

A Budapesti Kutatóreaktor és a BME Oktatóreaktor jövőjére vonatkozó elképzelések

Készítették:

Belgya Tamás (MTA EK), Gadó János (MTA EK), Gajdos Ferenc (MTA EK),
Szentmiklósi László (MTA EK), Rosta László (MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont),
Vidovszky István (MTA EK)
Czifrus Szabolcs (BME NTI), Fehér Sándor (BME NTI), Szalóki Imre (BME NTI),
Szieberth Máté (BME NTI), Zsolnay Éva (BME NTI)



A Kutatóreaktor képe



Az Oktatóreaktor épülete

Budapest, 2016. április

Bevezetés

Az MTA Energiatudományi Kutatóközpont (MTA EK) által Csillebércen üzemeltetett Budapesti Kutatóreaktor (BKR) és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nukleáris Technikai Intézete (BME NTI) által üzemeltetett Oktatóreaktor jövőjének alapos átgondolása nagyon időszerűvé vált. Egyrészt mindkét reaktor meglehetősen hosszú ideje üzemel és üzemidejük meghosszabbításának kezdeményezéséről hamarosan dönteni kell. Másrészt mindkét reaktor fontos szerepet játszik a hazai nukleáris energiatermelés szakemberképzésében és kutatási hátterében, ezért fontosságuk az új paksi blokkok létesítésekor megnövekszik.

Jelen tanulmány első fejezete áttekinti a két reaktor eddigi működésének fő vonásait. A második fejezet nemzetközi kitekintést ad. A harmadik fejezet mutatja be a két reaktor lehetőségeit meghosszabbított üzemidő esetére. Végül a negyedik fejezet összegzi a javaslatokat.

Tartalomjegyzék

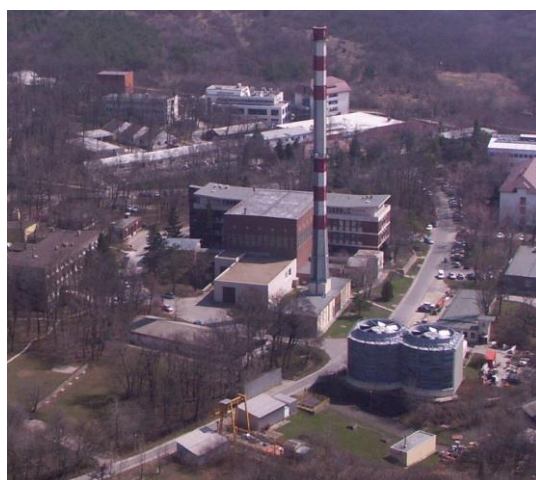
1.	A Budapesti Kutatóreaktor és az Oktatóreaktor működésének fő vonásai	7
1.1.	A Budapesti Kutatóreaktor bemutatása	7
1.1.1.	A reaktor rövid története	7
1.1.2.	A Budapesti Kutatóreaktort üzemeltető MTA Energiatudományi Kutatóközpont	8
1.1.3.	A reaktor műszaki állapota	12
1.1.4.	A fűtőelem-helyzet	13
1.1.5.	A humánpolitikai helyzet	15
1.1.6.	A pénzügyi helyzet	16
1.2.	Az Oktatóreaktor bemutatása	21
1.2.1.	A reaktor rövid története	21
1.2.2.	Az Oktatóreaktor szerepe a magyarországi nukleáris oktatásban és kutatásban	21
1.2.3.	A reaktor műszaki állapota	26
1.2.4.	A fűtőelem-helyzet	27
1.2.5.	A humánpolitikai helyzet	28
1.2.6.	A pénzügyi helyzet	29
2.	Nemzetközi kitekintés	30
2.1.	Budapesti Kutatóreaktor	30
2.2.	Oktatóreaktor	35
3.	A reaktorok működtetésének jövőbeni alkalmazási lehetőségei	37
3.1.	A BKR működtetésének jövőbeni alkalmazási lehetőségei	37
3.1.1.	Az új paksi blokkokkal kapcsolatos kutatások	37
3.1.2.	A BKR lehetőségei más neutronkutató központokhoz való beszállítás előkészítésében	38
3.1.3.	Neutronfizikai alapkutatások és alkalmazások	45
3.1.4.	Oktatás	47
3.1.5.	Izotóp besugárzás orvosi és ipari célú radioaktív izotópok készítéséhez	47
3.1.6.	A nukleáris technika népszerűsítése	48
3.2.	Az Oktatóreaktor működtetésének jövőbeni alkalmazási lehetőségei	49
3.2.1.	Oktatás	49
3.2.2.	Kutatási célú felhasználás	50
4.	Összefoglalás, javaslatok	51
	Rövidítések jegyzéke	55

1. A Budapesti Kutatóreaktor és az Oktatóreaktor működésének fő vonásai

1.1. A Budapesti Kutatóreaktor bemutatása

1.1.1. A reaktor rövid története

A Budapesti Kutatóreaktor Magyarország első nukleáris létesítménye. A reaktor 1959 óta működik Csillebércen. Teljesítménye kezdetben 2 MW volt, fűtőelmei 10% dúsítású EK-10 típusú, orosz gyártmányú kazetták voltak, amelyekben négyzetes rácsban elhelyezett rudak tartalmazzák az uránt. 1966-ban az első rekonstrukciót követően a reaktor teljesítményét 5 MW-ra növelték. Ekkor a teljesítmény növelése érdekében fűtőelemeit VVR-M2 típusú, 36% dúsítású, koncentrikus kör és hatszög alakú lemezekből álló elemekre cserélték, továbbá a reaktort berillium reflektorral vették körül. Az 1986-ban megkezdett második rekonstrukció befejezését követően a reaktor 1992 decemberében lett újra kritikus, üzemeltetési engedélyét a hatóság 1993-ban adta ki. A második rekonstrukció során a reaktor védelmét szolgáló betontömb kivételével minden elemét kicserélték, ám a fűtőelemek típusa változatlan maradt. A megújult reaktor teljesítménye 10 MW lett. 2001-ben a neutronfizikai kutatások számára jelentős fejlesztés valósult meg, a kutatóreaktort hidegneutron forrással látták el.



A Budapesti Kutatóreaktor madártávlatból

Az amerikai kezdeményezésű kockázatcsökkentési programnak (RRRFR) megfelelően a reaktort 2009 és 2012 között konvertálták, azaz fokozatosan kisdúsítású (20%) fűtőelemekre cserélték a nagy dúsításúnak tekintett (36%) fűtőelemeket. A fűtőelem alakja, szerkezete nem változott, ezért a típus megnevezése sem. A konverzióval párhuzamosan a konverzió előtt kiégetett fűtőelemek elszállításának problémája megoldódott. Az RRRFR program segítségével 2013 végére a kutatóreaktor 2012 előtt használt valamennyi fűtőelemét elszállították Oroszországba és így Magyarország is a nagy dúsítású urántól mentes, tehát ebből a szempontból csökkent kockázatú országok sorába lépett. Megjegyzendő, hogy a kiégetett

fűtőelemek oroszországi feldolgozása során keletkező radioaktív hulladék a vonatkozó megállapodásoknak megfelelően örökre Oroszországban marad, Magyarországot ezekkel kapcsolatban semmilyen további kötelezettség nem terheli.

1.1.2. A Budapesti Kutatóreaktorot üzemeltető MTA Energiatudományi Kutatóközpont

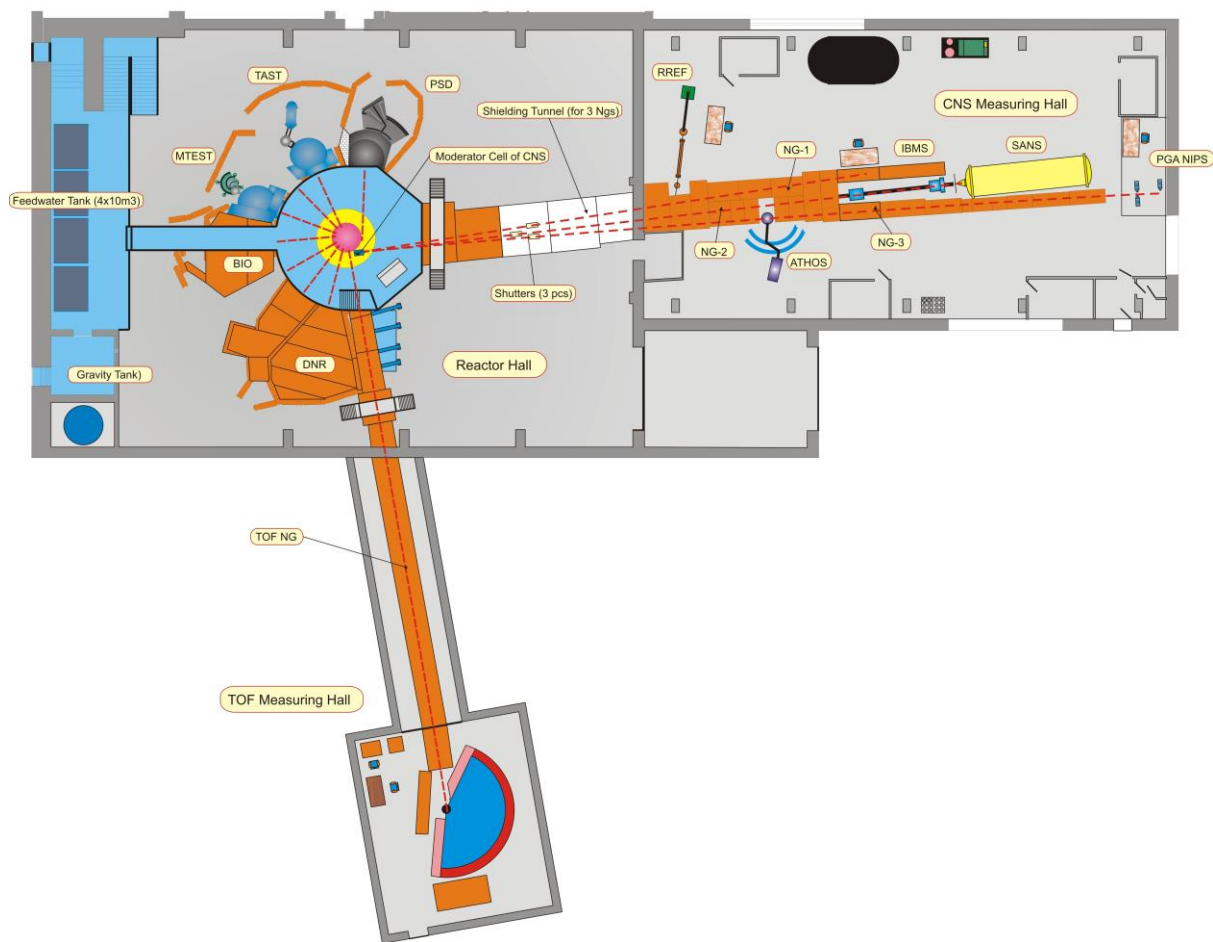
A Budapesti Kutatóreaktorot az MTA Energiatudományi Kutatóközpont (MTA EK) üzemelteti. Az MTA EK, a Magyar Tudományos Akadémia intézménye, amely mai formájában 2013. január 1-től működik, amikor is a korábbi MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézetet (AEKI) és az MTA Izotóp Intézetet (IKI) az előbbi bázisán összevonták. 2015. január 1-től a Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet (MFA), amely egy ideig az MTA egy másik kutatóközpontjának volt része, szintén az MTA EK részévé vált. Az intézetek valamennyien a KFKI csillebérci telephelyén jöttek létre évtizedekkel ezelőtt.

Az MTA EK kutatási tevékenységében ugyan fontos szerepet játszik a Budapesti Kutatóreaktor, de az MTA EK-nak számos más feladata is van. A központ küldetésnyilatkozata szerint ezek a feladatok a következők:

- kutatás és fejlesztés a nukleáris tudomány és technika területén a nukleáris technológia magyarországi biztonságos használata érdekében;
- részvétel azokban a nemzetközi kutatási erőfeszítésekben, amelyek az atomerőművek új generációjának létrehozását és az üzemanyag-ciklus zárását célozzák;
- kutatás a megújuló energiaforrások területén;
- a kompetencia fenntartása és javítása a nukleáris tudomány és technológia terén;
- a mikro- és nanoszerkezetű anyagok kutatása;
- együttműködés doktori iskolákkal, részvétel a képzésben;
- a Budapesti Kutatóreaktor üzemeltetése.

Az MTA EK tevékenységében fontos szerep jut a kutatóreaktor kutatási célú felhasználásának (lásd 3.1.3. szakasz), valamint jóval kisebb mértékben ipari és egészségügyi alkalmazásának is (lásd 3.1.5. szakasz). A kutatási célú felhasználás legfőbb jellemző adatait a 2000-2016-os időszakra vonatkozó alábbi táblázat rögzíti. Megjegyzendő, hogy a reaktor körül összesen kb. 20 magyar kutatóból álló csoportok működnek, amelyek munkájába időről-időre külföldi kutatók is bekapcsolódnak.

Lektorált folyóiratokban megjelent publikációk száma	1043
Ebből impakt faktoros folyóiratokban megjelent publikációk száma	824
Független hivatkozások száma	4515



A Budapesti Kutatóreaktor körüli berendezések sematikus képe

Korántsem szabad azonban azt gondolni, hogy az MTA EK tevékenységében a BKR lenne a meghatározó. Az MTA EK fő feladata kettős: a korábbi AEKI utódjaként az MTA EK az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. főkonzulense és az Országos Atomenergia Hivatal egyik műszaki háttérintézménye.

Az AEKI komoly szerepet játszott a paksi blokkok indításában és az erőmű működésének korai szakaszában is. A reaktorzónák állapot-monitorozása, azaz az operátorok informálása a reaktor állapotáról, kezdettől fogva az AEKI-ben kifejlesztett számítógépes rendszerrel (VERONA) történik, amelynek kiesése esetén a reaktort 24 órán belül le kellene állítani; az AEKI szállította az erőmű környezet-ellenőrző rendszerét; az AEKI kulcsszereplője a paksi tréningsszimulátor kifejlesztésének; az AEKI igazolta a szűkített rácsosztású kiegészítő fűtőelem-tároló biztonságát. A rendszerváltozás után az AEKI a szovjet háttérintézményektől függetlenül, korszerű nyugati módszerekkel igazolta az erőmű biztonságosságát és rámutatott azokra a gyenge pontokra, amelyek későbbi kiküszöbölése biztosította, hogy Magyarország Európai Unió csatlakozása során a Paksi Atomerőmű léte nem forgott kockán (AGNES projekt). Az atomerőmű főkonzulenseként az AEKI meghatározó szerepet játszott a blokkok teljesítményének 500 MW-ra való emelésében, a Végleges Biztonsági Jelentés elkészítésében, az üzemidő-hosszabbítás előkészítésében, a 2003-as üzemzavar utáni helyreállításban (különös tekintettel a 2. blokk

újraindítására), a fukushimai balesetet követő Célzott Biztonsági Felülvizsgálat sikeres véghezvitelében. Az AEKI-t, illetve immáron az MTA EK-t az atomerőmű minden olyan fontos biztonsági kérdés megoldásába bevonja, amelyekben az MTA EK szakmailag kompetens. Az MTA EK felelős az atomerőmű biztonságának determinisztikus értékeléséért.

Az OAH sokmindenben kikéri az MTA EK véleményét, azonban ez nem fordulhat elő olyan esetekben, amikor az MTA EK főkonzulensként már dolgozott az atomerőmű számára. Az MTA EK részt vett számos szabályzati dokumentum előkészítésében, valamint technikai segítséget ad a nukleáris anyagok nyilvántartásához.

Ezek a fő feladatok azért váltak elvégezhetővé, mert az AEKI évtizedek óta jelentős kísérleti kutatási programot végez a reaktorfizika (kritikus rendszereken végzett mérések, beleértve a VVER-1000 reaktor fizikájának kutatására létrejött nemzetközi kutatócsoport működését a ZR-6 reaktor körül), a termohidraulika (a paksi primerkör modelljén végzett kísérletsorozatok, a reaktortartály külső hűtésére készült műszaki megoldás biztonságának kísérleti igazolása), és a reaktoranyagok (reaktortartály anyagának vizsgálata, fűtőelem-sérülések kísérleti modellezése) terén. Az AEKI ezeket a kísérleti vizsgálatokat mindig azért végezte, hogy a paksi atomerőmű számítógépi modelljeit ellenőrizni, validálni tudja. Ennek jelentősége igen nagy, mert ez biztosítja azt a hitelességet, amely szükséges a paksi atomerőmű nemzetközileg is elismert biztonságosságához. Természetesen az MTA EK részese a nemzetközi keretekben folyó kísérleti vizsgálatoknak is, amelyek közül a legfontosabb a norvégiai Halden reaktorban évtizedek óta az OECD Nuclear Energy Agency keretében folyó projekt.

Az alábbiakban röviden összefoglaljuk a BKR szerepét a paksi blokkok történetében.

A Budapesti Kutatóreaktor mint korai nukleáris létesítmény létezése lehetővé tette, hogy a paksi atomerőművet üzemeltető szakemberek már az atomerőmű építésének kezdetétől megismerkedjenek a nukleáris technikával. Az üzembe helyezési munkák megkezdése előtt az erőmű fizikusainak és mérnökeinek egy része hosszabb, több hónapos képzésben részesült a Budapesti Kutatóreaktort akkor működtető Központi Fizikai Kutatóintézetben. Ennek a képzésnek során természetesen nem csak a kutatóreaktorral foglalkoztak, ám az azon szereshető tapasztalat lényeges volt.

A Budapesti Kutatóreaktornak a paksi blokkok biztonsága érdekében történő közvetlen alkalmazására a legfontosabb példa a paksi erőmű négy reaktortartálya élettartam tervezéséhez szükséges besugárzások végzése. Ez azért volt előnyös, mert a kutatóreaktorban elérhető maximális neutron-fluxus mintegy tízszerese a reaktortartályt üzem közben érő fluxusnak, így időben lehetett eredményeket kapni arra vonatkozóan, hogy a reaktortartály a tervezett üzemidő végéig biztonságos marad. Később e mérések alapján azt is meg lehetett állapítani, hogy a reaktortartály az először tervezett üzemidőnél hosszabb ideig is megfelel a szigorú követelményeknek. Ezek a vizsgálatok fontos adatokat szolgáltattak az atomerőművi blokkok üzemidő-hosszabbításához.

Közvetve bár, de a paksi blokkokhoz kapcsolódik az is, hogy a Budapest Műszaki Egyetemen folyó szakmérnök-képzés során több szakdolgozat is született a kutatóreaktoron végzett munkára alapozva. A szakmérnökök egy része ugyanis a paksi erőműben hasznosította és hasznosítja ma is tudását.

Végezetül meg kell említeni a kutatóreaktor talán legfontosabb hozadékát, nevezetesen azt, hogy itt alakult ki az a magyar nukleáris kultúra, amely elengedhetetlen tudományos háttere az atomerőmű biztonságos üzemeltetésének.

A fenti tevékenységek, amelyek az MTA EK megítélése szempontjából kulcsfontosságúak, csak kisebb részben alap kutatás jellegűek, sokkal inkább alkalmazott kutatási jellegűek. Ez utóbbi sikerességének mérésére az atomenergetikában sehol sem alkalmazzák a létrejövő szabadalmak számát, ugyanis ezen a területen gyakorlatilag egyáltalán nem szokás szabadalmakat készíteni, ugyanis az új eredmények felhasználása nem a tömegtermelésben, hanem néhány egyedi esetben történik. Mindenesetre jól jellemzik az MTA EK ezen alaptevékenységét az évente az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. és az OAH részére, valamint a hasonló tárgyú Európai Unió kutatási projekteiben elkészült kutatási jelentések száma, amelyet az alábbi táblázat tartalmaz (az ingadozások a konkrét igények ingadozását mutatják). Megjegyzendő, hogy egy az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. vagy az OAH részére készített jelentés elfogadtatása sokszor nehezebb, mint egy-egy impakt faktoros folyóiratban megjelent publikációé.

Év	MTA EK (AEKI) kutatási jelentések száma
2007	85
2008	154
2009	177
2010	173
2011	108
2012	229
2013	183
2014	125

A fentiek alapján nyilvánvaló, hogy az MTA EK-ra nagy szerep vár a jövőben is, elsősorban az új paksi blokkok létesítése kapcsán. Ennek részleteibe itt nem kívánunk belemenni, de megjegyezzük, hogy a sikeresség (az MTA EK, de az egész magyar atomenergetika sikerességének) alapvető forrása a továbbiakban is az atomenergetikai kutatások magas színvonalának, nemzetközi beágyazottságának fenntartása.

