

## A PULZÁLT NEUTRONOK DÓZISTELJESÍTMÉNYÉNEK MÉRÉSE

Deme Sándor\*<sup>1</sup>, Elek Richárd<sup>2</sup>, Pesznyák Csilla<sup>3</sup>, Szűcs László<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest

<sup>2</sup>Nemzeti Népegészségügyi Központ, Budapest,

<sup>3</sup>Országos Onkológiai Intézet, Budapest

<sup>4</sup>BFKH Metrológiai és Műszaki Felügyeleti Főosztály, Budapest

\*deme@aeki.kfki.hu

A kézirat beérkezett: 2021.02.26.

Közlésre elfogadva: 2021.03.23.

### DOSE RATE MEASUREMENTS OF THE PULSED NEUTRONS

*Linear accelerators (LINACs) used in radiation therapy emit fast neutrons as well beside the photon radiation. The radiation is pulsed and it makes the measurement of the neutron component especially difficult, thus traditional neutron dose rate measuring instruments could not be used. In our present publication we describe the methods and instruments suitable for the dose rate measurement of pulsed neutrons and the challenges of their legal verification.*

*Keywords – LINAC, pulsed neutrons, dose rate measurement, LUPIN instrument*

***A sugárterápiában alkalmazott lineáris gyorsítók (LINAC) a fotonsugárzás mellett gyorsneutronokat is bocsátanak ki. A neutronkomponens mérését különösen nehézé teszi, hogy a sugárzás pulzált, ezért a klasszikus neutron dózisteljesítmény-mérők nem alkalmazhatók. Közleményünkben ismertetjük a pulzált neutronok dózisteljesítmény mérésére alkalmas módszereket és műszereket, azok hitelesítésének nehézségeit.***

***Kulcsszavak – LINAC, pulzált neutronok, dózisteljesítmény-mérés, LUPIN műszer***

### BEVEZETÉS

A daganatos betegek jelentős részét sugárterápiával kezelik. A sugárzást napjainkban általában lineáris gyorsítókkal állítják elő, egy nem kívánatos mellékterméke ennek a neutron-sugárzás. A kialakult neutronter függ a lineáris gyorsítók típusától, az üzemeltetési paramétereitől és a kezelőhelységek kialakításától.

A sugárterápiában alkalmazott lineáris gyorsítók (LINAC) esetén a neutronméréseket az teszi különösen nehézé, hogy a gyorsítók pulzált sugárzást állítanak elő, a sugárzási tér kevert foton- és neutronsugárzást is tartalmaz, a neutron fluens detektálási határfoka és a neutron fluens-dózisegyenérték konverziós tényező erősen energiafüggő, ugyanakkor a mérendő fotoneutron-sugárzás energiaspektruma nem ismert, vagy csak nagyon nehezen meghatározható. A felsorolt nehézségek miatt a sugárvédelem alapvetően két mérési feladatot követel meg: méréseket a kezelőhelységben, a primer sugárban és/vagy annak közelében, valamint méréseket a kezelőhelységen kívül, ahol szórt sugárzási tér alakul ki. A kezelőhelységen kívül mind a foton-, mind a neutron dózisteljesítmény több nagyságrenddel kisebb, továbbá az árnyékoló anyagokban a neutron impulzus is jelentősen kiszélesedik. A kezelőhelységen kívül a neutron-energiaspektrum az erősen árnyékolt hasadási spektrumhoz hasonlít, az átlagenergiája jelentősen kisebb, mint a kezelőhelységben. Emiatt a neutrondetektoroknak jóval érzékenyebbek kell lenniük a kisebb energiájú gyors neutronokra, különösen a 100 keV tartományban és alatta.

Az aktív neutronmérők mérési elve a termikus neutronok detektálására épül. A gyors neutronok detektálási hatásfoka ezeknél sok nagyságrenddel kisebb, emiatt a gyors neutronokat moderátor közegben le kell lassítani.

E közleményben csak a LINAC-okkal foglalkozunk, illetve a passzív méréseket nem tárgyaljuk, csak a közvetlen dózisteljesítmény mérést aktív eszközökkel.

## A PULZÁLT SUGÁRZÁS MÉRÉSÉNEK ÁLTALÁNOS JELLEMZŐI

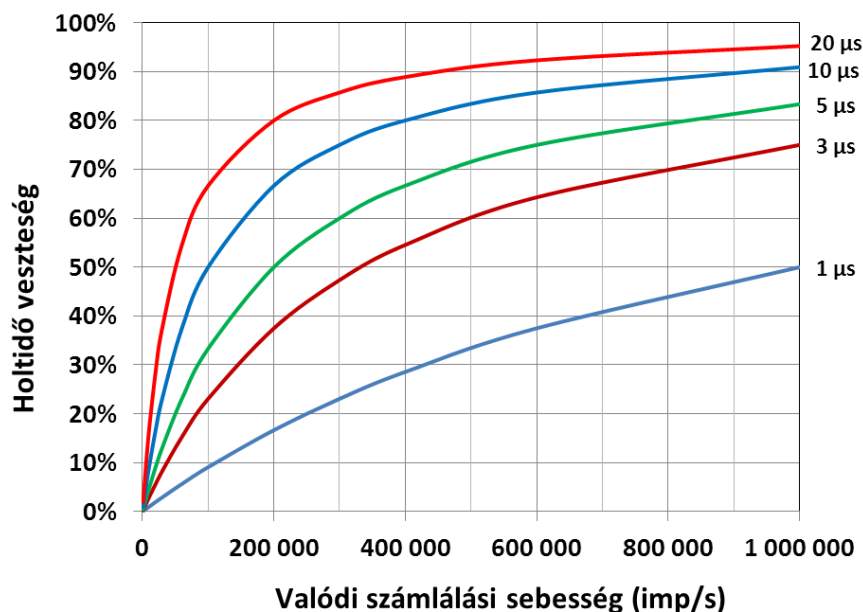
A pulzált sugárzásra jellemző, hogy az a teljes időnek csak egy részében van jelen. A pulzált sugárzás általában periodikus, ebben az esetben megadható az egyes impulzusok hossza és gyakorisága. A két adat alapján kiszámíthatjuk a kitöltési tényezőt, ami a tényleges sugármeneti idő és a teljes eltelt idő hányadosa. Periodikus sugárzásnál ez az impulzus időtartama és a frekvencia szorzata. Legyen az impulzus hossza  $1 \cdot 10^{-5}$  s, az ismétlődési frekvencia 100 imp/s, akkor a kitöltési tényező  $1 \cdot 10^{-3}$ . Ez azt is jelenti, hogy a sugármeneti idő alatt a pillanatnyi dózisteljesítmény az átlagos dózisteljesítménynél a kitöltési idő reciprokával arányosan nagyobb. Legyen a pulzált sugárzás átlagos dózisegyenérték-teljesítménye 1 mSv/h, a kitöltési tényező  $1 \cdot 10^{-3}$ , akkor az impulzus tartama alatt ugyanez a mennyiség:  $1/1 \cdot 10^{-3} = 1000$ , tehát ezerszer nagyobb, 1 Sv/h.

