetételű bórsavval indul. Úgy is fogalmazhatunk, hogy a kisebb teljesítményű és rövidebb kampányok esetében a kezdeti bórsavösszetétel bizonytalansága és a bór kiégése összemérhető hiba határon belül, és ezt jól lefedi a bórsav pontosságára adott pontossági kritérium.

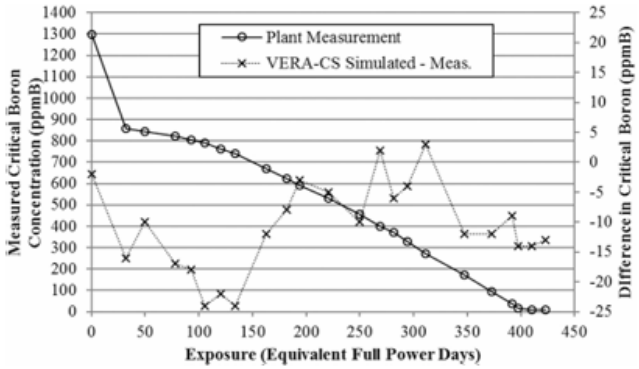
A bór kiégése a szakirodalomban

A legkorábbi összehasonlítást egy spanyol 1000 MW_{th} teljesítményű erőműre találtuk [10], ahol az Almaraz-II PWR egy 12 hónapos kampányát vizsgálták, a KOBAYA spanyol [11] program felhasználásával. A kampány 6,5-7 g/kg kezdeti bórsavértékről indult, de részletes adat nincs róla, csupán a cikkből idemásolt bórsavgörbe (3. ábra). A mérésre utaló körök és a ^{10}B kiégésével hangolt kevéscsoport állandókat használó kampányszámítás jól illeszkednek egymásra. A kétféle számítás a kampány közepén mintegy 0,36 g/kg eltérést mutat.

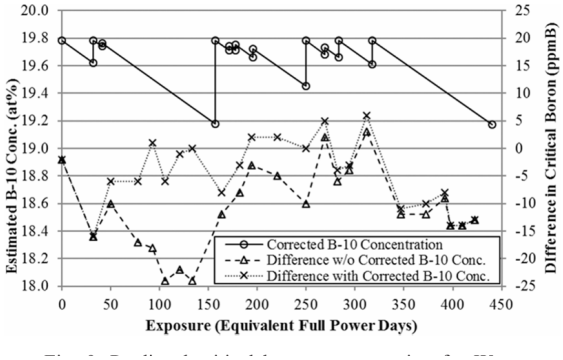


3. ábra. A mért, számított és hangolt könyvtár hatását mutató kritikus bórsav a kiégés függvényében a spanyol Almaraz-II PWR reaktor kampányára

Az USA (Oak Ridge National Laboratory) egyik széles körben használt reaktorfizikai programrendszere a VERA (The **V**irtual **E**nvironment for **R**eactor **A**nalysis) is használja a ^{10}B kiégésével kapcsolatos modellt. A 2017-ben a Nuclear Science and Engineering-ben [12] megjelent cikkükben a 3100 MW_{th} Watts Bar erőművel kapcsolatban közöltek mérés – és számítás-összehasonlítást, ezekből két ábrát átvettünk (4. és 5. ábra). A cikkben feltételezik, hogy a 4. ábrán bemutatott kritikus bórsavval kapcsolatos kampánymenet és a mérés - számítás közti különbséget a ^{10}B-izotóp kiégése okozza. A szerzők elismerik az izotópmérés hiányát, de „mérnöki tapasztalat”-ra hivatkozva megismétlik a számítást a bórsav izotóp-összetétel gyengítésével, aminek következtében a mérés és számítás közti hiba csökkenthető volt (5. ábra)

