

**RECOMENDATIONS FOR THE RADIATION PROTECTION OF HIGH PERFORMANCE LASER EQUIPMENT****AJÁNLÁSOK NAGY TELJESÍTMÉNYŰ LÉZERBERENDEZÉSEK SUGÁRVÉDELMEHEZ**BODOR Károly<sup>1</sup> – ZAGYVAI Péter<sup>2</sup>**Abstract**

During laser-matter interactions, accelerated particles may be emitted, which upon leaving the experimental equipment may activate materials/objects in their surroundings, e.g. radiation protection shields. As a result of activation, so-called hotspots may develop, where a higher dose field than that of the background radiation will be measurable in the long run. This is the space where pieces detaching from the target must be found and identified. In this work, I examine the processes occurring in the target and estimate the values of the expected braking radiation by extrapolation. I formulate recommendations and present the training site where searching for hotspots can be practiced under real conditions.

**Keywords**

Radiation protection, high power laser facility, training site, FOSTER, Reflex

**Absztrakt**

A lézerfény és az anyag kölcsönhatása során gyorsított részecskék is keletkezhetnek, amelyek a kísérleti berendezést elhagyva felaktiválhatják a környezetükben megtalálható anyagokat, például a sugárvédelmi árnyékolókat. A felaktiválódás hatására ún. forró pontok (hotspot-ok) alakulnak ki, ahol hosszabb távon a háttérsugárzásnál magasabb dózistér mérhető. Ebben a térben kell megtalálni és azonosítani a céltárgyról leváló darabokat. Ebben a cikkben megvizsgálom a céltárgyban létrejövő folyamatokat és extrapolációval becslöm a várható fékezési sugárzás értékeit. Ajánlásokat teszek, valamint bemutatom a tanpályát, ahol lehetőség van valós körülmények között gyakorolni a hotspot keresést.

**Kulcsszavak**

Sugárvédelem, nagy teljesítményű lézerberendezés, tanpálya, FOSTER, Reflex

<sup>1</sup>Karoly.Bodor@eli-alps.hu | ORCID: 0000-0002-1612-8207 | Radiation protection expert, ELI ALPS, ELI-HU Non-Profit Ltd. | Sugárvédelmi szakértő, ELI ALPS, ELI-HU Nonprofit Kft.

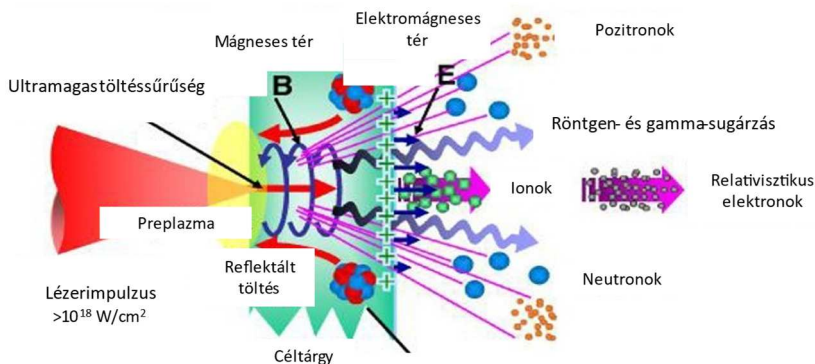
<sup>2</sup>Peter.Zagyvai@eli-alps.hu | ORCID: 0000-0002-8121-8452 | Radiation protection advisor, ELI ALPS, ELI-HU Non-Profit Ltd. | Sugárvédelmi tanácsadó, ELI ALPS, ELI-HU Nonprofit Kft.

## BEVEZETŐ

A nagy teljesítményű lézerberendezések különleges sugárvédelmet igényelnek, mivel a hagyományos radioaktív sugárforrásokhoz, illetve az ionizáló sugárzást létrehozó, de radioaktív anyagot nem tartalmazó berendezésekhez képest eltérő ionizáló folyamatok játszódnak le. A sugárvédelmi ajánlások pontos meghatározásához fontos tisztában lenni azzal, hogy mi történik a lézerfény-anyag kölcsönhatásakor, mi történik a néhány mikrométer vastagságú céltárgyakkal, illetve milyen felaktiválódási folyamatok mehetnek végbe.

### A LÉZERFÉNY-ANYAG KÖLCSÖNHATÁS

Nano-, piko- és femtoszekundumos lézerimpulzusokat már viszonylag régóta használnak az anyagmegmunkálás területén (pl. impulzus lézeres abláció). A lézerimpulzussal való besugárzás hatására a néhány mikrométer vastagságú céltárgy felületéről távozó anyag ún. ablációs felhőt alkot. A gerjesztett elektronok egy része kilép a céltárgy felületéből, egy másik része pedig bediffundál annak belsejébe, így a felületen lokálisan megnő a pozitív ionok sűrűsége. Ha az ionok közötti taszítás meghaladja a rács kötéseinek erősségét, akkor a kötések felszakadnak, és ún. Coulomb-robbanás következik be. A robbanás következtében a felületről nagy energiájú (az ionizáló sugárzások csoportjába sorolandó) részecskék lépnek ki, valamint UV-, röntgen-, valamint látható fény tartományú elektromágneses sugárzás keletkezik (1. ábra), [4 pp. 3-12].



1. ábra: A lézerfény-anyag kölcsönhatásából keletkező másodlagos részecskék [1]

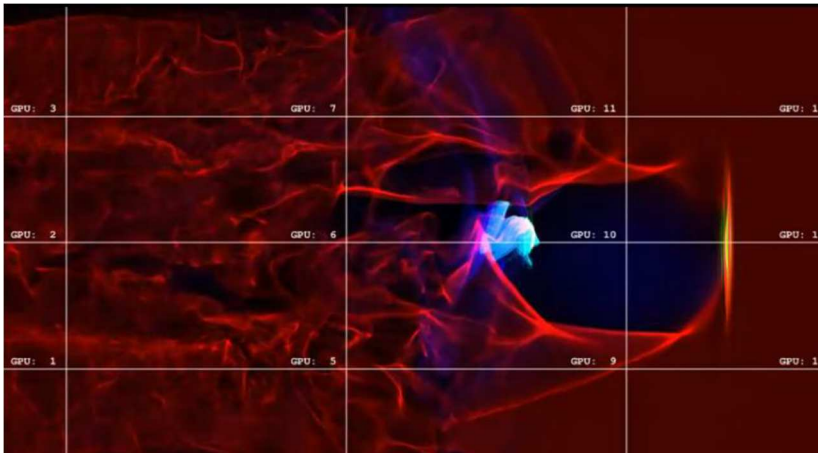
Az attoszekundumos impulzusok előállítása két lépésben történik. A lézerelven kelhető legrövidebb impulzus a femtoszekundumos nagyságrendbe esik, ezt felerősítik és ráfókuszálják a céltárgyra. Amikor az ultrarövid impulzus eltalál egy atomot, az intenzív elektromos tér kiszakítja a leggyengébben kötött elektront a kötött állapotból és eltávolítja az atomtól. Viszont a térerősség irányának fordulásakor az elektron visszatér az atom közelébe és a mag mellett való elhaladásakor egy attoszekundumos röntgen impulzust bocsát ki.

