

A HPLWR tanulmányozásához használt csatolt neutronfizikai-termohidraulikai programrendszer továbbfejlesztése

Reiss Tibor, Dr. Fehér Sándor, Dr. Czifrus Szabolcs

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Budapest, Műegyetem rkp. 9. R. épület 3. emelet, H-1111

A Szuperkritikus Nyomású Vízhűtésű Reaktor (SCWR) a negyedik generációs reaktorok családjába tartozik. Ennek a típusnak az európai változata a High Performance Light Water Reactor (HPLWR) elnevezésű reaktor. A primervíz szuperkritikus nyomású, az aktív zónán való áthaladás során a sűrűsége nagyon jelentősen változik. Ennek következménye, hogy a HPLWR lokális hőmérséklet-, sűrűség- és teljesítmény-ingadozásra hajlamos, aminek leírására kapcsolt neutronfizikai-termohidraulikai számítások szükségesek. A cikkben a 2006-ban elkészült csatolt neutronfizikai-termohidraulikai programrendszer továbbfejlesztését ismertetjük. A fejlesztés eredményeként az aktív zóna realiztikusabb modelljéhez jutottunk. Az új programrendszerrel kiterjedt paramétervizsgálatot végeztünk, továbbá illesztettük hozzá az ORIGEN kódot is a kiegészítő összefüggő jelenségek tanulmányozásához.

Az SCWR és a HPLWR

Az egyre növekvő energiaigények kielégítése és a környezeti terhelés csökkentése érdekében kiterjedt kutatómunka folyik a jövő atomerőműveinek, a negyedik generációs reaktoroknak a kifejlesztése érdekében ([1]). E reaktorok közül az egyik legperspektivikusabb az SCWR ([2]), amely a mai könnyűvízes reaktorok (LWR-ek) és a szuperkritikus kazánok technológiáit ötvözi.

Az SCWR a víz kritikus pontja (374°C, 22,1 MPa) fölött működő magas-hőmérsékletű, magas-nyomású, vízhűtött reaktor. A cikkben e reaktortípus európai változatának, a High Performance Light Water Reactor (HPLWR) reaktortípusnak egy kazettáját tanulmányoztuk a [3]-ban található tervek alapján. A HPLWR reaktortartályának tervei hasonlóak az LWR-éhez, habár a primerköri hűtőrendszer egy BWR-típusú direkt-körfolyamat. A primervíz reaktortartályon belüli útját a [4] ismerteti, amely alapján megkülönböztetünk leszálló vizet, moderátort (moderátorcső, vízrész) és hűtőközeget ([3]). Az Európai Unió 6. Keretprogramjában a HPLWR Phase 2 projekt ([5]) keretében több európai kutatóintézet és egyetem tanulmányozza a HPLWR-t: a legújabb tervek alapján az

aktív zóna háromutas (angolul: three pass core) lesz, követve a szuperkritikus fosszilis erőművekben megvalósuló áramlást ([6]).

Az általunk kifejlesztett csatolt neutronfizikai-termohidraulikai programrendszer az eredeti HPLWR elrendezést, az egyutas aktív zónát ([7]) modellezi.

A rendelkezésre álló programrendszer továbbfejlesztése

A 2006 szeptemberében kidolgozott csatolt neutronfizikai-termohidraulikai programrendszert ([8]) fejlesztettük tovább, így a programrendszer a HPLWR realiztikusabb modellezésére képes. A jelentősebb változtatások a termohidraulikai modulban történtek, ezek a következők:

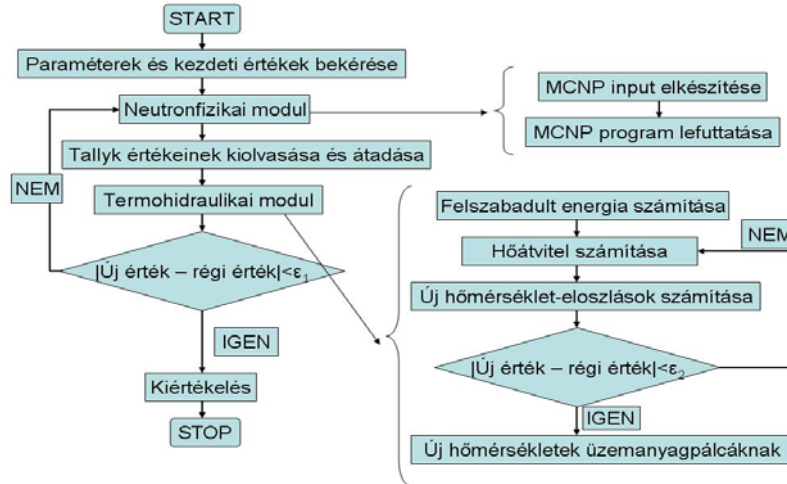
- 1.) a moderátorcsőben és a vízrészben folyó közeg szétválasztása;
- 2.) tömegáram-hányadosok bevezetése, amelyek megmutatják, hogy a hidegági csomkon belépő víz hány százaléka megy a moderátorcsőbe, vízrészbe és a leszálló vízbe;
- 3.) a moderátor és a hűtőközeg között fordított hőátvitel is előfordulhat, azaz a moderátor fűtheti a hűtőközeget (ez a kazetta alsó szintjein jellemző a leszálló víz jelentős tömegárama mellett);

¹ A moderátorcső angol megfelelője: moderator box.

4.) a termohidraulikai modulban belső iteráció bevezetése, mivel a hőtávitel miatt változik a hőmérséklet-eloszlás, ebből következően a hőtadási és hőtáviteli tényezők is;

5.) az üzemanyagpálcák hőmérséklet-eloszlásának számítása.

A jelenlegi verzió folyamatábrája az 1. ábrán látható, a programrendszer részletes működése megtalálható [9]-ben.



1. ábra: A továbbfejlesztett programrendszer folyamatábrája.

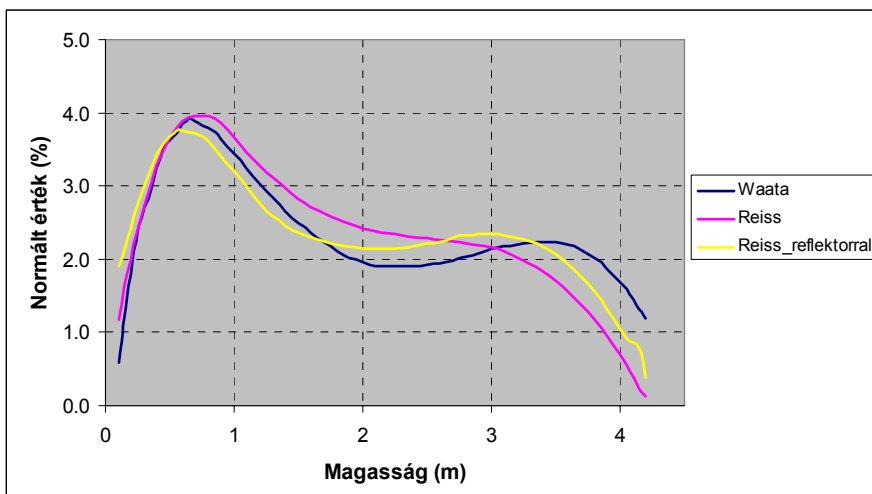
Számítási eredmények

Összevetés más eredményekkel

A karlsruhei FZK kutatóintézetben C. L. Waata az MCNP és a STAFAS kódokkal végzett hasonló számításokat ([10]), ezekkel összevetettük a saját eredményeinket (2. ábra): a két modell elfogadható egyezést mutat. Programrendszerünk MCNP modelljében a kazetta aktív hossza fölött és alatt reflektor régiókat bevezetve a kazetta felső régiójában található lokális maximum is megkapható. A 2. ábrán túlmenően a számítási eredmények között további hasonlóságok tapasztalhatóak, például mindkét modell forró pontot jósol a kazetta sarokpálcájában.