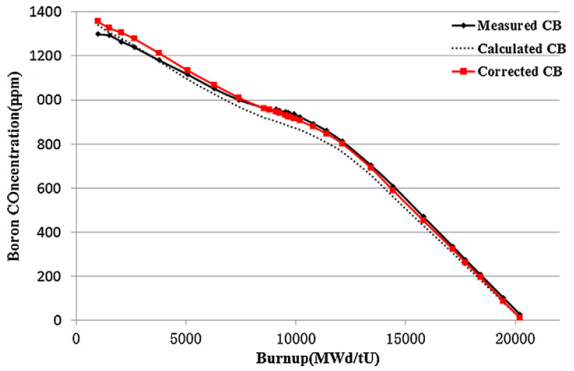


4. ábra. A Watts Bar egy kampányára mért kritikus bórsav és a VERA által számított értékek méréstől való eltérése az idő függvényében

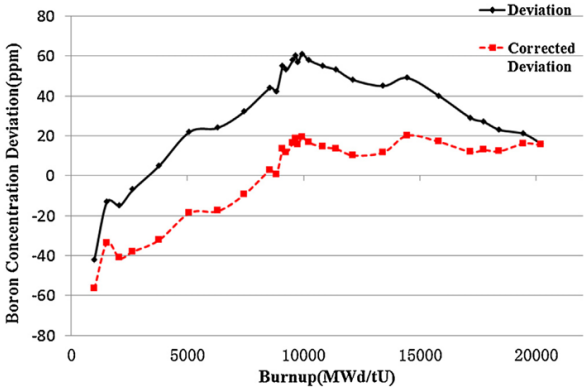


5. ábra. A Watts Bar egy kampányára a mért és VERA által számított bórsavkülönbség a ^{10}B kiégésének figyelembe vételével

A Daya Bay-i erőműre (2. blokk és 35. kampány) már izotópmérésekkel alátámasztott bórsavgörbe szimulációt találtunk (lásd [4]). Ez a PWR francia - kínai együttműködésben készült, 1000 MW_e teljesítményt szolgáltat, a tervezett kampányhossz 18 hónap. Ebben az esetben is csak a kritikus bórsavra vonatkozó adatokat másoltuk ki a cikkből (lásd 6. és 7. ábra). Jól megfigyelhető a vizsgált kampánymenet alatt a mért és számított érték közti kezdetben növekvő, majd csökkenő különbség, amit a ^{10}B kiégésének figyelembe vételével hathatósan le tudtak csökkenteni. A cikk külön érdeme, hogy felhívja a figyelmet az izotóparány mérésének fontosságára. Érdemes megfigyelni a 7. ábrán, hogy a kampány elején is történt valamilyen hangolás, hiszen a BOC állapot közelében történik 20 ppm változás.

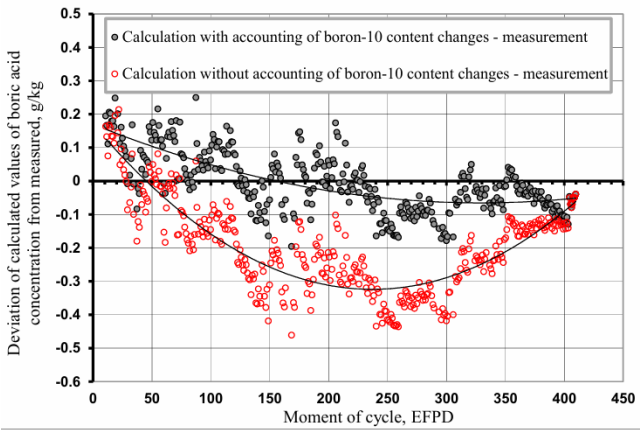


6. ábra. A Daya Bay-i erőmű egy kampányára a mért (folytonos fekete vonal) és számított (szaggatott vonal) kritikus bórsav mellett a mérések alapján a ^{10}B kiégését figyelembe vevő számított értékek találhatók a kiégés függvényében (a kampány 18 effektív hónap hosszú)



7. ábra. A 6. ábrán bemutatott mért és számított görbék különbsége.

A Kurcsatov Intézet is használ izotóparánnyal kapcsolatos hangolást. Erről Helsinkiben, a 26. AER konferencián tartottak előadást [13]. A 8. ábrát ebből a cikkből vettük. A különbség jelentős csökkenése nehezen értékelhető, mivel a cikkben az izotópváltozásról és egyéb mérési feltételekről nincs részletes információ. A kampányt eredetileg 18 hónaposnak adják meg (540 effektív nap), nem világos, miért csak 450 napra történt számolás.



