

A BUDAPESTI KUTATÓREAKTOR FŰTŐELEMEINEK SORSA

Vidovszky István
MTA Energiatudományi Kutatóközpont

Rövid történeti áttekintés

A Budapesti Kutatóreaktor, Magyarország első nukleáris létesítménye, 1959 óta üzemel. A reaktor elsődleges feladata a kísérleti lehetőségek megteremtése a neutronfizika számára, ám emellett fontos szerepet játszik az ország radioaktív izotópokkal történő ellátásában is. A kutatóreaktor teljesítménye eleinte 2 MW volt, ekkor 10% dúsítású urán fűtőelemekkel üzemelt. Az 1967-es rekonstrukciót követően a fűtőelemeket 36% dúsításúakra cserélték. Ennek és az újonnan kialakított berilliumreflektornak köszönhetően a teljesítmény 5 MW-ra nöhetett. Az 1986 és 1992 között végrehajtott második rekonstrukciót követően a reaktor teljesítménye már 10 MW, a fűtőelem típusa ekkor változatlan maradt. A 21. század elején a terrorfenyegetettség növekedése miatt az Egyesült Államok kormánya szorgalmazta a 20%-nál nagyobb dúsítású urán kivonását a civil forgalomból, ezért támogatta az ilyen fűtőelemekkel működő reaktorok konverzióját kis dúsítású üzemanyagra. Ennek során a Budapesti Kutatóreaktor is konvertáltuk, a művelet 2012 novemberében fejeződött be, azóta a reaktor 19,75% dúsítású üzemanyagot használ, teljesítménye változatlanul 10 MW. A konverzió „ára” mindössze csekély mértékű (körülbelül 5%) fluxusszökkenés.

Kutatóreaktorok kiégett fűtőelemeiről

A kiégett fűtőelemek kezelése az atomenergetika egyik jelentős problémája. A probléma legnagyobb mértékben atomerőművek esetében jelentkezik, hiszen a nagy teljesítmény miatt ott keletkezik a legtöbb kiégett fűtőelem. E fűtőelemek tárolása, hűtése, újrafeldolgozása vagy végleges elhelyezése már az erőmű tervezésekor meghatározódik. Kutatóreaktorok esetében a kiégett fűtőelemek mennyisége jóval kisebb, ám nem elhanyagolható. Az ötvenes, hatvanas években létesített kutatóreaktorok esetében a kiégett fűtőelemekről történő gondoskodás többnyire kimerült abban, hogy a reaktor részeként építettek egy kiégett-fűtőelem tárolót, ami néhány évtizedre megoldja ugyan a problémát, a hosszabb távú megoldást azonban általában későbbre halasztották. A kiégett fűtőelemek tárolása a nagy fajlagos radioaktivitás miatt hűtést igényel, ezért eleinte a tárolás vizes medencékben történik. Megfelelő vízkémia és jó minőségű fűtőelem-burkolat esetében a tárolás sok évtizeden keresztül is problémamentes maradhat. Ám e két feltétel nem mindenütt teljesült, ezért a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség a kilencvenes évek végén öt éves koordinált kutatási projektet szervezett a kutatóreaktorok kiégett fűtőelemeinek vizes tárolásával kapcsos-

latos problémák tisztázására. A projektben amerikai (USA) szakemberek játszották a vezető szerepet, további résztvevők orosz, kínai, argentin, brazil, thaiföldi és magyar kutatóreaktorok képviselői voltak. A projekt eredményeként sikerült meghatározni a hosszú távú biztonságos tárolás felételeit. A legfontosabb két paraméter a megfelelő pH-tartomány és az alacsony kloridion-koncentráció. A projekt során egy-egy (magyar gyártású) korróziós indikátorok segítségével minden tároló medencében méréseket végeztünk. A magyar medence a legjobbak egyike volt. Abban mindenki egyetértett, hogy a vizes tárolás nem végleges megoldás.