A sokszorozási tényező

A programrendszerrel végzett számításoknál 5%-os uniform üzemanyag-dúsítást feltételezve 1,185 és 1,195 közé eső sokszorozási tényezőt kaptunk. A reaktivitás-többletet üzemanyagba kevert gadólium-oxiddal (Gd_2O_3), illetve a moderátorcsőbe süllyesztett bór-karbid (B_4C) szabályozórudakkal lehet lekötöni ([11]). Ennél a reaktortípusnál a nyomottvízes erőművek esetében elterjedt bórsavas megoldás az egykörös felépítés miatt nem alkalmazható.



2. ábra: Teljesítmény-eloszlás egy kiválasztott üzemanyagpálcában a [10] és a saját programrendszer számításai alapján.

A neutronspektrum

Az európai HPLWR Phase 2 projekt keretében egy termikus és egy gyors aktív zóna-elrendezés tervezése egyaránt szerepel, viszont ezek megvalósítása a tervezett belépő és kilépő vízhőmérsékletek (280°C illetve 500°C) esetén az alábbi okok miatt nem egyszerű:

- a pszeudokritikus alatti hőmérsékletek esetén a víz sűrűsége nagy, így jó moderátorként viselkedik, ami gyors reaktorok esetében kedvezőtlen;
- a pszeudokritikus feletti hőmérsékletek esetén a sűrűség drasztikusan lecsökken, ami rossz moderátori tulajdonságokat eredményez, így a termikus reaktor megvalósítása komplikált.

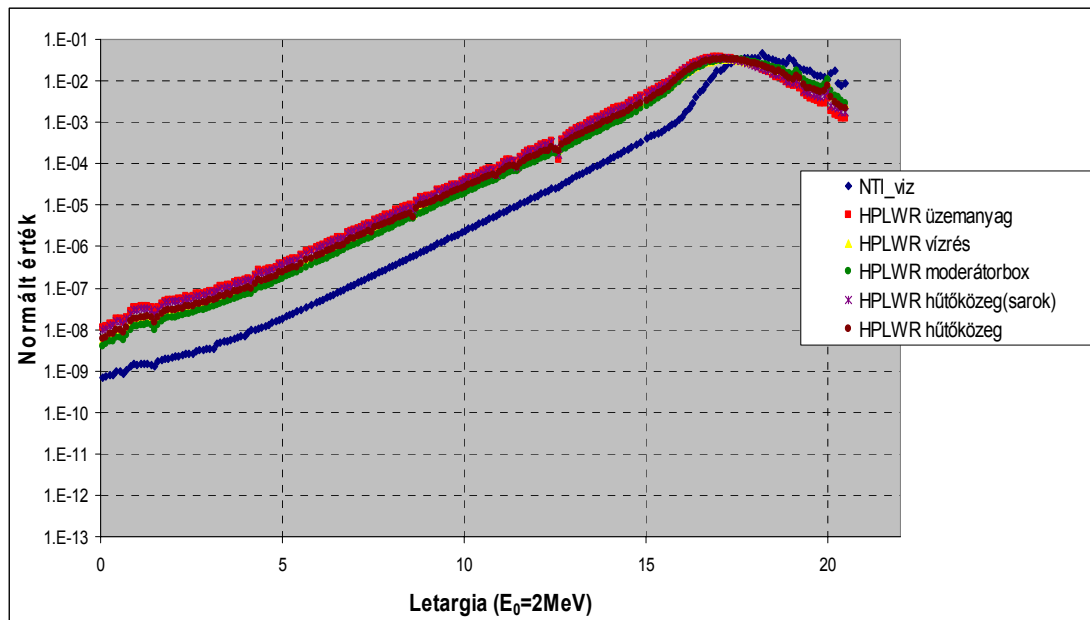
Termikus reaktorok tervezésénél kiutat jelenthet ZrH₂-rudak ([12]) vagy vízrudak használata (utóbbi szerepét a

HPLWR esetében a moderátorcső látja el). Az előbbieket miatt összehasonlítottuk a Budapesti Műszaki Egyetem Nukleáris Technika Intézet Oktatóreaktorának neutronspektrumát az általunk modellezett HPLWR kazetta spektrumával. A 3. ábra alapján megállapítható, hogy a HPLWR spektruma a jelenlegi kazetta-elrendezés mellett keményebb (letargia itt használt definíciója:

$$u = -\ln(E_0/E), \quad (1)$$

ahol $E_0 = 2 \text{ MeV}$).

