
Veres Árpád

A HOSSZÚ ÉLETŰ NUKLEÁRIS HULLADÉKOK ÁTALAKÍTÁSA ÉS HASZNOSÍTÁSA

A sugárveszélyes (radioaktív) hulladékok hazai elhelyezésének egyes kérdései már a mesterséges radioaktív izotópok első hazai felhasználását követően felvetődtek. Hazánkban akkor még főleg rövid (néhány órás, napos) felezési idejű*, kis intenzitású és kevésbé veszélyes radioizotópokat használtak az orvosi, biológiai és mezőgazdasági alkalmazásokban. Az ipari radiográfia forrásai pedig főleg a 75 napos ^{192}Ir és az 5,3 éves felezési idejű ^{60}Co 1-5 Ci (50–200 GBq) nagyságrendű zárt sugárforrások voltak. Országosan erősen növekedett a sugárzó izotópok felhasználása, s 1958-ban megépült a kutató atomreaktor. Ekkor már felvetődött a sugárzó, veszélyes hulladékok biztonságos elhelyezésének igénye. 1969-től kísérletek folytak a hazai radioaktív hulladékmennyiség csökkentésére: hamvasztással, a radioaktív szennyvizek tisztítására bepárlással. Előtanulmány jelent meg kis és közepes aktivitású hulladékok elhelyezéséről föld alatti geológiai képződményekben. A keletkezett rövid és közepes felezési idejű sugárzó hulladékok biztonságos elhelyezésére Solymáron elkészült egy földbe süllyesztett, zárt tartályokból álló, ideiglenes hulladékgyűjtő, majd Püspökszilágyon épült hosszabb tárolásra alkalmas, ma is működő izotóptároló.

A hazai atomerőművek tervezésekor – mivel a kiégett fűtőelemek visszavételére a külföldi beruházó kötelezettséget vállalt – a fűtőelem-hulladékok elhelyezésére csak rövid távú pihentető tárolók tervei készültek. A kiégett fűtőelemek visszavételére vállalt kötelezettségek kapcsán azonban a mindkét országban előállt teljesen új helyzet miatt nehézségek merültek fel. Napirendre került a kiégett fűtőelemkötegek hosszabb távú tárolásának kérdése.

Az atomerőművek villamosenergia-termelése következtében óriási mennyiségű veszélyes hulladék (kiégett fűtőelemköteg, igen aktív alkatrész stb.) keletkezik. Ha a világ villamosenergia-előállításában a mai szintnek megfelelő

részeseledést tételezünk fel, több mint 250 ezer tonna kiégett fűtőelem-hulladékkal kell számolni, ami tekintélyes mennyiségű hasadási terméket, továbbá másodlagos (minor) aktinidákat és 2000 tonnánál több plutóniumot tartalmaz.

A nagy aktivitású hulladékokkal kapcsolatos társadalmi ellenérzés a sugárzó anyagok stabil, vagy rövid felezési idejű izotóppokká történő átalakítására irányította a figyelmet, s ami a spallációs fizika újjáéledéséhez is elvezetett. Ezt a törekvést támasztja alá az is, hogy a spallációs sugárforrások fejlesztésére, a kölcsönhatások kísérleti, elméleti tanulmányozására, gyakorlati teljesítőképességének meghatározására irányuló tanulmányok, szakkikkek száma ezres nagyságrendű, így ezeknek még vázlatos ismertetésére sem gondolhatunk. A felmerült problémák egyes részleteinek megoldási igényei közül ismertetünk azonban néhány igen lényegesnek vélt feladatot, különös figyelmet szentelve a megvalósíthatóságban lényeges szerepet játszó atommagmodellek fejlesztésének, mérés-technikák és a kísérleti berendezések terén elért újabb eredményeknek.

