



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VEGYÉSZMÉRNÖKI ÉS BIOMÉRNÖKI KAR
OLÁH GYÖRGY DOKTORI ISKOLA

RUTÉNIUM VISELKEDÉSE LEVEGŐBETÖRÉSES REAKTORBALESET SORÁN

Tézisfüzet

Szerző: Vér Nóra

Témavezető: Dr. Hózer Zoltán



Magyar Tudományos Akadémia
Energiatudományi Kutatóközpont
Fűtőelem és Reaktoranyagok Laboratórium

2013

1. Bevezetés

A súlyos baleseti kutatások kezdetben elsősorban a gázhalmazállapotú és az illékony hasadási termékek kibocsátásával számoltak, míg a kiégett üzemanyagban fémzárványok formájában kiváló nemesfémeket, köztük a ruténiumot, a nem-illékony elemek közé sorolták, nem feltételezve számottevő kikerülésüket a sérült fűtőelemből egy reaktorbaleset során. Ez a feltételezés mérsékelt magas hőmérséklettartományig (2000-2050 °C alatt) és gyengén oxidáló atmoszférában igaz.

A csernobili reaktorbaleset és a későbbi vizsgálatok azonban rámutattak arra, hogy erősen oxidáló körülmények között, különösen levegőbetörés esetén, a fém ruténium már közepesen magas hőmérsékleten illékony RuO_3 -dá és RuO_4 -dá oxidálódhat és csaknem 100%-ban kikerülhet a sérült fűtőelemből. A Ru oxidációjához a Zr burkolat és az UO_2 tableta lokális oxidáltsága szükséges, így a Ru kibocsátás kinetikája az üzemanyag oxidációs kinetikájának és a Ru oxidációs kinetikájának lesz függvénye. A ruténium oxidjai közül a RuO_4 metastabil állapotban részben gázhalmazállapotú marad szobahőmérsékletig, és elérheti a konténment épületét.

A ruténium oxidjainak ez az illékonyasága, valamint a hasadási termék ruténium számottevő mennyisége a kiégett üzemanyagban és jelentős rövid- és közepes-távú radiológiai hatása, ^{103}Ru ($t_{1/2}=39,3$ d) és ^{106}Ru ($t_{1/2}=368,2$ d) β^- -bomló izotópjai révén, teszi ezt az elemet jelentőssé a forrástag becslésben.

Jóllehet számtalan kísérlet foglalkozott a ruténium kibocsátás jelenségének vizsgálatával, egy levegőbetöréses súlyos reaktorbaleset következményeinek előrejelzése még mindig kihívást jelent, és további modellfejlesztéseket igényel a súlyos baleseti kódokban. A SARNET (Severe Accident Research Network) program egy munkacsomagja foglalkozik a ruténium kibocsátására és transzportjára vonatkozó információk összegyűjtésével az európai ASTEC (Accident Source Term Evaluation Code) súlyos baleseti kódban a megfelelő modellek validálása és továbbfejlesztése/javítása céljából.

A közelmúltban ezért számos, a ruténium súlyos baleseti körülmények közötti kémiájával kapcsolatos vizsgálatot folytattak világszerte. 2002-ben hasonló céllal indult meg az MTA Atomenergia Kutatóintézetében a RUSSET (RUthenium Separate Effect Test) kísérleti program is.

A RUSSET program fő célkitűzése egy levegőbetöréses reaktorbaleset során a ruténium-oxidok primerkörben várható viselkedésének: kiválásának és újbóli elpárolgásának, azaz a gázhalmazállapotú ruténium-vegyületek reaktor hűtőrendszerén keresztüli lehetséges transzportjának vizsgálata volt egyszerűsített modellkísérletekben. Az egyes hatásokat külön vizsgáló kísérletekből származó eredmények fontos információkat szolgáltathatnak a súlyos baleseti kódok fejlesztéséhez, valamint az integrális tesztekben tapasztalt jelenségek értelmezéséhez.

2. Célkitűzések

A ruténiummal foglalkozó irodalomból ismert, hogy a $\text{RuO}_4(\text{g})$ kis része nem bomlik el hűtés közben, és metastabil állapotban észlelhető mennyiségben létezik szobahőmérsékleten^{1,2}. Munkám elsődleges célja ennek az el nem bomló $\text{RuO}_4(\text{g})$ hányadnak, amely egy levegőbetöréses reaktorbaleset során potenciálisan elérheti a konténmentet, a kvantitatív meghatározása volt, illetve azoknak a lehetséges tényezőknek az azonosítása, amelyek egy súlyos reaktorbaleset esetén a $\text{RuO}_4(\text{g})$ gázfázisban maradó mennyiségét befolyásolhatják.

