

Atomenergia és biztonság

Bevezetés

Az atomenergia a XX. században kifejlesztett energia-előállítási technológia, amelynek két formáját fejlesztjük. Az egyik a legnehezebb atommagok önfenntartó hasadásán, a másik a legkönnyebb atommagok egyesülésén (fúzióján) alapul. Az energiaátalakítás e két formája rendelkezik a legnagyobb energiasűrűséggel (tömegegységre vonatkoztatott energiafelszabadulással). A hasadás a természetben csak speciális körülmények között valósul meg, míg a fúzió igen gyakori, a csillagokban lejátszódó folyamat, amelynek önfenntartó földi megvalósítása még nem sikerült. A hasadást az atomreaktorok nevezett berendezésben leggyakrabban villamos energia termelésre használjuk, a fúziót leginkább a tokamak elnevezésű berendezésben tudjuk létrehozni. Mindkét energiaátalakítási forma a résztvevő anyagok tömegcsökkenése árán állítja elő az energiát hőfelszabadítás formájában, amelyet turbina meghajtásával alakítunk át villamos energiává. Mindkét folyamatban radioaktív atommagok is keletkeznek. Ezek környezetbe való kijutásának megakadályozásával biztonságos üzemelés érhető el, amelyet a biztonsággal foglalkozó szakemberek folyamatosan fejlesztenek.

Egyes nagy tömegszámú atommagok (pl. ^{235}U vagy ^{239}Pu) önfenntartó hasadása a folyamatban keletkező 2-3 neutron segítségével történik az ún. kritikus rendszerekben. E rendszereket úgy kell kialakítani, hogy a veszteségek után átlagosan mindig egy neutron hozzon létre egy újabb hasadást. Ezt a berendezésben neutronokat elnyelő (abszorbens) szabályozórudak mozgásával érik el, amelyeket a reaktor aktív magjában helyeznek el. Az atomreaktorok legújabb, ún. három plusz generációs fajtái leggyakrabban 1-2 GW_e elektromos teljesítménnyel gyártják, kb. 30-33% hatásfokkal. Folyamatban van az ún. negyedik generációs (GEN4) reaktorok fejlesztése. Ezeket (a hagyományos, ún. termikus neutronokat alkalmazó reaktorokkal szemben) gyors neutronokkal üzemeltetik. A GEN4 reaktorokban a termikus neutronok befogása drasztikusan lecsökken, ezért kevesebb nagy radioaktivitású nehéz aktinoida (90 és 103 közötti rendszámú kémiai elem) keletkezik, és még a korábban keletkezett nehéz aktinoidák is hasíthatók. A paksi erőmű működéséről a következő honlapon található további információ: <http://www.atomeromu.hu/hu/rolunk/technika/HogyMukodik/Lapok/default.aspx>.

A fúziós erőművek működéséről pedig az alábbi honlap ad áttekintést https://hu.wikipedia.org/wiki/F%C3%BAzi%C3%B3s_reaktor. Itt érdemes a JET (Egyesített Európai Tórusz) és az ITER (Nemzetközi Termonukleáris Kísérleti Reaktor) wikipédiás honlapjára (a Fordítás címszó alatt) és a saját honlapjára <http://www.iter.org/> ráklikkelni.

A hazai termelésben résztvevő atomerőművek, még hagyományos, második generációs erőművek, amelyek akár az üzemelés, akár a leszerelés során különböző aktivitású hulladékot

eredményeznek. A biztonságos üzemeltetés mellett az atomerőművek másik kulcskérdése a radioaktív hulladékok biztonságos kezelése, tárolása.

