

KIRÁLY MÁRTON

A hasadóanyag-tenyésztés atomenergetikai lehetőségei

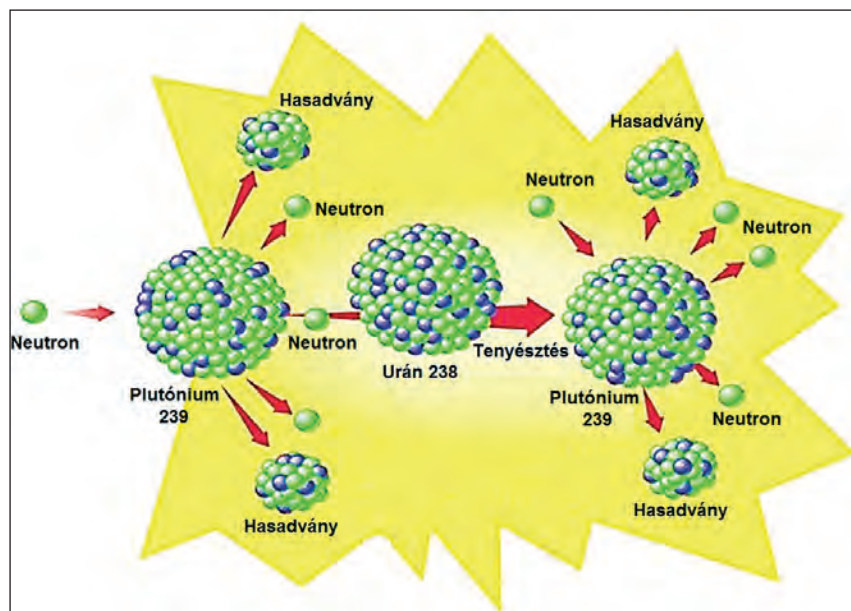
A XXI. század egyik legfontosabb kérdése az emberiség egyre növekvő energiaigényének kielégítése, méghozzá oly módon, hogy a globális felmelegedés folyamatát megállítsuk, esetleg visszafordítsuk. Mai világunk elsősorban a fosszilis energiahordozókra épül: a fűtési, az elektromosenergia- és közlekedési igényeinket is ezek elégítik ki. A Földön kitermelhető fosszilis energiaforrások biztosítják az energiaigény közel 80%-át. A világon naponta mintegy 18 millió tonna kőszén, 15 millió m³ kőolajat és 3 milliárd m³ földgázt termelnek ki [1]. Becslések szerint a növekvő igény figyelembevételével a jelenlegi kőolaj-kitermelés 40–60 évig, a földgázkitermelés 60–100 évig, a kőszénfejtés pedig mintegy 150–200 évig folytatható. A kitermelés mennyisége azonban idővel csökkenni fog, mert nem tud lépést tartani a meredeken növekvő fogyasztással, ötven éven belül tehát súlyos, globális méretű energiaválsággal kell, hogy szembe nézzünk. A válság elkerülésére több megoldási javaslat született, mint a CO₂ kibocsátási kvóták, vagy a megújuló forrásokkal való kiváltás, azonban ezek egyike sem csökkentette a hagyományos tüzelőanyagok használatát. De vajon ez az egyetlen hatékony és gazdaságos energiatermelési megoldás, avagy kiváltható lehetne más forrásokkal is?

Az elérhető fosszilis készletek fogyásával és a globális katasztrófával fenyegető üvegházhatás ellensúlyozására az energetikában a megújuló energiaforrásokra és a nukleáris energiára kell a hangsúlyt fektetni. Utóbbihoz azonban érdemes behatóbban is megvizsgálni, hogy milyen lehetőségeket hordoz magában a nukleáris energiatermelés, és mennyi ideig fenntartható a jelenleg alkalmazott technológia. A természetben egyetlen könnyen hasadó atom található, az urán 235-ös izotópjá, amely az összes urán mintegy 0,7%-át teszi ki. A természetes urán többi 99,3%-a a 238-as izotóp, amely az atomerőművekben használt 235-ös izotóppal szemben nem igazán hasadóképes. A természetben fellelhető hasadóanyag-készletek hosszútávon nem elégségesek, így előbb-utóbb szükségessé válik a hasadóanyag termelés, az úgynevezett tenyésztés

