

A TRANZMUTÁCIÓ MINT A NUKLEÁRIS HULLADÉKOK KEZELÉSÉNEK EGY LEHETSÉGES ÚTJA

TRANSMUTATION AS A POTENTIAL WAY OF NUCLEAR WASTE MANAGEMENT

Szieberth Máté

PhD, egyetemi docens, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nukleáris Technikai Intézet, Budapest
szieberth@reak.bme.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk áttekinti a transzmutációs technológiát, szakmai hátterét és egy lézeres neutronforrás felhasználási lehetőségeit ezen a területen. A transzmutáció elsődleges célkitűzése, hogy a kiégett nukleáris üzemanyagban található másodlagos aktinidákat hasadás révén rövidebb felezési idejű hasadási termékekké alakítsa. Nem váltja ki a mély geológiai tárolót, viszont az abban elhelyezett radioaktív hulladék hosszú távú kockázatait jelentősen csökkenti. Megvalósításához a nukleárisüzemanyag-ciklus zárására és gyorsreaktorokra, vagy esetleg gyorsítóval hajtott szubkritikus rendszerekre van szükség. Utóbbi technológia fontos eleme a spallációs neutronforrás, amely esetleg lézeres neutronforrással is kiváltható, amennyiben sikerül elérni a szükséges intenzitást. Ugyanakkor a lézeres neutronforrások terén elért áttöréstől még nem várható, hogy közelebb hozza a transzmutáció megvalósítását.

ABSTRACT

The paper provides an overview of the transmutation technology, its technical background and the potential use of laser-based neutron sources in this field. The primary objective of transmutation is to transform minor actinides in spent nuclear fuel into shorter half-lived fission products through nuclear fission. It does not replace deep geological disposal but can significantly reduce the long term risks of radioactive wastes disposed in the latter. Its implementation requires the closure of the nuclear fuel cycle and the application of fast reactors or maybe accelerator driven subcritical systems. A crucial element of the latter is the high intensity neutron source, which is currently assumed to be spallation source but may be replaced by laser-based neutron source in case the required intensity is successfully achieved. On the other hand, a breakthrough concerning laser-based neutron sources is not yet expected to bring closer the realisation of transmutation.

Kulcsszavak: atomenergia, radioaktív hulladékok, nukleárisüzemanyag-ciklus, transzmutáció, gyorsítóval hajtott szubkritikus rendszerek, lézeres neutronforrás

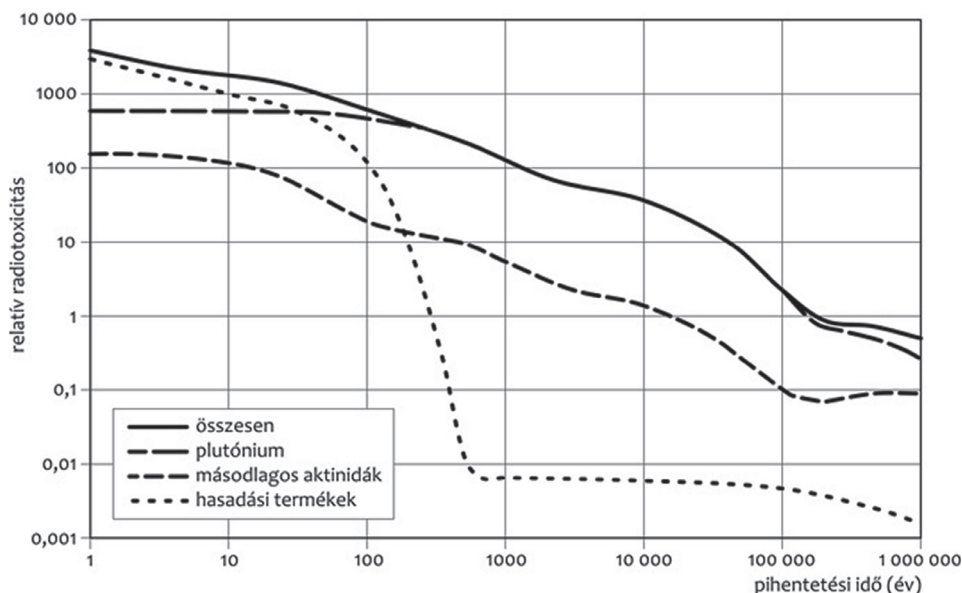
Keywords: nuclear power, radioactive wastes, nuclear fuel cycle, transmutation, accelerator driven subcritical systems, laser-based neutron source

A *Magyar Tudomány* egy korábbi számában cikksorozat foglalkozott a kiégett fűtőelemek és radioaktív hulladékok kezelésével és elhelyezésével. Ennek keretében bemutatásra került a vonatkozó nemzeti program (Nös, 2016), a kiégett üzemanyag jellemzői és feldolgozási lehetőségei (Hózer, 2016), valamint a nukleárisüzemanyag-ciklus zárásának lehetőségei (Szieberth, 2016). Utóbbi cikk a transzmutációval is foglalkozott, mivel azonban a szegedi ELI-ALPS lézeres neutronforrás projektje (Osvay–Szabó, 2020) kapcsán a téma az érdeklődés homlokterébe került, ebben a cikkben részletesebben tekintjük át ezt a technológiát és szélesebb szakmai hátterét.

