

kritikus pontban a két érték közötti ugyan-csak a rendszer méretétől független értékhez tartanak. Ezekből a számításokból lehet meghatározni az ún. skálafüggvényt, illetve ennek következtében a lokalizációs hossz-nak a kritikus ponthoz közelítő divergenci-áját leíró hatványfüggvény kitevőjét.

Kissé misztikus, hogy a numerikus szimulációk miért vezetnek viszonylag nagy pontossággal három különböző értékhez, ezek miért csökkennek a Dyson-index növe-lésével, illetve miért térnek el olyan nagymér-tékben a kísérletileg a fázis átalakulások sok-szor tapasztalható egységnyi értéktől.

E számunk szerzői

DR. ABONYI IVÁN, a fizikai tu-dományok kandidátusa, Budapest; ÁDÁM PÉTER fizikus, PhD, MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Kvantumoptikai és Kvantumin-formatikai Osztály, Budapest; DR. CSEH JÓZSEF fizikus, az MTA doktora, tudományos tanácsadó, MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen; DR. CSEHI ANDRÁS fizi-kus, ELI Elméleti és Számítógépes Molekulaszerkezet és Dinamikai Csoport, a Debreceni Egyetem Elméleti Fizikai Tanszék egyetemi adjunktusa, Debrecen; DR. DOMO-KOS PÉTER akadémikus, MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest; DR. GADÓ JÁNOS, az MTA doktora, MTA Energiatudományi Kutatóközpont, professor emeritus, a V4G4 Centre of Excel-lence elnöke, Budapest; DR. HOR-VÁTH DEZSŐ, MTA Wigner FK, Budapest és MTA Atomki, Debrecen; DR. HALÁSZ GÁBOR fizikus,

egyetemi tanár, Debreceni Egyetem In-formációtechnológiai Tanszék, Debrecen; DR. HÓZER ZOLTÁN, MTA doktora, MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest; DR. KISS TAMÁS fizikus, PhD, MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Kvantumoptikai és Kvantuminformatikai Osztály, Budapest; DR. KONIORCZYK MÁTYÁS fizikus, PhD, Pécsi Tudomá-nyegyetem Természettudományi Kar, Alkal-mazott Matematika Tanszék, Pécs; DR. PALÁGYI GYÖRGYNÉ tanár, Budapest-Fasori Evangélikus Gimnázium; DR. RADNAI GYULA fizikus, ELTE Fizikai Intézet, Anyagfizikai Tanszék, Budapest; DR. SOLT GYÖRGY elméleti fizikus, Zug, Svájc; DR. SÓLYOM JENŐ akadá-mikus, professor emeritus, ELTE–MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest; DR. VARGA IMRE egyetemi docens, BME Elméleti Fizika Tanszék, Buda-pest; DR. VIBÓK ÁGNES fizikus, az ELI Elméleti és Számítógépes Molekulaszerkezet és Dinamikai Csoport vezetője, a Debreceni Egyetem Elméleti Fizikai Tanszék egyetemi tanára, Debrecen;

Decemberi számunkból

Hérincs Dávid: Tíz hurrikán egyhu-zamban

Szabados László: Galaxishalmazok faggatása. Miről árulkodik a galaxisok közötti térség vastartalma?

Varga Péter: Legrégibbi ismertnek vélt földrengésünk: Savaria, 455

Pátkai Zsolt: 2017 nyarának időjárása

Szabad János: Miként ketyeg a belső óra? Fiziológiai és orvostudományi Nobel-díj 2017