Minden impulzusszámláláson alapuló mérésnél a beütésszámlálást követő holtidő alatt a műszer újabb beütést nem tud mérni, tehát az élőidő ennyivel csökken. A holtidő okozta számlálási veszteséget a következő összefüggéssel vehetjük figyelembe [1]:

$$n = m/(1 - m\tau)$$

ahol  $n$  – a valódi számlálási sebesség (imp/s),  $m$  – a mért számlálási sebesség (imp/s),  $\tau$  – a holtidő (s). (A valódi számlálási sebesség a holtidőveszteség nélküli számlálási sebesség.)

Az összefüggés alapján megadhatjuk a holtidő okozta számlálási veszteséget, azaz azt, hogy a valódi impulzusok mekkora hányada veszik el a holtidő miatt (1. ábra).

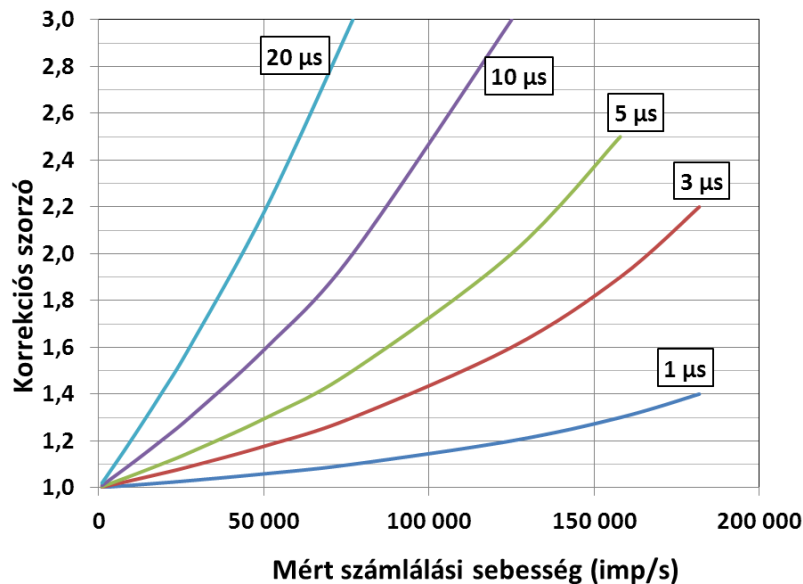


1. ábra: Holtidőveszteség a valódi számlálási sebesség és a holtidő függvényében

A mért számlálási sebesség és a holtidő függvényében megkaphatjuk azt a korrekciós szorzót, amivel megszorozva a mért számlálási sebességet, kiszámíthatjuk a valódi számlálási sebességet (2. ábra). Ha van két műszerünk eltérő holtidővel, akkor a két műszer jelzése jelentősen eltérhet. Ha a valódi számlálási sebesség 250 000 imp/s, és az egyik műszer

holtideje  $1 \mu\text{s}$ , a másiké  $20 \mu\text{s}$ , akkor korrekció nélkül a két műszer jelzése közel egy nagyságrendet tér el egymástól.

A holtidő mellett az impulzus számlálási sebességet még befolyásolja a pileup jelenség, azaz az impulzusok amplitúdójának szuperpozíciója, a „felhalmozódás” abban az esetben, ha a második impulzus akkor követi az elsőt, amikor az első impulzus lecsengő jele még nem érte el az alapszintet. Az, hogy a mérőberendezés ilyen esetben egy vagy két impulzust észlel az a követési távolságtól és az alkalmazott jelformálástól függ.



2. ábra: Korrekciós szorzó a mért számlálási sebesség függvényében különböző holtidők esetén

## A PULZÁLT SUGÁRFORRÁSOK JELLEMZŐI

A nagyon sokféle pulzált sugárforrás (ciklikus és lineáris gyorsítók, impulzus lézerek) közül gyakorlati szempontból csak az orvosi célú lineáris gyorsítókkal (a továbbiakban LINAC-okkal) foglalkozunk. Ennek oka elsősorban az, hogy a gyorsító sugárzási terében helyezkedik el a besugárzandó személy és a kiszolgáló személyzet sem különíthető el teljes mértékben a sugárzási tértől.

Az orvosi célú LINAC-ok elsődleges sugárzása a nagy energiára felgyorsított elektronnyaláb. Ezt a nyalábot nagyon gyakran nagyenergiájú röntgensugárzás keltésére használják úgy, hogy az elektronnyalábot nagy rendszámú céltárgyra irányítják. Ha a fotonok energiája meghaladja a közelben lévő anyagok fotoneutron keltési küszöbét ( $\sim 8 \text{ MeV}$ ), akkor a LINAC nagyenergiás fotonjai a besugárzó fejen fotoneutronokat keltenek, ezek jelentős része átjut a besugárzó fejen.

A továbbiakban tekintsük át a LINAC-ok mérés technikai szempontból legfontosabb paramétereit. Ezeket az adatokat az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat. Lineáris gyorsítók impulzus paramétereit [2]

Gyorsító	Feszültség (MV)	Impulzusismétlődési frekvencia (Hz)	Impulzushossz ( $\mu\text{s}$ )	1/kitöltési tényező
Elekta Versa HD	10	600	2,5–3	667
Siemens ARTISTE	18	~300	2,5–3	1333
Varian TrueBeam/ VitalBeam	10	120–360	2–5	2083–4167
	18	120–180		
	12, 15, 18	180–200		

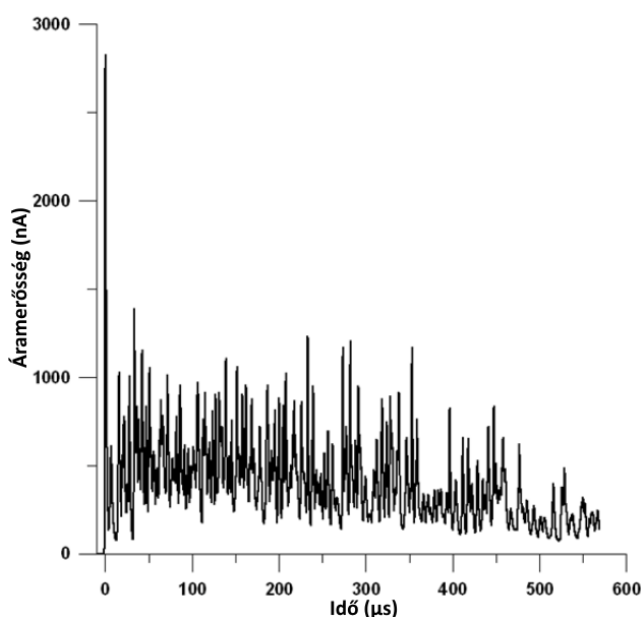
### A FOTONSUGÁRZÁS MÉRÉSE

A foton sugárzás esetén lehetőség van elegendően nagy érzékenységgű ionizációs kamrás műszer alkalmazására. Ionizációs kamráknál a rekombinációs veszteség nem függ az impulzus hosszától, amennyiben az impulzus lényegesen rövidebb, mint az ionizációs kamrában keletkező töltéshordozók (elektronok és ionok) begyűjtési ideje [3]. Miután a rekombinációs veszteség a töltéshordozók koncentrációjával arányos, a felső méréshatár a kitöltési tényező csökkenésével arányosan csökken, ezt a méréseknél figyelembe kell venni.