Így célul tűztem ki annak vizsgálatát, hogy a különböző hasadási termékekkel magas hőmérsékleten, levegő atmoszférában lejátszódó reakciók milyen hatással vannak a lehűlt levegőárammal távozó gázhalmazállapotú Ru mennyiségére.

Céziium-rutenát esetleges képződése növelheti a Ru illékonyságát egy levegőbetöréses reaktorbaleset során³. Ezért vizsgálni kívántam, hogy a Cs_2RuO_4 lehetséges képződése (a ruténium-oxidok céziium vegyületekkel történő magashőmérsékletű reakciója) hogyan befolyásolja a gázfázisban maradó ruténium mennyiségét a kilépő lehűlt levegőben.

A hasadási termékek közül a céziium⁴ és a molibdén ruténiuménál jóval nagyobb illékonysága következtében egy súlyos baleseti szcenárió során a reaktor hűtőkörének hideg felületein korábban fog lerakódni, mint a ruténium-oxidok. Ezért vizsgálni szándékoztam a csökkenő hőmérsékletű térben a Mo- és Cs-oxid lerakódás ruténium-oxidok bomlására/kiválására gyakorolt hatását, valamint a Cs/Cs-oxid lerakódásnak az irodalomban már említett⁵ esetleges Ru megkötő képességét is.

Egy levegőbetöréses baleset esetén a ruténium vegyületeknek a reaktor hűtőkörében való visszatartására és re-evaporációjára vonatkozó adatok szűkösek⁶. Levegőbetörés során a reaktor hűtőrendszerének acélfelületei oxidálódni fognak. Ezért a ruténium primerkörben várható viselkedésének: kiválásának és újbóli elpárolgásának vizsgálatát terveztem a csökkenő hőmérsékletű térben rozsdamentes acél és oxidált rozsdamentes acél felületek mellett végzett vizsgálatokkal.

A hőmérséklet-gradiens mentén az acélfelületek ruténium-oxidok bomlására gyakorolt hatását össze kívántam hasonlítani egyéb: kvarc, alumínium-oxid, cirkónium és oxidált cirkónium felületek hatásával. Az irodalomban ugyanis számos helyen említik, hogy a RuO_4 bomlását (alacsony hőmérsékleten, 100-150 °C körül) a rozsdamentes acél, az oxidált rozsdamentes acél, a kvarc/üveg felületek, valamint a tiszta felülethez képest az azon már jelenlévő/lerakódott RuO_2 kristályok katalizálják. A különböző anyagi minőségű felületek ruténium-oxidok kiválására és re-evaporációra gyakorolt hatását egyéb hasadási termékek jelenlétében is vizsgálni kívántam.

¹ H. Schäfer, et al., Z. Anorg. Allg. Chem. 319 (1963) 327-336.

² W. E. Bell and M. Tagami, J. Phys. Chem. 67 (1963) 2432-2436.

³ E. H. P. Cordfunke, et al., J. Chem. Thermodyn. 24 (1992) 725-728.

⁴ D. S. Cox, et al., AECL-10438 (1991).

⁵ T. Kärkelä, et al., SARNET-ST-P58, VTT-R-01252-07 (2007).

⁶ D. A. Powers, et al., NUREG/CR-6218, SAND94-0731 (1994).

3. Kísérleti módszerek

A kísérletek során a reakciótér egy függőleges kemencébe helyezett kvarccső volt, amely a középső részén (a kemence stabil hőmérsékletű szakaszán) tartalmazta a vizsgált hasadási termékeket modellező inaktív vegyületek vagy tiszta Ru fémpor ZrO_2 -dal hígított szilárdfázisú keverékét. Az alkalmazott levegő térfogatáram mellett a ruténium párolgási sebessége elegendően gyors volt ahhoz, hogy a mérés kezdetén a ruténium-oxidok egyensúlyi parciális nyomása kialakulhasson.

