

Végyári Zsolt*

Kilopower – villamos erőmű a Marson II. rész

A KILOPOWER-HEZ VEZETŐ ÚT

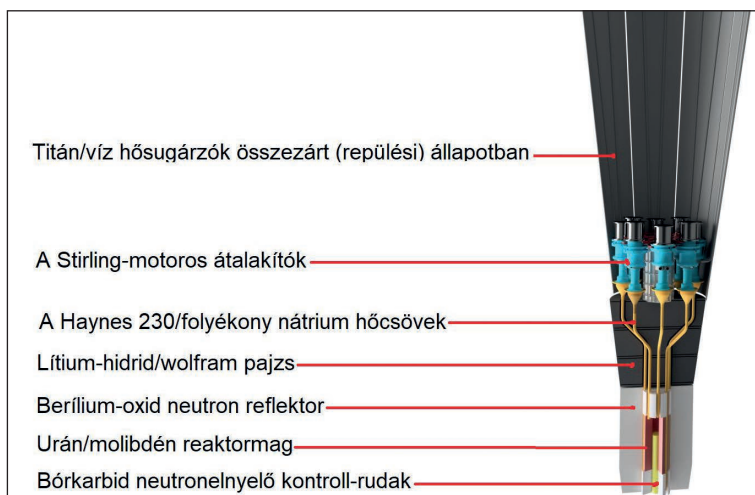
A hidegháború vége felé a hagyományosnak tekinthető rádióizotópos generátorok (RTG-k) teljesítménye már nem volt elégséges az USA tervezett új űrfegyvereihez, de a reaktorral működtetett Seebeck-effektust kihasználó berendezésekkel is elég rossz tapasztalataik voltak. Az 1965-ben felbocsátott SNAP-10A „Snapshot” nevű műhold még most is kering, de mindössze 43 napig működött – igaz, nem a reaktor hibásodott meg. A Szovjetunió viszont tömegesen alkalmazott reaktoros műholdakat, 1965 és 1988 között összesen 33 db USZ-A jelzésű RORSAT-ot (Radar Ocean Reconnaissance Satellite²). Ezek közül több is bal esetet szenvedett és radioaktív szeméttel szennyezte a keringési pályáját, egy 1978-as eset során pedig egy légkörben eléggő RORSAT Kanada egy részét terítette be közel egy tonna dúsított uránnal. A fenti okok miatt ismert, hogy a NASA már a '70-es évektől folytatott kísérleteket a Stirling-motor űrbéli alkalmazására, de ezek sosem jutottak el addig, hogy ténylegesen ilyen eszközt juttattak volna az űrbe. Végül a hőcsövek fejlődése adta meg a lökést, ami után a NASA megtette az első komolyabb lépéseket az atomenergia és a hőlégmotor házasítása felé.

Az első működő demonstrátort 2012-ben Glennben, a Nevadai Nemzeti Titkos Kísérleti Telepen (Nevada National Security Site – NNSS) mutatták be szűk szakmai közönségnek. Az eszköz a Kilopower Reactor Using Stirling Technology-ból képzett KRUSTY nevet kapta, ahol a „kilopower” a kilowattra utal, mutatva az eszköz tervezett teljesítményének léptékét. (A „krusty” egyébként angolul ropit jelent, és ugyanígy hívják a Simpson-család című rajzfilm ismert bohóc figuráját is, ami félreértésekre adhat okot.

A két elnevezés gyakran keveredik, de valójában kezdetben a KRUSTY csak a reaktor és a Stirling-motoros energia-konverter egysége volt.) Újabban tudatosan egyre inkább a jobban hangzó „Kilopower” elnevezést használják, de ez már tulajdonképpen a KRUSTY és a hozzá tartozó egyéb berendezések (pajzs, hűtő, vezérlés) teljes egysége, vagyis a működőképes mini erőmű [8].

