

# A nagy aktivitású leszerelési és üzemviteli hulladékok végleges elhelyezése

Hózer Zoltán<sup>1</sup>, Hordósy Gábor<sup>1</sup>, Slonszki Emese<sup>1</sup>, Vimi András<sup>1</sup>, Tóta Ádám<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Magyar Tudományos Akadémia KFKI Atomenergia Kutatóintézet, 1525 Budapest, Pf. 49

<sup>2</sup>Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3

---

*A paksi reaktorokra végzett számítások szerint a tartály zónához közeli szegmense erősen felaktiválódik, de a képződő radioaktív izotópok többsége rövid felezési idejű. A számítások eredményei alapján a reaktor felaktiválódott szerkezeti elemeit tíz év pihentetés után a hőtermelés szempontjából nem kell nagy aktivitású hulladéknak tekinteni. Az erőműben a szerkezeti elemeken kívül keletkező, egyéb nagy aktivitású hulladékokról rendelkezésre álló adatok alapján valószínűsíthető, hogy az erőmű leszerelésekor ezeknek az anyagoknak a hőtermelése sem fogja elérni a nagy aktivitású hulladéokra vonatkozó 2 kW/m<sup>3</sup> értéket.*

---

## Bevezetés

A világon már számos atomerőművet lebontottak, de a leszereléskor keletkezett nagy aktivitású hulladékok nem kerültek elhelyezésre mélygeológiai lerakóban [1]. Erre egyrészt a mélygeológiai lerakók létesítésének elhúzódása ad magyarázatot. Másrészt a nemzetközi tapasztalatok szerint a reaktortartály és az egyéb nagy aktivitású hulladékok nem aktiválódtak fel olyan mértékben, vagy izotóp összetételük nem olyan, hogy elhelyezésük csak a kiégett üzemanyag lerakására tervezett létesítményekben lenne megoldható.

## A nagy aktivitású hulladék meghatározása

A Paksi Atomerőmű Zrt. Munkahelyi Sugárvédelmi Szabályzata alapján nagy aktivitásúak azok a hulladékok, amelyek felületétől 10 cm-re a dózisteljesítmény 10 mGy/h-nál nagyobb [2]. Ezt a korlátot a nagy aktivitású radioaktív hulladékok erőművön belüli átmeneti tárolásához veszik alapul. Az atomerőmű üzemeltetése során elsősorban a reaktorból kivett komponensek (szabályozó kazetták abszorbensei, közbelső rudak, termoelemek, stb.) felületein mérhető olyan mértékű dózisteljesítmény, amely miatt ezeket nagy aktivitású hulladékként kell kezelni.

Az MSZ 14344-1:2004 számú szabvány szerint nagy aktivitású az a radioaktív hulladék, amely 2 kW/m<sup>3</sup>-nél több hőt termel, vagy fajlagos aktivitása nagyobb mint a mentességi aktivitáskoncentráció egymillió szorosa. (A korábbi MSZ 14344-1:1989 szabványban még 5·10<sup>8</sup> kBq/kg azaz 5·10<sup>11</sup> Bq/kg szerepelt). A 47/2003. (VIII.8.) ESzCsM rendelet szerint nagy aktivitású az a radioaktív hulladék, amelynek hőtermelését a tárolás, az elhelyezés tervezése és a lerakó üzemeltetése során figyelembe kell venni. A hőtermelés korlátra a fenti szabványban megadott 2 kW/m<sup>3</sup>-t kell használni. A végleges elhelyezés szempontjából tehát – az aktivitás tartalom mellett – a hulladék hőtermelése a legfontosabb jellemző.

A radioaktív hulladékok végleges elhelyezését ún. telephelyi aktivitás korlátok is limitálhatják. A kis és közepes aktivitású

