5. Molnár Gábor: Elemanalitika hideg neutronokkal, *Fizikai Szemle 50/11* (2000) 382.
6. Mezei Ferenc: Novel polarized neutron devices: Supermirror and spin component amplifier. *Communications on Physics 1* (1976) 81.
7. Mezei Ferenc: The Concept of Long Pulse Neutron Sources. *Acta Physica Hungarica, Heavy Ion Physics* (1995) 209–226.
8. Sánta Zsombor: Nagyfelbontású repülési idő diffraktométer a Budapesti Neutron Kutatóközpontban. *Archeometriai Műhely 2* (2006) 22–26.
9. Russina M., Káli György, Sánta Zsombor, Mezei Ferenc: First experimental implementation of pulse shaping for neutron diffraction on pulsed sources. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Sect. A, 654* (2011) 383–389.
10. Mezei Ferenc, et al.: Low dimensional neutron moderators for enhanced source brightness. *Journal of Neutron Research 17* (2014) 101–105.

Honlapok:
URL1: Budapest Neutron Centre – www.bnc.hu
URL2: Heinz Maier-Leibnitz (FRM II) – www.frm2.tum.de

# AMORF ANYAGOK ÖSSZETÉTELÉNEK OPTIMALIZÁLÁSA RADIOAKTÍV HULLADÉKOK KONDICIONÁLÁSÁRA

Fábián Margit
MTA Energiatudományi Kutatóközpont

A radioaktív hulladékok végső elhelyezése a jelen és jövő egyre sürgetőbb környezeti problémája. Nem képzelhető el az atomenergia, a nukleáris medicina és a nukleáris ipar más ágazatai által nyújtott előnyök igénybevétele anélkül, hogy ne tudnánk választ adni a hulladék végleges elhelyezésének kérdésére.

Napjainkban általánosan elfogadott műszaki megoldás, hogy a nagy aktivitású radioaktív hulladékot mélyen fekvő geológiai tárolókban elhelyezve szigetelik el a bioszférától. A zárt és nyílt üzemanyagciklus esetén is ez a műszaki megoldás tűnik elfogadhatónak és biztonságosnak. A mélygeológiai tároló kialakítása többszörös védelmi rendszer megépítésével valósul meg. Az itt bemutatott munka a hulladékok kondicionálásával foglalkozik, amely „mérnöki gátnak" tekinthető. A kondicionálás célja a hulladék szilárdítása, valamint a hulladékban található szennyezők immobilizálása. A folyamat során a hulladékot különféle kötőanyagokba ágyazzák, stabil hulladékmátrixot képezve. A nagy aktivitású hulladékok elhelyezésére az amorf rendszerek a legalkalmasabbak [1].

A kondicionálási eljárások során figyelembe kell venni a gazdaságos előállítás szempontjait, továbbá követelmény a hulladék stabil, biztonságos tárolása és a tárolásra való előkészítése is. A kondicionáló anyag (melyet mátrixanyagnak hívunk) aránya minél kisebb legyen a végleges hulladékban, az előállítás ipari méretben gazdaságos legyen, miközben stabil beépülés valósuljon meg. Javítani kell tehát a hulladék/mátrix arányt, a mátrixösszetétel a legkülönbözőbb típusú hulladék befogadására legyen alkalmas, jó kémiai ellenállóképességgel rendelkezzen (azaz stabilitását őrizze meg a hulladék jelenlétében is).

Az eddig ismert amorf összetételek nem tartalmazzák az összes adatot (több esetben iparjogvédelmi előírás miatt), amely segítségével kondicionálni lehet a hulladékot.

Legfőbb célom a különböző összetételű radioaktív hulladékok végleges tárolásához megtalálni a megfelelő mátrixüveget. Továbbá fontos feladat meghatározni a maximálisan adalékolható hulladék mennyiségét, vizsgálni a radionuklidok beépülését és hatásukat az üveg stabilitására, higroszkópos tulajdonságaira.

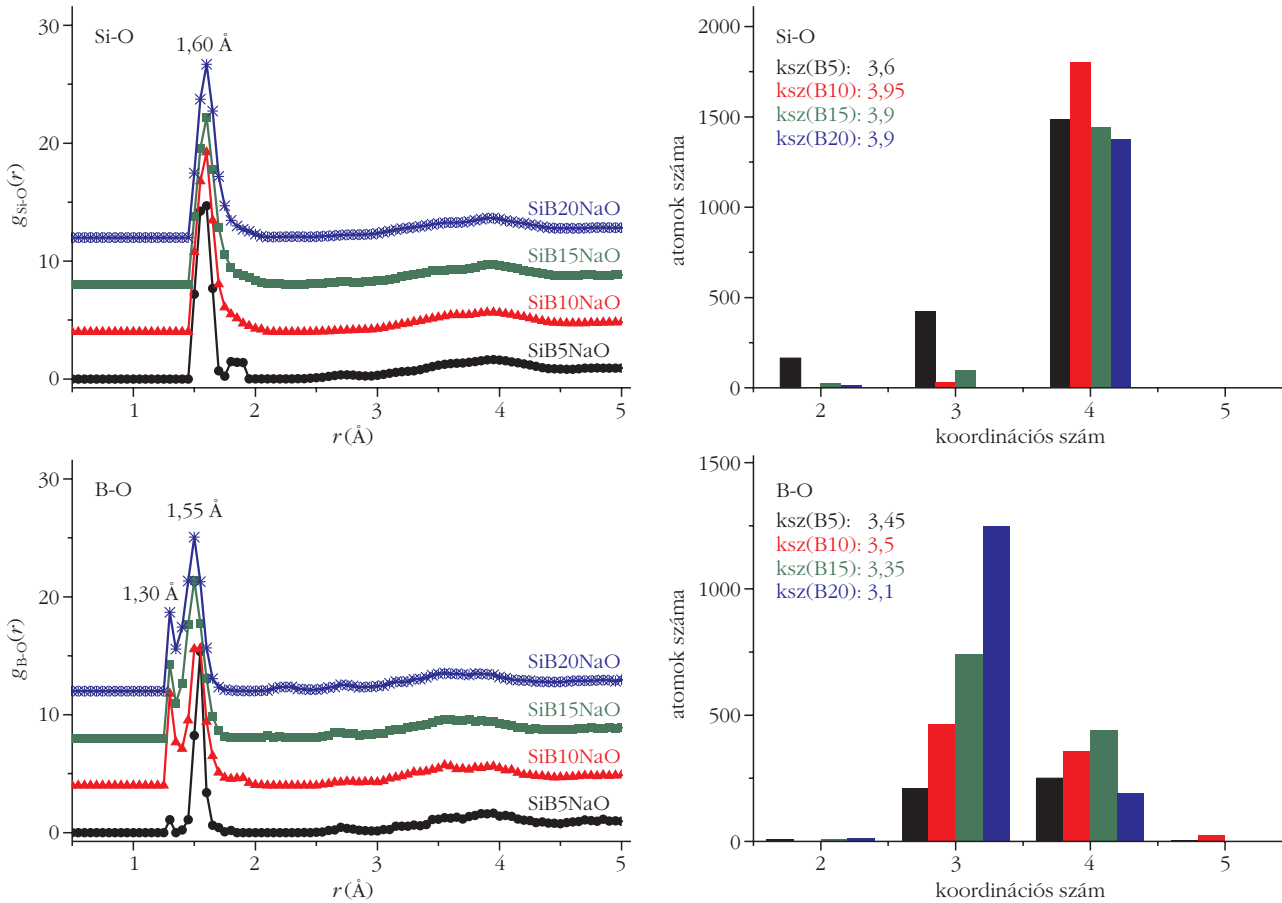
A minták vizsgálatához azonos előállítási feltételeket alkalmaztam, ugyanazokat a mérési eljárásokat használtam és a kiértékelés is hasonló módon történt. Mindezek nagyban hozzájárultak ahhoz, hogy az eredményeket megfelelően tudjam összehasonlítani, a kapott lehetséges szerkezeteket értelmezni. Neutron- és röntgendiffrakciós méréseim feldolgozására a Reverse Monte Carlo (RMC) szimulációs módszert alkalmaztam. A módszer ezen mintákra történő alkalmazása kihívást jelent, eddigi tanulmányokat tekintve nincs jól bevált séma. A peremfeltételeket az egyszerű és a több komponensű összetételekre is külön meg kell határozni, ezeket a minta összetevőinek függvényében lehet megadni.

