

Globális urántartalékok földtani és mennyiségi értékelése

Breitner Dániel¹, Török Szabina¹ és Márton István²

¹MTA Energiatudományi Kutatóközpont

1525 Budapest, Pf. 49, (+36-1) 392-2222/1176

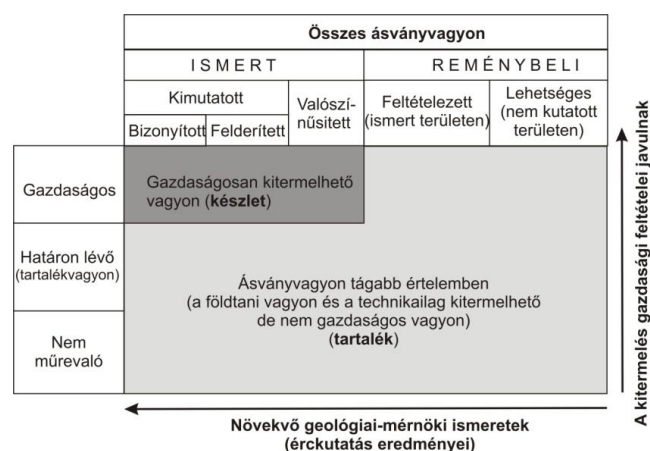
²Stockwork GeoConsulting Kft.

400697 Kolozsvár, Románia, str. Hateg, nr. 10.

A nukleáris energia térnyerése újra és újra felveti annak a kérdését, hogy van-e elegendő urán a növekvő igények kielégítésére. Sok forrásban találunk olyan adatokat, amelyek ugyan támpontot adnak a tervezéshez, de az ércek ásványtani és földtani tulajdonságainak ismerete elengedhetetlen ahhoz, hogy értékelni tudjuk ezeket az információkat, teljes képet kapjunk az uránércnek, mint a nukleáris fűtőelemek legfontosabb forrásának a hozzáférhetőségéről. Mivel egy tervezett, vagy engedélyezett erőmű a beruházási döntéstől számítva csak több évtized alatt megtérülő befektetés, a döntés előkészítésben fontos szempont az urán készletek becslési módszereinek megismerése és némi földtani ismeret ahhoz, hogy a hozzáférhető adatokat saját céljainkra értékelni tudjuk. Munkánkban ezért a legfontosabb uránérc-típusok főbb jellemzőit mutatjuk be, és mennyiségük valamint világtermelésben betöltött szerepük alapján értékeljük őket.

Bevezetés

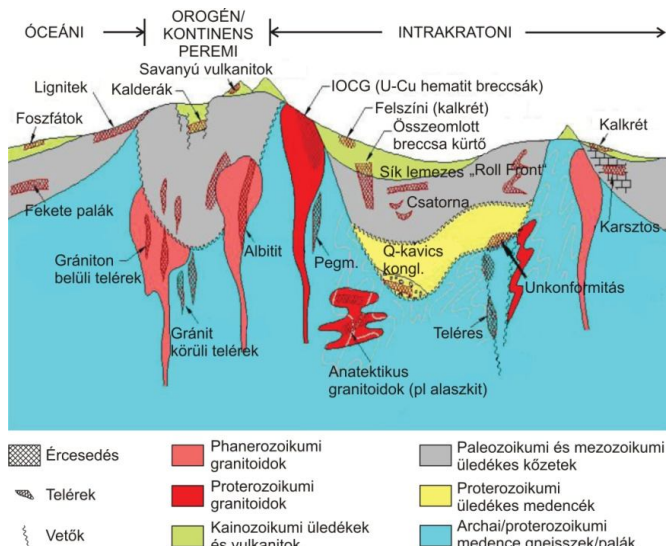
Ma a világon 440 atomreaktor blokk működik, 61 épül (2011.07.01), 154 építését tervezik (8-10 év) és további 343-at javasolnak (többségében 15 éven belül). 2010-ben a blokkok a világ elektromos áram termelésének 14%-át adták [1]. A 2006-os év végi adatok alapján a világ uránszükséglete 59.065 tonna, míg a termelése csupán 43.880 tonna [2]. A kimutatott és valószínűsített urán tartalékok mennyisége 6,3 millió tonna, míg a feltételezett- és lehetséges tartalékok mennyisége megközelítőleg 10,5 millió tonna [2]. Tanulmányunkban a nemzetközi érckutatásban elterjedt USGS ásványvagyron osztályozási rendszert használjuk, amely a készlet fogalmát a méretében és minőségében ismert nyersanyag tartalékként határozza meg (1. ábra).



1. ábra: Nemzetközi érckutatásban elterjedt USGS ásványvagyron osztályozási rendszer.

Jelenleg az igény és a termelés közti deficitet másodlagos forrásokból (például: fűtőanyag újrafeldolgozás, nukleáris fegyverek leszerelése) fedezik. Azonban ezek a források folyamatosan csökkennek, így az igények kielégítésére újabb telepeket kell termelésbe vonni. A nem, vagy csak részben bizonyított tartalékok ásványtani és földtani tulajdonságainak ismerete elengedhetetlen ahhoz, hogy teljes képet kapjunk az uránércnek, mint a nukleáris fűtőelemek legfontosabb forrásának a hozzáférhetőségéről.

