

Az ELI sugárvédelmi rendszereinek tervezési alapjai

Bodor Károly*

Magyar Tudományos Akadémia KFKI Atomenergia Kutatóintézet,
1121, Budapest Konkoly Thege M. út 29-33.

*bodor@aeki.kfki.hu

Title: Principle design elements of the radiation protection systems of the ELI

Abstract - The paper presents the principles of radiation protection of the ELI in the Czech Republic. Numerous particles are generated and accelerated by the laser matter interactions, these particles can get out to the environment or they can activate the materials of the environment.

Keywords- Radiation protection, ELI

Kivonat

A cikk bemutatja a Cseh Köztársaságban épülő ELI (Extreme Light Infrastructure) nagyteljesítményű lézerberendezés sugárvédelmi tervezési alapjait. A nagyteljesítményű lézerfény és az anyag kölcsönhatása során számos részecske keletkezik és felgyorsul, amelyek a kísérleti berendezésből kiléphetnek a környezetbe, illetve felaktiválhatják a környezetükben található anyagokat.

Kulcsszavak – Sugárvédelem, ELI

BEVEZETŐ

Az ELI (Extreme Light Infrastructure) rövid impulzusidejű, és a világon jelenleg létező lézereknél ezerszer nagyobb teljesítménysűrűségű lézerfényt szolgáltató szuperlézer. Az épülő berendezés az alap és alkalmazott kutatásokban a fény és az anyag kölcsönhatását minden eddiginél nagyobb intenzitással lesz képes vizsgálni (az ún. ultra-relativisztikus tartományban). Működése első 10 évében a világon egyedülálló paraméterekkel fog rendelkezni. Az ELI az EU lézer kutató központja lesz Közép-Kelet Európában. A projekt része az European Roadmap for Research Infrastructures programnak (ESS, X-FEL). A nagyberendezés tervezésében 13 európai ország vesz részt ELI-PP (Preparatory Phase). A programot a francia lézerfizikusok kezdeményezték Prof. Gérard Mourou vezetésével. Az ELI berendezés három helyszínen fog megvalósulni:

- Csehország, Prága: lézertechnológiai és lézeralkalmazási központ
- Magyarország, Szeged: attoszekundumos lézertechnológiai központ
- Románia, Bukarest: fotonukleáris lézertechnológiai központ

Az érintett főbb tudományterületek: magfizika, asztrofizika, kozmológia, nagy energiájú fizika, gyógyítás, nukleáris technika, nanotechnológia.

Az ELI teljesítménye a PW többszörösét is elérheti, míg az impulzus időtartama ns-as nagyságrendű. Az ELI segítségével számos alap és alkalmazott kutatás válik lehetővé. A feladat a világon a legnagyobb teljesítményű lézer sugárvédelmének tervezése.

AZ ELI SUGÁRVÉDELMI RENDSZEREINEK TERVEZÉSI ALAPJAI

A nagyteljesítményű lézerberendezések sugárvédelme a sugárvédelem egy speciális, újabb részterülete. A sugárvédelmi rendszerek tervezésénél figyelembe kell venni azt a tényt, hogy a lézer – anyag kölcsönhatás során széles energia tartományban, számos részecske típus keletkezik. Kevés információ áll rendelkezésre a lézerek sugárvédelmének tervezésére. Az

ELI-t annak sajátos műszaki paramétereit miatt nehéz összehasonlítani más nagyberendezésekkel, pl. a National Ignition Facility (NIF)-vel. A tervezéshez az információkat elsősorban a nagyteljesítményű szuperlézerek sugárvédelmével foglalkozó közleményekből lehet beszerezni. A szuperlézerek sugárvédelmének tervezésekor a gyorsítók sugárvédelmi terveit célszerű alapul venni. A gyorsítók esetén a részecske forrás tagja ismert, míg a szuperlézereknél a forrás tagot is meg kell határozni.

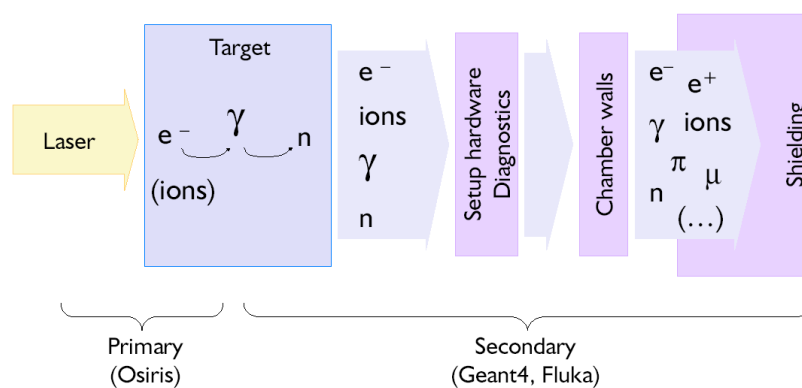
Tervezési alapok, kritériumok

Az ELI tervezésénél a nemzetközileg elfogadott irányelvek a mértékadók, melyeket az IAEA, ICRU, ICRP készített, továbbá az EU direktíváit is figyelembe kell venni, valamint az adott ország sugárvédelmi szabályozásában leírtakat. A tervezésnél az ALARA elvnek kell érvényesülni.

A tervezés lépései

- Tervezési folyamat eszközeinek meghatározása
- Kimeneti lézer paraméterek meghatározása
- Lézer-céltárgy kölcsönhatás szimulálása
- A kísérletek során keletkező részecskék meghatározása
- Árnyékolás tervezése FLUKA kóddal (1. ábra)
- Ellenőrző mérések

A védelem kidolgozásához szükséges ismerni a létesítmény műszaki paramétereit: teljesítmény, szellőzés, eszköz méretek, rendelkezésre álló hely, működési időtartam, sugár karakterisztika, maximális energia, a target anyagi jellemzői, vizsgálati, mérési módszerei, stb. Az 1. ábrán a lézer-anyag kölcsönhatás során felgyorsított részecskék és a részecskék nyaláb csapda kölcsönhatás látható. A lézer-anyag kölcsönhatás során felgyorsított részecskéket az ún. OSIRIS kóddal határozzák meg, majd a nyaláb csapdát a FLUKA programmal tervezik.



1. ábra: Az árnyékolás tervezésének lépései [3]

Az ún. PDCA (Plan, Do, Control, Act) ciklus alapján a rendszer megtervezését és megépítését, üzembe helyezését követően a teszt működés alatt ellenőrző méréseket kell végezni. Amennyiben a mérési adatok alapján a dózisteljesítmény meghaladja a tervezett értékeket, úgy további számítások, szimulációk elvégzése szükséges és az árnyékoló rendszert tovább kell bővíteni. A sugárvédelmi rendszer engedélyezhető, ha a dózisteljesítmény szintek nem lépik túl a hatóság által előírt értékeket.

