



Braun Tibor

■ ELTE Kémiai Intézet

■ MTA Könyvtár és Informatikai Központ | braun@mail.iif.hu

Kritikus helyzetben a világ ritkaföldfém-ellátása

Mítosz vagy valóság?

Előszó

Valószínűleg rövid magyarázatra szorul jelen dolgozat kezdőszava. Ugyanis más vonatkozásokban használt értelmezése miatt a „kritikus” szó itt félreérthető lehetne. Említhettük volna helyette a „kockázatos” vagy „veszélyes” kifejezéseket. A „kritikus” szót azért tartottuk meg, mert dolgozatunk tetemes méretű angol nyelvű szakirodalmában a „critical” kifejezés, azaz pontosabban a „critical rare earth elements”, „criticality of rare elements” nagyon gyakran fordul elő. Persze itt a kritikus helyzetet nemcsak a ritkaföldfémekre értjük, hanem azokra a nyersanyagokra (érc, ásványok) is, amelyekből ezeket a fémeket kinyerik. Sőt, néha óhatatlanul a ritkaföldfémek kritikus helyzetét ki kell egészíteni más fémek kritikus helyzetével.

Meg kell jegyezzük, hogy a nyersanyagok kimerülésétől, csökkenő mennyiségeitől való félelmek nem mai eredetűek. Talán legfenyegetőbbben Meadows és munkatársai világszerte ismert, *Limits to Growth* című bestsellerében jelentkeztek komolyan már 1972-ben [1]. Ami a történelmi távlatot érinti, meg kell említsük még Jevons (1865) *The Coal Question: can Britain survive?* című monográfiáját [2], amiben többek között az akkor kifogyóban lévő brit széntartalékok csökkenő tendenciáját hangsúlyozták, lévén, hogy a kőszén a történelem folyamán döntő szerepet játszott Anglia iparosodásában. Dennis Meadows és társai arra utaltak említett könyvükben, hogy számos fém, például platina, arany vagy ólom nem tudta már a keresletet megnyugtatóan kielégíteni. Még azt is hozzátették, hogy az akkori ezüst-, cink- és uránellátás, a magas árak mellett, már a 20. században hiányossá válhatna. A *Limits to Growth* az említett előrejelzéseket adta a 70-es években nagy nemzetközi tekintélyre szert tett *Római Klubnak* [2]. Meadowsék, többek közt, azt közvetítették, hogy felhasználásnövekedés eredményeként az akkori alumíniumtartalékok már csak 31 évre lesznek elegendőek, azaz az alumíniumtartalékok már 2003-ra teljesen kimerülnek. Mint ismert, ezek az előrejelzések nem váltak be, főleg azért, mert nem megfelelő indikátorokon alapultak. Az alumíniumon kívül Meadows és munkatársai számos más nyersanyag kimerülését is meghatározták. Például az ólom esetében 26 évet, cinkre és ónra 23, illetve 17 évet, ezüstre és higanyra 16, illetve 13 évet és aranyra 11 évet jósoltak. Ennek tükrében az említett nyersanyagok egyike sem állna már rendelkezésre manapság.

Nyilvánvaló, hogy, mint említettük, azok az indikátorok, amiket Meadowsék használtak, nem voltak megfelelőek valamely

nyersanyag kiapadásának jelzésére. Mint a későbbiekben említésre kerül, a nyersanyagok, különösképpen a ritkafémek és érc-tartalékaik kimerülésének becslésére időközben sokkal megbízhatóbb indikátorokat javasoltak [4]. A *Limits to Growth* adatainak és állításainak másik bírálata, amit maguk a Római Klub tagjai is ismertettek, az volt, hogy a műben nem emelték ki eléggé a tudomány és a technika fejlődését, amellyel a nyersanyag-gazdálkodást egyensúlyban tartható.

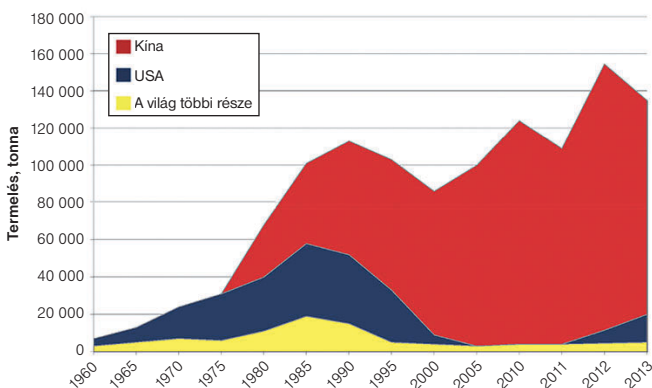
A fentieket meggyőzően bizonyítja, hogy Meadows és munkatársai művét és annak javaslatait jó ideje nem említik a Római Klub nyilatkozatai. Ezt erősíti meg *Simon* könyve is: „Natural resources are not finite in any meaningful economic sense ... but rather are expanding through human ingenuity” [5]. A címben említett *kritikus* „fogalom” legegyszerűbb definícióját *Alex King*, a US Department of Energy, Ames. Lab. igazgatója adta meg, aki szerint „critical refers to the stuff you need the most but can't get enough of” [6].

Jelen dolgozat részint körbejárja a ritkaföldfémeket és alkalmazásaikat, majd ismerteti ezen fémek utánpótlásának jelenlegi kritikus helyzetét, valamint elemzésre felvetett lehetőségeket. Természetesen nem törekedhetünk teljességre, de érdeklődő inyen-cek részére megemlítünk néhány kitűnő monográfiát [7–9].

Bevezetés

A műszaki fejlődés közelmúlt évtizedek alatt bekövetkezett növekedése részben azért is vált lehetségessé, mert az elemek periódusos rendszeréhez tartozó számos ritkaföldfém új funkciók és

1. ábra. A világ ritkaföldfém-termelése [10]



Periodic table of elements showing the percentage of metal's global primary production obtained as companion. The table is color-coded by metal family: alkali (yellow), alkaline earth (orange), transition (green), post-transition (light blue), lanthanide/actinide (purple), and noble (pink).