Venetianer Pál: Modellszervezetek a biológiában

GADÓ JÁNOS

Negyedik generációs gázhűtésű gyorsreaktor

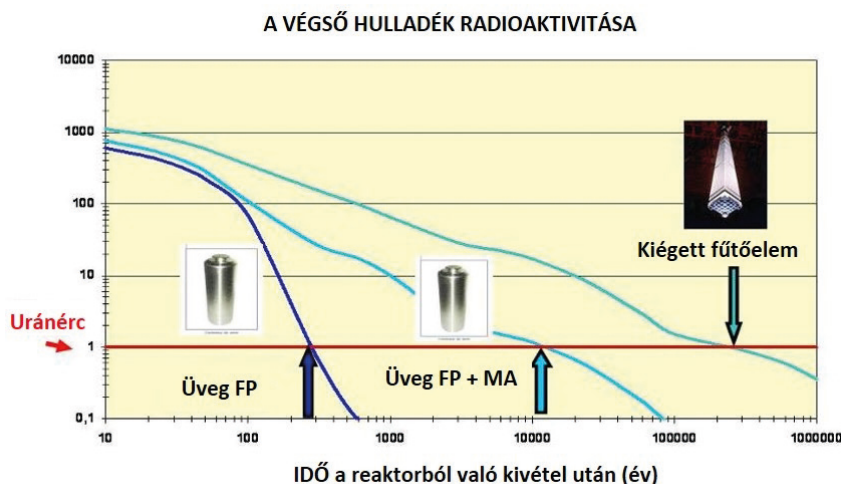
Magyar kutatók egy csoportja, nemzetközi projekt keretében, több éve foglalkozik az ALLEGRO gázhűtésű gyorsreaktor fejlesztésével. A cikk először a gyorsreaktor fejlesztés általános céljait és a fejlesztés jelenlegi nemzetközi helyzetét tárgyalja, majd bemutatja a gázhűtésű gyorsreaktor specifikumait, az ALLEGRO projekt kereteit és a projekt aktuális helyzetét.

Új technológia

Az atomreaktorok köztudomásúan a maghasadáson alapuló, szabályozott lánreakcióban keletkező energiát hasznosítják. Az

atomerőművek kezdetektől fogva egészen a mai napig és a közeljövőben is olyan módon működnek, hogy a maghasadásban keletkező 1-10 MeV energiájú ún. gyors neutronokat a reaktorban lelassítják 0-1 eV ún. termikus energiára, ahol a neutronok igen jó eséllyel újabb maghasadásokat keltenek. Ezeket a reaktorokat termikus reaktoroknak nevezzük. A neutronokat lassító közeg lehet grafit, vagy egyszerűen víz, ami egyben a reaktor hűtőközegül is szolgál. A hűtőközeg felmelegedése révén hasznosul a maghasadásban keletkező energia, és a keletkező gőz azután a hőerőművekben szokásos turbinákon és generátorokon keresztül villamosenergia termelést teszi lehetővé.

Már a reaktorok fejlesztésének legke-zetibb szakaszán felismerték, hogy a termikus reaktorok mellett kifejleszthetők lehetnek olyan ún. gyorsreaktorok is, amelyek a gyors neutronokat közvetlenül használják újabb maghasadások keltésére. Ebben az esetben természetesen a neutronok lassítása elkerülendő, viszont megfelelő hűtőközegekről mindenképpen gondoskodni kell. Mivel a kis tömegszámú atommagok (elsősorban a hidrogén) erősen lassítják a neutronokat, ezért a hűtőközeg csak viszonylag magas tömegszámú atommagokat tartalmazó anyag lehet, amelynek termodinamikai tulajdonságai (pl. olvadáspont, forráspont, hőkapacitás) megfelelőek. Így csak kevés anyag jön szóba, gya-



1. ábra. A nagyaktivitású hulladék bomlásának időfüggése

korlatilag a nátrium és az ólom. Lényegesen eltérő hűtőközeg lehet az arra alkalmas gáz is (pl. a hélium, amelynek kis tömegszáma a kis sűrűség miatt nem okoz lassítási problémát).

A gyorsreaktorok kifejlesztése, mint látni fogjuk, nagyon sok olyan műszaki probléma megoldását igényli, amelyek a termikus reaktorok esetében nem léteznek. Ugyanakkor a gyorsreaktoroknak van egy igen nagy előnyük, nevezetesen az, hogy alkalmasak a termikus reaktorokban keletkező nagyaktivitású hulladék elégetésére és reaktorokban hasznosítható hasadó anyagok létrehozására. Ennek az az oka, hogy az 1-10 MeV-es energiatartományban a transzurán izotópok neutronos magreakciókra való hajlama (hatáskereszmetszete) egészen más, mint termikus energiákon.

