

Az ólomhűtésű reaktorok

Kirchkeszner Csaba – 2022. szeptember 12.

A negyedik generációs atomerőművekről, valamint a kis moduláris reaktorokról (SMR-ekről) szóló mini sorozatunkat az ólomhűtésű reaktorok bemutatásával folytatjuk. Már a gázzal és a sóolvadékkal hűtött negyedik generációs reaktorok is igen egzotikusnak tűnhettek a Kedves Olvasó számára, most azonban egy még különlegesebb reaktortípus, az ólomhűtésű reaktor főbb jellemzőit és érdekességeit ismertetjük.

Egyből adódik a kérdés, hogy az ólom, ami egy nehézfém miatt alkalmazható egy atomreaktorban hűtőközegként. Ahhoz, hogy erre a kérdésre választ adjunk meg kell vizsgálnunk, hogy alapvetően milyen kritériumoknak kell eleget tennie egy anyagnak, ha reaktorban hűtőközegként szeretnénk használni (**1. ábra**). Az elsők közé tartoznak a **termodinamikai kritériumok**, vagyis jól vezesse a hőt (magas hővezetési együttható), alacsony legyen a gőznyomása (robbanások elkerülése érdekében), magas legyen a forráspontja és alacsony az olvadáspontja. A következők a **neutronfizikai kritériumok**, vagyis az alkalmazandó hűtőközeg ne vagy csak kis mértékben nyelje el a neutronokat (kicsi legyen a neutronbefogási hatáskeresztmetszet), amennyiben gyorsreaktorokról beszélünk, akkor fontos, hogy a hűtőközeg ne lassítsa (termalizálja) a gyorsneutronokat (elhanyagolható neutronmoderálás). További fontos neutronfizikai kritérium, hogy a besugárzás hatására minél kisebb mértékben aktiválódjon fel az adott hűtőközeg. Nem feledkezhetünk el a **kémiai kritériumokról** sem, melyek a következők: lehetőleg ne legyen toxikus, kémiailag inert legyen a vele érintkező anyagokkal szemben, vagyis azokkal ne lépjen kémiai reakcióba, továbbá fontos a termikus stabilitás is, vagyis magas hőmérsékleten ne alakuljon át. Mindezen kritériumok mellett természetesen fontos a **gazdaságosság** is. A nehézfémmel hűtött gyorsreaktoroknál valójában kétféle hűtőközeget szoktak vizsgálni, ezek (1) a természetes ólom és (2) az ólom-bizmut eutektikum¹ (44,5% ólom, 55,5% bizmut). A következőkben ezek tulajdonságait hasonlítjuk össze az előbb említett kritériumok alapján.



1. ábra: A hűtőközeggel szemben támasztott legfontosabb követelmények

¹ **Eutektikum** (etimológia: *eutektos*, gör., jelentése: könnyen olvadó): két vagy több anyag olyan elegye, amelyek egymással homogén (egyfázisú) folyadékot (olvadékot vagy oldatot) képeznek, szilárd állapotban azonban nem elegyednek. Az eutektikumnak egy jellegzetes tulajdonsága, hogy olvadáspontja alacsonyabb, mint az alkotókomponensek olvadáspontja.

