

bármilyen kölcsönható Fermi-gázzal modellezhető rendszer esetében. Ez az első lépés volt a kvantumfluktuációk hatásának vizsgálatára a hideg sűrű anyag esetében, és az eredmények alapján a következő lépés a módszer alkalmazása lesz realiztikusabb modellekben.

#### Irodalom

1. Karsai Sz., Barnaföldi G. G., Forgácsné Dajka E., Pósfay P.: Neutroncsillagok – a világegyetem legnagyobb atommagjai. *Nukleon VIII* (2015) 185.
2. [http://astro.elte.hu/icsip/csill\\_elete/csillagok\\_elete/index.html](http://astro.elte.hu/icsip/csill_elete/csillagok_elete/index.html)  
<https://apatruno.wordpress.com/neutron-stars/>  
[http://www.lcsd.gov.hk/CE/Museum/Space/archive/EducationResource/Universe/framed\\_e/lecture/ch16/ch16.html](http://www.lcsd.gov.hk/CE/Museum/Space/archive/EducationResource/Universe/framed_e/lecture/ch16/ch16.html)
3. P. Pósfay, G. G. Barnaföldi, A. Jakovác: FRG Approach to Nuclear Matter at Extreme Conditions. *PoS EPS-HEP2015* (2015) 369.
4. G. G. Barnaföldi, A. Jakovác, P. Pósfay: Harmonic expansion of the effective potential in a functional renormalization group at finite chemical potential. *Phys. Rev. D* 95/2 (2017) 025004.
5. V. Graber, N. Andersson, M. Hogg: Neutron stars in the laboratory. *Int. J. of Modern Physics D* 26/8 (2017) 1730015.
6. S. Guillot, M. Servillat, N. A. Webb, R. E. Rutledge: Measurement of the Radius of Neutron Stars with High Signal-to-noise Quiescent Low-mass X-Ray Binaries in Globular Clusters. *The Astrophysical Journal*, 772/1 (2013) 7.
7. F. Özel, D. Psaltis, T. Guver, G. Baym, C. Heinke, S. Guillot: The Dense Matter Equation of State from Neutron Star Radius and Mass Measurements. *Astrophys. J.* 820/1 (2016) 28.
8. F. Özel, P. Freire: Masses, Radii, and Equation of State of Neutron Stars. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 54 (2016) 401–440.
9. P. B. Demorest, T. Pennucci, S. M. Ransom, M. S. E. Roberts, J. W. T. Hessels: A two-solar-mass neutron star measured using Shapiro delay. *Nature* 467 (28 October 2010) 1081–1083.
10. L. Rezzolla, K. Takami: Gravitational-wave signal from binary neutron stars: a systematic analysis of the spectral properties. *Phys. Rev. D* 93/12 (2016) 124051.
11. A. Hewish: *Pulsars. Ann. Rev. of Astron. and Astrophysics* 8 (1970) 265.
12. M. Prakash, J. R. Cooke, J. M. Lattimer: Quark-hadron phase transition in protoneutron stars. *Phys. Rev. D* 52 (1995) 661.
13. R. B. Wiringa, V. Fiks, A. Fabrocini: Equation of state for dense nucleon matter. *Phys. Rev. C* 38 (1988) 1010.
14. A. Akmal, V. R. Pandharipande: Equation of state of nucleon matter and neutron star structure. *Phys. Rev. C* 58 (1998) 1804.

# BALESETÁLLÓ ATOMERŐMŰVI FŰTŐELEMENK FEJLESZTÉSE

Hózer Zoltán

MTA EK Fűtőelem és Reaktoranyagok Laboratórium

A világon napjainkban működő több mint négyszáz atomerőmű többsége urán-dioxid-tablettákat tartalmazó, cirkóniumburkolattal ellátott fűtőelemekkel üzemel. Ez az üzemanyag nagyon jól használható az erőművek normál üzemelése során, amit több mint ezer reaktorév tapasztalata is bizonyít. Az urán-dioxid-üzemanyagban a besugárzás során végbemenő változások nem akadályozzák meg, hogy egészen magas kiégéseket lehessen elérni. A jó korrózióállósággal, mechanikai szilárdsággal és sugárállósággal rendelkező cirkóniumburkolattal pedig több évig lehet üzemelni úgy, hogy közben a fűtőelem ne veszítse el integritását, és utána a kiégett üzemanyag még a több évtizedes átmeneti tárolás és a végleges elhelyezés során fellépő terheléseket is képes legyen elviselni.