1 H Hydrogen																	19 K Potassium	20 Ca Calcium											37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdenum	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silver	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	51 Sb Antimony	52 Te Tellurium	53 I Iodine	54 Xe Xenon	55 Cs Cesium	56 Ba Barium	57-71 Lanthanide series	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantalum	74 W Tungsten	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platinum	79 Au Gold	80 Hg Mercury	81 Tl Thallium	82 Pb Lead	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astatine	86 Rn Radon	87 Fr Francium	88 Ra Radium	89-103 Actinide series	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 Uup Ununpentium	116 Uuq Ununquadium	117 Uus Ununseptium	118 Uuo Ununoctium	91 La Lanthanum	92 Ce Cerium	93 Pr Praseodymium	94 Nd Neodymium	95 Pm Promethium	96 Sm Samarium	97 Eu Europium	98 Gd Gadolinium	99 Tb Terbium	100 Dy Dysprosium	101 Ho Holmium	102 Er Erbium	103 Tm Thulium	104 Yb Ytterbium	105 Lu Lutetium
---------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-----------------------------	----------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	-----------------------------	------------------------------	---------------------------	------------------------------	----------------------------	-------------------------------	-------------------------------	------------------------------	----------------------------	------------------------------	---------------------------	----------------------------	---------------------------	------------------------	-----------------------------	------------------------------	--------------------------	--------------------------	---------------------------	---------------------------	----------------------------	----------------------------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------	-----------------------------	-------------------------	----------------------------	-----------------------------	-------------------------	----------------------------	-----------------------------	-----------------------------	--------------------------	-----------------------------	---------------------------	---------------------------	-----------------------------------	-----------------------------	--------------------------------	-----------------------------	-----------------------------	--------------------------------	----------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	------------------------------	-------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	---------------------------------	------------------------------	---------------------------	---------------------------------	------------------------------	-------------------------------	-----------------------------	-----------------------------	-------------------------------	----------------------------	--------------------------------	-----------------------------	----------------------------	-----------------------------	-------------------------------	------------------------------

% of metal's global primary production obtained as companion

Color scale: 0% (blue) to 100% (red)

[illegible]

A ritkaföldfémekhez [12] a következő 17 elem tartozik: szkandium (Sc) (amit például a US Geological Service kizár a ritkaföldfémek közül), ittrium (Y) és 15 lantanoida (Ln). Ezek: lantán (La), cérium (Ce), prazeodímium (Pr), neodímium (Nd), prométium (Pm), szamárium (Sm), európium (Eu), gadolínium (Gd), terbi-um (Tb), diszprózi-um (Dy), holm-ium (Ho), erbi-um (Er), túli-um (Tm), itterbi-um (Yb) és lutécium (Lu) (**3. ábra**). Maga a ritka-

3. ábra. A ritkaföldfémek felfedezésének rövid kronológiája
[11]

földfémek elnevezés megtévesztő, mivel azt sugallja, hogy ezek földes anyagok, ami nem egyértelmű. Hogy enni maradjunk, a „föld” szó régebben oxidos anyagot, gyakorlatban fém-oxidot, azaz olyan vegyületet jelzett, aminek az egyik tagja oxigén volt. A fentieknél még zavaróbb a „ritka” melléknév használata, aminek *Rainers* [13] szerint leginkább etimológiai alapja van, mivel a „ritka” jelzést a 18. század végétől valamilyen furcsa, különleges, meglepő dolognak tekintették. A ritkaföldfémeket általában két csoportra osztják, a könnyű és a nehéz ritkaföldfémekre. Ebben a vonatkozásban nincs teljes egyetértés a különböző intézmények között, mint ahogy az a **4. ábrán** látható. A ritkaföldfémek említett két csoportra való osztásában főleg kémiai tulajdonságaiknak van szerepük. A nehéz ritkaföldfémekhez hasonlítva az ércekben a könnyű földfémek nagyobb koncentrációban találhatók, mivel azok nagyobb ionrádiuszai elválasztva tartják őket más elemektől. Továbbá a páros atomszámú ritkaföldfémeknek általában nagyobb a gyakoriságuk, mint a páratlanoknak. Az elemek kémiai hasonlósága többszörös ritkaföldfém-elem jelenléthez vezet egy adott ásványmintában, és ezáltal szélesebb eloszlásban szerepelnek a földkéregben. Végül a nagyobb atomszámú elemeknek, általában néhány kivételtől eltekintve, magasabb az olvadáspontja. Például a cérium a legkönnyebb ritkaföldfém, olvadáspontja 798 °C, miközben a lutécium a legnehezebb ritkaföldfém, olvadáspontja az említettnek kétszerese, azaz 1663 °C.

Ritkaföldfémek		Colloquial Industry Reference	British Geological Survey (BGS)	U.S. Geological Survey (USGS), NI 43-101, JORC
Scandium	Sc	KÖNNYŰ RITKAFÖLDFÉMEK	KÖNNYŰ RITKAFÖLDFÉMEK	KÖNNYŰ RITKAFÖLDFÉMEK
Lanthanum	La			
Cerium	Ce			
Praseodymium	Pr			
Neodymium	Nd			
Promethium	Pm	NEHÉZ RITKAFÖLDFÉMEK	NEHÉZ RITKAFÖLDFÉMEK	NEHÉZ RITKAFÖLDFÉMEK
Samarium	Sm			
Europium	Eu			
Gadolinium	Gd			
Terbium	Tb			
Dysprosium	Dy			
Holmium	Ho			
Erbium	Er			
Thulium	Tm			
Ytterbium	Yb			
Lutetium	Lu			
Yttrium	Y			



Elem	Felső kéreg (µg/g)	Középső kéreg (µg/g)	Alsó kéreg (µg/g)	Teljes kéreg* (µg/g)	Földkéreg (ppm)	Föld (ppm/ppb)
Sc	14	19	31	21,9	20	10,1 ± 2 ppm
Y	21	20	16	19	31,5	2,4 ± 0,2 ppm
Cu	28	26	26	27	68	64,7 ± 5 ppm
La	31	24	8	20	35	415 ± 10 ppb
Ce	63	53	20	43	68	1088 ± 20 ppb
Pr	7,1	5,8	2,4	4,9	9,5	165 ± 5 ppb
Nd	27	25	11	20	40	814 ± 10 ppb
Sm	4,7	4,6	2,8	3,9	7,5	259 ± 3 ppb
Dy	3,9	3,8	3,1	3,6	6,2	424 ± 10 ppb
Tb	0,7	0,7	0,48	0,6	1,2	66,6 ± 5 ppb
Lu	0,31	0,4	0,25	0,3	0,81	42,5 ± 2 ppb
Pt	0,5	0,85	2,7	1,5	0,004	1562 ± 40 ppb
Au	1,5	0,66	1,6	1,3	0,0041	102 ± 20 ppb

1. táblázat. A földkéreg ritkaföldfém-koncentrációja

* A három réteg koncentrációjának rétegvastagság szerint súlyozott átlaga.

