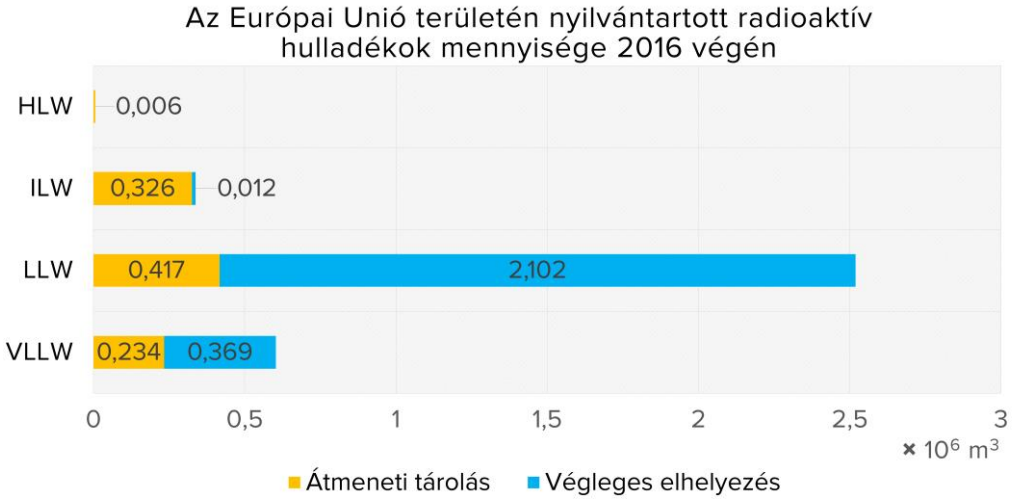
MI LESZ A KIÉGETT ÜZEMANYAG-KAZETTÁK ÉS A NAGY AKTIVITÁSÚ RADIOAKTÍV HULLADÉKOK SORSA?

Kirchkeszner Csaba, Dr. Hugyecz Attila – 2021. április 29.

A nukleáris technológia egyre inkább a mindennapjaink részét képezi. Felhasználjuk az egészségügyben mind diagnosztikai (pl. SPECT[1], PET[2]), mind pedig terápiás jelleggel (sugárterápia). Alkalmazzuk számos ipari tevékenység során úgy, mint az élelmiszeriparban (pl. γ-besugárzásos élelmiszer-tartósítás), a modern roncsolásmentes anyagvizsgálatok során (pl. neutronaktivációs elemzés), a műszaki földtanban, a tudományos kutatásban, s nem utolsó sorban talán a legnagyobb ipari jelentősége a villamosenergia-termelő atomerőművek esetén van. **Azonban legyen szó bármilyen technológiáról, szinte kivétel nélkül mindegyikről elmondható, hogy működésük során keletkezik hulladék, amit megfelelő hulladékkezelési eljárásokkal kezelni kell szem előtt tartva a környezet- és humánbiztonsági, valamint megvalósíthatósági és gazdasági elveket.** Nincs ez másképp az atomerőművek esetében sem, melyek működése során képződnek radioaktív hulladékok és idővel kiégett üzemanyagok is. Először tekintsük át, hogy mekkora mennyiségű és milyen radioaktív hulladékkal van dolgunk!

