

mentes vizsgálatok megbízhatóságának növelését eredményező tevékenységek (vizsgálatminősítés), valamint a repedést tartalmazó berendezések további üzemeltethetőségének értékelésére szolgáló törésmechanikai számítási eljárások tökéletesítése.

Biztonságnövelő intézkedések

A biztonságnövelő intézkedések elmaradása csökkenti az üzemidőt. Az atomerőmű üzemeltetése időszakában végrehajtott biztonságnövelő intézkedések célja – az üzemi tapasztalatok, az új szempontok alapján elvégzett biztonsági elemzések és a műszaki–tudományos ismeretek bővülése alapján – a biztonság adott korban megkövetelt szintjének biztosítása. Ennek illusztrálására a 6. ábrán a biztonsági tartalékot nem változtatlanként ábrázoltuk az erőmű üzemideje alatt. Az ábra szignifikáns változást mutat, de folyamatos növekedés vagy több diszkrét változás is lehetséges.

Ahhoz, hogy a reaktor üzemét ne kelljen korlátozni a szigorúbbá vált biztonsági követelmények miatt, biztonság-növelő intézkedéseket kell végrehajtani.

Irodalom

1. *Glossary of Nuclear Power Plant Ageing*. OECD/NEA, Paris, 1999.
2. *Nuclear Power Reactors in the World*. Reference Data Series No. 2. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2005.
3. Vajda Gy.: *Energiapolitika*. Magyar Tudományos Akadémia, Budapest, 2001.
4. IAEA-TECDOC-1085: *Hydrogen as an Energy Carrier and Its production by Nuclear Power*. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1999.
5. *Nuclear Technology Review 2006*. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2006.
6. Fazekas A.I.: *Villamosenergia-termelési technológiák jellemzői*. MAFE, Budapest, 2005.
7. Civin V.: A ki nem bocsátott széndioxid, mint áru. *A Magyar Villamos Művek Közleményei 1* (2004) 32–42.
8. Szatmáry Z.: A jövő atomerőművei. *Műszaki Tudomány 11* (2001) 1292–1299.
9. Davies, M. et al: Harmonising national life management approaches. *Nucl. Eng. Intern.* 4 (2003) 12–14.

RADIOAKTÍV HULLADÉKOK FÖLD ALATTI ELHELYEZÉSÉNEK »VIZES« KÉRDÉSEIRŐL

Nagy Zoltán, Buday Gábor
Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft.

A radioaktív hulladékok föld alatti elhelyezése

Egy föld alatti radioaktív hulladék-tároló a radioaktív hulladékokat az emberi és biológiai környezettől elszigetelő természetes és mesterséges gátak rendszeréből épül fel. A természetes gát a tárolót befogadó kőzetből és annak geológiai környezetéből áll. A geológiai környezet főbb elemei a talaj- és rétegvizek (együttesen a felszín alatti vizek), valamint a kőzetalkotó ásványok és a felszín alatti vizek kémiai tulajdonságai által meghatározott geokémiai környezet. A mesterséges gátak rendszerének alkotóelemei a kondicionált hulladékforma, a hulladéksomag, a hulladéksomagot kívülről körülvevő, azt védő csomagolás, a hulladéksomagok közötti réseket kitöltő anyag, valamint a föld alatti tárolótérség fala és az ott elhelyezett hulladéksomagok közti „üres” térrészt kitöltő tömedékanyag.

E természetes és mesterséges gátaknak együtt kell biztosítaniuk, hogy a tárolóban elhelyezett radioaktív hulladéknak az emberi környezetre gyakorolt radiológiai hatása – megfelelően hosszú időn keresztül – a hatóságok által előírt határ alatt maradjon.

Egy föld alatti (geológiai) tárolóban a természeti környezetnek (a természetes gátak) nemcsak azt kell biztosítani, hogy a mesterséges gátak megfelelően „működhesse”, hanem ezen kívül fel kell tartóztatnia azokat a radionuklidokat, amelyek a mesterséges gátak rendszerén keresztül a bioszféra felé tartanak.