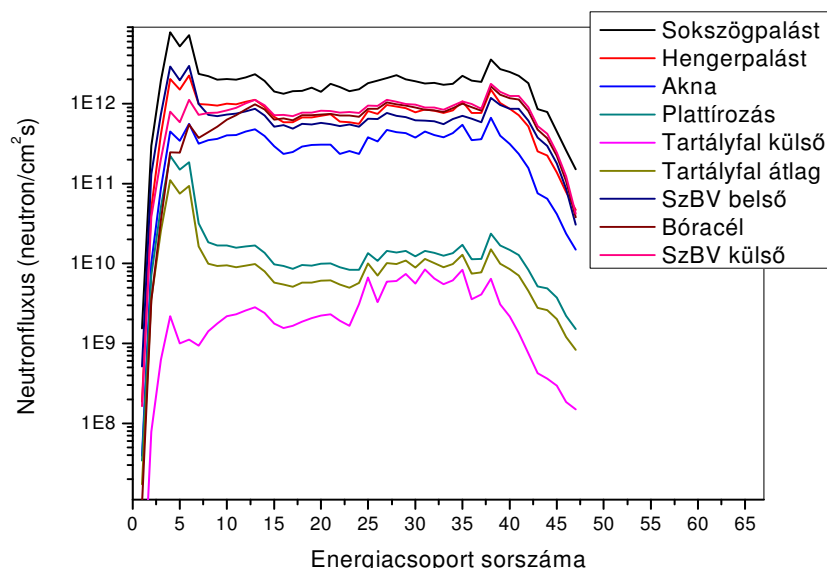
hulladék elhelyezésére létesített bátaapáti telephelyre például a <sup>59</sup>Ni izotópra 6,54·10<sup>13</sup> Bq aktivitáskorlátot adtak meg a létesítési engedélyhez. További korlátot jelent az is, hogy a bátaapáti lerakó – teljes üzemideje alatt összesen – nem fogadhat be 1 kg <sup>235</sup>U-nál több hasadó anyagot tartalmazó hulladékot.

## A reaktortartály és a belső szerkezeti elemek felaktiválódása

A VVER-440 típusú atomerőművek leszerelése során kezelendő összes aktivitás 99%-a a reaktorok felaktiválódott szerkezeti elemeiből, illetve az aktív zóna körüli biológiai védelmek felaktiválódott beton szerkezeteiből kerül ki. A paksi reaktorok felaktiválódott szerkezeti elemeinek aktivitására és izotópösszetételére korábban nem készültek hazai számítások, ezért a Végleges Biztonsági Jelentésben (VBJ) egy régebbi finn elemzés adatai szerepelnek. A loviisai atomerőmű VVER-440/213 típusú reaktora számára készített számításokban a reaktor 30 éves üzemidejét vettek figyelembe.

A besugárzott reaktor-részegységek radioaktív hulladékként történő besorolásához a finn számítások alapján megadott adatok csak korlátozottan használhatóak, mivel csak összaktivitást adnak meg. A tartály radioaktív hulladékként való kezelése során fontos lesz, hogy a továbbiakban hogyan fog alakulni az aktivitása, vagyis a keletkező izotópok milyen gyorsan bomlanak el. Ezért az összaktivitás adatokon túl ismerni kell a szerkezeti elemek izotópösszetételét is, hogy értékelni tudjuk a pihentetés hatását. Az erőmű hosszabb idejű üzemeltetése során nagyobb fajlagos aktivitás kialakulása várható, ennek becsléséhez további számításokra volt szükség a várható 50-60 éves üzemidőre.

A reaktortartály jelentős – főleg a termikus energiatartományba eső – neutron sugárzásnak van kitéve, így a neutronbefogás során keletkező, éves nagyságrendhez közel eső (és azt akár jelentősen meghaladó) felezési idejű izotópok keletkezését kell figyelembe venni. A számításokhoz a neutronaktivációs analitikában általános használt felaktiválódás modellt alkalmaztuk.



1. ábra: A reaktortartály felaktiválódásának számításához felhasznált neutron fluxus adatok 47 energiacsoportra

A reaktortartálynak az aktív zónával szemben elhelyezkedő, hengerszimmetrikus részének aktivitását vizsgáltuk, a számítások nem terjedtek ki a zóna felett és alatt található komponensekre. Az aktív zóna 2420 mm magasságú, a 3/5 hegesztési varrat alatt, az 5/6 varrat elé belógva helyezkedik el. A tartály 15H2MFA típusú acélból készült, belső falát rozsdamentes plattírozás borítja 10 mm vastagon. A számítás során a vizsgált tartályrészt érő neutronfluxust a tartály külső falán és a plattírozáson megjelenő fluxusokból átlagoltuk és feltételeztük, hogy a neutronfluxus időben állandó.

