

# Radioaktív korróziótermékek keletkezése és transzportja nyomottvizes atomreaktorokban

Varga Kálmán<sup>1</sup> †, Baja Bernadett<sup>1</sup>, Horváthné Deák Emese<sup>1</sup>, Kristóf Tamás<sup>2</sup>, Vajda Nóra<sup>3</sup>, Horváth L. Gábor<sup>4</sup>, Pintér Tamás<sup>5</sup>, Patek Gábor<sup>5</sup>, Schunk János<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Pannon Egyetem, Radiokémiai és Radioökológiai Intézet  
8201 Veszprém, Pf. 158.

<sup>2</sup>Pannon Egyetem, Fizikai Kémia Intézeti Tanszék  
8201 Veszprém, Pf. 158.

<sup>3</sup>Radanal Analitikai Izotóptechnikai Kft.  
1121 Budapest, Konkoly-Thege M. út 29-33.

<sup>4</sup>NUBIKI Nukleáris Biztonsági Kutatóintézet  
1121 Budapest, Konkoly-Thege M. út 29-33.

<sup>5</sup>Paksi Atomerőmű Zrt.  
7031 Paks, Pf. 71.

---

*A primerköri szerkezeti anyagok és a hőhordozó közötti kölcsönhatások eredményeként bonyolult és egymással összefüggő korróziós, vízkémiai és kontaminációs folyamatok játszódnak le, amelyek alapvetően befolyásolják a radioaktív és inaktív korróziótermékek transzportjának jellegét és mértékét. A radioaktív sugárzási terek nagyságának és kiterjedésének becslését célszerű összekapcsolni a korróziótermék-transzportfolyamatok (elsősorban a részecske-transzport) modellezésével. Jelen munka igazolja, hogy a valós üzemi folyamatokat leíró modell valamennyi domináns korróziótermék radionuklid esetén tematikusan figyelembe veszi a keletkezés és transzport alappolyadatait, illetve azok mértékét és jellegét befolyásoló fontosabb tényezőket. Ismereteink szerint ilyen komplex modell a VVER-típusú nyomottvizes reaktorok vonatkozásában jelenleg nem áll rendelkezésre.*

---

## Korróziótermékek keletkezése és transzportja

### Alappolyamatok, és azok mértékét befolyásoló tényezők

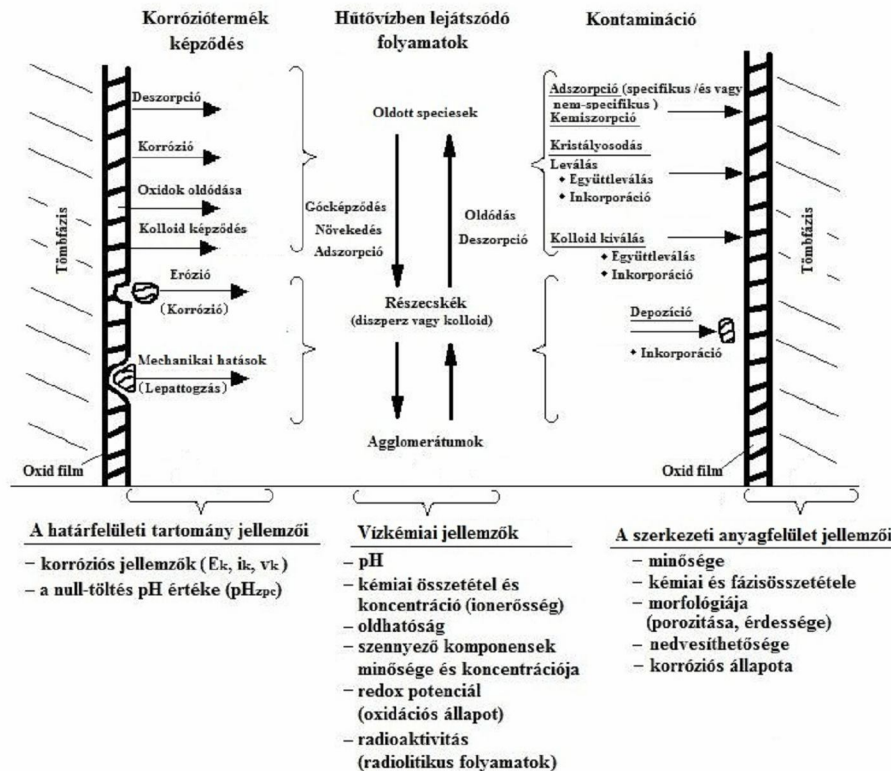
A nyomottvizes atomreaktorok (PWR) primer hűtőkörében a radioaktív és inaktív korróziótermékek keletkezésének és transzportjának alappolyadatait, illetve azok mértékét és jellegét befolyásoló fontosabb tényezőket – a vonatkozó szakirodalmi adatok [1-2] alapján – az 1. ábrán foglaltuk össze. Az 1. ábra egyértelműen alátámasztja, hogy adott szerkezeti anyag esetén az alkalmazott vízkémiai üzemmód (vízüzem) döntő hatással van az oldatfázisba jutó speciestek megjelenési formájára, illetve a szerkezeti anyagfelület felületkémiai és korróziós jellemzőire.

