

**SZUPERKRITIKUS NYOMÁSÚ VÍZZEL HŰTÖTT REAKTOR
CSATOLT REAKTORFIZIKAI - TERMOHIDRAULIKAI
ELEMZÉSE**

Ph.D. tézisfüzet

Reiss Tibor

**Témavezetők:
Dr. Fehér Sándor
Prof. D.Sc. Csom Gyula**



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Nukleáris Technikai Intézet
2011

A kutatások előzménye

A jövő atomenergetikáját meghatározó tudományos programok közül a Generation IV International Forum a legjelentősebb, amely keretében hat fő reaktorfejlesztési irányt határoztak meg ([GIF2002]): gázhűtésű gyorsreaktor (GFR), ólomhűtésű gyorsreaktor (LFR), nátriumhűtésű gyorsreaktor (SFR), sóolvadékos reaktor (MSR), szuperkritikus nyomású vízhűtésű reaktor (SCWR) és nagyon magas hőmérsékletű reaktor (VHTR). E reaktorokat a következő szempontok alapján választották ki: biztonság, atomenergia fenntarthatósága, proliferáció-állóság, fizikai védelem, gazdasági versenyképesség.

A szuperkritikus nyomású vízhűtésű reaktor ([Fischer2009]) a víz kritikus pontja (374 °C, 22,1 MPa) fölött működő, magas hőmérsékletű, magas nyomású vízzel hűtött reaktor, amely ötvözi a mai könnyűvízes reaktorok és a szuperkritikus kazánok előnyös tulajdonságait, pl. összehasonlítva a nyomottvízes reaktorokkal, magasabb erőműhatásfokkal, magasabb hűtőközeg-entalpiainövekedéssel, kisebb hűtőközegárammal rendelkezik, és normál üzemben nem léphet fel forráskρίζis. Az SCWR-nek hátrányos tulajdonságai is vannak (pl. egykörös felépítés, aminek következtében a hűtőközeg direkt érintkezik a turbinával; hűtőközegvesztéses üzemzavar esetén gyorsabb kiszáradás), amelyek azonban megfelelő fejlesztéssel mérsékelhetők, illetve teljesen kiküszöbölhetők. Az SCWR az aktív zóna kialakításától függően termikus- és gyorsneutron-spektrumú is lehet.

Szuperkritikus nyomású vízhűtésű reaktorokkal már az 1950-es és 60-as években is foglalkoztak ([Oka2000]). A 70-es és 80-as években kissé visszaesett irántuk az érdeklődés, a 90-es években azonban új japán ([Oka1998]) és orosz ([Silin1993]) koncepciók jelentek meg: a Tokiói Egyetemen egy ilyen reaktortípusnak a termikus és gyors aktív zónás megvalósítását is tanulmányozták, ezzel párhuzamosan az orosz Kurcsatov Intézetben kifejlesztették a B-500 SKDI-t. E kutatások alapján az SCWR-ekben rejlő lehetőségeket több más ország is felismerte:

- Európában konzorcium alakult a High Performance Light Water Reactor (HPLWR, [Schulenberg2007]) kifejlesztésére;
- az USA-ban 2001-2004 között készült megvalósíthatósági tanulmány ([MacDonald2004]);
- a dél-koreai SCWR-kutatás 2002-ben indult ([Bae2007]);
- végül a kanadai CANDU esetében magától értetődő a szuperkritikus nyomásra való továbbfejlesztés ([Torgerson2006]).

Egy tipikus SCWR aktív zónájában jelenlévő szuperkritikus nyomású víz két funkciót lát el: hűti az üzemanyag-kazettákat és lassítja a neutronokat (moderál). Eközben sűrűsége nagyon jelentősen változik (ugyanakkor fázisátalakulás nem lép fel): a körülbelül 220 °C-os melegedés során (280°C-ról 500°C-ra) közelítőleg a tizedére (0,77 g/cm³-ről 0,08 g/cm³-re) csökken. Ennek következtében egy lokális hőmérséklet-, sűrűség- és teljesítmény-ingadozásra hajlamos rendszer alakul ki. Tovább növeli ezt az ingadozási hajlamot az a körülmény, hogy a szuperkritikus víz sűrűsége 372 és 392°C között drasztikusan változik (ezt a jelenséget pszeudokritikus átalakulásnak is nevezik, [Pioro2007]).