A föld alatti vizek jelentősége

A természeti környezeten belül a föld alatti vizek szerepe azért jelentős, mivel egy föld alatti radioaktív hulladék-tároló rendszerint a talajvízszint alatt helyezkedik el teljes egészében, és a föld alatti vizek által történő szállítódás az a legvalószínűbb természetes mechanizmus, amely segítségével a radionuklidok elérhetik az emberi környezetet. Ezért egy radioaktív hulladék-tároló létesítésével, üzemeltetésével és bezárásával kapcsolatban különösen nagy súlyt kell fektetni a hidrogeológiai környezet megismerésére, megértésére és megfigyelésére.

A hidrológiai körforgás keretében a vizek folyamatosan alakulnak át egyik állapotukból a másikba. A víz eső, ónos eső vagy hó formájában hullik le a földre. A csapadék egy része a tavakba, folyókba és óceánokba hullik, illetve folyik. Ezeket nevezzük felszíni vizeknek. A csapadék másik része beszivárog a talajba.

A talajba beszivárgott víz egy része onnan elpárolog, egy másik részét a növényzet szívja fel és párologtatja el. A párologtatás eredményeként a levegőbe visszakeringő vízből felhők képződnek, amiből eső formájában a víz visszahullik a földre, ezzel zárva a hidrológiai ciklust.

A talajban az elpárolgás és a növényzet által történő elpárologtatás után visszamaradó vizeket nevezzük felszín alatti vizeknek. A felszín alatti vízszint felszíntől mért távolsága területenként változó. Ahhoz, hogy a

felszínről beszivárgó víz eléri a felszín alatti vízszintet, a helyi körülményektől függően órákra, évekre van szükség. A beszivárgó vizek csak az első vízzáró réteggig tudnak beszivárogni. A vízzáró rétegek között található vizeket rétegvizeknek nevezzük.

A felszín alatti vizek a kőzetekben lévő apró pórus-terekben és/vagy a kőzetekben lévő repedésekben mozoghatnak. A mozgás sebessége többek között nem csak a pórusterek és/vagy repedések nagyságától függ, hanem attól is, hogy ezek milyen mértékben összekötöttek. A talajvizek mindig fentről lefelé áramlanak. A rétegvizek esetében, amikor a rétegvíz nyomás alatt van, az áramlás iránya lehet felfelé irányuló is, ugyanis a nyomás alatt levő rétegvíz mindig az alacsonyabb nyomású hely felé áramlik.

Amennyiben a kőzetben található valamely pórustér vagy repedéstér nincs közvetlen kapcsolatban rétegvízzel, akkor ezek „üresek”, azaz vízmentesek is lehetnek, hiába található felettük, körülöttük akár több száz méter vastagságban vízzel telített kőzet. Ebből következően egy föld alatti térség kialakítása csak a feltárt repedések egy részéből folyik ki víz. A föld alatti térségbe egy adott időtartam alatt bejutó víz mennyisége függ a vizet tartalmazó repedések nagyságától és sűrűségétől.

A vizek kora a ^{14}C -, illetve ^3H -tartalmuk alapján jól meghatározható. A vizek korának megismerése azért fontos, mert egy felszín alatti víz magas kora arra utal, hogy az adott vízföldtani környezetnek nincs, vagy nagyon korlátozott kapcsolata van csak a jelenkori csapadékkal, azaz a felszínnel. Ez azt is jelenti, hogy a vizsgált víztömeg nincs kapcsolatban közvetlenül a felszínre mutató gyors áramlási pályákkal.

A vízzel telített kőzeteknek abban a részében, amelyben nincs se repedés, se pórustér (az ún. kőzetmátrixban), a víz csak diffúzió útján tud mozogni.