Jelenleg számos ritkaföldfém-koncentrációt tartalmazó táblázat áll rendelkezésre különböző adatokkal és földrajzi származással. Ennek megfelelően egymással egyező koncentrációlisták nem lelhetők fel. Egyes szerzők adatokat publikáltak a kontinentális kéreg összetételéről és különböző földrajzi területeiről [16]. Ezek a szerzők ismertették a földkéreg felső, középső és alsó rétegének ritkaföldfém-koncentrációit. Mint ahogy az **1. táblázatban** látható, egyesek a kevésbé gyakori lutécium és túlium ritkaföldfém koncentrációját a platina és arany mögé helyezték. Binder [17] viszont említetteket a platina elé listázta. Allegre és társai [15] ellenben az elsőként említett szerzők adatait igazolták.

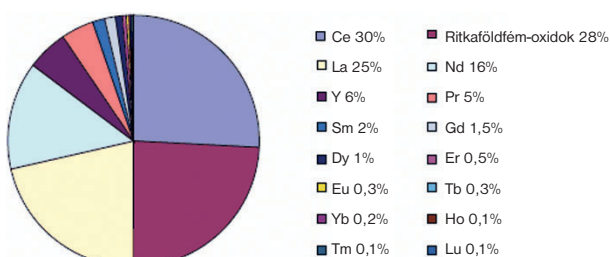
Annak dacára, hogy a legtöbb ritkaföldfém nem ritka, szétszórva van jelen a földkéregben, például a vas-, foszfát- vagy réz-arany-üledékekkel összefonódva. Ugyancsak előfordulnak olyan alluviális üledékekben is, amelyeket a vulkanikus ércek hosszú lejárati eróziója képzett. Ez magyarázza megjelenésüket brazil és indiai tengerpartok fekete homokjában. Mint az **1. táblázatban** láttuk, a szakirodalomban nézeteltérések vannak a földkéregben lévő ritkaföldfémek koncentrációjában.

Egyes ritkaföldfémek, például a prométium nem található meg a Földön, kivéve a nukleáris reaktorokat. A reaktorból származó prométiumot fel is használják szívritmus-szabályozók akkumulátoraiban és lumineszcens festékekben, órák mutatóin [18]. Mások, mint a túlium, olyan ritkák, hogy csak néhány kilogramm választható el belőlük 500 tonna ritkaföldfémekben gazdag ércből [19]. A prométiumot sokszor kizárják a ritkaföldfém-csoportból,

mivel, mint említettük, szintetikus radioaktív elem, ami az urán nukleáris hasadásakor képződik, és a Földön csak reaktorok kiégett nukleáris fűtőanyagában található. A ritkákhoz tartozik még a szkandium, ami annyira nehezen választható el a többi ritkaföldfém-től és az urántól, hogy évi globális forgalma nem haladja meg a néhány száz kilogrammot. Kivételes mágneses és vezetőképes tulajdonságai révén a lágy és képlékeny ritkaföldfémek nélkülözhetetlenek egy egész sor fejlett technológiai alkalmazásban, amelyek alapvetőek a jelenkori globalizált műszaki életben (**5. ábra**).

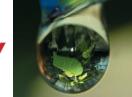
A globális pénzügy, internet, távközlés, műholdas megfigyelés, olajszállítás, repülőgépek hajtóművei, televíziók és GPS nem működtethetők ritkaföldfémek nélkül. Feltétlenül szükséges komponensei az olyan zöld technológiáknak, mint szél-turbinák [20], napelemek és hibrid fűtőelemes akkumulátorok [21]. Jelen-tősek a nanotechnológiák fejlődésében és gyakori alkalmazást találnak az olyan elektronikus berendezésekben, mint az okostelefonok (**6. ábra**), merevlemez és lapos képernyők [22]. Nem beszélhetünk „egyedi ritkaföldfém-piac”-ról, inkább többszörös piacok működnek a 17 elem és kombinációik esetében széles és eltérő hozzáférhetőségekkel és alkalmazásokkal. A ritkaföldfémek bizonyos nélkülözhetetlenséget tükröznek, mert látszólag nagyon kis mennyiségekben vagy bonyolult alkalmazásokban mindenütt jelen vannak. A leggyakoribban más elemekkel együtt használják

5. ábra. Ritkaföldfémek előállítása a világon 2010 és 2015 között [26]



6. ábra. Okostelefonok ritkaföldfém-tartalma [27]

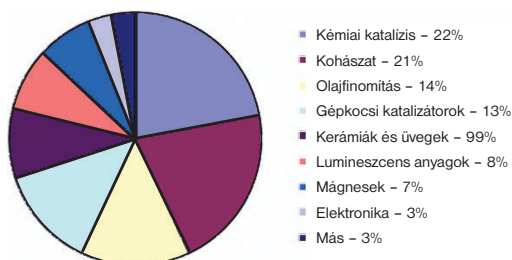




fel őket, például vas-, vagy nikkelötvözetekben, annak érdekében, hogy azokat jobbra, erősebbé, gyorsabbá és könnyebbé tegye.

A tudományos közbeszédben a ritkaföldfémek hozzáadását más elemekhez „doppingolásnak” (dópolásnak) nevezik a sportteljesítmény növelésére használt szereket leíró szlengből kölcsönözve. A német iparban „fűszer” fémekként említik őket [23]. A United States Geological Services (USGS) „vitaminoknak” írja le őket, mert más elemekhez hozzáadva olyan tulajdonságokat hoznak létre, amelyek nem valósulhatnak meg nélkülük. Japánban a következő metaforával jellemzik őket: „Az olaj a vér, az acél a test, a ritkaföldfémek a modern gazdaság vitaminjai” [24]. Ezek a metaforák közvetítik azt az érzést, amelyet általában az aránylag kis (de nem mindig kis) mennyiségek hozzáadását igazolják bizonyos hatás elérésére. Mindezek ellenére a felhasználói elektronika anyagszükségletét csak kis százalékban adják a ritkaföldfémek. Néhány ritkaföldfém lelőhelyén, világeloszlásuk révén (1. ábra), lényegében rendkívül heves politikai, gazdasági indulatokat váltanak ki ritkaságuk kapcsán. Ezek a szenvedélyek általában olyan helyekről indulnak ki, amelyeken a ritkaföldfémek aránylag bőségesek, mint Kína, Brazília és az Egyesült Államok.

