

AZ ATOMERŐMŰVEKBEN KELETKEZŐ RADIOAKTÍV HULLADÉKOK JELLEMZŐI ÉS KEZELÉSÜK

RADIOACTIVE WASTES OF NUCLEAR POWER PLANTS AND THEIR HANDLING

Hózer Zoltán

az MTA doktora, Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest
hozer.zoltan@energia.mta.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

Az atomerőművekben sokféle radioaktív izotóp keletkezik, amelyeket különböző módon kell kezelni. A hűtőközegben megjelenő aktivációs és korróziós termékek egy része az erőmű normál üzemelése során eltávolítható, ezzel a hűtővíz aktivitáskoncentrációját alacsony szinten lehet tartani. A folyékony radioaktív hulladékokat besűrítik, és szilárd csomagokat állítanak elő a végleges elhelyezéshez. Az erőmű szerkezeti elemeinek felületén megjelenő radioaktív szennyeződések dekontaminációs eljárásokkal lehet eltávolítani. A szerkezeti elemekben megjelenő radioaktív izotópokkal az erőmű leszerelésekor is számolni kell. A legtöbb radioaktív izotóp a fűtőelemekben keletkezik. A végleges elhelyezés és a kiegészítő üzemanyag újrahasznosítása szempontjából kiemelt jelentőségű a nagyon hosszú felezési idejű és magas radiotoxicitású transzurán elemek kezelése, amelyre jelenleg nem áll rendelkezésre ipari méretekben alkalmazható technológiai eljárás.

ABSTRACT

The nuclear power plants produce large variety of radionuclides, the handling of which needs different technologies. The activation and corrosion products can be removed from the primary coolant and so the activity concentration can be kept at low level. The volume of liquid radioactive wastes can be reduced and solidified for final disposal. The radioactive deposits from the surface of primary circuit can be removed by decontamination. The activity of the NPP components must be taken during the decommissioning works. Most of the radionuclides are produced inside of the fuel elements. The long lived and highly radiotoxic transuranic elements have high importance from the point of view of reprocessing and final disposal. Today there is no technology for their handling at industrial scale.

Kulcsszavak: atomerőmű, radioaktív izotópok, transzurán elemek

Keywords: nuclear power plant, radioactive isotopes, transuranic elements

BEVEZETÉS

Az atomerőművekben olyan magreakciók mennek végbe, amelyek eredményeként szükségszerűen radioaktív izotópok is képződnek. Ezek többsége a maghasadás helyén az üzemanyag-tablettákban keletkezik, de radioaktív izotópok megjelennek a hűtőközegben és a reaktor és a primerkör szerkezeti elemeiben is. Nagyon sokféle izotópról van szó, amelyek különböző kémiai és fizikai tulajdonságokkal rendelkeznek. Ezért a környezetre gyakorolt hatásuk is nagyon különböző, és az atomerőművön belül vagy azon kívül történő kezelésük is sokféle technológiai megoldást igényel.

RADIOAKTÍV IZOTÓPOK A HŰTŐVÍZBEN

Az atomreaktorban lejátszódó láncreakció során felszabaduló hőenergiát az aktív zónán átáramló hűtővíz veszi át. A hűtővíz aktivitásának domináns részét a ^{16}N izotóp adja, amely a víz oxigénjéből keletkezik neutronbefogással a $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$ reakció során. A nagyon rövid (7,1 másodperces) felezési idejű ^{16}N izotóp gyakorlatilag nem jut ki a környezetbe a gyors bomlás miatt. Az erőművön belül kezelést nem igényel, de hatásával számolni kell az erőműben dolgozók várható sugárvédelmi terhelésének becslésekor. A primerköri hűtőközeg optimális vízkémiai paramétereinek beállításához különböző vegyszereket adagolnak a hűtővízbe. Ezek az adalékok, illetve a bennük található szennyeződések felaktiválódásával több radioaktív izotóp is keletkezik (^{24}Na , ^{42}K , ^{38}Cl). A hűtővízben megjelennek korróziós termékek is, amelyek között egyaránt megtalálhatóak azok a radioaktív izotópok, amelyek az acélkomponensekből (^{51}Cr , ^{55}Fe , ^{59}Fe , ^{54}Mn , ^{56}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co) és az üzemanyag-kazetták cirkóniumötvözetből készült részegységeiből származnak (^{95}Zr , ^{97}Zr , ^{95}Nb , ^{97}Nb). Ha az aktív zónában van szivárgó fűtőelem, vagy a kazetták felületén hasadóanyag szennyezés található, akkor a hűtőközegben a hasadási termékek és a transzurán elemek izotópjai is kimutathatóak különböző mérési módszerekkel.

