

Primerköri forgalom becslése reaktorfizikai megközelítéssel

Holl Viktor, Parkó Tamás

MVM Paksi Atomerőmű Zrt.,
7030 Paks, hrsz.: 8803/17.

Az atomerőműben fontos feladat a primerköri hőhordozó-közeg forgalmának a meghatározása. A primerköri forgalom határozási módszere diverzitásának növelése érdekében egy a reaktorfizikai paramétereken alapuló eljárás kidolgozására is felmerült az igény. A módszer alapja a C-PORCA reaktorfizikai program által számolt kritikus bórsav-koncentráció értékének a méréssel való összehasonlítása. Az elemzés érdekében fejlesztett Python kód a mért és a számított bórsav-koncentráció kiértékelését kampányonként egyenletesen elosztott kiégési állapotban végezte. Az elvégzett számítások és a mért bórsav adatok legjobb egyezése esetén megkaptuk a vizsgált kampányok kiégéséhez leginkább illeszkedő hűtőközeg-forgalom becsült értékét.

Bevezetés

A paksi reaktorokban termelt hőenergia döntő része a primerköri hőhordozóközeget fűti. Ahhoz, hogy meghatározzuk a reaktor teljesítményét, ismernünk kell a hőhordozó felmelegedésének mértékét és annak forgalmát. A primerköri forgalom mérésére több eljárást ismerünk az erőműben. Felmerült az igény, hogy egy reaktorfizikai paramétereken alapuló eljárással is támasszuk alá a használt névleges forgalmak helyességét.

A módszer alapötlete

A maghasadás közben felszabaduló energia jelentős része hőenergia formájában jelenik meg az aktív zónában, ezt a primerköri hőhordozó közvetíti a szekunderkör felé. Ha a reaktor stabilan 100%-os teljesítményszinten üzemel, akkor a megtermelt és a szekunder kör felé átadott hőenergiának az egyéb helyre disszipált veszteségek figyelembe vételével egyensúlyban kell lennie.

A szekunderkörbe átvitt energia mennyisége függ a primerköri hideg- és melegág hőmérséklete közötti különbségtől, illetve a primerköri víz tömegáramától. A fenti megfontolások alapján a reaktor teljesítménye - stacioner állapotban, ismert veszteséghányad esetén - számolható a hőhordozó felmelegedése és forgalma segítségével is. Amennyiben a reaktoron áthaladó hőhordozó közeg felmelegedését meghatározott értéken tudják tartani, úgy az elszállított hőmennyiség a hőhordozó forgalmától függ. Ha a hőhordozó forgalma eltér a névleges értéktől, akkor a hőhordozó-felmelegedés és -forgalom alapján számított reaktorteljesítmény is eltér a névleges értéktől.

A reaktor teljesítményét a nukleáris láncreakció adja. Amennyiben a reaktor egy ideig nagyobb teljesítményszinten üzemel, akkor nagyobb lesz a nukleáris üzemanyag kiégése, mintha kisebb teljesítményszint mellett üzemelt volna. Az üzemanyag kiégésének növekedése csökkenti a reaktorban elhelyezett töltet reaktivitástartalékát, így a reaktivitás lekötéséhez használt szabályzórudakból rövidebb hosszt, a bórsavból kisebb koncentrációt kell alkalmazni a reaktor kritikus állapotban tartásához. Tehát végső soron azonos üzemi paraméterek (szabályzórudhelyzet, hőmérséklet stb.) esetén a primerköri

forgalom befolyásolja a kialakuló kritikus bórsav-koncentráció értékét. Egy blokk kampánya során a primerkörben lévő bórsav koncentrációja folyamatosan csökken, ezt a Vegyészeti Ellenőrzési Osztály (VEO) rendszeresen méri titrálással.