Kezdjük az összehasonlítást a termodinamikai jellemzők alapján. Mivel az ólom-bizmut eutektikum az ólomhoz sok szempontból hasonló tulajdonságokkal bír, így a tárgyalást az ólmon keresztül végezzük, majd egy-két alapvető különbséget bemutatunk a két hűtőközeg között. Az **ólm egyik fontos hőfizikai sajátossága az alacsony gőznyomás** (kb. 727 °C hőmérsékleten 0,01 Pa). Ezt a hőmérsékletet az ólomhűtésű reaktorokban normál üzemi körülmények között (400–600 °C) nem érjük el. Az ólom forráspontja 1743 °C (légtörnyomás), ami több mint 1100 °C-kal magasabb az ólomhűtésű reaktorok normál üzemi hőmérsékleténél. Ebből látható, hogy **az ólom hűtőközeg esetlegesen forrása nem jelent különösebb biztonsági kockázatot**. Az ólom alkalmazásának másik nagy előnye, hogy forráspontja atmoszférikus nyomáson is magas, így **a hűtőközeget nem kell nagy nyomáson tartani ahhoz, hogy az ne forrjon fel** (a könnyűvízes reaktorokban azért alkalmazunk nagy nyomást, hogy a víz ne forrjon fel). **Az ólomnak ugyanakkor van egy kedvezőtlen fizikai tulajdonsága, ez pedig az, hogy az olvadáspontja viszonylag magas** (327 °C légtörnyomás), ami közel esik az üzemi hőmérséklet legalacsonyabb pontjához. Ez azért jelent problémát, mert a teljesítmény hirtelen csökkenése esetén az ólom megszilárdulhat, amit mindenképpen el kell kerülni, hiszen ekkor megszűnik a nukleáris üzemanyag-kazetták hűtése. Előnye is van ugyanakkor a magas olvadáspontnak, az egyik az, hogy **hűtőközeg-vesztéssel járó balesetek (Loss Of Coolant Accident, LOCA) esetén a kiömlő ólom viszonylag rövid idő alatt megszilárdul, s magába zárja a radioaktív anyagokat**. Ezzel szemben a 44,5% ólmot és 55,5% bizmutot tartalmazó **ólm-bizmut eutektikumnak az egyik, számunkra legfontosabb fizikai tulajdonsága, hogy olvadáspontja 126 °C (légtörnyomás), ez komoly előny az ólmmal szemben**. Ennek köszönhető, hogy egy üzemzavari teljesítményesés (és ezáltal hőmérsékletcsökkenés) hatására bekövetkező hűtőközeg-megszilárdulásnak sokkal kisebb az esélye, mint amikor tisztán ólmot használunk hűtőközegként. Másrészt az aktív zónába belépő és az onnan kilépő hűtőközeg hőmérsékletei közötti különbség nagyobb, ezáltal a termodinamikai hatásfok is nagyobb. A reaktor tervezésének szempontjából tekintettel kell lenni arra, hogy a jellemző üzemi hőmérsékletek között az ólm sűrűsége 10,4–10,6 g/cm³, az ólm-bizmut eutektikumé pedig 10,2–10,5 g/cm³, ez a könnyűvízes reaktorokban áramoltatott víz jellemző üzemállapotokban adódó sűrűségének (≈0,7 g/cm³) kb. 15-szöröse. A nagy sűrűségnek köszönhetően az ilyen közegbe merített berendezésekre nagyon nagy felhajtóerő hat. A nukleáris üzemanyag-kazetták elhelyezésénél ennek pozitív hatása, hogy a hűtőközeg valamennyire „tartja” a kazettákat, így a reaktor azon belső szerkezeti elemei, melyek a kazetták megtartásában játszanak szerepet, egyszerűbbek, mint egy könnyűvízes reaktor esetén. Abból a szempontból viszont komoly problémát jelent a hűtőközeg nagy sűrűsége, hogy a szabályozó- és biztonságvédelmi rudakat mozgató szerkezet meghibásodása esetén e rudak felfelé kilökődhetnek, így a reaktort erre is tervezni kell, a biztonsági berendezéseket egy ilyen üzemzavar kezelésére fel kell készíteni.

Mindezek után tekintsük át röviden az ólm és az ólm-bizmut eutektikum **főbb neutronfizikai tulajdonságait**. Az **ólm egyik – neutronfizikai szempontból – kedvező tulajdonsága, hogy kicsi a neutronbefogási hatáskeresztmetszete, vagyis kis mértékben képes csak neutronokat befogni és azokkal reakcióba lépni**. Az ólmnál az esetleges neutronbefogás esetén sem kell a felaktiválódástól tartani, hiszen a legtöbb ólmizotópból neutronbefogáskor stabil, vagyis nem radioaktív izotóp keletkezik². A természetben 1,4%-ban előforduló ²⁰⁴Pb izotópból neutronbefogás hatására ugyan keletkezik instabil, vagyis radioaktív ²⁰⁵Pb izotóp (felezési ideje 10⁷ év nagyságrendű), ugyanakkor a ²⁰⁴Pb a természetben csak nagyon kis koncentrációban fordul elő, így számottevő többletaktivitást nem okoz. A ²⁰⁸Pb neutronbefogás hatására szintén radioaktív izotóppá alakul, azonban ennek felezési ideje alig több mint 3 óra, s ezután stabil ²⁰⁹Bi lesz belőle. Az ólm-bizmut eutektikumnak neutronfizikai

