

5. ábra. Az ALLEGRO felépítése

toros megoldás lehetővé teszi a primerköri kényszeráramoltatás csökkenő mértékű folytatását a reaktor leállítása után is.

A reaktor primerkörét körülvevő speciális biztonsági tartály feladata, hogy a primerköri hélium hűtőközeg elvesztése ellenére a nyomás olyan magas maradjon, hogy a kényszeráramoltatás folytatható legyen. A speciális biztonsági tartály ipariilag lehetséges legmagasabb nyomását meg kell határozni.

A reaktorban a zóna olvadását gyakorlatilag ki kell zárni. A reaktort olyan konténmenttel és zónaolvadékot felfogó rendszerrel kell ellátni, hogy még súlyos baleset bekövetkezése esetén se legyen szükség a reaktor 800 méteres körzetén kívül semmiféle rendkívüli egészségügyi intézkedésre.

Amint látható, a feladatok sora nem rövid, és ezek csak a koncepció átdolgozásával kapcsolatos feladatok. Ezekén túlme-

nően természetesen intenzíven kell foglalkozni olyan eleve ismert kérdésekkel, mint a hélium visszatartása vagy speciális mérőrendszer kidolgozása (ami a gáz átlátszósága miatt teljesen újszerű technikák bevezetését vetíti előre).

2018 végén látni fogjuk, hogy a fenti feladatok megvalósíthatóak-e, és pozitív esetben megkezdődhet a koncepció részleteinek kidolgozása. ▣

## Irodalom

Az alábbi szakirodalmakból bővebb tájékoztatás nyerhető az egyes témákról.

Gyorsreaktorok: Status of Fast Reactor Research and Technology Development, IAEA-TECDOC-CD-1691, IAEA, Vienna, 2013

4. generációs atomreaktorok fejlesztése: Generation IV Nuclear Reactors, [www.world-nuclear-org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx](http://www.world-nuclear-org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx)

Reprocesszálás: Spent Fuel Reprocessing Options, IAEA-TECDOC-1587, 2008

Becsült uránkészletek: Uranium 2016: Resources, Production and Demand, OECD 2016 NEA No. 7301 (<https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf>)

FR17 konferencia: Proceedings of the International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Ekaterinburg, 25-29 June, 2017, IAEA, Vienna

HÓZER ZOLTÁN

# Atomerőművi fűtőelemek

Az első atommérnök, Wigner Jenő terveit megalapozták az atomenergetika fejlődését. A ma működő atomerőművek a közel hetven évvel ezelőtt lefektetett elveken üzemelnek, műszaki megoldásaik azonban jelentősen eltérnek az első reaktorokétól. Az atomerőmű egyik legfontosabb eleme a fűtőelem. Az alábbi írásban ennek jellemzőiről lesz szó néhány hazai kutatási eredménnyel illusztrálva.

## Az atomerőművek üzemanyaga

Az atomerőművek reaktoraiban a maghasadások a fűtőelemekben mennek végbe. A fűtőelemek konstrukciója viszonylag egyszerű: az urán-dioxid tablettákat tartalmazó cirkónium csöveket záródugók-

kal hermetikusan lezárják és a tablettaszlop hőtágulását egy rugóval kompenzálják (1. ábra).

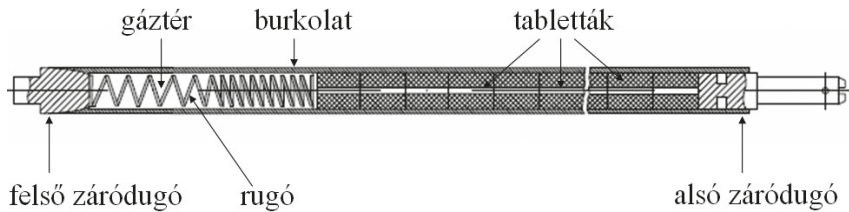
Az urán-dioxidot – azon túl, hogy megfelelő mennyiségű hasadóanyagot tartalmaz – számos egyéb tulajdonsága is alkalmazható arra, hogy több évig üzemeljen a reaktorban. Az  $\text{UO}_2$  megőrzi geometriai méreteit, a hőmérséklet és a besugárzás csak kismértékű változásokat okoz a tablettá formájában és nagyságában. Hőtani jellemzői megakadályozzák, hogy üzemeltetés közben az üzemanyag megolvadjon, kémiaiailag összeférhető a burkolatanyaggal és a hűtőközeggel.