A Reaktorfizikai Osztályon (RFO) használt, jól verifikált és validált C-PORCA program képes modellezni a paksi reaktorokban zajló neutronfizikai folyamatokat és számolni annak paramétereit a kampány során. A program bemeneti paraméterei között szerepel többek között a primerköri forgalom és a reaktor teljesítménye. A kimeneti fájlban pedig megtalálható az egyes reaktorállapotokra számolt kritikus bórsav-koncentráció értéke, amelyet a program 0,45 g/kg-os pontossággal képes számolni (ez a 3 σ nagyságú mérnöki faktor). [1]

Ha a C-PORCA program által számolt és a VEO által mért bórsav-koncentrációk különbsége kis abszolútértékű és stabil a kampány(ok) során, az azt mutatja, hogy a C-PORCA program inputjában lévő adatok a valóságos értékekhez jól közelítenek. Természetesen a mért és számított bórsavértékek eltérése a mennyiségek meghatározása során fellépő összes bizonytalanságot és hibát (input adatok, számítási modell, mérési hiba stb.) tartalmazza. A vizsgálataink során, mivel az egyéb körülmények változatlanok, úgy tekinthetjük, hogy a bórsav-koncentrációt csak az inputként megadott hűtőközeg-forgalom és -teljesítmény befolyásolja.

A fenti megfontolások alapján, ha az érvényes üzemmodtáblázat szerinti névleges hűtőközeg-felmelegedés figyelembe vételével egymásnak megfelelően változtatjuk a primerköri forgalom és a hozzátartozó reaktorteljesítmény értékét a program bemenetén, akkor a számított és a mért bórsav adatok legjobb egyezése esetén megkapjuk a vizsgált kampányok kiégéséhez leginkább illeszkedő hűtőközeg-forgalom becsült értékét.

Ezzel a módszerrel a teljesítmény kiégés során akkumulálódó hatása miatt nagyon kis forgalom- és teljesítményanomáliákat is ki lehet mutatni, de ugyanezen ok miatt pillanatnyi kiértékelést nem, csak hosszabb időszakra elvégzett utólagos meghatározást tesz lehetővé.

A primerköri forgalom értékét - a Rendszertechnikai Osztály (RTO) hatásfokméréseinek megadott hibái alapján -

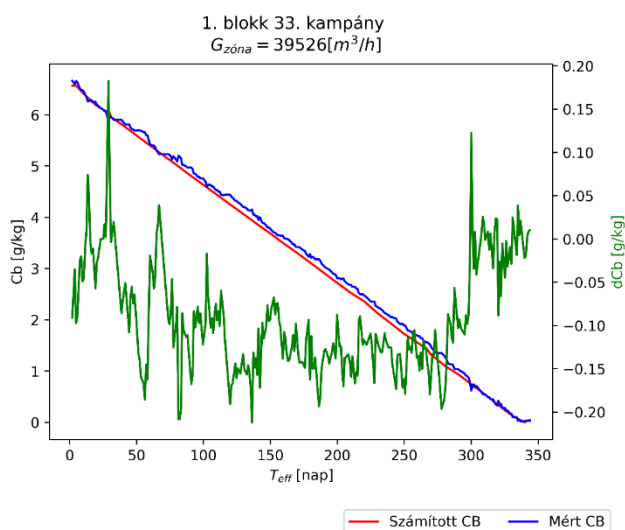
a névleges érték 1% körüli környezetében vizsgáltuk. Ekkora eltérés az előbb említettek szerint egy kampány alatt csekély és nehezen kimutatható különbséget okoz a számított és mért bórsavgörbék között, ezért célszerű több egymást követő kampányra elvégezni az összehasonlítást.

A számítás folyamata és az eredmények

A névleges és névleges körüli forgalomértékekre történtek C-PORCA számítások. Fontos megjegyezni, hogy a következőkben a forgalom alatt nem a primerköri reaktorforgalmat, hanem a zónaforgalmat értjük. A zónaforgalom az aktív zónán áthaladó és az üzemyagot hűtő hőhordozó mennyisége. A zónaforgalomból egy szorzófaktor (a vizsgált kampányokra állandónak tekintett bypass-tól függő érték) segítségével megkaphatjuk a primerköri reaktorforgalmat, amely minden blokkra – az RTO hatásfokmérési szerint – jól meghatározott mennyiség.