Üzemzavarok és balesetek során a felhevült fűtőelemekben számos kedvezőtlen folyamat léphet fel. A cirkóniumötvözet magas hőmérsékleten intenzív reakcióba lép a vízgőzzel. Az exoterm reakcióban hidro-

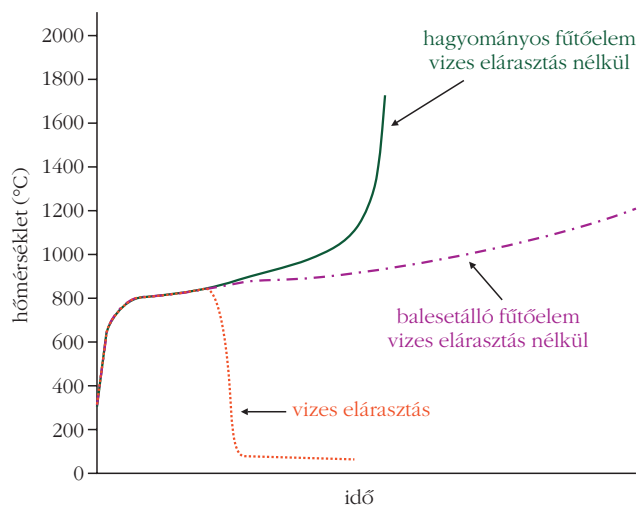
gén keletkezik, az oxidált fém pedig elridegedik és mechanikai terhelés hatására eltörhet. A szerény hővezető-képességgel rendelkező urán-dioxid középponti hőmérséklete normál üzemelés során is meghaladja az 1000 °C-ot, de baleseti körülmények között még ennél is magasabbra emelkedhet. Ha ez nem is éri el a baleset során az UO<sub>2</sub> olvadáspontját (2800 °C), a hőmérséklet növekedésével a hasadási termékek kikerülése a tablettából fokozódik, ami potenciálisan növeli a környezeti kibocsátást.

Az atomerőművek biztonsági rendszerei megakadályozzák azt, hogy tervezési üzemzavarok során a fűtőelemek épsége olyan mértékben sérüljön, aminek komoly környezeti hatása lenne. A kis valószínűségű, súlyos balesetek során bekövetkezhet a fűtőelemek jelentős mértékű sérülése és akár a zóna megolvadása is. Ekkor a környezeti kibocsátást az erőmű további védelmi gátjai (elsősorban a konténment) hivatott garantálni. A régebben tervezett atomerőművek egy részét nem látták el a súlyos balesetek kezeléséhez szükséges rendszerekkel, sajnos ezek közé tartoztak a fukusimai balesetben sérült blokkok is.

A 2011. évi balesetben a fukusimai reaktorok túléltek a földrengést és a cunamit. A dízelgenerátorok elvesztése és a külső áramforrás hiánya miatt azonban a vészhűtőrendszerek szivattyúi nem tudták biztosítani a maradványhő elvezetését. A burkolat forró felületén beindult a cirkónium vízgőzös oxidációja, és a kémiai reakcióban reaktoronként több száz kg hidrogén keletkezhetett. A néhány nappal később bekövetkezett hidrogénrobbanások három blokkon



Hózer Zoltán az MTA doktora, az MTA Energiatudományi Kutatóközpont Fűtőelem és Reaktoranyagok Laboratóriumának vezetője. Több mint két évtizede foglalkozik fűtőelemes kutatásokkal. Vezetésével több kísérleti programot hajtottak végre a paksi atomerőműben használatos cirkóniumburkolatok normál üzemi és üzemzavari viselkedésének jobb megismerésére.



1. ábra. Hagyományos és balesetálló fűtőelemek jellemző hőmérséklete baleseti folyamatok során vizes elárasztással és elárasztás nélkül.

az épületek sérüléséhez vezettek, és ez lehetővé tette, hogy nagy mennyiségű radioaktív izotóp jusson ki a környezetbe.