elterjedése. A tórium az uránhoz hasonlóan alkalmas hasadóanyag tenyésztésre, azonban alkalmazása mégsem terjedt el az atomenergetikában. Ebben a cikkben megvizsgálom azt a kérdést, hogy mi állhat a tórium mellőzése mögött, valamint lehet-e létjogosultsága a tóriummal kapcsolatos kutatások folytatásának. Ehhez áttekintem a különböző tenyésztő lehetőségeket a természetes urán és a tórium mint potenciális nukleáris üzemanyag alkalmazására.

generációs atomerőművek a világon széles körben (többek között nálunk is) elterjedt második generációs erőművek továbbfejlesztésével jöttek létre. Ezek az új típusok sokkal biztonságosabbak, sokféle balesetnek és külső eseménynek (pl. földrengés, szökőár) is ellenállnak, és a tervek szerint 60–80 évig lesznek üzemeltethetők, azonban építésük rendkívül tökéletes.

A jövő atomerőművei, az úgynevezett negyedik generációs (innovatív) erőművek



1. ábra. Az urán-plutónium ciklus vázlata: az urán–238 egy neutron befogásával (valójában két lépésben) átalakul a hasadóanyaggá, plutónium–239-cé, amelynek hasadása során elég neutron keletkezik a láncreakció és a tenyésztés fenntartásához (1)

A gyorsreaktorok

A manapság üzemelő atomerőművek által termelt villamos energia – amely ma az összes előállított elektromos energia 11%-át teszi ki – jelenleg egymilliárd emberhez jut el [2]. Ez az arány az utolsó évtizedben nem változott jelentősen. Az energia-ellátás biztonságának növekvő fontossága, valamint a globális klímaváltozás kockázata miatt az utóbbi években ismét megindultak a nukleáris beruházások. A ma építhető harmadik

alapvetően új megoldásokat alkalmaznak, új termelési és biztonsági célokat kívánnak kielégíteni. Ezek közül az egyik legfontosabb az üzemanyagciklus zárása, vagyis a jelenlegi erőművekben használt és kiegészítő üzemanyagok újrahazsnosítása, idegen szóval reprocesszálása. Az elhasznált fűtőelemek anyagának 95–98%-át a megfelelő tenyésztő technológiák alkalmazásával ismételtelen energiatermelésre lehetne használni, így az egész üzemanyagciklus (bányászat – fűtőelemgyártás – erőművi

hasznosítás – fűtőelem-reprocesszálás) hatékonyságát jelentősen növelni lehetne. Ezek az atomerőművek jellemzően magasabb hőmérsékleten üzemelnének, így jobb termoelektromos átalakítási hatásfokkal működhetnek, vagy kapcsolt energia-termelésre lehetnek alkalmasak. Ez annyit jelent, hogy a magas hőmérsékletű reaktor hőforrásként szolgálhat más energia-átalakító műveletekhez, mint a katalitikus hidrogéngyártás, és ebből másodlagos, CO₂ semleges üzemanyagok gyártása (metanol, dimetil-éter, ammónia, metán), a nitrogénmegkötéses műtrágyagyártás, a műanyagok termikus depolimerizációja, vagy a tengervíz sótalanítása. A passzív biztonsági berendezések beavatkozás nélkül képesek az üzemzavari és baleseti helyzeteket kezelni. A magasabb fokú automatizálás kevesebb emberi, operátori hibát okozhat, ami minden reaktorbalesetben szerepet játszott.