Az ionizációs kamrák esetében megfelelő konstrukcióval (fém kamrafal, argon töltőgáz, szervesetlen szigetelők) elérhető, hogy a kamra a neutronokra gyakorlatilag érzéketlen legyen, így segítségükkel a foton komponens jól mérhető.

### A NEUTRONSUGÁRZÁS MÉRÉSE KLASSZIKUS MŰSZEREKKEL

Ionizációs kamrákat a neutronsugárzás mérésére nem alkalmaznak, mert az ionizációs kamráknak – bármilyen konstrukciónál – nagyon érzékenyek a fotonokra, emellett a megfelelő energiafüggés sem érhető el a segítségükkel. Neutronok dózisteljesítményének mérésére széleskörűen elterjedtek a megfelelő moderátorral rendelkező  $\text{BF}_3$  vagy  $^3\text{He}$  gáztöltésű proporcionális számlálóval rendelkező műszerek.



3. ábra: 18 MV-on üzemeltetett LINAC esetén kapott detektorjelzés [4]

Még a moderátor miatt bekövetkező impulzussorozat hossz növekedés révén sem biztosítható a detektor jelentős holtidőveszteségének az elkerülése.

Egy orvosi LINAC (Varian Clinac 18 MV) esetében 90%-os holtidőveszteség is felléphet [4], ami azt jelenti, hogy a mért eredmény csak 10%-a a ténylegesnek. A nagyon rövid, mintegy 10  $\mu$ s-os elektron-impulzus hasonló hosszúságú gyorsneutron-impulzust kelt, de a termalizáció miatt ebből az impulzusból kb. 600  $\mu$ s időtartamú lassú neutron impulzus sorozat lesz (3. ábra). Meg kell jegyezni, hogy a holtidőveszteség becslésekor ezt a megnövekedett időt kell figyelembe venni.

Tekintettel arra, hogy ez a holtidőveszteség intenzitásfüggő, ezért ezek a mérések teljesen megbízhatatlanok lesznek. Az áramköri beállítások, elsősorban akár az adott típusú műszerben alkalmazott diszkriminációs szintek különbözősége a folyamatos (statikus) terekben végzett méréseknél nem jelentkezik, míg pulzált terekben már jelentősen megváltoztatja a mérési eredményt. További mérési hibát okozó jelenség, hogy a pulzált terekben fokozottan jelentkezik az impulzusok egymásra rakódásának (pileup) esetleg nem azonos hatása is. Ezek összessége még az azonos típusú műszereknél is jelentősen eltérő jelzést eredményezhet.

Összefoglalva megállapítható, hogy a klasszikus neutron-dózisteljesítmény mérők pulzált neutron terek dózisteljesítményének meghatározására nem alkalmasak.

## A PULZÁLT NEUTRONTEREK MEGJELENÉSE

Neutronterek és különösen a már említett pulzált neutronterek dózisteljesítményét pontosan mérni elsősorban részecskefizikai kutatások miatt és sugárvédelmi célból szükséges. Ezeknek az igénye nagyjából együttesen keletkezett, a múlt század 30-as éveit, a neutronok felfedezését követően. Az elmúlt évtizedekben megszorodott a pulzált neutronsugárzást felhasználó alkalmazások száma az iparban, a földtudományokban, a kutatásban. A gyógyászatban még csak kutatási céllal alkalmaznak BNCT (bór-neutronbefogásos (sugár)terápia) eljárást tumorok kezelésére, a pulzált neutronok nemkívánatos mellékhatásai az egyre szélesebb körben elérhető, nagyenergiájú lineáris gyorsítóknak köszönhetően jelentenek állandó kihívást.

## ÖSSZEMÉRÉSEK

Az Európai Sugárdozimetriai csoport (EURADOS) 11-es munkacsoportja, amely a nagyenergiájú részecskesugárzások dozimetriai kérdéseivel foglalkozik, 2015-ben összemérést szervezett a HZB (Helmholtz-Zentrum Berlin) protogyorsítójánál, ahol 14 környezeti neutron dózisteljesítmény mérő és 15 aktív személyi dózismérő eredményeit hasonlították össze [5]. A létesítményt egyébként okuláris tumorok kezelésére használják és 68 MeV-es protonnyalábbal végzik e kezeléseket. Főbb részei egy Van-der-Graaf generátor és egy ciklotron, amelyekkel impulzusüzemben 50 ns és 1 ms tartamú impulzusokat, illetve legfeljebb 100 kHz-es működési frekvenciát érhetnek el. A nyalábáram 0,5 pA és 300 nA között változtatható, így a nyaláb intenzitása a paraméterek függvényében 5 nagyságrendet foghat át. A műszereket mérőpályán, az általuk mérendő mennyiségnek megfelelően ellenőrizték. A detektálási pont várható neutron dózisteljesítményét a FLUKA nevű Monte Carlo kóddal szimulálták. Az egyes műszerek legfontosabb tulajdonságai és részletes leírásuk az eredeti közleményben találhatóak meg. A forrás beállítására 13 különböző paraméterkészletet használtak az összemérések során.

Az aktív személyi dózismérő eszközök félvezető detektorokat használnak és a konkrét elektronikai felépítésüktől függően eltérő ofszettel, de a forrás impulzusrátájával proporcionális dóziszjelzést adnak 50 Sv/h dózisteljesítményig. Ez elsősorban a detektor

működési elvének köszönhető, ugyanis ez a fajta műszer nem érzékeny az elektromos impulzusok felhalmozódására.

