

LEHETSÉGES MEGOLDÁSOK AZ ATOMENERGIA-IPAR JELENLEGI PROBLÉMÁIRA

II. rész – A tóriumos tenyésztő reaktorok

Király Márton
Budapest

A tórium

A következőkben a tóriumciklusról és a tóriumalapú energiatermelésről írok, előbb azonban bemutatom a tóriumot, mint a periódusos rendszer egy kevésbé ismert elemét.

A tórium a természetben előforduló radioaktív, a periódusos rendszer 90. eleme, vegyjele Th. 1828-ban fedezte fel *Jöns Jacob Berzelius* és a skandináv mitológiában a villámok és zivatarok istenéről, az emberiség védelmezőjéről, Thorról nevezte el. A tóriumnak a természetben gyakorlatilag egyetlen izotópja fordul elő, a ^{232}Th , mely 14 milliárd éves felezési idővel bomlik, alfa-részecskét emittálva. Ez az idő nagyjából a Világegyetem általánosan elfogadott életkorával egyenlő. A bomlási sor többi izotópja lényegesen gyorsabban, néhány nap alatt lebomlik, az ^{208}Pb zárja a sort. A tórium többi izotópja rövidebb felezési ideje miatt csak nyomokban található meg. Az ^{238}U bomlási sorában megtalálható, 246 ezer év felezési idejű ^{234}U és az alfa-bomlásával keletkező leányelem, a 75 ezer év felezési idejű ^{230}Th egymáshoz képesti mennyisége radioaktív kormeghatározást tesz lehetővé. Ezt a módszert pár millió éves mészkő üledékek esetén használják [11].

A tórium gyakorisága a Földön az ólomhoz hasonló, átlagosan 10 ppm, mintegy 3-5-ször olyan gyakori, mint az urán. Kitermelhető készletei világszerte több millió tonnára tehető, felhasználása azonban jelenleg korlátozott. Főként ritkaföldfémekkel együtt fordul elő, a különböző monazitok egyik fő összetevője, azonban az értékes ritkaföldfémek kinyerése után hulladékként jelentkezik. Általában jelentős mennyiségben megtalálható az uránbányászat során visszamaradó meddőben is. Legnagyobb koncentrációban a thorit nevű ásványban fordul elő, amelynek összegképlete $(\text{Th,U})\text{SiO}_4$. Ez az urán egyik bányászott formája Kanadában. A tórium általában az uránbányászat mellékterméke. A monazit 2010-ben nem jelent meg eladható termékként, árat nem határoztak meg hozzá, világszerte szabadon bányászható.

A tórium nukleáris üzemanyagként is hasznosítható (2. ábra). A ^{232}Th egy neutron befogásával ^{233}Th -má alakul, mely 22 perces felezési idővel bétabomlással ^{233}Pa -má alakul. A protaktínium, ha nem fog be több neutron, 27 napos felezési idővel bétabomlás következtében ^{233}U -má alakul. Az ^{233}U -t 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

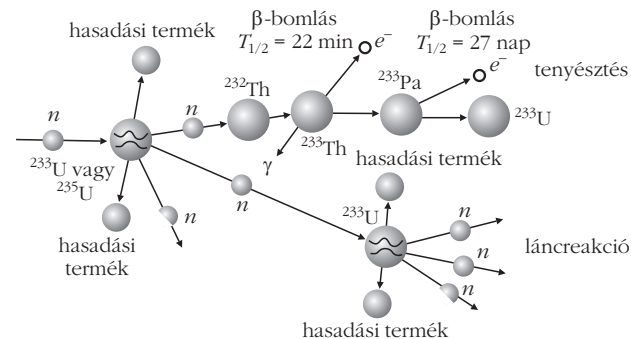
az ^{235}U dúsítására és az előző év elején felfedezett elem, a plutónium előállítására, szeparálására és felhasználására.