A HPLWR spektruma lágyítható a moderátorcső szigetelésével, mivel ekkor megakadályozható az itt folyó moderátor melege.



3. ábra: Neutronspektrum a BME NTI Oktatóreaktorában (az aktív zóna vizére átlagolva), illetve a HPLWR kazetta különböző régióiban a 17. szinten ($z = 175 \text{ cm}$ -nél, a kazetta közepe $z = 210 \text{ cm}$ -nél van).

A tömegáram-hányadosok változtatásának hatása

A továbbfejlesztett programrendszerrel kiterjedt paramétermegvizsgálást végeztünk, ami során vizsgáltuk a tömegáram-hányadosok változtatásának, különböző hőátadási tényezőket számító formulák használatának és a dúsítás változtatásának hatását. Utóbbi vizsgálatok hasonló következtetéseket tudunk levonni, mint [8]-ban. A továbbiakban a különböző moderátorcső és vízrés tömegáram-hányadosok okozta hatásokat elemezzük.

Elméleti úton belátható ([9]), számítások is igazolták, hogy a moderátorcső és a vízrés tömegáramának növelésekor (állandó hidegági csonkon belépő tömegáram mellett) csökken az alsóbb szinteken a fordított hőátvitel előfordulásának valószínűsége, azaz kevesebb olyan szint

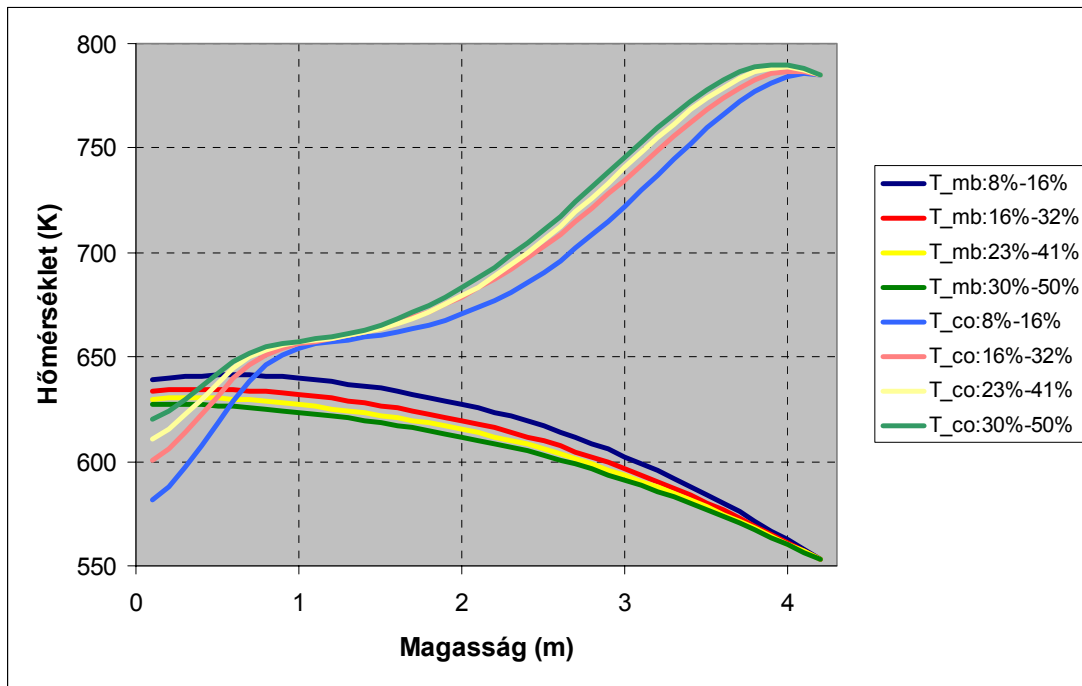
lesz, ahol a moderátor fűti a hűtőközeget (4. ábra, 5. ábra). További fontos szempont, hogy a moderátor tömegáram-hányadosainak növelése csökkenti a maximális üzemanyag-hőmérsékletet. Természetesen a moderátor tömegáramát nem lehet a leszálló víz tömegáramának rovására minden határon túl növelni, mivel ekkor csökken a reaktortartály hűtése, amely az anyag gyorsabb fáradását eredményezi. Az üzemi értékeket az előbbi két effektus figyelembevételével részletes, teljes zónára kiterjedő csatolt neutronfizikai-termohidraulikai számításokkal lehet meghatározni.