A forgalom változásának hatását feltérképező érzékenyszsámítások során a C-PORCA programot vezérlő bemeneti fájl elkészítését, a futtatások vezérlését, továbbá az eredmények beolvasását, feldolgozását és ábrázolását minden esetben a Python programkód végezte hozzávetőleg 200-300 kiégési állapokra

A számítások során hét forgalomértéket vizsgáltunk, amelyek a névleges érték ± 300 t/h környezetében 100 t/h osztásokkal helyezkedtek el. Az így kapott számított kritikus bórsavadatokat hasonlítottuk össze a VEO által mért értékekkel. Az 1. ábrán példaként az 1. blokk 33. kampányára vonatkozó eredmény látható. A piros és kék görbék rendre a számított és mért bórsav-koncentrációkat mutatják a bal oldali tengelyhez tartozó skálán. A jobb oldali tengelyhez tartozó zöld vonal pedig a számított-mért bórsav értékek különbségét ábrázolja.



1. ábra: Mért és számított kritikus bórsav-koncentrációk és eltérésük alakulása a kampány során

A mért adatokhoz tartozó effektív napot a mérés dátumához az online ellenőrző rendszer (VERONA) archívumából tudjuk meghatározni, ahol a forgalom a névleges érték volt, tehát nem változott. Emiatt a VERONA által a kampány során meghatározott értéket az adott forgalomhoz tartozó

teljesítmény szerint kell skálázni, hiszen a kampányra vonatkozó effektív nap függ a leadott teljesítménytől. A skálázás mértékét a következő képlet alapján lehet számolni:

$$T_{eff, forg} = T_{eff} * \frac{G_{névleges}}{G_{forg}}$$

ahol a T_{eff} a mérési ponthoz tartozó effektív nap értéke [nap], $T_{eff, forg}$ a forgalom értékhez skálázott effektív nap értéke [nap], $G_{névleges}$ a névleges forgalom értéke [m^3/h], G_{forg} a vizsgált forgalom értéke [m^3/h].

A korábban említettek szerint az elvégzett számítások a 15 hónapos (C15) kampányok bevezetése utáni kampányokat vizsgálják. A hosszabb kampányokra épülő stratégia előkészületeként történt ugyanis a főkeringtető szivattyúk (FKSZ) járókerekének a cseréje, azaz olyan geometriai változás a primerkörben, ami a hőhordozó tömegáramát erősen befolyásolja. Ezt követően a vizsgált kampányokban már mindig egységes forgalmat feltételezhetünk.

A számításokat az egyszerűség kedvéért a C-PORCA kód stacioner kiegészítő módját használva végeztük. A tranzien reaktorállapotok kizárása céljából a számítások során olyan bórsavértékek képezték a vizsgálat tárgyát, melyek a névleges teljesítmény 100-95%-os intervallumában lévő értékei mellett kerültek rögzítésre.

A kapott eredményeket grafikonon ábrázoltuk és több szempontból értékeltük. Az értékelés során figyelembe vettük, hogy mely forgalomértékek mellett lesz az átlagos bórsav-koncentráció eltérése a kampányok során:

- a legkisebb;
- a legstabilabb. (A kampányok során időben előre haladva az átlagos bórsav-koncentráció eltéréseire illesztett egyenesek meredekségét vizsgáltuk. Ez ugyanis azt mutatja, hogy a számításokban olyan jellegű hiba van, ami a számítások során kampányról kampányra nő, halmozódik. Azaz minél kisebb a meredekség, annál jobban modellezik a számítások a valóságot.)

A vizsgálat alapján legjobbnak ítélt, illetve legrosszabb eredményeket produkáló forgalomadatok számított bórsav-koncentrációgörbékre gyakorolt hatásának szemléltetése érdekében bemutatásra kerülnek az utolsó kampány mért és számított bórsavkoncentráció-görbéi.

