

A VÉDŐCSÖBLOKK EMELÉSÉT MONITOROZÓ DOZIMETRIAI MÉRŐRENDSZER ÚJRAKALIBRÁLÁSA

Bujtás Tibor¹, Csurgai József², Kiss Mihály¹, Makovecz Gyula¹, Marusa Andor*¹, Nagy Gábor², Solymosi József², Zsille Ottó²

¹MVM Paksi Atomerőmű Zrt., 7031 Paks, Pf. 71

²SOMOS Környezetvédelmi Kft., 1118 Budapest, Sasadi út 70.

*marusaan@npp.hu

A kézirat beérkezett: 2020.01.16.

Közlésre elfogadva: 2021.05.03.

Recalibration of the monitoring system of the fuel-cassette-free state of the control rod sleeves

Lifting the control rod sleeves (CRS) is one of the initial steps of the refueling of the VVER-400-213 type reactor, which are operating at Paks NPP. If any fuel-cassette adheres to the CRS during its lift, it can result in unplanned exposure of the workers.

The recalibration was necessary, because the first calibration of the monitoring system had been implemented 20 years ago, and Paks NPP had changed the fuel cycle from 12 months to 15 months. The task was performed under the refueling outage of unit 1 in 2018.

This work provides an overview about the completed tasks and the evaluation of the measurement data.

Keywords: Control rod sleeves, fuel-cassette, calibration

A védőcsőblokk (VCSB) kiemelése a reaktorból a VVER-440-213 típusú reaktorok esetében az üzemanyag átrakás kezdő lépései közé tartozik. Ha az emelés során fűtőelem kazetta tapad fel a VCSB-re, az a dolgozónál jelentős dózisznövekedést eredményezne.

A felpadot fűtőelem kazetta monitorozására kifejlesztett rendszer csaknem 20 éve történt első kalibrációja óta eltelt idő, valamint az új, 15 hónapos kampányban működő zóna miatt szükségessé vált az ismételt kalibrálás. A feladatot 2018-ban az 1. blokk leállása alatt, a zóna átrakási időszakban végzett mérések alapján végeztük el.

Jelen munka áttekintést ad az elvégzett feladatokról és a kapott adatok kiértékeléséről.

Kulcsszavak: védőcsőblokk, fűtőelem, kalibrálás

BEVEZETÉS

A védőcsőblokk (VCSB) kiemelése a reaktorból a VVER-440-213 típusú reaktorok esetében az üzemanyag átrakás kezdő lépései közé tartozik. A VCSB funkciója a kazetták felülről történő pozicionálása, valamint megvezeti az abszorbens, szabályozó és biztonságvédelmi célokat szolgáló rudakat. Ha az emelés során fűtőelem kazetta tapad fel a VCSB-re, és azt felső szállítási helyzetbe hoznánk, akkor a fűtőelem köteg kiemelésre kerülne, a VCSB visszarakása lehetetlenné válna, ezen kívül a dolgozónál jelentős dózist eredményezne.

A VCSB fűtőelem kazetta mentességének ellenőrzésére a PA Zrt. Dozimetriai Üzeme kifejlesztett egy dózisteljesítmény-mérőkön alapuló monitoring rendszert, amely alkalmas volt a zóna közepén lévő pozíciók kivételével arra, hogy egy esetleges felpadás effektusát jelezze. A rendszer továbbfejlesztésébe bevonták 1998–1999-ben a SOMOS Kft-t is, majd a PA Zrt. Sugárvédelmi Osztályával történő együttműködésben kialakult a máig is sikeresen működő monitoring rendszer [1]. A rendszer 2 db hordozható gamma-spektrométert és 4 db gamma-dózisteljesítmény mérőt foglal magába, melyek a hidegági csonkokra szerelve

helyezkednek el.

A rendszer a paksi atomerőmű blokkjainak eredeti kampányának megfelelő fűtőelem kötegei emelési effektusainak detektálására lett tervezve, ezen kívül egy esetleges feltapadás esetén képes volt becslést adni a feltapadt kazetta pozíciójára is [2]. A kalibráció mérési adathalmazának alapját a leállás alatti kazettaemelések dózisteljesítmény mérőkön mért effektusai szolgáltatták, ahol a távolság függvényében – figyelembe véve az acélréteg és a vízréteg gyengítést – regressziós összefüggéssel meg lehetett becsülni a detektor-kazetta távolságot [2],[3]. Itt meg kell jegyeznünk, hogy a feltapadás pozíciójának meghatározása valójában nem is egy kazettára koncentrálódik, hanem a mérést és a számításokat terhelő nagy kumulatív hiba miatt mindig is a kiszámolt pozíció körüli 6-16 kazettát tartalmazó régiót jelentette. A mérőrendszer részét képező gamma-spektrométerek érzékenysége lehetővé tette a zóna közepén levő pozíciókban is az esetleges feltapadás egyértelmű detektálását, amit amúgy a dózisteljesítmény-mérők nem „láttak”[2]. Az új, 15 hónapos kampányban működő zóna esetén a rendszer csak a feltapadás detektálását tudja végrehajtani, a pozíció meghatározását valószínűleg tévesen, vagy a szokásosnál nagyobb hibával képes végezni. A rendszer első kalibrálása óta mintegy 19 év telt el, és a rendszer mérést végző elemeinek jelentős része szükségszerűen kicserélődött, ez óhatatlanul a detektorok hatásfokának változását vonta maga után. Így ismételt kalibrálására szükség volt.

A rendszer újra kalibrálását az 1. blokk leállítását követően, 2018. november 16-21 közötti zóna átrakási időszakban végzett mérések alapján végeztük el.

A zóna átrakás időszakában a monitoring rendszer dózisteljesítmény mérői 222 fűtőelem-kazetta emelését regisztrálták, ebből 19 kazetta emelésére felvettünk gamma-spektrumokat is. A monitoring rendszer ezen kívül, a zónában való fűtőelem mozgások, visszahelyezések nagy részét is regisztrálta mintegy 300 lépés terjedelemben, melyek feldolgozása járulékos információkat biztosíthat az adatkiértékelés fejlesztéséhez.

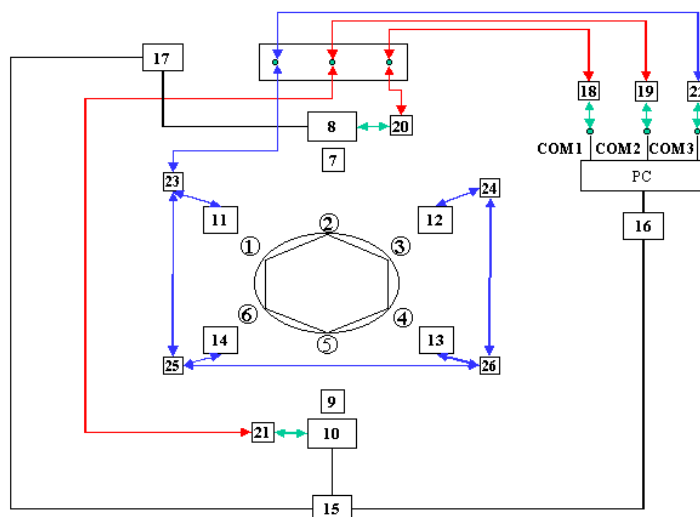
Az emelési dózisteljesítmény effektusok és a felvett gamma-spektrumok adatainak feldolgozásából és kiértékeléséből sikerült pontosítani a rendszer érzékenységét, a zóna egyes detektorokkal való lefedettségének, illetve átfedettségének mértékét, valamint a kollimált gamma-spektrométerek látószögét.

