

KONTÉNERES SUGÁRFORRÁS-TÁROLÓ LÉTESÍTÉSE A PÜSPÖKSZILÁGYI RADIOAKTÍV HULLADÉK FELDOLGOZÓ ÉS TÁROLÓBAN

Kovács Bence^{1,*}, Buday Péter^{2,**}, Meleg Ádám¹

¹Izotóp Intézet Kft., 1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

²Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft., 7031 Paks, Pf. 12.

*kovacs@izotop.hu

**buday.peter@rhk.hu

A kézirat beérkezett: 2026.05.08.

Közlésre elfogadva: 2026.05.26.

The interim storage of sealed radioactive sources with significant activity is a critical technical and radiation protection task in radioactive waste management. With the development of industrial applications, sources with increasing activity, predominantly containing Co-60 isotope, are appearing, while the existing waste management infrastructures were primarily designed for lower activity levels. The conventional technological chain of the Püspökszilágy Radioactive Waste Treatment and Disposal Facility is no longer applicable for higher activity sources due to design limitations.

During our work, a cask-based radioactive source storage system was developed in cooperation between the Public Limited Company for Radioactive Waste Management and the Institute of Isotopes Ltd. The system ensures the fulfilment of fundamental safety functions through the application of multiple engineered barriers, primary lead-based and secondary concrete shielding, as well as safety analyses (radiation protection calculations, finite element structural and thermal analyses, ageing management studies). Our results confirm that the solution is suitable for the safe, long-term outdoor interim storage of Category 1 and 2 sealed radioactive sources.

Keywords: *sealed radioactive source, Co-60, radiation protection*

A jelentős aktivitástartalmú zárt sugárforrások átmeneti tárolása a radioaktív hulladék-gazdálkodás egyik kritikus műszaki és sugárvédelmi feladata. Az ipari alkalmazások fejlődésével egyre nagyobb aktivitású, jellemzően Co-60 izotópot tartalmazó források jelennek meg, miközben a meglévő kezelési infrastruktúrák elsősorban kisebb aktivitásokra lettek méretezve. A püspökszilágyi Radioaktív Hulladék Feldolgozó és Tároló hagyományos technológiai lánc a jelentősebb aktivitású források esetében már nem alkalmazható a tervezési korlátok miatt.

Munkánk során egy konténeres sugárforrás-tároló rendszer került kialakításra a Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft. és az Izotóp Intézet Kft. együttműködésében. A rendszer többszörös mérnöki gátak alkalmazásával, ólom alapú elsődleges és betonelemekkel kialakított másodlagos árnyékolással, továbbá biztonsági elemzésekkel (sugárvédelmi számítások, végelelemes szerkezeti és hőtechnikai vizsgálatok, öregedéskézelési vizsgálatok) biztosítja az alapvető biztonsági funkciók teljesülését. Eredményeink igazolják, hogy a megoldás alkalmas jelentős aktivitású, 1-es és 2-es kategóriába sorolható zárt sugárforrások biztonságos, hosszú idejű kültéri átmeneti tárolására.

Kulcsszavak: zárt sugárforrás, Co-60, sugárvédelem

BEVEZETÉS

A radioaktív sugárforrások alkalmazása az ipar, az orvostudomány és a kutatás számos területén elterjedt. A sterilizálási eljárások, a sugártechnikai berendezések, az anyagvizsgálati és egyéb ipari rendszerek gyakran gamma-sugárzó radionuklidokat tartalmazó zárt sugárforrásokat alkalmaznak. E források jellemzően hermetikusan zárt kapszulákba kerülnek, amelyek normál üzem közben biztosítják a radioaktív anyag környezettől való elszigetelését. A sugárforrások életciklusa azonban nem ér véget az alkalmazás megszűnésével: a használatból kivont források a 2/2022 (IV. 29.) OAH rendelet 12. melléklete alapján külön hulladékosztályt képviselnek, amelyeket használaton kívüli zárt sugárforrásként kell nyilvántartani. Ezen források biztonságos kezelése, átmeneti tárolása, illetve végső elhelyezése nyilvánvaló fontossággal bír.

Magyarországon az intézményi eredetű kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok kezelésének meghatározó létesítménye a Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft. (a továbbiakban: RHK Kft.) üzemeltetésében működő püspökszilágyi Radioaktív Hulladék Feldolgozó és Tároló (a továbbiakban: RHFT). A telephely a radioaktív hulladékok átvételét, feldolgozását, átmeneti tárolását és végleges elhelyezését is biztosítja, melynek keretében zárt sugárforrások kezelésére kialakított technológiai láncsal is rendelkezik. A technológiai rendszer ugyanakkor alapvetően olyan hulladékáramokra és aktivitásszintekre lett kialakítva, amelyek a korábbi ipari gyakorlatnak feleltek meg.