Az MTA EK jelenlegi és jövőbeni atomenergetikai kutatási portfóliójának fontos része az újgenerációs, a 21. század második felében létesítendő gyorsreaktorokra vonatkozó, nemzetközi keretekben folyó kutatásokban való részvétel. Az újgenerációs gyorsreaktorok kifejlesztése a záloga annak, hogy az atomenergiát tartósan használni lehessen. Az újgenerációs

gyorsreaktorok ugyanis lehetővé fogják tenni egyrészt az atomenergia kiaknázásához szükséges, és a természetben egyre csökkenő mértékben elérhető hasadóanyag mesterséges előállítását, másrészt az atomerőművi üzemanyag-ciklus zárása révén az atomenergia-termelés során keletkező nagyaktivitású hulladék mennyiségének és legfőképpen tárolási idejének radikális csökkenését. Az újgenerációs gyorsreaktorok fejlesztése Magyarországnak is nemzeti érdeke.

Az elmúlt években az MTA EK vezetésével létrejött egy olyan nemzeti nukleáris kutatási program, amely a következő évekre transzparens módon magában foglalja a meglévő paksi blokkokra, a létesítendő paksi blokkokra, valamint az újgenerációs reaktorokra (és az üzemanyag-ciklus zárására) vonatkozó, több kutatóhelyen folyó hazai kutatásokat. A kutatások fő finanszírozója az állam (az NKFIH-n keresztül), amely 2014. novemberében elindította a VKSZ-14 projektet, de az illetékességükbe tartozó feladatokra finanszírozóként jelenik meg az MVM Paksi Atomerőmű Zrt., az OAH és a Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Kft. is. Nem kifejezetten kutatási feladatokat ad ugyanezen körnek az MVM Paks II. is. A transzparencia biztosítja, hogy a párhuzamosságok elkerülését.

Az MTA EK pályázati eredményességét mutatják azok az adatok, amelyek az MTA-nak a Matematikai és Élettelen Természettudományi területen működő 7 kutatóintézetének/központjának 2014-es összesítéséből származnak (ekkor az MFA még nem volt az MTA EK része):

	MTA EK	összesen	MTA EK/ összesen (%)
kutatói létszám (fő)	79	1148	6,9
EU projektek támogatása (MFt)	192	2156	8,9
OTKA és Innovációs Alap projektek támogatása (MFt)	486	3146	15,9

Hasonlóan pozitív képet mutat az a tény, hogy az EU 7. Keretprogramjában az MTA EK 22 pályázata kapott összesen 2,05 M€ támogatást (összehasonlításképpen az MTA egész intézethálózatának 189 pályázata részesült 48,5 M€ támogatásban).

1.1.3. A reaktor műszaki állapota

Az első Időszakos Biztonsági Jelentés (IBJ) elkészítésére és leadására 2003-ban, a másodikára 2013-ban került sor. A hatóság mindkét alkalommal 10 évre adott üzemeltetési engedélyt. A jelenlegi engedély 2023-ig érvényes. 2023-ban a kutatóreaktor eléri a rekonstrukció utánra tervezett 30 éves üzemidejét.

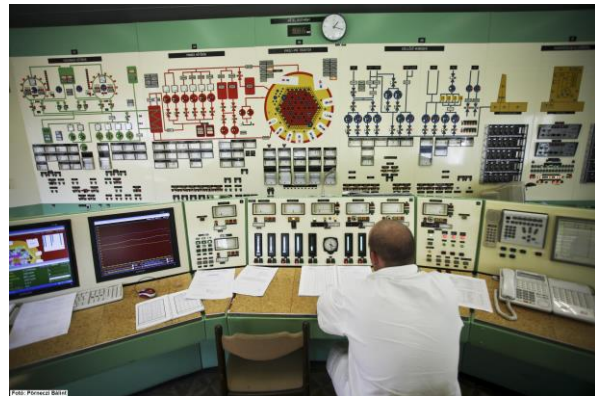
A kutatóreaktor műszaki állapota korának megfelelő. Gépészeti, villamos és sugárvédelmi rendszerei nem igényelnek jelentős átalakításokat. Az irányítástechnikai berendezések elemeit

folyamatosan korszerűbbekre cserélik. A nukleáris mérőláncok részleges cseréje előbb-utóbb szükségessé válik, ami jelentősebb kiadást igényel.

A 2013-as engedélyezés során már felmerült az üzemidő meghosszabbításának lehetősége, ezért előzetes egyeztetés folyt az engedélyező hatósággal (OAH). A hatóság nem látta akadályát a hosszabbításnak, tehát ez elvi lehetőség, kizáró tényező nincs. Az engedélyezés folyamatának tisztázása is megtörtént. Első lépésként az engedélyesnek kérnie kell a hatóságtól, hogy készítse a paksi üzemidő-hosszabbítás mintájára egy útmutatót, ami tartalmazza az elvárásokat. Az engedélyesnek az abban szereplő elvárások szerint a következő IBJ kidolgozása során kell elvégeznie a vizsgálatokat és a megfelelés igazolását.



A reaktorcsarnok



A vezénylő

1.1.4. A fűtőelem-helyzet

A kutatóreaktor üzemeltetési engedélye 2023. december 15-ig érvényes. A jelenleg rendelkezésre álló friss üzemanyag mennyisége alapján megbecsültük a rendelkezésre álló üzemanyag felhasználásának időbeli határát, valamint a reaktor 2023-ig történő üzemeltetéséhez szükséges üzemanyag mennyiségét és a megrendelés határidejét.

A fűtőelemek felhasználását az alábbi megkötések korlátozzák:

1. A friss fűtőkötég tárolóban jelenleg 196 köteg található.
2. A zóna 190 kötegből áll.
3. A zónában öt korcsoportba tartozó köteg van, egy korcsoport 38 darabból áll.
4. Zónarendezés során egy korcsoportot cserélünk, mivel a becslések szerint két korcsoport friss kötegre történő cseréje esetén a megfelelő lezárási szubkritikuság nem biztosítható (túl sok urán lenne a zónában).
5. Egy fűtőkötég legfeljebb öt évig maradhat a zónában.
6. Egy ciklus 240 órás.
7. Egy kampány 9-10 ciklusból áll.
8. A felhasználók kiszolgálása érdekében egy év alatt legalább 12 ciklust kell üzemelni.
9. A szállítási határidő két év a szerződéskötést követően.

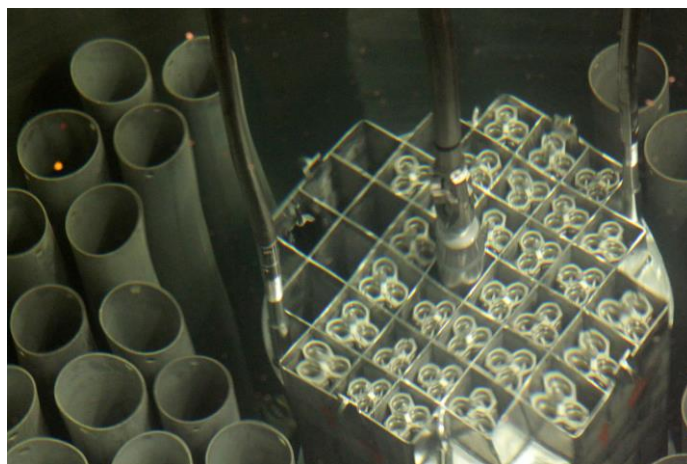
A 4-5. pontok miatt évente legalább egy zónarendezést kell tartani.

Egy kampány hosszát átlagosan 10 hónapra lehet becsülni. Ennek alapján az üzemanyag fogyasztása az alábbiak szerint alakul:

Kampány kezdete	Kampány vége	Friss köteg marad a tárolóban [db]	Rendelendő kötegek száma [db]
2015.10.	2016.08.	158	
2016.08.	2017.06.	120	
2017.06.	2018.04.	82	
2018.04.	2019.02.	44	
2019.02.	2019.12.	6	32
2019.12.	2020.10.		38
2020.10.	2021.08.		38
2021.08.	2022.06.		38
2022.06.	2023.04.		38
			38
A 2023-ig történő üzemeléshez rendelendő kötegek összes száma			222

Bár a fenti adatok csak becslésként kezelendők, de a reaktor 2023-ig tartó üzemeltetéséhez a fűtőelemek megrendelését 2016 végéig el kell indítani.

Tekintettel arra, hogy 2009-ben és 2013-ban a kutatóreaktor kiegészítő fűtőelem tárolójában lévő valamennyi kiegészítő fűtőelemet elszállították Oroszországba, a kiegészítő fűtőelemek tárolója minden további nélkül bőségesen elegendő a 2023-ig kiegészítendő fűtőelemek tárolására.



A szállítókonténer megtöltése



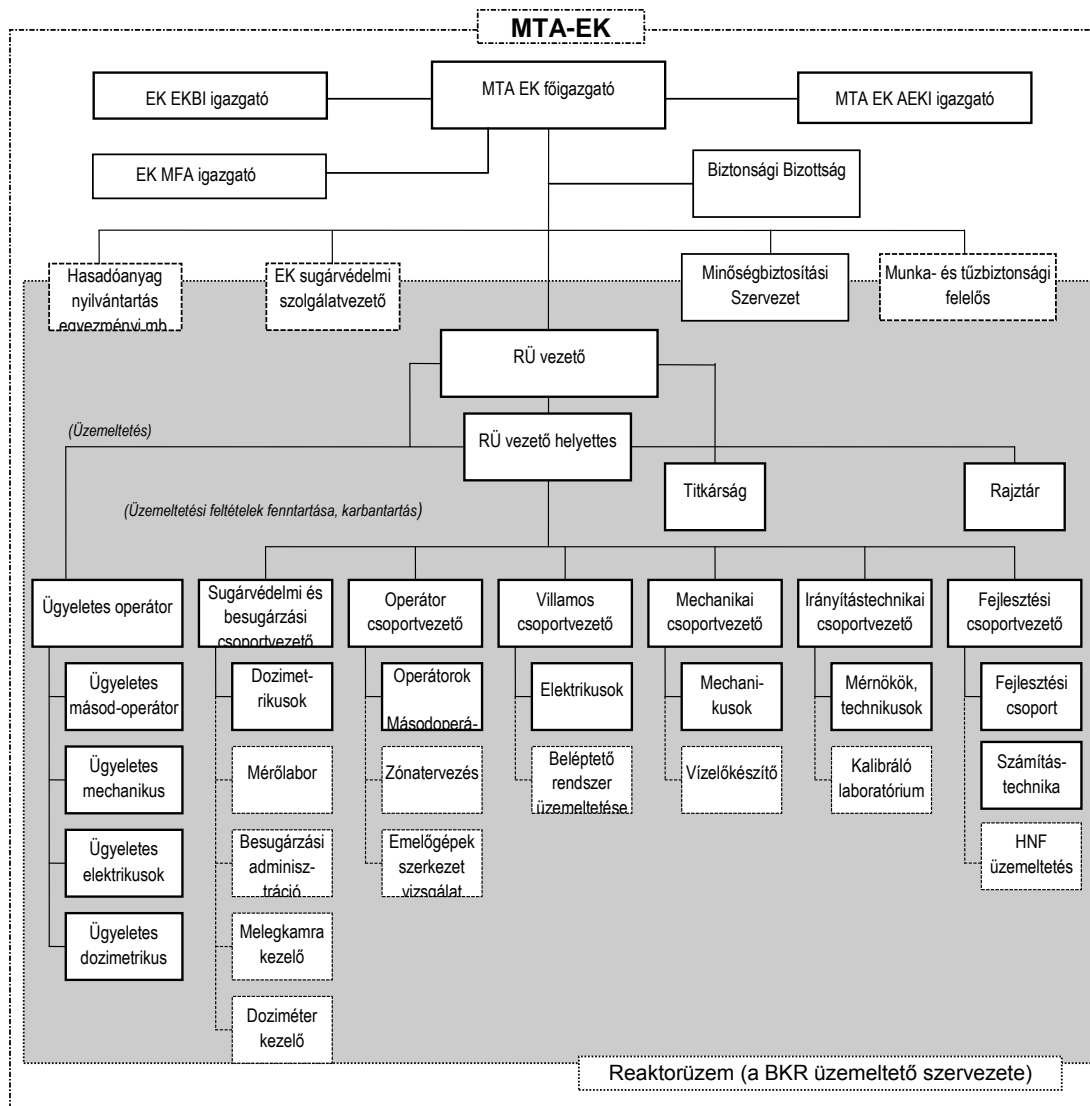
A konténerszállító hajó Koperben



A konténerszállító repülőgép

1.1.5. A humánpolitikai helyzet

A Budapesti Kutatóreaktor engedélyese az MTA Energetikai Kutatóközpont. A reaktor üzemeltetését a Reaktorüzem (RÜ) végzi, amely a kutatóközpont egyik szervezeti egysége.



A fenti ábra a RÜ szervezeti felépítését mutatja be, megjelölve a feladatokat és a kutatóközpontba való illeszkedést. A RÜ dolgozóinak létszáma jelenleg 41, ezek közül diplomás 12 fő, technikus 24 fő, szakmunkás 5 fő. A Kutatóközpont vezetése elkötelezett a dolgozók továbbtanulásával kapcsolatban, azt munkaidő-kedvezményel és tandíj-támogatással segíti.

Mint a jogszabályok alapján elkészített, a szervezeti felépítést bemutató ábrán is látható, az 37 beosztást szimbolizáló kockát tartalmaz. Ha figyelembe vesszük, hogy az évi 12 ciklus biztosításához az ügyleti szolgálatot ellátó személyekből legalább négy váltást kell biztosítani, akkor a szükséges létszámot 15 fővel meg kellene növelni. Ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy legalább 52 főt kellene foglalkoztatni, ami nem megoldható. A probléma feloldásához egy munkavállaló több szakirányú képzéssel is rendelkezik, illetve több feladatot is ellát.

A nukleáris létesítményben foglalkoztatott munkavállalók speciális szakmai képzését, továbbképzését és az atomenergia alkalmazásával összefüggő tevékenységek folytatására jogosultak körét az 55/2012. (IX. 17.) NFM rendelet szabályozza. A kutatóreaktor minden dolgozója megfelel az abban szereplő előírásoknak.

A személyzet jelenlegi kor szerinti összetételét az alábbi táblázat mutatja:

Életkor szerint (év)	
fiatalabb, mint 30	5 fő
30-40	8 fő
41-50	9 fő
50-60	12 fő
60 fölött	7 fő

Szakmai gyakorlat szerint (év)	
kevesebb, mint 5	12 fő
6-10	9 fő
11-20	9 fő
21-30	9 fő
30 fölött	4 fő

Az átlagos életkor 2012-ben 52 év volt, ehhez képest a jelenlegi 47 év kedvezőbb az esetleges üzemidő-hosszabbítás szempontjából, ám az átlagos életkor megtartása, sőt további csökkentése kívánatos. A 13 év átlagos szakmai tapasztalat megfelelőnek mondható.

1.1.6. A pénzügyi helyzet

Az MTA EK gazdasági eredményessége

A kutatóreaktort az MTA EK, tehát egy költségvetési intézmény üzemelteti. Az MTA által biztosított éves költségvetési támogatásban a reaktor nem szerepel önállóan, ezért a pénzügyi helyzet megítélésekor figyelembe kell venni az MTA EK egészének pénzügyi helyzetét. Az alábbi táblázatban egy tipikus évre (2010) vonatkozó részletes adatokat közlünk. Valamennyi adat az AEKI-re vonatkozik, mert egyrészt a reaktor költségei ott jelennek meg, másrészt az MTA EK másik két intézete lényegében nullszaldóként működik.

Kiadások	MFt
-----------------	------------

Személyi kiadások	783
Társadalombiztosítás	228
Dologi kiadások, szolgáltatások	141
Közüzemi számlák	102
Telephelyi kiadások	90
Utaztatási költségek	54
Beruházások és felújítások	49
Alvállalkozói díjak	224
Könyvbeszerzés, folyóirat-előfizetés	9
Nemzetközi projekt-tagsági díj	38
Egyéb	34
Adó	254
Összesen	2006

Bevételek	MFt
MTA támogatás	630
MTA pályázatok	150
Magyar pályázatok	17
Országos Atomenergia Hivatal	41
EU pályázatok	112
MVM Paksi Atomerőmű Zrt.	592
Szolgáltatások	8
Egyéb	185
Adóvisszatérítés	183
Összesen	1917

A mintegy 90 MFt-nyi különbözet nem okozott pénzforgalmi problémát.

A reaktor üzemeltetési költségei és bevételei

A reaktor üzemeltetésének éves költségei (beleértve a beruházási és felújítási költségeket), valamint bevételei a fenti kiadási és bevételi tételek részét képezik. Az MTA-n keresztül kapott, az állami költségvetésből származó kutatóközponti költségvetés elvileg fedezi az reaktor üzemeltetési költségeit. Az üzemeltetési költségeken kívül azonban fűtőelemköltségek és leszerelési költségek is felmerülnek, amelyeket alább külön tárgyalunk.

Az üzemeltetési költségek két részre bonthatóak: bérjellegű költségek, amelyek átlagos évi mértéke mintegy 200 millió Ft, továbbá az anyagok és szolgáltatások költsége, amelyek együttes összege mintegy 400 millió Ft évente. Ez az összeg általában fedezi a szükségessé váló felújításokat és kisebb beruházásokat is,

A reaktor felhasználásából bevételek is származnak. Mint mindenütt a világon, az üzemeltetési költségek a Budapesti Kutatóreaktor esetében is jóval meghaladják a bevételeket. Az

izotópgyártáshoz szükséges besugárzások átlagosan évi 1-10 millió Ft bevételt hoznak. További, mintegy 50-60 MFt-os bevételt jelentenek esetenként az ipari felhasználású kutatások (pl. neutron radiográfia alkalmazása). A NAÜ által szervezett tanfolyamok csekély bevételt jelentenek. A Budapesti Neutron Központ, amely a reaktoron folyó kutatási tevékenységeket szervezi, 1992-ben jött létre az akkor KFKI intézetek együttműködéseként. A kutatások alapvetően a reaktor vízszintes csatornáinál folynak, a csatornát használó kutatóintézet műszereivel. A reaktor térítésmentesen áll rendelkezésre az MTA intézetek és a hazai egyetemek számára. A külföldi kutatók lehetőségeit az Európai Unió biztosítja az NMI-3 projekt keretében, amelynek fejében évi mintegy 8 MFt folyik be a reaktorhoz. A megállapodások szerint a felhasználók akkor fizetnek be költségtérítést a reaktorhoz, ha ott folyó kutatási tevékenységük valamilyen árbevétellel jár (EU-projektek és szerződések). Az egyetlen jelentős, a reaktoron folytatott mérésekre alapuló EU-projekt a CHARISMA volt, aminek révén az elmúlt években összesen 15 MFt folyt be a reaktorhoz. A szerződéses kutatások gyakorlatilag egyetlen megrendelője a MIRRORTRON Kft., amely a reaktort az általa kifejlesztett és gyártott neutronfizikai kutatási eszközök hitelesítésére használta fel. Ennek fejében a Kft. az elmúlt években évi 12 MFt-ot fizetett a reaktor használatáért. Nehéz megítélni az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. (illetve jogelődje) részére is végzett tartályanyag-besugárzásokat, mert ezek komplex projektek részei voltak, amelyekből a reaktorra jutó összeg nem elkülöníthető.

Összességében tehát az mondható, hogy a reaktoron évente átlagosan mintegy százmillió Ft árbevétel keletkezik, ami jóval kisebb, mint a reaktor fenntartásának költsége. Ez természetes, hiszen a reaktor alapvetően alapkutatási célokat szolgál. A közvetlen bevételek azonban nem jellemzik a reaktor gazdasági jelentőségét, mivel az elsősorban közvetetten befolyásolja az MTA EK gazdasági teljesítményét. Az a tény, hogy az MTA EK, illetve jogelődje külső segítség nélkül 25 év óta biztosítani tudja a reaktor működését (beleértve az üzemanyag-ellátást), jól mutatja, hogy a gazdasági teljesítmény teljes mértékben megfelelő.

A Budapesti Neutron Centrum pályázati potenciálja igen jelentős. A 2014 novemberében publikált Nemzeti Intelligens Szakosodási Stratégia (www.s3magyarország.hu/S3) c. dokumentum bemutatja, hogy a magyar pályázatok jóval sikeresebbek voltak, mint a 2004-ben csatlakozott többi országból érkezett pályázatok. A 10 nyertes magyar résztvevő összesen 14,5 millió euró támogatást nyert el, ebből 6 pályázat közvetlenül kapcsolódik a BNC-hez, ill. a neutronkutatásokhoz.

