

# A STABILITÁSI SÁVTÓL TÁVOL ESŐ ATOMMAGOK

## – 2. rész

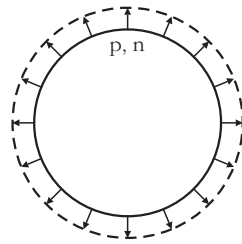
Fényes Tibor  
MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen

A stabilitási sávtól távolodva az atommagokban számos változás tapasztalható. A *Fizikai Szemle* előző számában a következők kerültek tárgyalásra:

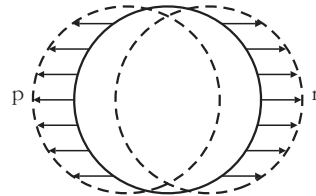
- A héjszerkezet változásai
- Neutronglóriás atommagok, neutronbőr

Jelen munka a következő változásokkal foglalkozik:

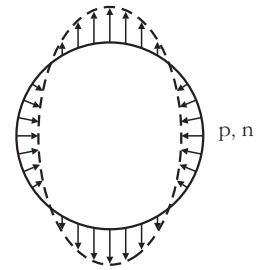
- Óriásrezonanciák
- $Z = N$  magok
- Atomagtömeg-változások
- Hiperdeformált magok
- Túl a nukleonleszakadási határon
- Elméleti eredmények



$$\begin{aligned} \Delta L &= 0, \text{ monopól} \\ \Delta T &= 0, \text{ izoskalár} \\ \Delta S &= 0 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \Delta L &= 1, \text{ dipól} \\ \Delta T &= 1, \text{ izovektor} \\ \Delta S &= 0 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \Delta L &= 2, \text{ kvadrupól} \\ \Delta T &= 0, \text{ izoskalár} \\ \Delta S &= 0 \end{aligned}$$

6. ábra. Néhány óriásrezonancia-típus.  $\Delta L$  a maggerjesztésnél átadott keringési impulzusnyomatékot,  $\Delta T$  és  $\Delta S$  az izospin-, illetve spinváltozást jelöli alapállapotból történő gerjesztésnél.

Az óriásrezonanciák vizsgálata hasznos információt szolgáltat az atommagok kompresszibilitására is. Az egzotikus magoknál különösen kívánatos az óriásrezonanciák vizsgálata, mivel eddig csak nagyon kevés ilyen mérés történt.

Óriásrezonancia-vizsgálatokat például a következő laboratóriumokban végeztek.

- KVI Groningen (Hollandia),  $\alpha$ -szórás,
- GANIL Caen (Franciaország), MAYA aktív céltárgy,
- GSI Darmstadt (Németország) R<sup>3</sup>B-LAND program,  $(\gamma, \gamma)$  szórás,
- LNL Legnaro (Olaszország), AGATA program, nehézion reakciók 20 MeV/nukleon energiánál.

Az óriásrezonancia egyszerre lehet például izoskalár és izovektor is, azaz hibrid állapot.

Az ELI-NP (*Extreme Light Infrastructure, Nuclear Physics*, Măgurele, Bukarest mellett) nagy fényességű  $\gamma$ -nyalábrendszere lehetőséget adhat stabil rendszerek óriásrezonancia-finomszerkezetének vizsgálatára.

A jövőben az óriásrezonancia jelenségét intenzívebb radioaktív nyalábokkal szisztematikusan is lehet majd vizsgálni. Például azt, hogy a belső gerjesztési energia függvényében milyen változások lépnek fel a rendszerben. (Részletesebben lásd az írás végén, az *Összegzés, kitekintés* részben.)

Izoskalár óriásrezonanciák észlelésére Zamora munkatársaival új technikát fejlesztett ki. A GSI kísérleti nehézion-tárológyűrűjében (ESR)  $^{58}_{28}\text{Ni}_{30}$ -t tároltak 100 MeV/nukleon energián, amivel belső héliumgázcéltárgyat bombáztak, és a rugalmatlanul szórt  $\alpha$ -részecskéket detektálták. A módszer lehetőséget ad arra, hogy az óriásrezonanciát széles atommagtartományokban, instabil, egzotikus magoknál is vizsgálják.

