

azon a ponton keresztül csak a sötét nyilaknak megfelelő spinek lépjenek ki. (A másik kimeneten a szerepek felcserélődnek.) Így végeredményben a sötét és világos nyilaknak megfelelően irányított, polarizált spinek lépnek ki a gyűrűből [9].

Ez a fajta polarizáló működés még sarkítottabban jelentkezik, ha nem egyetlen gyűrűt, hanem gyűrűk rendszerét tekintjük [10]. Ha feltesszük, hogy az egyes gyűrűkben függetlenül változtatható a spin-pálya kölcsönhatás erőssége, akkor ezek megfelelő választásával elérhető az is, hogy egymással ellentétes irányú bemenetek más-más kimeneten keresztül hagyják el a hálózatot, méghozzá úgy, hogy irányuk megegyezik a bemenetével, és lényegében visszaverődés sincsen (4. ábra). Érdeemes megjegyezni, hogy ez a javasolt eszköz a Stern–Gerlach-berendezéshez teljesen hasonló, azzal a különbséggel, hogy a számítások szerint működik, míg – amint már *Bohr* is megmutatta – a hagyományos, inhomogén téren alapuló berendezés elektron spinpolarizációjára elvben sem alkalmas.

Kvantumgyűrűk hálózata emellett még számos ígéretes alkalmazást tehet lehetővé [11], de ezek szempontjából alapvető kérdés, hogy a működőképességet mennyire befolyásolja (rontja el), ha a hőmérséklet növekszik, vagy a szabad úthossz a hálózat alkotóele-

meinek gyarapodása miatt összemérhető vagy kisebb lesz, mint a rendszer mérete. Számításaink szerint a működőképesség ugyan megéri ezeket a külső zavarokat, de a mai kísérleti eszközökkel is elérhető az a tartomány, ahol még mérhetőek a jósolt jelenségek [12]. Ennek alapján a kvantumgyűrűk és a spinfüggő interferenciát mutató hálózatok mind elméleti, mind kísérleti szempontból sok lehetőséget tartogatnak még.

Irodalom

1. J. Nitta, *NTT Technical Review* 2 (2004) 31.
2. Geszti T., *Fizikai Szemle* 56 (2006) 216.
3. E. I. Rashba, *Fiz. Tverd. Tela (Leningrad)* 2 (1960) 1224. [*Sov. Phys. Solid State* 2 (1960) 1109.]
4. J. Cserti, *Természet Világa* 136 (2005) 389.
5. S. Datta: *Electronic transport in mesoscopic systems*. Cambridge University Press, Cambridge, 1995.
6. B. Molnár, F. M. Peeters, P. Vasilopoulos, *Phys. Rev. B* 69 (2004) 155335.
7. M. Benedict, *Fizikai Szemle* 44 (1994) 190.
8. P. Földi, B. Molnár, M. G. Benedict, F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* 71 (2005) 033309.
9. P. Földi, O. Kálmán, M. G. Benedict, F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* 73 (2006) 155325.
10. P. Földi, O. Kálmán, M. G. Benedict, F. M. Peeters, *Nano. Lett.* 8 (2008) 2556.
11. O. Kálmán, T. Kiss, P. Földi, *Phys. Rev. B* 80 (2009) 035327.
12. P. Földi, M. G. Benedict, O. Kálmán, F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* 80 (2009) 165303.

MERRE TART AZ EURÓPAI UNIÓ A NUKLEÁRIS HULLADÉKOK KEZELÉSE TERÜLETÉN?

Ormai Péter, Hegyháti József

Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Nonprofit Kft.

Az elmúlt évtizedben jelentős műszaki haladás történt az Európai Unióban a kis és közepes aktivitású hulladékok elhelyezése terén. Az igazi kihívás továbbra is a nukleáris fűtőelemciklus lezárása. Néhány országban a geológiai tárolók az építésre vonatkozó döntés közelébe jutottak. Az EU legújabb kutatási keretprogramjának fő célkitűzése megvalósítás-célú programok ösztönzése minden eddig még le nem zárt fontos kérdésben annak érdekében, hogy masszív tudományos és műszaki alapot lehessen teremteni a geológiai elhelyezés biztonsága és a technológiák demonstrálhatósága érdekében, ezzel kialakítva egy közös európai álláspontot a fő kérdésekben. A geológiai tárolók kifejlesztése mellett az elemszeparáció és transzmutáció (P&T) a másik fő fejlesztési irány.