A BME Nukleáris Technikai Intézetében az SCWR-ekhez kapcsolódó kutatások 2005-ben indultak reaktorfizikai és termohidraulikai területeken. Az Európai Unió 6. keretprogramja részeként 2006-ban indult HPLWR Phase 2 projekthez az NTI is csatlakozott.

Célkitűzések

Az előbbieket követően a SCWR-ek tanulmányozásához csatolt neutronfizikai-termohidraulikai programrendszerre van szükség. A doktori munka elsődleges célja egy ilyen programrendszer létrehozása volt, amely alkalmas tetszőleges reaktor - pl. az európai háromutas HPLWR - stacionárius egyensúlyi állapotának (teljesítmény- és hőmérsékleteloszlás) a meghatározására, illetve kiégenszámítására. A munka során nagyszámú számítást kellett elvégezni, ezért olyan módszereket kerestem, amelyekkel gyorsan és hatékonyan lehetett akár teljes zónák számítását is elvégezni.

A legtöbb SCWR-konceptió aktív zónájának hossza meghaladja a 4 métert, ennek következtében instabil térbeli xenonlengések ([Csom2005]) is kialakulhatnak. A sűrűség- és teljesítmény-ingadozás az előbbi mechanizmussal kölcsönhatva a mai reaktorokban megszokott dinamikai folyamatoktól jelentősen eltérő lehet. Az előbb említett programrendszer módosításával célul tűztem ki a xenonlengéssel összefüggő jelenségek feltérképezését is.

A HPLWR és az irodalomban található egyéb SCWR-konstrukciók megvalósítása – összehasonlítva a mai kommerciális könnyűvízes reaktorokéval – meglehetősen bonyolult. A bonyolultság elsősorban a neutronok megfelelő moderáltságának biztosításából fakad, pl. a HPLWR-ben ezt az úgynevezett moderátor boxszal ([Hofmeister2007]) érik el. Ehhez viszont bonyolult hűtőközeg áramlási útvonalra van szükség. Az egyszerűséget szem előtt tartva célul tűztem ki olyan új kazettkonstrukciók megtervezését, amelyek egyszerűbb hűtőközeg-áramlási útvonallal rendelkeznek, ugyanakkor a bevezetőben említett szempontokat is kielégítik, melyek egyik legfontosabb eleme az üzemanyag jobb hasznosítása.

Vizsgálati módszerek

A kutatás során egy saját fejlesztésű csatolt neutronfizikai-termohidraulikai programrendszert használtam. A program alapja az a megfigyelés volt, hogy a hűtőközeg aktív zónán való áthaladásához szükséges idő jóval kisebb, mint a kiégés során használt időlépés. Így minden kiégési lépés előtt először meghatároztam a stacionárius hőmérséklet- és teljesítmény-eloszlásokat. Ezután következett a kiégenszámítás a megfelelő időlépéssel, melynek eredményeképp megváltozott a rendszer anyagi összetétele. Utóbbi következtében változtak a mikroszkópikus hatáskeresztmetszetek, továbbá a teljesítmény-eloszlás is, tehát újra ki kellett számolni a stacionárius eloszlásokat. Ezt addig ismételtam, amíg el nem értem a kívánt kiégési szintet.

A programot modulárisan építettem fel, ami lehetővé tette különböző típusú problémák gyors és hatékony megoldását. A két fő modul a reaktorfizikai és a termohidraulikai modul volt. A reaktorfizikai modulon belül a részletes háromdimenziós számításokhoz elsősorban az MCNP-t ([Briesmeister2000]), míg a kiterjedtebb geometriák elemzéséhez a SCALE programcsomagot ([ORNL2009]) használtam. Utóbbihoz kifejlesztettem egy hatáskeresztmetszet-homogenizálási eljárást is, amivel nagymértékben csökkentettem a felhasznált számítógépi időt. A termohidraulikai modulon belül egy egycsatornás kódot használtam, amely az energia- és tömegmaradás egyenleteit használta.