## Kísérleti háttér

Az OTKA-PD pályázat beruházási tételeiként sikerült kialakítani egy radioaktív anyagok használatára is alkalmas, biztonságos minta-előállítási környezetet, be-

*Fábián Margit* vegyész-fizikus diplomáját 2003-ban a Babeş–Bolyai Tudományegyetemen, doktori fokozatát 2009-ben az ELTE-n szerezte. 2003–2011 között az MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet, 2012 óta az MTA Energiatudományi Kutatóközpont munkatársa. Kutatási tevékenysége a nagyaktivitású radioaktív hulladékok biztonságos tárolása. Módszert fejlesztett ki stabil, de egyszerű kondicionáló összetételek előállítására. Több tudománynépszerűsítő és -szervező tevékenységben vesz részt.

Köszönetet mondok mindenekelőtt *Sváb Erzsébetnek* és *Mészáros Györgynek* (MTA Wigner FK), akiknek a szakmai és emberi támogatását sok éven keresztül élvezhettem. A röntgendiffrakciós mérések során jelentős segítséget kaptam *Martin von Zimmermanntól* (Hasylab). A munkát az OTKA-PD 109384 pályázat támogatta.




*1. ábra.* A Si-O és B-O parciális párkorrelációs függvények és koordinációs számeloszlások RMC modellezéssel számolva az SiB*x*NaO, azaz B5, B10, B15 és B20 mintákra.

rendezni egy minta-előállító laboratóriumot a Budapesti Kutatóreaktor épületében.

Az elektromos fűtésű, magas hőmérsékletű LAC VP 10/17 típusú kályha maximális hőmérséklete 1700 °C, így teljes mértékben eleget tesz a vizsgált üvegek előállítási követelményeinek. A minták olvasztással készültek, majd olvadékállapotból (1300–1450 °C) gyorshűtéssel értem el az üvegállapotot.

Kiinduló anyagként a következő oxidokat használtam: $SiO_2$ és $B_2O_3$ (üvegalkotó oxidok az üveg amorf állapotban való előállításáért felelősek), $Na_2O$ és BaO (módosító oxidok, az olvasztás körülményeinek optimalizálásáért alkalmazzuk őket), $ZrO_2$ (stabilizáló oxid, a kristályosodás elkerüléséért adjuk a rendszerhez), valamint $UO_3$, $CeO_2$ és $Nd_2O_3$ voltak. A természetes bór nagy neutronabszorpciója miatt B-11 izotópban dúsított (99,6% – Sigma Aldrich Co.) diborátot használtam.

Neutron- és röntgendiffrakciós módszereket alkalmaztam az üvegminták szerkezetvizsgálatára. *Neutrondiffrakciós* méréseimet a Budapesti Kutatóreaktor 9. számú termikus, vízszintes, tangenciális csatornájánál működő PSD helyzetérzékeny neutrondiffraktométeren végeztem [2].

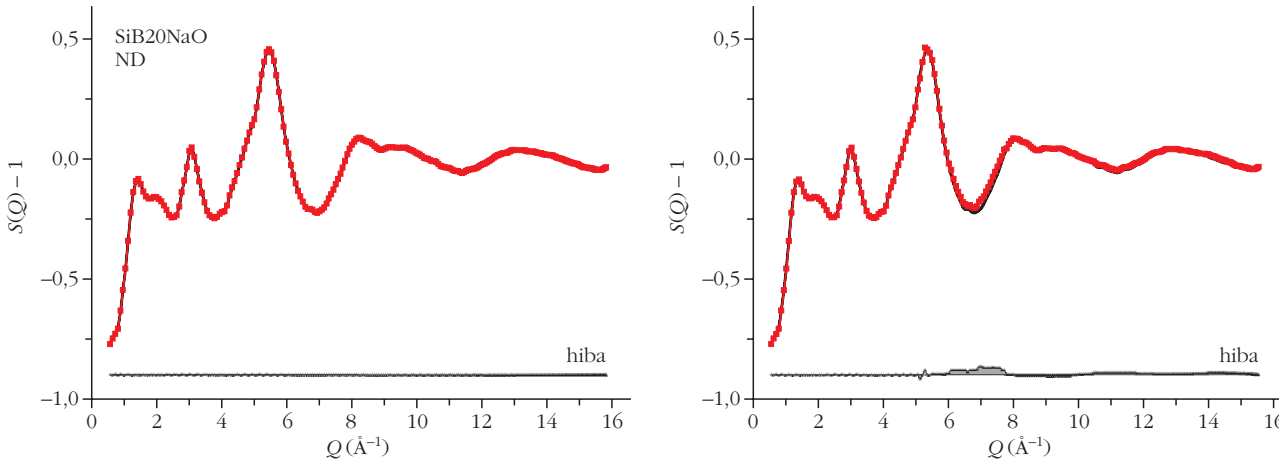
Kiegészítő mérésekre került sor a Saclay-i kutatóreaktornál üzemelő 7C2 [3] berendezésen és a Los Alamos-i impulzus-neutronforrásnál működő NPDF és HIPPO [4] berendezéseken. Utóbbi mérőhelyek lehetővé tették a mérés kiterjesztését nagy $Q$ tartományig[1], jellemzően 20-35 Å$^{-1}$-ig. Ennek előnye, hogy az $r$-térben az atomi párkorrelációs függvények számításánál lényegesen jobb felbontást kapunk ($\Delta r = \pi/Q_{max}$).