A negyedik generációs atomerőművek egyik csoportját a gyorsreaktorok teszik ki, melyekben a hagyományos, könnyűvízzel, nehézvízzel vagy grafittal lassított (moderált) neutronok helyett lassítatlan, nagy energiájú neutronok segítségével érik el az urán és a transzuránok hasítását. A reaktorok koncepciói elég hasonlóak, a főbb különbség a hőtadó közeg anyagában és a hozzá kapcsolódó üzemeltetési technológiában van. Hőelvonó közegként nagy fajhőjű fémolvadékok (nátrium, lítium, kálium, bizmut, ólom) lehet használni. A reaktor üzemi hőmérsékletét így túlnyomás nélkül is lényegesen magasabbra lehet beállítani, mint a vizes reaktorokét.

Ezekben a gyors neutronokkal működő tenyésztőreaktorokban urán–238-ból neutronbefogással plutónium–239 állítható elő, amely hasadó izotóp, és így energia-termelésre alkalmas üzemanyag. Egy hasadáskor legalább két neutron szabadul fel, amelyek közül az egyik egy uránmagban elnyelődve új plutónium atomot ad, vagyis tenyészt, a másik pedig egy plutóniummal ütközve hasít, és fenntartja a láncreakciót (1. ábra). A gyors neutronokra a hasadási reakció esélye ezerszer kisebb, mint lassított neutronok esetén, így sok tonna uránra és rengeteg neutronra van szükség, amely képes fenntartani a hasadást, a tenyésztést, valamint fedezi a kiszökő vagy a szerkezeti anyagokban elnyelődő neutronokat is.

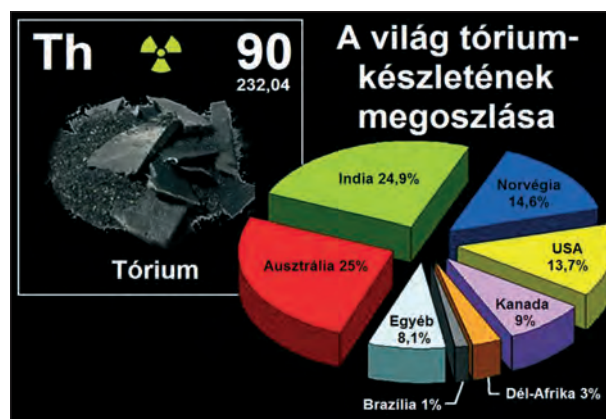
Fontos megemlíteni, hogy ez a tenyésztési reakció a hagyományos, második és harmadik generációs atomerőművekben is lejátszódik, mivel az üzemanyagban az urán–235 aránya (az eredeti 0,7%-ról dúsítással növelve) mintegy 5%, vagyis a maradék 95%-ot az urán másik, 238-as izotópjá teszi ki. Ez a reaktorban a neutron hatására szintén plutóniumot tenyészt, azonban a termelődő hasadóanyag mennyisége kevesebb, mint ami az üze-

lés alatt fogy, így egy idő után nem lehet a láncreakciót fenntartani. Urán–plutónium alapon nem lehet lassú neutronokkal önfenntartó tenyésztést létrehozni, mert a plutónium a lassú, termikus neutronok mintegy negyedét hasadás nélkül elnyeli, és magasabb tömegszámú izotópok képződnek belőle. Ez jelentősen rontja a hasadásokban keletkezett neutronok hasznosítását. A tenyésztőreaktorokban azonban az üzemelés (energiatermelés és tenyésztés) során a hasadóanyag mennyisége nem csökken, hanem nő, mert megfelelő körü-

tesen) 4,8%-át teszi ki, akkor a teljes globális energiafelhasználást csak 5 évig fedeznék az uránkészletek. Ezt változtatná meg jelentősen a tenyésztés, mivel így a teljes uránmennyiség hasznosítható lenne, ami százszor hatékonyabbá tenné az uránfelhasználást és így több száz évre tudná biztosítani az egész világ energiaigényét.