A Budapesti Kutatóreaktor fűtőelemei

A Budapesti Kutatóreaktor fűtőelemeinek hosszabb tárolására már a hatvanas években megépült az úgynevezett külső tároló. Ez a reaktorepületben lévő és a reaktorról egyidejűleg épített belső tárolóhoz hasonlóan egy vizes medence, ahol a nagy víztérfogat elegendő a fűtőelemek hűtésére, valamint a fűtőelemek felett lévő több méter víz a sugárvédelmet is biztosítja. A tároló vízkémiájára a kezdetektől fogva nagy gondot fordítottak, így lehetséges, hogy közel ötven éves tárolás során sem keletkezett korróziós probléma. A tároló azonban semmi esetre sem végleges megoldásnak készült, ezért a reaktor üzemeltetői már a nyolcvanas években szorgalmazták a fűtőelemek visszaszállítását a gyártó országába, a Szovjetunióba. Az elszállításra vonatkozó tárgyalások megkezdődtek, ám a szállítás megvalósulása előtt a Szovjetunió összeomlott és ez a terv meghiúsult. Később többször is felmerült az elszállítás gondolata, ám Oroszország törvényei akkoriban nem tették lehetővé a külföldön kiégett fűtőelemek visszafogadását. Ezért az ezredfordulón a reaktort üzemeltető KFKI Atomenergia Kutatóintézet vezetése úgy döntött, hogy felkészül a hosszabb távú tárolásra. Ennek során az intézet megvalósította a fűtőelemek felszáraz tárolását. Ez azt jelentette, hogy a már régóta pihent fűtőelemeket, amelyek jelentős hűtést már nem igényeltek, szárítás után alumíniumtokba helyezték, a tokot nitrogéngázzal töltötték fel, majd légmentesen lezárták. A zárt tokokat továbbra is az eredeti tárolóban, víz alatt tárolták, így biztosítva a sugárvédelmet. Ez a tárolási mód hosszabb távra biztosítja a korrózió és így a fűtőelemek inhermetikussá válásának elkerülését, mint a legjobb vízkémiájú nedves tároló.

A tárolás biztonsága így igen hosszú távra is megnyugtatóvá vált, ám a tároló kezdett megtelni. Az eredeti tervek helyesek voltak, a hatvanas években igen hosszú távra elegendőnek látszott a tároló kapacitása,

ám a megnövelt teljesítmény miatt a kapacitás 2000 után egyre közeledett a kimerüléshez, így a fűtőelemek elszállítása a további üzemeltetés feltételévé vált. Szerencsére a nemzetközi helyzet ezúttal kedvezőbb lett a reaktor számára. Az orosz törvények megváltoztak, a kiégett fűtőelemek befogadása ismét lehetővé vált, továbbá az Egyesült Államok és Oroszország vezetői megegyeztek, hogy közös erőfeszítéseket tesznek a nagy dúsítású (20% vagy a feletti) fűtőelemeknek a gyártó országába történő visszaszállítására. Az Egyesült Államok kormánya megkereste az orosz eredetű, nagy dúsítású fűtőelemekkel rendelkező valamennyi ország kormányát és felajánlotta segítségét. E segítség anyagi természetű is, azaz vállalták az előkészítés, szállítás, újrafeldolgozás és húsz évi tárolás költségeit, de szervezési, engedélyezési, kapcsolattartási kérdésekben is segítettek. A magyar kormány, hasonlóan a többiekhez (Észak-Korea volt az egyetlen kivétel) elfogadta az ajánlatot.

Fűtőelem-szállítások

A terrorfenyegetettség csökkentése érdekében minden nagy dúsítású uránt el kellett távolítani az országból, így a konverzió után feleslegessé váló friss fűtőelemeket is, amelyeket az amerikai partnerek díjmentesen becseréltek számunkra azonos mennyiségű hasadóanyagot tartalmazó, kis dúsítású urán fűtőelemekre. A friss fűtőelemek elszállítása nem okozott különösebb nehézséget, noha a szállítás biztonsága ebben az esetben is fontos tényező, ám hasonló szállítmányokkal már a fűtőelemek beszerzése során találkoztunk. Az érdekesség kedvéért el kell mondani, hogy a kutatóreaktor friss fűtőelemei mellett megsza badultunk attól az urántól is, amelyet még a hatvanas években, saját fűtőelemgyártás céljára szereztünk be a Szovjetunióból. A poralakban érkező urán mintegy fele feldolgozatlan maradt, ám másik feléből kritikus rendszer, másnéven zéróreaktor készült. E reaktorok teljesítménye nevüknek megfelelően igen kicsi, közel zérus és reaktorfizikai kísérletek végzésére szolgáltak. Az említett kritikus rendszer a hatvanas évek végén a Budapesti Nemzetközi Vásáron népszerűsítette a nukleáris technikát, segítségével bárki készíthetett gyorsan elbomló radioaktív izotópokat az akkoriban forgalomban lévő alumínium pénzérmékből. A feldolgozott és feldolgozatlan uránporért cserébe szintén kis dúsítású fűtőelemeket kaptunk, amelyek egy további évre biztosítják a Budapesti Kutatóreaktor üzemeltetését. Ez igen jelentős segítség a mai, igen magas fűtőelemárak miatt.