Radioaktív hulladékok és besorolásuk

Radioaktív hulladéknak azokat a radioaktivitást tartalmazó anyagokat tekintjük, amelyek további felhasználásra már nem alkalmasak, illetve amelyek felhasználójának, birtokosának nincs szándékában azokat a távolabbi jövőben sem újrahasznosítani. Magyarországon az 1996-ban elfogadott CXVI. törvény, a „**második atomtörvény**” szerint a radioaktív hulladékok végleges elhelyezéséről való gondoskodás állami feladat, melynek költségeit – lehetőség szerint – a radioaktív hulladék keletkezését előidéző létesítménynek kell viselnie. Igen fontos, hogy a fenti megfogalmazás szerint nem radioaktív hulladék az atomreaktorok, atomerőművek használt, „kiégett” fűtőeleme, mert az még újrahasznosítható, bár a használt fűtőelemek feldolgozási eljárása, az úgynevezett *reprocessálás* csak az atomfegyverekkel rendelkező országok előjoga.

A radioaktív hulladékokat igen sokféle kategóriába, csoportba sorolják, e tekintetben a nemzetközi gyakorlat sem egységes. A magyarországi szabályzás alapja a 14344. számú, először 1989-ban megjelent, majd 2004-ben módosított szabvány, valamint a már említett atomtörvény végrehajtási utasításai között kiadott 23/1997. számú népjóléti miniszteri rendelet, amit az egészségügyi, szociális és családügyi miniszter 2003-ban megjelent rendelete módosított. A szabvány, illetve a miniszteri rendelet az **osztályozás** alábbi szempontjait említi meg:

- halmazállapot szerint: szilárd, biológiai eredetű, folyékony és nem tűzveszélyes, folyékony és tűzveszélyes, valamint légnemű radioaktív hulladékok;
- hőfejlődés szerint: kis és közepes aktivitású radioaktív hulladéknak minősül az a hulladék, amelyben a hőfejlődés az elhelyezés (és tárolás) során elhanyagolható, míg nagy aktivitású az a hulladék, melynek hőtermelését figyelembe kell venni;
- aktivitáskoncentráció szerint: kis, közepes és nagy aktivitású radioaktív hulladékok;
- a hulladékban jelenlévő radionuklidok (sugárzó atomfajták) felezési ideje szerint: rövid, közepes és hosszú élettartamú radioaktív hulladékok.

A hulladék halmazállapota szerinti felosztás elsősorban a hulladékfeldolgozás és -elhelyezés szempontjait tükrözi. Megkülönbözteti a teljesen eltérő kezelést igénylő szerves és vizes alapú oldatokat, valamint kiemeli a biológiai eredetű hulladékokat, amelyek – elsősorban kísérleti állatok tetemei, használt táptalajok, tenyészetek – bomlásuk révén kémiaiag agresszív, korrozív vegyületeket hoznak létre, és fokozott terhelést jelentenek a hulladéktároló anyagaira nézve.

A **kis aktivitású hulladék** kategóriájának alsó korlátját nem a szabvány, hanem egy magasabb rendű jogszabály határozza meg. Ez ebben az esetben az előbbiekben említett miniszteri rendelet, amely a gyakorlatban előforduló mesterséges és természetes eredetű radioaktív izotópokra mentességi szinteket állapított meg. A **mentességi szintek** fogalmi körének és számértékeinek meghatározásakor a rendelet kidolgozói lényegében átvették a nemzetközi,

ezzel együtt az európai gyakorlatban elfogadott sugárvédelmi ajánlásokat, azaz a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség által 1994-ben elkészített „Nemzetközi Biztonsági Alapszabályzat - Az ionizáló sugárzások elleni védelem és a sugárforrások biztonsága (IBSS#115.)” című kiadvány vonatkozó fejezeteit. A mentességi szint ennek értelmében kettős fogalom, aktivitásként (kBq) és aktivitáskoncentrációként (kBq/kg) is értelmezhető. Ha egy tárgy vagy anyag aktivitástartalma kisebb a mentességi szintnél, az kivonható az atomtörvény és minden, azzal összefüggő egyéb rendelkezés hatálya alól, tehát radioaktív hulladékként sem kell azt kezelni. A mentességi szint meghatározásának alapja a sugárvédelem dóziskorlátozási rendszere. A mentességi szint alatti mennyiségű radioaktivitás sem külső (a sugárzás veszélyének kitett ember testén kívüli), sem belső (belégzés vagy lenyelés révén *inkorporált*) sugárterhelésként nem jelenthet reális egészségkárosító kockázatot a vele kapcsolatba kerülő egyénekre. Bár sem a rendelet, sem az IBSS nem tartalmazza ezt az explicit dózisszintet, a kockázattal nem járó dózisszint a mentességi szintek megállapításánál alkalmazott értéke évi 0,01 és 0,1 mSv közé tehető. (Összehasonlításként: a magyarországi lakosságot érő, természetes eredetű radioaktivitásból származó dózis évente mintegy 2,4 mSv.)