A magashőmérsékletű reakciótérben (1000-1200 °C) képződő ruténium-oxidok (RuO_3 és RuO_4) nagy része, a kemence felső, csökkenő hőmérsékletű szakaszán (1100-100 °C) RuO_2 alakjában kivált a gázáramból, míg kisebb hányaduk a kilépő levegőben gáz alakban távozott. A reakciótér kivezetésének 1100 °C-ról 100 °C-ig hűlő szakaszán egy betétcsövet helyeztünk el. Ily módon a csökkenő hőmérsékletű térben lerakódó Ru mérés közben a betétcső cseréjével eltávolítható, illetve mennyisége meghatározható. A gázáramban maradt RuO_4 -ot hipokloritos nátrium-hidroxid oldatban abszorbeáltattuk.

A betétcsövek anyagi minőségének (kvarc, rozsdamentes acél, alumínium-oxid, cirkónium ötvözet (E110), oxidált rozsdamentes acél, oxidált E110) változtatásával vizsgáltuk a különböző felületek ruténium-oxidok kiválására és re-evaporációjára gyakorolt hatását a hőmérséklet gradiens mentén. A molibdén és cézium betétcsövekre történő előzetes felpárolgatásával pedig a Mo- és Cs-oxid lerakódások hatását tanulmányozhattuk a ruténium-oxidok bomlására és kiválására.

Az elnyelető oldat Ru tartalmát spektrofotometriásan határoztuk meg. A csökkenő hőmérsékletű térben kivált RuO_2 mennyiségét tiszta Ru oxidációja esetén a kvarc és alumínium-oxid betétcsövek használat előtti és utáni tömegmérésével kaptuk meg. Kvarc betétcső alkalmazása esetén a RuO_2 formájában lerakódó Ru mennyiségét egyéb hasadási termékek jelenlétében úgy határoztuk meg, hogy a RuO_2 -ot redukáló ($5\%H_2+N_2$) atmoszférában 1100 °C-on történő hevítéssel fém Ru-má alakítottuk, majd a fém Ru-ot hipokloritos nátrium-hidroxid oldattal leoldva, a kapott oldat Ru tartalmát spektrofotometriásan határoztuk meg. A kísérleteket követően a ZrO_2 mátrix maradék Ru tartalmát tömegspektrometriás méréssel ellenőriztük.

A kvarc és alumínium-oxid felületeken lerakódott elemek axiális eloszlását mikroszkópikus röntgenfluoreszcencia (μ -XRF) módszerrel állapítottuk meg. A rozsdamentes acélfelületen kivált „hasadási termékek” morfológiájának és mennyiségének vizsgálatára pásztázó elektronmikroszkópia (SEM) és energia diszperzív röntgen spektrometria (EDX) módszereit használtunk.

4. Eredmények

A RUSSET program célja egy levegőbetöréses súlyos reaktorbaleset során a ruténium-oxidok lehetséges viselkedésének tisztázása volt. A kísérletek elsősorban a primerkörben lejátszódó folyamatok megértésére irányultak: így csökkenő hőmérsékletű térben a ruténium-oxidok kiválásának és újbóli elpárolgásának vizsgálatára, és végső soron a lehűlt levegőáramban metastabil állapotban maradó RuO_4 mennyiségi meghatározására, amely mint gázhalmazállapotú ruténium forma érheti el a konténmentet egy súlyos baleseti szcenárió során.

A RUSSET program keretén belül tanulmányoztam a ruténium magashőmérsékletű (1000-1200 °C-os) oxidációját és a ruténium-oxidok hőmérsékleti gradiensen keresztüli transzportját levegőáramban.

Vizsgáltam, hogy a különböző hasadási termékek, mind a magashőmérsékletű, mind a csökkenő hőmérsékletű térben, milyen hatással lehetnek a ruténium párolgási kinetikájára, illetve a gázfázisban metastabil állapotban maradó RuO_4 mennyiségére.

Abból a célból, hogy egy hipotetikus levegőbetöréses reaktorbaleset során a ruténium-oxidoknak a reaktor hűtőkörén keresztüli lehetséges transzportját pontosabban megértsük, tanulmányoztam a csökkenő hőmérsékletű térben (1100-100 °C) a különböző anyagi minőségű felületek (kvarc, rozsdamentes acél, alumínium-oxid, cirkónium ötvözet, oxidált fémfelületek, valamint molibdén- és cézium-oxid lerakódást hordozó felületek) ruténium-oxidok bomlására és újbóli elpárolgására gyakorolt hatását.

A vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy a Ru , RuO_3 és RuO_4 formájában elpárolog, és az adott körülmények között az illékony ruténium-oxidok (RuO_3 és RuO_4) elérték egyensúlyi koncentrációjukat a magashőmérsékletű térben. A kísérleti berendezés csökkenő hőmérsékletű szakaszán, körülbelül 1100 és 600 °C között a RuO_3 , illetve a RuO_4 legnagyobb része, $\approx 95\%$ -a, (a ruténium-oxidok $\approx 98-99\%$ -a) a kvarc felületen elbomlott és RuO_2 kristályok képződtek, míg a kilépő levegőben a RuO_4 parciális nyomása 10^{-6} bar körül változott, amely több nagyságrenddel meghaladja az adott hőmérsékletnek megfelelő egyensúlyi értéket ($\approx 10^{-20}$ bar 25°C -on⁷). A ruténium-oxidok RuO_2 -dá történő bomlása heterogén fázisú kémiai reakció, melyet a kvarc felület, a kvarcfelület inhomogenitása és a már kialakult RuO_2 szemcsék hatékonyan katalizálnak. Másrészt az adott kísérleti körülmények között a RuO_4 RuO_2 -dá történő felület katalizált bomlása nem volt elég gyors, hogy a hőmérsékletváltozásnak megfelelő egyensúly kialakulhasson. A kísérletek késői fázisában a Ru kibocsátás a lerakódott RuO_2 re-evaporációjából származott, amely szintén $\approx 10^{-6}$ bar RuO_4 parciális nyomást eredményezett a kilépő gázban.

A csökkenő hőmérsékletű térben (1100-100 °C) különböző felületekkel végzett vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy a ruténium-oxidok RuO_2 -dá történő heterogén fázisú bomlását a kvarc és alumínium-oxid felületek hatékonyabban katalizálják, mint a rozsdamentes acél. A RuO_2 újbóli elpárolgása a rozsdamentes acél felületéről (valószínűleg az azon kialakult RuO_2 lerakódás finomabb eloszlása miatt) nagyobb mértékű volt, mint a kvarc vagy alumínium-oxid felületekről. A kvarc felületen képződött, nagyobb kristályokból álló RuO_2 lerakódás növekvő re-evaporációs sebességet mutatott a kísérlet késői fázisában.

A MoO_3 réteg jelenléte valamennyi vizsgált felületen csökkentette a RuO_x -ok

⁷ H. Schäfer, et al., Z. Anorg. Allg. Chem. 321 (1963) 41-55.

kiválásának mértékét. A Mo (és Cs) felpárolgatásakor maga a rozsdamentes acél betétső is oxidálódott. A rozsdamentes acélcső tiszta levegős oxidációja kissé szintén növelte a RuO₄ parciális nyomását a kilépő levegőben és az abszorber oldatot elérő Ru hányadot a fém kiindulási felülethez képest, de a RuO₄ kezdeti kilépő koncentrációja az eltávozó gázban kisebb volt, mint molibdén-oxidok jelenlétében.

A rozsdamentes acél felületére felvitt Cs/Cs-oxid lerakódás a csökkenő hőmérsékletű szakaszon kismértékben megkötötte a ruténiumot a gázfázisból (a tiszta acélfelülethez képest). Ezzel szemben az alumínium-oxid és különösen a kvarc felületén a Cs/Cs-oxid lerakódás csökkentette a ruténium-oxidok bomlását és növelte a RuO₄ koncentrációját a kilépő levegőben. Az utóbbi esetben a Cs a kvarc anyagába diffundálva vagy azzal cézium-szilikátot képezve megváltoztatta a kvarc felületi jellegét és csökkentette annak a RuO_x-ok RuO₂-dá történő bomlására gyakorolt katalitikus hatását, egy nagyságrenddel növelve a RuO₄ parciális nyomást az eltávozó gázban a tiszta kvarcfelület fölött mért értékhez képest.

