

A kiégett üzemanyag tárolása, kezelése új eszközöket és eljárásokat igényelhet, különösen akkor, ha az új fűtőelemek reprocessálásával is számolnak.

Következtetések

A balesetálló fűtőelemek fejlesztése a világ számos laboratóriumában folyik és a fűtőelemgyártók többsége hosszú távon tervezi ilyen üzemanyag gyártását. Számos új burkolatanyagot és tablettatípust vizsgálnak, és több olyan perspektivikus konstrukció van, amelyek kutatóreaktori besugárzása már megkezdődött. Várhatóan négy-öt éven belül kezdődhet meg az első erőművi kazetták tesztelése.

A balesetálló atomerőművi fűtőelemeknek – amellett, hogy sokkal jobban ellenállnak az üzemzavari és baleseti állapotokban fellépő terheléseknek – természetesen a normál üzemelés során is legalább olyan jól kell majd teljesíteniük, mint a jelenleg használatos üzemanyagoknak.

Irodalom

1. Accident Tolerant Fuel Concepts for Light Water Reactors. *IAEA-TECDOC-1797*, Proceedings of a Technical Meeting held at Oak Ridge National Laboratories, United States of America, 13–16 October 2014 (<http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE1797web.pdf>)
2. Increased Accident Tolerance of Fuels for Light Water Reactors. NEA/NSC/DOC (2013) 9, Workshop Proceedings OECD/NEA Headquarters Issy-les-Moulineaux, France 10–12 December 2012.
3. S. J. Zinkle, K. A. Terrani, J. C. Gehin, L. J. Ott, L. L. Snead: Accident tolerant fuels for LWRs: A perspective. *Journal of Nuclear Materials* 448 (2014) 374–379.
4. Hyun-Gil Kim, Jae-Ho Yang, Weon-Ju Kim, Yang-Hyun Koo: Development Status of Accident-tolerant Fuel for Light Water Reactors in Korea. *Nuclear Engineering and Technology* 48 (2016) 1–15.
5. Masaki Kurata: Research and Development Methodology for Practical Use of Accident Tolerant Fuel in Light Water Reactors. *Nuclear Engineering and Technology* 48 (2016) 26–32.
6. Shannon Bragg-Sitton: Development of advanced accident tolerant fuels for commercial LWRs. *Nuclear News* (March 2014) 83–91.
7. M. Sevecek, J. Krejci, L. Cvrcek: Development of Chromium and Chromium Nitride Coated Cladding for VVER Reactors. 2017, the Water Reactor Fuel Performance Meeting, September 10–14, 2017, Korea

RADONEXPOZÍCIÓ ÉS A KIS DÓZISOK DEFINÍCIÓJA

Madas Balázs Gergely

MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Környezetfizikai Laboratórium

A sugárvédelmi kutatások egyik alapvető kérdése, hogy milyen a kis dózisú besugárzások egészségre gyakorolt hatása. Ennek megfelelően mind Európában, mind az Egyesült Államokban jelentős forrásokat biztosítottak a kis dózisok hatásainak vizsgálatára. De mik is azok a kis dózisok?

Szórtan ionizáló, azaz kis LET-értékű (LET: linear energy transfer, lineáris energiaátadási tényező) sugárzások esetén általában a 100 mGy-nél kisebb elnyelt dózisokat szokás kis dózissnak tekinteni, míg a sűrűn ionizáló, azaz nagy LET-értékű sugárzásoknál

a kis dózisok tartományának felső határa egy nagyságrenddel alacsonyabb. Első ránézésre a definíció egyértelmű.

Kérdések a kis dózisok definíciójával kapcsolatban

A definíciót jobban megvizsgálva rájövünk, hogy néhány kérdés nyitva maradt. Az egyik, hogy az időbeli eloszlástól független-e, hogy valamit kis dózissnak tekintünk vagy sem. Ezzel kapcsolatban azt találjuk, hogy a kis dózisok vonatkozásában a releváns dózisteljesítmény-tartomány 100 mGy/h szórtan ionizáló sugárzásokra, míg a sűrűn ionizálóakra, például alfa-részecskékre, pedig ismét egy nagyságrenddel alacsonyabb. Bár továbbra is nyitott az a rendkívül fontos kérdés, hogy a dózisteljesítmény miként befolyásolja az egészségi hatást, fontos megjegyezni, hogy ezt a sugárvédelem rendszere igyekszik figyelembe venni a „dózis-dózisteljesítmény csökkentési tényezővel” (DDREF: dose and dose rate effectiveness factor) [1]. Emiatt is a továbbiakban nem erre, hanem egy másik kérdésre összpontosítunk. Ugyanis nemcsak az a kérdés, hogy milyen időtartam alatt éri egy adott dózis az embert, hanem az is, hogy a dózist mekkora térfogatban mérjük.