A xenonlengés elképzelhető úgy is, mint a kiégenszámítás egy speciális esete, mivel az idő folyamán itt is változik az anyagi összetétel. Ugyanakkor a xenon bomlási sorában

található izotópok rövid felezési ideje miatt más izotópok koncentráció-változását el lehet hanyagolni. Tehát a programba implementáltam a xenonlengések számításához szükséges differenciálegyenleteket is.

Irodalmi hivatkozások listája

[Bae2007] Bae K-M., Joo H-K., Bae Y-Y. (2007), *Conceptual design of a 1400MWe Supercritical Water Cooled Reactor core with a cruciform type U/Zr solid moderator*, Proceedings of ICAPP '07, Nice, May 13-18

[Briesmeister2000] Briesmeister J.F. (2000), *MCNPTM – a general Monte Carlo n-particle transport code*, LA-13709-M

[Csom2005] Csom Gy. (2005), *Atomerőművek üzemtana II/I. kötet*, Műegyetemi Kiadó

[Fischer2009] Fischer K., Schulenberg T., Laurien E. (2009), *Design of a supercritical water-cooled reactor with three-pass core arrangement*, Nucl. Eng. Des. 239, pp. 800-812.

[GIF2002] Generation IV International Forum (2002), *A technology roadmap for Generation IV nuclear energy systems*

[Hofmeister2007] Hofmeister J., Waata C., Starflinger J., Schulenberg T. (2007), *Fuel assembly design study for a reactor with supercritical water*, Nucl. Eng. Des. 237, pp. 1513-1521.

[MacDonald2004] MacDonald P., Buongiorno J., Sterbentz J.W., Davis C., Witt R. (2004), *Feasibility study of Supercritical Water Cooled Reactors for electric power production*, Final Report, INEEL/EXT-04-02530

[Oka1998] Oka Y., Koshizuka S. (1998), *Conceptual design study of advanced power reactors*, Prog. Nucl. Energy 32, pp. 163-177.

[Oka2000] Oka Y. (2000), *Review of high temperature water and steam cooled reactor concepts*, 1st International Symposium on Supercritical Water-cooled Reactors, Tokyo, November 6-9

[ORNL2009] Oak Ridge National Laboratory (2009), *SCALE: A modular code system for performing standardized computer analyses for licensing evaluation*, ORNL/TM-2005/39, Version 6, Vols. I-III

[Pioro2007] Pioro I.L., Duffey R.B. (2007), *Heat transfer and hydraulic resistance at supercritical pressures in power-engineering applications*, ASME Press

[Schulenberg2007] Schulenberg T., Starflinger J. (2007), *Core design concepts for the High Performance Light Water Reactors*, Nuclear Engineering and Technology 39, pp. 249-256.

[Silin1993] Silin V. A., Voznesensky V.A., Afrov A.M. (1993), *The Light Water Integral Reactor with natural circulation of the coolant at supercritical pressure B-500 SKDI*, Nucl. Eng. Des. 144, pp. 327-336.

[Torgerson 2006] Torgerson D.F., Basma A., Shalaby A., Simon Pang (2006), *CANDU technology for Generation III+ and IV reactors*, Nucl. Eng. Des. 236, pp. 1565-1572.