A környezeti neutron-dózisteljesítmény mérők esetén a LUPIN és az AGREM (ezüstaktivációs elvű), illetve a REM-2 típusok kivételével mindegyiknél megfigyelhető, hogy egy adott impulzusonkénti dózisteljesítmény felett a holtidejük miatt a lineáristól eltérő, csökkent választ adnak. Az ún. LINUS típusnál a detektor ráadásul teljesen paralizálható, vagyis nagyobb intenzitásra kisebb válaszjelet ad. Mindegyik kereskedelmi forgalomban kapható klasszikus műszer esetén elmondható, hogy kisebb-nagyobb mértékben, de helytelenül mér pulzált neutronterekben, amely ráadásul a nehezen megismerhető holtidejük miatt nem korrigálható, illetve műszerenként változik.

Az előbb leírtakhoz hasonló kísérleteket végeztek korábban az Európai Részecskefizikai Kutatóközpont (CERN) HiRadMat gyorsítójánál [6]. Itt szintén 13 intenzitásbeállítással dolgoztak, 2,5 és 7.500 nSv közötti impulzusonkénti dózissal. A helyi sugárvédelmi monitorozó rendszer céldetektorain (H és Ar gázzal töltött ionkamrák) felül ebbe az összemérésbe is bevontak kereskedelmi forgalomban kapható műszereket (BIOREM, Wendi-2), illetve szerepel még a LUPIN is. Az eredmények közül kiemelendő, hogy a helyi, egyénileg a célra szabott mérőrendszer az 5  $\mu$ Sv-nél nagyobb intenzitású impulzusok esetén közel a várt érték felét (0,45), a helyi mérőrendszer detektorai 85 és 96%-át, a kereskedelmi forgalomban kaphatók az 5 és 12%-át mérték. Utóbbiak kisebb intenzitás (100 nSv/impulzus) esetén is csak a nyegedét-felét mérték a várt értéknek.

Az OAH támogatásával 2019-ben tanulmány készült az orvosi célú lineáris gyorsítók körül kialakuló neutronterek méréséről [2].

A tanulmány része volt a Magyarországon típusengedélyezett neutron környezeti dózisegyenérték-teljesítmény mérő műszerek (rem-mérők) összemérése AmBe neutronforrás állandó neutronterében és orvosi lineáris gyorsítók labirintusba szóródó pulzálo neutronterében.

A következő típusú rem-mérők összemérésére került sor Berthold LB 6411; Wedholm 2222A; Thermo Scientific FHT 752 (BIOREM); Thermo Scientific FHT 762 (WENDI-2)

Az összemérés eredményei úgy foglalhatók össze, hogy amíg állandó intenzitású neutronterben az összes hitelesített műszer megfelelt a hitelesítési követelményeknek, azaz a mért értékek a referencia értéktől megközelítőleg  $\pm 20\%$ -ban tértek csak el. Pulzálo neutronterben ugyanakkor a különböző típusú neutronmérők azonos feltételek mellett nagyságrendbeli különbségeket mértek, de még azonos típusú rem-mérők mérési eredményei is egymástól elfogadhatatlan mértékben eltérhettek. Az összemérések alapján megállapítható, hogy pulzálo neutronterben a hazánkban használt rem-mérők megbízhatatlanul mérnek.

A régi közmondás szerint nincs neutron foton nélkül. Ebből kiindulva a nagyenergiájú, vegyes sugárzásokban való viselkedését is érdemes megvizsgálni az egyes neutron dózisteljesítmény mérő műszereknek. Így tettek Mayer és mtsai. [7], akik kereskedelmi forgalomban kapható (Berthold LB 6411, Studsvik 2202D, RIC és WENDI-2)  $^{238}\text{PuBe}$  és  $^{252}\text{Cf}$  forrásokkal kalibrált dózisteljesítmény mérők méréseit vetették össze egy HANDI-TEPC neutron proporcionális számláló vizsgálati eredményeivel. Az utóbbi műszer különlegessége, hogy egy speciális szoftveres algoritmussal elemzi a logaritmikusan elosztott, 16-csatornás spektrumot, majd szétválasztja azt a neutronoknak megfelelő jelzések és egyéb sugárzások szerint. A mérések során a CERF (CERN High-energy Reference Field Facility) referenciaforrását használták, ahol GeV nagyságrendű energiával bíró szórt neutronok is kelthetőek. A méréseket egy precíziós ionizációs kamrával ellenőrizték, a céltárgyat érő neutronok darabszáma impulzusonként  $(2,2 \pm 0,1) \cdot 10^4$ , dózisteljesítménye átlagosan  $84,8 \pm 3,0 \mu\text{Sv/h}$  a kísérletek ellenőrzésére készített szimulációk alapján. A dózisteljesítmény zöme 20 MeV és GeV nagyságrend közötti energiájú neutronokból származott. Az

összehasonlító vizsgálatok eredménye, hogy a pulzált neutron-gamma terek mérésére specializált célműszer átlagosan 2,9%-kal többet, a többi műszer 10-50%-kal kevesebbet mért a helyesnek elfogadott értékhez képest. A kereskedelmi forgalomban kapható, általános célú neutron dózisteljesítménymérők, amelyek ugyan kielégítik a vonatkozó IEC 61005 szabvány követelményeit (16 MeV-os neutron energiáig, nem pulzált térben legfeljebb  $\pm 15\%$  eltérést mutatnak az etalontól), nagyobb energiájú vegyes sugárzási terekben már nem működnek megfelelően, jelzésük rendre elmarad, akár a fele is lehet a tényleges dózisteljesítménynek.

Szinkrotronok, amelyek töltött részecskék, vagy ionok gyorsítása révén állítanak elő egy meghatározott energiájú nyalábot, szintén keltenek egyfajta mellékhatásként neutronokat, amelyekkel a sugárvédelemnek számolnia kell. A CERN korábbi zászlóshajója volt e tekintetben a PS (Proton Szinkrotron), amely egy 200 m átmérőjű, 100 dipólmágnessel operáló létesítmény, amely akár 25 GeV kinetikus energiát képes kölcsönözni a felgyorsított részecskéknek, elemeknek. Ennek szórt sugárzási terében egyes kevéssé szokványos részecskék mellett előfordulnak nagyenergiájú fotonok és neutronok is. A PS sajátja még, hogy kis kitöltési tényezőjű (11  $\mu$ s, 1,2 s-onként) az általa létrehozott nyaláb, tehát egyfajta „részecskekitörés”-ként is lehet a megjelenő szórt térre tekinteni. Aza és mtsai. [8] ennek a környezetében végeztek vizsgálatokat különböző neutrontektorokkal. A létesítmény különböző helyein kijelölt mérési pontjaikban végzett vizsgálatok eredményeit közleményük a műszerekkel kapott mért értékek és a FLUKA szimulációval nyert referenciától való eltérésük szerint csoportosították. Ezek alapján a helyi sugárvédelmi monitorozó rendszer Ar és H ionizációs kamrái, illetve a LUPIN (BF<sub>3</sub>) detektora az első, a BIOREM szonda a második, míg a LINUS és WENDI-2 műszerek alkotják a harmadik csoportot. Az első csoport műszerei a mérési bizonytalanságon belül megegyeztek a szimuláció eredményeivel, a BIOREM kb. 30%-kal kisebb mért értéket mutatott a helyesnek vélt eredménytől, míg az utolsó csoport két műszere 65%-kal mért kevesebbet a vártnál. Az utóbbi eredményekre magyarázat, hogy ezeknek a holtideje kb. 2  $\mu$ s, míg a BIOREM-é 1  $\mu$ s. Általános következtetés a közleményben, hogy a nem speciálisan felkészített műszerek (2. és 3. csoport) a holtidőveszteségeik miatt a H\*(10) értékét rendre alábecsülik. Az ionizációs kamrákat a mérési elvük miatt nem befolyásolja a holtidőveszteség. Az összeméréseken felül fontos cél volt, hogy ellenőrizzék az újonnan fejlesztett LUPIN képességeit, amely helyt állt e vizsgálatban és megállapítható volt, hogy a rövid impulzusidejű, nagyintenzitású terekben is alkalmas a mérések elvégzésére.