A sztochasztikus hatások vizsgálatakor az elnyelt dózist a szervek, illetve a szövetek egészére átlagol-

Köszönet illeti *Drozdik Emesét* a kézirat átolvasásáért. A kutatás részben a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával (VKSZ 14-1-2015-0021), részben pedig a TÁMOP 4.2.4.A/1-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése országos program című kiemelt projekt keretében zajlott (A2-EPPK-13-0160). A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.



Madas Balázs 2007-ben szerzett diplomát mérnök-fizikus szakon a BME-n, majd 2009-ben ugyanitt végzett egészségügyi mérnökként. Doktori fokozatát 2013-ban az ELTE Fizika Doktori Iskolájában szerezte. Értekezését, amelynek címe „Az ionizáló sugárzás biológiai hatásainak szövetszintű modellezése” *Balászházy Imre* témavezetésével készítette. Kutatásainak fő kérdése, hogy a biológiai rendszerekre hogyan hat az ionizáló sugárzás, különös tekintettel azok változékonyságára.

jük. Belső terheléskor több esetben (tüdő, emésztőrendszer, csontfelszín, bőr) figyelembe vesszük a radionuklidok és a sugárérzékeny célsejtek térbeli eloszlását. Ugyanakkor az elnyelt dózist ebben az esetben is az adott szerv vagy szövet összes célsejtjére kell átlagolni. Ez azt jelenti, hogy a sugárvédelem ugyanazt a kockázatot rendeli a célsejtekben adott átlagos elnyelt dózist eredményező besugárzásokhoz, attól függetlenül, hogy az ionizáló energia egyenletesen vagy egyenetlenül oszlik el az adott szervben vagy szövetben. Az effektív dózis és ennek megfelelően a besugárzáshoz rendelt kockázat ugyanakkora, ha egy adott szerv egyetlen célsejtje nyel el 0,001 J energiát vagy az adott szerv 10^{11} célsejtje nyel el egyenként 10^{-14} J energiát. Ugyanakkor a biológiai hatás és ennek megfelelően a várható egészségi következmények minden bizonnyal különbözőek, ha egy sejt nyel el nagyjából 10^9 Gy dózist, vagy 10^{11} sejt mindegyike nyel el 10 mGy dózist.

Ez az ellentmondás, hogy ugyanazt a kockázatot rendeljük nagyon különböző besugárzásokhoz, és feltehetően nagyon különböző biológiai hatásokhoz is, sokkal mélyebben gyökerezik, mint azt elsőre gondolnánk. Tulajdonképpen a dózismennyiségek definíciójából már levezethető, ugyanis ezek a lineáris, küszöb nélküli dózis-hatás összefüggés feltételezésén alapulnak (LNT-hipotézis). Mivel a lineáris dózis-hatás összefüggés kizárja annak lehetőségét, hogy az ugyanolyan érzékenyséű sejtek közötti dóziseloszlást figyelembe vegyük, az ellentmondás a sugárvédelem jelenlegi rendszerén belül első közelítésben nem feloldható. Ezt korábban mi is bemutattuk [2].

A fenti példa tekinthető úgy, mint egy érdekes elméleti kérdés. Fontos azonban, hogy a sugárvédelem célja gyakorlati problémák megoldása. Kérdés tehát, hogy a térben egyenetlen terheléseloszlásoknak van-e bármilyen gyakorlati jelentősége.

Egyenetlen térbeli dóziseloszlás a gyakorlatban

Az aeroszolok légúti kiülepedése igen egyenetlen. Mivel a radonleágyelemek jelentős részben az aeroszol szilárd részecskéihez kötődnek, a térbeli egyenetlenség az aktivitáseloszlásban is megmutatkozik. Az alfa-részecskék rövid hatótávolsága miatt az egyenetlen aktivitáseloszlás egyenetlen dóziseloszlást eredményez [3].

Az uránbányászok radonterhelésének jellemzésére régen gyakran használták a munkahónapszint mennyiséget (WLM: working level month). 1 WLM expozíció megfelel annak, hogy valaki egy munkahónapon, azaz 170 órán keresztül 1 WL (working level) koncentrációjú levegőt lélegez be. 1 WL koncentráció pedig olyan levegő-összetételt jellemez, amelynek 1 literében a radonleágyelemek tetszőleges kombinációjából összesen $1,3 \cdot 10^5$ MeV alfa-energia szabadulhat fel.