² A természetben megtalálható ólm izotóp-összetétele: 1,4% ²⁰⁴Pb, 24,1% ²⁰⁶Pb, 22,1% ²⁰⁷Pb és 52,4% ²⁰⁸Pb.

szempontból kedvezőtlenebb tulajdonságai vannak. Ennek oka a benne lévő bizmut, aminek köszönhetően neutronbesugárzás hatására jelentősebb a felaktiválódás, ugyanis a ^{209}Bi -ből ^{210}Bi keletkezik, utóbbi izotóp felezési ideje alig több, mint 5 nap, és β^- bomló magként ^{210}Po -zé (polóniummá) alakul. Azzá az alfa-sugárzó polónium-210-zé, amely 2006-ban *Alekszandr Litvinyenko*, korábbi KGB-ügynök halálát is okozta. Ugyan a reaktor leállításáig és a tartály felnyitásáig, normál üzemi körülmények között nem okoz problémát a ^{210}Po , azonban karbantartáskor, amikor a reaktorfedelelet kinyitják a ^{210}Po a levegőbe kerül, s az inkorporáció³ veszélye jelentőssé válik. (Mindamellett ma már léteznek olyan adszorbensek, melyek a ^{210}Po -et nagy hatékonysággal és gyorsan megkötik felületükön.)

Egykor a vízvezetékeket ólomból gyártották, azonban az ólom toxikus hatásának felismerését követően, valamint az ólomvezetékekből az ivóvízbe oldódó ólomkoncentráció növekedése miatt azokat a legtöbb helyen mára cserélték a vízhálózat korszerűsítésével kapcsolatos programok során. Felmerül azonban a kérdés, hogy egykor miért nem gondoltak e problémákra. Ez az ólom kémiaiában keresendő. Ugyanis az ólomvezeték alkalmas arra, hogy ivóvizet szállítsunk rajta, hiszen a víz enyhe szénsavtartalma az ólomcső felületén vízben oldhatatlan bázisos ólom-karbonátot hoz létre. Azonban ha a vízben megnövekszik a széndioxid-koncentráció, akkor vízben oldódó ólom-hidrogén-karbonát keletkezik. Így az ivóvízben megnő az ólom(II)-ion koncentrációja. A hatályos 201/2001-es (X.25.) Korm. rendelet értelmében 2013. december 25-től az ólom ivóvízben megengedett határértéke hazánkban 10 $\mu\text{g/l}$.

Mondhatnánk, hogy a ^{209}Bi -tal akkor valójában a tisztán ólomhűtésű reaktoroknál is baj van, hiszen noha stabil, neutronsugárzás hatására átalakul, és belőle ^{210}Po képződik. Ez igaz, ugyanakkor megfigyelték, hogy a tiszta ólomhűtésű reaktorokban a ^{210}Po képződési sebessége és a ^{210}Po termelés mértéke jóval kisebb, mint az ólom-bizmut eutektikummal hűtött reaktorok esetén.

Fontos tényező továbbá a gyorsneutronos reaktoroknál a hűtőközeg moderáló vagy neutronlassítási képessége. Ideális esetben elvárjuk egy gyorsreaktor esetén, hogy a hűtőközeg a neutronokat csak alig-alig moderálja, hiszen az aktív zónában a kemény neutronspektrum fenntartása a cél. Ebből a szempontból az ólom kiválóan teljesít, hiszen maga az ólom atommag a neutronhoz képest óriási, így a lendületmegmaradás törvényének értelmében egy rugalmas ütközés során az ólom atommagjánál több mint 200-szor könnyebb neutron alig veszít az eredeti kinetikus energiájából. További **nagy előnye van az ólom alkalmazásának sugárvédelmi szempontból is**, hiszen jól ismert, hogy a gamma-sugárzás ellen például ólommal védekezhetünk. Így az ólom hűtőközegnek köszönhetően az aktív zónában keletkező gamma-sugárzás nem vagy csak jelentős gyengülést követően jut ki a zónából.