Az atomerőmű normál üzemelése során a hűtőközeg aktivitáskoncentrációját a megengedett korlátokon belül kell tartani. Ehhez több eszköz is rendelkezésre áll: ioncserélők, szűrők és gáztalanítók. Az erőműben keletkező folyékony radioaktív hulladékokat többféle műszaki eljárás alkalmazásával készítik elő a végleges elhelyezésre. Ezeknek az eljárásoknak (például: bepárlás, lecsapatás, szűrés, extrakció, ionscere) alapvető célja a térfogatcsökkentés, ami természetesen az aktivitáskoncentrációk növelését eredményezi. A paksi atomerőmű jelenleg működő blokkjain alkalmazott technológia lehetővé teszi a radioaktív izotópok jelentős részét adó kobalt- és céziumionok eltávolítását és a hulladék bórsavtartalmának visszanyerését is (Feil et al., 2014). A cseppfolyós halmazállapotú radioaktív hulladékok kezelésének utolsó fázisában cementezéssel vagy bitumenezéssel olyan csomagokat állítanak elő, amelyek alkalmasak a végleges elhelyezésre.

A SZERKEZETI ELEMEK AKTIVITÁSA

Az atomreaktor és a primerkör szerkezeti elemeiben, illetve azok felületén jelentős aktivitás jelenik meg az erőmű sokéves üzemelése során. Ennek a folyamatnak két fő összetevője van:

- A reaktortartály és a reaktor belső szerkezeti elemei közvetlen sugárzásnak vannak kitéve. A neutronsugárzás hatására egyrészt kristályszerkezeti változások mennek végbe az acél- és cirkóniumkomponensekben: rácshibák, vakanciák, diszlokációs hurkok jönnek létre, amelyek hatására megváltoznak az anyagok mechanikai tulajdonságai (Groma et al., 2018). A sugárkárosodás hatásával számolni kell a reaktortartály integritásának értékelésekor is (Trampus, 2003). A nagy energiájú neutronok és az atommagok kölcsönhatása során új izotópok is képződhetnek a szerkezeti elemekben, és ezek egy része radioaktív.
- A hűtőközegben megjelennek korróziós termékek, amelyek a hűtővízzel együtt keringenek a primerkörben. Az aktív zónán áthaladva a vízben oldott izotópok egy részéből új, részben radioaktív izotópok jöhetnek létre. A vízben oldott radioaktív korróziós termékek eljutnak a primerkör reaktortól távoli részébe is, ahol a szerkezeti elemeken (például a gőzfejlesztő csövein) lerakódhatnak. Így nemcsak a reaktor, hanem a primerköri komponensek felülete is felaktiválódik az üzemelés során.

Az atomerőmű biztonságos karbantartása megköveteli, hogy minimalizálják a különböző műveletek során a személyzet által elszenvedett dózist. Ezért azokat a felületeket, ahol jelentős radioaktív szennyeződés jött létre, és ahol a munkavégzésre kerül sor, meg kell tisztítani. A dekontaminálási eljárások alkalmazásával jelentősen csökkenthető a személyzet sugárterhelése (Varga et al., 2010).