8. ábra. Egy VVER-1000-s erőmű esetében a mért és számított kritikus bórsav különbsége (piros körök) és ugyanez a számolás a ^{10}B kiégésének figyelembe vételével (fekete körök)

© Magyar Nukleáris Társaság, 2025

A bórkiégés becslése VVER-440 esetére

A fenti példák jelzik, hogy a ^{10}B kiégésének hatása nagyobb reaktorteljesítmény mellett és hosszabb kampányok esetén megjelenik. Egyes esetekben ezt a kampánytervezést végzők tudomásul veszik (AREVA által fejlesztett SMART, Westinghouse által használt ANC program), de számos tanulmány becslést is ad a bórszegényedés hatására [1-3, 14-15].

Az 1. táblázatban ismertetett adatok felhasználásával és a 2. ábrán látott kiégésnek megfelelően a [12]-es tanulmányt követve egy egyszerű becslést adunk a VVER típusú reaktorok kampányeneteire. A gondolatmenet az (1)-(3) egyenletek átalakításán alapul.

Egy kampány során a primer körbe tiszta víz hozzáadásával, esetenként tömény oldat bekeverésével változik a bórsav koncentrációja. Ehhez adódik még a ^{10}B kiégése. A folyamatokat a következő elsőrendű differenciálegyenletekkel adhatjuk meg:

$$\frac{d^{10}B}{dt} = -\frac{V_c}{V_P}\mathrm{P}^{10}B + \frac{\nu_B A\alpha}{V_P\rho_P} - \frac{\nu_B}{V_P\rho_P}{}^{10}B - \frac{\nu_D}{V_P\rho_P}{}^{10}B \tag{4}$$

$$\frac{d^{11}B}{dt} = \frac{\nu_B A(1-\alpha)}{V_P\rho_P} - \frac{\nu_B}{V_P\rho_P}{}^{11}B - \frac{\nu_D}{V_P\rho_P}{}^{11}B \tag{5}$$

és

$$B(t) = {}^{10}B(t) + {}^{11}B(t) \tag{6}$$

ahol:

- ^{10}B Bór-10 izotópkoncentrációja,
- ^{11}B Bór-11 izotópkoncentrációja,
- A Koncentráció a bórozáshoz használt tartályban (40 vagy 13,5 g/kg),
- α Bór-10 izotóparánya a természetes bórban,
- P a teljesítménynek megfelelő fluxussal képzett reakciógyakoriság a bórkiégés meghatározásához, egyszerűsítésként állandó
- ν_B a bórozási sebesség,
- ν_D a hígítási sebesség,
- V_P a primer kör térfogata,
- V_C az a térfogat, ahol a bór-10 kiég
- ρ_P a primer kör sűrűsége

A feladat megoldását az (5) egyenlet kibővítésével:

$$\frac{d\,{}^{11}\tilde{B}}{dt} = -\frac{V_c}{V_P}P_r\,{}^{11}\tilde{B} + \frac{\nu_B A(1-\alpha)}{V_P\rho_P} - \frac{\nu_B}{V_P\rho_P}{}^{11}\tilde{B} - \frac{\nu_D}{V_P\rho_P}{}^{11}\tilde{B} \tag{7}$$

és az effektív bórsav bevezetésével egyszerűsíthetjük:

$$B_{eff}(t) = {}^{10}B(t) + {}^{11}\tilde{B}(t) \tag{8}$$

Az effektív bórsav esetében ugyanis formálisan a ^{11}B-izotóp is kiég, de valójában épp ezzel a kezdeti izotóparány nem változik, azaz használhatjuk a kezdeti természetes bórsav megfelelőjeként. Vezessük be a következő segédmennyiséget:

$$R(t) = \frac{B(t) - B_{eff}(t)}{B_{eff}(t)} = \frac{{}^{11}B(t) - {}^{11}\tilde{B}(t)}{{}^{10}B(t) + {}^{11}\tilde{B}(t)}$$

