

ATOMERŐMŰVI HULLADÉKOK KEZELÉSE – 1. RÉSZ

Fábián Margit
MTA Energiatudományi Kutatóközpont

Az atomenergia-termelés jelenleg két fontos kérdést vet fel, amelyekre pozitív választ kell találni: az egyik a biztonságos működtetés, a másik a keletkezett radioaktív hulladékok megfelelő kezelése, tárolása. Jelen cikk a teljesség igénye nélkül ad átfogó képet a radioaktív hulladékok keletkezésének, kezelésének és tárolásának témaköreiről.

Az atomenergia-termelés elkerülhetetlen mellékterméke a kiegészített nukleáris üzemanyag, amely hosszútávú biztonságos kezelést, tárolást igényel. Az atomenergetika számos területére vonatkozó szabályozásait a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) ajánlása alapján lehet megfogalmazni. A legtöbb ország hatályos nemzeti szabályozásának – így a magyarországinak is – alapjaként ismert IBSS 1996-ban megjelent Safety Series sorozat 115. kötetében, a radioaktív hulladék definíciója:

– „radioaktív anyagokat tartalmaz vagy azokkal szennyezett, és aktivitása, illetve aktivitás-koncentrációja meghaladja a hatósági szabályozás alóli kivonás, illetve mentességi határát, valamint

– a hozzá tartozó sugárzási helyzet nincs kizárva a szabályozott tevékenységek köréből”.

A NAÜ ajánlások hulladékokra vonatkozó legfontosabb alapelvei: az emberi egészség, illetve a környezet védelme, az országhatárokon túlnyúló védelem, a jövő generációk egészségére gyakorolt hatás a ma elfogadhatónak tartottnál nem lehet nagyobb, valamint a hulladék kezelése a következő generációkra nem róhat indokolatlanul nagy terheket. A nemzeti törvényi keretek megalkotásának elve szerint a hulladékokat törvényes nemzeti keretek között kell kezelni, a hulladékok keletkezését a praktikusán elérhető legalacsonyabb szinten kell tartani a radioaktív hulladékok keletkezésének szabályozásával. A biztonság érdekében a hulladékok keletkezésének és kezelésének összefüggéseit megfelelően figyelembe kell venni. Végül a létesítmények biztonságával kapcsolatban rendkívül fontos, hogy a radioaktív hulladékok kezelésére szolgáló létesítmények biztonságát azok egész élettartama során biztosítani kell [1].

A magyar szabályozás szerint: a nukleáris létesítményekkel, illetve az általuk termelt, valamint más tevékenységekből származó radioaktív hulladékokkal kapcsolatos hazai szabályozás feladata a nemzetközi egyezményekre épülő törvények és kormányrendeletek megalkotása. A jelenleg hatályos „atomtörvény” (1996. évi CXVI. törvény az atomenergiáról) alapvető rendeltetése a lakosság egészségének, biztonságának és a környezet védelme.

A biztonságos alkalmazás irányítása és felügyelete a kormány feladata. A magyar hatósági rendszer összetett, a törvényi rendelkezések az alapvető hatósági feladatokat megosztották az Országos Atomenergia

Hivatal (OAH) főigazgatója és az egészségügyért felelős miniszter között, de egyes kérdésekben jelentős szerepe van más tárcáknak is. Az atomenergiáról szóló törvényt végrehajtó egyik kormányrendelet 1998. január 1-jei hatállyal Központi Nukleáris Pénzügyi Alapot hozott létre, amelynek forrását az atomenergiát alkalmazó létesítmények befizetései képezik. Az Alap célja a radioaktív hulladéktárolók létesítésének, a kiegészített fűtőelemek ideiglenes tárolásának és végső elhelyezésének, valamint a nukleáris létesítmények végleges leállításának, leszerelésének finanszírozása. Az „atomtörvény” egyik végrehajtási elemeként jelent meg a 47/2003. EszCsM-rendelet, amely definiálta, hogy a hulladéktároló végleges lezárását követően „... a lakosság vonatkoztatási csoportja egyedeinek sugárterhelése az elhelyezett hulladék hatásaitól eredően nem haladhatja meg a 100 $\mu\text{Sv}/\text{év}$ effektív dózis értéket”. Az OAH irányításával a radioaktív hulladéktárolók létesítésére, üzemeltetésére, fenntartására, valamint a nukleáris létesítmények leszerelésére 1998-ban létrejött a Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft. [2, 3].