Kis és közepes aktivitású hulladékok elhelyezése

Az elmúlt évtizedben – a nemzeti programok keretében végzett munkának köszönhetően – jelentős tudományos és műszaki haladás történt az Európai Unióban a rövid életű kis és közepes aktivitású hulladékok

biztonságos végleges elhelyezése területén. Az ilyen típusú hulladékok elhelyezésére korszerű felszín közeli és felszín alatti tárolók épültek. Európában az atomerőművel rendelkező országok majd mindegyike üzemeltet hulladéktárolót, vagy pedig folyamatban lévő programja van a létesítésre. Kivételt képez Hollandia és Olaszország [1].

Kis és közepes aktivitású hulladékok elhelyezése Pakson a speciális szállítójárműre (foto NRHT).



1. táblázat		
A nagy aktivitású radioaktív hulladékok tárolóinak tervezett időpontjai az EU néhány országában		
ország	tároló építésének kezdete	üzembe helyezés becsült időpontja
Svédország	2015	2020
Finnország	2015	2020
Franciaország	2015	2025
Belgium	2025	2040–2080
Németország	2025	2030
Csehország	2030–2050	2065
Magyarország	2020–2046	2047

Az utóbbi években több ország vizsgálja a nagyon kis aktivitású hulladékok elhelyezésének kérdését, amely a közeljövőben egyre nagyobb számban leszerelésre kerülő atomerőművek hulladékkezelési stratégiájának fontos eleme lehet. Franciaország és Spanyolország már üzembe is helyezett ilyen hulladék-tárolót.

Megoldandó feladatot jelent még a hosszú életű kis és közepes aktivitású hulladékok végleges elhelyezése. Ezen a területen Svédország és Franciaország jár az élen az EU-n belül.

A nukleáris fűtőelemciklus lezárása

Az igazi kihívás továbbra is a nukleáris fűtőelemciklus lezárása. Jelenleg két jól kiforrott koncepció létezik a fűtőelemciklus lezárására. Az egyik az elhasznált fűtőelemek újrafeldolgozása (reprocesszálása), a hasznosítható anyagok kinyerésének igényével és a radioaktív hulladékok üvege ágyazásával, illetve a kiégett fűtőelemek közvetlen végleges elhelyezése. Míg az első ipari méretekben már évtizedek óta működik, addig a közvetlen végleges elhelyezésre még nem került sor.

Figyelembe véve, hogy nagy aktivitású radioaktív hulladék mély geológiai elhelyezése 2020 előtt egyetlen EU tagállamban sem várható, ezért a következő években is minden felhasználónak a kiégett fűtőelemek vagy az üvegezett nagy aktivitású hulladékok hosszú idejű átmeneti tárolására kell berendezkednie.

Geológiai elhelyezés

Ma már nemzetközi egyetértés van a szakemberek között a tekintetben, hogy a nagy aktivitású és/vagy hosszú élettartamú radioaktív hulladékok biztonságos, végleges elhelyezésének legjobb megoldása stabil, mély geológiai formációkban történhet. A legnagyobb kihívás, hogy a geológiai elhelyezésbe vetett bizalmat közvetíteni tudják a társadalomnak [2, 3].

2. táblázat		
A mély geológiai tárolók becsült költségei		
ország	kiégett fűtőelem mennyiség (tU)	költség (milliárd euro)
Finnország *	5 500	3
Svédország	9 100	3,5
UK	16 400	15
Spanyolország	6 800	3

* a telephelykutatás, a K&F, az engedélyezés és az átmeneti tárolás költségeit nem tartalmazza

A tároló fejlesztésben élenjáró országok többsége a mélybeli kőzetkörnyezetet a helyszínen vagy a helyszínhez hasonló körülmények között (in-situ) vizsgálja az erre a célra kialakított föld alatti kutató bázison, vagy elterjedtebb nevén kutató laboratóriumban (angol rövidítéssel: URL). Mára Európában Németország, Finnország, Franciaország, Spanyolország, Svédország, Belgium és Svájc halmozta fel a legtöbb tapasztalatot a föld alatti kutatásokban. Ezek a vizsgálatok minden esetben széleskörű nemzetközi együttműködésben folynak, messzemenően támaszkodva egymás eredményeire és tapasztalataira. Az Európai Unió is támogatja ezt a fajta munkát, kiemelten a belga és a svéd programot. Ez utóbbi indulásától fogva nemzetközi kutató létesítményként funkcionál.

A föld alatti kutatólaboratóriumok nem csak műszaki, tudományos szempontból nagyon fontosak. Külön ki kell emelni, hogy ezek a radioaktív hulladék-elhelyezéssel összefüggő lakossági kapcsolatépítés meghatározó létesítményei is. A hulladéktároló projektek egyik legérzékenyebb pontja szerte a világon a társadalmi elfogadtatás.