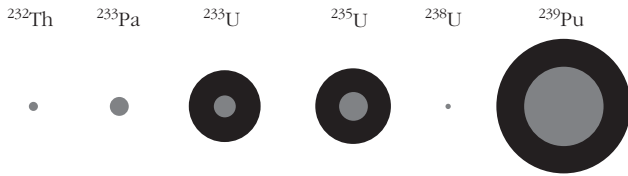
Az ^{233}U alkalmas nukleáris üzemanyagnak mind atomerőművek, mind atombombák számára. Egy mag hasadása során 197,9 MeV energia szabadul fel, amely közel azonos az ^{235}U hasadási energiájával. A tórium ciklusban egy ^{233}U hasadása során keletkező átlag 2,5 neutron közül egy továbbviszi a láncreakciót, egy másikat befog egy ^{232}Th , így tartva fenn a tenyésztést, a fennmaradó neutronok pedig elnyelődnek a szerkezeti anyagokban. A tóriumciklusban a késő neutronok aránya 2,03%, amely háromszor több, mint az ^{235}U hasadványai esetén ($\beta = 0,65\%$). Ez sokkal szélesebb szabályozási tartományt enged meg, jelentősen egyszerűsítve ezzel a láncreakció kézben tartását.

Az USA az ötvenes években kipróbálta az ^{233}U hadi célú alkalmazását. A számított kritikus tömeg 16 kg, azonban az ^{232}U szennyezés miatt feldolgozása nehezebb, detektálása könnyebb volt. Az ^{232}U az ^{233}U -ból keletkezhet ($n, 2n$) reakcióban, vagy a ^{233}Pa -ból keletkezik a ^{232}Pa ($n, 2n$) reakció során és ez bomlik bétabomlással ^{232}U -vé. Az ^{232}U felezési ideje 72 év, a keletkező ^{218}Th -é 1,9 év, a leányelemei azonban jóval rövidebb, néhány órás felezési idejűek és több közülük erős gamma-sugárzó (például ^{208}Tl , $E = 2,6$ MeV). Ez jelentősen megneghezíti a tóriumciklusban keletkező urán hadi alkalmazását, ugyanakkor a reaktor biztonságos üzemeltetését is, távirányítás megvalósítását teszi szükségessé [13].

A ^{232}Th termikus neutronbefogási hatáskeresztmetszete háromszor nagyobb, mint az ^{238}U -é (3. ábra). Az ^{233}U termikus neutronbefogási és hasadási keresztmetszete is kedvezőbb, mint ^{235}U esetén. Az ^{233}U hasadási neutronhozama magasabb, mint az ^{235}U -nél vagy a ^{239}Pu -nél, lassú, rezonancia és gyors neutronok ese-

2. ábra. A tenyésztési reakció bemutatása: a tórium egy neutron befogásával két lépésben átalakul hasadóanyaggá, ^{233}U -má, amelynek hasadása átlagosan 2,5 neutron eredményez (ezt jelzik az ábrán a „fél neutronok”) [12].