Az utóbbi években az ipari sugárforrás-alkalmazások volumenében és aktivitásszintjében számottevő eltolódás figyelhető meg. A rendelkezésre álló üzemi adatok szerint az RHFT-ben közel 50 évnyi üzemeltetés után (2024 év végén) az átmeneti és végleges tárolóhelyeken hozzávetőlegesen 190 TBq összaktivitás gyűlt össze. A megváltozott hulladékbeszállítói igényeket jól jellemzi, hogy 2025-ben már 1000 TBq nagyságrendű volt a beszállítani szándékozott ipari sugárforrások összaktivitása. Ez a változás nem pusztán mennyiségi növekedést jelentett, hanem minőségi technológiai kihívást is, mivel a megnövekedett aktivitású források kezelése az árnyékolás, a manipuláció, a telephelyi logisztika, és a potenciálisan hosszú idejű átmeneti tárolás biztonsága szempontjából is más megközelítést igényelt.



1. ábra. RHFT ellenőrzött területe a konténeres sugárforrás tároló kialakítása előtt (2024).
Összaktivitás: ~190 TBq

A probléma jól érzékeltethető akkor, ha az RHFT zárt sugárforrások kezelésére szolgáló technológiai láncolatát Co-60 ekvivalens aktivitási határok szerint értelmezzük. A technológiai láncból származtatható maximálisan kezelhető aktivitások egy sugárforrásra 0,4 TBq-nek, a gyűjtőtokba helyezett (ún. torpedózott) állapotra 5 TBq-nek adódtak. E határértékek alapján a létesítmény kompatibilitása elsősorban a kisebb aktivitású, 3-4-5-ös sugárforrás kategóriákra terjedt ki, miközben az 1-es és 2-es kategóriájú sugárforrások kezelése már új technológia bevezetését indokolta.



2. ábra. RHFT ellenőrzött területe a konténeres sugárforrás tároló kialakítása után (2025).
Összakivítás: ~1250 TBq

E kihívásra válaszul az RHK Kft. és az Izotóp Intézet Kft. közös fejlesztési projektet indított egy konténeres sugárforrás-tároló rendszer kialakítására. A projekt sajátossága, hogy nem pusztán egy új tárolóegység telepítéséről van szó, hanem egy olyan integrált műszaki megoldásról, amely a hulladékkezelői követelményrendszert és az ipari radioizotóp-technológiai tervezési tapasztalatot egyesíti. A fejlesztés során az RHK Kft. a sugárvédelmi számítások elvégzésében, az alapvető biztonsági funkciók azonosításában, a telephelyi alkalmazhatóság és az engedélyezési-logisztikai elvárások meghatározásában működött közre, míg az Izotóp Intézet Kft. végezte a tárolókonténer tervezését, gyártását, feltöltési és zárási technológiájának kialakítását, valamint az ellenőrzési és validációs célokat egyaránt szolgáló sugárvédelmi mérések megvalósítását.

A jelen publikáció célja a kiinduló technológiai probléma, a követelményrendszer, a kialakított tárolási koncepció, a műszaki és sugárvédelmi megoldások, valamint a validációs tapasztalatok összefoglaló bemutatása.

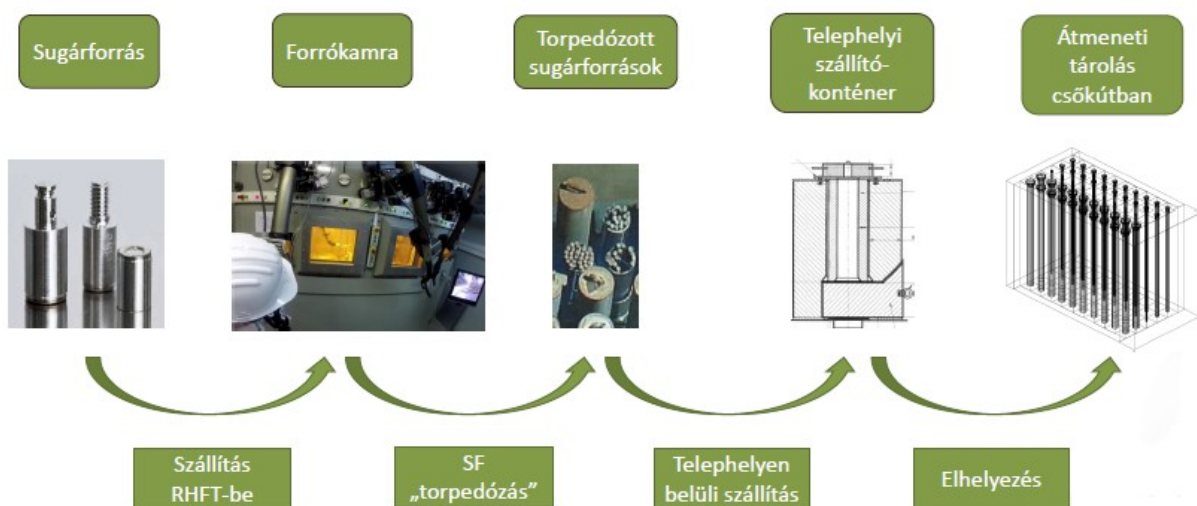
A KIINDULÁSI HELYZET: ZÁRT SUGÁRFORRÁSOK NORMÁL KEZELÉSI LÁNCOLATA ÉS ANNAK KORLÁTAI

Az RHFT-ben a hulladékká minősített zárt sugárforrások kezelése jól meghatározott technológiai lépések mentén történik. A normál életút a sugárforrás RHFT-be történő szállításával indul, ezt a források forrókamrában végzett torpedózása, azaz egy további mechanikai és zárési védelmet biztosító tokba helyezése követi. A torpedózott sugárforrásokat ezt követően telephelyi szállítókonténerbe helyezik, majd telephelyen belüli szállítást követően

ún. csőkutakba eresztik le, ahol megkezdődik azok átmeneti tárolása. Ez a láncolat műszakilag kiforrott és az alacsonyabb aktivitású (3-4-5 kategóriájú) források esetében megfelelően működtethető, azonban a technológiai lánc csak addig alkalmazható, amíg a kezelendő forrás, vagy források aktivitása el nem éri a láncot alkotó rendszerek aktivitáskorlátjai közül a legalacsonyabbat.

