

A sugárkárosodás laboratóriumi vizsgálatának katonai jelentősége

Absztrakt

Katasztrófa, sugaras esemény vagy terrortámadás esetén az érintetteket változó mértékű, ismeretlen intenzitású ionizáló sugárzás érheti. Ezek az expozíciók – dózisfüggő akut hatásokon túl – hosszú távú egészségügyi problémákat okozhatnak, rosszindulatú daganatok kialakulásához vezethetnek. A Magyar Honvédség állománya például terrortámadások, katasztrófa elhárítása közben nagyobb valószínűséggel kerülhet kapcsolatba ionizáló sugárzással, mint a civilek.

A sugárbiológiai laboratóriumokban folyó munkának kettős célja van. Egyrészt a képességek aktíván tartásával állandó készenlét biztosítása katasztrófahelyzet esetére, ahol a biológiai vizsgálatok (biodozimetria) jelentősége a sérülés mértékének meghatározásában, visszajelzésben, a gyógyulási folyamat követésében van. Másrészt alapvető feladat, ami arra irányul, hogy az előbb említett területen hatékonyabbá tegye az egészségkárosodás felmérését, a gyógyulási folyamat nyomon követését, valamint elősegítse az alkalmazott vizsgálati módszerek fejlesztését, korszerűsítését. Az egyéni sugárérzékenység biokémiai hátterének vizsgálatával és a sugárhatást módosító vegyületek hatásmechanizmusának tanulmányozásával olyan ismeretek halmozódnak fel, amelyek a későbbiekben a foglalkozási sugárterhelés tervezése során, a sugárterápiában és az űrkutatásban is hasznosak lehetnek.

Kulcsszavak: sugárbiológia, biodozimetria, sugárérzékenység, hatásmechanizmus

Military Relevance of Laboratory Testing for Radiation Damage

In the event of a disaster, radiation incident or terrorist attack affected people may be exposed to unknown doses of ionizing radiation. In addition to dose-dependent acute effects, these exposures can cause long-term health problems and lead to the development of malignancies. For example, the personnel of the Hungarian Defence Forces may be more likely to come into contact with ionising radiation during terrorist attacks and disasters than civilians.

The work in radiobiology laboratories has a dual purpose. On the one hand, by keeping the capabilities active, ensuring constant preparedness in the event of a disaster situation, where the importance of biological tests (biodosimetry) is in determining the extent of injury, providing feedback and following the healing process. On the other hand, it is a basic research task, which aims to make the assessment of health damage, the monitoring of the healing process more efficient in the aforementioned field, and to promote the development and modernisation of the applied examination methods. By studying the biochemical background of individual radiation sensitivity and studying the mechanism of action of radiation-modifying compounds, knowledge

will be accumulated that may be useful in the planning of occupational radiation exposure, radiation therapy and space research.

Keywords: *radiation biology, biodosimetry, radiation sensitivity, mechanism of action*

Bevezetés

Amióta a II. világháború, majd a hidegháborús fenyegetettség is véget ért, sokkal kisebb jelentőséget tulajdonítanak a sugárvédelemmel kapcsolatos biológiai kutatásoknak, mivel a ráfordítás és a kockázat aránya messze elmarad más típusú katasztrófáktól. A biológiai-kémiai kutatásokról a hangsúly áthelyeződött a nukleáris létesítmények minél biztonságosabb működtetésére. Ilyen esetekben a megelőzésnek van nagyobb szerepe, mint az utólagos kárenyhítésnek. A sugárbiológiának a károk felmérésében, a helyreállítás követésében és ellenőrzésében van elsődleges szerepe, beleértve a mindennapos foglalkozási ártalmakat is. Számos olyan orvosi alkalmazás van, amely nemcsak a betegeket, de a kezelő egészségügyi személyzetet is veszélyeztetheti, ilyenek például a röntgen- és izotópdiagnosztikai eljárások és a különböző sugárterápiák. Természetesen a sugárveszélyes munkakörben dolgozók viselnek fizikai dozimétert, azonban egy sugaras esemény bekövetkezésekor nemcsak őket érheti sugárzás, hanem a civileket és a katasztrófa felszámolását végző állományt is.

A Magyar Honvédség állományát feladatainak sokrétűsége és a katasztrófa elhárításában való részvétel miatt a civilekhez képest nagyobb valószínűséggel érheti sugárrexpozíció. Ez indokoltá teszi, hogy a katonai kutatások során a biológiával, azon belül a sugárbiológiával kiemelten foglalkozzanak.

Tekintve, hogy az egyéni sugárérzékenység eltérő,¹ ezért az egyéneket ért effektív dózist legpontosabban biodozimetriával lehet meghatározni.

A legfontosabb sugárbiológiai feladat, hogy alapkutatással és a prioritások beállításával a védekezés tervezéséhez járuljunk hozzá, amelyhez elengedhetetlen a sugárkárosodás és annak enzimatisz javításának mélyreható megismerése, valamint a törzsféjlődés során kialakult védekező mechanizmusok megismerése és a sugárhatást módosító vegyületek kutatása. A biodozimetriában és a sugárvédő vegyületek kutatása során nagyrészt ugyanazok a – hagyományosnak mondható – biológiai metodikák használatosak, ezek főként mikroszkópos eljárásokon alapulnak, s vannak törekvések ezek automatizálására.² Lassan adaptálódnak a más tudományterületen használatos metodikák, például a flow citometria

¹ Kis Enikő – Sáfrány Géza – Solymosi József: A sugárérzékenység vizsgálatának katasztrófavédelmi jelentősége. *Hadmérnök*, 8. (2013), 4. 107.

² Ruth C. Wilkins et al.: The Application of Imaging Flow Cytometry to High-Throughput Biodosimetry. *Genome Integrity*, 8. (2017), 1. 1.

a mikronukleuszok³ vagy a hisztonfehérjék vizsgálatánál.⁴ Az immunológia is jelentős fejlődésen esett át az elmúlt évtizedekben, ez megnyitotta a lehetőséget a sugárzás hatásának immunológiai következményei elemzésére.⁵ A molekuláris biológia robbanásszerű fejlődést produkált az ezredforduló környékén, és ezt a fejlődési ívet – a tudomány többi területével ellentétben – a Covid-19-járvány is csak kevésbé törte meg, sőt a PCR-technika elterjesztésében, a laboratóriumok PCR-készülékkel való felszerelésében, a kezelő szakszemélyzet kiképzésében a járványnak jelentős szerepe van. Ez a tény széles körű lehetőséget biztosít más tudományágak, többek közt a sugárbiológia fejlődésének.

Tárgyalás

A Covid-19-világjárvány mindenkit felkészületlenül ért, ennek aktualitása miatt tanulságos lehet egy vírusjárvány és egy nukleáris katasztrófa összehasonlítása.

A nukleáris katasztrófák és a vírusjárványok során alkalmazott intézkedések összehasonlítása

Ha megvizsgálunk egy nukleáris balesetet (például a csernobili és a fukusimai), az sok szempontból hasonlóságot mutat egy vírusjárvánnyal (SARS, kanyaró, Covid-19), és persze lényeges különbségeket is.

Kialakulás, gócok

A népesség növekedésével megnő a matematikai esélye a fertőző gócok kialakulásának, ahhoz azonban, hogy balesetek – beleértve a nukleáris baleseteket – történjenek, számos tényező együttes fennállására van szükség. A nukleáris balesetek többnyire emberi mulasztásra vezethetők vissza, hiszen ha külső körülmény is okozza közvetlenül a balesetet, az szinte minden esetben megfelelően szigorúan betartott biztonsági intézkedésekkel megelőzhető lenne (például Fukushima esetében a földrengés és az azt követő cunami hatása mérsékelhető lett volna megfelelő tervezéssel és a lakosság evakuációs tervének

³ Svetlana L. Avlasevich et al.: In Vitro Micronucleus Scoring by FlowCytometry: Differential Staining of Micronuclei Versus Apoptotic and Necrotic Chromatin Enhances Assay Reliability. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 47. (2006), 1. 56.