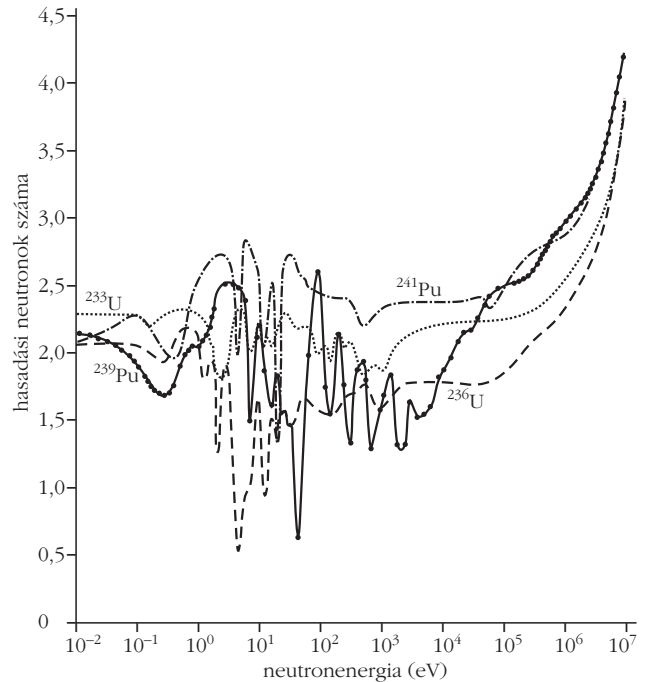


3. ábra. Termikus neutronokra vonatkozó relatív befogási (világosabb szürke) és hasadási (sötét szürke) hatáskeresztmetszetek aránya (a területek arányában) [14].

tén is 2 fölötti (4. ábra). A több termelőző neutron javítja a tenyésztés fenntarthatóságát. Az U-Pu tenyésztők nagy hátránya, hogy a ^{239}Pu a termikus neutronok jó részét hasadás nélkül befogja, amely rontja a neutronháztartást, ez gyors neutronok esetén erősen csökken. Az ^{233}U esetén ez sem okoz gondot, a termikus befogás esélye is megfelelően kicsi. Továbbá a befogási és hasadási hatáskeresztmetszetek termikus neutronokra sok százszor nagyobbak, mint gyors neutronokra, így kevesebb üzemanyag elég a kritikuság eléréséhez.

MSBR – A sóolvadékos tenyésztő reaktor

1969 végén a MSR-programot leállították és kezdetét vette a már hosszabb ideje tervezett, ezen kísérlet eredményein és a tóriumcikluson alapuló sóolvadékos tenyésztőreaktor (Molten Salt Breeder Reactor, MSBR) egyes elemeinek kipróbálása. Az első tervek szerint két, egymástól elválasztott körre van szükség: a reaktor körül található tenyésztő és árnyékoló külső körre, amelyből egy lépésben kivonható az ^{233}U és ezt