A technológiai láncolatból származtatható maximálisan kezelhető aktivitások Co-60 ekvivalensben értelmezve 0,4 TBq sugárforrás- és 5 TBq torpedószintű határt jelölnek ki. Ez azt jelenti, hogy a rendszer alapvetően a 3-as, 4-es és 5-ös kategóriába eső, vagy ahhoz közeli források kezelésére alkalmas, miközben a 1-es és 2-es kategóriájú források esetén a rendszer már nem alkalmazható, mert a kezelendő aktivitások már meghaladnák a meglévő korlátokat.

A probléma súlyát nemcsak az egyes ipari eredetű források aktivitásának abszolút értéke jelzi, hanem azok mennyisége is. Az 1-es és 2-es kategóriájú források kezeléséhez már nem elegendő egyetlen komponens, a technológiai lánc leggyengébb elemének kapacitását növelni. Új, a meglévő technológiai lánc logikájától eltérő tárolási koncepciót kellett kialakítani, amely képes megoldást nyújtani ezen források nagy mennyiségű, hatékony tárolására. A fejlesztési folyamat a kiinduló állapot részletes értelmezésével kezdődött: fel kellett tární, hogy mely funkciókat kell mindenképpen megőrizni, és melyek azok a területek, ahol új konstrukcióra van szükség.



3. ábra. Sugárforrások normál életútja az RHFT-ben

A FEJLESZTÉS KÖVETELMÉNYRENDSZERE

Az új tárolórendszerrel szemben meghatározott követelményeket az alapvető biztonsági funkciók teljesítésére fűzte fel az RHK Kft. Az alapvető biztonsági funkciókat a radioaktív hulladékok átmeneti tárolását vagy végleges elhelyezését biztosító tároló létesítmények biztonsági követelményeiről és az ezzel összefüggő hatósági tevékenységről szóló 9/2022. (XII. 29.) OAH rendelet definiálja az alábbiak szerint:

- radionuklidok kibocsátásnak visszatartása
- védelem az ionizáló sugárzással szemben
- hőelvezetés a végső hőelnyelőbe
- szubkritikusság biztosítása
- visszanyerhetőség biztosítása a szükséges mértékben a lezárásig

Az új tárolási rendszernek biztosítani kell a radionuklidok kibocsátásának visszatartását, azaz azt, hogy se normál üzemi állapotban (a tárolás idővolumenét is figyelembe véve), se üzemzavari helyzetben ne következhesen be a tárolt radioaktív anyag környezetbe jutása.

Alapkövetelmény volt a rendszerrel szemben az ionizáló sugárzással szemben nyújtott védelmi funkció ellátása, vagyis az, hogy a kezelő személyzet, a telephely és a környezet sugárterhelése a jogszabályokban, illetve a telephelyi előírásokban rögzített korlátok alatt maradjon.

A hőelvezetés biztosításával a végső hőelnyelő felé kell garantálni, hogy az elhelyezési rendszer egyik elemét sem éri olyan hőterhelés, ami veszélyeztetné bármelyik másik biztonsági funkció ellátását.

Ugyancsak követelményként jelent meg a visszanyerhetőség biztosítása, melynek lényege, hogy a sugárforrásokhoz való hozzáférés biztosított legyen addig, míg azok végleges módon elhelyezésre nem kerülnek egy erre alkalmas radioaktív hulladék-tárolóban.

A szubkritikusság biztosítása a tárolni kívánt izotóp típusából fakadóan irreleváns követelmény.

A műszaki követelményrendszer ennél szélesebb volt. A fejlesztés célja nem egy kizárólag beltéri vagy speciális manipulációs infrastruktúrára támaszkodó rendszer létrehozása volt, hanem egy olyan konténeres megoldás kialakítása, amely a meglévő infrastruktúrától nagyrészt függetlenül, kültéri környezetben is alkalmazható. Emellett külön figyelmet kellett fordítani az 50 évre tervezett, tehát hosszú idejű átmeneti tárolásból fakadó kihívásoknak, köztük a maradó nedvesség, a korrózió, a gázképződés és az öregedési folyamatok kezelésére.

Mindezek mellett a hatékonysági szempontok sem maradhattak háttérben: a rendszernek nagyszámú sugárforrás befogadására, jó térkihasználásra és telephelyi szinten kezelhető logisztikai kialakításra volt szüksége.