Látható, hogy néhány kezelhetőnek tűnő kihívás mellett hűtőközeggként mind az ólom, mind az ólom-bizmut eutektikum számos előnyös tulajdonsággal bír, így akár hátra is dőlhetnének. Igen ám, de a „*kémia ördöge*” ott lapul a részletekben! Korábban a kémiai kritériumok között soroltuk fel a **nagy termikus stabilitást**, ami azt jelenti, hogy magas hőmérséklet hatására elvárjuk az anyagtól, hogy stabil maradjon. A fémeknél – így az ólomnál és az ólom-bizmut eutektikumnál – ilyen probléma nincs, ugyanis folyékony halmazállapotban a fémrácsban kötött fématomtörzsek közötti fémes kötések nem bomlanak fel. A következő szempont **a toxicitás**. Ha az ólomra gondolunk, akkor talán senkinek sincsenek olyan jellegű illúziói, hogy a legkevésbé toxikus anyagról van szó. Ez helyes is, hiszen az ólom számos vegyülete komoly humán toxikológiai kockázattal bír, azonban atomerőművi környezetben súlyos baleset esetén a kiömlő ólomolvadék megszilárdul, s magába zárja a radioaktív anyagokat. Maga az ólom nem szublimál, tehát belélegezhető ólomgözök nem kerülnek a levegőbe (nem úgy mint például a higanynál). **Az ólom toxicitása tehát sokkal inkább vegyületei formájában meghatározó, mint elemi fémként, és a reaktorban utóbbi**

³ **Inkorporáció:** a radioaktív izotóp orálisan, inhalációval vagy kültakarón (bőrön) keresztül történő felszívódással bejut az élő szervezetbe.

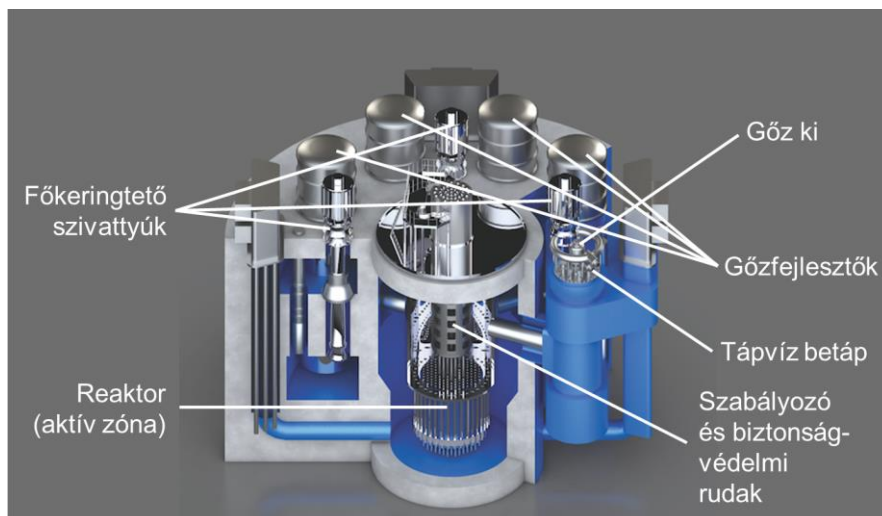
formájában használjuk. Az ólom ismert kémiai reakciói ellenére mindemellett az is elmondható, hogy az ólom esetén **heves, detonációszerű kémiai reakcióktól nem kell tartani.**