Valójában nem is csak egy konkrét berendezésről van szó, hanem egy eszközkonceptióról, ami az elmúlt 40 év egyetlen számottevő nukleáris energetikai fejlesztése is egyben. A teljes berendezés különféle részeit számos példányban megépítették és a működési próbákon túl egyéb, pl. repülési vizsgálatokat is végeztek már (legalábbis erre utal a Marshall Space Flight Centerrel – Marshall Űrrepülési Központtal való együttműködés), de deklaráltan csak egy demonstrátorról van szó, ami még a prototípust megelőző kísérleti fázis. Magát a fejlesztést a DoE (Department of Energy) és a NNSA (National Nuclear Security Administration) felügyeli. Az első az Egyesült Államok sajátos adminisztrációjában kb. az „energiaügyi minisztérium”-nak, míg a második „nemzeti nukleáris biztonsági hivatal”-nak felel meg. A program eddig mintegy 20 millió dollárt emésztett fel [9], ami az európai fül számára kissé borsos (kb. 6 milliárd forint). Ugyanakkor, ha egy majdani Mars-program teljes költségvetését nézzük, ez csupán egy elenyészően kicsi részt képvisel. A demonstrációs fázis befejezését 2020-ra tervezik, a kiértékelés után – amennyiben az a technológiát arra alkalmasnak minősíti – már konkrét küldetésekhez illeszkedő teljesítményű és felépítésű prototípusokat fejlesztenek majd.

5. ábra. A Kilopower felépítése (Forrás: NNSS)



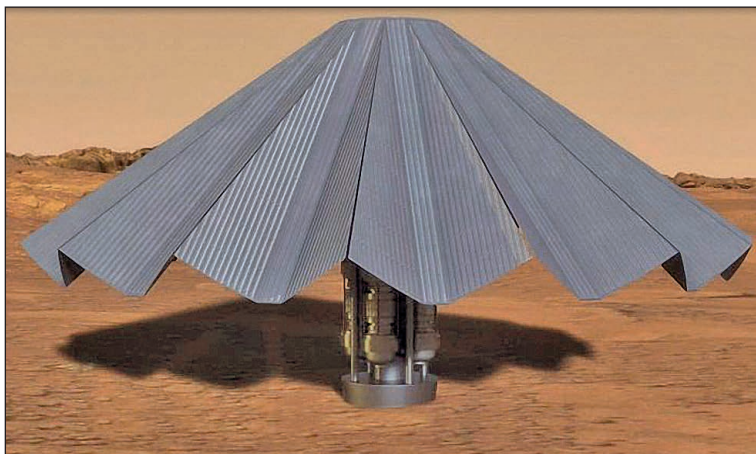
A KILOPOWER FELÉPÍTÉSE ÉS MŰKÖDÉSE

Ahogy azt korábban is jeleztük, a KRUSTY még nem egy konkrét berendezés, hanem egy koncepció, a „Kilopower” elnevezés, ami magát a kész eszközt jelöli, de egyre inkább a teljes projekt azonosítására használják. A kiszivárogtatott információkon és néhány közzétett fotón kívül eddig csak egy sajtóvilágos bemutató volt 2018 augusztusában, ahol egy 1 kW-os, de teljesen működőképes modellt mutattak be. A későbbi prototípusok felépítése várhatóan nagyon hasonló lesz, de számos paraméterük, elsősorban a méretük és a teljesítményük biztosan változni fog. Az alábbiakban a hivatalosan is bemutatott 1 kW-os berendezést ismertetjük [10].

A reaktor teljes tömege 134 kg. A reaktor magja egy 28 kg-os urán-molibdén ötvözet, ez 92%-ban urán 235-ös izotópot és 8%-ban molibdént tartalmaz. A felszabaduló neutro-

* Mk. alezredes, MH Modernizációs Intézet, kiemelt főtiszt, NKE doktorandusz, vegvari.zsolt@hm.gov.hu. ORCID: 0000-0003-2543-6049