Egyik célunk tehát, hogy kevésbé veszélyes és lényegesen kevesebb nukleáris hulladék kezelésével járó megoldásokat találjunk (tóriumos energiaszorzó). A másik –lényegesen fontosabb – cél pedig olyan hulladékfeldolgozási technológiák kidolgozása, amelyekkel úgy szabadulhatunk meg a nukleáris hulladékoktól, hogy azok hosszú felezési idejű transzurán, hasadási termék és másodlagos aktinida komponensei rövid felezési idejű, vagy stabil izotóppá alakíthatóak át (transzmutáció), ami – mint majd látjuk – lényeges energiatermeléssel is járhat. A szerző szándéka pedig az, hogy a feladat nagyságán, fontosságán keresztül ráirányítsa a hazai figyelmet a következő évezred egyik nagy kihívására.

Tóriumos energiaszorzó

Carlo Rubbia Nobel-díjas fizikus, az MTA tiszteleti tagja, 1994-ben tartott akadémiai székfoglaló előadásában szólt a gyorsítókkal történő

* Felezési idő: amennyi idő alatt az anyagban levő sugárzó izotópok száma a felére csökken.

energiatermelés és a nukleáris hulladékok ártalmatlanítási lehetőségeiről. De az előadás fontos alapkérdése a ^{232}Th energiasokszorozó tulajdonságának felhasználhatóságával foglalkozott, amely a spallációs reakcióval hajtott tórium alapú szubkritikus rendszer működtetésén alapul. Rubbia a tóriumos energiasokszorozó előnyeit az alábbiakban fogalmazta meg:

- A rendszer szubkritikus, s így megszaladása kizárt, ezért szabályozására sincs szükség.
- A folyamat igen kis mértékben termel hosszú életű aktinidákat.
- Az energiasokszorozó a tórium teljes mennyiségét hasznosítja, így az urános erőműveknél lényegesen hosszabb távon oldhatja meg az emberiség energiaellátási gondjait.
- A gyorsító kikapcsolásával a rendszer leáll; ez biztonsági szempontból rendkívül nagy előny.
- A folyamat végterméke ^{235}U , és mivel az keményebb (400 keV) g-sugarakat bocsát ki, mint a ^{235}U (200 keV), illegális atombomba készítése nagyobb kockázattal jár.

Mit old meg Carlo Rubbia tóriumos energiasokszorozója? címmel Szatmári Zoltán elemezte a Rubbia által javasolt energiasokszorozó előnyeit és hátrányait, s így azzal szemben különböző aggályokat is megfogalmazott. Az eljárás egyik nagy előnye (amellyel minden uránreaktoros megoldást felülmúl), hogy reprocesszálás nélküli fűtélelemes rendszer. Szatmári végkövetkeztetése az, hogy az energiasokszorozó még alapos vizsgálatra szorul, főleg reaktorfizikai szempontból.

A spallációs berendezések elve és helyzete

A spalláció 1950 óta ismert folyamata során a nagy energiára felgyorsított részecskék (proton, deuteron, hélium stb.) nehéz atomokkal (Pb, W, Bi, Hg stb.) összeütközve nagyszámú neutronot hozhatnak létre. Az első ütközés következtében a céltárgy atommagja erősen gerjesztődik és általában gyorsneutronok kibocsátásával adja le energiáját. A kezdeti szakaszban kibocsátott részecskék egy része még rendelkezhet elegendő energiával újabb spallációs reakciók létrejöttéhez, amelyek ismét neutronok kibocsátásával is járhatnak és tovább sokszorozhatják a keletkező neutronok számát. Így a GeV nagyságrendű energiatarományba felgyorsított

protonokkal, spallációs magreakció révén, eseményenként pl. egy volfrám targetban akár 30–40 neutron is keletkezhet, szemben a hasadási magreakcióval, amelyben a hasadásonkénti neutronok száma átlagban 2,5–2,9 közötti.