E célok eléréséhez alapvetően szükséges a reprocesszáló berendezés. Ebben a berendezésben a reaktorok fűtőelemeit, amelyek a hasadóanyagot és a nagyaktivitású hulladék (azaz a továbbiakban nem hasznosítható anyagok) zömét tartalmazzák, kémiai módszerekkel alkotóelemeire lehet bontani és az egyes anyagokat egymástól elkülönítve lehet kinyerni. A reprocesszáló berendezés eredeti célja a reaktorokban termelt plutónium, az ideális atombomba-alapanyag kinyerése volt. Emiatt az eddig használt reprocesszáló berendezések biztonsági szempontból rendkívül veszélyesek. Jelenleg folyik egy olyan kémiai eljárás kifejlesztése, amelynek eredményeképpen a plutónium és az urán együtt válna ki, ami ezt a veszélyt nagymértékben csökkenti vagy megszünteti. Persze, a reprocesszáló berendezések nem csak sugárvédelmi, de kémiai szempontból is veszélyesek. Ezt a veszélyt a pirótechnikai módszer alkalmazása a nedves eljárás helyett jórészt kiküszöböli.

A plutónium és az urán leválasztása után visszamaradó nagyaktivitású anyag nem teljes mértékben tekintendő hulladéknak, mert abban még hasadó transzurán izotópok (neptúnium, amerícium, kúrium izotópok) is találhatóak. A nagyaktivitású anyag hosszú távon sem lebomló részét éppen a kúrium izotópok dominálják. A transzurán izotópok leválasztásának módszere ma még kísérleti stádiumban van, de ez bizonyosan megvalósítható.

Ha sikerül egy olyan megbízható és kevésbé veszélyes reprocesszálási eljárást kidolgozni, amelynek eredményeképpen az urán, plutónium és a transzurán izotópok kinyerhetőek, akkor a maradék anyag hosszú távú aktivitása drámai módon csökken, és a nagyaktivitású hulladék aktivitása százezer év helyett néhány száz év alatt visszaesik a természetben található uránérc aktivitásának szintjére, amint azt az 1. ábra mutatja (FP: hasadási termékek, MA: transzurán izotópok).

A reprocesszálás során kinyert plutóniumot természetesen nem csak atombombában lehet felhasználni, hanem termikus reaktorokban is. Igen gyakori (elsősorban Európában), hogy a fűtőelemek alapanyaga az UO_2 helyett az $U-PuO_2$ vegyes oxid (MOX). Így megvalósulhat az újrahasznosítás. Ameddig azonban erre termikus reaktorokban kerül sor, addig csak egyszeri újrahasznosításról beszélhetünk, mert az ismételt reprocesszálás értelmetlenné válik. Ennek az az oka, hogy termikus reaktorokban nagyon lényeges a plutónium izotóp-összetétele. A 239, 240, 241 és 242 tömegszámú plutónium-izotópok maghasadásra való hajlama erősen eltérő, és az összetétel a termikus reaktorokban való ismételt felhasználás során rohamosan kedvezőtlené válik.

Nem ez a helyzet gyorsreaktorokban, ahol a plutónium izotóp-összetétele gyakorlatilag változatlan marad. Ha a gyorsreaktorban az $U-PuO_2$ üzemanyagot uránnal vesszük körül, akkor elérhető, hogy a gyorsreaktor üzeme során legalább annyi hasadóanyag keletkezzék, mint amennyit a reaktor az energiatermeléshez elfogyaszt (ez persze a veszteségek miatt nem perpetuum mobile). Tekintettel arra, hogy a világ uránkészletei végesek, és gazdaságos kitermelésük belátható időn belül (a mostani becslések szerint mintegy 250 év múlva) véget ér, az atomenergia hosszú távú használatához a gyorsreaktorok kifejlesztése és alkalmazása elengedhetetlen.

A gyorsreaktorok alkalmasak lesznek a transzurán izotópok elégetésére is. Összességében tehát a gyorsreaktorok (megfelelő reprocesszálási eljárás felhasználásával) lehetővé teszik az atomreaktorokban keletkező nagyaktivitású hulladék radikálisan gyorsabb lebomlását, egyszerűsítik az atomenergia fenntartható használatát.

Hogy áll a gyorsreaktorok fejlesztése?

Joggal kérdezhető, hogy ha a gyorsreaktorok használata ilyen sok előnnyel jár, akkor miért nem kerültek már nagy számban üzembe. Ennek két oka van: a reaktor megvalósításának műszaki problémái és a reprocesszállással járó műszaki és biztonsági problémák. 2017. júniusában az oroszországi Jekatyerinburgban került sor a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség 3. gyorsreaktor-világkonferenciájára, ami jó alkalmat adott az aktuális helyzet értékelésére.