A MONITORING RENDSZER FELÉPÍTÉSE, MŰKÖDÉSE, A VELE SZEMBEN TÁMASZTOTT KÖVETELMÉNYEK

A monitoring rendszer felépítése

A monitoring rendszer vázlatos felépítését az 1. ábra mutatja. Az ábrán lévő számok jelentése a következő

- 1,2,3,4,5,6 - hidegági hurkok,
- 7,9 CANBERRA HPGe detektorok,
- 8,10 CANBERRA INSPECTOR egységek,
- 11,12,13,14 BNS-98 (Gamma Műszaki ZRt.) dózisteljesítmény mérők
- 15,16,17 ~230 V hálózati kábeldobok
- 18,19,20,21 USB-LAN, LAN-USB átalakító egységek,
- 22 RS 232 RS 485 soros vonali átalakító egység,
- 23,24,25,26 BNS-98 - RS 485 soros vonali elosztó egységek.



1. ábra: A monitoring rendszer vázlatos felépítése [2]

A detektorok mérőpozíciójának kialakításakor alapvető szempont volt a zónára történő rálátás a főkeringető vezeték falán keresztül, ahol kevésbé érvényesül a reaktortartály falának nagyfokú gyengítő hatása, ami a dózisteljesítmény-mérők esetében a rálátás szögét is meghatározza. A dózisteljesítmény-mérők az 1., 3., 4. és 6. hurkokon, jó közelítésben, egymásra derékszögben helyezkednek el (12-134. ábra). A gamma-spektrométerek esetében ezen kívül a kollimátor az, ami egyrészt a rálátást korlátozza, másrészt, az intenzív sugárzási térből származó szórt sugárzás nagyfokú holtidő-növelő hatását kompenzálja.

A 2. ábra mutatja monitoring rendszer mérési pozícióját a csonkzónában, a főkeringtető vezetékek hidegágára szerelve.

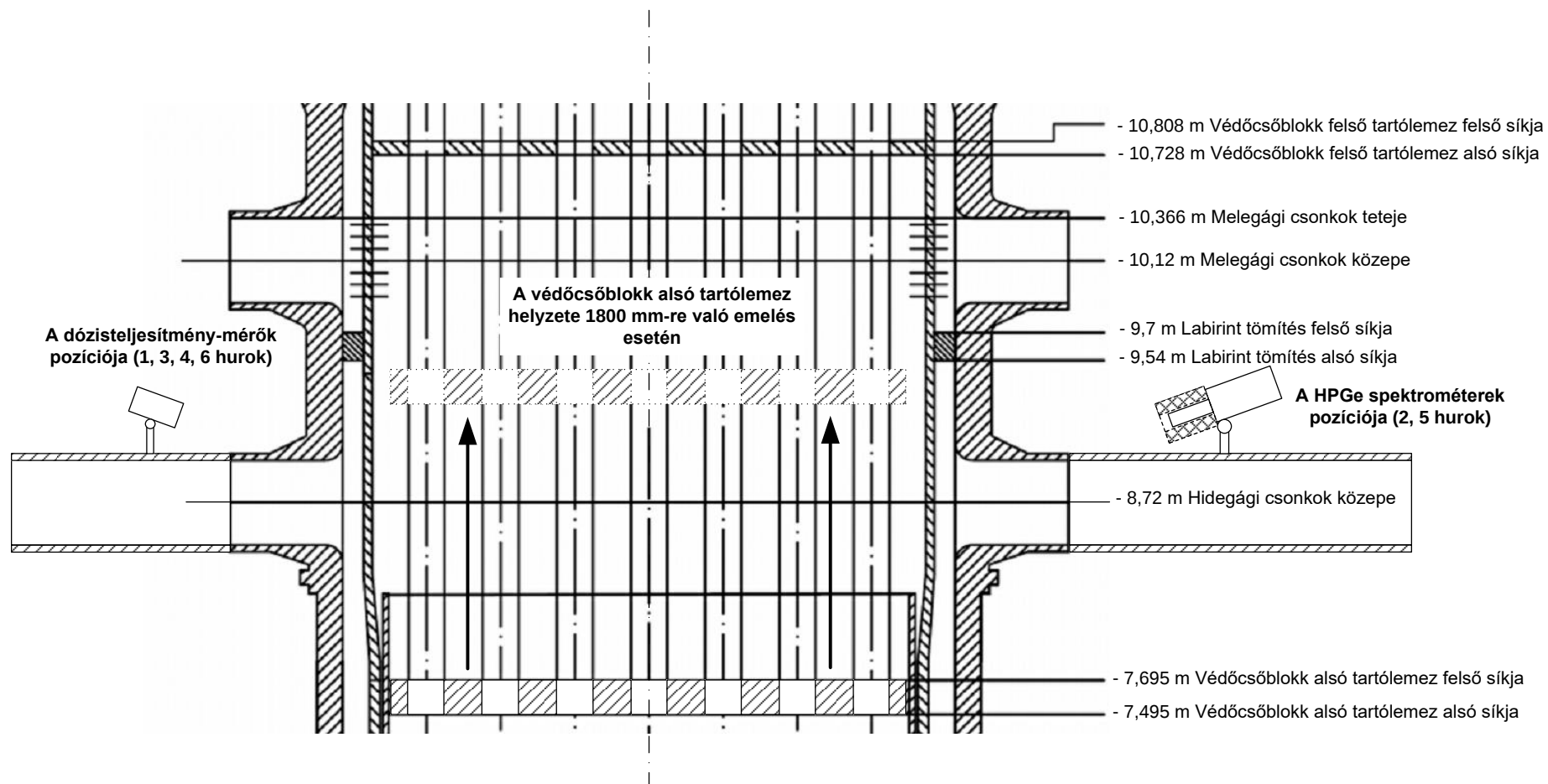
A rendszer működése

A rendszer két, egymással párhuzamosan mérő alrendszert foglal magában:

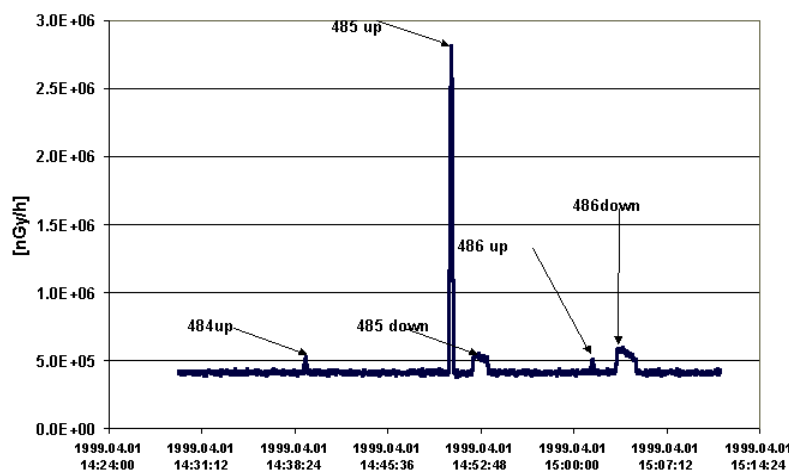
- dózisteljesítmény mérő;
- gamma-spektrometriás alrendszer.