A kiégett fűtőelemek szállítása, ellentétben a friss fűtőelemek szállításával, igen összetett feladat, ezért az előkészítés általában évekig tart. A Budapesti Kutatóreaktor kiégett fűtőelemeinek elszállításával kapcsolatos első megbeszélés 2004 decemberében volt, a fűtőelemek első szállítmánya 2008 szeptemberében, a második szállítmány 2013 novemberében hagyta el az országot.

Az előkészületek

A projekt elején tisztázódott, hogy a kiégett fűtőelemek szállítása a cseh Skoda Művek által gyártott VPVR/M jelű konténerekben fog történni. E konténerek kiszolgálására a kutatóreaktor telephelyén rendelkezésre álló infrastruktúra nem volt elegendő. A külső fűtőelem-tároló föld alatti medence, amely fölött egy olyan kis méretű könnyűszerkezetes épület állott, ahol az átrakás nem volt kivitelezhető. Fel kellett építeni egy hatalmas csarnokot, amelyben megfelelő daru állt rendelkezésre, valamint egy sínen mozgó szerkezet, amely azt biztosította, hogy ne kelljen a 11 tonnás konténert a medence felett daruzni, mert ez nem megengedhető biztonsági kockázatot jelentett volna. Szükség volt továbbá egy olyan szerkezetre is, amely alkalmas volt a tokozott fűtőelemek tömeges bontására, a rendelkezésre álló tokbontó készülék ugyanis csak a meghibásodás esetén felmerülő egy-egy bontás lebonyolítására volt alkalmas. A csarnok és a hozzá tartozó berendezések elkészítése minden bizonnyal nagyobb feladat, mint a szállítás adminisztratív ügyintézése, ennek ellenére a csarnok készült el hamarabb. 2007 őszére a szállítás valamennyi műszaki feltétele megvalósult, ám az engedélyek beszerzése, az útvonal tervezése korántsem állt ilyen jól.

Az adminisztratív ügyintézés fő nehézségét az okozta, hogy nemzetközi egyezményeket kellett kötni. Eredetileg három egyezményről volt szó, kellett egy amerikai–magyar és egy orosz–magyar egyezmény a fűtőelemek átadásáról, illetve ennek lebonyolításáról, valamint egy háromoldalú szállítási egyezmény, orosz, ukrán és magyar részvétellel. A két kétoldalú egyezménnyel semmi probléma nem volt, ennek ellenére aláírásukra – a diplomáciai folyamatok bonyolultsága miatt – csak 2008-ban került sor. Az orosz–magyar kormányközi egyezmény tette lehetővé, hogy a kiégett üzemanyag feldolgozását követően a nagy aktivitású hulladék végleg Oroszországban maradjon. A háromoldalú egyezmény aláírására azonban nem került sor, ezért más szállítási útvonalat kellett keresni.¹

Az első szállítás – 2008. szeptember

Kiégett fűtőelemeket általában vonaton, közúton vagy hajón szállítanak, tekintettel arra, hogy a nagy aktivitás miatt nehéz védelemre van szükség. A legelőnyösebb a vasúti szállítás, mert így lehet a legolcsóbban és a legkisebb feltűnést keltve szállítani. Tekintettel arra, hogy a Budapesti Kutatóreaktor telephelyén nincs vasúti sín, a közúti szállítás mindenképpen elkerülhetetlen. Az első útvonaljelölt a legközelebbi könnyen megközelíthető vasútállomásról vezetett a célállomásra, a nyugat-szibériai Majak telephelyre. 2008-ra terveztük az első szállítást. A szállítmány tartalmazta a kutatóreaktor valamennyi 2005 előtt kiégett

¹ Az egyezményt végül évekkel később aláírták, majd 2013. október végén ratifikálta az ukrán parlament.