## Mi történik a céltárgyban?

A nagy teljesítményű lézerimpulzusok alkalmazásakor a néhány mikrométer vastagságú céltárgyban az abláció folyamán létrejövő, „forró” elektrongáz a részecskegyorsítás kiinduló pontja. A kialakuló gyorsító térerősség eléri a TV/m-es nagyságrendet. A kísérletek során a lézernyalábot egy néhány  $\mu\text{m}$  vastagságú céltárgyra fókuszálják. A lézerimpulzus által felgyorsított elektronok kollimált nyaláb formájában áthaladnak a céltárgyon, miközben olyan elektromágneses teret hoznak létre, amely a pozitív töltésű ionokat és protonokat a nyaláb irányában gyorsítja. A kísérlet folyamán a céltárgy lézerrel ellentétes oldalán a felületre merőlegesen kilépő, nagy energiájú, kollimált elektron- és protonnyalábot figyeltek meg. A protonok feltételezhetően a céltárgyban, illetve a felületen jelenlévő vízmolekulák hidrogénjeiből származnak.

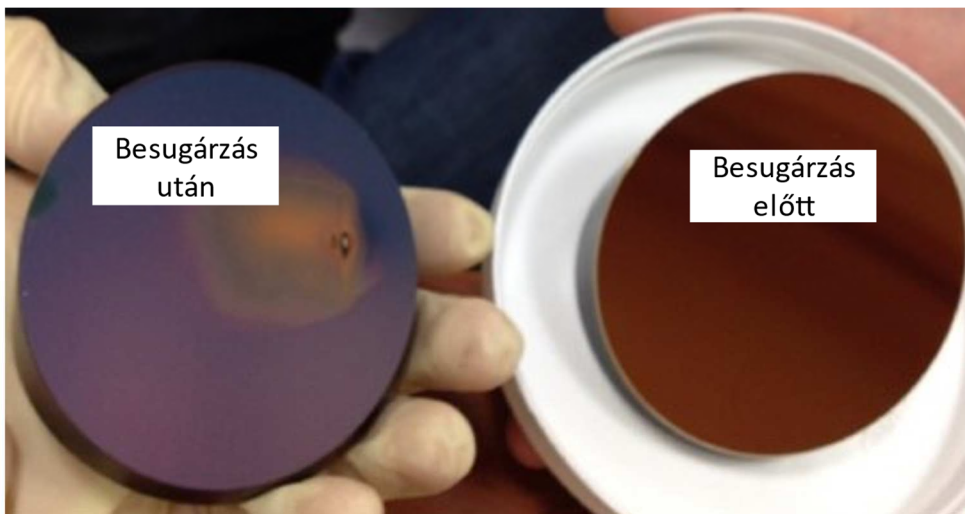
A néhány mikrométer vastagságú céltárgy elektronjainak lézeres gyorsításában több kölcsönhatási folyamat is szerepet játszik. Ahhoz, hogy a részecskék megfelelő mértékben fel tudjanak gyorsulni, a lézer transzverzális elektromágneses terét longitudinális térére kell alakítani, amely hatására az elektronok egy irányban mozogva gyűjtik össze az energiát. Ez a folyamat a plazmában jöhet létre. A lézerfény elektromágneses tere elmozdítja az elektronokat a tér irányában, míg a magok a sokkal nagyobb tömegük miatt mozdulatlanok tekinthetők. Az elektronfelhő transzverzális irányú oszcillációja miatt periodikus töltéssűrűség változás jön létre, amely nagy sebességű longitudinális plazmahullámként halad tovább. Az így kialakuló sűrűség perturbáció longitudinális irányú elektromos térerősséget hoz létre, ami már képes nyaláb irányában gyorsítani az elektronokat.

A nagy energiájú, kollimált és kvázi-monokromatikus részecskenyaláb előállítását az ún. buborék gyorsítás teszi lehetővé (2. ábra), amelyet 2002-ben fedeztek fel szimulációk alapján, majd ugyanabban az évben kísérletileg is kimutattak. A buborék gyorsítás létrejöttéhez szükséges lézerimpulzus elég nagy ahhoz, hogy a plazmahullám már az első oszcilláció után a tengely felé törjön. A folyamatos törések miatt a hullámfront meggömbül, majd összeháródik és egy „buborék” alakul ki, amely csapdába ejti és felgyorsítja az elektronokat. A lézerimpulzus néhány MeV energiájú elektronokat tol maga előtt, míg a buborék mögött csökken az elektronsűrűség. A buborék közepén csapdába ejtett, kvázi-monokromatikus elektronok sűrűsége a legnagyobb, miközben az energiájuk elérheti a GeV-es nagyságrendet. A buborék igen stabil, a plazma hullámhossz százszorosának megfelelő utat is megtehet. Az anyagi és geometriai jellemzők megfelelő megválasztásával a lézerfény energiáttranszfer hatásfoka elérheti a 15%-ot.



2. ábra: A buborék gyorsítás szimulációja, az elektronsűrűség a sötétebb árnyalatok felé csökken, a késsel jelölt részen „esnek csapdába” az elektronok [2]

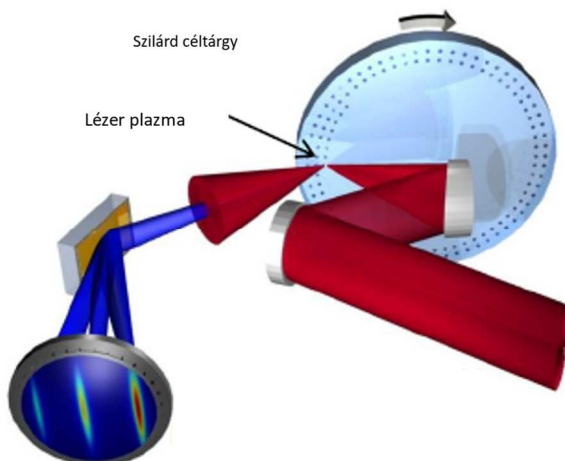
Az alábbi 3. ábrán egy néhány mikrométer vastagságú szilárd céltárgy látható lézerfény általi besugárzás után és besugárzás előtt:



3. ábra: Besugárzás előtti, utáni szilárd céltárgyak [3]

### SZILÁRD CÉLTÁRGY BESUGÁRZÁSA

A néhány  $\mu\text{m}$  vastag szilárd céltárgyat egy precíziós léptetőmotor forgatja a besugárzások időtartama alatt (4. ábra). A femtoszekundumos lézerimpulzussal való besugárzás hatására a céltárgy felülete megolvad, az anyag egy része el is párolog. Ablációs plazmafelhő alakul ki, ezen felhők paraméterei eltérőek a hosszabb lézerimpulzusok során létrejövő ablációs felhőkétől, [4 pp. 3-12].



4. ábra: Szilárd céltárgy besugárzása [1]

A lézerimpulzus primer energiája a besugárzott céltárgy felületén absorbeálódik. Az igen rövid lézerimpulzus miatt, a besugárzási pontban keletkező magas hőmérséklet és a céltárgy további része között nincs hőmérsékleti kiegyenlítődé. Hosszabb, pl. nanoszekundumos impulzusoknál már van elég idő a hőmérséklet kiegyenlítődére. A céltárgy hőmérséklet kiegyenlítődéhez ezerszer több időre van szükség, mint a femtoszekundumos lézerimpulzus ideje. A besugárzott céltárgy vagy annak részei elpárologhatnak, illetve megolvadnak a hőmérsékletváltozás végett, [4 pp. 3-12].