A dózisteljesítmény mérő alrendszer működése

Az egyes kazetták felemelésekor fellépő többletsugárzás mérhető az eleve magas háttérben is. A 2-es blokk átrakása során, 1998 áprilisában elvégzett tesztek bizonyították, hogy a zóna közepében található 19 kazetta kivételével a dózisteljesítmény mérők érzékenysége elegendő az emeléskor képződő csúcsok regisztrálására, a 3. ábra alapján:



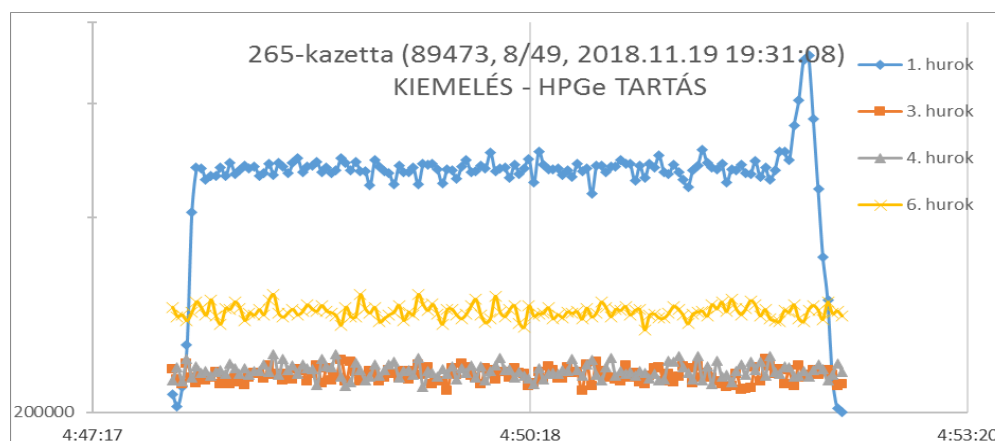
2. ábra: A monitoring rendszer mérési pozíciója a csomkózónában, a főkeringtető vezetékek hidegágára szerelve



3. ábra: Kazetta emelés regisztrálása A diagramon látható effektusok azonosítása az átrakógép kartogram lépésszáma szerint történt. Természetesen, az adott lépésszámon megemelt kazetta pozíciójának ismeretében az emelési kartogram alapján vissza lehet követni a kazetta mozgását

Az egyes emelések különböző amplitúdója az adott fűtőelemek eltérő távolságától, a közbeeső acél és vízréteg vastagságától függ.

Négy gamma-dózisteljesítmény mérő detektor a hidegági hurkokra történő szerelése biztosítja, hogy az aktív zóna, a középső 19 kazetta kivételével kellő átfedéssel figyelhető, vagyis az egyes fűtőkötegek felemelését egyidejűleg két detektor is regisztrálja, és a regisztrált effektusok egymáshoz való viszonyából következtetünk a fűtőelemköteg és az egyes detektorok közötti távolságra, végső soron annak koordinátájára a klasszikus háromszögélés módszerével. A tesztmérések feldolgozatlan, nyers adatait a 4. ábra mutatja.



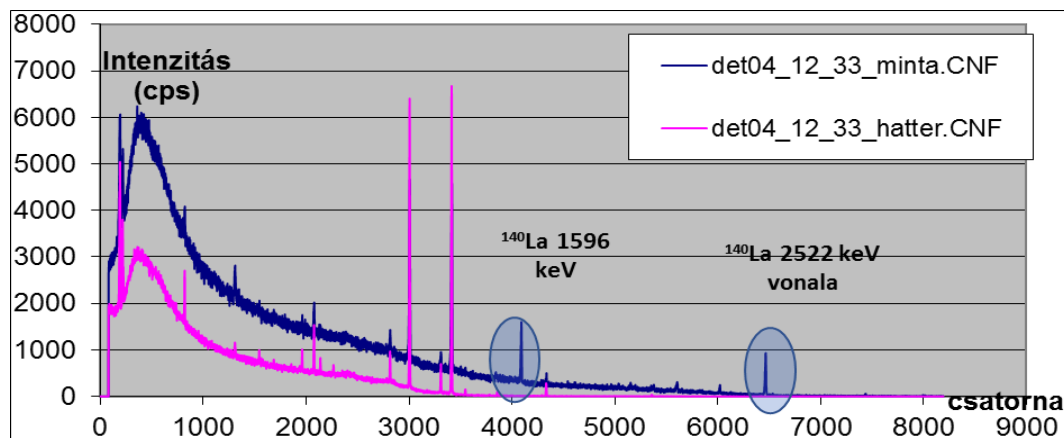
4. ábra: Egy megemelt kazetta okozta effektus, a gamma-spektrum felvételének ideje alatt, a diagram végén látható növekmény az 1. hurkon a kiemelés folytatása, a kazetta itt jobban látszik

A gamma-spektrometriás alrendszer működése

A két HPGe detektor a 2. és 5. hidegági hurokra telepítve, ólom kollimátorban elhelyezve és 20°-os szögben megdőntve van pozícionálva a zóna közepére úgy, hogy az 1800 mm-re megemelt VCSB esetén rálásson a zónára, illetve az esetlegesen felemelt kazettára. A

spektrumok feldolgozása során, ahogyan az előzőekben már említésre került, a kiértékelt szignifikáns csúcsok intenzitásai vissza lettek számolva az első spektrum felvételének időpontjára, mint referencia időpontra.

Kazetta feltapadás esetén szignifikánsan megjelennek a spektrumban a ^{140}La nagyenergiájú (1596 és 2522 keV) vonalai (5. ábra), amelyek soha nem láthatóak abban az esetben, amikor a kazetták a helyükön, a tartórácsban helyezkednek el:



5. ábra: A 12-33-as pozícióban megemelt kazetta okozta változás a gamma-spektrumban, a háttérpektrumhoz képest

Az azonos csúcsok különböző detektorokon mért intenzitás arányai, valamint az egyes detektorok mért különböző csúcsok egymáshoz viszonyított intenzitás arányainak változása a feltapadt kazetta pozíciójának a függvénye, mivel a gamma-sugárzás lineáris gyengítése energiafüggő folyamat. A nagyenergiájú csúcsok intenzitása, valamint áthatolóképesége lehetővé teszi, hogy a HPGe detektorok átlássanak a zóna középső régióján és így a zóna közepe, valamint az adott detektortól távolabb eső régiók, a kollimátor által biztosított látószög függvényében biztosan monitorozhatók.

A MÉRÉSEK VÉGREHAJTÁSA

A program végrehajtása 2018. november 16-21 között, az 1.blokk 35. kampányának főjavítása alatt történt. A rendszer telepítése után 30 perces háttérrel ellenőriztük a rendszer állapotát.

Az átrakás megkezdésével egy időben indítottuk a dózisteljesítmény mérők szoftverét, ami a teljes átrakás alatt folyamatosan rögzítette a dózisteljesítmény értékeket.

Az előre egyeztetett 19 kazetta pozíciónál 1 perces gamma-spektrum felvétel történt a félvezető detektorokkal.

A fűtőelem kazettamozgatások pontos időpontját a vezető átrakógép operátor rögzítette.

