

RADIOAKTÍV HULLADÉKOK TRANZMUTÁCIÓJA

Fehér Sándor

PhD, egyetemi docens
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
fehersh@reak.bme.hu

Az egyik legnagyobb teherterhelés, amellyel a mai atomenergetikának szembe kell néznie, az atomerőművek üzemeltetése során keletkező nagy aktivitású radioaktív hulladékok kezelésének és végleges elhelyezésének problémája. A manapság világszerte elfogadott elképzelések szerint a nagy aktivitású radioaktív hulladékok és a kiegészítő atomerőművi üzemanyag végleges elhelyezésére a mély geológiai tárolás jöhet számításba. A radioaktív hulladékoknak a kellően stabil geológiai formációkban való elhelyezése – a témával foglalkozó szakemberek véleménye és a vonatkozó vizsgálatok szerint – biztonságos megoldásnak tekinthető. Ugyanakkor világszerte tapasztalható, hogy a radioaktív hulladék-tárolók létesítése esetenként komoly társadalmi ellenállást vált ki, egyrészt az érintett lakosság, másrészt az atomenergia felhasználását ellenzők részéről. Valószínűleg ez a körülmény is közrejátszott abban, hogy az elmúlt másfél évtizedben jelentősen megnőtt az érdeklődés egy olyan új nukleáris technológia, nevezetesen a transzmutáció iránt, amely a végleges tárolás gazdaságosabbá és biztonságosabbá tehető. Ebben az írásban a transzmutáció fizikai alapjait, megvalósítási lehetőségeit és az e területen folyó nemzetközi kutatómunkát tekintjük át röviden.

A kiegészítő atomerőművi üzemanyag összetétele és radiotoxicitása

A transzmutáció mibenlétének és szerepének megvilágítása előtt célszerű rámutatni arra, hogy melyek azok a radioaktív hulladékok, amelyek kezelése, illetve végleges elhelyezése gondot jelent, és hogy ezek mennyiségét hogyan befolyásolja a nukleáris üzemanyag-ciklus jellege.¹

A manapság leginkább elterjedt úgynevezett nyomottvízes atomerőművi reaktorok kiegészítő üzemanyagának jellemző összetételét az *I. táblázatban* foglaltuk össze. Látható,

¹ A nukleáris üzemanyagciklus nyitott vagy zárt lehet. Nyitott üzemanyagciklus esetén a nukleáris üzemanyagot mindössze egyszer használjuk a reaktorban. Nyitott ciklusnál a kiegészítő üzemanyag radioaktív hulladéknak számít, s egy átmeneti tárolás után végleges elhelyezésre kerül. Ha az atomerőművek kiegészítő üzemanyagát reprocesszáljuk, azaz alkalmas kémiai eljárásokkal szétválasztjuk a benne található uránt, plutóniumot és egyéb összetevőket, akkor az uránt és plutóniumot új üzemanyag gyártásához használhatjuk fel, és így visszakeringethetjük a reaktorokba. Az urán és a plutónium visszakeringetésén alapuló üzemeltetési rendszert zárt üzemanyagciklusnak nevezzük. Zárt üzemanyagciklus esetén többféle reaktor együttműködése (szimbiózis) is megvalósítható. A ma üzemelő reaktorok többségére a nyitott üzemanyagciklus a jellemző, de több ország folytat kiterjedt kutatásokat a ciklus zárása érdekében.

| Urán és plutónium | Másodlagos aktinidák | Hosszú felezési idejű hasadási term. | Rövid felezési idejű hasadási term. | Stabil izotópok |
|-------------------------|---|---|---|------------------------------------|
| 955,4 kg U 8,5 kg Pu | 0,5 kg ²³⁷ Np 0,6 kg Am 0,02 kg Cm | 0,2 kg ¹²⁹ I 0,8 kg ⁹⁹ Tc 0,7 kg ⁹³ Zr 0,3 kg ¹³⁵ Cs | 1,0 kg ¹³⁷ Cs 0,7 kg ⁹⁰ Sr | 10,1 kg lantanida 21,8 kg egyéb |

1. táblázat • Tipikus nyomottvizes reaktor kiégett üzemanyagának összetétele (kiégettség: 33 MWnap/t, pihentetés: 10 év, összes tömeg: 1 t)

hogy a kiégett üzemanyag tömegének több mint 95 %-át a maradék urán teszi ki. Ennek ²³⁵U tartalma közelítőleg 1 %, azaz magasabb, mint a természetes uráné. A kiégett uránt tehát zárt üzemanyagciklusban enyhén dúsított uránként is hasznosíthatjuk. A második legfontosabb összetevő a csaknem 1 %-ot kitevő plutónium. Zárt üzemanyagciklusban ez is hasadóanyagként hasznosítható. A mindössze 0,1 tömegszázalékot kitevő másodlagos aktinidákról (neptúniumról, ameríciumról és kúriumról) meg kell jegyezni, hogy nagyon radiotoxikusak,² és némelyik izotópjuk igen hosszú élettartamú. A hasadási termékek közül a 16 millió éves felezési idejű ¹²⁹I és a 200 ezer éves felezési idejű ⁹⁹Tc jelenti a legnagyobb gondot a végleges elhelyezés szempontjából.