A 2011-15-ös időszakban a BNC-hez befolyt hazai és nemzetközi pályázati támogatások következtében a BNC-hez kapcsolódó befizetések az Államkincstárba meghaladták a 800 MFt-ot. A jelenlegi helyzetben az prognosztizálható, hogy a reaktor működésével összefüggő tevékenység által generált pályázati bevételek évi több, mint 150 MFt Államkincstárba való befizetést eredményeznek.

Az üzemanyag-költségek

Az üzemanyag-költségeket célszerű mind a jelenlegi helyzetre, mind a jövőre vonatkoztatva megadni.

A reaktor orosz gyártmányú VVR-M2 fűtőelemekkel üzemel. A fűtőelemek minősége kiváló, ára azonban egyre magasabb. Más típusú fűtőelemek beszerzése nem merül fel, hiszen a kiváló minőségű orosz fűtőelem helyettesítése biztonsági kockázatot is jelenthet, ami az esetleges pénzügyi megtakarítás érdekében nem vállalható. A nemzetközi piacot áttekintve egyébként sehol sem kapható alacsonyabb áron kutatóreaktor üzemanyag.

A BKR fűtőelemek ára a következő táblázatban foglaltak szerint változott:

év	fűtőelem ár (USD)	relatív ár
2000	2670	1
2009	22900	8,577
2015	62360	23,36

Ez a változás a fűtőelemek önköltségének növekedésével nem indokolható, magyarázata az, hogy az orosz szállító az elmúlt években gyakorlatilag fokozatosan igazodott a világpiacra található árakhoz. A fűtőelemköltségek hozzájárulását a jelenlegi üzemeltetési költségekhez a 2009-ben beszerzett fűtőelemek akkori beszerzési ára alapján számolhatjuk. Az évente átlagosan felhasznált fűtőelemek száma jelenleg 48, ami mostani áron évi 296,5 millió Ft költséget jelent.

A fűtőelem-beszerzések története a következőképpen összegezhető,

- Az 1986-92 közti rekonstrukció kiterjedt jelentős mennyiségű fűtőelem beszerzésére.
- 1993-ban a volt NDK-ban működött rossendorfi reaktor friss fűtőelemeit ingyen megkaptuk (a szállítási költségeket az MTA fedezte).
- 2000-ben mintegy 400 MFt-ért vásároltunk üzemanyagot, amelyet az MTA áthidaló kölcsöne révén négy év alatt kellett az intézetnek kifizetnie.
- 2009-ben a BKR-től elszállított, korábban megvásárolt 36% dúsítású friss üzemanyag fejében az Egyesült Államok 198 fűtőelemet szerzett be a reaktorhoz. Ugyanekkor az MTA újabb áthidaló kölcsönét is felhasználva további 198 fűtőelemet vásároltunk.
- 2012-ben a BKR-től elszállított maradék nagydúsítású urán fejében az Egyesült Államok szervezésében újabb 66 fűtőelem érkezett a reaktorhoz.

A jövőbeni üzemanyag-költségek becsléshez a TVEL 2015. június 30-ig érvényes, 2017-ben történő szállításra vonatkozó ajánlata áll rendelkezésünkre. Egy lehetséges szállítmány 198 fűtőelemet tartalmaz hat konténerben, ennek teljes költsége a szállítással együtt 11,3 millió USD, azaz a jelenlegi árfolyamon kb. 3,3 milliárd Ft. Reális, de takarékos üzemeltetést feltételezve évi 45 fűtőelemet használ a reaktor, ami kb. 750 millió Ft költséggel jár.

A leszerelési költségek

Ami a leszerelési költségeket illeti, azok értelemszerűen csak a jövőre vonatkoznak, ezek tervezése azonban nukleáris létesítmények esetében elengedhetetlen. Tudnivaló, hogy mivel a kutatóreaktor üzemeltetője költségvetési intézményként működik, ezért az Atomtörvény szerint a leszerelési költségek fedezetét nem kell a Központi Nukleáris Pénzügyi Alapba befizetnie, a költségek fedezetét annak idején majd a központi költségvetésnek kell biztosítania.

A jogszabályoknak megfelelően a kutatóreaktor előzetes leszerelési tervét már el kellett készíteni. Ezt az előzetes leszerelési tervet ötévenként, majd a reaktor végleges leállítását megelőzően egy évvel felül kell vizsgálni, és azt más dokumentumokkal együtt be kell nyújtani jóváhagyásra az Országos Atomenergia Hivatalhoz (OAH). A végleges leszerelési tervet a reaktor végleges leállítását követő két éven belül kell elkészíteni.

A végleges leállítást hároméves átmeneti időszak követi. Erre a kiégett fűtőkötegek telephelyről történő elszállítása előtti pihentetés miatt van szükség. Kiszállítást követően engedélyesi jogkör átadás-átvétel keretében át kell adni a reaktorépületet és a hozzátartozó építményeket a bontás lebonyolításával megbízott RHK Kft.-nek. A továbbiakban az RHK Kft. áll kapcsolatban az OAH-val.

A leszerelési tevékenység során el kell bontani mind az aktív, mind az inaktív reaktor-rendszereket és alrendszereket. A keletkezett hulladékot szortírozva és csomagolva szállítják és helyezik el a végleges hulladéklerakóban. A végső cél a reaktorépület és az építmények sugárvédelmi szempontból tiszta állapotban történő átadása a telephely tulajdonosának. A telephelyet csak akkor célszerű felszabadítani a hatósági felügyelet alól, ha nem létesül újabb nukleáris létesítmény a telephelyen. Ha újabb nukleáris létesítmény épül, akkor a „barnamezős” (brownfield decommissioning) leszerelés a tervezett végpont.

A várható leszerelési költségek számításánál a NAÜ által javasolt Excel táblázatot használtuk (CERREX). A számított költség 1,2 milliárd forint, ami nem tartalmazza a fűtőkötegek elszállításának és további kezelésének költségét. A kiégett fűtőelemekkel kapcsolatos költségek a korábbi ilyen költségek alapján becsülhetőek meg. Ha a reaktor üzemeltetése 2023-ban zárul, akkor ez további mintegy 6 milliárd Ft költséget jelent.

1.2. Az Oktatóreaktor bemutatása

1.2.1. A reaktor rövid története

A korábbi KFKI kritikus rendszereit leszámítva a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) oktatóreaktora az első teljesen magyar tervezésű és építésű reaktor. Építését a kritikus rendszereken végzett kutatás-fejlesztés, továbbá a kutatóreaktor üzemeltetése és felhasználása során szerzett tapasztalatok tették lehetővé.

A reaktor 1971. május 20-án vált először kritikussá. Akkori engedélye 10 kW termikus teljesítményre szólt. A megnövekedett igényekhez igazodva és a hazai fejlesztési eredmények felhasználásával 1979-ben az akkori üzemeltetők átalakították az irányítórendszert, 1980 nyarán pedig egy nagyságrenddel (tehát 100 kW-ra) emelték meg a reaktor maximális teljesítményét.

A létesítményt – amelynek elsődleges célja a fizikus- és mérnökhallgatók gyakorlati nukleáris képzési feltételeinek biztosítása – a BME Nukleáris Technikai Intézete (NTI) üzemelteti. A reaktor medence típusú, nyitott vízfelszínű, maximális teljesítménye jelenleg is 100 kW. Üzemanyaga 10%-os dúsítású EK-10 típusú, a töltet teljes urántömege közel 30 kg. Az Oktatóreaktor számos kísérleti berendezéssel – pl. csőposta, függőleges besugárzó csatornák, vízszintes nyalábcatornák, besugárzó alagút – van ellátva. E berendezések, valamint a reaktorépületben kialakított laboratóriumok teszik lehetővé több különböző mérési gyakorlat akár egy időben történő lebonyolítását.

A reaktor az 1971-es üzembe helyezés óta egyszer esett át jelentős átalakításon. Ennek során az aktív zóna elrendezése az addig alkalmazott 23 fűtőelem-kazettáról 24-re bővült, amely lehetővé tette a reaktor teljesítményének 10 kW-ról 100 kW-ra történő emelését. Az aktív zónában lévő fűtőelemeket a reaktor indulása óta nem cserélték. Ez azért volt lehetséges, mivel az Oktatóreaktor fűtőelemeinek kiégése – a kis teljesítménynek és a szakaszos, optimalizált üzemelésnek köszönhetően – rendkívül alacsony. E tényből adódóan azonban a fűtőelemek 45 éve vannak a zónában.

1.2.2. Az Oktatóreaktor szerepe a magyarországi nukleáris oktatásban és kutatásban

A nukleáris oktatás és gyakorlati képzés az elmúlt fél évszázadban mindig szorosan kapcsolódott a nukleáris energia hasznosításához. Felismerve a nukleáris technológia tudományos és interdiszciplináris jellegét, továbbá a résztvevő szakemberek képzettségének rendkívüli fontosságát, a döntéshozók minden nagyobb nukleáris program esetében a projekt elválaszthatatlan részének tekintették a szükséges oktatási infrastruktúra kialakítását. A ma világviszonylatban létező oktatási és képzési infrastruktúra döntő hányada lényegében visszavezethető azokra az alapokra, amelyeket az 1950-es és 1960-as évek kutatási programjainak támogatására hoztak létre.

Az oktatóreaktort e gondolatok jegyében hozták létre és ezek adják jelenleg is a működtetés fő elveit. A reaktor és a hozzá kapcsolódó berendezések kialakítása, felépítése, sokrétű

használhatósága megteremtették és jelenleg is szolgálják a gyakorlati nukleáris képzés feltételeit.

A 100 kW-os teljesítmény lehetővé teszi, hogy a reaktor segítségével számos kísérlet, mérés elvégezhető legyen, ugyanakkor több paramétert is minimalizál:

- a reaktor fűtőelemeinek kiégése igen csekély marad hosszú időn keresztül történő üzemeltetéskor is;
- a hőteljesítmény kicsi, ezért nincsenek magas követelmények a reaktor hűtőrendszerével szemben (nominális teljesítményen történő 8 órás üzemelést követő nukleáris leállás után a reaktortartályban lévő víz természetes cirkulációja elegendő a fűtőelemek hűtéséhez);
- a reaktorblokk tetején még nyitott vízfelszín mellett is viszonylag kicsi a dózisteljesítmény, ezért a kísérleti eszközökkel történő manipuláció lehetséges.

Mivel a teljesítmény 0 és 100 kW között tetszés szerint változtatható, továbbá a teljesítményértékek eléréséhez sem szükséges hosszú idő, a reaktor nagyon flexibilisen alkalmazható hallgatói mérések elvégzéséhez. Szintén segítik ezt a beépített kísérleti rendszerek:

- a csőposta;
- a vízszintes besugárzó csatornák, melyek segítségével létrehozott neutronyalábokkal – megfelelő felügyelet mellett – hallgatók is kísérletezhetnek;
- a nagy méretű besugárzó alagút, amely távirányítással nyitható és szintén alkalmas a benne elhelyezkedő termikus oszlop, illetve más, oda behelyezhető berendezések segítségével hallgatói mérések, laborgyakorlatok végzésére.

A reaktor indulása óta az NTI oktatói - a fent említett berendezéseket is kihasználva – nagy számú, színvonalas mérési gyakorlatot dolgoztak ki, melyek a mag-, neutron- és reaktorfizika számos területéhez kapcsolódóan nyújtanak a hallgatók számára gyakorlati ismereteket. A legfontosabb mérési gyakorlatok – melyek közül akár egyszerre több is végezhető a hallgatók mérőcsoportjai számára – a következők:

- kritikussági kísérlet,
- üregeffektus mérése,
- különböző méretű, tömegű és elhelyezkedésű neutronabszorbensek reaktivitásra gyakorolt hatásának vizsgálata
- neutronaktivációs analízis,
- a termikus neutron-fluxus térbeli eloszlásának és lokális értékének mérése,
- későneutron-paraméterek meghatározása,
- uránkoncentráció vizsgálata,
- neutronok diffúziós hosszának meghatározása a besugárzó alagútban elhelyezkedő grafit termikus oszlopban,
- neutron- és gamma dózisteljesítmény-mérések a vízszintes csatornáknál,
- sugárvédő anyagok vizsgálata a vízszintes csatornáknál,
- grafitreflektorok reaktivitás-értékességének vizsgálata.

A felsorolt méréseken túlmenően az NTI 2016 folyamán vásárolt egy pulzált neutronforrást is, melyet a kutatási feladatokon túlmenően az oktatásban is használni fogunk (szubkritikus rendszeren végzett reaktivitás-mérések oktatására).

Az NTI – hasonlóan korábbi jogelődeihez – jelentős volumenű oktatási feladatot látott és lát el magyar és nemzetközi viszonylatban egyaránt. A hazai fizikus- és mérnökképzéshez kapcsolódóan az NTI feladatai a következők:

- Felelős a BME Fizikai Intézete által gesztorált Fizika alapszak (BSc) Alkalmazott fizika szakirányának Nukleáris technika specializációjáért és a Fizikus mesterszak (MSc) Nukleáris technika és Orvosi fizika szakirányának programjáért, és oktatja e szakirányok hallgatóit.
- Vezeti és szervezi az Energetikai mérnök alap- és mesterszak Atomenergetika szakirányának képzési programját és oktatja e szakirányok hallgatóit.
- Oktatja a Villamosmérnöki és Informatikai Kar által gesztorált Villamosmérnök MSc Rendszertechnika szakirányának Nukleáris mellék-szakirányába tartozó tárgyakat.
- Oktatja a Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar környezetmérnök hallgatóit.

Rendszeresen szervezi a reaktortechnika szakirányú továbbképzéseket (másoddiplomás képzés).

A felsorolt oktatási feladatok – a kontakt órákon túlmenően – diákköri feladatokat, szakdolgozati és diplomamunkákat, valamint doktori témákat is magukban foglalnak, melyek egy része szintén az Oktatóreaktorhoz kapcsolódik. A fenti feladatokon túlmenően kiemelkedő fontosságú az évente mintegy másfél-kétezer, elsősorban középiskolás korú látogató (diák) fogadása.

A Nukleáris Technikai Intézet – elsősorban az oktatóreaktornak köszönhetően – az utóbbi évek során egyre nagyobb mértékben kapcsolódik be a nemzetközi oktatásba. Ebben a vonatkozásban az NTI tevékenysége az alábbiakban foglalható össze:

- A Pozsonyi, a Prágai és a Bécsi Műszaki Egyetemen közösen több éven át szervezte a Wigner Kurzust, amely elméleti és gyakorlati reaktorfizikai oktatási céllal jött létre.
- Jelentős számú hallgatót és doktoranduszt fogadott különböző európai egyetemekről (École de Mines de Nantes, KTH Stockholm, TU Delft stb.).
- 34 éve minden évben egy hét időtartamra fogadja a Pozsonyi Műszaki Egyetem hallgatóit, továbbá a szlovák atomerőművek szakembereit reaktorfizikai mérési, illetve továbbképzési kurzusokon.
- Tanfolyami keretben évente fogadja a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) nukleáris biztosítéki ellenőreit.
- Jelentős számban fogadott és fogad fiatal szakembereket a NAÜ ösztöndíjával, illetve az Ügynökség égisze által szervezett nemzetközi EERRI tanfolyamok keretében.
- 6 csoportban mintegy 220 vietnami egyetemi oktatót és szakembert fogadott 3+3 hetes, illetve 4+2 hetes képzés keretében (a képzés második 3 illetve 2 hetes időtartamát a Paksi Atomerőmű biztosította).

- 6 fős csoportokban vietnami egyetemi oktatók képzését biztosítja 12 hetes specializált kurzusok formájában, melyek során a vietnami szakemberek 10 hetet a BME-n, 2 hetet a paksi atomerőműben töltenek.
- A BME és a Duisburg-Essen-i Egyetem közös szervezésében indított Energy Science alapképzés hallgatóinak (évente 10-12 hallgató) a nukleáris specializációt jelentő 6. és 7. féléves képzését a BME Fizikai Intézete és az NTI közösen biztosítja.

Várható, hogy a jövőben az NTI képzési feladatai mind magyar, mind nemzetközi vonatkozásban jelentősen bővülni fognak. A nukleáris szakember-képzés a paksi atomerőmű üzemidő-hosszabbítása, illetve a kapacitás-fenntartása miatt kiemelt fontossággal bír. Megjegyzendő, hogy a jelenleg az MVM Paksi Atomerőmű Zrt.-nél, továbbá az Országos Atomenergia Hivatalnál dolgozó mérnökök és fizikusok jelentős része tanult a BME NTI-nél, részben a reguláris képzés hallgatójaként, részben a felsőfokú szakképzés keretében két éves időtartamú szakmérnöki továbbképzésben.

Az elmondottak miatt az NTI 2015 februárjától a BME Villamosmérnöki Karán Nukleáris mellék-szakirányt indított a villamosmérnök mesterképzéses hallgatóknak, amelyre közel 20 hallgató jelentkezett. A képzési formát célszerű lenne más karok irányába is kiterjeszteni. A nukleáris szakember-igény növekedéséhez kapcsolódó hallgatói érdeklődés más területen is figyelemre méltó: míg a korábbi években a BME Energetikai mérnök alap- és mesterszakán 6-8 fő választotta az Atomenergetika szakirányt, 2013-ban 13, 2014-ben pedig 16 hallgató jelentkezett erre a specializációra. 2015-ben sajnálatos módon ez a szám jelentősen visszaesett, aminek az okát az Energetikai Szakkollégium bevonásával vizsgáljuk.

A BME NTI által 2014-ben indított reaktortechnika szakmérnöki tanfolyamon jelentős számú hallgató vett részt. Az előreláthatólag tovább bővülő szakemberigény miatt számítani lehet arra, hogy a jövőben is folyamatosan szükség lesz újabb tanfolyamokra.

A felsorolt képzési feladatok megvalósításában kiemelt szerepe van az Oktatóreaktornak. A nukleáris oktatás tekintetében rendkívül fontos a gyakorlati vonatkozás. Ezt a tényt – valamint a BME több évtizedes nukleáris oktatási tapasztalatát – észrevéve több ország is jelezte szándékát, hogy jelentős számban kívánják küldeni Magyarországra nukleáris célú kurzusokra. Ilyen megkeresések érkeztek – többek között – Szaúd-Arábiából, Jordániából, Egyiptomból és Törökországból is.

A vietnami fél részéről igény van rá, hogy egyetemeikről újabb 6 fős csoportok jöhessenek specializált tanfolyamokra. A nemzetközi érdeklődés miatt elkezdődött egy Nuclear Engineering MSc kurzus szervezése, előkészítése. Ez 4 féléves, angol nyelvű képzés lesz. Várható maximális létszáma 30 hallgató.

Az Oktatóreaktor természetesen nem csak oktatási jellegű tevékenységet végez, hiszen a felsőoktatásban az oktatás és a kutatás egymástól nem elválasztható tevékenységek. A kutatási feladatok egyaránt szolgálják az oktatók folyamatos önképzését, a tudomány legfrissebb

eredményeinek az oktatásba való beépítését és a hallgatók bevonásán keresztül az egyetemi és akadémiai szféra utánpótlásának kinevelését. Számos nemzetközi példához hasonlóan a BME, mint az ország vezető műszaki felsőoktatási intézménye egyben az egyik legfontosabb hazai kutatási centrum is, amit kutatóegyetemi minősítése is tükröz.

Ennek megfelelően az Oktatóreaktornál a kezdetektől fogva folyik kutatási tevékenység is. Az NTI oktatói nemzetközileg is elismert publikációs tevékenységet tudnak felmutatni. A vezető oktatók több, mint 300 nemzetközi publikációval és ezekhez kapcsolódóan 1500-at meghaladó független idézéssel rendelkeznek.

A 100 kW-os maximális teljesítmény kutatási szempontból is ésszerű kompromisszum, amely az egyetemi környezethez alkalmazkodva, a nagyfokú specializáció helyett kutatási irányok szélesebb spektrumát biztosítja egyetlen berendezésben. Az alacsonyabb neutron-fluxus nem teszi ugyan lehetővé a sugárkárosodási vizsgálatokat, vagy nyalábok biztosítását neutronfizikai kísérletekhez, viszont ezek hiányában folyamatos üzemre sincsen szükség, így a reaktor üzeme alkalmazkodhat az oktatási vagy kutatási feladatokhoz, az aktív zóna alacsonyabb mértékű besugárzottsága pedig könnyebb hozzáférést és konfigurálhatóságot biztosít.

A reaktorban elérhető neutron-fluxus megfelelő az ún. neutronaktivációs analitikához, amely az egyik legérzékenyebb módszer anyagok nyomelem-összetételének nagy pontosságú meghatározására. Az Oktatóreaktorban több besugárzási lehetőség is rendelkezésre áll ilyen vizsgálatokra. Az NTI kutatói az elmúlt évtizedekben sikeresen alkalmazták ezt a technikát különféle régészeti, környezeti, biológiai minták vizsgálatában nemzetközi szinten is kiemelkedő eredményeket érve el.