Ha a magashőmérsékletű térben (1100 °C-on) a Ru mellett egyéb hasadási termékek is jelen voltak, akkor azok a tiszta Ru oxidációjához viszonyítva növelték a RuO₄ parciális nyomását a környezeti hőmérsékletű kilépő levegőben kvarc és alumínium-oxid betétsővek esetén, míg csökkentették azt rozsdamentes acélcső használata mellett (hasonlóan a Cs lerakódás hatásához). A vizsgált felületek mindegyikénél a maximális RuO₄ koncentráció az eltávozó gázban bizonyos időkéssel jelent meg, ha egyéb hasadási termékek is jelen voltak a töltetben. Ezt az időkést a ruténium és a cézium közötti magashőmérsékletű (illetve acélfelület esetén a csökkenő hőmérsékletű térben is lejátszódó) reakciók okozták. Ha Cs volt jelen a töltetben, a Ru a magashőmérsékletű térből részben cézium vegyületek (esetleg Cs₂RuO₄) formájában távozott el és a tiszta RuO₂ kiválási tartományához képest viszonylag alacsony hőmérsékleteken (kvarc felületen: ≈900-400 °C között) rakódott le. Ebben az esetben a kiválás mechanizmusa egyszerű kondenzáció, és ez a folyamat csökkentette a Ru koncentrációját a kilépő levegőben.

Mo tartalmú (Mo fémport vagy Mo-Ru-Rh-Pd ötvözetet tartalmazó) mintákkal és a csökkenő hőmérsékletű térben kvarcfelület mellett végzett vizsgálatok során a gázfázisban a ruténium-oxidokkal egyidejűleg jelenlévő molibdén-oxid gőzök hatékonyan gátolták a ruténium-oxidok felületkatalizált bomlását, és közel egy nagyságrenddel növelték a RuO₄ parciális nyomását a kilépő lehűlt levegőben a tiszta Ru oxidációjához képest. A levegő vízgőztartalma kisebb mértékben, de ugyancsak gátolta a RuO₄ felületkatalizált bomlását.

1000 és 1100 °C-on bárium- és ritkaföldfém-oxidok jelenlétében a mintában, bárium-rutenát és ritkaföldfém-rutenátok keletkeztek, amely reakciók csökkent intenzitású és időben elnyújtott Ru kibocsátást eredményeztek a magashőmérsékletű térből.

Ha a csökkenő hőmérsékletű térbe E110-es burkolatanyagot helyeztünk, Ru kibocsátás gyakorlatilag mindaddig nem jelent meg a szobahőmérsékletű gázáramban, amíg a cirkónium cső magashőmérsékletű vége teljesen el nem oxidálódott. Az E110-es cső intenzív oxidációját követően a vizsgálat időtartamán belül (360 min) számottevő Ru kibocsátás csak egyéb hasadási termékek jelenlétében történt.

Az adott kísérleti körülmények között a rozsdamentes acélfelületek vízgőzös előoxidációjának nem volt szignifikáns hatása a Ru kibocsátásra. Tiszta Ru oxidációja esetén a rozsdamentes acél vízgőzös előoxidációja kissé növelte a RuO_x-ok (RuO₄) RuO₂-dá történő bomlását a tiszta fémfelület hatásához képest. Ha a Ru mellett egyéb

hasadási termékek is jelen voltak a magashőmérsékletű térben, akkor a csökkenő hőmérsékletű szakaszon az oxidréteg jelenléte kissé növelte a Ru kibocsátást. E110-es cső esetén a vízgőzös előoxidációnak csak akkor volt hatása a Ru eltávozására, ha az a breakaway-tartományon kívül (1100 °C-on) történt. Ellenkező esetben (800 °C-on) a képződött oxidréteg nem nyújtott védelmet az intenzív levegős oxidációval szemben és az előoxidációnak nem volt hatása a Ru kibocsátásra.

Összefoglalóan megállapítható tehát, hogy egy levegőbetöréses súlyos reaktorbaleset esetén a ruténium-oxidoknak a reaktor hűtőkörében való visszatartásában a felület minőségének (rozsdamentes acél, oxidált rozsdamentes acél, Mo és Cs lerakódás) döntő szerepe van.

A ruténium-oxidoknál (≈ 500 °C felett) illékonyabb Cs_2RuO_4 lehetséges képződése eltérő kiválási mechanizmusa (kondenzáció) miatt a gázhalmazállapotú Ru koncentrációját a környezeti hőmérsékletű kilépő levegőben csökkentheti.

