

# RITKAFÖLDFÉMEK GEOKÉMIKUS SZEMMEL

Dobosi Gábor      Török Kálmán

az MTA doktora, tudományos tanácsadó,  
MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont  
Földtani és Geokémiai Intézet  
dobosi@geochem.hu

a földtudomány kandidátusa, tud. főmunkatárs,  
Eötvös Loránd Geofizikai Intézet  
torokklm@elgi.hu

## Bevezetés

Az elmúlt években a híradásokban gyakran szerepeltek a ritkaföldfémek. A hírek egy része egyenesen ritkaföldfém-krízisről beszél, a szenzációhajhász címek gyakran az olajfegyver bevetéséhez hasonlítják a jelenlegi ritkaföldfém-helyzetet. Erre csak néhány kiragadott példa, közelebbi forrás megjelölése nélkül: *Ami az olaj Kuvaitnak, az a ritkaföldfém Kínának, Élesedik Kína „olajfegyvere”: csökken-tik a ritkaföldfémek exportját, Rare Earths Are Vital, and China Owns Them All, vagy Global Supply of Rare Earth Elements Could Be Wiped out by 2012.* Mi is áll a címek mögött valójában? Valóban elfognak-e a ritkaföldfémek a közeljövőben? Tényleg csak Kínában vannak hasznosítható ritkaföldfémtelepek?

Túlzás nélkül állítható, hogy a ritkaföldfémek meghatározó szerepet játszanak számos iparágban, többek között az energetikában, távközlésben, hadiiparban, számítástechnikában, illetve a csúcstechnológiákban. Mivel az esetek jelentős részében helyettesítésük nem lehetséges, kiesésük valóban komoly problémát okozna. Az igények pedig – különösen a környezetbarát alkalmazásokban – egyre

növekednek. A keresleti oldalról tehát mindenképpen növekedés, egyes ritkaföldfémek, például a neodímium (Nd) esetében jelentős növekedés várható.

A termelés ma még fedezi a szükségletet, de a ritkaföldfém-ellátás rendkívül egyoldalú, a világtermelés 97%-a Kína kezében van. Ráadásul Kína az utóbbi években exportkorlátozásokat vezetett be, a saját igényeinek biztonságos és hosszú távú ellátása miatt, ami komoly aggodalmat váltott ki számos országban, és természetesen áremelkedéshez is vezetett. Meg is vádolták, hogy a ritkaföldfémek exportjának korlátozását nyomásgyakorlásra is használja, bár Kína ezt tagadja. A mára kialakult egyoldalú függő helyzet és az árak növekedése ráirányította a figyelmet a ritkaföldfémkészletek kutatására, feltárására és a termelés mielőbbi megindítására.

E tanulmányban röviden áttekintjük a ritkaföldfémek hasznosítható dúsulásának geológiai körülményeit, a ritkaföldfémtelepek legfontosabb típusait, a jelenlegi ritkaföldfém-termelést és érckutatást, a ritkaföldfém-tartalékokat és azok regionális eloszlását, illetve a ritkaföldfémek rendkívül sokrétű felhasználási lehetőségeit.

*A ritkaföldfémek általános jellemzése*

*Ritkaföldfémeknek* a lantanida csoport 15 elemét, valamint az itriumot (Y) nevezik, bár egyes szerzők a szkandiumot (Sc) is ide sorolják. Az 57-es rendszámú lantántól a 71-es lutéciumig terjedő lantanidák a periódusos rendszer külön csoportját képezik, és általában a többi elemtől elkülönítve ábrázolják. Az Y kémiai sajátosságait tekintve nagyon hasonló a lantanidákhoz, a Sc azonban már sok vonatkozásban eltér, ezért a geokémikusok zöme nem is sorolja a ritkaföldfémek közé.

A lantanidákat hagyományosan két csoportra, a *könnyűlantanidákra* (a lantántól az európiumig) és *nehézlantanidákra* (a gadolíniumtól a lutéciumig) osztják. Bár az itrium „könnyebb” még a könnyűlantanidáknál is, kémiai és geokémiai sajátosságai a nehézlantanidákéhoz hasonlóak. A ritkaföldfémek felsorolása az 1. táblázatban látható. A ritkaföldfémek, ill. a lantanidák a periódusos rendszer legkoherensebb elemcsoportját képezik, kémiai és geokémiai sajátosságaik nagyon hasonlóak, egymást könnyen helyettesíthetik, így nehéz őket egymástól elválasztani, és valame-

vegyjel	név	rendszám	kondritos gyakoriság (ppm)	földkéregbeli gyakoriság (ppm)
Y	itrium	39	2,25	27
La	lantán	57	0,367	38
Ce	cérium	58	0,957	80
Pr	prazeodímium	59	0,137	8,9
Nd	neodímium	60	0,711	32
Pm	promécium	61	-	-
Sm	szamárium	62	0,231	5,6
Eu	európium	63	0,087	1,1
Gd	gadolínium	64	0,306	4,7
Tb	terbium	65	0,058	0,77
Dy	diszpróziium	66	0,381	4,4
Ho	holmium	67	0,0851	1,0
Er	erbium	68	0,249	2,9
Tm	tullium	69	0,0356	0,41
Yb	itterbium	70	0,248	2,8
Lu	lutécium	71	0,0381	0,43

1. táblázat • A ritkaföldfémek vegyjele, rendszáma és előfordulási gyakorisága ppm-ben megadva (ppm – főleg a nyomelemek esetében használt koncentrációegység, szó szerint milliiod rész jelent. Egy százalék tízezer ppm). A kondritos és a földkéregbeli gyakoriságértékek Stuart Ross Taylor és Scott McLennan (1988) összefoglaló tanulmányából származnak. A 61-es rendszámú promécium nem fordul elő a természetben.

lyüküket tisztán előállítani. Elemi állapotban fémek, vegyületeikben általában három értékű kationok. Ettől természetes körülmények között csak az eurórium tér el, amely az  $\text{Eu}^{3+}$  mellett gyakran  $\text{Eu}^{2+}$  oxidációs állapotban fordul elő, illetve a cérium, amely könnyen oxidálódik  $\text{Ce}^{4+}$  kationná, különösen tengeri üledékes körülmények között. A ritkaföldfémek ionrádiusza a rendszám növekedésével csökken – ezt a jelenséget *lantanidakontrakciónak* nevezik. Sajátságos elektronszerkezetüknek köszönhetően különleges optikai és mágneses tulajdonságaik vannak.