A reprocesszálás során az atomerőművekben elhasznált fűtőelemeket feldolgozzák, összetevőit elválasztják. Bár a fűtőelem urán–235 tartalma az üzemelés során jelentősen csökkent, így egy hagyományos, könnyűvízes erőműben nem használható tovább, a fűtőelem anyagának 95%-át továbbra is urán (elsősorban a 238-as izotóp), valamint az üzemelés során tenyésztődött mintegy 1% plutónium alkotja. Tehát a kiégett fűtőelemek anyagának 96%-a tovább hasznosítható, potenciális üzemanyag. A tenyésztőreaktorokhoz a reprocesszálás a kulcs, mivel a hagyományos reaktorokban termelődő plutónium használható legjobban a tenyésztőreaktorok indítására.

A reprocesszáláshoz szükséges elválasztási technológiát a hadiiparban már az 1940-es években kidolgozták, ezt a módszert használva jutott az első néhány atomhatalom saját fegyverhez, majd ezen kutatások nyomán megindult a civil felhasználás is. A kezdetben ígéretes nemzetközi politikai helyzet 1974-ben gyökeresen megváltozott, amikor India felrobantotta első atombombáját. Ez az eset rávilágított arra, hogy az atomfegyverkezés nem állt meg a két szuperhatalom, az USA és a Szovjetunió által kijelölt határok között [4]. A reprocesszálás során előállított nagy tisztaságú plutóniumra ettől kezdve úgy tekintettek, mint a terroristák és szakadár államok tömegpusztító terveinek elsődleges célpontjára. 1976-ban az USA-ban betiltották a plutónium kinyerését használt fűtőelemekből, majd ez a szabályozás tovább terjedt a világ több országára is. Ez világszerte keresztülhúzta az összes tenyésztőreaktor-tervet. Bár a tiltó rendelkezést 1981-ben eltörölték, azóta sem indult sok reprocesszáló üzem a világon, és ezek közül alig tízben folyik civil atomerőművek kiégett fűtőanyagainak újrahasznosítása. A rendkívül szigorú biztonsági intézkedések és a magas beruházási igény miatt a beruházók nagy része eddig nem ítélte ezt az iparágat gazdaságosnak. Ennek ellenére a világon több helyen épülnek és működ-



2. ábra. A világon kitermelhető ismert tóriumkészletek eloszlása országonként (2)

mények között hatékonyabb a tenyésztés, mint a kiégés. Gyorsneutronok esetén a neutronbefogás esélye csekély, ugyanakkor a hasadási reakció esélye is jelentősen kisebb, így nagy mennyiségű hasadóanyagra van szükség a láncreakció fenntartásához.

A gyorsneutronokkal működő tenyésztőreaktorok visszaszorulása több okra vezethető vissza. Egyrészt az urán világpiaci ára viszonylag alacsony, és egyre újabb tartalékok kerülnek felszínre. A jelenlegi árszínvonalon 5,5 millió tonna urán található gazdaságosan kitermelhető lelőhelyeken, amelyekből a 60 ezer tonna éves uránszükségletet közel száz évig fedezni tudnánk [3]. Ennek az uránmennyiségnek azonban csak 0,5%-a hasznosul a hagyományos atomerőművekben, a többi kiégett üzemanyagként nukleáris hulladéklerakók mélyére kerül.

Ezzel kapcsolatban megjegyzendő, hogy (amint az a bevezetőben is olvasható) az atomenergia jelenleg csak a világ villamosenergia-termelésének mintegy 11%-ért felel, vagyis ha a teljes villamos hálózatot atomerőművekkel szeretnénk ellátni, akkor a jelenleg gazdaságosan kitermelhető készletek csak 10 évre lennének elegendőek. De ha azt számoljuk, hogy ez az évi 60 ezer tonna felhasznált urán csak a primer energiahordozó-felhasználás (fűtés, közlekedés és villamos energia együt-

nek kísérleti gyorsreaktorok (többek között Franciaországban, Oroszországban, Indiában, Kínában és Japánban), mivel a fenntartható fejlődés hosszú távon kikényszeríti a jelenlegi atomenergetikánál hatékonyabb és kevesebb nukleáris hulladékot termelő erőműveket.