A tartály és a szerkezeti elemek közül a palást, kosár, akna aktivációs számításához szükséges neutronspektrumokat az a számítási apparátussal határoztuk meg, amelyet eredetileg a tartály sugárterhelésének vizsgálatára fejlesztettünk ki. Ez a KARATE zónatervező program [3] és az MCNP Monte Carlo program együttes használatán alapul. A KARATE segítségével meghatároztuk a zóna külső felületén a neutronforrást, majd ezt a forrást használva vizsgáltuk a neutrontranszportot a zónától kifelé az MCNP segítségével. A belső szerkezeti elemekre a spektrumot az egyes elemek térfogatára

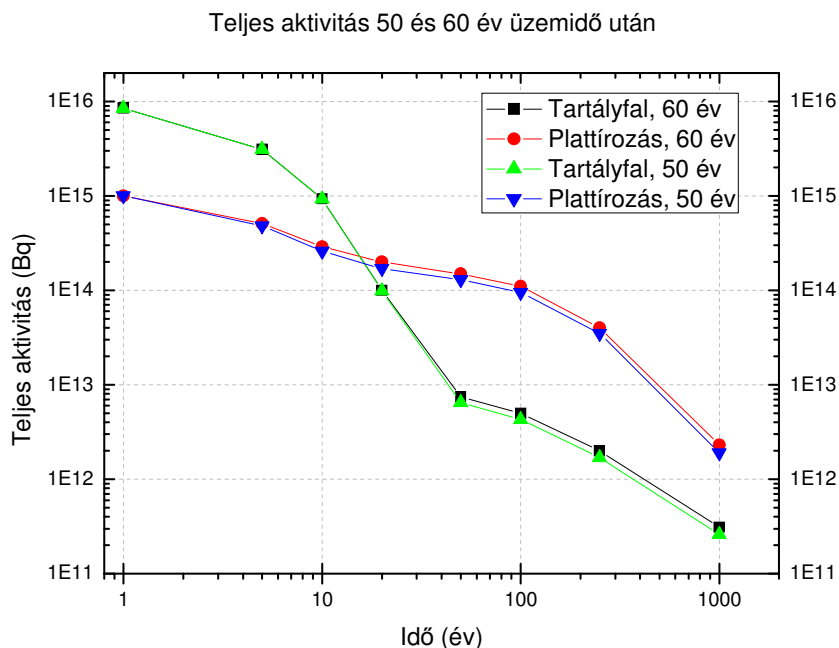
átlagolva határoztuk meg, a tartályfal esetében pedig a plattírozásra és a tartályfal külső oldalára. A neutronfluxust mindegyik esetben 47 energiacsoportban adtuk meg.

Az aktivitás szempontjából jelentős izotópok hatáskeresztmetszetei az ENDF adatbázisból, főként az ENDF/B-VII, helyenként pedig a JEFF-3.1.1 könyvtár adataiból származnak. Mivel a reakciók hatáskeresztmetszetét általában több tízezer energiaértékre adták meg, a 47 energiacsoporthoz tartozó neutronenergiák tartományába konvertáltuk a hatáskeresztmetszeteket.

A tartály aktivitása az atommagok gamma, proton, illetve alfa részecske kibocsátásával járó neutronbefogásos reakciói (röviden  $(n,\gamma)$ ,  $(n,p)$  vagy  $(n,\alpha)$  reakciók) során keletkező radioaktív izotópokból származik (1. táblázat). A számításokhoz a vizsgált szerkezeti anyagok elemi összetételéből indultunk ki, és a lehetséges magreakció részletes áttekintése alapján megállapítható volt, hogy a számításból kihagyott reakciókban keletkező izotópok aktivitása elhanyagolható nagyságrendű mind rövid, mind hosszú távon.

