

szer biokompatibilitásának javításához, így mód van arra, hogy megvalósuljon például a tervezett, hosszú idejű hatóanyag-leadás.

A célba juttatás szintén a részecske felületén végrehajtott kémiai, biológiai módosítás, amelynek során specifikus felismerő molekulákat rögzítenek a felszínre, amelyek segítik a részecske felhalmozódását a kíván szervben, vagy sejtek környezetében.

Mindebből kitűnik, hogy a gyógyszerhordozó nanorészecskék igen komplex rendszert alkotnak, aminek egy még összetettebb rendszer, az élő szervezet körülményei között kell teljesítenie. Azokban a példákban, amiket röviden említettünk, ennek főleg egy jellemzőjét, a méretet igyekeztünk megragadni, ami nyilván egyszerűsítés, bár jelenlegi tudásunk szerint a méret és méreteloszlás sok szempontból meghatározó paraméter.

Köszönetnyilvánítás

Az általunk előállított polimer gyógyszerhordozók méretének és méreteloszlásának meghatározása az ELTE TTK Quanta 3D pásztázó elektronmikroszkópjával történt. Köszönjük a minták előkészítéséhez nyújtott segítséget, valamint a mérések szaksterü elvégzését.

A tanulmány az Európai Unió támogatásával és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával készült, a támogatási szerződés száma TAMOP 4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0003.

Irodalom

1. Bhaskar, S., Tian, F., Stoeger, T., Kreyling, W., de la Fuente, J. M., Grazú, V., Borm, P., Estrada, G., Ntziachristos, V., Razansky, D.: Multifunctional Nanocarriers for diagnostics, drug delivery and targeted treatment across blood-brain barrier: perspectives on tracking and neuroimaging. *Particle and Fibre Toxicology* 7/3 (2010) 1–25.
2. Legrand, P., Lesieur, S., Bochot, A., Gref, R., Raatjes, W., Barratt, G., Vauthier, C.: Influence of polymer behaviour in organic solution on the production of polylactide nanoparticles by nanoprecipitation. *Int. J. Pharmaceutics* 344 (2007) 33–43.
3. Huszti Zs., Kálmán M.: *Glia*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2008.
4. Faragó Eszter: *A vér-agy gát szelektivitásának molekulaszervezeti alapjai és nanotechnológiai hasznosításuk a permeabilitás elősegítésére*. Diplomadolgozat, ELTE Kémiai Intézet 2011.
5. www.nanomi.com Nanomi B.V. Zutphenstraat 51 7575 EJ Oldenzaal The Netherlands
6. Wang, F. J., Lee, T. K. Y., Wang, C. H.: Controlled Release Devices for Chemotherapy and Radiotherapy Applications. *Biomaterials*, 23 (2002) 3555–3566.
7. Fessi, H., Puisieux, F., Devissaguet, J.-P., Ammoury, N., Benita, S.: Nanocapsule formation by interfacial polymer deposition following solvent displacement. *Int. J. Pharmaceutics* 55 (1989) R1–R4.
8. Pribransky Kinga: *Kolloidális gyógyszerhordozó előállítása nanoprecipitációval*. TDK dolgozat, ELTE Kémiai Intézet, 2010.
9. Kiss É. D. Schnöller D., Pribranská K., Hill K., Péntes Cs. B., Horváti K., Bősze Sz.: Nanoencapsulation of antitubercular drug isoniazid and its lipopeptide conjugate. *J. Dispers. Sci.* 2011.
10. Wang, J., Chua, K. M., Wang, C. H.: Stabilization and encapsulation of human immunoglobulin G into biodegradable microspheres. *J. Colloid Interfacial Sci.* 271 (2004) 92–101.
11. Csemesz F., Puskás L.: Controlling the Physical Stability of Liposomal Colloids. In *Colloid Stability and Application in Pharmacy*. (Ed: Th. F. Tadros) Wiley-VCH, 2007. Colloids and Interfaces Science Series, vol 3.

A PAKSI ATOMERŐMŰ KIS ÉS KÖZEPES AKTIVITÁSÚ RADIOAKTÍV HULLADÉKAINAK MENNYISÉGI ÉS MINŐSÉGI ELEMZÉSE

Horváth András
ELTE TTK Fizikai Intézet

Jelen írásban a Paksi Atomerőműben keletkező kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok forrásait, mennyiségi adatait tekintem át. Becslést végzek a következő években keletkező hulladékok várható mennyiségére. Megvizsgáltam, hogy a 2003-as súlyos üzemzavar hatására miként változott meg, valamint a teljesítménynövelés hatására hogyan fog megváltozni a hulladékok mennyisége. A cikk végén pedig becslést adok a hulladékos hordók felületi dózisteljesítményére.