Az utóbbi két évtizedben igen változatos és nagy mennyiségű kísérletet végeztek az atommagok átalakítására protonokkal, pionokkal, hadronokkal, nehézionokkal és más atomi részecskékkel, valamint fotonokkal. A kölcsönhatási mechanizmusok elméleti értelmezésére (Gudima, Mashnik és Tonev 1983) kidolgozták a CEM (Cascade Exciton Model) kaszkád gerjesztési modellt, amelyet a 0,01–5 GeV energiájú nukleonokkal teszteltek is. Feltételezések szerint a reakció leginkább három fejlődési fokozattal jellemezhető. Az első állapotban az atommagok közötti kaszkádban a primer és szekunder részecskék újraszóródhatnak az atommag gerjesztődése, abszorpciója és/vagy emissziója következtében. A visszamaradó, még mindig gerjesztett atommag kiindulópontja lehet a második fázisnak, amelyben az atommagot részecske–lyuk egyensúlyi állapot előtti konfigurációk jellemzik. Ezt követi a gerjesztett atommag relaxációja, amely magában foglalhatja az egyensúly kialakulásának evaporációs állapotát.

A továbbiakban vázoljuk a spallációs folyamat alapelvét, főbb lépéseit, amelyek igen lényegesekek a sikeres gyakorlati megvalósításhoz.

A gyorsítóval vezérelt atommag-átalakítás alapelve

Gyorsítóval hajtott rendszer (ADS: Accelerator-Driven System), amelyet gyakran hibrid rendszernek is neveznek és egy gyorsítóból és többnyire szubkritikus reaktorzónából áll. A részecskegyorsító szolgáltatja a GeV nagyságrendű energiájú, néhány száz mA intenzitású (többnyire protonokból álló) részecskenyalábot.

A *transzmutáció* (átalakítás) kifejezés egy, az atommagban lejátszódó folyamatot jelöl, melynek során az atommag magreakció, vagy radioaktív bomlás következtében átalakul. A fontosabb átalakítandó atommagok lehetnek minor aktinidák (pl. Np, Am és Cm). Fontos targetatommagok lehetnek még hosszú felezési idejű hasadási termékek is, mint például a ^{129}I és a ^{99}Tc . A spalláció és a hasadási reakció együtt hasznos hibrid megoldásokhoz is vezethet.

A szubkritikus reaktorban a proton-gyorsító által keltett neutronok tartják fenn a láncreakciót, mialatt a hulladék hosszú élettartamú izotópjai energiát termelve stabil vagy rövid életű izotópokká alakulnak át. A rendszer további előnye a hagyományos nukleáris erőművel szemben, hogy ez jóval biztonságosabb és többoldalú megoldási lehetőséget tartalmaz. A nagyfokú biztonság a rendszer szubkritikus voltából következik, hogy az ilyen gyorsítóval hajtott/vezérelt (ADS) rendszerekbe bevitelhető nagy mennyiségű plutónium vagy minoraktinida, anélkül, hogy a reaktort ellenőrizhetetlen „megfutási” veszélynek tennénk ki. Az ADS hibrid rendszer abban a tekintetben is sokkal rugalmasabb, mint a hagyományos atomreaktor, hogy a gyorsító intenzitásának változtatásával csökkenthetők a „mérgező” izotópok megnövekedésével járó káros következmények is. Hátránya viszont, hogy a rendszer még mindig eléggé bonyolult és egyes technológiai fejlesztések hiányosak, mint pl. egyes kiszolgáló egységek és a target közötti kapcsolatok hatását ellenőrző és regisztráló műszerek.

A nagy áramú és intenzitású részecskegyorsítók lehetővé tették új, intenzív, folytonos és impulzus üzemi spallációs neutronforrások létrehozását különböző spallációs magreakciókkal. Ezek a spallációs források számos tudományos és gyakorlati feladat vizsgálatára is jól felhasználhatók. Így például a nukleáris hulladék átalakításán kívül a szilárdtest, az anyag-tudományi és sok más kutatási területen is.