A zóna alacsony besugárzottsága rövid pihentetési idő után lehetővé teszi az ún. besugárzó alagút nyitását, és az ott elhelyezett eszközök cseréjét, átrendezését. Ez tette lehetővé az ún. bór-neutronbefogós rákterápiával (BNCT) kapcsolatos nemzetközi kutatásokba való bekapcsolódást és egy neutron- és gammaszűrő kifejlesztését.

A neutron-fluxus anyagok sugárkárosodásának vizsgálatához csekély, de az Oktatóreaktor besugárzó alagútjában kialakítható besugárzó tér alkalmas elektronikai eszközök működésének és a besugárzás hatására bekövetkező meghibásodás, vagy zaj vizsgálatára. Ezt kihasználva az NTI-ben fúziós kísérleti berendezésekbe telepítendő kamerák és más eszközök vizsgálatát is végezték.

Reaktorfizikai mérések és kísérletek szempontjából előnyös, hogy az oktatóreaktorok az ilyen célokra használt kritikus rendszereknél (zéró reaktoroknál) szélesebb teljesítmény tartományban üzemelhetnek. Hátrány, hogy az enyhén besugárzott zóna nehezebben konfigurálható és egyes méréseket a gammaháttér zavarja, amely azonban megfelelő pihentetéssel csökkenthető. Az elérhető magasabb teljesítmény lehetővé teszi pl. neutrondetektorok kalibrálását különböző fluxus szinteknél, azok különböző üzemmódjában, amelyre a paksi atomerőmű mérőláncainak felújítása kapcsán is sor került. Az Oktatóreaktornál végezték reaktivitásmérő rendszer tesztelését is.

1.2.3. A reaktor műszaki állapota

Az Oktatóreaktor első Időszakos Biztonsági Felülvizsgálata (IBF) 1996-ban volt. Az ezt dokumentáló Időszakos Biztonsági Jelentés (IBJ) alapján az Országos Atomenergia Hivatal 10 évre adott üzemelési engedélyt. 2006-ban az NTI újabb IBF-et készített, melynek eredménye a 2017-ig szóló üzemeltetési engedély. Az NTI a 2016. év során egy újabb IBF-et készített, melynek keretében az üzemeltetési engedély újabb 10 évre, 2027-ig szóló meghosszabbítását kéri.

2009-től az NTI a Paksi Atomerőmű segítségével az alábbi átalakításokat, felújításokat végezte el a reaktoron:

- körpályás daru felújítása,
- szennyvízkezelő rendszer részleges felújítása,
- rúdmozgató hajtások rendszerének cseréje,
- biztonságvédelmi logika karbantartása,
- technológiai mérőrendszer cseréje,
- táptartályok földrengésbiztonsági megtámasztása,
- nukleáris mérőláncok elektronikájának valamint a detektorok részleges cseréje (jelenleg is zajlik).

A 2015-ös évben a BME a Felsőoktatási Struktúraátalakítási Alaphoz beadott pályázatból elnyert összeg nagy részét az Oktatóreaktor épületének korszerűsítésére fordítja. Ennek keretében az NTI – a kapott pénzeszeget saját bevételeivel kiegészítve – a 2016. év folyamán a következő munkákat végezteti el:

- az épület erősáramú rendszerének teljes cseréje
- az épület szellőző- és klímarendszerének teljes cseréje
- az épületgépészeti rendszer felújítása
- a sugárvédelmi ellenőrző rendszer teljes cseréje
- a reaktor primer körében található szelepek cseréje
- a sugárvédelmi célokat szolgáló bóros kádak cseréje
- az épület ablakainak cseréje, belsőépítészeti felújítás.

A további üzemelés szempontjából – a fűtőelemeken kívül – műszaki szempontból a reaktortartály és a benne található berendezések számítanak kritikusnak.

A primerköri rendszerek műszaki állapota koruknak megfelelő. A reaktortartály és a tartályban lévő alkatrészek vizuális állapotellenőrzése rendszeresen történik. A jelenlegi IBJ keretében egy komplett vizsgálati és elemzési programot kell végrehajtanunk a további üzemelés megalapozása érdekében.

1.2.4. A fűtőelem-helyzet

A BME Oktatóreaktorának aktív zónája szovjet gyártmányú, EK-10 típusú fűtőelemekből áll. Ezt a típust az Oktatóreaktor 1971-es üzembe helyezése előtt már sok reaktorban használták, ezért arra vonatkozóan hosszú üzemidő-tapasztalat állt rendelkezésre. A tervezés alapja a túlméretezés volt: az EK-10-es fűtőelemet az Oktatóreaktorénál több mint egy nagyságrenddel nagyobb hőterhelésre méretezték.

Az EK-10-es fűtőelem 10 mm külső átmérőjű pálcákból áll. Üzemanyaga 10% dúsítású, fémmagnézium-mátrixban diszpergált urándioxid, burkolata alumínium. A fűtőelemeket – valószínűsíthetően – az 1960-as évek közepén gyártották. Az Oktatóreaktor épületében található, összesen 854 fűtőelempálca különböző időpontokban került a létesítménybe. Az első szállítmány a reaktor indulása előtt, 1971-ben érkezett részben az akkori Szovjetunióból, részben a KFKI-ból. A második adag – 485 fűtőelempálca – 1980-ban egy cseh (akkori csehszlovák) reaktorból került az Oktatóreaktorhoz. A jelenlegi aktív zóna – 1980 óta – 369 fűtőelempálcából áll, melyek 24 kazetában helyezkednek el. Az aktív zónában lévő üzemanyagon kívül több mint egy zónatöltetnyi kazetta található a reaktorépületben lévő tárolókban. Ezek olyan fűtőelemek, melyek a ŠKODA Művek kritikus rendszerében az 1970 és 1975 közötti időszakban voltak besugározva. Mivel az a berendezés maximum 100 watt teljesítményen üzemelt, a fűtőelemek a kezelhetőség és felhasználhatóság szempontjából gyakorlatilag a frissekkel egyenértékűek.

A reaktivitás-tartalék fogyása alacsony szintű: az 1980-ban mért 1,58 \$ értékről 2015-re 78 centre csökkent. Az aktív zóna átrendezésével és újabb grafit reflektorok elhelyezésével a reaktivitás-tartalék – elvileg – további 30-40 évre lehetne elegendő.

Elképzelhető, hogy a jelenleg az aktív zónában lévő fűtőelemekkel – a fűtőelemek kora miatt – nem lesz lehetséges az üzemeltetési engedély 2027 utáni meghosszabbítása. Ebben az esetben a további üzemelés – a fűtőelemek szempontjából – két esetben lehetséges:

1. Az NTI a jelenleg az Oktatóreaktor tárolóiban lévő, kismértékben besugárzott fűtőelemeket használja fel töltetcsereére. Ehhez a fűtőelemek felhasználhatóságát, előírásoknak való megfelelést igazolni kellene. Az NTI ki fog dolgozni egy programot, amelyben megvizsgálja a fűtőelemek minősítésével kapcsolatos lehetőségeket.
2. Az NTI új fűtőelemek beszerzésével hoz létre új aktív zónát. Az új fűtőelemek beszerzésével párhuzamosan a jelenlegi fűtőelemeket el kell szállítani. Amennyiben fűtőelemet kell vásárolni és azt teljes egészében ki kell fizetni, annak ára – az MTA EK fűtőelemeinek árából kiindulva – valószínűleg meghaladja a félmilliárd Ft-ot. Ebben természetesen nincsen benne a kiegészítő fűtőelem elszállításának költsége.

Bármely megoldás kerüljön is kiválasztásra az Oktatóreaktor reaktivitástartalékának megnövelésére, az – a mostani üzemanyagtakarékos üzemmenet fenntartása mellett – a reaktor hátralévő élettartamára, akár több évtizedre is biztosíthatja az üzemanyag-ellátást.

1.2.5. A humánpolitikai helyzet

A BME Oktatóreaktorát a Nukleáris Technikai Intézet üzemelteti. E feladatkörön túlmenően az Intézet szerteágazó oktatási és kutatási feladatkörrel bír. Emiatt az üzemeltetés, illetve az ehhez kapcsolódó elemzési, dokumentum-készítési munkák egy részét az oktató-kutató munkakörben foglalkoztatott kollégák végzik.

Az Intézetnek 58 főállású munkatársa van. Közülük 27-en oktató-kutatói, 31-en pedig nem oktató-kutatói státuszban vannak. Az Oktatóreaktor üzemeltetéséhez – az Intézeti SzMSz és a Szolgálati szabályzat szerint – öt munkatárs jelenléte szükséges (beosztás szerint):

- operátor,
- másodoperátor,
- dozimetrikus,
- elektrikus,
- mechanikus.

Operátor csak műszaki diplomával rendelkező munkatárs lehet. Mivel a reaktor csak munkanapokon és csak munkaidőben üzemel, ezért nincsen szükség többműszakos munkarendre. A munkabeosztás megkönnyítése végett bizonyos kollégák beoszthatók a fent említett öt funkció közül többre is (természetesen egyszerre csak egyre). A nem oktató-kutató kollégák képesítés szerint a következő számban állnak rendelkezésre:

- operátori jogosítvány: 4 fő
- másodoperátori képesítése: 2 fő
- dozimetrikus: 4 fő (statisztikai állomány: 3,5 fő)
- biztonsági mérnök: 1 fő
- elektronikus képesítés: 1 fő
- mechanikus képesítés: 2 fő.

A fent említett átfedések miatt ez összesen 8,5 fő.

Az Intézetben az elmúlt 10 évben jelentős fiatalítás történt. Az átlagos életkor 2011-ben 46 év volt. Az állományi létszám 2011-évhez képest 2 fő fiatallal bővült, így a 2016. évi átlagéletkor tovább csökkent 44 évre. Az esetleges üzemidő hosszabbítás szempontjából, személyi állományát tekintve az Oktatóreaktor felkészült. Hosszútávon kívánatosnak tartjuk az átlagéletkor 50 év alatt tartását, a folyamatos fiatalítást. Fontos megemlíteni, hogy az Oktatóreaktor esetében az elmúlt időszakban történt fiatalítással párhuzamosan a fluktuáció is igen magas volt, elsősorban a megnövekedett adminisztrációs és egyéb terhek, valamint az alacsony bérek következtében.

A személyzet jelenlegi kor szerinti összetételét az alábbi táblázat mutatja:

Életkor szerint (év)	
fiatalabb, mint 30	0 fő
30-40	4 fő
41-50	3 fő
50-60	1 fő
60 fölött	1 fő
Átlagos életkor	44 év

Szakmai gyakorlat szerint (év)	
kevesebb, mint 5	2 fő
6-10	2 fő
11-20	4 fő
21-30	1 fő
30 fölött	0 fő
Átlagos szakmai gyakorlat	10 év

1.2.6. A pénzügyi helyzet

A Nukleáris Technikai Intézet költségvetése – amely az Egyetem szemszögéből a „Nukleáris technika alrendszer” nevet viseli – több részből áll össze:

- költségvetési forrás,
- szerződéses munkák bevételei,
- hazai és nemzetközi oktatási munkák bevételei,
- pályázati bevételek.

2015-ig költségvetési forrásból az Intézet évente 123 millió Ft-ot kapott. Az Oktatóreaktor felújítása kapcsán 2016-ban ez 100 MFt-ra csökkent. Ebben az összegben szerepel a 27 oktató-kutató tudományos és oktatási teljesítményének finanszírozása is. A szerződéses munkák, a pályázatok, valamint az oktatási tevékenység együttesen évente átlagosan 300 millió Ft körüli bevételt eredményeznek. Ebből az Oktatóreaktorhoz kapcsolható bevételek – melyek megszerzéséhez szükséges a reaktor működése – éves szinten 30-40 millió Ft-ra tehetők.

Az NTI munkabér jellegű kiadásai évente meghaladják a 250 millió Ft-ot. Ebből a közvetlenül a reaktor üzemeltető személyzetéhez (beleértve a portásokat, öröket) köthető bérjellegű kiadások 90 MFt felett vannak. Ezen felül vannak a reaktor működési költségei, melyek között elsősorban az Oktatóreaktor üzemeltetésével és karbantartásával kapcsolatos költségek (kb. évi 30 MFt), valamint a reaktor épületében található laboratóriumok költségei a jelentősek (pl. detektorok karbantartása, folyékony nitrogén, radioaktív hulladékok elszállításának/elhelyezésének költségei stb., kb. 15-20 MFt). Mivel fűtőelemet az NTI mindezidáig nem cserélt, ezért az éves kiadások között fűtőelem-költséggel nem kell számolni.

A fenti számadatokból megfigyelhető, hogy az Oktatóreaktort üzemeltető NTI költségvetésből származó bevételei kb. felét adják az Intézet bérköltségének. Minden más, működési jellegű költséget az Intézet saját bevételből finanszíroz. Nyilvánvaló, hogy ezekből új fűtőelem vásárlására az NTI forrást nem tud elkülöníteni. A teljes működési költség, valamint a bér jelentős részének kigazdálkodása nagy terhet jelent az NTI munkatársai számára.

Bár egy töltetnyi fűtőelem vásárlása komoly egyszeri kiadást jelentene (ennek pontos összegére nézve jelenleg nincsen információ), a kiadást – mint fűtőelem-költséget – az elkövetkező 20

vagy 30 évre elosztva csekély összeg adódik. Ehhez érdemes még hozzátenni, hogy a reaktor külső felhasználók számára történő üzemeltetéséből eredő bevételek (reaktorhoz kapcsolható magyar és külföldi oktatás bevételei, reaktoros mérések szerződéses bevételei stb.) a következő 20 évben várhatóan jóval meghaladhatják az 500 millió Ft-ot.

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem – az MTA Energiatudományi Kutatóközponthoz hasonlóan – szintén költségvetési intézmény. Ezért a leszerelési költségek fedezetét a felmerüléskor a központi költségvetésnek kell majd biztosítania. Az előzetes leszerelési tervet az NTI elkészítette. Eszerint a leszerelés várható költsége mintegy 600 millió Ft lesz. Ebben nincsen benne a fűtőelemek elszállításának, feldolgozásának és végső elhelyezésének költsége.

2. Nemzetközi kitekintés

2.1. Budapesti Kutatóreaktor

Az elmúlt másfél évtizedben a BKR nemzetközi pozíciója/szerepe a neutronnyaláb-kutatások és -alkalmazások tekintetében rendkívüli módon felértékelődött. Ez alapvetően két tényezőnek köszönhető: egyfelől látványosan kibővült a reaktor körüli infrastruktúra, a laboratóriumok instrumentális felszereltsége, jelentősen felfejlődött a hazai neutronkutatói közösség, és a BKR bizonyította a hosszútávon is mérhető megbízható üzemelési gyakorlatot; másfelől viszont felerősödött az a tendencia, ami a neutronforrások koncentrációja irányába mutat, más szóval számos reaktor bezárásához vezetett. E két szempont mellett fontos kiemelni azt is, hogy a BKR bázisán kialakított felhasználói rendszer, ennek szervezettsége igen kedvezően pozicionálja a reaktort, illetve a neutronkutatásokra létrehozott Budapesti Neutron Centrumot (BNC). Mint a legnagyobb hazai *kutatási infrastruktúra*, a BNC jelenlegi kísérleti állomásainak együttese 15 nagyberendezést számlál. Ezzel a berendezéssparkkal, illetve hidegneutron-forrással (HNF), neutronvezető rendszerrel felszerelt, felhasználói rendszerben működő reaktor-centrumok sorában a BNC az európai „top-5”-ös és világviszonylatban a „top-10”-es listán szerepel.

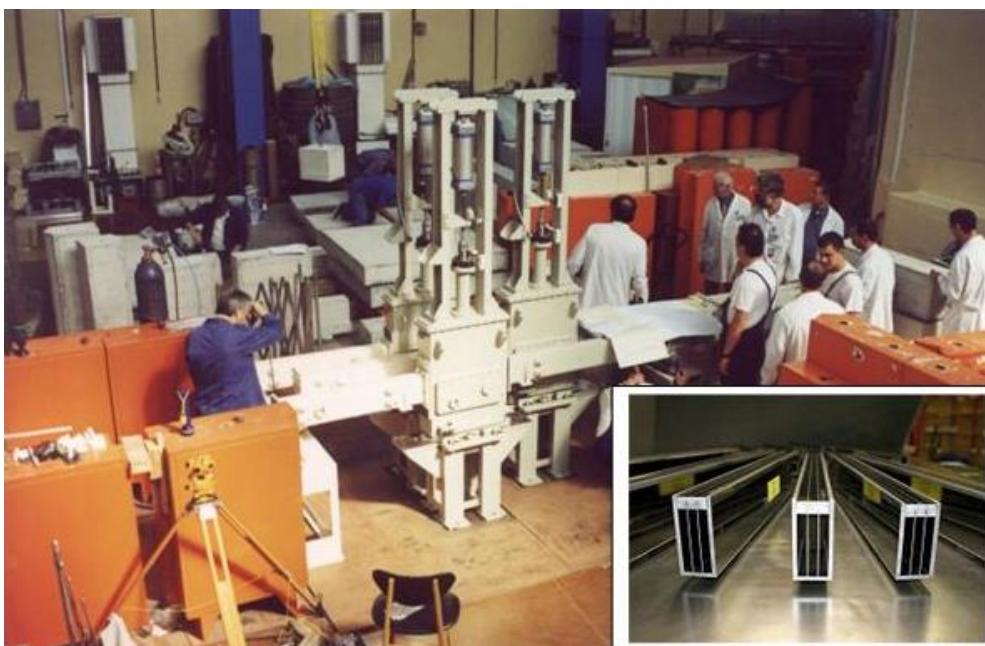
Az alábbi táblázat a felhasználói üzemmódban működtetett európai neutronforrások bizonyos pénzügyi mutatóit tartalmazza. A működési költség adatok a neutronforrások éves működési költségei, beleértve az üzemanyag-költségeket, továbbá a neutron mérőállomások költségeit. Az utolsó oszlop adatai az egyes központok által 2016-ban benyújtott H2020 pályázatokban négy évre megpályázott – szokás szerint minden bizonnyal meg is ítélt – támogatások. Amint látható, a BKR pályázata a költségekhez képest a legnagyobb. A BKR mindig elnyerte az EU által 1999 óta kiírt kutatási infrastruktúra pályázatokon a támogatást, és az első pályázathoz képest (300 k€) több mint kétszeresére sikerült növelnie a részesedését.

Neutronforrás	Működési költség (M€)	EU pályázat (k€)
FRM II (München)	48	2105
ILL (Grenoble)	82	517
ISIS (Oxford)	43	1407

SINQ (Zürich)	42	1068
BER II (Berlin)	34	615
LLB (Paris-Saclay)	18	1121
BKR (Budapest)	5	648
RID (Delft)	6	238

A BKR nemzetközi viszonylatban is számottevő fejlődésének főbb állomásai a következők:

- 2000-ben bővült ki a reaktor egy cseppfolyós hidrogén moderátorral (hidegneutron-forrással), mely egy optimalizált szupertükrös neutronvezető rendszert és az ezeken üzemelő spektrométereket látja el a hidegneutronok spektrális tartományába eső nyalábokkal. Ez a beruházás 30-80-szoros faktorial emelte az egyes berendezések neutron intenzitását, melyek így a nemzetközi élvonalban is versenyképesé váltak, azaz paramétereik megegyeznek vagy hasonlóak a más neutronforrásoknál üzemelő spektrométerekéhez, ezáltal vonzó váltak a hazai és külföldi kutatói közösségek részére. Ennek folyamatosan növekvő érvényesülése pl. jól lemérhető a sikeres pályázati szerepléseken, ill. az elnyert pályázati források növekvő tendenciáján (pl. a 2014-15-ben beadott 5 db H2020 pályázatból 3 nyert).
- A BNC berendezésparkja folyamatosan bővült, az elmúlt 15 évben hat új spektrométert helyeztünk üzembe, valamint több más berendezésen jelentős bővítésre/modernizációra került sor. Két spektrométer esetében világviszonylatban is elsőként demonstrált módszerek alkalmazására került sor: i) a TOF-ND diffraktométer rácsparaméter felbontása a legjobbak között van a világon – köszönhetően az újszerű hátraszórási geometriának és az impulzus multiplikációs eljárásnak; ii) a NIPS-NORMA volt az első neutron tomográfiai képalkotást aktivációs analízissel kombináló berendezés. Ezeket azóta több hasonló berendezés követte külföldi neutronforrásoknál.