Radioaktív hulladékok: meghatározások, kategóriák

A *radioaktív hulladék* további felhasználásra nem szánt, emberi tevékenység, például ionizáló sugárzás alkalmazása során létrejött radioaktív anyag. A radioaktív hulladékokat – a hulladékkezelés és a biztonságos elhelyezés optimalizálása érdekében – keletkezésük szempontjából három kategóriába soroljuk: a nukleáris létesítmények működéséből származó folyamatos üzemi kibocsátás; üzem közben és leszereléskor keletkező, helyben maradó hulladékok; üzemzavar, baleset esetén keletkező hulladék (amit baleseti hulladéknak nevezünk).

A jelenleg érvényes, dózisalapú hatósági szabályozás a relatív *aktivitáskoncentráció* alapján különbözteti meg a radioaktív hulladékokat.

A tartalmazott aktivitáskoncentráció szerinti kis aktivitású hulladék kategóriájának alsó korlátját ez idő szerint a 124/1997. sz. Kormányrendelet és a hozzá kapcsolódó 23/1997. NM rendelet határozza meg, amely a gyakorlatban előforduló mesterséges és természetes eredetű radioaktív izotópokra *mentességi szinteket* állapít meg. A mentességi szintnél kisebb radioaktivitással vagy aktivitáskoncentrációval jellemzett anyag mentes a sugárvédelmi szabályozás alól, így ha hulladékká válik, akkor is szabadon (azaz nem radioaktív hulladékként) elhelyezhető. A radioaktív hulladékok minősítésére bevezetett (1) összefüggésben a mentességi aktivitáskoncentrációt egy tonna hulladékmennyiségig, a felszabadítási koncentrációt e

felett javasolják referenciaszintként alkalmazni. Az aktivitáskoncentráció szerinti jellemzés mérőszáma az S veszélyességi mutató:

$$S = \sum_i \frac{AK_i}{REAK_i}, \quad (1)$$

ahol $REAK$ a referencia aktivitáskoncentráció (Bq/kg), AK az aktivitáskoncentráció, i a hulladékcsomag adott radioizotópja. Ha tehát egy hulladékcsomag veszélyességi mutatója egynél kisebb, akkor az radioaktív hulladékként történő kezelés és elhelyezés nélkül is csak elhanyagolható dózist okoz a leginkább érintett kritikus lakossági csoportnak.

Ennek alapján a NAÜ szerint a radioaktív-hulladék osztályok:

Kis aktivitású hulladék (LLW) veszélyességi mutatója: $1 < S < 1000$.

Közepes aktivitású hulladék (ILW) veszélyességi mutatója: $10^3 < S < 10^6$.

Nagy aktivitású hulladék (HLW) veszélyességi mutatója: $S > 10^6$. Ugyancsak HLW minősítést kap az a hulladék, amelyben a radioaktív bomlás következtében fellépő hőfejlődés (maradvány- vagy remanens hő) nagyobb, mint 2 kW/m^3 . E kategóriákat Magyarországon a 47/2003. sz. EszCsM-rendelet, valamint a 14344/1-2004. sz. magyar szabvány definiálta.