A Paksi Atomerőmű névleges villamos teljesítménye a teljesítménynövelési program 2009. novemberi befejezésével már 2000 MW. Ezzel Magyarország villamosenergia-termelésében meghatározó szerepet tölt be, annak mintegy 40%-át adja.

2010-ben a Paksi Atomerőmű négy blokkja összesen 15761 GWh villamos energiát termelt. A megtermelt 1 kWh villamos energia értékesítési ára 2010-ben 11 forint 16 fillér volt. Az atomerőmű az egyéb villamos energiát termelő erőművekkel összehasonlítva (üzemszerű működés esetén) a legkevésbé környezetszennyező, nem bocsát ki szén-dioxidot. Így a Pak-

si Atomerőmű Magyarország számára mind energetikai, mind környezetvédelmi, mind pedig gazdasági szempontból nélkülözhetetlen [1].

Az elemzés fontosabb célkitűzései a következők:

1. A Paksi Atomerőműben keletkező kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok forrásainak áttekintése.

2. Az eddigi adatok alapján annak megvizsgálása, hogy milyen biztonsággal becsülhető a hulladékok mennyiségének növekedése a következő években.

3. A 2003-as súlyos üzemzavar elemzése a kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok keletkezésének szempontjából.

4. Annak becslése, hogy a teljesítménynövelés milyen hatással lesz a kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok mennyiségére.

A tanulmány alapvetően forráselemzés, de tartalmaz saját számolásokat a hulladék keletkezés üteméről, a 2003-ban bekövetkezett üzemzavar elemzéséről, a teljesítménynövelés hatásáról a radioaktív hulladékok mennyiségére, valamint a hulladékcsoomagok felületi dózisteljesítményéről.

A radioaktív hulladékok definíciója

Radioaktív hulladékoknak azokat a radioaktivitást tartalmazó anyagokat tekintjük, amelyek további felhasználásra már nem alkalmasak, illetve azok felhasználójának, birtokosának nincs szándékában azokat a jövőben sem újrahasznosítani.

Magyarországon a radioaktív hulladék definícióját az MSZ 14344 számú 1988-as szabvány adja meg. Eszerint a radioaktív hulladék „olyan hulladék anyag, amely a sugárvédelmi jellemzők alapján nem kezelhető közönséges hulladékként.”

Radioaktív hulladék alatt értendő tehát minden, további felhasználásra nem szánt, ipari, mezőgazdasági, egészségügyi, oktatási vagy kutatási tevékenységből származó radioaktív anyag. [2]

A radioaktív hulladékok kategorizálása

A radioaktív hulladékokat nagyon sokféle kategóriába, csoportba sorolják, e tekintetben a nemzetközi gyakorlat sem egységes. A legtöbb országban a hulladékok pontos kategorizálásának fontos gyakorlati jelentősége van, mivel a különböző csoportba tartozó hulladékok más-más módon kerülnek átmeneti tárolásra, majd végleges elhelyezésre.

Magyarországon a radioaktív hulladékok osztályozása az alábbi szempontok alapján történik:

- Halmazállapot szerint
- Hőfejlődés szerint
- Felezési idő szerint
- Felületi dózisteljesítmény szerint
- Aktivitáskoncentráció szerint

A kis aktivitású hulladékok egészségkárosító hatása nagyon alacsony. (A kategória alsó határát nem szabvány, hanem egy magasabb rendű jogszabály határozza meg.)

Amennyiben a hulladék egy bizonyos szintnél már kisebb veszélyt jelent a környezetre, abban az esetben nem kell szabályozást alkalmazni. Ekkor a hulladék kivonható az atomtörvény alól, tehát nem kell radioaktív hulladékként kezelni. Ezeket a szinteket nevezzük *mentességi szint*eknek. A mentességi szint fogalma 1997-ben került be a magyar törvénykönyvbe a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) ajánlása alapján.

A mentességi szint aktivitásként (kBq) és aktivitáskoncentrációként (kBq/kg) is értelmezhető. A mentességi szint meghatározásának alapja a sugárvédelem dóziskorlát rendszere. Külön táblázatokban adják meg az értékeket, izotóponként, aktivitásban és aktivitáskoncentrációban. A mentességi szint alatti radioaktivitás sem külső (a sugárzás veszélyének kitétt 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 (NAÜ Nemzetközi Biztonsági Alapszabályzat) nem tartalmaz explicit dózisszintet, az alkalmazott érték (0,01 – 0,1) mSv/év.