## A PULZÁLT SUGÁRZÁSOK MÉRÉSI MÓDSZEREI IRÁNTI KÖVETELMÉNYEK

A pulzált neutronforrások mérésére szolgáló műszer iránti követelmények a következők [9]:

1. Alkalmasnak kell lennie nagyon nagy pillanatnyi neutronfluxusok mérésére.
2. Érzékenysége feleljen meg a kereskedelmi forgalomban kapható dózisegyenérték-mérőkének.
3. Képesnek kell lennie egyetlen neutronimpulzus mérésére.
4. Képesnek kell lennie a neutronsugárzást kísérő foton-sugárzás kiszűrésére.

Meg kell jegyezni, hogy a megfelelő energiafüggés biztosítása érdekében a moderátornak folyamatos és pulzált neutronsugárzás esetében azonosnak kell lennie, ezért a moderátorra nem térünk ki.

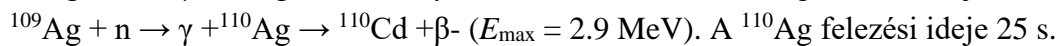
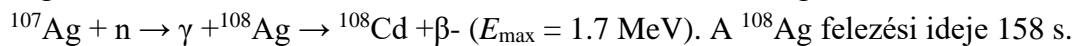
Jelenleg két műszercsalád alkalmas a pulzált neutronok mérésére, az egyik az ezüst aktiválásán és az aktivitás valósidejű mérésén alapul és kompenzáció révén csökkenti a foton-sugárzás zavaró hatását. A másik a neutronok által a detektorban keletkezett töltés mérésén alapul és időkapuzással csökkenti a foton-sugárzás hatását. Kereskedelmi forgalomban csak az utóbbi elven működő műszer kapható.

## AZ EZÜST AKTIVÁLÁSÁN ALAPULÓ MÓDSZER

Ez a módszer lényegét tekintve a passzív és az aktív detektorok kombinációján alapul, amelynél a pulzált sugárzás által felaktivált ezüst béta-sugárzását egy detektor valós időben méri.

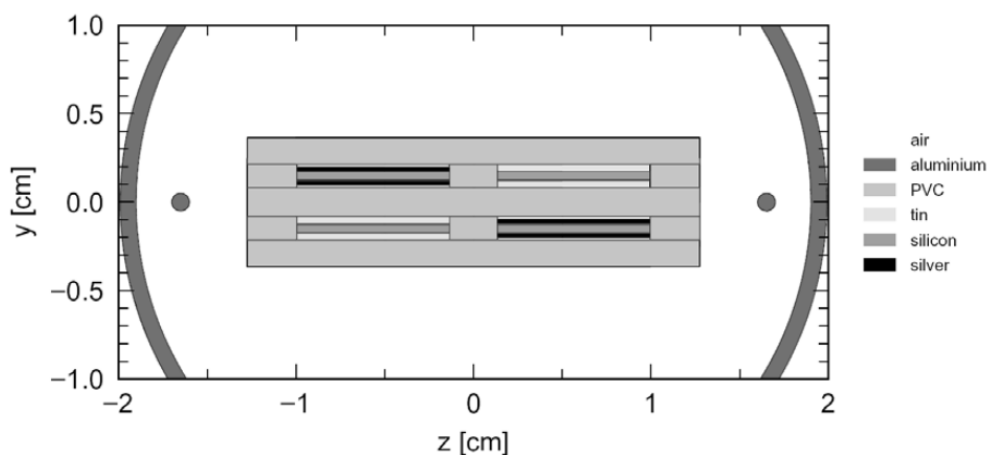
Az ezüst aktiválásán alapuló módszer azt használja fel, hogy ez az anyag jó hatásfokkal aktiválható termikus neutronokkal és a keletkezett aktivációs termékek rövid felezési idejűek, tehát hamar beáll az egyensúlyi (telítési) aktivitás és az aktiváció révén létrejövő izotópok béta-sugárzása jól mérhető.

Az ezüst két izotópja, az  $^{107}\text{Ag}$  és az  $^{109}\text{Ag}$  a termikus neutronok hatására felaktiválódik. A  $^{107}\text{Ag}$  52% gyakoriságú, termikus neutron hatáskeresztmetszete 38,6 barn, a  $^{109}\text{Ag}$  48% gyakoriságú, termikus neutron hatáskeresztmetszete 90,5 barn. A magreakciók:



Az ezüstaktivációs módszer gyakorlati megvalósításánál két Geiger-Müller (GM) csövet használtak polietilén moderátorban [10]. Az egyik GM csövet 0,25 mm vastag ezüsfólia vette körül, a második, kompenzációs GM csövet pedig 0,36 mm vastag ónfólia, amelyik a béta-részecskék elnyelése szempontjából az ezüsfóliával azonosnak tekinthető. A két csőnél mért, az ezüst telítési aktivitásának megfelelő számlálási sebesség különbsége arányos lesz a neutronok dózisteljesítményével.

Az adott módszer újabb megvalósítási formájánál a GM csövek helyett félvezető detektorokat használtak a fóliák béta-sugárzásának mérésére [11]. A mérési összeállítás vázlatát mutatja be a 4. ábra. A moderátor egy 30 cm átmérőjű polietilén gömb, ebben helyezkedik el a négy félvezető detektor. Két detektor mindkét oldalán 0,25 mm-es vastagságú ezüst fólia, további két detektoron pedig 0,36 mm-es vastagságú ónfólia van. Ennek a megoldásnak előnye, hogy a detektorok szimmetrikus elhelyezése révén a rendszer irányfüggése kedvezőbb. Az elektronikus rendszer összegzi a két-két azonos detektor jeleit és az ezüst és az ónborítású detektorok számlálási sebességének különbsége alapján számítja ki a neutronok dózisteljesítményét.