6. ábra. Fantáziakép a Mars felszínén kinyíló hőszugárzókról (Forrás: NASA)

nok koncentrációja érdekében ezt egy két csonka kúppal lezárt henger alakú berillium-oxid reflektor veszi körül. A kúpok azért csonkák, mert a hőcsöveket a képzeletbeli tengely mentén vezették ki. A reflektor teljes tömege 70,5 kg, a hengerpalást átmérője 27 cm. A nukleáris láncreakciót igen jó neutron-elnyelő tulajdonsággal bíró bór-karbidból készült rudakkal szabályozzák. Ezek a felbocsátáskor teljesen be vannak tolvá a magba és csak a keringési pályán húzzák vissza őket, ezzel beindítva a reaktort. A reaktormagban összesen 8 db hőcső fut a palást mentén. Ezek külső átmérője 1,59 cm, a belső 1,4 cm, és egy Haynes 230 nevű ötvözetből készültek. Ennek anyaga 57%-ban nikkkel, de még mintegy tucatnyi fém, javarészt krómot, molibdént, wolframot és kobaltot tartalmaz. Ez az ötvözet viszonylag gyakran használt repülőgépek turbinájában is, mivel durva hőmérséklet-változásokat is elvisel alakváltozás nélkül. Jelen esetben a működési hőmérséklet-tartomány a reaktorban 500–1100 °C. A hőcsövek teljes tömege mindössze 4,1 kg és folyékony nátrium kering bennük.

A reaktor sugárzását egy összesen 40,3 kg lítium-hidridből és 45,5 kg szegényített urániumból álló pajzs ár-

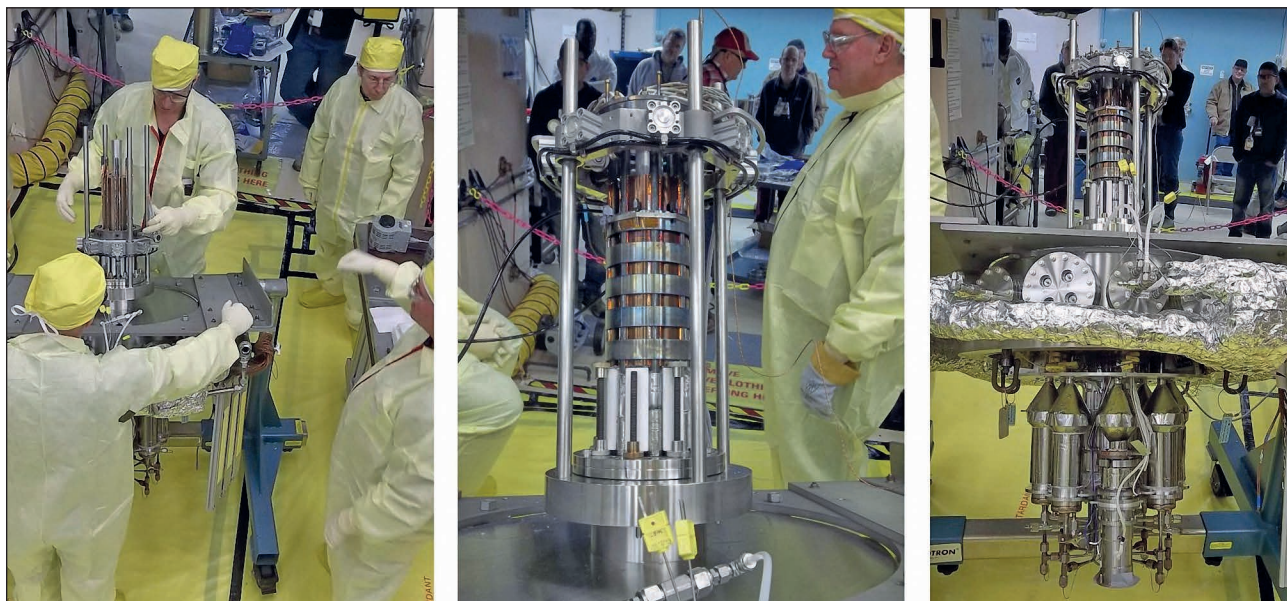
nyékolja le. Ezen kívül helyezkedik el az energia-átalakító, végezetül a hűtő következik. Az energia-átalakító tulajdonképpen kétszer nyolc darab (hőcsövenként egy-egy) tengelyirányban összefordított dupla Stirling-motor – egy-egy 150 W névleges teljesítményű generátorral. Ezeket a Sunpower nevű cég gyártja és minimalizálták bennük a mozgó részeket, így korábban sikerrel teljesítettek 30 000 órás teszt-ciklusokat is. A hőt a világűr (vagy az égitest atmoszférája) felé nagyméretű karbonszálal „szirmok” adják le, ezekben titán hőcsövek találhatóak, amelyekben desztillált víz kering. A „szirmok” indításkor be vannak hajtva egy hengerpalástba, működés közben viszont kinyitva egy 100 m²-nél is nagyobb felületet képeznek.