Sokféle módon lehet osztályozni az uránérc telepeket. A legtöbb IAEA és a jelentősebb uránbánya vállalatok által készített osztályozás nem tér el nagyon egymástól, 12-18 teleptípust különítenek el. Az egyik legáltalánosabban használt osztályozás 15 kategóriát különböztet meg az általános geológiai környezetük alapján [3]. Az általunk használt osztályozás követi az OECD által meghatározottakat, de elsősorban a telepek létrejöttét meghatározó különféle folyamatokra koncentrálnak. Ilyen típus-telepek a magmás differenciációhoz kötődő, a parciális olvadáshoz kötődő, a metasomatózishoz kötődő, az unkonformitáshoz kötődő, a magmás kőzetekhez kötődő hidrotermális, a homokkőben jelenlevő és az egyéb (kvarc kavics konglomerátum, kalkrét-ban jelenlevő, lápos területeken kialakuló és a nem konvencionális) telepek (2. ábra).



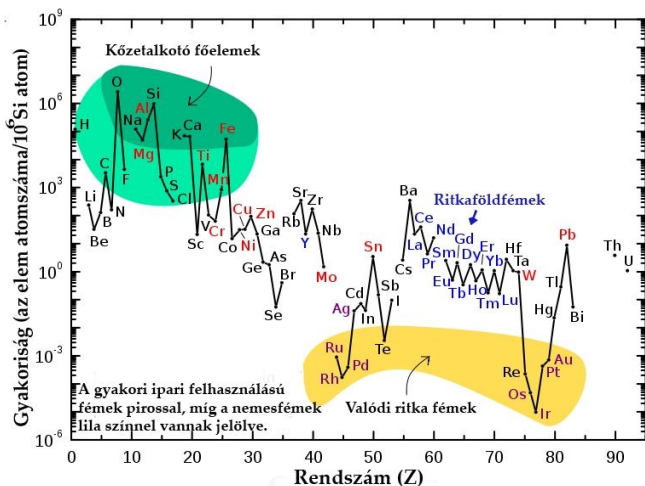
2. ábra: Az eltérő típusú U-telepek földtani elhelyezkedésének sematikus ábrája.

Az urán dúsulását meghatározó geokémiai tényezők

Az urán a földkéreg felépítésében viszonylag kis, átlagosan 1.3 ppm koncentrációban vesz részt, amely hasonló más fontos ipari felhasználású fém koncentrációjával (3. ábra). Az uránnak a természetben három izotópja fordul elő, mindegyik előfordulásnál döntően 238-as izotóp található (99,275%), kis mennyiségben (0,72%) a 235-ös, és nagyon kis mennyiségben a 234-es izotóp is megjelenik (0,005%). Mivel fűtőelemként a mai atomerőműveknek túlnyomó részt a 235-ös izotópra van szüksége, ezért a kibányászott uránt dúsítani kell. A természetes uránnak pusztán a 0,4%-át hasznosítják [4].

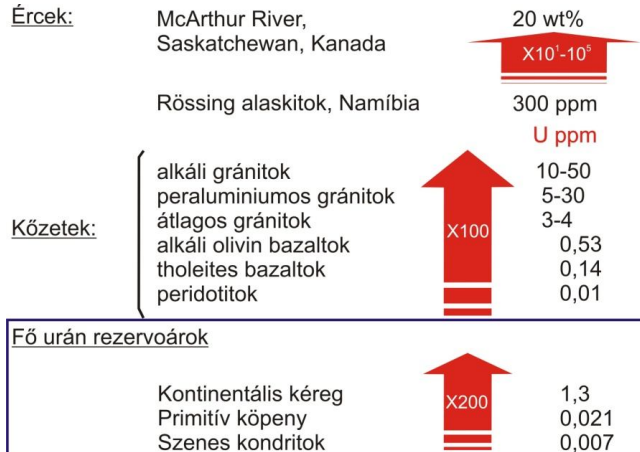
Az urán számos ásvány felépítésében megjelenik, de a leggyakoribb ércásványa az uraninit (UO_{2+x}), amelynek mikrokristályos kolloform megjelenésű halmazait uránszurokércnek is nevezzük.

Kisebb gazdasági jelentőséggel koffinitet ($USiO_4$), branneritet ($(U,Ca,Ce)(Ti,Fe)_2O_6$), karnotitet ($K_2(UO_2)_2(VO_4) \cdot 3H_2O$, egyben jelentős vanádium ércásvány), tyujamunitet ($Ca(UO_2)_2(V_2O_8) \cdot 8H_2O$) és uranofánt ($Ca(UO_2)_2(SiO_3OH)_2 \cdot 5H_2O$) is bányásznak.



3. ábra: Az elemek gyakorisága a földkéregben.

Magmás (olvadék) környezetben az urán dúsulását elsősorban az U^{4+} viszonylag nagy ionsugarából (1 \AA) és alacsony ionpotenciáljából (iontöltés/ion sugar) adódó szilikátos fázisokhoz viszonyított inkompatibilis viselkedése határozza meg. Így az urán a bazaltos magma kristályosodása folyamán az olvadék fázisban dúsul, ezért az erősen frakcionált olvadékokból származó alkáli kőzetekben 10-100-szoros dúsulásuk történhet meg (4. ábra). Így a földkéreg többszöri olvadása során az urán eltávozik a földkéregből és a földkéregben dúsul.