Számos ország gyakorlatában, illetve a vonatkozó szakirodalomban a radioaktív hulladékokat (elsősorban a kiégett nukleáris fűtőelemeket, amelyek csak abban az esetben tekintendők hulladéknak, ha további felhasználásuk kizárható) sugárvédelmi szempontból az RT radiotoxicitással jellemzik, ami az alábbi definíció szerint a hulladék által összesen okozható dózist jelenti:

$$RT = \sum_{i=1}^n DCF_{i,ny} A_i, \quad (2)$$

ahol A_i a fűtőelembeli i -edik radionuklid aktivitása, $DCF_{i,ny}$ az ezen radionuklidgez kapcsolódó lenyelési dóziskonverziós tényező. Ez a definíció nem azt feltételezi, hogy egyetlen ember inkorporálja az egész hulladékot, hanem kollektív dózist számol, azt feltételezve – ami meglehetősen valószínűtlen –, hogy a hulladékot a lakosság teljes mennyiségében inkorporálja.

A radioaktív hulladékkal feltöltött hulladéktároló veszélyességének minősítésére, azaz a hulladék és a befogadó létesítmény együttes jellemzésére egy komplexebb radiotoxicitás-indexet ($RTOX$) alkalmaznak, ami az elhelyezett hulladék által a reprezentatív (leginkább érintett és leginkább érzékeny) személynek okozható éves effektív dózist jelenti:

$$RTOX = \sum A_i(t) \left(\sum_j mf_{i,j} Q_j \right) DCF_{i,ny} \text{ (Sv/év)}, \quad (3)$$

ahol A az aktivitás (Bq), i az adott radioizotóp, mf az egyes szennyezhető táplálékfajtákra vonatkozó mobilitási tényező [(Bq/kg)/(Bq)], Q_j a j -edik anyagból való

táplálékfogyasztás (kg/év); DCF_{ny} a lenyelési dóziskonverziós tényező (Sv/Bq). A mobilitási tényező helyspecifikus, tartalmazza a tárolóból való kijutás (migráció), a környezetben történő elterjedés (diszperzió) és a biológiai rendszerekben végbemenő felvétel (immisszió) sebességi és hígulási mutatóit is, ennél fogva meghatározása igen nehéz tudományos feladat.

Nukleáris energiatermelésből származó radioaktív hulladékok keletkezése

A radioaktív hulladékok legfontosabb forrása a nukleáris energiatermelés. A nukleáris üzemanyagciklus minden fázisa az uránbányászattól az atomerőmű leszereléséig radioaktív hulladékok keletkezésével jár. A különböző forrásokból keletkező radioaktív hulladékok mennyiségét nehéz pontosan megadni, a magyarországi arányokat a hulladéktárolók befogadó térfogata révén lehet érzékelteni. A gyakorlatilag megtelt püspökszilágyi tároló teljes befogadó térfogata körülbelül 5000 m^3 , ide nem nukleáris eredetű hulladékokat helyeznek el. A jelenlegi paksi 4 blokk üze- mi és leszerelési hulladékainak befogadására tervezett bátaapáti lerakó tárolókapacitása $40\,000 \text{ m}^3$, amely 200 m mélyen van a föld alatt. A hazai radioaktív hulladék mintegy 90%-a a nukleáris energiatermeléshez kapcsolódik.

Az uránbányászat

Az uránbányászat felszínre hozza és egyes helyeken felhalmozza, dúsítja az urán bomlási sorában található radioaktív izotópokat tartalmazó anyagokat, amelyek a felszínen megnövekedett sugárzást, illetve radioaktív kibocsátást eredményeznek. Az uránbányászathoz, illetve a feldolgozási lépésekhez köthető radioaktív hulladékok fő összetevői a természetes uránizotópok és a vele szinte minden esetben együtt előforduló természetes töríum, illetve ezek bomlási sorainak tagjai.

Uránérc feldolgozása

A kitermelt érc urántartalmának kinyerése hidrometalurgiaii módszerekkel történik, azaz az érc savas vagy alkalikus oldatokkal való kezelésével. Az eljárás nagymértékben függ az uránt tartalmazó ásványok jellegétől, az érc minőségétől és az általános ásványi összetételétől.