Az atomerőművi fűtőelemek burkolatát elsősorban azért készítik cirkónium-ötvözetből, mert a cirkónium kis neutronbefogási hatáskeresztmetszettel rendelkezik, azaz gyakorlatilag átlátszó

a neutronok számára. További előnyös tulajdonsága, hogy nem lép intenzív kémiai kölcsönhatásba a tablettával és jó korrózióállóság jellemzi vizes közegben. A cirkónium-ötvözeteknek megfelelő sugárállóságuk és a rozsdamentes acélokhoz hasonló mechanikai szilárdságuk van.

A fémcirkónium korrózió- és sugárállósága, valamint mechanikai tulajdonságai ötvöző elemek hozzáadásával optimalizálhatóak a reaktorokra jellemző körülményekre. A néhány tized, vagy 1–2%-ban hozzáadott ötvözők jelentősen ronthatják a fűtőelem reaktorfizikai tulajdonságait, ezért elsősorban olyan elemeket használnak ötvözőként, amelyeknek kicsi a neutronbefogási hatáskeresztmetszetük.

A nagy teljesítményen üzemelő atomerőművi reaktorokban több tízezer fűtőelem alkotja az aktív zónát. A fűtő-



1. ábra. VVER-440 típusú fűtőelem

elem-pálcákat nem egyesével rakják be a reaktorba, hanem kazettákat szerelnek össze belőlük, amelyeket az erőművi átrakógép önállóan tud mozgatni. A jelenlegi VVER-440 típusú paksi blokkokon egy kazetta 126 fűtőelemet tartalmaz. Az újabb blokkok VVER-1200 reaktorainak kazettáiban pedig 312 fűtőelemmel számolnak. A kazetták szerkezeti elemei biztosítják azt is, hogy fűtőelemek közötti távolság a terveknek megfelelően állandó legyen (2. ábra).

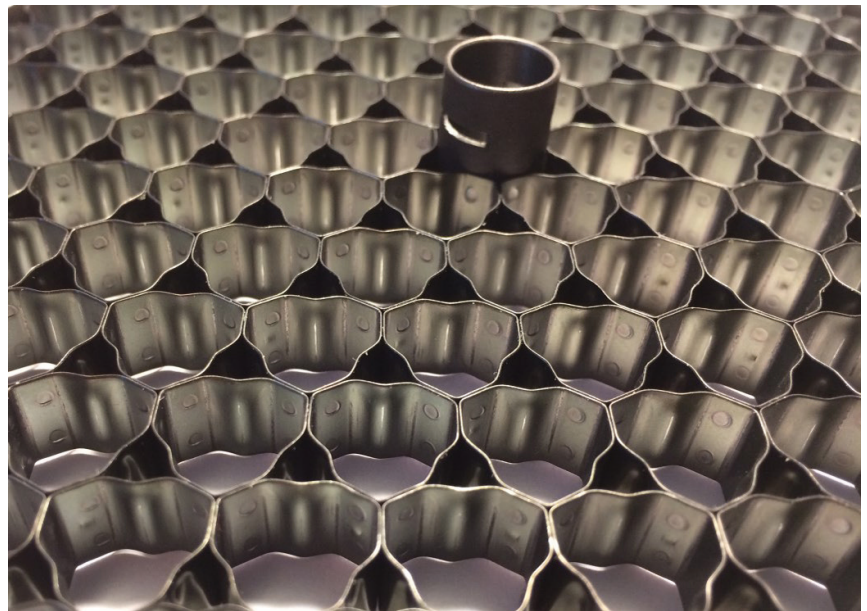
### Az üzemelés során fellépő változások

A fűtőelemek több évet töltenek a reaktorban nagyon komoly terhelés alatt. A maghasadás során keletkező nagyenergiájú hasadási termékek és neutronok szerkezeti változásokat okoznak a tablettákban és burkolatban. A magas hőmérséklet és nyomás pedig hőtechnikai és mechanikai igénybevételt jelent.