⁴ Kainat Khana et al.: Flow Cytometric Detection of Gamma-H2AX to Evaluate DNA Damage by Low Dose Diagnostic Irradiation. *Medical Hypotheses*, 115. (2018). 22.

⁵ Nikolett Sándor et al.: Growth Differentiation Factor-15 (GDF-15) is a Potential Marker of radiation Response and Radiation Sensitivity. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 793. (2015). 142.

megfelelő kidolgozásával).⁶ A csernobili reaktor egy elavult kivitelű grafitmoderált reaktor volt, amely gőzrobbanást szenvedett, amikor az üzemeltető személyzet megkísérelte a leállítást.⁷ A vírusok okozta járványgócok kialakulása sem látható előre. Valószínű, hogy a vírusok mutációval és gazdaszervezet-váltással okoznak fertőzőési gócot.

Terjedés

A vírusok terjedése elsősorban emberről emberre (például cseppfertőzéssel) történik, de átadódhatnak közvetett módon, felületeken, fagyasztott élelmiszerekkel, légkondicionált terek levegőjével. Reaktorbaleset után az izotópfelhő a szél segítségével több ezer kilométerre eljut az éppen aktuális széliránynak megfelelően (Csernobil). A sugárzó anyag lerakódhat a tárgyak, növények felszínére, belégzéssel és táplálékkal kerül az állatok és az ember szervezetébe. Nemzetközi hálózat épült ki a környezeti sugárérték és a fallout monitorozására. Hazánkban ennek a központja az NNK-SSFO.⁸

Tünetek

A tünetek sem vírusfertőzés, sem sugárterhelés után nem jelentkeznek azonnal. A vírus szervezetben való szaporodása időt vesz igénybe, sugárexpozíció esetében ilyen fázis nincs, akár belső, akár külső sugárforrásból származik. A látencia közös komponense az immunrendszer válasza. Sugárterhelés esetében nagyobb dózisoknál számolni kell az immunrendszer szupressziójával is. Mivel a legtöbb esetben sugársérülés és vírusfertőzés esetén is kezdetben nem specifikus tünetek jelentkeznek (például hányás, hasmenés, láz), amennyiben a sugársérülés gyanúja nem merül fel, a kórkép rossz diagnózist eredményezhet.

Kimutató

A vírusgenom jellemző szekvenciárszletein alapuló PCR-technikával kimutatható a vírus jelenléte – a sugárzó anyag jelenléte pedig megfelelő detektorral mutatható ki. A fizikai dozimetria a terjedés megelőzésére, a biológiai dozimetria az egyén által elszenvedett biológiai károsodás becslésére és gyógyulásának követésére alkalmas.

⁶ The National Diet of Japan: *The Official Report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission*. Tokyo, 2012. 16.

⁷ Frederick J. Bonte: Chernobyl Retrospective. *Seminars in Nuclear Medicine*, 18. (1988), 1. 16.

⁸ NNK-SSFO (OSSKI) rendszeres telephelyi méréseinek eredményei. (É. n.)

Elpusztítás, kezelés

A vírusok ellen fertőtlenítő – detergens, oxidáló – szerekkel, UV-fénnyel eredményesen lehet védekezni. Egyes esetekben antivirális kezeléssel szervezetben belül is elpusztíthatók. A nukleáris esemény kapcsán keletkező izotópok „élettartama” nem befolyásolható sem a környezetben, sem a szervezetben belül. A fémek esetében komplexképzők (például: berlini kék), jóid esetén feleslegben alkalmazott nem sugárzó jóid, csak az izotópok szervezetből való távozását segítik elő. A ^{134}Cs , ^{137}Cs és a ^{131}I a leggyakrabban kiszabaduló izotópok erőműbaleseteknél, mert az urán hasadási termékei közül ezek a leggyakoribbak. Egy nukleáris balesetnél ezek jelentik a legnagyobb problémát, mert szilárd halmazállapotúak, így kontaminálják a környezetet. Az adott izotópleltár meghatározása csak a környezet különböző közegeiből (levegő, víz, talaj) történő ismétlődő mintavételezéssel és azok energiaszelektív (spektrometriás) mérésével lehetséges, amely során különös figyelemmel kell lenni a környezet szélsőséges paramétereinek mérést befolyásoló hatására (például a szcintillációs gamma-spektrometria erős hőmérsékletfüggése).⁹

A ^{131}I (a radioaktív kihullás leggyakoribb radiojód összetevője) viszonylag gyorsan, 8 nap felezési idővel bomlik, így az eredeti mennyiség 99,5%-a három hónap elteltével gyakorlatilag eltűnik. Jelentős lehet még két céziumizotóp, a ^{134}Cs és a ^{137}Cs jelenléte, ezek felezési ideje hosszabb: a ^{137}Cs 30,1671 év, a ^{134}Cs pedig 2,0652 év. Az erőműbaleset helyszínét és közvetlen környezetét évtizedekre lakhatatlanná teszik.

Megelőzés

A megelőzés mind egy nukleáris katasztrófa, mind egy járvány esetén két lépcsőben is értelmezhető. Egyrésztől magát a katasztrófát kell megelőzni, ami csak a biztonsági előírások megfelelő betartásával és gondos tervezéssel lehetséges. Vírus esetében megelőzésként védőoltás alkalmazható, kifejlesztése és gyártása hosszú időt vehet igénybe.¹⁰ Másrésztől egy bekövetkezett katasztrófa esetén a lakosság sugárexpozícióját vagy megbetegedését kell megelőzni. Nukleáris veszélyhelyzet esetén a lakosság részére a sürgős óvintézkedések elrendelésére kerülhet sor a baleset kezdeti szakaszában (elzárkózás, jóidprofilaxis, kimenekítés). Izotópszennyezés esetén a szennyező izotóp függvényében a jóidprofilaxis megfontolandó. Ennek lényege, hogy ha stabil jóidot adnak a radioaktív jóidnak való kitettség előtt vagy annak kezdetén, akkor az utóbbi felvételét a pajzsmirigy stabil jóiddal való telítettsége gátolja, ezáltal hatékonyan csökkentve a pajzsmirigy

⁹ József Csurgai – József Padányi – László Földi: Temperature Dependence of NaI(Tl) Radiation Scintillation Detectors' Characteristics. *Advances in Military Technology*, 15. (2020), 1. 201–212.

¹⁰ Deli Gábor et al.: A COVID-19 megelőzésére szolgáló vakcinák összetétele, működési elve. *Honvédervos*, 72. (2020), 3–4. 7–25.

belső expozícióját.¹¹ Egy járványhelyzet esetén a lakosság megfertőződése ellen például a betegek karanténzásával, távolságtartással vagy maszk használatával védekezhetünk.

Egy nagy volumenű katasztrófa-helyzet esetén az egyik első lépés a sérültek ellátása, amelynek része egy sürgősségi sorrend felállítása. Ezt a folyamatot nevezzük *triage-nak*, amely során az érintettek egészségügyi állapota a rangsoroló tényező. A balesetben közvetlenül érintettek ellátása után egy nagy volumenű sugaras esemény esetében a védekezés központilag megszervezett lépések formájában történik.¹²

Maradandó sérülések

Sugársérülés és vírusfertőzés után is jelentős lehet a spontán regeneráció, de maradhatnak vissza károsodások. Covid esetén leírták a post-Covid-szindrómát, főként neurológiai tünetekkel, sugárterhelés után sok esetben nincs látható károsodás, de megnő a daganatos megbetegedések előfordulása és a születési rendellenességek valószínűsége a következő generációban.¹³ A nukleáris terhelés a populáció genetikai állományát veszélyezteti. Vírusok esetén is előfordul, hogy a vírusgenom a gazdaszervezet genetikai állományába integrálódik: leírták, hogy az ember genomjának körülbelül 8%-a ilyen úgynevezett endogén retrovírus.¹⁴

Katasztrófák elleni védekezés

Bármilyen katasztrófáról is legyen szó, a védekezés legfontosabb eleme a gondos tervezés és a megfelelő biztonsági előírások betartása, ehhez azonban szükség van a jogszabályi háttér megteremtésére.