A radioaktív hulladék-tárolókban alkalmazott mesterséges gátrendszer egyik legfontosabb szerepe az, hogy megfelelően hosszú ideig lehetetlenné tegye, hogy víz férjen az elhelyezett hulladékhoz, és abból radionuklidokat oldjon ki. A jó mesterséges gátrendszerre az jellemző, hogy igen hosszú időn át a víz csak diffúzióval tud mozogni benne.

Bármilyen jó is egy mesterséges gátrendszer, „természetes elöregedése” következtében – egy bizonyos idő elteltével – biztosan elveszíti kedvező tulajdonságait, és nem tölti be többé a tőle elvárt szerepet. Így víz érheti a tárolóban elhelyezett hulladékot és abból radionuklidokat oldhat ki, és a kioldott radionuklidok a víz segítségével kiléphetnek a tárolóból a természetes környezetbe.

Ekkor válik igen lényegessé a természetes gátrendszer, azaz a tároló geológiai környezete. A radioaktív hulladék tárolás szempontjából a jó geológiai környezet

- gátolja a víz mozgását, azaz csökkenti a benne lévő víz mozgási sebességét,
- nem a bioszféra irányába vezeti el a tárolótérből kilépő vizeket, és
- elősegíti a vízben oldott radionuklidok megkötődését, kiszűrődését a repedések felületén.

Ezért célszerű a föld alatti radioaktív hulladék-tárolókat olyan vízföldtani környezetbe telepíteni, ahol a vízáramlás lefelé irányul, így megnő annak az útvonalnak a hossza, amely mentén a radionuklidok kijuthatnak a felszínre. Ez egyben azt is maga után vonja, hogy a radionuklidok hosszabb idő alatt érhetik el a felszínt annál, mintha közvetlenül felfelé vinné őket a víz.

A hosszabb útvonalon több oldott radionuklid tud megkötődni a repedések fala mentén, a hosszabb időtartam miatt pedig több oldott radionuklid bomlik el a természetes radioaktív bomlás miatt. Mindezek következtében, mire a tárolóból kilépő víz eljut a bioszférába, jelentősen csökken, vagyis gyakorlatilag a nullához közelít a benne oldott radionuklidok mennyisége.

A Bábaapátiban létesíteni tervezett Nemzeti Radioaktív Hulladéktároló vízföldtani környezete

Sokévnyi kutatás után 2005 elején megkezdődött a Bábaapátiban létesíteni tervezett Nemzeti Radioaktív Hulladéktároló 250 m mélyen kialakítandó tárolókamráinak elérhetőségét biztosító két lejtakna kialakítása. A tárolót teljes egészében gránit kőzetben alakítják ki, mégpedig mintegy 200 méterrel a gránitban megfigyelt talajvízszint alatt.

A terület kutatása 1996-ban kezdődött, és az eddig kivitelezett közel 9000 m fúrással megvizsgálták többek között a befogadó kőzetet, annak vízvezető képességét, a víz korát, áramlási irányát és sebességét. 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.

A terület vízháztartásának vizsgálata szerint az éves csapadékösszeg sokéves átlaga 632 mm. A lehullott csapadék mintegy 92%-a párolog el a felszínről és a talajzónából, illetve párologtatódik el a növényzet által. Sokéves átlagban mintegy 25 mm-nyi csapadék

A bábaapáti kutatási telephely



szivárog be a talajba. Körülbelül ugyanekkor csapadékmennyiség felszíni lefolyással távozik a vízgyűjtő területéről.

A talajba beszivárgott víz 95–99%-a a mállott gránitban oldalirányban eláramlik, mivel a mállott gránit vízvezető képessége mintegy 2–3 nagyságrenddel felülmúlja az üde gránitét. Az üde gránitba a beszivárgott víz 1–5%-a jut, ami 0,25–1,25 mm-nyi éves csapadéknak felel meg.

A talajnedvesség függőleges irányú mozgása igen lassú, 0,075–0,17 m/év, így a dombtetőkön a csapadékvíznek több száz évre van szüksége, hogy elérje az összefüggő talajvízszintet.