A könnyű atomok (B, O, Si) környezetére a neutrondiffrakció ad pontosabb szerkezeti információt, míg a nehéz atomok (Ba, Zr, U) a röntgendiffrakciós mérésben figyelhetők meg jobban. A vizsgált többkomponensű összetételek könnyű és nehéz atomokat egyaránt tartalmaznak, ezért indokolt röntgendiffrakciós méréseket is végezni. Utóbbiakat a hamburgi, Doris szinkrotronnál működő BW5 diffraktométeren [5] végeztem, 109,5 keV energián, amely a $Q$ = 0,5–25 Å$^{-1}$ szórási tartományt tette elérhetővé. A kétfajta diffrakciós mérés együttes kiértékelését az RMC szimulációs programmal végeztük.

A szerkezet jellemzéséhez elsősorban a $g_{ij}(r)$ parciális párkorrelációs függvényeket[2] és a koordinációs

[1] A $Q$ szórási amplitúdó, a szórási vektor ($Q = k - k'$, ahol $k$ a beérkező, és $k'$ a $\Delta\Omega$ térszögben szóródott neutronok hullámvektora) abszolút értéke, amit a $\lambda$ hullámhossz és a $2\Theta$ szórási Bragg-szög ismeretében az alábbi képlet alapján kapunk meg: $Q = 4\pi\sin\Theta/\lambda$.

[2] A $g_{ij}(r)$ parciális párkorrelációs függvény megmutatja, hogy egy $i$ típusú részecskétől $r$ távolságban a $j$ típusú részecskék lokális sűrűsége hogyan aránylik az $j$ típusú részecskék átlagos sűrűségéhez. A $g_{ij}(r)$ függvények invariánsak az $i \leftrightarrow j$ részecskékre nézve, hiszen a két részecske közötti távolság azonos, a $g_{ij}(r) = g_{ji}(r)$.




*2. ábra.* A SiB20NaO mintára a kísérleti és RMC szimulációval illesztett neutrondiffrakciós szerkezeti függvények (jobb oldalon az 1,55 Å-ös B-O csúcs kizárásával számított függvény). A kísérleti görbén fekete vonal jelöli az RMC-vel előállított modellt.

számokat[3] határoztuk meg, valamint – egyszerűbb összetételeknél – a kötési szögeloszlásokat és a lehetséges gyűrűeloszlásokat. Az egyes atompárokat jellemző parciális párkorrelációs függvények meghatározásához itt is az RMC szimulációs módszert [6, 7] használtuk, amely széles körben alkalmazott eljárás a rendezetlen kondenzált rendszerek diffrakciós spektrumainak értelmezésére.

## Eredmények és következtetések

### Háromkomponensű SiNaO minta

Előállítottam a $70SiO_2 \cdot 30Na_2O$ alapösszetételű nátriumszilikát üvegmintát, amelynek kombinált neutron- és röntgendiffrakciós méréseire együttes RMC szimulációt alkalmazva, meghatároztuk az eddig ismert egyik legpontosabb szerkezeti modellt. Megadva a parciális párkorrelációs függvényeket, a koordinációs számokat, a 3-részecske szögeloszlás-függvényeket, valamint a kovalens kötésekből álló Si-O hálószerkezetet alkotó gyűrűk eloszlását. Legfontosabb megállapítások, hogy az oxigénatomok körülbelül 63%-a vesz részt a $SiO_4$ tetraéderek egymáshoz való kötésében, míg körülbelül 37%-a terminális, azaz a Si-O lánc megszakad és az oxigén nátriumhoz is kötődik. A Na-O kötéstávolság 2,29 Å és két szomszédos Na szeret egy adott O környezetében lenni, ami a szerkezet kompaktságára utal [8].

### Négykomponensű SiBNaO mintasorozat

A négykomponensű $(75–x)SiO_2 \cdot xB_2O_3 \cdot 25Na_2O$ ($x$ = 5–20 mol%) alapösszetételű nátrium-boroszilikát üvegsorozat rövid távú rendjét is neutron- és röntgendiffrakciós mérések, valamint RMC szimuláció segítségével vizsgáltuk. A parciális párkorrelációs függvényeket és a koordinációs számokat (KSz) meghatározva választ kaphatunk az üveg szerkezetének kialakulására (*1. ábra*).