Nemzetközi szervezetek, jogszabályok

Napjainkban az 1928-ban létrehozott Nemzetközi Sugárvédelmi Bizottság (International Commission on Radiological Protection – ICRP) foglalkozik a sugárvédelem alapvető

¹¹ *Iodine Thyroid Blocking. Guidelines for Use in Planning for and Responding to Radiological and Nuclear Emergencies.* Geneva, WHO, 2017. 5., 6.

¹² Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság: *Katasztrófatípusok – Nukleáris veszély.* (É. n.)

¹³ Hyeyeun Lim et al.: Maternal Occupational Exposure to Ionizing Radiation and Major Structural Birth Defects. *Clinical and Molecular Teratology*, 103. (2015), 4. 244.

¹⁴ Maria Paola Pisano et al.: Comprehensive Characterization of the Human Endogenous Retrovirus HERV-K(HML-6) Group: Overview of Structure, Phylogeny, and Contribution to the Human Genome. *Journal of Virology*, 93. (2019), 16.

problémáival: ajánlásai a kor tudományos ismereteinek megfelelő sugárvédelmi szabályozás alapjául szolgálnak.¹⁵

A nukleáris energia biztonságos felhasználásában központi szerepet játszik a Nemzetközi Atomenergia-ügynökség (NAÜ), amelynek célja a nukleáris energia békés felhasználása és a katonai felhasználás meggátolása. A NAÜ tevékenysége alapvetően három nagy, egymással összefüggő feladatot ölel fel: a nukleáris energia békés célú felhasználásának segítése és támogatása, a nukleáris biztonság erősítése, valamint a nukleáris tevékenység békés jellegének ellenőrzése. A három terület közötti egyensúly megőrzése különösen a fejlődő országok számára nagy jelentőségű.¹⁶

A NAÜ ösztönzi és segíti az atomenergia és békés célú alkalmazásainak kutatását, fejlesztését és gyakorlati felhasználását világszerte. Összehozza a fejlődő és fejlett tagállamok kutatóintézeit, hogy együttműködjenek a közös érdekű kutatási projekteken, az úgynevezett koordinált kutatási projekteken. Ezek ipari alkalmazások, nem tartalmaznak alapkutatási projekteket.

A NAÜ a WHO-val közösen megjelentetett egy a sugársérültek ellátásáról szóló kiadványt.¹⁷

A NAÜ gondozásában létrehozta a biológiaidozimetria-hálózatot a vészhelyzeti felkészültség és reagálási képességek megerősítésére nagyszabású nukleáris baleset vagy radiológiai vészhelyzet esetén. A RENEB- (Realizing the European Network of Biodosimetry) projekt révén 16 európai ország 23 laboratóriuma létrehozott egy hálózatot a gyors, átfogó és szabványosított biodozimetria biztosítása érdekében, amelyre nagy szükség lenne egy európai szintű vészhelyzetben.

A RANET (Response and Assistance Network) egy integrált rendszer a nemzetközi segítségnyújtás koordinálására, annak érdekében, hogy minimálisra csökkentsék a nukleáris vagy radiológiai események vagy vészhelyzetek tényleges vagy lehetséges radiológiai következményeit az egészségre, a környezetre és a tulajdonra nézve. Ezenkívül lehetővé teszi, hogy a résztvevő felek tanácsokat és segítséget nyújtsanak a megkereső államnak a vészhelyzet helyszínén végrehajtott reagálási tevékenységekről annak hatása mérséklése érdekében.

Az Európai Atomenergia Közösség (Euratom) egy nemzetközi szervezet; a szerződés aláírói megállapodtak az atomenergia békés célú felhasználásában és az atomenergia-ipar fejlesztésében való együttműködésben. Mindez az atomenergia területén való kutatások összehangolását, a védelmi szabályok közös megalkotását és a közös piac létrehozását jelentette. Az Euratom-szerződés általános célkitűzése, hogy hozzájáruljon az európai atomenergia-ipari ágazatok kialakulásához és fejlődéséhez annak érdekében, hogy valamennyi tagállamnak előnyére válhasson az atomenergia-ipar fejlődése, és hogy biztosítva legyen az ellátás biztonsága. A szerződés ugyanakkor szigorú biztonsági előírásokat

¹⁵ *International Commission on Radiological Protection, Governance.* (É. n.)

¹⁶ *Nemzetközi Atomenergiái Ügynökség – International Atomic Energy Agency.* (É. n.)

¹⁷ *Diagnosis and Treatment of Radiation Injuries.* Safety Reports Series No. 2. Vienna, International Atomic Energy Agency, 1998.

szavatol a lakosság számára, és megakadályozza, hogy a polgári felhasználásra szánt nukleáris anyagokat katonai felhasználásra irányítsák át. Az Euratom hatásköre a nukleáris energia polgári célú felhasználására korlátozódik.

A nukleáris fegyverek tilalmáról szóló szerződés (TPNW) 2021. január 22-én lépett hatályba, és ez az első jogilag kötelező erejű nemzetközi megállapodás, amely átfogóan tiltja az atomfegyverek gyártását és alkalmazását, végső célja pedig a teljes felszámolásuk. A résztvevő államok számára a szerződés tiltja az atomfegyverek fejlesztését, tesztelését, gyártását, készletezését, elhelyezését, átadását, használatát és használatával történő fenyegetést, valamint a tiltott tevékenységekhez való segítséget és bátorítást. A csatlakozó államok (amelyek rendelkeznek nukleáris fegyverekkel) számára a szerződés időkeretet biztosít a tárgyalásokhoz, amelyek nukleárisfegyver-programjuk ellenőrzött és visszafordíthatatlan leszereléséhez vezetnek.¹⁸

Jogi háttér Magyarországon

Magyarországon az atomenergia békés célú, biztonságos alkalmazására vonatkozó legmagasabb szintű szabályozást az atomtörvény (1996. évi CXVI. törvény) tartalmazza. A biztonság egyik alapvető követelménye az indokolt alkalmazások következtében fellépő ionizáló sugárzások elleni megfelelő védelem optimális kialakítása. Az ionizáló sugárzás elleni védelemmel kapcsolatos követelményeket az ionizáló sugárzás elleni védelemről és a kapcsolódó engedélyezési, jelentési és ellenőrzési rendszerről szóló 487/2015. (XII. 30.) Korm. rendelet határozza meg. Szintén ez a rendelet rendelkezik a munkavállalók helyi és országos személyi dozimetriai nyilvántartásáról is. Szabályozó hatóság Magyarországon az Országos Atomenergia Hivatal.¹⁹

A sugárvédelem alapelve az, hogy a sugárterheléssel járó tevékenység okozta egészségkárosodás kockázatát elfogadható szinten kell tartani. Ez az elv képezi a Nemzetközi Sugárvédelmi Bizottság sugárvédelmi ajánlásainak és dóziskorlátozási rendszerének alapját. Ezt a dóziskorlátozási rendszert a NAÜ beépítette Sugárvédelmi Alapszabályzatába. Ez a korlátozási rendszer állandó változásban van, hiszen az újabb felismerések alapján az ajánlásokat időnként módosítják, és ezek a szabályzatok módosítását is maguk után vonják. Ennek megfelelően a sugárvédelem hármas alapelve:

- Indokoltság elve: sugárzással járó tevékenységet csak pozitív nettó haszon esetén szabad folytatni.
- ALARA- (As Low As Reasonably Achievable) elv: minden indokolt sugárterhelést olyan alacsony szintre kell csökkenteni, amennyire az a gazdasági és társadalmi szempontok figyelembevételével ésszerűen lehetséges.