Nem hunyhatunk azonban szemet **az ólomolvadék korrodáló és erodáló tulajdonsága** felett. **Az ólommal való hűtés talán legnagyobb problémája a korrodáló és erodáló hatás, s ezek mértéke jelentősen függ az ólom hőmérsékletétől és áramlási sebességétől.** Az egyik megoldás az ólommal és az ólom-bizmut eutektikummal való hűtés során, hogy oxigént (10^{-5} – 10^{-6} tömeg% koncentrációban) oldanak be hűtőközegbe. Így néhány mikrométer vastagságú oxidréteget alakítanak ki az acél szerkezeti elemek felületén, amely már képes ellenállni hosszabb ideig a kioldódásnak és a felületi erózióknak. Ezt az ígéretesnek tűnő módszert orosz mérnökök találták ki. Vizsgálataik során azt tapasztalták, hogy 500 °C hőmérsékletű ólomolvadékban a megfelelő minőségű és összetételű acél elemek több ezer órán keresztül is megőrizték épségüket, azonban az anyag mintegy 550 °C hőmérsékleten már néhány száz óra alatt tönkremegy. Ennél sokkal hatékonyabb módszer, hogy szilíciummal ötvözött, különböző oxidokat is tartalmazó acélokat használnak az ólommal érintkező felületek kialakítására a kopásállóság növelése érdekében (az oxidok és a karbidok kemények, növelik az acél kopásállóságát). Aktív kutatás folyik olyan anyagokkal is, amelyekkel akár a 750–800 °C-os előremenő hőmérséklet is elérhető. Ilyen anyagok lehetnek például bizonyos kerámiák és kompozitok, azonban ezek esetében kulcskérdés az ólommal való összeférhetőség. **Az ólomhoz viszonyítva az ólom-bizmut eutektikumnak kisebb a korróziós potenciálja, azonban a hőmérséklet növelésével ez esetben is komoly korrodáló és erodáló hatással kell számolni.**

Ahogy a gázhűtésű vagy a sóolvadékos reaktorok ötlete sem újkeletű, úgy az ólommal és ólom-bizmut eutektikummal hűtött atomreaktoroké sem. Utóbbiak területén Oroszország rendelkezik igen komoly tapasztalatokkal, ugyanis korábban számos olyan tengeralattjárót építettek, melyekben folyékony fémhűtésű – főleg ólom-bizmut eutektikum hűtésű – atomreaktorokat használtak. Noha a '90-es évek végére ezek közül az utolsót is leállították, Oroszország nem hagyott fel a fémhűtésű reaktorok fejlesztésével, jelenleg is két demonstrációs projektjük fut: az egyik az ólomhűtésű gyorsreaktoroké szánt BREST-OD-300, a másik az SVBR, amely pedig egy ólom-bizmut eutektikummal hűtött gyorsreaktor lesz.

Az Elemző percek jelen számában először a **BREST projektet** ismertetjük. A **300 MW_e villamos teljesítményű és 700 MW_t termikus teljesítményű kísérleti ólomhűtésű gyorsneutronos reaktor (2. ábra)** építése 2021. június 8-án kezdődött meg az orosz Sverskben. A BREST projekt egy igen komplex, nagyszabású projekt, hiszen három fő létesítményből áll, ezek (1) a BREST-OD-300 ólomhűtésű gyorsreaktor, (2) a nukleáris üzemanyagot gyártó üzem, (3) a kiégett üzemanyagot reprocesszáló üzem, így a BREST projekt a **zárt nukleáris üzemanyag-ciklus megvalósításának** mintapéldája lehet.

A BREST-OD-300 gyorsreaktor **kevert urán-plutónium-nitrid (MNUP)** üzemanyaggal fog üzemelni. A reaktort **kétkörös hűtőrendszerrel** tervezték. A primer körű **ólom hűtőközeg 420 és 540 °C** közötti, míg a szekunder körű víz-vízgőz 340 és 520 °C közötti hőmérsékletű. Korábban említettük, hogy az ólom olvadáspontja magas, ami problémákat okozhat. Az atomerőmű tervezői azonban törekedtek az ólom megszilárdulásának kizárására még akkor is, ha a gőzfejlesztő teljesen megsemmisülne, s a víz-vízgőz és az ólom direkt kölcsönhatásba kerülne. A primer körű ólom hűtőközeg ebben az esetben is folyékony halmazállapotú maradna. A BREST-OD-300 reaktor sajátos jellemzői (pl. az első hurokban uralkodó kis nyomás, betonból készült, acélbéléses reaktor, a hűtőfolyadék nagy térfogata) lehetővé tették például a zónaolvadékcsapda és egyéb – pl. a nyomottvízes reaktoroknál általánosan használt – rendszerek elhagyását mindemellett, hogy **a reaktor teljes mértékben passzív biztonsági rendszerekkel rendelkezik.**