Új tudományos eredmények

- 1. Tézis:** SCWR-ek elemzésére alkalmas, moduláris felépítésű csatolt neutronfizikai-termohidraulikai (CsNT) programrendszert hoztam létre. A neutronfizikai modulban a pálcá- és a kazettaszintű számításokhoz a széles körben elterjedt és sokrétűen tesztelt MCNP és SCALE kódokat használtam. A SCALE-en alapuló számítások felgyorsítására új hatáskeresztmetszet-homogenizálási eljárást fejlesztettem ki, mivel a hagyományos könnyűvízes reaktorok számítása során alkalmazott módszerek a valóságostól jelentősen eltérő neutronfluxus-eloszlást szolgáltatottak. Az eljárást implementáltam a CsNT programrendszerbe, ezzel lehetővé téve SCWR zónák gyors optimalizációját és kiégésszámítását (utóbbi egy speciális esete a xenonlengés). [1] [3] [4] [6]
- 2. Tézis:** Az egyhuzamú és a háromhuzamú SCWR-ben (PWR-SC és HPLWR) kialakuló migrációs hosszak közelítő kiszámítása és a reaktorok méreteivel való összevetése alapján megállapítottam, hogy ezek a reaktorok első közelítésben stabilak a xenonlengésekkel szemben. Részletes számítások alapján elsőként mutattam ki, hogy az üzemanyag negatív hőmérsékleti reaktivitástényezője (Doppler-tényező) a meghatározó a HPLWR reaktor stabilizálásában. Ezzel szemben a hűtőközeg felmelegedéséből adódó jelentős sűrűség csökkenésének és a migrációs hossz ezzel együtt járó növekedésének csak másodlagos szerepe van. Bebizonyítottam, hogy hasonló felépítésű, de UO_2 helyett $(\text{Th}-^{233}\text{U})\text{O}_2$ üzemanyaggal szerelt reaktorok a hasadási termékek (^{135}I , ^{135}Xe) kedvezőbb hozamarányának köszönhetően még stabilabbak a xenonlengésekkel szemben. [4]
- 3. Tézis:** Csatolt reaktorfizikai-termohidraulikai számításokat végeztem $\text{ZrH}_{1.6}$ extra moderátort tartalmazó, UO_2 üzemanyagú, egyszerű hűtőközeg áramlási útvonallal rendelkező SCWR-kazettára. A hűtőközeg felmelegedése miatti axiális sűrűség- és moderáltság-csökkenést – amely effektusok tipikusak az SCWR-ekre - az üzemanyagrudak ZrH -pálcákkal való fokozatos helyettesítésével kompenzáltam. Meghatároztam egy ilyen kazettákból álló friss zóna kezdeti optimális összetételét minimalizálva a radiális és az axiális teljesítmény-egyenlőtlenégeket. A zóna kiégésszámítása során azonosítottam az új koncepció gyenge pontjait és javaslatokat adtam ezek megoldására. [2] [3]
- 4. Tézis:** Elsőként vizsgáltam meg $(\text{Th}-^{233}\text{U})\text{O}_2$ üzemanyaggal szerelt SCWR-kazetta neutronfizikai tulajdonságait, amely elemzés elsődleges célja annak bizonyítása volt, hogy e reaktortípussal egyidejűleg biztosítható a hasadóanyag újratermelése és a pozitív reaktivitástartalék. Kimutattam, hogy az elegendően hosszú üzemanyagciklus és a megfelelően magas konverziós tényező eléréséhez a kazetta kéthuzamú elrendezése szükséges. Ennek érdekében optimalizáltam a kazetta különböző

régióinak rácsosztását, az üzemanyagpálcák átmérőjét és dúsítását. A kétdimenziós számítások alapján lefektettem az optimális kazettaméreteket. [5]

5. Tézis: A $(\text{Th-}^{233}\text{U})\text{O}_2$ üzemanyaggal szerelt, kéthuzamú, optimalizált geometriájú SCWR-kazettára háromdimenziós csatolt neutronfizikai-termohidraulikai számításokat végeztem el. Az eredmények elemzésével arra a következtetésre jutottam, hogy a $(\text{Th-}^{233}\text{U})\text{O}_2$ az SCWR-ek természetes üzemanyaga, melynek legfőbb bizonyítéka, hogy a kéthuzamú kazettában nincs szükség extra moderátorra. Az üzemanyag dúsításának és a kiégő méreg arányának optimalizálása után számításokkal igazoltam, hogy a rendszer körülbelül 40.0 MWnap/kg-ig önfenntartó a hasadóanyag szempontjából. A reaktivitás tényezőket is meghatároztam ezzel bizonyítva, hogy egy ilyen típusú SCWR kielégíti az inherens reaktorbiztonság feltételét. [1] [5]