#### *A ritkaföldfémek előfordulása a természetben*

A ritkaföldfémek – nevükkel ellentétben – nem olyan ritkák; ezt az elnevezést azért kapták, mert ritka, illetve ritkának tartott ásványokból izolálták őket először. A kontinentális kéregben valamennyi ritkaföldfém gyakoribb, mint az ezüst, és egyes ritkaföldfémek, például a La, vagy a Ce gyakoribbak a réznél.

A ritkaföldfémek kozmikus (helyesebben naprendszerbeli vagy kondritos<sup>1</sup>) és kontinentális kéregbeli gyakoriságát ugyancsak az *1. táblázat* mutatja. Az adatokból jól látszik, hogy páros rendszámú lantanidák kb. egy nagyságrenddel gyakoribbak a páratlan rendszámúaknál (Oddo–Harkins-szabály), illetve, hogy mind a páros, mind a páratlan rendszámú ritkaföldfémek „kozmosz” gyakorisága csökken a rendszám növekedésével. A kondritos gyakoriság értéke különösen fontos a geokémiában, mert a szakirodalomban ritkaföldfém-adatokat gyakran a kondritos (pontosabban a szenes kondritos) összetételre, azaz a Naprendszer „ősanyagának”

<sup>1</sup> A kondritok, közülük is a szenes kondritok a legprimitívabb meteoritok, amelyek összetétele, az illó komponensek kivételével, a Naprendszer őanyagának összetételéhez hasonló.

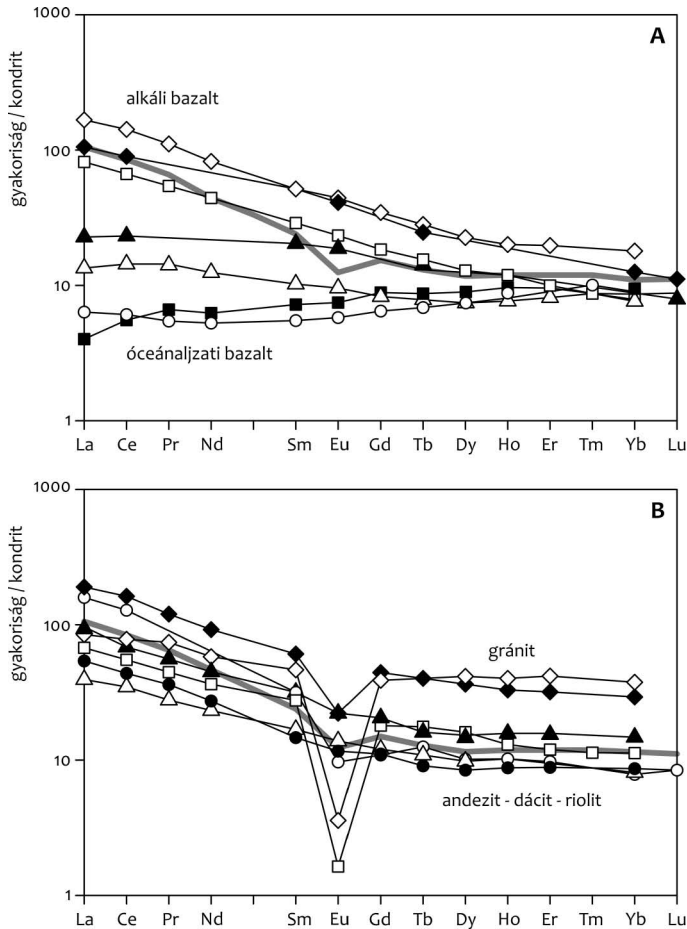
megfelelő gyakoriságértékekre normálva adják meg. A kontinentális kéregben (pontosabban annak felső részén) a ritkaföldfémek jelentősen – a nehézlantanidák kb. egy, míg a könnyűlantanidák két nagyságrenddel – dúsulnak a kondritos értékekhez képest.

A hasonló ionrádiusz és töltés miatt a ritkaföldfémek könnyen helyettesítik egymást a kristályrácsban, ezért mindig együtt fordulnak elő. A legtöbb kőzetben a ritkaföldfémek nem képeznek önálló ásványokat, hanem a kőzetalkotó ásványok rácsába lépnek be, ahol a hasonló ionrádiuszú kalciumot vagy nátriumot helyettesítik. A geológiai rendszerekben a ritkaföldfémek ún. *inkompatibilis* nyom-elemként viselkednek, ami azt jelenti, hogy az olvadás és a kristályosodás során az olvadéban dúsulnak és nem a kristályos fázisban. A ritkaföldfémek relatív gyakoriságának változását a geokémiában az ún. kondritnormált diagramokon ábrázolják (bár használnak primitív köpenyre vagy kontinentális kéregre normált diagramokat is). A kondritos összetételre történő normálás egyrészt kiküszöböli a páros-páratlan gyakoriság hatását, másrészt szemléletesen mutatja a változást egy kiinduló „ősanyaghoz” képest. A normált diagramokon látható ritkaföldfém-lefutás tanulmányozása sokat segít a különböző kőzetképződési folyamatok megértésében és azonosításában, ezért a kőzettani és geokémiai kutatásban a ritkaföldfémek (és a ritkaföldfémekhez kapcsolódó radiogén izotóprendszerek) vizsgálata felbecsülhetetlen jelentőségű.