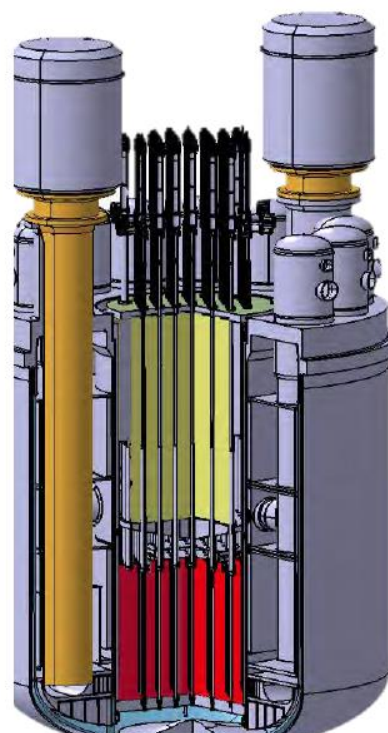


2. ábra: A BREST-OD-300 reaktor felépítése

(Forrás: <https://www.neimagazine.com/news/newsrussias-brest-reactor-now-scheduled-for-2026-6803677>)

A BREST-OD-300 alaplemezének betonozása 2021. június 15-én kezdődött. Az alaplemez elkészítéséhez mintegy 19 000 m³ betonra (és 4300 tonna vasra) volt szükség. Az alaplemez betonozása több fázisban történt. A közvetlenül a reaktor alatt lévő ötödik alaplemez öntése 2021. augusztus 19-én kezdődött, 26 órás művelet volt, melynek során 2855 m³ nehézbetont öntöttek. Fontos megjegyezni, hogy a BREST-OD-300 alaplemezének szilárdsága lényegesen nagyobb, mint általában a könnyűvízes reaktoroké. **A demonstrációs reaktor a tervek szerint 2026-ban lép majd üzembe, míg az üzemanyag-gyártó és -feldolgozó egységek rendre 2023-ra és 2024-re készülnek el.** Az orosz szakemberek már dolgoznak a BREST-OD-300 nagy testvéreinek tervezésén, a BREST-1200-on.

A szintén orosz **SVBR projekt** során építendő negyedik generációs atomreaktor még **csak tervek formájában** létezik. A BREST-OD-300-zal ellentétben az SVBR reaktor tervezett **hűtőközege ólom-bizmut eutektikum**, a bizmut magas ára miatt ez sokkal költségesebb lesz. Az üzemanyag-kazetták közötti áramlási tér méretét csökkentették, így a hűtőközeg mennyisége is csökkent. A méretezés során a határfeltétel az volt, hogy a természetes cirkuláció által elszállított hő nem lehet kevesebb a névleges hőteljesítmény 5–7%-ánál. Így az optimalizálás során kijött, hogy az SVBR-100 ólom-bizmut eutektikum szükséglete 110 tonna. A kisebb zónának egyébként biztonsági szempontból is számos előnye van. A költségek csökkentésének másik lehetősége az eutektikumban a bizmut arányának csökkentése. A szakemberek megállapították, hogy az ólom-bizmut hűtőközeg olvadáspontja a bizmuttartalom 55,5%-ról 30%-ra történő csökkentése esetén sem lépi túl a 200 °C-ot. **A SVBR tervezett termikus teljesítménye 280 MW_t, elektromos teljesítménye 100 MW_e.** A reaktor a tervek szerint **kétkörös hűtőrendszerrel** fog üzemelni, s passzív



3. ábra: Az SVBR-100 reaktor sematikus felépítése
(Forrás: IAEA, 2020)

biztonsági rendszerekkel lesz felszerelve. Az hűtőközeg bemenő hőmérséklete 340 °C, kimenő hőmérséklete 485 °C lesz. Üzemanyaga <19,3% dúsítású UO₂, azonban más üzemanyagokkal (pl. MOX) is kirakható az aktív zóna. **A jelenlegi tervek szerint SVBR reaktorral szeretnék kiváltani a novovoronyezsi VVER-440 nyomottvizes reaktorokat.**

A világ más országai is elkezdtek ólommal vagy ólom-bizmut eutektikummal hűtött negyedik generációs reaktorokat tervezni. Az egyik ilyen amerikai projekt a SSTAR (Small Secure Transportable Autonomous Reactor), de van európai uniós példa is, az ELSY (European Lead-cooled System), melynek fejlesztésében számos EU-s ország részt vesz.

Ez volt az Elemző percek sorozatunk 127. tagja.