Az ún. FEP (Features, Events, Process) (események, lehetőségek, folyamatok) lista készítése során minden lehetséges eseményt és hatást felvázolnak az érintett szakemberek (pl. veszély források). A második körben a súlyozott FEP mátrixot definiálják, elsődleges közelítések, becslések, alapján az események valószínűségéhez, kockázatához, hatásaihoz számokat, illetve minősítő pontokat rendelnek, így az események, hatások, kockázatok sorrendje meghatározható. A magasabb pontszámokkal rendelkező eseményekre több, precízebb számítás, szimuláció szükséges, míg a kevésbé releváns események analíziséhez kevesebb erőforrás szükséges. A súlyozott FEP lista segítségével a tervezés során optimalizálható a humánereforrás és a számítási kapacitások hatékony kihasználása, így a tervezés idő- és költséghatékony. Ez a lista az alap a későbbi ellenőrzések során, a kevésbé releváns eseményeket ez alapján lehet le ellenőrizni, ha mégis jelentős az esemény, akkor azt újra kell vizsgálni.

Az LCA (életciklus) elemzések alapján a sugárvédelmi anyagok (árnyékoló anyagok) optimális megválasztása válik lehetővé, ami ugyancsak a költséghatékonyságot növeli.

A konkrét feladatok definiálásával, határidők kitűzésével, felelősök megnevezésével, azaz a munkaterv kidolgozásával kezdődhet a tervezési folyamat. Az ELI tervezésekor több munkacsoportot is létrehoztak, a sugárvédelmet a 6-os számú (WP6) csoport tervezte. Az elkészült tervek és ellenőrző mérések alapján demonstrálható a hatóságok, befektetők, dolgozók, kormány, társadalom számára, hogy a berendezés teljesíti a szabályozásban, ajánlásokban, törvényekben előírtakat, illetve a létesítmény környezeti hatásai nem jelentősek.

A forrástag meghatározása

A lézer-anyag kölcsönhatás során plazma és indukált elektromágneses tér keletkezik, a töltött részecskék ebben a térben gyorsulnak fel. A kölcsönhatás során egy lézernyaláb irányú részecske sugárzás jön létre, mely nagy energiájú (akár GeV nagyságrendű) elektronokból és protonokból áll. A forrástagot szimulációval ill. a meglévő empirikus adatok extrapolálásával határozzák meg.

Az ELI teljesítménye, műszaki paraméterei ($I=10^{22}-10^{25}$ W/cm²) több nagyságrenddel meghaladja a jelenleg üzemben lévő lézerek teljesítményét. A világ több pontján működő nagyteljesítményű lézerberendezések mért adatai alapján az ELI forrástagja extrapolációval közelíthető. A részecskék definiálása után az adatokat standard adat formában gyűjtötték össze, így a különböző források, kísérletek összehasonlíthatóvá válnak. A keletkező részecskéket leíró egyenlet folyamatos, illetve kvázi-monokromatikus komponensekre bontható.

Az alábbi link tartalmazza az eddig összegyűjtött adatokat és számításokat a már meglévő nagy berendezésekről: <http://eli6.fis.usal.es/>. A nyaláb spektrumát, szögeloszlását empirikus adatok alapján becslik a VULCAN berendezés (STFC) (<http://www.clf.rl.ac.uk/Facilities/Vulcan/12248.aspx>) adatait felhasználva 1, 10, 100 PW-ra, illetve $10^{20}-10^{23}$ W/cm²-re.

A fotonok gyakorlatilag monoenergetikusak, a foton fluens elérheti $3 \cdot 10^{16}$ foton/lövés-t. A proton nyalámban a protonok energiája szélesebb tartományú, míg az elektronok kvázi monoenergetikusak.

10 PW teljesítmény esetére az 1 PW-os adatokat felhasználva extrapolációval határozzák meg a dózisteljesítményeket. A numerikus szimulációk és modellek alapján a nagy energiával rendelkező protonok száma elérheti a 10^{11} db/lövés –t. Elektronok esetén a maximális gyorsulási hosszúság alapján becsülhető a felgyorsított elektronok energiája, 4 m esetén az elektronok a 38 GeV-ot is elérhetik.

100 PW esetén csak szimulációval lehetséges meghatározni a forrástagot, mivel ebben a teljesítmény tartományban jelenleg nincs kísérleti adat. A szimulációkat az OSIRIS 2.0

kóddal végezték. A program a Maxwell-Lorentz egyenleteket felhasználva a szukcesszív approximáció elve alapján lépésről-lépésre újra és újra számolja a részecskék állapotjellemzőit egy „véges dobozban”. A részecskék a lézer nyaláb irányába haladnak, energiájuk a GeV-ot is elérheti a lokálisan indukált nagy elektromágneses térben. Az OSIRIS szimulációs kód akár 100 Tbyte adatot is generál szimulációnként, ezért a kódot csak nagy teljesítményű szuperszámítógépen lehet futtatni. A felgyorsított protonok és elektronok a lézer nyaláb irányába haladnak, az elektron nyalábnak egy kis része azonban 90° -ban szóródik.

SUGÁRVÉDELMI ÁRNYÉKOLÓ ANYAGOK TERVEZÉSE

Az árnyékolás tervezéséhez a rendelkezésre álló bemenő paraméterek (lézer berendezés, cél tárgy paraméterei) alapján, a forrástag meghatározását követően a részecskék spektrum adatait az ún. FLUKA kódban használják fel. A FLUKA kódot a CERN-ben fejlesztik 1962 óta. A kód képes több mint 60 részecske mozgását szimulálni akár TeV energiákon is. Az ELI-ben a részecskék GeV energiára is szert tehetnek, ezért a FLUKA az ELI esetében is használható. További információ a FLUKA kóddal kapcsolatban: <http://www.fluka.org/fluka.php>. A lézer teljesítményétől és ismétlési frekvenciájától, valamint a céltárgy anyagától függ a kialakuló részecske nyaláb karakterisztikája. A nagy teljesítményű, kis ismétlés frekvenciájú lézernyaláb által keltett nyaláb energiája közel egy nagyságrenddel nagyobb, mint a kisebb teljesítményű, nagyobb ismétlés frekvenciájú lézer nyaláb részecske energiája. A kisebb teljesítményű, nagyobb ismétlés frekvenciájú lézer nyaláb által felgyorsított részecskék integrális dózisa adott esetben, azonban meghaladhatja a nagy teljesítményű, kis ismétlés frekvenciájú lézernyaláb által felgyorsított nyaláb integrális dóziséét.