4. ábra: Az urán frakcionációja magmás folyamatok során [4].

Vizes oldatokban az urán szállítását és dúsulását az oxidatív környezetben a +6 oxidációs állapotú urán magas szolubilitása határozza meg, amely az UO_2^{2+} és az erős anionok (mint például a F^- , Cl^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} és PO_4^{3-}) komplexképző hatása miatt történik meg. Magas és alacsony hőmérsékleten egyaránt az oldat oxigén fugacitásának csökkenése a leghatékonyabb uraninit képződési folyamat, amely a természetben leggyakrabban az urángazdag oxidatív oldatok valamint a redukáló hatású oldatok keveredésekor, a szenes összetettekkel való érintkezéskor vagy a Fe^{2+} tartalmú ásványok kölcsönhatásával következik be. Alacsony hőmérsékleten az oldat savassága is meghatározó az U^{6+} oldhatósága szempontjából, így kis pH mellett oldott állapotban jelenik meg, míg a közeg lúgosodásával kicsapódik a magas oxigén fugacitással rendelkező oldatokból is.

Főbb uránérc típusok jellemzése

Magmás differenciációhoz és parciális olvadáshoz kötődő telepek

A gránit plutonokhoz kötődő U ásványosodásnak négy típusa létezik. Három ezek közül egyedi magma kémiával rendelkezik, ilyenek a peralkáli ($Al_2O_3 / (K_2O + Na_2O) < 1$), metaaluminios ($Al_2O_3 / (K_2O + Na_2O) > 1$), valamint peraluminios ($Al_2O_3 / (K_2O + Na_2O + CaO) > 1$) gránitok. Ezek mindegyike egyedi járulékos ásványtársulással jellemezhető [5]. A negyedik típusnak a migmatitos környezetben jelenlevő granitoid kőzetek felelnek meg, amelyeket alaszkitoknak neveznek (ld. alább). Kizárólag ehhez a gránittípushoz és a peralkáli gránitokhoz kapcsolódik olyan uránércesedés, amit a nagy hőmérsékletűtől egészen a késő-magmásig bezáródó események hoznak létre. Azok a telepek, amelyeknél migmatitos gneiszbe nyomul bele a pegmatitos telér, parciális olvadáshoz köthetőek. Ezekben a képződményekben az

uraninit szétszórtan jelenik meg. A gazdaságosan művelhető telepek közül ezek képviselik a legextrémabb hőmérséklet és nyomás körülményeket. A legjelentősebb ezek közül a Rössing telep Namíbiában [6]. Ennek alapján a parciális olvadáshoz köthető telepeket Rössing típusú telepeknek is nevezik. Ilyen telepek számos helyen megtalálhatóak, például: Kola-félsziget, Saskatchewan (Kanada), Québec (Kanada), Wheeler Basin (USA, Kolorádó), Narvik (Norvégia), Dél-Finnország stb.

A magmás differenciáció során az ércesedést peralkáli magmához és granitoid kőzetekhez kapcsolódó, migmatitos környezetben (pl.: alaszkit és karbonátit testek) lejátszódó nagy hőmérsékletű magmás folyamatok hozzák létre. Mivel az uránnak és a tóriumnak nagy az oldhatósága a jelentősen depolimerizált magmában, a peralkáli magma extrém nagy frakcionációs kristályosodása hatalmas méretű, kis fokú U- és Th-telepek kialakulását eredményezheti. Ezekből a magmákból az urán nem, vagy csak nagyon kis koncentrációban képes önállóan, uraninitként kiválni. Ennek következtében, még ha az urán mennyisége ezekben a kőzetekben nagy is, általában nem bányásszák az uránnak az ellenálló ásványokból történő kinyerésének nagy költsége miatt. A legfontosabb magmás differenciáció során létrejött uránérc telepek a Kvanefjeld telep (Grönland, Ilimaussaq), Poços de Caldas (Brazília), Bokan Mountain (Alaszka), Lovozero Massif (Oroszország, Kola-félsziget), Kaffo Valley (Nigeria), Thor Lake (Kanada) és Palabora (Dél-afrikai Köztársaság) [7].

Metaszomatózishoz kötődő telepek

A metaszomatikus telepek közé tartoznak a nagy hőmérsékletű hidrotermális folyamatok révén kialakult telepek. E folyamatok során szakaszos, urántartalmú Nametaszomatizált gránit, metaszediment vagy metavulkanit egységek jönnek létre. Ezen egységek kiterjedése elérheti a több tíz kilométert is. Az alkáli metaszomatózis egy gyakori geológiai folyamat, amely eltérő geológiai környezetben jön létre, és némely közülük uránérc képződéshez vezet. Az alkáli metaszomatózis leggyakrabban albit dúsulással jár együtt. Az idősebb, nagyobb telepek az ukrain Krivoy-Rog körzet, Otish Basin Kanadában, Mistamisk a Labrador-árokban (Québec, Kanada), Skuppesavon és Bjorkramyran Észak-Svédországban, Liangshangan ÉK-Kínában, Lagoa Real terület Brazíliában és a Valhalla telep Queenslandben (Ausztrália). A fiatalabbak kisebb kiterjedésűek, ilyenek a Pán-afrikai - Brazíliai eseményhez kötődő Espinharas és Itatiaia telepek Brazíliában és a Kitongo telep Kamerunban. A nagy hőmérsékletű metamorfózishoz kötődő telepek szkarnos környezetben alakulnak ki. Ezeknél karbonátos testbe nyomul be a magma. Ilyen telep például a Tranomaro Madagaszkáron [7].