A TRANSZMUTÁCIÓ ALAPJAI

A transzmutáció a középkori alkímiából eredő fogalom, amelyen elemek egymásba alakítását értették. A modern tudomány a magreakciók felfedezésével adott új értelmet a fogalomnak, és a protonszám változásával járó reakciókra használja, hiszen ilyenkor az anyagban egy másik elem izotópja jelenik meg. Így transzmutációnak nevezzük az anyag sugárkárosodásának egyik formáját is, amikor például acélban besugárzás hatására kobaltizotópok jelennek meg, megváltoztatva a rácsszerkezetet. Jelen esetben a nukleáris hulladékok kezelésével kapcsolatban a transzmutáció alatt a hosszú felezési idejű izotópok rövid felezési idejűvé vagy stabillá alakítását értjük. A nukleáris hulladékok transzmutációjának alapgondata nem új ötlet, szinte egyidős az atomenergetikával (Fehér, 2007). Már az 1940-es években felvetődött a gondolat, hogy a gyorsítótechnológia hasznos lehet az atomenergetika hulladékainak kezelésében. A neutron-magreakciókat felhasználó transzmutációval kapcsolatos első publikáció 1958-ban jelent meg.

A transzmutációval kapcsolatban először azt fontos rögzíteni, hogy az atomerőművekben keletkező radioaktív hulladékok (Hózer, 2020) közül csak a kiégett üzemanyag esetén merül fel az alkalmazása. A kiégett üzemanyagban található anyagok radiotoxicitásának az 1. ábrán látható hosszú távú alakulását vizsgálva megállapíthatjuk, hogy az több mint százezer év alatt csökkenne a felhasznált természetes urán szintjére, és ezért elsősorban a plutóniumizotópok (Pu) felelősek. Mivel a plutóniumizotópok jelentős arányban hasadóképesek, az üzemanyagciklus zárása esetén a kiégett üzemanyag feldolgozása után reaktorokban hasznosíthatók és hasadási termékekké alakíthatók. Amennyiben ez megvalósul, akkor a hulladékban az ún. másodlagos aktinidák (neptúnium-, amerícium- és kúriumizotópok) határozzák meg a hosszú távú kockázatokat, ami tízezer éves léptékben csökken a fenti referenciaszintre. A másodlagos aktinidákat is eltávolítva a hulladéksomagból, a hasadási termékek maradnak hátra, melyek jellemzően rövidebb felezési idejének köszönhetően már ezer éven belül a kívánt szintre csökkenhet a radiotoxicitás.



1. ábra. A kiégett üzemanyag kitermelt uránhoz viszonyított relatív radiotoxicitásának időbeli alakulása

Ezekből a megállapításokból fakad a transzmutáció elsődleges célkitűzése, vagyis hogy a másodlagos aktinidákat hasadás révén rövidebb felezési idejű hasadási termékekké alakítsuk. Fontos megjegyezni azonban, hogy a fenti radiotoxicitás-alapú megközelítés nem veszi figyelembe a konkrét hulladékformát, a végleges elhelyezés körülményeit, valamint az egyes izotópok mobilitását a tároló műszaki határain és a környező kőzetten keresztül. A végleges elhelyezésre szolgáló mélységi geológiai tároló méretezése és biztonsági elemzése során ezekkel számolni kell, és kritériumként a potenciálisan érintett lakosságra vonatkozó dóziskorlátot kell alkalmazni. Werner von Lensa és munkatársai (2008) tanulmányukban részletesen vizsgálták több ország tervezett tárolókonceptióját, és az egyik legfontosabb megállapításuk, hogy valamennyi képes garantálni a radioaktív hulladékok biztonságos elszigetelését akár a kiégett üzemanyag közvetlen elhelyezése esetén is. A bőven a határértékek alatt maradó lakossági dózisokhoz pedig elsősorban néhány hosszú felezési idejű hasadási termék (például ^{129}I) járult hozzá jelentős mértékben, míg az aktinidaiszotópok a befoglaló kőzetekben gyakorlatilag immobilisnak tekinthetők. Ennek megfelelően azzal kapcsolatban egyértelmű nemzetközi szakmai konszenzus áll fenn, hogy mélységi geológiai tárolóra mindenképp szükség van, és azok mérnöki és természetes gátjait elsősorban a mobilis hasadási termékek alapján kell méretezni. Ugyanakkor azt is megállapították, hogy a tárolóba történő emberi behatolás esetén a transzmutációs scenárió előnyei

egyértelműek, és a potenciális kockázatok valóban a fenti radiotoxicitási görbékhez hasonlóan alakulnak. Míg a természeti folyamatokból fakadó kockázatok műszaki-tudományos eszközökkel jól felmérhetők, addig a jövőbeni emberi viselkedésre – hogy ki, mikor, milyen célból és milyen technológiával hatol be a tárolóba akár szándékosan, akár véletlenül – ebben az időtávlatban nem tudunk ilyen becsléseket adni, ezért a transzmutációból fakadó előnyök mérlegelése vég-ső soron társadalmi-filozófiai kérdéssé válik.