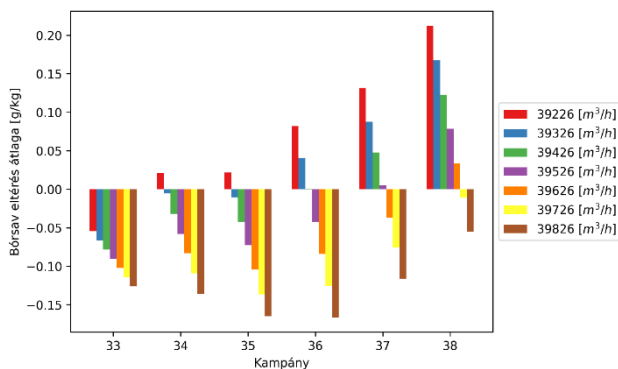
1. blokki kampányok vizsgálata

A vizsgálat a 33. kampánnyal kezdődött és a 38. kampánnyal zárult. A következő ábrákon lila színnel jelöltük az adott blokkon a jelenlegi névleges forgalomhoz tartozó eredményeket. A 2. és 3. ábra alapján egyértelműen a névleges vagy a névlegesnél 100 m^3/h -val nagyobb zónaforgalom bizonyult a legjobbnak. A névlegesnél kisebb forgalomértékek, bár néhol kisebb abszolútértékű eltérést okoznak a bórsav-koncentrációgörbék között, trendjük (3. ábra) egyértelműen meredekebb, így a bórsav-koncentrációk eltéréseinek görbéi alapján a forgalom a névleges érték és a névleges értéknél 100 m^3/h -val nagyobb intervallumban van. Ennél nagyobb forgalmak esetén a trend ugyan lehet kisebb meredekségű, de az abszolút eltérések megnövekednek.

A 4. és 5. ábrákon az 1. ábránál leírtak szerinti bórsav-koncentrációkat és eltérésüket figyelhetjük meg. A legrosszabbnak és a legjobbnak bizonyuló forgalomérték hatása jól látható: a kisebb forgalom kisebb kiégést eredményezett a hat kampány alatt, így többlet reaktivitás-tartalék maradt a kazettákban. A megnövekedett reaktivitás

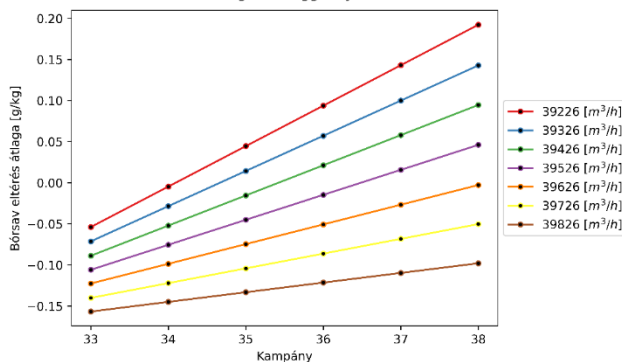
lekötéséhez nagyobb bórsav-koncentráció szükséges, így a valós mérésektől jelentősen eltérő adatokat kaptunk. A legkevésbé illeszkedő esetben a mért és számított értékek eltérése eléri a 0,4 g/kg-ot. Az 5. ábrán látható, hogy a legjobban illeszkedő esetben ugyanez a mért/számított bórsav-koncentrációeltérés mindig $\pm 0,2$ g/kg alatt marad.

1. blokk számítás-mérés bórsav eltérés átlaga a zónaforgalom függvényében



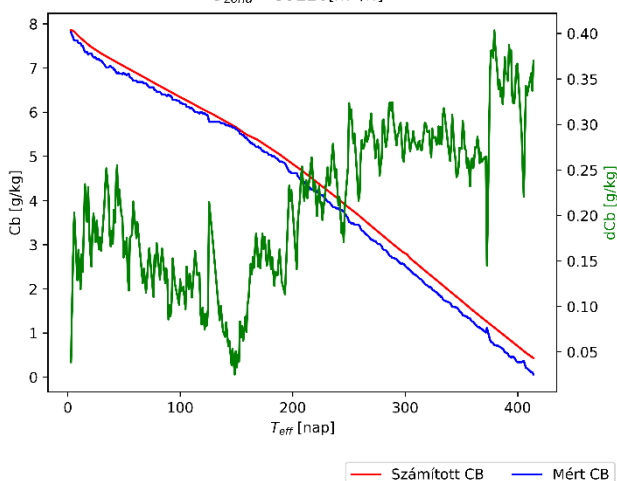
2. ábra: A kritikus bórsav-koncentráció átlagos eltérése kampányonként az 1. blokkon különböző zónaforgalmak mellett