Uránérc dúsítása

Az atomerőmű felépítésétől, valamint a moderátor anyagától függően a természetes urán 0,72%-os ^{235}U tartalmát a legtöbb üzemanyagpushoz dúsítással 3-4%-ra kell növelni, hogy a reaktorok üzemanyagához szükséges dúsított uránt kapjunk. A fennmaradó szegényített uránt – nagyon nagy, $18,7 \text{ kg/dm}^3$ sűrűsége miatt – például a hadiipar használja fel lövedékek és páncélzat készítésére. Az ^{238}U radioaktivitása elha-

nyagolható, viszont az urán toxikus nehézfém (főleg vesekárosító hatása van). A szegényített urán a jövőben az új típusú gyorsreaktorok üzemanyagaként is alkalmazható lesz.

Fűtőelemtípusok hulladékai

A különböző reaktorok többféle üzemanyagot alkalmaznak: természetes izotóparányú urán-dioxid (UO_2) üzemanyagot például a nehézvízes (D_2O) nyomottvízes reaktor használ; a MOX (mixed oxide fuel, vegyes oxid üzemanyag), azaz UO_2 és PuO_2 keveréket tartalmazó üzemanyagot alkalmaznak például európai nyomottvízes reaktorokban; dúsított UO_2 üzemanyagot használ a könnyűvízzel (H_2O) működő atomreaktorok túlnyomó része, például forralóvízes reaktorok (BWR) és a nyomottvízes reaktorok (PWR) többsége, ilyenek a Pakson működő VVER-440 blokkok is.

Az atomerőmű üzemi hulladékai

Az atomreaktorok működése során keletkező radioaktív anyagokat a keletkezés módja szerint csoportokba soroljuk: hasadási termékek, urán és transzurán aktivációs termékek, fém szerkezeti anyagok aktivációs termékei, beton szerkezeti anyagok aktivációs termékei, vízkémiai aktivációs termékek.

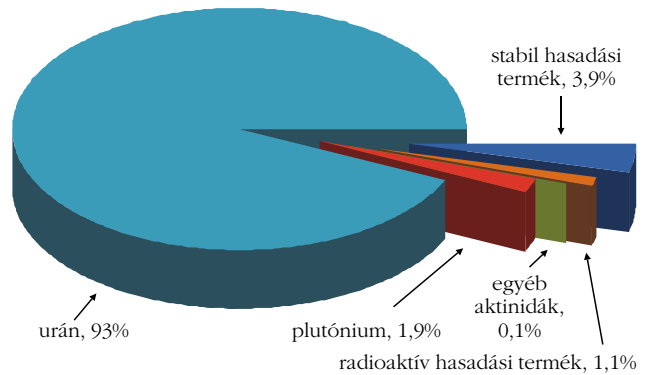
Az atomerőműben keletkező kiégett üzemanyag

A kiégett üzemanyagot a legtöbb, reaktort üzemeltető országban a szabályozásban és a gyakorlatban is megkülönböztetik a radioaktív hulladékoktól, mivel további felhasználásuk lehetséges. A jelenleg működő atomerőművek többségében urándioxid-tablettákból álló üzemanyagot használnak. Az üzemelés során végbemenő hasadás és aktiváció eredményeként az üzemanyag összetétele jelentősen átalakul. A kiégett üzemanyag három fő elemcsoportból áll.

A kiégett üzemanyag tömegének nagy részét az urán két izotópjá adja; a hasadóképes ^{235}U izotóp kezdeti dúsítása a friss üzemanyagban jellemzően 3-5%, a kiégett üzemanyagban az ^{235}U koncentráció csökken ($> 1\%$), ezért az üzemanyagot tovább használni már nem gazdaságos. A friss üzemanyag urántartalmának 95-97%-át kitevő 238-as tömegszámú izotóp gyakorlatilag csak gyors neutronok hatására hasad. A szóba jöhető valamennyi jelenlegi és tervezett, illetve építés alatti atomerőművi blokkban a termikus neutronok felhasználása van túlsúlyban, így ez az izotóp gyakorlatilag csak neutronbefogás útján fog.