A transzmutáció objektíven meghatározható előnyei közé tartozik viszont a hulladék térfogatának és hőtermelésének jelentős csökkentése, amely a közvetlen elhelyezéshez képest akár tizedére csökkentheti a szükséges geológiai tároló térfogatát, és ezáltal jelentős költségmegtakarítást is eredményez. Ezt a megtakarítást viszont a szükséges kutatás-fejlesztés, a többletberuházások és a drágább, összetettebb technológia üzemeltetése ellensúlyozhatja. Az eljárás gazdaságosságának elemzése részletesen kidolgozott koncepciók és a teljes üzemanyagciklus figyelembevételével lehetséges, ezért ma még csak nagy bizonytalansággal ter-helt elemzések állnak rendelkezésre.

A fentiek alapján a hasadási termékek transzmutációja is szóba jöhetne, de az alacsony hatáskeresztmetszetek miatt ez nem tűnik reálisnak. A másodlagos aktinidák transzmutációjára viszont lehetőséget ad, hogy nagy neutronenergiákon (kb. 1 MeV fölött) minden másodlagosaktinida-izotóp hasadóképes, vagyis a neutronelnyelés hatáskeresztmetszetét meghaladja a hasadás hatáskeresztmetszete (Szieberth, 2016). Ez azért fontos, mert a neutronelnyelés viszont más aktinida-izotópok létrejöttéhez vezet, amelyek mind hosszú bomlási láncok alapját képezik, így a hosszú távú kockázatok lényegében nem változnak.

TRANSMUTÁCIÓS REAKTOROK ÉS ÜZEMANYAGCIKLUS

Ennek megfelelően a transzmutáció gyorsneutron-spektrumban lehetséges, vagyis olyan reaktorokban, amelyekben nincsenek a neutronok lassítását szolgáló kis tömegszámú anyagok. A legnagyobb kihívást az okozza, hogy ez egyben a legkézenfekvőbb hűtőközeg, a víz használatát is kizárja, ezért a gyorsreaktorok folyékonyfém- (nátrium, ólom vagy ólom-bizmut eutektikum) vagy (a kis sűrűséget kihasználva) gázhűtésűek. A nátriumhűtésű gyorsreaktor demonstrált technológiának tekinthető kb. 400 reaktorév üzemeltetési tapasztalattal, bár jelenleg csak Indiában, Kínában és Oroszországban üzemel összesen négy ilyen reaktor. Az ólom- és a gázhűtésű gyorsreaktor két alternatív technológia, amelyek fejlesztését az Európai Unió is támogatja (Gadó, 2016). Franciaországban 2009-ben állították le a *Phénix* kísérleti gyorsreaktort, amelyben korábban laboratóriumi szinten demonstrálták a másodlagos aktinidák transzmutációját is amerícium- és neptúniumtartalmú speciális üzemanyagpálcákban. Egy korábbi *Magyar Tudomány*

cikk (Szieberth, 2016) bemutatta, hogy egy gázhűtésű gyorsreaktorral lehetséges olyan üzemanyagciklust kialakítani, amely a reprocesszási veszteségeken túl nem termel aktinidahulladékot, végleges elhelyezésre gyakorlatilag csak hasadási termékek kerülnek. Ez érvényes a többi gyorsreaktortípusra is, sőt, egy gyorsreaktor több termikus reaktor kiegészített üzemanyagának aktinidatartalmát is képes hasznosítani és átalakítani (Halász–Szieberth, 2020).

A transzmutáció megvalósításához azonban nem elegendő a megfelelő neutronspektrumú reaktor, ugyanilyen fontos a kiegészített üzemanyag kémiai feldolgozása oly módon, hogy az urán- és plutóniumfrakciók mellett a másodlagos aktinidákat is szeparálják a hasadási termékektől (Hózer, 2020). Ezeknek a feldolgozási eljárásoknak a fejlesztése még zajlik, többet is demonstráltak már laboratóriumi szinten, de ipari léptékben még egy sem működik. A kémiai szétválasztás alapvető fontosságát jelzi, hogy a nemzetközi szakirodalom általában szétválasztási és transzmutációs (partitioning and transmutation, P&T) technológiát említ. A szétválasztás után másodlagosaktinida-tartalmú üzemanyagot kell gyártani, amely szintén komoly technológiai kihívás a nagy aktivitás miatt. Az üzemanyaggyártás problémáját látszólag megkerülik a sóolvadékos reaktorkonceptiók, ahol fluoridalapú olvadt sóban feloldva kering az üzemanyag a primer körben, miközben csak az aktív zónát alkotó megfelelő térfogatú tartályban áll fenn kritikusság. A koncepció előnye a homogén üzemanyag, a folyamatos betáplálás és kémiai feldolgozás lehetősége, de a megvalósításban a korróziós problémák, az olvadt só kémiai kontrollja számtalan nehézséget tartogat. Ezért az 1960-as években az Egyesült Államokban három éven át üzemelő 10 MW-os kísérleti reaktoron (Király, 2012) túl ilyen berendezés még nem épült, bár több koncepcióval kapcsolatban zajlanak kutatások, mint például az orosz MOSART (Ignatiev et al., 2014) és a francia MSFR (Yamaji–Aszódi, 2014) koncepciók.