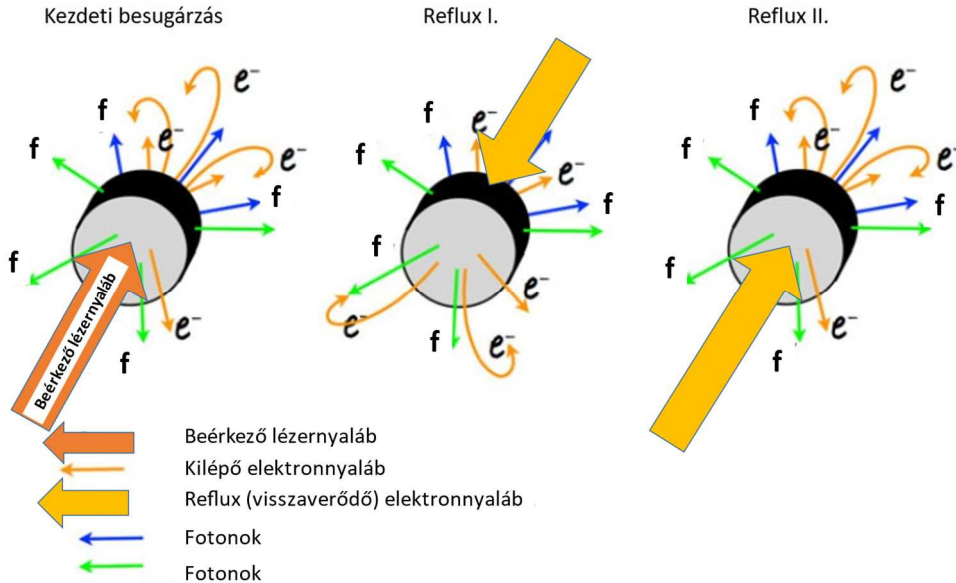
A céltárgyban (pl. amikor a céltárgy anyaga alacsony szublimációs- és olvadáspontú) a folyamatos nagy intenzitású lézerfény besugárzás hatására mechanikai feszültségek alakulnak ki a részleges elpárolgás és olvadás hatására. Az olvadás során a gázként elpárolgó céltárgy darabok az olvadékban csapdába kerülhetnek és a megolvadt céltárgy gázbuborékokat tartalmazhat, mely szintén rideggé teszi a céltárgyat. A „forrásban lévő” céltárgyban keletkező gázbuborékok folyadékcseppeket lökhetnek ki a céltárgyból, a szakirodalom ezt fázisrobbanásnak nevezi, [4 pp. 3-12].

Továbbá a céltárgy deformálódik és belső repedések alakulnak ki. Kellően nagy energiájú lézerfény impulzus hatására a céltárgy felületi rétege elpárolog és a gázállapotú részecskék a besugárzó térben létrehozott vákuumban nagy sebességgel terjedhetnek. Az ablációs felhő keletkezése során először elektronok, ezt követően a pozitív töltésű ionok szakadnak le a céltárgy felületéről. Az abláció során ún. plazma tükör effektus lép fel, mely során a (nagy sűrűségű elektron felhő) ablációs felhő visszaveri a besugárzott lézerfény egy részét, [4 pp. 3-12].

A fentiek alapján látható a besugárzott céltárgy kezelése nagy körültekintést igényel, mivel kisebb rázkódásra, ütésnek, mechanikai behatásnak kitéve a céltárgy apró darabokra töredezhet a besugárzó kamrában, illetve annak környékén a kiszedési procedúra során. A céltárgy darabkák elszennyezhetik ezen területeket. Emiatt fontos a szakemberek számára, hogy besugárzatlan céltárgyak kiszedésével gyakorolhassanak, valamint a bal-eseti szcenáriókra is felkészülhessenek.

## Elektron reflux

A fentiekben ismertetett módon a primer lézerimpulzus plazmát generál a céltárgy felszínén. A céltárgynak a beérkező lézernyalábbal ellentétes oldalon lévő felszínét elérve az elektronok egy része távozik, ezért a fennmaradó töltéskülönbség fékezi a további elektron kiszakadást, illetve visszafordítja az elektronnyaláb „maradékát”, a folyamat többször megismétlődik, ún. elektron oszcilláció, reflux alakul ki (5. ábra).



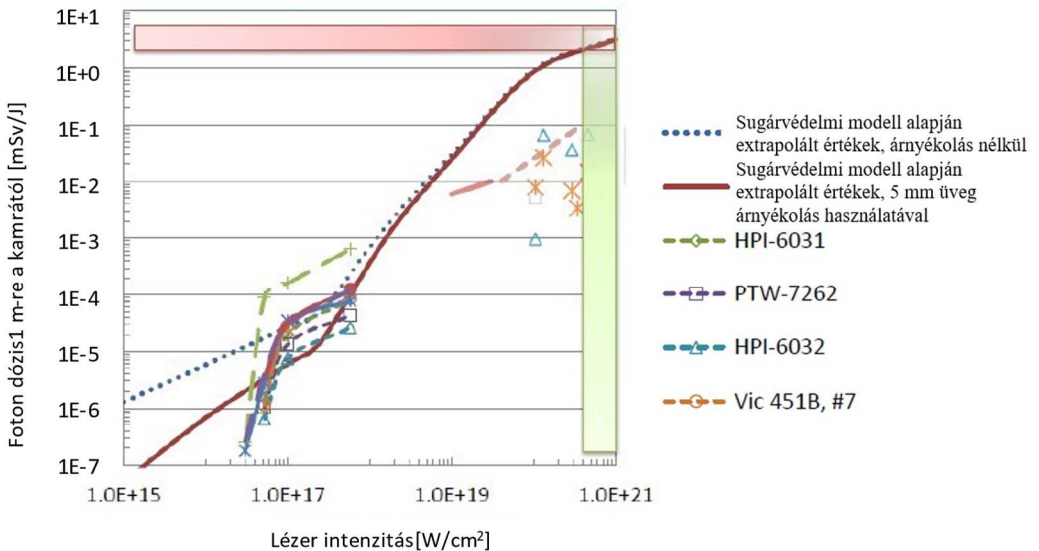
5. ábra: A céltárgyban kialakuló elektron reflux folyamata [saját szerkesztés]

Vékony, hidrogéntartalmú céltárgy esetén (1-2  $\mu\text{m}$ ) a gyors elektronok „átrepülnek” a céltárgyon, jelentékeny energiavesztés nélkül, majd a hátsó felületen lévő fel-színből protonokat szakítanak ki.

Vastagabb céltárgy esetén (>10  $\mu\text{m}$ ) a céltárgy már nem „átlátszó” az elektronok szemszögéből, az energiavesztés jelentősebb, ennek során fékezési röntgensugárzás keletkezik. Ha ezek energiája meghaladja az 1,2 MeV-ot, a fotonok útjába eső anyagok (kamrafal, árnyékolás stb.) rendszámától függő mértékben párkeltés is bekövetkezik. Minél nagyobb a reflux mértéke, annál intenzívebb röntgenfluxus is keletkezik. Azaz alacsony elektron energiákon és vastag céltárgy esetén a reflux nem effektív, mivel az elektronok többsége abszorbeálódik az anyagban, és a kiváltott röntgensugárzás sem intenzív. Vékonyabb céltárgy esetén hatékonyabb a reflux, a nagyobb rendszámú anyagok több röntgent generálnak.