Ez a követelményhalmaz lényegében kijelölte a koncepcionális irányt. A hagyományos csőutas megközelítés helyett egy konténer alapú rendszer körvonalazódott, amely önmagában is jelentős árnyékolási és visszatartási kapacitással bír, illetve a telephely dedikált tárolópozícióiban, másodlagos árnyékolással kiegészítve biztonságosan üzemeltethető.

A KONTÉNERES SUGÁRFORRÁS-TÁROLÓ RENDSZER KONCEPCIÓJA

A kialakított koncepció több egymásra épülő műszaki gátból áll. A kiinduló elem maga a kétszertokozott, zárt sugárforrás, amelyet torpedóba helyeznek. A torpedózott egységek ezt követően a tárolókonténerbe kerülnek, amely a sugárforrások elsődleges árnyékolását, mechanikai védelmét, és a keletkező hő elvezetését biztosítja.

A konténer önmagában nem rendelkezik szállítási minősítéssel, de vele kompatibilis szállítókonténerben, ún. overpack-ben biztosítható az egyes telephelyek közötti biztonságos, a vonatkozó szabályozásokat kielégítő közúti szállítása. A konténer sugárvédelmi ellenőrzése még a szállítás megkezdése előtt megtörténik.

A telephelyen előre kialakított, beton tárolási pozíciók fogadják a beszállított konténert. A szállítmány telephelyre érkezése után a konténert az overpack-ből kiemelik, és a kijelölt tárolási pozícióba emelik, majd lezárják azt.

Ennek megfelelően az overpack nem az átmeneti tárolási rendszer állandó része, hanem a szállítási és kezelési műveletekhez kapcsolódó ideiglenes műszaki egység.

A tárolási koncepció egyik legfontosabb előnye, hogy a rendszer funkcionálisan jól tagolható: a torpedó a sugárforrás közvetlen fizikai védelmét, a konténer az elsődleges sugárvédelmi és szerkezeti funkciókat, míg a tárolási pozícióba épített betonvédelem a telephelyi tároláshoz szükséges másodlagos árnyékolást biztosítja.

A rendszer egyik alapelve a többszörös mérnöki gátak alkalmazása. Az első mérnöki gát maga a sugárforrás zárt külső kapszulája, amelyet zártágvizsgálattal ellenőriznek. A második gát a torpedó, amely hegesztéssel zárt egység, és további mechanikai és elszigetelési szerepe van. A torpedóra vonatkozóan a fejlesztés a „special form” követelményeket is figyelembe vette, ideértve az ejtési próbát, a hőpróbát és a zártágvizsgálat végrehajtását. A harmadik mérnöki gát maga a konténer, amely szintén hegesztéssel zárt szerkezeti egységként biztosítja a radionuklidok visszatartásának újabb szintjét.

A konténer tervezését, gyártását, feltöltését és zárását az Izotóp Intézet Kft. végezte el az RHK Kft.-vel együttműködve. A fejlesztés iteratív módon haladt: a műszaki tervezés főbb mérföldköveit elérve ellenőrzésre kerültek a tervezési specifikáció egyes elemeinek való megfelelések.

Az Izotóp Intézet Kft. felelt a műszaki megoldás teljességéért, valamint a torpedók és a konténer fizikai megvalósításáért és azok kiszolgálásáért.

Az RHK Kft. felelt a tárolási pozíciók tervezéséért és kivitelezéséért (alvállalkozóin keresztül), valamint az egész koncepció minden engedélyezési kérdéséért.

A koncepció sugárvédelmi tervezését az RHK Kft. és az Izotóp Intézet Kft. közösen végezte el: egymástól független számításokkal és modellezésekkel szimulálták a tervezett rendszert, majd a gyártási folyamat után ellenőrző mérésekkel bizonyosodtak meg annak megfelelőségéről. Ez utóbbi tevékenység egyedi lehetőséget biztosított a sugárvédelmi számítások validációjára.