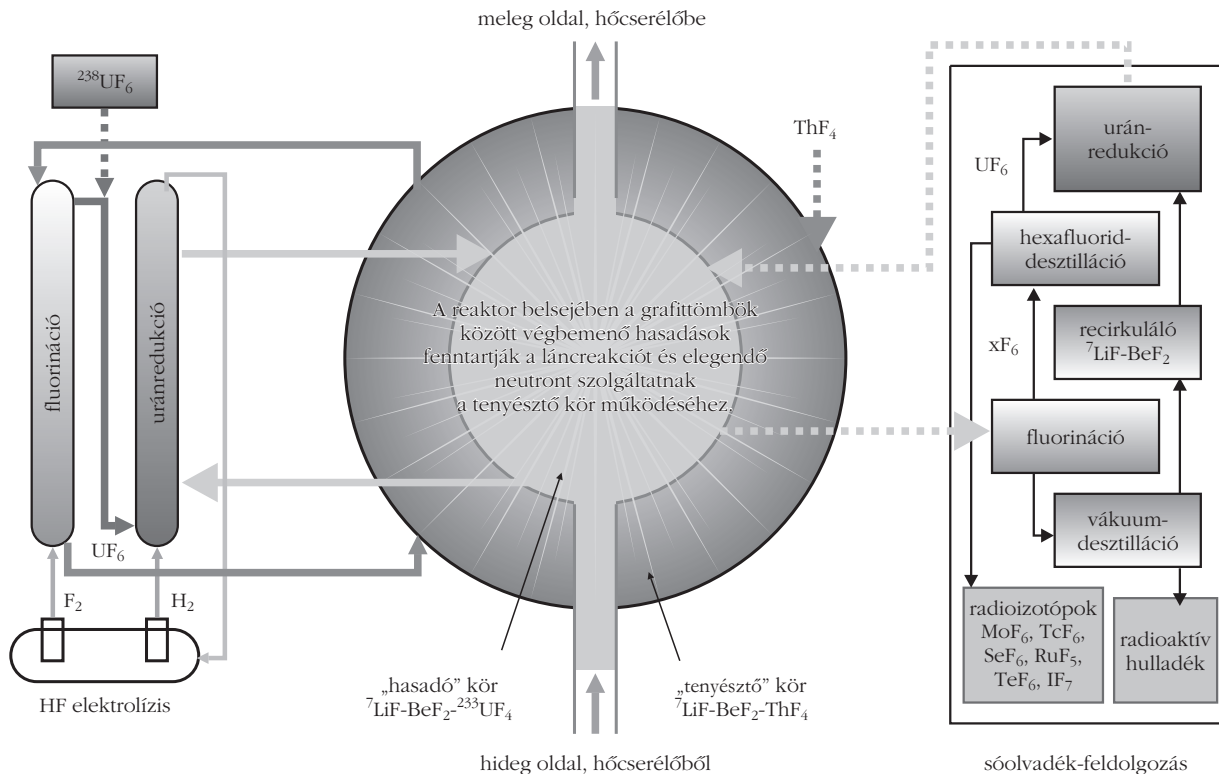


4. ábra. Néhány izotóp átlagos hasadási neutronhozama a neutronok energiájának függvényében [15].

használva működik a kritikus állapotú reaktor maga, a belső kör. Ebben fenntartható a láncreakció és egyben neutronokat is szolgáltat a külső, tenyésztő kör működéséhez (5. ábra).

Későbbi vizsgálatok kimutatták, hogy nincs feltétlenül szükség két körre, mivel a számítások szerint 1,065-ös tenyésztési arány érhető el a tórium és az

5. ábra. A kétkörös sóolvadékos tenyésztő működési vázlatja [16].



urán 5:1 arányú elegyítése mellett, továbbá sikerült kifejleszteni egy technológiát, a folyékony bizmuttal történő redukív extrakciót, amely képes az uránt, a protaktíniumot és a ritkaföldfémeket szelektíven extrahálni a sóból. Ehhez a moderátor grafit mennyiségét csökkenteni kellett a reaktoron belül és megoldásokat kellett találni felületének lezárására, bevonat képezésére, így akadályozva meg a xenon felhalmozódását a pórusokban. Az így létrehozott elképzelés az eredeti sóolvadékos technológia kiterjesztésének és méretnövelésének is felfogható, mivel a tervek egy 1000 MW elektromos teljesítményű lakossági erőmű kifejlesztéséről szóltak. Több ilyen terv is készült, amelyek több száz oldalas, részletes leírásokat tartalmaznak az addig elért eredményekről és a jövőben elvégzendő munkákról [17]. A kutatási eredmények ismeretében 1972-ben a gyorsreaktorokat részesítették előnyben, a program költségvetését fokozatosan csökkentették, majd 1976-ban gazdasági okokra hivatkozva megszüntették [18]. Azóta sem történt meg e lassan negyven éve született, javarészt politikai döntés hivatalos felülvizsgálata.

A tóriumos tenyésztő reaktor előnyei a következőkben foglalhatók össze:

- a tóriumciklus 200-szor hatékonyabb a jelenlegi ^{235}U technológiákhoz képest (bányászat, dúsításra nincs szükség),
- az éppen elégséges tenyésztési arány miatt nem vagy csak kevés ^{233}U többletet termel,
- termikus neutronokkal működik, kevés hasadóanyagra van szükség,
- legalább 600 évre elegendő a globális tóriumkészlet, az uránnál ötször gyakoribb, a fosszilis energiahordozók kiválthatók,
- az indítótöltet lehet reprocessálásból és leszerelelésből származó ^{235}U vagy ^{239}Pu is,
- nincs utólagos reprocessálás, működés közbeni szeparáció lehetséges, értékes orvosi izotópok nyerhetők ki (^{99}Mo , ^{213}Bi , ^{225}Ac , ^{229}Th , ^{125}I , ^{106}Ru , ^{90}Y),
- ^{232}U szennyezés javítja a proliferáció-állóságot, csak békés célokra alkalmas,
- a radioaktív hulladék fluorapatit formában egyszerűen és biztonságosan tárolható,
- alig keletkeznek transzuránok, csak rövidebb felezési idejű izotópok,
- a keletkező hulladékban 100 év alatt a bomlások 84%-a lezajlik,
- a tórium nem képes önmagában hasadásra, tehát tiszta állapotban is biztonságos.