Az említett paraméterek együttesen határozzák meg a szerkezeti anyag felülete és a hűtőközeg közt lejátszódó komponenstranszport mértékét és mechanizmusát. Másrészt fogalmazva a vízkémiai jellemzők megszabják a transzportfolyamatokban részt vevő komponensek domináns megjelenési formáit az oldatfázisban, és befolyásolják a szilárd fázis és a szilárd/folyadék határfelület jellemzőit.

A fent leírtak összhangban vannak az alábbi tapasztalati tényekkel. Nevezetesen, optimálisan vezetett primerköri vízkémia (vízüzem) esetén is számolni kell:

- az alkalmazott szerkezeti anyagok minimális vagy a minimálshoz közeli, ill. tervezett mértékű korróziójával és eróziójával,
- az inaktív korróziótermékek műszakilag elérhető minimális koncentrációjával a hűtőközegben, következőképpen
- a radioaktív korróziótermékek képződésével aktivációs és transzport mechanizmus révén,
- a hűtőközegtől a szerkezeti anyagfelületek felé irányuló korróziótermék-transzport (radioaktív speciestek esetén a radioaktív kontamináció) minimális szintjével.

A korróziótermék-részecskéket megjelenési formájuk alapján három csoportba sorolhatjuk. Ezek a következők: oldott, kolloid, illetve diszperz méretű speciestek. A felületi oxidréteg elektrokémiai korróziója, egyensúlyi oldódása, valamint deszorpció révén különböző ionok (anionok és kationok) és oxidok (hematit, magnetit és nikkell-oxidok stb.) juthatnak a primerköri hűtővízbe.



1. ábra: A radioaktív és inaktív korróziótermékek keletkezésének és transzportjának alapfolyamatai, illetve az azok mértékét és jellegét befolyásoló fontosabb tényezők

Kitüntetett szerepük miatt az elmúlt évtizedekben széleskörűen tanulmányozták a magnetit és egyes nikkell-oxidok oldhatóságát, megbecsülték a nikkell- és vasionok, valamint a hidrolízis termékeinek termodinamikai paramétereit 300 C-on [3-4]. Az adatgyűjtést és a termodinamikai modellfejlesztést kiterjesztették néhány vegyes oxid oldhatóságának meghatározására is [5-10]. Mindezek következtében a PWR-típusú reaktorok primer hűtőkörében normál üzemi körülmények között jelenlévő specicsenek oldhatósága, illetve termodinamikai adatai ma már jól ismertek. Általánosságban elmondható, hogy a korróziótermék oxidok oldhatósága nagymértékben függ a hűtővíz oldatkémiajától (pH, redoxi potenciál, ion koncentráció) és a hőmérséklettől. A felsorolt paraméterek közül a korróziótermék-transzport szempontjából a legfontosabb oldhatóságot befolyásoló tényező a pH.

A nem oldott specicsenek szemcseméretüket tekintve lehetnek kolloid ( $5 < \varnothing < 500$  nm) vagy diszperz részecskék ( $\varnothing > 500$  nm); az utóbbiak eróziós, eróziós-korróziós folyamatok, illetve mechanikai igénybevétel (lásd 1. ábra) révén kerülhetnek a primerkörüi hőhordozóba. Ugyanakkor hangsúlyozni kell, hogy a hűtővízben jelenlévő oldott specicsenek és részecskék (kolloid, vagy diszperz) között dinamikus egyensúly alakulhat ki, azaz különböző (adszorpciós-deszorpciós, kristályosodás-oldódás stb.) folyamatok révén átalakulhatnak egymásba.