Újabb stratégiákat dolgoztak ki számos országban arra, hogy a hagyományos nukleáris energiatermelő technológiákat alapvetően különböző újabb eljárásokkal válthassák fel. Ezt elsősorban nagyenergiájú (GeV nagyságrendű), főleg proton részecskegyorsítók rohamos fejlődésére alapozták, amelyek alkalmassá váltak nagyintenzitású neutronforrások előállítására.

A gyorsítóval hajtott transzmutációs rendszerek alapvető egységei

Az egyik legfontosabb egység a protongyorsító. A Los Alamos Meson Physics Facility (LAMPF) 20 év fejlesztési munkája után alakította ki ATW berendezését (Bowman et al. 1992). A fejlesztés főbb eredménye: radiofrekvenciás kvadрупól használata a részecske gyorsításához. Az ATW

(Accelerator-driven Transmutation of Waste) berendezés 30 éves becsült időtartam figyelembevételével 1000 kg aktinida fűtőelem elégetését teszi lehetővé, 3000 MWt termikus energia/év előállításával. A beruházási költség: 2345 millió USD (gyorsító, target-tartály, kémiai üzem). Működési költségek: 414 millió USD/év, amit kompenzál a villamos energia eladásából származó 414 millió USD bevétel.

Három orosz intézet (Moszkva, Leningrád, Saratov) által fejlesztett 1 GeV–100 mA lineáris protongyorsító (Kazaritsky et al. 1998) két párhuzamosan működő szubkritikus reaktor meghajtását végezheti. A rendszer 1200 kg/év nukleáris hulladék (800 kg atomfegyver minőségű plutónium és 400 kg minor aktinida) elégetésére alkalmas. A költségelemzések szerint a beruházás költsége: 6097 millió USD, 3 évenkénti működési költség 776 millió USD, ez egytizede a BN-800 típusú kritikus gyorsneutronos tesztraktor üzemeltetési költségének.

Megvalósítás alatt álló ADT projektek és tanulmányok

A gyorsítóval hajtott atommag-átalakítási rendszerek fejlesztésén és az elképzelések megvalósításán sokan munkálkodnak világszerte, így francia, japán, USA együttműködéssel a CERN-ben, valamint számos ország részvételével az OECD/NEA, IAEA, valamint EC keretében folyó nemzetközi programokban, de egyes országok saját programja illetve szűkebb együttműködések alapján is folynak vizsgálatok. A nemzeti és nemzetközi programok között nem lehet egyértelmű határvonalakat meghúzni. Ezért az alábbiakban egy önkényes országonkénti és nemzetközi program csoportosításban emelünk ki néhány – lényeges megvalósításra irányuló – kísérletet, amelyek között szintén vannak bizonyos átfedések, de mindezek ellenére egy általános helyzetkép kialakításához alapul szolgálhatnak.

- Amerikai Egyesült Államok. A nagyszámú és széles körű vizsgálatokból az e területen elsőként említésre méltó programok a BNL (Brookhaven National Laboratory) PHOENIX és a LANL (Los Alamos National Laboratory) ATW projektje. A PHOENIX gyorsítóval hajtott átalakító rendszer, amelynek minor aktinidákat oxid formában tartalmazó fűtőelem modul aegysége van.

- Anglia. A nukleáris hulladékok átalakítása terén Nagy-Britanniában nem terveztek nagyobb horderejű projekteket. Világszínvonalú spallációs neutronforrás (ISIS) üzemel a Rutherford-Appleton Laboratory-ban (Oxfordshire), 18 célberendezéssel, közöttük egy trícium előállítására szolgáló egységgel. Gyorsító hasznosíthatósági kutatás-fejlesztési tanulmányokat is folytatnak.