Néhány óceáni és kontinentális kőzet ritkaföldfém-eloszlása a földkéreg átlagos összetételével együtt az *1. ábrán* látható. A magmás kőzetek ritkaföldfém-diagramjai igen változatos képet mutatnak, a ritkaföldfémek koncentrációja azonban ritkán haladja meg a földkéregbeli átlagot. Különösen

kevés ritkaföldfém van az óceánok aljzatát alkotó bazaltokban (*1a. ábra*), de a kontinentális kéreg fontos magmás kőzeteinek (andezitek vagy gránitok) ritkaföldfém-tartalma is a földkéregbeli átlagos értékek közelében van (*1b. ábra*). Jelentősebb dúsulás csak az ún. alkáli magmás kőzetekben mutatható ki. Az

üledékes kőzetek közül az agyagpala vagy lösz ritkaföldfém-tartalma a kontinentális kéregéhez hasonló (a kontinentális kéreg ritkaföldfém-tartalmát éppen az ilyen üledékek alapján számították), míg a homokkővek vagy karbonátos üledékek (mészkö, dolomit) ritkaföldfém-tartalma még ennél is kisebb.



*1. ábra* • A leggyakoribb magmás kőzetek kondritra normált ritkaföldfém-tartalma Taylor és McLennan (1988) tanulmánya alapján. **A** – Bázisos óceáni és kontinentális vulkáni kőzetek (bazaltok). **B** – Kontinentális intermedier és savanyú magmás kőzetek (andezit, dácit, riolit és különböző gránitok). A negatív Eu-anomáliák oka, hogy magmás körülmények között az Eu kétértékű is lehet, így megoszlási viszonyai eltérnek a többi, három értékű ritkaföldfémtől (földpátok hatása). A vastag szürke vonal a földkéreg átlagos ritkaföldfém-tartalmát mutatja.

*A ritkaföldfémtelepek*

Az előzőekben felsorolt néhány példa is mutatja, hogy a ritkaföldfémek szórt elemek, viszonylag egyenletesen oszlanak el a különböző kőzettípusokban, számottevő – és gazdasági szempontból is jelentős – dúsulásuk viszonylag ritka. Elsődleges magmás dúsulásuk inkompatibilis viselkedésüknek köszönhető, amelynek eredményeképpen a magmaképződés (parciális olvadás) során a képződött magmában dúsulnak, a magma kristályosodása (frakcionált kristályosodás és differenciáció) folyamán pedig a maradék olvadékban koncentrálnak. Magmás dúsulásuk egyrészt a dúsult köpenyforrás igen kisfokú olvadása révén képződött alkáli kőzetekben és karbonatitokban, illetve a gránitos testek kristályosodása során képződött pegmatitokban várható. További koncentrációadások hidrottermális, kontakt metamorf vagy mállási folyamatokhoz köthető. Különösen a laterites mállás, illetve az ellenálló nehéz ásványok felhalmozódása révén képződhetnek ritkaföldfémek műrevaló érclepei. A különböző ritkaföldfém-dúsulásokról és teleptípusokról számos kiváló átfogó tanulmány jelent meg (például Castor – Hedrick, 2006; Gupta – Krishnamurthy, 2005; Walters – Lusty 2010; Long et al., 2010); a következő összefoglalás ezen munkák alapján készült. A legfontosabb teleptípusokat néhány jellemző példával együtt a 2. táblázatban tekintjük át.

*Elsődleges telepek*

Elsődleges telepeknek azokat az érclepeket nevezzük, amelyek magmás folyamatok vagy magmás működéshez kapcsolódó egyéb, például hidrottermális folyamatok során képződnek. A ritkaföldfémek elsődleges dúsulása szempontjából különösen az alkáli magmás

kőzeteknek és a karbonatitoknak van szerepük. A két kőzettípus nem választható el teljesen egymástól, gyakran együtt fordulnak elő, főleg az ősi, stabil kontinentális területeken, különösen azok riftesedett, árkos törésekkel szabdaltságra. Ilyen, ma is aktív terület például a Kelet-afrikai árok.

Az alkáli magmás kőzetek, mint a nevük is mutatja, a többi magmás kőzethez képest megnövekedett  $\text{Na}_2\text{O}$ - és  $\text{K}_2\text{O}$ -tartalommal jellemezhetők. Az alkáli magmák kristályosodása és differenciációja során a szilíciumban szegény ultrabázisostól a szilíciumban gazdagabb felzikusig rendkívül változatos összetételű kőzetek képződhetnek, amelyek jelentős, bár nem műrevaló mértékben tartalmazhatnak inkompatibilis nyomelemeket, köztük ritkaföldfémeket. A ritkaföldfémek további dúsulása egyrészt az önálló ritkaföldfémásványok kumulatív felszaporodása vagy hidrottermális tevékenység révén történhet. Az ilyen típusú, nagy ritkaföldfém-tartalmú alkáli kőzetekből álló komplexumok közül a Kola-félszigeten található előfordulások a legismertebbek (Khibina- és Lovozero-komplexumok). Ezekhez az alkáli komplexumokhoz igen nagy tömegű foszfor-, Nb-, Zr-, Ti- és ritkaföldfém-dús telepek kapcsolódnak. Nagyobb mértékű rendszeres termelés azonban nincs a Kola-félszigeten. Ugyancsak ide tartozik a jövő egyik jelentős ritkaföldfémforrása, a grönlandi Ilímaussaq-komplexum. A ritkaföldfémeket egy eudialit nevű ásvány tartalmazza, amely a magmás kristályosodás során egyes periodikusan képződött kumulatív eredetű rétegekben jelentősen, műrevaló mértékben felszaporodott. Az eudialit a ritkaföldfémek mellett még cirkóniumot és nióbiiumot is tartalmaz. A jelenlegi kutatások szerint a grönlandi ritkaföldfémkészletek (Kvane-fjeld- és Motzfeldt-telepek) a teljes igény