A MÉRÉSI ADATOK KIÉRTÉKELÉSE

A dózisteljesítmény-mérők effektusainak kiértékelése

A dózisteljesítmény-mérők adatainak kiértékelésekor egy egyszerű módszert követtünk és az alkalmazott összefüggésekben az alábbi paramétereket alkalmaztuk:

E	Az effektus nGy/h-ban mért átlagértéke
$E_{\max}$	Az effektus nGy/h-ban mért maximális értéke
P_i	Az effektus intervallumában mért pillanatnyi dózisteljesítmény

	értékek (nGy/h)
n	Az effektushoz tartozó értékek száma
i_e	Az effektus első dózisteljesítmény értékének indexszáma
$H_{1,2}$	Az effektus előtti és utáni háttér nGy/h-ban mért értéke
$sd_{1,2}$	Az effektus előtti és utáni háttér standard deviációjának nGy/h-ban mért értéke
P_{cal}	A kalibrációs függvényhez használt érték, a maximális effektusból és a két háttérből képezve (nGy/h)

A módszer lépései az alábbiak:

- az átrakógép-operátorokkal folyamatosan egyeztetett és pontosított kartogram alapján meghatároztuk az adott effektushoz tartozó kazetta mozgási idő- és adatintervallumot, vagyis az emelési effektushoz tartozó adatpontok számát (n), illetve az effektushoz tartozó első dózisteljesítmény érték indexét (i_e);
- az effektus intervallumában a dózisteljesítmény értékekből átlagot képeztünk (E) és meghatároztuk a maximális értéket (E_{max});

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{e+n} P_i}{n} \quad (1)$$

- az effektus előtti és utáni háttér értékekből, az effektus intervallumának háromszorosából átlagokat (H_1 , H_2) és standard deviáció értékeket (sd_1 , sd_2) képeztünk:

$$H_1 = \frac{\sum_{i=1}^{i_e-1} P_i}{3n} \quad (2)$$

$$sd_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i_e-1} (P_i - H_1)^2}{3n-1}}$$

$$H_2 = \frac{\sum_{i=i_e+n+1}^{i_e+4n+1} P_i}{3n} \quad (3)$$

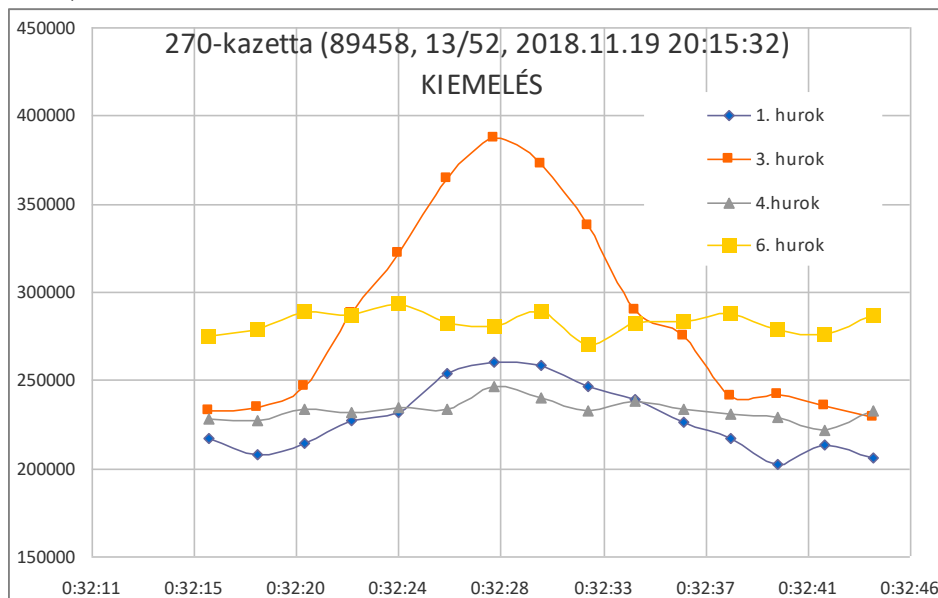
$$sd_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=i_e+n+1}^{i_e+4n+1} (P_i - H_2)^2}{3n-1}}$$

- az effektusnak az adott hurokról való mérhetőségéhez két feltétel egyidejű teljesülése szükséges. A későbbiekben ez lesz a kazetta felpadása detektálásának kritériuma is. A két feltétel az effektus előtti, illetve utáni háttérnek, az effektushoz való viszonyát vizsgálja. A feltétel teljesül, ha az effektus és a háttér különbsége nagyobb, mint az adott háttérhez tartozó standard deviáció háromszorosa. Ehhez az adott effektus átlagértékéből és az effektus előtti, valamint utáni háttér értékeiből különbségeket képeztünk, eldöntöttük, hogy az adott effektus egy adott hurokra telepített műszeren mérhető-e:

$$E - H_{1,2} > 3sd_{1,2} \quad (4)$$

- a kalibrációs függvényhez, ha az effektus a kritériumot kielégítette, a maximális effektus és a két háttér különbségének az átlagát használtuk:

- $$P_{cal} = \frac{2E_{max} - H_1 - H_2}{2} \quad (5)$$
- Az alábbi diagramon (6. ábra) láthatjuk az egyik mért kazetta kiemelését és az effektus kiértékelésének lépéseit és számszerű adatait tartalmazó táblázatot (1. táblázat).



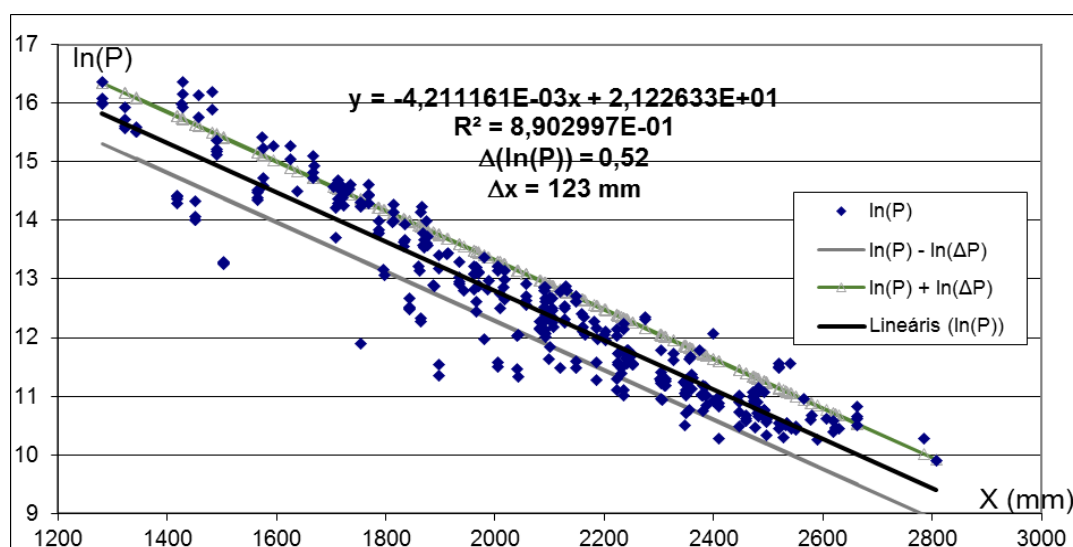
6. ábra: A 13/52-es kazetta kiemelési effektusának dózisteljesítmény-mérési adatai a monitoring rendszeren

1. táblázat. Sávhatárok: A 13/52-es kazetta emelési effektusának kiértékelése

BNS	1 (90001)			2 (90002)			3 (90003)			4 (90007)		
Hurok	1			3			4			6		
	H ₁	E	H ₂	H ₁	E	H ₂	H ₁	E	H ₂	H ₁	E	H ₂
	205136	228255	205717	225557	286729	227352	230020	233101	231205	281880	282831	284313
E _{max}		260210			387030			246540			293250	
ΔP ₁	E-H ₁	23119			61171			3081			951	
ΔP ₂	E-H ₂	22538			59377			1895			-1482	
ΔP ₃	E _{max} -H ₁	55074			161473			16520			11370	
ΔP ₄	E _{max} -H ₂	54493			159678			15335			8937	
ΔP		54783			160575			15927			10153	
sd ₁		3934			6479			6508			8211	
sd ₂		5130			5312			5247			9559	
ΔP ₁ > 3sd ₁		11317			41735			-16443			-23683	

A kiemelések effektusainak feldolgozott és kiértékelt adatait rögzítettük és meghatároztunk egy regressziós függvényt, amit egy adott effektust mért dózisteljesítmény mérőtől való

távolság becslésére lehet alkalmazni, valamint annak hibáját (7. ábra)