## $Z = N$ atommagok

A kétrészecske-korrelációk fontos szerepet játszanak a magszerkezet kialakulásában. Ez a magtömegekben, kötési energiákban, a páros-páros atommagok  $0^+$

## Óriásrezonanciák

Régóta ismeretes, hogy  $(\alpha, \alpha')$ ,  $(^{17}\text{O}, ^{17}\text{O}'\gamma)$ ,  $(\gamma, \gamma')$  stb. reakciókkal az atommagok óriásrezonanciára gerjeszthetők. A jelenség könnyű és nehéz, gömbszerű és deformált, gyakorlatilag minden atommagban fellelhető. A jó hozammal való gerjesztéshez nagy bombázó energiákra van szükség. A rezonanciacsúcs szélessége általában 3–6 MeV. Az óriásrezonancia legerjesztődése történhet  $\gamma$ -emisszióval, de nagyobb energiáknál részecskekibocsátás is lehetséges.

Az óriásrezonancia a résztvevő nukleonok kollektív gerjesztődésének megnyilvánulása. Néhány óriásrezonancia-típus a 6. ábrán látható.

A történetileg először észlelt  $\Delta L = 1$ ,  $\Delta T = 1$ ,  $\Delta S = 0$  elektromosdipól-óriásrezonanciát Goldhaber és Teller úgy értelmezte, hogy az atommag protonjai és neutronjai dipóloszcillációt végeznek ellenkező fázisban. A hidrodinamikai modell közelítőleg helyesen reprodukálta az óriásdipól-rezonancia  $E_{gerj}$  gerjesztési energiájának tömegszámfüggését, nevezetesen, hogy  $E_{gerj} \approx \text{konst.} \cdot A^{-1/6}$  MeV. A jelenség részletes leírása például Harakech, Van der Woude [9] munkájában található.



Fényes Tibor az MTA Eötvös-koszorús doktora, az ATOMKI professor emeritusa. Hat évig dolgozott Dubnában az Egyesített Atommagkutató Intézetben és közel fél évig a Kentucky Egyetem tandemgyorsító laboratóriumában. Fő kutatási területei az atommag- és részecskefizika. Több mint 130 tudományos publikáció és 10 könyv szerzője, illetve társszerzője.

állapota feletti energiérés kialakulásában és sok más sajátságban jelentkeznek. A  $Z = N$  és szomszédos atommagok vizsgálata  $A = 100$ -ig információt adhat az izospin szerepéről, tükrömagokról, a szupermegengedett  $\beta$ -bomlásról, pn-párkorrelációkról, egzotikus magalakokról. Tanulmányozható, hogy az izoskálár ( $T = 0$ ) párkölcsönhatás miként járul a kollektív állapotok kialakulásához.

A  $Z = N$  esetében a proton- és neutronpályák átfedése miatt könnyen alakulhat ki pn-párkölcsönhatás. E téren a Jefferson-laboratórium (Virginia, USA) kísérlete különösen érdekes eredményeket szolgáltatott. Folytonos elektronnyaláb-gyorsítójukon 4,6 GeV-es elektronokkal  $^{12}\text{C}_6$  céltárgyat bombáztak, és a rugalmatlanul szórt elektronokat a kirepülő nukleonokkal koincidenzában mérték.

Az esetek 80%-ában egyes nukleonok, 18%-ában pn-párok, 1-1%-ában nn-, illetve pp-párok lépnek ki a  $^{12}\text{C}$  atommagból. Az elméleti számítások arra utalnak, hogy a pn-párok más nukleonpárokhoz képesti túlsúlya a nukleon-nukleon tenzorerő következménye.