Az elmúlt évtizedekben megépült néhány gyorsreaktor. A Szovjetunióban (Kazahsztánban), Franciaországban és Japánban épült gyorsreaktorok működése eléggé dicstelenül ért véget, de Oroszország, India és Kína épített újabb gyorsreaktorokat. Mindezek a reaktorok (a szovjet atomtengeraltjárók reaktorait leszámítva) nátriumhűtésűek voltak. A nátriumhűtés két jelentős kockázattal jár. Az egyik az, hogy az erőműben végső soron gőzt kell fejleszteni, azaz szükségképpen van benne egy nátrium-víz hőcserélő, amelynek két közege még rendkívüli helyzetben sem érintkezhet egymással, mert bekövetkezik a nátriumtűz (a középiskolai kémiaórákon ezt mindenki számára szemléltették). A másik problémát az okozza, hogy a reaktorok ún. üregtényezője (azaz annak hatása a reaktor kritikusságára, ha a nátrium helyére levegő kerülne) pozitív, ami pozitív visszacsatolásra vezethet és biztonsági szempontból csak megfelelő egyéb hatások egyidejű fellépésének biztosítá-

sával engedhető meg. (Talán felesleges emlékeztetni arra, hogy hasonló probléma okozta a csernobili balesetet.) Az ólomhűtés termodynamikailag valamivel kedvezőtlenebb, de égésveszély nincs és az üregtényező is kedvezőbb (de pozitív), alapvetően azonban meghatározó a folyékony ólom erősen korrozív tulajdonsága. Elmondható, hogy a gyorsreaktorok fejlesztésének egyik kulcsa a megfelelő szerkezeti anyagok kikísérletezése (ugyanúgy, mint a szabályozott termionukleáris fűző esetében).

A gyorsreaktorokra vonatkozó kutatás-fejlesztés az atomenergetika fontos célkitűzése. Az atomerőművek eddigi három generációját (az üzemeltetésből már kivont első generációs reaktorokat, a viszonylag régebben épült, de ma is sikeresen működő második generációs reaktorokat, ahová a paksi atomerőmű működő blokkjai tartoznak, továbbá a jelenleg épülő harmadik generációs reaktorokat, pl. a leendő paksi blokkokat) az atomerőművek negyedik nemzedéke fogja követni. E negyedik generáció legfontosabb elemei lesznek a gyorsreaktorok.



2. ábra. A BN-800 reaktorblokk képe

Ma Oroszország vezető szerepet játszik a gyorsreaktorok fejlesztésében: zavartalanul működik a BN-600 és BN-800 (2. ábra) nátriumhűtésű gyorsreaktoros atomerőművi blokk (a nevükben szereplő szám a reaktor villamos teljesítményét adja meg MW egységekben), és meg fog épülni a hasonló BN-1200, a későbbi széria első darabja is. Ugyancsak eldöntötték, hogy megépítik a BRESZT-300 ólomhűtésű gyorsreaktor prototípust, és foglalkoznak a korábban az atomtengeralattjárókban használt kb. 100 MW-os ólom-bizmut hűtésű gyorsreaktor alkalmazásával is a villamosenergia-hálózatától távoli területeken. Oroszország mel-

lett jelentős a fejlődés Indiában és Kínában, továbbá fejlesztések folynak Koreában, Japánban és Franciaországban. Feltűnő az Európai Unió elmaradása, ami az idő folyamán egyre nő, míg az Egyesült Államok hosszú évtizedek óta eleve távol tartja magát a gyorsreaktorok fejlesztésétől és a polgári célú reprocesszálástól.

A műszaki problémákon túl két tényező hátráltatja a gyorsreaktorok fejlesztését. Az egyik a gáz- és olajárak jelenlegi alacsony szintje, amely az atomerőművek építését viszonylag gazdaságtalanná teszi, főképp az Egyesült Államokban. Nehéz megjósolni a 10-20-30 év múlva előálló gazdasági világhelyzetet, de a jelenlegi helyzet az atomenergetika szempontjából biztosan kedvezőtlen. Gyorsreaktorok építése további nagy anyagi kockázatot jelent, mint általában minden újdonságé, ráadásul reprocesszálás nélküli, pusztán energiatermelésre való használatuk bizonyosan gazdaságtalan lenne.