A hidegneutron-forrás beépítése a reaktor 10-es számú vízszintes csatornájába. A kis képbetét a neutronok kivezetésére szolgáló nagy sugárállóságú üvegből készült, neutronokat nagy

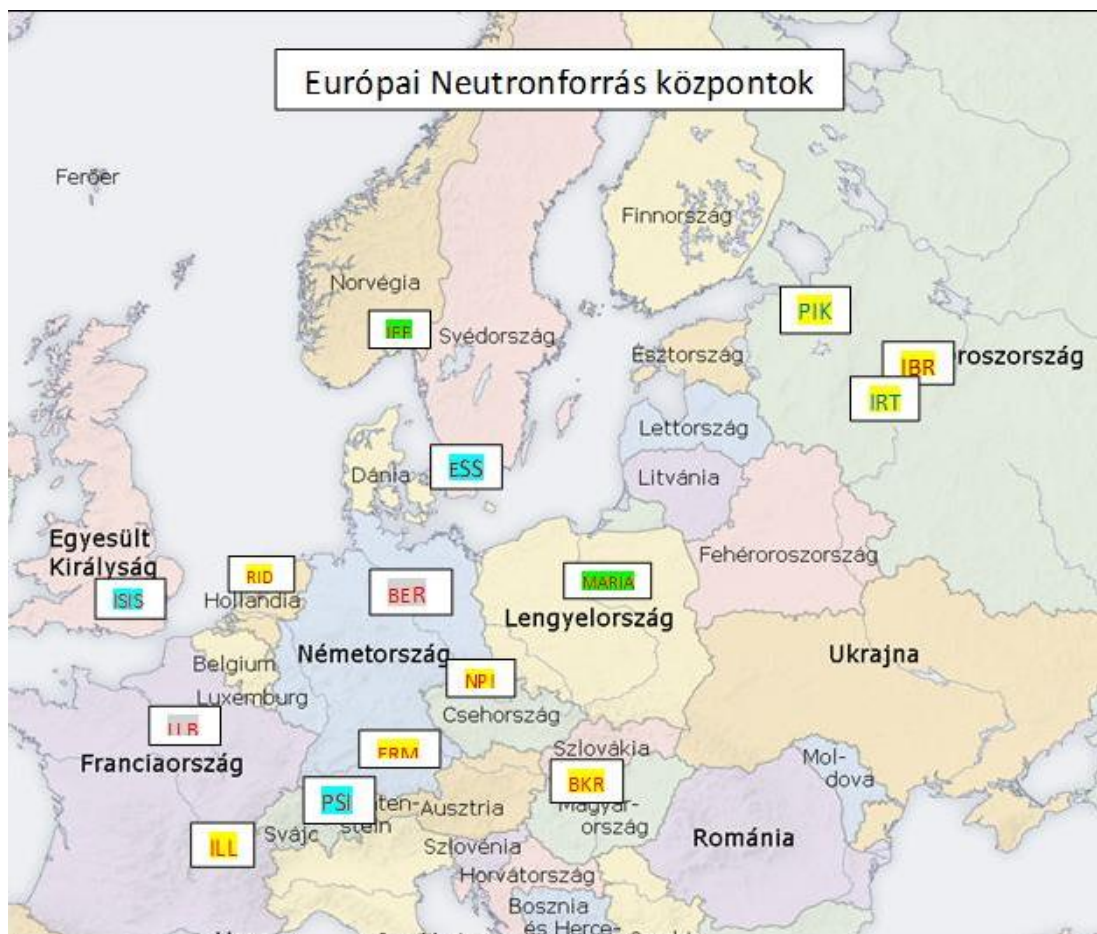
hatásfokkal reflektáló szupertükör neutron-vezetőket mutatja. A nagy képen látható három függőleges pneumatikus nyalábzár itt kidolgozott megoldása azóta nemzetközi szinten elterjedt.

- A metodikai és instrumentációs fejlesztések nagymértékben járultak hozzá ahhoz, hogy kialakuljon a BNC nemzetközileg is versenyképes spektrométer együttese. Több berendezés is az itt kifejlesztett két-dimenziós detektorokkal került felszerelésre – ezzel a BNC messze megelőzte a hasonló külföldi laboratóriumokat.
- A Budapesti Kutatóreaktor húsz évvel ezelőtti nemzetközileg nyitott központtá szervezésének köszönhetően jelentősen kibővült a hazai és nemzetközi felhasználói kör. Ma Magyarországon közel 200 kutatót tartunk nyilván, akik a BNC-t rendszeresen használják; az érintett hazai kutatóhelyek száma 35-40, ennek mintegy a fele akadémiai intézmény. Ezzel Magyarország második az európai rangsorban a kutatói létszám tekintetében a lakossági lélekszámra és/vagy a GDP-re súlyozott arányban. A nemzetközileg nyitott felhasználói-szolgáltatói rendszer, az átlátható stratégiát és működést szolgáló Nemzetközi Tudományos Tanács, a kísérleti javaslatokat értékelő nemzetközi Panel és a felhasználói iroda – mind az európai elvárásoknak messzemenően eleget tevő kritériumok, illetve gyakorlat.
- A reaktor multidiszciplináris használata során a területen kiváló és szcientometriailag jól mérhető tudományos eredmények születtek (a BNC publikációs tevékenységének adatai az 1.1.2. fejezetben szereplő táblázatban találhatóak). Az Európai Unió KI programjaihoz csatlakozva jelentős elismertséget, kiemelkedő *nemzetközi pályázati* eredményességet ért el, így az EU 2014-ben indult Horizon 2020 programjában eddig több mint 700 millió forintnyi támogatást sikerült elnyerni.
- A reaktor rekonstrukciója óta (1992) egyfelől kiépült egy jelentős neutronkutatói infrastruktúra és 15 mérőállomást tartalmazó berendezés-együttes. A beruházás és infrastruktúra fejlesztések szinte kivétel nélkül mind egyedi tervezés és kivitelezés alapján valósultak meg hazai vállalkozások részvételével. Másfelől az innovatív fejlesztések és a technológiai transzfer eredményeként a spin-off vállalkozásokból kifejlődött egy high-tech ipari kör, melynek az éves *exportbevétele* mára megközelíti az egymilliárd forintot. A 3.1.2 fejezetben bemutatjuk a legjelentősebb cégeket, amelyek nem jöttek volna létre, nem vagy kevésbé versenyképesen tudnának működni a reaktor nélkül. Természetesen a vállalkozások bevételeinek csak kis része csapódik le a reaktornál, hiszen a vállalkozások bér- és anyagköltségei, továbbá adóbefizetései igen jelentősek, amint azt a 3.1.2 fejezetben részletesen bemutatjuk. Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy az innovációs lánc élén a reaktor (és kutatóintézeti infrastruktúrája) áll. Az itteni metodikai fejlesztési ötletek, prototípusok, minőségileg kiérlelt eszközök kerültek fel a vállalkozások terméklistájára. Erre az innovációs folyamatra a legjellemzőbb példa az elmúlt 10 évben elnyert számos K+F pályázat (NAP, JAP, KMOP, KMR), melyek tipikusan a BNC intézeteiből és a vonatkozó vállalatokból (ANTE, HNF-Technologies, MIRRORTRON, OPEN, RegTron) álló konzorciumként hajtottak végre projekteket, és ezek eredményeként számos innovatív/versenyképes eszköz került a nemzetközi piacra.

Magyarország, illetve a BKR szerepét a világban működő kutatóreaktorok és nyaláb kutatásokra alkalmas neutronforrások területén a következők szerint értékelhetjük. A NAÜ és más nemzetközi szervezetek adatai szerint ma a világban mintegy 250 kutatási és/vagy oktatási célú reaktor, valamint gyorsító bázisú neutronforrás létezik. Ezek közül az évi 100 napot meghaladó üzemidejű, hidegneutron forrással és neutronvezető rendszerrel felszerelt, legalább 10 spektrométert üzemeltető és felhasználói rendszerben működő neutronforrás-centrumok száma a világon 18 (13 reaktor és 5 spallációs forrás), Európában pedig 7 (5 reaktor és 2 spallációs forrás). A BKR/BNC ebbe a kategóriába tartozik. A BKR nem éri el a csúcsberendezésnek paramétereit, hanem az ún. közepes fluxusú és felszereltségű laboratóriumok sorába tartozik.

A legtöbb felhasználó számára elérhető neutronforrás (szám szerint 17) az Európai Unió és Oroszország területén található, amint azt az alábbi térkép mutatja. Számos régebbi reaktort bezárnak, viszont csak kevés új, ugyanakkor nagyteljesítményű forrást építenek.

A budapesti reaktor relatív felértékelődéséhez az is hozzájárul, hogy megfeneklettek azok az erőfeszítések, amelyek a tőlünk keletre vagy délre lévő reaktorok életben tartására irányultak, így nincs kilátás a romániai, a bolgár, szerb, ukrán, lett, görög reaktorok jövőbeni működtetésére. Az utóbbi 20 évben csak egy új reaktor épült, a müncheni FRM-II, illetve épül a PIK (Gatchina, Oroszország) és az ESS (Lund, Svédország), amelyek mind extrém nagy fluxusú és nagyszámú berendezést ellátó neutronforrások. Hamarosan beindul a Jules Horowitz Reactor (Franciaország), de ennek célja az anyagvizsgálat, neutron-nyaláb kísérleteket itt nem terveznek.



Európa neutronforrás térképe. Reaktorok felhasználói üzemmódban: ILL (Grenoble), FRM II (München), BRR (Budapest), NPI (Prága-Rzez), RID (Delft), IBR-2 (Dubna); Bezárásra kerül 2019-ben: BER II (Berlin) és LLB (Párizs-Saclay). Épül, ill. modernizálás alatt (indítás 2018-19): PIK (Szentpétervár), IRT Moszkva. Működő spallációs források: ISIS és PSI. Reaktorok kis teljesítménnyel, ill. felhasználói program nélkül: IFE (Oslo), MARIA (Varsó). Lényegileg üzemen kívüli, vagy bezárásra ítélt kis reaktorok: Demokritos Greece, JRC Netherlands, RPI Portugal, TRIGA Mainz, TRIGA, Slovenia, TRIGA Vienna.

Az Európai Neutronkutatói Egyesület (ENSA) 2015-ben készült részletes stratégiai tanulmánya egyrészt bemutatja, hogy a neutronnyalábokkal végzett anyagkutatások nagymértékű fejlődése vetíthető előre a következő 20 évre. A magas színvonalú kísérleti lehetőségekre már most kb. kétszer annyi igény van a tudományos/ipari felhasználás részéről, mint amekkora kapacitás rendelkezésre áll. A mérésidő hozzáférés tehát kompetitív alapú, ami garantálja a kiváló tudományos színvonalat és gazdasági hatékonyságot. A neutronszórás egyre nagyobb teret kap a leggyorsabban fejlődő kutatási ágazatokban a *hidrogén, ill. a mágneses szerkezetek* megfigyelhetősége, valamint a neutronok *roncsolásmentes vizsgálati* képessége miatt. Így a rendkívül fontos biológiai, biotechnológiai kutatásokban (egészségtudományok, élelmiszerbiztonság) vagy energetikában (új nukleáris energiaforrások anyagai, üzemanyag-cellák, fotoszintézis), illetve az anyagtudományok, infótechnológia területén kap fontos szerepet. Másfelől, a fent bemutatott bezárásoknak, illetve a nagyfluxusú forrásokhoz való koncentrálásnak a tendenciája hatására a nyalábidó-kapacitás a 2020-as évek közepére kevesebb mint a felére fog csökkenni. Ez azt jelenti, hogy a neutronkutatói kísérleti igények kielégítetlensége drasztikusan meg fog nőni. Továbbá egyre kevesebb lehetőség nyílik majd oktatási, felkészülési, előkísérleti, kockázatosabb, különleges előkészületeket igénylő stb. kísérletek elvégzésére. Az ilyen típusú tevékenység hagyományosan a kisebb/nemzeti berendezéseknél folyik, tehát ilyen szempontból különösen nagy figyelem fog irányulni a kisebb és közepes reaktorok életben tartására, esetleg kisebb új neutronforrások építésére.

Az európai (nemzetközi) neutronkutatói együttműködési rendszerben a BKR tekintélyes szerephez jutott. A hagyományosan kiváló kapcsolatok az oroszországi intézményekkel a rendszerváltás óta is igen aktívak, gyümölcsözőek. A neutronkutatásokban az orosz intézmények az utóbbi 5 évben jelentős új lendületet kaptak. Ezekkel az intézményekkel szoros kapcsolatot tartunk mind tudományos kutatási témákban, mind az ottani berendezés-fejlesztési program megvalósításában.

Az EU-n belül valamennyi pályázati alapú és szervezeti működésű intézményben, kezdeményezésben teljes jogú tagként/szereplőként veszünk részt, teljes körűen beépültünk a nyugat-európai kapcsolati rendszerbe. A földrajzi közelségnek köszönhetően kiváló a BKR kapcsolata a bécsi székhelyű NAÜ-vel. Nukleáris technikai, anyagtudományi, kulturális örökség kutatási stb. témákban folyamatosan részesei vagyunk a NAÜ „technikai programjainak”. A BKR gyakori résztvevője, helyszíne NAÜ rendezvényeknek (oktatási, speciális műhely találkozónak stb.).

Érdemes megemlíteni, hogy Európán kívül, főleg a fejlődő régiókban (pl. Argentína, Brazília, Peru, Törökország, India, Kína, Vietnám, Indonézia) az elmúlt öt évben robbanásszerű fejlődés tapasztalható, ami a kutatóreaktorok új generációjának építésével és az ezzel kapcsolatos kutatások, neutronnyaláb-kísérletek egyre nyilvánvalóbb társadalmi hasznosságára utal. Ez a tendencia a Fukushima-ban történt szerencsétlenség óta sem tört meg, sőt a technológiai és a biztonsági kultúra fejlesztése ezekben az országokban egyre nagyobb jelentőséget kap.

2.2. Oktatóreaktor

A BME Oktatóreaktora – mint berendezés és mint intézmény – az 1960-as években hozott kormányzati döntés alapján elsősorban a hazai nukleáris energetikai program (a paksi atomerőmű felépítése és üzemeltetése) szakemberigényének kielégítése érdekében létesült. Az intézmény oktatási tevékenysége azonban a kezdetektől fogva kiterjedt nemzetközi szintre is. Már a hetvenes években rendszeresen érkeztek külföldi (köztük algériai, cseh, kubai, orosz, szlovák) hallgatói csoportok hosszabb-rövidebb képzésre, és több nemzetközi kurzusra is sor került az intézményben a NAÜ szervezésében. A közelmúlt külföldi oktatási kapcsolatait tanulmányunk 1.2.2. fejezete részletezi. Az alábbiakban azt tekintjük át, hogy az Oktatóreaktor – műszaki adottságai, oktatási volumene és tapasztalatai alapján – milyen helyet foglal el a hasonló profilú európai és regionális képzési helyek között.

Áttekintésünk egyrészt a külföldi partnerekkel jelenleg is fennálló kapcsolatokból származó információkon, másrészt az európai nukleáris oktatás összehangolására egy évtizede létrehozott European Nuclear Educational Network-ből (ENEN) hozzáférhető adatokon, harmadrészt az európai Sustainable Nuclear Energy Technology Platform-nak (SNETP) egy, a témához kapcsolódó 2010. évi tanulmányán alapul.

A nukleáris energia hasznosításának kezdeti időszakában (az 1950-es és 1960-as években) Európában a kutatási, kísérleti és demonstrációs eszközökhöz való hozzáférés arányaiban kedvezőbb volt, mint manapság. A kutatóreaktorok és egyéb kísérleti berendezések relatív bősége abban az időben számos innovatív eredmény elérését segítette elő. Azonban a nukleáris energia hasznosításának az 1990-es években tapasztalt stagnálása és a nukleáris kutatások költségvetésének visszavágása sok európai kutató- és októatóreaktor bezárásához vezetett. Némelyek közülük csak „konzervált” állapotban vannak és megfelelő műszaki átalakításokkal újból üzemképesé tehetőek, de a leállított reaktorok közül többet véglegesen szétszedtek, leszereltek. A ma üzemelő reaktorok többsége a fentiek miatt meglehetősen öreg, többségüket – ha felújításukra nem kerül sor – még 2020 előtt véglegesen le kell állítani.

Ugyanakkor a fent említett SNETP-tanulmány azért született, mert a szervezet az EU Tanácsával összhangban 2008-ban úgy ítélte meg, hogy

- az oktatás és a gyakorlati képzés kulcsfontosságú a nukleáris energetika és ipar fenntarthatósága és a létesítmények biztonsága szempontjából,
- és habár ez a megállapítás korábban is helytálló volt, még inkább érvényes napjainkban, amikor

- a meglévő atomerőművek jelentős hányadának élettartam-hosszabbítása, a véglegesen leállított létesítmények lebontása és a keletkező hulladék elhelyezése, a nukleáris ipar világméretű bővülése,
- továbbá a szakképzett és tapasztalt munkaerő nagy részének közeli inaktívvá válása folytán jelentkező szakemberhiány komoly korlátozó tényezővé válhat.

A fenti körülményeket Európában és másutt is már a 1990-es években felismerték, és ennek következtében világszerte jelentős erőfeszítéseket tettek a helyzet orvoslására. Ezek közé sorolhatjuk az akadémiai és felsőoktatási kutatások stabilizálására, a nemzeti és nemzetközi együttműködések új formáinak kialakítására, az oktatási programok minőségének javítására, és a nukleáris mérnöki pálya vonzóbbá tételére tett különféle kísérleteket és intézkedéseket. A fentiek szellemében az SNETP 2008-ban külön munkacsoportot hozott létre az európai nukleáris oktatási és kutatási infrastruktúra felmérésére. Ennek eredménye a szóban forgó tanulmány.

Az SNETP felmérése szerint 2010-ben Európában 53 kutatóreaktor¹ üzemelt, amelyeknek közelítőleg a felénél, szám szerint 25 reaktornál folyt BSc és MSc szintű képzés. A 25 reaktor közül csak néhány volt olyan, amelyet kifejezetten oktatási céllal használtak. Ha elfogadjuk, hogy a didaktikailag is megalapozott oktatáshoz legalább évi 120 óra időkeretre van szükség, és ebből a szempontból is megvizsgáljuk a fenti 25 reaktort, akkor mindössze 7 olyat találunk, amely kielégíti ezt a kritériumot. A 7 reaktor a következő: ISIS (Franciaország, Saclay), AKR-2 (Németország, Drezda), SUR-Ulm (Németország, Ulm), CROCUS (Svájc, Lausanne), TRIGA II (Ausztria, Bécs), VR1 (Csehország, Prága), és az Oktatóreaktor (Magyarország, Budapest). Látható tehát, hogy az Oktatóreaktor az európai nukleáris képzés „elitklubjába” tartozik.

Ha tovább vizsgáljuk a felmérés számadatait, akkor kiderül, hogy az oktatott órák számát tekintve az Oktatóreaktor vezeti az európai rangsort, közelítőleg évi 600 oktató-órával². Itt érdemes felhívni a figyelmet arra, hogy ez az adat csak a reaktornál folytatott laborgyakorlatokat foglalja magában, a BME NTI elméleti oktatása ennél jóval nagyobb időkeretben zajlik. Továbbá az elmúlt években a laborgyakorlatok oktató-óraszámára – éppen a külföldiek képzésének bővülése következtében – drasztikusan megemelkedett, majdnem 100%-kal.

Az európai rangsor második helyén a Prágai Műszaki Egyetem VR1 (Vrabc-1) reaktora található, közelítőleg 450 oktató-órával. A harmadik a francia ISIS reaktor (300 oktató-óra), ezt

¹ Beleértve az oktatásra használt reaktorokat és a kritikus rendszereket is.

² A hallgató-órák száma ennek kb. a három-négyszerese, tekintettel a reaktornál tartott laborgyakorlatokon résztvevő hallgatói csoportok tipikusan 3-4 fős létszámára. További fontos fogalom még a reaktornál évente megforduló különböző hallgatók (oktatott „személyek száma”) száma, és az évente a reaktorépületbe történő „belépések száma”. Ha egy hallgató többször is visszatér különböző laborgyakorlatokra, az a személyek számát nem növeli, de a belépések számát igen. Az évente laborgyakorlatokon oktatott személyek száma jóval meghaladja a 100 főt.

követi a Bécsi Műszaki Egyetem TRIGA-II reaktora (közelítőleg 200 oktató-órával, amelyek zömében a bécsi székhelyű Nemzetközi Atomenergia Ügynökség kurzusait szolgálják ki). Meglepő tény, hogy a rangsor első négy helyezettje közül három a közép-európai térségben található³. Ahogy arra már utaltunk, az Oktatóreaktor sokféle együttműködés fűzi a prágai és a bécsi intézményhez.

Annak magyarázataként, hogy az Oktatóreaktor a laboratóriumi gyakorlatok óraszámát tekintve miért kerülhetett az európai rangsor élére, két tényezőt is ki lehet emelni: egyrészt a már említett, optimálisan választott reaktorteljesítményt, másrészt azt, hogy a reaktor műszaki adottságai és a reaktorépület méretei lehetővé teszik az időben párhuzamosan zajló gyakorlatokat is.

