

A REAKTORMÉRGEZÉS KIKÜSZÖBÖLÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI SÓOLVADÉKOS REAKTOROKBAN

Balla Áron, Márkus Ferenc
BME Fizikai Intézet

Az olvadt-sós reaktor a negyedik generációs reaktor-család egyik legfontosabb tagja. Nukleáris reaktorok körében kuriózumnak számít alapvető felépítésbeli különlegessége miatt. Ezekben a reaktorokban az üzemanyag és a hűtőközeg azonos fázist alkot. Ez a fázis egy alkálifém- és alkáliföldfém-fluoridokból álló folyékony sókeverék, amelyben a hasadóanyag-fluoridok vannak oldva [1].

A koncepció legelőnyösebb tulajdonsága az, hogy üzem közben a sóból a hasadási termékek eltávolíthatók, az üzemanyag pedig folyamatosan pótolható. E funkciónak köszönhetően a hasadóanyag-tartalom alacsonyan tartható a reaktorban, és az izotóp-összetétel homogén [1–4]. Mivel a reprocessálás üzem közben zajlik, így egyidejűleg kevesebb veszélyes anyagot kell kezelni, nem úgy, mint szilárd üzemanyagoknál, ahol a kazetták ki és behelyezésénél egyszerre kényszerülnek nagy mennyiségű radioaktív anyagot mozgatni. Az üzemanyag folyamatos betáplálásából az is következik, hogy üzemanyagcserére nem kell leállítani a reaktort [1].

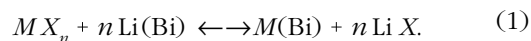
A tervek szerint a helybeli reprocessáló üzemekben a só kezelése több fázisból áll majd. Első lépésként a reaktorból érkező sót héliummal buborékolatják át, deszorbeálva ezzel a gáz halmazállapotú hasadási termékeket, a kripton és a xenont, valamint pár nemesfémet [5]. Ez a folyamat a primer körben, a reaktor közvetlen közelében zajlik, míg ezzel párhuzamosan a só egy része a reaktort elhagyva egy hosszabb idejű kezelésre kerül, amely egy, az erőművel összekapcsolt vegyi üzemben játszódik le. A továbbiakban e sókezelési eljárás részfolyamatait és a reaktor egyes üzemi paramétereire gyakorolt hatását szeretnénk bemutatni.

A sókezelési eljárás részfolyamatai

Olvadt só / folyékonyfém-extrakció

A vegyi üzemben lejátszódó folyamatok elsődleges célja a különböző, nem gáz halmazállapotú hasadási termékek eltávolítása a sóból. Ezek elsősorban a ritkaföldfémek, lantanoidák közé tartozó elemek. Első lépésként a sót egy folyékony fémmel, bizmuttal érintkeztetik, amely előnyös tulajdonságai miatt alkalmas erre a feladatra. Olvadáspontja alacsony (271 °C), a folyamat által érintett hőmérsékleti tartományban (500–700 °C) elhanyagolhatóan kicsi a gőznyomása, a lantanoidák, a tórium, a protaktínium, valamint a só egyik legfőbb alkotóeleme, a lítium kiválóan oldódik benne, viszont a sóval egyáltalán nem elegyíthető [5].

A redukív extrakció a fémfázis és a só között a következő egyenlettel írható le:



Tehát a folyamat során egy fémhalid a bizmutfázisban lévő lítiummal reagál, amelynek eredményeképpen a fém a bizmutfázisba kerül, miközben a lítium a halogénatommal alkot vegyületet. A folyamat szelektivitása meglehetősen gyenge, mivel a lantanoidák és aktinoidák szeparációs faktoraik nagyon közel állnak egymáshoz. Emiatt a sóban lévő fémek közül a protaktínium, a tórium, az urán, a transzurán elemek és a lantanoidák egyidejűleg hagyják el a sóolvadékat [5].

Elektrokémiai szeparáció

A folyékonyfém-extrakciót követően a második lépés a kiextrahált fémek egymástól való szétválasztása. Ennek keretében a legfontosabb cél a lantanoidák elválasztása a sótól, és a visszamaradó aktinoidák reaktorba történő táplálása. A folyamat szelektivitását elsősorban a folyamatban résztvevő elektrodok változtatható redox potenciálja adja. A szeparáció két lépésben valósulhat meg. Első lépésként az anódon – megfelelő feszültség hatására – a fémkeverékből a megfelelő fém(ek) egy LiF-CaF₂ összetételű sókeverékben oldatba mennek, majd a következő egység(ek)ben a különböző feszültségű katódokon kiválnak [5].