A 20. század aranykorszaknak tűnt a ritkaföldfémek kutatására, lévén, hogy óriási volt az érdeklődés felhasználásukra, a politikai és gazdasági problémák ellenére. De 1980 előtt a ritkaföldfémek zömét még nem használták az elektronikában. A legtöbb alkalmazást eleinte a katalízisben, az üvegekben és kerámiákban, valamint a kohászatban valósították meg [25]. Csak a kései 80-as és korai 90-es években terjedt el alkalmazásuk a távközlésben és a felhasználói elektronikában (7. ábra) [26–28]. Ezeken a terüle-



7. ábra. Ritkaföldfémek ipari felhasználása [28]

teken például a neodímium ma már különösen fontos. Különleges mágneses tulajdonságai révén például lehetővé tette a számítógépek merevlemezeinek és hangszóróinak miniaturizálását. Nélküle ma nem használhatnánk személyi számítógépeket, okostelefonokat és fülbe illeszthető hangerősítőket, amelyekből világsszerte több milliárd darabot használnak [29]. Semmilyen más anyag nem közelíti meg például a neodímiummal dópolt mágnesek erejét, és talán ennek említése demonstrálja a legjobban a ritkaföldfémek sokat ígérő alkalmazásait. Nagyon erős neodímiummágnesek szükségesek az eredményes megújuló energia-technológiákhoz, beleértve a hibrid fűtőelem-akkumulátorokat, víz- és szélturbinákat, valamint napelemeket. Egy 2 MW-os szélturbina körülbelül 360 kg neodímiumot és 60 kg diszpróziumot, míg egy 3 MW-os 1800 kg ritkaföldfémeket tartalmaz [30]. Hogy ezt a környezetvédelem szemszögéből ábrázoljuk: minden tonna előállított ritkaföldfém körülbelül 1 tonna radioaktív selejtet és 75 m³ savas szennyvizet, valamint 1200 m³ fluorsav-, kén-dioxid- és kénsavhulladékot és körülbelül 8,5 kg fluort hoz létre [31].

A neodímium- és neodímiumötvözetek alapvető fontosságúak a korszerű haditechnikában. A cirkálórakéták, okosbombák és drónok ezek mellett tartalmaznak prazeodímiumot, terbiumot,

szamáriumot és diszpróziumot. Ittriumot, európiumot és terbiumot használnak a célzáshoz és a detektáláshoz a radar-, szonár- és sugárzásdetektációs berendezésekben a hadviselésben. Ugyanezeknek a ritkaföldfémeknek az optikai tulajdonságait használják ki az orvosi képalkotó berendezésekben, például a röntgen- és NMR-készülékekben.

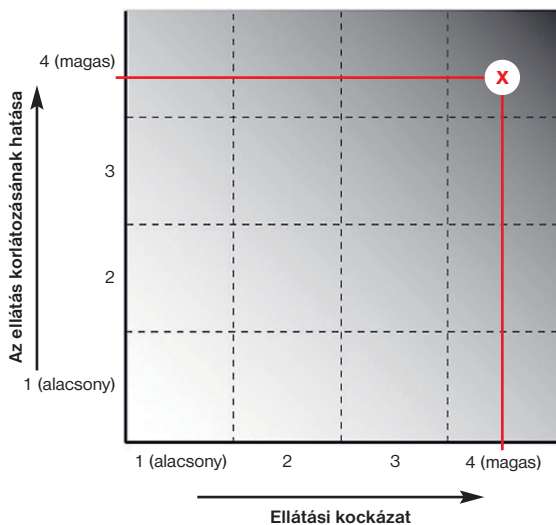
A ritkaföldfémek elválasztásának forradalmasítása Kínában, és annak politikai háttere

A ritkaföldfémek lelőhelyeinek és ipari gyártásának kérdése már a 19. század végétől összefonódott a politikával, az imperializmussal és militarizmussal. A politikai aspektusokat a hidegháború kritikus módon formálta. A nukleáris fegyverkezési verseny jelentősen függött a ritkaföldfémektől [32]. De pozitívként említhetjük, hogy például a jelenlegi rákelleni harcban a ritkaföldfémek is részt vesznek [33]. Ugyanakkor az olajkutatás, -fűrés, -szállítás és -finomítás technológiai jelentősen építenek a ritkaföldfémek vezetőképességi és mágneses tulajdonságaira [34]. A ritkaföldfémek, mint már említettük, szétszórtságuknál fogva csak a világ néhány országában bányászhatók és termelhetők eredményesen, amint az 1. ábra mutatja. Azok az országok, amelyekről szó van, bizonyos hatalmi monopóliumot is igyekeztek kialakítani a ritkaföldfémek előállítására és forgalmazására, és ez számos diplomáciai feszültséget és politikai manőverezést eredményezett. Mint említettük, a valóságban a nukleáris versengés a ritkaföldfémektől jelentősen függött elemi és elválasztási vonatkozásban is. Kína első nukleáris fegyvertesztelése után 1964-ben a központi kormány vezetői teljes átrendezést rendeltek el az ország ritkaföldfém-kutatásában és -fejlesztésében. Ebben hangsúlyosan meg kell említenünk egy kínai tudományos kutató, *Xu Guangxian* szerepét, aki, miután *Mao* elnök kulturális forradalma alatt alaposan meghurcolták, visszatért az egyetemi kutatáshoz, és 1974-ben kidolgozta a ritkaföldfémek egyszerűbb és olcsóbb elválasztásához a „kaszkád ellenáramú folyadék-folyadék extrakció” elméletét és gyakorlatát. Ez az eljárás 99,99%-os tisztaságú ritkaföldfémek elválasztását tette lehetővé, és forradalmasította Kína és más országok ritkaföldfém-termelését a 70-es évek végén. *Guangxian* akadémikus lett Kínában, elméletét és módszerének lényegét, valamint műszaki megvalósításának részleteit jól tükrözik az általa és mások által közölt publikációk [35–39].