Az árnyékoló anyag választás optimalizálása

Az ELI sugárvédelme esetén a hagyományos árnyékoló anyagok jöhetnek szóba, így a beton, nehéz beton, acél, vas, fa, ólom, ólom ötvözetek, szegényített urán, paraffin, egyéb nagy hidrogén tartalmú anyagok. Szilárd anyagokban, levegőben, vízben keletkezhetnek radioaktív nuklidok a fény-anyag kölcsönhatása, illetve az ebből származó felgyorsított részecskék hatására. A számos lehetőség közül olyan árnyékoló anyagot kell választani, ami hatásosan árnyékol a fellépő sugárzásokkal szemben, továbbá kevésbé aktiválódik fel, így élettartama hosszú.

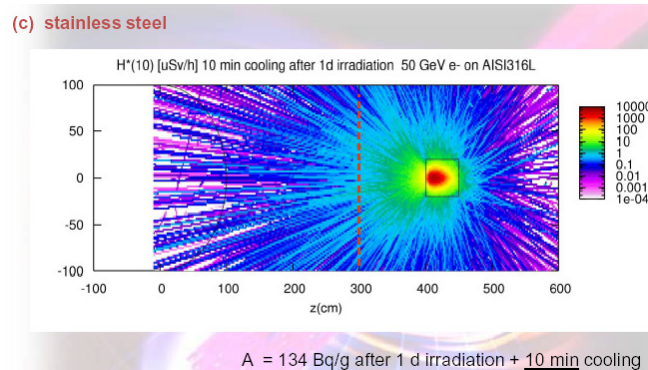
Az árnyékoló anyagok csoportosítása a felaktiválódás szempontjából:

- Kicsi: ólom, beton, alumínium, fa, műanyag
- Közepes: króm, vas
- Nagy: cink, arany, magnézium, kobalt, nikkel

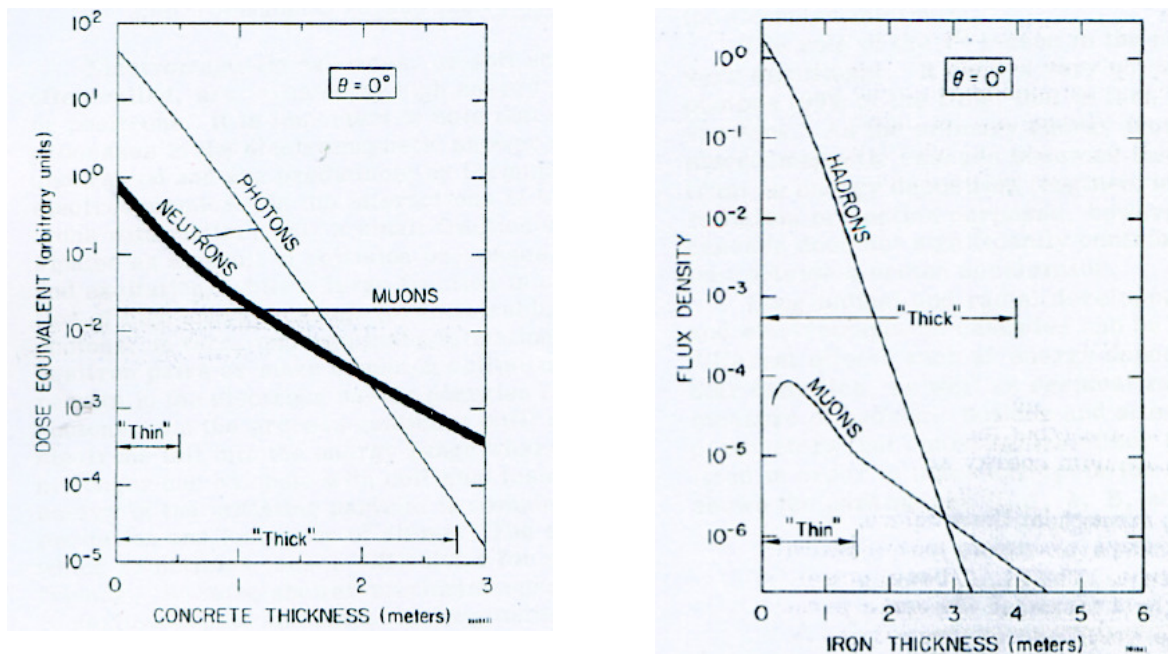
A kísérletek során több fajta részecske gyorsul fel, széles energia tartományban. A hadron-elektromágneses-kaszád hatásos csökkentése érdekében nagy rendszámú árnyékoló anyagokat célszerű választani, ugyanakkor a nagyrendszámú anyagok az elektronok által keltett rezonancia neutronok hozamát növelik, továbbá a hadron-elektromágneses-kaszád is neutron sugárzást generál. Ezért az árnyékoló falat többféle anyagból kell építeni, melyben kis és nagy rendszámú anyagok is megtalálhatóak. Az árnyékoló falat célszerű héj szerkezetűnek építeni, a nagyrendszámú anyagok a müon, proton-elektron-foton kaszkádot nyelik el, a kis rendszámú anyagok a neutron sugárzást csökkentik. Az ilyen héj szerkezetű sugárvédelmi árnyékoló berendezéseket beam dump-nak (nyaláb csapda) nevezzük.

A FLUKA kóddal réz, ólom és rozsdamentes acélon végeztek aktivációs szimulációkat (2. ábra jobb oldalán a környezeti dózisegyenérték-teljesítmény színekód látható ($\mu\text{Sv/h}$ -ban), 1 napos besugárzás 50 GeV-os elektronokkal). A 2. ábra alapján látható, hogy a felaktiválódás

szempontjából a rozsdamentes acél (AISI-316L) a legmegfelelőbb anyag, mivel kevésbé aktiválódik fel, illetve azért mert a vas hatékonyan gyengíti a müon sugárzást (3. ábra).