A gyakorlatban a mentességi szint ismeretében is szokták aktivitáskoncentrációk szerint besorolni a radioaktív hulladékokat:

$$S = \sum_i \frac{AK_i}{MEAK_i},$$

ahol S a veszélyességi mutató („hazard index”), $MEAK_i$ az i -edik radioizotóp mentességi aktivitáskoncentrációja (kBq/kg), AK_i az i -edik radioizotóp aktivitáskoncentrációja (kBq/kg).

S különböző értékei szerinti kategóriák:

- kis aktivitáskoncentrációjú: $S \leq 10^3$,
- közepes aktivitáskoncentrációjú: $10^3 < S \leq 10^6$,
- nagy aktivitáskoncentrációjú: $S > 10^6$.

A Paksi Atomerőmű kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékainak fajtái és formái

A szilárd radioaktív hulladékok forrásai

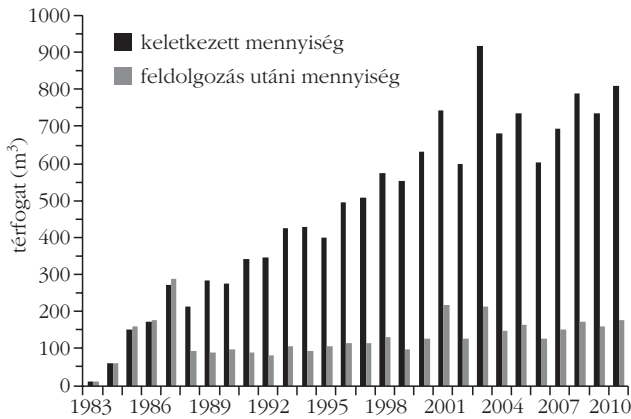
Az atomerőműben az üzemeltetés során keletkezett kis és közepes aktivitású szilárd radioaktív hulladékok főbb forrásai a következők: az üzemeltetés és a karbantartás során keletkezett úgynevezett „puha” hulladékok (például ruhák, egyéni védőfelszerelések, fóliák, rongyok). Elhasználódott és felaktíválódott, vagy felületileg szennyezett szerelvények, berendezések, átalakításból származó építési anyagok (például betontörmelék, faanyag, üveg...). Karbantartó műhelyekben képződött fémhulladékok, elhasznált szerszámok, gáztisztító rendszerek elhasznált szűrői [3].

A szilárd radioaktív hulladékok gyűjtése

Az atomerőmű ellenőrzött zónájának épületeiben a keletkező szilárd hulladékok kezelésének első fázisa a szelektív gyűjtés. Ez már a keletkezés alkalmával szervezetten történik. A szelektív gyűjtésre az atomerőmű belső szabállyal rendelkezik, amelynek betartását rendszeresen ellenőrzik. A megfelelő kezelés érdekében a munkavégzési folyamat megkezdése előtt a helyszínen kellő számú és fajtájú gyűjtőedényt biztosítanak.

A keletkező hulladékokat fémvázra helyezett 50 l-es műanyag zsákba, vagy 200 l-es fémhordókba gyűjtik. A hordók fedelén jól olvashatóan fel kell tüntetni a hordó alfanumerikáját, a hordóba helyezett hulladékok fajtáját (NT – nem tömörített, T – tömörített, HP – „helyreállítási projekt”, a 2003-as súlyos üzemzavar felszámolása közben keletkezett hulladék), a hordó felületi dózisteljesítményét (μ Sv-ben), és a hordó súlyát. (Egy hordóba maximálisan 240 kg tömegű hulladék helyezhető el.)

Ha a hulladék méretei nem teszik lehetővé a közvetlen elhelyezést a gyűjtőedénybe, a feldarabolásról a hulladéktermelő szervezetnek kell gondoskodnia. A tárgyakat olyan méretűre kell darabolni, hogy a 200 l-es hordó optimális térkitöltése és fedelének zárható-sága biztosított legyen.



1. ábra. A szilárd radioaktív hulladékok évenkénti mennyiségi adatai.

A szelektív hulladékgyűjtést követően az alábbi hulladékcsoportok különböztethetők meg: normál hulladék, veszélyes hulladék, valamint ipari hulladék.