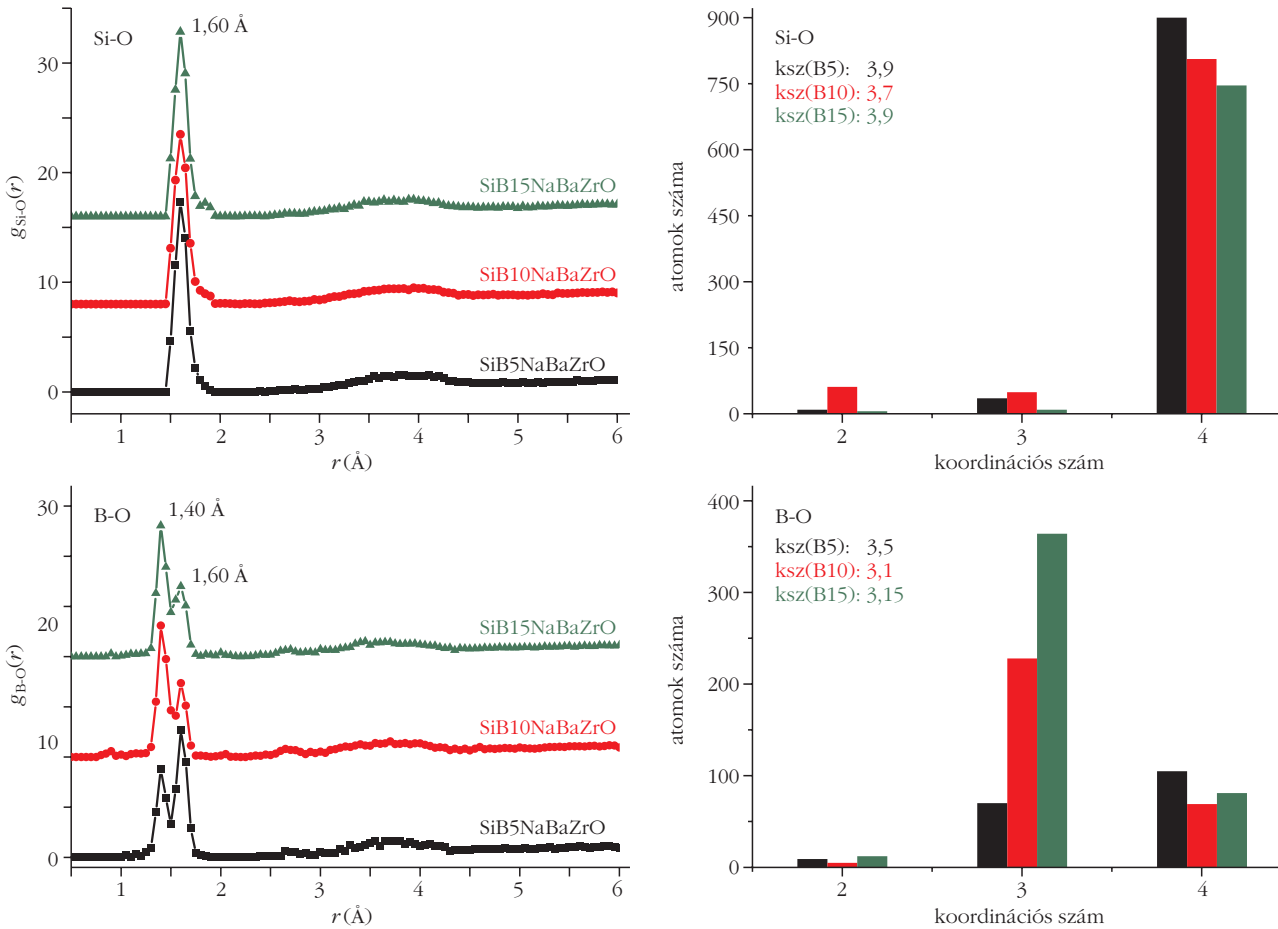
Legfontosabb megállapításunk az, hogy a Na-atom bevitele a hármas koordinációval rendelkező B-atomok környezetét részben átalakítja és megjelennek a négyes koordináltságú B-atomok. Az $r_{Si-O}$ = 1,60± 0,01 Å távolság, valamint a 3,6–3,9 közötti Si-O koordinációs számok a tetraéderes $SiO_4$ kialakulását mutatják. Ezek az értékek az előzőleg vizsgált amorf $70SiO_2 \cdot 30Na_2O$ munkánk eredményével megegyezők. A B-O elsőszomszéd-távolságra kapott 1,30 és 1,55±0,05 Å értékeknél – a koncentráció függvényében – intenzitásváltozás figyelhető meg. (Az áttekinthetőség kedvéért a vizsgált üvegek Si-O és B-O távolságait a cikk végén külön táblázatban is közöljük). Mivel az 1,55 Å-ös B-O csúcs átfed a 1,60 Å-ös Si-O csúccsal, felmerül a gyanú, hogy a B-O és Si-O parciális párkorrelációs függvények szétválasztása nem megfelelő. Ezért ellenőrző szimulációs futtatásokat végeztünk, amelyekben az 1,55 Å-nél található B-O csúcs kialakulását kizártuk. Ennek eredményeként a szerkezeti függvény[4] illeszkedése romlott (*2. ábra*). Mindezek alapján arra következtetünk, hogy a fenti B-O távolság valós, és a vizsgált üvegekben $BO_4$ és $SiO_4$ szerkezeti egységek találhatók [9].

### Hatkomponensű SiBNaBaZrO mintasorozat

A $(65–x)SiO_2 \cdot xB_2O_3 \cdot 25Na_2O \cdot 5BaO \cdot 5ZrO_2$ ($x$ = 5–15 mol%) hatkomponensű sorozatot számos előállítási próbálkozás előzte meg. A mátrixüveg összetételének optimalizálása bonyolult, de végül sikeres folyamatnak bizonyult. Az előzőekhez hasonlóan erre a rendszerre is meghatároztuk az alapszerkezetet jellemző legfontosabb atompárok parciális párkorrelációs függvényeit és a koordinációsszám-eloszlásokat (*3. ábra*).

[3] A *ksz* koordinációs szám megadja, hogy egy *i* típusú atomot átlagosan hány *j* típusú atom vesz körül egy megadott távolságtartományban.

[4] Az $S(Q)$ szerkezeti függvény a szórtintenzitás-eloszlásból számolt koherens, rugalmas szórás normált alakja, figyelembe véve a háttér, abszorpció és az adott mérőberendezésre jellemző egyéb korrekciós tényezőket.




*3. ábra.* A Si-O és B-O parciális párkorrelációs függvények és koordinációs számeloszlások RMC modellezéssel számolva az SiB*x*NaBaZrO, azaz B5, B10, és B15 mintákra.

Megállapítottuk, hogy a mátrixüveg szerkezeti felépítésében elsősorban a tetraéderes koordináltságú $(SiO_4)^{4-}$ egységek játszanak fontos szerepet, míg a bór 3-as és 4-es koordináltságú oxigén környezetekben helyezkedik el. A B-O eloszlásra most is két karakterisztikus elsőszomszéd-távolságot kapunk 1,40± 0,01 Å, illetve 1,60±0,01 Å-nél. A bór itt is beépül a Si-alapú hálószerkezetbe és $^{[3]}$B-O-$^{[4]}$Si[5], illetve $^{[4]}$B-O-$^{[4]}$Si vegyes láncok alakulnak ki. További eredmény, hogy a Zr-atom, a Zr-O párkorrelációs függvények és a koordinációs számok alapján mintáinkban üvegképző szerepet is betölt („töltéskompenzáló" kationként a kettőnél kevesebb Si/B szomszéddal rendelkező oxigénekhez köt, lezárva a felszakadt hálózatot) [10, 11].