Magmás kőzetekhez kötődő hidrotermális uránérc telepek

A hidrotermális uránérc telepek egy extrém változatos kategória, általában ér-típusú morfológiával rendelkeznek, mindazonáltal episzenit testekben hintett ércesedésként is megjelenhetnek. Előfordulhat gránitokban, ahogyan a Saint Sylvestre körzetben (Massif Central, Franciaország), vulkanikus kőzetekben (Streltsovskoye Caldera, Transz-Bajkál, Oroszország), a gránit test közvetlen környezetében, amint az Érchegeységben (DK-Németország és Csehország), vagy gránitához kötődő közvetlen kapcsolat nélkül

(Schwartzwalder, USA). Felzikus magmás kőzetek (mélységi és kiömlési) jelentik a legjelentősebb U-forrást a telepek többségében. Habár ahhoz, hogy megfelelő forrás legyen, a magmás kőzetnek kellőképpen dúsnak kell lennie uránban, és az uránnak olyan formában kell jelen lennie, hogy a hidrotermális oldatokban oldható legyen. A kémiájuk alapján három magmás közettípust különíthetünk el, amelyek dúsulhatnak az uránban.

Az U-dús peraluminios gránitokban az urán leggyakrabban Th-szegény uraninit ásványban van jelen, amely egy könnyen oldható forrása az uránnak [5]. Ezekhez a gránitokhoz kapcsolódik messze a legtöbb telér-típusú vagy episzenit-típusú uránérc telep. Ennek a kifejlődésnek a legnagyobb provinciája a közép-európai Varisztidák karbon gránitjai (Linnen és Cuney, 2005). Az igen savanyú, jelentősen peraluminios vulkanikus kőzet, amely a kiömlési formája a kétcsillámú peraluminios leukogranitnak, igen ritka. Az egyedüli olyan ismert előfordulása, ahol U-ércesedés társul hozzá, a perui Macusani vulkanikus terület [7].

A jelentősen frakcionálódott peralkáli olvadék kristályosodása során nagy mennyiségű komplex Zr, Rf, Th, Nb és Ta ásványok képződnek, amelyek szerkezetébe az urán is beépül. Ezeket általában nem bányásszák, mivel az urán kinyerése az ellenálló ásványokból igen költséges. Peralkáli felzikus vulkanikus kőzet (liparit) a peraluminios vulkanikus kőzetekhez képest gyakori. Ezek a kőzetek tökéletes forrásai az uránnak, mert az U az üveges mátrixban helyezkedik el. Így amikor a mállás során az üveg devitrifikálódik, az urán könnyen mobilizálódik. Az oroszországi Transz-Bajkálban található Streltsovskoye Caldera, amely részben peralkáli liparitos tufával van kitöltve, tartalmazza a világ legnagyobb vulkanikus kőzetekhez kapcsolódó U-ércesedését [8].

A metaaluminios mészkáli gránit család egyes tagjai K-ban gazdagodottak, és ez általában U, Th és egyéb inkompatibilis elemek dúsulásával jár együtt. Ezek az U-gazdag, nagy K-tartalmú mészkáli gránitok akkor válnak jelentős U-forrássá, és esetleg kapcsolódik hozzájuk U-ércesedés, ha az akcesszórius ásványok metamiktizálódtak, és ha tartalmaznak uraninitet is [7].

Unkonformitáshoz kapcsolódó telepek

Kanadában és Ausztráliában paleo-proterozoós medencék tartalmazzák a világ legjelentősebb unkonformitáshoz kapcsolódó U-ércesedését. Ezek a telepek biztosítják a világ U piacának 33%-át [7]. Ezeknek a telepeknek a képződése a paleo-proterozoós homokkő és az alatta található metamorf alaphegység között létrejött unkonformitás közelében kialakult redukciós frontokhoz kötődik. A legújabb ércképződési modelleknek két alapvető típusa van. Az egyikben az aljzatban jelenlevő monacit ásvány az urán forrása, és a medence szolgáltatja a fluidumot. A másik modell szerint mind a forrás mind a fluidum az alaphegység felett kialakult medencéből származik. A medence modellben az urán, amelyet az oxidált felszín alatti besűrűsödött oldatok szállítanak, kicsapódik, amikor 1) érintkezésbe lép a redukált aljzattal, 2) találkozik redukáló egységgel, mint például vulkanikus kőzettel, vagy 3) keveredik az aljzattól származó redukált oldatokkal. Ebben az esetben az urán a detritális ásványok (turmalin, monacit, cirkon és uraninit) mállásából származik [7]. Az összes, jelenleg művelés alatt álló unkonformitáshoz kötődő telep a kanadai Athabasca-

medencében vagy Ausztráliában a Kombolgje-medencében, amely a McArthur medence részmedencéje, található. Egyéb proterozoós unkonformitáshoz kapcsolódó telepek, amelyeket még nem bányásznak a Kiggavik telep a kanadai Thelon medencében, a Karku telep az ÉNy-oroszországi Pasha-Ladoga medencében és a nyugat-ausztráliai Yeneena medencében kialakult Kintyre telep. A kanadai Beaverlodge területen és az ausztráliai Alligator River Uranium Field Rum Jungle területén befejezték, vagy szüneteltetik a termelést [7].