Néhány országban mára már az építésre vonatkozó döntés közelébe jutottak a kiégett fűtőelemek és nagy aktivitású hulladékok elhelyezésére szolgáló geológiai tárolók projektjei, bár ez idáig ilyen tároló nem üzemel és a legtöbb országban még évekre van a létesítéstől (1. táblázat). A felmerülő akadályok ellenére egyetlen országban sem vetették el a geológiai tároló létesítésére vonatkozó döntést, bár sok országban lelassult a telephely-kiválasztási program, néhol pedig újragondolják a telephelyek kiválasztásának folyamatát. Az újonnan csatlakozó országok mindegyike még több évtizedre van a megoldástól.

A mély geológiai formációban történő elhelyezés finanszírozása a „szennyező fizet” elv alapján biztosítható. A 2. táblázat a tároló költségeire tartalmaz becsléseket. 1000 tonna urán (tU) végleges elhelyezése közelítőleg 0,5–1,0 milliárd euróba kerülhet [4].

Elemseparáció és transzmutáció

Annak ellenére, hogy a nagy aktivitású hulladékok mély geológiai formációban történő végleges elhelyezésével szinte minden nukleáris iparral rendelke-

ző ország foglalkozik, sok helyen keresik azokat a lehetőségeket, amelyek segítségével csökkenthetők a jövő generációk terhei. Az egyik ígéretesnek tartott lehetőség a hulladékokban található hosszú élettartamú radionuklidok átalakítása oly módon, hogy a maradékok elhelyezését követően csak jóval rövidebb idejű intézményes ellenőrzésre legyen szükség. Az eljárás a transzmutáció, illetve P&T (Partition & Trans-mutation), olyan nukleáris folyamat, amellyel a hosszú élettartamú radioizotópok nagy részét stabil, vagy rövid élettartamú izotóppá lehet alakítani reaktorban, vagy az e célra kialakított részecskegyorsítókban [5].

Mivel a mai technológiákkal a megkívánt szétválasztási hatékonyság nem érhető el, továbbá a szükséges reaktorteknika sem eléggé kiforrott, ezért a transzmutációs programokat tovább kell fejleszteni, mielőtt dönteni lehetne gyakorlati alkalmazásukról. Mai tudásunk szerint azonban nincsen olyan technológia, amelynek alkalmazásával teljesen kiválthatók lennének a geológiai tárolók. Ezért a transzmutáció nem is tekinthető önálló koncepciónak, sokkal inkább a reprocesszálsági változat finomításának. E technológiánál a nagy aktivitású hulladékból leválasztják a transzurán izotópokat (aktinidákat) és a hosszú felezési idejű hasadási termékeket, majd megfelelő atomreaktorban átalakítják azokat rövidebb élettartamú, illetve stabil izotóppokká.

A negyedik generációs reaktorok fejlesztésénél ezt a feladatot már figyelembe veszik, és olyan reaktortípusok kidolgozását és üzembe állítását is tervezik, amelyeknek egyik fontos feladata – a villamosenergia-termelés mellett – az említett transzmutáció. Ennek révén olyan hulladékot kapunk, amelynek aktivitása kisebb lesz (bár továbbra is nagy aktivitású marad) és megfelelő szintre történő lebomlásához nincs szükség több százezer évre, esetleg néhány száz év is elegendő lesz.

A fűtőelemciklus korszerűsítése és zárása során flexibilis elszeparációs eljárásokat terveznek kidolgozni, hogy az uránt és a plutóniumot többször is felhasználhassák; ehhez a gyorsreaktorok elterjedésére, az aktinida-kémia fejlődésére, a szeparációs technológia fejlesztésére és az úgynevezett minor aktinidákat (Am, Cm, Np) is tartalmazó fűtőelemek gyártási technológiájának kidolgozására van szükség. A mai tudás szerint ipari üzemek 2040. előtt nem kezdik meg működésüket.

A ma reálisnak nevezhető számítások szerint a kiégett fűtőelemek több mint két nagyságrendű radiotoxicitás-csökkenése P&T alkalmazásával 500–3000 év után érhető el, szemben a nyitott ciklussal, ahol ugyanez az érték 130 000 évre tehető. Ezt az időtávot követően a maradék radiotoxicitás 7,83 t természetes – leányelemeivel egyensúlyban lévő – urán (ennyi szükséges 1 t friss fűtőelem előállításához) radiotoxicitásával egyenlő. Ez azt is jelenti, hogy ezt az „új”, kedvezőbb tulajdonságúvá tett hulladékot továbbra is mély geológiai tárolóban kell elkülöníteni a bioszférától.