2. ábra: Az optimális árnyékoló anyag megválasztása aktiváció szempontjából. Jobb oldalon a környezeti dózisegyenérték-teljesítmény színekódja látható ($\mu\text{Sv/h}$), az y és z tengelyen a távolság saválló acélban (cm) [3]



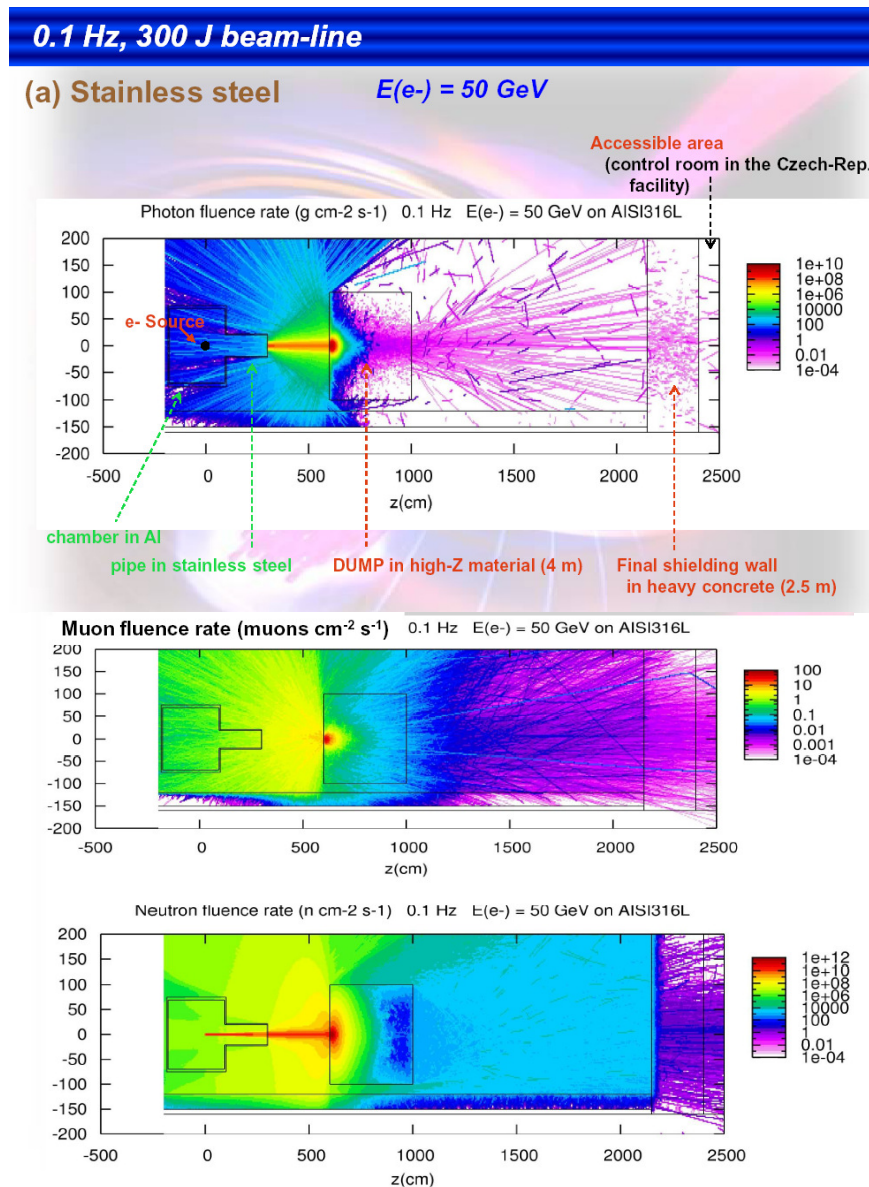
3. ábra: A müon sugárzás hatékony árnyékolása vasból készült falakkal (jobb oldali ábra), a beton gyakorlatilag nem gyengíti a sugárzást (bal oldali ábra) [2]

A céltárgyat a célkamrában helyezik el (anyaga alumínium), mely téglatest alakú (kb. $1,5 \times 1,5 \times 4$ m), a céltárgyat középen helyezik el benne, a bejövő lézer nyalábbal ellentétes oldalon kb. $2 \times 0,5 \times 0,5$ m csonkot helyeznek el, melyet az ún. beam dump-ra (nyaláb csapda) irányítanak. A kamrában vákuum van, a célkamrában, illetve a kamra mellett helyezkednek el a vizsgáló berendezések (4. ábra).

Az 5. ábrán a FLUKA kóddal végzett szimulációk láthatóak. A szimulációt rozsdamentes acél árnyékoló anyagra, 0,1 Hz ismétlési frekvenciájú, 300 J energiájú lézernyaláb esetére vizsgálták, 50 GeV-os elektron sugárzást feltételezve. A lézernyaláb balról érkezik, majd a célkamrába érve a céltárgyba csapódik. A felgyorsított részecske áram a kimenő csonkon keresztül elhagyja a célkamrát, majd közel 3 m múlva éri el a nyaláb csapdát, az ábra jobb oldalán (színekód) a részecske fluensteljesítmény látható (részecske. $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ban). Az ábrák jobb oldalán egy 2,5 m vastag beton fal látható.



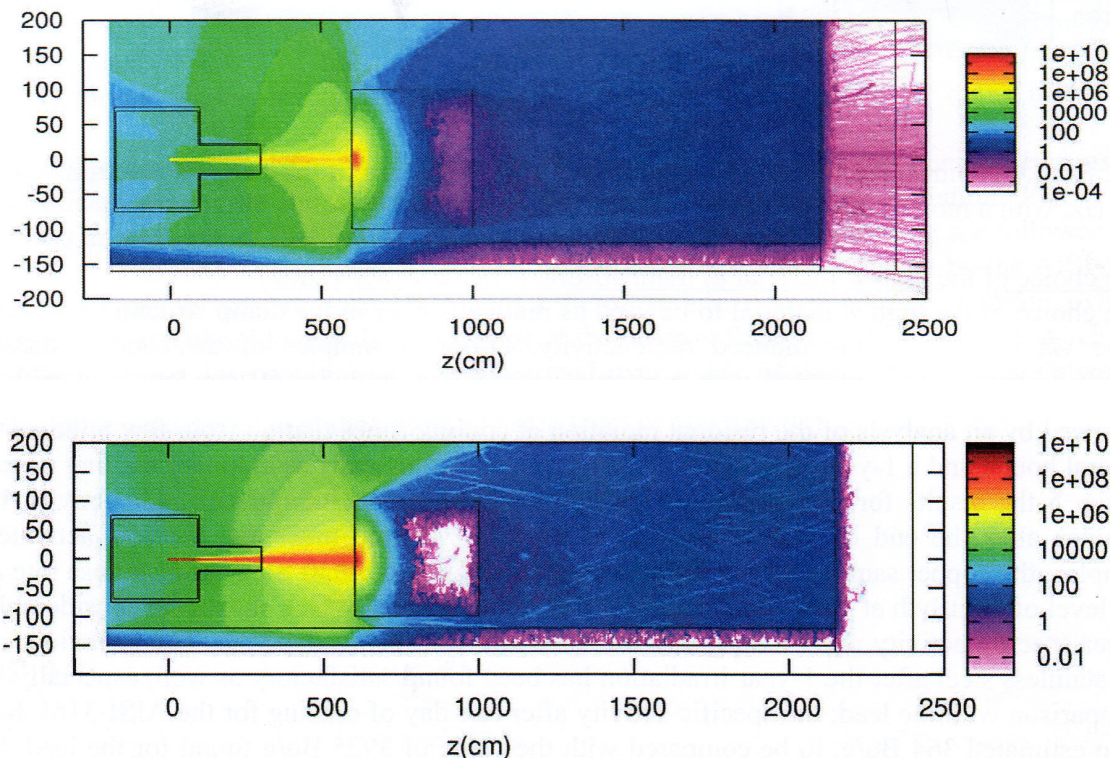
4. ábra: A kísérleti célkamra [1]