Az Oktatóreaktor iránt megnyilvánuló nemzetközi érdeklődés tehát érthető, jelenleg kevés intézmény képes hasonló volumenű és spektrumú nukleáris oktatás és gyakorlati képzés nyújtására. Ezt a potenciált elsősorban természetesen a hazai igények, azaz a paksi atomerőmű kapacitás-fenntartáshoz szükséges szakemberképzés és utánpótlás érdekében kell megőrizni, de üzleti, tudománypolitikai és stratégiai érdekek fűződnek az egyre bővülő nemzetközi oktatási igények kielégítéséhez is.

3. A reaktorok működtetésének jövőbeni alkalmazási lehetőségei

3.1. A BKR működtetésének jövőbeni alkalmazási lehetőségei

3.1.1. Az új paksi blokkokkal kapcsolatos kutatások

A Budapesti Kutatóreaktor mindig jelentős szerepet játszott a hazai atomerőmű-programban. Korábban itt történtek a paksi erőmű négy reaktortartálya élettartam-tervezéséhez szükséges besugárzások. Mint fentebb már említettük, ez azért volt fontos, mert a kutatóreaktorban elérhető maximális neutron-fluxus mintegy tízszerese a reaktortartályt üzem közben érő fluxusnak és ezért időben lehet eredményeket kapni, amelyek alapján az üzemvitel a kívánatos élettartamnak megfelelően módosítható. Hasonló lesz a helyzet az új blokkok esetében is, tehát a reaktortartályok anyagából vett minták besugárzása fontos lesz az új paksi blokkok szempontjából. Ezen vizsgálatok elvégzésére a Budapesti Kutatóreaktor lesz az egyetlen hazai lehetőség, feltéve, hogy abban az időben még üzemelni fog. Hasonló vizsgálatokat elvileg külföldön is el lehet végezteni, de ennek ára és bonyolultsága ellehetetlenítheti a vizsgálatokat.

Az atomerőművekben alkalmazott szerkezetek sugárállóságának vizsgálata alapvető fontosságú, hiszen a jelentős neutron-fluxusnak kitett szerkezetek stabilitását az üzemidő végéig biztosítani kell. Újabban merült fel, hogy a betonszerkezetek sugárállóságát is vizsgálni

³ Egy további szomszédos fővárosban, Ljubljanában is folyik nukleáris oktatás. A „Jožef Stefan” Institute TRIGA típusú reaktoránál tartott laborgyakorlatok óraszámja azonban nem éri el az évi 120 órát.

kell. Az atomerőművi reaktortartályok körüli sugárvédelmi betonszerkezetek ugyanis az erőműbe beépített többi betontól eltérően erős neutron- és gamma-sugárzásnak, valamint a szokásosnál magasabb hőmérsékletnek vannak kitéve. A paksi atomerőmű jelenleg üzemelő blokkjainak üzemidő-hosszabbítási programja során komoly gondot jelentett, hogy nem álltak rendelkezésre a reaktor körüli 35-40 éve megvalósult betonszerkezetekre vonatkozó, kellő mélységű építési dokumentumok, a szerkezetekből nem lehetett mintát venni, így a betonok sugárzás indukálta öregedésére vonatkozóan csak szakirodalmi adatokra és mérnöki modellekre támaszkodva lehetett következtetéseket levonni. Az új blokkok vonatkozásában a fenti probléma már elkerülhető lesz. Az erőmű főkonstruktőre által rendelkezésre bocsájtott eddigi adatok szerint a felépítendő blokkok tervezési élettartama 60 év. Az eddig üzemelő atomerőműveken szerzett tapasztalatok azt mutatják, hogy kellően gondos üzemeltetés és a megfelelő biztonsági háttérismeretek/háttértudás mellett a létesítendő blokkok elvileg akár 80-100 évig is üzemben tarthatók lesznek. Az új atomerőműi blokkok építése során az erőmű betonszerkezeteit feltehetőleg hazai alapanyagokból készítik majd. Ennek érdekében fel kell készülni a sugárálló és kedvező öregedési jellemzőkkel bíró betonok receptúráinak ellenőrzésére, melynek egyik kulcsa, hogy a szóba jöhető betonfélésegekből készült minták megfelelő besugárzásos és hőmérsékleti öregítésére sor kerüljön. Ilyen vizsgálatokra a Budapesti Kutatóreaktor a fent említett nagy neutron-fluxusa révén alkalmas. Ilyen vizsgálatok még nem folytak, ám előzetes vizsgálataink alapján a vizsgálatok elvégzésének a Budapesti Kutatóreaktornál műszaki akadályja nincs, a besugárzó-helyek könnyen kialakíthatóak.

Teljesen új alkalmazási lehetőség merült fel az ALLEGRO projekt kapcsán. Ennek a visegrádi országok nukleáris kutatóintézetei által folytatott projektnek célja egy 4. generációs gázhűtésű gyorsreaktor technológia működőképességének demonstrálása. A projekt egyik leglényegesebb feladata új típusú kerámiaburkolatú fűtőelemek kifejlesztése. Bár maga az ALLEGRO reaktor feltehetőleg Szlovákiában fog megépülni, a fűtőelemek kifejlesztése magyar koordinációban történne. A fűtőelemek kipróbálása, minősítésének megszerzése az alapvető feladat, mert minősítés nélkül az új típusú fűtőelemek reaktorban való rendszeres használata nem engedélyezhető. A hosszú minősítési program kulcseleme egy Pakson létesítendő Fűtőelem Laboratórium. Ennek feladata az ALLEGRO fűtőelemek minősítésében való részvételen túl az új paksi blokkok fűtőelemeinek vizsgálata is. A kísérleti ALLEGRO fűtőelemek, illetve az ezekből készítendő minták besugárzására a BKR kiválóan alkalmassá tehető. Ha a Fűtőelem Laboratórium megvalósul, akkor a meghosszabbított üzemidejű kutatóreaktor egyik legfontosabb feladata lehet az ALLEGRO fűtőelem-minták besugárzása, amihez persze megfelelő besugárzó-helyet kell majd kiépíteni.

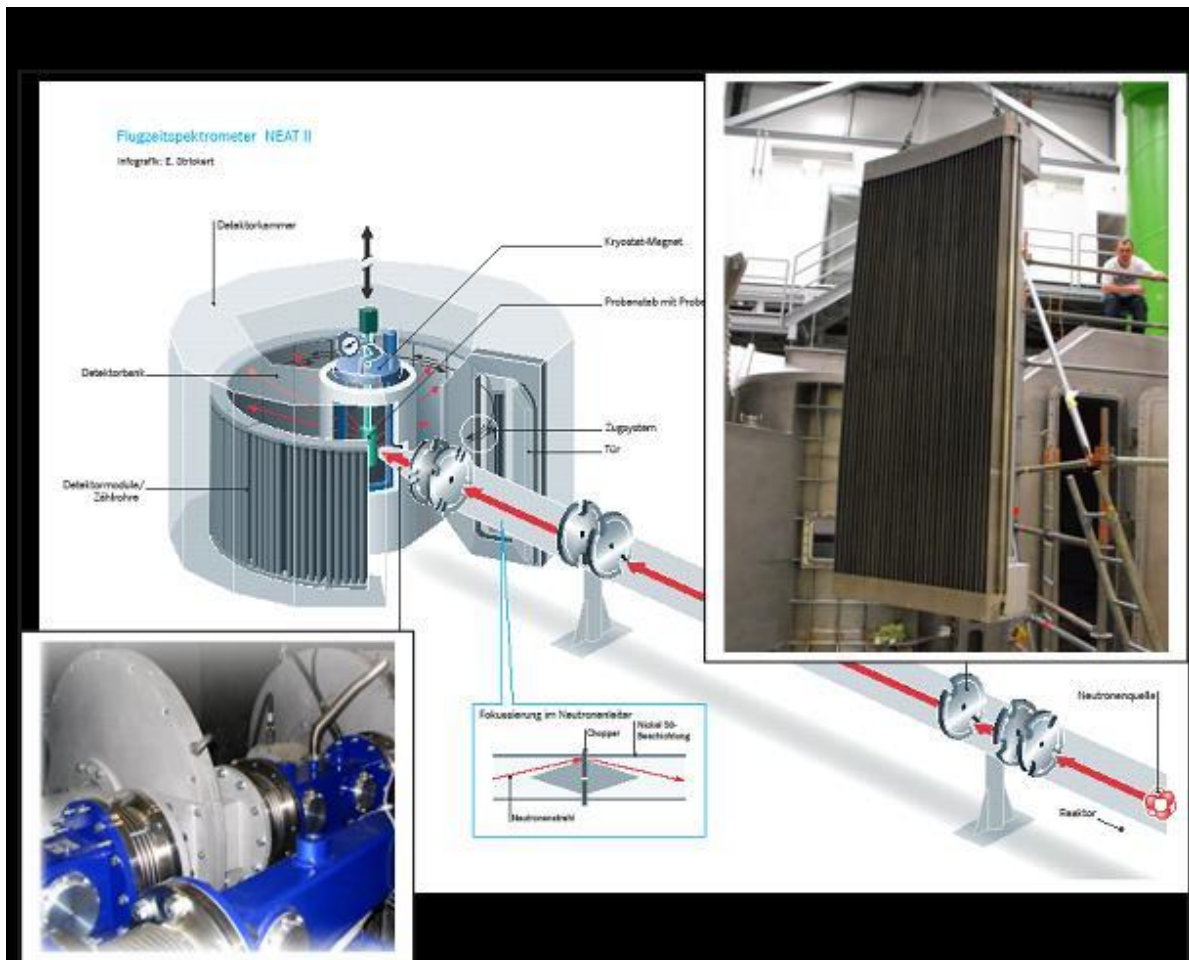
3.1.2. A BKR lehetőségei más neutronkutató központokhoz való beszállítás előkészítésében

A Budapesti Kutatóreaktornál 1992 óta egyfelől jelentős neutronkutató infrastruktúra és 15 mérőállomást tartalmazó berendezés-együttes épült ki. A beruházás és az infrastruktúra-fejlesztések szinte kivétel nélkül mind egyedi tervezés és kivitelezés alapján valósultak meg hazai vállalkozások részvételével. A szériagyártású kereskedelmi komponenseket leszámítva a

beruházási érték mintegy 90 %-a magyarországi beszállítások révén realizálódott, vagyis összértékben a beszerzés/kivitelezés 70-80 %-ban hazai terméknek tekinthető. A megvalósításban közvetlenül szerződött vállalkozások száma – a gépészet, elektronika, számítástechnika, finommechanika, vákuumtechnika, optika stb. területén – az elmúlt 10 évben kb. 20-25. (A későbbiekben bemutatunk egy vállalati listát, mely jelentős átfedésben van az itt említettekkel.)

A BKR kutatási/technológiai bázisán kifejlődött és stabilan működik egy specializált neutronkutatási műszergyártó kapacitás, mely jelentős export árbevételt produkál. Ezek a spin-off cégek többnyire a KFKI telephelyen működnek, a BKR-t fejlesztő és minőségellenőrző bázisként napi szinten használják. Ezeknek a cégeknek az elmúlt 10 évi árbevételi eredménye, amelyben az összforgalom minimum 90 %-át a neutron műszerexport képezi, meghaladja **a 10 milliárd forintot**.

Röviden bemutatjuk azt a három kisvállalkozást, amely közvetlenül, saját termékeit forgalmazza és az éves exportja a több száz millió Ft nagyságrendbe esik: Az ANTE Kft. neutron-komponensek, illetve spektrométerek elektronikus vezérlésére, detektorrendszerek szállítására szakosodott. Az ANTE a kínai neutronforrások több berendezésének, vagy a norvég reaktor egyik diffraktométerének nagy detektora elektronikáját szállította a BKR berendezésén fejlesztett, kipróbált technológia alapján.



A berlini reaktor legmodernebb berendezésének (NEAT II) két fő komponensét magyar vállalatok szállították: a baloldali kis kép a MIRRORTRON Kft. által gyártott nyalábszaggatót, a jobboldali kép pedig az ANTE Kft. által szállított nagy csődetektor blokk helyszíni beemelését mutatja.

A MIRRORTRON Kft. fő profilját a hazai felfedezésen és technológiai fejlesztésen alapuló ún. szupertükrös neutronvezetők gyártása képezi, amelyet egy korábbi ábrán már bemutatunk. Monokromátorok (lásd az alábbi ábrán), polarizáló eszközök, detektorok, sugárvédelmi komponensek is a gyártási palettáján vannak – sőt ezek összeépítésével komplett neutronspektrométerek „kulcsrakész” szállítására is sor került. A MIRRORTRON termékei a világ szinte minden jelentős neutronkutató laboratóriumában (Ausztráliától Kínán, Japánon, Indián, Amerikán át természetesen az európai centrumokig) megtalálhatók. Legnagyobb tételként az ausztrál OPAL és a pekingi CARR reaktor komplett neutronvezető rendszerét, továbbá a kínai spallációs forrás (CSNS), a japán J-PARC, az angol ISIS, az Oak Ridge-i reaktor és spallációs forrás neutronvezetőit és több nyalábszaggató-rendszerét gyártotta és szállította le.

Mechanikus neutron sebesség szelektorok fejlesztése és gyártása



Soktárcsás szelektor – első fejlesztés a csillebérci reaktornál 1985



Gyártás, termékfejlesztés:
MIRRORTRON Kft. (1992-től)

A termékfejlesztett eszköz (középen és jobbra lent) értékesítése Franciaországban, Hollandiában, Németországban USA-ban, Japánban stb.

Új fejlesztés: 1999-2002.
Tárcsás megoldást felváltó lamella-kerekes változat



K+F+I projekt
MTA SZFKI – RegTron Kft - MIRRORTRON Kft. Konzorcium

Új értékesítések (2011-15):
India, Kína, Norvégia



A Budapesti Kutatóreaktor spektrométerei számára kifejlesztett mechanikus monokromátor termékfejlesztésének és értékesítésének fejlődése. Az első példányok egyike még mindig üzemel a BNC kisszögű szórásvizsgáló berendezésében; az újonnan értékesített eszközök bemérése, minőségbiztosítása továbbra is a BKR-nél történik.

A magyar-orosz vegyesvállalként működő HNF-Technologies Kft. ún. kriogén neutronmoderátorok fejlesztésére és szállítására specializálódott. A HNF-Technologies gyártotta a kínai CARR és az ausztrál OPAL reaktorok hidegneutron-forrását (lásd az alábbi ábrákat).

A bemutatott cégeknél a high-tech (minőség és technológia szempontjából kritikus) komponensek gyártására jelentős „házon belüli” gyártókapacitás épült ki, míg a hazai beszállítói kör a részegységek, szolgáltatások tekintetében igen széleskörű. Az elmúlt 10 évben az alvállalkozásban foglalkoztatott cégek száma elérte a 120-at. Ezek zömében kisvállalkozások, de van közöttük jelentős multinacionális nagyvállalat is, mint a General



Baloldalon a HNF-Technologies Kft. által tervezett és kivitelezett hidegmoderátor behelyezése látható az ausztráliai OPAL reaktorba. A jobboldali kép a pekingi 60 MW teljesítményű CARR kutatóreaktor hidegneutron forrásának hidrogén és hélium ellátó rendszerét mutatja az alvállalkozó Patent Kft. ceglédi telephelyén, ahol a HNF-Technologies Kft. a szállítás előtti üzemi próbákat végezte.

Electric (pl. nagyméretű vákuumtartó tartályok) vagy a National Instruments (elektronikus modulok), illetve egyszemélyes egyéni vállalkozás is (pl. precíziós csomagolás). Az alábbi táblázat mutatja annak a 30 beszállítónak a listáját, amelyek rendszeres, nagyobb volumenű szerződésekben voltak a MIRROTRON partnerei.

Cég név	Cím/Kontakt	Profil
Anco-coop kft.	Szigethalom, Hunya I.	Forgácsolás
ARBO Kanizsa kft	8800 Nagykanizsa, Király u1.	Alumínium szerkezetek öntése
Bákány művek kft	Tatabánya Búzavirág 8.	forgácsoló munkák (megmunkálóközponttal)
Baán Bt	+36 20 919 0405	Csomagolás, ládázás, konténerezés
Dkg-East Rt	8800 Nagykanizsa Vár u.9	Alumín. öntés, gumisütés, kovácsolás, hőkezelés
Femat Hungária kft	8778 Csesztreg, Ady E. 49.	Homok-, szemcseszórás, plazmavágás, lakatos
Fémex kft	Környe, Tópart u.1.	szerszám és alkatrészgyártó, forgácsoló
Fogaskerékgár Kft.	Tatabánya Búzavirág u.8.	fémmegmunkálás
Ganz Transelektro	6100 Kiskunfélegyháza	detector vessel
GE Hungary ZRt	Budapest, Fóti út 78.	Vákuumtechnikai alkatrészgyártás, szerelés
HTM Kft.	Székesfehérvár, Széch.út. 88	Szikraforgácsolás, megmunkálóközp. hegesztés
Inopress kft	Bp. Béke u.69.	felületkezelés
KVV Rt.	Siófok, Bajcsy-Zsilinszki 207	hőkezelés, csőkihúzás, csőanyagok beszerzése
Lasram	Szentendre, Lukács Csaba	Lézervágás
Locomo bt	Bp. Halász András	Huzalelektroda
Móroczi Mechanika kft.	9700 Szombathely, Bethlen u.4.	CNC esztergálás-marás
Oiltech kft	8878 Lovászi, Ipartelep	hegesztés, csőkihúzás
Partner Kft.	Cegléd	Vákuumtechnika, rozsdamentes acél munka
Pemű	Solymár, Soós Csaba	CNC, szerszámgyár
Pintér Művek	6237, Kecel Rákóczi úti ipartelep	Forgácsolás, hegesztés, felületbevonatolás
Qualitative Production	9028, Győr, Rozgonyi u. 46.	Forgácsolás, hegesztés, kovácsolás
RegTron Kft	1121 Bp. Konkoly Thege 29-33	Nukleáris elektronika
Repszer kft	Budaörs, Brüller József	Forgácsolás, hegesztés
Siro-Krom kft	2310 Szigetszentm, Rákóczi 51.	horganyzás, keménykrómozás
RoyalPack	Baán Miklós	Csomagolás, ládázás, konténerezés
Szeli bt	Dunavarsány, Bp. Szűcs Antal	CNC marás
Villtech kft	Nagykanizsa Sugár u.8.	világosmérési berendezések
VT galvano kft	Székesfehérvár, Berényi u.100.	felületkezelés, horganyzás, vegyinikkelés
Woldem kft	Bp. (Budafok), Molnár Máté	vízugaras vágás



A BNC fizikusainak közreműködésével tervezett és a MIRROTRON Kft. által kivitelezett neutron diffraktométer az új kínai (Mianyang/Szecsuan) kutatóreaktornál. A „kulcsra-készen” átadott berendezés minden komponense hazai fejlesztés és gyártás. Az elmúlt 5 évben még három hasonló spektrométert szállított ide a magyar vállalat.

A három Kft. árbevételeit, adózás előtti eredményét és adófizetési kötelezettségét az alábbi táblázat mutatja be a 2010-2014 közti időszakra.

Cégnév	Év	Árbevétel (MFt)	Adózás előtti eredmény (MFt)	Adófizetési kötelezettség (MFt)
MIRROTRON	2010	684	94	15
	2011	636	95	7
	2012	716	196	17
	2013	742	148	12
	2014	669	-27	2
ANTE	2010	57	1	0
	2011	51	-15	0
	2012	69	0	0
	2013	55	16	5
	2014	101	5	5
HNF-Technologies	2010	77	1	0
	2011	85	20	2
	2012	69	12	1
	2013	16	6	1
	2014	18	8	1

A három Kft. közül a MIRROTRON Kft. az, amelyik az általa készített neutronfizikai kutatási eszközök hitelesítésére a Budapesti Kutatóreaktort használja. Ezért évente 20 MFt költségtérítést fizet. A közvetett gazdasági hatás a munkaerő-foglalkoztatáson és az alvállalkozói beszállításokon keresztül érvényesül. A három Kft. 50 főt foglalkoztat, ennek éves bruttó bértömege (12x50x400 eFt), azaz 240 MFt, ami az árbevétel kb. egyharmada. Ennek adó és járulék befizetése közvetlenül a kincstárba 140 MFt, továbbá, áttételesen a hazai fogyasztáson keresztül ÁFA formájában még mintegy további 30 MFt kerül vissza a költségvetésbe (az évi átlag 170 MFt-nyi nettó keresmények 60%-a kerül fogyasztásra). Az export tevékenység multiplikátor hatása további kincstári bevételt hoz: az árbevétel (a fenti táblázat szerint évi átlag 810 MFt) kb. 30%-a hazai alvállalkozóknak kerül kifizetésre, ennek ismét csak egyharmada az államkincstárba kerül, ami 80 MFt. Így összességében a három Kft. árbevételének kincstári hozadéka mintegy 250 MFt (plusz 14 MFt a közvetlen társasági adó az 5 év átlagában). Öt év alatt tehát a reaktorhoz köthető műszergyártó-exportáló vállalkozói tevékenység több mint 1300 MFt állami bevételt hoz.