1. blokk számítás-mérés bórsav eltérés átlagának trendje, a zónaforgalom függvényében



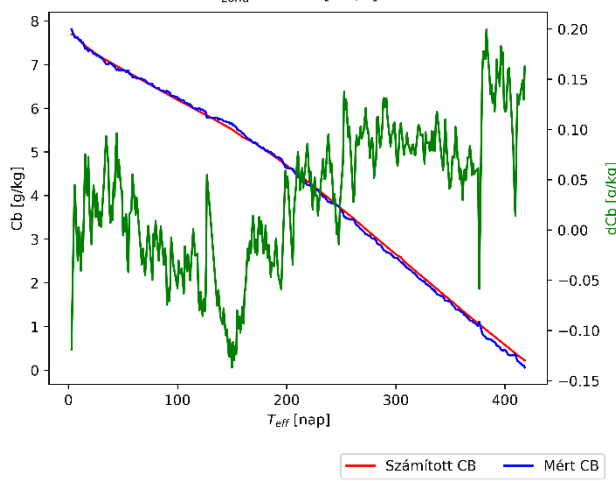
3. ábra: A kritikus bórsav-koncentráció kampányonként vett számítás/mérés eltérés átlagának trendje az 1. blokkon különböző forgalmak mellett

1. blokk 38. kampány
 $G_{zóna} = 39226[m^3/h]$



4. ábra: A mért bórsav-koncentrációgörbéhez legkevésbé illeszkedő számítás

1. blokk 38. kampány
 $G_{zóna} = 39626[m^3/h]$



5. ábra: A mért bórsav-koncentrációgörbéhez legjobban illeszkedő számítás

Összefoglaló

Az atomerőműben fontos feladat a primerköri hőhordozó-közeg forgalmának a meghatározása. A rendelkezésre álló módszerek a primer és a szekunder kör termohidraulikai paramétereit használják, hogy az említett forgalmat meghatározzák. A forgalommeghatározási módszerek diverzitásának növelése érdekében kidolgoztunk egy független, reaktorfizikai paramétereken alapuló eljárást, mely lehetővé teszi a reaktorok valós primerköri térfogatáramának becslését. A módszer alapja a C-PORCA által számolt kritikus bórsav-koncentráció értékének mérésrel való összehasonlítása. Munkánk során bemutattuk

a kiértékelés módszertanát és az 1. blokkra vonatkozó eredményeket. A módszer jellemzője, hogy csak több kampányon átívelő kiegészi folyamat alapján lehet a forgalom vizsgált időszakra vonatkozó átlagos értékére megalapozottan következtetni. Viszont az átlagérték megváltozása 1%-os határon belüli pontossággal mutatható ki.

A Paksi Atomerőmű 1. blokkjának hat kampányára, hét különböző forgalomértékkel végeztünk számításokat. Az input fájl készítését is vezérlő, általunk készített Python kód a mért/számított bórsav-koncentráció kiértékelését kampányonként egyenletesen elosztott, hozzávetőleg 200-300 kiegészi állapotban végezte. Az eredmények

ismertetése során bemutattuk, hogy ezzel a módszerrel – a nagyszámú adat segítségével – a számításokhoz feltételezett névleges zónaforgalom értéke a vizsgált blokk esetén $\pm 100 \text{ m}^3/\text{h}$ bizonytalanságon ($\sim 0,25\%$ relatív hibán) belül

helytálló. Másképpen fogalmazva kijelenthető, hogy a vizsgált blokk esetén a primerköri térfogatáram évek óta tartó, folyamatos, trend jellegű, 1%-ot meghaladó változása kizárható.

Irodalomjegyzék

- [1] Pócs I., Parkó T.: A C-PORCA 7 program validációja, RFO, 2009. március