Ha feltételezzük, hogy sikerül kifejleszteni a reprocesszálás biztonságos módszerét, akkor is kérdéses, hogy hogyan lehetne optimalizálni a termikus- és gyors-

elem-gyárral, avagy a telepen mondjuk csak gyorsreaktorok, reprocesszáló berendezés és fűtőelem-gyár működjön és a kiégett és friss fűtőelemeket más telepekről/telepekre kelljen szállítani (figyelembe véve a szállítás biztonsági és gazdasági hatásait).

Mindezen problémák ellenére, tekintettel a gyorsreaktorokban rejlő hatalmas lehetőségekre, a fejlesztés bizonyosan folytatódik. Nem lenne szerencsés, ha Oroszország és az ázsiai hatalmak annyira előretörnének e téren, hogy Európa teljesen kimaradna a fejlesztés fő irányából.

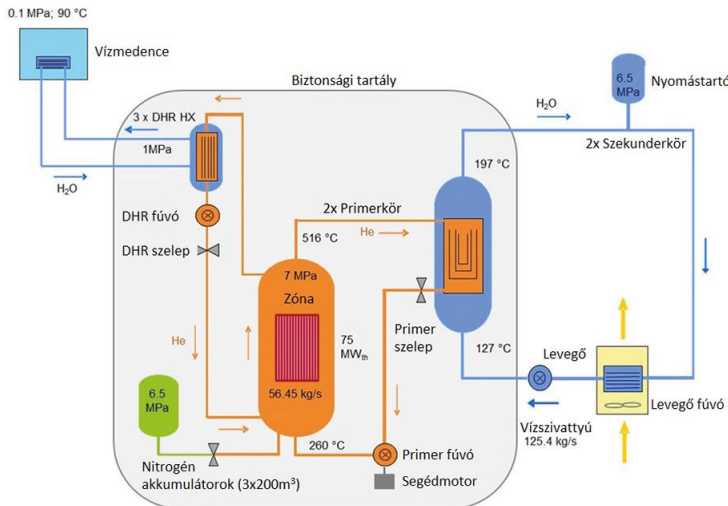
A gázhűtésű gyorsreaktor és az ALLEGRO projekt keretei

Mint említettük, már a reaktorfejlesztés kezdeti szakaszában felmerült gáz hűtőközeg alkalmazása. Erre nyilvánosan sor is került: a Nagy-Britanniában alkalmazott, saját fejlesztésű termikus erőművi reaktorok jó része CO₂-hűtésű. Annak idején fejlődésnek indult a magas hőmérsékletű héliumhűtésű reaktorok fejlesztése, elsősorban Németországban (ez manapság Kínában folytatódik) és Japánban. Egy gázhűtésű gyorsreaktor fejlesztését a franciák kezdeményezték. Több, itt nem részletezendő lépés után 2009-ben elkészült a francia CEA reaktor-konceptiója, amelyet azután a GoFastR elnevezésű európai projekt tovább finomított és így eljutottunk a ma referencia-konceptiónak nevezett elképzeléshez. E szerint a terv szerint megépíthető egy 2400 MW termikus teljesítményű héliumhűtésű gyorsreaktor, amelyet a villamosenergia termelése mellett magas hőmérsékletű (800-1000 °C) gáz előállítására is lehet majd használni. Várható a magas hőmérsékletű gáz kiterjedt ipari alkalmazása, pl. hidrogén-termelésre.

A létesítést azonban szokás szerint meg kell előznie egy ún. demonstrációs berendezés építésének, ami lehetővé teszi a technológia kipróbálását, valamint egy prototípus megépítésének, amelyen már gyakorlatilag üzemi körülmények között lehet majd igazolni a széria-blokkok biztonságos működését. A demonstrációs reaktort nevezzük ALLEGRO-nak.

Az ALLEGRO reaktor megépítése három célt szolgál:

- a gázhűtésű gyorsreaktor koncepció megvalósíthatóságának igazolását,
- a majdani gyorsreaktorokban alkalmazandó fűtőelemek működőképességének igazolását,
- a magas hőmérséklet eléréséhez és fenntartásához szükséges anyagok és technológia üzemszerű kipróbálását.