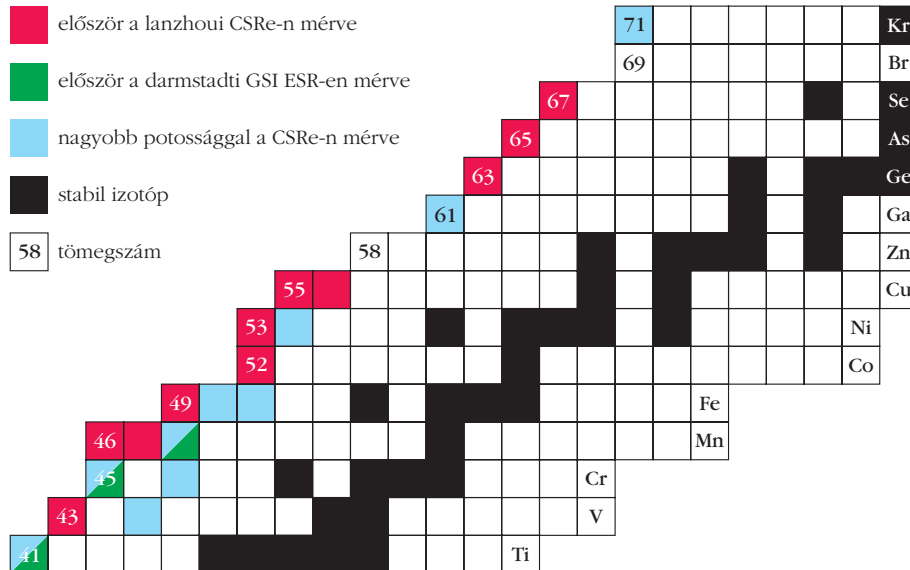
A témakör részletesebb ismertetését lásd például Fényes és munkatársai *Atommagfizika* [5] könyvében (II.3., III.3., X.2.2. alfejezetek).

A  $Z = N$  magok vizsgálata továbbra is perspektivikus. Például:

- A deuterontranszfer-reakciókból új információ nyerhető a nukleonpárokra.
- Ígéretes a felcsípési és lefosztási reakciók vizsgálata nagyon rövid felezési idejű ( $T_{1/2} = 10^{-6} - 10^{-9}\text{s}$ ) izotópoknál.
- Fejlett  $\gamma$ -spektroszkópiai berendezésekkel perspektivikus a  $^{80}\text{Zr}_{40}$  és  $^{100}\text{Sn}_{50}$  körüli magok tanulmányozása.
- A GANIL SPIRAL2 (Caen, Franciaország) program várhatóan sokat adhat a  $Z = N$  magok alap- és gerjesztett állapotainak vizsgálatához.

## Atommagtömeg-változások

Shottky- vagy izokrón tömegspektrometriai módszerekkel precíziósan lehet meghatározni a stabilitási sávtól távol eső atommagok tömegét. A vizsgált izotópot tárológyűrűbe vezetik, majd az ion tömegére az ott keringő ionok frekvenciájának ismeretében vonnak le következtetést. Így például a Lanzhou HIRFL (Heavy Ion Research Facility, Lanzhou) laboratóriumában számos rövid felezési idejű atommag tömegét sikerült meghatározni. Az izokrón tömegspektrometria gyors és hatékony módszernek bizo-



7. ábra. Tömegmérések a Lanzhou CSRE tárológyűrűjén Litvinov és Xu [10] alapján.

nyult, a tömegmeghatározás elért relatív pontossága néhány százszor  $10^{-6}$ . Az eredményekről áttekintés található a 7. ábrán.

A GSI és GSI FAIR programokban is vannak/lesznek precíziós tömegmérési eredmények. Például Penning-csapdás mérésekkel  $6 \cdot 10^{-8}$  tömegmérési pontosságot értek el. A CERN-i ISOTRAP berendezésben több száz nagypontosságú tömegmeghatározást végeztek  $T_{1/2} \geq 60$  ms-os izotópokra.