A folyékony radioaktív hulladékok összetétele

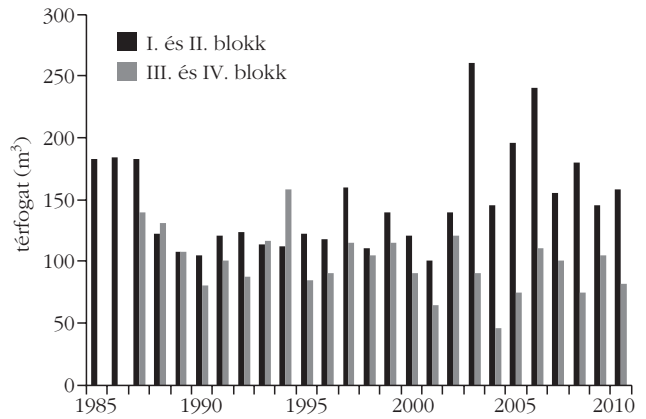
Az atomerőműben az üzemeltetés és a karbantartások során keletkezett kis és közepes aktivitású folyékony radioaktív hulladékok főbb összetevői a következők: bepárlási maradékok, elhasznált primerköri ioncserélő gyanták, elszennyeződött technológiai bórsavoldatok (primerköri szervezetlen szivárgások, leürítések és légtelenítések). Továbbá aktív oldószerkeverékek (mosóbenzin, alkohol, petróleum) és olajok, dekontamináló oldatok (helyiség-, illetve berendezés-dekontaminálások), evaporátorsavazó oldatok, aktív iszapok, primerköri laboratóriumi és mosodai hulladékok, szennyezett zuhanyvizek.

Az atomerőműben a technológiai adottságok és a szelektív hulladékgyűjtés jelenlegi szintje alapján a fentiekben felsorolt folyékony hulladékok gyűjtése és kezelése folyik. A felsorolásban látható első néhány hulladékcsoportot csurgalékvizeknek nevezzük. Potenciális radioaktív hulladék-források még a szekunderkör elszennyeződésekor (gőzfejlesztő-szivárgás) a gőzfejlesztő leiszapolásból származó folyékony hulladékok, az 5. számú víztisztító gyantái, regenerátuma, mosó és lazító vizei, a kondenzátum tisztító gyantái, regenerátuma, mosó és lazító vizei. [4]

A Paksi Atomerőmű kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok mennyiségi növekedésének elemzése

A szilárd radioaktív hulladékok mennyisége

A szilárd radioaktív hulladékok mennyiségét évről-évre az 1. ábra szemlélteti. Külön fel van tüntetve a feldolgozás előtti, és a feldolgozás utáni mennyiség. Az ábrán jól látható, hogy 1988-tól radikálisan csökken a feldolgozás utáni mennyiség, ugyanis ekkor helyezték üzembe a tömörítő berendezést. A 2010. december 31-i állapot szerint az atomerőműben belüli átmeneti tárolókban 8541 db 200 literes hordó kis és közepes aktivitású szilárd radioaktív hulladék található [4].



2. ábra. A bepárlási maradékok mennyiségi adatai évről-évre.

A folyékony radioaktív hulladékok mennyisége

Az atomerőműben tárolt összes folyékony hulladék mennyisége: 6645,6 m³. A teljes rendelkezésre álló tárolókapacitás 10 020 m³ [4]. (Ebben nincs benne az üzemzavari tárolókapacitás, ami összesen 1560 m³.)

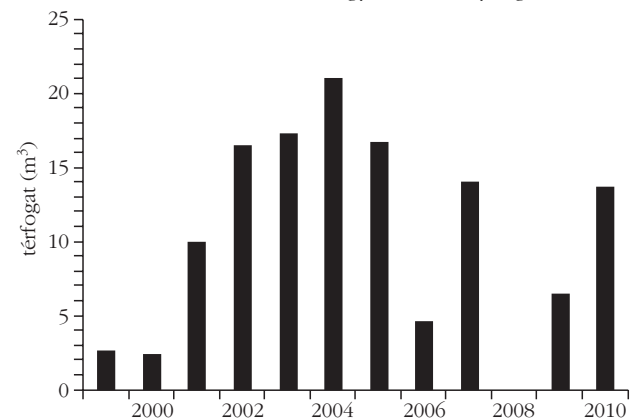
• Bepárlási maradékok

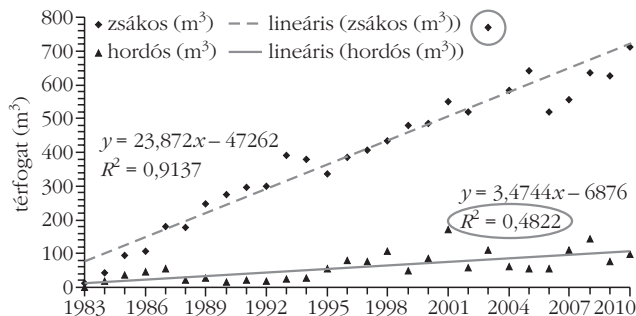
Az atomerőmű üzemeltetése során eddig összesen 5925 m³ bepárlási maradék keletkezett, amelyből 1300 m³ α-sugárzókkal szennyezett. Az eddig keletkezett éves mennyiségeket a 2. ábra szemlélteti.

