

A HPLWR reaktor egyensúlyi kampányának finomhálós elemzése

Temesvári Emese, Hegyi György, Hordósy Gábor, Maráczy Csaba

MTA Energiatudományi Kutatóközpont

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

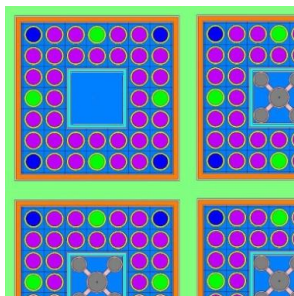
A szuperkritikus nyomású vízhűtéses reaktor (Supercritical Water-Cooled Reactor, SCWR) európai változatának, a HPLWR reaktor (High Performance Light Water Reactor) olyan stacionárius kapcsolt reaktorfizikai-termohidraulikai programrendszerét hoztuk létre, amely alkalmas a reaktor pálcaszintű számítására is. Az új programrendszerrel - konzervatív feltételezéseket alkalmazva - megvizsgáltuk a lineáris hőteljesítmény és a maximális burkolathőmérséklet limitekhez való viszonyát a HPLWR reaktor egyensúlyi zónájára.

Bevezetés

A zónatervezési célunk a szuperkritikus nyomású vízhűtéses reaktor európai változatához, a HPLWR reaktorhoz [1] olyan stacionárius kapcsolt reaktorfizikai-termohidraulikai programrendszer létrehozása, amely alkalmas a legújabb, 2008 szeptemberében kialakult zónakoncepció számítására. Az egykörös, a kritikusanál nagyobb nyomású SCWR reaktorokban a víz fázisátalakulás nélkül melegszik fel. A magas kilépő hőmérséklet közel 44%-os határfokot tesz lehetővé. Az erőmű várható előnyei a jó gazdasági mutatók az erőmű egyszerűsödése, méretcsökkenése és a magas termikus hatásfok miatt. A számítások kiterjedtek a HPLWR reaktor kazettáinak neutrontranszport számításaira, az egész zónára vonatkozó globális számításokra és a pálcaszintű számításokra is.

A HPLWR reaktor felépítése

A kazetták felépítését az 1. ábra mutatja be. Az alapegység a 40 üzemanyagpálcából álló fallal rendelkező kazetta, melynek belsejében a moderátor cső foglal helyet. A zónában fűtőelem-klaszterek találhatóak közös fej és láb résszel, melyekben 3x3 fűtőelemkazettát fognak össze. 156 klaszterből épül fel a reaktor üzemanyagot tartalmazó része. Az üzemanyagot tartalmazó részt alul és felül az axiális reflektorok veszik körül, körben pedig a radiális reflektorok.

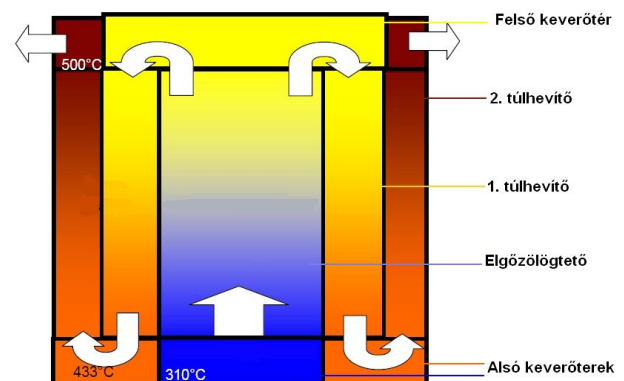


1. ábra: A 9 kazettából álló klaszter negyed része abszorbensrudakkal, Gd kiegészítő méreggel (zöld). A sarokpálcák (sötétkek) kisebb dúsításúak.

A HPLWR reaktorra épülő erőmű elektromos teljesítménye 1000 MW, az aktív zóna nyomása 25 MPa. A tápvíz forgalma 1160 kg/s 280 °C belépő hőmérséklettel, a kilépő hőmérséklet 500 °C a 4,2 m magas zónában.