A technológia nagy előnye, hogy a teljes tervezett élettartam során a berendezés nem igényel semmilyen karbantartást, illetve a láncreakció is teljesen és passzív módon önszabályozó. Ez azt jelenti, hogy a biztonságos működéshez nincs szükség a hagyományos erőműveknél megszokott elektronikus és mechanikus szabályozó rendszerekre, amelyek különálló berendezések, így további meghibásodási lehetőségeket jelentenek. Ha ugyanis a KRUSTY technológiájú rendszer terhelése csökken, azaz a Stirling-motorok kevesebb hőt vonnak el a reaktorból, akkor annak a hőmérséklete megemelkedik. A reaktormag a magasabb hőmérsékleten kitágul, így viszont csökken a neutronok sűrűsége, vagyis mérséklődik a láncreakció. Nagyobb terhelés esetén a folyamat ellentétes [9].

Ez a tény önmagában is nagy jelentőséggel bír, hiszen ez az első olyan reaktor típus, ahol nem fenyeget az ún. megfutás³.

A teljes 1 kW névleges villamos teljesítményű „repülő” Kilopower tömege pajzzsal és hűtővel összesen 400 kg. A reaktor termikus teljesítménye 4,3 kW, ennek megfelelően a teljes rendszer hatásfoka 23%. Ez máris jóval meghaladja a korábban tárgyalt RTG-két és a teljesítmény növelésével, illetve a technológia finomításával később megközelíthetik, akár túl is léphetik a 30%-ot.

7. ábra. Képek a kísérleti berendezés összeszereléséről 2017-ben, Glenn-ben (Forrás: NNS)





8. ábra. A Stirling-motoros energia-átalakító egység szerelés közben (Forrás: NNS)