¹⁸ United Nations: *Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons*. (É. n.)

¹⁹ Országos Atomenergia Hivatal: *Sugárvédelem*. (É. n.)

- Dóziskorlátozás: az egyéni sugárterhelés egyenérték- és effektív dózisa nem haladhat meg egy megállapított határértéket.²⁰ A foglalkozási sugárterhelésre vonatkozó effektív dóziskorlát évi 20 mSv. Bizonyos sugárzási helyzetekben azonban az illetékes hatóság egy-egy évben ennél nagyobb, de legfeljebb 50 mSv nagyságú effektív dózist is jóváhagyhat, amennyiben bármely egymást követő öt évben – azokat az éveket is ideértve, amikor a korlátot meghaladták – az éves átlagos dózis nem haladja meg a 20 mSv értéket. A lakossági sugárterhelésre vonatkozó dóziskorlát az összes jóváhagyott tevékenységből ért éves sugárterhelések összegére érvényes, ez 1 mSv/év. A korlátok nem vonatkoznak az egyén érdekében végrehajtott orvosi eljárásokból származó vagy baleseti sugárterhelésre.²¹

Előrejelző rendszerek és jogszabályi hátterek

Az Országos Környezeti Sugárvédelmi Ellenőrző Rendszer (OKSER) alapfeladata a lakosság természetes és mesterséges eredetű sugárterhelését meghatározó környezeti sugárzási viszonyok és a környezetben mérhető radioaktívanyag-koncentrációk országos ellenőrzési eredményeinek gyűjtése.

A Hatósági Környezeti Sugárvédelmi Ellenőrző Rendszer (HAKSER) a paksi atomerőmű környezetének rendszeres, az erőmű érdekeltségétől független, hatósági jellegű ellenőrzése céljából jött létre. Az érintett intézmények laboratóriumai az erőmű 30 km sugarú környezetében gyűjtenek rendszeresen környezeti mintákat. E minták radiológiai ellenőrzésének eredményeit az NNK-SSFO-ban működő Adatfeldolgozó és Értékelő Központ (HAKSER AFÉK) gyűjti.

Az Egészségügyi Radiológiai Mérő és Adatszolgáltató Hálózat (ERMAH) elsődleges célja a környezet rendszeres, rutinszerű radiológiai ellenőrzése volt, eredetileg abból a célból, hogy a nukleárisfegyver-kísérletek és egy esetleges atomháború során keletkező mesterséges radioaktív izotópok minőségi és mennyiségi kimutatásával felmérje a lakosság egészségromlásának kockázatát és mértékét. Az ERMAH működésében minőségi fejlődést és egyben súlyponteltolódást az atomenergia békés célú alkalmazásával kapcsolatos feladatok irányába a hazai atomenergetika kialakulása és az 1980-as években bekövetkező atomerőmű-balesetek hoztak. Egyre nagyobb hangsúlyt kapott a lakosság mesterséges, majd az utóbbi években a természetes eredetű sugárterhelésének becslése.²²

²⁰ Turai István – Kóteles György (szerk.): *Sugáregészségtan*. Budapest, Medicina, 2014. 234.

²¹ 487/2015. (XII. 30.) Korm. rendelet az ionizáló sugárzás elleni védelemről és a kapcsolódó engedélyezési, jelentési és ellenőrzési rendszerről.

²² Nemzeti Népegészségügyi Központ, *Sugárbiológiai és Sugár-egészségügyi Főosztály, Sugárvédelem*. (É. n.)

A biológiai vizsgálatok helye a nukleáris katasztrófák elleni védekezésben

A biológiai vizsgálatoknak számos ponton lehet szerepe egy nukleáris katasztrófa elleni védekezésben. Egyrészről a diagnosztikában is fontos szerepet játszanak, mivel azoknál, akik nem viseltek személyi dozimétert, a sugárterhelés mértékét csak ilyen módon lehet meghatározni. A sugársérültek állapotának nyomon követésében és kezelésükben is kiemelkedően fontos, hogy a pontos hatásmechanizmussal tisztában legyünk, valamint az egyéni sugárérzékenység meghatározása is segítheti a védekezésben részt vevők egészségének megőrzését. A biológiai, kémiai és farmakológiai alap kutatás feladata, hogy elősegítse az alkalmazott vizsgálati módszerek fejlesztését, korszerűsítését, amely a felkészülés legfontosabb része.

Biodozimetria

Az ionizáló sugárzás maradandó szerkezeti változásokat okoz élő és élettelen anyagban egyaránt, ez a retrospektív dozimetria alapja. Ezeket élettelen anyagban, például műanyagokban, kerámiában az EPR- (electron paramagnetic resonance) és az OSL- (optically stimulated luminescence) módszerekkel lehet meghatározni.²³ Ezek az eljárások a biodozimetria peremterületei, mert ugyan az alkalmazott eljárások pusztán fizikai alapon adnak dózisbecslést, azonban ezt olyan biológiai anyagokból is képesek megtenni, mint a fogzománc, csont vagy köröm.²⁴

A biodozimetria a sugársérült egyének utólagos dózisbecslésével foglalkozik. A sugárzás okozta biológiai károsodásokból kiindulva meg lehet becsülni a biológiai rendszer által elnyelt dózist. Különösen abban az esetben tesz nagy szolgálatot, ha a sugársérült egyének nem viselnek fizikai dozimétert. Fontos tulajdonsága, hogy a kapott dózis mellett figyelembe veszi a biológiai fogékonyságot is.²⁵

Ha élő anyagban, például a DNS-ben okoz töréseket a sugárzás, és a sejt életben marad, többféle enzimátikus javító mechanizmus próbálja helyrehozni a töréseket és újra működőképpé tenni a genetikai anyagot.²⁶ Ha sok törés keletkezik egymás közelében,²⁷ a javító enzimek tévedhetnek, ilyenkor az adott genomszakasz esetleg más helyre, másik kromoszómára épül vissza, transzlokáció történik, a sugárzásra nagymértékben jellemző

²³ Deli Gábor: Az ionizáló sugárzás emberi szervezetre gyakorolt hatásának korszerű kimutatási lehetőségei. *Honvéddorvos*, 71. (2019), 1–2. 39.

²⁴ Deli (2019): i. m. 40.

²⁵ Kis–Sáfrány–Solymosi (2013): i. m. 107.

²⁶ Elizabeth M. Kass – Maria Jasin: Collaboration and Competition between DNA Double-Strand Break Repair Pathways. *Federation of European Biochemical Societies Letters*, 584. (2010), 17. 3703.

²⁷ Megumi Hada – Alexandros G. Georgakilas: Formation of Clustered DNA Damage after High-LET Irradiation: A Review. *Journal of Radiation Research*, 49. (2008), 3. 203.

dicentrikus kromoszómák alakulhatnak ki.²⁸ Mivel ez az adat az egyes személyekre ad pontos információt, magában foglalja az egyedi sajátosságokat is, mint például az egyéni sugárérzékenység.²⁹ Az eredményeket egyéb faktorok is befolyásolják, mint a kor, betegségek, stressz, életmód és a nem.

Alapvetően két okunk lehet a dozimetriai vizsgálat elvégzésére:

- tudunk a sugaras eseményről – meg kell határozni az elszennvedett dózist;
- tisztázunk kell, hogy a gyanús klinikai tüneteket egy korábbi besugárzás okozza-e (például panaszokkal hazatérő katonák esetében, vagy gondoljunk Alexander Litvinenko halálának körülményeire, bár polóniummérgezése nem múltbéli, hanem folyamatban lévő folyamat volt).