Európai Unió kutatások a nukleáris hulladékok terén

Egyre hangsúlyosabban fogalmazódik meg az Európai Bizottság Kutatási Igazgatósága részéről az integrált, összehangolt kutatási programokra vonatkozó igény. Fontos kérdés, hogy a radioaktív hulladékokkal foglalkozó szakembergárda hogyan tudná jobban hasznosítani a tudományos és technológiai tudásanyagot a legfontosabb kutatási területeken, illetve az új kutatási hálózatokra tett kezdeményezések segítségével miként lehetne jobban strukturálni és hatékonyabbá tenni a jövőbeni európai kutatási együttműködést.

Fontos lépések már eddig is történtek a hatékonyabb együttműködés érdekében a korábbi Euratom Keretprogramokban, ahol a partnerszervezetek megosztották tapasztalataikat mind a stratégiai, mind pedig a tudományos kérdésekben. Az olyan szervezeti keretek, mint az Összehangolt Programok (Concerted Actions), vagy a Tematikus Hálózat (Thematic Network) nagy mértékben hozzájárultak ahhoz, hogy az alapvető kérdésekben közös irányvonalak és megközelítések alakuljanak ki. Ily módon megteremethető az a műszaki konszenzus, amely a nemzeti programok prioritásainak meghatározásában jelenthet segítséget.

Annak ellenére, hogy ezen összehangolt akciók korábban is segítettek abban, hogy számos problematikus területen sikerüljön közös megközelítést kialakítani, nem feltétlenül biztosították a leghatékonyabb kutatási struktúrát és a tudásanyag legjobb hasznosítását. Az Európai Bizottság úgy véli, hogy a 6. és 7. Keretprogram új szervezeti formái, úgy mint az Integrált Projektek (Integrated Project) és a Tudásközpontok (Network of Excellence) valóban szervezettebb és hatékonyabb kutatásokat fognak eredményezni. Ehhez azonban arra is szükség van, hogy a radioaktív hulladékok kezelésében érintett szervezetek – kutatók, programvégrehajtók, hatóságok – között még szorosabb együttműködés valósuljon meg. Az Európai Bizottság Kutatási Igazgatósága a 7. Keretprogram Európai Technológiai Platform létrehozását szorgalmazza.

A 6. és 7. Keretprogram fő célkitűzése megvalósítás-célú K&F minden eddig még le nem zárt fontos kérdésben annak érdekében, hogy masszív tudományos és műszaki alapot lehessen teremteni a geológiai elhelyezés biztonsága és a technológiák demonstrálhatósága érdekében, ezzel alakítva ki közös európai álláspontot a fő kérdésekben.

A jelenlegi vizsgálati irányok a következők:

- A befogadó közet in-situ jellemzése generikus és telephely-specifikus URL-ekben.
- A meghatározó folyamatok (geoszférától a bioszféráig) vizsgálata a tároló környezetének megismeréséhez.
- Robusztus biztonságelemzési módszertan kifejlesztése (modellezési eszközök).
- Mérnöki tanulmányok és a tároló megvalósításának demonstrálása.

- A lakossági elfogadást támogató társadalmi kérdések vizsgálata.

Az eddigi kutatásokkal kapcsolatosan néhány fontos megállapítás tehető. A nagy aktivitású hulladékok elhelyezésére szolgáló geológiai tárolókkal kapcsolatos K&F tevékenység időigényes, komplex multi-diszciplináris terület. A programok lassan és óvatosan valósulnak meg (évtizedek telhetnek el a koncepció kialakításától a megvalósításig). Az Euratom keretprogramok végig jelen voltak ezen összetett folyamat során, és továbbra is folytonosságot jelentenek. Mivel az alapkoncepció kiforrott, a további vizsgálatok az optimalizálást és a bizonytalanságok csökkentését szolgálják.

A további európai kutatási erőfeszítések elsősorban a nagyobb mértékű integrációt célozzák.

Nemzetközi vagy nemzetek feletti megoldások

Gyakorlatilag minden nemzeti radioaktív hulladékkezelési program deklarálja, hogy nemzeti szintű megoldást kell találni a saját hulladék elhelyezésének problémájára. Ez leginkább a jelenlegi politikai realitások tükröződése, mintsem alapelv. A témában megjelent nemzetközi tanulmányok, valamint a különböző más fórumokon lezajlott viták mind arra a következtetésre jutottak, hogy nincsenek alapvető etikai vagy környezetvédelmi érvek a nemzetközi hulladéktárolási projektekkel szemben. Az aggodalmak forrásai újabban a terrorfenyegetettség és proliferáció.