Az üde gránitösszetétel hasadékos víztartó képződmény: a kristályos alapkőzet gyakorlatilag vízzáró; a vízáramlás pedig szinte kizárólag egyes nyitott repedések, hasadékok mentén történik. A fúrásokban észlelt nyitott repedések mintegy 7%-a bizonyult vízadóknak. A vízáramlás zöme elsősorban egyes lokális vízvezető zónákhoz kapcsolódik (de a vízadó repedések aránya a fúrásokban ezekben a zónákban sem lépte túl a 35%-ot). A vizsgálatok szerint a nyitott repedések nélküli kristályos alapkőzet szivárgási tényezője 10^{-12} m/s körüli érték, azaz a víz benne alig tesz meg többet 3 méternél 100 000 év alatt.

A tároló térségében 250 méterrel a felszín alatt a gránitban található repedésvizek kora 7000 és több mint 10 000 év között változik, tehát még a repedésekben is igen lassú a vizek áramlása.

A tervezett tároló térségében nem csak a vizek áramlási sebessége, hanem azok áramlási iránya is kedvező, azaz az áramlás függőleges komponense lefelé irányuló. A modellezések szerint ennek köszönhetően a tárolótérbe szennyező anyag csak több ezer – néhány tízezer év alatt juthat a felszínre, és ezalatt jelentős mértékben fel is hígul. (Ehhez természetesen arra is szükség lenne, hogy az épített műszaki gátak sérüljenek – lásd később.)

A számítások szerint a tárolóból esetleg kijutó radionuklidok a felszíni vizekben az eredeti állapothoz képest mintegy tízezerszeresen felhígulva jelennek csak meg.

A 30 éves felezési idejű, lebomló szennyeződés már a tároló közeléből sem képes nagyobb távolságra eljutni, szinte helyben elbomlik, és esetünkben ilyen felezési idejű izotópokkal szennyezett hulladék végleges elhelyezéséről van szó.

Az elhelyezendő hulladékok acélhordóba csomagolva érkeznek a tároló felszíni telephelyére. A hordókat vasbetonkonténerekbe helyezik, a hordók közét és a felettük lévő teret inaktív cementtel töltik ki. A konténerek köré bentonitos szigetelőréteg kerül. A tárolókamra szabadon maradó térsége öntömörödő betonnal lesz feltöltve. Ez utóbbi tömédékanyaggal kapcsolatban elvárás, hogy szivárgási tényezője ne legyen nagyobb, mint 10^{-11} m/s.

Ez a műszaki (mesterséges) gátrendszer

- elszigeteli a hulladékot a környezetétől, így a tároló nyitva tartása alatt megakadályozza az akaratlan vagy szándékos emberi behatolást,

- rossz vízvezető képessége révén hidraulikus gátat alkot, azaz csökkenti a hulladékkal érintkezésbe kerülő víz mennyiségét, ezáltal lassítja a konténerek tönkremenetelét és korlátozza a radionuklidok kijutását a földtani környezetbe,

- a tömédékanyagban jelen lévő jelentős mennyiségű cement kedvező megkötő tulajdonsága révén elősegíti a szennyező anyag visszatartását,

- a nagy mennyiségben felhasznált cement tartósan magas pH-t, erősen lúgos környezetet teremt, amely egyes radioaktív izotópokra oldhatósági korlátot eredményez, emellett stabilizálja, és ezáltal kiszámíthatóbbá teszi a geokémiai környezetet,

- a tömédékanyag megtámasztja a vágatbiztosítást, ezáltal hosszabb időtávlatban megakadályozza a tárolókamrák kőzetkörnyezetének föllazulását.