3. ábra. Az ALLEGRO reaktor működési sémája

2008-ban a CEA kezdeményezte, hogy a visegrádi országok kutatóintézetei vegyék kezükbe az ALLEGRO fejlesztését, mivel Franciaország kapacitásait leköti az ASTRID nátriumhűtésű gyorsreaktor és az ITER fejlesztése. Ennek nyomán az MTA Atomenergia Kutatóintézet (a mai MTA Energiatudományi Kutatóközpont jogelődje), a cseh ÚJV Řež a.s. és a szlovák VUJE a.s. vezetői szándéknyilatkozatot írtak alá az ALLEGRO fejlesztésének előkészítését célzó együttműködésről, amelyet a CEA tudásával támogat. A megállapodáshoz 2012-ben a lengyel NCBJ is csatlakozott. 2013-ban a négy kutatóintézet létrehozta a V4G4 Centre of Excellence Szlovákiában bejegyzett egyesülést, amelyhez a CEA társult tagként csatlakozott (V4G4: Visegrád 4 countries for Generation 4 reactors). Az előkészítő szakasz után 2015-ben elindult az ALLEGRO projekt első fázisa, amelynek célja az ALLEGRO reaktor koncepciótervének kidolgozása 2025-ig egy meghatározott Útiterv alapján. A munkába a V4G4 tagjain kívül a kutatóintézetek szakmai partnerei (így Magyarországon a NUBIKI Nukleáris Biztonsági Kutatóintézet Kft. és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nukleáris Technikai Intézete) is bekapcsolódtak. A magyar részvétel finanszírozása (2018-ig) a NKFIH által támogatott Nemzeti Nukleáris Kutatási Program keretében történik.

Amennyiben az ALLEGRO projekt első fázisa igazolja a reaktor megvalósíthatóságát, akkor 2025 után megkezdődhet a második fázis, amelynek során elkészül a reaktor műszaki és kivitelezési terve, megtörténik a reaktor építése és üzembe helyezése, végül 2035 körül elkezdődhet az üzemeltetés. A reaktor várhatóan Szlovákiában, a bohunicei (Apátszentmihály) atom-

erőmű területén épül majd meg. A második fázis mindegyik eleme természetesen csak az illetékes nukleáris biztonsági hatóság vonatkozó engedélyének birtokában kezdődhet meg. A második fázisban működő konzorciumban a kutatóintézetek már kisebb szerepet fognak játszani, a meghatározóak a tervező-kivitelező ipari cég és a majdani üzemeltető cég lesznek.

Az ALLEGRO projekt helyzete

Az ALLEGRO projekt előkészítő szakasza megállapította, hogy a referencia koncepció sok tekintetben elégtelen, ezért új koncepció kidolgozására van szükség. A 3. ábra mutatja az ALLEGRO reaktor referencia-koncepciójának megfelelő működési sémát.

E koncepció meghaladása a következő elemeket fogja tartalmazni.

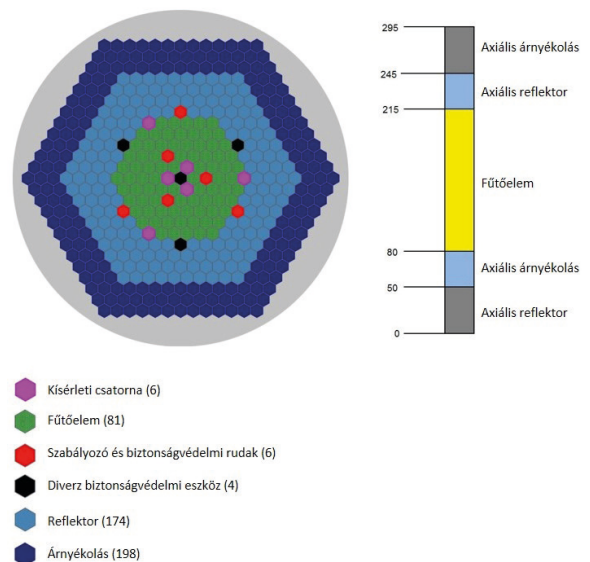
A reaktort első lépésben már kipróbált fűtőelemekből kell felépíteni (4. ábra). Ezek acél burkolatú UO_2 vagy MOX tablettákból álló pálcák. Ebben a reaktorban kell tesztelni a perspektivikus fűtőelemeket, amelyek burkolata SiC szálerősítésű SiC kompozit anyag, a tabletták pedig urán és plutónium tartalmú karbidból (UPuC) készülnek. A reaktor teljesítményét úgy kell