• Elhasznált primerköri ioncserélő gyanták

A folyékony hulladék-tároló rendszer módosításával az üzemeltetés alatt a gyantákat együttesen tárolják. Az 1999 óta keletkezett gyantamennyiségeket mutatja a 3. ábra. Figyelembe véve az elhasznált gyanták mennyiségét (összesen 169,86 m³) és a rendelkezésre álló tárolókapacitást (870 m³) feltételezhető, hogy a tárolókapacitás elég lesz az atomerőmű teljes élettartama alatt a keletkező gyantamennyiségek átmeneti tárolására (itt már a 20 évvel meghosszabbított üzemidőre vonatkozik a becslés!). Az ábrán jól látható, hogy a 2003-as üzemzavar hatására megnőtt a gyanta mennyisége, de az üzemzavar felszámolása után csökkent a mennyiség. 2001-ig nem történtek szisztematikus gyantatöltetecserék, attól az évtől elkezdtek cserélni, ezért nőtt a mennyiség.

3. ábra. Az 1999 óta keletkezett gyanták mennyiségi adatai.





4. ábra. A zsákos és hordós gyűjtésű hulladékok éves keletkezési üteme. A szürkés körrel jelölt, kiugró adat a 2003-as üzemzavar következménye.

Radioaktív hulladékok keletkezésének üteme

A kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok keletkezési ütemének megállapításához a korábbi évek adatai alapján a képződött hulladékmennyiségek trendjét határoztam meg.

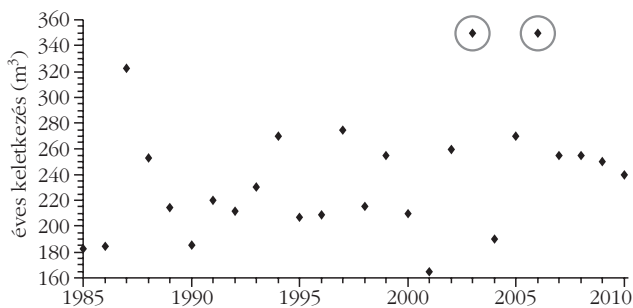
Szilárd hulladékok keletkezési üteme

Az eddigi zsákos és hordós gyűjtésű hulladékok éves keletkezési ütemének változása a 4. ábrán látható. Az adatokra egyenest illesztve, a kapott egyenlemből meghatározható a következő években várható keletkező hulladékmennyiség. Látható, hogy a hordós hulladékok adataira illesztett egyenes korrelációs együtthatója 0,48, ami azzal magyarázható, hogy hordós hulladékok nemcsak a zsákos hulladékok tömörítéséből keletkeznek, hanem zsákba nem helyezhető hulladékokból is, így e hulladéktípus mennyiségi becslése nem végezhető el olyan biztonsággal, mint a zsákos hulladékoké. A kis és közepes aktivitású, kezelt, szilárd radioaktív hulladékok 2037-ig (az erőmű várható leszereléséig) számított átlaga: körülbelül 170 m³/év (850 db 200 l-es hordó/év). (Ebben nincsenek benne a leszerelési hulladékok!)

Folyékony hulladékok keletkezésének üteme

A bepárlási maradékok mennyisége a legnagyobb a folyékony hulladékok közül, így csak e fajta mennyiségi becslését adom meg a cikkben. Az eddig keletkezett bepárlási maradékok éves keletkezési ütemének változása az 5. ábrán látható.

A 2003-as és a 2006-os adatokat is figyelmen kívül kellett hagyni, mert 2003-ban a súlyos üzemzavar során jóval több hulladék keletkezett, mint a normál üzem alatt. (2006-ban távolították el a sérült fűtőelemeket, és az üzemzavar felszámolásakor is jóval nagyobb hulladékmennyiség keletkezett.) Az elhanyagolás hatása az eredmény értékét



5. ábra. A bepárlási maradékok éves keletkezési üteme.

nem változtatta meg jelentősen, de a bizonytalanságot csökkentette. A bepárlási maradékok 2037-ig számított képződési átlaga: körülbelül 250 m³/év.

A 2003. április 10-i súlyos üzemzavar hatása a radioaktív hulladékok mennyiségére

Az 1. táblázat foglalja össze a 2003-as üzemzavarig évente átlagosan keletkező hulladékmennyiségeket, és hasonlítja össze a 2003-ban keletkezett mennyiségekkel. A táblázatból látható, hogy az üzemzavar miatt 2003-ban jelentősen megnőtt a radioaktív hulladékok mennyisége az előző évek átlagához képest.