1. táblázat A számításokban figyelembe vett magreakciók fő jellemzői

Reakció	Reakciótermék felezési ideje (év)	Reakció	Reakciótermék felezési ideje (év)
$^{10}\text{B}(n,p)^{10}\text{Be}$	1 513 000	$^{58}\text{Ni}(n,\gamma)^{59}\text{Ni}$	76 000
$^{13}\text{C}(n,\gamma)^{14}\text{C}$	5 730	$^{62}\text{Ni}(n,\gamma)^{63}\text{Ni}$	100
$^{34}\text{S}(n,\gamma)^{35}\text{S}$	0,24	$^{60}\text{Ni}(n,p)^{60}\text{Co}$	5,27
$^{50}\text{Cr}(n,\gamma)^{51}\text{Cr}$	0,08	$^{58}\text{Ni}(n,\alpha)^{55}\text{Fe}$	2,74
$^{54}\text{Fe}(n,\gamma)^{55}\text{Fe}$	2,74	$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	0,19
$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$	0,86	$^{63}\text{Cu}(n,p)^{63}\text{Ni}$	100
$^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$	0,12	$^{63}\text{Cu}(n,\alpha)^{60}\text{Co}$	5,27
$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$	5,27	$^{92}\text{Mo}(n,\gamma)^{93}\text{Mo}$	4 000
$^{59}\text{Co}(n,p)^{59}\text{Fe}$	0,12	$^{96}\text{Mo}(n,\alpha)^{93}\text{Zr}$	1 530 000



2. ábra: A tartályfal és a plattírozás teljes aktivitása a zóna magasságában 50 és 60 év üzemidő után

A számításokat 50 és 60 éves üzemidőre végeztük el, valamint nyomon követtük az aktivitás alakulását 1 és 1000 év közötti időpontokra. A teljes aktivitás mellett egységnyi tömegre eső aktivitást és hőfejlődést is számoltunk.

Az 50 és 60 éves üzemidőkre számolt összaktivitások között csak minimális különbség volt, mivel – az üzemidőhöz képest – rövid felezési idejű  $^{55}\text{Fe}$  (2,74 év) és  $^{51}\text{Cr}$  (27,7 nap) izotópok dominálnak. A 60 éves üzemidő alatt a hosszú felezési idejű izotópokból arányosan több képződik, és ez valamelyest lassítja az aktivitás lecsengését a pihentetés során (2. ábra).

A hőfejlődés a leállást követően a tartályfalban  $0,19 \text{ kW/m}^3\cdot\text{t}$ , a plattírozásban pedig  $0,73 \text{ kW/m}^3$  érhet el. A plattírozás a nagyobb neutronfluxus miatt aktiválódik fel jobban, mint maga a tartályfal. A tárolás során a tartályfal aktivitásának lecsengése jóval meredekebb, mint a plattírozásé (2. ábra). Ennek elsősorban a  $^{62}\text{Ni}(n, \gamma)^{63}\text{Ni}$  reakcióban keletkező, 100 éves felezési idejű  $^{63}\text{Ni}$  izotóp az oka. A plattírozás sokkal több nikkelt tartalmaz, ezért képződik ott sokkal több ebből az izotópból.

Másik fontos különbség a kobalt tartalom: a tartályfalban található  $0,01\%$  kobaltból a  $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$  reakció során keletkező  $^{60}\text{Co}$  (5,27 év) adja 20 év pihentetés után a legnagyobb aktivitást a  $^{55}\text{Fe}$  (2,74 év) mellett. A plattírozásban is létrejön  $^{60}\text{Co}$  aktivitás, de értéke jóval kisebb, mert más reakciókból származik ( $^{63}\text{Cu}(n, \alpha)^{60}\text{Co}$  és  $^{60}\text{Ni}(n, p)^{60}\text{Co}$ ).

A belső szerkezeti elemek közül az alábbiak felaktiválódását számoltuk:

- SzBV kazetták elnyelő része (külön-külön számoltuk a külső, acél hatszöget, a bóracél betétet és a központi csövet),
- közbenső rudak (15 és 25 éves élettartammal),
- kosár (sokszögpalást és henger),
- akna,
- hópajzs.