A másodlagosaktinida-tartalmú üzemanyaggal kapcsolatos nehézségek ihlették az ún. „kétrétegű” (double strata) üzemanyagciklus koncepcióját. Itt szétválasztják az üzemanyagciklusnak azt a rétegét, ahol csak a plutónium visszaforgatása történik meg, és azt a második réteget, ahova a szétválasztás után az előző rétegből a másodlagos aktinidák is visszaforgatásra kerülnek. Így erre a második rétegre lehet korlátozni a másodlagos aktinidák kezelő, bonyolultabb és kockázatosabb technológiákat, míg az első réteg a hagyományos ipari gyakorlatnak megfelelően tud működni. Mivel a másodlagos aktinidák mennyisége kb. egy nagyságrenddel kisebb a plutóniuménál, a második rétegnek kevesebb berendezést kell tartalmaznia. Különösen akkor, ha olyan reaktorokat alkalmazunk, amelyekbe nagy mennyiségben lehet másodlagos aktinidákat tölteni. Az önfenntartó láncreakción alapuló kritikus reaktorok esetében ez azonban reaktorfizikai akadályokba ütközik, mivel fontos paramétereiket (későneutron-hányad, Doppler-együttható) kedvezőtlen irányba változtatja a magas másodlagosaktinida-koncentráció, és nehezíti a szabályozásukat. Ezért kb. 5%-nál magasabb koncentráció valószínűleg nem engedhető meg.

A GYORSÍTÓVAL HATOTT SZUBKRITIKUS RENDSZEREK (ADS)

A kétrétegű üzemanyagciklusban juthatnak szerephez viszont az ún. gyorsítóval hajtott szubkritikus rendszerek (accelerator driven system, ADS). Ez a koncepció azon alapszik, hogy ha egy szubkritikus reaktorzónába egy neutronforrásból neutronokat juttatunk, akkor önfenntartó láncreakció ugyan nem indul el, de a forrásneutronokat hasadások révén megsokszorozva a reaktor a forrás intenzitásával arányos teljesítményen fog működni. Megfelelően intenzív neutronforrás esetén az energetikai reaktorokhoz hasonló teljesítmény érhető el. Ilyen neutronforrások lehetősége a nagy intenzitású spallációs források megjelenésével jött el (Mezei, 2020). A spalláció során nagy energiájú (kb. 1 GeV) proton csapódik nehézfém (például wolfram) céltárgyba, és magreakciók kaszkádja során nagy számú (50–55) neutron keletkezik. A transzmutáció szempontjából a koncepció előnye, hogy a szubkritikusság miatt, valamint mivel a teljesítménye a gyorsító nyalábáramán keresztül szabályozható, nem befolyásolja a magas másodlagosaktinida-koncentráció, az akár több tíz százalék is lehet. Ezért számítások szerint, míg egy kritikus gyorsreaktor 2–4 kg/TWh, egy ADS akár 35 kg/TWh másodlagos aktinida elhasítására lehet képes.

Az ADS-fejlesztések az 1990-es években kaptak lendületet a gyorsítótechnológia fejlődésével, azonban a mai napig sem épült még az elvárt paramétereknek megfelelő gyorsító, vagyis amely folytonos üzemmódban 1 GeV-os protonok 10 mA körüli áramát tudná biztosítani. További megoldandó kérdés a nyalábvezető ablakának, valamint a céltárgynak a kialakítása és hűtése a fellépő extrém terhelésnek megfelelően. A reaktor zónája a megfelelően nagy energiájú neutron-spektrum kialakítása érdekében hasonló kialakítású lesz, mint egy gyorsreaktoré. Fontos reaktorfizikai probléma azonban a zóna szubkritikusságának monitorozása, mivel a kritikus reaktoroknál megszokott módszerek nem alkalmazhatók.

A világ több országában folynak ma is fejlesztések ADS-koncepciókkal kapcsolatban. Legelőrehaladottabb állapotban a belgiumi MYRRHA (Multipurpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications) (Abderrahim–De Bruyn, 2019) kísérleti reaktor van, amelynek a tervezése már 1998-ban elkezdődött a belgiumi SCK-CEN kutatóintézetben. A jelenlegi tervek szerint a berendezés egy 600 MeV-os lineáris protongyorsítót tartalmaz majd, amely 3,5 mA-es protonnyalábot lő a reaktor közepén elhelyezett spallációs céltárgyra, kb. 10^{17} neutron termelve másodpercenként. A 0,95-ös effektív sokszorozási tényezőjű szubkritikus zóna nukleáris teljesítménye így 70 MW lenne. A spallációs céltárgy és a zóna hűtőközege is ólom-bizmut eutektikum. Ennek előnye viszonylag alacsony olvadáspontja (125 °C). Az üzemanyag kb. 30%-os Pu-tartalmú oxidkeverék (mixed oxide, MOX). A MYRRHA tehát nem transzmutációs berendezés lesz, ezen a területen legfeljebb laboratóriumi kísérleteket fognak végezni. Ugyanakkor a MYRRHA egyszerre lehet az ólom-bizmut-hűtésű gyorsreaktor és az ADS technológiai demonstrációja.