A működő berendezéseknél végzett (SLAC National Accelerator Laboratory)  $10^{15-17}$  W/cm<sup>2</sup> lézer intenzitású besugárzások során a lézerfény-anyag kölcsönhatástól 1 méterre elhelyezett detektorokkal mért prompt foton dózisos extrapolációjával becsülhető, amennyiben a kamrák anyaga azonos minőségű és vastagságú a  $10^{21}$  W/cm<sup>2</sup> lézer intenzitásnál várhatóan kialakuló prompt röntgenfoton-dózisterek értéke, a besugárzó kamra környékén a céltárgyban bekövetkező elektron reflux hatására (6. ábra). A 6. ábrán a piros és a kék szaggatott görbe az elméleti extrapolációs értékeket mutatja, míg a többi

jelzés meglévő berendezéseknél különféle termolumineszcens dózismérőkkel (TLD) mért értékeket ábrázol.



6. ábra:  $10^{21} \text{ W/cm}^2$  lézer intenzitásnál várhatóan kialakuló prompt röntgenfoton-dózisterek értéke a besugárzó kamra körül [5]

A 6. ábra alapján becsülhető, hogy maximum 6 mSv/J dózis mérhető egy lövéstől a céltárgytól 1 m távolságban. Figyelembe véve a lövésenkénti 40 J energiátartalmat és a 10 Hz-es ismétlési frekvenciát, a prompt foton-dózisteljesítmény a besugárzás alatt elérheti a 2,4 Sv/s értéket! Emiatt a besugárzó termekbe való bejutást a kísérletek alatt meg kell akadályozni, vagy hatékony árnyékolást kell kiépíteni.

### A céltárgy és környezetének felaktiválódása

A lézerfény-anyag kölcsönhatás során a lézerfény nagy elektromágneses térereje gyorsított elektron- és protonnyalábokat hoz létre, melyek a céltárgyat körülvevő anyagokkal és az árnyékoló anyagokkal való kölcsönhatásuk során elektromágneses és hadronkaskádót hoznak létre. Az elektromágneses kaskád során ún. óriás rezonancia neutronok is keletkeznek. A hadronkaskád során a rugalmatlan ütközések hatására felaktiválódó anyagok minősége, ezáltal felezési ideje igen változatos lehet. A proton aktivációhoz küszöb energia szükséges ( $>100 \text{ MeV}$ ), emiatt a protonok és az árnyékoló anyagok és a céltárgyat körülvevő anyagok közötti kölcsönhatásokor jellemzően azok felszínét és felszín közeli részeit aktiválják fel. Az aktivációs hatáskeresztmetszetek anyagonként különbözők. Az anyagi minőség részletes ismerete nélkül is lehetséges azonban közelítő becsléseket tenni. G. R. Stevenson közleményében a nagy energiájú protonok szóródása során várható rugalmatlan ütközések számára (N) és az adott protonhozammal elérhető aktivitás maximumára ( $A_{\text{max}}$ ) adott meg hangsúlyozottan empirikus összefüggéseket, megjegyzendő az aktiváció valószínűsége a besugárzott anyag sűrűségétől is függ, minél nagyobb a sűrűség annál nagyobb az aktiváció valószínűsége [6]:

$$N \sim E_p(\text{GeV}) \cdot 3 \quad (1)$$

$$A_{\max}(\text{Bq}) \sim E_p(\text{GeV}) \quad (2)$$

A felaktiválódott céltárgy és céltárgy körüli anyagok reziduális (tehát a besugárzás befejezését követően is egy ideig fennálló) dózisteljesítményére ( $D^*(t)$ ) is közölt becslést a szerző. Eszerint  $D^*(t)$  arányos a besugárzás fluensével, a besugárzási idővel, valamint a besugárzás utáni eltelt relaxációs, ún. hűlési idővel [6].

$$D^*(t) = B \cdot \varphi \cdot \ln \frac{(T+t)}{t} \quad (3),$$

ahol

T: besugárzási idő [s]

t: hűlési idő [s]

B: arányossági tényező [ $\text{Sv} \cdot \text{cm}^2/\text{részecske} \cdot \text{s}$ ]

$\varphi$ : besugárzási fluens [ $\text{részecske}/\text{cm}^2$ ]

Ha  $t \gg T$ , akkor  $D^*(t) = B \cdot \varphi \cdot \left(\frac{T}{t}\right) \sim \frac{1}{t}$ , azaz a dózisteljesítmény fordítottan arányos a hűlési idővel.

Ha  $T \gg t$ , akkor  $D^*(t) = B \cdot \varphi \cdot (\ln T - \ln t)$ , azaz, ha nő a besugárzási idő, akkor a dózisteljesítmény logaritmikusan csökken a hűlési idővel.

A kis rendszámú anyagokban az empirikus közelítés szerint főleg rövid felezési idejű pozitron bomló izotópok keletkeznek. Ez alól kivétel a  $^{16}\text{O}$ -ból keletkező  $^7\text{Be}$  [6].

A kaszkád effektus során keletkező óriás rezonancia neutronok is képesek a céltárgyat és annak környékét (pl. besugárzó kamra és a kamrában elhelyezett különféle berendezések, alkatrészek) felaktiválni neutron aktivációval, mely során béta bomló izotópok keletkezhetnek. A felaktivált vékony céltárgy béta-sugárzásából fakadó reziduális dózisteljesítmény a felületből kilépő béta-részecskék számával és energiájával arányos, a kilépő részecskék számát az önabszorpció csökkenti. A gamma sugárzás reziduális dózisteljesítménye a felületből kilépő gamma fotonok számával és a fotonok energiájával arányos.

Szintén Stevenson becslése alapján neutron aktivációval a vékony felaktivált céltárgyak esetén a levegőben kialakuló béta- és gamma-dózisteljesítmények ( $D_{\beta}$  és  $D_{\gamma}$ ) az alábbi egyenletekkel közelíthetők [6]:

$$D_{\beta}^* \left(\frac{\text{Sv}}{\text{s}}\right) = 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot N_{\beta} \left(\frac{\text{db}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}\right) \cdot \left(\frac{\text{dE}}{\text{dx}}\right)_{\beta} \quad (4)$$

$$D_{\gamma}^* \left(\frac{\text{Sv}}{\text{s}}\right) = 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot N_{\gamma} \left(\frac{\text{db}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}\right) \cdot E_{\gamma} \cdot \mu \quad (5)$$

ahol:



$D_{\beta-}^*$ : A céltárgy felületén mérhető béta-sugárzásból származó dózisteljesítmény [Sv/s]

$D_{\gamma}^*$ : A céltárgy felületén mérhető gamma-sugárzásból származó dózisteljesítmény [Sv/s]

$N_{\beta}$ : A másodpercenként 1 cm<sup>2</sup> felületen kibocsátott  $\beta$ - részecskék száma [ $\frac{db}{cm^2 \cdot s}$ ]

$N_{\gamma}$ : A másodpercenként 1 cm<sup>2</sup> felületen kibocsátott  $\gamma$ -részecskék száma [ $\frac{db}{cm^2 \cdot s}$ ]

$(\frac{dE}{dx})_{\beta}$ : Átlagos energiaveszteség [MeV·cm<sup>2</sup>/g]

$E_{\gamma}$ : Átlagos fotonenergia [MeV]

$\mu$ : A céltárgy súlyozottan átlagolt fotonenergiához tartozó tömeggyengítési együtthatója [cm<sup>2</sup>/g]

Például, ha  $\frac{N_{\beta}}{N_{\gamma}} = 1$  és  $(\frac{dE}{dx})_{\beta}$  értéke 2, valamint  $E_{\gamma}=1$  MeV és  $\mu=0,03$ , akkor a becslés szerint  $D_{\beta-}^*/D_{\gamma}^*=70$ . Azaz a felszínen mért béta-dózisteljesítmény 70-szer nagyobb, mint a gamma-sugárzásból származó dózisteljesítmény.