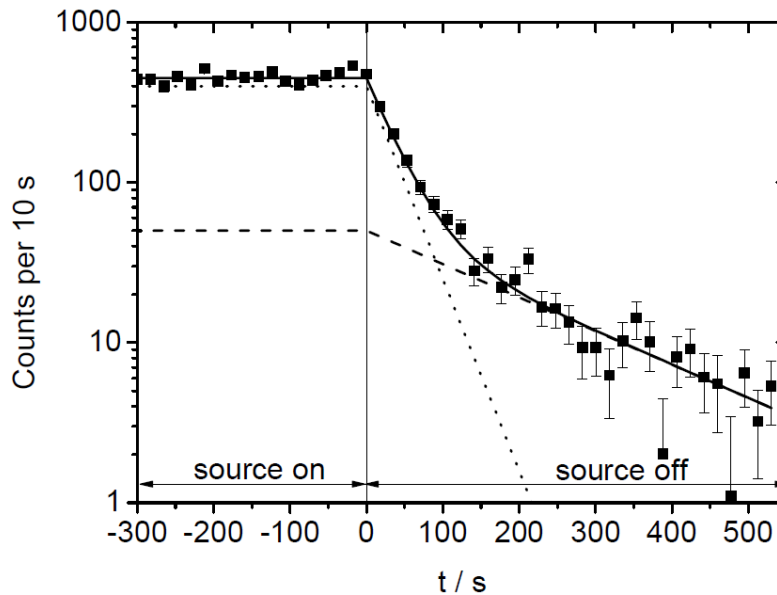


4. ábra: Az ezüstaktivációs detektorrendszer vázlata

Az ezüstbe burkolt detektorok számlálási sebességének időfüggését adja meg az 5. ábra.

Az ezüstbe burkolt detektor jelzése 1  $\mu\text{Sv}$  dózisra  $14,6 \pm 0,3$  impulzus, az ónba burkolté  $5,6 \pm 0,2$  impulzus.





5. ábra: A 10 s-onkénti beütésszám  $^{252}\text{Cf}$  neutronforrással történt besugárzás esetén. (source on – forrással, source off – forrás nélkül. A teljes bomlást a folyamatos vonal, az  $^{110}\text{Ag}$  bomlást a pontozott vonal, az  $^{108}\text{Ag}$  bomlását a szaggatott vonal mutatja. A szórás  $1\sigma$ .

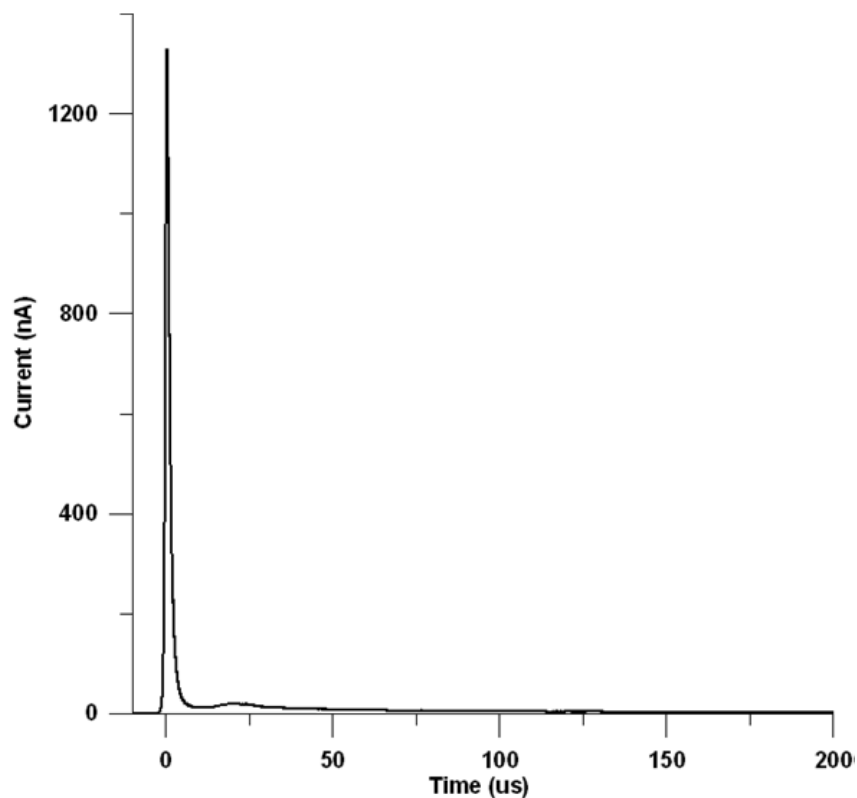
### DIGITÁLIS TÖLTÉSMÉRÉSEN ALAPULÓ MÓDSZER – LUPIN

A módszer alapja a neutrondetektorban ( $\text{BF}_3$ -as, vagy  $^3\text{He}$  proporcionális számláló) a neutronimpulzus alatt keletkezett töltés időfüggő meghatározása digitálisan. Ezen a mérési elven alapul a LUPIN műszer mérési módszere is. A LUPIN elnevezés jelentése Long Interval, Ultra-wide dynamic, Pile-up free, Neutron rem-counter, azaz hosszú időtartamú ultraszéles dinamikus, felhalmozódásmentes rem számláló [9].

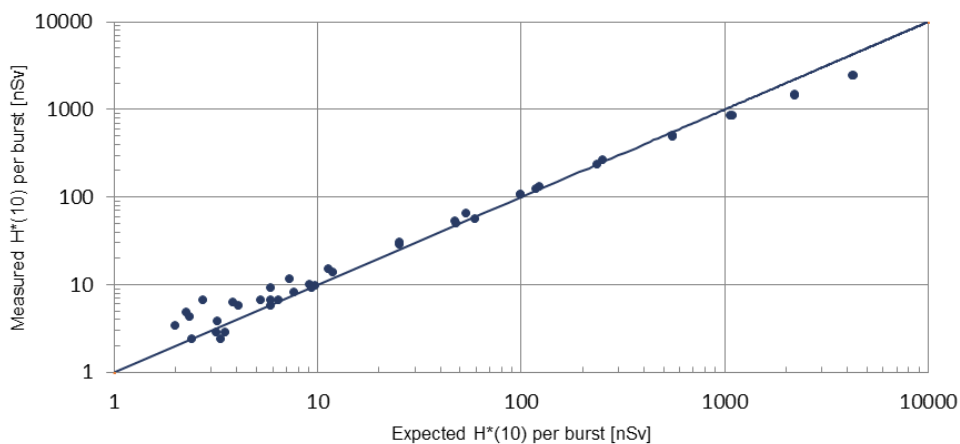
A műszer detektora  $^3\text{He}$  vagy a  $\text{BF}_3$  proporcionális számláló a szokásos polietilén moderátorban. A műszer különlegessége a jelfeldolgozási módszere. A számláló árama logaritmikus áram-feszültség erősítőre kerül. A logaritmikus erősítés célja a nagy dinamikus átfogási tartomány létrehozása. Az erősítő utáni analóg-digitális átalakító jelét a felhasználó által megadott időtartományban a rendszer összegzi, ez az összeg a neutronok dóziséval arányos áramot eredményez.