A szabvány az aktivitáskoncentrációkat tartalmazó táblázata mellett egy hasonló, kifejezetten gyakorlati jellegű kiegészítést is közöl: a hulladékokat tartalmazó göngyölegek felületén mérhető gamma-dózisteljesítmény értéke alapján is meghatározza a hulladékok osztályait. Eszerint kis aktivitású az a hulladék, amelynek felületétől 10 cm-re a dózisteljesítmény 0,3 mSv/h-nál kisebb, nagy aktivitású pedig az, amelynél a dózisteljesítmény 10 mSv/h-nál nagyobb. E felosztás alapján természetesen nem minősíthetők az alfasugárzó nuklidokat is tartalmazó hulladékok, hiszen a kiemelkedően nagy egészségkárosító hatású alfa-sugárzás csekély áthatolóképessége miatt a göngyöleg felületén át nem is lehet mérhető.

A felezési idő alapján történő felosztás még az eddigieknél is szubjektívabb, azaz gyakorlatiasabb. Hosszú élettartamú hulladékok a 30 évnél hosszabb felezési idejűek. Ennél (azaz a ^{137}Cs felezési idejénél) hosszabb felezési idejű nuklidok csak egyes kísérleti és oktatási laboratóriumokban alkalmazott forrásokban, valamint nukleáris reaktorok kimerült fűtőelemeiben vannak jelen a mentességi szintet meghaladó mennyiségben.

Mint említettük, a nemzetközi gyakorlat számos más kategorizálási elvet és rendszert is ismer. Két ilyen, Magyarországon egyelőre nem hivatalosan használt esetet érdemes megemlíteni. A „vegyes hulladék” fogalmával számos országban a radioaktivitásán kívül egyéb, pl. kémiai okból is veszélyes hulladékokat jelölik. Több országban, így az USA-ban és Nagy-Britanniában a nagy aktivitású hulladék fő ismérve nem az aktivitáskoncentráció, hanem az a sajátosság, hogy az ilyen nagy koncentrációjú radioaktív anyagban a bekövetkezett bomlások miatti hőfejlődés fűtőtelteljesítménye eléri a 2 kW/m^3 értéket.

Radioaktív hulladékok kezelésének lehetőségei

A radioaktív hulladékok kezelése igen széles fogalomkört fog át, ennek csak egy része a hulladékok feldolgozása. A teljes folyamat részei az alábbiak:

- a hulladékok összegyűjtése, előzetes minősítése és ideiglenes tárolása;
- a hulladékok szállítása, a hulladékfeldolgozás, melynek részlépései a halmazállapottól és a hulladékok osztályától függenek;
- a feldolgozott hulladék elszállítása és átmeneti tárolása;
- a hulladék végleges elhelyezése.

E csoportok közül a hulladékfeldolgozás és az átmeneti, illetve végleges elhelyezés számos, egymástól élesen különböző eljárást foglal össze.