A fentiekben csak röviden tettünk említést politikai vonatkozásokról, és ezekben itt nem is kívánunk elmélyedni. Az a kérdés, ami e dolgozat címében szerepel, részben vagy teljes egészében említett politikai szövődmények eredménye, más szóval, a kritikus helyzet, amiről említést tettünk, egyenes következménye a Kínával és más országokkal kapcsolatos globális gazdaságnak és politikumnak [40].

A „kritikus ellátás” értékelése

Egy nyersanyag „kritikus helyzetét” akkor értékelhetjük [41–47], ha az ellátási hiány kockázata és annak hatása a gazdaságra nagyobb a legtöbb más nyersanyaghoz hasonlítva (Európai Bizottság, 2010). Ahhoz, hogy „kritikus helyzetbe” kerüljön, egy ércnek vagy ritkaföldfémnek egyaránt lényegesnek kell lennie, és tárgya kell legyen ellátási korlátozásoknak (National Research Council, 2007). A „kritikus helyzet” általában mátrixként mutatható be. A 8. ábrán ilyen alpmátrixot láthatunk, amin a két fő értékelési tényező szerepel. Az egyik tényező az ellátás korlátozásának a

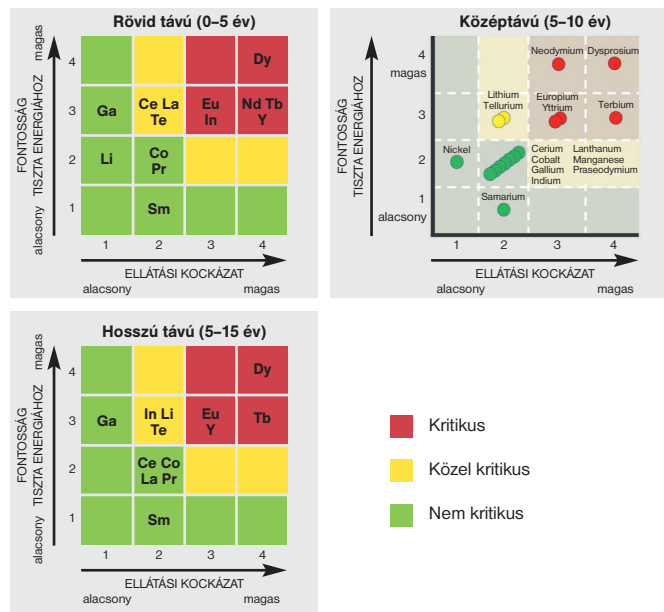


8. ábra. A „kritikus helyzet” ábrázolására használt mátrix mintája [42]

hatása, a másik a folyamatos ellátás biztosításának a kockázata. Mint az ábrán látható, a koordinátákon 1-től 4-ig (alacsony, illetve magas) értékek szerepelnek. A feltüntetett értékeket az azokon jelzettek szempontjából számos önkényes tényező tekintetbevételével határozták meg. Ezek között szerepelhetnek az értékelt fém vagy érc geológiai, műszaki, környezeti, társadalmi, politikai és gazdasági ismérvei. Az értékeléseknél feltétlenül tekintetbe kellett venni az időtényezőt is. Ennek megfelelően a 8–12.

2. táblázat. A 8–12. ábrákon szereplő ritkaföldfémek és más fémek kritikusságának összefoglalója

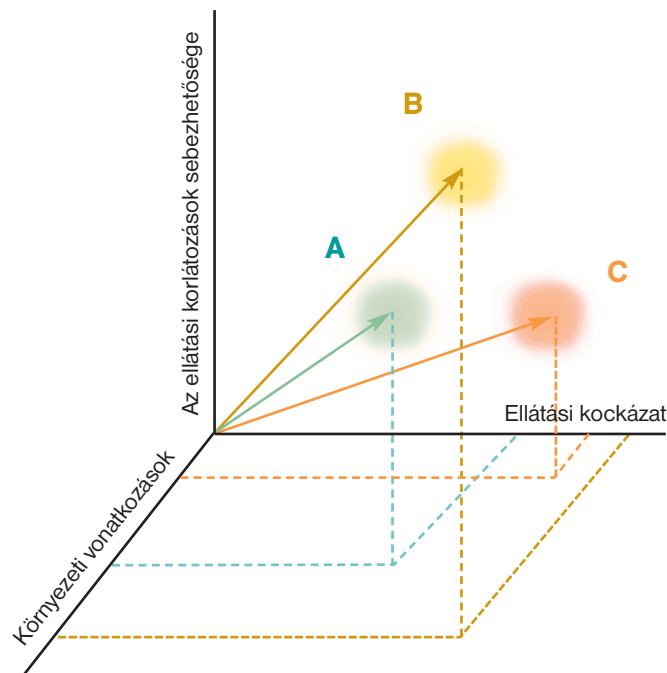
RÖVID TÁVON	KÖZEPES TÁVON
Kritikus	Kritikus
Diszprózium	Diszprózium
Európium	Európium
Neodímium	Neodímium
Terbium	Terbium
Ittrium	Ittrium
Kritikus közeli	Kritikus közeli
Cérium	Lítium
Indium	Tellúr
Lantán	
Tellúr	
Nem kritikus	Nem kritikus
Kobalt	Cérium
Gallium	Kobalt
Lítium	Gallium
Mangán	Indium
Nikkel	Lantán
Praeodímium	Mangán
Szamárium	Nikkel
	Praeodímium
	Szamárium

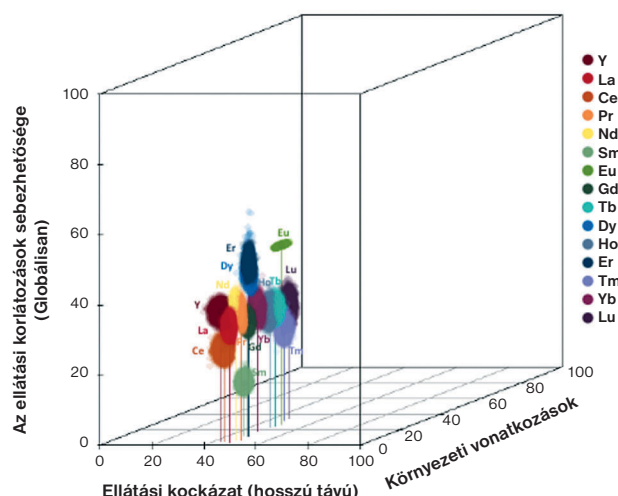
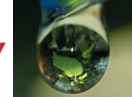