Az Európai Unió területén 2016 végéig tárolt összes radioaktív hulladék – a kiégett üzemanyagok nélküli – mennyiségi eloszlását a Nemzeti Atomenergia Ügynökség (NAÜ) által javasolt osztályozási rendszer szerint az **1. ábrá**n mutatjuk be. Ez alapján megállapítható, hogy **az összes – 2016 végéig – keletkezett radioaktív hulladék mennyiségé-nek 71,6%-át már elhelyezték az erre a célra kialakított végleges tárolókban.** Az átmeneti tárolókban a nukleáris hulladék fennmaradó része, az összes mennyiség 28,4%-a kapott helyet, melyből 27,8% arra vár, hogy megfelelő hulladékkezelési lépéseket követően átszállítsák a felszínközeli vagy közepes mélységű radioaktív hulladéktárolókba. *(Hazánkban két ilyen létesítmény üzemel: az egyik a Radioaktív Hulladék Feldolgozó és Tároló Püspökszilágyban, mely nem atomerőművi, hanem intézményi eredetű radioaktív hulladékokat fogad; a másik pedig a Bátaapátiban épített Nemzeti Radioaktívhulladék-tároló, mely létesítmény kis és közepes aktivitású atomerőművi hulladékok végső tárolását végzi.)* **Az EU-ban a teljes radioaktív hulladékmennyiség 0,17%-át tették ki a nagy aktivitású (HLW) hulladékok 2016 végén. A mennyiségek érzékeltetésére jelezzük, hogy ez egy 110 × 75 méter felületű futballpályát kb. 73 cm magasságban fedne be.**



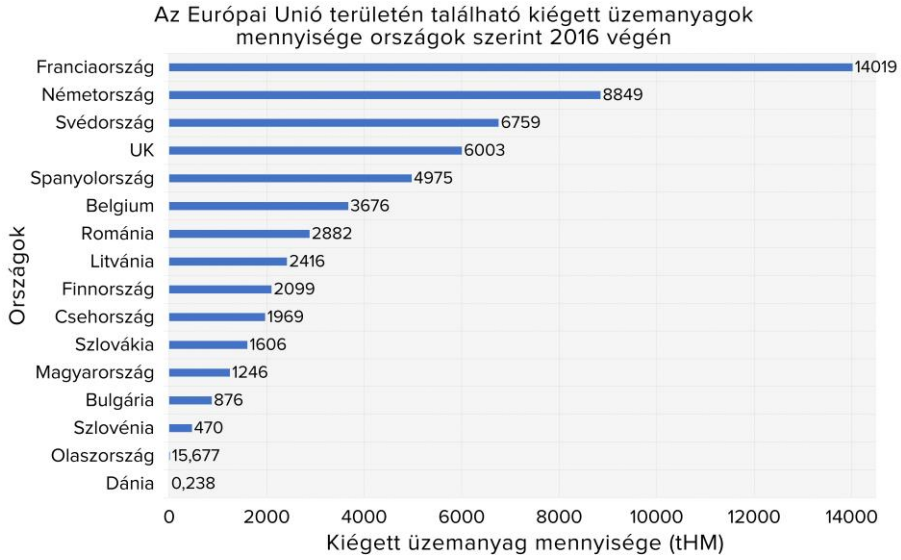
1. ábra: Az EU területén (EU27 és a UK) 2016 végén nyilvántartott radioaktív hulladékok minőségi és mennyiségi eloszlása

Az előbbi – radioaktív hulladékokra vonatkozó – adatok nem tartalmazták az EU-ban eddig keletkezett kiégett fűtőelemek mennyiségét. Ennek alapvető oka, hogy a kiégett üzemanyagokra másképp tekintünk, mint a nagy aktivitású radioaktív hulladékokra, mert **a kiégett fűtőelemek számos olyan radionuklidot tartalmaznak, melyek további feldolgozás (reprocesszálás) révén felhasználhatók új üzemanyag gyártására**. A **reprocesszálás** során a

[1] *SPECT: Single Photon Emission Computed Tomography, egyfoton-emissziós számítógépes tomográfia*

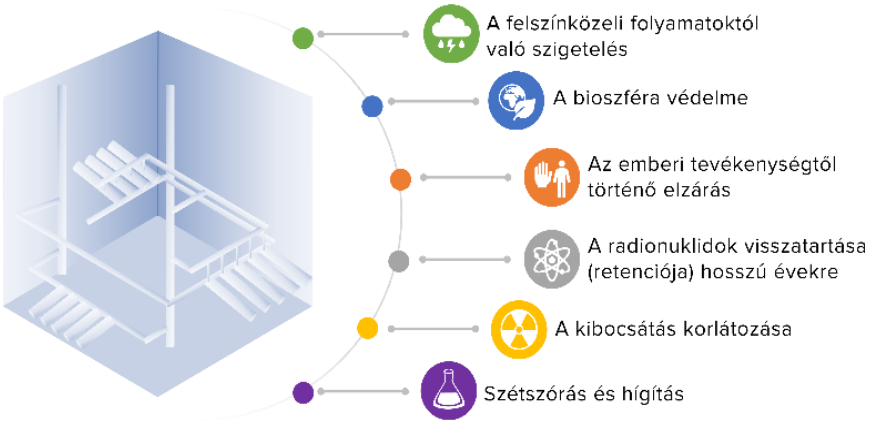
[2] *PET: Positron Emission Tomography, pozitronemissziós tomográfia*