A növekedés okai a következők: a 2. blokki súlyos üzemzavar következményeként a reaktorcsarnok takarításából, továbbá az AMDA (Automatizált Dekontamináló Berendezés) leszereléséből körülbelül 60 hordó radioaktív hulladék keletkezett. A növekmény további részét döntően az új hulladék felszabadítási eljárásban alkalmazott szigorú aktivitáskorlátok eredményezték.

A 2. blokki súlyos üzemzavar után a gyantatároló tartály folyadékfázisát körülbelül a tárolt gyanta szintjéig leszívatták, és bepárolták azért, hogy a 2. blokki (pihentető medence mögötti) 1. számú akna tisztítására használt 4. számú víztisztító gyanta kirkása során a transzportvíz ne kerüljön a csurgalékvíz-rendszerbe. Ugyanitt olyan átalakítást hajtottak végre, hogy a víztisztítók regenerátumai, mosóvizet a tartály kiiktatásával egyenesen a csurgalékvíz-rend-

1. táblázat									
A 2003-ig évente keletkezett, és a 2003-ban keletkezett hulladékok mennyisége									
	szilárd								folyékony
	nem tömörített				tömörített				
	zsák	hordó	szűrő	iszap	zsák	hordó	szűrő	iszap	
átlagos keletkezés (m ³ /év)	303	60,91	18,4	5,25	69	34,6	6,92	11	131,33
2003-ban keletkezett (m ³)	770	110	30	9	119	75,6	6	18	260
eltérés (m ³)	467	49,09	11,6	3,75	48	41	-0,92	7	128,6

szerbe kerüljenek olyan elgondolásból, hogy a regeneráló oldatok ne regenerálják részlegesen az erősen szennyezett és már kitérőlt gyantákat. Ezáltal elkerülték, hogy az egész csurgalékvíz-rendszert elszennyezzék. A jövőben a tartály már csak gyantát és transzportvizet tárol.

Teljesítménynövelés várható hatása a radioaktív hulladékok mennyiségére

A teljesítménynövelés *nincs* hatással a hulladékok mennyiségére és keletkezési ütemére, mert a hulladékok keletkezése nagyon csekély mértékben függ a reaktorok teljesítményétől. A szilárd hulladékok keletkezési aránya csak az idő függvénye, így a végső összesítésnél nem szükséges figyelembe venni a reaktorok időben változó teljesítményét. A korábban a keletkezés üteménél részletesen tárgyalt folyamat jó becslést ad a hulladékok mennyiségére.

A radioaktív hulladékok összaktivitása

A szilárd hulladékok összaktivitása

A kis és közepes aktivitású hulladékos hordók bizonyos részének izotópszелеktív mérését az erőmű Sugárvédelmi Osztálya végzi. A méréssel ellenőrzött hordók aránya évről-évre növekszik. (1998 előtt 10%, majd 15%, az utóbbi két évben pedig 50% fölött.) Az adatok feldolgozása során a mért aktivitás- és tömegadatokat alapján minden évre meghatározzák a hulladékok aktivitáskoncentrációit a mért izotópokra. Mivel viszonylag nagyszámú mérés történik, ezek jól reprezentálják a teljes képződött hulladék izotópösszetételét, így a koncentrációkat átlagolva, az adott időszakban keletkezett teljes hulladékmennyiségre kiszámíthatók az aktivitások. A 2009-es mérések alapján ez az érték 0,66 TBq-nek adódott.

A folyékony hulladékok összaktivitása

Az atomerőműben összesen 12 tartályban tárolnak bepárlási maradékokat. A 2009-es mérések alapján ezek összaktivitása 10,9 TBq-nek adódott. Az atomerőműben egy-egy tartályban tárolnak dekontamináló oldatokat és evaporátorsavazó oldatokat. A mérések, illetve számítások alapján a dekontamináló oldatok összaktivitása 226 GBq, míg az evaporátorsavazó oldatok összaktivitása 247 GBq [4]. Az elhasznált primerköri ioncserélő gyanták esetében a 4. számú víztisztító tartályból hetente egy-három mérés, az 1. víztisztító tartályból heti-havi gyakoriságú mérés történik. Az aktivitások két tartály¹ között oszlanak meg.

A jelentősebb aktivitások a 4. számú víztisztító rendszer gyantáin halmozódtak fel, mivel a 2003-as üzemzavart követően mind dozimetriai, mind reaktor-

fizikai szempontból kiemelt jelentőségű volt a szennyezett víz megtisztítása. Erre a 4. számú víztisztító használták, így e rendszer gyantáin jóval nagyobb aktivitás kötődött meg, mint normál üzem során. Az atomerőmű izotópleltárát egyértelműen az ioncserélő gyantákon felhalmozódott 2003-as üzemzavarból származó aktivitástartalom határozza meg, ugyanis a 4. számú víztisztító rendszer gyantáinak aktivitása $2,06 \cdot 10^{13}$ Bq!