A tórium

A tórium a természetben előforduló radioaktív elem, a periódusos rendszer 90. eleme. 1828-ban fedezte fel *Jöns Jacob Berzelius* és a skandináv mitológiában a vilálmok és zivatarok istenéről, Thorról nevezte el. A tóriumnak a természetben csak egy izotópja fordul elő, a 232-es tömegszámú, amely enyhén radioaktív, a felezési ideje 14 milliárd év. A tórium gyakorisága a földkéregben az ólomhoz hasonló, átlagosan 6–10 ppm (milliomodrész), mintegy 3–5-ször olyan gyakori, mint az urán. Kitermelhető készletei több millió tonnára tehetők világszerte (2. ábra), felhasználása azonban jelenleg korlátozott. Főként ritkaföldfémekkel együtt fordul elő, a különböző monazitok egyik fő összetevője, azonban az értékes ritkaföldfémek, valamint az urán kinyerése után hulladékként jelentkezik. Felhasználása igen korlátozott, segítségével nagy fénytörésű lencsákat készítenek, valamint felhasználják magas hőmérsékletű hegesztő-elektrodák gyártásánál is.

A tórium nukleáris üzemanyagként is hasznosítható (3. ábra). A tórium egy neutron befogásával egy béta-bomlás után protaktínium-233-má alakul. A protaktínium, ha nem fog be több neutron, 27 napos felezési idővel béta bomlást követően urán-233-má alakul, ami hasadásra alkalmas üzemanyag. A tóriumciklusban egy urán-233 hasadása során átlagosan keletkező 2,5 neutron közül egy továbbviszi a láncreakciót, egy másikat befog egy tórium, így tartva fenn a tenyésztést, a fennmaradó neutronok pedig kiszöknek vagy elnyelődnek a szerkezeti anyagokban.

A 233-as uránizotóp a természetben nem található meg, mivel a felezési ideje csak 159 ezer év, viszont a 235-ös uránizotóphoz hasonlóan rendkívül jó hasadóanyag. Az urán-233-at 1942 decemberében fedezte fel *Glenn Seaborg* a tórium besugárzása során, a Fermi-féle atommáglya építésével egy időben. Ekkorra az USA-ban a Manhattan-projekt keretében már több elgondolás is készen állt az urán-235 dúsítására és az 1941 elején felfedezett új elem, a plutónium előállítására, szeparálására és katonai felhasználására. A második világháború során az urán-235 és a plutónium-239 izotópok előállítása és a hozzájuk kapcsolódó feldolgozási technológiák is kiemelt stratégiai fontosságúak voltak.

A használatukat megalapozó kutatásokat jórészt ebben az időben végezték, ezekre a kutatásokra épült később a civil nukleáris ipar és az atomenergetika is.

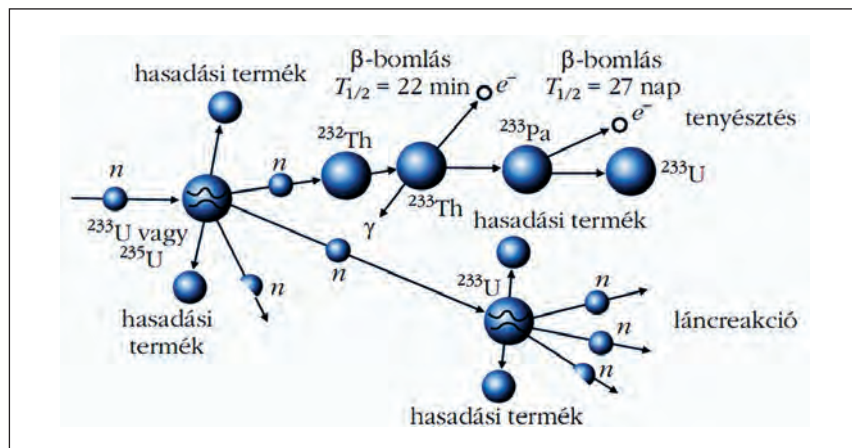
A tóriumciklus egyik legnagyobb hátránya egy másik, a 232-es tömegszámú uránizotóp keletkezése. Az urán-232 felezési ideje 69 év, a bomlása után keletkező további izotópok azonban jóval rövidebb felezési idejűek, és több közülük erős gamma-sugárzó. Ez az izotóp ugyan csak kis mennyiségben keletkezik, de jelentősen megnehezíti az üzemanyag kezelést, a reaktor biztonságos üzemeltetéséhez, az üzemanyag átrakásához és feldolgozásához távirányításra van szükség. Ugyanakkor ez jelentősen megnehezíti a tóriumciklusban keletkező urán-233 katonai alkalmazását is [5].