további energiatermelésre alkalmas **urán- és plutóniumfrakciók szeparációja** történik a kiégett üzemanyagból. A reprocesszálást követően visszamaradó – hosszú felezési idejű radionuklidokat is tartalmazó – melléktermékek nagy aktivitású hulladéknak minősülnek, s kezelésükről ennek megfelelően kell gondoskodni. A legelterjedtebb eljárás e hulladékok kezelésére a **vitrifikáció (üvegmátrixba való beágyazás)**, melynek során **a radioaktív hulladékot üvegképző anyagokkal (pl. SiO_2, B_2O_3) összekeverve magas hőmérsékletre hevítik, majd az ömledéket gyorsan lehűtik.** Az eljárás eredményeként egy üvegszerű, amorf anyag marad hátra, mely stabilabb, mint a cementek és kerámiák többsége, ráadásul a radionuklidok széles skáláját képes magába zárni. **A kiégett üzemanyagok tárolt mennyisége 2016 végén mintegy 58 000 tHM (tonna nehézfém) volt az Európai Unióban,** ezek mennyiségi eloszlását országok szerint a **2. ábrán** szemléltetjük. **Az EU-ban található kiégett üzemanyagok jelentős része átmeneti tárolókban található, s csak 1,6%-uk (mintegy 900 tHM) került reprocesszálásra 2016 végéig.**



2. ábra: A kiégett üzemanyagok tárolt mennyisége az Európai Unióban 2016 végén (az ábrán nem szereplő többi EU-s országban nem volt kiégett üzemanyag)

A nagy aktivitású hulladékok kezelésének legperspektivikusabb, s egyben legtöbbet vizsgált és kutatott módja a mélységi geológiai formációkban történő elhelyezés. A radioaktív hulladékok környezettől történő elzárásának és elszigetelésének alapelve, hogy **a mérnöki és természetes gátak kombinációjá**val egy olyan rendszert alakítsanak ki, **amelyek igen extrém körülmények között is képesek megakadályozni a radionuklidok kijutását**, vagy olyan mértékben lassítják ezek migrációját, ami összemérhető az elbomlásukhoz



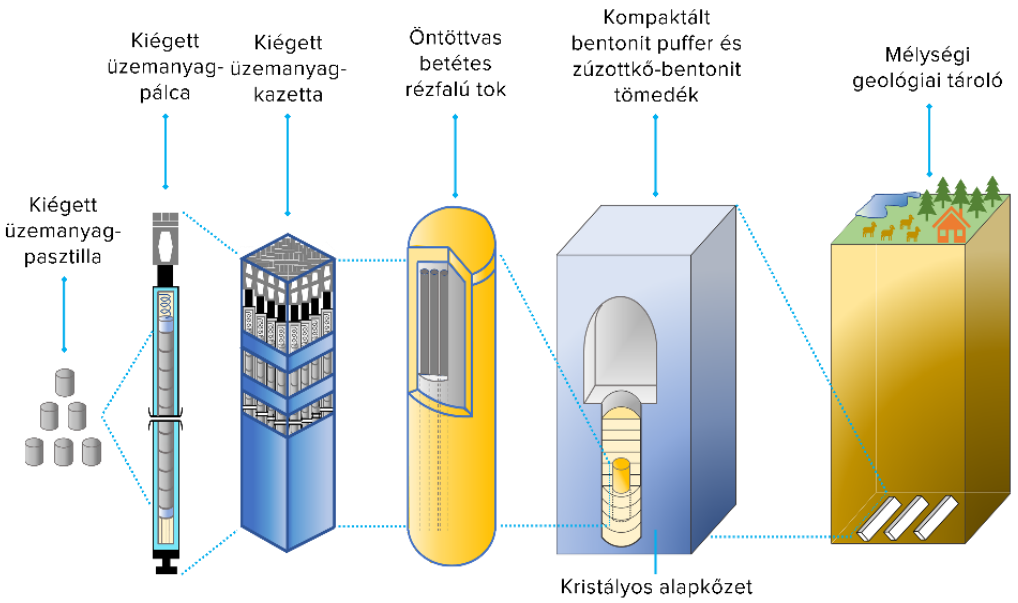
3. ábra: A mélységi geológiai tárolók funkciói és biztonsági koncepciója (Forrás: Kirchkeszner Cs.)