Homokkőben jelenlevő uránérc telepek

A homokkőekben jelenlevő uránérc telepek elsősorban folyóvízi, tavi és delta környezetben képződött homokkő formációban megjelenő U ásványok epigenetikus (a képződés kialakulását követő folyamatok során létrejövő) koncentrációja [9]. Az urán redukált környezetben kiválik a homokkőbe infiltrálódott oldatból. Ilyen körülményeket teremtenek a homokkőekben megjelenő szén anyagok, szulfidok, szénhidrogének és közberétegzett bázisos vulkanitok nagy mennyiségű Fe-, Mg-tartalmú ásványtartalommal (pl.: klorit). A homokkő telepeknek négy fő típusa van: alap-típus, lemezes-típus, „roll-front”-típus és szerkezeti-típus. Ezek közül a legfontosabbak a lemezes és a „roll-front” telepek. A homokkő telepek a világ uránkészletének 30%-át képezik. Ilyen telepek számos országban megtalálhatóak, a legjelentősebbek az USA-ban, Kazahsztánban, Nigerben, Üzbegisztánban, Gabonban és Dél-Afrikában vannak, de a mecseki urán is ilyen kifejlődésű.

Egyéb telepek

Kvarc kavics konglomerátum urántelep

A kvarc kavics konglomerátum típusú urántelepek sztratifórm, réteghez kötött telepek, amelyeket pirít gazdag kvarc kavics konglomerátumban megjelenő uránit és brannerit alkot. Ezek a telepek archaikumi és proterozoikumi medencék bazális szekvenciáiban jelennek meg. A legjelentősebb telepei az Elliot Lake Kanadában és a Witwatersrand Au-U telep Dél-Afrikában. További telepek a Black Hills és Délkelet-Wyoming az USA-ban, Koli Kelet-Finnországban, Moeda és Jacobina formációk Brazíliában, valamint Ghánában és Nyugat-Ausztráliában [10]. Ezek a telepek a világ uránkészletének megközelítőleg 2%-át biztosítják.

Kalkrétben jelenlevő urántelepek

A kalkrétben kialakuló uránérc telepek a legjelentősebbek a felszíni telepek közül, amelyben az uránércesedés a felszíni homokban és agyagban jelenik meg, kalcium- és magnézium-karbonáttal cementálva esetleg gipszes és szilikátos cementált rétegekhez is kapcsolódhat. A felszíni telepek <1%-át képezik a világ uránkészletének. Általában ott képződik, ahol jelentősen mállott, U-gazdag gránit vagy felzikus vulkanikus kőzet szemi-arid-arid klímán található. A legjelentősebb telepei Nyugat-Ausztráliában találhatóak, ezek a Yeelirrie, Lake Way, Centipede, Thatcher Soak és Lake Maitland telepek [7]. További fontos telepei a Langer Heinrich, Trekkopje, Tubas és Aussinanis telepek Namíbiában és a Kamasoas és Henkries telepek Dél-Afrikában. A kalkrétben jelenlevő uránérc telepek általában viszonylag nagy tömegűek, de nagyon kis urántartalmúak.

Lápos területeken kialakuló telepek

A lápos telepekben az urán az egyetlen fém, amely érdemleges mennyiségben dúsulhat. A telep általában redukáló környezetben van, amelyben a szerves anyag tartalom a néhány százaléktól 100%-ig változhat. Jelenleg nem azonosítottak U-ásványokat ezekben a telepekben, az U a szerves anyaghoz kapcsolódik. Az urántelepek laterális szelvényben geokémiaailag és ásványtanilag igen változatosak és összetettek. A felszíni lápos urántelepek mérete a <100 kg urán gazdag talajtól egészen az 500 tonna kifejtett ásványosodással rendelkező völgykitöltő üledékekig terjedhet. Az egyetlen művelésbe vont lápos U-telep az USA-ban található, a Washington állambeli Flodelle Creek telep [11].

Nem konvencionális telepek

Nem konvencionális telepek az olyan telepek, amelyekből az urán alárendelt melléktermékként nyerhető ki. Ilyen, amikor az urán foszfát kőzetekhez, karbonatitához, fekete palákhoz vagy lignithez kapcsolódik. A legtöbb nem konvencionális U-készlet a foszfát kőzetekhez kapcsolódik, habár a fekete palák is jelentősek.

Az urán átlagos gyakorisága a foszfát kőzetekben megközelítőleg 50-200 ppm, de a szerves foszforit telepekben elérheti a 600 ppm-et is [12]. Jelenleg nem bányásznak foszfátokat az urán kitermelés céljából, de nem hivatalosan több ország is kinyeri az uránt a műtrágya gyártás céljára termelt foszfátokból. A marokkói foszfát feldolgozása során 690 tonna uránt (tU) nyertek ki 1975 és 1999 között, és megközelítőleg 17.150 tU-t nyertek ki az USA-ban a floridai foszfát kőzet feldolgozása során 1954 és 1962 között. Kazahsztánban 40.000 tU-t vontak ki tengeri szerves telepekből [13]. A bonyodalmakat az urán és egyéb elemek kinyerése okozza, de a metallurgiai újításokkal a közeljövőben felértékelődhet a szerepük.