Az ötvenes években az Egyesült Államokban kísérleteket folytattak a tóriumciklus hadiipari alkalmazására. A Hanford telephelyen több, a tóriumciklusra épülő erőmű működött, és a hatvanas évekre több tonna urán-233-at halmoztak fel. 1955-ben egy kísérleti atomrobbantás keretében kipróbálták az urán-233-at, azonban az eredmények alulmúlták a várakozásokat. A tóriumciklust az addigra

veknél. Ezen kívül nem áll rendelkezésre kiépített ipari kapacitás sem nagy mennyiségű tiszta tórium előállítására, sem a tóriumot tartalmazó fűtőelemek legyártására, továbbá a tóriumot is tartalmazó fűtőelemek újrahasznosításának módja sem megfelelően kidolgozott. Az ehhez szükséges, a tóriumciklus felfedezése óta elmaradt befektetések részben arra vezethetők vissza, hogy ez néhány évvel a plutónium felfedezése után történt, így a második világháború alatt és után a katonai célú befektetések elmaradtak.

A tórium hasznosításának lehetősége hagyományos atomerőművekben

A tóriumciklus felhasználásával – az urán-plutónium ciklussal ellentétben – lassított, termikus neutronokkal is jól működő tenyésztőreaktor lehet létrehozni. Ennek előnye, hogy kevesebb hasadóanyagra van szükség a láncreakció fenntartásához, valamint könnyebben szabályozható a láncreakció. Tórium alapanyag használatával több nagyságrenddel kevesebb hosszú felezési idejű transzurán elem képződik, mint urán alapú reaktor esetében.

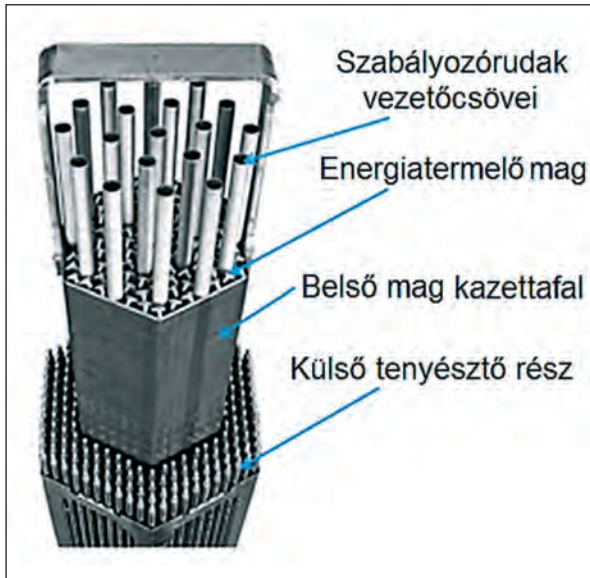


3. ábra. A tóriumciklus bemutatása: a tórium egy neutron befogásával két lépésben átalakul a hasadóanyaggá, urán-233-má, amelynek hasadása átlagosan 2,5 neutron eredményez (ezt jelzik az ábrán a „fél neutronok”) (3)

elterjedt plutónium termeléshez képest nehézkesnek és körülményesnek ítélték, és végül leállították a programot. A tórium hadiipari alkalmazásának elvetése jelentősen visszavetette a fejlődést. A jól bevált, uránra alapozott technológiák mellett nem láttak új lehetőséget a tórium hasznosításában, így az egyre inkább a nukleáris ipar perifériájára szorult.