A közelítő számításokban feltesszük, hogy a kampány „eseménytelen", azaz nincs tervezetten kívül bórozás, a teljesítmény és így P paraméter állandó, és a hígítást is állandónak vehetjük, ami tulajdonképp a természetes veszteség tiszta vízzel történő pótlását jelenti. Ekkor R arány egyszerűen megadható [9]:

$$R(t) \approx \frac{{}^{11}B(0)}{{}^{10}B(0) + {}^{11}B(0)}\frac{P_r}{b^* - P_r}\frac{e^{-(b^*-P_r)t} - 1}{e^{P_r t} - 1} = {}^{11}B(0)\frac{P_r}{b^* - P_r}\frac{e^{-(b^*-P_r)t} - 1}{e^{P_r t} - 1}$$

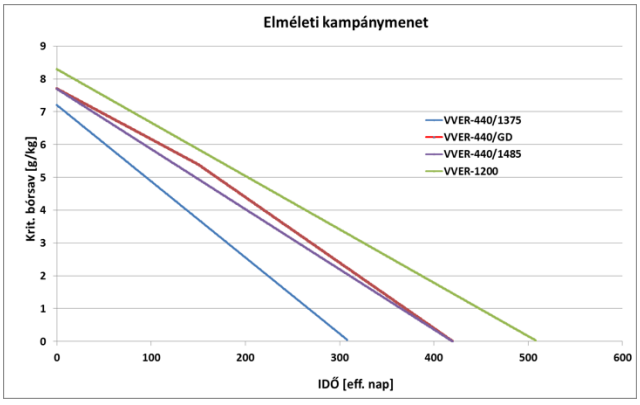
és ezzel a kiégés során a bórsavkülönbség:

$$C_b^{mért} - C_b^{számolt} \approx C_b^{számolt} * R(t) \tag{9}$$

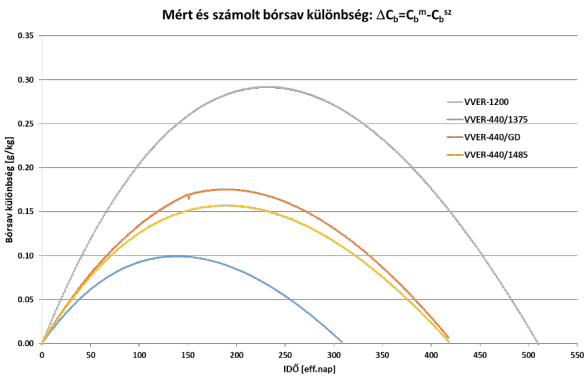
Megjegyezzük, hogy az utóbbi egyenletekben a b^* az egyszerűsített hígítás paramétere.

A VVER-440 esetében 3 féle „ideális" kampánymenet képzelhető el: a blokkok életének első kampányai alatt a zónateljesítmény 1375 MW volt, és a kampányok kb. 300 napig tartottak. Az utolsó blokk figyelembe vételével 2009-től a teljesítménynövelés eredményeképpen a reaktorok hőteljesítménye 1485 MW lett, és a kampányok kb. 400 napig tartottak. Az új típusú tölteteknél a Gd-s üzemanyag miatt a kampány elején a Gd hatására lassabban változott a bórsav, és ez csak kb. 150 effektív napnál gyorsult fel (lásd 9. ábrát). A VVER-1200 reaktorra az irodalmi adatokból indultunk ki.

A 3+1 ad-hoc kampánymenetre a (9) összefüggés segítségével a mért és számított bórsav különbségére a 10. ábrán bemutatott eredményt kaptuk.



9. ábra. VVER reaktorok elméleti kampánymenetei



10. ábra. VVER reaktorok elméleti kampányaira a modellezett bórsavkülönbség

Figyelembe véve a modellezés és a kampánymenet egyszerűsítéseit megállapítható, hogy a teljesítménynövelés és a kampánynyújtás együttvéve okozhat egy szisztematikus eltérést a mért és a természetes bór adataival homogenizált kevéscsoport állandókat használó számítás között. Így a kampány során mért bórsavban a ^{10}B tartalom fogy, ezért magasabb bórsav-koncentrációt mérünk, mint a számított érték. Az eltérés pedig érzékelhető a hosszabb kampányok esetében, a töltet típusától függetlenül.