Mivel nyitott üzemanyagciklus esetén a kiégett üzemanyag radioaktív hulladéknak számít, átmeneti tárolás után a fenti anyagok is a végleges tárolóba kerülnek. Felmerül a kérdés, hogy a végleges tárolónak mennyi ideig kell biztosítania, hogy a radioaktív anyagok ne juthassanak ki a bioszférába. Ennek megítéléséhez a relatív radiotoxicitás időbeli alakulását kell figyelembe vennünk.

² Egy radioaktív izotóp radiotoxicitása az adott izotópnak a bioszférára, illetve emberre való veszélyességét méri. A radiotoxicitás a fizikai jellemzőkön (a sugárzás fajtáján és energiáján) túl a kémiai és biológiai hatásokat is figyelembe veszi.

A relatív radiotoxicitás azt adja meg, hogy egy adott izotóp vagy hulladékcsoomag radiotoxicitása (a bioszférára, ill. az emberre való veszélyessége) hogyan aránylik az előállításához felhasznált, kibányászott természetes urán radiotoxicitásához. A végleges tárolónak tehát legalább annyi időre kell elszigetelnie a radioaktív anyagot a bioszférától, míg annak relatív radiotoxicitása 1 alá nem csökken.

A tipikus nyomottvizes reaktorból származó kiégett üzemanyag radiotoxicitásának időbeli alakulására vonatkozó számítások azt mutatják, hogy a szükséges tárolási idő igen hosszú, majdnem egymillió év. A számítási eredmények arra is rámutatnak, hogy a radiotoxicitást néhány száz év után a különféle plutónium-izotópok dominálják, ugyanis a hasadási termékek toxicitása 5-600 év után jelentősen csökken. Ha azonban a plutóniumot zárt üzemanyagciklusban újból felhasználjuk, a radiotoxicitást alapvetően a hosszú felezési idejű másodlagos aktinidák, továbbá a ¹²⁹I és a ⁹⁹Tc izotópok határozzák meg.

Megállapítható: a kiégett üzemanyagban lévő bizonyos izotópok miatt igen hosszú elszigetelési időre van szükség. E hosszú tárolási idő és az eltárolandó hulladékmennyiség csökkentésében segíthet a transzmutáció.

A transzmutáció célja és szerepe

A transzmutáció a hosszú felezési idejű izotópoknak speciális reaktorokban vagy gyorsítóval

hajtott szubkritikus (azaz önfenntartó láncreakcióra nem képes) rendszerekben történő olyan besugárzását jelenti, amelynek során ezek az anyagok rövidebb felezési idejű vagy stabil izotópokká alakulnak át.

A transzmutáció alkalmazása feltételezi a nukleáris üzemanyagciklus zárását, ugyanis megvalósításához egy olyan továbbfejlesztett zárt üzemanyagciklusra van szükség, amelyben az urán és a plutónium recirkulációján kívül az egyébként hulladéknak tekintett hasadási termékek egy részének és a másodlagos aktinidáknak a recirkulációjára és ezzel együtt kiégetésére (elhasítására) is sor kerül.

Ahhoz, hogy a hosszú felezési idejű transzurán izotópokat és hasadási termékeket neutron-besugárzással transzmutálni lehessen, szelektív módon le kell választani őket a kiégett üzemanyagból. A szelektív szétbontást particionálásnak hívják. A két kapcsolódó technológiát (particionálás és transzmutáció) P/T-technológiának is nevezik.

Hangsúlyozni kell, hogy *a P/T-technológia nem jelent alternatívát a radioaktív hulladékok végleges elhelyezésével szemben, csak annak kiegészítésére szolgál. Alkalmazása jelentősen csökkentheti a végleges elhelyezésre kerülő hulladék mennyiségét és annak lebomlási idejét.* Ezzel elősegítheti az ilyen geológiai tárolók gazdaságosabb kihasználását, és a jellemző felezési idő csökkentésén keresztül növelheti a végleges tárolás biztonságát.

A transzmutáció megvalósítására szóba jöhető berendezések és rendszerek

A hasadási termékeket neutronbefogással, a másodlagos aktinidákat maghasadással lehet hatásosan transzmutálni. A befogás valószínűsége általában annál nagyobb, minél kisebb a neutronenergia. Az aktinidák egy része csak bizonyos küszöbenergia felett hasad; transz-

mutálásukhoz nagyenergiájú neutronok szükségesek. Az aktinidák esetében a hasadás mellett mindig felléphet a szimpla befogás is, amely eggyel nagyobb rendszámú transzurán kialakulásához vezet. Mivel a transzuránok hasadási valószínűsége a neutronenergia növekedésével általában nő, a transzmutáció szempontjából nemkívánatos befogási reakcióknak az arányát úgy lehet csökkenteni, ha keményebb neutronspektrumban végezzük a besugárzást. Fentiekből következően *a hasadási termékek transzmutálására a nagy fluxusú (nagy neutronsűrűségű), termikus spektrumú (kisebb átlagenergiájú neutronokkal üzemelő) reaktorok, míg a másodlagos aktinidák elhasítására a gyors (keményebb neutronspektrumú) reaktorok, gyorsítóval hajtott szubkritikus rendszerek alkalmasak.*