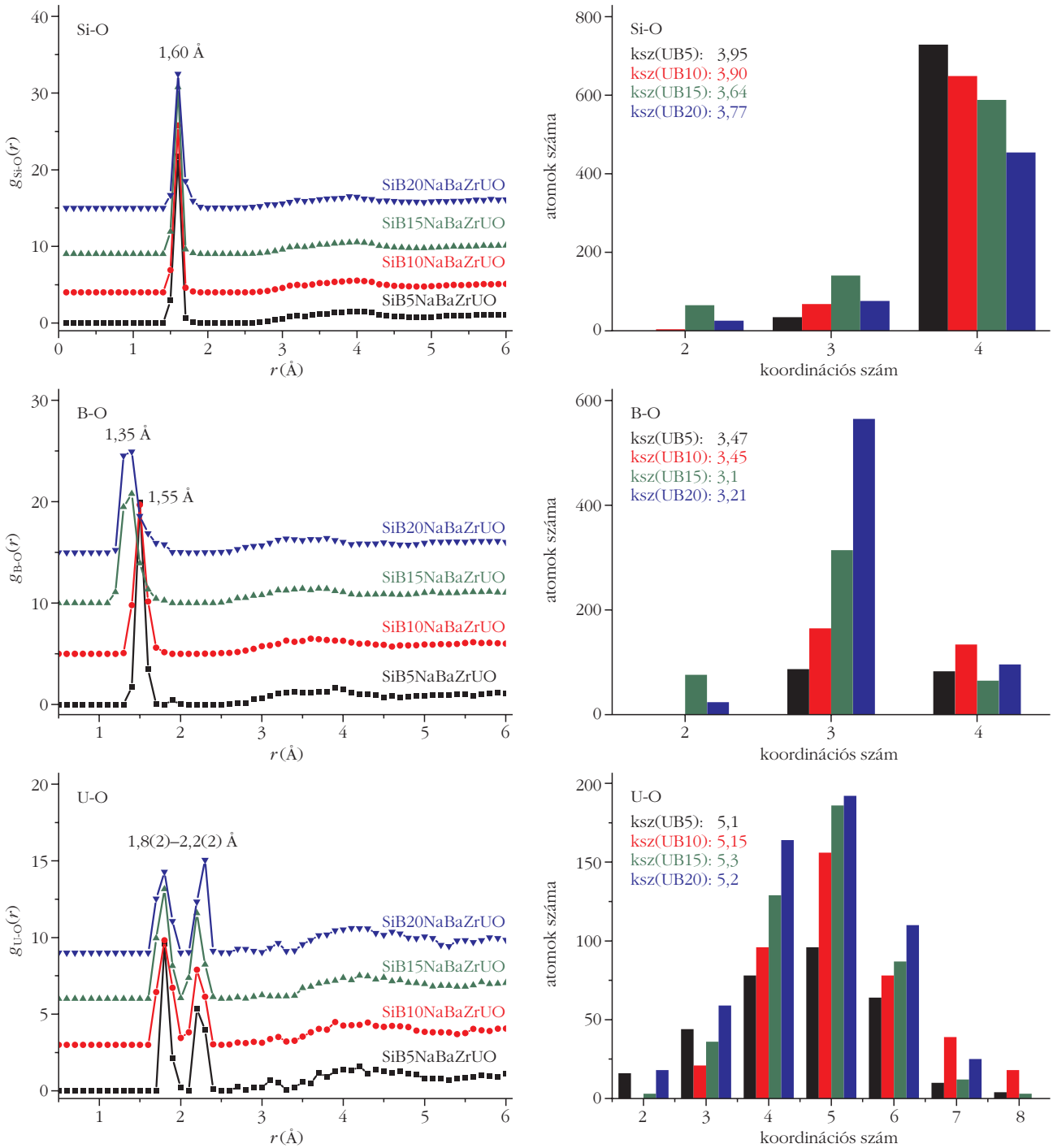
## Hétkomponensű SiBNaBaZrUO mintasorozat

Kísérleteink alapján bebizonyítottuk, hogy az optimalizált mátrixüveg-összetétel 30 s% $UO_3$ befogadására alkalmas. Előállítottam a 70 s% $[(65-x)SiO_2-xB_2O_3 \cdot 25Na_2O \cdot 5BaO \cdot 5ZrO_2)]$ + 30 s% $UO_3$ ($x$ = 5, 10, 15 és 20, rövidített jelöléssel UB5, UB10, UB15, illetve UB20) sorozatot is. Az RMC program által generált szerkezeti függvények mindhárom minta esetén jó egyezést mutatnak a kísérleti spektrumokkal, ugyanakkor azt is megfigyelhetjük, hogy a Si-O és B-O parciális párkorrelációs függvények és a koordinációs számok hasonlítanak az egyszerűbb összetételeknél kapott eredményekhez (*4. ábra*).

Fontos megemlíteni, hogy adminisztratív okokból ezeken a mintákon csak a budapesti PSD diffraktométeren tudtunk neutrondiffrakciós méréseket végezni, így több párkorrelációs függvény $r$-térbeli felbontása gyengébb. Ennek tulajdonítható például a B-O csúcs felhasadásának elmaradása. A csúcs eltolódása az összetétel függvényében (1,55 Å → 1.35 Å) viszont most is megfigyelhető.

Megállapítottuk, hogy az $UO_3$ tartalmú sorozat kevésbé hajlamos a kristályosodásra, mint az urán nélküli mátrixüveg, és higroszkópos tulajdonságai is kedvezőbbek. Az U-O parciális párkorrelációs függvény éles elsőszomszéd-eloszlást mutat 1,80±0,05 Å (UB5, UB10) és 1,82±0,05 Å (UB15, UB20), illetve 2,20±0,05 Å (UB5, UB10, UB15) és 2,22±0,05 Å (UB20) értékeknél. Az U-atomot átlagosan 5,2 O-atom veszi körül. Irodalmi adatok alapján [12] ezek a távolságok jól megfeleltethetők az $UO_2 \cdot SiO_2$ összetételben lévő uranil kristályos szerkezetben a hatos koordináltságú U körüli axiális (1,82) és ekvatoriális (2,22) U-O távolságoknak (*5. ábra*).

[5] $^{[3]}$B – a felső indexben szereplő szám az illető atom koordináltságát jelenti.

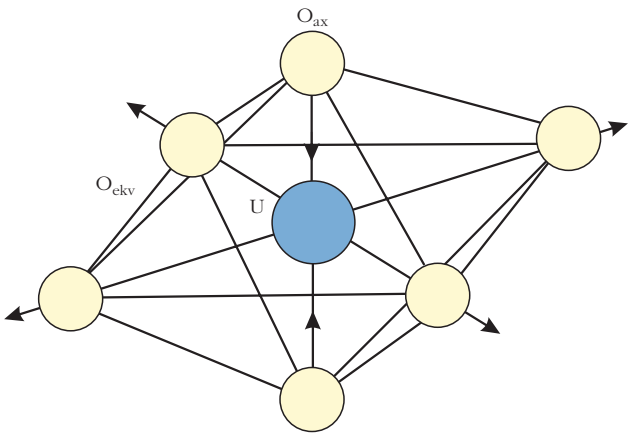



*4. ábra.* A Si-O és B-O parciális párkorrelációs függvények és koordinációs számeloszlások RMC modellezéssel számolva az SiB*x*NaBaZrUO, azaz UB5, UB10, UB15 és UB20 mintákra.

Az U-Si, U-B, U-Na és U-Zr parciális párkorrelációs függvények esetében a megfelelő másodikszomszéd-távolságokra a 3,35±0,1 Å, 2,85–3,15±0,1 Å, 3,5–4,0± 0,1 Å és 3,7±0,1 Å értékeket kaptuk (*6. ábra*).

Az U-atom és az üvegképző (Si, B, Zr) atomok közti korrelációt leíró függvények első csúcsa viszonylag éles, míg a Na-U párkorrelációs függvény esetében a csúcs kevésbé definiált. Az alaphálózat megbontásával a Na megnyitja az utat az urán előtt, amely így beépülhet a Si-B-O hálózatba [13–15]. Ahogy már említettük, a Zr szerepe a kristályosodás megakadályozása.