## Hiperdeformált atommagok

Egyes atommagoknál hiperdeformált állapotok – ahol a tengelyarányok akár 3:1 értéket elérhetnek – is felépíthetnek.

A 8. ábrán látható, hogy a  $^{232}\text{U}$  és  $^{238}\text{U}$  esetében hogyan függ az atommag  $E$  potenciális energiája a  $\beta_2$  kvadrupól-deformációs paramétertől.

A  $^{232}\text{U}$  hasadását a  $^{231}\text{Pa}(\alpha, \text{He}, \text{df})^{232}\text{U}$  ( $f = \text{fission}$ , hasadás) reakcióban mérték a 4,0–6,4 MeV gerjesztésienergia-tartományban. Látható, hogy 4,0, 4,91 és 6,02 MeV potenciális energiáknál három csúcspont jelentkezik, amelyekre rotációs sávok épülnek.

A méréseket a Maier–Leibnitz Laboratóriumában (München, Garching) végezték az ottani tandemgyorsítónál. A  $^{232}\text{U}$  gerjesztési energiáját a kilépő deuteronok – mágneses spektrométerrel megmért – energiájából határozták meg.

A 8. ábrán alul a  $^{238}\text{U}$  – fotohasadási mérések alapján meghatározott –  $E(\beta_2)$  függvénye látható. A vizsgálatokat monokromatikus, nagy fényességű, relativisztikus elektronnyalábról Compton-visszaszórt  $\gamma$ -sugarakkal végezték (Triangle University, Nuclear Laboratory, Durham, North Carolina). A  $\gamma$ -sugarak energiáját 4,7 és 6,0 MeV között változtatták, az energiafeloldás  $\sim 3\%$  volt. A  $^{238}\text{U}$ -nál is három csúcspont észleltek a  $\beta_2$  függvényében, amelyekre  $0^-, 0^-, 1^-, 2^+$  sávok épültek.

Az ELI-NP (Bukarest) nagy fényességű, kvázi-monokromatikus  $\gamma$ -sugárzásai várhatóan új lehetőségeket teremtenek a hiperdeformált magállapotok szelektív vizsgálatára. A harmadik hiperdeformált minimum problematikája (ahol a tengelyarány  $\sim 3:1$ ) még megnyugtatóan nem megoldott. A nagy intenzitású, kvázi-monokromatikus  $\gamma$ -sugarakkal ritka hasadási módokat is lehet vizsgálni, például hármass hasadást. Az igen nagy teljesítményű lézerrendszer  $10^{15}$  V/m elektromos teret is tud biztosítani.