Kiegészítés

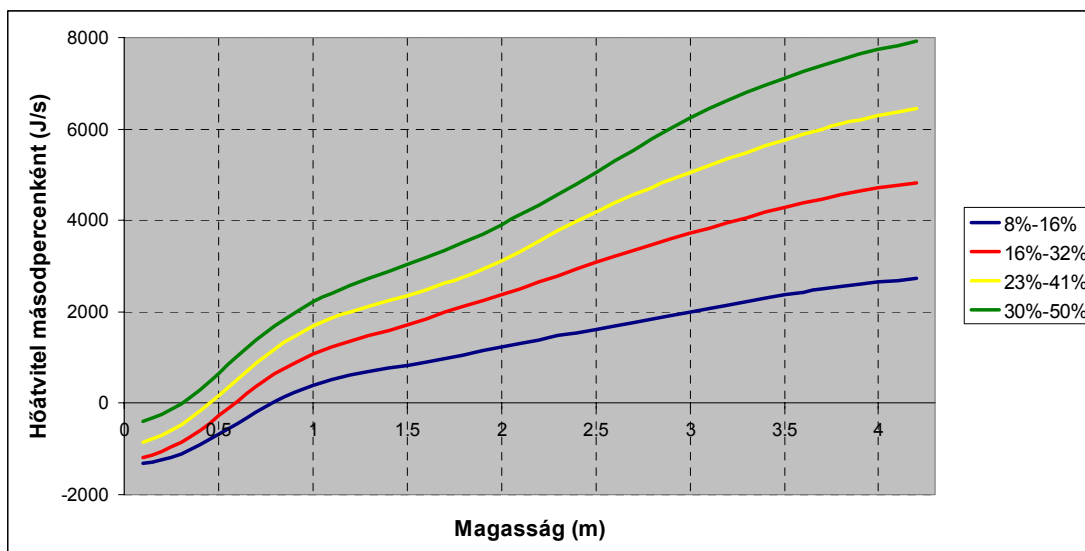
Az ORIGEN kiegészítő kódot csatoltuk a továbbfejlesztett programrendszerünkhöz, így a kiegészítés során fellépő időfüggő hatásokat is figyelembe tudtuk

venni. A kiégést két paraméter függvényében vizsgáltuk: az időlépés és a kazetta függőleges régióinak száma. Az előbbi meghatározta, hogy milyen kiégési lépcsőkkel futtattuk a programrendszerünket, aminek eredményeként a reaktor új stabil egyensúlyi állapotához tartozó teljesítmény-eloszlást és neutronspektrumot határoztuk meg. Az utóbbi jelentősége abban áll, hogy figyelembe veszi a kazetta hossza mentén fellépő eltérő teljesítmény-értékeket és ezzel együtt a nem egyenletes kiégést. A várakozásoknak megfelelően függőleges osztás nélküli esetben a

teljesítmény-eloszlásban nincs számottevő változás, ezért megvizsgáltuk a 3 és 6 régióra osztás eseteit is. A 10 MWnap/kg-os időlépés túl nagyának bizonyult, ezért azt lecsökkentettük 1 MWnap/kg-ra. Ezzel az időlépéssel és 6 függőleges régióval arra a következtetésre jutottunk, hogy a kiégés előrehaladása ennél a reaktortípusnál is egyenletesebbé teszi a térbeli teljesítmény-eloszlást, amely például a maximális üzemanyag-hőmérsékletek gyors csökkenését eredményezi.