1. ábra. A szállítmány Koperben, a hajó belsejében.

fűtőelemét. Így sikerült a teljes szállító kapacitást, azaz a rendelkezésre álló 16 VPVR/M konténer kihasználni. 2008 tavaszán azonban nyilvánvalóvá vált, hogy a háromoldalú egyezmény késlekedése lehetne a teszt az azévi szállítást. Ekkor a projekt vezetője, I. Bolshinsky úgy döntött, hogy más utat keres, felmerült a tengeri út lehetősége. A legkönnyebben elérhető kikötő a szlovéniai Koper, amely szerencsére az engedélyezés szempontjából kedvezőbb EU tagországban fekszik. Sikerült olyan hajóstársaságot is ta-



2. ábra. A kiégett fűtőelemek víz alatti betöltése a VPVR/M konténer kosarába.

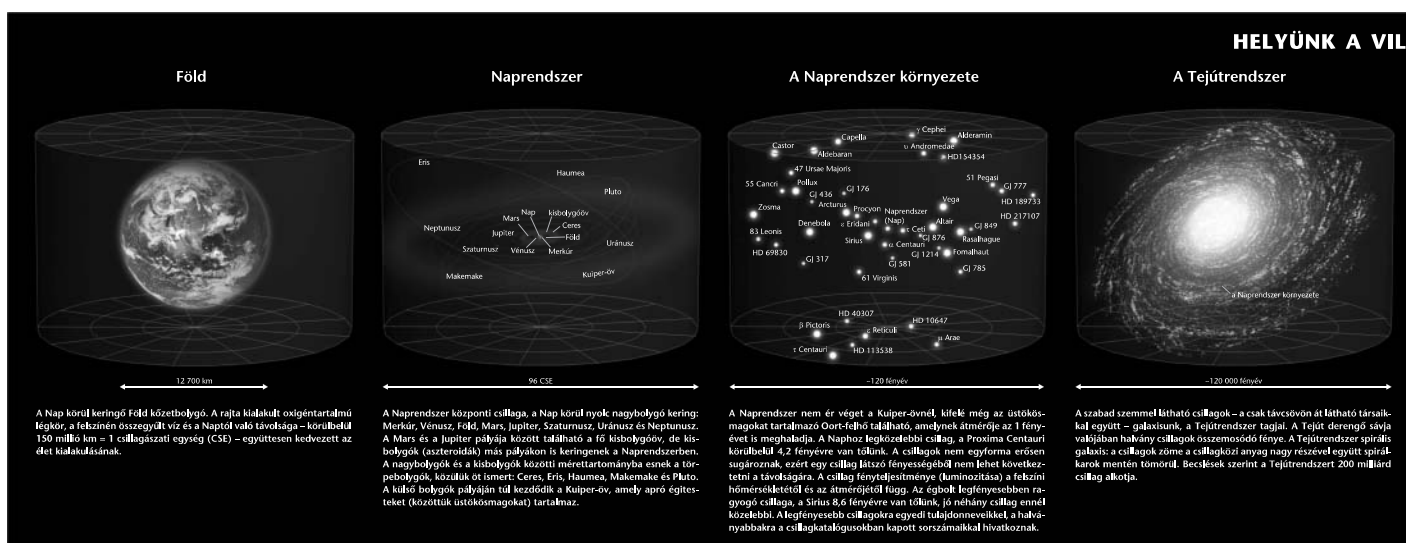
lálni, amely Koperből (1. ábra) Murmanszkba szállította a fűtőelemeket. Az út több mint egy hónapig tartott és nem volt teljesen problémamentes, mert a skót partoknál a vihar horgonyzásra kényszerítette és így néhány napra feltartotta a szállítmányt. Murmanszkból vonaton ment a szállítmány a Majakig.