A HPLWR aktív zónája a szokásos könnyűvízes reaktoroktól a következő okok miatt tér el jelentősen:

- A zónából kilépő víz sűrűsége egy nyolcada a belépő víz sűrűségének, így a megfelelő moderálás eléréséhez a vízfóraló reaktorokhoz hasonlóan a kazettafalakon kívüli rés vize járul hozzá. Ezen kívül a kazetta közepén elhelyezkedő csatorna segíti a moderálást.
- A hűtőközeg átlagos entalpia emelkedése közel 2000 kJ/kg, amely több mint tízszeresen meghaladja a nyomottvízes reaktorok értékét. Ez a nagy entalpiaemelkedés a forrócsatornában olyan burkolathőmérsékletet eredményezne egy hagyományos zónaelrendezésnél, amely túl van minden ésszerű anyagtudományi határértéken. A HPLWR 3-utas zónaelrendezésében [2] a hűtővíz háromszor áramlik át a zónán, minden egyes áthaladás után a keverőterekben egyenlítődik ki a hőmérséklet, ami csökkenti a forró pontok kialakulásának lehetőségét (2. ábra).



2. ábra: A 3-utas HPLWR zóna hűtővíz áramlási régiói (Karlsruhe Institute of Technology)

Egyensúlyi kampányszámítások finomhálós elemzése

A maximális burkolathőmérsékletek csökkentése céljából a kilenc kazettaból álló klaszterek bemenetén található szűkítőket használtuk a zóna forgalomeloszlásának hangolására. A kiegészítő mérgek alkalmazásának következményeképpen erős teljesítménytrendeződés jött létre a zónában, amely a forgalomeloszlás változásán keresztül is kihatott a burkolathőmérsékletekre. 2 300 MW termikus teljesítményen a HPLWR friss zónájától kezdve elértük az egyensúlyi kampányt. Az egyensúlyi számításokban alkalmazott klaszter-típusokban a maximális fűtőelem-pálcák dúsítás 7% volt. Az elgőzöltetőbeli erős axiális hűtővízsűrűség változás miatt axiális profilírozásra is szükség volt. Az egyensúlyi zónaszámításokban alkalmazott klaszter-típusok főbb adatait [3]-ban közöltük.

Átlagosan 3 évi zónában tartózkodás esetén a kirakott fűtőelem-klaszterek 33,5 (MWnap/kgU) átlagkiegést értek el.

A normál üzem biztonsága szempontjából a következő megfontolások voltak mérvadók az egyensúlyi kampány kialakításánál:

- a 390 W/cm lineáris teljesítmény limit betartása
- a fűtőelem középponti hőmérsékletének jóval az olvadáspont alatti tartása
- a maximális burkolathőmérséklet 630 °C alatt tartása

A fenti limitek fűtőelem-pálcák-szakaszonkénti betarthatóságának ellenőrzésére a pálcaszintű teljesítmények meghatározására alkalmas DIF3D [4] finomhálós diffúziós programot használtuk fel. A DIF3D programnak a szuperkritikus nyomástartományban működő KARATE [5] programrendszerrel való kapcsolatát kiépítettük és a programrendszert alkalmaztuk az egyensúlyi kampányra.

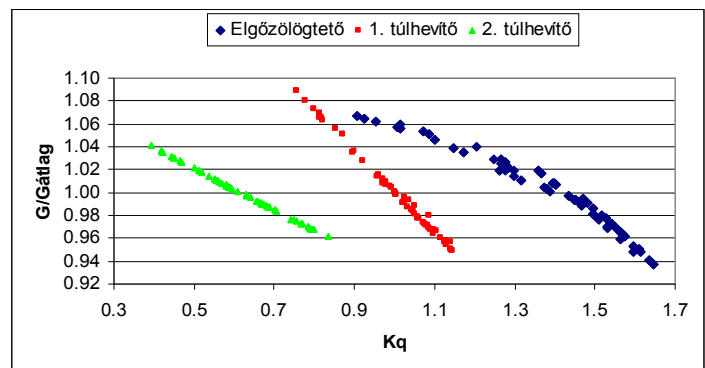
A számítás főbb lépései a következők:

- Best estimate kampányszámítások elvégzése a szuperkritikus KARATE nodális 3D csatolt neutronfizikai-termohidraulikai kóddal, a nodális neutronfizikai-termohidraulikai eredmények rögzítése a további lépésekhez.
- A MULTICELL transzport kód számításai alapján a cella szintű 2-csoport diffúziós típusú hatáskeresztmetszetek kiértékelése és paraméterezése a következő paraméterek függvényében:

- a fűtőelem-pálcák kiegészése
- az ^{235}U koncentrációja
- az ^{238}U koncentrációja
- a ^{239}Pu koncentrációja
- a ^{135}Xe koncentrációja
- a ^{149}Sm koncentrációja
- a fűtőelem hőmérséklete
- az abszorbens pozíciója
- a hűtővíz sűrűsége
- a moderátorcső vizének sűrűsége
- a kazettarés vizének sűrűsége

A kazetta celláinak csoportállandói általában a kazetta minden paraméterétől függenek a kis kazettaméret és nagy migrációs terület miatt. (Pl. a moderátorcsatorna csoportállandói függenek a vízrés sűrűségétől is.)

- A 2-csoport reflektor hatáskeresztmetszetek előállítása 1 dimenziós COLA transzport számítás segítségével, amelyben modelleztük a reflektor mellett lévő fűtőelemeket és az acél reflektort a benne elhelyezkedő, a kazettarés vizét elvezető csatornákkal együtt.
- A szuperkritikus KARATE nodális csatolt neutronfizikai-termohidraulikai kóddal számított termohidraulikai adatokat és axiális görbüeti tényezőket felhasználva 2 dimenziós (x-y geometriájú), egész zónás finomhálós számítások elvégzése minden kiegészési állapot mind a 39 szintjére. A reaktor aktív zónáját 3 sor fűtőelemkazetta átmérőjű reflektoranyaggal vesszük körül. Kiegészési lépés esetén a pálcaszintű izotópkoncentrációk követése. A kazettaátrakások kezelése.
- A best estimate KARATE számítások eredményeit felhasználva konzervatív kazettánkénti termohidraulikai számítások elvégzése, melyben a kazetta teljesítményeket a k_q radiális egyenlőtlenségi tényező bizonytalanságával emeljük, a bemeneti hőmérsékleteket a keverőterek nem tökéletes keveredését leíró entalpiabizonytalanságoknak megfelelő hőmérséklettel emeljük, valamint a forgalmakat a k_q növelésének megfelelően az áramlási szektoronkénti k_q -relatív forgalom görbének megfelelően csökkentjük (3. ábra). (A HPLWR reaktorban a kazettaszűkítők aránylag kicsi hidraulikai ellenállása és a hűtővíz jelentős felmelegedése miatt a kazetta forgalmak erősen függenek a kazetta teljesítményétől.)



3. ábra: A kazettánkénti relatív forgalmak a k_q függvényében a különböző áramlási szektorokra

- Konzervatív pálcaszintű számítás elvégzése: A DIF3D pálcaszakasz teljesítményekből számoljuk a kazettán belüli radiális teljesítményegyenlőtlenségeket, a maximális értéket (k_k) a számítási bizonytalanságnak megfelelő mérnöki tényezővel szorozva konzervatív kazettán belüli értéket kapunk. Ezt használjuk fel a HPLWR projektben kifejlesztett korrelációban a forrócsatorna entalpiaemelkedés egyenlőtlenségi tényezőjének (k_h) számításához. $k_h(k_k) = 0.780 + 0.235k_k$ [6]. A HPLWR reaktor kazettáira vonatkozó korreláció azt mutatja, hogy a helikális drót távtartók alkalmazása jó hűtőközegkeveredést biztosít a szubcsatornák között. A maximális burkolathőmérséklet és a fűtőanyag maximális hőmérsékletének számítása a Watt hőátadási korrelációt [7] alkalmazó fűtőelemmodellel történt. A pálcaszintű