A következő évtized legjelentősebb neutronos műszerexport iránya az ESS (Európai Spallációs Neutronforrás) berendezésparkjának kiépítése. Az ESS beruházás, illetve majdani fejlesztése és üzemeltetése döntően természetbeni (in-kind) szolgáltatás- és műszerbeszállítás révén történik. Az ESS projektben való magyar részvétel (a kutatási lehetőségekhez való hozzáférést biztosító hozzájárulás) a költségek 1%-a, ez 2025-ig évi 500 millió Ft befizetést jelent, melyre a magyar kormány vállalt kötelezettséget. A hozzájárulás 70%-ban in-kind beszállítással valósul meg. Az MTA ATOMKI, az MTA EK és az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, mint kijelölt ESS beszállítói partner már a megállapodás első évében (2015) lekötötte/leszerződte a

beszállítás első 3 évnyi keretét. Ebből jól extrapolálható, hogy a következő 10 évben a BKR háttérével működő akadémiai és vállalati ESS-beszállítási éves nagyságrendje a 200-300 millió Ft tartományba esik. Többek között az alábbi fő tételek realizálódnak: műszerfejlesztési K+F feladatok végzése, tesztnyaláb kiépítése, neutronnyaláb használat a BKR-nél, illetve prototípusok és valódi berendezés komponensek gyártása a csatlakozó alvállalkozók (pl. ANTE, MIRROTRON) részéről. Az ESS mellett az előző fejezetben tárgyalt, világszerte megvalósuló neutronforrás beruházások igen jelentős kommerciális alapon történő beszállítási lehetőségeket kínálnak a bemutatott vállalkozásoknak és beszállítóiknak. A legjelentősebb megrendelések a PIK, ILL, OPAL, ISIS, CARR irányából várhatók. A már bemutatott három vállalkozás mellett a neutronközpontok ugyancsak rendszeres szállítója az EVOPRO Zrt, Patent Kft, VOX-Automatika Kft, Lugal Spin Kft. A nagy volumenű in-kind alapú ESS beszállítás a legkiválóbb referenciaként szolgálhat a magyar vállalatok üzletszerzéséhez – és így várhatóan két-háromszorosára is nőhet a ténylegesen és közvetlenül exportáló magyar cégek száma. Tehát konklúzióként megállapíthatjuk, hogy az MTA 3-4 kutatóintézetével együtt még legalább 6-8 olyan magyar vállalkozás (és ezek mintegy 100 - 120 kisebb nagyobb alvállalkozója) vesz részt a reaktor- és neutronkutató exportüzletben, amelyek közvetlenül vagy áttételesen használják a Budapesti Kutatóreaktort.

Összességében tehát létezik a hazai spin-off cégek és más kisvállalkozások azon köre, amelyek számára a reaktor léte meghatározó szerepet játszik működőképességük fenntartásában, még ha a reaktort csak kis mértékben használják közvetlenül. E nyereséges kis cégek tartós léte önmagában is pozitívan befolyásolja a magyarországi kisvállalkozásokról alkotható összképet, ráadásul adóbefizetésük sem jelentéktelen.

Külön érdemes foglalkozni azoknak a beszállításoknak a lehetőségeivel, amelyek a tervek szerint a Kurcsatov Intézet reaktoraihoz fognak történni. A Kurcsatov Intézet az orosz atomenergetikai kutatások zászlóshajója, ezért ezek a beszállítások a Budapesti Kutatóreaktor fűtőelem-helyzetének megoldására is kihatással lehetnek. A legfontosabb a Szentpétervár melletti Gatscinában felépített 100 MW-os PIK reaktor, de ugyancsak fontosak a moszkvai központban lévő kutatóreaktor és egyéb berendezések. A PIK reaktor üzembe helyezése jelenleg folyamatban van. A tervek szerint ez a reaktor nem csak az oroszországi, hanem az európai neutronkutatások fő eszközévé válhat, amikor a 2020-as évekre már alig marad kutatóreaktor Európában. A jelenlegi konfliktus az Európai Unió és Oroszország között ugyan átmenetileg lelassíthatja a terveket, de minden bizonnyal a PIK reaktor körül számos világszínvonalú kutatási berendezés fog létesülni. Az elképzelések szerint ezek fő beszállítója Németország lesz (ahol számos kitűnő eszköz szabadul fel az ország anti-nukleáris politikája miatt), de az orosz fél nagyon komolyan számít a magyar beszállításra is. Az MTA EK és a három említett Kft. megállapodásokat készített elő az egymás közti és a Kurcsatov Intézettel folytatandó együttműködés jogi kereteként. Teljes mértékben elképzelhető, hogy a magyar beszállítás részben ellentételezéseként, mégpedig a magyar fél számára előnyös pénzügyi feltételek mellett a Budapesti Kutatóreaktor fűtőelem-szükségletei legalább részben megoldhatóvá válnak. A tényleges megállapodás kimunkálásához magasabb szintű erőfeszítések szükségesek.

3.1.3. Neutronfizikai alap kutatások és alkalmazások

A neutronok semleges részecskék, ezért akár több centiméter mélyen is könnyen behatolnak különféle anyagok belsejébe, ahol elsősorban az atomok magjával kerülnek kölcsönhatásba. Ez a folyamat felhasználható az anyagok belsejének és mikroszkopikus felépítésének, esetenként atomi szintű felbontású vizsgálatára. A neutronokkal ellentétben a töltött részecskesugárzások és a Röntgen-sugárzás behatolási mélysége csak néhány mikrométerre tehető, így azokkal az anyagoknak csak a felülete vizsgálható. Főként ezért, és itt nem részletezett egyéb tulajdonságaik miatt, a neutron-, töltött részecske- és Röntgen-sugárzással egymást kiegészítő információk nyerhetők az anyag atomi és makroszkopikus szerkezetéről.

A Budapesti Kutatóreaktornál folyó kutatómunka koordinálását a Budapesti Neutron Centrum (BNC) látja el, melynek keretében 15 kísérleti berendezés működik (<http://www.bnc.hu>), amely így a legnagyobb hazai kutatási infrastruktúrának számít, és az ezek felmérésére szolgáló NEKIFUT projekt keretében C133472 számon „Stratégiai jelentőségű kutatási infrastruktúra” minősítést nyert el. Az itt működő berendezések mással nehezen pótolható megoldást kínálnak az anyag- és szerkezetvizsgálati problémák széles körére. Több mérőállomás és az azokat üzemeltető kutatók szakmai kompetenciája világszinten elismert, esetenként unikális. A NEKIFUT eredeti elképzelései szerint az infrastruktúrák finanszírozására hazai pályázati kiírások készülnek, de erre még nem került sor.

A Budapesti Kutatóreaktornak jelentős szerepe van a regionális neutronos kutatások kielégítésében is. A berendezéseken a hazai kutatók mellett nemzetközi együttműködésben, illetve 1998 óta az Európai Unió által finanszírozott ún. „Transnational Access” projektek keretében idelátogató évente kb. száz vendégkutató végez kísérleteket, bekapcsolva Magyarországot a világ jelentős kutatási irányzataiba az anyagtudomány, a kémia, a nukleáris tudomány és technológia, a biológia, a geológia és a kulturális örökség kutatása területén. Ez az interdiszciplináris tudásátadás egyik kiemelt központjává teszi a BNC-t, az alap- és az alkalmazott kutatás területén egyaránt. Az elmúlt csaknem két évtizedben folyamatosan növelték részvételüket, mind a hazai, mind a nemzetközi szinten. Mára abban a helyzetben vannak, hogy párhuzamosan 4-5 nagy EU-s és számos egyéb hazai és nemzetközi projektben vesznek részt. Oktatást végeznek nemcsak a hazai, de számos külföldi intézményből érkező fiatal és szenior szakember számára.

A neutronokat felhasználják többek között a magreakciókkal létrehozott izotóptermelésben, az itthon gyártott neutronos kísérleti eszköz tesztelésében, anyagszerkezet módosításban, nukleáris reaktoranyagok sugárállóságának ellenőrzésében, valamint alkalmazott nukleáris kutatás keretében, nukleáris elemanalitikában, neutronos képalkotásban és atommagadatok, továbbá hasadás során kibocsátott részecskék mérésében is. A továbbiakban a kutatási és fejlesztési tevékenységükből ismertetünk néhány fontos eredményt, amely nemzetközi szinten is jelentős visszhangot váltott ki, illetve hozzájárul Magyarország és tágabb értelemben az EU gazdasági és társadalmi fejlődéséhez:

- a neutronok kiválóan alkalmazhatók a jármű- és gépiparban, minőségellenőrzési és termékfejlesztési célokra. Kiszögű neutronszórással, prompt-gamma aktivációs

analízissel és neutronradiográfia segítségével vizsgálták többek között gépjármű motorok dugattyúinak fáradását, új generációs repülőgép-turbinák alapanyagait, illetve energetikai turbinák hűtési csatornáinak épségét. Méréseket végeztek egy hazai háztartásigép-gyártó vállalatnak a folyadék-gőz fázisátmenet optimalizációjára, amely komoly energiamegtakarítást hozhat a továbbfejlesztett eszközök üzemeltetése során.

- szerkezeti anyag besugárzásokkal és a besugárzásokat követő mechanikai anyagvizsgálatokkal hozzájárultak a Paksi Atomerőműben, valamint a majdani fúziós reaktorokban használandó szerkezeti anyagok kifejlesztéséhez;
- német és svájci partnerekkel együttműködésben jelentős sikereket értek el az energiapazarló és környezetszennyező higany-katódos klórgyártás kiváltását és a nagyipari melléktermék sósav gáz recirkulációját célzó, heterogén katalízisen alapuló technológia kutatásában, amely néhány év alatt az ipari alkalmazás szintjére is eljuthat;
- a világon elsőként valósították meg a neutronholográfiát, amely az anyag atomi-léptékű szerkezetéről ad információt, illetve a neutronos képalkotás és a lokális elemösszetétel-meghatározás egy kísérleti berendezésbe történő integrálását;
- számos berendezés részvételével aktív szerepet játszanak a hazai és egyetemes kulturális örökség vizsgálatában és megőrzésében. Ennek keretében többek között megvizsgáltak több ötezer éves, egyiptomi fáraósírokból származó vas tárgyat, amelyről kimutatták, hogy meteoritikus eredetű és az eddig ismert legrégebbi, ember által megmunkált vas objektum;
- a neutronos összetétel-mérésekkel kiválóan mérhető bór nyomelem alapján újszerű eredményeket értek el a Kárpát-medencei és az óceán közepi hátságok vulkanizmusának megértésében;
- kisszögű neutronszórással jelentős eredményeket értek el a növényi fotoszintézis mechanizmusának feltárásában;
- egyedi berendezéseik révén a negyedik generációs energiatermelő reaktorok tervezéséhez szükséges nukleáris paramétereket határoztak meg;
- a reaktorhoz kötődő neutronos kutatások stimulálják és elősegítik a KFKI telephelyen működő, igen specializált tevékenységet folytató, magas hozzáadott értéket előállító kis és középvállalatok tevékenységét, amelyek - a reaktor kompetens kutatói és mérnökei mellett - az Európai Spallációs Neutronforrás (ESS) jelentős hazai beszállítójává válhatnak.

E szerteágazó alap- és alkalmazott kutatási portfólió lehetővé teszi nukleáris és sugárvédelmi szakemberek oktatását, mely nagymértékben hozzájárul a magyarországi nukleáris szakemberek képzéséhez. Sok korábbi munkatársukból lett az Országos Atomenergia Hivatal szakembere, akik szabályalkotó és ellenőrző képessége nélkül nehezen elképzelhető az atomenergia biztonságos alkalmazása hazánkban. Szintén ez a portfólió teszi lehetővé a Nemzetközi Atomenergia Ügynökséggel (NAÜ) és az Európai Egyesített Kutatólaboratóriumokkal (JRC) való intenzív kapcsolatukat is. E kapcsolatok hozzájárulnak a kutatóreaktorok kihasználtságának nemzetközi javításhoz, a tudás átadásához és az energiatermelő reaktorok biztonságos üzemeltetésének javításához világszerte.

3.1.4. Oktatás

Bár a Kutatóreaktor nem elsősorban oktatási célokat szolgál, a képzés, továbbképzés mindig is fontos szerepet játszott reaktor életében. A NAÜ támogatásával az EERRI program keretében évente 1-2 alkalommal, átlagosan 3-4 napos képzést tartunk a reaktor üzemeltetéséről, felhasználásáról. E szerep a jövőben jelentősen erősödhet.

Az új paksi blokkok létesítésének előkészítéséhez kapcsolódóan, az OAH frissen felvett szakembereinek jelentős része 2015-ben közel három hetes képzésen vett részt a reaktornál, a képzés még folytatódik.

Elképzeléseink szerint a jövőben a reaktor jelentős szerepet játszhat az energetikai reaktorban dolgozók oktatási, képzése, de elsősorban a nukleáris jelenségek demonstrálása céljából. A bemutatható effektusok közül néhány igen hasznos lehet reaktorfizikusoknak, valamint a paksi üzemeltető személyzetnek. Ezek az alábbiak lehetnek.

- A Doppler-effektust jól be lehet mutatni, amikor automata minimum teljesítményen beállítunk egy adott kétszerezési időt, majd észlelni lehet, hogy 5 MW környékén a kétszerezési idő megnő a Doppler-effektus miatt.
- Sűrített levegő befújásával és a zónába porlasztásával imitálni lehet a fűtőköteg felületén keletkező forrás megjelenését a nukleáris mérőláncokon. Ezt különböző mennyiségű levegő befújásával, különböző mértékű forrásra lehet bemutatni. Hasonló kísérletet a prágai egyetemi reaktorban oktatási célra már használnak. Hasonlóképpen be lehet mutatni az ún. üregeffektust, különböző méretű megfelelő súllyal ellátott üres tok zónába történő leengedésével.
- Névleges teljesítményen tanulmányozható a moderátor hőmérsékletváltozásának hatása a teljesítményre. Ennek során a hűtővíz hőmérsékletét 5-10 fokkal változtatjuk, a reaktor teljesítményét azonos értéken tartva. Nagyon jól bemutatható a negatív visszacsatolás.
- Ugyancsak látványos lehet a xenon-mérgeződés bemutatása. Ennek során a névleges teljesítményen üzemelő reaktor teljesítményét 10 MW-ról 500 kW-ra csökkentjük. A hőmérsékletet állandó értéken tartva bemutatható a mérgeződés hatása. Ez a kísérlet történhet akár olyan formában is, hogy a teljesítményt több lépcsőben csökkentjük, így a mérgeződés folyamatát a teljesítményváltoztatás függvényében lehet vizsgálni.
- Érdekes lehet az egyes mérőberendezések, különösen a neutron-fluxus mérésének bemutatása.

A neutronkutatásokhoz szorosan kapcsolódik az 1999 óta megrendezésre kerülő nemzetközi tréning kurzus (CETS – Central-European Training School), ahol kb. 30 fiatal kutató neves meghívott külföldi szakértők előadásaiból ismerkedik a neutronfizikával, ill. a BNC berendezésin a gyakorlatban is elsajátíthatja az alapvető kísérleti technikákat.

3.1.5. Izotóp besugárzás orvosi és ipari célú radioaktív izotópok készítéséhez

A Budapesti Kutatóreaktor adja az egyetlen lehetőséget radioaktív izotópok hazai előállítására, a BME Oktatóreaktora ugyanis a viszonylag kis neutron-fluxus miatt, a paksi atomerőmű reaktorai pedig a más célú használatból eredően erre nem alkalmasak. Az orvosi felhasználású radioizotópok jelentős része rövid felezési idejű, mert diagnosztikai célra ezek előnyösebbek a hosszabb felezési idejűeknél, hiszen a vizsgálat után hamarabb lebomlanak és így kevésbé terhelik a beteget. A rövid felezési idejű izotópokat célszerű minél közelebb előállítani a felhasználás helyéhez, mert a hosszabb szállítási idő nagyobb kiinduló aktivitást és így nagyobb költséget eredményez. Tehát a hazai egészségügyi ellátás szempontjából a Budapesti Kutatóreaktor működésben tartása előnyt jelent.

A legfontosabb orvosi célú radioizotóp a ^{99}Tc , hiszen ezt használják világszerte legtöbbit. Ennek az izotópnak az előállítása jelenleg nem lehetséges a Budapesti Kutatóreaktorban, azonban ha igény merül fel rá, a neutronbefogáson alapuló technológia – előzetes tanulmányaink szerint – viszonylag könnyen bevezethető. Várható, hogy ilyen igény lesz, hiszen az a néhány kiemelten nagy teljesítményű kutatóreaktor, amely a jelenlegi világtermelés zömét adja, problémákkal küzd.

A jelenleg gyártott izotópok: ^{51}Cr , ^{65}Zn , ^{90}Y , ^{141}Ce , ^{166}Ho , ^{170}Tm , ^{82}Br , ^{203}Hg izotópokat is. Ezek felhasználása részben orvosi, részben ipari. Ezekre az izotópokra a jövőben is lesz igény, ám jelentőségük várhatóan nem fog növekedni.

A Budapesti Kutatóreaktor neutron-fluxusa ($1-2 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2\text{s}$) lehetővé teszi, hogy ipari célú ^{60}Co izotópot állítsanak elő, amire jelentős az igény világszerte. Jelenleg van is rendszeres megrendelés egy német cég részéről. Ez a tevékenység a jövőben várhatóan bővíthető

3.1.6. A nukleáris technika népszerűsítése

A Budapesti Kutatóreaktor az 1959-ben történt indítástól kezdve napjainkig jelentős szerepet játszik a nukleáris technika népszerűsítésében. A reaktor nyitva áll a látogatók előtt minden hónapban egy napon, ám csoportok számára más időpontban is hozzáférhető. Évente mintegy ezer ember él a lehetőséggel és látogatja meg a reaktort. Összetételük nagyon változatos, vannak köztük családok, középiskolai csoportok, egyetemisták. A reaktor bemutatása jelentős mértékben segíti a nukleáris energia elfogadottságának növelését. Sok környéken lakó is meglátogatja a reaktort, ők általában nyugodtabban távoznak. Rendszeresen, évente visszatérnek a pozsonyi műszaki egyetem hallgatói. Évente, két évente fogadunk vendégeket a NAÜ kérésére fejlődő országokban üzemelő nukleáris létesítményekből, általában két hétre jönnek.

Az évek során sok fiatal ismerkedhetett meg a reaktorról, ami nem csak azért fontos, mert eloszlatta az indokolatlan félelmeket, hanem azért is, mert hozzájárult a műszaki általános műveltség növeléséhez. A népszerűsítés fontos eleme a prominens külföldiek tájékoztatása is. Fontos esemény volt az Egyesült Államok budapesti nagykövetsége diplomatáinak látogatása 2014-ben, amelynek igen jó volt a visszhangja.

A tudomány és a társadalom közötti párbeszéd erősítésében fontos szerepet kap a kulturális örökség tárgyainak természettudományos vizsgálata, ami az utóbbi években nagy léptekkel fejlődik. A BNC 2009 óta vesz részt az EU CHARISMA, ill. IPERION elnevezésű projektjeiben, melyek Európa legjelentősebb múzeumi és a műtárgyak vizsgálatát végző természettudományi kutatóközpontok közti kapcsolatokat teremtik meg.

A reaktor 1992-93-as újraindulását követően fontos volt a környéken élők tájékoztatása. A pozitív tapasztalatok alapján a kutatóreaktor üzemeltetői azóta is naprakész anyagokkal tájékoztatják a közvéleményt a reaktorral kapcsolatos fejleményekről.

3.2. Az Oktatóreaktor működtetésének jövőbeni alkalmazási lehetőségei

3.2.1. Oktatás

Az 1.2.2. fejezetben ismertetett oktatási tevékenységeket az NTI a jövőben is folytatni kívánja. Ez több szempontból is fontos. Egyrészt a paksi atomerőmű üzemidő-hosszabbítása és kapacitásfenntartása miatt igen jelentős számban lesz szükség nukleáris energetikához értő szakemberekre a jövőben is. Ennek jeleit már most is tapasztaljuk. A Paks II Atomerőműfejlesztő Zrt. és az Országos Atomenergia Hivatal többször fordult az NTI-hez olyan kéréssel, hogy jelezzük a hallgatók felé, hogy szinte azonnali munkalehetőséget tudnak biztosítani számukra. A hallgatók közül többen – élve a lehetőséggel – a BSc diploma megszerzése követően a teljes MSc képzést vagy annak egy részét úgy végzik el, hogy párhuzamosan munkaszerződéssel is rendelkeznek és a tanulás mellett részidőben szakmai feladaton dolgoznak is. Az NTI jelenleg a műegyetemi fizikus-, energetikai mérnök-, vegyész-, környezetmérnök- és villamosmérnök-képzésben vesz részt, de a jövőben ezt szélesíteni kívánja.