A befejezés első céldátuma 2012 volt, de technológiai nehézségek és költségvetési problémák miatt többször átütemezték a projektet. 2018-ban háromfázisú megvalósítás mellett döntöttek: az első fázisban egy 100 MeV-os 4 mA-es gyorsítófokozat készül el, melynek több alternatív felhasználását is tervezik (izotópgyártás és magfúziós anyagtudományi kutatások). Ennek a megvalósítása meg is kezdődött, és 2026-ra tervezik a befejezését. A második fázisban a 600 MeV-os gyorsítófokozatot építenék meg, amellyel teljessé válna a 400 m hosszú lineáris gyorsító. Ennek befejezését 2033-ra tervezik. A reaktor a harmadik fázisban készülne el, amely a másodikkal párhuzamosan indulna, és 2036-ra fejeződne be. A teljes költségvetést 1,6 milliárd euróra becslik, amelyből 480 millió, mintegy 30% esik az első két fázisra, vagyis a gyorsító megépítésére. Jól látható, hogy bármilyen komplikált is a gyorsítótechnológia, a beruházás költségvetésének 70%-át még mindig a reaktor megépítése teszi ki. Valószínűsíthető, hogy ezek az arányok a későbbi, nagyobb teljesítményű, transzmutációs célra szánt ADS-eknél is fennállnak majd, ezért önmagában a neutronforrás terén elért költségsökkentésnek csak kisebb hatása lehetne az egész beruházási költségre.

A TRANZMUTÁCIÓ MEGVALÓSÍTHATÓSÁGA NEMZETKÖZI SZINTEN ÉS MAGYARORSZÁGON

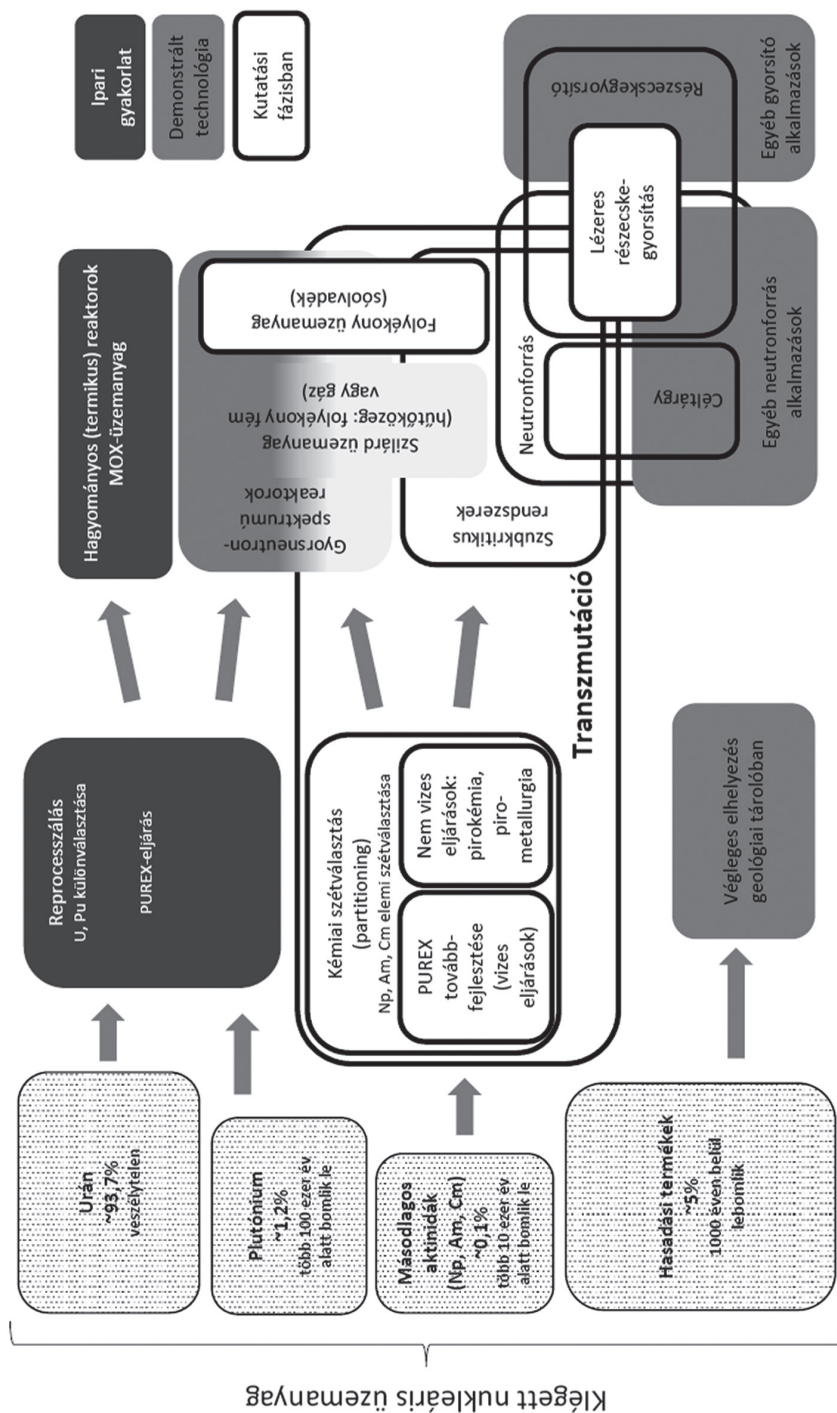
Ahogy láttuk, a transzmutáció egy összetett technológia, amely nem egy berendezés építésével valósul meg, hanem az egész nukleárisüzemanyag-ciklus átszervezésével. Ez magában foglalja a kiegészített üzemanyag kémiai újrafeldolgozásának ipari léptékű megvalósítását, másodlagosaktinida-tartalmú üzemanyagok gyártását és végül transzmutációs reaktorok vagy ADS-ek építését. Azt is láthattuk, hogy a hosszú távú kockázatokért elsősorban a Pu-izotópok felelősek, tehát a másodlagos aktinidák visszaforgatását akkor érdemes megvalósítani, ha már megvalósult a zárt üzemanyagciklus, vagyis a Pu visszaforgatása és hasznosítása. Mindez olyan léptékű beruházásokat igényel, amely észszerűen csak nemzetközi összefogásban valósulhat meg. Ez elsősorban akkor várható, ha a következő évtizedekben bekövetkezik az atomenergetika klímavédelmi okokból szükséges bővülése, és az urán iránti növekvő igény áremelkedést és így a Pu-alapú üzemanyagok versenyképessé válását eredményezi. Mivel a zárt üzemanyagciklus feltételezi gyorsreaktorok működését is, ezért valószínű, hogy transzmutáció is gyorsreaktorokban valósul meg először. Amennyiben azonban sikerül az ADS-technológiát megvalósítani, akkor az is szerepet kaphat, kihasználva a kétrétegű üzemanyagciklus előnyeit.