Összefoglalás

Irodalmi adatok alapján bemutattuk a mért és számolt bórsav-koncentráció eltérését néhány hosszabb kampány esetében. A cikkekben idézett nukleáris programokról ismert - ha itt nem is volt mód részletezni -, hogy komoly V&V folyamaton mentek át. Az idézett vizsgálatok azt mutatták, hogy az eddig alkalmazott módszerek mellett érdemes finomítani a mérési metodikát és az inputként szolgáló kevéscsoport-könyvtárat, tekintettel a természetes bór izotóparányának kiégésfüggő megváltozására!

Pontos adatok hiányában a fenti modellek alapján egyszerű becslést végeztünk VVER reaktorok esetére. Az ad-hoc számítások eredménye összhangban van a hivatkozásokban leírt jelenséggel.

A bemutatott vizsgálatok azért is tanulságosak, mert rámutatnak a validációs munka lényegére, fontosságára. Ha egy validált program a gyakorlat során eltéréseket eredményez: eseti hangolást indoklás nélkül nem szabad végezni, figyelembe kell venni a folyamatok minden elemét!

Irodalomjegyzék

[1] N. Asai, T. Ohno, A. Takahashi, et al., ”Evaluation of Boron-10 depletion during pressurized water reactor operation”, Trans. Am. Nucl. Soc., 44 (1983)

[2] G. John, E. Neymotin, „Boron-10 depletion in pressurized water reactors”, Nucl. Sci. Eng., 129 (2) (1998), pp. 195-198

[3] G. Cai, „ 10B abundance follows up of reactor main loop soluble boron”, Chin. J. Nucl. Sci. Eng., 27 (2007), pp. 240-242

[4] T. Shijie et al. „Pressurized nuclear plant 10B abundance evolution study”, Nuclear Engineering and Design, Volume 301, May 2016, pp. 153-156, https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.11.020

[5] Szatmáry Zoltán, “Az atomenergia hasznosítása és a fizika”, Fizikai Szemle 55.évf. 1. sz (2005.január) https://epa.oszk.hu/00300/00342/00181/pdf/FizSzem_EPA00342_2005_01.pdf

[6] https://periodusosrendszer.hu

[7] G. Hordósy, A. Keresztúri, Cs. Maráczy, "Methodological Studies on the VVER-440 Control Assembly Calculations“, Internal Conference on Mathematics and Computations, Reactor Physics and Environmental Analyses, Portland, Oregon, USA, April 30-May 4, 1995, p.1049

[8] Gy. Hegyi, Cs. Maráczy: “Control Bank Worth Calculation with the KARATE-440 Code”, Proceedings of the 7th Symposium of AER, pp.269-283.

[9] J. Meija, T.B. Coplen, M. Berglund, W.A. Brand, P. De Bièvre, M. Gröning, N.E. Holden, „Atomic weights of the elements 2013”, Pure and Applied Chemistry, vol. 88, 2016, pp.265-291

[10] J.M. Aragones, C. Ahnert, ”Isotopic Depletion of Soluble Boron in a PWR”, Proc. of ANS Winter Meeting, 1998.

[11] J.M. Aragonés, C. Ahnert, “A Linear Discontinuos Finite Difference Formulation for Synthetic Coarse-Mesh FewGroup Diffusion Calculations”, Nucl. Sci. Eng., 94, 309 (1986)

[12] Brendan Kochunas, et al. ”VERA Core Simulator Methodology for Pressurized Water Reactor Cycle Depletion”, Nucl. Sci. Eng., 185 (1) (2017) DOI: http://dx.doi.org/10.1080/00295639.2016.1271248

[13] M. A. Sumarokov et al. „Accounting of boron-10 content changes in boric acid during fuel burnup in reactor VVER-1000”, 26th Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, 10 – 14 October 2016, Helsinki, Finland

[14] Tan, S., Hu, R., et al., „Pressurized nuclear plant 10B abundance evolution study”, Nucl. Eng. Design 301, pp. 153–156.

[15] Santamarina, A., Collignon, C., Garat, C., „French calculation schemes for light water reactor analysis” In: PHYSOR 2004 - The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Developments

© Magyar Nukleáris Társaság, 2025