

Mitől biztonságos egy radioaktív hulladék-tároló

Dankó Gyula

Golder Associates (Magyarország) Kft., gdanko@golder.hu

Bóthi Zoltán

Golder Associates (Magyarország) Kft., zbothi@golder.hu

ÖSSZEFOGLALÁS: A radioaktív hulladékok geológiai elhelyezését úgy kell tervezni, hogy az biztosítani tudja mind az üzemviteli, mind a lezárást követő, hosszú távú biztonságot. Az üzemviteli biztonság a megfelelően kialakított műszaki védelmet és az egészségügyi szempontokat figyelembe vevő működési eljárások alkalmazását jelenti. A lezárást követő biztonság azonban olyan elemekre épít (mérnöki és geológiai gátak sorozata), amelyek magukra hagyva, külső hatásoknak is ellenállva, akár többszázézer évig is garantálni tudják az ember és környezete biztonságát. A geológiai elhelyezésnek a következő követelményeket kell kielégítenie: i) valósítsa meg a hulladék bezárását (*containment*), ugyanakkor ii) szigetelje el egymástól a bioszférát és a hulladékot (*isolation*) és iii) lehetőség szerint akadályozza meg, illetve lassítsa az esetlegesen kikerülő radioaktív izotópok terjedését (*delay and retardation*). Az RHK Kft. által irányított NRHT program keretében azonosítottuk ezen biztonsági funkciók helyszín-specifikus összetevőit. Mind a mérnöki, mind a geológiai gát biztonság szempontjából lényeges rendszereleme olyan funkciót lát el, hogy a fentebb említett követelmények valamelyikét részben vagy egészében kielégíti. Végső soron ezek a biztonsági funkciók garantálják a radioaktív hulladék-tároló biztonságosságát.

Kulcsszavak: radioaktív hulladék-tároló, biztonsági értékelés, biztonsági funkció, gránitos kőzet

1 BEVEZETÉS

1.1 A radioaktív hulladékok elhelyezésének szükségessége

Az atomerőmű 4 db VVER-440, V-213 típusú reaktorának jelenlegi beépített kapacitása 1866 MW. A blokkok a magyarországi villamosenergia-termelés 36,8 %-át biztosították 2007-ben (<http://www.atomeromu.hu/uzem/04TeljKihaszn.htm>). Ebből következően az atomerőműben termelt energiával kapcsolatos kérdések kiemelt fontossággal bírnak a nemzetgazdaság szempontjából.

Az utóbbi évek erőfeszítéseinek hatására, egy atomerőmű üzemeltetésének kockázata összemérhetővé vált más – elfogadottabb – hétköznapi esemény kockázatával. A 10^7 - 10^9 éves bekövetkezési valószínűségű katasztrófáknál (pl. Three Miles Island, Csernobil) gyakoribb balesetek éves valószínűsége 10^5 , ami nagyjából megegyezik egy kisikló tehervonat és egy személyszállító vonat ütközésével (3×10^5), ellenben lényegesen kisebb egy gátszakadás 10^3 - 10^4 éves valószínűségénél (VAJDA 1998).

Más a helyzet a radioaktív hulladékok területén. Egyéb ipari tevékenységekhez hasonlóan, az atomerőmű üzemeltetése is hulladék keletkezésével jár. Az atomerőművekben keletkező radioaktív hulladéknak kezelése és ártalmatlanítása valóban kihívás, rendkívüli körülményt kíván. Habár a kis és közepes hulladékok végleges elhelyezésére már 1997-ben is 32 ország talált végleges megoldást (ORMAI 2003), a nagy aktivitású hulladékok, illetve a kiégett fűtőelemek ártalmatlanításának kérdése még mindig nyitott. Többek között ezért is, az atomenergia használata ellen fellépő „zöld szervezetek” egyik támadási célterülete az erőműben keletkezett radioaktív hulladék kérdése, illetve ennek biztonságos ártalmatlanításának megkérdőjelezése (PERGER 2008).

Mind a hazai, mind a nemzetközi tudományos és műszaki közösség szerint a nagyobb aktivitástartalmú radioaktív hulladékok elhelyezésére a geológiai tárolás jelenti hosszú távon a legbiztonságosabb megoldást. Jelen cikk – a nemzetközi szinten elfogadott normák alapján – áttekinti a geológiai elhelyezés elméleti hátterét és ennek magyarországi és azon belül is elsősorban a Bábaapáti külterületén épülő Nemzeti Radioaktív hulladék-tároló (NRHT) megvalósítását. Bár az NRHT csak 250-270 m terepszint alatti mélységben létesül és csak a kis és közepes aktivitású hulladékok elhelyezésére alakítják ki, de a tároló számos jellemzője mélységi (geológiai) elhelyezés jegyeit viseli. Így ennek példáján jól lehet illusztrálni a radioaktív hulladékok geológiai elhelyezésének biztonsági elemeit.

Az Atomenergiáról szóló 1996. évi CXVI. törvény 40. § szerint a radioaktív hulladékok végleges elhelyezéséről a Kormány által kijelölt szerv gondoskodik, mivel ennek megoldása országos érdek. Ez a szerv az 1996-ban megalakított Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft. (továbbiakban RHK), amely 2008. márciusa óta közhasznú, nonprofit Kft-ként működik. Jelen cikkben közöltek – az RHK által irányított – az NRHT megvalósítására irányuló program keretében keletkezett ismereteken alapulnak.

1.2 Az NRHT megvalósításának eddigi eseményei

Az NRHT megvalósításával kapcsolatos munkák 1993-ra nyúlnak vissza (BÁRDOSSY 1998). A telephely kiválasztásával, kutatásával kapcsolatos munkák zömmel a 90-es évek második felében folytak. 2003 végére, kiegészítő kutatással lezárult a felszíni földtani kutatás, amelynek eredményeként 2003-ban a Magyar Geológiai Szolgálat Dél-dunántúli Területi Hivatala elfogadta a telephely földtani alkalmasságát.

A további kutatási programot a Központi Nukleáris Pénzügyi Alappal (KNPA) rendelkező miniszter 2004. szeptemberében jóváhagyta, majd 2005 végén, az Országgyűlés előzetes, elvi hozzájárulást adott a Bábaapáti közigazgatási területén a radioaktív hulladéktároló létesítésére. Ennek a határozatnak birtokában az RHK elkészítette a létesítmény beruházási javaslatát, amelyet az illetékes miniszter 2006. május 18-án jóváhagyott. Ebben az évben meg is indulhatott a beruházás.

A beruházás keretében 2008. áprilisban a lejtaknák hossza elérte a tervezett 1700 métert. A föld alatti tevékenységekkel párhuzamosan elkezdődött a tároló engedélyezési folyamata is, amelynek első fontos lépése a környezetvédelmi engedély megszerzése volt. Ezt követte a létesítési engedély, amelyet az ÁNTSZ Dél-dunántúli Regionális Intézete adott ki a Létesítést Megelőző Biztonsági Jelentés (LMBJ) alapján. A környezetvédelmi, a létesítési, a vízjogi létesítési, valamint az építési engedély birtokában indult el a felszíni létesítmények kiviteli terveinek elkészítése és maguk a kivitelezési munkák.

Az üzembe helyezés első fázisában az LMBJ-ben bemutatott felszín feletti létesítményekből a Központi Épület és a Technológiai épület, valamint az udvartéri rendszerek valósultak meg. A Betonüzem és a Látogató Központ, illetve a felszín alatti tároló létesítmények később épülnek meg. Az elkészült létesítmények elkészültét követően a kiszolgáló technológiákat üzembe helyezték, a létesítmény alkalmassá vált a kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok felszín alatti tárolásának előkészítési tevékenységeinek végrehajtására, illetve az ehhez kapcsolódó puffer tárolásra. A felszíni létesítmények üzembehelyezési engedélyét a hatóság 2008. szeptemberében adta meg.

A jelenlegi (2008. év III. negyedévében) helyzet szerint: a bábaapáti NRHT megvalósítására irányuló program keretében, a kutatás kezdete óta közel 9000 m fúrás mélyült, a kutatásokban több mint 200 hazai és külföldi szakember vett, illetve vesz részt és a mai napig több, mint 22 millió mért, megfigyelt kutatási információ került be a központi kutatási adatbázisba.

2 A TÁROLÓ BIZTONSÁGOSSÁGÁNAK BIZTOSÍTÉKA

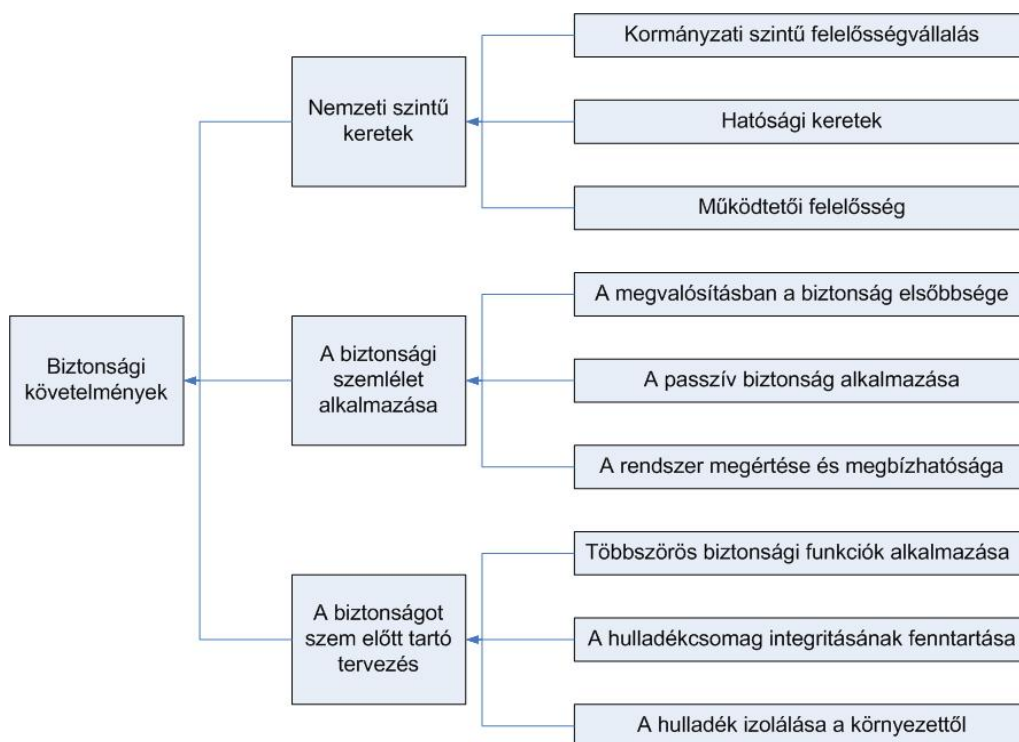
2.1 A Biztonsági követelmények rendszere