A béta/gamma reziduális dózisteljesítmény aránya a céltárgy rendszámának, illetve vastagságának növelésével csökken a béta-sugárzás önabszorpciójának növekedése miatt. Igen vékony (vastagság <0,1 mm), kis rendszámú céltárgy esetén az arány a céltárgy felszínén az elvégzett mérések alapján jellemzően 50-szeres is lehet Stevenson megállapítása alapján, melynek érvényességét egy valós helyzetben a keletkező radioaktív anyagok minőségének ismeretében lehet csak igazolni [6]. A céltárgyhoz közeledve a béta-sugárzás értéke többszörösen felülmúlhatja a gamma-dózisteljesítményt, emiatt a céltárgyakat csak távtartóval szabad megfogni, illetve automata robotkarral, valamint a céltárgyat érdemes megfelelő árnyékolással ellátott szállító konténerbe helyezni (7. ábra).



7. ábra: Automata robotkar a céltárgyak elhelyezésére és kivételére a besugárzó kamránál, valamint árnyékolással ellátott szállító konténer [saját szerkesztés]

### Indukált (mesterséges) radioaktivitás a céltárgyon kívül

A céltárgyakon kívül a besugárzó termekben elhelyezett berendezések, eszközök, köztük az árnyékoló elemek anyagaiban is keletkezhetnek radioaktív nuklidok a lézertény-anyag kölcsönhatásából adott esetekben közvetve származó terciér neutron (óriás rezonancia neutron) részecskesugárzás hatására. A neutron indukált felaktiválódás mértéke az alábbi egyenlettel számolható:

$$A(t) = \lambda \cdot N_{\text{rad}}(t) = \sigma \cdot \varphi \cdot N_{\text{target}} \cdot [1 - \exp(-\lambda t)] \quad (6)$$

ahol:

t: besugárzási idő [s],

$\varphi$ : fluens [részecske/cm<sup>2</sup>],

$\sigma$ : aktivációs hatáskeresztmetszet [barn = 10<sup>-24</sup> cm<sup>2</sup>],

$\lambda$ : bomlási állandó [s<sup>-1</sup>],

$N_{\text{rad}}$ : keletkező radioaktív magok száma [db],

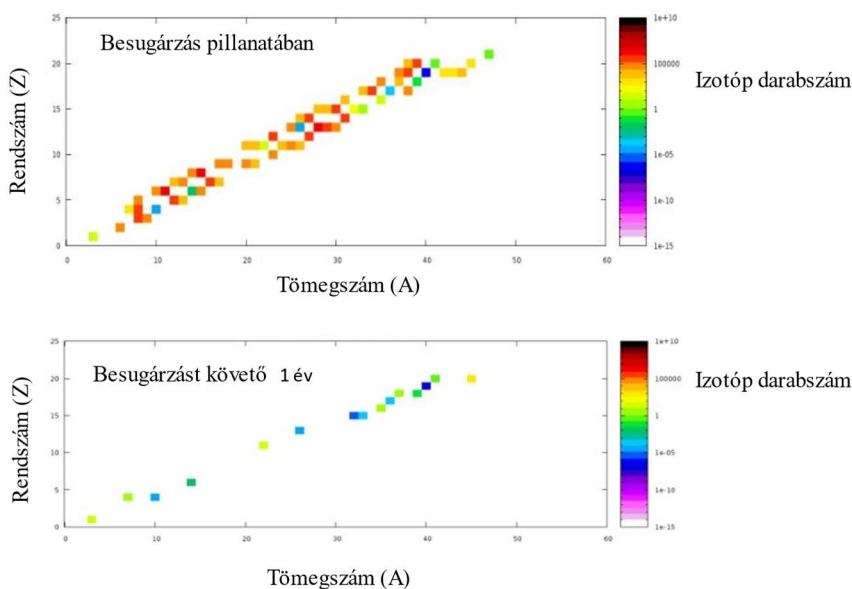
$N_{\text{target}}$ : a radionuklid keletkezéséhez vezető reakcióban részt venni képes célmagok száma

A: aktivitás [Bq].

Az árnyékoló elemekbe behatoló másodlagos sugárzások (elektron, proton) a részecske energiája és az árnyékolás anyagát jellemző gyengítési hatáskeresztmetszet függvényében eltérő mértékben képesek behatolni, ahol az erre alkalmas részecskék az anyagot fel tudják aktiválni. Az elektronok kisebb LET-értéküknek megfelelően jellemzően mélyebbre hatolnak, míg a kezdetben hasonló energiájú protonok a felszín közelében nye-

lődnek el, és okozhatnak felaktiválódást. Az elektronok csak közvetve, pl. az általuk keltett fékezési sugárzás elnyelődéséből előálló fotoneutronok révén válhatnak ki magreakciót. Az árnyékoló elemekről szóródó neutron sugárzás a besugárzó termekben lévő egyéb anyagok felszínét, illetve felszínközeli részét is képes lehet felaktiválni. A nyaláb elrendezéstől függően bizonyos területeken nagyobb lesz a felaktiválódás mértéke a neutron fluens inhomogén eloszlása és a neutronok változó mértékű termalizálódása miatt, így hosszabb besugárzásoknál kialakulhatnak hotspotok, ezekből származhat reziduális sugárzás. A reziduális sugárzásból eredő dózisteljesítmény kezdetben gyorsan csökken a kis felezési idejű radionuklidok bomlása miatt, a hosszabb felezési idejűek megmaradnak, és ezek képzik majd a hotspotokat [6].

A különböző anyagok felaktiválódásának mértéke azonos részecskesugárzás hatására a hatáskeresztmetszetek különbözősége miatt eltérő. A 8. ábrán a FLUKA kód segítségével szimulált aktivációval keletkező izotópok láthatóak a tömegszám és a rendszám függvényében nehézbetonra. A felső ábrán a besugárzás pillanatában, míg az alsó ábrán a besugárzást követő 1 év pihentetés után rögzített állapot látható, 1 db 250 MeV-es proton besugárzásra normálva, besugárzási idő 1 óra, lézer frekvencia 10 Hz, indított részecskeszám  $10^9$  db proton (minden kis négyzet 1-1 izotópot jelöl).



8. ábra: Nehézbeton (Nurad 385) felaktiválódása a besugárzás pillanatában és a besugárzás követő 1 évben (x: tömegszám (A), y: rendszám (Z), színkód: Izotóp darabszám 1 db 250 MeV proton besugárzásra normálva) [saját szerkesztés]

A 8. ábra alapján – a felső és alsó ábrát összevetve – megállapítható, hogy a protonok által generált radioaktív izotópok nagy része igen gyorsan elbomlik, ennek ellenére a hosszú idejű lézerhasználat esetén az anyagban a hosszú felezési idejű radionuklidok feldúsulnak (8. ábra alsó).