- Ausztria. Az osztrák kormány javasolta egy új pulzált nagy-fluxusú spallációs neutronforrás (AUSTRON) építését. Az eredeti terv célja az volt, hogy az új forrás paraméterei az ISIS 2 javított berendezésénél is jobbak legyenek. Ausztria is csatlakozott az ESS-hez (European Spallation Source), amelynek spallációs neutronforrása a terv szerint 2015-ben kezdi majd meg működését. De az Auston még egy újabb lépés a nagy spallációs neutronforrások létesítése sorában, s ehhez csatlakozási szándékát több, Ausztriával szomszédos ország, így hazánk is jelezte. A koncepció egy speciális gyorsító tervezésén alapul. A berendezés jelentős mértékben alkalmaz szabvány méretű egységeket, s így a létesítés költsége (1998-as árakon) 4,7 milliárd osztrák schilling, amelynek 1/3-át az osztrák kormány magára vállalta, egy további 1,1 milliárd schillingbe kerülő orvosi célt szolgáló gyűrű-egységgel. A megépítés befejezésének várható legközelebbi időpontja 2006.

- Belhorma. A MYRHA projekt keretében az 1966-os év végén indították el egy tanulmány elkészítését, gyorsítóval hajtott spallációs neutronforrás megépítéséről. A forrással szemben támasztott követelmény: A gyorsító-ciklotron egy 250 MeV energiájú, 2 mA-s protonnyaláb áramnak a 10 mA-ra emelését tegye lehetővé és a többcélú berendezés legyen alkalmas anyagkutatásra, radioizotóp (^{99}Mo) előállítására és nem utolsósorban transzmutációs tanulmányokra.

- Csehország. A gyorsítóval hajtott transzmutációs technológiák fejlesztésére indított programot az Atommagfizikai Intézet, Nukleáris Kutató Kft. és a Skoda Nukleáris Gépészeti Vállalat.

- Franciaország. A CEA francia projekt célkitűzése a szubkritikus AD rendszerek vizsgálata különösen az alábbi területeken: nagyintenzitású gyorsítók; módszerek, adatok és érvényességi tartományuk; target technológia; szubkritikus spallációs neutronforrás által vezérelt sokszorozó rendszerek; különböző alkalmazási mód-

szerek tanulmányozása. A program tartalmazza a szubkritikus rendszerek működését és a modellezési kódok megerősítését célzó vizsgálatokat. A CRNS, CEA és az ADF kutatóközpontok által létrehozott GEDEON Csoport koordinálja az említett területeken a kutatásokat.

- Japán. A Japán Atomenergiái Kutatóintézet (JAERI) tanulmányozta a gyorsítóval hajtott transzmutációs rendszerek és nagyintenzitású protongyorsítók fejlesztését a japán OMEGA program keretében (Takizuka, 1996). A transzmutációs berendezéseket a minor aktinidák hatásos elégetésére tervezték. Két (szilárd és sóoldatos) rendszert vizsgáltak.

- Dél-Korea. A Koreai Atomenergia Kutatóintézetben (KAERI) 1992 óta folytatnak transzmutációs tanulmányokat.

- Magyarország. Elsősorban a különböző nemzetközi összefogások keretében tervezett programokhoz történő csatlakozás tűnt számunkra megvalósíthatónak. Ezek keretében a nehézion ütközések és az egzotikus részecskék vizsgálatai szerepeltek nagyobb hangsúllyal. A transzmutáció tanulmányozása csupán egy-egy felvetődött javaslat megvalósíthatósági kritériumára vonatkozott (l. például Carlo Rubbia már említett akadémiai székfoglaló előadását). A nukleáris hulladékok spallációs átalakításának kérdésével a KFKI Atomenergia Kutatóintézetben, a BME Nukleáris Technikai Intézetben (Brolly és Sziebert, 2000) és a Kémiai Kutatóközpont Izotóp- és Felületkémiai Intézetében (Sáfár, 1997) foglalkoztak.

- Németország. Az utóbbi időben a német erőműi fűtőelemek feldolgozásában a gyorsítóval hajtott átalakítás terén voltak újabb kezdeményezések a KFA Jülich és a FZK Karlsruhe intézetekben. Számításokat végeztek az ADS kapacitások, termikus, illetve gyors kritikus rendszerek működése során keletkező nukleáris hulladék mennyiségének összevethetőségéről. A Münchener Műegyetemen egy elkülönített pályájú ciklotron (TRITON) létrehozását tervezték.