7. ábra: A mért dózisteljesítmény értékek távolságfüggése

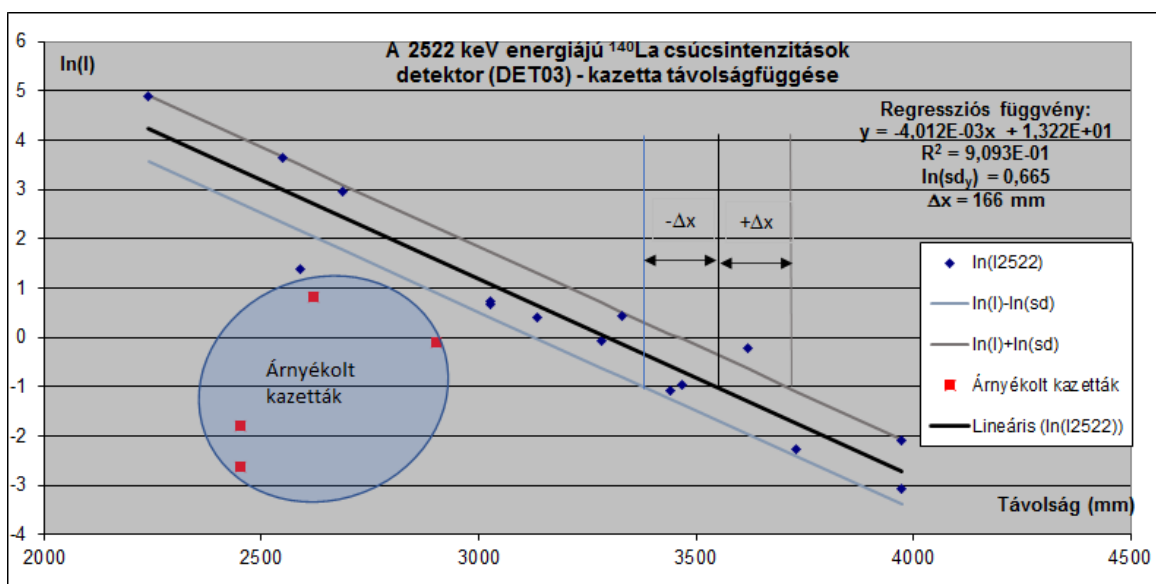
A középső régióban látható viszonylag kis effektusoknak oka a detektor és az adott pozíció között, a reaktortartály görbületevel növekedő acélfal gyengítő hatásában keresendő, míg a diagram két szélénél a regressziós egyenes felett található kazettákat az aktuális detektor nagyjából „szemben” látja.

A gamma-spektrométerek adatainak kiértékelése

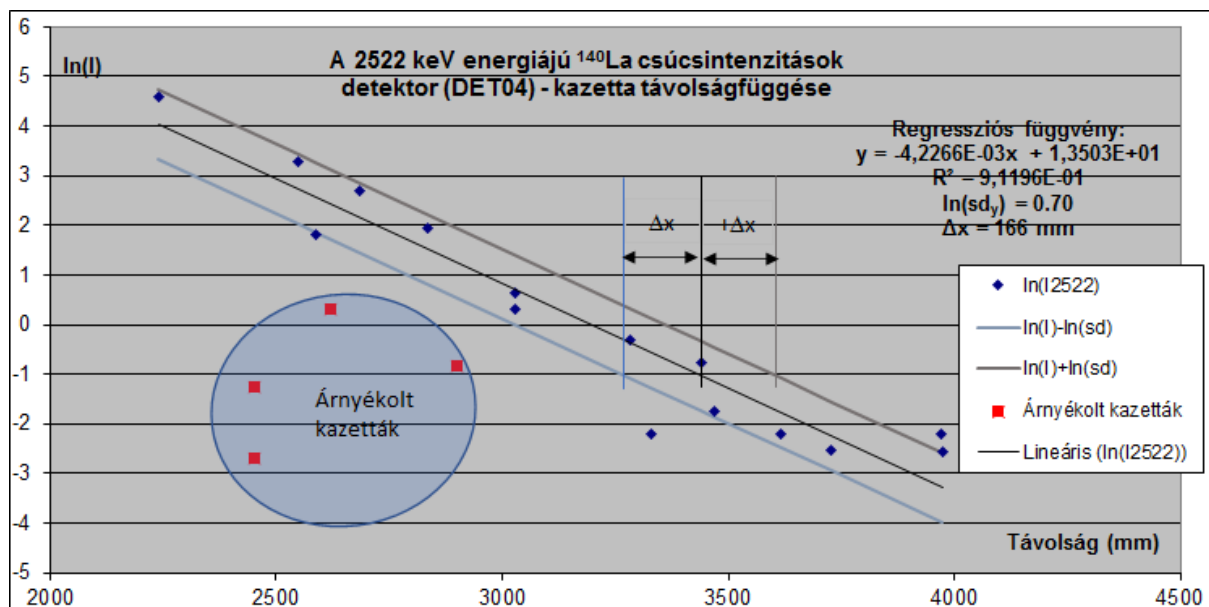
A kiértékelés során a felvett γ -spektrumok ^{140}La csúcsintenzitásait vizsgáltuk a megemelt kazetta és a detektor közötti távolság függvényében. Mint már említettük, a lantáncsúcsok megjelenése önmagában is egyértelműen kazetta feltapadásnál jelenik meg, tehát feltapadás-indikátorként fogadjuk el. Ezenkívül, az acél- és vízréteg okozta csúcsintenzitás változása lehetőséget ad a feltapadás pozíciójának meghatározott hibával történő becslésére is. Az értékelés során arra kerestük a választ, hogy a mérési adatokból felállított regressziós függvény alkalmazásával, hasonló módon a dózisteljesítmény-mérőknél alkalmazott módszerhez, milyen hibával vagyunk képesek megbecsülni a feltapadt kazetta pozícióját. Az alábbi diagramokon (8. ábra és 9. ábra) a ^{140}La 2522 keV-es csúcsának távolságfüggését ábrázoltuk. Azért nem az 1596 keV-es csúcs távolságfüggését jelenítettük meg, mert a nagyobb energiájú csúcs áthatolóképessége nagyobb, és kisebb szórást eredményezett a feldolgozás során. Amúgy teljesen analóg képet mutat, csak a 2522 keV-es csúccsal megbízhatóbb dolgozni. Mellesleg, furcsán hangzik ez akkor, ha figyelembe vesszük, hogy a két energia hozam aránya majdnem 28-szoros a kisebb energia javára!

Ezen az ábrán látható, hogy a regressziós függvény körüli statisztikus szórás értéke 166 mm volt mind a két spektrométer esetében. Mivel ez összemérhető a kazetták méretével, így gyakorlatilag egy adott pozícióra, és a körülötte lévő kazettákra korlátozódhat az értékelés.

Egyes esetekben nem működik a regressziós függvény alkalmazása, és most itt azon kazettákra utalunk, ahol a spektrométerek ugyan jeleztek lantáncsúcsot, azonban az emelés pozíciója a detektor rálátását már a kollimátoron keresztül tette lehetővé, ezáltal a távolsághoz képest igen gyenge effektust érzékeltek. Itt a lantáncsúcsok csak, mint feltapadás-indikátorok szerepelnek, azonban ezek a pozíciók már rendre két-két szomszédos dózisteljesítmény-mérő látószögébe esnek, így a pozíció meghatározást azok effektusai alapján végezzük.