szükséges idővel. A geológiai tárolórendszernek **a lezárás utáni években, évtizedekben és évszázadokban különböző funkciókat kell ellátnia** (**3. ábra**). Ennek megfelelően távol kell tartania a hulladékokat a felszínközeli környezettől és az ott lezajló folyamatoktól. Védenie kell a bioszférát a radioaktív sugárzástól, s el kell zárnia az eltemetett radioaktív hulladékokat mindenféle emberi tevékenységtől. A geológiai tárolók fontos funkciója a rövid élettartamú radionuklidok teljes visszatartása (retenciója) néhány száz vagy akár ezer évre, még a tároló természetes és mérnöki gátjain belül. **A többszörös gátrendszer késlelteti és korlátozza a radionuklidok migrációját.** A mélységi geológiai tárolók biztonsági funkcióinak betöltésében kulcsszerepet játszik az alkalmas földtani környezet, amelynek kiválasztása során figyelembe vehető fő szempontokat a **4. ábrá**n foglaltuk össze. Ezek a több millió éves földtani stabilitás, alacsony víztartalom és vízáramlás, stabil geo- és hidrokémiai viszonyok, valamint kedvező műszaki tulajdonságok, amelyek lehetővé teszik a mélységi geológiai tároló megépítését. E kiválasztási szempontok alapján több kőzettípus is megfelelő lehet.

4. ábra: A mélységi geológiai tárolók létesítésére alkalmas földtani környezet főbb jellemzői (Forrás: Kirchkeszner Cs.)

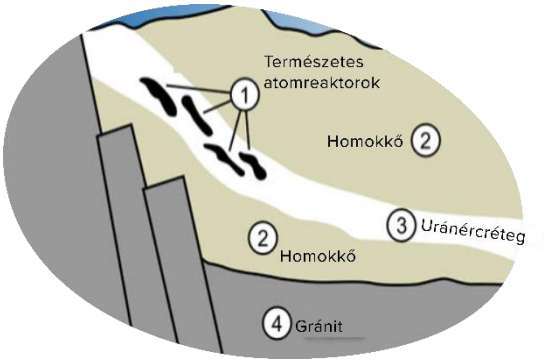
Alkalmas befogadó kőzet lehet például a **kősó vagy az agyagos képződmények**, melyek vízáteresztő-képessége a radionuklidokra nézve különösen alacsony, hiszen nem tartalmaznak nyitott repedéseket. Ezek mellett **kiváló befogadó kőzetek lehetnek a kristályos kőzetek** (pl. gneisz, gránit) és a **vulkáni tufák** is. *Hazánkban is találtak a geológusok olyan formációt, amely alkalmas lehet nagy aktivitású radioaktív hulladékok befogadására. Ez a **Bodai Agyagkő Formáció** – röviden BAF, melynek földtani környezetét és radioaktív hulladék befogadására való alkalmasságát 1982 óta aktívan kutatják.*