teleptípus	rövid leírás	ismert telepek száma	az érckészlet mérete és minősége	legfontosabb példák
Elsődleges telepek				
Alkáli kőzetek	Ritkaföldfém és Zr-, Ti-, Nb-dús alkáli kőzetek-kel társult telepek	122	Általában < 100 millió tonna érc (Lovozero > 1000 millió tonna), < 5% RFO	Ilímaussaq (Grönland), Khibina és Lovozero (Oroszország), Thor Lake (Kanada), Weishan (Kína)
Karbonatitok	Karbonátdús alkáli kőzetekkel társult telepek	107	Tizezer tonnától több százmillió tonnáig, 0,1-10% RFO	Mountain Pass (USA), Bayan Obo, Weishan (Kína), Okorusu (Namibia)
Vasoxid - ritkaföldfém-telepek	Réz-arany érctelepek, vasoxiddal, változatos megjele- néssel	4	például Olympic Dam, 2 milliárd tonna 0,33%-os érc	Olympic Dam (Ausztrália), Pea Ridge (USA)
Egyéb telepek	Különböző eredetű kvarc, fluorit, polimetallikus telérek és pegmatitok	63	Általában < 1 millió tonna, de 50 millió tonna is lehet, változó minőség, az RFO tartalom akár 12% is lehet	Steenkampskraal (Dél-Afrika), Hoidas Lake (Kanada)
Másodlagos telepek				
Torlatok	Tengerparti vagy folyóvízi nehézsá- vány-torlatok, és idősebb cementált torlatok (paleotorlatok)	355	10 milliótól több száz millió tonnáig, általában < 0,1% monacittartalom	Eneabba (Ausztrália), Bald Mountain (USA), Richards Bay (Dél-Afri- ka), Perak (Malajzia)
Laterites telepek	Ritkaföldféműs kőzetek laterites mállása során képződött reziduális telepek	42	10 ezer tonnától több 100 millió tonnáig, 0,1-10% RFO-tartalom	Mount Weld (Ausztrá- lia), Araxá (Brazília), Kangankunde (Malawi)
Ionadszorp- ciós telepek	Ritkaföldféműs gránitok mállása során képződött agyagos telepek	> 100	Kis telepek (< 10 ezer tonna) érc, 0,03- 0,35% RFO- tartalommal	Longnan, Xunwu - (Kína)

2. táblázat • A ritkaföldfémek fő ércteleptípusainak összefoglalása Abigail Walters és Paul Lusty (2010), valamint Keith R. Long és munkatársai (2010) nyomán. (RFO – ritkaföldfém-oxid)

mintegy 25%-át volnának képesek fedezni. A legújabb kutatási eredmények a Greenland Minerals and Energy Ltd. honlapján olvashatók (URL1).

Közismert, hogy a földkérget alkotó kőzetek túlnyomó része szilikátkőzet, kivételt a karbonátos üledékes kőzetek, a mészkő és a dolomit képeznek. Kevésbé ismert azonban, hogy vannak túlnyomóan karbonátból álló magmás kőzetek is, az ún. karbonatitok, amelyek karbonátolvadékokból kristályosodtak. Az ilyen kőzetek különösen sok inkompatibilis elemet, köztük ritkaföldfémeket (főleg könnyűlantánidákat) és nióbiumot tartalmazhatnak. Bár gazdaságilag jelentős mértékű dúsulás az elsődleges magmás kristályosodás során is létrejöhet, gyakoribb, hogy a ritkaföldfémek a karbonatithoz kapcsolódó későbbi hidrotermális folyamatok révén koncentrálnak. Ilyenkor a ritkaföldfémásványok a késői erek vagy kizorítások formájában fordulnak elő magában a karbonatitban vagy a karbonatitot körülvevő mellékkőzetben.

Az egyik legfontosabb, karbonatithoz kapcsolódó ritkaföldfém-ércesedés a kaliforniai Mountain Pass-telep. Hosszú ideig ez a telep adta a világtermelés jelentős részét. Bár az ezredforduló körül felhagytak a bányászattal, a megváltozott körülmények miatt a termelést hamarosan újraindítják. Ugyancsak jelentős karbonatitlepeket találunk Kínában, Nyugat-Szecsuanban egy 270 km hosszú és 14 km széles zóna mentén. Közülük a legnagyobb ércesedés a Maoniuping-telep, amely Kína második legnagyobb ritkaföldfémkészletét tartalmazza. Az említett két példa mellett számos karbonatit, vagy karbonatit-eredetű ritkaföldfém-ércesedés ismert, és részletes kutatásuk folyamatban van.

Szintén karbonatit eredetű a Bayan Obo vasoxid-ritkaföldfém-nióbiium-telep Kíná-

ban. Bár a ritkaföldfémek a vasércben található, dúsulásuk karbonatitmagmából származó fluidumok által okozott metasomatózishoz (átítatás) kötődik. Az érctelepet elsősorban vasércre bányásszák, a ritkaföldfémeket a vasoxidtartalmú ércből nyerik ki. A Bayan Obo-érctelep a Föld legnagyobb ismert ritkaföldfém-telepe, amely még hosszú ideig meghatározó szerepet tölt be a ritkaföldfém-termelésben.

Ismertek azonban vasérccekhez kapcsolódó olyan ritkaföldfém-dúsulások, amelyeknél nem mutatható ki alkáli magmás vagy karbonatitos kapcsolat. Ilyenek az ún. vasoxid-réz-arany-ritkaföldfém-telepek, amelyek legjellemzőbb képviselője az Olympic Dam-telep Ausztráliában. Bár az érc szokatlanul sok ritkaföldfémeket és uránt tartalmaz, ezek még nem nyerhetők ki gazdaságosan. A vasoxid-ritkaföldfém-telepek képződése, a ritkaföldfémek eredete, dúsulásának oka még nem tisztázott. Számos hasonló vasoxid-réz-arany-ércesedés ismert ritkaföldfém-dúsulás nélkül, és számos jól ismert vasérc is tartalmaz ritkaföldfémeket (például a Kiruna-érctelep), bár ezeket nem nyerik ki az ércből.