## MÓDSZERTANI ÚTMUTATÓ, AJÁNLÁSOK

Az ajánlások célja, hogy szakmai segítséget nyújtsanak a nyílt sugárforrásnak minősülő céltárgyról leváló törmelék, az akár néhány  $\mu\text{m}$  méretű felaktiválódott (radioaktív) anyagok hatékony kereséséhez, megtalálásához, valamint a besugárzó kamra dekontaminálásához, illetve a termekben kialakuló hotspotok felkutatásához a háttérhez képest nagyobb dózisteljesítményű térben, amit a reziduális aktivitás okoz. Ezt a munkát már az ELI ALPS indulásakor elindítottuk, így a korábbi eredményekből egyetemi szakdolgozat is készült [10].

Mivel a céltárgyak kis mérete (pár  $\mu\text{m}$ , szemmel nem látható) megnehezíti a kezelésüket, így ionizáló sugárzások mérésére alkalmas készülékek használata indokolt. Amennyiben ezen apró céltárgy darabkák ellenőrizetlenül kikerülnek a besugárzó kamrából, akkor megnő a környezeti szennyezés (kontamináció) és humán szennyezés (inkorporáció) kockázata.

Az útmutatóban leírtak segítséget adhatnak az operátorok, sugárvédelmi megbízottak számára az elveszett céltárgyak, céltárgy törmelékek, valamint elveszett források felkutatásához.

A sugárveszélyes munkafolyamatokat csak olyan személyek végezhetik, akiknek megfelelő sugárvédelmi képzettségük és tapasztalatuk van, valamint felhatalmazásuk a munkáltató részéről. A sugárvédelmi képzés feltételei megtalálhatók a 2/2022. (IV. 29.) OAH rendeletben [7]. A sugárforrás keresése begyakorolható az erre a célra kialakított tanpályán valós, illetve virtuális sugárforrásokkal.

Az ilyen munkát végző személyek képzésének kötelező eleme a minimum bővített sugárvédelmi tanfolyam a nagy teljesítményű lézerberendezés sugárvédelmi sajátosságával kiegészítve, valamint a rendszeres időközönként tartott gyakorlatokon való részvétel.

### Sugárvédelmi ellenőrző mérések, monitorozás

A besugárzó termekbe való belépéskor hordozható belégzés monitorral kell meggyőződni arról, hogy a termék kiszellőztek, a levegő a természetes háttérszint felett nem tartalmaz mérhető mennyiségben radionuklidokat.

A besugárzást követően (a besugárzási kamrában vákuumot kell létrehozni a kísérletek alatt) a vákuumot először meg kell szüntetni, majd a kamrát ki kell nyitni, különösen ügyelve arra, hogy a céltárgyról esetlegesen levált mikroszkopikus méretű radioaktív szennyeződések ne juthassanak ki a külső térbe. Nyitás után a sugárvédelmi megbízottnak alfa, béta és gamma felületi szennyezettséget mérő eszközzel végig kell mérnie a besugárzó kamra belső részét, és meg kell találni a céltárgy esetleg levált darabjait.

### Radioaktív anyag kezelése

Egy robotkar vagy csipesz segítségével ki kell emelni a besugárzott, aktív céltárgyat, majd egy jól záródó, vonalkóddal (vagy azonosító címkével) ellátott nejlon tasakba kell helyezni. A besugárzott céltárgyról érdemes minden információt digitális archívumba felvezetni (fénykép, besugárzási körülmények, mért gamma-spektrum, egyéb dokumentumok). A későbbiekben a vonalkód és informatikai program segítségével könnyedén megtehető minden információ a céltárgyról.

## Radioaktív anyag tárolása

Amennyiben gamma-sugárzó az anyag, akkor ólom tokokban kell tárolni a besugárzott céltárgyakat (levált darabokat) a házban belüli szállítás idejére. A felaktiválódott anyagokat célszerű mindig távfogókkal mozgatni. Végül a céltárgyat egy ólom tároló konténerbe kell helyezni tárolás céljából. A szállító- és tároló konténer sugárveszély bárccával kell ellátni és úgy lezárni, hogy illetéktelenek ne férhessenek hozzá. A tárolást olyan helyen kell biztosítani, ahová csak külön belépési jogosultsággal és sugárvédelmi képzettséggel rendelkező személyek léphetnek be. A besugárzó kamra dekontaminálását és a felaktivált anyagok elszállítását követően a sugárvédelmi megbízott engedélye alapján lehet csak belépni a besugárzó termekbe.

A fenti folyamatokhoz a következő protokoll tartozik: Belépés előtt megfelelő zárt védőruházat, két pár gumikesztyű, szájmascsk, védőszemüveg, tisztatéri cipő felvétele szükséges, valamint hatósági dózismérő és kiegészítő EPD (elektronikus személyi doziméter) viselése is kötelező (9. ábra). Az öltözetnek meg kell felelnie a tisztatér technológiának a lézertechnológia miatt, illetve a sugárvédelmi előírásoknak is. A védőruházatok fel- és levételét ún. fekete-fehér öltözőben kell elvégezni. A mérőműszereket szintén védőburkolattal kell ellátni az esetleges kontamináció elkerülése végett. Ellenőrizni kell a mérőműszerek kalibráltságát, hitelesítését és a mérőeszközök akkumulátorainak töltöttségi szintjét is.



9. ábra Megfelelő védőruházat [saját szerkesztés]

Két személy (minden ilyen sugárveszélyes munka végzéséhez két fő szükséges) bemegy a kutatási területre felszerelve a személyi dozimetria eszközeivel: hatósági TLD, EPD (Electronic Personal Dosimeter); továbbá a mérésekhez szükséges detektorokkal: felületi szennyezettség mérő,  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$  mérők, dózisteljesítmény-mérő, valamint kézi nuklidazonosító készülék, illetve belégzés monitor. A terület határán először háttérsugárzást kell mérni. Ezután a céltárgyról levált szennyeződések megkeresni: a dózisteljesítménymérő és felületi szennyeződés mérő jelzései alapján a forró pontok meghatározhatók. Amennyiben a nuklidazonosító dózisteljesítmény-mérő része háttérsugárzási szintet jelez

(10. ábra, bal), érdemes a műszert spektrum analízáló üzemmódba kapcsolni, így meghatározhatók a kis gamma-energiájú, felaktiválódott anyagok (10. ábra jobb).