Az NRHT megvalósítását (a kutatástól a lezárásig, illetve az azt követő aktív és passzív intézményes ellenőrzési fázisokat is beleértve) a biztonság szem előtt tartásával kell végigvinni. Ezt a szemléletmódot követeli meg a nemzetközi gyakorlat is, amelyet a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) által is megfogalmazott biztonsági követelmények rögzítenek. Ezeket a biztonsági követelményeket a NAÜ WS-R-4 (IAEA 2006) alapján a következőképpen adhatjuk meg (1. ábra):

A nemzeti szintű kereteket azok a jogszabályi, szervezeti, pénzügyi szempontok érvényesítése valósítja meg, amelyeket Magyarország már megfelelő szinten kiépített. Ilyen pl. az Atomtörvény, vagy az ehhez kapcsolódó alacsonyabb szintű jogszabályok (pl.: a 62/1997.(XI. 26.) IKIM, vagy a 47/2003. (VIII. 8.) ESzCsM rendelet), de az RHK Kft. létrehozása, illetve a független Nukleáris Pénzügyi Alap működtetése, az OAH, illetve az ÁNTSZ Sugáregészségügyi Decentrumainak megléte, létrehozása is ide tartozik.

A biztonsági szemlélet (*safety approach*) alkalmazása a tároló megvalósítása során szintén kulcsfontosságú követelmény. A tároló hosszú távú programját a biztonsági értékelés vezérli, így biztosítható a biztonsági alapelvek (*safety principles*) megfelelő alkalmazása, illetve elsőbbsége az egyéb szempontok előtt. Az is nyilvánvaló, hogy a tároló hosszú távú biztonságát, csak passzív védelem (*passive safety*) biztosíthatja azon idő távon (ami akár több százezer évet is jelenhet), amely alatt a tároló rendszernek el kell látnia funkcióját. Ez persze nem jelenti, az aktív elemek alkalmazásának kizárását (intézményes ellenőrzés, illetve monitoring alkalmazása), azonban ezek igen hosszú időn keresztül tartó üzemeltetését, de egyáltalán a meglétét sem lehet garantálni.

Végül a – tágabb értelemben vett – tároló rendszer hosszú távú működésének megértése, bizonytalanságainak számba vétele és az erre vonatkozó előrejelzések megbízhatósága szintén alapvető jelentőséggel bír a tároló elfogadtatásához.



1. ábra. A tároló megvalósításának biztonsági szempontjai

A nemzeti szintű szabályozás elsősorban politikai, államigazgatási szempontok érvényesülését jelenti, a biztonsági szemlélet alkalmazását a radioaktív hulladékokat kezelő társaságnak (RHK Kft.) kell alkalmaznia munkája során. Ez a két elem a tároló megvalósításának jogi, szervezeti és megközelítési kereteit adja, míg a biztonsági tervezés a tároló hosszú távú biztonságosságának¹ teremti meg a műszaki-tudományos alapjait.

A NAÜ No. WS-R-4 szerint, a biztonságot szem előtt tartó tervezés során úgy kell eljárni:

- hogy alkalmazni lehessen a többszörös biztonsági funkciókat,
- hogy a hulladékcsomag integritását minél hosszabb ideig lehessen biztosítani, illetve
- hogy a környezettől történő megfelelő elszigetelést meg lehessen valósítani.

BRUNO *et al.* 2004 szerint a biztonsági tervezés során tulajdonképpen két alapelvet kell alkalmazni, mégpedig a mélységi védelem és a biztonságosság igazolhatóságának alapelvét. A mélységi védelem gyakorlatilag megfeleltethető a NAÜ No. WS-R-4 szerinti többszörös biztonsági funkciók elvének, egyben magába foglalja a csomagintegritás fenntartásának és az elszigetelésnek az elvét is. BRUNO *et al.* 2004. munkájában azonban megjelenik az első alapelv igazolásának igénye is, mint másik alapelv.

2.2 A biztonsági tervezés alapelvei

Amint azt az előző pont végén már említettük, a biztonságot szem előtt tartó tervezés (safety design) stratégiája a következő alapelvekre épül (BRUNO *et al.* 2004):

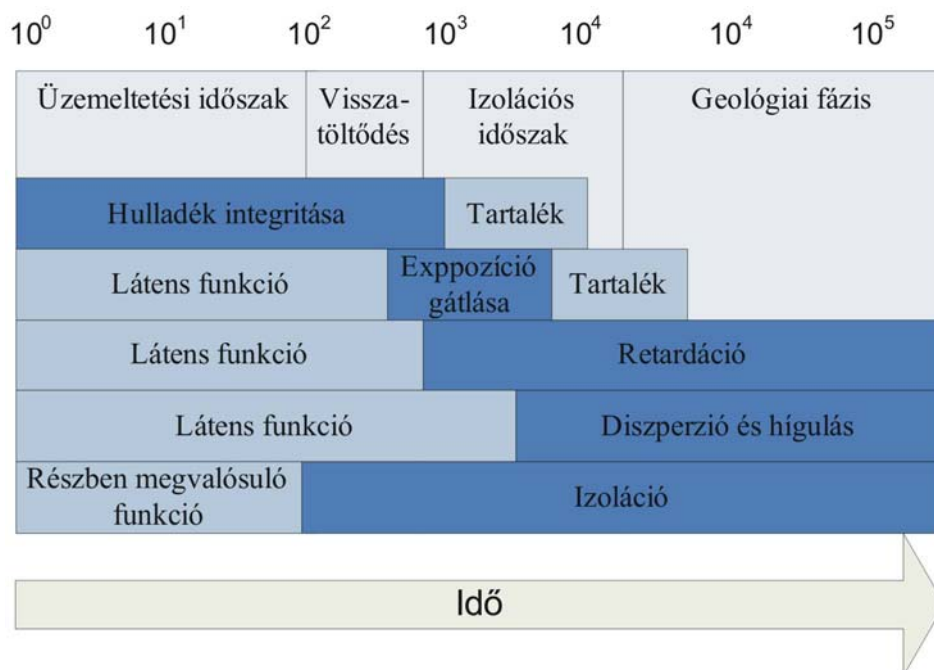
- mélységi védelem (*defence in depth*) alkalmazása és a
- biztonságosság igazolhatósága (*demonstrability of safety*).

A mélységi védelem több egymástól független, de egymást térben és időben kiegészítő biztonsági funkciót (elzárás, izoláció valamint késleltetés és retardáció) kielégítő elem alkalmazását jelenti.

A gyakorlatban ez a műszaki és természetes gátrendszer elemeit jelentheti, mint pl. hulladékmátrix, konténer, térkitöltés, vagy maga a geológiai formáció, illetve ezen elemek által kifejtett mechanizmusokat mint pl. szorpció, vagy mátrixdiffúzió. Az elemek redundanciája a védelmi rendszer robusztussá-

¹ A szövegben megkülönböztetjük a biztonság és a biztonságosság fogalmát. Értelmezésünk szerint a tároló biztonsága azt jelenti, hogy maga a tároló van biztonságban, míg a tároló biztonságossága a környezet – a tároló veszélyei ellenére is megvalósuló – biztonságára utal. Ebben az összefüggésben a tároló biztonságossága és a környezet biztonsága egyenértékű kifejezések.

gát biztosítja, vagyis a hulladéktárolót úgy kell elhelyezni és úgy kell megtervezni, hogy az egyes elemek hibás működése ne befolyásolja döntően az elhelyezési rendszer eredő funkcióját. A gátrendszer elemei hagymahéjszerűen veszik körül az elhelyezni kívánt hulladékot. Ezek az elemek azonban nem folyamatosan fejtik ki védelmi feladatukat: egyes időszakban látens módon ugyan megvan az adott elem funkciója, de az nem aktív, nincs szennyezőanyag migráció. Ugyanakkor hosszú időtartamot figyelembe véve egyes rendszerelemek degradációja vezethet a védelmi funkció elvesztéséhez (2. ábra).



2. ábra A biztonsági funkciók időbeni alakulása

A biztonságosság igazolhatóságának alapelve szerint a tároló elhelyezési koncepciójának fejlesztése során azt is figyelembe kell venni, hogy az alkalmazott módszertan már önmagában is alkalmas legyen a biztonságosság igazolására. Ezt a tároló elemeinek egyszerű fizikai megvalósításával, jól ismert anyagok alkalmazásával, a lejátszódó folyamatok alapos ismeretével, természetes analógiák bemutatásával, átlátható és nyomon követhető értékeléssel, nyitott kommunikációval lehet elérni. Angolszász környezetben ezt összefoglalóan „*safety case*-nek” nevezik, amelynek magyar fordítása meglehetősen nehéz feladat. Ugyanis ez nemcsak a tároló kvantitatív biztonsági értékelését foglalja magába, hanem felhasznál más olyan argumentumokat, bizonyítékokat is, amelyekkel kvalitatív módon, meggyőzően igazolható a tároló biztonságossága. Ilyen érvrendszer lehet pl. az előbb említett természetes analógiák használata, vagy a geológiai környezet homogenitásának, előre jelezhetőségének kivánalma² is. Mindezen módszerek együttes alkalmazása a teljes programba vetett társadalmi bizalmat is erősítheti (*confidence building*).