### *Másodlagos telepek*

A másodlagos ritkaföldfém-dúsulások és -telepek mállási és üledékes folyamatok során képződnek. Számos kőzet tartalmaz jelentősebb mennyiségben ritkaföldfém-tartalmú ásványokat, például monacitot, xenotimot vagy cirkont. Ezek az ásványok nagy fajsúlyuknak, kémiai és fizikai ellenállóképességüknek köszönhetően a kőzetek mállása, aprózódása során épen maradnak, és a szállítás során osztályozódva koncentrált torlatok formájában lerakódhatnak. Az ilyen torlatokban a ritkaföldfémásványok mellett titánt (ilmenit) vagy ónt (kassziterit) tartalmazó

nehézsaványok is vannak. Torlattelepek különböző környezetben, például tengerpartokon vagy folyódeltákban alakulhatnak ki. Torlattelepeket jelenleg csak Ausztráliában, Indiában, Malajziában, Sri Lankán, Thaiföldön és Braziliában művelnek, bár termelésük alárendelt, a ritkaföldfémeket melléktermékként nyerik ki, azonban igen jelentős telepek ismertek más országokban, például az Egyesült Államokban is.

Trópusi környezetben a kőzetek mállása során egyedülálló talajtípus, ún. *laterit* képződik, amely akár több tíz méter vastag is lehet. A trópusi mállás során a kőzetalkotó ásványok jelentős része szétesik, ennek során bizonyos elemek (például Ca és Mg) kioldódnak, míg más, kevésbé mobilis elemek (pl. Fe és Al) a reziduumban maradnak. Ha az anyakőzet eleve dús ritkaföldfémekben, pl. karbonátban, akkor a mállás során ezek gazdaságilag jelentős mértékben dúsulhatnak. Ilyen telepeket jelenleg csak Kínában művelnek, de a nyugat-auztráliai Mount Weld-telep, vagy a brazíliai Araxá-telep jelentős tartalékokat képvisel. Mindkét telep esetében a ritkaföldfémek a karbonátokon kialakult vastag laterites zónában dúsulnak. A ritkaföldfémek másodlagos foszfátokban vannak. A ritkaföldfém-oxid-tartalom egyes helyeken a 40%-ot is elérheti. Az ilyen mértékű dúsulás erőteljes kilúgozás és újra kicsapódás eredménye.

A ritkaföldfémtelepek különleges típusát képviselik az ionadszorpciós telepek (Wu et al., 1996). Ez a viszonylag újonnan felismert teleptípus a magmás kőzetek, elsősorban gránitok mállása során képződik. A ritkaföldfémek a gránit elsődleges ásványainak mállása és lebomlása során felszabadulnak, majd a talaj agyagásványain, főleg kaoliniten és halloysiton adszorbeálódnak. Ezeket a ritkaföldfémek reziduális dúsulása révén képződő

ritkaföldfém-dús agyagokat ionadszorpciós agyagoknak nevezik. Ilyen telepeket jelenleg kizárólag Kína területéről ismerünk. Az ionadszorpciós telepek főleg a nehézlantanidákat és az itriumot dúsítják, és egyes becslések szerint a Föld nehézlantanida-készletének 80%-át tartalmazzák.

#### *A jelenleg ismert készletek*

A globális ritkaföldfém-tartalékok becslése nehéz, mert a szükséges adatok nagy része nem áll rendelkezésre, vagy kétséges a megbízhatósága. A USGS (Amerikai Geológiai Szolgálat) felmérése szerint a Föld teljes ritkaföldfémkészlete (oxidban megadva) 99 millió tonnára tehető (Hedrick, 2010). A becslésben a jelenleg művelt telepek készletei mellett a kutatás vagy feltárás alatt álló érce-sedések reménybeli készlete is beletartozik, így ez az érték az új területek megkutatásával még növekedhet. A legnagyobb készlettel Kína rendelkezik, a teljes becslött készlet 37%-a van Kínában. Ezt a volt Szovjetunió utód-államai (főleg Oroszország) követik (19%), majd az Amerikai Egyesült Államok (13%), Ausztrália (6%) és India (3%) következik. A fennmaradó 22% Kanada, Malajzia, Brazília, Grönland, Dél-Afrika, Namíbia, Mauritánia, Burundi, Malawi és Vietnam között oszlik meg. A legfontosabb ritkaföldfémtelepek regionális eloszlását mutató 2. ábrán látható, hogy az ismert készletek túlnyomóan Észak-Amerika, Délkelet-Ázsia, Afrika és Ausztrália területén találhatóak, szórványos előfordulások vannak még Dél-Amerikában, a Kola-félszigeten és Grönlandon. Ennek részben geológiai oka van, de közrejátszik az is, hogy az egyes területek megkutatottságának mértéke korántsem azonos.

Jóval egyoldalúbb képet mutat a ritkaföldfémek bányászata, hiszen jelenleg a világ-

termelés 97%-át Kína adja. Ez azonban nem volt mindig így, néhány évtizede még Amerika és Ausztrália termelte a legtöbb ritkaföldfémeket. Kínában a ritkaföldfémek termelése az 1980-as években kezdődött, és 1988-ra Kína átvette az Egyesült Államoktól a vezető szerepet (Gupta – Krishnamurthy, 2005). A kínai árakkal a többi ország nem tudott versenyezni, ezért csaknem mindenütt felhagytak a ritkaföldfémek bányászatával. Kivételt a kaliforniai Mountain Pass jelentett, ahol a termelés egészen 2002-ig folyt, és végül is környezeti okok miatt zárták be a bányát (bár a már kibányászott készlet feldolgozása még ma is folyik). A ritkaföldfémárak 2009-ig viszonylag alacsonyak voltak, emiatt Kínán kívül nem volt kutatás vagy fejlesztés ezen a területen. Ez a helyzet eredményezte, hogy jelenleg Kínán kívül gyakorlatilag nincs ritkaföldfém-termelés.