A baleset után szakértői fórumokon [1, 2] felmerült, hogy az atomerőművekben olyan fűtőelemekre lenne szükség, amelyek sokkal jobban elviselik a baleseti körülményeket, mint a cirkóniumburkolatos urándioxid-üzemanyag.

## Elvárások a balesetálló üzemanyaggal szemben

Amerikai szakemberek szerint a balesetálló üzemanyag – azon túl, hogy biztonságosan használható normál üzemelés során – az alábbi négy követelménynek kellene, hogy megfeleljen [3]:

a) El kell kerülni vagy minimálisra kell csökkenteni azokat a kémiai reakciókat, amelyek a zóna fokozott felmelegedéséhez vezethetnek. A burkolat-vízgőz reakció kevésbé intenzív és kevésbé exoterm legyen, mint a jelenlegi cirkóniumburkolat esetében. Így elkerülhető a gyors hőmérséklet-megszaladás a zónában és a hűtés nélkül maradt fűtőelemek felmelegedését csak a maradványhő befolyásolja (1. ábra).

b) A baleseti helyzetekben keletkező hidrogén mennyiségét minimalizálni kell a burkolat-vízgőz reakció intenzitásának csökkentésével és a keletkező hidrogén megkötésével, kémiai átalakításával.

c) A burkolat magas hőmérsékletű mechanikai tulajdonságait javítani kell a zóna hűthetőségének biztosítására és a hasadási termékek fűtőelemen belüli visszatartására. A burkolat felhasadása csak az eddigieknél magasabb feszültségeken történjen meg, legyen magasabb a burkolat olvadáspontja, jobban álljon ellen a hideg víz beáramlásakor fellépő termikus és mechanikai terhelésnek és hidrogén jelenlétében ne ridegedjen el.

d) Javítani kell az üzemanyag-tabletta hasadási termék-visszatartó képességét, csökkenteni kell a tablettá baleseti fragmentációját és szétszóródását. El kell

kerülni a burkolat belső felületének oxidációját. Az üzemanyag alacsonyabb hőmérsékletet érjen el normál üzemelés alatt és balesetek során nagyobb tartálékkal rendelkezzen az olvadáspontig.

2011-ben, nem sokkal a fukusimai baleset után az USA Energiaügyi Hivatala (*Department of Energy*) egy fejlesztési programot (*Enhanced Accident Tolerant Fuel Development Program*) indított el azzal a céllal, hogy húsz éven belül balesetálló üzemanyagra lehessen cserélni a mai atomerőművi fűtőelemeket. A program keretében 2022-ig el akarják készíteni az erőművi besugárzásra alkalmas első tesztkazettákat. Az amerikai kezdeményezéssel párhuzamosan több más országban is intenzív kutatási programok kezdődtek a balesetálló fűtőelemek kifejlesztésére [4–6].

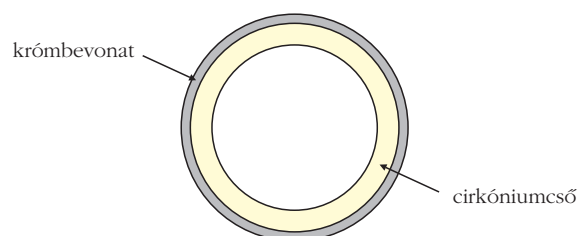
## Balesetálló burkolatok

A balesetálló fűtőelemek burkolatának kifejlesztésékor több szóba jöhető konstrukcióval is számolnak.