A levegőben jelenlévő vízgőz és molibdén-oxid gőzök, valamint a csökkenő hőmérsékletű tér felületein jelenlévő MoO_3 réteg a ruténium-oxidok RuO_2 -dá történő felület katalizált bomlását csökkenteni, és így az eltávozó gázban metastabil állapotban maradó RuO_4 parciális nyomását növelni fogja. Egy levegőbetöréses reaktorbaleset esetén nagymennyiségű aeroszol fog képződni, aminek várhatóan szintén jelentős hatása lesz a ruténium-oxidok hűtőkörön keresztüli transzportjára.

Talán a legérdekesebb vizsgálati eredménye a RUSSET kísérleteknek a csökkenő hőmérsékletű térben a rozsdamentes acél felületén a cézium lerakódás ruténium megkötő képessége volt. A cézium-rutenát lehetséges képződése magas hőmérsékleteken, valamint a csökkenő hőmérsékletű térben a ruténium–cézium–rozsdamentes acél közötti reakciók további, részletesebb vizsgálatot igényelnének a ruténium-oxidok primerköri viselkedésének pontosabb megismerése céljából.

5. Tézisek

1. A gázhalmazállapotú ruténium-oxidok (RuO_3 és RuO_4) szilárd RuO_2 -dá történő bomlása felületkatalizált, heterogén fázisú kémiai reakció. A RuO_4 a kilépő környezeti hőmérsékletű levegőáramban metastabil állapotban az egyensúlyit ($\approx 10^{-20}$ bar) több nagyságrenddel meghaladó koncentrációban maradhat (kvarc felület esetén $\approx 10^{-6}$ bar), mivel a RuO_4 RuO_2 -dá történő bomlása ≈ 800 °C körül leáll. (A RuO_4 RuO_2 -dá történő felületkatalizált bomlása nem elég gyors ahhoz, hogy a hőmérsékletváltozásnak megfelelő egyensúly kialakulhasson.) A lerakódott RuO_2 re-evaporációjából származó RuO_4 parciális nyomása a kilépő szobahőmérsékletű gázban szintén a 800 °C körüli hőmérsékletnek megfelelő egyensúlyi érték (kvarc felület esetén $\approx 10^{-6}$ bar) [2,4].

2. A RuO_x -ok RuO_2 -dá történő heterogén fázisú bomlását a kvarc és alumínium-oxid felületek hatékonyabban katalizálják, mint a rozsdamentes acél. A RuO_2 újbóli elpárolgása a rozsdamentes acél felületéről (az azon kialakuló RuO_2 lerakódás kisebb szemcseméretének/finomabb eloszlásának köszönhetően) nagyobb mértékű, mint a kvarc vagy alumínium-oxid felületekről. Ugyanakkor a kvarc felületen képződő, nagyobb kristályokból álló RuO_2 lerakódás időben növekvő re-evaporációs sebességet mutat [1].

3. A gőzfázisban jelenlévő molibdén-oxidok, valamint a csökkenő hőmérsékletű tér felületein a MoO_3 lerakódás csökkenti a ruténium-oxidok felületkatalizált bomlását és növeli a RuO_4 parciális nyomását a környezeti hőmérsékletű kilépő levegőben. A molibdén-oxid gőzök szimultán jelenlétének a ruténium-oxidok kiválását gátló hatása nagyobb mértékű, mint a csökkenő hőmérsékletű tér felületein jelenlévő MoO_3 rétegé [1,2,3].

4. Cézium-rutenát vagy más cézium-ruténium vegyület esetleges képződése a ruténium-oxidokétól eltérő kiválási mechanizmusa (kondenzáció) miatt csökkentheti a gázhalmazállapotú ruténium koncentrációját a kilépő lehűlt levegőben a Ru tiszta ruténium-oxidok formájában történő kibocsátásához képest. Másrészt a csökkenő hőmérsékletű térben, rozsdamentes acél felületen jelenlévő Cs/Cs-oxid lerakódás a Ru-ot a gőzfázisból kismértékben képes megkötni. Cs jelenlétében a Ru jobban megkötődik a rozsdamentes acél felületen, mint tiszta ruténium-oxidok esetén. A kvarc és alumínium-oxid felületeken a Cs/Cs-oxid lerakódás csökkenti ezekben a felületek a ruténium-oxidok bomlására gyakorolt katalitikus hatását, és növeli a RuO_4 koncentrációját a kilépő lehűlt levegőben [1,2].