A fekete palákban található urán készletek szintén jelentősek, de az urán gazdaságos kinyerése nem egyszerű. Az urán a palákban a szerves anyaghoz kapcsolódik, mennyisége eltérő, de elérheti a 400 ppm-et, ahogyan a svédországi Ranstad telepnél mérték [7]. Nagy urán készletek (4,2 millió tU) kapcsolódnak a Chattanooga (USA) és Ronneburg (Németország) fekete palákhoz [14].

A tengervíz lehetséges uránforrás, átlagos urántartalma 3-4 ppb, amely globálisan 4 milliárd tonnát jelent. Egy kg urán kinyeréséhez azonban megközelítőleg 350.000 tonna tengervíz feldolgozására van szükség. Németországban, Olaszországban, Japánban, Angliában és az USA-ban végeztek kutatásokat az 1970-es és 1980-as években, de jelenleg csak Japánban folytatnak ilyen kutatásokat. 2006-os számítások alapján a kinyerési ráta 1200 tU/év volt, melynek költsége 250 USD/kgU [15].

A világ uránérc telepeinek összefoglalását az 1. táblázat mutatja. A táblázat bemutatja az érctelepek képződési környezetét, általános ércesedési fokát, korát, a létrehozó fluidumok összetételét és típus területeit.

1. táblázat: Az urántelepek általános jellemzője a gazdasági fontosságuk sorrendjében [7]

Telep típus	Földtani környezet	Érc. foka* (%U)	Képződési hőm. (°C)	Fluidum típus	Kor	Példa
Unkonformitáshoz kapcsolódó	Intrakratoni/medenceperemi	1,0 – 25,0	200 – 300	Medence és alaphegység besűrűsödött oldatok	1500 – 1900 M év	Rabbit Lake, Mc Arthur River (Athabasca medence), Narbarlek, Ranger (Ausztrália), Karku (Oroszország)
Homokkőben jelenlevő	Táguló rift medence	0,05 – 0,5	25 – 100	Felszín alatti vizek	Paleozoikum-tercier	Mokum, Inkay (Kazahsztán), Beverley (Ausztrália), Akouta (Nigéria)
Telérés	Poszt-orogén táguló medence	0,1 – 2,0	200 – 500	Metamorf és hidrotermális	Proterozoikum-mezozoikum	Pribram, Jachymov (Csehország), Shinkolobwe (Kongói DK), Massif Central (Franciaország),
Metaszomatikus	Rift/ív mögötti medence	0,05 – 0,2	300 – 700	Metamorf és magmás	Proterozoikum	Pervomayskoye (Ukrajna), Lagoa Real (Brazília), Valhalla (Ausztrália)
IOCG/hematit breccsa	Szigetív/medenceperemi	0,02 – 0,05	200 – 500	Magmás és késő hidrotermális	Proterozoikum	Olympic Dam (Ausztrália)
Magmás intrúzió	Alkáli komplexek	0,01 – 0,5	300 – 700	Magmás és hidrotermális	Nem korfüggő	Rössing (Namíbia), Ilimaussaq (Grönland), Palabora (Dél-Afrika)
Vulkanikus	Rift/ív mögötti medence	0,03 – 0,3	200 – 500	Medencén belüli besűrűsödött és magmás oldatok	Nem korfüggő	Streltsovsk caldera (Oroszország), Dornot (Mongólia), Nopal (Mexikó), McDermit (USA), Xiangshan (Kína)
Kvarc kavics konglomerátum	Intrakratoni/medenceperemi		50 – 300	Felszín alatti vizek és hidrotermális	2200 – 2700 M év	Witwatersrand (Dél-Afrika), Blind River/Elliott Lake (Kanada)
Felszíni (Kalkrét)	Vízgyűjtő medence	0,03 – 0,1	25 – 50	Felszín alatti vizek	Tercier	Yeerlirrie (Ausztrália), Langer Heinrich (Namíbia)
Foszforit	Kontinens perem/tengeri	0,005 – 0,05	20 – 50	Sós és félsós oldatok	Fanerozoikum	Uncle Sam (USA), Gantour (Marokkó), Al-Abiad (Jordánia),
Fekete pala	Sekély epikontinentális medence	0,005 – 0,04	2 – 20	Sós oldatok		Alum shale (Svédország, Észtország), Chatanooga shale (USA), Chanziping (Kína), Gera-Ronneburg (Németország)

*: ércesedés foka = az érc urántartalma %-ban

Az urántartalékok mennyiségi értékelése

Az ismert U-tartalék a <130 USD/kgU kitermelési költségű kategóriában közel 5404000 tU, ez 1,2%-os csökkenés a 2007-es adathoz képest. Az újonnan bevezetett nagy költségű, <260 USD/kgU kategóriában azonban a készletek 15,5%-kal, 6306300 tU-ra nőttek a 2007-ben jelentett <130 USD/kgU kategóriájú tartalékokhoz képest [2] (2. és 3. táblázat), tehát összességében a gazdaságosan kitermelhető készletek nőttek.