A biológiai alapú módszerek egyik alaptípusa a fehérvérsejtekben bekövetkező változásokat detektálja. Ezeket citogenetikai módszereknek nevezzük, ilyenek a dicentrikus kromoszómaanalízis, a mikronukleuszteszt, a korai kromoszómakondenzációs eljárás és a fluoreszcens in situ hibridizáció. A másik alaptípus pedig a DNS-károsodás és repair, a génaktiváció, a metabolom és a proteom biomarkereit vizsgálja. Sugárterhelés gyanúja esetén a leggyorsabban elvégezhető releváns vizsgálat a vérkép vizsgálata, mivel a sugárzás hatására a vér sejtjes elemeinek száma lecsökken. Ez azonban, bár triage során hasznos lehet, dózisbecslésre korlátozott mértékben alkalmazható, hiszen a vérképet számos egyéb tényező is nagymértékben befolyásolhatja (gyógyszerek, megbetegedések).

A személyi dozimétert nem viselő személyeknél a sugársérülés mértékét csak biodozimetriai vizsgálatokkal lehet megbecsülni.³⁰ Ezek a vizsgálatok a DNS-károsodás mértékét tárják fel. A hagyományos módszerek a sejtmagban található DNS töréseit határozzák meg különféle módon, például a keringésben lévő limfociták kromoszómaaberrációi vagy a kromoszómatörések következtében a sejtosztódás során keletkező mikronukleuszok, vagyis a kóros apró sejtmagszerű képződmények száma alapján lehet megbecsülni. Ezek az érintett ember fehérvérsejtjeinek tenyésztését, emiatt hosszú vizsgálati időt igényelnek. A kiértékelést pedig csak nagy mikroszkópos gyakorlattal rendelkező személyek végezhetik, az eredmények pedig szubjektívek lesznek. A fentebb említett dicentrikus kromoszómák kialakulása jellemző a sugársérült szervezetekre. Ez a *gold standard* módszer, azonban a gyorsaság, a pontosítás és a több szempontú megközelítés miatt több módszerre is szükség van. Ezért szükség van egy új, gyorsabb módszer beállítására, amelyre az utóbbi években elterjedt PCR-technika nyújt lehetőséget. Ezzel ugyanis a DNS-elváltozások molekuláris szinten vizsgálhatók.³¹

A biodozimetriai módszereket úgy választjuk ki, hogy – lehetőség szerint egymással kombinálva – alkalmasak legyenek olyan emberek vizsgálatára, akiket esetlegesen

²⁸ Gábor Deli: Cytogenetic Detection Tools for Effects of Ionizing Radiation on Human. *Hadmérnök*, 13. (2018b), 3. 181.

²⁹ Kis-Sáfrány-Solymosi (2013): i. m. 107.

³⁰ Deli (2019): i. m. 31.

³¹ Deli (2019): i. m. 38.

ionizáló sugárzás ért. Ezek az emberek lehetnek ipari munkások, egy katasztrófa következményeit felszámoló személyzet, terrortámadások áldozatai vagy misszióból visszatérő katonák.³²

Ezek a módszerek fontos szerepet játszanak egy nagyszabású baleset vagy katasztrófa során is. Azokban a helyzetekben, amikor ionizáló sugárzásról van szó, sok olyan ember lehet, akinek nincs tünete, de potenciálisan ki voltak téve sugárzásnak – ezeket az embereket meg kell vizsgálni, hogy minimalizálják a hosszú távú egészségkárosodások – mint például a daganatos megbetegedések – kialakulásának kockázatát a jövőben.³³

A Covid-19-járvány kapcsán rengeteg laboratóriumot felszereltek molekuláris biológiai diagnosztikai eszközökkel, így a biodozimetria ilyen irányú fejlesztése számos logisztikai problémát megoldhatna, azonban – habár számos ígéretes eljárás létezik – jelenlegi formájában egyelőre ezek egyike sem felel meg nagy volumenű dozimetriára. Ilyen fejlesztendő molekuláris biológiai vizsgálatok például a γ -H2AX, a telomerek, a centromerek, a mitokondriális deléciók és a génexpressziós mintázat, valamint az immunológiai válaszokban részt vevő fehérjék vizsgálata.³⁴

Kezelési és védekezési lehetőségek

A biológiai kutatások segítségével nemcsak a diagnosztikai eszközöket fejleszthetjük, hanem számos ponton kezelési és megelőzési eljárásokat is hatékonyabbá tehetünk, ehhez azonban szükség van a sugárzás szervezetet károsító hatásmechanizmusának pontosabb megismerésére.

Akut sugárbetegség kezelése

Az akut sugárbetegség egyik fő jellemzője a szakaszos lezajlás. Az expozíció után néhány órán belül egy prodromális szakasz lép fel, ezt követi a sugárszindróma megkülönböztető jegyeit mutató manifeszt fázis. A prodromális tünetek megjelenése a szervezet besugárzásra adott nem specifikus válaszüteme. Fellépési idejük, súlyosságuk és fennállásuk dózisfüggése miatt a biodozimetriai és vérképvizsgálatok mellett a prodromális tünetek is jelentős szerepet játszhatnak a sugársérülés várható súlyosságának korai becslésében és a megfelelő ellátási szint meghatározásában. Sugársérülés gyanújakor elsődleges fontosságú a vérkép sorozatvizsgálata, mert az expozíciót követő első néhány napban a limfociták, később pedig a neutrofil granulociták és vérlemezkék számának csökkenése nemcsak dózisbecslési, de egyben prognosztikai értékű is. A módszer limitációja, hogy

³² Deli Gábor: Citogenetikai vizsgálat sugárkárosodás gyanúja miatt: esetismertetés. *Hadmérnök*, 13. (2018a), 4. 340.

³³ Deli (2018b): i. m. 180.

³⁴ Deli (2019): i. m. 31.

bár gyorsan képet ad a sérült állapotáról, és az állapot követését is lehetővé teszi, azonban a reakciók egyénenként eltérhetnek, és a vérképet számos egyéb tényező is befolyásolja.

A gyógyulási esély – a kapott sugárdózis mellett – nagymértékben függ a megfelelő ellátástól, amelyben a sugárzás által immunsérültté vált szervezet további külső behatások elleni védelmét szolgáló elkülönítés, a fertőzések megelőzése és kezelése, a vérzések megakadályozása és csillapítása, a vérképző és immunrendszeri regeneráció támogatása és szükség esetén a vérképző őssejtek pótlása képezi a terápia alappilléreit.