Ez a szállítás végül is jól sikerült, ám hajszálon múlt, hogy nem hiúsult meg: a szlovén áthaladási engedélyt ugyanis belpolitikai okból visszavonták akkor, amikor a szállítmány már úton volt. Az ok a közelgő választásokkal függött össze. Magas szintű beavatkozás hatására, még mielőtt a vonat a határra ért volna, a visszavonást érvénytelenítették.

E szállítás tanulsága az, hogy ha megvan a megfelelő elszántság, akkor a cél sok nehézség ellenére is elérhető. Ugyanakkor viszont világosan kell látni, hogy ez a megoldás több szempontból hátrányos volt: elsősorban igen sokáig tartott, másodsorban igen drága volt, harmadsorban pedig három átrakást kellett végrehajtani, ami növelte a kockázatot.

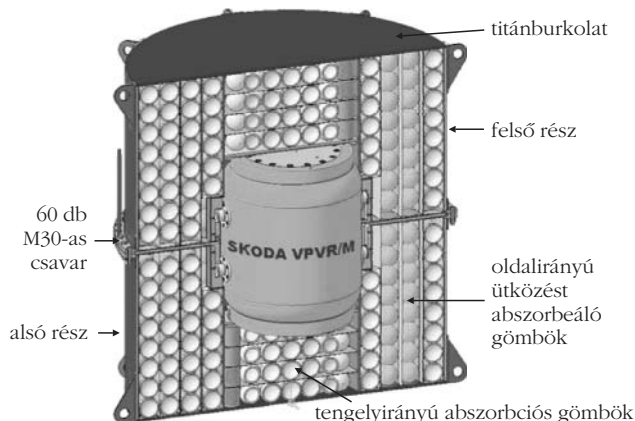
LETÖLTHETŐ ÉS TÖBB, MINT 3 MÉTER SZÉLESEN, SZÍNESEN KINYO

A magyarázó szöveggel kiegészített posztterzt keresd a Fizikai Szemle (www.fizikaiszemle.hu)





3. ábra. A betöltött VPVR/M konténer sugárvédelmi ellenőrzése.



4. ábra. A biztonságos légiszállításához kifejlesztett huzat szerkezete.

A második szállítás – 2013. október–november

A konverziót követően kerülhetett sor a második szállításra, amelynek eredményeképpen Magyarország megszabadult minden nagy dúsítású urántól. Tekintettel arra, hogy most csak a 2005 után kiegészített fűtőelemek voltak hátra, nem volt szükség mind a 16 VPVR/M konténerre, hanem csak ötre. A fűtőelemek rövidebb pihentetési ideje miatt viszont most nagyobb volt az aktivitásuk, ezért végülis hat konténert használtunk, ezáltal csökkentve a konténerek hőterhelését. A fontosabb műveleteket a 2. és 3. ábra szemlélteti.

Tekintettel arra, hogy az orosz–ukrán–magyar háromoldalú egyezmény ratifikálására még mindig nem került sor, a második szállítás tervezésekor három lehetőséget vettünk számításba. Az első a már bejárt Koperen át vezető szállítási útvonal volt, a második a rövidebb tengeri szakasz miatt előnyösebbnek tűnő, Szlovákián és Lengyelországon át vezető útvonal, ami az elsőhöz hasonlóan közúti, vasúti és tengeri szállítást is tartalmazott. A harmadik lehetőség első pillanatra abszurdnak tűnt: légi szállítás. Korábban már előfordult kiégett fűtőelemek légi szállítása, ám csak néhány speciális esetben, mert a rendelkezésre álló orosz konténer (TUK-6) kapacitása igen csekély.

A Sosny orosz cég kifejlesztett egy „huzat”-nak (overpack) nevezett szerkezetet, amely egy VPVR/M konténer befogadására alkalmas és amely TUK-145/C néven engedélyt kapott a légi szállításra. A kiégett nukleáris üzemanyag légi szállítása speciális követelményeknek kell megfeleljen, hiszen biztosítani kell, hogy a repülőgép lezuhanása esetén se kerülhessen ki a radioaktív anyag a konténerből. Ezt a célt úgy érték el, hogy gömb formájú elemekből álló, méhrácsra emlékeztető szerkezettel töltötték ki a „huzat” belsejét (4. ábra). A TUK-145/C méretei a fenti cél érdekében igen jelentősek, a henger alakú konténer átmérője és magassága egyaránt meghaladja a 3 métert. Az 5. ábrán a pakolást végző személyek mérete mutatja a „huzat” (a kép alján látható) nagyságát. A