## Atommagok túl a leszakadási határon

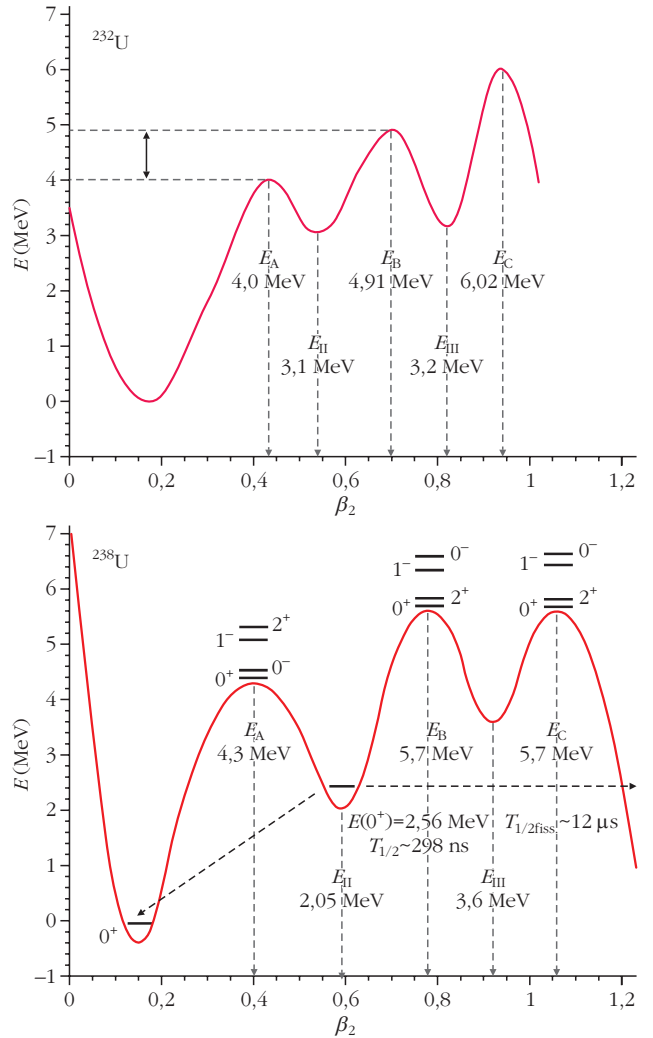
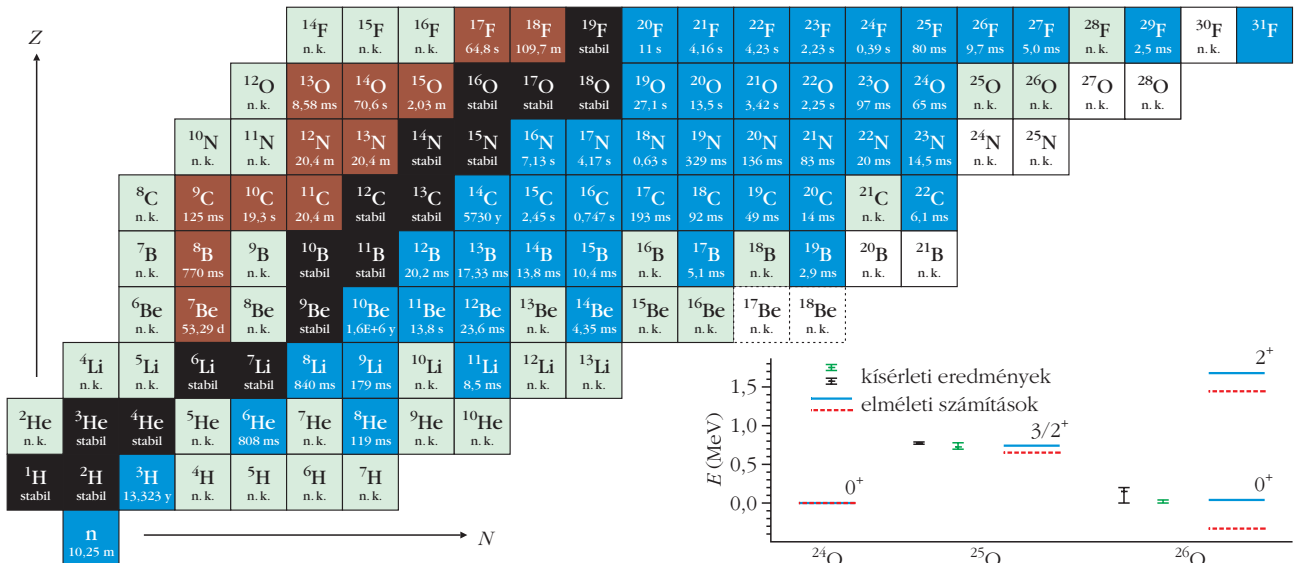
A 9. ábrán felül a legkönnyebb elemek izotóptáblázata látható. Nagy energiájú kiütési reakciókkal nem kötött állapotok – túl a neutronleszakadási határon – is előállíthatók. Ezek bomlásának kinematikailag teljes vizsgálatára (szög-, energia- és impulzuskorrelációk) lehetővé tette nem kötött állapotok azonosítását és kvantumszámok meghatározását.