A rendkívüli kínai dominancia érthetően aggodalmat váltott ki az ellátás biztonságával kapcsolatban (mint később látni fogjuk, a ritkaföldfémek alapvető szerepet játszanak a csúcstechnológiában, ezért a ritkaföldfém-ellátás kérdése stratégiai kérdés is). A folyamatosan növekvő igény és a kínai túlsúly miatti aggodalom jelentős mértékű ércutatáshoz vezetett. Száznál több ércesedést vizsgálnak Kanadában, Ausztráliában és az Egyesült Államokban, közülük többnek a kutatása már a végső szakaszban van (O’Driscoll, 2009). Újra megindult a termelés a kaliforniai Mountain Pass-bányában, ahol az üzemeltető Molycorp Rt. nemcsak ritkaföldfém-oxidokat, hanem feldolgozott ritkaföldfémtermékeket, ötvözeteket és mágneseket is gyárt. A tervek szerint még az idén, 2012-ben megindul a termelés az ausztráliai Mount Weld- és Dubbo Zirconia-telepeken, a grönlandi bá-



## 2. ábra • A Föld legfontosabb ritkaföldfémtelepeinek regionális eloszlása

1. Mountain Pass, USA (karbonatit), 2. Bald Mountains, USA (paleo torlat), 3. Pea Ridge, USA (vasoxid), 4. Hoidas Lake, Kanada (hidrotermális), 5. Thor Lake, Kanada (alkáli), 6. Kvanefjeld, Ilímausaq, Grönland (alkáli), 7. Araxá, Brazília (laterites), 8. Khibina és Lovozero, Kola-félsziget, Oroszország (alkáli), 9. Okorusu, Namíbia (karbonatit), 10. Kangankunde, Malawi (laterites), 11. Steenkampskraal, Dél-Afrika (hidrotermális), 12. Richards Bay, Dél-Afrika (tengeri torlat), 13. Perak, Malajzia (torlat), 14. Maoninping, Kína (karbonatit), 15. Bayan Obo, Kína (karbonatit/vasoxid), 16. Weishan, Kína (alkáli), 17. Xunwu és Longnan, Kína (ionadszorpció), 18. Eneabba, Ausztrália (tengeri torlat), 19. Mount Weld, Ausztrália (laterites), 20. Olympic Dam, Ausztrália (vasoxid), 21. Dubbo Zirconia, Ausztrália (alkáli)

nyászat megindulását 2013-ra tervezik, a megkutatott kanadai területeken (Thor Lake, Hoidas Lake) pedig már a megvalósíthatósági tanulmányok készülnek (Walters - Lusty, 2010). Több helyen hátráltathatja a termelés megindítását a ritkaföldfémek mellett gyakran előforduló radioaktív elemekkel (U, Th) szembeni növekvő ellenézés.

Magyarország területén számottevő ritkaföldfém-dúsulás nem ismeretes. A legigéretesebb képződmény a bauxit, illetve a timföldgyártás melléktermékeként keletkező vörösiszap. Az előzetes vizsgálatok szerint (Dobosi et al., 2011) a vörösiszapban a ritkaföldfémek a kontinentális kéreghez viszonyítva kb. hatszoros dúsulást mutatnak. Önmagában ez nem nevezhető jelentős mértékű dúsulásnak, azonban a Bayer-eljárás során a bauxitban található ritkaföldfémásványok jelentős részben feltáródnak, ritkaföldfém-tartalmuk pedig főleg rétegszilikátokon adszorbeálódik, ahonnan gyenge ásványi savakkal kioldható. Az előzetes kísérletek szerint (Dobosi et al. 2011) a ritkaföldfémek 60%-a mobilizálható a vörösiszaptól.

#### *A ritkaföldfémek felhasználása*

A periódusos rendszer egyetlen elemének vagy elemcsoportjának sincs olyan sokrétű felhasználása, mint a ritkaföldfémeknek. Tűlzás nélkül állítható, hogy kulcsszerepet töltenek be számos iparágban, és jelenlegi ismereteink szerint más anyagokkal nem helyettesíthetők. A ritkaföldfémek legfontosabb felhasználási területeit a következőkben tekintjük át.

**Katalizátorok** • A gépkocsigyártásban a kipufogók katalizátorában (szénhidrogén és szén-monoxid oxidációja) használnak jelentős mennyiségben Ce-karbonátot és Ce(IV)-oxidot hordozóanyagként és oxidálószerként. A kőolaj finomítása során a folyékony szén-

hidrogének katalitikus krakkolásához használják a lantánt és a cériumot, elsősorban a nagy fajlagos felületű zeolitok szerkezeti és kémiai stabilizálására.

**Fémötvözetek** • Elsősorban a magas hőmérsékletnek és oxidációnak ellenálló ötvözetek gyártásában használnak ritkaföldfémeket ötvözőként. Ilyen ötvözetekből készülnek a gyújtóberendezések, égőfejek (Ce, La, Nd) vagy a gázturbinák. Ritkaföldfém- és vas-, kobalt-, illetve nikkeltartalmú ötvözetek szobahőmérsékleten is képesek jelentős mennyiségű hidrogént adszorbeálni. Ilyen ötvözet például az 1970-ben felfedezett  $\text{LaNi}_5$ , amely könnyen képez hidrideket, ezért „hidrogén-szivacsként” működik. Egy térfogatnyi ilyen kristályrácsban – teljes feltöltés esetén – több hidrogén van, mint ugyanolyan térfogatú cseppfolyós hidrogénben.