5. ábra: 50 GeV-os elektron nyaláb által keltett másodlagos sugárzások okozta részecske fluensteljesítmény eloszlás. Az y és z tengelyen a távolság a saválló acélban (cm), jobb oldalon a fluensteljesítmény színskódja ($\text{részecske} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$).

Az ábra alapján látható, hogy a nyaláb csapda a fotonokat és müonokat megfelelően árnyékolja a csapda jobb oldalán, de az árnyékoló falat elhagyó neutronok aránya még mindig nagy. Továbbá főleg a müonok és neutronok, de a fotonok is erősen vissza szóródnak a nyaláb csapda felületéről, ezért a célkamra és a csapda közötti terület sugárvédelmi

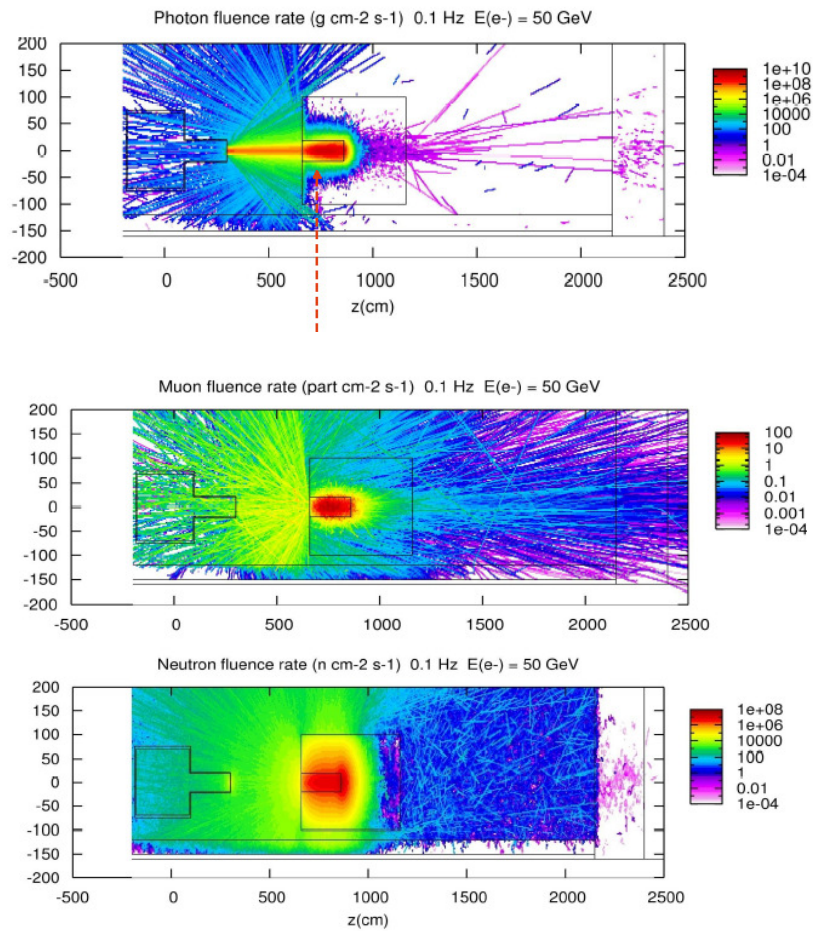
szempontból nem megfelelő. A 6. ábrán a prompt környezeti dózisegyenérték-teljesítmény látható 50, illetve 5 GeV-os elektron nyaláb esetén, az ábra jobb oldalán pedig a színekód van ($\mu\text{Sv/h}$).



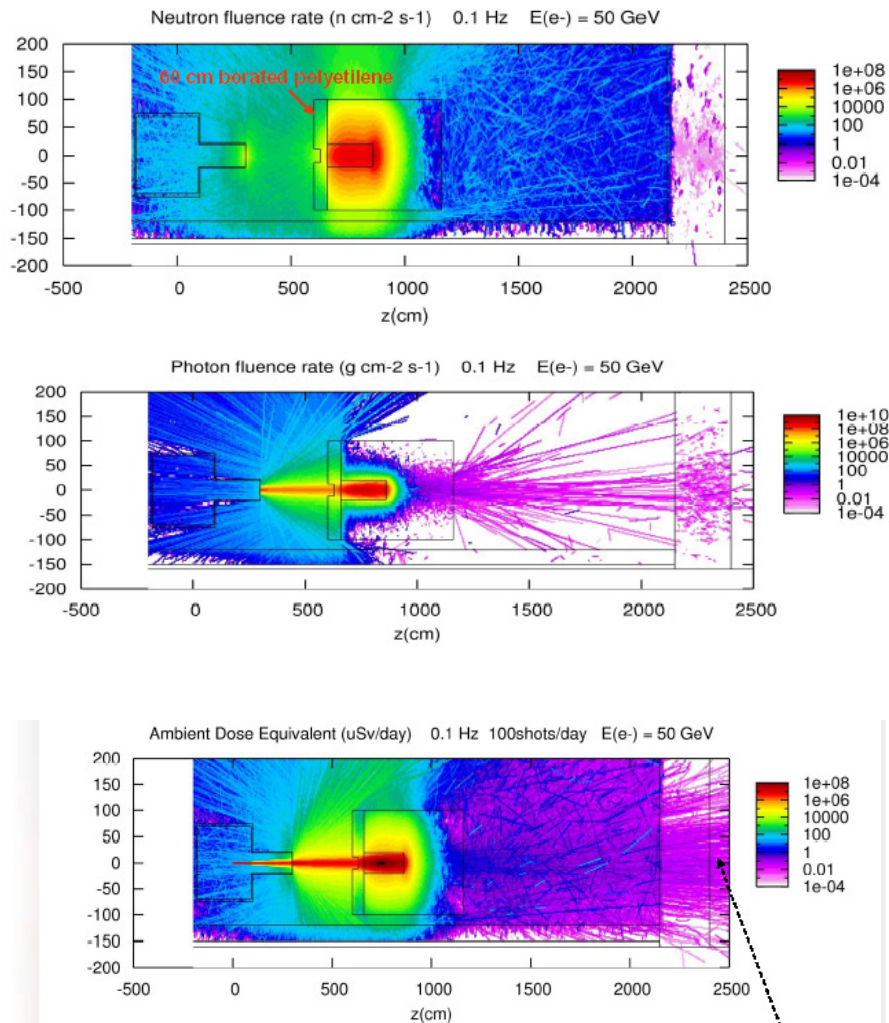
6. ábra: A környezeti dózisegyenérték-teljesítmény 50, illetve 5 GeV-os elektron nyaláb esetén. A jobb oldalon van a környezeti dózisegyenérték-teljesítmény színekódja ($\mu\text{Sv/h}$), az y és z tengelyen a távolság saválló acélban (cm).