A munka egyik fő célja meghatározni a maximális hulladék mennyiséget, amely stabilan be tud épülni a mátrixba. Az előzőekben ismertetett mintákból a 10 mol% $B_2O_3$ tartalmú, $55SiO_2 \cdot 10B_2O_3 \cdot 25Na_2O \cdot 5BaO \cdot 5ZrO_2$ összetétele (továbbiakban: MÁTRIX) bizonyult a legstabilabbnak, ehhez adtam 35, 40, 45 s% $UO_3$-at. A neutron- és röntgendiffrakciós szerkezetvizsgálati eredmények azt mutatják, hogy ez az összetétel 40 s% $UO_3$-at tud stabilan beépíteni úgy, hogy tökéletesen amorf mintát kapjunk. Az üveg alapszerkezete nem változik, az alapszerkezet kialakulásáért felelős Si és



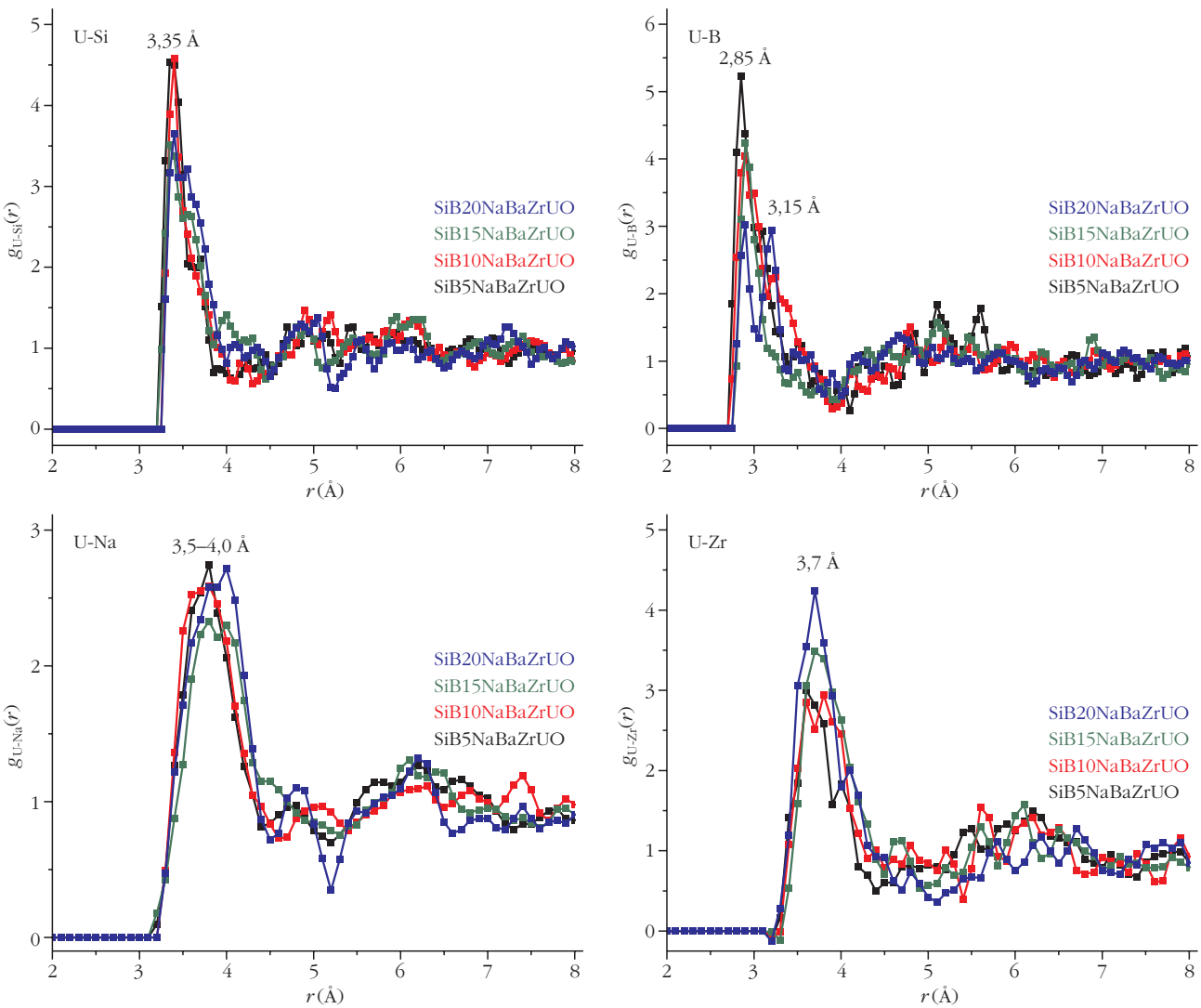

*5. ábra.* A kristályos szerkezetben az U-atom körül lévő, axiális és ekvatoriális pozícióban elhelyezkedő O-atomok.