Az orvosi célú lineáris gyorsítóknál a neutronkeltési küszöbenergia alatt csak fotonok keletkeznek, ezek a LUPIN-ban  $10\ \mu\text{s}$ -nál rövidebb impulzust keltenek (ld. 6. ábra), míg a magasabb feszültségnél neutronok is keletkeznek, amelyek jelei a moderátorban történő termalizálódási időnek megfelelően több száz  $\mu\text{s}$ -os jelsorozatot generálnak (3. ábra). Ha a LUPIN időkapujának kezdőértékét  $10\ \mu\text{s}$ -nak választjuk, akkor a ftonsugárzás zavaró hatása elhanyagolható, miközben a neutronok által kiváltott jel vesztesége jelentéktelen.

A műszer lineáris méréstartománya egy neutronimpulzusra vonatkoztatva eléri a három nagyságrendet (7. ábra).



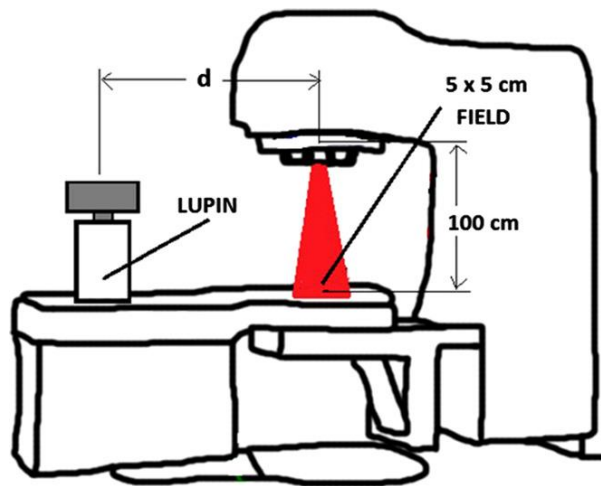
6. ábra: A LUPIN detektor jele 6 MV-os LINAC feszültségnél [4]



7. ábra: A LUPIN műszer egy neutronimpulzusra várható (vízszintes tengely) és mért (függőleges tengely) jelzése [12]

A LUPIN műszer egyes esetekben, ha a neutronok dózisteljesítménye nem haladja meg a műszer felső méréshatárát, felhasználható az orvosi lineáris gyorsító neutronterének mérésére is (8. ábra).

A LUPIN műszer kalibrálására radioaktív neutronforrások (PuBe, AmBe) használhatók [5],[9].



8. ábra: A LUPIN műszerrel végzett neutron dózisteljesítmény mérés egy orvosi gyorsítónál.  
A  $d$  távolság 32 cm

### A LUPIN KERESKEDELMI VÁLTOZATA

A LUPIN BF<sub>3</sub>-NP az egyetlen olyan kereskedelemben is kapható műszer, amely pulzált neutronterek dózisteljesítményének mérésére is alkalmas [13]. Ennek a műszernek a főbb jellemzői a következők.

Működési hőmérséklettartomány:  $0 \div 50$  °C;

Befoglaló méretek:  $\varnothing = 250$  mm,  $H = 425$  mm;

Teljes súly: 18 kg;

Hengeres BF<sub>3</sub> detektor;

Energia tartomány 0,025 eV-től 10 GeV-ig;

H\*(10) dózisteljesítmény mérési tartomány 10 nSv/h-tól 100 mSv/h-ig;

Neutron érzékenység: 0,6 imp/s/ $\mu$ Sv/h;

Gamma-sugárzás érzékenység: <0,5  $\mu$ Sv/h, 50 mSv/h-nál 662 keV-es gamma-sugárzásnál;

Szögfüggés: <20%;

Maximális H\*(10) egy neutron impulzusnál  $\leq 10\%$ -os alulmérésnél 2  $\mu$ Sv.

### HITELESÍTÉS

1991-ben jött létre a mérésügyi törvény [14] és annak végrehajtását szolgáló kormányrendelet [15]. A kormányrendelet 2. számú melléklete tartalmazza a Magyarországon kötelező hitelesítésű mérőeszközök listáját. A rendelet alapján a gyógyászati és sugárvédelmi dózismérők kötelező hitelesítésűek, függetlenül a dózist létrehozó sugárzás típusától. A hitelesítéseket a Budapest Főváros Kormányhivatala (BFKH) Metrológiai és Műszaki Felügyeleti Főosztálya (MMFF) végzi, amelyre Korm. rendelet [16] jelölte ki. A típusvizsgálat és a hitelesítés célja annak vizsgálata, hogy az adott mérőeszköz eleget tesz-e a rá vonatkozó mérésügyi feltételeknek [14].

2012-ig, a neutron személyi- és környezeti dózismérők típusvizsgálatának és hitelesítésének hiányoztak a hazai technikai feltételei. 2012 őszén az MVM Paksi Atomerőmű Sugárfizikai Laboratóriumának neutron besugárzója (forrás és sugárzási tér) teljesítette a rá vonatkozó metrológiai követelményeket. A BFKH MMFF a neutronmérő eszközök típusvizsgálatát és hitelesítését ebben a laboratóriumban végzi. A neutronnyalábot <sup>241</sup>Am-Be sugárforrás hozza létre, a jól ismert  ${}^7\text{Be} + \alpha \rightarrow {}^{12}\text{C} + n + \gamma$  ( $E_{\text{neutronmax}} = 11$  MeV) reakció alapján. 2012-től

kezdődtek meg a neutronmérő készülékek hazai típusvizsgálatai és hitelesítései. A hitelesítések „Hitelesítési Előírás” szerint történnek, amelynek alapjait nemzetközi szabványok [17],[18] képezik.