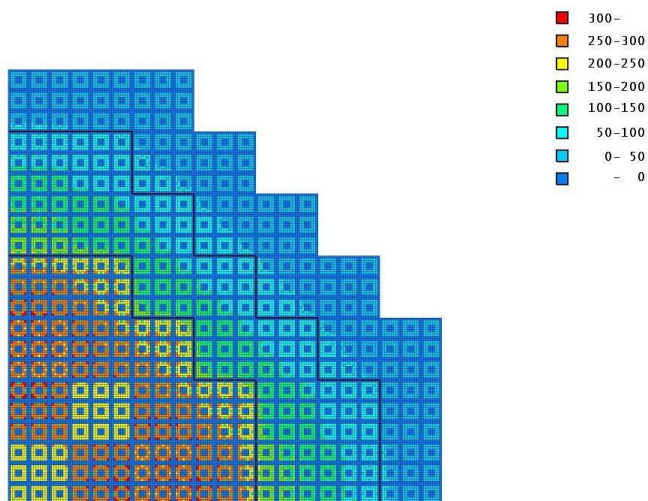
forrócsatorna számításokat a legterheltebb pálcaszakasz pálcájára és a legterheltebb pálcára is elvégeztük. A számításokban használt kazettánkénti és pálcánkénti konzervatív mérnöki faktorokat az 1. táblázatban közöljük.

1. táblázat Mérnöki faktorok a különböző áramlási szektorokra

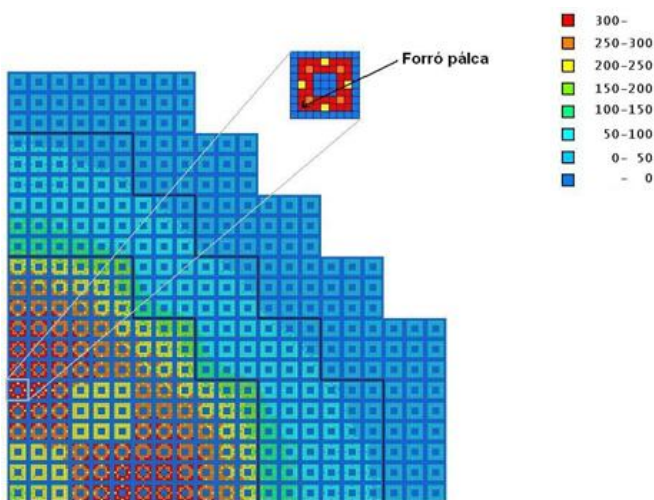
Áramlási szektor	f_{kq}	f_{kk}
Elgőzölögtető	1.040	1.072
1. túlhevítő	1.110	1.072
2. túlhevítő	1.120	1.072

A mérnöki faktorok meghatározásánál számos zónakonfigurációra elvégzett KARATE, DIF3D és referencia MCNP számítás eredményét használtuk fel.