Az egyik lehetőség a cirkóniumburkolat bevonása olyan anyagokkal, amelyek megakadályozzák az intenzív cirkónium-vízgőz reakciót magas hőmérsékleteken. Így a burkolat sokkal kevésbé oxidálódik, kevesebb hidrogén fejlődik és a burkolat szerkezetében sem jönnek létre olyan anyagszerkezeti változások, amelyek az elridegedéshez vezetnek. Az egyik lehetőség a krómbevonat alkalmazása, amelyet jó korrózióállóság jellemez és a gyártástechnológia is viszonylag egyszerű (2. ábra). A balesetálló VVER fűtőelemek fejlesztéséhez cseh szakemberek 5–20  $\mu\text{m}$  vastag Cr és CrN bevonatokkal ellátott cirkóniumcsövek vizsgálatát kezdték meg [7]. A Zr-Al-C komponensekből álló bevonat neutronfizikai szempontból nagyon ígéretes, mivel mind a három elem kis neutronbefogási hatáskeresztmetszettel rendelkezik. A  $\text{ZrO}_2$  és  $\text{Al}_2\text{O}_3$  rétegek vízben és gőzben egyaránt védőréteget képeznek a felületen. Vizsgálják a háromkomponensű (úgynevezett MAX kerámiák), mint például a  $\text{Zr}_2\text{AlC}$  és  $\text{Zr}_3\text{AlC}_2$  alkalmazásának a lehetőségét is. Egy további ötlet oxidokkal (például  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) megerősített (*ODS – oxide dispersion strengthened*) cirkóniumréteg létrehozása a burkolaton, ami jelentősen növeli a burkolat szakítószilárdságát és csökkenti a magas hőmérsékletű képlékenységet.

Rozsdamentes acélok használatával már az első atomerőművek tervezésekor is számoltak és most, a balesetálló burkolatok fejlesztése során – mint lehetséges megoldás – újra felmerültek. Például a FeCrAl

2. ábra. Krómbevonatos cirkóniumburkolat.



ötvezetek rendkívül jó korrózióállósággal rendelkeznek vizes közegben és vízgőzben is nagyságrendekkel lassabban oxidálódnak, mint a cirkónium. Mechanikai tulajdonságaik is jobbak, mint a cirkóniumé. Olvadáspontjuk alacsonyabb, mint a cirkóniumé, de baleseti körülmények között megolvadásuk mégis később várható, mivel a csekély oxidációs hő miatt nem lép fel hőmérséklet-megszaladás. Ugyanakkor üzemeltetési szempontból kellemetlen, hogy a nagy neutronbefogási hatáskeresztmetszet miatt az acélburkolatos fűtőelemnek több hasadóanyagot kell tartalmaznia.

A fémburkolatok helyett elképzelhető kerámiából készült burkolatok használata is. Legperspektivikusabb anyagnak a nagy keménységű, jó hővezetéssel rendelkező SiC tűnik. Baleseti körülmények között 1700 °C hőmérsékletig csak egészen kis mértékben oxidálódik, és épségét akár 2500 °C-ig képes megtartani. A kerámiaacso azonban nagyon rideg, ezért az erőművi alkalmazásokhoz monolit csövek helyett inkább többrétegű, szálmegerősítésű szerkezeteket fejlesztenek. A SiC burkolattal kapcsolatban számos gyártástechnológiai kérdés is felmerül, például a burkolatcsövek lezárásához szükséges speciális hegesztési eljárás kidolgozása és a hermetikusan záró rétegek létrehozása a többrétegű szerkezetben. A SiC burkolattal – annak előnyös tulajdonságai miatt – a gázhűtésű reaktorok újabb generációjának terveiben és számolnak. A vízű reaktorokban egyelőre vizsgálatok tárgyát képezi, hogy milyen vízkémiai körülményeket kell ahhoz kialakítani, hogy a SiC vizes korróziója minél kisebb mértékű legyen. A korróziós folyamat eredményeként ugyanis a burkolat felületén nem képződik oxidréteg, hanem a korróziós termékek oldódnak a vízben, és így a burkolat vastagsága időben csökken.