Az urán- és plutóniumatomok hasadásakor különböző kémiai tulajdonságokkal rendelkező hasadási termékek jelennek meg az üzemanyagban. Néhány elem (Nd, Ce, Eu) oldódik a mátrixban és elfoglalja az elhasadt uránatom helyét a kristályrácsban. A nemesgázok (Xe, Kr) gázbuborékokat képeznek. A Ba, Sr, Zr oxidzárványokat hoz létre, a nemesfémekből (Ru, Pd, Tc, Rh) pedig fémes zárványok jönnek létre. Az  $^{238}\text{U}$  izotópból neutronbefogással plutónium és további aktinidák (Np, Am, Cm) keletkeznek, a tablettá szélén egy plutóniumban gazdag peremréteg alakul ki. A hasadóképes  $^{239}\text{Pu}$  megjelenése miatt a tablettá peremrétegében megnő a hasadások száma, a hasadási termékek mennyisége. Az összetétel változása és az eredetileg homogén, szemcsés mikroszerkezet átalakulása a tablettá duzzadásához és hővezetésének romlásához vezet.

A burkolat átmérője a besugárzás és a magas hűtőközeg oldali nyomás hatására csökken, ezzel együtt a pálcák hossza növekszik. A tervezéskor a kazettákban szabad térfiguratot hagynak a pálcák fölött, hogy ez a méretnövekedés ne okozzon olyan feszültségeket, amelyek a fűtőelem integritását veszélyeztetnék. Annak elle-

nére, hogy az erőművekben nagy gondot fordítanak a hűtőközeg tisztaságának megőrzésére, a több éves üzemelés alatt a cirkónium burkolaton oxidréteg jön létre és a radiolízis, illetve a korróziós folyamatok során keletkező hidrogén egy része is beépülhet burkolatba. A burkolat így veszíthet képlékenységből és bizonyos mértékben elridegedhet, kisebb terhelést tud elviselni. A cirkóniumötvözetek korrózióállósága jól javítható bizonyos ötvözőe-



2. ábra. A VVER-440 típusú kazetta távtartórácsa

lemekkel, például a nióbbiummal, ezért a paksi blokkokon is nióbbiummal ötvözött cirkóniumot használnak.

A burkolatban és a tablettában végbe-menő változások hatással vannak a fűtőelem pálcá egészének állapotára is. A tablettá duzzadása és a burkolat kúszása miatt a tablettá és a burkolat felülete között mechanikai és kémiai kölcsönhatások léphetnek fel. A hasadási gázok felhalmozódása pedig növeli a fűtőelem belsejében a gáznyomást. Ezekkel a folyamatokkal már az üzemanyag tervezésekor is számolni lehet. A fűtőelemeket úgy tervezik meg és a reaktor üzemelését is úgy alakítják ki, vagy szükség esetén úgy korlátozzák, hogy a

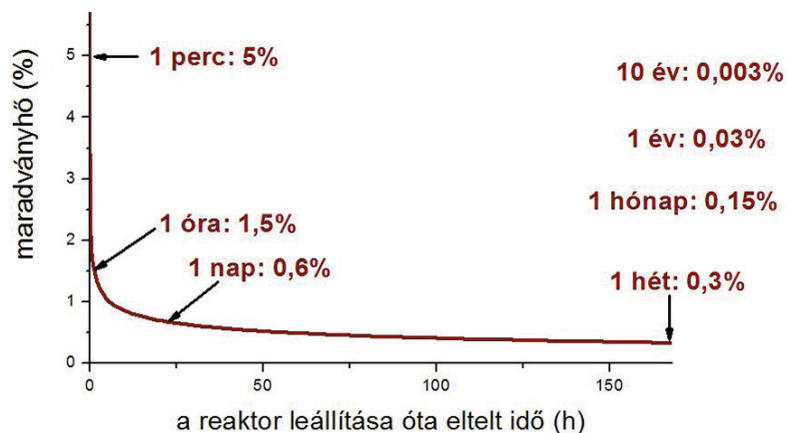
belső gáznyomás vagy a tablettá és a burkolat közötti kontaktus se vezethessen a fűtőelemek sérüléséhez.

### A kiégett üzemanyag tárolása

A reaktorban eltöltött évek alatt az üzemanyag összetételének változása – a hasadóanyag-tartalom csökkenése és a reaktor üzemelés szempontjából kedvezőtlen tulajdonságú hasadási termékek felhalmozódása – miatt a kazettát nem lehet tovább használni, a reaktor leállítása után friss üzemanyagra kell kicserélni. A reaktorból eltávolított, kiégett kazettában jelentős mennyiségű radioaktív hasadási termék van, ezért az üzemanyagban folyamatosan radioaktív bomlások mennek végbe. Vannak nagyon hosszú felezési idejű izotópok a hasadási termékek és az aktinidák között, ezért a kiégett kazetta sugárzásával hosszú távon számolni kell. A sugár-

zás ellen megfelelő árnyékolással lehet és kell védekezni. Ezért a kazetták tárolására használt pihentető medencében magas vízszintet tartanak a kazetták fölött és a medencét vastag betonfal alkotja. A kiégett üzemanyag hasadóanyag tartalma miatt a tárolókat úgy kell kialakítani, hogy semmilyen körülmények között ne alakulhasson ki kritikus állapot, azaz ne indulhasson be a láncreakció.