A tézispontokhoz kapcsolódó angol nyelvű referált folyóiratcikkek

- [1] Reiss T., Fehér S., Czifrus Sz. (2008), *Coupled neutronics and thermohydraulics calculations with burn-up for HPLWRs*, Prog. Nucl. Energy 50, pp. 52-61.
- [2] Reiss T., Csom Gy., Fehér S., Czifrus Sz. (2010), *The Simplified Supercritical Water-Cooled Reactor (SSCWR), a new SCWR design*, Prog. Nucl. Energy 52, pp. 177-189.
- [3] Reiss T., Csom Gy., Fehér S., Czifrus Sz., Szieberth M. (2010), *Full-core SSCWR calculations applying a fast computational method*, Prog. Nucl. Energy 52, pp. 767-776.
- [4] Reiss T., Fehér S., Czifrus Sz. (2011), *Xenon oscillations in SCWRs*, Prog. Nucl. Energy 53, pp. 457-462.
- [5] Reiss T., Csom Gy., Fehér S., Czifrus Sz. (javított verzió beküldve 2011. június 23-án), *Thorium as an alternative fuel for SCWRs*, Ann. Nucl. Energy

A tézispontokhoz kapcsolódó magyar nyelvű folyóiratcikkek

- [6] Reiss T., Czifrus Sz., Fehér S. (2008), *A HPLWR tanulmányozásához használt csatolt neutronfizikai-termohidraulikai programrendszer továbbfejlesztése*, NUKLEON I/1.
- [7] Reiss T., Horváth D., Fehér S., Czifrus Sz. (2007), *Csatolt neutronfizikai-termohidraulikai számítások a HPLWR reaktor axiális teljesítmény-eloszlásának meghatározására*, Magyar Energetika 2007/5.

További tudományos közlemények

- [8] Reiss T., Horváth D., Fehér S., Czifrus Sz. (2006), *Csatolt neutronfizikai-termohidraulikai számítások a HPLWR reaktor axiális teljesítmény-eloszlásának meghatározására*, 5th Symposium of Nuclear Techniques, Paks, November 30 - December 1
- [9] Reiss T., Dr. Czifrus Sz., Dr. Fehér S. (2007), *Coupled neutronics and thermohydraulics analysis for the optimization of the axial enrichment profile of HPLWRs*, International Youth Conference on Energetics, Budapest, Mai 31 - June 2
- [10] Reiss T., Fehér S., Czifrus Sz. (2007), *A HPLWR tanulmányozásához használt csatolt neutronfizikai-termohidraulikai programrendszer továbbfejlesztése*, 6th Symposium of Nuclear Techniques, Budapest, November 29-30
- [11] Reiss T. (2008), *A coupled neutronics-thermohydraulic program system for steady state analysis of HPLWRs*, International Students' Workshop on High Performance Light Water Reactors, Karlsruhe, March 31 - April 3
- [12] Reiss T., Fehér S., Czifrus Sz. (2009), *Calculation of xenon-oscillations in the HPLWR*, 4th International Symposium on Supercritical Water-Cooled Reactors, Heidelberg, March 8-11
- [13] Reiss T., Fehér S., Czifrus Sz. (2009), *Calculation of xenon-oscillations in the HPLWR*, ICAPP'09, Tokyo, Mai 10-14

[14] Reiss T. (2010), *Coupled neutronics – thermal-hydraulics programs for SCWRs*, 4th ENEN PhD Event 2010 (European Nuclear Conference 2010), Barcelona, June 2

[15] Prezentációk, kutatási (rész)jelentések a HPLWR Phase 2 projektben, szerződés száma: FI6O-036230

[16] Prezentációk, kutatási (rész)jelentések a NUKENERG NAP projektben, Szerződés száma: DMFB00719/2005

[17] Szerző, társszerző BME-NTI kutatási jelentésekben: 372/2006, 439/2008, 449/2008, 495/2009, 541/2010.

Köszönetnyilvánítás

A doktori munkámat segítette Dr. Fehér Sándor és Dr. Czifrus Szabolcs. A ZrH extra moderátorú, illetve a (Th-²³³U)O₂ üzemanyagú SCWR kazetták elemzésében szorosan együttműködtem Dr. Csom Gyulával. Tanácsaikat és támogatásukat ezúton is köszönöm.