2. táblázat és 3. táblázat: Az eltérő árkategóriájú, ismert U-tartalékok 2007-ben és 2009-ben [14] [2]

	2007		
	<USD 40/kgU	<USD 80/kgU	<USD 130/kgU
Unkonformitás	572400	637500	649700
Homokkő	722600	1005400	1523900
IOCG	886200	892200	900900
Q-kavics	201800	258400	301900
Metaszomatit	136000	580500	673700
Hidrotermális	0	198100	324500
Magmás	109000	210200	287900
Vulkanikus	51400	200300	211300
Egyéb	240100	354900	438700
Nem azonosított	50500	118900	156400
Összesen	2970000	4456400	5468900

	2009			
	<USD 40/kgU	<USD 80/kgU	<USD 130/kgU	<USD 260/kgU
Unkonformitás	366800	754000	724900	733700
Homokkő	65100	820200	1369000	1647500
IOCG	0	1240200	1255500	1255500
Q-kavics	135006	171000	203300	215900
Metaszomatit	92000	175600	582600	727600
Hidrotermális	0	8100	115300	288700
Magmás	1800	10900	189600	281300
Vulkanikus	0	163700	214800	292000
Egyéb	53600	256900	453400	479500
Nem azonosított	82200	194900	295600	384600
Összesen	796500	3741900	5404000	6306300

A nagy költségű kategória bevezetését a világgiazi árak 2003 óta tartó általános növekedése (25 USD/kg U₃O₈-ról megközelítőleg 160 USD/kg U₃O₈-ra [16]) és a növekvő kitermelési költségek indokolták [2]. A még fel nem fedezett tartalékok (prognosztizált és spekulatív) meghaladják a 10400000 tU-t [2].

Az 2. és 3. táblázat alapján jól látható, hogy az alacsonyabb árkategóriájú készleteknél számottevő csökkenés volt tapasztalható, elsősorban a dráguló kitermelés miatt. Az alacsony, <USD 40/kgU kategóriájú bizonyított konvencionális készleteknél az unkonformitáshoz kapcsolódó telepek a dominánsak, amelyet a Na-metaszomatit típusú telepek és a kvarc kavics konglomerátum típusú telepek követnek. A <130 USD/kgU kategóriában az IOCG (Iron-Oxide Copper Gold) telepek (gyakorlatilag az Olympic Dam telep) rendelkeznek a legnagyobb készlettel, amelyet a homokkőveken található és az unkonformitáshoz kapcsolódó telepek követnek. A nagy költségű kategóriában (<USD 260/kgU) a legnagyobb készletek a homokkő telepeken vannak, amelyet az IOCG telep követ (5. ábra).



5. ábra: A világ jelentősebb U-telepei és típusai [4]

A világ urántermelése (43880 tU) a világ fűtőanyag igényének (59065 tU) 74%-át biztosította [2]. A fennmaradó 26%-ot másodlagos forrásból, kormányzati és kereskedelmi többletből, a nukleáris fegyverek leszereléséből, meddők dúsításából, illetve a kiegészítő fűtőelemek reprocessálásából biztosították. Figyelembe véve a piaci igények folyamatos növekedését [17], a projekciók alapján a készletek biztosan elegendőek az atomerőművek gyorsabb bővülése (782 GWe) esetén 2028-ig, lassabb bővülés (511 GWe) esetén 2038-ig [2]. Habár az információk a másodlagos forrásokról hiányosak, általánosan várható a piaci szerepének csökkenése, különösen 2013 után. Az eltérő üzemanyag ciklusok (pl.: 4. generációs erőművek) bevezetése, amennyiben sikeresen kifejlesztettek és kivitelezettek, jelentősen befolyásolhatja a mérleget, de jelenleg még nem lehet előre jelezni, mennyire lesz költséghatékony, társadalmilag elfogadott és ennek következtében széles körben elterjedt ez az új módszer. Jelentős ellátás-biztonsági kockázatot okoz továbbá az igény- és tartalék-oldal földrajzi elhelyezkedésének aránytalansága.

Míg a fő felhasználók az USA, Nyugat-Európa és Japán, addig Nyugat-Európában és Japánban lényegében nincs U-termelés, még az USA is csak sokadik az U-termelő országok sorában. Kazahsztán 2007-ben és 2008-ban 26% és 28%-kal növelte a termelését, ami valószínűsíti, hogy hamarosan átveszi a vezető szerepet Ausztráliától.

Mindazonáltal a kazahsztáni telepek homokkőveken vannak jelen, amelyekre jellemző a széttagoltság, ami

jelentősen megdrágítja a bányászatot. A helyszíni kioldás sok szempontból lehet gazdaságosabb is, viszont ezzel a módszerrel csak kevesebb százalékát lehet az uránnak kinyerni. További problémát jelent, hogy nehezen kiszámítható, hogy Kazahsztán mennyi ideig tud újabb és újabb telepet termelés alá vonni, mivel elsősorban a szovjet időszakban történt kiterjedt földtani kutatások eredményeit hasznosítják, relatíve kevés pénzt és energiát áldozva az új U-provinciák felkutatására. Jelentős kockázatot jelent a forrás oldalon, hogy mennyire sikerül megnyerni a közvéleményt uránbánya nyitásának támogatására, tekintettel arra, hogy egyre több helyen vonják, vagy kívánják bevonni a közvéleményt és/vagy az önkormányzatokat az engedélyezési folyamatokba (például: Finnország, Ausztrália). A nem konvencionális telepek komoly lehetőséget biztosíthatnak az igények folyamatos kielégítésére, azonban kitermelésük jelenleg nem gazdaságos. Több bányavállalat is próbál új kinyerési eljárásokat kifejleszteni, amivel csökkenthetőek a költségek, ezáltal gazdaságosá válna a termelésük. Előremutató az új ár kategória (260 USD/kgU) bevezetése is, hiszen a folyamatosan emelkedő világpiaci árak egyre több telep termelését teszik gazdaságossá, és ahogy az a szénhidrogén iparban is történt, a kisebb, nagyobb tudást és fajlagos költséget igénylő telepeket is érdemes lesz megkutatni. Azonban a hosszú bányalétesítési folyamat miatt (általában több mint 15 év) elengedhetetlen a folyamatos kutatás, bányafejlesztés és az uránkinyerési módszerek fejlesztése.