A fenti elveken működő reaktorok és a tórium energetikai hasznosításának elterjedéséért a következő, különböző volumenű összefogások léteznek világszerte:

- Generation IV International Forum, USA Department of Energy,
- Thorium Energy Alliance (TEA),
- International Thorium Energy Organisation (IThEO),
- Thorium Molten-Salt Nuclear Energy Synergetic System (THORIMS-NES), Japán,
- FLIBE Energy Co., USA (*Kirk Sorensen*),

- Weinberg Alapítvány, Egyesült Királyság,
- Chinese Academy of Sciences, Kína.

Ezek közül az első kettő nemzetközi akadémikus összefogást jelent, évente tartott konferenciáik a világ minden területéről vonzzák az atomenergia ezen területének kutatóit. A japán kutatás egy pénzühiányokkal küzdő kutatócsoport, amely az Oak Ridge-ben elért eredmények reprodukálását tűzte ki célul. A FLIBE Energy egy magánkézben lévő vállalat, amely kormányzati és katonai pályázatok segítségével igyekszik kis méretű reaktorok építésén keresztül gyártási, üzemeltetési és piaci tapasztalatot szerezni a sóolvadékos technológia gyors és olcsó gyakorlati alkalmazását keresve. A Weinberg Alapítvány politikai nyomást igyekszik gyakorolni a tórium alapú nukleáris energiatermelésnek az Egyesült Királyság energiastratégiájába való beépítésére. India gazdag tóriumkészleteit újonnan épülő nehézvízes erőművekben szeretné felhasználni, mivel ezek a típusok alkalmasak szinte bármilyen nukleáris üzemanyaggal való működésre. Külön figyelmet érdemel a kínai kutatások megindulása, mivel Kína nem titkolt szándéka a sóolvadékos technológia kifejlesztése és az intellektuális tulajdon birtokában annak a nyugati világ számára történő értékesítése [19].

Kombinált tenyésztő reaktorok

Léteznek olyan tervek is, amelyek nem kizárólag egyfajta elképzelés mentén indulnak el, hanem két vagy több elképzelés előnyeinek egyesítéséből származnak. A klasszikus, termikus reaktorokban is lehet üzemanyag tenyésztést létrehozni. Az első kísérlet erre a Shippingport Atomic Power Stationben történt. Ez volt a világ első kizárólag békés célra használt atomerőműve, amely *Eisenhower* elnök 1953-as *Atoms for peace* beszéde után jött létre. A nyomtárolt víz erőmű 1957-ben kezdte meg működését és 60 MW elektromos teljesítménnyel üzemelt. 1977-ben átalakították a reaktor aktív zónáját. A közepén meghagyták a neutronokat termelő „magot”, majd ezt körülvették – felülről és alulról is – tóriumreflektorokkal [20].

Ez az elképzelés újfajta szabályozási lehetőséget adott a mérnökök kezébe. A belső mag a reflektorok nélkül szubkritikus volt. Ha a reaktor teljesítményét csökkenteni kellett, akkor a magot lejjebb eresztették, így több neutron szökött ki a zóna szélén, ezzel csökkent a reaktivitás. A magot a középső pozícióba hozva a reaktor ismét kritikussá vált, mivel a neutronok nagyobb hányada verődött vissza. Az erőművet 1982-ben, pénzügyi nyomásra leállították, a tenyésztő koncepció felülvizsgálata azonban még 1987-ig várattat magára. Ekkor 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 [21].