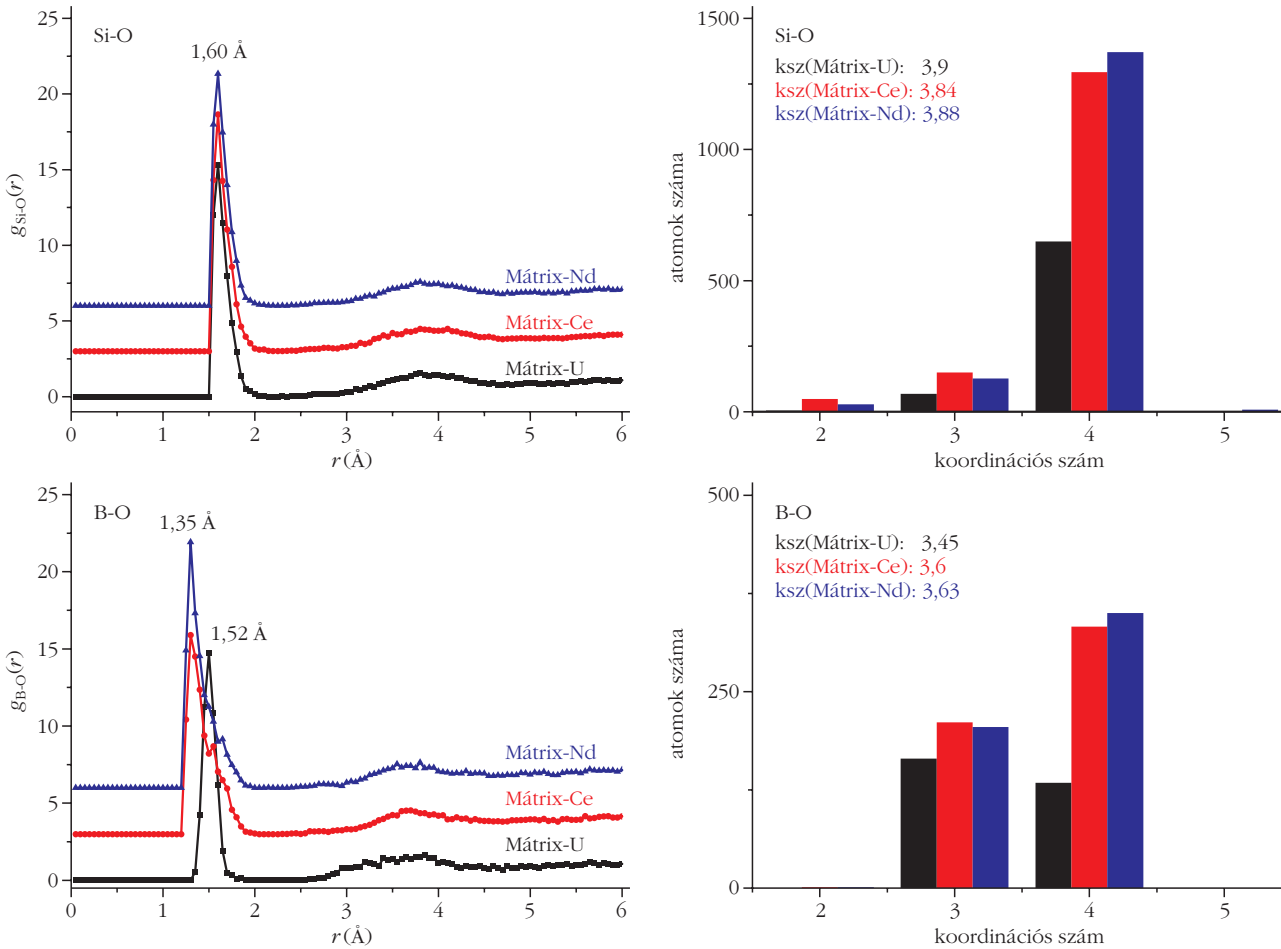
B atomi környezetek az egyszerűbb mintákhoz hasonló módon, stabilan és reprodukálhatóan alakulnak ki. A 45 s% $UO_3$-at tartalmazó minta azonban már részben kristályos fázisokat mutat, kijelölve a befogadóképesség határát.

## Hétkomponensű SiBNaBaZrCe(Nd)O mintasorozat (előzetes eredmények)

A kifejlesztett összetételnek az urán mellett alkalmasnak kell lennie a hasadási termékek (jórészt aktinoidák) befogadására is [16]. Mivel utóbbiak beszerzése bonyolult, és felhasználásuk csak speciális, erre a célra engedélyezett laboratóriumban lehetséges, ezért helyettük a kémiailag hasonló módon viselkedő lantanoidákat használtam. A Pu beépülését Ce-mal szimuláltam, az Am és Cm helyett pedig Nd-ot alkalmaztam, amely helyettesítés a szakirodalomban elfogadott megoldás [17]. Vizsgáltuk a 90 s% [MÁTRIX] + 10 s% *X* és 70 s% [MÁTRIX] + 30 s% *X* (*X* = $CeO_2$, $Nd_2O_3$) sorozatokat, amelyek az előzetes vizsgálatok alapján stabil amorf szerkezettel rendelkeznek. A *7. ábra* a 70 s% [MÁTRIX] + 30 s% *X*, ahol *X* = $CeO_2$, $Nd_2O_3$ összetételekre mutatja be az első szerkezeti eredményeket. Az alapszerkezet felépítésében szerepet játszó Si és B atomi környezetek hasonló stabil kialakulást mutatnak, mint az egyszerűbb rendszerek esetén.

*6. ábra.* Másodikszomszéd-távolságok az U-atom körül az SiB*x*NaBaZrUO, azaz UB5, UB10, UB15 és UB20 mintákra.






*7. ábra*. A Si-O és B-O parciális párkorrelációs függvények és koordinációsszám-eloszlások RMC modellezéssel számolva az UB10, CeB10 és NdB10 sorozatra.

A *7. ábrán* a jobb összehasonlítás miatt feltüntettem az $UO_3$ tartalmú mintákra kapott előzetes eredményeket is. A legfontosabb megállapítás az, hogy a Si-B-O alapszerkezet az U-, Ce- és Nd-tartalmú mintáink esetén sem változik.

Végezetül érdemes megnézni az Si-O és B-O távolságokat az összetétel függvényében (*1. táblázat*).

## Összefoglalás

Sikerült több lépésben előállítani és megvizsgálni egy olyan többkomponensű mátrixüveget, amely alkalmas lehet a radionuklidok stabil befogadására. A mátrixüveg szerkezetének megértése céljából egyszerűbb, két- és háromkomponensű üvegek szerkezetét is vizs-

*1. táblázat*

**Si-O és B-O távolságok a tanulmányozott összetételekben**

| minták | $r_{ij}$ (Å) | |
|---|---|---|
| | Si-O | B-O |
| $SiO_2$ [18] | 1,62±0,05 | – |
| SiNaO | 1,62±0,01 | – |
| $B_2O_3$ [19] | – | 1,37±0,02 |
| BNaO [19] | – | 1,38/1,55±0,05 |
| SiBNaO | | |
| SiB5NaO | 1,60±0,01 | 1,30/1,55±0,05 |
| SiB10NaO | 1,60±0,01 | 1,30/1,55±0,05 |
| SiB15NaO | 1,60±0,01 | 1,30/1,50±0,05 |
| SiB20NaO | 1,60±0,01 | 1,30/1,50±0,05 |
| SiBNaBaZrO | | |
| SiB5NaBaZrO | 1,60±0,01 | 1,40/1,60±0,01 |
| SiB10NaBaZrO | 1,60±0,01 | 1,40/1,60±0,01 |
| SiB15NaBaZrO | 1,60±0,01 | 1,40/1,60±0,01 |
| SiBNaBaZrUO | | |
| SiB5NaBaZrUO | 1,60±0,01 | 1,35/1,55±0,1 |
| SiB10NaBaZrUO | 1,60±0,01 | 1,35/1,55±0,1 |
| SiB15NaBaZrUO | 1,60±0,01 | 1,35/1,55±0,1 |
| SiB20NaBaZrUO | 1,60±0,01 | 1,35/1,55±0,1 |
| SiB10NaBaZrCeO | 1,60±0,01 | 1,35±0,05 |
| SiB10NaBaZrNdO | 1,60±0,01 | 1,33±0,05 |

gáltuk. Megállapítottuk, hogy a két- és háromkomponensű mintákhoz hasonlóan a mátrixüveg szerkezeti felépítésében is a tetraéderes koordináltságú $(SiO_4)^{4-}$ egységek játszanak szerepet. A mátrix alapszerkezetét $^{[3]}$B-O-$^{[4]}$Si, illetve $^{[4]}$B-O-$^{[4]}$Si vegyes láncok alkotják. Ez az alapszerkezet megmarad akkor is, ha uránt vagy más nehézfémet (például Ce, Nd) adunk a mátrixüveghez.