Összefoglalás

A dolgozatban bemutatott uránkészletek adatai alapján látható, hogy az újonnan építendő erőművek élettartamát meghaladó időszakokra versenyképes áron biztosított az üzemanyag. A készletek túlnyomó része politikailag stabil államokban, a szénhidrogénekhez viszonyítva területileg elszórtabban áll rendelkezésre, ezért a fosszilis tartalékokhoz viszonyítva lényegesen kisebb a kitermelés geopolitikai kockázata. A gazdaságosan kitermelhető készleteket a piaci ár befolyásolja (120 USD/kg U_3O_8 [16]). Azonban a piaci ár alakulásában jelentős szerepet játszik az atomenergiával kapcsolatos társadalmi elfogadottság aktuális szintje, valamint a szaporító reaktorok üzembe állításának üteme. A társadalmi elfogadottság befolyását jól mutatják a fukushimai eseményeket követő németországi azonnali erőmű bezárások és üzemidő hosszabbítás megvonások. Ide sorolható az olaszországi népszavazás eredménye is, miszerint nem indítják újra a csernobili katasztrófa után bezárt atomerőműveiket. Tekintettel arra, hogy jelenleg nem lehet gazdaságosan és fenntartható módon helyettesíteni az atomenergiát, nem várható az urán árának tartós csökkenése, és továbbra is jelentős felhasználói bővülésre lehet számítani főleg Kína és India részéről, amelyet - ahogyan arra Bárdossy 2011-es munkájában szintén rámutatott [18] - bizonyosan kielégítenek a jelenleg ismert urántartalékok.

Irodalomjegyzék

- [1] World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html> (11.07.25)
- [2] OECD/NEA-IAEA: Uranium 2009: Resources, Production and Demand; OECD, 2009.
- [3] OECD/NEA-IAEA: Uranium 1999: Resources, Production and Demand; OECD, 2000.
- [4] Cuney, M.: Metallogeny and Exploration of Uranium Deposits; 8th Freiberg Short Course in Economic Geology, 2009.
- [5] Cuney, M és Friedrich, M.: Physicochemical and crystal-chemical controls on accessory mineral paragenesis in granitoids. Implications on uranium metallogenesis; Bulletin de Minéralogie, 1987, 110, 235-247.
- [6] Cuney, M.: Preliminary results on the petrology and fluid inclusions of the Rössing uraniumiferous alaskites; Trans. Geol. Soc. South Africa, 1980, 83, 39-45.
- [7] Cuney, M. és Kyser, K.: Recent and not-so-recent developments in uranium deposits and implications for exploration. Short Course Series, Volume 39, Mineralogical Association of Canada, 2009.
- [8] Chabiron, A., Alyoshin, A., Cuney, M., Golubev, V., Velitchkin, V., Delouie E. és Poty, B.: Geochemistry of the rhyolitic magmas associated with the Streltsovskoye uranium deposits (Transbaikalia): a magmatic inclusion study; Chem. Geol., 2001, 175, 273-290.
- [9] Finch, W.I. és Davis, J.F.: Sandstone-type uranium deposits - An introduction. In Geological environments of sandstone-type uranium deposits; IAEA-TECDOC-328, Vienna, 1985, 11-19.
- [10] IAEA: Uranium deposits in quartz-pebble conglomerates; IAEA-TECDOC-427, 1987.
- [11] Owen, D.E.: Economic, environmental and health implications of uraniumiferous montane and subalpine wetlands; On-line abstract book of AAPG Rocky Mountain Section Meeting, Denver, Colorado, 1990.
- [12] Chernoff, C.B. és Orris, G.J.: Data set of world phosphate mines, deposits, and world phosphate occurrences - Part A. Geologic Data; USGS Open-File Report 02-156-A, 2002.
- [13] Orris, G.J. és Chernoff, C.B.: Data set of world phosphate mines, deposits, and world phosphate occurrences - Part B. Location and Mineral Economic Data; USGS Open-File Report 02-156-B, 2002.
- [14] OECD/NEA-IAEA: Uranium 2007: Resources, Production and Demand, 2007 Red Book. OECD, 2008.
- [15] Tamada, M.: Current status of technology for collection of uranium from seawater. Erice Seminar, 2009.
- [16] Uranium Price Comparison of Different Time Periods <http://www.infomine.com/Investment/HistoricalCharts/ShowCharts.asp?c=Uranium> (11.07.25)
- [17] EIA: International Energy Outlook, 2010, U.S. Energy Information Administration, Washington, DC, 2010.
- [18] Bárdossy, Gy.: A világ atomerőműveinek uránérc-ellátottsága. Magyar Tudomány, 2011.