A modellezési eredmények azt mutatják, hogy a betömédékelt kamrákon belül a beton tönkremenetele időben csak igen kis mértékben befolyásolja a kamrákba jutó víz mennyiségét; a betömédékelt befejezésekor és az 50 000 évvel későbbi időpontban a kamrákba egy adott időegység alatt belépő vizek mennyisége között nincs nagyságrendi különbség. Ennek magyarázata egyszerűen az, hogy hiába nő meg a beton tönkremenetele következtében vízvezető képessége, a közvetlen földtani környezet alacsony szivárgási tényezője mintegy felülről korlátozza az egységnyi idő alatt a tárolótérbe lépő víz mennyiségét.

2003-ban, a felszín alatti munkák megkezdése előtt, szakvélemények készültek a lejtaknában várható vízbeáramlás mértékéről. A fúrási adatok, modellszámítások, külföldi analógiák alapján megállapították, hogy a legjelentősebb egyedi vízbeáramlások hozama rövid távon elérheti az 500 liter/percet, azonban a korlátozott utánpótlódás miatt ez a hozam néhány nap – néhány hét alatt a töredékére csökken. A vízbelépés intenzitása a fő vízvezető zónák előzetes elcementezésével jelentősen mérsékelhető. A szakvélemény szerint elcementezés nélkül a lejtaknák 100 m-ére vetítve 30 liter/perc átlagos beszivárgás várható.

A lejtaknába történő vízbeáramlás a tároló építési és üzemeltetési ideje alatt elsősorban műszaki kérdés, hiszen a beszivárgó vizet szivattyúkkal a felszínre lehet és kell emelni, illetve a lejtaknába soha sem kerül hulladék elhelyezésre. A tároló végső lezárását követően azonban a hosszú távú biztonság szempontjai a lényegesek, hiszen a szennyezett víz a fő vízvezető zónák mentén juthat csak a felszín közelébe, ezért lejtaknák a tárolókamrákhoz hasonlóan teljes mértékben el fogják tömédékelni, kizárva ezzel a további vízbelépés lehetőségét, illetve azt, hogy a lejtaknák lehetséges áramlási pályaként „működjenek”.

2004-ben, a lejtaknák kihajtásának megkezdése előtt az a döntés született, hogy a lejtaknában a vízbeáramlás mértékét 100 m-enként 10 liter/perc alá kell csökkenteni és ennek érdekében a fő vízvezető zónákat injektáló anyaggal el kell cementezni. A lejtaknák kihajtása ennek megfelelően folyik: a lejtak-

nákban előre mélyített fúrásokkal vizsgálják a kőzetet, és ha jelentős vízvezető képességű zónát harántolnak, azt előzetesen elcementezik.

Jelenleg már mindkét lejtakna hossza eléri az 1700 métert, és megközelítik a tároló tervezett mélységét. Az előfúrásokban eddig észlelt legnagyobb egyedi beáramlás 180 liter/perc volt. A lejtaknák hosszának kevesebb, mint 15%-án volt szükség előinjektálásra, és a felszínre emelt teljes vízmennyiség jelenleg 160 liter/perc, azaz 100 m lejtaknahosszra vetítve kevesebb, mint 5 liter/perc.

A lejtaknák falát löttbetonréteg támasztja meg. Ennek a kőzetomlás megakadályozása, és nem a vízkizárás a feladata, így az el nem cementezett kisebb repedésekből helyenként csepegés, szivárgás észlel-

hető. Ezek mértéke azonban sem a vágathajtás, sem a biztonság szempontjából nem jelent problémát. A vízbetörést jelentő, belépési pontonként 2500 liter/perc értéket meg sem közelítik.

A felszín alatti tároló 2007-ben készült létesítési engedélyezési terve a jelenleg alkalmazott vízkizárási módszereket megfelelőnek értékeli. Ez a megállapítás a tároló létesítési engedély-kérelmét megalapozó biztonsági elemzés eredményeit összefoglaló biztonsági jelentésben alapul. A biztonsági elemzés eredményei alapján kijelenthető, hogy az elkövetkező 200 000 évben a tároló létesítése, üzemeltetése és bezárása (felhagyása) következtében a lakosságot érő dóziszárulék több mint egy nagyságrenddel a hatóságilag előírt dózismegszorítás szintje alatt marad.