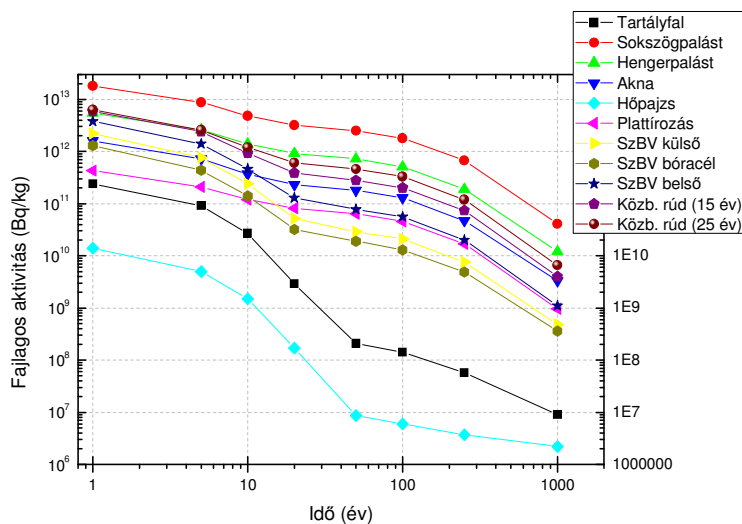
A számítások szerint 10 év pihentetés után a szerkezeti elemek fajlagos aktivitása több mint egy nagyságrendet csökken. Két nagyságrendnyi csökkenés kb. 100 év pihentetés után várható (3. ábra). A korábbi MSZ 14344-1:1989 számú szabványban megadott szerinti  $5 \cdot 10^{11} \text{ Bq/kg}$  fajlagos aktivitást csak a kosár és a közbenső rudak haladják meg tíz év pihentetés után. A kosár számított fajlagos aktivitása 100 éves pihentetés után sem csökken a fenti érték alá.

Tíz éves pihentetés alatt valamennyi vizsgált szerkezeti elem fajlagos hőtermelése  $1 \text{ kW/m}^3$  alá csökken (4. ábra). Tehát a szerkezeti elemek a nagyaktivitású hulladék végleges elhelyezésére vonatkozó  $2 \text{ kW/m}^3$  teljesítményt nem haladják meg, így hőtermelés szempontjából nem igényelnek nagyaktivitású lerakót.

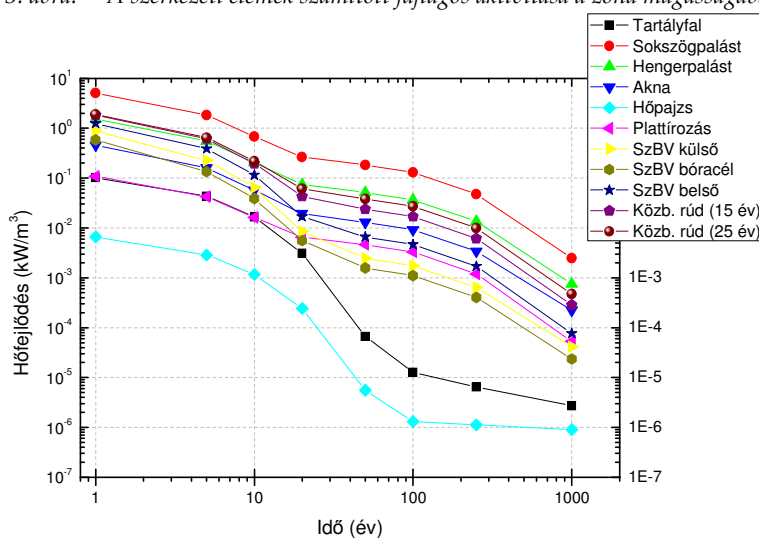
## Az erőmű normál működése során keletkező nagy aktivitású hulladékok

A paksi atomerőmű eddigi üzemeltetése során 2009. december 31-ig összesen  $93 \text{ m}^3$  tárolóteret foglaltak el a nagy aktivitású hulladékok [4]. A nagy aktivitású hulladék tárolására használt csökutakban közepes aktivitású hulladékok is találhatóak – ezek egy része kezdetben nagy aktivitású volt, de a többéves tárolás során aktivitásuk lecsökkent. Az erőmű szakemberei azzal számolnak, hogy minden évben  $5 \text{ m}^3$  tárolóterben elhelyezhető mennyiségű nagy aktivitású hulladék keletkezik és az évente termelő hulladék-mennyiség a jövőben változatlan marad.

A nagy aktivitású hulladékok kezelésére az erőműben készült koncepció szerint a leszerelésig az atomerőmű telephelyén tárolják ezeket a hulladékokat, és leszereléskor a többi nagy aktivitású hulladékkal együtt kezeli, illetve helyezi el az RHK Kft. az akkorra üzemelő végleges tárolóban [4]. A nagy aktivitású hulladéklerakó létesítése még nem kezdődött meg, és a nagy aktivitású hulladékokra vonatkozó átvételi követelményrendszert sem határozta meg az RHK Kft.