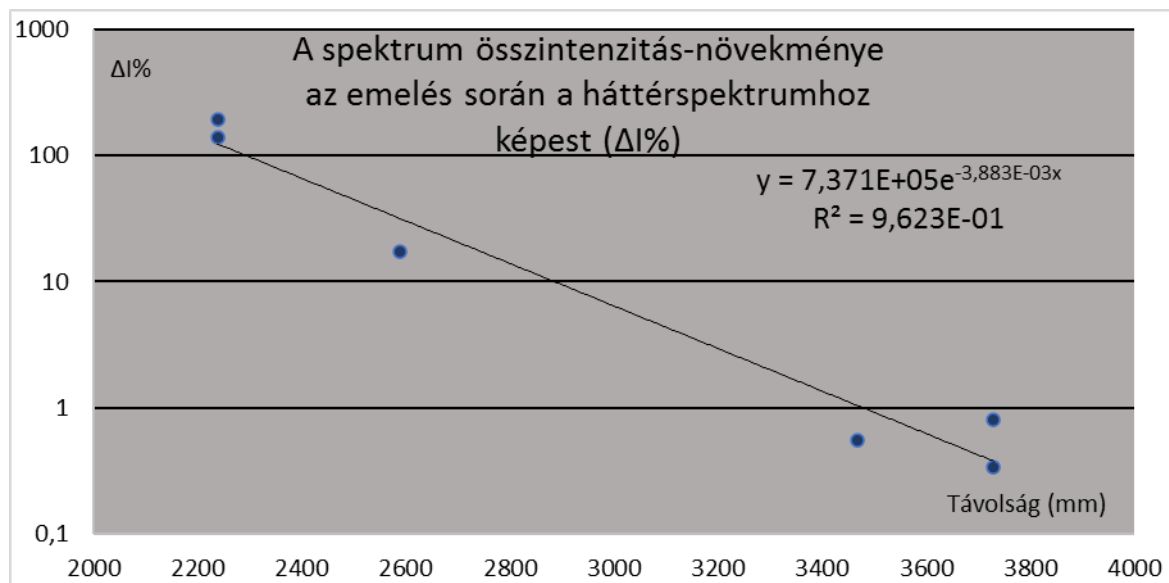


8. ábra: A DET03-as HPGe detektor (2. hurok) csúcsintenzitás-távolság függvénye



9. ábra: A DET04-as HPGe detektor (5. hurok) csúcsintenzitás-távolság függvénye

A spektrumok kiértékelésénél továbbá kérdés volt az is, hogy a háttér spektrumhoz képest hogyan változik a spektrum összintenzitása az emelés során. Sajnos, a mérések során a spektrumok felvételénél nem mindig volt lehetőség háttérrel mérni, hiszen az azt feltételezte, hogy a zóna „nyugalomban” van 100 s időtartamig, így csak 6 esetben tudtunk a „mintaspektrumhoz” háttér spektrumot is mérni, ezek összintenzitás-távolságfüggését a 10. ábra mutatja be.



10. ábra: A DET04-as HPGe detektor (5. hurok) csúcsintenzitás-távolság függvénye

Mindazonáltal az összintenzitás változása is a várakozásnak megfelelően alakult, szignifikánsan megnövekedett, ha olyan pozícióban történt az emelés, ahol a nagyobb energiájú lantáncsúcs is egyértelműen megjelent. Vagyis, megfordítva az állítást, ha a háttérpektrumhoz képest, az emelés során a spektrum összintenzitásának szignifikáns növekményét tapasztaljuk, az önmagában is a kazetta feltapadást jelenti, tehát feltapadás indikátorként fogadjuk el. Szignifikáns növekménynek meg önkényesen a spektrum összintenzitásának 5 %-os növekményét határoztuk, mivel ez egyértelműen, csakis a feltapadt kazetta járulékos sugárzásából fakad. Ha a spektrum összintenzitás-indikátora feltapadást jelez, ez mindenképpen együtt fog járni a lantáncsúcsok megjelenésével is.

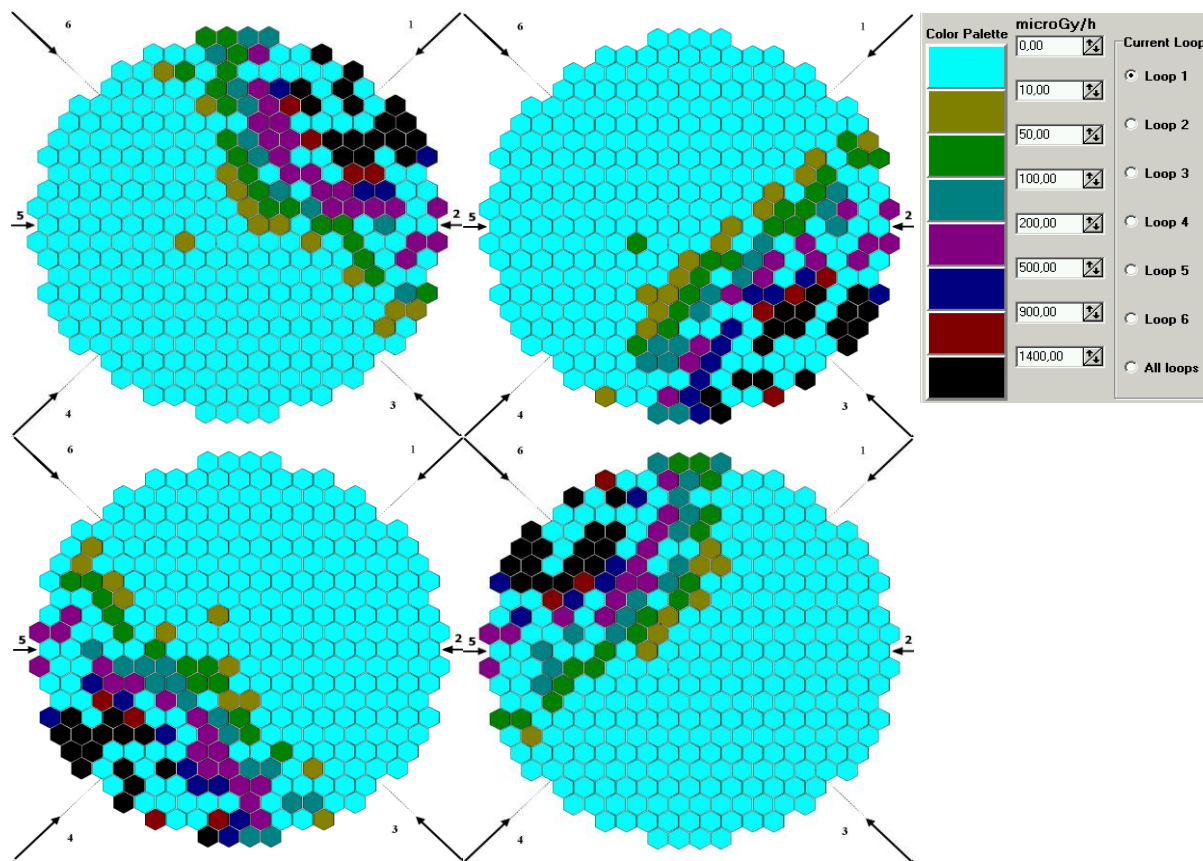
Itt most tennünk kell egy fontos megjegyzést. Felmerülhet a kedves olvasóban, hogy az emelési effektusok kiértékelésénél vajon miért nem vesszük figyelembe a kazetták különböző kiégettségi fokát, hiszen attól függően pl. a dózisteljesítmény egy adott távolságon mérve két-háromszoros, akár négyszeres eltérést is eredményezhet? A kézenfekvő válasz egyszerűen: csak. Ha nem akarjuk ilyen egyszerűen lezárni ezt a kérdést, akkor megpróbáljuk néhány pontban kifejteni:

- A válasz egzakt matematikai megközelítése ott van elrejtve a fentebb tárgyalt detektor-kazetta távolságfüggvény regressziós összefüggéseiben: a szórásértékek a különböző detektorokkal mért effektusoknál 123-167 mm-es tartományba esnek, ami összemérhető a kazetták méretével. Kétszeres szórás (vagyis a regressziós görbétől eggyel jobbra, és eggyel balra) a regressziós összefüggéseknél 1,2-1,5 nagyságrendi változást jelent mind a dózisteljesítményekben, mind a csúcsintenzitásoknál és mind a spektrum összintenzitás változásánál. Ez azt jelenti hogy egy pozícionyi távolságot tévedhetünk az esetek túlnyomó többségénél. És mi van, ha két pozíciót tévedünk? Semmi. Statisztika.
- A válasz gyakorlati megközelítése még egyszerűbb: amikor VCSB emelés folyik, és effektust jelez a rendszer, a legfontosabb, hogy az effektus feltapadást jelent. Arra nincs lehetőség, meg persze szükség sem, hogy az operátor kartogrammot böngésszen, ami nem a boxban van ott nála, hanem az átrakógép operátorainál, a csarnokban. A pozíció meghatározását terhelő hiba, amit a fentiekben tárgyaltunk, kumulatív és már tartalmazza a kazetták különböző kiégettségi fokából származó anomáliáit. Tehát az eredmény valójában egy kazetta pozíció mint a legvalószínűbb eset, illetve a körülötte lévő másik valószínű hat, kivéve az adszorber pozícióját.

AZ AKTÍV ZÓNA „LÁTHATÓSÁGA” – A DÓZISTELJESÍTMÉNY MÉRŐK ÉS A GAMMA-SPEKTROMÉTEREK ÁLTALI LEFEDETTSÉGE

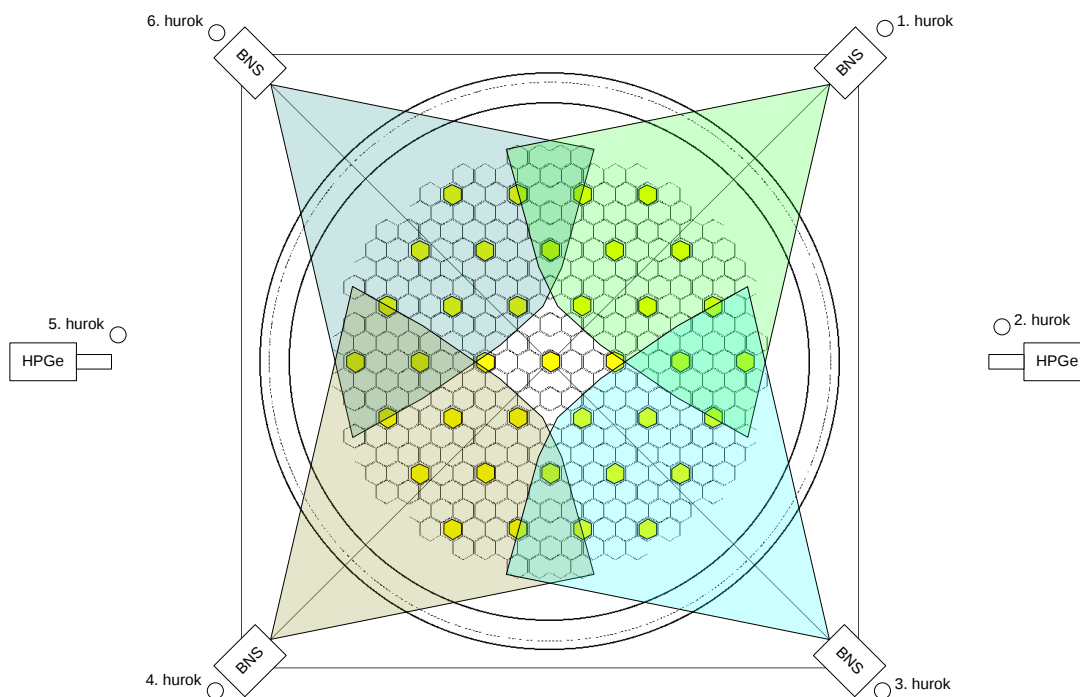
A dózisteljesítmény-mérők adatai által lefedett kazetta pozíciók

Összességében, az aktív zóna az emelési effektusok maximuma alapján a BNS dózisteljesítmény-mérők által gyakorlatilag teljes egészében látható, ahogyan a 11. ábra szemlélteti.



11. ábra: A mért emelési effektusok megoszlása a BNS-dózisteljesítmény-mérők között. Látható a zóna nagyfokú át- és lefedettsége a dózisteljesítmény-mérők által, valamint az is, hogy a középső pozíciók éppen az alsó méréshatáron vannak.

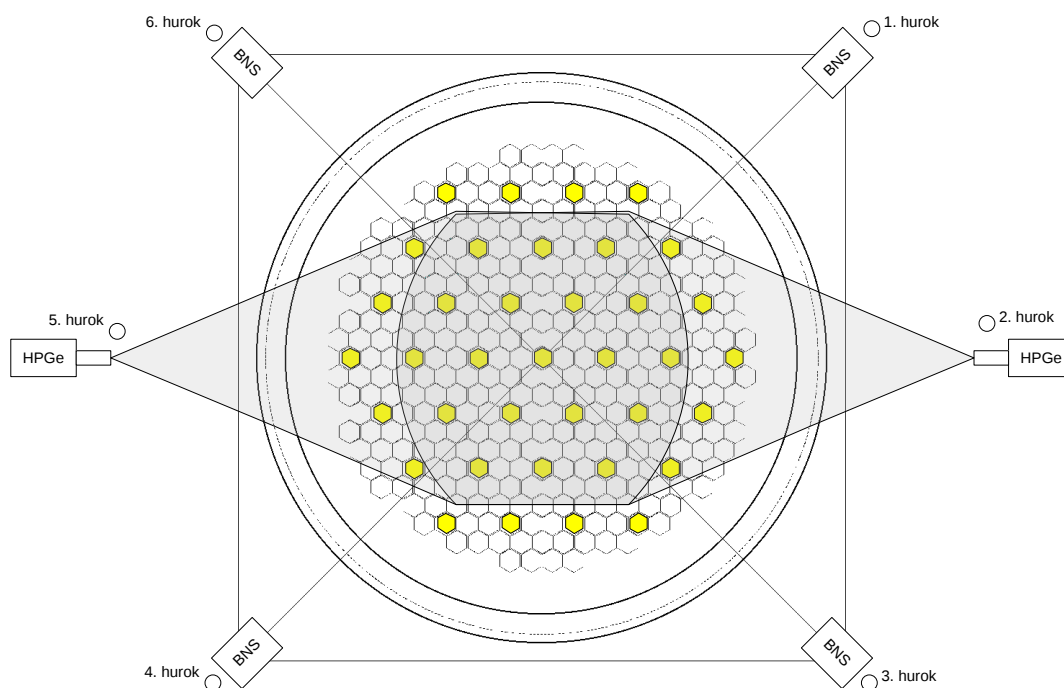
Mivel az effektusok kiértékelésénél az egyes kazetta pozíciókban a maximumokat vettük figyelembe, a továbbiakban konzervatív megközelítést kell alkalmaznunk, vagyis a méréshatáron levő pozícióktól a detektorokhoz egy pozícionyi távolsággal közelebbi határon kell megállapítanunk az egyes detektorokkal történő láthatóságot. Így a középső hat kazetta pozíció (12-41, 11-42, 11-44, 12-45, 13-44, 13-42) a BNS dózisteljesítmény-mérőkkel nem látható, a körülöttük lévő pozíciók (12-39, 11-40, 10-41, 10-43, 10-45, 11-46, 12-47, 13-45, 14-45, 14-43, 14-41, 13-40) pedig valószínűleg a méréshatáron lesznek, azonban a zóna többi része minimálisan egy, vagy két dózisteljesítmény mérővel biztosan lefedett. A dózisteljesítmény-mérőkkel összességében minimálisan lefedett területet a 12. ábra mutatja.