### **<sup>60</sup>Co- kontamináció hatáselemzése**

Közismert, hogy a könnyűvíz-hűtésű nyomottvízes (PWR) és forralóvízes (BWR) típusú reaktorokban normál üzemenet esetén a hőhordozóba jutó legjellemzőbb korróziótermék

radionuklidok a <sup>60</sup>Co, <sup>58</sup>Co, <sup>51</sup>Cr, <sup>54</sup>Mn, <sup>59</sup>Fe, <sup>95</sup>Zr, illetve – a szovjet gyártmányú VVER-típusú nyomottvízes reaktorokban a felsoroltakon kívül még – az <sup>110m</sup>Ag. A radioaktív korróziótermékek okozta kontamináció és személyi dózisterhelés szempontjából a <sup>60</sup>Co radionuklidnak kiemelkedő jelentősége van. A <sup>60</sup>Co dozimetriai hatása főleg az emittált  $\gamma$ -fotonok nagy energiája (1,17 és 1,33 MeV), és viszonylag hosszú felezési ideje (5,27 év) miatt kiemelkedően kedvezőtlen. Egyes becslések szerint a reaktor-karbantartó személyzet dózisterhelésének megközelítően 80%-a a <sup>60</sup>Co radionuklidnak tulajdonítható. (A VVER blokkoknál az <sup>110m</sup>Ag is jelentős hatású, mivel dózisszállítója hasonló nagyságú, ugyanakkor koncentrációja a hűtőközegben egyes esetekben nagyobb a <sup>60</sup>Co-énál.) Megállapítható tehát, hogy hermetikus fűtőelemekkel vezetett normál üzemenet esetén a primer hűtőkörüi felületeken kialakuló radioaktív szennyezést elsődlegesen a radioaktív korróziós termékek keletkezése és transzportja határozza meg [1, 11-20].

A nyomottvízes reaktorokban – üzemi tapasztalatok szerint – a sugárzási terek nagysága erőművenként változik, és nagymértékben függ az adott erőmű üzemenetétől és szerkezeti anyagának minőségétől. A zónán kívüli (elsősorban gőzfejlesztő (GF) felületeken a <sup>60</sup>Co aktivitás már néhány éves üzemenidő elteltével is jelentős, és az üzemenidő előrehaladtával egyre dominánsabbá válik. Ez a tény – a <sup>60</sup>Co nuklid keletkezésének magfizikai folyamatait ismerve – folyamatos inaktív Co-forrás létezésére utal, amelynek eredetéről megoszlanak a kutatói vélemények.

A szakirodalmi adatok alapján összefüggés van a PWR-típusú reaktorokban mérhető dózisteljesítmények és a szerkezeti anyagok kobalt tartalma között. Svéd kutatók

igazolták, hogy a kobalttól eredő magas dózisszintért a Co-tal szennyezett nikkelt tartalmazó plattírozott fűtőelem rácsok a felelősek a Goesgeni erőműben [21]. A Westinghouse-gyártmányú PWR reaktorokban széleskörűen alkalmazták gőzfejlesztő csövek szerkezeti anyagaként az Inconel-600 típusú ötvözetet (Co tartalom: 0,05%), illetve különböző alátétek, szelepek, pumpák szerkezeti anyagaként a magas kobalt tartalmú, kopásálló ún. stellites acélokat (Co tartalom  $\geq 60\%$ ) [22]. Miután a primer hűtőkörből eltávolították a stellites acél alkatrészeket, a kobalt dózisszintje jelentősen lecsökkent [23]. Mindezek alapján – más kutatókkal egyetértve [24] – a stellites acél kobalt tartalmát tartják a  $^{60}\text{Co}$  fő forrásának. Ugyanakkor a szovjet VVER-típusú erőművekben a primerköri szerkezeti anyag felületek többnyire 08X18H10T típusú,  $\leq 0,05\%$  kobalt tartalmú acélból készültek [25-26]. Az alacsony kobalt tartalom ellenére a VVER-típusú erőművekben is számottevő a  $^{60}\text{Co}$ -tól eredő sugárzási szint. Egy összehasonlító munka keretében igazolták, hogy a Westinghouse-gyártmányú erőművekben a gőzfejlesztők környezetében mért dózisteljesítmények jóval nagyobbak, mint az orosz, cseh, vagy magyar VVER-típusú reaktorban [27, 28].

Mindezek alapján reálisan feltételezhető, hogy a  $^{60}\text{Co}$  radionuklid forrása a szerkezeti anyagok inaktív kobalt tartalma, amely oldódási folyamat révén jut a primerköri hűtővízbe. Következésképpen a könnyűvízhűtésű reaktorokban az aktív zónán kívüli terekben mért dózisteljesítmények csökkenthetők, ha kizárólag olyan szerkezeti anyagokat alkalmaznak, melyeknek kobalt tartalma kisebb, mint 0,05% [29]. A VVER-típusú reaktorok üzemi tapasztalataiból azonban könnyen belátható, hogy a korrózióálló acél kis kobalt tartalma (0,01-0,02%) is jelentős dóziszárulék forrása lehet, tekintettel a gőzfejlesztő csövek több ezer m<sup>2</sup>-nyi felületére.