A különböző szerkezeti elemek aktivitásának csökkentésére az erőmű leszerelésekor is szükség lesz a végleges elhelyezéssel szemben támasztott követelményeknek megfelelően.

Az említett reaktortartályon és gőzfejlesztőn túl természetesen számos kisebb szerkezeti elem (például szivattyúk, tartályok, ioncserélők, meghajtók) radioaktív szennyeződéseit is kezelni kell az átmeneti tároláshoz és a végleges elhelyezéshez.

A KIÉGETT ÜZEMANYAG ÖSSZETÉTELE ÉS KEZELÉSE

A reaktorban töltött idő alatt az üzemanyag összetétele jelentősen megváltozik (Hózer, 2016). A paksi atomerőműben használt friss üzemanyag urán-dioxid-tablettákból áll, amelyben a hasadóképes ^{235}U izotóp jellemző dúsítása 4-5%. A maghasadások többségében két különböző tömegszámú hasadvány és 2-3 neutron keletkezik. A hasadványokból radioaktív bomlással a hasadási termékek széles

spektruma jön létre. Egyes elemek (például Nd, Ce, Eu) oldódnak a mátrixban, és elfoglalják az elhasadt uránatom helyét. A xenon- és kriptonatomok nemesgáz buborékokat hoznak létre az üzemanyagszemcsén belül, majd a szemcsék között is. A Ba-, Sr- és Zr-oxidok zárványokat képeznek, azaz lekötik az urán-dioxidból – az urán elhasadása után – szabaddá vált oxigénatomokat. A nemesfémek (Ru, Pd, Tc, Rh) pedig fémes zárványokat képeznek, amelyek önállóan jelennek meg az üzemanyagszemcsékben vagy azok felületén.

Az üzemanyagban található ^{238}U izotópból neutronbefogással transzurán elemek jönnek létre (Fehér, 2007). A Np, Pu, Am és Cm izotópjainak jelentős része nagyon hosszú felezési idejű, és sok közöttük az alfa-sugárzó. Ezért radiotoxicitásuk (potenciális egészségkárosító hatásuk) nagyon magas, főleg ha azzal számolunk, hogy beléggzéssel az emberi szervezetbe jutnak. A feldolgozás nélküli kiégett üzemanyag radiotoxicitása több százezer év alatt csökken a természetes urán szintjére. Ha az üzemanyagból sikerül eltávolítani a transzurán elemeket, akkor a természetes urán radiotoxicitási szintjének elérése már ezer éven belül megtörténik (Szieberth, 2016). A felsorolt transzurán elemek közül a Pu keletkezik legnagyobb mennyiségben a kiégés során. A ^{239}Pu és a ^{241}Pu izotópok a jelenleg működő atomerőművek termikus neutronspektrumában is hasadóképesek. Az eredeti ^{238}U tartalom kb. 3-4%-ából keletkezik ^{239}Pu , és ennek a mennyiségnek a fele el is hasad a reaktorban töltött idő alatt. A másodlagos aktinidák (Np, Am és Cm) izotópjainak többsége is hasadóképes, de csak gyorsreaktorokban (Szieberth, 2016; Gadó, 2016).

Az atomreaktorból eltávolított nukleáris üzemanyag speciális tárolást igényel (Nős, 2016). A kiégett fűtőelemekben található radioaktív izotópok erősen sugároznak, és bomlásuk során számottevő hő keletkezik. A kiégett kazettákat először pihentetőmedencékben helyezik el, ahol a hűtővíz keringtetésével oldják meg a hőelvitelt. A magas vízszint és a vastag betonfalak biztosítják a sugárvédelmi árnyékolást. A pihentetőmedencékben garantálni kell a szubkritikus állapotot is, mivel a kiégett kazettákban jelentős mennyiségű hasadóképes urán és plutónium marad. A többéves nedves tárolás során a maradványhő a kazettákban lecsökken, és át lehet szállítani őket a száraztárolókba, ahol már a léghűtés is elegendő a keletkező hő elviteléhez.