A radioaktív bomlás a kiégett kazettákban hőfejlődéssel jár, ez az úgy nevezett maradványhő. A kazetták teljesítménye a reaktor leállása után kezdetben gyorsan csökken, 1 órával a leállást követően csak az eredeti teljesítmény 1,5%-ával kell szá-



3. ábra. Maradványhő a kiégett üzemanyagban

molni (3. ábra). A következő időszakban azonban lassul ez a tendencia és egy héttel a leállítás után még 0,3%, majd egy évvel később még 0,03% hőteljesítmény elviteléről kell gondoskodni. Ez a paksi kazetták esetében egy év után még több mint 1 kW hőfejlődést jelent.

A kazetták hűtéséről hosszú időn keresztül gondoskodni kell. A reaktorból eltávolított üzemanyagot először a reaktor közvetlen közelében található pihentető medencében helyezik el, ahol több évig tárolják. A pihentető medence vizét egy önálló hűtőkör tartja állandó hőmérsékleten.

Néhány év tárolás után a kazetták teljesítménye pár száz wattra csökken és akkor már át lehet őket szállítani a kiégett kazetták átmeneti tárolójában. Ez a tároló az atomerómű közvetlen szomszédságában található. Minden kazettát külön-külön függőleges tárolócsövekben helyeznek el, amelyek nitrogénnel vannak feltöltve. A nitrogén atmoszférával elkerülhető az üzemanyag oxidációja. A hatalmas kamrákba beépített függőleges csöveket kívülről levegő hűti, ami az épület folyosóin és kéményein keresztül, természetes cirkulációval viszi el a maradványhőt a kazettákból. Az átmeneti tárolót több évtizedes üzemelésre tervezték.

A kazettákban a radioaktív bomlások miatt egyre csökken a radioaktív izotópok mennyisége és ezzel párhuzamosan a maradványhő is. A kiégett üzemanyag – amennyiben a benne lévő hasadóanyag hasznosítása céljából nem kerül újrafeldolgozásra – végleges elhelyezésre kerülhet a mélygeológiai tárolóban. Ilyen tároló hazánkban egyelőre nem üzemel, az első mélygeológiai tárolókat néhány éven belül Finnországban és Svédországban kezdik meg kiégett üzemanyaggal feltölteni.

### Üzemzavarok és balesetek

Az atomeróművek üzemanyagát úgy tervezik meg, hogy az előzőekben leírt életút (több év reaktorban töltött idő, átmeneti tárolás a pihentető medencében és a száraz tárolóban) során várható terheléseket nagy biztonsággal elviselje, és ne jöjjenek benne létre olyan változások, amelyek a fűtőelemek épségét veszélyeztetve radioaktív kibocsátásokhoz vezethessenek. A normál üzemi állapotokon túl a fűtőelemek tervezésekor figyelembe kell venni azokat az üzemzavari állapotokat is, amelyek ha csak kis valószínűséggel is, de bekövetkezhetnek az erőműben.

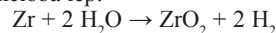
A csernobili és fukusimai balesetek példája azt mutatta, hogy nem zárható ki teljesen olyan balesetek bekövetkezése sem, amelyek a fűtőelemek sérülésé-

a maradványhő elvitelét folyamatosan biztosítani kell. Ha a hőelvitel nem megfelelő mértékű, akkor a fűtőelemek felmelegednek és különböző fizikai és kémiai folyamatok a pálcák épségének elvesztéséhez vezethetnek. A következő részben röviden áttekintjük ezeket a folyamatokat.

A hűtés nélkül maradt aktív zónába a felhevült cirkónium burkolat jelentősen veszít mechanikai szilárdságából, csökken az ötvözet folyáshatára és a hasadási gázok okozta magas belső nyomás hatására deformáció jöhet létre. A felfűvődött burkolat fala elvékonyodik és fel is hasadhat (4. ábra). A kazettában a fűtőlempálcák között csak néhány mm távolság van, ezért a burkolatok felfűvődése részben elzárhatja azt a szabad keresztmetszetet, ahol hűtőközeg áramlik.