A fenti szabványok a neutron referencia térre vonatkozó előírásai nem terjednek ki a pulzáló neutronterekre. Az MSZ EN 61005 szabvány neutron sugárforrásra vonatkozó [18] előírása: „A referencia neutron sugárforrásnak a következők egyikének kell lennie:  $^{241}\text{Am}$ -Be radionuklid forrás,  $^{252}\text{Cf}$  spontán hasadó forrás vagy gyorsító célforrás”. A legutóbbi nem pulzáló forrást jelent, hanem  $\text{D}(\text{d},\text{n})^3\text{He}$  reakción alapuló neutronforrást (neutrongenerátor). A típusvizsgálatok és hitelesítések csak „statikus” neutronterben történnek. A referencia neutronterek állandósága miatt, az utóbbi időkig nem derült fény a különböző típusú mérőeszközök által mért eredmények fentebb leírt hatalmas eltéréseire.

A vizsgálatok, ellenőrzések további nehézségét a méréstartomány jelenti. A neutronok energiája nagyon széles skálán mozog (10-12 nagyságrend). A „hideg” ( $E_n < 0,01$  eV) neutronoktól a relativisztikusig ( $E_n > 20$  MeV). A leggyakrabban a termikus – gyors neutronspektrum tartomány mérése történik. A gyártók által megadott neutronenergia méréstartomány felső határa általában 20 MeV. Az újabb tervezésű eszközök (FHT 752; WENDI) azonban már (a gyártó szerint) a termikustól 5 GeV energiáig mérnek. A WENDI hazai típusvizsgálata a már említett MVM PA Zrt.  $^{241}\text{Am}$ -Be terében történt, vagyis jóval a felső méréshatára alatt. A műszer hitelesítési engedélye 20 MeV felső határig szól (korlátozott). 20 MeV feletti energiák esetén a műszer nem hiteles (még ha megtörtént a hitelesítése, akkor sem)!

## KÖVETKEZTETÉSEK

A gyorsítók megjelenése és rohamos elterjedése a gyógyászatban, valamint a nagyteljesítményű impulzus lézerek alkalmazása indokoltta tette, hogy a gamma-dózisteljesítmény mérések mellett a keletkező neutronok által létrehozott dózisteljesítmény ellenőrzése is megtörténjen.

A különböző típusú aktív neutron-dózisteljesítmény mérők által mért eredmények jelentősen különböznek, amint az látható a nemzetközi szakirodalomból és a saját összeméréseinkből. Az eredményekből egyértelműen az a következtetés vonható le, hogy a lineáris gyorsítók pulzáló fotontere esetén van mérhető neutronter, de ennek pontos mértéke nem határozható meg egyértelműen csak a LUPIN típusú neutron dózismérővel, ennek alkalmazása viszont további vizsgálatokat igényel.

Metrológiai szempontból úgy a pulzáló neutronterekben, mint a neutronok nagyobb ( $E_n > 20$  MeV) energiatarományában történő típusvizsgálatok és hitelesítések új kihívásokat jelentenek. Pillanatnyilag nincs olyan nemzetközi szabvány, ami vizsgálati módszereket adna a felmerült kérdésekre.

## IRODALOM

- [1] Bódizs Dénes. Atommagsugárzások mérés technikái. Budapest, 2006
- [2] Pesznyák Csilla, Ballay László, Deme Sándor, Varjas Géza, Király Réka, Elek Richárd, Szegedi Domonkos, Milecz-Mitykó Richárd, LINAC neutron dózistér felmérése II. rész. OAH-ABA-09/18-M
- [3] Deme Sándor. Gázionizációs detektorok. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1985
- [4] M. Caresana, M. Ferrarini, G. P. Manessi, M. Silari és V. Varoli. A neutron detector for pulsed mixed fields: preliminary measurements. Progress in Nuclear Science and Technology. Volume 4 (2014) pp. 725-728

- [5] M. Caresana, A. Denker, A. Esposito, M. Ferrarini, N. Golnik, E. Hohmann, A. Leuschner, M. Luszik-Bhadra, G. Manessi, S. Mayer, K. Ott, J. Röhrich, M. Silari, F. Tromprier, M. Volnhals, M. Wielunski. Intercomparison of radiation protection instrumentation in a pulsed neutron field. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 737 (2014) 203–213.
- [6] E. Aza, M. Caresana, C. Cassell, N. Charitonidis, E. Harrouc, G.P. Manessi, M. Pangallo, D. Perrin, E. Samara, M. Silari. Instrument intercomparison in the pulsed neutron fields at the CERN HiRadMat facility. *Radiation Measurements Volume 61* (2014), pp. 25-32.
- [7] S. Mayer, D. Forkel-Wirth, M. Fuerstner, H. G. Menzel, M. J. Mueller, D. Perrin, C. Theis and H. Vincke. Response of neutron detectors to high-energy mixed radiation fields. *Radiation Protection Dosimetry Vol. 125* (2007), No. 1-4, pp. 289-292.
- [8] E. Aza, M. Caresana, C. Cassell, V. Colombo, S. Damjanovic, S. Gilardoni, G. P. Manessi, M. Pangallo, D. Perrin, M. Silari. Comparison of the performance of different instruments in the stray neutron field around the CERN proton synchrotron. *Radiation Protection Dosimetry Vol. 161* (2014), No. 1-4, pp. 190-195.
- [9] Caresana, M., Ferrarini, M., Manessi, G. P., Silari, M. and Varoli, V. LUPIN, a new instrument for pulsed neutron fields. *Nucl. Instrum.Methods A* 712, 15–26 (2013).
- [10] Brown, D., Buchanan, R. J. and Koellea A. R. Microcomputer-Based Portable Radiation Survey Instrument for Measuring Pulsed Neutron Dose Rates. *Health Physics* Vol. 38 (April 1980), Pp. 507-521.
- [11] Luszik-Bhadra, M. and Eike Hohmann, Eike. A new neutron monitor for pulsed fields at high-energy accelerators. *Radiation Measurements, Volume 45, Issue 10, December 2010, Pages 1258-1262*
- [12] Caresana, M., Ferrarini, Manessi, G. S., Silari, M. és Varoli, V. A new version of the LUPIN detector: improvements and latest experimental verification. *Rev. Sci. Instrum.* 85- 065102 (2014).
- [13] Web: [www.elsenuclear.com](http://www.elsenuclear.com). Letöltés 2021.01.14.
- [14] Az 1991. évi XLV. törvény a mérésügyről.
- [15] 127/1991. (X.9) Korm. rendelet a mérésügyről szóló törvény végrehajtásáról.
- [16] 365/2016. (XI.29) Budapest Főváros Kormányhivatalának egyes ipari és kereskedelmi ügyekben eljáró hatóságként történő kijelöléséről, valamint a területi mérésügyi és műszaki biztonsági hatóságokról.
- [17] ISO 21909:2005 Passive personal neutron dosimeters – Performance and test requirements.
- [18] MSZ EN 61005:2017 Sugárvédelmi mérőműszerek. A neutronsugárzás környezeti dóziségyenértékét (egyenértékű dózisteljesítményét) mérő eszközök.