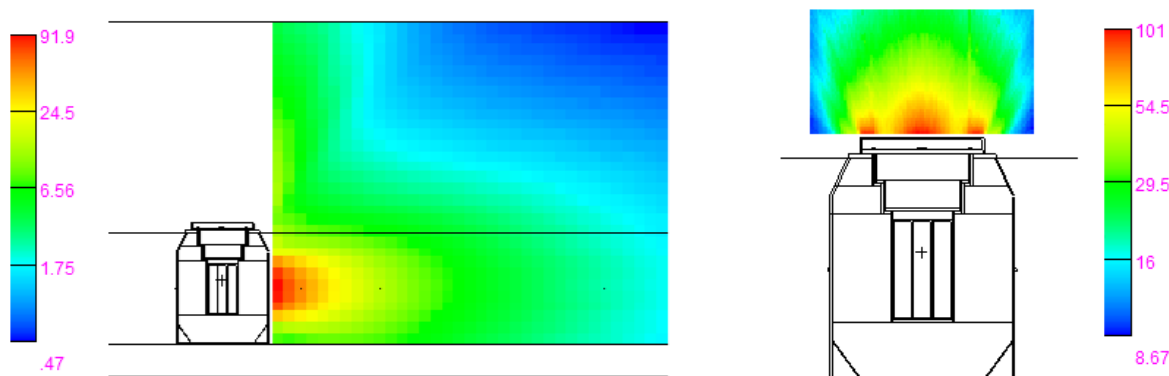


4. ábra. A konténeres sugárforrás-tároló rendszer koncepciója

A KONTÉNER BIZTONSÁGÁNAK MEGALAPOZÁSA SUGÁRVÉDELEM

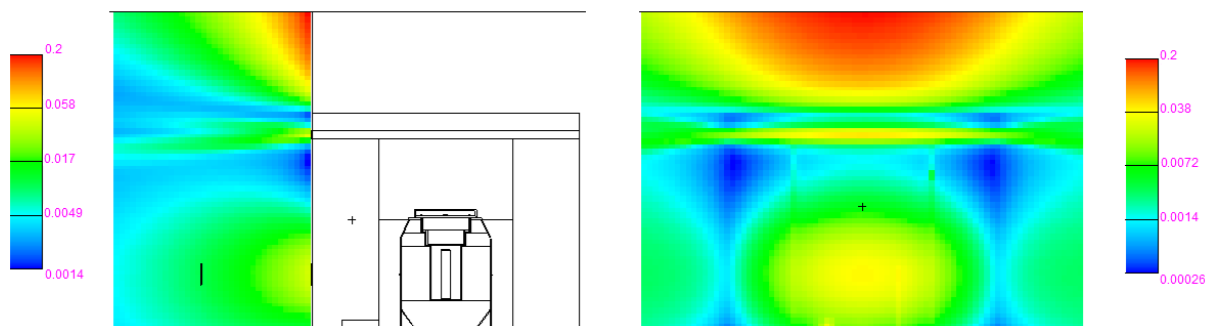
A védelem az ionizáló sugárzással szemben két egymásra épülő árnyékolási szinten valósul meg.

Az elsődleges árnyékolást a konténerben elhelyezett ólom biztosítja. A konténer specifikációja alapján annak maximális kapacitása 2000 TBq (54 kCi) Co-60 izotópra vonatkoztatva, a sugárvédelmi számítások ezen az értéken alapultak. Ez az aktivitásmennyiség árnyékolás nélkül a források közelében megközelítően 2500 Sv/h dózisteljesítményt hoz létre. A konténer tervezési specifikációja rögzítette, hogy a konténer maximális felületi dózisteljesítménye nem haladhatja meg az 1000 $\mu\text{Sv/h}$ környezeti dózisegyenérték-teljesítményt. A konténer ólomvédelmét úgy kellett méretezni, hogy a specifikáció előírásai még az illesztési réseknél, illetve a vízleeresztő csövek kivezetéseinél is biztosítottak legyenek. A méretezést az Izotóp Intézet Kft. végezte, mely alapján az RHK Kft. ellenőrző sugárvédelmi számításokat készített MCNP szoftver használatával. A számítások – melyek külön figyelmet fordítottak a konténer sugárvédelmi szempontból érzékeny pontjaira - igazolták a méretezés jóságát, a várakozások szerint a konténer maximális felületi dózisteljesítményére 100 $\mu\text{Sv/h}$ körüli értékek adódtak. Az elsődleges árnyékolás tehát képessé teszi a konténert arra, hogy a kezelt aktivitásmennyiség okozta dózisteret kezelhető erősségre redukálja, ugyanakkor az RHFT ellenőrzött területére vonatkozó előírásai ennél szigorúbbak, így egy másodlagos árnyékoló réteg is szükségessé vált.



5. ábra. A 2000 TBq Co-60 aktivitással töltött konténer körüli, MCNP-vel becsült dózistérkép. A skála $\mu\text{Sv/h}$ -ban közölt effektív dózisteljesítményre vonatkozik

A másodlagos árnyékolást a tárolópozíció körül kialakított betonelemek adják. Ezen elemek szerepe az, hogy a konténer környezetében még fennmaradó sugárzási mezőt tovább csökkentsék annyira, hogy a tárolási pozíció közelében, illetve az RHFT ellenőrzött területén a dózisteljesítmény az 1 $\mu\text{Sv/h}$ alatti tartományba essen. A tárolópozíciók tervezése és sugárvédelmi méretezése az RHK Kft. feladata volt. A szintén MCNP szoftverrel elkészített elemzések szerint a 60 cm vastag, előre gyártott betonelemek nagy tartalékkal képesek a konténer környezetében jellemzően még mintegy 100 $\mu\text{Sv/h}$ nagyságrendű dózisteret 1 $\mu\text{Sv/h}$ alá csökkenteni. A sugárvédelmi modell külön kitért a betonelemek közötti, néhány mm széles réseken történő kiszórás vizsgálatára is, ami azt mutatja, hogy mind az elsődleges, mind a másodlagos árnyékolás globális és lokális geometriák szempontjából is értelmezett és ellenőrzött.