9. ábra. A ritkaföldfémek rövid, közép- és hosszú távúra vonatkozó ellátási kockázatának mátrixdiagramjai [46] [47]

ábrákon szereplő diagramokon a ritkaföldfémek rövid, közepes, illetve hosszú távú kritikus helyzetét mutatják be. Természetesen a koordinátákon más tényezők is szerepelhetnek. Mint a 8–12. ábrákon és az azokon szereplő ritkaföldfémek és más elemek kritikusságát összefoglaló 2. táblázatban látható, a legkritikább (rövid és közepes távon) elemek a diszprózium, az európium, a neodímium, a terbium és az ittrium. A rövidtáv és a középtáv között a tiszta energia előállítása és ellátási kockázatai eltolódnak bizonyos fémek esetén. Például a neodímium fontossága a tiszta energia előállításában növekszik. Ugyanitt csökken az európium, a terbium és az ittrium fontossága. Mindezen változások ellenére a neodímium, az európium, a terbium és az ittrium ellátása kritikus marad közepes távon. A még behatóbb értékelések ér-

10. ábra. A ritkaföldfémek kritikusságának elemzését szolgáló diagram. A, B, C = ritkaföldfém elemek [48]



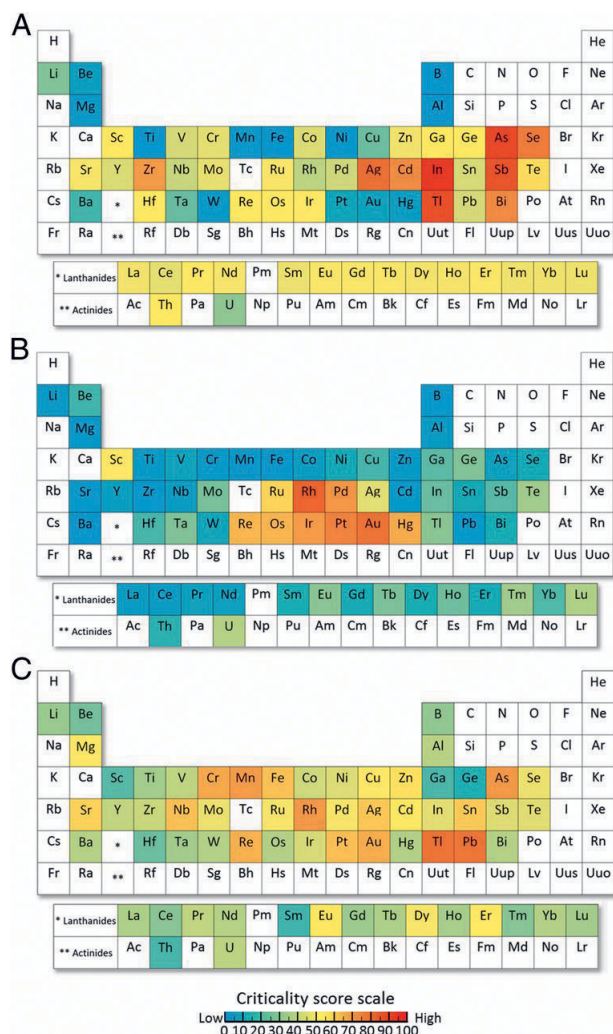


11. ábra. 15 ritkaföldfém kritikusságának elemzése 3D mátrix alapján [57]

dekében a közelmúltban a Yale Egyetem kutatói az említett mátrixok kétdimenziós értékelési lehetőségeit 3D-re bővítették (10. ábra) [48]. Mint az ábrán látható, az újabb koordinátán szereplő tényező az ellátási korlátozások sebezhetősége. A ritkaföldfémek

12. ábra. A ritkaföldfémek és más fémek kritikussága.

A: ellátási kockázat szerint, B: környezeti vonatkozások szerint, C: az ellátási korlátozások sebezhetősége szerint



kritikusságát az említett 3D értékelésben mutatja a 11. ábra. Lényegében az ábrán látható ritkaföldfémek a koordináta-rendszer közepébe szorúlnak, és nagyjából a 2D (8–10.) ábrákkal összevethető kritikusságot mutatnak. Hogy a ritkaföldfémek kritikusságát a periódusos rendszer többi elemeinek kritikusságával összevessék, százalékos kritikalitási skálát alkalmaztak. A 12. ábrán már nemcsak a ritkaföldfémek három szempont szerinti kritikussága szerepel, hanem számos más elemé is. Itt, mint említettük, szempontként a sebezhetőséget is tekintetbe veszik. Hangsúlyoznunk kell, hogy a ritkaföldfémek kritikus helyzetét a fentebb ismertetett 2D és 3D mátrixokat alkalmazó értékelési módszer olyan sok szemponttól, illetve tényezőtől függ, hogy legjobb esetben is csak fél- vagy kvázikvantitatívnek tekinthető.

Utószó

Itt kell megemlítenünk, bár valószínűleg az összes fentebb leírtakból kitűnik, hogy a ritkaföldfémek szakirodalmi szokatlanul nagyméretű, és abból csak a dolgozat témájához legközelebbi részleteket emeltük ki és ismertettük. Mint előzőleg említettük, a ritkaföldfémek előállításának nehézsége, valamint gyakorlati alkalmazásai rendkívül rohamos fejlődése révén a ritkaföldfémek témája a más tudományos kutatási témáktól eltérően szokatlanul szoros összefüggésbe került a globális gazdasággal és politikummal [40]. A továbbiakban válaszolni igyekszünk az írás alcímében is felvetett kérdésre. Ennek érdekében felsorolunk néhány, a kérdésre vonatkozó tudományos dolgozatot. Kezdjük a *Mineral resources: Exhaustion is just a Myth* cíművel. Ebben a dolgozatban szó szerint kimondják: „Some scientists have declared that *mineral deposits containing important non renewable resources will be exhausted* in a few decades if consumption does not decrease. *Reaching the opposite conclusion*, the international team of researchers (from the Université de Genève) shows that even though mineral resources are finite, geological arguments indicate that they are sufficient for at least many centuries, even taking into account the increasing consumption required to meet the growing needs of society. [49]” (Bizonyos kutatók azt nyilatkozták, hogy a nem megújuló tartalékokat tartalmazó fontos ásványlerakatok *kimerülnek néhány évtized múlva*, amennyiben a fogyasztás nem csökken. Az *ellenkező következtetésre* jutó nemzetközi kutatói csoport (Genfi Egyetem) kimutatta, hogy annak ellenére, hogy az ásványi források végesek, geológiai érvek arra mutatnak, hogy azok elegendőek legalább néhány évszázadra, még a növekvő társadalmi szükségletek kielégítését tekintetbe véve is.) De ugyanolyan gondolatmenetben említhetjük a következő cikkeket: *Myths and facts about the Rare Earth* (Mítoszok és tények a ritkaföldfémekről) [50], *Critical Metals Myths, Markets and Geopolitics* (Kritikus fémek, mítoszok, piacok és geopolitika) [51], *Clean Energy and the Rare Earth: Why not to Worry* (Tiszta energia és ritkaföldfémek: miért ne aggódjunk) [52], *The scarcity illusion – rare earth elements* (A hiány illúziója – ritkaföldfémek) [53], *Correcting the Record: Myths and Facts about the Rare Earths Supply Chain* (A nyilvántartás javítása: mítoszok és tények a ritkaföldfémek ellátási láncolatáról) [54].