megválasztani, hogy a reaktor biztonságosan működtethető legyen az első lépésben is, ezért a reaktort a második lépésre tervezett 75 termikus MW helyett kisebb, most meghatározandó teljesítményen kell majd működtetni úgy, hogy a perspektivikus fűtőelemek besugárzását elegendően rövid idő alatt el lehessen végezni.

Gyakorlatilag ki kell zárnunk annak lehetőségét, hogy szükség esetén a szabályozó- és biztonságvédelmi abszorbensrudak ne essenek be a reaktorzónába, ezért a már most is kis valószínűségű esemény teljes kizárása érdekében alapvető természettörvények alapján automatikusan működő ún. diverz biztonságvédelmi eszközöket is ki kell fejleszteni.

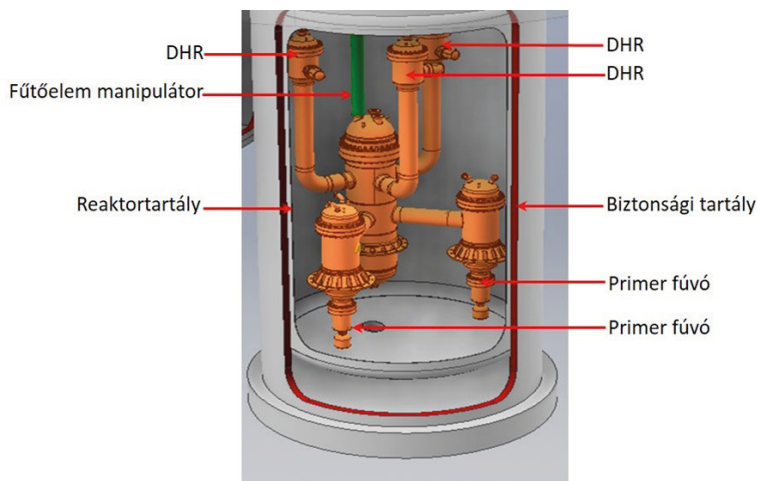
A reaktor primerkörében (5. ábra) mindenképpen biztosítani kell, hogy a kényszeráramlás megszűnése esetén mihamarabb meginduljon a természetes cirkuláció. Ebből a célból valószínűleg nitrogént kell befevesszük a rendszerbe, aminek részleteit ki kell dolgozni.

A reaktor leállását követően működésbe kell lépnie az ún. maradványhő-eltávolító rendszernek (DHR), hiszen a reaktorban a láncreakció leállítását követően is termelődik hő a radioaktív bomlások miatt. A referencia-koncepció aktív, azaz a reaktort működtető operátorok beavatkozásával, valamint villamos betáplálást igénylő áttéréssel számol, de mindenképpen ki kell dolgozni a passzív áttérés mikéntjét.



4. ábra. Az ALLEGRO reaktor aktív zónája

A referencia-koncepció hélium-víz hőcserélőt és vízzel feltöltött szekunderkört irányoz elő. Ezt el kell kerülni, részben a kritikuság szempontjából kockázatos vízbetörés kiküszöbölése céljából, részben azért, mert az alkalmazandó turbógenerátor



5. ábra. Az ALLEGRO felépítése

toros megoldás lehetővé teszi a primerköri kényszeráramoltatás csökkenő mértékű folytatását a reaktor leállítása után is.

A reaktor primerkörét körülvevő speciális biztonsági tartály feladata, hogy a primerköri hélium hűtőközeg elvesztése ellenére a nyomás olyan magas maradjon, hogy a kényszeráramoltatás folytatható legyen. A speciális biztonsági tartály ipariilag lehetséges legmagasabb nyomását meg kell határozni.