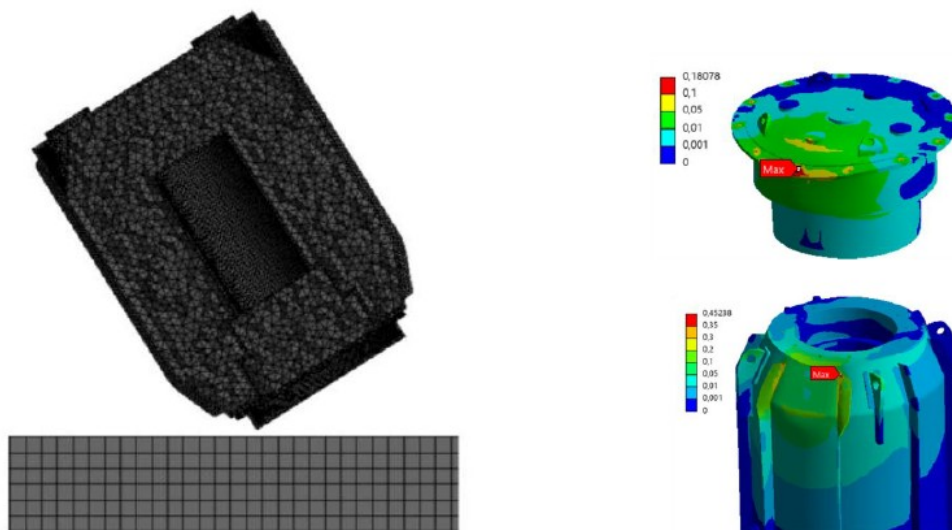


6. ábra. A tárolópozícióba helyezett, 2000 TBq Co-60 aktivitással töltött konténer keltette dózistér a tárolópozíció körül. A skála $\mu\text{Sv/h}$ -ban közölt effektív dózisteljesítményre vonatkozik. Az illesztési rések hatása látszódik, de az előírt $1 \mu\text{Sv/h}$ alatti

SZERKEZETI ÉS HŐTECHNIKAI VIZSGÁLATOK

A tárolórendszer fejlesztése során végesselembes módszereket alkalmaztak annak szerkezeti és hőtechnikai vizsgálatára. Ezek két fő területre terjedtek ki.

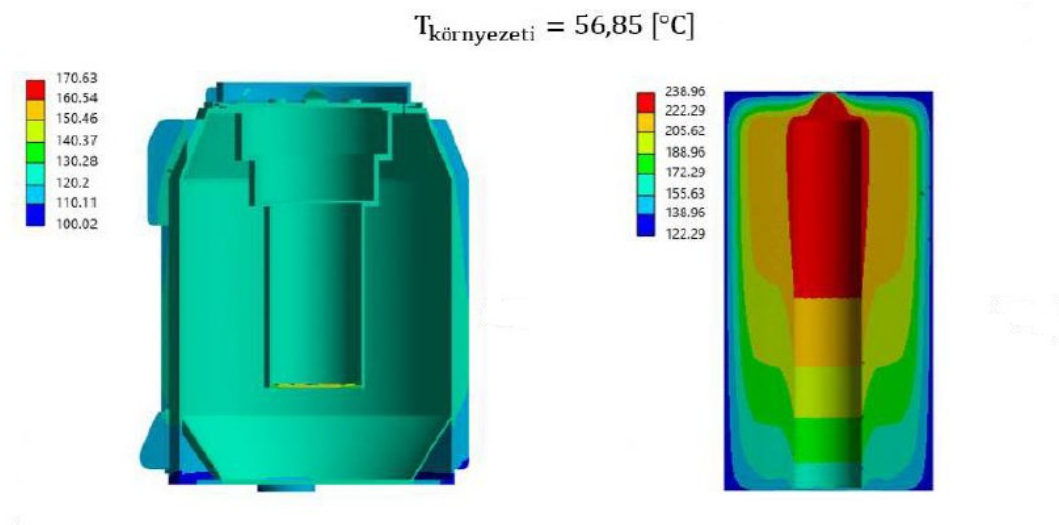
Ejtési szimulációk és szerkezeti számítások készültek annak vizsgálatára, hogy üzemzavari helyzetben a konténer, és a sugárforrások szerkezeti integritása fennmarad-e. A vizsgálatok a konténer, illetve a torpedók plasztikus nyúlásának meghatározására irányultak annak érdekében, hogy becsülhető legyen a geometria változása, ezáltal a torpedók, illetve a sugárforrások sértetlensége, illetve visszanyerhetősége. Az elemzés konzervatív, kritikus ejtési irányokat vizsgálva igazolta, hogy a konténer 4 m magasságból történő ejtése esetén a fentiek teljesülnek, így még egy emelés közben feltételezett ejtési üzemzavar esetén is biztosított minden vonatkozó alapvető biztonsági funkció.



7. ábra. Ejtési szimulációk. Az eredmények a maradó deformációt jellemző plasztikus nyúlást jellemzik (dimenzió nélkül)

A szerkezeti vizsgálatokon túl hőtechnikai elemzések is készültek, amelyek a hőelvezetési útvonalakat és a szerkezeti elemek hőmérsékletét elemezték. A vizsgálatok igazolták, hogy a források hőtermelése következtében még szélsőségesen konzervatív környezeti peremfeltételek

mellett is biztosított a sugárforrások, illetve a konténer szerkezete, továbbá a másodlagos árnyékolást biztosító épített beton környezet épsége és integritása.



8. ábra. Hőtechnikai vizsgálatok és eredmények

A tervezés tehát nem csupán statikus árnyékolási problémaként kezelte a rendszert, hanem globálisan, az üzemviteli és az üzemzavari állapotok felől is megközelítette azt. Ez a megközelítésmód biztosította a releváns alapvető biztonsági funkciók teljesülésének igazolását.