3. ábra: A szerkezeti elemek számított fajlagos aktivitása a zóna magasságában



4. ábra: Fajlagos hőfejlődés a számított szerkezeti elemekben

A csőutakban tárolt hulladékok izotópozsetteléről csak közelítő adatok állnak rendelkezésre. A nagy aktivitású hulladékok aktivitástartalmának ismerete az RHK Kft. részére történő átadáshoz mindképpen szükséges lesz, ezért hosszabb távon (2030-2035) ennek meghatározására az erőműben előkészületek kezdődtek. Valószínűsíthető, hogy a jelenleg – dózisteljesítményük alapján – nagy aktivitásúnak tekintett hulladékok jelentős részét néhány éves vagy évtizedes pihentetés után akár a bátaapáti telephelyen is el lehet helyezni, mint kis vagy közepes aktivitású hulladékot. Az elhelyezés szempontjából kulcskérdés lesz a hosszú felezési idejű izotópok mennyisége az egyes komponensekben, valamint integrális mennyiségük az összes hulladékban.

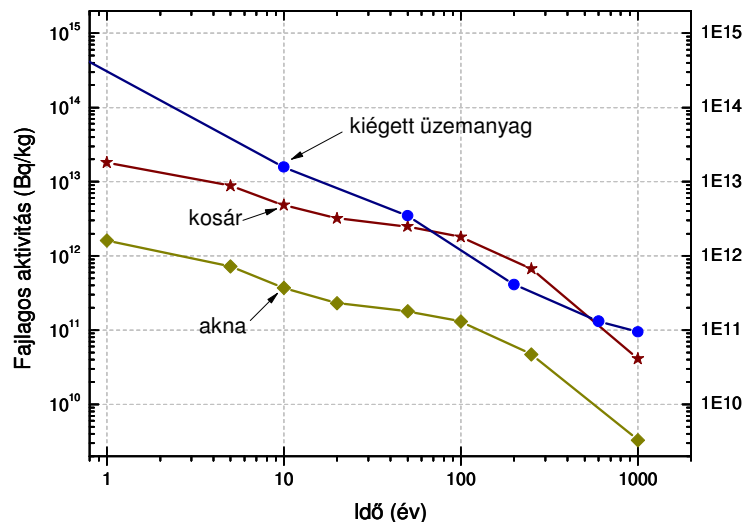
## A 2. blokki sérült üzemanyagból származó hulladékok

A 2. blokki sérült üzemanyagból az üzemzavar során és a több éves nedves tárolás alatt jelentő mennyiségű hasadási termék, aktinida és urán került ki az 1. sz. akna és a pihentető medence hűtővizébe. A hűtővizbe kikerült aktivitást a különböző szűrők gyűjtötték össze.

A 2. blokki elhárítás során keletkezett hulladék kb. 72 kg uránt tartalmaz. Ebben a tömegben 2-3%-os dúsítással számolva 1,5-2,0 kg <sup>235</sup>U lehet és nem elhanyagolható az üzemanyaggal együtt kioldódott plutónium mennyisége sem. A bátaapáti telephely nem tudja befogadni ezt a hulladékot, mivel annak hasadóanyag tartalma meghaladja az 1 kg-ot.

## Következtetések

A radioaktív hulladékokat a hazai gyakorlat szerint különböző paraméterek alapján tekintik nagy aktivitásúnak az erőműben, a szabványban, illetve a végleges elhelyezés szempontjából. Az erőműben nagy aktivitásúként kezelt hulladékok jelentős része kis és közepes aktivitású hulladékokra tervezett lerakóban is elhelyezhető lesz. Ugyanakkor az erőműben jelenleg közepes vagy kis aktivitású hulladékok között lehetnek olyanok, amelyeket – a bennük található hosszú felezési idejű, vagy α sugárzó izotópok koncentrációja miatt – nem fogadhat be a kis és közepes aktivitású hulladékok lerakója. További problémát jelent a hulladékokban található hosszú felezési idejű (<sup>94</sup>Nb, <sup>99</sup>Tc és <sup>129</sup>I) és α sugárzó izotópok (aktinidák), valamint hasadóanyag össz mennyisége – mivel a kis és közepes aktivitású hulladékok telephelyén ezek mennyisége integrálisan is korlátozva van.