A kisebb energiájú sugárzás hatására a dózis a nyaláb csapda távolabbi részében erősen lecsökken (alsó ábra). A számított környezeti dózisegyenérték-teljesítmény a célkamra – csapda közötti részben ugyancsak nem megfelelő, azaz az árnyékoló fal rendszert tovább kell növelni.

A rendszer további tervezése során a falba egy 2 m hosszú, 50 cm átmérőjű grafit rudat helyeztek el, mely „bevezeti” az elektron sugárzást a nyaláb csapda közepére, így a kaszkád-effektusok és a másodlagos sugárzások elsősorban nem a csapda felületén, hanem annak belsejében keletkeznek (7. ábra). Látható, hogy ekkor valóban a csapda belső felében növekszik meg a részecske fluensteljesítmény és a vissza szóródás volumene is alacsonyabb az előző esethez képest. Ennek ellenére a neutron és müon visszaszóródás még így is jelentős. Ezért a csapda elé egy 60 cm vastag nagy hidrogén tartalmú anyagot, jelen esetben bórozott polietilént raktak a neutron visszaszóródás elkerülése érdekében (8. ábra). Ekkor a környezeti dózisegyenérték-teljesítmény a beton fal után 10 nSv/nap , 100 lövés/nap esetén. Amennyiben évente 300 napig üzemel a kísérleti berendezés, akkor a környezeti dózisegyenérték-teljesítmény átlaga $3 \mu\text{Sv/év}$ lesz, ha napi 100 helyett 1000 lövést adna le a rendszer, akkor a 10-szeresére emelkedne, azaz $0,03 \text{ mSv/év-re}$.



7. ábra: A nyaláb csapda tovább fejlesztett változata, grafit rúddal a közepén. A jobb oldalon van a részecske fluensteljesítmény színskódja ($\text{részecske} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), az y és z tengelyen a távolság saválló acélban (cm).



8. ábra: A nyaláb csapda bórozott polietilénnel kiegészítve. Az első két ábrán a színek a részecske fluensteljesítmény (részecske.cm⁻²s⁻¹), az y és z tengelyen a távolság saválló acélban (cm). A harmadik ábra jobb oldalán a színek a környezeti dózisegyenérték-teljesítmény (μSv/nap).

A nyaláb csapda végső struktúrája

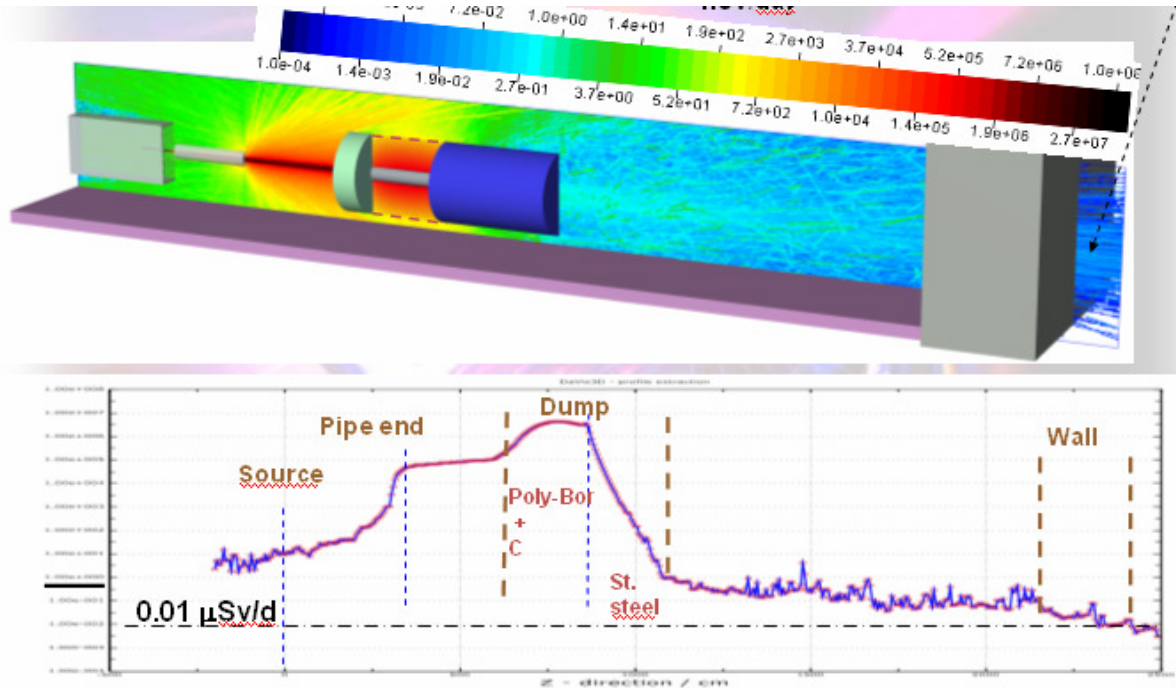
A szimulációs eredmények alapján a csapda három részből áll:

- 60 cm vastag bórozott polietilén a csapda elején, a kis energiájú neutronok visszaszóródásának megakadályozására (az árnyékoló anyag közepének vastagságát csökkentették, így könnyebben a csapda mélyére jut a nyaláb mentén érkező szekunder sugárzás)
- 2 m hosszú, 50 cm átmérőjű grafit rúd a nyaláb csapda közepén (sűrűsége: 1,9 g/cm³)
- 5 m hosszú rozsdamentes acél henger (AISI-316L), átmérő 2 m

Az elektromágneses sugárzás hatására óriás rezonancia neutronok (Giant resonance neutron) keletkeznek, melyek energiája kisebb, mint 25 MeV, ezt a bórozott polietilén hatásosan gyengíti. A kísérleti labor falai betonból készülnek (2,5 m), melyek a fékezési

röntgen sugárzást és a nagy energiájú neutronokat hatásosan gyengítik. A neutron energia növekedésével a beton relaxációs rétegvastagsága 50 MeV-110 MeV-ig lineárisan nő.