A 9. ábrán alul a  $^{24,25,26}\text{O}$  első energiánívói vannak feltüntetve: kísérleti adatok és elméleti értelmezésük különböző modellekkel. A  $^{26}\text{O}$  nagyon alacsonyan fekvő alapállapotát magasabb közelítésben sikerült értelmezni.

## Elméleti eredmények

Az elmúlt évtizedben az *ab-initio* magfizikai számítások hatalmas fejlődésen mentek át. Új eredmények születtek nem csak a könnyű, de a nehéz atommagoknál is. Ezek a magkölsönhatások értékes próbái, és elősegítik az optimális bemenő paraméterek megtalálását is. Rács-QCD-számítások a rendszer kötött állapotait elsődleges elvekből (a QCD Lagrange-ener-

9. ábra. Felül: a nuklidtáblázat részlete a legkönnyebb magoktól a fluorig. A neutronleszakadási határ az oxigénig jól meghatározott, míg a fluornál a legnehezebb kötött állapot a  $^{31}\text{F}$ . A nem kötött (n. k.) izotópok közül a fehéreket még nem azonosították. Jobbra lent: a  $^{24,25,26}\text{O}$  energiánívói, ahol a kísérleti értékeket és a különböző kölcsönhatásokat figyelembe vevő elméleti számítások eredményeit is jelöltük. Aumann, Simon [12] (Darmstadt) alapján.



8. ábra. Felül: a  $^{232}\text{U}$   $E$  potenciális energiája  $\beta_2$  kvadrupól-deformációs paraméter függvényében. Alul: hasonló  $E(\beta_2)$  összefüggés, mint felül, de  $^{238}\text{U}$ -ra. Csige és munkatársai [11] alapján.

giasűrűségéből vagy annak különböző közelítéseiből) kiindulva írják le. A módszerről korszerű összefoglalót közöltek Hashimoto és munkatársai [13].

Az atommagok szerkezetének megértéséhez az effektív térelméletek, például a királis perturbációs elmélet nagyon sikeres közelítést jelentenek (Weinberg [14]). E közelítésben a Lagrange-energiasűrűség a következő általános alakba írható:

$$L_{QCD} \rightarrow L_{eff} = L_{\pi} + L_{\pi N} + L_{NN} + \dots,$$

ahol  $L_{\pi}$  a Goldstone-bozon,  $L_{\pi N}$  a pion-nukleon,  $L_{NN}$  a nukleon-nukleon kölcsönhatást tartalmazza. Az expliciten ki nem írt tagok a nukleáris többtesterők hozzájárulását veszik figyelembe, például a (2 nukleon + pion) és (3 vagy több nukleon pionokkal vagy nélkülük).

A királis perturbációs térelmélet részletesebb kifejtését lásd például Fényes [15] (VII.4.2. pont) könyvében és Machleidt, Entem [16] összefoglalójában.

## Összegzés, kitekintés

Mint az előbbi néhány példa mutatja, a stabilitási sávól távol eső atommagok vizsgálatában sok értékes eredmény született.

A  $\beta$ - és p-bomlás vizsgálatához néhányszor 10 részecske/s radioaktívnyaláb-intenzitás is elég lehet. Az

első gerjesztési nívók Coulomb-gerjesztéssel, részecsketranszfer-reakciókkal való vizsgálatához azonban már legalább néhányszor 100 részecske/s intenzitás szükséges. A nívósémák, rezonanciák részleteinek felderítéséhez pedig további 2-3 nagyságrenddel nagyobb nyalábintenzitások kellenek.