A reaktorban a zóna olvadását gyakorlatilag ki kell zárni. A reaktort olyan konténmenttel és zónaolvadékot felfogó rendszerrel kell ellátni, hogy még súlyos baleset bekövetkezése esetén se legyen szükség a reaktor 800 méteres körzetén kívül semmiféle rendkívüli egészségügyi intézkedésre.

Amint látható, a feladatok sora nem rövid, és ezek csak a koncepció átdolgozásával kapcsolatos feladatok. Ezekén túlme-

nően természetesen intenzíven kell foglalkozni olyan eleve ismert kérdésekkel, mint a hélium visszatartása vagy speciális mérőrendszer kidolgozása (ami a gáz átlátszósága miatt teljesen újszerű technikák bevezetését vetíti előre).

2018 végén látni fogjuk, hogy a fenti feladatok megvalósíthatóak-e, és pozitív esetben megkezdődhet a koncepció részleteinek kidolgozása. ▣

Irodalom

Az alábbi szakirodalmakból bővebb tájékoztatás nyerhető az egyes témákról.

Gyorsreaktorok: Status of Fast Reactor Research and Technology Development, IAEA-TECDOC-CD-1691, IAEA, Vienna, 2013

4. generációs atomreaktorok fejlesztése: Generation IV Nuclear Reactors, www.world-nuclear-org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx

Reprocesszálás: Spent Fuel Reprocessing Options, IAEA-TECDOC-1587, 2008

Becsült uránkészletek: Uranium 2016: Resources, Production and Demand, OECD 2016 NEA No. 7301 (<https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf>)

FR17 konferencia: Proceedings of the International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Ekaterinburg, 25-29 June, 2017, IAEA, Vienna

HÓZER ZOLTÁN

Atomerőművi fűtőelemek

Az első atommérnök, Wigner Jenő tervei megalapozták az atomenergetika fejlődését. A ma működő atomerőművek a közel hetven évvel ezelőtt lefektetett elveken üzemelnek, műszaki megoldásaik azonban jelentősen eltérnek az első reaktorokétól. Az atomerőmű egyik legfontosabb eleme a fűtőelem. Az alábbi írásban ennek jellemzőiről lesz szó néhány hazai kutatási eredménnyel illusztrálva.

Az atomerőművek üzemanyaga

Az atomerőművek reaktoraiban a maghasadások a fűtőelemekben mennek végbe. A fűtőelemek konstrukciója viszonylag egyszerű: az urán-dioxid tablettákat tartalmazó cirkónium csöveket záródugók-

kal hermetikusan lezárják és a tablettaszlop hőtágulását egy rugóval kompenzálják (1. ábra).

Az urán-dioxidot – azon túl, hogy megfelelő mennyiségű hasadóanyagot tartalmaz – számos egyéb tulajdonsága is alkalmazható arra, hogy több évig üzemeljen a reaktorban. Az UO_2 megőrzi geometriai méreteit, a hőmérséklet és a besugárzás csak kismértékű változásokat okoz a tablettá formájában és nagyságában. Hőtani jellemzői megakadályozzák, hogy üzemeltetés közben az üzemanyag megolvadjon, kémiaiailag összeférhető a burkolatanyaggal és a hűtőközeggel.

Az atomerőművi fűtőelemek burkolatát elsősorban azért készítik cirkónium-otvözetből, mert a cirkónium kis neutronbefogási hatáskeresztmetszettel rendelkezik, azaz gyakorlatilag átlátszó

a neutronok számára. További előnyös tulajdonsága, hogy nem lép intenzív kémiai kölcsönhatásba a tablettával és jó korrózióállóság jellemzi vizes közegben. A cirkónium-otvözeteknek megfelelő sugárállóságuk és a rozsdamentes acélokhoz hasonló mechanikai szilárdságuk van.

A fémcirkónium korrózió- és sugárállósága, valamint mechanikai tulajdonságai ötvöző elemek hozzáadásával optimalizálhatóak a reaktorokra jellemző körülményekre. A néhány tized, vagy 1–2%-ban hozzáadott ötvözők jelentősen ronthatják a fűtőelem reaktorfizikai tulajdonságait, ezért elsősorban olyan elemeket használnak ötvözőként, amelyeknek kicsi a neutronbefogási hatáskeresztmetszetük.

A nagy teljesítményen üzemelő atomerőművi reaktorokban több tízezer fűtőelem alkotja az aktív zónát. A fűtő-