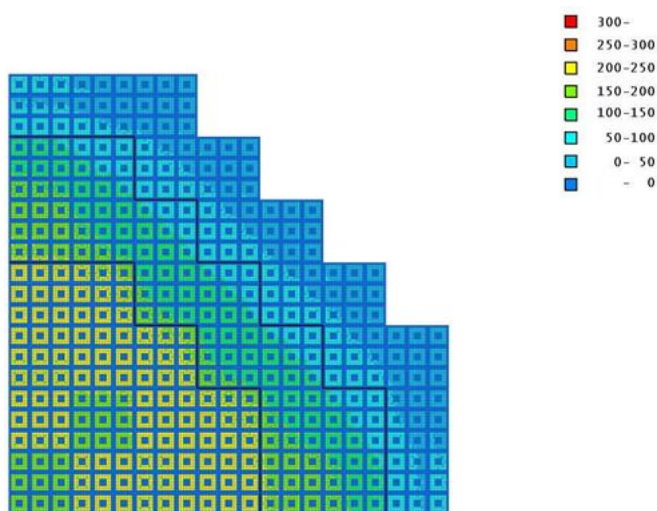
A pálcaszintű lineáris teljesítményeloszlás az egyensúlyi kampány elején, a legterheltebb időpontban és a kampány végén, a 4-6. ábrákon látható a legterheltebb rétegben. A középső elgőzölögtetőt, az első túlhevítőt és a zóna szélén lévő második túlhevítőt fekete vonal választja el. Jelentős axiális és radiális teljesítményeloszlás-átrendeződés figyelhető meg.



4. ábra: Pálcaszintű lineáris teljesítményeloszlás az egyensúlyi kampány 0. napján a legterheltebb 22. szinten [W/cm]

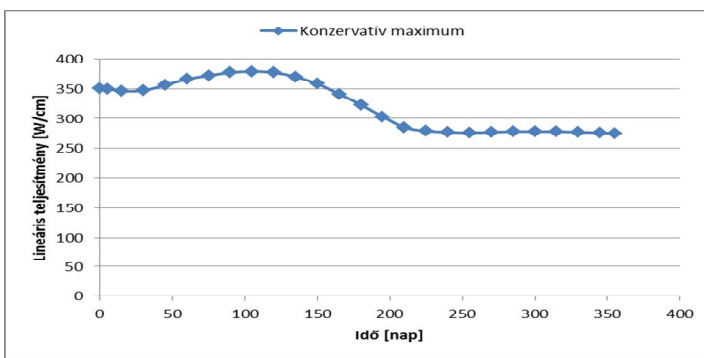


5. ábra: Pálcaszintű lineáris teljesítményeloszlás az egyensúlyi kampány 105. napján a legterheltebb 8. szinten [W/cm]



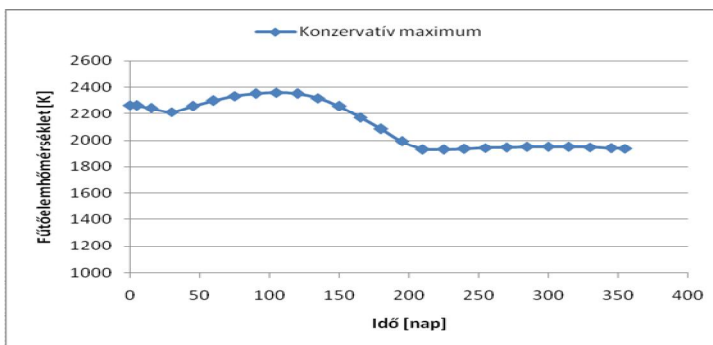
6. ábra: Pálcaszintű lineáris teljesítményeloszlás az egyensúlyi kampány 355. napján a legterheltebb 32. szinten [W/cm]

A mérnöki tényezőkkal felszorozott lineáris teljesítményeloszlás maximuma az egyensúlyi kampány során a 7. ábrán látható. A maximumot az üzemeltetés 105. effektív napján kaptuk. A 390 W/cm-es limit éppen betartható.



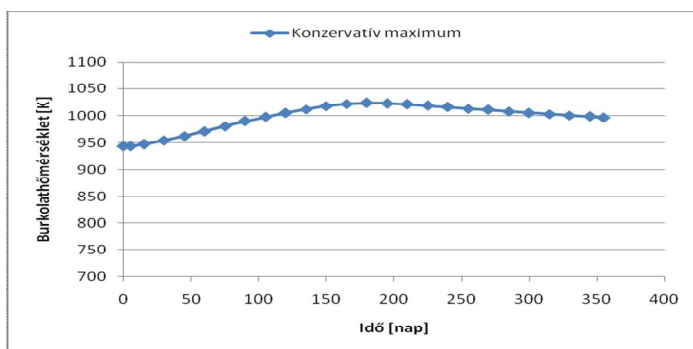
7. ábra: A pálcaszintű lineáris teljesítményeloszlás konzervatív maximuma az egyensúlyi kampányban

A pálcaszintű fűtőelem-hőmérséklet konzervatív maximuma is hasonló viselkedést mutat, mint a lineáris teljesítmény, az urándioxid olvadáspontja alatt van a görbe (8. ábra).