## A korróziótermék-transzportfolyamatok modellezése

A különböző számítások során a radioaktív kontamináció mértékének, illetve a sugárzási terek nagyságának és kiterjedésének becslését összekapcsolják a korróziótermék-transzportfolyamatok (elsősorban a részecsketranszport) modellezésével ([1] és az ott felsorolt hivatkozások). Szakirodalmi adatok szerint normál – reduktív vízüzemi – körülmények között a primer kör ausztenites korrózióálló acél szerkezeti anyagainak belső felületén spinell-szerkezetű kevertoxidokat ( $\text{Cr}_x\text{Ni}_y\text{Fe}_{3-x-y}\text{O}_4$ , ahol  $0 \leq x+y \leq 3$ ) tartalmazó vékony (1-2  $\mu\text{m}$  vastag) passzív réteg alakul ki, a védőrétegre jelentős mennyiségben nagyméretű kristályok (magnetit és/vagy hematit) rakódnak le a hőhordozó közvetítésével [1-2, 16-20]. Irodalmi adatok és a Paksi Atomerőműből származó GF hőátadó csövek belső felületének mérési eredményei egyaránt alátámasztják, hogy a primerköri korróziós részecskék által hordozott radionuklidok mennyiségét, azaz a részecskék aktivitását az „aktivációs” és „transzport” mechanizmus egyaránt és egyidejűleg befolyásolja [1-2, 30]. Mindezek alapján, a primerköri acélfelületeken lerakódott kristályok lehetséges kémiai összetételét és morfológiáját, az általuk hordozott radioaktivitás, valamint kémiai ellenálló képességük potenciális sorrendjét a 2. ábra szemlélteti. Az „aktivációs mechanizmus” szerint a radioaktív korróziós szemcse kizárólag a kémiai alkotóelemeinek felaktiválódásával

keletkezik az aktív zónában. Tekintettel a primerköri acélfelületeket borító vegyes oxidok összetételére (magnetit, nikkelferit és kromit), valamint csekély inaktív kobalt tartalmára, ezen az úton döntő mennyiségben csak  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  nuklidok keletkezhetnek. Könnyen belátható, hogy az „aktivációs mechanizmust” tekintve a korróziós részecskékben potenciálisan felaktiválható kémiai elemek mennyiségét egyértelműen a szemcse mérete befolyásolja.

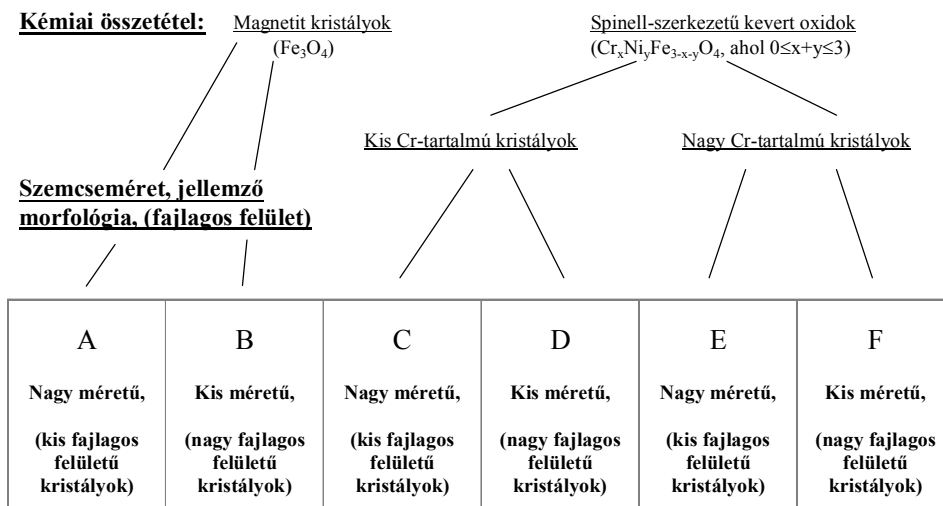
A „transzport mechanizmust” feltételezve – akár a felületen lévő, akár a hőhordozóban diszpergált – aktív korróziós részecske a saját felülete és az oldott radionuklidokat tartalmazó hőhordozó között lejátszódó transzportfolyamatok (adszorpció-deszorpció, kristályosodás-oldódás stb.) révén keletkezhet.