A transzmutáció rendszerszintű megvalósítására vonatkozó elképzelések két kategóriára oszthatók. Az elsőbe azok a rendszerek sorolhatók, amelyekben termikus és gyorsreaktorok nagyjából azonos arányban vannak jelen, és a gyorsreaktorok a termikus reaktorokból és önmagukból származó plutóniummal és másodlagos aktinidákkal üzemelnek. Az ilyen rendszerekben tehát a másodlagos aktinidák transzmutációja a gyorsreaktorokban valósul meg. A másik kategóriába azok az elképzelések tartoznak, amelyeknél a transzmutáció külön erre a célra fejlesztett (dedikált) berendezésekben történik. Az ilyen ún. kétrétegű rendszereknél a termikus reaktorok vannak többségben, és ezek nagy része a keletkezett plutónium újrafelhasználásával (plutónium-recirkuláltatással) üzemel. A termikus reaktorokban keletkező másodlagos aktinidákat a dedikált berendezések transzmutálják, szintén többszöri visszaforgatással. Számítások szerint egy dedikált transzmuter reaktor 6-10 termikus reaktort tud ily módon kiszol-

gálni. A fenti rendszerekre vonatkozó elemzések azt mutatják, hogy az *üzemanyag többszöri visszakeringetésével elérhető a radiotoxicitás akár századrészére történő csökkentése a nyitott üzemanyagciklushoz képest* (Salvatores, 2006). Ennek eredményeként a szükséges tárolási idő a több százezer éves nagyságrendről néhány száz évre csökken. A transzmutációs rendszerek teljes potenciáljának kihasználása azonban csak akkor lehetséges, ha legalább száz évre elkötelezzük magunkat az alkalmazása mellett.

A költségekre vonatkozó becslések szerint az új technológia mintegy húsz százalékkal emeli meg az ilyen rendszerekben termelt villamos energia árát (Salvatores, 2006).

Nemzetközi kutatómunka a transzmutáció területén

A transzmutáció alap gondolata nem új ötlet, szinte egyidős az atomenergetikával. Már a '40-es években felvetődött a gondolat, hogy a gyorsító technológia hasznos lehet az atomenergetika hulladékainak kezelésében. A neutron-magreakciókat felhasználó transzmutációval kapcsolatos első publikáció 1958-ban jelent meg. 1976-ban a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség egy, a transzmutációt is magában foglaló kutatási programot indított. Az ennek eredményeként 1982-ben született zárótanulmányban arra a következtetésre jutottak, hogy a transzmutáció ugyan technikailag megvalósíthatónak tűnik, ám bevezetése óriási beruházást igényel. Ez némiképp visszavetette a transzmutációval kapcsolatos kutatásokat. A '80-as és a '90-es évek fordulóján azonban új erőre kaptak a kutatások. Ebben nagy része volt a japán kormány 1988-as kez-

deményezésének, amely egy a P/T-technológiára irányuló K+F program indítására vonatkozott. Ez az ún. OMEGA program. A japán kormány meghívására szervezett tudományos eszmecsere eredményeként technikai információcsere-programot indítottak az OECD/NEA keretében a P/T területén. Az első nemzetközi információcsere-találkozót 1990 novemberében, Japánban tartották. Azóta a találkozókát két évente megszervezik. A résztvevő országok és kutatók száma folyamatosan nő, s a témák köre is egyre kiterjedtebbé vált.

Mindezek eredményeként *a P/T-technológia ma nagyon perspektivikus, erősen kutatott témának számít*. Több ország indított nemzeti kutatási programokat ezzel kapcsolatban. Az elméleti eredmények mellett már sok kísérleti eredmény áll rendelkezésre mind a particionálás (leválasztás), mind a transzmutáció területén. A különböző típusú atomreaktorokban végzett besugárzások bizonyítják, hogy *a P/T-technológia* ma már nemcsak elméleti lehetőségnek, hanem *műszakilag is végrehajtható hulladékkezelési eljárásnak tekinthető* mind az aktinidák, mind a hosszú élettartamú hasadási termékek vonatkozásában.

A P/T-technológia jelentőségének és elfogadottságának növekedését jelzi, hogy az elkövetkező évtizedek atomerőmű-típusainak nemzetközi együttműködéssel történt kiválasztásánál fontos szempont volt, hogy a kiválasztott reaktorok között legyenek hatásos transzmutációra képes típusok.

Kulcsszavak: *radioaktív hulladékok, radiotoxicitás, transzmutáció, P/T-technológia, zárt üzemanyagciklus*