A reaktorban végbemenő láncreakció során az elhasadó atommagokból *hasadási termékek* keletkeznek, amelyek jellemzően a 95-ös és a 140-es tömegszám körüli tartományba esnek. A hasadási termékek között vannak radioaktív és stabil izotópok is.

Az ^{238}U -ból és más izotópokból neutronbefogás és radioaktív bomlások útján *aktinoidák* keletkeznek (az aktinoidák a 89-es és a 103-as rendszám közé eső atomok). Legnagyobb mennyiségben hasadóképes



1. ábra. Az 50 MWd/kgU kiégésű UO_2 üzemanyag jellemző összetétele.

^{239}Pu keletkezik, amely a kiégés végén hasonló mennyiségben hasad, mint az ^{235}U . A kiégett üzemanyag tárolása szempontjából legjelentősebb aktinoidák: a neptúnium, az amerícium és a kúrrium.

Az atomerőművekben felhasznált üzemanyag állapotát a kiégés mértékével jellemezzük, amely megadja, hogy egységnyi tömegű uránt (vagy uránt és plutóniumot) tartalmazó üzemanyagból mennyi energiát nyertek ki (MWnap, azaz MWd egységben) a reaktorban eltöltött idő alatt. Egy 50 MWd/kgU kiégésű üzemanyag jellemző összetételét mutatja a 1. ábra [4]. A radioaktív izotópok bomlásával újabb stabil izotópok keletkeznek, ezért a radioaktív izotópok részaránya folyamatosan csökken a tárolás során.

Az atomreaktor teljesítménye és a felhasznált üzemanyag dúsítása meghatározza az üzemelés során keletkező kiégett üzemanyag mennyiségét. Minél nagyobb teljesítményű egy atomerőművi blokk és minél kisebb az üzemanyag dúsítása, annál több kiégett üzemanyag keletkezik. A kiégés növelésével egy adott reaktornál csökkenthető a kiégett üzemanyag tömege. Egy 1000 MW teljesítményű blokk 60 éves üzemelése során körülbelül 1000-1500 tonna kiégett üzemanyag keletkezik.

Az üzemanyagban csak kis tömegben található aktinoidák szerepe fontos, hiszen a kiégett üzemanyag radiotoxicitásának nagy részét már az üzemidő vége után néhány évtizeddel ezek az izotópok adják.

Az urán és plutónium izotópjainak eltávolítása a kiégett üzemanyagból jelentősen csökkenti a hulladék radiotoxicitását. Ha az összes aktinoida eltávolítható lenne a hulladékból, akkor már 350 év után a természetes uránérc radiotoxicitásával megegyező lenne a hulladék radiotoxicitása. A kiégett üzemanyag relatív radiotoxicitása a kiégett üzemanyag egységnyi urántömegre jutó radiotoxicitásának és az egységnyi tömegű uránt tartalmazó természetes érc radiotoxicitásának aránya.

A kiégett fűtőelemben található radioaktív komponensek radioaktív bomlása következtében még hosszú időn keresztül hőfejlődés lép fel. A bomláshő számolásánál feltételezik, hogy a fűtőelem-kazettákat 3 évig tartják pihentető medencében, majd reprocesszálják. A reprocesszási folyékony hulladékokat egy évig pihentetik vitrifikálás (üvegesítéssel) kondicio-

nálás, szilárdítás) előtt. Így a vitrifikált hulladékok hőtermelési görbéje 4 évvel később kezdődik, mint a kiégett fűtőelemké.