A supraletális dózisok okozta emésztőrendszeri kórforma kezelésében a fentiek mellett a sérült bélhám regenerációjának serkentése, a szervezet folyadék- és elektrolitegyensúlyának biztosítása, a belekből felszívódó bakteriális és egyéb toxikus anyagok hatására fellépő mérgezettségi állapot kezelése, valamint a többszervi elégtelenség megelőzése a fő cél.³⁵

A hematopoetikus szindróma kezelése függhet a becsült dózistól, az expozíció módjától és a jelentkező tünetektől. A citokinekkal történő rövid távú terápia alacsonyabb dózisok (<3Gy) esetén alternatíva. Nagyobb dózisok (>7Gy), esetleg traumás vagy égési sérülésekkel való kombinált sérülések esetén a transzfúzióval, citokinekkal és akár őssejt-terápiával történő hosszú távú kezelés lehet megoldás.³⁶

Egyéni sugárérzékenység

A sugárérzékenységnak három fajtája van: a szövetkárosodásra, a rákos megbetegedésre és a felgyorsult öregedésre való hajlam.³⁷ A szövetkárosodásra való hajlam korrelál a javíthatlan DNS-károsodásokkal, amelyek a sejtek halálát, így a determinisztikus hatásokat okozzák. A daganatok kialakulására való hajlam pedig a rosszul kijavított DNS-károsodásokkal függ össze, ez áll a sztochasztikus hatások hátterében. A felgyorsult öregedéshez kapcsolódó degenerációs válaszok nem daganatos hatások, amelyek kijavíthatlan, de tolerálható DNS-károsodások felhalmozódása miatt alakulnak ki, azonban nem váltanak ki a szövetkárosodásra jellemző válaszokat.³⁸

Egy sugaras esemény során a civilek előre nem tervezett, ellenőrizhetetlen dózist kaphatnak, azonban a bevetett mentő-, illetve mentesítő személyzet ellenőrzött, de a természetes háttérnél magasabb dózisú sugárterhelésnek van kitéve. Ezért fontos ismerni

³⁵ Pesznyák Csilla – Sáfrány Géza: *Sugárbiológia*. Budapest, Typotex, 2016. 154.

³⁶ Jamie K. Waselenko et al.: Medical Management of the Acute Radiation Syndrome: Recommendations of the Strategic National Stockpile Radiation Working Group. *Annals of Internal Medicine*, 140. (2004), 12. 1044.

³⁷ Laura El-Nachef et al.: Human Radiosensitivity and Radiosusceptibility: What Are the Differences? *International Journal of Molecular Sciences*, 22. (2021), 13. 7158.

³⁸ Nicolas Foray – Michel Bourguignon – Nobuyuki Hamada: Individual Response to Ionizing Radiation. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 770. (2016), Part B. 369.

az elhárítás tervezésekor a tűzoltók, egészségügyi személyzet és katonák egyéni sugárérzékenységét.³⁹

Farmakológiai kutatási irányok

Kiterjedt vizsgálatok kutatják a sugárhatást módosító anyagokat. Egy váratlan nukleáris eseményre felkészülve vagy a mindennapi életben jelen lévő, helyenként esetleg magasabb háttérsugárzás ellen lehet jelentősége a sugárvédő anyagoknak. A sugárterápia hatékonyságának és szelektivitásának megnövelésére, valamint diagnosztikai célokra a sugárvédő és a sugárérzékenyítő, sőt helyettesítő (radiomimetikus) anyagokat az egészségügy egyaránt tudja használni.

A sugárvédő vegyületek kapcsán két alapvető szakaszban lehet beavatkozni: a szabadgyökök mennyiségének mérséklésével, illetve a gyulladásos folyamat megállításával.

A DNS-károsodás vagy a sugárzás hatására közvetlenül alakul ki, vagy az ionizáló sugárzás reaktív oxigéngyököket képezve közvetve okoz DNS-törést. A szövetekben jelen levő egyes enzimek – például a szuperoxid diszmutázok (SOD-ok), a glutationperoxidáz, a glutationreduktáz és a kataláz – működésükkel antioxidáns, sugárvédő hatást fejtenek ki.

A klasszikus sugárvédő anyagok azok, amelyek jelenlétében az ionizáló sugárzás kisebb mértékű DNS-károsodást okoz, mint tenné azt az anyag jelenléte nélkül – ezek profilaktikus célt szolgálnak.⁴⁰

A mesterséges klasszikus sugárvédők gyakorlatilag csak tervezett besugárzás, orvosi beavatkozás esetén használatosak. A hidegháború idején fejlesztettek ki egy erős sugárvédő antioxidáns szulfhidrát csoportot tartalmazó vegyületet, amifosztin (vagy WR2721) néven, amit a klinikumban is alkalmaznak az egészséges szövetek sugárvédelmére. Alkalmazása azonban korlátozott, súlyos mellékhatásai, rövid felezési ideje, nem orális jellege és egyéb hátrányai miatt. Szabadgyökfogó, hidrogéndonor, prodrog, a szöveti alkalikus foszfatáz hidrolizálja, ezáltal aktiválja 8–9-es pH-jú környezetben. A tumorokra jellemző hypoxia és savas közeg miatt a szöveti alkalikus foszfatáz aktivitása alacsony, ez biztosítja az egészséges szövetek relatív szelektív védelmét.⁴¹ Több klasszikus sugárvédő van még kísérleti fázisban, például a WR2721 egy származéka, a HL-003, egy kis molekulájú sugárvédő, jobb biztonsági profillal, nagy hatékonysággal és orális alkalmazással.⁴²

A természetben is előfordulnak ilyen antioxidáns, szabadgyökfogó vegyületek, mint az α -tokoferol, az aszkorbinsav, a tiolok, a glutationok. Ezek a mindennapi táplálékkal

³⁹ Kis-Sáfrány-Solymosi (2013): i. m. 105.

⁴⁰ Pesznyák-Sáfrány (2016): i. m. 98.

⁴¹ Pesznyák-Sáfrány (2016): i. m. 99.

⁴² Yahong Liu et al.: Preclinical Evaluation of Safety, Pharmacokinetics, Efficacy, and Mechanism of Radioprotective Agent HL-003. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2021. február 20.

bevihetők, hidrogéndonorként működnek, de csak részlegesen semlegesítik az oxidatív stressz során keletkező szabadgyököket.⁴³

Állatkísérletben már ígéretes eredmények vannak a szuperoxid-diszmutáz- (SOD-) alapú génterápiával.⁴⁴ A tracheába juttatott lipidborítású plazmidrészcsekék tartalmazták a SOD-genomot a géndeficiens egerek számára. A módosított RNS-tartalmú Covid–19 Pfizer-oltás sikere várhatóan új lendületet ad majd ennek a területnek is.

A nanorészecskék is érdeklődést váltottak ki a sugárbiológiai alkalmazásokban. A rétegszerű Bi_2Se_3 nagy aktív felülettel ígéretes a szabadgyökök megkötésére. Kiváló antioxidáns-aktivitása és elektrokatalitikus tulajdonsága van. Növelhetik az egerek túlélő frakcióját a nagy energiájú gammasugárzás expozíciója után, segíthetnek helyreállítani a sugárzás által csökkentett vörösvérsejtszámot, a fehérvérsejtszámot és a vérlemezkeszámot, funkcionális szabadgyökkötőként viselkedtek. A Bi_2Se_3 nanopartikulumok nem okoztak jelentős mellékhatásokat a vérkéimiai, klinikai biokémiai és patológiai vizsgálatok alapján.⁴⁵

A reaktív oxigéngyökök mennyiségét helyi hypoxiát okozó fizikai eljárással is csökkentjük. A fej-nyak tumoros betegek krioterápiája azt jelenti, hogy a szájnyalkahártya és a nyálmirigyek védelmére a sugárterápia során a beteg jégkockákat szopogat, a lokális érösszehúzó és az ebből adódó hipoxia megvédi az egészséges szöveteket a besugárzással szemben.⁴⁶

Váratlan esemény bekövetkezése után a szabadgyökök mennyiségét már nem tudjuk hatékonyan mérsékelni, csak a szöveti károsodás folyamatát megállító vegyületek jöhetnek szóba, ezért ennek a csoportnak a katasztrófavédelmi jelentősége kiemelkedő.⁴⁷

Az ionizáló sugárzás hatására sejtpusztulási folyamat lép fel azokban a sejtekben, amelyek helyrehozhatatlan DNS-károsodást szenvedtek. A károsodott és elpusztult sejteket tartalmazó szövetben bystander mechanizmussal gyulladásos folyamatok alakulnak ki.⁴⁸ Szöveti átrendeződés történik, fibrózis kezdődhet.