Természetesen, külön figyelmet kell fordítani az elhelyezési rendszer kialakításának műszaki megvalósíthatóságára, kivitelezhetőségére úgy, hogy közben az alkalmazott módszereket minősíteni, ellenőrizni kell. Ezt demonstrációs kísérletek végrehajtásával lehet megtenni. Így a rendszerelemek biztonsági funkcióinak működőképességéről – megfelelő mértékben – meg lehet bizonyosodni. Ugyanakkor meg kell említeni, hogy a várhatótól eltérő, előre nehezen jelezhető fejlődési irányok bekövetkezéséhez már nagyobb bizonytalanságok kapcsolódnak.

2.3 A biztonságot szem előtt tartó tervezés elemei

A tároló helyszínét úgy kell kiválasztani, illetve a tárolót úgy kell megtervezni, hogy az elhelyezési rendszer biztonsági funkciói meg tudják valósítani a lezárást követő, hosszú távú biztonságosságot. (Ebben a formában már nem maguk a rendszerelemek, illetve folyamatok, hanem az általuk kifejtett funkciók a lényegesek.) A megfelelő szintű biztonságot több műszaki rendszerelem (*multiple barriers*), illetve mechanizmus együttes alkalmazásával kell biztosítani. Ez azért fontos, mert tudatosan kell alkalmazni a rendszerelemek, illetve folyamatok egymást kiegészítő és egymást át is fedő, sokszor redundáns védelmi funkcióit. (Ezt nevezzük robosztus rendszernek). Érzékenységvizsgálatokkal kell bizonyítani a teljes rendszerre, hogy egy adott elem funkcióvesztése, de akár több elem együt-

²Lévéen, hogy kvalitatív argumentumokról van szó, ezek igazolása sokszor igazi kihívást jelent a szakemberek számára.

tes tönkremenetele sem befolyásolhatja döntően az elhelyezési rendszer végső célját³, vagyis az ember és környezetének védelmét.

A tároló rendszer elemei fizikai és kémiai tulajdonságai révén a következő átfogó biztonsági funkciókat fejtik ki (BRUNO *et al.* 2004):

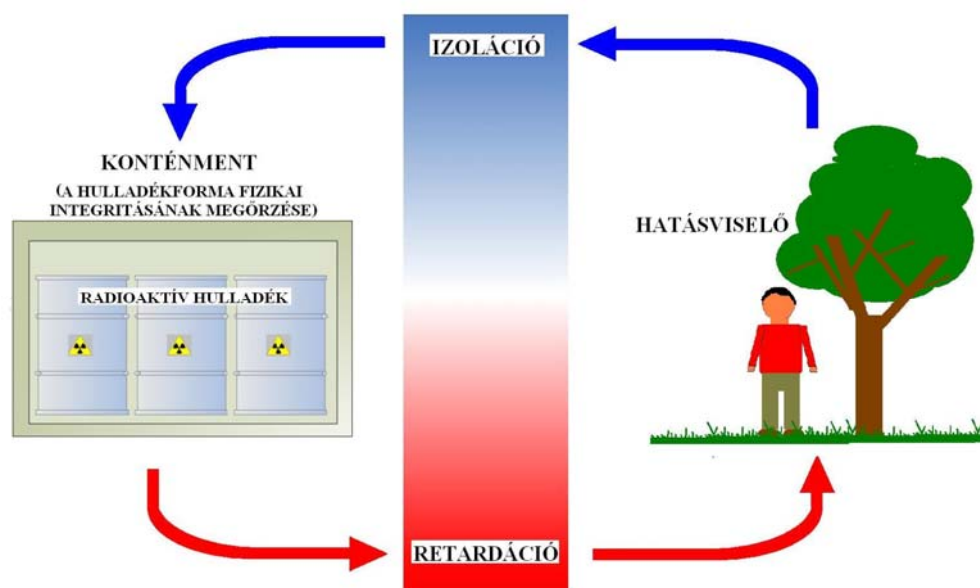
- a hulladékcsoomagok integritásának fenntartása, vagy elzárás (*containment*),
- a hulladék izolálása (és az abból esetlegesen kijutó szennyezőanyagok mozgásának korlátozása) az embertől és környezetétől (*isolation*) és
- a radioaktív izotópok kijutásának korlátozása és mobilitásának gátlása (*limitation and retardation*, néha *delay and retardation*)⁴.

A hulladékforma és a csomagolást is magába foglaló műszaki gátrendszer egyik biztonsági funkciója a hulladék fizikai integritásának minél hosszabb időtávon való, lehetőség szerinti fenntartása. Ez biztosítja a radioaktív izotópok késleltetett expozícióját⁵, illetve kibocsátását, ezáltal lehetővé téve a rövid felezési idejű izotópok helyben történő lebomlását. A hulladékcsoomag fizikai integritásának megőrzése jellemzően néhány száztól néhány ezer évig tartó periódusra tehető, a tervezési céltól, illetve az alkalmazott anyagoktól függően (2. ábra).

Izolációnak nevezzük a bioszféra (és benne az ember) fizikai távoltartását a hulladéktól, illetve annak káros hatásaitól. Ez elsősorban a természetes gátak segítségével, de a műszaki gátakkal is megvalósítható.

A hulladékcsoomag integritásának fenntartására és a hulladék izolálására törekedve is – hosszabb időtávot tekintve – mégis előfordulhat a radioaktív izotópok expozíciója és kijutása, kibocsátása. Az exponálódott hulladékcsoomagnál a radioaktív izotópok kijutását korlátozni, illetve ezen izotópok mozgását a környezetben gátolni szükséges. Ezt az átfogó biztonsági funkciót összefoglalóan retardációnak nevezzük.

Kissé átfogalmazva és leegyszerűsítve a kérdést azt mondhatjuk, hogy az izoláció a bioszféra felől, míg a retardáció a hulladék felől jövő hatásokat hivatott gátolni. Az elzárás feladata a hulladék egyben tartása, a műszaki gátrendszer segítségével történő bezárás, így megakadályozva annak kiszabadulását a környezetbe (3. ábra).



3. ábra Az elhelyezési rendszer átfogó biztonsági funkciói

Az előbbieket összefoglalva:

³ A magyar szabályozás (47/2003. (VIII. 8.) ESzCsM rendelet) szerint, az elhelyezési rendszer várható viselkedését feltételező körülmények esetén a lezárást 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.

⁴ Megjegyzendő, hogy bizonyos megközelítésben a hulladék izolálását, valamint a kijutás korlátozását és a mobilitás gátlását egy követelményként, az izoláció keretében definiálják: pl. Svédországban.

⁵ Expozíció, vagy kitettség: az az állapot, amelyben a szennyezőanyag a transzport folyamat számára már elérhető.

A hulladékot koncentráltan, többszörös gátrendszer védelmében kell elhelyezni úgy, hogy a hulladékhoz való hozzáférést a lehetőségeknek megfelelően korlátozzuk, illetve a hulladéksomag fizikai integritása fennmaradjon. Ugyanakkor, a későbbiekben esetleg exponálódott és a környezetbe kijutott izotópok mozgását térben és időben korlátozni kell. Így biztosítható, hogy az izotópok csak olyan mértékben és annyira hosszú idő alatt érhessen el az emberhez és környezetébe, hogy az már ne jelentsen veszélyt rájuk nézve (3. ábra).

Korábban, a NAÜ – általános (és elsősorban a kiégett fűtőelemekre és a nagy aktivitású hulladékokra kidolgozott) szinten – szintén definiálta a geológiai elhelyezési rendszerrel szemben megkövetelt, hosszú távú funkciókat (IAEA 2003):

- a) a felszíni folyamatoktól való elszigetelés: mivel a geoszféra a felszíni környezetet elszigeteli a hulladéktól, ezért a hulladék védett lesz az ott lezajló természeti és emberi folyamatoktól.
- b) a bioszféra védelme: a hulladékok közvetlen ionizáló sugárzásától védi a bioszférát a geoszféra anyagi tulajdonságai révén.
- c) elzárás az emberi tevékenység elől: a hulladékok mélységi elhelyezése miatt kevésbé valószínű, hogy a jövőbeli emberi tevékenység radioaktivitásnak való kitettséget eredményezne, akár közvetlen (a hulladék felszínre hozatala), akár közvetett (a hulladék komponenseinek különböző mobilizációja) módon.
- d) korai visszatartás: a rövid életű radioaktív izotópok lényegében teljes visszatartása néhány száz vagy ezer évre, valószínűleg nagyrészt még a tároló műszaki gátjain belül.
- e) a kibocsátások korlátozása: késlelteti és korlátozza azt a sebességet és koncentrációt, amely mellett a radioaktív izotópok kiszabadulnak a fokozatosan tönkremenő műszaki gátrendszeren keresztül a földtani környezetbe, majd végül transzportálódnak a bioszférába. Ez fizikai és kémiai mechanizmusok kombinálásával érhető el, melyek – más funkciók mellett – korlátozhatják a felszín alatti vizek hozzáférését a hulladékokhoz és áramlását a tárolótól a bioszféra felé, továbbá korlátozhatják a radioaktív izotópok oldhatóságát, reverzibilisen vagy folyamatosan szorbeálhatják vagy kicsaphatják őket a kőzetek és a műszaki gátak felszínén. Ezen túlmenően, a radioaktív bomlási folyamat fokozatosan csökkenti a tároló rendszerben lévő radioaktív izotópok mennyiségét.
- f) diszperzió és hígítás: a hosszú élettartamú radioaktív izotópok áramlása a földtani gát közelein keresztül háromdimenziós szóródást jelent, amely erősen eltérő hidrogeológiai környezetekben játszódhat le. Egyes koncepciók és egyes javasolt tárolóhelyek esetében a kibocsátások nagy mélységben vagy a felszín közelben találkozhatnak nagy tömegű felszín alatti vizekkel, vagy hasonlóan nagyméretű felszíni víztestekkel. Ez egy további funkciót teljesít, azaz a kibocsátott radioaktív izotópok általános hígítását úgy, hogy a bioszférába történő belépéskor a koncentrációjuk alacsonyabb lesz.