A **hulladékfeldolgozás** szilárd hulladékok esetén az alábbi eljárásokat jelentheti: tömörítés (prézelés), égetés, rögzítés (kondicionálás, lásd később). Folyékony halmazállapotú, kis és közepes aktivitású hulladékok esetén az elhelyezési költségek csökkentését célzó térfogatcsökkentésre igen sok lehetőség van: alkalmazható az oldatok bepárlása, égetése, a radioaktív komponensek lecsapása, szűrése, extrakciója, ioncseréje is. Valamennyi eljárás közös jellemzője, hogy a keletkező radioaktív anyag kisebb térfogatú és nyilvánvalóan nagyobb aktivitáskoncentrációjú lesz, mint a kiindulási oldat, és az „inaktív” anyagáram meg kell, hogy feleljen a mentességi kritériumoknak.

A térfogatcsökkentést szilárdítás (kondicionálás) követi. Vizes alapú oldatokat általában cementezéssel, szerves alapúakat bitumenezéssel szilárdítanak. Bár a szilárdítás nyilvánvalóan térfogat növekedéssel jár, azaz rontja a későbbi elhelyezés gazdaságosságát, mégis szükséges, hiszen meg kell akadályozni a hulladékban lévő radioaktív izotópok kikerülését a környezetbe.

Újabb, elsősorban közepes és nagy aktivitású hulladékoknál gazdaságos kondicionálási eljárás az üvegesítés (vitrifikáció). Ennek során a szilárd (vagy megszilárdított) hulladékot olvasztott üvegmasszába keverik, amely megszilárdulva a többi eljárásnál sokszorta hatékonyabban rögzíti a radioaktív szennyezést. Igen fontos, hogy az üveg különleges szerkezete ellenáll a nagy aktivitású hulladékok esetében nem elhanyagolható hőfejlődésnek is.

A kiégett fűtőelemek feldolgozása, a reprocessálás újrahasznosításra alkalmatlan, nagyaktivitású melléktermékei is hulladékként kezelendők. A fenti eljárásokon kívül ezen anyagokkal kapcsolatban egy különleges, nukleáris reaktort igénylő feldolgozási módszerrel is kísérleteznek, a *transzmutációval*, ami a hosszú felezési idejű radionuklidok neutronbesugárással történő átalakítását jelenti.

A **kiégett fűtőelemek újrahasznosításának** területén további fejlődés várható. Még fokozottabban igaz ez a hulladékok viselkedésének, környezetbe való kikerülésének és ottani terjedésének tudományára. Ezért jelenleg a legtöbb állam nem tartja indokoltnak és gazdaságosnak a kiégett fűtőelemek végleges elhelyezését. A kiégett és újrahasznosításra egyelőre nem szánt fűtőelemeket ezért a sugárvédelmi biztonságnak megfelelően kialakított, általában 50 évre tervezett élettartamú átmeneti tárolókban helyezik el.

A **Földön keletkező radioaktív hulladék térfogatának 99%-a kis és közepes aktivitású**, ezek végleges elhelyezése igen jelentős és költséges feladat. A tárolók két típusa ismeretes: a felszín közeli (legfeljebb 15-30 m mélységű) és a felszín alatti (mélységi, geológiai, legalább 300 m mélységű) hulladéktárolók. Európa két legnagyobb tárolója, L'Aube (Franciaország, 1 millió m³) és Drigg (Anglia, 800 ezer m³) felszín közeli tároló.

Magyarország jelenleg két üzemelő radioaktív hulladéktárolója van. Püspökszilágyon (5000 m³) felszín közeli tároló működik. A paksi atomerőmű kis és közepes aktivitású hulladékainak elhelyezésére Bataapatiban épült meg a Nemzeti Radioaktív Hulladék-tároló, ahová az első vasbeton konténer elhelyezésére 2012. december 5-én került sor. A nagy aktivitású hulladékok végleges tárolására mélygeológiai tároló építését tervezik, a terület geológiai, hidrológiai, a kőzet geokémiai-kémiai-fizikai vizsgálata jelenleg is folyik. A radioaktív anyagok tárolásával Magyarországon a Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Nonprofit Korlátolt Felelősségű Társaság foglalkozik, melynek a honlapja <http://www.rhk.hu/>.