Az átmeneti tárolás után a kiégett üzemanyagot vagy feldolgozzák (reprocesszálják), vagy feldolgozás nélkül végleges elhelyezésre kerül mélygeológiai tárolókban.

A végleges elhelyezéshez meg kell várni, hogy a kazetták teljesítménye olyan alacsony szintre csökkenjen, amely nem vezet az üzemanyag felmelegedéséhez a geológiai tárolóban. A kazettákat eredeti állapotukban speciális konténerekben helyezik el. Így megmarad az első két védelmi gát, amit az üzemanyag-tabletta és a fűtőelem burkolata alkot. További mesterséges (konténer, tömedékelés) és természetes (geológiai rétegek) védelmi gátak is akadályozzák a radioaktív izotópok kijutását a bioszférába (Nős, 2016).

A kiegészített üzemanyag feldolgozását elsősorban az motiválja, hogy hasadóanyagot lehet kinyerni a kiegészített fűtőelemekből, és azzal új üzemanyagot lehet gyártani az atomerőművek számára (Hózer, 2016). Ez nagyon fontos lenne az atomerőművek működéséhez, ha nem állna rendelkezésre elegendő természetes urán az üzemanyaghoz. Az elmúlt évtizedek kutatásai azonban azt mutatták, hogy a természetes urántartalékok még hosszú ideig ki tudják elégíteni a több mint négyszáz működő atomerőművi blokk igényeit (NEA/IAEA, 2019). A kiegészített üzemanyag ciklikus reprocesszálása gyorsreaktoros atomerőművek működése esetén jelent optimális megoldást (Gadó, 2016), de jelenleg csak néhány ilyen blokk működik az egész világon.

A kiegészített üzemanyag feldolgozására meglehetősen bonyolult vegyipari és pirometallurgiai módszereket dolgoztak ki. A legelterjedtebb a Plutonium and Uranium Recovery by Extraction (PUREX) eljárás, amelynek lényege, hogy az üzemanyagot először forró salétromsavban feloldják, majd tributil-foszfát hozzáadásával elkülönítik az uránt és a plutóniumot. A reprocesszáló üzem létesítése hatalmas beruházást igényel, ezért csak néhány működik az egész világon (például Franciaországban és Oroszországban). Reprocesszáló üzem nem érdemes minden országban létesíteni, főleg nem minden atomerőmű vagy átmeneti tároló mellett, hanem inkább nemzetközi együttműködések keretében célszerű megoldani a feldolgozást.

A másodlagos aktinidák transzmutációja egy elméletileg lehetséges megoldás a kiegészített üzemanyag radiotoxicitásának csökkentésére (Szieberth, 2020). Ehhez azonban mindenképpen fel kell dolgozni a kiegészített fűtőelemeket, hiszen a transzmutációs berendezéssel nem lehet a kiegészített üzemanyagot közvetlenül kezelni. A transzmutációs berendezésben előállított, megfelelő energiájú neutronok nemcsak a transzurán elemeket képesek elhasítani, hanem más magreakciókra is képesek, amelyek eredményeként újabb radioaktív izotópok jöhetnek létre. Ezért a berendezésbe nagy tisztaságú céltárgyakat kell elhelyezni, a transzmutációval kezelhető anyagok elválasztására, kondicionálására laboratóriumi léptékben történtek vizsgálatok, de az ipari méretű alkalmazás még nagyon messze van. Ha a reprocesszálási igények lecsökkennek, mert az atomerőművek nem igénylik a kiegészített üzemanyagból származó plutóniumot, akkor a kiegészített üzemanyag feldolgozásának költségei jelentősen meg fogják haladni a mélygeológiai tároló létesítésének költségeit (MIT, 2011). Ilyen körülmények között a kiegészített üzemanyag reprocesszálása gazdasági szempontból kérdéses lesz.