Ugyanakkor a kiegészített üzemanyag itthon keletkező mennyiségére nem lehet gazdaságosan újrafeldolgozó üzemet alapozni, ezt Magyarországnak csak külföldön elvégzett szolgáltatásként lehet érdemes megvásárolnia. Ugyanígy, egy transzmutációs reaktor üzemeltetése is legalább széles körű regionális együttmű-

ködést igényelne a beruházás léptéke miatt. Magyarországon a radioaktív hulladékok és a kiégett atomerőművi üzemanyagok kezelésével kapcsolatban 2015-ben az Országgyűlés nemzeti politikát (21/2015. (V. 4.) OGY határozat) fogadott el, amelyre alapozva a kormány 2016-ban nemzeti programot (Nös, 2016) dolgozott ki. Ezek a magas szintű dokumentumok figyelembe veszik a nukleárisüzemanyag-ciklus zárását, így a transzmutáció lehetséges megvalósulását is, ugyanakkor – a nemzetközi tudományos konszenzusnak megfelelően – rögzítik, hogy a kiégett nukleáris üzemanyag kezelési módjától függetlenül mélységi geológiai tároló kialakítására van szükség. Ennek megfelelően a telephely kiválasztását célzó kutatási program ma is zajlik, miközben a végleges elhelyezésre kerülő hulladék összetételét és formáját legkésőbb a tároló kialakításának tervezéséig kell meghatározni, amelyre a telephely kiválasztását követően, évtizedek múlva kerülhet sor. Ez a legtöbb ország által követett ún. „do and see” politika, vagyis amikor folyamatosan lépéseket teszünk a radioaktív hulladékok végleges elhelyezése felé, de döntési pontokat iktatunk be, ahol a technológiai fejlődés alapján mérlegelni lehet a továbbhaladás legkedvezőbb útját. A döntési pontig rendelkezésre álló több évtizedes időszakban fontos, hogy a hazai nukleáris kutatóintézetek továbbra is aktívan és sikeresen kapcsolódjanak be a transzmutációval kapcsolatos megalapozott nemzetközi kutatási programokba, hogy a helyzetértékeléshez és döntéshez szükséges információ és kompetencia folyamatosan rendelkezésre álljon.

A LÉZERES NEUTRONFORRÁS SZEREPE A TRANSZMUTÁCIÓBAN

A 2. ábrán sematikusan láthatók a kiégett üzemanyag egyes komponenseinek kezelésére alkalmazható technológiák, köztük a transzmutáció. Az urán és a plutónium termikus reaktorokban történő újrahasznosítása ipari gyakorlatnak tekinthető. A Pu hasznosítása gyorsreaktorokban szintén demonstrált, bár csak kevés ilyen reaktor működik. A transzmutáció megvalósításához elengedhetetlen, hogy a ma még csak laboratóriumi szinten létező technológiák ipari léptékben megvalósuljanak. Ha ez megtörténik, akkor kritikus reaktorok mellett ADS-ekben is elképzelhető a transzmutáció. Míg a szilárd üzemanyagú gyorsreaktorokban történő transzmutáció szinte minden eleme demonstrált, addig a sóolvadékos reaktorok és az ADS-ek még fejlesztés alatt állnak. Utóbbiaknál kritikus pont a megfelelő intenzitású (10^{17} s^{-1} nagyságrendű) neutronforrás, amelyhez részecskegyorsító és megfelelő céltárgy is szükséges. Ezen a területen jelenthet komoly előrelépést a lézeres neutronforrás, amennyiben azoknál olcsóbban vagy megbízhatóbban képes produkálni a megfelelő intenzitást. Ugyanakkor azt is láttuk, hogy az ADS költségében a neutronforrás csak kisebb részt tesz ki. A lézeres neutronforrás tehát önmagában nem fogja közelebb hozni a transzmutáció megvalósulását, de egyik lehetséges útjának fejlesztéséhez komoly hozzájárulást nyújthat.