Mint látjuk, a ritkaföldfémek kritikus helyzete egyesek szerint mítosz, mások szerint valóság, és mindkét meglátást jelentősen befolyásolja a mindenkori világpolitika, valamint a ritkaföldfém ellátásának kínai monopóliuma [55, 56].



Függelék

A ritkaföldfém-termelés jövője

A dolgozatban többször említett fontosságuk miatt a technológia fejlődése, valamint a ritkaföldfémek előállításának nehézsége és kritikus helyzete következtében a ritkaföldfémek előállítása könnyebb, olcsóbb megvalósítására számos helyen folynak intenzív tudományos kutatások. Ezen sokirányú erőfeszítései, a tervek és elképzelések közül itt csak kettőt említenénk. Az egyik a biobányászat és biokioldás (biomining, bioleaching) igénybevétele a ritkaföldfémek előállítására [58–60]. Biobányászatnak és biokioldásnak azt a folyamatot nevezzük, amelyben fémek kioldását kívánják ásványi forrásaikból, ércekből a természetben előforduló mikroorganizmusokkal, vagy mikroorganizmusok igénybevételével elemek helyét változtatják meg úgy, hogy az érintett elemek vízzel, savakkal vagy oldószerekkel elválaszthatók, illetve kinyerhetőek legyenek. A másik kutatási terület, amire szintén jelentős reményeket fűznek, az új-, illetve a holdbányászat a ritkaföldfémek vonatkozásában. A földre került bizonyos aszteroidákból származó minták ugyanis azt mutatják, hogy azok ritkaföldfém-tartalma jelentős és esetleg feldolgozásra érdemes [61–63].