A nagy európai, amerikai és ázsiai kutatóintézetekben – egyre javított feltételek mellett – hatalmas erőfeszítéseket tesznek a kutatások folytatására. Különösen perspektivikusak a GSI (Darmstadt), GANIL (Caen), CERN ISOLDE, ACCULINNA (Dubna), JYFL (Finnország), NSCL FRIB (Michigan), Texas Ciklotron Intézet, TRIUMF SLAC (Vancouver), RIKEN RIBF (Japán), HIRFL (Lanzhou, Kína) programok, sok más kisebb intézet programjai mellett.

## Irodalom

9. M. N. Harakech, A. Van der Woude: *Giant resonances: fundamental high frequency modes of nuclear excitation*. Oxford University Press (2001)
10. Y. A. Litvinov, H. Xu, *Nucl. Phys. News* 21 (2011) 13.
11. L. Csige et al., *Phys. Rev. C* 80 (2009) 011301 (R) és *Phys. Rev. C* 87 (2013) 044321.
12. T. Aumann, H. Simon, *Nucl. Phys. News* 24 (2014) 5.
13. S. Hashimoto et al., *Rev. Part. Phys. Particle Data Group* 2016, 310.
14. S. Weinberg, *Physica* 96 A (1979) 327.
15. Fényes T.: *Részecskék és kölcsönhatásaik*. 3. korszerűsített kiadás, Debreceni Egyetemi Kiadó (2013)
16. R. Machleidt, D. R. Entem, *Phys. Rep.* 503 (2011) 1. Ulf-G. Meisner, *Nucl. Phys. News* 24 (2014) 11. R. Wada et al., *Nucl. Phys. News* 24 (2014) 28.

# CIRKÓNium MINT AZ ATOMERŐMŰVEK SZERKEZETI ANYAGA

Griger Ágnes  
AEMI Atomenergia Mérnökiroda

A nukleáris reaktorokhoz kapcsolódó különböző technikai és gazdaságosságra irányuló fejlesztések egyik folyamatosan szem előtt tartott célja – a meglévő reaktorok élettartamának növelése mellett – azok fenntartható és egyre biztonságosabb működtetése. Ennek megfelelően a biztonsággal szembeni követel-

mények egyre növekednek, ami folytonos kihívást jelent a reaktoranyagok tulajdonságainak optimalizálásában.

A könnyű- és nehézvízes reaktorok működéséhez szükséges fűtőelemek kiégetése során aktinidaelemek izotópjai és hasadási termékek keletkeznek, amelyek bomlása az élő szervezetekre veszélyes radioaktív sugárzást okoz. Ezen radioaktív anyagok környezettől való elzárása mindig is hangsúlyos cél volt. Bár a fűtőelemmátrix (urán-dioxid) alapvetően visszatartja a keletkező anyagokat, nagyon lényeges a fűtőelem burkolatának izoláló hatása. A fűtőelemek burkolatának legfontosabb feladata az, hogy a fűtőelemmátrixból kilépő radioaktív anyagok környezetbe való kijutása szempontjából *elsődleges gátként* működjön. Ehhez – még szélsőséges működési körülmények között is – a burkolat integritásának megőrzésére, a *hermetikus megőrzésére* van szükség.

Az üzemeltetési körülmények jelentős gazdasági haszonnal járó kiterjesztésével és a villamosáram-termelés

A munkát a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal az NVKP\_16-1-2016-0014 számú projekt keretében támogatta.



Griger Ágnes, a fizikai tudomány kandidátusa az AEMI Atomenergia Mérnökiroda tudományos főmunkatársa. Kutatási területe az atomreaktorok-fűtőelemek besugárzás alatti viselkedésének vizsgálata, különös tekintettel a reaktorbiztonsági kérdésekre, például a továbbfejlesztett fűtőelemek bevezetését megalapozó elemzések végzése. Vezetésével nemzetközi együttműködésben kiégetett VVER fűtőelemek széleskörű anyagtudományi vizsgálatát végezték. A FURUM stationer fűtőelem-viselkedési kód egyike szerzője.