Ebben a fázisban a gyulladásgátlók hatékonyak, például a nem szteroid gyulladás-csökkentők, mint az aszpirin és az ibuprofen. Az elpusztult sejtek pótlását segíthetjük növekedési faktorok, hematopoetikus növekedési faktorok, granulocita kolónia stimuláló faktor (G-CSF), illetve a granulocita-makrofág kolónia stimuláló faktor (GM-CSF) adásával. Ha a hámok nem folytonosak a nekrozis következtében, az fertőzéshez, szepszishez

⁴³ Joseph F. Weiss – Michael R. Landauer: Protection Against Ionizing Radiation by Antioxidant Nutrients and Phytochemicals. *Toxicology*, 189. (2003), 1–2. 1.

⁴⁴ Michael W. Epperly et al.: Decreased Pulmonary Radiation Resistance of Manganese Superoxide Dismutase (MnSOD)-Deficient Mice is Corrected by Human Manganese Superoxide Dismutase-Plasmid/Liposome (SOD2-PL) Intratracheal Gene Therapy. *Radiation Research*, 154. (2000), 4. 365.

⁴⁵ Xiao-Dong Zhang et al.: Catalytic Topological Insulator Bi_2Se_3 Nanoparticles for In Vivo Protection Against Ionizing Radiation. *Nanomedicine*, 13. (2017), 5. 1597.

⁴⁶ Pesznyák–Sáfrány (2016): i. m. 101.

⁴⁷ Pesznyák–Sáfrány (2016): i. m. 98.

⁴⁸ Lumniczky Katalin – Géza Sáfrány: The Impact of Radiation Therapy on the Antitumor Immunity: Local Effects and Systemic Consequences. *Cancer Letters*, 356. (2015), 1. 114.

vezethet. A veszély fokozódik az immunsejtek pusztulása miatt. Hasznosak ilyenkor a fibrotikus folyamatokat gátló TGF- β gátlók és glukokortikoidok is. Ezenkívül alkalmaznak ACE gátlókat a vese és a tüdő, izoflavonokat a csontvelő, sztatínokat és proteáz gátlókat az agy védelmére sugárterápia során.⁴⁹

Radiomimetikumok

A radiomimetikumok részben vagy egészen kiválthatják a sugárkezelést, a kutatás szempontjából azért is érdekesek, mert segítségükkel fény derülhet a DNS-károsodás és a javító mechanizmusok hatásmechanizmusára.⁵⁰ Diagnosztikai szempontból is jelentősek.⁵¹

Következtetések

A háttérsugárzás, foglalkozási ártalomként elszenvedett sugárterhelés, terrortámadás vagy nukleáris támadás során elszenvedett terhelés nyomot hagy a sejteinkben.

A sugárbiológiai kutatások feladata többretű: a nemkívánatos sugárterhelés hatásának kimutatása, a regenerálódás követése, valamint a daganatterápia során alkalmazott sugárterhelés szelektivitásának növelése, ellenőrzése, a gyógyulás követése.

A sugárbiológiai laboratóriumok előtt átfogó kutatási feladat áll, mert a jelenlegi formájában egyik biodozimetriai módszer sem alkalmazható első vonalban, katasztrófafhelyzetben. A biodozimetriát új alapokra kell helyezni, új molekuláris biológiai markereket, új eljárásokat kutatni. A sugárbiológiai laboratóriumok mindaddig nem lesznek a katasztrófakezelés hasznos eszközei, amíg egy megbízható és főleg gyors diagnosztikai eljárást nem dolgoznak ki a sugaras érintettség mértékének megállapítására.

A katasztrófaelhárításban részt vevők egyéni sugárérzékenységeinek meghatározása nemcsak a védekezés tervezésekor lehet rendkívül hasznos, hanem a mentésben részt vevők egészségének védelme szempontjából is fontos tényező.

Számos kutatás célozza a sugárzás emberi szervezetre gyakorolt hatásainak mind mélyebb megismerését, mivel így egyrészt különböző sugárvédő anyagokat is felfedezhetünk, valamint a hatásmechanizmus pontos megismerése a sugársérültek kezelési lehetőségeit is bővítheti, továbbfejlesztheti.

Az orvosi beavatkozás során, a sugárterápia kapcsán még a sugárérzékenyítésnek is létjogosultsága van, a környező egészséges szövetek sugárvédelmével párhuzamosan. A szelektív hatás megvalósításához azonban pontosabban kell ismernünk a háttérben játszódó biokémiai folyamatokat.

⁴⁹ Pesznyák–Sáfrány (2016): i. m. 102.

⁵⁰ Leila Benkhaled et al.: Induction of Complete and Incomplete Chromosome Aberrations by Bleomycin in Human Lymphocytes. *Mutation Research*, (2008), 1–2. 139.

⁵¹ Székely Gábor et al.: Does the Bleomycin Sensitivity Assay Express Cancer Phenotype? *Mutagenesis*, 18. (2003), 1. 59.

Felhasznált irodalom

- Avlasevich, Svetlana L. – Steven M. Bryce – Siân E. Cairns – Stephen D. Dertinger: In Vitro Micronucleus Scoring by FlowCytometry: Differential Staining of Micronuclei Versus Apoptotic and Necrotic Chromatin Enhances Assay Reliability. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 47. (2006), 1. 56–66. Online: <https://doi.org/10.1002/em.20170>
- Benkhalel, Leila – M. Xunclà – M. R. Caballín – L. Barrios – J. F. Barquinero: Induction of Complete and Incomplete Chromosome Aberrations by Bleomycin in Human Lymphocytes. *Mutation Research*, (2008), 1–2. 134–141. Online: <https://doi.org/10.1016/j.mrfmmm.2007.07.013>
- Bonte, Frederick J.: Chernobyl Retrospective. *Seminars in Nuclear Medicine*, 18. (1988), 1. 16–24. Online: [https://doi.org/10.1016/S0001-2998\(88\)80016-3](https://doi.org/10.1016/S0001-2998(88)80016-3)
- Csurgai, József – József Padányi – László Földi: Temperature Dependence of NaI(Tl) Radiation Scintillation Detectors' Characteristics. *Advances in Military Technology*, 15. (2020), 1. 201–212. Online: <https://doi.org/10.3849/aimt.01328>
- Deli Gábor: Citogenetikai vizsgálat sugárkárosodás gyanúja miatt: esetismertetés. *Hadmérnök*, 13. (2018a), 4. 340–348.
- Deli, Gábor: Cytogenetic Detection Tools for Effects of Ionizing Radiation on Human. *Hadmérnök*, 13. (2018b), 3. 179–192.
- Deli Gábor: Az ionizáló sugárzás emberi szervezetre gyakorolt hatásának korszerű kimutatási lehetőségei. *Honvédervos*, 71. (2019), 1–2. 31–45.
- Deli Gábor – Papp Sándor – Pataki Ágnes – Mátyus Mária: Hagyományos és PCR alapú biodozimetriai módszerek a katasztrófavédelemben. *Honvédervos*, 70. (2018), 1–2. 27–32.
- Deli Gábor – Pataki Ágnes – Emődy-Kiss Blanka – Takács Edina – Papp Sándor – Fent János: A COVID-19 megelőzésére szolgáló vakcinák összetétele, működési elve. *Honvédervos*, 72. (2020), 3–4. 7–25.
- Diagnosis and Treatment of Radiation Injuries*. Safety Reports Series No. 2. Vienna, International Atomic Energy Agency, 1998.
- El-Nachef, Laura – Joelle Al-Choboq – Juliette Restier-Verlet – Adeline Granzotto – Elise Berthel – Laurene Sonzogno – Mélanie L. Ferlazzo – Audrey Bouchet – Pierre Leblond – Patrick Combemale – Stéphane Pinson – Michel Bourguignon – Nicolas Foray: Human Radiosensitivity and Radiosusceptibility: What Are the Differences? *International Journal of Molecular Sciences*, 22. (2021), 13. 7158. Online: <https://doi.org/10.3390/ijms22137158>
- Epperly, Michael W. – C. J. Epstein – E. L. Travis – J. S. Greenberger: Decreased Pulmonary Radiation Resistance of Manganese Superoxide Dismutase (MnSOD)-Deficient Mice is Corrected by Human Manganese Superoxide Dismutase-Plasmid/Liposome (SOD2-PL) Intratracheal Gene Therapy. *Radiation Research*, 154. (2000), 4. 365–374. Online: [https://doi.org/10.1667/0033-7587\(2000\)154\[0365:DPRROM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1667/0033-7587(2000)154[0365:DPRROM]2.0.CO;2)
- Foray, Nicolas – Michel Bourguignon – Nobuyuki Hamada: Individual Response to Ionizing Radiation. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 770. (2016), Part B. 369–386. Online: <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2016.09.001>
- Hada, Megumi – Georgakilas Alexandros G.: Formation of Clustered DNA Damage after High-LET Irradiation: A Review. *Journal of Radiation Research*, 49. (2008), 3. 203–210. Online: <https://doi.org/10.1269/jrr.07123>
- Harrison, John – Rich Leggett – David Lloyd – Alan Phipps – Bobby Scott: Polonium-210 as a Poison. *Journal of Radiological Protection*, 27. (2007), 1. 17–40. Online: <https://doi.org/10.1088/0952-4746/27/1/001>