4. ábra: A moderátorcső (T_{mb}) és a hűtőközeg (T_{co}) hőmérséklet-eloszlása különböző tömegáram-hányadosok esetén.



5. ábra: A hőátviteli energia másodpercenként a moderátorcső és a hűtőközeg között különböző tömegáram-hányadosok esetén.

Összefoglalás

A továbbfejlesztett csatolt neutronfizikai-termohidraulikai programrendszer a HPLWR egy kazettájában lejátszódó folyamatok realiztikusabb modellezésére képes. A

programrendszerrel elvégzett kiterjedt paraméter-vizsgálat felhasználható további optimalizálási kutatásoknál. Továbbfejlesztett programrendszerünk és az ORIGEN program csatolásával a HPLWR-beli kiégés is tanulmányozható.

Irodalomjegyzék

- [1] *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*, 2002. december
- [2] K. Dobashi, Y. Oka, S. Koshizuka: *Conceptual design of a high temperature power reactor cooled and moderated by supercritical light water*, ICONE-6, 1998. május 10-15.
- [3] J. Hofmeister: *Design of a fuel assembly for a HPLWR*, prezentációs fájl, 2005. november 11.
- [4] P. MacDonald, J. Buongiorno, J. W. Sterbenitz, C. Davis, R. Witt: *Feasibility study of supercritical light water reactors for electric power production*, Final Report, INEEL/EXT-04-02530
- [5] J. Starflinger, T. Schulenberg, P. Marsault, D. Bittermann, C. Maraczy, E. Laurien, J. A. Lycklama, H. Anglart, N. Aksan, M. Ruzickowa, L. Heikinheimo: *European research Activities within the Project: „High Performance Light Water Reactor Phase 2” (HPLWR Phase 2)*, Proceedings of ICAPP 2007, Nizza, Franciaország, 2007. május 13-18.
- [6] T. Schulenberg, K. Fischer, J. Starflinger: *Review of design studies for High Performance Light Water Reactors*, 3rd International Symposium on Supercritical Water-Cooled reactors, Shanghai, Kína, 2007. március 12-15.
- [7] B. Vogt, J. Starflinger, T. Schulenberg: *Near term application of supercritical water technologies*, Proceedings of ICONE-14, Miami, Florida, 2006. június 17-20.
- [8] Reiss T., Horváth D., Czifrus Sz., Fehér S.: *Csatolt neutronfizikai és termohidraulikai számítások a HPLWR reaktor axiális teljesítmény-eloszlásának meghatározására*, V. Nukleáris Tehnika Szimpózium, Paks, 2006. november 30. - december 1.
- [9] Reiss T., Fehér S. Czifrus Sz.: *Csatolt neutronfizikai-termohidraulikai programrendszer a HPLWR reaktortípus tanulmányozására*, Tudományos Diákköri Dolgozat, Budapest, 2007. október
- [10] C. L. Waata: *Coupled Neutronics/Thermal-hydraulics Analysis of a High-Performance Light Water Reactor Fuel Assembly*, FZKA 7233 2006. június
- [11] M. Schlagenhauser, B. Vogt, T. Schulenberg: *Reactivity control mechanism for a HPLWR fuel assembly*, Proceedings of GLOBAL 2007, Boise, Idaho, USA, 2007. szeptember 9-13.
- [12] J. Buongiorno, J. W. Stebentz, P. E. MacDonald: *Study of solid moderators for the thermal-spectrum Supercritical Water-Cooled reactor*, Journal of Nuclear Technology, 153, 282, 2006.