Magas hőmérsékleten megváltozik a cirkónium ötvözetek kristályszerkezete is. Az eredetileg hexagonális szoros illeszkedésű  $\alpha$ -fázisból 600–900 °C között térfokozepes köbös  $\beta$ -fázis jön létre, amit a mechanikai tulajdonságok változása kísér.

A normál üzemelés során, vizes közegben nagyon jó korrózióállóságú cirkónium magas hőmérsékletű vízgőzzel intenzív reakcióba lép:



Az exoterm reakcióban 1 kg cirkónium oxidációja során 6,4 MJ energia szabadul fel. 1200 °C fölötti hőmérsékleteken az intenzív kémiai reakció gyors hőmérsékletmegszaladást okozhat.

Az oxidáció során a fém felületén oxidréteg képződik, továbbá az elnyelt oxigén egy része bediffundál az oxidréteg alatti fémbe. Így az oxidréteg alatt egy oxigéndús  $\alpha$ -réteg alakul ki, a burkolat



4. ábra. 800 °C-os hőmérsékleten végrehajtott kísérletben felhasadt cirkónium burkolat

vel, vagy a zóna megolvadásával járnak. Ezekben a baleseti állapotokban a radioaktív anyagok környezeti kikerülését úgy lehet megakadályozni, hogy megfelelő méretezéssel és műszaki megoldásokkal megőrzik az erőmű további védelmi gátjainak – elsősorban a reaktortartályt is magában foglaló konténment épületnek – az épségét.

Az üzemzavarok és balesetek elején az atomerómű biztonságvédelmi rendszerei – a jellemző paraméterek nem megengedhető mértékű változása miatt – működésben lépnek és leállítják a láncreakciót. A reaktor teljesítménye gyorsan csökken, de

belsejében pedig egy alacsony oxigéntartalmú  $\beta$  réteg marad. Az oxidáció során keletkező hidrogén egy részét ugyancsak elnyeli a fém, a hidrogén elsősorban a belső  $\beta$  rétegben halmozódik fel. A felületen általában zárt oxidréteg képződik, de egyes ötvözeteken bizonyos hőmérsékleti tartományokban leváló oxidrétegek jönnek létre. Minden egyes réteg leválása után szabad fém felülettel érintkezhet a gőz, ez felgyorsítja a reakciót és megkönnyíti a hidrogén bejutását a fémbe.

A cirkónium ötvözet összetételének és szerkezetének említett változásai jelentősen csökkentik a burkolat képlékeny-

ségét. Az oxidáció és a hidrogénfelvétellel mértékének növekedése olyan rideg állapothoz vezethet, amikor a burkolat teherbíróképessége már nem tudja elviselni az üzemzavar során fellépő terheléseket (5. ábra). Az egyik legnagyobb terhelés, amivel ilyen esetekben számolni kell, a vészhűtőrendszerből beáramló nagy tömegű hidegvíz, ami egyszerre okoz termikus és mechanikai feszültségeket.

A burkolat sérülése után kikerülnek a fűtőelemből a tableta és a burkolat közötti részben a normál üzemelés során felhalmozódott hasadási termékek. A további felmelegedés következtében a tableta repedezésével és később olvadásával a radioaktív izotópok kibocsátása folytatódik. A nemesgázok (Xe, Kr) és a magas hőmérsékleteken illékony hasadási termékek (I, Cs, Ag, Cd, Sb, Sn, Te, Rb) kikerülése folyamatosan nő a hőmérséklet emelkedésével. A kevésbé illékony elemekből (Ba, In, Mo, Tc, Ce, Eu, La, Nb, Ru, Sr, Y) kisebb mértékű kikerülés várható.

Súlyos balesetekben a felmelegedés a zóna megolvadásához vezethet. Nagyon fontos paraméter a zóna felmelegedésének sebessége, amely részben a zóna maradványhőjétől, részben pedig a zónába kerülő hűtőközeg mennyiségétől függ. Ha ez az érték  $1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ , akkor a szárazon maradt zóna megolvadásához félóra is elegendő, míg  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  sebességnél több mint két óra is eltelik az olvadásig.