- International Commission on Radiological Protection, Governance.* (É. n.) Online: www.icrp.org/page.asp?id=3
- Iodine Thyroid Blocking. Guidelines for Use in Planning for and Responding to Radiological and Nuclear Emergencies.* Geneva, WHO, 2017.
- Kass, Elizabeth M. – Maria Jasin: Collaboration and Competition between DNA Double-Strand Break Repair Pathways. *Federation of European Biochemical Societies Letters*, 584. (2010), 17. 3703–3708. Online: <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2010.07.057>
- Kis Enikő – Sáfrány Géza – Solymosi József: A sugárérzékenység vizsgálatának katasztrófavédelmi jelentősége. *Hadmérnök*, 8. (2013), 4. 104–112.
- Khana, Kainat – Shikha Tewari – Namrata Punit Awasthi – Surendra Prasad Mishra – Gaurav Raj Agarwal – Madhup Rastogi – Nuzhat Husain: Flow Cytometric Detection of Gamma-H2AX to Evaluate DNA Damage by Low Dose Diagnostic Irradiation. *Medical Hypotheses*, 115. (2018). 22–28. Online: <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2018.03.016>
- Lim, Hyeyun – A. J. Agopian – Lawrence W. Whitehead – Charles W. Beasley – Peter H. Langlois – Robert J. Emery – Dorothy Kim Walle: Maternal Occupational Exposure to Ionizing Radiation and Major Structural Birth Defects. *Clinical and Molecular Teratology*, 103. (2015), 4. 243–254. Online: <https://doi.org/10.1002/bdra.23340>
- Liu, Yahong – Longfei Miao – Yuying Guo – Hongqi Tian: Preclinical Evaluation of Safety, Pharmacokinetics, Efficacy, and Mechanism of Radioprotective Agent HL-003. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2021. február 20. Online: <https://doi.org/10.1155/2021/6683836>
- Lumniczky, Katalin – Géza Sáfrány: The Impact of Radiation Therapy on the Antitumor Immunity: Local Effects and Systemic Consequences. *Cancer Letters*, 356. (2015), 1. 114–125. Online: <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2013.08.024>
- Nemzeti Népegészségügyi Központ, Sugárbiológiai és Sugár-egészségügyi Főosztály, Sugárvédelem. (É. n.) Online: www.nnk.gov.hu/index.php/sugarbiologiai-es-sugar-egeszsegugyi-foosztaly/sugarvedelem/kornyezeti-sugarvedelmi-monitoring-rendszerek
- Nemzetközi Atomenergiai Ügynökség – International Atomic Energy Agency. (É. n.) Online: <http://vienna.io.gov.hu/nau-bemutato>
- NNK-SSFO (OSSKI) rendszeres telephelyi méréseinek eredményei. (É. n.) Online: www.osski.hu/info/ksv/ksv.php
- Országos Atomenergia Hivatal: Sugárvédelem. (É. n.) Online: www.haca.gov.hu/web/v3/oahportal.nsf/web?openagent&menu=02&submenu=2_12
- Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság: Katasztrófatípusok – Nukleáris veszély. (É. n.) Online: www.katasztrofavedelem.hu/300/katasztrofatipusok-nuklearis-veszely
- Pesznyák Csilla – Sáfrány Géza: *Sugárbiológia*. Budapest, Typotex, 2016.
- Pisano, Maria Paola – Nicole Grandi – Marta Cadeddu – Jonas Blomberg – Enzo Tramontano: Comprehensive Characterization of the Human Endogenous Retrovirus HERV-K(HML-6) Group: Overview of Structure, Phylogeny, and Contribution to the Human Genome. *Journal of Virology*, 93. (2019), 16. Online: <https://doi.org/10.1128/JVI.00110-19>
- Sándor, Nikolett – Boglárka Schilling-Tóth – Enikő Kis – Anett Benedek – Katalin Lumniczky – Géza Sáfrány – Hargita Hegyesi: Growth Differentiation Factor-15 (GDF-15) is a Potential Marker of Radiation Response and Radiation Sensitivity. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 793. (2015). 142–149. Online: <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2015.06.009>
- Székely, Gábor – Éva Remenár – Miklós Kásler – Sarolta Gundy: Does the Bleomycin Sensitivity Assay Express Cancer Phenotype? *Mutagenesis*, 18. (2003), 1. 59–63. Online: <https://doi.org/10.1093/mutage/18.1.59>

- The National Diet of Japan: *The Official Report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission*. Tokyo, 2012.
- Turai István – Köteles György (szerk.): *Sugáregészségtan*. Budapest, Medicina. 2014.
- United Nations: *Treaty on the Prohibition of Nuclear Weapons*. (É. n.) Online: www.un.org/disarmament/wmd/nuclear/tpnw/
- Waselenko, Jamie K. – Thomas J. MacVittie – William F Blakely – Nicki Pesik – Albert L. Wiley – William E. Dickerson – Horace Tsu – Dennis L. Confer – C. Norman Coleman – Thomas Seed – Patrick Lowry – James O. Armitage – Nicholas Dainiak: Medical Management of the Acute Radiation Syndrome: Recommendations of the Strategic National Stockpile Radiation Working Group. *Annals of Internal Medicine*, 140. (2004), 12. 1037–1051. Online: <https://doi.org/10.7326/0003-4819-140-12-200406150-00015>
- Weiss, Joseph F. – Michael R. Landauer: Protection Against Ionizing Radiation by Antioxidant Nutrients and Phytochemicals. *Toxicology*, 189. (2003), 1–2. 1–20.
- Wilkins, Ruth C. – Matthew A. Rodrigues – Lindsay A. Beaton-Green: The Application of Imaging Flow Cytometry to High-Throughput Biodosimetry. *Genome Integrity*, 8. (2017), 1. 1–7. Online: <https://doi.org/10.4103/2041-9414.198912>
- Zhang, Xiao-Dong – Yaqi Jing – Shasha Song – Jiang Yang – Jun-Ying Wang – Xuhui Xue – Yuho Min – Gyeongbae Park – Xiu Shen – Yuan-Ming Sun – Unyong Jeong: Catalytic Topological Insulator Bi₂Se₃ Nanoparticles for In Vivo Protection Against Ionizing Radiation. *Nanomedicine*, 13. (2017), 5. 1597–1605. Online: <https://doi.org/10.1016/j.nano.2017.02.018>