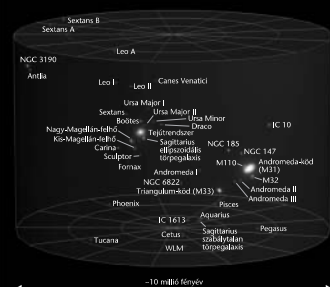
A TUK-145/C méretei a fenti cél érdekében igen jelentősek, a henger alakú konténer átmérője és magassága egyaránt meghaladja a 3 métert. Az 5. ábrán a pakolást végző személyek mérete mutatja a „huzat” (a kép alján látható) nagyságát. A

MTATHATÓ A HELYÜNK A VILÁGEGYETEMBEN MIND A NÉGY RÉSZÉ!

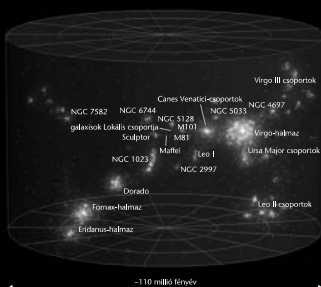
Mellékletek menüpontjában, a posztet bátran rakjad ki a fizika-előadó vagy a folyosó falára!

ÁGEGYETEMBEN

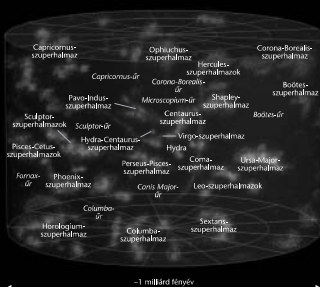
A galaxisok Lokális csoportja



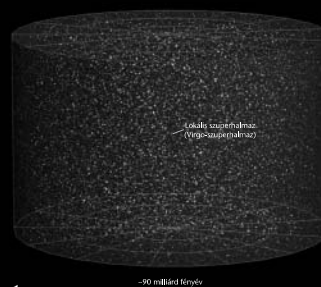
Virgo-szuperhalmaz



Lokális szuperhalmazok



Az észlelhető Univerzum



A galaxisok túlnyomó többsége nem elszórtan helyezkedik el a térben, hanem csoportosulva. Néhány tucat tagból állnak a galaxiscsoportok, és több száz vagy akár ezer tagja is van a galaxis-halmazoknak. A Tejútrendszer a Lokális csoporthoz tartozik körülbelül 60 ismert galaxisal együtt. E csoport meghatározó tagjai a Tejútrendszeren kívül az Andromeda-kód (M31) és a Triangulum-kód (M33) – mindhárom spirálgalaxis. Mellette számos szabálytalan és ellipszoidális torpegalaxis alkotja a Lokális csoportot.

A galaxis-halmazok még nagyobb egységekre, úgynevezett szuperhalmazokra szerveződnek. A Lokális csoport (benn a Naprendszer is tartozik a Tejútrendszerhez) a Virgo-szuperhalmaz része.

A galaxisok halmazait tartalmazó szuperhalmazok között hatalmas kiterjedésű dörök vannak, amelyekben alig fordulnak elő galaxisok. A szuperhalmazokat és az őket egyaránt körülvevő döröket a csillagképről nevezték el, amelybe a geometriai középpontjuk esik.

Az Univerzum nagy skálájú szerkezete valójában zappanhabra emlékeztet: a buborékok felületén vannak a galaxisok és azok nagyobb szerveződési egységei, a galaxis-halmazok és szuperhalmazok. A fény véges terjedési sebessége (körülbelül 300 000 km/s) miatt minél messzebbre nézünk, annál korábbi állapotokban vehetjük szemügyre az égitesteket és azok rendszereit.

A Fizikai Szemle melléklete, 2014. április
Készítési forrásaink: www.horvathk, oktatási célra szabadon felhasználható.
Andrew Z. Colvin munkája alapján Szabados László és Kármán Tamás készítette.



5. ábra. A VPVR/M konténer betöltése a „huzat”-ba.