1 WLM (ami egyébként $3,54 \cdot 10^{-3}$ Jh m⁻³-nek felel meg) 12 mSv effektív dózist eredményez. Tekintsük a kisdózistartomány felső határát alfa-részecskékre 10 mGy-nek, ami éppen megegyezik a hazánkban meghatározó *Sugárvédelem* című könyv által megadott 200 mSv-es felső határnak [1]. Ha csak az alfa-részecskékből származó, tüdőben elnyelt dózist vesszük figyelembe, akkor a kisdózistartomány felső határának 2 WLM expozíció felel meg. Ugyanakkor ez a radonterhelés a hörgők sugárzásnak leginkább kitett $0,14 \text{ mm}^2$ -én 39,4 Gy lokális dózist eredményez, ha a mukociliáris tisztulást nem vesszük figyelembe [4].

Lakásokban 2 WLM expozíciót 500 Bq m^{-3} radonkoncentráció 1 év alatt eredményez, ha az egyensúlyi tényező 0,7, és az idő 40%-át töltjük otthonunkban. Mivel más a belélegzett részecskék méreteloszlása és a légzés módja lakásokban és bányákban, a dóziseloszlás kevésbé lesz egyenetlen [3], és így a lakásokban a fenti makroszkopikus terhelés csak 10,6 Gy lokális dózist eredményez a hörgők sugárzásnak leginkább kitett $0,14 \text{ mm}^2$ -én. A mukociliáris tisztulást itt sem vettük figyelembe.

Az előbbi számok jól mutatják, hogy a radonterhelés nagyon is gyakorlativá teszi a sugárterhelés térbeli eloszlásának problémakörét. Ha ehhez hozzávesszük, hogy a radont a dohányzás után a második legfontosabb tüdőrák okozó tényezőnek tekintjük, illetve hogy a radon hozzájárulása a természetes sugárterhelésből származó effektív dózishoz körülbelül 50% [1], akkor világosan látható, hogy a gyakorlati sugárvédelem számára is rendkívül fontos lehet, hogy a sugárterhelés térbeli eloszlása miként befolyásolja az egészségi hatást.

Konklúzió

Ha a közelítőleg 2 WLM-mel jellemzett radonterhelés tekinthető kisdóziskutatásnak, akkor megállapítható, hogy kis dózisok hatásainak megértéséhez olyan vizsgálatokra is szükség van, amelyekben a szövet kis részeit nagy dózissal sugarazzuk be, miközben a szövet egészének dózisa alacsony marad. A lokálisan nagy dózisok nagy valószínűséggel eredményeznek sejtpusztulást, maguk az elpusztult sejtek pedig nem növelik a rákkockázatot, ezért a sejtszintű kísérletektől nem várható, hogy segítenek megérteni, miként növeli a radon a rákkockázatot. Ehelyett olyan kísérletekre van szükség, ahol magasabb szerveződési szintet (szövetet, szervet) sugarazzunk be, és e magasabb szerveződési szint sugárválasztát határozzuk meg.

Bár a fenti vizsgálatokból a kis dózisok hatására vonatkozó általános következtetések nem várhatók, a radon jelentősége miatt ezek a kutatások a sugárvédelem számára legfontosabbak közé tartoznak. A szövet fókuszált besugárzása miatt olyan jelenségek léphetnek fel (mint például a hyperplasia kialakulása), amelyek nem jellemzőek egyenetlen térbeli eloszlású, kis dózisú besugárzásokra. Ez nem jelenti azt, hogy az

egyenetlen terhelések kockázata szükségképpen nagyobb lenne, mint az egyenletes terheléseké, de azt valószínűsíti, hogy a radon által kiváltott rákkelkezés mechanizmusainak megértéséhez a lokálisan nagy dózisos hatását is szükséges vizsgálni.

Irodalom

1. Fehér István, Deme Sándor: *Sugárvédelem*. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2010.

2. Madas B. G., Balásházy I.: Szerven belül egyenetlen dóziseloszlások és az LNT-modell. *Sugárvédelem* 6 (2013)7-14. http://www.sugarvedelem.hu/sugarvedelem/docs/V6i1/Madas_V6i1.pdf
3. Balásházy I.: *Aeroszolok légúti kiülepedésének és a kis dózisos biofizikai hatásainak vizsgálata*. Doktori értekezés (DSc), Magyar Tudományos Akadémia, Budapest (2010) http://real-d.mtak.hu/239/4/Balashazy_Imre_5_Mu.pdf
4. Madas B. G.: *Az ionizáló sugárzás biológiai hatásainak szövet-szintű modellezése*. Doktori értekezés (PhD), Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (2012) http://teo.elte.hu/minosites/ertekezes2012/madas_b_g.pdf