A tórium használatával kapcsolatban megfogalmazott ellenérvek közül az első általában az, hogy a tóriummal működő erőművek üzemeltetése során összegyűlt tapasztalat jóval kevesebb, mint az urán, vagy urán-plutónium üzemanyagú erőmű-

A tórium energetikai felhasználására több kísérletet is végeztek, amelyekhez jelenleg is elterjedt atomerőmű-típusokat használtak. Tórium felhasználásával a világon legerjedtebben, könnyűvízes típusú reaktorokban is létre lehet hozni önfenntartó üzemanyag-tenyésztést. Az egyik legjobb példa erre a Shippingportban (USA) épült atomerőmű. Ez volt a világ egyik első, kizárólag békés célra használt civil atomerőműve. Ez a nyomottvízes erőmű először 1957-ben kezdte meg a működését, majd 1977-ben átalakították a reaktor aktív zónáját. A reaktor közepén tiszta urán-233-ból a láncreakciót fenn-



4. ábra. A Radkowsky-féle, nyomottvízes atomerőművekben is alkalmazható összetett fűtőelem makettje. A belső magban található a dúsított urán-235 vagy az urán-233, a külső, tenyésztő köpeny pedig urán-tórium keveréket tartalmaz (4)

tartó „magot” építettek, majd ezt minden irányból körülvették urán-tórium neutron-visszaverőkkel (reflektorokkal) [6]. Az erőművet 1982-ben, pénzügyi nyomásra leállították, de a későbbi vizsgálatok során kiderült, hogy az aktív zóna 1,3%-kal több hasadóanyagot tartalmazott, mint a kísérlet kezdetekor. Ebből 1,01 tenyésztési arány számítható, vagyis könnyűvízes termikus reaktorból is lehetséges tenyésztő reaktort építeni [7]. Ezt a tényt azóta több kutatás is igazolni lát-szik [8–11].


Indiában található a világ egyik legjelentősebb tóriumkészlete. Ezt újonnan épülő nehézvízes erőművekben szeretnék kihasználni, mivel ezek a típusok szinte bármilyen nukleáris üzemanyaggal való működésre alkalmasak. Az Bhabha Atomic Research Centre (BARC) által fejlesztett 300 megawatt teljesítményű nehézvízes reaktor (AHWR) szilárd fűtőelemei a tervek szerint tórium-urán pálcákból állnak majd, és nagy nyomású nehézvíz moderátorral fog működni, egybe olvasztva a nehézvízes atomerőművek tapasztalatait és a shippingporti eredményeket [12]. Nagy hangsúlyt fektettek a tervezés során a passzív biztonsági berendezésekre is, amelyek egy esetleges áramszünet esetén is biztosítják az aktív zóna folyamatos hűtését.

A tóriumos reaktor úgynevezett Radkowsky-féle koncepciója szerint a nyomottvízes atomerőművek fűtőelemében belül is elvégezhető az üzemanyag tenyésztése. Az elképzelés szerint az atomerőművi fűtőelem két részből állna: egy belső magból és egy azt körül-

vevő köpenyből (4. ábra). A belső mag maximum 20%-os dúsítású uránból állna, az üzemanyag urán-cirkónium ötvözet formájában lenne jelen. Ezeket a kazetákat 3–5 évente kellene cserélni, a hagyományos fűtőelemekhez hasonlóan. A mag körüli tórium-urán kerámiát tartalmazó üzemanyag-pálcák 10 évig maradnának a reaktorban és ezalatt a tórium ciklus segítségével üzemanyagot tenyésztene, amelynek egy része az üzemelés során hasznosítódik. A kevesebb kazettagyártás, az uránnál olcsóbb tórium és a hatékonyabb üzemanyag-kihasználás gazdaságilag kifizetődővé tehetne egy ilyen atomerőművet [13].