További vizsgálatokat végzünk a Ce- és Nd-atomok beépülésére vonatkozóan. Eddigi eredményeink alapján feltételezhető, hogy a javasolt mátrix-boroszilikát üvegek potenciális radioaktívhulladék-kondicionáló anyagként használhatók.

Irodalom


1. Chun K S, Kim S S, Kang C H, *Journal of Nuclear Materials 298* (2001) 150.
2. Sváb E, Mészáros Gy, Deák F, *Materials Science Forum 228* (1996) 247; www.bnc.hu
3. Proffen Th, Billinge S J L, Egami T, Louca D, *Zeitschrift für Kristallographie 18* (2003) 132.
4. Ambroise J P, Bellissent R, *Rev. Phys. Appl. 19* (1984) 731; http://www-llb.cea.fr/en/
5. Poulsen H, Neuefeind J, Neumann H B, Schneider J R, Zeidler M D, *J. Non-Cryst. Solids 188* (1995) 63.
6. McGreevy R L, Pusztai L, *Mol. Simul. 1* (1988) 359.
7. Gereben O, Jóvári P, Temleitner L, Pusztai L, *J. Optoelectron. Adv. Mater 9* (2007) 3021.
8. Fábián M, Jóvári P, Sváb E, Mészáros Gy, Proffen T, Veress E, *J. Phys.: Condens. Matter 19* (2007) 335209.
9. Fábián M, Araczki Cs, *Physica Scripta 91* (2016) 054004.
10. Fábián M, Sváb E, Mészáros Gy, Révay Zs, Proffen Th, Veress E, *J. Non-Cryst. Solids 353* (2007) 2084.
11. Fábián M, Sváb E, Proffen Th, Veress E, *J. Non-Cryst. Solids 354* (2008) 3299.
12. Liu G K, Zhuang H Z, Beitz J V, Williams C W, Vikhnin V S, *Fizika Tverdogo Tela 44* (2002) 8.
13. Fábián M, Proffen Th, Ruett U, Veress E, Sváb E, *J. Phys.: Condens. Matter 22* (2010) 404206.
14. Fábián M, Sváb E, *Neutron News 23* (2012) 9.
15. Fabian M, Svab E, Zimmermann M, *J. Non-Cryst. Solids 380* (2013) 71.
16. Zagyvai P, Kókai Zs, Hózer Z, Breitner D, Fábián M, Török Sz, Börcsök E: *A nukleáris üzemanyagciklus radioaktív hulladékai*. Budapest, MTA Energiatudományi Kutatóközpont, ISBN: 978-963-7351-20-4, 77 (2013)
17. Ramsey W G, Bibler N E, Meaker T F: *Compositions and durabilities of glasses for immobilization of Plutonium and Uranium*. Westinghouse Savannah River Company, WSRC-MS-94-0550 (1994)
18. Rino J P, Ebbsjö I, Kalia R K, Nakano A, Vashishta P, *Physical Review B 4(6)* (1993) 3053.
19. Fábián M, Sváb E, Proffen Th, Veress E, *J. Non-Cryst. Solids 356* (2010) 441–446.


# A SUDBURY NEUTRÍNÓ OBSZERVATÓRIUM – 2. RÉSZ

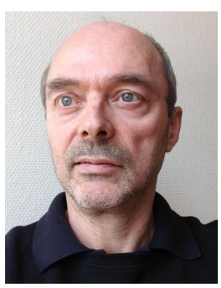
## – az SNOLAB, célkeresztben a neutrínók és a sötét anyag


Németh Csaba

Pannon Egyetem, Fizika és Mechatronika Intézet


A *Fizikai Szemle* előző, ez év júniusban megjelent számában [6] a 2015. évi fizikai Nobel-díj kapcsán a Sudbury Neutrínó Obszervatóriumról (SNO) írtam. Az *Arthur B. McDonald* nevéhez kapcsolódó mérésekkel itt sikerült megoldani a „Nap-neutrínó rejtély" néven elhíresült problémát, amelynek során megerősítést nyert a neutrínóoszcilláció léte, aminek pedig következménye, hogy léteznie kell nullánál nagyobb tömegű neutrínónak. Ez utóbbi állítás pedig már túlmutat a részecskefizika standard modelljén, azaz a neutrínó(k) tanulmányozása ismét a természet egy eddig nem ismert oldaláról vetheti fel a fátylat. Ebből is látszik, hogy e „szellem-részecskék" vizsgálatára miért fordítanak egyre nagyobb figyelmet (és egyre több forrást) a világ különböző kutatóhelyein. Így történt/történik a kanadai Sudbury közelében levő – a fent említett eredményeknek köszönhetően jelentős hírnévre szert tett – kutatóbázis esetében is.

Ebben az írásban az SNO-ból kinőtt, kibővített, és immár többféle kutatásnak is helyt adó, új nevén SNOLAB komplexumot szeretném bemutatni.




*Németh Csaba* 1990-ben kémia-fizika-filozófia szakon végzett a JATE-n. Kutatómérnöki oklevelet és egyetemi doktorátust a Veszprémi Egyetemen (1996), majd PhD-t az ELTE–SOTE közös doktori programjában (2000) szerzett. Fő kutatási területe a környezeti radioaktivitás és a radioökológia, érdeklődési körébe tartozik még a kísérleti neutrínókutatás. Jelenleg a Pannon Egyetem docense. 2012–14 között az SNOLAB-ban, illetve a Brookhaven National Laboratory-ban dolgozott, az SNO+ projektben.


### Az SNO után

A föld alatti labort jelentősen kibővítették (5000 $m^2$-re), így ott egyszerre már több projekten is dolgozhatnak. Ez 2007-re lett készen. A *4. ábrán* a teljes föld alatti komplexum térképe látható, az *5. ábrán* levő képek pedig a méreteket érzékeltetik.

Közben, 2005-re a felszínen is elkészült egy nagy épület (3100 $m^2$), irodáknak, konferenciatermeknek, felszíni laboroknak stb. biztosítva helyet (*6. ábra*). A bővítés következtében előállt mennyiségi és minőségi fejlődést, illetve az immár szélesebb kutatási profilt, az intézmény új neve is kifejezi.

Az SNOLAB-nál folyamatban levő és tervezett kísérletek közül a legnagyobb az SNO+, amely továbbra is a neutrínók természetének felderítésére összpontosít.