Szintén kiemelkedő fontosságú az a tény, hogy az épülő atomerőmű magyar kis- és középvállalkozásoknak jelenthet majd komoly piacot. A cégek érdeklődését jelzi, hogy az NTI már 2014-ben is 21 fővel tudta elindítani a reaktortechnikai szakmérnöki tanfolyamot, melynek kulcseleme a reaktoron végzett laborgyakorlatok elvégzése. Az elkövetkező években az NTI két évente tervezi szakmérnöki tanfolyam indítását.

Mivel igen jelentős érdeklődés mutatkozik nemzetközileg is a valódi, oktatóreaktorral támogatott gyakorlati nukleáris képzésre, ezért az NTI az elkövetkező években is folytatni szeretné a külföldi résztvevőknek tartott tanfolyamait. A korábban jelzett érdeklődés miatt jelenleg folyamatban van az angol nyelvű Nuclear Engineering képzésünk kidolgozása, amely várhatóan az ENEN által akkreditált „Európai Nukleáris Mérnök” diplomát fog adni. Ezen túlmenően újabb, általános, nukleáris alapismereteket adó, illetve specializált, kiscsoportos tanfolyamokat is szervezünk.

Az ESS fejlesztéséhez Magyarország is jelentősen hozzájárul. Emiatt már most gondolni kell arra, hogy a berendezés üzembe helyezése után rendelkezésre álljon a hasznosításban (akár

hazai, akár külföldi kutatóintézet kötelékében) szerepet vállaló magyar szakembergárda. Hasonlóan fontos a BNC várható továbbüzemelése esetén az ott dolgozó kutatók utánpótlásának biztosítása. Ezért a BNC szakembereivel együttműködve érdemes megvizsgálni, hogy milyen eszközöket lehetne telepíteni az Oktatóreaktor vízszintes csatornáihoz, amelyek segítségével egy nagy neutronforrás nyálábjaiban végzett kísérleti munka alapjait demonstrálni lehet (pl. neutron-radiográfia, neutron diffrakció). Az Oktatóreaktor alacsony fluxusa természetesen ezeken a területeken nem teszi lehetővé versenyképes kutatási eredmények elérését, de oktatási szempontból unikális lenne, hiszen a kisebb teljesítményű reaktorok leszerelésével az ilyen jellegű képzési helyek száma is jelentősen csökkent Európában és világszerte.

3.2.2. Kutatási célú felhasználás

A hazai felsőoktatás K+F+I potenciáljának javítására vonatkozó stratégiai célkitűzésekkel összhangban az Oktatóreaktor jövőbeni alkalmazási lehetőségeinek kialakításánál is figyelembe kell venni, hogy az kutatási infrastruktúraként továbbra is nemzetközileg versenyképes eredményeket tudjon biztosítani, előmozdítsa a H2020 forrásokhoz való hozzáférést és segítse a hazai vállalati K+F+I tevékenységet. Az Oktatóreaktor kutatási célú felhasználása során az előző évtizedekben kialakult szakértelem, hazai és nemzetközi együttműködések biztosítják, hogy ez a továbbiakban is megvalósítható legyen.

Bár a neutronaktivációs analitikának ma már számos versenytársa van az analitikai módszerek között, még mindig az egyik legnagyobb pontosságú eljárásnak számít, amely – kiegészítve az Oktatóreaktorban működő radiokémiai laboratóriummal és más analitikai eszközökkel (pl. röntgen-fluoreszcencia) várhatóan továbbra is élvonalbeli kutatásokat tesz lehetővé. Ez egyben indokolja a 100 kW-os reaktorüzem lehetőségének fenntartását. A paksi atomerőmű bővítéséhez kapcsolódó fontos feladat lehet pl. a reaktorok körül alkalmazandó betonok összetevőinek előzetes vizsgálata a felaktiválódás, és így későbbi leszerelési radioaktív hulladék mennyiségének minimalizálása érdekében.

A modern szabályozó és diagnosztikai rendszerek egyre gyakrabban követelik meg összetett elektronikák megemelt sugárzási terekbe telepítését akár atomerőművekben is, ezért az ilyen eszközök besugárzásos vizsgálata továbbra is fontos feladata lehet az Oktatóreaktornak. Ez egyben az eszközök fejlesztésével foglalkozó hazai vállalatok tevékenységét is segíti és a paksi atomerőműbe telepítendő eszközök minősítése szempontjából is fontos lehet.

Az Oktatóreaktor változtatható intenzitású neutronforrásként a továbbiakban is segítheti a neutrondetektorok és kapcsolódó elektronikák, mérőláncok fejlesztését, kalibrálását.

A számítástechnika rohamos fejlődésével a reaktorfizikai mérések elsődleges feladata az lett, hogy validációs eseteket biztosítsanak a különböző számítási modellekhez és így az azokban alkalmazott eljárások, adatok, feltételezések és közelítések érvényességét ellenőrizni lehessen. Ugyanakkor az utóbbi évtizedekben sok, erre a célra alkalmas zéró vagy alacsony teljesítményű reaktort leszereltek, ezért az ilyen jellegű mérések szerepe jelentősen felértékelődött. Az

élvonalbeli kísérleti reaktorfizikai kutatások elsősorban az új reaktoranyagokkal (pl. nitrid vagy karbid alapú üzemanyagok) vagy új reaktorkonceptiókkal (különösen a negyedik generációs reaktortípusok és azokon belül a nukleáris üzemanyagciklus zárását megvalósítani képes gyorsreaktorok) kapcsolatos problémákkal foglalkoznak. Az Oktatóreaktor az ilyen kutatásokhoz is hozzá tudna járulni, ha a zónájában egy vagy néhány pozícióban elhelyezett, alkalmasan kialakított kísérleti kazettával lokálisan az adott problémára jellemző neutronspektrumot alakítunk ki. Hasonló megoldásra több nemzetközi példát is találni.

Egy beszerzés alatt álló neutrongenerátor segítségével az Oktatóreaktoron fontos méréseket lehet végezni szubkritikus állapotban is, melyek segíthetik a szubkritikuság mértékének meghatározását célzó eljárások további fejlesztését, pontosítását. Ez egyaránt értékes lehet az atomerőművek üzemeltetése, az ún. gyorsítóval hajtott szubkritikus rendszerek és a hasadóanyagok ellenőrzésére, kimutatására alkalmazott módszerek fejlesztése szempontjából.

Az NTI kutatási és oktatási lehetőségei is jelentősen bővíthetők lennének egy, a tartalék EK-10-es fűtőelem pálcákból kialakított zéró teljesítményű kritikus vagy szubkritikus rendszer⁴ segítségével. A csekély (pár watt) hőteljesítmény és a korróziót kizáró szilárd moderátor (pl. polietilén) alkalmazása indokolatlanná teszi a fűtőelem-pálcák felhasználhatóságával kapcsolatos aggodalmakat és az elhanyagolható besugárzottságuk a folyamatos ellenőrzésüket is lehetővé teszi. Az ilyen rendszerben való alkalmazás nem gátolja meg a fűtőelem-pálcák esetleges későbbi felhasználását az Oktatóreaktor zónájában. Az Oktatóreaktor csarnoka sugárvédelmi és biztosítéki ellenőrzési szempontból is megfelelő helyet biztosítana. Egy, az összes fűtőelem behelyezésével is mélyen szubkritikus ($k_{eff} < 0,95$) zóna esetében klasszikus értelemben vett szabályozó rendszer kialakítására sincs feltétlenül szükség. Jó példa ilyen megoldásra a Delfti Műszaki Egyetemen megvalósított Delphi szubkritikus rendszer, amelyet az '50-es évekből származó, fel nem használt üzemanyagból állítottak össze. A szubkritikus rendszeren a fent említett módon neutrongenerátor vagy más neutronforrás segítségével lehet méréseket végezni. Arra is van azonban nemzetközi példa, hogy ilyen szubkritikus rendszert egy kutatóreaktor vízszintes besugárzó csatornájánál helyeznek el, hogy az onnan érkező neutronnyaláb biztosítsa a forrást. Kritikus rendszer kialakítása összetettebb feladat, engedélyezése sem egyszerű, de felhasználási lehetőségei is sokrétűbbek.

4. Összefoglalás, javaslatok

A fentiek alapján a két reaktor helyzete a következőképpen értékelhető.

Budapesti Kutatóreaktor

A Budapesti Kutatóreaktor megbízhatóan működik, üzemeltetése biztonságos, az üzemeltető személyzet korösszetétele megfelelő. A BKR mint a legnagyobb hazai kutatási infrastruktúra

⁴Fontos megjegyezni, hogy a hatályos Atomtörvény egy zéró teljesítményű kritikus vagy szubkritikus rendszer létesítését is előzetes parlamenti elvi hozzájáruláshoz köti.

által lehetővé tett tevékenységek nemzetközileg is elismerten magas színvonalúak az atomenergetikai kutatások, a neutronfizikai alapkutatások, az ipari alkalmazások és a más reaktorokba történő beszállítások terén. A reaktor kutatási hasznosítása az EU-ban szokásos módon történik. A reaktor üzemeltetési engedélye 2023 végén jár le, amely megfelelő feltételek fennállása esetén meghosszabbítható.

A BKR üzemeltetési költségeit az MTA EK – költségvetési ellátmánya terhére – jól bevált módon biztosítja. Kivételt képez ez alól az üzemanyag beszerzése, amihez állami segítségre van szükség. A jelenleg tárolt friss üzemanyagon kívül a 2023-ig való üzemeléshez további 222 darab fűtőelem beszerzése szükséges, aminek költsége a 2015-ben kapott orosz árajánlat szerint összesen mintegy 12,7 millió USD. A beszerzést minél hamarabb, de legkésőbb 2017 folyamán meg kell oldani. A 2023-ig, sőt az elvileg azon jóval túl is keletkező kiegészítő üzemanyag tárolása a telephelyen megoldott. Amennyiben az üzemanyag beszerzése elmarad, meg kell kezdeni a reaktor végleges leállítását és leszerelését. Ennek a fűtőelem-beszerzésnél lényegesen nagyobb költségei vannak, amelyek persze előbb-utóbb biztosan fel fognak merülni, de nyilván nem mindegy, hogy a leszerelési költségek 2020 körül, vagy 2040 körül merülnek majd fel.

A Budapesti Neutron Centrum jelentős pályázati potenciállal rendelkezik és a technológia transzfer révén számottevő műszeripari export tevékenységet generál. Ebből az Államkincstárnak jelentős, mintegy 400 millió forintnyi éves bevétele származik.

A BKR üzemidejének meghosszabbítása 2023 után 10-20 évre szakmailag indokolt, különös tekintettel az új paksi blokkok várható üzembe helyezésére. Ennek üzemanyag-költsége mai árakon évi mintegy 750 millió forint. A BKR által lehetővé tett atomenergetikai kutatások elengedhetetlenek az új paksi blokkok biztonságos üzemeltetésének megalapozásához. A meghosszabbított üzemidő lehetőséget ad fűtőelem-minták besugárzására is, amely elengedhetetlen a visegrádi országok nukleáris kutatóintézetei által irányított ALLEGRO negyedik generációs demonstrációs reaktor fűtőelemeinek kifejlesztéséhez. A BKR-nél nemzetközi keretekben folyó magas színvonalú neutronfizikai kutatások jelentősége várhatóan tovább nő a tapasztalható nemzetközi tendenciák miatt. A BKR léte ugyancsak elengedhetetlen ahhoz, hogy a jelentős exportbevétellel járó, más nukleáris kutatási létesítményekhez történő magyar műszer-beszállítások sikeresen folytatódhassanak. Az újonnan kialakítandó képzési program kiegészítheti az Oktatóreaktornál zajló képzést.

Minden eddigi vizsgálat szerint a BKR üzemidő-hosszabbításának műszaki akadályja nincs. Tekintettel az eljárás bonyolultságára, az üzemidő-hosszabbításról a közeljövőben (legkésőbb 2017 végéig) elvi kormányzati döntés szükséges, amelyet a Magyar Tudományos Akadémia nyilván tudomásul fog venni. A döntés során érdemes figyelembe venni a fűtőelem-beszerzés éves költségeit, valamint a leszerelési költségek felmerülésének jelentős eltolódását. A döntés következtében szükséges műszaki fejlesztésekről az MTA EK a szokásos pályázati rendszerek keretében tud gondoskodni. A felmerülő humánpolitikai igények kielégítése sem okozhat problémát.

Oktatóreaktor

A BME Oktatóreaktora megbízhatóan működik, üzemeltetése biztonságos, az üzemeltető személyzet korösszetétele az elmúlt években lezajlott generációváltás után kifejezetten kedvező. Az Oktatóreaktor a hazai felsőoktatás egyik legjelentősebb oktatási-kutatási infrastruktúrája, amely nemzetközi szempontból is kiemelkedő. Az Oktatóreaktor üzemeltetési költségei éves szinten 140-150 MFt-ot tesznek ki, amely magában foglalja a reaktorüzemeltetéshez kötődő dologi kiadásokat és a személyzet bérét.

A jelen legfontosabb célkitűzése az esedékes IBF teljesítése, és ezzel a 2027-ig tartó üzemeltetés biztosítása. Utóbbival kapcsolatban az elmúlt években és jelenleg is zajló rekonstrukciók eredményeképpen komoly kockázat nem merül fel. A 2009 óta tartó korszerűsítés 2016-ban a reaktorépület teljes felújításával folytatódik.

A meglévő nemzetközi oktatási tapasztalatokra alapozva az intézmény fontos törekvése az angol nyelvű, külföldi hallgatókat célzó oktatás további szélesítése a Nuclear Engineering MSc képzés akkreditálásával. A felsőoktatás fejlesztésének célkitűzéseivel összhangban erősíteni kell a kutatási célú felhasználást is. Ebben jelentős segítséget nyújt a jelenleg zajló Nemzeti Nukleáris Kutatási Program, melynek keretében 2018 végéig tervet kell kidolgozni az Oktatóreaktor, mint oktatási-kutatási infrastruktúra stratégiai fejlesztéséről. Ezzel párhuzamosan el kell végezni a reaktor kutatási célú felhasználását kiterjesztő lehetőségek (pl. zéró teljesítményű rendszer, módosított neutronspektrumú sziget kialakítása stb.) részletes elemzését.

A 2017-ben esedékes IBF után meg kell kezdeni a 2027 utáni működtetés előkészítését is. A működtetés folytatásához elvi kormányzati szintű döntés szükséges. A 2027 utáni időszak üzemanyag-szükségletének biztosítására mielőbb meg kell kezdeni a tartalék üzemanyag vizsgálatát és ezzel párhuzamosan tájékozódni kell új üzemanyag beszerzésének költségéről. A költségek racionalizálása érdekében a BKR és az Oktatóreaktor üzemanyagáról célszerű lenne közösen tárgyalni az orosz féllel.

Amennyiben sikerül új üzemanyagot beszerezni, gondoskodni kell a mostani EK-10 típusú üzemanyag-kazetták elszállításáról is. A két reaktor kiégett üzemanyagát célszerű lenne egy tételben elszállíttatni. A BKR-nél lévő kiégett üzemanyag átmeneti tároló alkalmas az OR kiégett üzemanyagának befogadására, amíg annak elszállítása Magyarországról meg nem történik.

Javaslatok

- Annak érdekében, hogy az új paksi blokkok a meglévőkhöz hasonlóan biztonságosan üzemelhessenek, szükség van a hazai nukleáris tudás kifejlődésében és megtartásában meghatározó szerepet játszó MTA EK Budapesti Kutatóreaktor és a BME Oktatóreaktor további üzemeltetésének biztosítására, valamint a környezetükben kifejlődött szakmai műhelyek fenntartására.

- Mint ahogy a mostani paksi blokkok biztonságos üzemeltetésében, a hazai nukleáris tudás kifejlődésében és megtartásában meghatározó szerepet játszott az MTA EK Budapesti Kutatóreaktora és a BME Oktatóreaktora, valamint a környezetükben kifejlődött szakmai műhelyek, úgy az új paksi blokkok működtetéséhez szükséges szakmakultúra fenntartásához is szükséges a kisreaktorok továbbüzemeltetésének biztosítása.
- Legkésőbb 2017-ig kormányzati szintű döntés szükséges a BKR 2023-ig történő üzemeltetéséhez szükséges üzemanyag beszerzéséről.
- Legkésőbb 2017-ig kormányzati szintű döntés szükséges a BKR 2023 utáni 10-20 évre történő üzemidő-hosszabbításának előkészítéséről.
- 2020-ig elvi kormányzati szintű elvi döntés szükséges az Oktatóreaktor 2027 utáni üzemeltetéséről, hogy annak előkészítése megkezdődhessen.
- A két reaktor fűtőelem-kérdéseinek megoldása érdekében a kormányzat által kijelölt személyeknek mielőbb meg kellene kezdeniük a tárgyalásokat az orosz féllel, hogy a fenti döntések a reális lehetőségek ismeretében születhessenek meg.

Rövidítések jegyzéke

AEKI	MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézet, ma az MTA EK része
AGNES	Adeadvanced and General New Evaluation of Safety – a Paksi Atomerőmű biztonságát értékelő projekt 1991 és 1994 között
ALLEGRO	nem betűszó, tervezett gyorsreaktor neve
BER II	nem betűszó, német kutatóreaktor, Berlin
BKR	Budapesti Kutatóreaktor
BME	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
BME NTI	a BME Nukleáris Technikai Intézete
BNC	Budapesti Neutron Centrum, a BKR kutatási célú hasznosítására létrehozott szervezet
CARR	China Advanced Research Reactor, kínai kutatóreaktor
CSNS	China Spallation Neutron Source, kínai neutronfizikai berendezés
ENSA	European Neutron Scattering Association, Európai Neutronkutatási Egyesület
ESS	European Spallation Source, Svédországban épülő neutronfizikai berendezés
EU	Európai Unió
FRM-II	Forschungsreaktor München, németországi kutatóreaktor
GDP	Gross Domestic Product
H2020	Horizon 2020, az EU kutatási pályázati rendszere a 2014-2020-as időszakra
HNF	hidegneutron-forrás
IBJ	Időszakos Biztonsági Jelentés
IBF	Időszakos Biztonsági Felülvizsgálat
IKI	MTA Izotóp Intézet, ma az MTA EK része
ILL	Institut Laue-Langevin, nemzetközi kutatóintézet Grenoble-ban és annak reaktora
ISIS	protongyorsítóval üzemeltetett spallációs forrás, Oxford
JAP	Jedlik Ányos Program
J-PARC	Japan Proton Accelerator Research Complex, japán kutatóközpont
JRC	Joint Research Center, Európai Egyesített Kutatólaboratóriumok
KFKI	a korábbi Központi Fizikai Kutató Intézet
KI	kutatási infrastruktúra
KMOP	Közép-Magyarországi Operatív Program
KMR	Közép-Magyarországi Regionális Program
LLB	Laboratoire Léon Brillouin, francia kutatóreaktor, Saclay
MFA	Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet, ma az MTA EK része
MTA	Magyar Tudományos Akadémia
MTA EK	MTA Energiatudományi Kutatóközpont
MVM	Magyar Villamos Művek Zrt.
NAÜ	Nemzetközi Atomenergia Ügynökség
NEKIFUT	Nemzeti Kutatási infrastruktúra Felmérés és Útitervezés
NFM	Nemzeti Fejlesztési Minisztérium
NIPS	Neutron Induced Prompt-Gamma Spectrometry, neutronfizikai műszer-csoport

NORMA	Neutron Optics and Radiography for Material Analysis, neutronfizikai műszercsoport
OAH	Országos Atomenergia Hivatal
OPAL	Open Pool Australian Lightwater Reactor, ausztrál kutatóreaktor
PIK	nem betűszó, orosz kutatóreaktor
RID	Reactor Instituut Delft, holland kutatóreaktor, Delft
RRRFR	Russian Research Reactor Fuel Repatriation – az orosz gyártmányú kutatóreaktor üzemanyag visszavitele Oroszországba
RHK Kft.	Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Nonprofit Kft.
RÜ	Reaktorüzem
SINQ	protongyorsítóval üzemeltetett spallációs forrás, Zürich
TOF-ND	time-of-flight, magyarul repülési idő neutron diffraktométer
TVEL	orosz fűtőelemgyártó cég
VKSZ-14	Versenyképességi és Kiválósági Szerződés