10. ábra: Gamma dózisteljesítmény mérés (bal oldali ábra), spektrum analízis (jobb oldali ábra) RIIDEye-G készülékkel [saját szerkesztés]

## Dekontaminálás

A céltárgy elszállítása után a besugárzási kamra dekontaminálása következik. A műszer által mért aktivitás két helyről származhat: a kamra felaktiválódott anyagából, vagy a kamra falára rakódott aktív szennyeződésekéből. Ez dörzsmintavétel segítségével határozható meg. Egy etanolba áztatott inaktív vattával át kell dörzsölni az aktívnek vélt felületet, majd a vattát nejlon csomagolásba kell elhelyezni, hogy elkerülhető legyen a véletlen szennyezés. A becsomagolt dörzsmintát a besugárzó termen belül egy erre a célra kijelölt természetes környezeti háttérsugárzású területre kell szállítani. Ott meg kell mérni a felületi szennyezettségét. Ha a műszer emelkedett értéket mutat, akkor megállapítható, hogy lerakódott szennyeződésről van szó, amit dekontaminálni kell. Amennyiben nem mérhető a háttérnél magasabb érték, akkor a kamra anyaga aktiválódott fel, amire fel kell hívni a figyelmet. Ebben az esetben a sugárvédelmi megbízott további utasításáig nem lehet a kamrát megközelíteni. A sugárvédelmi megbízottnak a kamrában lévő felületi szennyezettséget dekontaminálnia szükséges, az irányadó beavatkozási felületi szennyezettség értékek megtalálhatóak az MSZ:62-7/2017 szabvány 5. táblázatában.

Az eljárás során fontos a detektor megfelelő pozicionálása (11. ábra), ugyanis a kizárólag spektrum analízissal detektálható szennyeződések annyira kis aktivitásúak lehetnek, hogy helytelen mérési módszer esetén detektálásuk elmaradhat. A mérőszondát a vizsgált felülethez a lehető legközelebb, merőlegesen tartva kell a mérést elvégezni, mivel az aktivitás kimutatási érzékenysége a távolság négyzetével arányosan romlik.



11. ábra: Megfelelő mérési módszer RIIDEye-G készülékkel [saját szerkesztés]

A dekontaminálást hosszú szárú csipesszel megfogott, dekontamináló szerbe mártott vattával kell elvégezni. A használt vatták veszélyes radioaktív hulladéknak minősülnek, és ennek megfelelően kezelendők. Dekontaminálás után feltétlenül szükséges a védőruházatok vizsgálata felületi szennyezettség mérővel (12. ábra), majd a védőruházatok levétele.



12. ábra: Védőöltözet ellenőrzése, kilépéshez [saját szerkesztés]

A kamra sugárvédelmi ellenőrzésére fordítandó idő legfeljebb fél – 1 óra.

A folyamatról jegyzőkönyv készítése szükséges, amelyben az alábbi adatoknak kell szerepelnie:

- munkafolyamatot végző személyek neve
- munkafolyamat kezdési és befejezési dátuma, ideje
- munkafolyamat helye
- besugárzott anyag
- szennyeződések típusa, aktivitásának mértéke
- munkafolyamat rövid leírása
- anyagfelhasználás
- megjegyzés
- rendkívüli események

A munkafolyamat során használt szerszámokat, alkatrészeket, amelyek szennyeződhetnek, a besugárzó termék melletti sugárvédelmi laboratóriumba kell elhelyezni, illetve használaton kívül ott kell tárolni.

### TANPÁLYÁK, GYAKORLATOK, FOSTER

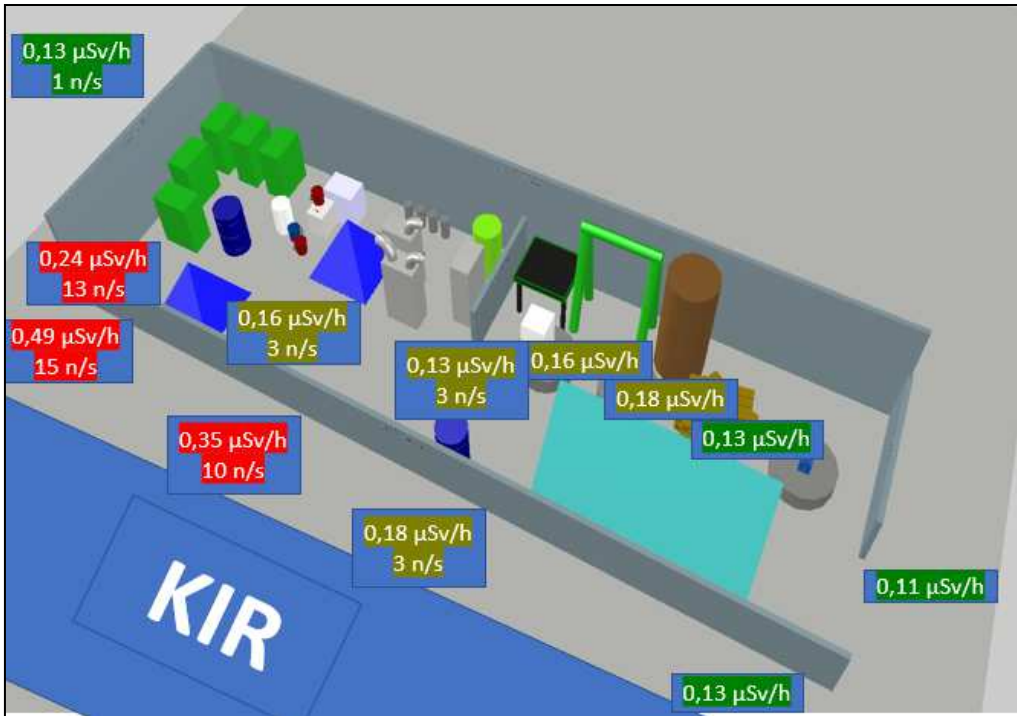
A nagy teljesítményű lézerberendezés hosszabb távú működése során számolni kell a céltárgyak, a besugárzó kamra, az árnyékoló elemek és egyéb berendezések felaktiválódásával, az ún. hotspotok kialakulásával és a háttérhez képest emelkedettebb dózisteljesítményekkel a reziduális sugárzás következtében. Kisméretű és kisebb aktivitású anyagokat még normál háttér-érték mellett is nehéz és hosszadalmas megkeresni, nagyobb háttérnél pedig speciális eszközökre és megfelelő gyakorlatra van szükség.

A 490/2015 (XII.30.) rendelet [8] értelmében, amennyiben sugárforrást találnak vagy foglalnak le a hatóságok az országban, akkor a rendelet és a hatályos jogszabályok alapján esetenként több, elsődleges detektálásra és reagálásra is jogosult és detektálási képességekkel rendelkező hatóság is kivonul(hat) a helyszínre (Katasztrófavédelem, Terror Elhárítási Központ, Nemzeti Nyomozó Iroda). Radioaktív anyag, (pl. zárt radioaktív sugárforrások) esetén az OKI készenléti csapata az OSKSZ (Országos Sugáregészségügyi Készenléti Szolgálat) az illetékes helyszínelő, amennyiben az anyag nukleáris, akkor az OSKSZ, vagy más szervezet értesítése után, az EK SBL (Energiatudományi Kutatóközpont Sugárbiztonsági Laboratórium) feladata az anyag helyszíni vizsgálata, kategorizálása, begyűjtése és elszállítása az EK telephelyére.

A Sugárbiztonsági Laboratórium emiatt létrehozta a MEST (**M**obile **E**xpert **S**upport **T**eam) csapatot, melynek elsődleges feladata felkészülni radioaktív sugárforrások felkutatására az egyszerűtől az igen bonyolult esetekig [9].