- Olaszország. Az ENEA projekt keretében (Applied Physics Department, Bologna) neutronfizikai, sugárbiztonsági, termohidraulikai és nyaláb-ablak vizsgálatokat folytatnak. Az intézet részt vett (Gabriel et al. 1997) a közepes energiájú fotonukleáris reakciók CEM (Cascade Exciton Model) és ICM (Intranuclear Cascade

Model) modellek összevetését és finomítását célzó amerikai–orosz együttműködésekben.

- Oroszország. Néhány kutatóintézet részfeladatokat végzett a transzmutációs program keretében (Kazaritsky et al. 1998). A gyorsítóval hajtott transzmutációs technológiák kiemelkedő paraméterűek. Az 1994-ben (Moszkvában) megalakult (ISTIC: International Science and Technology Center) nemzetközi központ keretében négy orosz intézet (ITEP, Moszkva; VNIPI-ET, Szentpétervár; VNIINM, Moszkva; VNIIEF, Szarov) részvételével, gyorsítóval hajtott nukleáris hulladék-feldolgozó rendszert hoztak létre, amely 1200 kg/év nukleáris fegyver minőségű plutónium és 400 kg minor aktinida elégetésére alkalmas. A keletkező hőt a reaktor működtetésére és energiatermelésre használják. A kockázati elemzések azt mutatták, hogy a target/tartály és más egységek kellő védelmet nyújtanak a radioaktív anyagok kiszabadulása ellen. Egy gyorsítóval hajtott transzmutációs üzem (két 100 MW-os erőmű és 1200 kg transzurán átalakítása) becsült beruházási költsége 6,1 milliárd USD, üzemeltetési költsége 776 millió USD/év.

- Svájc. A Paul Scherrer Institut-ban (PSI) az ATHENA kísérletben aktinida targeteket sugároztak be, az intézet ciklotronjának 0,6 GeV-os protonjaival (Wenger et al. 1995) és az így nyert adatokkal megvizsgálták a nagyenergiájú hasadási modell érvényességi tartományát. Tanulmányozták a transzmutáció hatékonyságát és a hozzá tartozó adatbázis és kódrendszer követelményeit. Nemzetközi együttműködésben az európai spallációs forráshoz (ESS) folyékony fémtarget egységet terveztek.

- Svédország. A spallációs kutatásokat végzők egy csoportja a Stockholmi Egyetem Sigbalm-Laboratoriumában és az Uppsalai Egyetemen kezdeményeztek és koordináltak egy programot (Gudowski, 1996) a gyorsítóval hajtott transzmutációs technológiák fejlesztésében kialakítandó nemzetközi együttműködésekre.

Nemzetközi programok

A CERN EA Project. Kidolgoztak egy koncepciót a tórium bázisra alapozott EA (Energy Amplifier) energiatermelésre. Az első demonstrációs kísérlet elvégzését szupravezető lineáris gyorsítóval tervezték. Az elképzelés tesztelésére terveztek egy kísérletet