HOSSZÚ IDEJŰ ÁTMENETI TÁROLÁS VIZSGÁLATA

A konténerben a sugárforrások tervezett átmeneti tárolási periódusa 50 év, mely további kihívásokat vet fel, különösen a konténerben esetlegesen bent maradó víz hatásainak vonatkozásában. A konténer torpedókkal feltöltése víz alatt, távmanipulációval történik, így a konténer zárási folyamatát ennek figyelembevételével kellett megalkotni.

A konténer feltöltése után a torpedók közötti vizet az erre kialakított leeresztő csöveken át le kell eresztetni, a maradó nedvesség pedig a hőtechnikai számítás tranziens vizsgálatai alapján sugárforrások hőtermelése következtében 24 óra alatt elpárolog. További, kiegészítő biztonsági intézkedésként a lezárási folyamat részeként előírásra került, hogy a konténer belső terét a szárítási ciklus után inert gázzal öblítsék át. Az átöblítés után a konténer minden nyílását hegesztéssel zárják.

A fenti leírt lezárási eseménylánc biztosítja, hogy a konténer belső terében az észszerűen elérhető legalacsonyabb legyen a maradó víz jelenléte, ennek ellenére külön biztonsági elemzés készült a lezárási folyamat esetlegesen eredménytelen víztelenítési mechanizmusának vizsgálatára. A biztonsági elemzés a maradó víz okozta belső korrózió és a radiolízisből fakadó durranógáz-képződés kockázatát mérte fel. A vizsgálat a belső korrózió hatását a torpedó és a konténer héjszerkezetének megfelelő anyagválasztásával elhanyagolhatónak minősítette, a durranógáz képződése okozta kockázat pedig még abban az esetben is jelentéktelennek bizonyult, ha a konténer szabad belső terének egésze víz alatt maradna. Figyelembe véve a lezárási folyamat lépéseit, és az elemzés eredményeit, a konténer hosszú távú átmeneti tárolási időszaka alatti biztonsága igazoltnak tekinthető. Mindezekén túl a hosszú távú állapotfenntartást az RHFT öregedéskelelési programja is kiegészíti periodikusan előírt vizsgálatokkal.

VALIDÁCIÓS MÓDSZERTAN ÉS EREDMÉNYEK

A projekt egyedülálló lehetőséget biztosított a sugárvédelmi modellek validálására. A tervezés és az engedélyezés előkészítése során iteratív módon több előzetes modell készült, amelyeket később a kiviteli terveken alapuló végleges modellek követtek. A validáció célja az volt, hogy a számítások eredményeit mérésekkel összevesse, és ezáltal képet adjon a modellek generális jóságáról, illetve irányt mutasson azok esetleges pontosítására vonatkozóan. A validációs folyamat során értékes tapasztalatokat nyertünk a források reprezentációjára, valamint az árnyékolóanyag tulajdonságaira vonatkozóan.

Az engedélyezési eljárás alapját képező, végső kiviteli terveken alapuló modell a specifikációnak megfelelő 2000 TBq Co-60 aktivitást tartalmazott 7 darab torpedóban egyenletesen elosztva, a sugárforrások önárnyékolását elhanyagolva, de a torpedók falát figyelembe véve. Az eredményeket a szoftver – a jogszabályi követelményeknek megfelelően – effektív dózisteljesítményben szolgáltatta. A kapott értékek a konténer felületén 100 $\mu\text{Sv/h}$ körüli maximumokat adtak.

A konténer gyártását követő sugárvédelmi ellenőrző mérések során a konténerbe 7 db, közel 2000 TBq összaktivitású sugárforrás került, torpedók nélkül, egy pozicionálást segítő kosárba. A mérési eredmények ebben a konfigurációban 200–600 $\mu\text{Sv/h}$, illetve 400–450 $\mu\text{Sv/h}$ tartományba estek a konténer fedelén, illetve oldalán. A mérési eredmények környezeti dózisegyenérték-teljesítményben értendők ($H^*(10)$).

A modell előrejelzése nagyságrendileg tehát jó volt, de látható, hogy ad lehetőséget további pontosításokra, optimalizációra. A teljes töltetre vonatkozó mérések után ellenőrzésre került:

- a modell általános felépítése
- a fő árnyékoló anyag, az ólom sűrűsége
- a torpedók és sugárforrások anyagának leképezése, figyelembevétele
- a lekérdezett dózismennyiség hatása

A modell általános átvizsgálása nem fedett fel elvi, geometriai, vagy anyagösszetételi hibát.

Nyilvánvaló jelentősége miatt megkülönböztetett figyelemmel vizsgáltuk az ólom tulajdonságait, ahol a konténer kivitelezése során keletkezett jegyzőkönyvek alapján pontosítani lehetett a konténerbe öntött ólom sűrűségét az elméleti értékhez képest: a korábban alkalmazott 11,35 g/cm³ elméleti érték helyett a beöntött ólom tömege és a rendelkezésre álló térfogat alapján módosított sűrűség 11,06 g/cm³ lett.