Fluorinálás

E szeparációs művelet lényege, hogy a reaktorból érkező elhasznált sót fluorgázzal intenzíven átbuborékolatják. Ennek eredményeként a fluorral könnyen illó vegyületeket képző sókomponensek gáz formájában távoznak a sóolvadékból. Ezek között a legfontosabb az urán, amelynek a sókeverékben jelenlévő formája, az urán-tetrafluorid – a következő egyenlet szerint – a fluor gázzal illékony urán-hexafluoridot alkot [6]:



Ezzel szemben – például – a plutónium PuF₄ állapotában marad, így nem hagyja el a sókeveréket. A teljes sókezelési folyamatot az 1. ábrán foglalhatjuk össze [7].

A folyamatábrán látható protaktínium-bontó egység feladata szintén fontos. A reaktorban a ²³²Th izotóp neutronbefogással először ²³³Th-má alakul, amely viszonylag rövid felezési idővel (22 perc),

2. táblázat

A ¹³⁵Te bomlási sora

nuklid	¹³⁵ Te	¹³⁵ I	¹³⁵ Xe	¹³⁵ Cs	¹³⁵ Ba
$T_{(1/2)}$	30 s	6,6 óra	9,1 óra	$2,6 \cdot 10^6$ év	stabil

két fő csoportba sorolhatók. Az egyik csoport körülbelül 80–110 tömegszámig terjed, ide tartozik az ötödik periódus jó néhány eleme, valamint a kripton, mint nemesgáz. A másik nagy csoport pedig a körülbelül 125–155 tömegszám közötti különböző izotópokat tartalmazza. Ide tartozik egy viszonylag hosszabb életű radionuklid, a ¹³⁷Cs, a lantanoidák körülbelül fele, és két rendkívül fontos reaktorméreg: a ¹⁴⁹Sm és a ¹³⁵Xe is. A nemesgáz-eltávolító rendszer elsődleges célja ez utóbbi izotóp eltávolítása a sóból.

A ¹³⁵Xe meglehetősen kis stabilitású, felezési ideje 9 óra 6 perc. A reaktorokban a teljes xenonmennyiség csak viszonylag kis része, mindössze pár százaléka származik közvetlenül az urán hasadásából, nagyobb hányada a ¹³⁵Te bomlásának eredménye, amely izotóp a hasadásból származik. A ¹³⁵Te felezési ideje mindössze 30 másodperc, és negatív β -bomlással ¹³⁵I keletkezik belőle, amely 6,6 órás felezési idővel bomlik ¹³⁵Xe-ná. A teljes bomlási sort a 2. táblázat mutatja.

A ¹³⁵Xe izotóp neutronbefogási hatáskeresztmetszete $\sim 2,6 \cdot 10^6$ barn, ami elképesztően magas érték. Összehasonlításképpen a ²³⁵U izotóp hatáskeresztmetszete 550 barn. A neutronelnyelés eredményeként ¹³⁶Xe izotóp keletkezik, ami stabil. A reaktor üzemelése közben a ¹³⁵Xe folyamatosan termelődik a hasadásból származó ¹³⁵Te-ből. Ezzel párhuzamosan a ¹³⁵Xe mennyiségét csökkentő neutronelnyelés is zajlik. A két folyamat közötti egyensúly nagyjából 40-50 órányi egyenletes reaktorüzemelés után áll be. Ilyenkor a ¹³⁵Xe koncentrációja a reaktorban a teljesítménnyel arányos értéken állandósul. Amennyiben a reaktor teljesítményét meg akarjuk növelni, akkor a neutronok száma a reaktorban megnő, így a ¹³⁵Xe izotóp mennyiségét csökkentő neutronbefogás mértéke is megnő, ugyanakkor viszont a megnövelt teljesítmény miatt a ¹³⁵I termelés is nő a reaktorban. Ezen folyamatok eredőjeként a neutronfluxus növelését követő néhány órában a ¹³⁵Xe koncentráció csökken, minimumot ér el, majd az azt követő 40-50 órában növekszik, végül beáll a megnövelt teljesítményhez tartozó magasabb koncentrációértéken. Ha a teljesítményt csökkentjük, akkor viszont az egész folyamat éppen fordítva játszódik le, a koncentráció eleinte növekszik, majd csökken, végül beáll egy alacsonyabb értéken. Amennyiben a reaktort leállítjuk, a neutronfluxus sok nagyságrenddel lecsökken, így tulajdonképpen a ¹³⁵Xe-t fogyasztó folyamat jó közelítésben elhanyagolhatóvá válik az azt termelő folyamattal szemben, így ilyen esetben a ¹³⁵Xe koncentrációja a reaktorban átmenetileg drasztikusan megnő. Amikor a reaktort újraindítják, a felhalmozódott ¹³⁵Xe eleinte nagy mennyiségű neutront nyel el, éppen