Tizenkét (2 görög, 3 francia, 5 spanyol és 3 svájci) kutatóhely hatvanhat munkatársa vett részt az Arnould et al. (1999) közleményében leírt kísérleti munkálatokban és az eredmények értékelésében. Amerikai–orosz (Titarenko et al. 1998) együttműködésben vékony ^{209}Bi targetben tanulmányozták a keletkező radionuklidokat kísérleti és számítógépes szimulációs módszerrel a 130–1500 MeV energiatarományban. Ez volt az első olyan kísérlet, amelyben nem hasadó targetet használtak a gyorsítóval hajtott berendezésben. Az elsődleges tapasztalatok azt mutatták, hogy néha az elméleti hozamok két nagyságrenddel is eltérnek, ami arra enged következtetni, hogy alkalmazott kódokat is tovább kell fejleszteni. A francia–német együttműködés köréből megemlítjük a GANIL és Hahn-Meitner Intézet munkáit, amelyekben hadron-indukcióval spallációs neutronok keletkezését tanulmányozták vékony és vastag ólom és urán targetekben. Francia–holland együttműködésben (Konig et al. 1998) a nukleáris hulladékok átalakítására szolgáló gyorsítóval hajtott transzmutációs rendszerekre fellelhető adatok számítógépes feldolgozását, azok közül is elsősorban a neutron és proton könyvtári adatait és a 150 MeV alatti aktivációs adatokat gyűjtötték össze. Megállapították, hogy a szubkritikus rendszerekkel kapott transzmutációs és energiatermelési adatok fontossága növekszik. Egyetértés van kialakulóban az adatok tárolási formáiban és jelentős előrehaladás történt a kísérleti adatok összegyűjtése terén is.

Összefoglalás, feladatok, következtetések

Az eddigiek során elméleti és kísérleti erőfeszítésekkel elért eredményeken keresztül alkothatunk némi képet a nukleáris hulladékok ártalmatlanná tételére irányuló erőfeszítésekről, azok jelenlegi állásáról. Bemutattuk a világ különböző országaiban és nagy kutatóközpontjaiban kifejtett erőfeszítések jelentős részét, felhasználva a különböző nemzetközi rendezvények anyagait. A költségek és a berendezések méretei mutatják, hogy a jövő energiaellátása milyen óriási tudás és technológiai koncentrációt igényel.

Számos országban szisztematikus tanulmányokat és kísérleteket folytattak a gyorsítóval hajtott atommag átalakítása terén. A nukleáris hulladékok teljes mértékű megsemmisítése nem

megoldott, de a hosszú életű izotópok jelentős mértékű csökkentésére a módszer alkalmas. A lehetséges csökkentési tényezők, az alkalmazott eljárástól is függően, 10 és 100 között változtak. Sok tanulmány foglalkozott a gyorsneutronos rendszerekkel, amelyek a legtöbb izotóp esetében jó neutronhozamot szolgáltatnak kedvező hasadás/befogás viszonyok mellett. De még a termálneutronos rendszerek is érdekesek lehetnek mint a maradványok végső átalakítói.

A folyékony nehézfém hűtések (Pb vagy Pb/Bi – ólom/bizmut eutektikum: LBE) kémiai és termodinamikai sajátosságai alapján bizonyultak a legmegfelelőbbeknek a gyorsítóval hajtott rendszerekben. A fémolvadék keringtetése megfelelő hőmennyiséget biztosít az energia-termeléshez. Sem az ólom, sem az LBE nem lép reakcióba a levegővel vagy a párával, mint a gyors reaktoroknál használt nátrium fémolvadék. Azonban ezek nem a legalkalmasabbak spallációs targetnak. Kiegészítő választási lehetőségként a szilárd volfrám target, vagy a folyékony higany target alkalmazása kínálkozik.

A gázhűtés lehetőségét még most vizsgálják.

Az eddigiekből és a keletkezett nukleáris hulladékok okozta környezeti veszélyek elhárításának igényéből világosan következik, hogy új technológiai eljárásokra van szükség a felmerülő energiaigények kielégítéséhez.

A gyorsítóval hajtott transzmutációs technológia kidolgozása a tudomány különböző interdiszciplináris területein (atommagfizika, nukleáris technológia, nagy- intenzitású és nagy-energiájú részecskegyorsítók, anyagtudomány, magkémia, nukleáris hulladék-feldolgozó technológiák stb.) kutatás-fejlesztési feladattá vált.

Ezek az ismeretek hasznosak lehetnének asztrofizikai tanulmányokhoz is, mivel a kozmi-

kus sugárzás részecskéi spallációs reakciónak is részesei lehetnek, s így bizonyos izotópok univerzumon belüli gyakoriságában is szerepet játszhatnak.