Ezt az eredményt Indiában is szeretnék megismételni. Az Bhabha Atomic Research Centre (BARC) által

fejlesztett nehézvízes reaktor (AHWR) szilárd fűtőelemei a tervek szerint $\text{ThO}_2\text{-PuO}_2$ és $\text{ThO}_2\text{-}^{233}\text{UO}_2$ összetételű pálcákból állnak majd, a negatív üregegyűthetőséggel épített reaktor amorf szén moderátorral és nyomott nehézvízzel fog működni, egybeolvasztva a CANDU és a PHWR-ok tapasztalatait és a shippingporti eredményeket. A tervezés során nagy hangsúlyt fektettek a passzív biztonsági berendezésekre is, amelyek egy esetleges áramszünet esetén is biztosítják az aktív zóna folyamatos hűtését. A KAMINI reaktor a világ első, kifejezetten ^{233}U -mal való működésre tervezett reaktora. Ez a 15 éve működő 30 MW termikus teljesítményű könnyűvízes kutatóreaktor urán-alumínium ötvözetet használ [22].

Az *Alvin Radkowsky* után elnevezett Radkowsky Thorium Reactor is a shippingporti eredmények alapján képzeli el a tenyésztőreaktorok jövőjét. Ez a konstrukció a PWR technológiát veszi alapul és kapcsolja össze a tóriumciklussal. Az elképzelés szerint a „mag” maximum 20%-os dúsítású uránból állna, de az üzemanyag urán-cirkónium ötvözet formájában kerülne a reaktorba. Ezeket a kazettákat 3 éves ciklusidő után kellene cserélni. A mag körüli kazetták tóriumból és dúsított uránból állnának, amelyek 10 évig maradnának a reaktorban. Az aktív zónát a mai PWR-ekhez hasonlóan évente kellene átrakodni, tehát a mag kazettái 3, a köpeny pedig 10 cikluson keresztül maradnának a reaktorban. Az egyszerűbb kazettagyártás, az olcsó tórium és a hatékonyabb üzemanyagciklus gazdaságilag kifizetődővé tenné egy ilyen atomerőművet. A ma Lightbridge Corporation néven működő vállalat a Kurcsatov Intézettel közösen végezte az újfajta fűtőanyag irradiációs vizsgálatait, 2009 óta pedig az AREVA-val és az Egyesült Arab Emírátsokkal együttműködésben szeretnék mindezt a gyakorlatban is kipróbálni [23].

Carlo Rubbia Nobel-díjas felvetette egy spallációs neutronforrással kombinált tóriumos reaktor gondolatát, amelynek segítségével úgy lehetne villamos energiát termelni, hogy az atomerőművek számos ismert problémája nem merül fel. Egy szinkrotronban 1 GeV energiára gyorsított protonokat nehézfém (például ólom) targetre löve spallációs reakció révén intenzív neutronforrást kapunk. A neutronok egy grafittal moderált és vízzel hűtött, tóriumot tartalmazó rendszerbe jutnak. A tórium-grafit fűtőelemek golyó alakúak. A neutronok hatására a tóriumból ^{233}U izotóp keletkezik, és a berendezésben ennek hasadása révén termelődik energia. Ha megfelelően választjuk meg a rendszerben kialakuló neutronfluxus nagyságát, akkor a gyorsító által fogyasztott villamos energia sokszorosát kapjuk így vissza. Erre való tekintettel nevezte el rendszerét Rubbia energiasokszorozó rendszernek, amint ez *Szatmáry Zoltán* cikkében is olvasható [24].