A 9. ábrán a nyaláb csapda végleges struktúrája látható 3D-ben, alatta a csapda és a közelében kialakuló környezeti dózisegyenérték-teljesítmény ($\mu\text{Sv}/\text{nap}$).



9. ábra: A végleges nyaláb csapda képe 3D-ben és a környezeti dózisegyenérték-teljesítmény alakulása ($\mu\text{Sv}/\text{nap}$) 50 GeV-es elektronok esetén, 0,1 Hz ismétlési frekvencián

A felső ábra alapján látható, hogy a célkamrát elhagyó 50 GeV-os elektron nyaláb a levegővel érintkezésbe lépve szóródik, nagy része a grafit csőnek köszönhetően bejut a csapda közepére, ahol az elektromágneses-hadron-kaszád beindul, majd a csapda második részét elérve a környezeti dózisegyenérték-teljesítmény csökkenni kezd. A beton falat elhagyva $0,01 \mu\text{Sv}/\text{nap}$ érték alá csökken.

Az alsó ábrán látható a környezeti dózisegyenérték-teljesítmény alakulása a távolsággal. A lézer-anyag kölcsönhatás során az elektronok a plazmában gyorsulni kezdenek, a célkamrában vákuum van. Mire az elektronok elérik a célkamra kivezető csonkját, addigra energiájuk az 50 GeV-ot is elérheti, a gyorsulás hatására szinkrotron sugárzást bocsátanak ki, emiatt a kezdeti közel $1 \mu\text{Sv}/\text{nap}$ a csonk végén eléri az $1000 \mu\text{Sv}/\text{nap}$ -ot. Az elektron nyaláb a kivezető csonk anyagával ütközve, fékezési röntgen sugárzást, illetve elektromágneses-hadron kaszkádot indukál, emiatt a dózis-teljesítmény exponenciálisan emelkedik (lavina-effektus) majd a csapda és a kilépő csonk közötti térrészben a közel állandó (enyhén növekszik). Miután a részecske nyaláb eléri a csapdát az elektromágneses - hadron kaszkád újra beindul és fékezési röntgen sugárzás is létrejön, elsősorban a csapda első 2,5 m-es szakaszán. A dózis-teljesítmény először exponenciálisan növekszik a lavina-effektus miatt, közben a keletkező részecskék energiája lépésenként csökken, a kezdeti energia „disszipálódik”, eloszlik a részecskék között, miután a dózis-teljesítmény növekedés elérte a maximumát a növekedés logaritmikusan folytatódik. Az ilyen exponenciális-logaritmikus függvényeket logisztikus görbéknek nevezzük.

A folyamatos részecske energia csökkenés révén (pl. szóródás) a részecskék energiája egy kritikus energia szint alá csökken, ekkor a kaszkád folyamatok telítődnek, leállnak és a folyamat „befagy”, nem keletkeznek újabb részecskék a kaszkád folyamatokból. A kaszkád folyamatok leállítását követően a nyaláb csapda második 2,5 m-es szakaszán a dózisteljesítmény közel exponenciálisan csökkenni kezd a csapda végéig 10^6 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ -ról egészen 1 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ -ig, majd a laboratórium beton falában tovább csökken egészen 10 nSv/h-ra. Ha napi 100 lövés van 300 napon át, akkor az éves átlagos környezeti dózisegyenérték-teljesítmény 3 $\mu\text{Sv}/\text{év}$ lesz, napi 1000 lövés esetén ennek tízszeres, azaz 30 $\mu\text{Sv}/\text{év}$. A Cseh Köztársaságban a sugárveszélyes helyen dolgozóakra vonatkozó dózis korlát 20 mSv/év, azaz a dózis korlát 0,002-ét sem éri el [1].

További ajánlások a sugárvédelmi árnyékoló fal kiegészítésére:

- Az 5. és 7. ábrát összevetve jól látható, hogy a kezdetben nyaláb irányú neutronok a grafit rúd elhelyezését követően radiális irányban is szóródnak, ezért a csapda első 2,5 m-es szakasza körül egy ugyancsak bórozott polietilénből készült (kb. 60 cm vastag) elemet kéne felhelyezni, így a radiális irányú neutronok nagy része nem hagyja el a csapdát. A kilépő neutron fluensteljesítmény $\sim 10\,000$ $\text{n}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$, (a színekód alapján sárgás-zöld)
- Ugyancsak az 5. és 7. ábrát összevetve jól látható, hogy a müonok jelentősen visszaszóródnak (1 müon. $\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$) ezért a nyaláb csapda elé, a bórozott polietilén elemhez hasonlóan, egy közel 1-1,5 m vastag rozsdamentes acélból készített elemet kéne elhelyezni, melynek közepén 20 cm vastag fűrt lyuk helyezkedne el.

A KÍSÉRLETI LABORATÓRIUMOK KIALAKÍTÁSA, ELLENŐRZŐ RENDSZEREK

A laboratóriumokat aktív és passzív mérő berendezésekkel kell felszerelni, melyek on-line és off-line rendszerben működhetnek, ezen eszközök a felaktiválódott anyagok mérésére alkalmasak.

Aktív mérő berendezések :

- GM cső,
- Ionizációs kamra,
- Proporciónális számláló,
- Szcintillációs detektor
- Félvezető spektrométer

Passzív mérő berendezések:

- Aktivációs detektorok,
- TLD-k

Az ellenőrző rendszer másik eleme a beléptető rendszer, mely ajtókból, zárákból, figyelmeztető berendezésekből áll. A beléptető rendszer megakadályozza a személyzet belépését az aktív zónába (target, nyaláb környéke), a külső sugárzás okozta károsodás így elkerülhető. Több egymástól független érzékelő rendszert kell kiépíteni a megbízható működés érdekében pl. logikai áramkörök beiktatásával, így csak akkor lehet indítani a kísérleteket, ha azt rendszer minden szinten engedélyezi. A beléptető rendszerhez tartozhat sugárzást jelző rendszer, mely külső-belső térben elhelyezett detektorokból áll, ezek szintemelkedéskor riasztanak és letiltják a belépést. A figyelmeztető jelzéseknek audiovizuálisnak kell lenniük, a vészvillogókat, kapcsolókat jól látható helyen kell elhelyezni,

melyek világítanak, ill. hangot adnak. A belső videokamerás megfigyelő hálózat segítségével nyomon követhető, illetve rögzíthetőek a napi események, melyeket napi jegyzőkönyvbe célszerű regisztrálni. A beléptető ajtók előtt célszerű labirintust kialakítani, mely költség hatékony, így nem kell nehéz pl. ólomból készült ajtókat elhelyezni, melyek működtetése segéd berendezéseket igényel.