5. ábra: A kiégett üzemanyag, a kosár sokszögpalástja és az akna fajlagos aktivitása

A paksi körülményekre végzett előzetes számításaink alapján elmondható, hogy a tartálynak a zónához közeli szegmense ugyan erősen felaktiválódik, de a képződő radioaktív izotópok többsége rövid felezési idejű. Számításaink alapján a reaktor felaktiválódott szerkezeti elemeit tíz év pihentetés után a hőtermelés szempontjából nem kell nagy aktivitású hulladéknak tekinteni. A kezdeti aktivitást a rövid felezési idejű <sup>55</sup>Fe (2,74 év), <sup>51</sup>Cr (27,7 nap) és <sup>60</sup>Co (5,27 év) izotópok adják. A felaktiválódott szerkezeti elemek hosszú ideig aktívak maradnak a <sup>93</sup>Mo (4000 év) és <sup>59</sup>Ni (76 000 év) izotópok jelenléte miatt. A <sup>59</sup>Ni teljes mennyisége egy blokk szerkezeti elemeiben számításaink szerint legalább kétszeresen meghaladja a bátaapáti telephelyre megadott integrális <sup>59</sup>Ni aktivitáskorlátot.

Az erőműben a szerkezeti elemeken kívül keletkező nagy aktivitású hulladékok izotóppozitív felmérése a következő években várható. A jelenleg rendelkezésre álló adatok alapján valószínűsíthető, hogy ezeknek az anyagoknak a hőtermelése nem fogja elérni a nagy aktivitású hulladékhhoz tartozó 2 kW/m<sup>3</sup> értéket. Ugyanakkor azzal is számolni kell, hogy – elsősorban a 2. blokki sérült fűtőelemek kezelése során – olyan hulladékok is keletkeztek, amelyek nagy mennyiségű hasadóanyagot tartalmaznak, ezért nem lehet őket Bátaapátiba szállítani. A hulladékokban található hosszú felezési idejű és  $\alpha$  sugárzó izotópok mennyisége további korlátozást jelent.

A kiégett üzemanyag fajlagos aktivitása néhány év pihentetés után jelentősen magasabb, mint az egyéb nagy aktivitású hulladékoké. Száz év pihentetés után azonban már a legjobban felaktiválódott szerkezeti elemek (ilyen a kosár sokszögpalástja) már hasonló, vagy akár nagyobb fajlagos aktivitással is rendelkezhetnek, mint a kiégett üzemanyag (5. ábra). A kiégett üzemanyag azonban – a benne található  $\alpha$  sugárzó izotópok miatt – jóval nagyobb potenciális egészségkárosító hatással rendelkezik, ezért végleges elhelyezése is nagyobb körültekintést igényel.

A leszerelési és üzemviteli nagy aktivitású hulladékok számára valószínűleg kevésbé szigorú feltételekkel (például kisebb mélységben) is lehet majd lerakót létesíteni a kiégett üzemanyaghoz képest. A tervezéskor tekintettel kell lenni az elhelyezendő hulladék típusára, összetételére ( $\alpha$  sugárzók és hosszú felezési idejű izotópok koncentrációjára) és a fontosabb izotópok összes mennyiségére is, és értékelni kell az egyes izotópok migrációs képességét és potenciális egészségkárosító hatását.

Külföldi példák alapján valószínűsíthető, hogy a felaktiválódott acélkomponensek magas <sup>59</sup>Ni (76000 év) és <sup>93</sup>Mo (4000 év) tartalma miatt nem feltétlenül szükséges mélygeológiai lerakót létesíteni hazánkban sem, hanem elfogadható megoldás lehet a felszínhez közeli végleges elhelyezés is.

## Irodalomjegyzék

- [1] *Selecting Strategies for the Decommissioning of Nuclear Facilities, Status Report, Radioactive Waste Management OECD 2006, NEA No. 6038 (2006)*
- [2] *Orbán Otília, Doma Árpád, Elter Enikő: Vegyészeti Évkönyv 2008, Paksi Atomerőmű Zrt., (2009)*
- [3] *Cs. Hegedűs, Gy. Hegyi, G. Hordósy, A. Keresztúri, M. Makai, Cs. Maráczy, F. Telbisz, E. Temesvári, P. Vértes, The KARATE Program System, PHYSOR 2002, Seoul, Korea, October 7-10, 2002*
- [4] *Feil Ferenc: Konceptió - Nagyaktivitású szilárd hulladékok, PA Zrt. (2010)*