A KILOPOWER VÁRHATÓ ALKALMAZÁSA

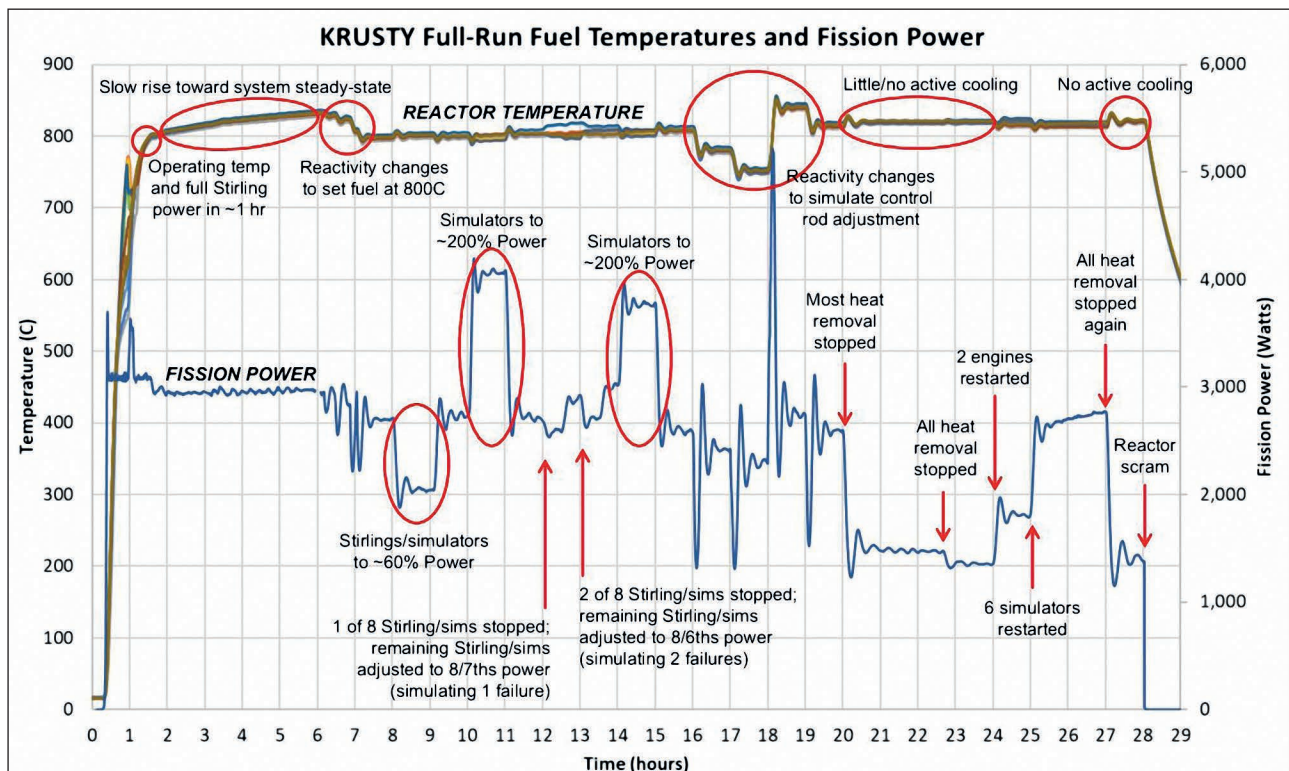
A Föld körüli pályán keringő távközlési és tudományos műholdak számára továbbra is napelemek lesznek a leginkább alkalmas villamos energiaforrások, és ugyanez várható a Merkúr, a Vénusz és a Nap megfigyelésére épített műholdak esetében. Az újabb, ún. többátmenetes⁴ napelemek hatásfoka kiemelkedő, miközben várható élettartamuk is megnőtt az utóbbi időben. Nyomban megváltozik a helyzet azonban, ha a Földtől távolabbi égitestet célunk meg, de akár a Merkúr és a Vénusz is okozhat nehézségeket. A Merkúr keringési és tengelyforgási ideje azonos, vagyis a bolygó mindig ugyanazt az oldalát fordítja a Nap felé, így a napelemekre nem számíthatunk, ha az égitest hideg oldalán szeretnénk egy leszállóegységet hosszabb ideig üzemeltetni. A Vénusz forró és sűrű légköre eddig minden földi eszközt gyorsan elpusztított, de ha mégis sikerülne ott egy leszállóegységnek hosszabb ideig kibírni a

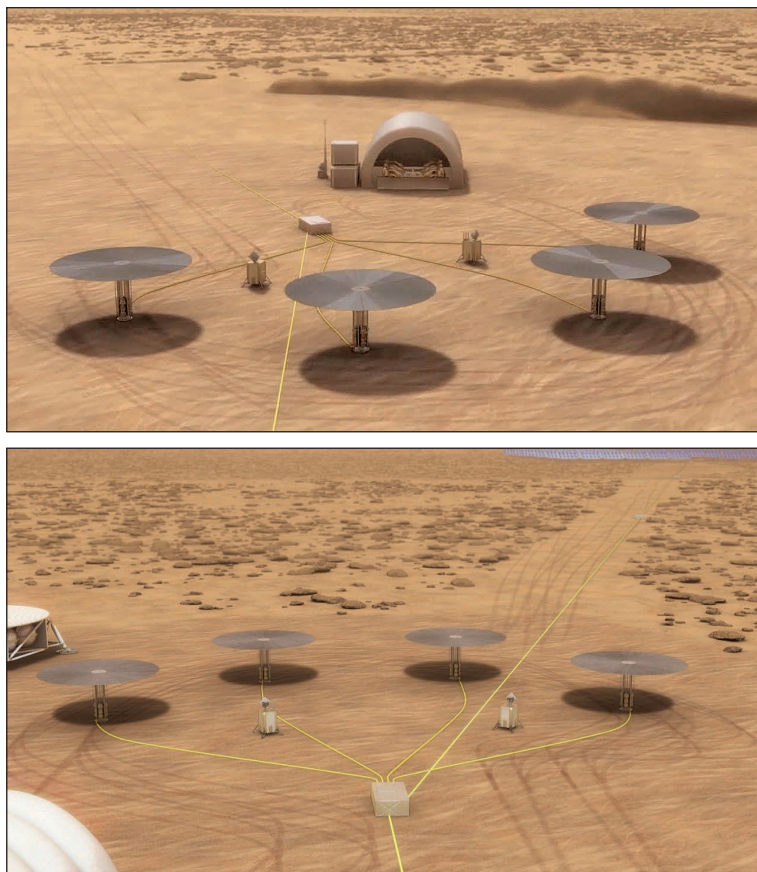
barátságatlan körülményeket, arra számítani kell, hogy a sűrű légkör nem sok napfényt enged át. Megkérdőjelezhető a napelemek alkalmazhatósága akkor is, ha valóban jelentős mennyiségű villamos energiára van szükség, mert ehhez extrém mennyiségű panelt kellene a világűrbe juttatni. Az űrfegyverkezés üteme a Szovjetunió széthullása után ugyan lelassult, de ne legyenek kétségeink afelől, hogy a katonai műholdak újabb nemzedékei egyre több energiát igényelnek majd.