**Akkumulátorok** • Jelentős mennyiségű lantánt használnak fel a NiMH- (nikkel-fémhidrid-) akkumulátorokhoz, amelyekben az anód egy lantántartalmú ötvözet. A NiMH-akkumulátorok – amellet, hogy nem mérgezőek – élettartama és kapacitása is nagyobb, mint az ólom- vagy a NiCd-akkumulátoroké. Az ilyen akkumulátorok az ún. hibrid járművek fontos részei. Egy Toyota Primus akkumulátorához 10–15 kg lantán szükséges.

**Foszforeszkáló anyagok** • Mind a katód sugárcsőves, mind a plazma- vagy LCD-kijelzőkön, TV-képernyőkön, monitorokon a különböző színű világító képpontokhoz ritkaföldfém-vegyületeket használnak. A vörös képponthoz Eu szükséges, és helyettesítő lehetőség nincs. Az 1960-as évek közepén, a színes televíziók gyártásával nőtt meg az igény az európiumra, és az Egyesült Államokban a Mountain Pass-bánya fő terméke ekkor az Eu volt – a bányát tulajdonképpen az Eu termelése miatt nyitották. A zöld, illetve a

kék képpontokhoz terbiumot és cériumot használnak. Fluoreszcens tulajdonságaiknak köszönhetően a ritkaföldfémeknek nagy szerepük van az energiatakarékos lámpák, a minifénycsövek gyártásában. A fehér színű LED szintén ritkaföldfémeket tartalmaz. A világítástechnikában a ritkaföldfémeknek történelmi jelentőségük is van – a gázlámpák erős fényű Auer-harisnyája a Th-oxid mellett kb. 1% Ce-oxidot tartalmazott.

*Lézerek és fényerősítők* • A ritkaföldfémek fontos alkalmazási területét képezik a lézerek és az optikai kábelek. A lézerekben főleg a neodímiumot és a terbiumot használják aktív médiumként (például a Nd:YAG-lézer vagy a fogászatban és a kozmetikában használt erbiumlézerek). A száloptikás telekommunikációs kábelek igen nagy sáv szélességet biztosítanak, és az üveghez adalékul hozzáadott erbium lézerfény-erősítőként működik, így lehetővé teszi a fényjel eljuttatását nagy távolságokra, külön közbeiktatott erősítők nélkül.

*Üveggyártás és kerámiáipar* • Az üveggyártásban a ritkaföldfémeket adalékanyagként használják, így módosítják az optikai tulajdonságokat (szín, törésmutató, UV-elnyelés stb.). A Ce-oxidot az üvegiparban polírozószerként használják. Szinte minden üvegterméket, például tükröket, szemüveglencsét, precíziós lencsét Ce-oxiddal políroznak. A kerámiákban a ritkaföldfémeket főként az égésti hőmérséklet csökkentésére vagy színezésre használják, de ritkaföldfém-oxidokat használnak a kerámiakondenzátorokban is.

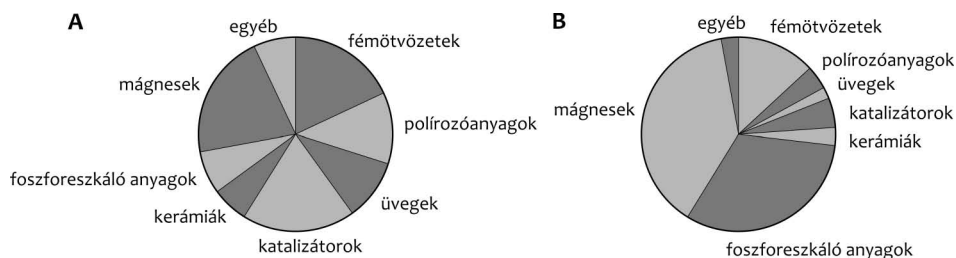
*Permanens mágnesek* • A ritkaföldfémek egyik legfontosabb alkalmazása különleges mágneses tulajdonságaiknak köszönhető. A legerősebb permanens mágneseket ritkaföldfém-ötvözetekből készítik. Az első ilyen mágnes a Sm-Co-mágnes volt a 60-as években, és ezt váltotta fel a 80-as évektől a jóval

erősebb Nd-Fe-B-mágnes. A Sm-Co-mágnes magas hőmérsékleten is alkalmazható, de a Dy vagy Tb szintén növeli a Curie-pont hőmérsékletét. A Nd-mágneseknek – az intenzív kutatások ellenére – nincs alternatívája, nem helyettesíthetők más anyaggal.

Az erős permanens mágneseknek számos felhasználási területük van. Jelentős szerepük van a miniatürizálásban: merevlemezek, fejhallgatók, DVD-lejátszók, mp3-lejátszók és hifi hangfalak gyártásában használják. Szintén komoly szerepük van az orvosi diagnosztikában, például az MRI-tomográfiában.

Neodímium-mágneseket használnak a villanymotorokban és generátorokban is. Legnagyobb mennyiségben a szélturbinák és a hibridautók gyártásában használják a neodímiumot. A szélturbinák generátoráiban több száz kilogramm Nd-mágneset használnak fel – úgy tartják, hogy 0,6–1,0 tonna Nd-mágnes szükséges megawattként, és ennek kb. 30%-a Nd. A szélturbinák új generációját képviseli a Kínában kifejlesztett mágneses szélturbina, amely a mágneses lebegtetés elvén működik, ezért nincs súrlódás, hatásfoka jobb, élettartama hosszabb, mint a hagyományos szélturbináké, és kis szélességek esetén is képes az áramtermelésre.