Miután röviden áttekintettük a mélységi geológiai tárolók megvalósítási koncepcióját, biztonsági funkcióit és a természetes gátakat, következzen a **mérnöki gátak rendszere** (**5. ábra**). Vitrifikált radioaktív hulladékok esetén az első mérnöki gát valójában maga az üvegmátrix, míg a kiégett nukleáris üzemanyag esetén maga az üzemanyagmátrix és az azt befogadó pálca. Az üvegmátrixba ágyazott radioaktív hulladékokat és a kiégett üzemanyag-pálcákat először **fémkonténer**be, majd egy **külső csomagolás**ba helyezik. A belső tartály (pl. acéltartály, öntöttvas tartály) biztosítja a szükséges mechanikai szilárdságot, míg a külső tok célja a radionuklidok és azok bomlástermékeinek visszatartása. A külső tok anyaga lehet korróziót megengedő anyag (pl. lágyacél, öntöttvas) vagy korróziót akadályozó anyag (pl. réz és titánötvözetek). Előbbiek késleltetik a tartály tönkremenetelét addig, amíg a rövid élettartamú hasadási termékek elbomlanak. Utóbbiak nagyon hosszú időre (kb. 100 000 év) megakadályozzák a víz hozzáférését a hulladékhoz. Ennyi idő alatt ugyanis a hulladék radioaktivitása a természetes uránérc radioaktivitásával lesz összemérhető, így pedig már nem jelent többlet kockázatot. A következő mérnöki gát **a tároló visszatöltése (tömedékelése)**, melynek célja a radionuklidok terjedésének korlátozása, valamint az elsődleges műszaki gátak védelme, továbbá biztosítja az emberi tevékenységtől való elzárást. Kiégett fűtőelemek és nagy aktivitású hulladékok esetén erősen tömörített bentonitot tartalmazó tömedékanyagokat használnak, melyet összetört kőzettel és homokkal keverhetnek az igen alacsony vízáteresztő-képesség biztosítása érdekében. **Az utolsó – talán legfontosabb – gát pedig a mélységi geológiai tároló megvalósítására kiválasztott kőzettest.**



5. ábra: A mélységi geológiai tároló természetes és mérnöki gátrendszere (Forrás: Kirchkeszner Cs.)

Mindezek alapján úgy tűnhet, hogy a kiégett fűtőelemek és a nagy aktivitású radioaktív hulladékok mélységi geológiai tárolókban történő elhelyezése itt véget ért. Azonban ez koránt sincs így, hiszen felmerül a kérdés, **kinek lesz bátorsága, hogy egy ilyen tároló engedélyeztetéséhez szükséges tanulmányok során leírja vagy megjósolja, hogy mi lesz a tárolóval több mint 1700 emberöltőnyi (>100 000 év) idő után.** A kérdés teljesen reális, a válasz pedig a természetben van, csak nyitott szemmel kell járni, ahogy tették ezt azok a kutatók, akik elkezdték tanulmányozni azt a **2 milliárd éves természetes atomreaktort** (**6. ábra**), ami az afrikai Gabonban, Mounana város mellett található. Ha visszautaznánk 2 milliárd évet az időben, akkor talán rá sem ismernénk a bolygónkra, hiszen ekkor a Föld arculata egyáltalán nem hasonlított a maihoz. Ebben a korban a természetes urán kb. 3%-át tette ki az U^{235} izotóp, ami már elegendő a láncreakció fenntartásához egy könnyűvizes atomreaktorban. A kutatások szerint kb. 1740 millió éve váltak kritikussá a talajvíz feltörésével és az érctelepek elöntésével az oklói természetes atomreaktorok. Ezekben a reaktorokban a talajvíz töltötte be a moderátor szerepét. A láncreakció szabályozását is a talajvíz biztosította azáltal, hogyha a víz elforrt, akkor nem volt közeg, ami lassítsa a neutronokat, így lecsökkent a hasadások száma, és ezzel lehűlt a reaktor. Amikor viszont érkezett vízutánpótlás, akkor ismét megnövekedett a maghasadások száma, nőtt a reaktivitás. Idővel, a hasadóanyag-tartalom jelentős csökkenése miatt e természetes reaktorok kimerültek, de mintegy 150 000 évig működtek, és termelték a nagy aktivitású radioaktív hulladékot. **Ez a hely kiválóan alkalmas arra, hogy a nagy aktivitású hulladékokban található elemek kőzetbeli migrációjának mértékét tanulmányozzuk.** Több egymástól független kutatócsoport által végzett vizsgálatok alapján elmondhatjuk, hogy **nem figyelhető meg a területen az egykor képződött radionuklidok széthordása**.