IRODALOM

- [1] D. L. Meadows, D. H. Meadows, J. Randers, W. Behrens III., Limits to Growth, Univers. Books, NewYork, 1972.
- [2] W. S. Jevons, The Coal Question: can Britain survive?, MacMillan, London, 1865, reprint 1906.
- [3] https://hu.wikipedia.org/wiki/R%C3%B3mai_Klub
- [4] L. Mancini, C. De Camillis, D. Pennington, Security of supply and scarcity of raw materials, JRC Scientific and Policy Reports, 2013.
- [5] J. L. Simon, The Ultimate Resource, Princeton University Press, Princeton N.J., 1996.
- [6] N. T. Nassar, T. E. Graedel and E. M. Harper, By-product metals are technologically essential but have problematic supply, Science.
- [7] J. H. L. Voncken, The Rare Earth Elements. An Introduction. Springer Verlag, 2016.
- [8] V. Zepf, Rare Earth Elements, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2011.
- [9] D. A. Atwood (ed.), The Rare Earth Elements: Fundamentals and Applications, John Wiley and Sons, 2012.
- [10] J. M. Klinger, Rare Earths: Lessons for Latin America, Berkeley, Review of Latin American Studies, Vol. 2013, 39.
- [11] http://www.periodni.com/history_of_rare_earth_elements.html
- [12] N. G. Connelly and T. Damhus (with R.M.Harzhorn and H.T.Hutton eds.) Nomenclature of Inorganic Chemistry: IUPAC recommendations 2005, Cambridge. RSC Publication ISBN 0-85404-438-8.
- [13] C. S. Rainers, Was ist das Seltene an den Seltenen Erden? Eine chemiedidaktische Reflexion Chemie in unserer Zeit (2001) 35, 110.
- [14] G. Z. Hatch, Going Green: The Growing Role of Permanent Magnets in Renewable Energy Production and Environmental Protection, Magnetism. Denver, Colorado, 2008.
- [15] C. Allegre, G. Manhès, E. Lewin, Chemical composition of the Earth and the volatility control on planetary genetics, Earth planet Sci.Lett. (2001) 185, 49.
- [16] R. L. Rudnick, S. Gao, Composition of the Continental Crust. In: H.D. Holland, K.K.Turekian (eds): Treatise on geochemistry, Pergamon (imprint), San Diego, Science and Technology Books.
- [17] H. H. Binder, Lexikon der chemischen Elemente. Das Periodensystem in Fakten, Zahlen und Daten, S.Hirzel, Stuttgart, 1999.
- [18] R. E. Krebs, The History and Use of Our Earth's Chemical Elements, A Reference Guide, 2nd Edition, Greenwood Press, Westport, C.T., 2006.
- [19] J. Emsley, Nature's Building Blocks: An A-Z Guide to the Elements, Oxford University Press, 2001.
- [20] M. Humphries, Rare Earth Elements: The Global Supply Chain, Washington D. C., Congressional Research Service, 2012.
- [21] M. Armand, J. M. Tarascon, Building better batteries, Nature Geoscience (2008) 451, 652.
- [22] N. Krishnamurthy, C. K. Gupta, Extractive metallurgy of rare earth, SRC Press, Boca-raton, Florida, 2005.
- [23] V. Zepf, Rare Earth Elements, A New Approach to the Nexus of Supply, Demand and Use: Exemplified along the Use of Neodymium in Permanent Magnets, PhD Thesis, Physics, Human Geography and Geoinformatics, Augsburg University, 2013.
- [24] P. C. Dent, Rare earth elements and permanent magnets, Journal of Appl.Phys. (2012) 111, (07a721).
- [25] L. Niinistö, Industrial Applications of the Rare Earths, an Overview, Inorg. Chim. Acta (1987) 140, 339.
- [26] <http://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/material-matters/the-rare-earth-crisis.html>
- [27] <http://www.outsiderclub.com/report/how-to-invest-in-rare-earth-metals-and-profit/1446>
- [28] <http://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/material-matters/the-rare-earth-crisis.html>
- [29] J. J. Croat, Current status and future outlook for bonded neodymium permanent magnets, J.Appl.Phys. (1997) 81, 49804.
- [30] D. Stover, The myth of renewable energy, Bull. Atomic Sci. (2011) 22., Nov.
- [31] C. Hurst, China's Rare Earth Elements Industry: What Can the West Learn?, Washington D.C., Institute for the Analysis of Global Security, 2010.
- [32] V. D. Kosynkin, S. D. Moiseyev, C. H. Peterson, B. V. Nikipelov, Rare Earth Industry of today in the Commonwealth independent States, J.Alois and Co. (1993) 192, 118.
- [33] H. E. Townley, Applications of the rare earth elements in cancer imaging and therapy, Current Nanoscience (2013) 9, 686.
- [34] S. T. Sie, Past, Present and Future Role of Microporous Catalysts in the Petroleum Industry, Studies in Surface Science and Catalysis (1994) 85, 587.
- [35] J. Deng, A life time of Rare Earth love: notes on the China Academy of Sciences, Academician Xu Guangxian Science Times
- [36] H. Jia, L.Di, Xu Guangxian: a chemical life, 2009, April, <https://www.chemistry-world.com/news/xu-guangxian-a-chemical-life/3004349.article>
- [37] Xin Ling, Xu Guangxian: Father of Chinese Rare Earth Chemistry, Bulletin of the Chinese Academy of Sciences (2009) 23, 98.
- [38] C. Yan, J. Jia, C.Liao, S.Wu, Xu Guangxian, Rare Earth Separation in China, Tsinghua Science and Technology (2006) 11, 241. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1007021406701833>
- [39] <http://advances.sciencemag.org/content/1/3/e1400180.full>
- [40] N. Mancheri, L. Sundaresan, S. Chandrashekar, Dominating the World. China and the Rare Earth Industry, National Institute of Advanced Studies, Bangalore, India, 2013, April.
- [41] Critical raw materials for the EU: Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, European Commission, DG Enterprise and Industry, 2013. November 8.
- [42] National Research Council, Minerals, Critical Minerals and the US Economy, CHAPTER 4, Applying the Matrix, edited by the National Academy Press, Washington D.C., USA, 2007. <https://www.nap.edu/read/12034/chapter/6#111>
- [43] <https://www.nap.edu/read/12034/chapter/6#111>
- [44] U.S. Department of Energy, Critical Materials Strategy, 2010. December, <https://energy.gov/sites/prod/files/edg/news/documents/criticalmaterialsstrategy.pdf>
- [45] T.Zimmermann, Cycles of Critical Metals. Dissipative losses and potential Optimizations, Dissertation, Universität Bremen, 2015, <https://elib.suub.uni-bremen.de/edocs/00104959-1.pdf>
- [46] <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/12/f34/2011%20Critical%20Materials%20Strategy%20Report.pdf>
- [47] <http://www.namibiarareearth.com/market-demand.asp>
- [48] T. E. Graedel, L. Barr, C. Chandler, T.Chase, J. Choi, L. Christoffersen, E. Friedlander, C. Henly, T. Jun, N. T. Nassar, T. Schechner, S. Warren, N-yu Yang, C. Zhu, Methodology of Metal Criticality Determination, Environ.Sci.Technol. (2012) 46, 1063.
- [49] http://www.unige.ch/sciences/Actualites/2017/News-280417-1_en.html
- [50] <http://www.evwind.es/2011/05/04/myths-and-facts-about-the-rare-earth/11433>
- [51] B. Sylvester, The Critical Metals Report (2011) 6. 7.
- [52] A. Lovins, Clean Energy and the Rare Earth: Why not to Worry, Bull. Atomic Sci. 2017. május 23.
- [53] <http://www.iom3.org/materials-world-magazine/News/2013/apr/09/scarcity-illusion-rare-earth-elements>
- [54] http://www.enhancedonlinenews.com/portal/site/eon/permalink/?ndmViewId=news_view&newsId=20110503007593&newsLang=en&permalinkExtra=
- [55] China's Monopoly On Rare Earths: Implications For U. S. Foreign And Security Policy Hearing before the Subcommittee on Asia and the Pacific of the Committee on Foreign Affairs House of Representatives, 2011. September 21, Serial No. 112–63, Printed for the Use of the Committee on Foreign Affairs, U.S. Government Printing Office, Washington, 20.11
- [56] D. A. Neill, E. Speed, The Strategic Implications of China's Dominance of the Global Rare Earth Elements (REE) Market, Defence R&D Canada, Centre for Operational Research and Analysis, National Defence, Canada
- [57] T. E. Graedel, E. M. Harper, N. T. Nassar, Ph. Nuss, B. K. Reck, Criticality of metals and metalloids, Pros. Nat. Acad.Sci. (2015) 112, 4257. <http://www.pnas.org/content/112/14/4257.full.pdf>
- [58] Braun Tibor, Biobányászat, biokioldás bemutatása. A mikroorganizmusok szerepe és alkalmazása fémek kioldására ércekből. Magyar Kémikusok Lapja, publikálás alatt
- [59] W-Q. Zhuang, J. P. Fitts, C. M.Ajo-Franklin, S. Maes, L. Alvarez-Cohen, T. Hennebel, Recovery of critical metals using biometallurgy, Curr. Op. in Biotechnol. (2015) 33, 327.
- [60] D. M. Park, D. W. Reed, M. C. Yung, A. Eslamimanesh, M. M. Lencka, A. Anderko, Y. Fujita, R. E. Riman, A. Navrotsky, Y. Jiao, Bioadsorption of Rare Earth Elements through Cell Surface Display of Lanthanide Binding Tags, Environ. Sci.Technol. (2016) 50, 2735.
- [61] https://www.rbth.com/science_and_tech/2014/10/26/moon_exploration_will_reduce_the_shortage_of_rare_earth_meta_40887.html
- [62] http://beta.industryweek.com/transportation/space-mining-answer-rare-earths-problem?utm_test=redirect&utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.hu%2F
- [63] <https://phys.org/news/2013-02-space-rare-earths-scientists.html>