A nyílt üzemanyagciklus

A reaktorból kikerült kiégett fűtőelemek rövid felezési idejű izotópjainak nagy része a pihentető medencében töltött idő alatt lebomlik, ezáltal csökken a fűtőelemek hőtermelése is. A végleges nagy aktivitású radioaktív hulladéktároló szempontjából csak az ezután is jelentős aktivitású izotópok fontosak. A fűtőelemek közvetlenül, feldolgozás nélkül kerülnek végleges elhelyezésre, ez esetben a kiégett fűtőelemeket nagy aktivitású radioaktív hulladéknak (HLW) tekintjük. Ezt a folyamatot nyílt üzemanyagciklusnak nevezik, lásd hátsó fedlapon felül. A nyílt üzemanyagciklus során elveszítjük az üzemanyagban lévő, nem elhanyagolható mennyiségű hasadóanyagot. Ez a feldolgozás nélkül elhelyezett hulladék nagy aktivitású és számottevő hőtermeléssel rendelkezik. A kiégett kazetták radiotoxicitása a természetes urán radiotoxicitását csak több százezer év után éri el. A kiégett üzemanyag végleges elhelyezésére elfogadott megoldás a mélygeológiai tárolók létesítése, ezeket olyan geológiai formációkban kell kialakítani, amelyek nagyon hosszú ideig biztosítják, hogy az ott elhelyezett radioaktív anyagok ne jussanak ki a bioszférába.

A zárt üzemanyagciklus

A reaktorból kikerült kiégett fűtőelemeket újra feldolgozzák, amelyet reprocessálásnak nevezünk. E folyamatnak két fontos előnye van: a kiégett üzemanyagból kinyerjük a hasadóképes izotópokat, így jelentősen csökkenthető a nagy aktivitású hulladékok mennyisége, aktivitása és radiotoxicitása.

A jelenleg ismert és ipari méretekben alkalmazott technológiával a fűtőelemekből kinyerik az uránt és a plutóniumot, amelyekből MOX fűtőelemeket gyártanak (hátsó fedlapon alul), a többi összetevő pedig

közepes aktivitású radioaktív hulladékként végleges tárolóba kerül, amelynek a radiotoxicitása néhány tízezer év alatt eléri a természetes uránércre jellemző szintet. Zárt üzemanyagciklust feltételezve a világ összes atomerőművében a végleges elhelyezésre szánt radioaktív hulladék térfogata 75%-kal, radiotoxicitása 90%-kal csökkenne a kiégett üzemanyag közvetlen elhelyezéséhez képest. Az újrafeldolgozással a természetes urán üzemanyaggyártásra felhasználása 25%-kal lenne csökkenthető [4].

Az atomerőmű leszerelési hulladékai

Az eddig lebontott atomerőművek leszereléskor keletkezett nagy aktivitású hulladékok végleges elhelyezésére még nincs példa. Egyrészt még nem működik mélygeológiai tároló, másrészt a nemzetközi tapasztalatok szerint a reaktortartály és az egyéb nagy aktivitású hulladékként számon tartott alkatrészek nem aktiválódtak fel olyan mértékben, hogy elhelyezésük csak a kiégett üzemanyag lerakására tervezett létesítményekben lenne megoldható.

Az üzemeltetés során elsősorban a reaktorból kivett komponensek (szabályozó kazetták abszorbensei, közbenső rudak, termoelemek stb.) felületein mérhető olyan mértékű dózisteljesítmény, amely miatt ezeket nagy aktivitású hulladékként kell kezelni.

A radioaktív hulladékok kezeléséről és tárolásáról, valamint a hazai helyzetről a szeptemberi számban megjelenő 2. részben lesz szó.

Irodalom

1. International Commission on Radiological Protection: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP #103, 2007
2. CXVI. törvény az atomenergiáról, 1996.
3. Országos Atomenergia Hivatal: Országos Atomenergia Hivatal hivatalos honlapja. <http://oah.hu>
4. Breitner D., Fábrián M., Hózer Z., Kókai Zs., Török Sz., Zagyvai P.: *A nukleáris üzemanyagciklus radioaktív hulladékai*. 2013.

Jobb egy mentőötlet mint öt mentő egylet

– írta Karinthy Frigyes az egyletistápolás margójára.

**Most Társulatunknak lenne szüksége
egyletmentő ötletekre!**



**Ezek az ötletek nem vesznek el,
ha a <http://forum.elft.hu>
linken, az ELFT stratégiai vitafórumán adjuk elő.**