5. A Ru magashőmérsékletű, 1000-1100 °C-os reakciója bárium- és ritkaföldfém-oxidokkal csökkent intenzitású Ru kibocsátást eredményez a magashőmérsékletű térből, feltételezhetően bárium-rutenát és ritkaföldfém-rutenátok keletkezése következtében [2,3].

6. Közlemények a dolgozat témájában

Publikációk

1. N. Vér, L. Matus, A. Pintér, J. Osán, Z. Hózer, Effects of different surfaces on the transport and deposition of ruthenium oxides in high temperature air, *J. Nucl. Mater.* 420 (2012) 297-306.
2. N. Vér, L. Matus, M. Kunstár, J. Osán, Z. Hózer, A. Pintér, Influence of fission products on ruthenium oxidation and transport in air ingress nuclear accidents, *J. Nucl. Mater.* 396 (2010) 208-217. (IF: 1.279)
3. P. Giordano, A. Auvinen, G. Brillant, J. Colombani, N. Davidovich, R. Dickson, T. Haste, T. Kärkelä, J. S. Lamy, C. Mun, D. Ohai, Y. Pontillon, M. Steinbrück, N. Vér, Recent advances in understanding ruthenium behaviour under air-ingress conditions during a PWR severe accident, *Progr. Nucl. Energ.* 52 (2010) 109-119. (IF: 1.085, I: 3)
4. A. Auvinen, G. Brillant, N. Davidovich, R. Dickson, G. Ducros, Y. Dutheillet, P. Giordano, M. Kunstár, T. Kärkelä, M. Mladin, Y. Pontillon, C. Séropian, N. Vér, Progress on ruthenium release and transport under air ingress conditions, *Nucl. Eng. Des.* 238 (2008) 3418-3428. (IF: 0.874, I: 7)
5. Matus Lajos, Nagy Imre, Windberg Péter, Hózer Zoltán, Alföldy Bálint, Kunstár Mihály, Vér Nóra, Ruténium kibocsátás nagyhőmérsékletű fűtőelemekből, *Magyar Energetika*, ISSN 1216-8599, XIV évf. 5. szám, p. 40-43, 2006.

Poszter bemutatók

6. N. Vér, L. Matus, A. Pintér, J. Osán, Z. Hózer, Effects of different surfaces on the transport and deposition of ruthenium oxides in high temperature air, 10th Multinational Congress on Microscopy 2011, Urbino, Italy, 4-9 September, 2011.
7. C. Mun, T. Kärkelä, N. Vér, D. Corbin, G. Brillant, M. Steinbrück, Main achievements of the European R&D on the issue of air ingress during a LWR severe accident, *EUROSAFE Forum 2008*, Paris, France, 3-4 November, 2008.
8. N. Vér, L. Matus, M. Kunstár, J. Osán, Z. Hózer, Delay of ruthenium escape in the presence of some fission product elements, *European Conference on X-ray Spectrometry 2008*, Cavtat, Dubrovnik, Croatia, 16-20 June 2008.

Előadások

9. N. Vér, L. Matus, A. Pintér Csordás, J. Osán, Z. Hózer, Effects of different surfaces on the transport and deposition of ruthenium oxides in high temperature air, *SARNET2 Source Term Progress Meeting*, Pisa, Italy, 23-24 November 2010.
10. Vér Nóra, Matus Lajos, Kunstár Mihály, Osán János, Hózer Zoltán, Molibdén és cézium hatása a ruténium-oxidok eltávozására, VII. Nukleáris Technikai Szimpózium, Budapest, 2008. december 4-5.
11. N. Vér, L. Matus, M. Kunstár, J. Osán, Z. Hózer, Delay of ruthenium escape in the presence of some fission product elements, *SARNET, 5th Meeting of the ST OXIDEN Circle: Ruthenium Behaviour*, Aix-en-Provence, France, 30 June 2008.
12. N. Vér, L. Matus, M. Kunstár, A. Pintér, J. Osán, Z. Hózer, Oxidation and release of ruthenium from white inclusions, *SARNET, 4th Meeting of the ST OXIDEN Circle: Ruthenium Behaviour*, Espoo, Finland, 5 June 2007.
13. Matus Lajos, Nagy Imre, Windberg Péter, Hózer Zoltán, Alföldy Bálint, Kunstár Mihály, Vér Nóra, Ruténium kibocsátás nagyhőmérsékletű fűtőelemekből, IV. Nukleáris Technikai Szimpózium, Budapest, 2005. december 1-2.