Valóban nyilvánvaló, hogy erős gazdasági és műszaki érvek szólnak az ilyen projektek mellett, különösen olyan nemzetek esetében, amelyek kis atomenergetikai kapacitással rendelkeznek. A költségek, a biztonság és a védelem (safeguards) szempontjából a nemzetközi együttműködés ideális megoldás lehetne, hiszen így a nukleáris anyagok megbízhatóbb elzárása mellett a nukleáris technológiák alkalmazását is lehetővé tenné még több ország számára. A kérdés társadalmi és politikai érzékenysége miatt a nagy aktivitású hulladékok végleges elhelyezésében élenjáró országok (Svédország, Finnország) különösen visszafogottak a regionális hulladéktárolás kérdésében.

Hazai helyzet

Magyarországon az atomerőművi kis és közepes aktivitású hulladékok végleges elhelyezésének kérdése a jelenleg Bataapátiban épülő tárolóban hosszú távon megoldást jelent.

A kiégett fűtőelemek átmeneti tárolására szolgáló létesítmény 50 évre megoldja a kazetták biztonságos tárolását. Ez idő alatt kell végleges megoldást találni.

1995-ben program indult a nagy aktivitású és hosszú élettartamú hulladékok elhelyezésének megoldására. Középpontjában elsősorban azok a helyszíni vizsgálatok voltak, amelyeket 1996 és 1998 során a

Mecsek hegységben található (akkor még működő) uránbányából megközelíthető Bodai Agyagkő Formáció (BAF) területén, 1100 m mélységben végeztek el. A program három évre korlátozódott a bánya 1998 évi bezárása miatt. 2004-től folytatódtak a BAF megismerését és alkalmas terület kijelölését célzó vizsgálatok és kísérleti munkák. Az újrainduló kutatások elsődleges célja egy földalatti kutatólaboratórium helyszínének kijelölése.

Összefoglalás

A nukleáris energia jövőbeli alkalmazásai alapvetően hatással lesznek a képződő nukleáris maradékanyagok mennyiségére és minőségére.

A következő évtizedekben az atomenergia felhasználásának fenntarthatósága érdekében kifejlesztik az atomerőművek negyedik generációját. Az atomerőműveknek ez az új generációja a természeti erőforrások javított felhasználásával és a nagy aktivitású hulladékok mennyiségének minimalizálásával döntően befolyásolja majd az atomenergetika fenntartható alkalmazását. A fejlesztésekben nagy szerep jut a gyorsneutron-spektrumú reaktoroknak, amelyek lehetővé teszik a fűtőelemciklus zárását.

A negyedik generációs rendszerek egyrészt minimalizálni fogják a nukleáris maradékanyagok mennyiségét, másrészt pedig jelentősen csökkentik a végleges elhelyezés nagyon hosszú felügyeleti időszakát, ezáltal csökkentve a jövő generációk terheit, valamint növelik a lakosság egészségének és a környezet védelmét.

Nemzetközileg elfogadott elv, hogy minden országnak saját magának kell gondoskodnia a területén keletkezett radioaktív hulladékok végleges elhelyezéséről. Ez nem feltétlenül az adott országon belüli elhelyezést jelenti. Az utóbbi időben felélénkült az érdeklődés a nemzetközi megoldás iránt. E nemzetközi hasznosítású tárolókra vonatkozó elképzelések ma még nagyon kezdeti fázisban vannak, és egyáltalán nem biztos, hogy – a befogadó országok lakosságának ellenállása következtében – valósággá válhatnak. Ezért minden atomenergiát alkalmazó országnak folytatnia kell a saját területén történő elhelyezésre alkalmas terület keresését és a telephely előkészítését.

Irodalom

1. Ormai P: *Nemzetközi és hazai törekvések a radioaktív hulladékok biztonságos kezelésére és elhelyezésére*. Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Társaság, Budapest, 2003.
2. *Geological Disposal of Radioactive Waste Produced by Nuclear Power, from Concept to Implementation*. EUR 21 224, European Communities, 2004.
3. *Timing of High-level Waste Disposal*. OECD Nuclear Energy Agency, NEA No. 6244, 2008.
4. Euradwaste '08 Conference: Community policy and research and training activities. Luxemburg, 2008. Oct. 20–23.
5. *Partitioning and transmutation: Towards an easing of nuclear waste management program*. EUR 19785, European Commission, 2001.