A többi hulladék térfogata, bár jóval nagyobb, de aktivitásuk együttesen is több nagyságrenddel elmarad a 01TW20B001 tartályban levő gyantáétól.

A hulladékos hordók felületi dózisteljesítményének becslése

A kapott izotópleltár alapján kiszámítható a hordók felületi dózisteljesítménye. A becslés során az a *feltételezés*, hogy az aktivitás eloszlása a hordókban homogén. A hordókban található izotópok kivétel nélkül negatív béta-bomlással bomlanak, amit bomlásonként egy ismert energiájú gamma-foton kibocsátása követ [5]. A felületi dózisteljesítmény számításakor csak a gamma-fotonokat veszem figyelembe, mert a béta-részecskék nem jutnak át a hordó 1,2 mm vastag falán. Első lépésben meghatároztam azt a hordón belüli tartományt, amelyből ki tud jutni a gamma-foton. A foton az anyaggal való kölcsönhatása következtében veszít energiájából. A gyengülés empirikusan jól közelíthető exponenciális függvényvel:

$$I = I_0 e^{-\mu x},$$

ahol x az abszorbens közeg vastagsága (cm) és μ az abszorpciós együttható (1/cm).

Az x távolság meghatározásához ismerni kell az abszorpciós állandó értékét, valamint meg kell mondani, hogy mekkora hibát kívánunk elérni. (A számítás során 10%-os hibával dolgoztam.) A polietilén abszorpciós állandójával számoltam [6], mert a hordókban levő hulladék nagy része polietilén. Így már egyszerűen meg lehet határozni az ismeretlen x értékeket a fenti egyenletről ($\rho_{\text{polietilén}} = 0,93 \text{ g/cm}^3$).

Az átlagos út, amit a gamma-foton megtesz, mielőtt elnyelődik a polietilén-közegben: 3,3 cm, azaz a hordó falától átlagosan ekkora távolságból képes kijutni a gamma-sugárzás. Ismerve a hordó térfogatát meghatározható az a térfogat, amin belülről kijuthat a sugárzás, amelyre $V' = 0,065378 \text{ m}^3$ adódott. Feltételezésem szerint az aktivitáseloszlás a hordókban homogén, így a fent kiszámolt térfogatba jutó aktivitás egyszerűen megadható, és kiszámítható a hordó falát érő sugárzás összes energiája. (A falat a számolt összenergia körülbelül fele éri el, mert a másik fele visszamegy a hordó belsejébe!)

A hordó falát elérő fotonok a hordó falában adnak le energiát a fent részletesen tárgyalt módon. Ezúttal a leadott energia a kérdés, és ismert a megtett út, ami a hordó $x = 1,2 \text{ mm}$ vastag fala. Az abszorpciós állandót

¹ 01TW20B001 és a 02TW10B001 jelű tartályok

ugyanazokra az energiákra határoztam meg, de ez-
úttal vas közegben [6] ($\rho_{\text{vas}} = 7,8 \text{ g/cm}^3$).

Ezek alapján már egyszerűen meghatározható a
hordó falában leadott energia, majd a dózisteljesít-
mény, ami $\sim 300 \mu\text{Gy/óra}$ -nak adódott. Ez jó közelítés-
sel egyezik a mért értékekkel, de nem szabad figyel-
men kívül hagyni, hogy a számítás során többször is
becsléseket végeztem, amelyek természetesen befo-
lyásolják az eredményt.

Következtetések

A munkának négy fő célja volt. Elsősorban a Paksi
Atomerőmű kis és közepes aktivitású radioaktív hulla-
dékai keletkezési ütemének meghatározását, az előre-
jelzés biztonságának vizsgálatát tűztem ki célul. Elő-
ször a korábbi évek adatai alapján becslést adtam a
keletkező hulladék mennyiségére, majd ezt a gondolat-
menetet folytatva a teljesítménynövelés és az üzem-
idő-hosszabbítás hatásait is figyelembe vettem.

Megmutattam, hogy a teljesítménynövelés nincs
komoly hatással a keletkező hulladék mennyiségére.
A hulladék keletkezésének üteme csak nagyon cse-
lély mértékben függ a reaktorok teljesítményétől.

Megvizsgáltam a 2003-ban bekövetkezett súlyos
üzemzavar hatásait a kis és közepes aktivitású radio-
aktív hulladék mennyiségére. Amint a táblázatból
látható, a súlyos üzemzavar során jelentősen megnőtt
a hulladék mennyisége. A zsákos gyűjtésű hulladék
mennyisége közel 150%-kal nőtt, de a többi hulladék-
fajtából is jelentős többlet keletkezett.