8. ábra: A pálcaszintű fűtőelem-hőmérséklet konzervatív maximuma az egyensúlyi kampányban

A konzervatíván számított burkolathőmérséklet maximuma az egyensúlyi kampány során mindig meghaladja a célul kitűzött 903 K fokos értéket (9. ábra)



9. ábra: A pálcaszintű burkolathőmérséklet konzervatív maximuma az egyensúlyi kampányban

Következtetések

A pálcaszintű burkolathőmérséklet maximuma mindig az 1. túlhevítő olyan kazettájában található, amely szomszédos az elgőzölögtetővel. Mivel az elgőzölögtetőben a lineáris teljesítmény korlát még éppen tartható, a további optimalizálás iránya a teljesítmény részbeni áthelyezése az 1. túlhevítőtől a 2. túlhevítőbe, ahol semmilyen korlát nincs veszélyben. Az átrakási sémával történő optimalizálásnak gátja a kazetták 3x3-as klaszterbe rendezése, továbbá a klaszterenkénti szűkítő alkalmazása. A kazettánkénti átrakás és szűkítők alkalmazásával a burkolathőmérséklet jelentős csökkenése volna elérhető.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket nyilvánítják az alábbi intézményeknek pénzügyi támogatásukért: Nemzeti Fejlesztési Ügynökség; Nukenerg pályázat, Európai Bizottság : FI6O-036230 szerződés számú HPLWR Phase 2 projekt.

Irodalomjegyzék

- [1] Schulenberg T, Maraczy Cs, Heinecke J and Bernnat W: *Design and Analysis of a Thermal Core for a High Performance Light Water Reactor*, *Nuclear Engineering and Design*, 241, pp. 4420–4426., 2011
- [2] T. Schulenberg, J. Starflinger, J. Heinecke, "Three pass core design proposal for a high performance light water reactor", *Progress in Nuclear Energy* 50, p.526-531 (2008)
- [3] Temesvári E., Hegyi Gy., Maráczy Cs.: *A HPLWR szuperkritikus nyomású reaktor egyensúlyi kampányszámítása*, *Nukleon*, 2010. szeptember, III. évf. 3. szám (2010) 69
- [4] K.L.Derstine: *DIF3D: A Code to Solve One-, Two, and Three-Dimensional Finite-Difference Diffusion Theory Problems*, ANL-82-64, Argonne National Laboratory, USA, 1984 április
- [5] Keresztúri, A., Hegyi, Gy., Korpás, L., Maráczy, Cs., Makai, M. and Telbisz, M. (2010) 'General features and validation of the recent KARATE-440 code system', *Int. J. Nuclear Energy Science and Technology*, Vol. 5, No. 3, pp.207–238.
- [6] T. Schulenberg, J. Heinecke, Köhly, C. Kunik, A. Miotto, L. Monti, X. Turet, A. Wank, Cs. Maráczy, Gy. Hegyi, E. Temesvári, W. Bernnat: *Thermal Core Design for the HPLWR – Year 3, HPLWR Phase 2 Project*, 2009
- [7] T.Yamaji, A., Tanabe, T., Oka, Y., Yang, J., Liu, J., Ishiwatari, Y., Koshizuka, S., 2005. *Evaluation of the nominal peak cladding surface temperature of the super LWR with subchannel analyses*. In: *Proceedings of GLOBAL 2005*, Paper No. 557, Tsukuba, Japan, 9–13 October.