12. ábra: Az aktív zóna BNS-dózisteljesítmény-mérők általi láthatósága

A HPGe gamma-spektrométerek által lefedett régiók

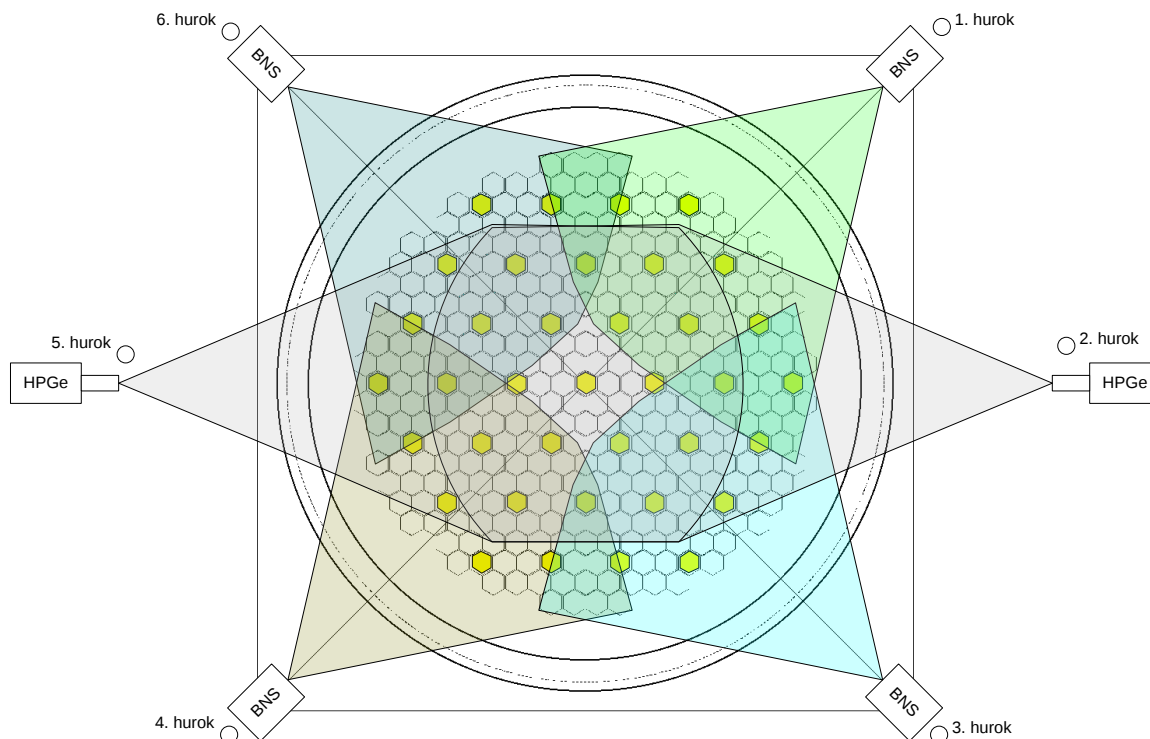
A 13. ábra lapján megfigyelhető, hogy a BNS detektorok által nem látható hat kazetta pozíció és a körülöttük lévő pozíciók is jól mérhetőek a félvezető detektorokkal. Szintén jól kivehető a kollimátorok által leárnnyékolt térrész.



13. ábra: Az aktív zóna HPGe gamma-spektrométerek által „látható” régiója, a látószöget döntően befolyásolja a kollimátor

ÖSSZEFOGLALÁS

A 14. ábra összefoglalva mutatja a kapott eredményeket. Látható, hogy a hidegágra telepített négy dózisteljesítmény-mérőből és két félvezető spektrométerből álló konfiguráció minden kazetta pozícióra lefedettséget nyújt.



14. ábra: A BNS és HPGe detektorok által lefedett területek

Most foglaljuk össze azt, hogy az átrakás időszakában végrehajtott mérések és az adatok kiértékelése hogyan segíti elő a VCSB emelés monitorozását. Elsőként határozzuk meg az emelés során, egy tetszőleges kazetta feltapadását egyértelműen jelző indikátorokat, hiszen amint a cikk elején említettük, a rendszer alaprendeltetése, hogy a VCSB emelésnél az esetleges kazetta-feltapadást egyértelműen és megbízhatóan jelezze:

Kazetta feltapadás indikátorok

- bármelyik dózisteljesítmény-mérő detektoron mért effektus (függetlenül attól, hogy csak egy, vagy több detektoron jelenik-e meg);
- a gamma-spektrométerek háttérhez viszonyított összintenzitásának szignifikáns növekménye, hasonlóan a ^{140}La csúcsok távolság–intenzitás arányához, a kazetta-detektor távolsággal fordított arányossággal változik, exponenciális képet mutat, ahol az exponens értéke közelebb áll;
- a gamma-spektrométerek spektrumában megjelenő szignifikáns ^{140}La csúcsok (1596 és 2522 keV). Ezek kizárólag a feltapadt/emelt kazettákból származnak.

A kazetta pozíció (érintett régió) meghatározása:

- több dózisteljesítmény-mérő egyidejű effektusa esetén az átfedett régiók alapján;
- két gamma-spektrométer egyidejű mérése esetén a távolság-effektus függvények alapján;

- az egyes dózisteljesítmény-mérőkhöz közel, az aktív zóna szélén található mintegy 22 kazetta, amelyek bár rendkívül intenzív effektust keltenek a dózisteljesítmény-mérőkön, azonban a többi műszer látómezőjéből kiesnek. Itt valószínűleg csak az adott dózisteljesítmény-mérő fog effektust jelezni, ellenben a régióban található összes kazetta feltapadása drasztikus növekményt okoz a háttérhez képest.

A feltapadás indikátorok esetében már egy műszer effektusa, illetve egy spektrum összintenzitás-növekmény is elég a feltapadás tényének bizonyítására. A pozíció meghatározás pontossága az átfedett régiók esetében összemérhető a szomszédos pozíciók közötti távolsággal és a meghatározás kombinált módszerrel történik, az átfedés és a távolság-effektus függvények alapján.

Összeségében elmondható, hogy a mérőrendszer újra kalibrálása sikeres volt. A kapott eredmények alapján az új, 15 hónapos kampányban működő zónában történő valamennyi kazetta feltapadás egyértelműen megállapítható és helyzete megfelelő pontossággal behatárolható.

IRODALOM

- [1] SOMOS Környezetvédelmi Kft.: Kazetta mentesség megállapítására vonatkozó sugárvédelmi ellenőrző módszer és rendszerterv kidolgozása a VCSB kiemeléséhez, 1998
- [2] Csurgai József: Nukleárisbaleset-elhárítás és vegyi katasztrófák összefüggésrendszerének tudományos vizsgálata, PhD értekezés, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, 2002
- [3] J Csurgai; Á Vincze; I C Szabó; G Volent; Á Gujgicz; O Zsille; Gy Plachtovics: New Method for the Monitoring of the Fuel-Cassette-Free State of the Control Rod Sleeves During its Lift, 5th International Nuclear Technology Symposium, Paks, Oct 4-6. 2000.

A pályamű a SOMOS Alapítvány támogatásával készült.