6. ábra: Az oklói természetes atomreaktorok elhelyezkedése az ottani geológiai formációban (az USA Energiaügyi Minisztériumának ábrája alapján)

De más hasonló példát, ún. természeti analógiát is ismerünk és felhasználunk: kiválóan lehet tanulmányozni az agyagréteg radionuklid-áteresztő képességét a kanadai Cigar Lake nevű bánya területén, ahol az 1950-es évek végén felfedezték a világ egyik legnagyobb uránlelőhelyét. Az itt található uránmezőt egy 1300 millió éves agyagköpeny vette körül, ami meggátolta az uránércben keletkező leányelemek felszíni és felszín alatti vizekbe történő migrációját. Ez kiválóan bizonyítja, hogy **az agyag nem engedi át a radionuklidokat akár évmilliók alatt sem**. További természeti analógiaként szolgál a végleges hulladéktárolók tervezői számára az, hogy a svéd Gotland-szigeten olajkitermelés közben lettek figyelmesek 500 méter mélységben egy bentonitmezőre, amely az elmúlt 10 millió évben folyamatosan kb. 120 °C hőmérsékletnek volt kitéve. A kutatók e formáció vizsgálatával tudták

bizonyítani, hogy **a tömedékelésre tervezett bentonit hosszú ideig magas hőmérsékleten is képes megőrizni izoláló tulajdonságát, s nem engedi át a radionuklidokat, hasadási termékeket.**

A természeti analógiák mellett fontos megemlíteni a régészeti (archeológiai) analógiákat is. 1628-ban süllyedt el a svéd Vasa hadihajó, mely korának egyik legjobban felszerelt hajója volt, ágyúcsövei pedig rézből készültek. 1961-ben került sor a hajó kiemelésére. Ez pedig kiváló lehetőséget teremtett arra, hogy a réz korróziójára vonatkozó ismereteinket évszázadok természeti tapasztalatával vessük össze. A vizsgálatok nagyon hasznosnak bizonyultak, kiderült ugyanis, hogy a több mint 300 évig a tenger mélyén lévő hajó réz ágyúcsövei alig korrodálódtak. A hosszú időszak alapján a réz korróziójának sebességére 300 éves időtáv alapján tudunk következtetni: ez a sós vízben ~0,2 µm/év értékűnek adódott (a víz sótartalma jelentősen növeli a korrózió sebességét). Ez alapján ma már joggal állíthatjuk, hogy **egy 5 cm falvastagságú rézből készült konténer sós vízben 250 000 évig szolgál mérnöki gátként a korrózió ellen, száraz körülmények között pedig ennél is sokkal tovább.** A nagy aktivitású radioaktív hulladékok mélységi geológiai tárolásának természetes és archeológiai analógiáit a római kori cementek vizsgálata során szerzett tapasztalatokkal tovább folytathatnánk. A **természeti és archeológiai analógiák vizsgálatából nyert tudást és tapasztalatokat a mélygeológiai tárolók tervezése során értelemszerűen felhasználjuk.**

Az évtizedek óta tartó megalapozott és komplex kutatások eredményei alapján napjainkban széleskörű tudományos és műszaki egyetértés van abban, hogy a nagy aktivitású, hosszú felezési idejű radionuklidokat tartalmazó radioaktív hulladékok geológiai képződményekben történő elhelyezése megfelelő és biztonságos végleges elhelyezési eljárásnak tekinthető e hulladékok bioszférától való hosszútávú elszigetelésére. Ezt az álláspontot a 2021. március 19-én kiadott tanulmányában az Európai Unió tudományos szolgálata, a Közös Kutatóközpont (JRC) is megerősíti.