## Üzemanyag-tabletták a balesetálló fűtőelemekhez

Az urán-dioxidot és a plutóniumot is tartalmazó, de ugyancsak oxidalapú MOX tabletták mellett az atomreaktorokban már korábban is teszteltek nitrid és karbid tablettákat is. Ezek az anyagok sokkal jobb hővezető-képességgel rendelkeznek, mint az oxidok – így hőmérsékletük sokkal alacsonyabb mind normál üzemi, mind baleseti körülmények között. Magas olvadáspontjuk (2480 °C a karbid és 2780 °C a nitrid) következtében baleseti helyzetekben komoly tartalékkal rendelkeznek. Gyártásuk azonban nem egyszerű: mindkét anyag gyúlékony, ezért a tabletták előállításához olyan gépsorok szükségesek, amelyek inert atmoszférában üzemelnek. Az utóbbi években az  $U_3Si_2$  tabletták vizsgálata is megkezdődött a balesetálló üzemanyagok fejlesztéséhez. A szilicid is jó hővezető, nem gyúlékony, viszont olvadáspontja (1665 °C) sokkal alacsonyabb, ezért egy baleset során gyorsabban bekövetkezhet a zónaolvadás. A Westinghouse fűtőelemgyártó balesetálló fűtőelemes terveiben is

$U_3Si_2$  tabletták jelennek meg. A karbid, nitrid és szilicid tabletták további előnye, hogy fajlagos hasadóanyag-tartalmuk magasabb, mint az oxid üzemanyagé. Ezért a fűtőelemgyárakban általános 5%-os  $^{235}U$  dúsítási limit alatt lehet maradni úgy, hogy közben növelik a hasadóanyag-tartalmat, amit például a cirkóniumnál több neutron elnyelő, új burkolatok tehetnek szükségessé.

A mikrokapszulás üzemanyagban a körülbelül 100-500  $\mu m$  nagyságú üzemanyagdarabokat önálló bevonattal látják el. A bevonat megakadályozza, hogy a szemcsékből radioaktív hasadási termékek kerüljenek ki. Ilyen üzemanyagot korábban sikeresen alkalmaztak több gázhűtésű reaktorban is, ahol az  $UO_2$  szemcséken a bevonatot grafit és SiC rétegek alkották. Hasonló megoldást jelent a fém- vagy kerámiamátrixban diszpergált üzemanyag is. A mátrix egyrészt jó hővezetést biztosít, és ezzel csökkenti az üzemanyag hőmérsékletét, másrészt akadályozza a hasadási termékek kijutását. Ezekben az üzemanyagokban a fajlagos hasadóanyag-tartalom kisebb, mint a szokásos tablettákban, így a megfelelő hasadóanyag-mennyiség biztosításához magasabb dúsításra lehet szükség. Súlyos balesetek során ezek a heterogén szerkezetű tabletták csökkentik a hasadási termékek kikerülését és késleltetik a zóna megolvadását.

## A balesetálló üzemanyag bevezetése

A balesetálló fűtőelemek fejlesztésének fő kérdése jelenleg az, hogy miként viselik el az új fűtőelemek a balesetek során várható körülményeket. Ha sikerül belátni, hogy a tervezett anyagokkal az atomreaktor súlyos baleseteinek sokkal szerényebb következményei lehetnek, mint a jelenlegi üzemanyaggal, akkor az nagyon komoly eredmény lesz, de ez csak az első lépést jelenti a balesetálló erőművi üzemanyag bevezetéséhez. Az alkalmasnak bizonyult anyagokkal számos előzetes mérést kell végezni, majd besugárzásukat kutatóreaktorokban kell megkezdni. El kell készíteni – a megfelelő gyártástechnológiák kifejlesztésével párhuzamosan – a fűtőelemek prototípusait, amelyeket a besugárzások után alapos vizsgálatnak kell alávetni. Ezek után kerülhet sor a tesztkazetták gyártására és erőművi besugárzására.

A biztonsági elemzésekhez használt számítógépes programok modelljeiben – várhatóan – számos továbbfejlesztésre lesz szükség. Az újabb anyagok jellemző paramétereinek megadásához további méréseket kell majd végezni, és a modellek validálásához is kísérleti programok kellene.

Komoly kihívást jelent majd a balesetálló üzemanyag hatósági engedélyezése is. Az új fűtőelemekre a jelenleg érvényes előírások közül az általános – például kritikusságra, hűhetőségre vonatkozó – követelményeket alkalmazni lehet, de a cirkónium- és urán-dioxid-specifikus kritériumokat (például a burkolat megengedhető maximális hőmérséklete, vagy az üzemanyag entalpiája) újabb limitekkel kell kiváltani.

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 – amellet, 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-EFPK-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.