2. ábra. A kiégett üzemanyag kezelésére alkalmas technológiák és a lézeres neutronforrás kapcsolata

Emellett természetesen még számos rövidebb távon megvalósítható alkalmazása lehet. Fontos azt is rögzíteni, hogy mélységi geológiai tárolóra legalább a hasadási termékek és reprocesszási hulladékok elhelyezéséhez bármelyik forgatókönyv esetén szükség lesz.

A TADZSIMA (TAJIMA)–MOUROU TRANSZMUTÁCIÓS KONCEPCIÓ

A lézeres neutronforrás fejlesztését bemutató cikkben (Osvay–Szabó, 2020) említett Gerard Mourou és Tadzsimá Tosiki (Toshiki Tajima) által javasolt transzmutációs berendezésről hivatalosan publikált leírás egyelőre nem érhető el. A szerzők azonban több alkalommal tartottak Magyarországon előadást, és Tadzsimá Tosikit, valamint munkatársait a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nukleáris Technikai Intézetébe is meghívtuk, hogy bemutassák koncepciójukat. Az itt megismert adatok általában összhangban voltak a *TAE Technologies* honlapján megtalálható folyóiratcikk-kéziratban foglaltakkal (Tajima et al., 2019). A sóolvadék üzemanyagból fakadó egyszerű, homogén geometriának köszönhetően ezek alapján már összeállítható egy modell előzetes reaktorfizikai elemzésekhez.

A koncepció szerint egy sóolvadékos szubkritikus reaktort hajt egy lézeres neutronforrás. Az aktív zóna 50 cm-es átmérőjű és 2 m magasságú henger 30 cm-es grafitreflektorral körbevéve. A só LiF-BeF_2 keverék, amelyhez 1 mol%-ban (az oldhatósági határ alatt) transzurán elemek fluoridjait adjuk. A lézeres neutronforrást pontszerű 14 MeV-os energiájú forrásként modelleztük a zóna közepén, mivel ez az optimális pozíció, ahol a legnagyobb neutronfluxust biztosítja. A transzuránok összetételét a paksi reaktorok kiégett üzemanyagának átlagos Pu-, illetve másodlagosaktinida-összetétele alapján határoztuk meg, a Pu és a másodlagos aktinidák arányát úgy állítva be, hogy mindig 0,98-as effektív sokszorozási tényezőt kapjunk. Folytonos üzemanyag-betöltést és a keletkező hasadási termékek folytonos kémiai eltávolítását tételeztük fel. A számításokat a széleskörűen használt SERPENT Monte-Carlo-neutrontranszportkód és az NTI-ben fejlesztett JOSETTE üzemanyagciklus-szimulációs kód (Halász–Szieberth, 2020) összekapcsolásával végeztük.

Eredményeink szerint a feltételezett 100 MW-os termikus teljesítmény eléréséhez 2×10^{17} 1/s-os neutronforrás-intenzításra van szükség. Kezdetben egy év alatt 10 kg másodlagos aktinidát lehet betáplálni a rendszerbe, ez a mennyiség azonban évről évre folyamatosan csökken, és kb. tizenöt év után már termelésbe fordul át. Ennek oka, hogy a reaktor kis mérete miatt már kezdetben is a teljes transzurán tartalom 74%-át teszi ki a Pu mennyisége, ami a hasadóképes Pu-izotópok fogyásával 88%-ig növekszik, hogy a megfelelő neutronsokszorozás biztosítható legyen. A problémához a sóolvadékban található könnyű elemeknek (Be

és Li), valamint a grafitreflektornak köszönhetően a gyorsreaktorokénál sokkal termalizáltabb neutronspektrum is hozzájárul. Az eddig megismert adatok alapján tehát a koncepció reaktorfizikai szempontból nem tűnik megalapozottnak, és a kitűzött transzmutációs célokat nem éri el. A reaktorfizikai problémák a zóna méretének jelentős növelésével és más paraméterek optimalizálásával valószínűleg megoldhatók, hiszen több részletesen kidolgozott sóolvadékos reaktor (mint az említett MOSART- és MSFR-koncepciók) esetében is sikerült számításokkal igazolni, hogy az a másodlagos aktinidák folyamatos nettó fogyasztására (elhasítására) képes. Ugyanakkor a sóolvadékos reaktorok megvalósításával kapcsolatos termohidraulikai, anyagtudományi, kémiai és nukleáris biztonsági kihívások továbbra is fennállnak. Mivel ezekkel kapcsolatban az eddig megismert koncepció nem tartalmaz értékelhető részleteket, annak megvalósíthatóságáról és főleg a megvalósítás időskálájáról még nem lehet érdemi megállapítást tenni.