Vannak anyagok, amelyek mágneses térbe helyezve felmelegsznek, illetve a mágneses tér megszűnésekor lehűlnek. Megfelelő körülmények esetén ez az effektus hűtésre használható. Valójában ezt az ún. magnetokalorikus effektust használták fel az abszolút nulla fokhoz közeli hőmérsékletek elérésére. Az utóbbi évtizedekben derült ki, hogy bizonyos Gd-ötvözetek szobahőmérséklet közepében is jelentős magnetokalorikus effektust mutatnak. Ez az alkalmazás jelenleg még fejlesztési stádiumban van, de elképzelhető, hogy a következő évtizedekben már mágne-



3. ábra • A ritkaföldfémek felhasználásának megoszlása mennyiség szerint (A) és érték szerint (B). Forrás: Dudley J. Kingsnorth (2009)

ses hűtőszekrényeket és légkondicionálókat használunk, amelyekhez a Gd-ötvözetek mellett Nd-mágnesekre is szükség van.

A felsoroltakon kívül a ritkaföldfémeknek még számos egyéb alkalmazása és alkalmazási lehetősége van, de növekvő fontosságukat ez a rövid áttekintés is jól érzékelteti. A ritkaföldfémek felhasználásának százalékos megoszlását – mind mennyiség, mind érték szerint – a 3. ábra mutatja.

### Összefoglalás

A ritkaföldfémeknek alapvető szerepük van számos meghatározó iparágban. Az irántuk való igény az előrejelzések szerint növekedni fog, ami az árakban is érezteti a hatását. A világ jelenleg ismert ritkaföldfémkészletei még hosszú ideig képesek biztosítani az ellátást, az új területek megkutatása, illetve a ritka-

földfémek újrahasonosítása pedig további tartalékokat jelent. A különböző területeken folyó intenzív geológiai kutatások és bányányítások ellenére a kínai túlsúly valószínűleg még hosszú ideig megmarad. A ritkaföldfémek felértékelődése miatt mindenképpen szükség van a magyarországi lehetőségek felmérésére, a potenciális ritkaföldfém-tartalmú képződmények, különösen a bauxit feldolgozása során keletkező vörösiszap vizsgálatára.

Jelen tanulmány a Magyar Bányászati és Földtani Hivatal (MBFH) megbízásából készített, *A hazai ritkaföldfém-potenciál felderítő meghatározása* című kutatási jelentés alapján készült.

Kulcsszavak: ritkaföldfém, geokémia, természetes előfordulás, értelemek, készletek, bányászat, felhasználás

### IRODALOM

- Castor, Stephen B. – Hedrick, James B. (2006): Rare Earth Elements. In: Kogel Jessica E. – Trivedi N. C. – Barker J. M. – Krukowsky S. T. (eds.): *Industrial Minerals and Rocks: Commodities, Markets, and Uses*. 7<sup>th</sup> ed. SME, 769–792.
- Dobosi Gábor – Polgári M. – Jordán Gy. – Fügedi U. – Bartha A. – Horváth P. – Sipos P. (2011): *Előzetes felmérés Magyarország ritkaföldfém-potenciál kutatásához*. Kutatási jelentés, kézirat. MBFH Adattár, Ad. 2439.

- Gupta, C. K. – Krishnamurthy, Nagaiyar (2005): *Extractive Metallurgy of Rare Earths*. CRC Press
- Hedrick, James B. (2010): *Rare Earths. USGS Minerals Commodity Summary* • www.usgs.gov
- Kingsnorth, Dudley J. (2009): *Meeting Demand in 2014: The Critical Issues*. 5<sup>th</sup> International Rare Earths Conference, Hong Kong, November 2009 • <http://www.reitaglobal.org/storage/The%20Road%20to%20Commercial%20Rare%20Earths%20Production%20IMCOA.pdf>

- Long, Keith R. - Van Gosen, B. S. – Foley, N. K. – Cordier, D. (2010): *The Principal Rare Earth Elements Deposits of the United States—A Summary of Domestic Deposits and a Global Perspective. Scientific Investigations Report 2010–5220*, U. S. Geological Survey, Reston, Virginia • <http://pubs.usgs.gov/sir/2010/5220/downloads/SIR10-5220.pdf>
- O'Driscoll, Mike (2009): Rare Earth Supply Tight in 2014. *Industrial Minerals*. 3 March 2009. • <http://www.indmin.com/Article/2117867/Rare-earth-supply-tight-in-2014.html>
- Taylor, Stuart Ross – McLennan, Scott (1988): The Significance of the Rare Earths in Geochemistry and Cosmochemistry. In: Gschneidner Jr, Karl A. – Eyring, LeRoy: *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*. Vol. II. 485–578. [tp://dx.doi.org/10.1016/S0168-1273\(88\)11011-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-1273(88)11011-8)
- Walters, Abigail – Lusty, Paul (2010): *Rare Earth Elements*. British Geological Survey, Natural Environmental Research Council, Commodity Profiles, Keyworth, Nottingham [www.mineralsuk.com](http://www.mineralsuk.com)
- Wu, C. – Yuan, Z. – Bai, G. (1996): Rare Earth Deposits in China. In: Jones, Adrian P. – Wall, F. – Williams, C. T. (eds.): *Rare Earth Minerals: Chemistry, Origin and Ore Deposits. Mineralogical Society Series 7*. Chapman and Hall, London, 281–310. • [http://www.ggg.gl](http://www.google.hu/books?hl=en&lr=&id=Ncy4DBkzEzIC&oi=fnd&pg=PA281&dq=Wu,+C.+%EF%80%AD+Yuan,+Z.+%EF%80%AD+Bai,+G.+(1996):+Rare+Earth+Deposits+in+China.+In:+Jones+A.&ots=gGCycui6x3&sig=xheyQCOHGAr-tAFLmbI2uBfPvgw&redir_esc=y#v=onepage&q=Wu%2C%20C.%20%EF%80%AD%20Yuan%2C%20Z.%20%EF%80%AD%20Bai%2C%20G.%20(1996)%3A%20Rare%20Earth%20Deposits%20in%20China.%20In%3A%20Jones%20A.&f=false)