A fenti példák mindegyike eddig az RTG-k klasszikus alkalmazási területe volt, illetve itt működtek a legelső – és nem kimondottan sikeres reaktoros eszközök is, amelyek most új versenytársat kaphatnak. A Kilopower felépítése bonyolultabb, mint egy RTG-é és ennek megfelelően valószínűleg drágább is annál, de mivel az űreszközöknél az ár nem feltétlenül élvez prioritást, nagy jövő várhat rá ezen a területen. A Kilopower hatásfoka minden korábbi, nem földi telepítésű nukleáris eszköznél jobb, így alkalmazásával csökkenhet bizonyos műholdak tömege, ami pedig az egyik legkritikusabb paraméter az űreszközöknél. Ahol nagy mennyiségű villamos energiára van igény, pl. folyamatos és nagy mennyiségű vegyi reakció fenntartása, nagy teljesítményű radar vagy akár lézer működtetése esetén, ott az új megoldás várhatóan teljesen kiszorítja a korábbi technológiákat.

Az általánosságokon túl természetesen a cikk legelején említett Mars-küldetés már egy konkrét tervezett alkalmazása a Kilopowernek, bár itt sem a sajtó részére bemutatott eszközről van szó. A Marson a NASA számításai szerint kb. 40 kW villamos teljesítményre lesz szükség az oxigén, illetve a hidrogén-peroxid folyamatos termeléséhez. Ehhez 10 kW névleges teljesítményű, egyenként 1500 kg-os Kilopower egység szállítását tervezik a Marsra, a biztonság kedvéért legalább öt darabot.

9. ábra. A reaktor teszüzeméről készült diagram. A teszt alatt szimulálták egyebek között a Stirling-motorok meghibásodását is. Jól láthatóak az állapotváltozások körüli erős, csillapítatlan oszcillációk. Ezek a passzív önszabályozó rendszerek sajátosságai (Forrás: NNSA)





10. ábra. A Kilopower egységek a Marson – fantáziakép (Forrás: NASA)

nagy teljesítményű aggregátorral üzemeltessenek, de ez az üzemanyag-ellátás szempontjából majd nehezen megoldható logisztikai problémákat okozhat.

Egy korszerű 10 kW-os aggregátor kb. 1 tonnát nyom és névleges terhelés mellett mintegy 3 kg gázolajat fogyaszt üzemóránként. Ha 500 kg (kb. 600 l) gázolajat készletünk mellé, akkor csaknem egy hét (166 óra) üzemidőre számíthatunk. Ehhez képest a Marsra juttatandó 10 kW-os Kilopower bruttó 1500 kg-ban tartalmazza a minimum 5-6 éves üzemidőhöz szükséges üzemanyagot is! Egy, a Földön használt KRUSTY eszköz határfoka nem lenne olyan jó, mint a -63°C átlagos hőmérsékletű Marson, és súlyosabb problémát jelentene a sugárzás is, de ezzel együtt sem zárható ki a távolabbi jövőben a technológia ilyen típusú felhasználása. Erőműveket nem lehet a harctereken kiépíteni, az aggregátoros villamos energiatermelés pedig lényegében nulla fejlesztési potenciállal bír. A KRUSTY technológia ugyanakkor még csak most jött létre, de számos paraméterében máris összevethető a konvencionális megoldásokkal. Ez az eszköz még komoly fejlesztési lehetőségeket rejt magában, így reális esély van rá, hogy a sugárzásból adódó nehézségek ellenére is – jobb megoldás hiányában – megjelenik a jövő hadseregeinek eszköztárában.