ÖSSZEGZÉS

A transzmutációs technológia célja a másodlagos aktinidák elhasítása a végleges elhelyezésre kerülő nukleáris hulladék hosszú távú radiotoxicitásának csökkentése érdekében. Valamennyi aktinidaizotóp eltávolítása után a hulladék radiotoxicitása ezer éven belül a felhasznált természetes urán szintjére csökkenhet, de ebben az esetben is szükség van mélységi geológiai elhelyezésre, különös tekintettel a hulladékban maradó hosszú felezési idejű hasadási termékekre. A transzmutáció megvalósításának alapfeltétele a kiegészített üzemanyag kémiai szétválasztásának ipari léptékű megvalósítása, és másodlagos aktinidákat tartalmazó üzemanyag gyártása. Ez a nukleárisüzemanyag-ciklus átszervezését igényli, és olyan léptékű beruházást igényel, amely csak hosszabb távon, nemzetközi együttműködésben képzelhető el. A másodlagos aktinidák transzmutációját kritikus gyorsreaktorokban és ADS-ekben is meg lehet valósítani. Utóbbi technológia fontos eleme a spallációs neutronforrás, amely esetleg lézeres neutronforrással is kiváltható, amennyiben sikerül elérni a szükséges intenzitást. Ugyanakkor a lézeres neutronforrások terén elért áttöréstől még nem várható, hogy közelebb hozza a transzmutáció megvalósítását.

IRODALOM

- Abderrahim, H. A. – De Bruyn, D. et al. (2019): MYRRHA Accelerator Driven System Programme: Recent Progress and Perspectives. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2019 – #02, Nuclear Power Engineering (Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika), n°2, June 2019, 29–41. <https://doi.org/10.26583/npe.2019.2.03>
- Csom Gy. (1988): *Atomenergia-rendszerek nukleáris üzemanyagciklusának továbbfejlesztési lehetőségei*. Budapest: Akadémiai Kiadó

- Fehér S. (2007): Radioaktív hulladékok transzmutációja. *Magyar Tudomány*, 167, 1, 36–39. <http://www.matud.iif.hu/07jan/09.html>
- Forschungszentrum Julien GmbH (2008): *Red Impact*. Forschungszentrum Julien GmbH, https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/117/39117966.pdf
- Gadó J. (2016): Gyorsreaktorok az üzemanyagciklusban. *Magyar Tudomány*, 177, 5, 552–559. <http://www.matud.iif.hu/2016/05/06.htm>
- Halász M. – Szieberth M. (2020): Negyedik generációs reaktorokat tartalmazó üzemanyagciklusok vizsgálata. *Nukleon*, XIII, 1, 230. <https://nuklearis.hu/nukleon/negyedik-generacios-reaktorokat-tartalmazo-uzemanyagciklusok-vizsgalata>
- Hózer Z. (2016): A kiégett üzemanyag jellemzői és feldolgozása, *Magyar Tudomány*, 177, 5, 534–540. <http://www.matud.iif.hu/2016/05/04.htm>
- Hózer Z. (2020): Az atomerőművekben keletkező radioaktív hulladékok jellemzői és kezelésük, *Magyar Tudomány*, 181, 12, 1603–1608. DOI: 10.1556/2065.181.2020.12.4
- Ignatiev, V. – Feynberg, O. et al. (2014): Molten Salt Actinide Recycler and Transforming System without and with Th–U Support: Fuel Cycle Flexibility and Key Material Properties. *Annals of Nuclear Energy*, 64, 408–420. DOI: 10.1016/j.anucene.2013.09.004, <https://bit.ly/3iC9oGj>
- Király M. (2012): Egy részben elfelejtett technológia nyomában. *Nukleon*, V, 3, 114. <https://nuklearis.hu/nukleon/egy-reszben-elfelejtett-technologia-nyomaban>
- Lensa, W. von – Nabbi, R. – Rossbach, M. (2008): *RED-IMPACT. Impact of Partitioning, Transmutation and Waste Reduction Technologies on the Final Nuclear Waste Disposal*. Synthesis Report, Forschungszentrum Jülich
- Mezei F. (2020): Fejlődő perspektívák a neutronnyalábok széleskörű használatában. *Fizikai Szemle*, 1, http://fizikaiszemle.hu/uploads/2020/02/fizszem-202001-mezeife-renc_13_26_58_1581683218.8289.pdf
- Nős B. (2016): A kiégett üzemanyag kezelésének nemzeti programja. *Magyar Tudomány*, 177, 5, 527–533. <http://www.matud.iif.hu/2016/05/03.htm>
- Osvay K. – Szabó G. (2020): Lézeres neutronforrás fejlesztése, *Magyar Tudomány*, 181, 12, 1586–1602. DOI: 10.1556/2065.181.2020.12.3
- Szieberth M. (2016): A nukleáris nukleárisüzemanyag-ciklus zárásának lehetőségei. *Magyar Tudomány*, 177, 5, 541–551. <http://www.matud.iif.hu/2016/05/05.htm>
- Tajima, T. – Necas, A. – Mourou, G. et al. (2019): *Fusion Driven Liquid-phase Transmutator Monitored and Controlled Realtime by CAN Laser*. TAE Technologies, <https://tae.com/can-laser-driven-liquid-phase-transmutator-monitored-realtime-by-fiber-laser/>
- Yamaji, B. – Aszódi A. (2014): Sóolvadékos reaktorkonceptió kísérleti vizsgálata. *Nukleon*, VII, 2, 161. <https://nuklearis.hu/nukleon/soolvadekos-reaktorkonceptio-kiserleti-vizsgalata>