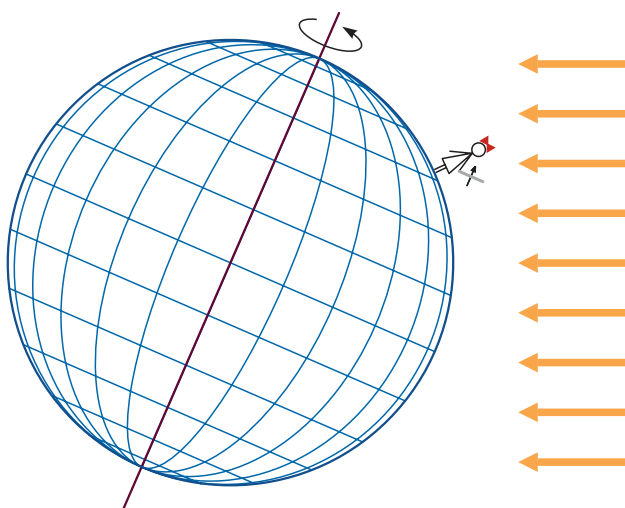
A FIZIKA TANÍTÁSA

KÉSZÍTSÜNK NAPÓRÁT CD-BŐL!

Bokor Nándor
BME, Fizikai Intézet

Az ekvatoriális napóra

A napóra legalább három és fél ezer éves múltra visszatekintő időmérő eszköz. Alapelve zseniálisan egyszerű. Központi csillagunk reggeltől estig folyamatosan változtatja helyét az égbolton (valójában a Föld forog a tengelye körül, de ezt nem kell tudni hozzá), és mivel ez a (látszólagos) mozgás megbízhatóan és kiszámíthatóan ismétlődik, időmérésre alkalmas. Az évezredek során megalkotott napórák sokfélesége, szépsége a mai szemlélőt is lenyűgözi. Túlnyomó többségük fény-árnyék jelenségen alapul: egy bot, az úgynevezett gnómon árnyékot vet egy megfelelően kalibrált skálára, és az árnyékot „óramutatóként” használva a skáláról leolvashatjuk az aktuális időt. Az épített környezet geometriai sajátosságaira gondolva érthető, hogy kertekben, parkokban általában vízszintes számlapú, míg paloták, templomok falára szerelve többnyire függőleges számlapú (sokszor művészi kivitelezésű) elrendezéssel találkozhatunk. Pedig a legegyszerűbb elvű, legkönnyebben érthető geometriát az *ekvatoriális* elrendezés adja: ilyenkor a napóra beskálázott számlapját nem vízszintesen és nem is függőlegesen, hanem az Egyenlítő síkjával párhuzamosan orientáljuk. (Az ekvatoriális napórák számlapja az egyenlítőnél függőleges, a sarkokon vízszintes, Budapesten pedig $90^\circ - 47,5^\circ = 42,5^\circ$ -os



1. ábra. Az ekvatoriális napóra az északi féltekén, nyáron.

szöget zár be a vízszintessel.) Az 1. ábra egy ekvatoriális napórát mutat az északi féltekén, nyári használat közben.

Az ábrán szürke vonal jelzi a megfigyelő kezében tartott napóra kalibrált számlapját, amely párhuzamos az Egyenlítő síkjával. A számlap közepébe merőlegesen szúrt gnómon (az ábrán kis fekete egyenes nyíl) párhuzamos a Föld forgástengelyével, tehát a Sarkcsillag felé mutat. Az ábrán látható, hogy a gnómon felülről vet árnyékot a számlapra, tehát az időt a számlapra felülről ránézve lehet leolvasni. Mivel a Föld óránként 15° -os szöveget fordul el a tengelye körül, a számlapra szabályosan, 15° -onként kell az óra-beosztásokat felrajzolni. (Megjegyzés: a helyzetet kicsit bonyolítja, hogy a Föld nem kör-, hanem ellipszispályán kering a Nap körül, ezért keringési sebessége nem állandó, illetve hogy forgástengelye nem merőleges a keringési síkra, hanem $23,5^\circ$ -os szöveget zár be a merőlegessel. Ezek hatásáról később lesz szó.)



Bokor Nándor egyetemi docens a BME-n szerzett villamosmérnök diplomát 1993-ban, majd ugyanott fizikából PhD fokozatot 1999-ben. Munkájában – az optika számos területén végzett kutatásai mellett – legszívesebben a fizika, azon belül kiemelten a relativitáselmélet oktatásának pedagógiai kérdéseivel foglalkozik. Ez utóbbi témában számos publikációja jelent meg a *Fizikai Szemle*ben, valamint a *Physics Education* és a *European Journal of Physics* folyóiratokban.