FELHASZNÁLT IRODALOM

A Föld gravitációja ellenében rendkívül nehéz és drága a rakéta-hajtóanyagok űrbe juttatása, ezért a naprendszer további felderítése során nagy előnyt jelentene, ha a jóval kisebb gravitációjú Holdon lehetne üzemanyagot gyártani. Bár a Holdnak nincs légköre, mint a Marsnak, üzemanyagot a holdi kőzetekből is elő lehetne állítani, de ennek természetesen előfeltétele a kőzetek rendkívül sok energiát igénylő kitermelése [11]. A Kilopower technológiájával elvben már ez is lehetséges, de a tervezők ez esetben már „Megapower”-ről beszélnek – nomen est omen. Mivel a generátoros áramtermelés nagyon jól skálázható, ha a KRUSTY technológia élesben is bizonyít, a sugárzáson kívül semmi akadálya nem lesz akár 10-20 MW-os vagy még nagyobb erőművek üzemeltetésének a világűrben.

És végezetül egy utolsó gondolat, amely jelenleg még nincs napirenden, de bizonyos fejlődési tendenciákat figyelembe véve talán ezzel is számolhatunk a jövőben. A vegyi indítású ballisztikus lőszer fejlesztésében mára (elsősorban anyagtechnológia korlátok miatt) egyre kevesebb a potenciál. A rakétalövedékek esetében kicsit jobb a helyzet, de ezek a megoldások rendkívül drágák és bonyolultak. Ennek megfelelően szinte valamennyi katonai teoretikus az energiafegyverekben látja a jövőt. A railgun [12] még csak prototípusként létezik, de a lézereket már tömegesen alkalmazzák, és további terjedésük legfőbb akadálya jelenleg az energiaigény [13]. Repülőgépeken vagy hajófedélzeten az óriás gázturbinák vagy atomreaktorok képesek lehetnek az egyre erősebb lézerek táplálására, de a szárazföldi eszközöknél (legalábbis a mobil rendszereknél) ez nem lehetséges. Elvben nem zárható, hogy szárazföldi bázisú energiafegyvereket több

- [8] KRUSTY: First of a New Breed of Reactors, Kilopower Part II, Beyond NERVA, 2017.11.19.;
- [9] M. Gibson: „Welcome to the Kilopower Press Conference”, előadás Kilopower Press Conference, NASA, 2018.05.02.;
- [10] L. Mason: „NASA Kilopower overview and mission applications”. NASA, 2018.05.02.;
- [11] P. McClure: „How a Small Nuclear Reactor Could Power a Colony on Mars or Beyond (Op-Ed)”, Space.com, 18-jan-2018. <https://www.space.com/39413-small-nuclear-reactor-kilopower-mars-colony.html>. [2018.08.16.];
- [12] Zs. Végvári: „Elektromágnesesen gyorsított lövedékek a tűzérség eszköztárában, A Bae Systems EM railgun-ja 1. rész”, Haditechnika, 51. évf. 1. sz., 2017. DOI: 10.23713/HT.51.1.06;
- [13] L. Ványa: Irányított energiájú fegyverek. Nemzeti Köszölgálati Egyetem, Budapest, 2013.

JEGYZETEK

- 2 Óceáni felderítő műhold – a hidegháború csúcspontján a Csendes-óceán északi részét pásztázták, támadó interkontinentális ballisztikus rakéták után kutatva.
- 3 Amikor a reaktormag pl. a terhelés hatására túlmelegszik. A folyamat azért veszélyes, mert ha a melegedés hatására jelentősen torzul a mag, nem lehetséges a neutronok számának szabályozására használt (általában grafit) rudak betolása a magba és kontrollálatlanná válik a láncreakció, ahogy az Csernobilban is történt.
- 4 Több, a különféle színekre érzékeny fotovillamos réteg helyezkedik el egymás felett, így jobban kihasználva a beérkező fény spektrumát.