Jól látható, hogy az a)-f) jelölt funkciókat a fentebb megfogalmazott három biztonsági funkciónak megfeleltethetjük. Így az elzárás kategóriába sorolhatjuk a c) és d) pontokat. Az izolációt az a) és b) pont valósíthatja meg, míg a retardációt az e) és f) pontok képviselik.

3 A BIZTONSÁGI FUNKCIÓK RENDSZERE

Az előzőekben bemutatuk a radioaktív hulladéktároló biztonsági követelményeit, majd ebből levezetjük a biztonsági tervezés elemeit. Így eljutottunk az átfogó biztonsági funkciók bemutatásához, amelyeket az alábbiakban továbbrészletezünk, illetve ezeket már rendszerelemekhez kötjük. Azonban ahhoz, hogy az egyes biztonsági funkciókkal bíró rendszerelemekkel szemben konkrét kritériumokat megfogalmazhassunk, ezeket az általános biztonsági funkciókat még pontosabban kell meghatározni. Így juthatunk el az egyedi biztonsági funkciókhoz, illetve a számszerűsíthető biztonsági kritériumokhoz.

3.1 Általános biztonsági funkciók

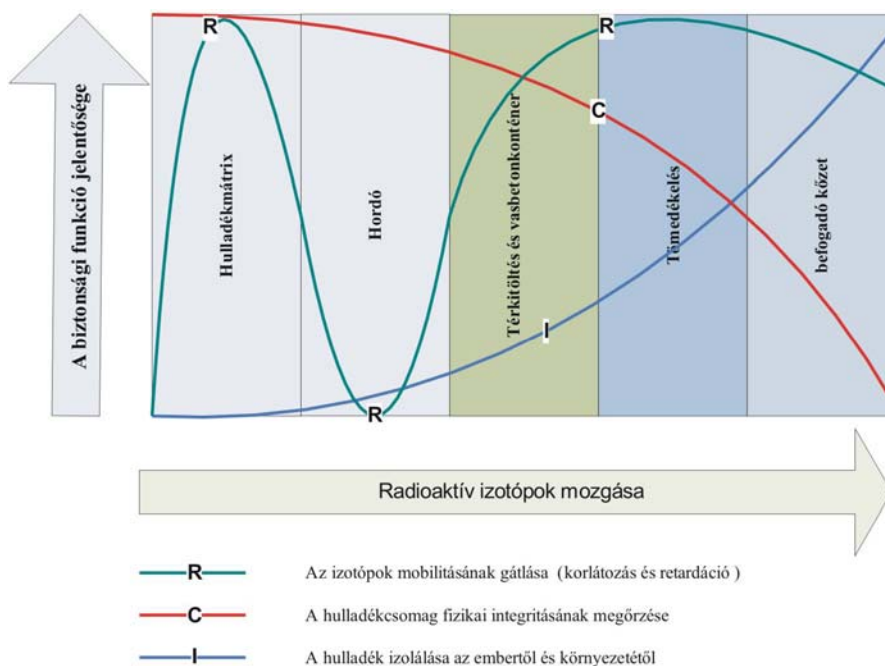
A többszörös gátrendszer elemei – a bátaapáti NRHT-ra vonatkozó, elhelyezési alapkonceptió szerint – a következők:

- befogadó kőzet
- vágatok tömedékelése és a tároló lezáró szerkezetei
- térkitöltés és vasbeton konténer
- acélhordó
- hulladékmátrix

Ezen elemekhez a fentebb leírtak szerint átfogó biztonsági funkciókat (a hulladéksomag fizikai integritásának megőrzése: C [*containment*], a hulladék elválasztása az embertől és környezetétől: I

[*isolation*], valamint az esetlegesen kikerült radioaktív izotópok mozgásának korlátozása: R [*retardation*]) rendelkezünk.

Mint azt a 2.2. pontban már említettük, az elhelyezési rendszer elemei eltérő mértékben (és időben is változóan) látják el ezeket az elsődleges biztonsági funkciókat. Általában minden fő rendszerelem valamennyi elsődleges biztonsági funkciót megvalósít, de nem azonos súllyal. Az alábbi ábra (4. ábra) azt mutatja, hogy a rendszer fő elemei milyen átfogó biztonsági funkciót, mekkora mértékben biztosítanak.



4. ábra Rendszerelemek átfogó biztonsági funkciói

Persze ezek az átfogó biztonsági funkciók még túl széles körűek, szükség van a részletezésükre. Ezért az átfogó biztonsági funkciókat további általános funkciókra bonthatjuk. Konkrétan, mik is lehetnek ezek az általános biztonsági funkciók? A következőkben a fő rendszerelemek által kifejtett általános biztonsági funkciókat jelenítjük meg, zárójelben pedig a legjellemzőbb átfogó biztonsági funkciót adjuk meg:

- Befogadó kőzet:
 - elválasztja a hulladékot a bioszférától – fizikai távolságot biztosítva (I),
 - a felszíni és felszín közeli folyamatokkal szemben védelmet biztosít, mint pl. erózió, szándékolatlan emberi behatolás (I),
 - kedvező és megismerhető kőzetmechanikai, geokémiai és hidrogeológiai környezetet biztosít (C),
 - korlátozza, illetve visszatartja a radioaktív izotópok mozgását (R).
- Kamrák tömedékelése és a tároló lezáró szerkezetei:
 - megakadályozza, hogy a kamrák és a vágathajtás hatására megváltozott tulajdonságú kőzetkörnyezet potenciális transzport útvonalat képezhessen (R),
 - stabilizálja a hulladéksomagokat kamrákban (C),
 - a vágatok kémiai és mechanikai stabilitását biztosítja (C),
 - meggátolja, hogy a műszaki gátrendszer egyéb elemeit káros hatás érhesse (I).
- Térkitöltés és vasbeton konténer:
 - a transzport folyamatok közül az advekciónak korlátozza (R),
 - szorpciós tulajdonságai révén megköti a radioaktív izotópokat, illetve késlelteti azok transzportját (R),
 - kémiai és mechanikailag stabil környezetet biztosít (C),
 - meggátolja, hogy a műszaki gátrendszer egyéb elemeit káros hatás érhesse (I).
- Acélhordó
 - biztosítja a hulladékmátrix fizikai integritását (C),
 - meggátolja, hogy a műszaki gátrendszer egyéb elemeit káros hatás érhesse (I).
- Hulladékmátrix:
 - a tervezési alap forgatókönyve szerint megkövetelt időtartam alatt intakt marad (C),
 - ellenáll a mechanikai terhelésnek (C),

- szorpciós tulajdonságai révén megköti a radioaktív izotópokat, illetve késlelteti azok transzportját (R),
- szubkritikus szinten tartja a hulladékot (I),
- meggátolja, hogy a műszaki gátrendszer egyéb elemeit káros hatás érhesse (C).

A három átfogó biztonsági funkció természetesen nem független egymástól, hiszen például a hulladékok integritásának hosszú távú megőrzése egyben az izolációt és az izotóptranszport korlátozását is részben biztosítja. Ugyanakkor a hulladékot a bioszférától megbízhatóan elválasztó elhelyezési rendszer olyan stabilitást feltételez a rendszerelemekről, amely biztosítja a hulladékcsoomagok integritásának hosszú távú megőrzését is. (IAEA 2005)

3.2 A biztonsági funkciók hierarchiája

Már az előző (3) pontban említettük, hogy az átfogó biztonsági funkciókat további általános funkciókra bonthatjuk. Az átfogó biztonsági funkciók úgy valósulhatnak meg, ha továbbbontjuk a megfelelően megfogalmazott általános biztonsági funkciókra. Ahhoz viszont, hogy a biztonságosság értékelése során az egyes rendszerelemekkel szemben számszerűsíthető követelményeket fogalmazhassunk meg, ezeket az általános biztonsági funkciókat tovább kell részleteznünk. Ezért bevezettük az egyedi biztonsági funkciókat.

Ennek megfelelően az alábbi hierarchiát definiálhatjuk:

- Átfogó biztonsági funkció (pl. retardáció) – amely megadja az elhelyezési rendszer három alapvető funkcióját.
 - Általános biztonsági funkció (pl. advekciónak korlátozása) – amely egyes rendszerelemekkel szemben (pl. tömedék) megfogalmazott biztonsági elvárásokat adja meg, de még mindig csak alapelv szintjén (pl. a tömedékanyag korlátozza az advekciót).
 - Egyedi biztonsági funkció – amely az egyes rendszerelemhez (pl. tömedékanyag) rendelhető olyan paraméter, amely mérhető, vagy számítható (hidraulikus vezetőképesség [m/s]). Az egyedi paraméterhez meg kell határozni a biztonsági kritériumot, vagyis annak határértékét (pl. $k \leq 10^{-8}$ m/s).

4 A FONTOSABB RENDSZERELEMÉK BIZTONSÁGI FUNKCIÓI

Mint azt a 3.2 pontban említettük, az egyedi biztonsági funkcióhoz rendelhető olyan paraméter, amely mérhető, vagy számítható. A következőkben megadjuk a felszín alatti tárolótér egyes rendszerelemeivel (BÉRCI *et al.* 2005) szemben támasztott követelményeket, funkciókat a bátaapáti NRHT-re vonatkozóan (BÓTHI *et al.* 2008).