Számítások szerint az ^{233}U mennyisége hozzávetőleg 10^{22} n/cm² értékű integrált neutronfluxus elérése után arányossá válik a ^{232}Th (lassan csökkenő) mennyiségével. A tisztán hasadási technológia útján való tenyésztéssel szemben a spalláció/hasadás kombinációnak az a legfőbb előnye, hogy a spalláció neutro-

nokban sokkal gazdagabb reakció, mint a hasadás: hasadásonként 2-3 neutront kapunk, egy spallációban pedig 20-40-et. Ehhez az elképzeléshez azonban szükség van egy 60 mA protonáramot előállító részcsokegyorsítóra, amely jelenleg még nem létezik. Az elképzelésen azonban érdemes elgondolkodni és szem előtt tartani a műszaki fejlődés előrehaladásával.

Összefoglalóan cikkemben röviden áttekintettem a jelenleg működő atomerőművek nehézségeit és néhány régi, hosszú ideje mellőzött technológia előnyeit mutattam be. A IV. generációs elképzelések közé sorolt gyorsreaktorok mellett a sóolvadékos reaktor több egyedi biztonsági és gazdasági előnnyel is rendelkezik, és a legújabb reaktortervekkel szemben megállja a helyét. A mai napig léteznek összefogások a tórium, a jövő egyik lehetséges energiaforrásának kiaknázására és a felhasználására született remek ötletek terjesztésére és népszerűsítésére. Több kidolgozott koncepció is született a tórium energetikai hasznosítására, ezek közül azonban – befektetők hiányában – eddig csak az indiai reaktor áll készen. A fejlesztés újraindítására lenne szükség, azonban alapvetően az új nukleáris technológiák a tudományos és gazdasági bizalmatlanság és a befektetők hiánya miatt nem fejlődnek. Az ipar szereplői, a kormányok és a kutatóintézetek közötti kapcsolatok felélénkítése elemi érdekünk. Fontos továbbá a szakma figyelmét is felhívni a tóriumciklus jelentőségére, kezdve azzal, hogy nagyobb hangsúlyt kell kapnia az egyetemi oktatásban. A következő mérnökgeneráció fogja majd a ma felvetett elképzeléseket megvalósítani, de csak akkor, ha hallanak róla és érdeklődésüket sikerül felkelteni.

Irodalom

11. <http://en.wikipedia.org/wiki/Thorium>
12. Ralph Moir, Teller Ede: Egy tórium alapon működő, sóolvadékos, föld alá telepített atomreaktor lehetősége. *Fizikai Szemle* 61/11 (2011) 367. oldal, 2. ábra.
13. <http://en.wikipedia.org/wiki/Uranium-233>
14. www.growingnewlife.com/web_images/fission_absorption_cross_sections.gif
15. <http://ralphmoir.com/media/tenneyMerged.pdf>, A System Study of Tokamak Fusion-Fission Reactors. Princeton University, 1978, PPPL-1450, 11. oldal.
16. www.lernerconsult.com/images/how-lfr-uses-thorium.png
17. R. B. Briggs: Molten-Salt Reactor Program Semiannual Progress Report For Period Ending February 28 1966, ORNL-3936, Oak Ridge National Laboratory (1966)
18. L. E. McNeese: Molten-Salt Reactor Program Semiannual Progress Report For Period Ending February 29 1976, ORNL-5132, Oak Ridge National Laboratory (1976)
19. <http://energyfromthorium.com/2011/01/30/china-initiates-tmsr>
20. <http://files.asme.org/ASMEORG/Communities/History/Landmarks/5643.pdf>
21. <http://atomicinsights.com/1995/10/light-water-breeder-reactor-adapting-proven-system.html>
22. P. N. Manoharan, K. V. Suresh Kumar, G. Srinivasan: Fifteen years of operating experience of KAMINI reactor; www.pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1575_CD_web/datasets/papers/B11%20Manoharan.pdf
23. www.ltbridge.com/leadership/history
24. Szatmáry Zoltán: Mit old meg Carlo Rubbia tóriumos energiasokszorozója? *Fizikai Szemle* 44/7 (1994) 293; www.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz9407/szz9407.html