6. ábra. Útrakészen.

kezelhetetlenül nagy tömeg elkerülése végett a „huzat” anyaga titán, ez természetesen jelentősen növelte az árát. A légi szállítási engedély megadása előtt elvégezték a repülőgép lezuhanását szimuláló kísérletet, a konténer rakéta segítségével belelőtték egy betonfalba.² A próba sikerült: a huzat roncsolódott, ám a benne lévő VPVR/M konténer sértetlen maradt.

A három lehetőséget mérlegelve a projekt vezetése a légi szállítás mellett döntött, elsősorban azért, mert így lehetett a szállítást a legrövidebb idő alatt végrehajtani és így a szállítás kockázata csökkenthető volt. Két TUK-145/C állt rendelkezésre, így három fordulóra volt szükség. Minden esetben a Volga-Dnyepri légitársaság AN-124 típusú gépével érkeztek az üres TUK-145/C konténerek a Liszt Ferenc repülőtérre. A gép orrának nyitása után a gép saját rámpáján a trélerre szerelt TUK-145/C-t egy kamionvontató lehozta, majd felszállította a Budapesti Kutatóreaktor csillebérci telephelyére. A jelentős tömegre tekintettel (a konténer és a tréler együttes tömege körülbelül 42 tonna) a rámpát át kellett építeni úgy, hogy dőlésszöge kisebb legyen. A kutatóreaktor kiégett fűtőelemeit előzetesen már elhelyezték a VPVR/M konténerekben, így csak a konténereket kellett a „huzat”-ba beemelni, majd az előbb leírt szállítási műveleteket kellett fordított sorrendben megismételni. A repülőgép kevesebb mint öt óra alatt elérte a Majakhoz legközelebbi repülőteret, ahonnan a budapestihez hasonló módon továbbították a szállítmányt. A szállítás teljes időtartama jóval 24 óra alatt maradhatott mindhárom esetben. Az AN-124 repülőgép kapacitása lehetővé tette két TUK-145/C együttes szállítását, sőt még a tartalék alkatrészeket szállító ISO konténer is elfért a gépen.

A 6. ábrán látható a TUK-145/C a kamionon, indulás előtt. A 7. ábra mutatja az AN-124 típusú repülőgépbe történő berakodást. A rakodás éjszaka történt, amint látszik a képen.

E szállítás tanulsága az, hogy elegendő anyagi eszköz rendelkezésre állása esetén előnyös a légi szállítás, hiszen így a teljes időtartam csak töredéke minden más szállítási módnak, annak ellenére, hogy na-

gyobb és nehezebb szállítókonténert kell használni és így a betöltés valamivel összetettebb feladat. Természetesen még az óriási szállító repülőgép kapacitása is jóval kisebb, mint akár a vonaté, akár a kisebb hajóké, ezért nagy mennyiségek esetében ez a szállítási mód nem célszerű. Gondoljunk például arra, hogy a 2005-ös szállítás légi megvalósítása esetén nyolc légi fordulóra lett volna szükség.

Összegzés

A Budapesti Kutatóreaktor konverziója sikeresen befejeződött, majd Magyarország megszabadult minden nagy dúsítású uránt tartalmazó fűtőelemtől. Az ország eleget tett nemzetközi kötelezettségének, méghozzá úgy, hogy továbbra is rendelkezik kutatóreaktorral, ami lehetővé teszi a korszerű neutronfizikai kutatásokat és fontos szerepet játszik a kórházak diagnosztikai és terápiás célú radioaktív izotópokkal való ellátásában.

A sors ironiája, hogy néhány nappal az utolsó szállítás befejezése előtt ratifikálták az orosz–ukrán–magyar háromoldalú egyezményt. A projekt valamennyi résztvevője egyetértett abban, hogy igen helyes volt más utat keresni, ugyanis igen hátrányos lett volna, ha még csak azután került volna sor a kiégett fűtőelemek első szállítására, hiszen például a Budapesti Kutatóreaktor már régen nem üzemelhetne.

7. ábra. Felhajtás a rámpán.



² Megtekinthető: www.youtube.com/watch?v=cNX1fVrdg0g#t=87 és hosszabban: www.youtube.com/watch?v=-8r9f2ojmaY#t=461