HARGITAI CSABA

1939–2007

Hargitai Csaba korai évei a fizikában

Hargitai Csabát sokan szerettük, tiszteltük emberségéért, tudásáért, humoráért, új botrányokról szóló szórakoztató történeteire és a világ minden dologára kiterjedő érdeklődéséért. Mindenki nagy sikereket várt tőle, de sorsa másként alakult. Az ő történetét szeretném pontosan elmondani és ezért a szokásosnál részletesebben. Minden szomorú sors tanulságos, remélem az ő sorsa is az.



Hargitai Csaba fizikus évfolyamának egyik kiemelkedően tehetséges tagja volt és érdeklődése korán az elméleti fizika felé fordult. Azon kevesek közé tartozott, aki nem az elemi részek, hanem a kondenzált anyagok elméletével kívánt foglalkozni. Már hallgatóként is rendszeresen látogatta az ELTE Elméleti Fizikai Tanszékének szemináriumait, és ott az egyetlen ilyen irányú szemináriumot *Szabó János* és *Abonyi Iván* szervezte a plazmafizika köréből. Szabó Jánossal mint hallgató írta a magneto-hidrodinamika egyenletei megoldásának egyértelműségére vonatkozó dolgozatát. Azután a KFKI Szilárdtestfizikai Főosztály akkor alakuló elméleti csoportjához került (*Menyhárd Nóra*, *Sólyom Jenő*, *Siklós Tivadar*, *Solt György* és *Zawadowski Alfréd*). Itt csoportosan láttak hozzá a szilárdtestfizika elméleti alapjainak elsajátításához. Ekkor a Szovjetunióban több csoportban is a statisztikus fizika problémáira a térelméleti módszereket alkalmazták. Így került sor arra, hogy *Pál Lénárd* felismerve ennek

fontosságát, felkérte őt és engem, hogy egy heti három órás szeminárium formájában ismertessük az akkor frissen megtanultakat. Ebből egy jegyzet is készült, amelyet a fiatal generáció sok éven át forgatott. A tanulás sok területre kiterjedt, többek között a fázisátalakulások elméletére, amelyet a főosztályon folyó kísérleti munkák igényeltek. Ez tette szükségessé a csoportelmélet alapos tanulmányozását. Később, ugyancsak ketten, egy széles kör által látogatott bevezető szilárdtestfizikai előadás sorozatot tartottunk *Ziman* könyve alapján heti három órában egy éven keresztül. Foglalkozott a szupravezetés és a szuperfolyékonyág elméletével, majd figyelme alapvetően a mágnesség, illetve a fémekben előforduló mágneses szennyezések felé fordult, és ez iránti érdeklődése élete végéig meghatározó maradt.

Ez az időszak az egész elméleti csoport számára nem az önálló publikálás, hanem a tanulás időszaka volt. Ebben az időben egyetlen dolgozata jelent meg, amelyet *Pócsik György* sugallatára írt, aki az összegyszabályok révén kívánta az elemi gerjesztések energiáit meghatározni. Ekkor felmerült, hogy hogyan lehet a Bose-kondenzációt mutató szuperfolyékony héliumra alkalmazni Pócsik György módszerét. Ezt a problémát Csaba egy rövid, de igen elegáns dolgozatban oldotta meg. 1965-ben a többiekkel együtt folytatta a tanulást igen lelkesen, iszonyatos alaposággal és eltökéltséggel. Mindenki számára készen állt, hogy elmélyült tudását megossza és így a többieket eredményesen segítse.

1968 körül Pál Lénárd bevonta a kísérleti mágneses vizsgálatokba és így a Mn_3Pt fázisátalakulásra vonatkozó kísérleti kutatásokat tartalmazó dolgozatban az elméleti háttérrel biztosította. Ezt követően, amíg az Elméleti Csoportban dolgozott, érdeklődése középpontjára