ezért a reaktor „nehezen indul”. A fentiek miatt a ma használt vízhűtésű reaktorokat leállítás után csak akkor lehet újraindítani, ha a ¹³⁵Xe koncentráció már megfelelően alacsony. A xenon reaktorból való eltávolítása a mai reaktoroknál nem lehetséges [8]. Ezzel szemben számít elég nagy előnynek az olvadt-sós reaktorok azon tulajdonsága, hogy lehetővé teszik a két gázalmazállapotú hasadási termék, a kripton és a xenon üzem közbeni eltávolítását a reaktorból. Ennek során a reaktorból távozó sókeveréket héliummal történő intenzív átbuborékolatásnak vetik alá. Annak érdekében, hogy a sóban a ¹³⁵Xe koncentrációját alacsonyan tartsák, egységnyi idő alatt a só viszonylag nagy térfogatát szükséges a buborékolató egységen átmozgatni, továbbá mivel a sóban a xenon oldhatósága a hőmérséklet növelésével csökken, érdemes a reaktor közvetlen közelében a deszorpciót végrehajtani. Ezen okokból a sóolvadékos reaktor héliumos átbuborékolató egységét a reaktor és a hőcserélő közé tervezik. Ezen belül a reaktorból távozó sőt egy szivattyú hajtja, amely mellett közvetlenül, nagy mennyiségben héliumbuborékokat juttatnak a sóba. Ezek után a gázbuborékok a folyadékkal együtt mozognak, miközben a nemesgázok a sőt elhagyva a gázfázisba koncentrálnak. A folyamat egészen addig tart, amíg a két fázis el nem válik egymástól. Bár e buborékolatási technika rendkívül perspektivikusnak ígérkezik, egyértelmű azonban, hogy a buborékok mérete, geometriája nagyban befolyásolhatja a xenon eltávolításának hatásfokát [5, 6].

Mindent egybevetve mondhatjuk, hogy a sóolvadékos reaktorok igen sok kedvező tulajdonsággal, lehetőséggel rendelkeznek. Ezek a reaktorok megfelelő formában tényleg képesek lehetnek a negyedik generációs reaktorok céljainak elérésére. Azonban az is látható, hogy a koncepció kezdeti kísérleti stádiumban jár. Következésképp ezzel a reaktorkoncepcióval kapcsolatban rengeteg kutatási, fejlesztési munkára van még szükség.

Irodalom

1. Király M.: Lehetséges megoldások az atomenergia-ipar jelenlegi problémáira, I.–II. rész. *Fizikai Szemle* 63 (2013) 121, 162.
2. M. W. Rosenthal, P. R. Kasten, R. B. Briggs: *Molten Salt Reactors – History, Status, and Potential*. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 1969.
3. M. W. Rosenthal: An Account of Oak Ridge National Laboratory's Thirteen Nuclear Reactors. *ORNL/TM* (2009) 181.
4. D. Leblanc: *Molten Salt Reactors: A new vision for a Generation IV concept*. Department of Physics Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada
5. F. N. Peebles: *Removal of Xenon-135 from circulating fuel salt of the MSBR by mass trans to helium bubbles*. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 1968.
6. J. H. Shaffer: *Preparation and handling of salt mixtures for the Molten Salt Reactor Experiment Oak Ridge National Laboratory*. U.S. Atomic Energy Commission, 1971.
7. J. Uhlir: Chemistry and technology of Molten Salt Reactors – history and perspectives. *Journal of Nuclear Materials* 360/1 (2007) 6–11.
8. DOE Fundamentals Handbook: *Nuclear Physics and Reactor Theory*. Vol. 2. U.S. Department of Energy. January 1993. 35–42.
9. E. Merle-Lucotte, et al.: Influence of the reprocessing on Molten Salt Reactor behaviour. *Nuclear Technology* 163/3 (2008) 358–365.