4.1 Hulladékmátrix

Az Atomerőmű üzemeltetése során keletkező kis és közepes radioaktivitású hulladékok:

- vegyes szilárd hulladékok,
- kimerült ioncserélő gyanták és
- sűrítvények és egyéb folyékony hulladékok.

A jelenlegi elképzelések szerint az ioncserélő gyantákat és a sűrítvényeket és egyéb folyékony hulladékokat bepárolják, majd cement alapú anyaggal kondicionálják. Az így kondicionált hulladékot – a keverőlapát bennhagyásával– 200 (ioncserélő gyanták) vagy 400 l-es (bepárlási maradékok) acélhordóba töltik. A vegyes szilárd hulladékokat tömörített formában helyezik a 200 l-es hordóba.

A létesítmény lezárását követően, a tároló újratelítődik a felszín alatti vizekkel. Bizonyos átmeneti idő eltelté után ismét egyensúlyi helyzet alakul ki, vagyis beáll az úgynevezett terciér állapot. Ekkor megindulhat a hulladék expozíciója, vagyis a hulladék kitétté válhat a felszín alatti vizekkel történő transzport számára. A hulladékmátrixnak a következő átfogó biztonsági funkciók betöltésében van szerepe:

- bezárás, vagyis a rövid felezési idejű radioaktív izotópok visszatartása,
- szubkritikus szinten tartja a hulladékot,
- a kibocsátás és a terjedés korlátozása.

Ahhoz, hogy az említett biztonsági funkciókat elláthassa, az alábbi feltételeknek kell megfelelnie:

- megfelelően zárt mérnöki gátat kell alkotnia,
- nem engedi a kritikussághoz szükséges geometria kialakulását,
- az izotópok közeli környezetben belüli terjedési idejét maximalizálnia kell,

A feltételek alapján a következő paramétereket kell meghatározni:

- degradáció mértéke: a radioizotópok hulladékmátrix expozíciós lehetőségének csökkentése,
- gázvezető-képesség (és porozitás): a képződő gázokat át kell engednie,
- vízvezető-képesség: a hulladékcsomagba kerülő víz korlátozása,
- szorpció (izotópfüggő): a maximális megkötődést lehetővé tevő anyagok kiválasztása a mérnöki gátak megépítése során,
- oldékonysági korlát (izotópfüggő): a szennyezők beoldódásának a korlátozása és
- diffúzió korlátozása (izotópfüggő): a porozitástól és diffúziós úthosszától függő jellemző,
- szuszpenzióba kerülhető tömeghányad: a kolloidképződés lehetőségét korlátoznia kell.

A fenti paraméter meghatározások alapján a hulladékformával szemben támasztott igényeket a cement mátrixra vonatkozó vízvezető képességre, porozitásra, és a benne létrejövő kémiai környezetre fordíthatjuk le.

Meg kell jegyeznünk, hogy a cementezett hulladékok esetén a hulladékmátrix feladata valóban a radioaktív izotópok bezárása, továbbá olyan kémiai környezet biztosítása, amely gátolja, vagy jelentős mértékben lassítja a transzportot. A hulladékmátrix expozíciója csak folyamatosan jelentkezik, a mátrix degradációjának mértékétől függően. Az exponálódott radioizotópok felszín alatti vizekbe történő beoldódásának mértékét az oldékonyság jellemzi. Ez, a várhatóan 13-as pH-jú (BATH és JEFFERIS 2004) környezetben néhány izotópra jelentősen korlátozott. A mátrix harmadik jellemzője, a cement-tartalomnak köszönhető szorpció, amely az egyik legfontosabb retardáló hatás.

A tömörített vegyes szilárd hulladék esetében azonban nincs hulladékmátrix, felületi szennyezéssel számolunk, amely azonnal exponálódik, a szennyezőanyag transzport azonnal megindul.

4.2 Acélhordó

Mint azt a 4.1 pontban említettük, a szilárd hulladékokat és az ioncserélő gyantákat 1,2 mm falvastagságú 200 l-es acél fémhordóba helyezik, míg a sűrítményeket 400 l-es speciális kialakítású acélhordóba cementezik.

A 3.1 pontban említettek szerint, az acélhordónak két általános biztonsági funkcióját említhetjük meg. A hordó egyfelől a hulladékmátrix fizikai integritását őrzi. Az acélhordó vízzáró lezárását csak igen rövid időre lehet garantálni, ezért – bár az elzárásban részben közrejátszik – tényleges biztonsági funkciója csak csökkentett értékű, így a biztonsági értékelésnél ezzel nem számolunk.

Másfelől az acélhordó meggátolja, hogy a műszaki gátrendszer egyéb elemeit káros hatás érje, amely az izoláció átfogó biztonsági funkcióhoz tartozik. Ez a funkció azonban – a geometria és az anyagminőség miatt – igen korlátozott, gyakorlatilag ez is figyelmen kívül hagyható.

4.3 Konténer

A hordóba csomagolt hulladékok átmeneti tárolást követően egy 2,25 x 2,25 m alapterületű, 1,55 m magasságú konténerbe kerül (konténerenként 9 db 200 literes, ill. 5 db 400 literes hordó). A cementtel történő belső térkitöltés és a vasbeton fedéllel való lezárás (kondicionálás) után 7,85 m³ bruttó térfogatú elhelyezési egységként szállíthatók a felszín alatti tároló kamrákba. A konténerek a kamraszelvevény közepén szimmetrikusan 4 sorba, illetve 4 oszlopba rendezve, szorosan egymás mellé helyezendők. A szellőztetett kamra teljes hosszában kétoldalt közlekedésre, a biztosítás állékonyságának ellenőrzésére, szükség szerinti javítására és tömedékelési műveletek végzésére a járóosztálynak helyet kell hagyni.

A telephelyen készülő elhelyezési konténer nem építőipari produktum, hanem a radioaktív hulladékok geológiai tárolókban való végleges elhelyezésének biztonságát alapvetően meghatározó elsődleges fontosságú műszaki gát.

A konténernek – lévén elhelyezési és szállítási (a felszíni létesítményből a felszín alatti tárolókamrába) egység – az üzemviteli biztonság szempontjából is különleges jelentősége van. Mind radiológiai, mind szilárdsági szempontból meg kell felelnie a biztonsági követelményeknek. Jelen cikkben azonban ezekkel nem foglalkozunk, csak a hosszú távú, lezárást követő biztonsági funkciókat tárgyaljuk.

A konténer az egyik legfontosabb olyan elem, amely a hulladék fizikai integritásának megőrzésében szerepet játszik. Analógiák alapján (pl. Hadriánus fala – Észak Anglia) a fizikai integritását a beton akár több ezer évig is képes megőrizni (MILLER *et al.* 2000). A konténerbeton alacsony vízáteresztő képessége és nagy szilárdsága által hatékony mind a fizikai mind a kémiai gátak tekintetében, ugyanis

a cement alapú térkitöltő anyaggal együtt kedvező kémiai környezetet képez (oldékonysági korlát és szorpció).

Azok a biztonsági funkciók, amelyek köthetők a vasbeton konténerhez a következők:

- bezárás, vagyis a rövid felezési idejű radioaktív izotópok visszatartása,
- a hulladék elszigetelése a felszíni folyamatoktól és
- a kibocsátás és terjedés korlátozása.

Ahhoz, hogy az említett biztonsági funkciókat elláthassa, az alábbi feltételeknek kell megfelelnie:

- megfelelően zárt mérnöki gátat kell alkotnia,
- közeli környezeten belüli terjedési időt maximalizálnia kell,
- a tárolón belül lezajló folyamatok káros hatásainak az időben való elnyújtása és
- advektív és diffúzív transzport korlátozása a közeli környezetben.

A fenti megvalósulási feltételekből származtatott paraméterek:

- gázvezető-képesség (és porozitás): a képződő gázokat át kell engednie,
- szorpció (izotópfüggő): a maximális megkötődést lehetővé tevő anyagok kiválasztása a mérnöki gátak megépítése során,
- degradáció mértéke: a radioizotópok hulladékmátrix expozíciós lehetőségének csökkentése,
- oldékonysági korlát (izotópfüggő): a szennyezők beoldódásának a korlátozása és
- diffúzió korlátozása (izotópfüggő): a porozitástól és diffúziós úthossztól függő jellemző,
- vízvezető-képesség: a hulladékcsomagba kerülő víz mennyiségének a korlátozása.

A konténer fala alacsony vízáteresztő képessége révén megakadályozza, hogy a hulladékforma rögtön a lezárást és visszatöltődést követően kapcsolatba kerüljön a vízzel, ezzel kiemelt szerepet kap a rövid felezési idejű izotópok hosszú időre történő elzárásában. Ugyancsak ebből a tulajdonságából következően a kibocsátás korlátozásának is egyik legfontosabb eleme. Az anyaga még a teljes degradáció állapotában is képes szorbeálni az izotópokat és magas pH-jú közege révén fenn tudja tartani az oldékonysági korlátot is.

Azok a mennyiségek, amelyek a konténer jóságát meghatározzák: a mechanikai szilárdság, anyagminőség: vízáteresztő képesség, porozitás, anyagösszetétel (elsősorban cementtartalom és minőség).

4.4 Térkitöltés

A vasbeton konténerbe helyezett hordók által ki nem töltött teret cementkötésű anyagokkal kell kitölteni. Ezzel magas pH (> 13) érték (ami alacsony oldékonysági korlátot is jelent) és jelentős szorpciós kapacitás érhető el. Megfelelően alacsony porozitás esetén (ami repedésmentességet is feltételez) a domináns transzport a diffúzió lesz. A cement alapú anyagok száradása folyamán térfogat csökkenés áll elő. A zsugorodás erősen függ az összetételtől és a kezelési folyamattól. Mértékét a lehető legalacsonyabban kell tartani. A cementek és betonok összetételét úgy kell tervezni, hogy minimalizáljuk a zsugorodást, így a repedések keletkezésének valószínűségét minimalizálni lehet.