7. Egyéb közlemények

Publikációk

14. Z. Hózer, M. Horváth, M. Kunstár, L. Matus, I. Nagy, T. Novotny, E. Perez-Feró, A. Pintér-Csordás, N. Vér, A. Vimi, P. Windberg, Experimental simulation of the Paks-2 cleaning tank incident through separate effect and integral tests, Nucl. Eng. Des. 241 (2011) 573-581. (IF: 0.765)
15. M. Steinbrück, J. Birchley, A. V. Boldyrev, A. V. Goryachev, M. Grosse, T. J. Haste, Z. Hózer, A. E. Kisselev, V. I. Nalivaev, V. P. Semishkin, L. Sepold, J. Stuckert, N. Vér, M. S. Veshchunov, High-temperature oxidation and quench behaviour of Zircaloy-4 and E110 cladding alloys, Progr. Nucl. Energ. 52 (2010) 19-36. (IF: 1.085)
16. Hózer Zoltán, Windberg Péter, Nagy Imre, Vimi András, Kunstár Mihály, Vér Nóra, Matus Lajos, Perezné Feró Erzsébet, Novotny Tamás, Balaskó Márton, A paksi üzemzavar modellezése a CODEX–berendezésen, Magyar Energetika, ISSN 1216-8599, XV évf. 5. szám, p. 20-23, 2007.
17. Hózer Zoltán, Kunstár Mihály, Matus Lajos, Vér Nóra, Nagy Imre, Windberg Péter, Kísérletek a sérült kazetták tárolótokjaiból várható kikerülés becslésére, Magyar Energetika, ISSN 1216-8599, XIV évf. 5. szám, p. 19-21, 2006.
18. Kunstár Mihály, Hózer Zoltán, Matus Lajos, Vér Nóra, UO₂ adszorpció reaktor szerkezeti elemeken bórsavas oldatból, Magyar Energetika, ISSN 1216-8599, XIV évf. 5. szám, p. 28-29, 2006.

Poszter bemutatók

19. M. Marques Fernandes, N. Vér, B. Baeyens, Application of the “bottom up” approach for the predictive modelling of sorption isotherms on Hungarian Boda Clay, Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement, Montpellier, France, 22-25 October 2012.

Előadások

20. M. Steinbrück, N. Vér, High-temperature oxidation of zircaloy-4 in mixed steam-air and steam-nitrogen atmospheres, 2010 Internat. Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP '10), San Diego, CA, United States, 13-17 June 2010. (Proc. on CD-ROM Paper 10168, La Grange Park, Ill.: American Nuclear Society, 2010)
21. M. Steinbrück, N. Vér, M. Große, Oxidation of advanced zirconium cladding alloys in steam at temperatures 600-1200°C, 2009 Internat. Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP '09), Tokyo, Japan, 10-14 May 2009. (Proc. on CD-ROM Paper 9007, Tokyo: Atomic Energy Society of Japan, 2009)
22. M. Steinbrück, N. Vér, M. Große, Comparison of oxidation kinetics of advanced cladding alloys in steam at temperatures 600-1200°C, Proc. of the 14th Internat. QUENCH Workshop, Karlsruhe, Germany, 4-6 November 2008. (CD-ROM, Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2008, ISBN 978-3-923704-67-5)
23. M. Grosse, L. Sepold, M. Steinbrück, J. Stuckert, N. Vér, Comparison of the severe accident behaviour of advanced nuclear fuel rod cladding materials, Internat. Topical Meeting on Safety of Nuclear Installations (TOPSAFE), Dubrovnik, Croatia, 30 September – 3 October 2008.

24. M. Steinbrück, U. Stegmaier, N. Vér, Air oxidation of zircaloy at high temperatures: update, Proc. of the 12th Internat. QUENCH Workshop, Karlsruhe, Germany, 24-25 October 2006. (CD-ROM, Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2006, ISBN 978-3-923704-57-6)
25. M. Horváth, Z. Hózer, M. Kunstár, L. Matus, N. Vér, Reaction of Zr1%Nb in Air and Nitrogen, 26th Bundle Interpretation Circle, Alkmaar, the Netherlands, 24 April 2006.