A laboratóriumok folyamatos légcseréjét légelszívó berendezéseknek kell biztosítaniuk, így minimalizálható a kísérletek során a levegőben keletkező radioaktív anyagok inkorporációja. A hűtő-fűtő rendszereknek az épület többi hűtő-fűtő rendszerétől függetlennek kell lennie, ezáltal a csövekben lévő felaktiválódott korróziós termékek és a hűtő vízben felaktivált anyagok nem keveredhetnek az épület hűtő-fűtő rendszerében lévő vízzel, így a felaktivált anyagok zárt rendszerben maradnak.

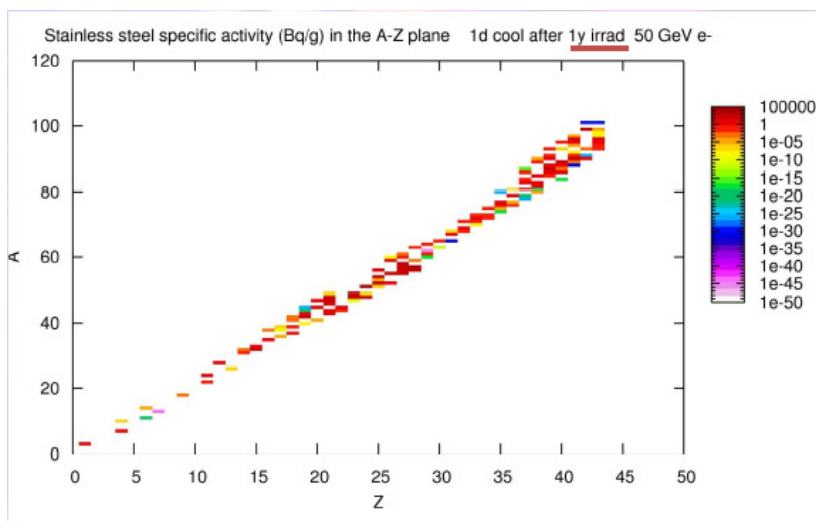
Környezetellenőrző rendszerek

A környezeti monitoring elemei lehetnek on- és off-line mérő berendezések, illetve mintavevő egységek. A központi légszűrőben a ki és belépő csonknál GM szondákat, aeroszol szűrőket érdemes felhelyezni, a szűrők radioaktív anyagtartalmát gamma-spektrometriai mérésekkel lehet meghatározni. A telephely környékén elhelyezett fall-out mintavételező állomások és GM szondák adatai alapján mérhetőek a környezetbe kerülő radioaktív anyagok. A telepített központi kijelző rendszer, mely az aktív sugárvédelmi berendezések részét képezik, az on-line adatforgalmú GM szondák adatait dolgozza fel és jeleníti meg egy központi kijelzőn. Évente egy esetleg több alkalommal érdemes talaj, növény, víz mintavételezést végezni az épület környékén. A mérési adatok alapján a talajban, talajvízben keletkező radionuklidok mennyiségét, mozgását nyomon lehet követni a környezetben.

A NYALÁB CSAPDA LESZERELÉSE

Radioaktív hulladékok

A kísérletek során a sugárzások által kiváltott különböző magreakciók révén a céltárgyban, a vizsgált műszerekben, illetve a berendezést körülvevő árnyékolásban radioaktív izotópok keletkeznek. A 10. ábrán a rozsdamentes acél hosszú távú felaktiválódása látható szimuláció segítségével. Az egy év alatti nagy energiájú (50 GeV) elektron besugárzás hatására számos radioaktív elem keletkezik, melyek aktivitáskoncentrációja elérheti a 100 kBq/g-ot. Amennyiben az árnyékoló anyagok aktivitáskoncentrációja meghaladja az ún. MEAK (Mentességi aktivitáskoncentráció) értéket, akkor azok radioaktív hulladékoknak minősülnek, ekkor az árnyékoló anyagokat osztályozzák, majd a már nem hasznosítható anyagokat radioaktív hulladéktárolóban helyezik.



10. ábra: Rozsdamentes acél felaktiválódása. A színek a Z rendszámú elem A tömegszámú izotópjának az aktivitáskoncentrációját (Bq/g) jelöli. [3]

ÖSSZEGZÉS

A lézerfény-anyag kölcsönhatás során felgyorsított nagy energiájú részecske sugárzás, hatékony, optimális árnyékolása érdekében közepes rendszámú anyagból készült árnyékoló fal jöhet számításba, mely egyéb kis rendszámú anyagokkal kiegészítve optimálisan gyengíti a részecske sugárzásokat. Az OSIRIS és FLUKA kódokkal elvégzett szimulációk alapján az árnyékoló fal visszaveri a beérkező sugárzást, grafit rúddal kiegészítve a visszaszóródás aránya nagymértékben csökkenthető. A környezeti dózisegyenérték-teljesítmény kezdetben több lépcsőben- elsősorban a különféle anyagok találkozásánál- „lépcsőzetesen” emelkedik, majd a kaszkád-effektusok leállását követően a az árnyékoló anyagon belül folyamatosan csökken, a betonfal túloldalán a 10 nSv/h alá csökken. Az árnyékolás vastagsága, szerkezete, anyagi felépítése optimális. A tervezett sugárvédelmi rendszerek várhatóan teljesíteni fogják a sugárvédelmi szabályokat, előírásokat nagy dózisteljesítmény tartalékkal, így a jövőben a rendszer teljesítményét tovább lehet növelni.

IRODALOM

- [1] Anna Ferrari: Target areas in the Czech Republic, WP6 találkozó, Prága, 2010. júl. 1-2.
- [2] Adolfo Esposito: Radiation protection for laser-based accelerators, LEI konferencia, Brassó, 2009. október 16-21.
- [3] Anna Ferrari, Daniele Margarone: Shielding assessment at ELI beamline facility (Czech Republic), WP6 találkozó, Salamanca, 2010. 05. 26-27.