A konténeren belüli térkitöltés szintén mindhárom koncepcionális biztonsági funkciót szolgálja, hiszen az elhelyezési egység részeként egy tömör, robosztus egységet alkotva védi a bezárt hulladékcsomag integritását, a mechanikai szilárdsághoz pozitívan járul hozzá, ezáltal az izolációban is szerepet kap, az alacsony vízáteresztő képessége és a nagy megkötő képessége pedig a retardációs feladat ellátásra is alkalmassá teszi.

A térkitöltés elsődleges biztonsági funkciója a retardáció, de segít a bezárás fenntartásában is:

- a kibocsátás és terjedés korlátozása,
- bezárás, vagyis a rövid felezési idejű radioaktív izotópok visszatartása.

Ahhoz, hogy az említett biztonsági funkciókat elláthassa, az alábbi feltételeknek kell megfelelnie:

- megfelelő mérnöki gátrendszer biztosítása,
- közeli környezeten belüli terjedési időt maximalizálnia kell és
- advektív és diffúzív transzport korlátozása a közeli környezetben.

A követelményekből származtatott paraméterek:

- gázvezető-képesség: a képződő gázokat át kell engednie,

- szorpció (izotópfüggő): a maximális megkötődést lehetővé tevő anyagok kiválasztása a mérnöki gátak megépítése során,
- degradáció mértéke: a radioizotópok hulladékmátrix expozíciós lehetőségének csökkentése,
- oldékonysági korlát (izotópfüggő): a szennyezők beoldódásának a korlátozása és
- diffúzió korlátozása (izotópfüggő): a porozitástól és diffúziós úthossztól függő jellemző,
- vízvezető-képesség: a hulladékcsoomagba kerülő víz mennyiségének a korlátozása,

A konténeren belüli cementes térkitöltés a konténerezett hulladékcsoomag robusztusságát, vízzel szembeni áthatolhatatlanságát növeli, ezért a fontos mennyiségek, amelyek a paraméterekből kiolvashatóak: a vízvezető-képesség, az izotópmegkötő-képesség, a porozitás, az anyag összetétel és a térkitöltés által létrehozott kémiai környezetre jellemző oldhatóság.

A vasbeton konténerek és a térkitöltés vízáteresztő képességét és radionuklid visszatartó sajátosságait kísérletileg kell meghatározni.

4.5 Tömedékelés

A geológiai tároló végleges lezárása folyamán annak valamennyi üregét tömedékelni kell. Ennek a tömedékelésnek több funkciója is van. Egyrészt mechanikai stabilitást biztosít a kőzetkörnyezetnek. A vágathajtás által előidézett lazult zóna (az ún. *EDZ – Excavation Disturbed Zone*) további fellazulását akadályozza meg. Másrészt, hasonlóan a többi cement alapú anyaghoz, magas pH-t, alacsony szivárgást és magas szorpciót fejt ki a radioaktív izotópok vándorlásával szemben.

A felszín alatti tároló végső tömedékelése elsősorban a retardációban játszik szerepet, de az izolációban és a bezárásban is van szerepe.

A visszatöltéshez, mint rendszerelemhez köthető biztonsági funkciók:

- bezárás, vagyis a rövid felezési idejű radioaktív izotópok visszatartása,
- a hulladék elszigetelése a felszíni folyamatoktól és
- a kibocsátás és terjedés korlátozása.

A biztonsági funkciókhoz köthető megvalósulási feltételek:

- az üregek állékonyságának fenntartása,
- megfelelő mérnöki gátrendszer biztosítása,
- meg kell nehezítenie a tároló megközelíthetőségét,
- közeli környezeten belüli terjedési időt maximalizálnia kell,
- a tárolón belül lezajló folyamatok káros hatásának az időben való elnyújtása és
- az advektív és diffúzív transzport korlátozása a közeli környezetben.

A követelményekből származtatott paraméterek:

- pumpálhatóság, zsugorodási hajlam: az üreg hosszú távú állékonyságának fenntarthatósága érdekében a tárolókamrát teljes mértékben tömedékelni kell, a zsugorodásból eredő koronateret ki kell injektálni.
- nyomószilárdság: a tömedékanyagnak hosszú távon intaktnak kell maradnia,
- gázvezető-képesség (és porozitás): a képződő gázokat át kell engednie,
- degradáció mértéke: a tömedékelés vízvezető-képességének minél hosszabb időtartam alatti fenntartása,
- vízvezető-képesség: a tömedékelésre használt anyag vízvezető-képessége legyen alacsonyabb (vagy egyenlő), mint a befogadó kőzeté,
- a tároló mérnöki gátjaiból kimosódott alkalikus csóva hatásainak a minimalizálása (alacsony pH-jú beton?)
- szorpció (izotópfüggő): a maximális megkötődést lehetővé tevő anyagok kiválasztása a mérnöki gátak megépítése során,
- oldékonysági korlát (izotópfüggő): a szennyezők beoldódásának a korlátozása és
- diffúzió korlátozása (izotópfüggő): a porozitástól és diffúziós úthossztól függő jellemző,

Az integritás megőrzésében a szerepét a tároló vágatoknak adott mechanikai stabilitással tölti be. Az anyag összetétele révén, amely a magas pH-jú közeget biztosítja kedvező körülményeket teremt az izotópok visszatartásának. Azok a mennyiségek, amelyeknek az ismerete és megfelelősége a fenti paraméterekből következik: a visszatöltés vízvezető képessége, adott kémiai környezetben a megkötő képesség és az oldhatósági határok, a porozitás és mechanikai szilárdság.

4.6 Lezáró szerkezetek (betondugók, kőzetinjektálás)

A geológiai tároló végleges lezárása során – a tömedékelést követően – a tárolóösszekötő vágatot és a megközelítő vágatokat vízzáró betondugók alkalmazásával le kell zárni. A megközelítő vágatok felszín közeli szakaszát olyan hosszú betondugóval kell lezárni, amely megakadályozza a felszínről történő behatolást. A lezárás funkciója elsősorban az izoláció, de a megközelítő vágatokon keresztül történő izotóptranszport korlátozásában is kiemelt jelentősége van. Bátaapáti specifikus elem a lezáró szerkezetek térbeli elhelyezése. Ugyanis a gránitos kőzetkörnyezet blokkosodott szerkezetéből kifolyólag a betondugókat az áramlási tér kialakításában elsődleges szerepet játszó, agyagos torlasztó zónák szelvényében kell kialakítani. Csak így biztosítható a teljes lezárás.

Ugyancsak ide tartozik a megközelítő vágatok mentén alkalmazott injektálás is, ami részben azt hivatott megakadályozni, hogy a vágat mentén kialakult EDZ-ben transzport út nyíljon az izotópok számára.

A lezáró szerkezetek, mint rendszerelemekhez köthető biztonsági funkciók:

- a hulladék elszigetelése a felszíni folyamatoktól és
- a kibocsátás és terjedés korlátozása (geometriai értelemben).

A biztonsági funkciókhoz köthető megvalósulási feltételek:

- megfelelő mérnöki gátrendszer biztosítása,
- meg kell nehezítenie a tároló megközelíthetőségét,
- a távoli környezeten belüli terjedési időt maximalizálnia kell,

A követelményekből származtatott paraméterek:

- nyomószilárdság: a lezáró szerkezeteknek hosszú távon intaktnak kell maradnia,
- degradáció mértéke: a lezáró szerkezeteknek hosszú távon intaktnak kell maradnia (így biztosítható a blokkok közötti nyomáskülönbség fenntartása),
- vízvezető-képesség: a lezáró szerkezetekben használt anyag vízvezető-képessége legyen alacsonyabb (vagy egyenlő), mint a befogadó kőzeté,
- a tároló mérnöki gátjaiból kimosódott alkalikus csóva hatásainak a minimalizálása (alacsony pH-jú beton?)

Ismételten hangsúlyoznunk kell, hogy túl a lezáró szerkezetek cementes anyagjellemzőin, szerepük a transzportban nem a szorpció, illetve az oldékonysági korlát fenntartásában van, hanem a terciér áramlási rendszer visszaállításában, vagyis a primer állapothoz közeli nyomásviszonyok biztosításában. Azaz nem tételezhető fel, hogy az izotóptranszport útvonalak áthaladnának a lezáró szerkezeteken.

4.7 Geoszféra

Mint azt az előző pontban kifejtettük, a befogadó formáció sajátossága, hogy a kőzettestet blokkokra osztják az ún. torlasztó zónák. Ezek a torlasztó zónák az alacsony vízáteresztő képességük miatt behatárolják a blokkokon belüli árampályákat.

A befogadó kőzet mindhárom már korábban felsorolt átfogó biztonsági funkciót ellátja (elszigetelés, bezárás és retardáció).

A geológiai formáció az a rendszerelem, amely minden biztonsági funkcióban megjelenik és a legtöbb megvalósíthatósági feltétel is a geoszféra tulajdonságaitól függ. A tároló és a geoszféra kölcsönhatása során azonban megjelennek olyan jelenségek, amelyeknek a tisztázására sort kell keríteni, ilyen jelenség az alkáli csóva hatása a torlasztó zóna vízvezető képességére.

A geológiai környezetnek minden biztonsági funkcióban szerepe van:

- a radioaktív hulladék elszigetelése a felszíni, felszín közeli folyamatoktól (pl. erózió, vagy a völgytalpi allúviumban történő vízáramlás),
- elszigetelés az emberi tevékenység elől,
- a radioaktív izotópok elzárása, a stabil geológiai környezet⁶ biztosítása révén,
- a kibocsátás és a terjedés korlátozása, valamint
- diszperzió és hígulás⁷.