A 490-es rendelethez kapcsolódó eljáró szervek kiképzésére létrehoztunk tanpályákat (FOSTER: **F**irst resp**O**nder**S** cen**T**re at **E**nergy **R**esearch on Nuclear Security) az Energiatudományi Kutatóközpontban, ahol igen sokféle scenáriót lehet begyakorolni. A tanpályák közül a **K**özponti **I**zotóp **R**aktár (KIR) mellett elhelyezkedő hangár speciális, mivel itt normál és emelkedett háttér lett kialakítva (13.-14. ábra) [11]:





13. ábra: A KIR melletti tanpálya dózistérképe [saját szerkesztés]



14. ábra: A KIR és a speciális tanpálya [saját szerkesztés]

Az emelkedetebb háttér miatt ez a terület ideális gyakorló pálya, mivel a remanens dózisteljesítménnyel rendelkező besugárzó termekhez hasonló körülmények lettek kialakítva.

Az SBL forráskeresési eljárásokat dolgozott ki, ezek leírása megtalálható az Országos Atomenergia Hivatal (OAH) honlapján [12]. A MEST csapat számos nemzetközi konferencián demonstrálta a forráskeresést, a helyszínelő rendőrséggel közös eljárásrendet dolgozott ki, továbbá az Országos Katasztrófavédelem Katasztrófavédelmi Mozgó Laboratórium egységeinek tart forráskeresési gyakorlatokat. Az SBL-en és a hozzá tartozó tanpályák segítségével időben fel lehet készülni és meg lehet szerezni a megfelelő gyakorlatot az ELI ALPS sajátos környezetéhez.

## ÖSSZEFOGLALÓ

A kutatási célú lézerek maximális intenzitása és teljesítménye az elmúlt húsz év alatt drasztikusan emelkedett. A nagy intenzitású lézerimpulzus és az anyag kölcsönhatása során bizonyos elrendezések mellett a kísérletekben többféle ionizáló sugárzás, szekunder és terciér részecskék is keletkezhetnek. A generált proton- és/vagy neutronsugárzás felaktiválhatja a céltárgyat, a besugárzó kamrát, az árnyékoló elemeket, valamint a besugárzó termék egyéb anyagait.

A nagy teljesítményű lézerberendezések sajátos sugárvédelméhez tett ajánlások segítik az ilyen létesítményben dolgozó sugárvédelmi szakembereket jobban megérteni, milyen fő fizikai folyamatok játszódnak le, melyek a sugárvédelmi szempontból releváns folyamatok, és ezeknek milyen várható hatásai vannak.

A kísérletek után a céltárgyak és törmelékek biztonságos megtalálása, elhelyezése, hotspotok, felületi szennyezettségek felkutatása és dekontaminálása kulcsfontosságú, mivel ezek hiányában a munkavállalók elszennyezhetik a besugárzó kamrát, a kísérleti labort és annak külső folyosóját.

Az EK SBL több éve foglalkozik sugárforrások felkutatásával, és olyan tanpályákat épített ki, ahol ezek a műveletek gyakorolhatók. A KIR melletti hangárban speciális emelkedett háttér található, ami kiváló terep az emelkedett háttérben történő forráskeresés készségeinek elsajátításához.

Az ELI ALPS projekt (GINOP-2.3.6-15-2015-00001) az Európai Unió támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával valósul meg.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Osvay Károly: Az ELI-ALPS lézerei és kutatási infrastruktúrája [https://www.kfki.hu/elftkisk/61\\_Anket/61\\_Eloadasok/Osvay\\_K.pdf](https://www.kfki.hu/elftkisk/61_Anket/61_Eloadasok/Osvay_K.pdf) (Letöltés ideje: 2022.09.11.)
- [2] <https://www.youtube.com/watch?v=MINxgmPVF6U&t=2s> (Letöltés ideje: 2022.09.05.)

- [3] J. Bauer, J. C. Liu, A. A. Prinz, S. Rokni, H. Tran, M. Woods, and Z. Xia, E. Galtier, H-J Lee, D. Milathianaki, B. Nagler: Measurements of Ionizing Radiation Doses Induced by High Irradiance Laser on Targets in LCLS MEC Instrument, SLAC PUB-15889, 2013.12.15. <https://www.osti.gov/biblio/23082908> (Letöltés ideje: 2022.09.10.)
- [4] Jegenyés Nikoletta: Ultrarövid lézerrimpulzusok kölcsönhatása fém és félfém céltárgyakkal, [http://doktori.bibl.u-szeged.hu/id/eprint/838/10/2010\\_jegyenyes\\_nikoletta.pdf](http://doktori.bibl.u-szeged.hu/id/eprint/838/10/2010_jegyenyes_nikoletta.pdf) (Letöltés ideje: 2022.09.10.)
- [5] J. Bauer, J. C. Liu, A. A. Prinz, S. Rokni, H. Tran, M. Woods, and Z. Xia, E. Galtier, H-J Lee, D. Milathianaki, B. Nagler: Measurements of Ionizing Radiation Doses Induced by High Irradiance Laser on Targets in LCLS MEC Instrument, SLAC PUB-15889, 2013.12.15. <https://www.osti.gov/biblio/23082908> (Letöltés ideje: 2022.09.10.)
- [6] Graham R. Stevenson: Induced activity in accelerator structures, air and water, [https://www1.lnl.infn.it/~radprot/index\\_html\\_files/act.pdf](https://www1.lnl.infn.it/~radprot/index_html_files/act.pdf) (Letöltés ideje: 2022.10.16.)
- [7] 2/2022. (IV.29.) OAH rendelet <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a2200002.oah> (Letöltés ideje: 2022.10.27.)
- [8] 490/2015. (XII. 30.) Korm. rendelet: a hiányzó, a talált, valamint a lefoglalt nukleáris és más radioaktív anyagokkal kapcsolatos bejelentésekről és intézkedésekről, továbbá a nukleáris és más radioaktív anyagokkal kapcsolatos egyéb bejelentést követő intézkedésekről: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1500490.kor> (Letöltés ideje: 2022.06.07.)
- [9] Dr. Éva Kovács-Széles, István Almási, Ákos Balaskó, Csaba Bíró, Károly Bodor, Csilla Csöme, Izabella Kakuja, Zsuzsanna Kreitz, Kornél Papp, Csaba Tóbi, József Volarics: How to respond a crime scene contaminated with radioactive material? Belügyi Szemle / 2020 / Special Issue 3., <https://ojs.mtak.hu/index.php/belugyi-szemle/article/view/4852> (Letöltés ideje: 2022.06.07.)
- [10] Vaska-Potharn Henriett: Az ELI-ALPS HTA-beli ionizáló sugárforrások sugárvédelmének elemzése, Diplomamunka, 2015. GAMF
- [11] Károly Bodor, Péter Zagyvai: Lost radioactive source exploration training capabilities at the Centre for Energy Research (EK), <https://biztonsagtudomanyi.szemle.uni-obuda.hu/index.php/home/article/view/252/228> (Letöltés ideje: 2023.03.01.), Biztonságtudományi Szemle Évf. 4 szám 4. (2022)
- [12] OAH útmutató: Útmutató a hiányzó nukleáris vagy más radioaktív anyagok keresésére [http://www.haea.gov.hu/web/v3/oahportal.nsf/708B91804DA53733C1258167002F0F67/\\$FILE/FV-20v1T\\_v%C3%A9gleges\\_korr\\_tiszta.pdf](http://www.haea.gov.hu/web/v3/oahportal.nsf/708B91804DA53733C1258167002F0F67/$FILE/FV-20v1T_v%C3%A9gleges_korr_tiszta.pdf) (Letöltés ideje: 2023.03.01.)