A fundamentális atommagfizika terén a következőket tekinthetjük a legsürgősebb feladatainknak:

- Új, javított és számítógépkódokkal megtervezett, a közepes energiatarományra (300 MeV-ig) terjedő részecske-kölcsönhatás atommag adatbázisán alapuló modellek szerkesztése;
- A gyorsítóval hajtott rendszerek (ADS) optimális rendszerfejlesztésének kutatása;
- Az optimálisan nagy intenzitású (erősáramú), rendkívül nagy megbízhatóságú és alacsony nyalábvesztésű gyorsítók fejlesztése;
- Spallációs neutron targetek kifejlesztése;
- A besugárzás okozta anyaghibák tanulmányozása, elméleti és számítógépes modellek fejlesztése;
- A nukleáris fűtőanyagciklusok új megközelítési módjainak keresése.

A jelenlegi helyzet értékeléseként megállapíthatjuk, hogy a transzmutációs módszer olyan fejlődési fokot ért el a nukleáris hulladékok átalakítása terén, amely – a jövőbeni óriási kutatási és technológiai fejlesztéseken keresztül – nagymértékben hozzájárul majd a sugárveszélyes hulladék mennyiségének igen tekintélyes mértékű csökkentéséhez. Egyik célom e munkával, hogy a fiatal, kezdő szakemberek némi támogatást kapjanak pályaválasztásukhoz, mivel a kis országok számára is akad megoldandó feladat. Világosan kell látnunk, hogy az emberiség energiagondjainak megoldása milyen nagy anyagi koncentrációkat igényel tőlünk a most kezdődő évezred elején.

IRODALOM:

Amould H., et al., Phys. Lett. B458, 167–80, (1999)
 Arthur E. D., Proc. Specialist Meeting on Accelerator-Driven Transm. Technology for Rad.-waste and Other Applications, Stockholm (1991)
 Bauer G. S., 2nd Int. Conf. on Accelerator Driven Transmutation Technologies, Kalmar, Svédország, 159, (1996)
 Bowman C. D., et al., Nucl. Instr. Meth. A320, 336, (1992)

Brolly Áron, Szeiberth Máté, Fizikai Szemle, 50 (2), 44–49, (2000)
 Browne J. C., et al. 2nd Int. Conf. on Accelerator Driven Transmutation Technologies, Kalmar, Svédország, 101, (1996)
 Bryant Ph., et al., The Austron proposal, Europhysics News, 30(4), 100, (1999)
 Gabriel T., Maino G., Mashnik S. G., Proc. 12th International Seminar on High Energy Physics Problems, JINR, Dubna, 309–318, (1997)
 Gabriel T. A., Phys. Rev. 182, 1035, (1969)

Gudima K. K., Mashnik S.G., Tonev V. D., Nucl. Phys. A401, 329, (1983)
Gudowski W., Proc. Int. Workshop on Nuclear Methods for Transmutation of Nuclear Waste, Dubna, (1996)
Gudowski W., Nucl. Phys. A654, 436c-457c, (1999)
Kazaritsky V. D., et al., Nucl. Instr. Meth. A, 414, 21-27, (1998)
Koning A. J., Delaroche J. P., Bersillon O. Nucl. Instr. Meth. A, 414, 49-67, (1998)

Rubbia C. Fizikai Szemle, 44 (4), 130-136, (1994)
Sáfár J., Proc. 9th Int. Symp. Capture Gamma-Ray Spectroscopy, Budapest, 797-798 (1997)
Szatmári Zoltán, Fizikai Szemle, 44 (7), 293-300, (1994)
Takizuka T., JAERI- Conf. 99-003, 150-159, (1999), Submit. to Nucl. Instr. Meth. A
Titarenko Yu. E., et al.: Nucl. Instr. Meth. A414, 73-99, (1978)
Wenger H. U., et al., Proc. Workshop on Advanced Fuel Cycle, PSI, (1995)