Becslést adtam a hulladékos hordók felületi dózis-
teljesítményére, és a kapott eredmény összhangban
van a mért értékekkel, tehát a becslés és a kidolgozott
módszer megbízható.

Irodalom

1. Paksi Atomerőmű Zrt. – Rólunk: <http://npp.hu/rolunk> (letöltés:
április 5.)
2. MSZ 14344-1:2004: Radioaktív hulladékok. Fogalom meghatá-
rások és osztályozás, Magyar szabvány, 112/1. MSZ közzététel
3. Elter E., Feil F.: Üzemeltetésből származó radioaktív hulladékok
helyzete a Paksi Atomerőműben. *Nukleon*, 2010. december
4. *A Paksi Atomerőmű radioaktív hulladékainak kezelése, tárolása
és elhelyezése. Éves jelentés – 2010.* Paksi Atomerőmű Zrt. kiad-
ványa, 2010.
5. D. R. Lide (szerk.): *Handbook of Chemistry & Physics*. 72nd Edi-
tion, Section 16, 25–31.
6. *Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-
Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1
to 92.* <http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm> (letöl-
tés: 2010. 02. 10.)

DIGITÁLIS HOLOGRÁFIA

Gombkötő Balázs, Kornis János
BME Fizikai Intézet, Fizika Tanszék

A *Fizikai Szemle* többször is foglalkozott már hasáb-
jain a holográfiával. Először maga *Gábor Dénes* írt
cikket (1966/10), majd mások mutatták be a holográ-
fia körébe tartozó kutatásaikat (például 1968/2), töb-
bek között a röntgen-holográfiát is két alkalommal
(1997/7 és 2005/3). 2000 júniusában Gábor Dénes
születésének 100. évfordulóján külön is foglalkozott a
Szemle a témával (2000/6), ekkor jelent meg a Nobel-
díj átadáson tartott beszéd, illetve előadás is. Minde-
zidáig azonban nem jelent meg cikk a holográfia digi-
tális és számítógépes változatáról, holott ez az ág is
hamar követte a lézerek megjelenését, és 1994 óta a
digitális CCD-kamerák elterjedésével, valamint az
informatika addig és azóta bekövetkezett fejlődése
révén a reneszánszát éli.

Elsőként röviden áttekintjük a holográfia történetét
és lényeges elemeit, hogy látható legyen a digitális
világba vezető út. Amint azt Gábor Dénes is leírta, két
hullám interferenciamezője, azaz az intenzitáselosz-
lás, képes tárolni egy tárgyról szóródott hullám vala-
milyen értelemben „teljes” információtartalmát, ha a
másik referenciahullám egyszerű és reprodukálható,
például sík vagy gömbhullám, és ha monokromati-
kus, kellően koherens hullámokat alkalmazunk. Ezt
már Gábor elődei is tudták, azonban arra nem gon-
doltak, hogy ez a mintázat diffrakciós elemként hasz-
nálva létre is hozhatja a tárgyhullámot, illetve annak

eléggé pontos mását. 1947–48 táján a kor lehetőségeit
alkalmazva kísérletileg demonstrálták is az elv helyes-
ségét, majd a lézerek megjelenésével, kihasználva
annak nagyfokú koherenciáját, *Lieth*, *Upatnieks* és
Denisyuk révén új erőre kapott a holográfia.

Ekkor már nagyobb fényintenzitás állt rendelkezés-
re, ténylegesen különválasztható lett a tárgy- és refe-
rencianyáláb, nagyobb méretű tárgyakról is lehetett
hologramot készíteni, egy lemezre akár többről is,
előtérbe kerülhettek a diffúz felületű tárgyak, szó szeri-
nt látványos eredmények születtek, és a rövidebb
expozíciós idők révén a mérés technika és az elektro-
nikus detektálás felé is lehetett nyitni.

A jelenből visszatekintve érdemes megjegyezni,
hogy a holográfia egyetemi oktatásában még ma is a
Gábor Dénes 1966-os cikkében is fellelhető egyszerű
egyenletek és szemléltető ábrák használatosak: a né-
hány sorban megadható komplex algebrai alapegyen-
letek a felvételtől és a rekonstrukcióról, valamint az
egyetlen pontforrás síkreferenciával készült holo-
gramján megjelenő Fresnel-zónarendszer, illetve a
rajta végbemenő fényszóródás. Szintén fontos, hogy
Gábor már a kezdetektől hangsúlyozta a holográfia
információtárolási módját és jelentőségét, amelyet
befogadva a ma közembere számára is érthető lehet
az őt leginkább foglalkoztató kérdés egy szép holo-
gram láttán, nevezetesen „mi van akkor, ha eltörik”.