Mivel a teljes töltetű mérés során 7 db, torpedó nélkül konténerbe helyezett pálca sugárzási terét mérték, így a módosított modellből eltávolítottuk a torpedók anyagát.

Mivel ez eredeti modell effektív dózisteljesítményt számolt, míg a mérés környezeti dózisegyenérték-teljesítményt adott, a két mennyiség közötti különbség felszámolása érdekében a módosított modellben a konzervatívabb eredményt adó környezeti dózisegyenérték-teljesítmény lekérdezésére tértünk át.

A fentiek szerint módosított modell a konténer fedelén és oldalán is 300–350 $\mu\text{Sv/h}$ körüli értékeket adott, tehát elmondható, hogy a fenti, megalapozott módosításokkal sikerült pontosabban leírni mind a konténert, mind a konkrét mérési elrendezést.

Hasonló validációt hajtottunk végre a ténylegesen betárolt sugárforrásokkal töltött konténerrel kapcsolatban is. A megvalósult töltetű validáció során a konténerben modellezett aktivitásmennyiség megfelelt a 7 db torpedóban levő összes forrás aktivitásának, megközelítően 1080 TBq-nek. A torpedókba betárolt, közel 250 darab forrás önárnyékolását a források anyagának torpedókban való elhomogenizálásával vettük figyelembe a torpedók végleges tömege alapján. A modellbe beépítettük a teljes töltet validációja során nyert valamennyi tapasztalatot (ólomsűrűség pontosítása, dózistípus csere). A megvalósult elrendezésen mért dózisteljesítmények a konténer tetején a 17-31 $\mu\text{Sv/h}$, a konténer oldalán a 34–46 $\mu\text{Sv/h}$ tartományban alakultak. A végleges töltetet leíró validációs modell eredményei ugyanitt 20 $\mu\text{Sv/h}$, illetve 34 $\mu\text{Sv/h}$ voltak.



9. ábra. A konténerbe betárolt torpedók az Izotóp Intézet Kft. sugárforrás tároló medencéjében

A tárolópozícióba betárolt konténer körüli mérések a 100-150 nSv/h tartományba esnek. Ezek az értékek igazolták, hogy a dózisteljesítmény sehol nem éri el a megszabott 1 $\mu\text{Sv/h}$ határértéket, ugyanakkor annyira alacsonyak, hogy a sugárforrások járuléka érdemben nem különböztethető meg a természetes háttérsugárzástól, így ennél messzebb menő validációs tapasztalatok már nem szűrhetők le belőlük.

Összességében a validációs tapasztalatok igazolták, hogy a konténeres rendszer árnyékolási teljesítménye rendkívül pontosan becsülhető, ugyanakkor a konténer belső konfigurációjának részletessége, a források eloszlása és az effektív árnyékolóanyag-paraméterek érzékenyen befolyásolják a számított eredményeket, így a kiviteli tervek bázisán mindig érdemes konzervatív megközelítéseket alkalmazni.

ÖSSZEGZÉS

A bemutatott fejlesztés jelentősége több szinten értelmezhető.

Megállapítható, hogy a konténeres sugárforrás-tároló rendszer egy valós technológiai hiányt pótol: megoldást kínál azon 1-es és 2-es kategóriába eső Co-60 források kezelésére és átmeneti tárolására, amelyek az RHFT korábban meglévő technológiai lánc által már nem voltak kiszolgálhatók.

A kialakított rendszer úgy biztosítja a létesítmény képesség- és kapacitásbővítését, hogy közben nem igényelte a teljes telephelyi infrastruktúra átalakítását.

A projekt jelentősége az intézményközi együttműködésben is megmutatkozik. Lényeges hangsúlyozni, hogy a rendszer iránti igény nem kizárólag az üzemeltetői oldalon fogalmazódott meg, és nem is kizárólag beszállítói gyártásként jött létre. Az RHK Kft. és az Izotóp Intézet Kft. közös fejlesztési munkájáról van szó, amelyben az Izotóp Intézet a tervezéstől a gyártáson és zárási technológia kidolgozásán át egészen a validációs mérésekig meghatározó szerepet vállalt, míg az RHK Kft. a specifikáció elkészítésétől, a tárolópozíciók megvalósításától a teljes projekt engedélyeztetésén át, a részletes sugárvédelmi számításokig partner volt mindenben.

Így jelen publikáció nem csupán egy létesítményi megoldást ismertet, hanem a hazai ipari-mérnöki kompetencia közreműködésével létrejött nukleáris technológiai fejlesztést dokumentál.

Végül, a rendszer nemcsak sugárvédelmi, hanem hulladékgazdálkodási értelemben is előrelépést jelent. A nagyszámú sugárforrás befogadása, a hatékony térkihasználás, a visszanyerhetőség és az öregedéskezelési szempontok figyelembevétele azt mutatja, hogy a tárolási koncepció hosszú távú üzemeltetési és biztonsági filozófia mentén készült.

FELHASZNÁLT IRODALOM

IAEA-TECDOC-1344: *Categorization of Radioactive Sources*. International Atomic Energy Agency.

A Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft. és az Izotóp Intézet Kft. belső fejlesztési és validációs dokumentációi, sugárvédelmi modellek és mérési jegyzőkönyvek.

Készült a SOMOS Alapítvány támogatásával.