Összefoglalás

Az atomenergia a megújuló energiaforrások használatával karöltve megoldást jelenthet a fosszilis tüzelőanyagok felhasználásának csökkentésére és a globális felmelegedés megfékezésére, valamint akár az elkövetkező évszázadok energiaigényének kielégítésére. Ehhez azonban a jelenleg alkalmazott, elsősorban urán-235-öt használó atomerőművi technológiák mellett szükség van a hasadóanyag-tenyésztés elterjedésére is. A tenyésztés megoldást jelenthet a radioaktív hulladékok és a véges uránkészletek problémájára is. Cikkemben röviden áttekintettem a jelenleg működő atomerőművek üzemanyag-ciklussal kapcsolatos nehézségeit, és néhány ezekről eltérő technológia előnyeit mutattam be.

A tenyésztés alapanyagaként azonban nemcsak a jelenleg elterjedt urán, hanem egy másik elem, a tórium is szolgálhat, amely a nagyközönség számára jórészt ismeretlen. A mai napig léteznek kezdeményezések a tórium, mint a jövő egyik lehetséges energiaforrásának népszerűsítésére. Több kidolgozott koncepció is született a tórium energetikai hasznosítására, ezek közül azonban befektetők hiányában eddig csak az indiai nehézvízes erőmű tervei tűnnek közeleink. A fejlesztés újraindítására lenne szükség, ez azonban alapvetően az új nukleáris technológiák kidolgozásának magas költsége, a tudományos és gazdasági bizalmatlanság és a befektetők hiánya miatt nem történik meg. 

Irodalom

[1] http://en.wikipedia.org/wiki/Fossil_fuel
 [2] International Energy Agency Key World Energy Statistics 2016 <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf>
 [3] Breitner Dániel, Török Szabina, Márton István (2012): Globális urántartalékok földtani és mennyiségi értékelése. Nukleon. 2012. március http://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/Nukleon_5_1_103_Breitner.pdf
 [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_reprocessing
 [5] <http://en.wikipedia.org/wiki/Uranium-233>
 [6] <http://files.asme.org/ASMEORG/Communities/History/Landmarks/5643.pdf>
 [7] <http://atomicinsights.com/1995/10/light-water-breeder-reactor-adapting-proven-system.html>
 [8] Role of Thorium to Supplement Fuel Cycles of Future Nuclear Energy Systems, IAEA publication, NF-T-2.4, 2012. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1540_web.pdf
 [9] J. Breza, R. Zajac, P. Darilek, V. Necas: PWR and VVER Thorium Cycle Calculation, PWR and VVER Thorium Cycle Calculation, IAEA publication, 2006. január http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/38/071/38071947.pdf
 [10] M. Korkmaz, O. Agar, E. Büyüker: Burnup analysis of the VVER-1000 reactor using thorium-based fuel, Kerntechnik, 79(6):478-483 2014 december. https://www.researchgate.net/publication/276200060_Burnup_analysis_of_the_VVER-1000_reactor_using_thorium-based_fuel
 [11] M.S. Kazimi, K. R. Czerwinski, M.J. Driscoll, P. Hejzlar, J.E. Meyer: On the Use of Thorium in Light Water Reactors, kutatási jelentés, Massachusetts Institute of Technology, MIT-NFC-TR-016, 1999. április. <http://lbridge.com/assets/15.pdf>
 [12] <http://www.barc.gov.in/reactor/ahwr.html>, <http://www.barc.gov.in/reactor/ahwr.pdf>
 [13] Paul R. Kasten: Review of the Radkowsky Thorium Reactor Concept. Science and Global Security, 1998, Volume 7, 237-269. <http://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs07kasten.pdf>
Ábrajegyzék (magyarítottak)
 (1) http://images.slideplayer.com/26/8741725/slides/slide_14.jpg
 (2) http://i.ucrazy.ru/files/pics/2015.03/1425389605_3.jpg
 (3) Ralph Moir, Teller Ede: Egy tórium alapon működő, sóoldadékos, föld alá telepített atomreaktor lehetősége. Fizikai Szemle 2011/11, 367. oldal 2. ábra
 (4) <http://www.lbridge.com/images/update/seedblanket.gif>