A transzmutáció gyakorlati megvalósításához számos műszaki problémát meg kell oldani. Ezek közül az egyik az optimális neutronforrás létrehozása (Szieberth, 2020; Osvay–Szabó, 2020), de ez önmagában nem elegendő ahhoz, hogy a kiegészített üzemanyag radiotoxicitását csökkenteni lehessen.

KÖVETKEZTETÉSEK

Az atomerőművekben keletkező radioaktív anyagok kezelésére kiforrott technológiai eljárások léteznek. Ezek alkalmazása lehetővé teszi, hogy a radioaktív izotópokat tartalmazó hulladékok ne jelentsenek veszélyt se a környezetre, se az atomerőműben dolgozóakra. A kiégett üzemanyag végleges elhelyezésének előkészítésére további kutatások folynak, amelyek egyik fontos célja az, hogy a mélygeológiai tárolóban elhelyezett üzemanyag radiotoxicitása minél rövidebb idő alatt csökkenjen le a természetes urán radiotoxicitásának szintjére. Ebben a tekintetben a legfontosabb kihívást a transzurán elemek semlegesítése jelenti, amire több technológiai fejlesztés is folyamatban van különböző laboratóriumokban.

IRODALOM

- Fehér S. (2007): Radioaktív hulladékok transzmutációja. *Magyar Tudomány*, 1, 36–39. <http://www.matud.iif.hu/07jan/09.html>
- Feil, F. – Elter, E.– Otterbein, J. et al. (2014): Folyékony radioaktív hulladékok térfogatcsökkentése az MVM Paksi Atomerőműben. *Nukleon*, VII, 167, https://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/7_3_167_Feil.pdf
- Gadó J. (2016): Gyorsreaktorok az üzemanyagciklusban. *Magyar Tudomány*, 5, 552–559. <http://www.matud.iif.hu/2016/05/06.htm>
- Groma I. – Szenthe I. – Ribárik G. et al. (2018): Atomreaktorokban használható cirkónium-ötvezetek mikroszerkezetének meghatározása röntgenvonalprofil-analízissel. *Fizikai Szemle*, LXVIII, 420–425. <http://fizikaiszemle.hu/szemle/tartalom/44>
- Hózer Z. (2016): A kiégett üzemanyag jellemzői és feldolgozása. *Magyar Tudomány*, 5, 534–540. <http://www.matud.iif.hu/2016/05/04.htm>
- MIT (2011): *The Future of the Nuclear Fuel Cycle*. An Interdisciplinary MIT Study. <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2011/04/MITEI-The-Future-of-the-Nuclear-Fuel-Cycle.pdf>
- NEA/IAEA (2019): *Uranium 2018: Resources, Production and Demand*. Paris: OECD Publishing, DOI: 10.1787/uranium-2018-en
- Nős B. (2016): A kiégett üzemanyag kezelésének nemzeti programja, *Magyar Tudomány*, 5, 527–533. <http://www.matud.iif.hu/2016/05/03.htm>
- Osvay K. – Szabó G. (2020): Lézeres neutronforrás fejlesztése. *Magyar Tudomány*, 181, 12, 1586–1602. DOI: 10.1556/2065.181.2020.12.3
- Szieberth M. (2016): A nukleáris üzemanyag-ciklus zárásának lehetőségei. *Magyar Tudomány*, 5, 541–551. <http://www.matud.iif.hu/2016/05/05.htm>
- Szieberth M. (2020): A transzmutáció mint a nukleáris hulladékok kezelésének egy lehetséges útja. *Magyar Tudomány*, 181, 12, 1609–1620. DOI: 10.1556/2065.181.2020.12.5
- Trampus P. (2003): A reaktortartály szerkezeti integritása. *Magyar Tudomány*, 11, 1425–1436. <http://www.matud.iif.hu/03nov/010.html>
- Varga K. – Horváthné Deák E. – Nagyné Szabó A. et al. (2010): Atomerőművi kémiai dekontaminációs technológia fejlesztése. *Nukleon*, 3(3)70, 1–6. https://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/Nukleon_3_3_70_Varga.pdf