⁶ Ez a helyszínekiválasztás folyamatához kapcsolódó tevékenység, a helyszínjellemzési fázisban ezt a biztonsági funkciót, mint a területnek adottságát vesszük csak figyelembe, tovább nem részletezzük.

⁷ Sok országban a hígulást nem tekintik biztonsági funkciónak, mivel nem az elhelyezési rendszerhez, hanem a geoszféra-bioszféra határfelülethez tartozik.

Mivel a geoszféra esetében nem egy homogén rendszerről beszélünk, hanem az több alrendszerből áll, fontos definiálni, hogy melyik követelmény melyik rendszeremhez (alrendszerhez) köthető.

A megvalósulási feltételek, amelyek a torlasztók által határolt **befogadó vízföldtani blokkra** vonatkoznak:

- vízföldtani szempontból stabil geológiai környezet kiválasztása és megőrzése,
- vízföldtani szempontból alkalmas területnek kell lennie és
- geoszférán belüli terjedési idő minél hosszabb legyen.

A vízföldtani blokkhoz tartozó paraméterek:

- vastagság: kellő mélység megléte, a hulladék izolálása miatt,
- geometria és a tároló pozicionálása: a természetes áramlási rendszer megváltozásának a minimalizálása a tároló létrehozása során, torlasztó és jó vízvezető szerkezetek elkerülése,
- előre jelezhetőség: stabil áramlási rendszer megléte (elsősorban a vízkémia, vízkorok alapján történő bizonyítás),
- hidraulikus potenciál: alacsony nyomású blokk kiválasztása,
- transzmisszivitás: alacsony vízáadó-képességű térrész kiválasztása,
- porozitás, mátrixporozitás, szorpciós kapacitás, diszperzió: a terjedési idő maximalizálása a vízföldtani blokkon belül.

A **torlasztó zónákra** vonatkozó megvalósulási feltételek:

- geoszférán belüli terjedési idő maximalizálása⁸,

A követelményekből származtatott paraméterek:

- geometria előre jelezhetősége: a megfelelő tároló térrész kiválasztásához szükség van a torlasztó zónák pontos ismeretére; ez egyben a megcsapolási helyeket is meghatározza,
- hidraulikai vezetőképesség: az alacsony „k” tényező biztosítja a blokkon belüli terjedési idő maximalizálását, a vízföldtani blokkok elválasztása és a blokkon belüli alacsony gradiens fenntartása révén,
- ásványos összetétel: a tároló mérnöki gátjaiból kioldódó alkalikus csóva hatásainak a minimalizálása,

A **gránit mállási kérgé** vonatkozó megvalósulási feltételek:

- a szennyezőanyagok hígulása, a relatíve nagy vízforgalmú mállási kérgében,

A gránit mállási kérgére vonatkozó paraméterek:

- hidraulikai vezetőképesség, effektív beszivárgás: a nagy vízforgalmú felszín közeli rétegben a szennyezőanyag jelentősen hígul,
- szorpciós kapacitás: az izotóptranszport korlátozása a rétegen belül.

A **geoszféra egészére** vonatkozó megvalósulási feltételek:

- stabil földtani környezet,
- tároló elhelyezése az emberi tevékenység hatókörén kívül
- a felszíni folyamatoktól megfelelően elzárt térrész kiválasztása,
- a tárolónak megfelelő földtani környezet kiválasztása (jó vízvezető és torlasztó zónák elkerülése),
- geoszférán belüli terjedési idő maximalizálása,
- a tárolóból kijutó szennyezők nagy szóródása és
- az elhelyezési rendszerből kikerülő szennyezőanyagok hígulása.

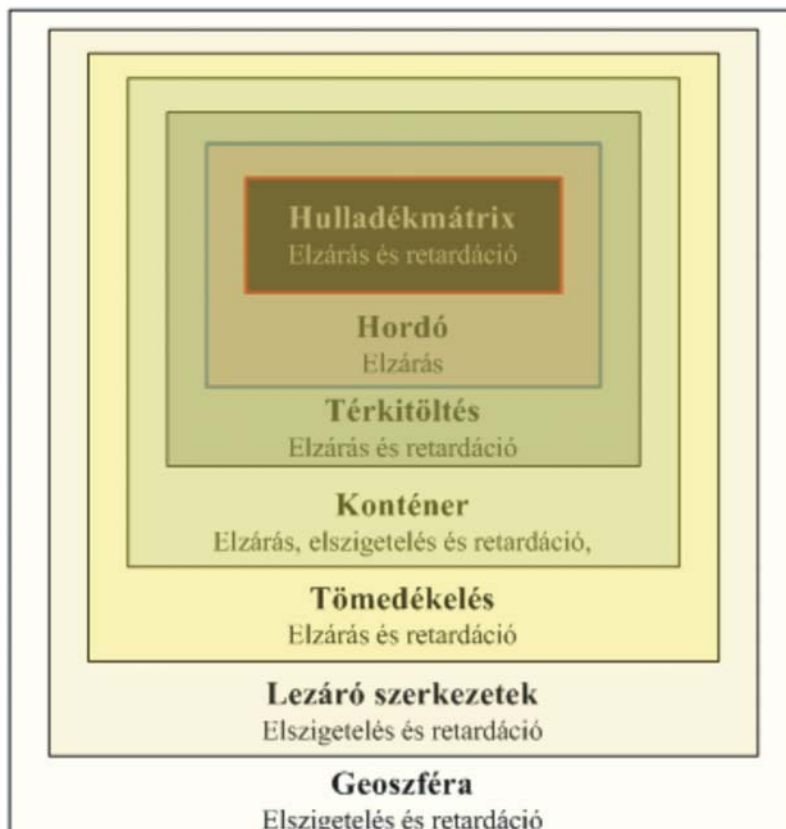
A követelményekből származtatott paraméterek:

- szeizmikus veszélyeztetettség: szeizmiológiai szempontból veszélytelen térrész kiválasztása,
- alacsony nyersanyag potenciál: roncsolással járó, véletlen emberi tevékenység bekövetkezési valószínűségének minimalizálása,
- megfelelően vastag közettömeg meglétének a biztosítása a tároló felett,

⁸ A torlasztó zóna sem a hulladék izolálásában, sem az elzárásban nem játszik szerepet, ellenben igen fontos szerepe van az áramlási rendszer alakításában, a blokkok nyomásviszonyainak fenntartásában (alacsony gradiens). Ugyanakkor nem valószínű, hogy az izotóptranszport útvonalak érintik ezeket az agyagos zónákat.

- kiemelkedés és erózió sebessége: a tároló relatív helyzetének megváltozása ne befolyásolja a megcsapolási viszonyokat és az áramlási sebességet,
- szorpciós kapacitás: a megkötő-képesség elsősorban a repedések felületén lévő agyagos bevonatot jellemzi,
- vízfluxus (transzmisszivitás eloszlása): advektív transzport korlátozása a geológiai környezetben,
- geometria: a tároló helyének kiválasztása a bioszféra irányába mutató árampályákon kívül,
- hígulás: a megcsapolási pontokon a hígulás mértéke.

A fentebbiek grafikus összefoglalását a (5. ábra) ábra mutatja:



5. ábra A rendszerkomponensek legfontosabb átfogó biztonsági funkciói

5 A BIZTONSÁGI FUNKCIÓK SZEREPE A BIZTONSÁGI ÉRTÉKELÉSBEN

Egy geológiai tároló működésének megértéséhez és értékeléséhez elengedhetetlen, hogy alaposan elemezzük azokat a rendszerelemeket, jellemzőket és folyamatokat, amelyek a végső biztonságot biztosítják. Amint azt már említettük (2.3 pontban), három átfogó biztonsági funkciót tudunk megkülönböztetni:

- az elszigetelést,
- a bezárást és
- a retardációt.

A tervezett NRHT rendszerlemeinek tulajdonságai alapján a három átfogó biztonsági funkciót további általános, majd egyedi biztonsági funkciókra bontottuk (4. pont).

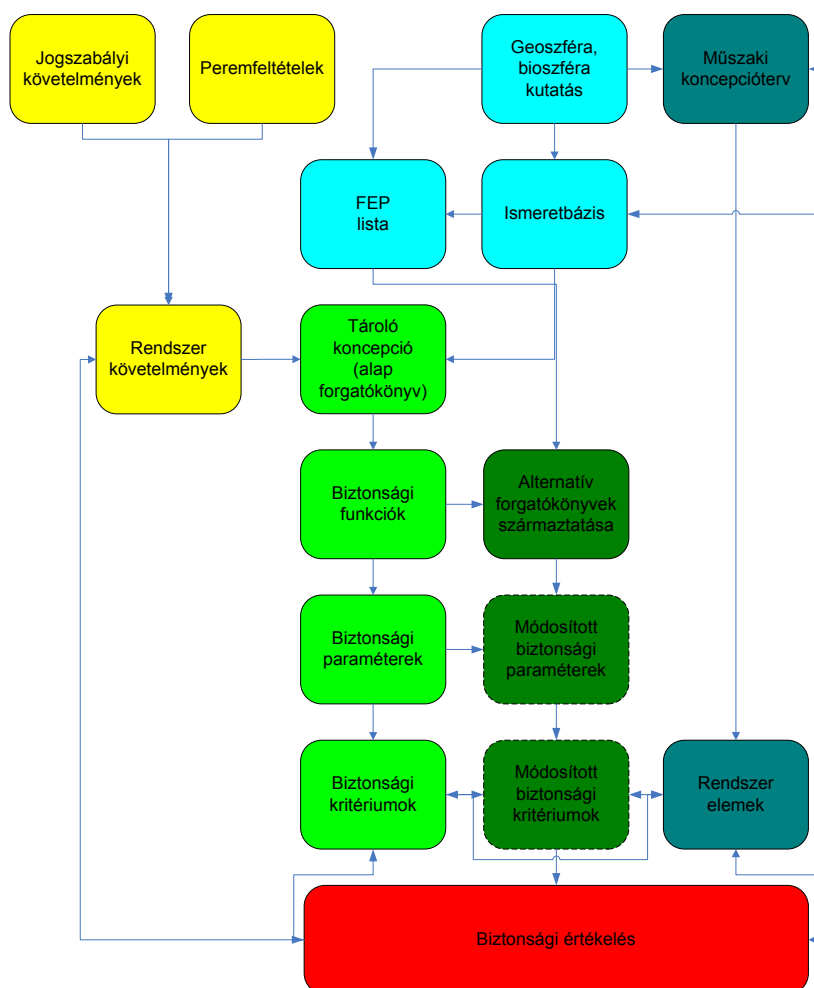
Az egyedi biztonsági funkciókkal kapcsolatosan a következő definíciókkal élhetünk:

- Egy egyedi biztonsági funkció az a tulajdonság, amelyen keresztül egy adott rendszerelem, jellemző vagy folyamat hozzájárul a teljes elhelyezési rendszer biztonságához.
- A biztonsági paraméter értéke az az adott rendszerlemhez kapcsolódó mérhető vagy számítható változó, amely azt mutatja meg, hogy az adott paraméter mennyiben járult hozzá a kapcsolódó egyedi biztonsági funkció működéséhez.
- A biztonsági paraméterváltozó határértéke megmutatja azt a mértéket, amelyen túl az adott biztonsági funkció hatékonyan működik közre az elhelyezési rendszer teljes biztonságában.

Az előzőekből következően, a biztonsági funkciók rendszere egy olyan eszköz, amely segítségével a teljes biztonság értékelhető. Ezt úgy tehetjük meg, ha térre és időre vonatkozóan meg határozzuk azokat a biztonsági funkciókhoz tartozó határértékeket, amelyek elérésével biztosítható az elhelyezési rendszer végső biztonsága. Ugyanakkor meg kell említeni, hogy nem szükséges, de nem is hatékony minden egyes biztonsági paraméter határértékét kielégíteni. (Ugyanakkor nem megengedhető, hogy egy általános biztonsági funkciót csak egy rendszerelem, vagy mechanizmus fejtsen ki, mert ezzel a többszörös gátrendszer elve sérülne.) Az elhelyezési rendszer elemei ugyanis térben és időben egymást kiegészítve, átlapolódva biztosítják az ember és környezete védelmét. Másfelől a biztonsági paraméterváltozó értékek kombinációit vizsgálva, megteremthető az elhelyezési rendszer optimalizálásának lehetősége, természetesen több iteratív cikluson keresztül finomítva a rendszer kiépítését. Ezekből következően a biztonsági funkció kapcsolatos, de nem egyenlő a helyszínválasztási és tervezési kritériumokkal. Ily módon a biztonsági funkciókat tekinthetjük a biztonsági értékelés központi elemének.

Az egyes biztonsági funkciók tervezett állapottól eltérő viselkedése lehetőséget nyújt az alternatív forgatókönyvek származtatásához is. Ennek módszertani kérdései azonban túlnyúlnak a jelen cikk keretein.

A következő (6. ábra) ábrán szemléltetjük a biztonsági funkciók szerepét a biztonsági értékelésben.



6. ábra A biztonsági funkciók szerepe a biztonsági értékelésben

Végső soron tehát, a biztonsági értékelésnek feladata a biztonsági funkciók működésének megértése, azok elemzése és ezeken keresztül a teljes elhelyezési rendszer biztonságosságának bizonyítása.

6 ÖSSZEFOGLALÁS

A radioaktív hulladékok geológiai elhelyezését úgy kell tervezni, hogy az biztosítani tudja mind az üzemviteli, mind a lezárást követő, hosszú távú biztonságot. Az üzemviteli biztonság a megfelelően kialakított műszaki védelmet és az egészségügyi szempontokat figyelembe vevő működési eljárások alkalmazását jelenti. A lezárást követő biztonság azonban olyan elemekre épít (mérnöki és geológiai gátak sorozata), amelyek magukra hagyva, külső hatásoknak is ellenállva, akár többszázézer évig is garantálni tudják az ember és környezete biztonságát.

A bátaapáti Nemzeti Radioaktív Hulladék-tároló (NRHT) létesítése kapcsán végzett biztonsági értékelési munkák egyik megalapozása volt a telephely-specifikus biztonsági funkciók meghatározása. Ezeket az egyedi biztonsági funkciókat a NAÜ WS-R-4 (IAEA 2006) dokumentumban található biztonsági követelményekből lehetett levezetni, alkalmazva Bruno et al. 2004. biztonsági alapelveit.

A nemzetközi szakirodalom alapján, a tároló rendszerlemei fizikai és kémiai tulajdonságai révén a következő átfogó biztonsági funkciókat fejthetik ki:

- a hulladékcsomagok integritásának fenntartása, vagy elzárás (*containment*),
- a hulladék izolálása (és az abból esetlegesen kijutó szennyezőanyagok mozgásának korlátozása) az embertől és környezetétől (*isolation*) és
- a radioaktív izotópok kijutásának korlátozása és mobilitásának gátlása (*limitation and retardation, néha delay and retardation*).

A tároló rendszerlemeinek biztonsági osztályba sorolása (BÉRCI *et al.* 2005) megteremtette az alapot a helyszín-specifikus biztonsági funkciók meghatározására. A tároló hosszú távú, lezárást követő biztonságában a következő rendszerlemekhez lehet biztonsági funkciókat rendelni: hulladékmátrix, acélhordó, konténer, térkitöltés, tömedékelés, lezáró szerkezetek és geoszféra.

A műszaki gátrendszer (*EBS – Engineering Barrier System*) elemei biztosítják a hulladékcsomagok fizikai integritását, ugyanakkor cementalapúak (kivéve az acélhordót), így magas pH-jú környezetet teremtenek a tárolóban és közvetlen közelében, ezzel oldékonysági korlátot állítva az exponálódott izotópoknak. Az expozíció késleltetését és a transzportfolyamatok gátlását a betonos anyagok elnyújtott degradációja, a rossz vízvezető-képességből eredő korlátozott vízforgalma okozza. A cement alapú komponensek magas szorpciós-kapacitással is rendelkeznek.

A geoszféra megteremti a hulladék elszigetelését a felszíni eredetű, emberi és természeti hatásoktól, ugyanakkor stabil környezetet biztosít az elhelyezett hulladék számára, így biztosítva a fizikai integritás megőrzését. E mellett a geoszféra korlátozza a tárolóból kiszabadult izotópok transzportját, míg a geoszféra-bioszféra határfelületen jelentős hígulással is számolhatunk.

Ezen rendszerlemek és biztonsági funkciók vizsgálata lehetőséget teremt a rendszer megértésére, a biztonságosság megítélésére és az elhelyezési rendszer optimalizálására.

IRODALOM

- BÁRDOSSY, G. 1998: A radioaktív hulladékok elhelyezése Magyarországon, *Földtani Közlöny*, **128**: 179-196
- BATH, A. és JEFFERIS, S. 2004: Geochemical and Geotechnical Considerations, Performance of Concrete in the Source Term for Performance Assessment of the Proposed LILW Repository, Bátaapáti, Hungary — **Kézirat**, *Intelligisci Ltd.*, Willoughby-on-the-Wolds, UK,
- BÉRCI, K.; TAKÁCS, T.; DANKÓ, G.; BÓTHI, Z.; VERBÓCI, J.; MESTER, J.; MUHEL, J. 2005: Pontosított Biztonsági Értékelés. A végleges elhelyezésre szolgáló létesítmény elemeinek, rendszereinek és az azok által megvalósított funkcióknak biztonsági osztályba sorolása — **Kézirat**, *ETV-ERŐTERV Rt.*, Budapest, RHK-K-048/05
- BÓTHI, Z.; BAKSAY, A.; DANKÓ, G.; S. TOMBOR, K. 2008: Modelleket, programokat és adatokat összefoglaló jelentés — **Kézirat**, *Golder Associates*, Budapest, RHK-K-069/08
- BRUNO, J.; DE PRETER, P.; GREVOZ, A.; NYS, V.; RAIMBAULT, P. 2004: Geological Disposal of Radioactive Waste: Elements of a Safety Approach — **Kézirat**, *ADN, ANDRA, AVN, FANC, IRSN, ONDRAF/NIRAS*,
- IAEA 2003: Scientific and Technical Basis for the Geological Disposal of Radioactive Wastes. — **Kézirat**, *International Atomic Energy Agency*, Vienna,
- IAEA 2005: *Geological Disposal of Radioactive Waste* — **Kézirat**, *International Atomic Energy Agency*, Vienna,
- IAEA 2006: *Geological Disposal of Radioactive Waste*. — **Kézirat**, *International Atomic Energy Agency*, Vienna, No. WS-R-4
- MILLER, W.; ALEXANDER, R.; CHAPMAN, N.; MCKINLEY, I.; SMELLIE, J. 2000: *Geological Disposal of Radioactive Wastes and Natural Analogues*, Pergamon, Amsterdam, pp. 316
- ORMAI, P. 2003: *Nemzetközi és hazai törekvések a radioaktív hulladékok biztonságos kezelésére és elhelyezésére*, Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Társaság, Budapest, pp. 119
- PERGER, A. 2008: *Az atomenergia esélyei a XXI. században*, **Kézirat**, *Energia Klub*, Budapest,
- VAJDA, G. 1998: *Kockázat és biztonság*, Akadémiai Kiadó, **Budapest**, pp. 476