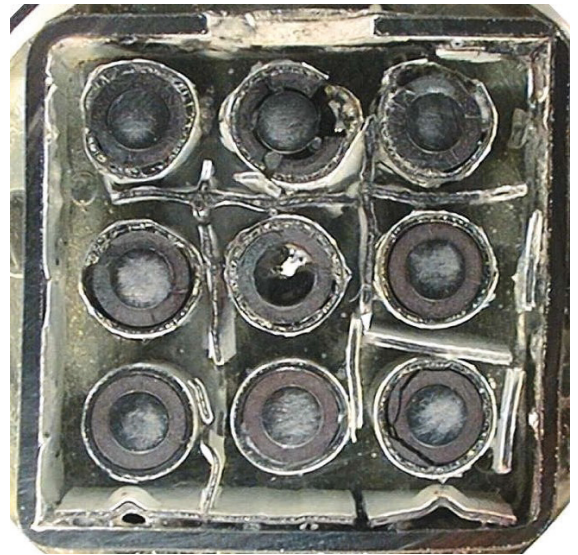


5. ábra. Ridegtörést szenvedett, oxidált, kísérleti fűtőelemköteg

Az aktív zóna szerkezeti elemei közül az acélok rendelkeznek a legalacsonyabb olvadásponttal, ezért  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$  elérése után a kazetták bizonyos részegységei, valamint a szabályozó rudak burkolata fog először megolvadni. A nem oxidálódott cirkónium ötvözetek olvadása  $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$  fölött kezdődik meg. Az olvadt

cirkónium oldja az urán-dioxidot, továbbá kémiai reakció során cirkónium-dioxid és fém urán képződhet. Az  $\text{UO}_2$  tabletták olvadása  $2800\text{ }^{\circ}\text{C}$  körül lép fel. A fűtőelemek megolvadása miatt természetesen már nem lehet számolni az eredeti, hűthető kazetta geometriával. A zóna átrendeződik, a sérült fűtőelemdarabok, olvadékok a gravitáció hatására lefelé indulnak és a reaktortartály alján olvadékmedence jöhet létre.

A vastag falú reaktortartály és az olvadékmedence kölcsönhatása idővel elvezethet a tartályfal olyan mértékű elvékonyodásához, amikor a tartály alja leszakad. A tartály sérülése elkerülhető, ha a reaktor külső felületét hűtik és elviszik az olvadékmedence maradványhőjét. Ilyen megoldást dolgoztak ki a paksi atomerőműben is, ahol szükség esetén a tartálynak helyet adó reaktorakna vízzel elárasztható. A felmelegedett víz természetes cirkulációval viszi el a hőt és hűti a tartályt. A tartály külső hűtése csak kisteljesítményű reaktorokra alkalmazható, ezért az új paksi blokkokra más megoldást kellett kifejleszteni.



6. ábra. Kísérleti fűtőelemköteg metszete légbetöréses baleset szimulációja után

dék a tartályfalra kisebb hőfluxussal adja át a maradványhőt, ezért hűtése egyszerűbb.

A tartály sérülése után levegő juthat a reaktorba. Ha csak a zóna közepe olvadt meg, a zóna szélén lévő kazetták pedig helyükön maradtak, akkor a beáramló levegő intenzív kölcsönhatásba léphet a fűtőelemekkel. A cirkónium levegőben még intenzívebben oxidálódik és az oxidok mellett nitridek is képződnek (6. ábra). A hőmérséklet megszaladás ilyen körülmények között gyorsabb, mint vízgőzben. A hasadási termékek közül a ruténium levegőn oxidálódik és gáznemű oxidok képződnek, amelyek könnyebben kijuthatnak környezetbe.

A felsorolt folyamatok jól illusztrálják, hogy milyen komplex folyamatok mehetnek végbe az atomerőművi fűtőelemekkel. Az első reaktorokban – amelyek tervezésében Wigner Jenőnek komoly szerepe volt – a sokkal kisebb teljesítmény miatt ezekkel a jelenségekkel még nem kellett számolni, ugyanakkor számos alapvető problémát meg kellett oldani, és ezek a megoldások azóta is a fontosak az újabb reaktorok tervezéséhez, üzemeltetéséhez.

## Irodalom

- B.R. Sehgal: Nuclear Safety in Light Water Reactors: Severe Accident Phenomenology, Academic Press 2012.
- Csom Gy.: Atomerőművek üzemtana, II. kötet, Az energetikai atomreaktorok üzemtana, 4. rész, 2012.
- Elter J., Gadó J., Holló E., Lux I.: Atomreaktorok biztonsága I., ELTE Eötvös kiadó, 2013.
- Hózer Z.: Az új paksi reaktorok üzemanyaga, Fizikai Szemle, 2015. december, 417-419