Mivel a korróziótermék-transzportfolyamatok döntően egyensúlyi folyamatok, a korróziós szemcsék felületközeli tartományában a releváns radionuklidok ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ) aktivitása és kémiai koncentrációja a teljes primer köri tartózkodás során állandóan változhat.

A kizárólag „aktivációs” mechanizmussal keletkező radioaktív részecskék aktivitása azon radionuklid/besugárzott inaktív ötvöző komponens (nuklid) párok esetén minimális, amelyeknél a besugárzott inaktív ötvöző koncentrációja a vizsgált korróziós részecskében a reaktor zónába belépést megelőzően rendkívül kicsi (jellemzően zérus). Ezt az esetet jól példázza a  $^{60}\text{Co}/\text{Co}$  pár, de megemlíthetjük az  $^{110\text{m}}\text{Ag}/\text{Ag}$  párt is. Tovább bonyolódik a helyzet, ha a valós primerköri korróziótermék-transzportfolyamatokat tiszta magnetit szemcsékkel modellezzük. Ekkor ugyanis a  $^{63}\text{Ni}/\text{Ni}$  és a  $^{51}\text{Cr}/\text{Cr}$  arányok sem becsülhetők pusztán az „aktivációs mechanizmust” feltételezve. Ugyanakkor elhanyagolható a „transzport” mechanizmusnak tulajdonítható felületi aktivitástöbblet az „aktivációs” mechanizmussal keletkező radionuklidok aktivitása mellett azon „ideális” korróziós részecskék esetén, amelyek megfelelnek az alábbi kritériumoknak:

- az acélötvözők (Cr, Ni) valamint a nyomelemek (Co, Ag) koncentrációja a korróziós részecskében a reaktor zónába belépést megelőzően jelentős,
- a szemcse gömbszimmetrikus és felülete sima,
- a gömbszimmetrikus részecske átmérője nagy (lehetőleg  $> 10 \mu\text{m}$ ), azaz a felület/tömeg arány kicsi,
- a korróziós részecske felülete passzív, azaz a szorpció mértéke csekély.

Kitüntetett dozimetriai szerepe miatt számos dolgozat foglalkozik a  $^{60}\text{Co}$  primerköri felületeken történő akkumulációjával. Egy közelmúltban publikált összefoglaló munka szerint [2] a  $^{60}\text{Co}$  az alábbi mechanizmussal kötődhet meg az acélfelületeken. A hűtővízben ionos formában jelenlévő  $^{60}\text{Co}$  szorbeálódik a felületen, majd bediffundál az oxidfilm pórusaiba [31] és az oxidfilm belsejében ioncsere reakcióba lép más átmeneti fém ionokkal. A  $^{60}\text{Co}$  izotóp mind a külső nikkelferit, mind a belső vas-kromit rétegben inkorporálódhat, azaz beépülhet a korábban említett spinell-szerkezetű oxidokba [32]. A folyamat eredményeként stabil vegyes oxidok ( $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CoCr}_2\text{O}_4$ ) keletkeznek [33-35]. Az oxidok kialakulásának szabadentalpiáját tekintve megállapították, hogy a kobalt-kromit az egyik legstabilabb oldhatatlan oxid a korróziótermék oxidok között [9, 36].



**Oldhatóságuk sorrendje azonos kémiai dekontamináló oldatban**

**B > A >> D > C > F > E**

**Kristályok által potenciálisan hordozott radionuklidok mennyisége (aktivitása)**

– ha a transzport mechanizmus domináns ( $^{60}Co, ^{110m}Ag$ )

**A < B << C < D < E < F**

– ha az aktivációs mechanizmus domináns ( $^{55}Fe, ^{59}Fe, ^{51}Cr, ^{63}Ni, ^{58}Co, ^{54}Mn$ )

**B < A << D < C < F < E**

2. ábra: A primerköri korrózióálló acélfelületeken kialakuló kristályos lerakódások csoportosítása

Lister és munkatársa BWR körülmények közt végzett vizsgálatok eredményei alapján a  $^{60}Co$  akkumulációját az előző bekezdésben vázoltakkal jól egyező, több lépéses (adszorpció, ioncsere és szilárd fázisú diffúzió vagy migráció) mechanizmussal írja le [37]. Ez alapvetően eltér Lister korábban publikált és széles szakmai körökben elfogadott modelljétől [34], mely szerint  $^{60}Co$  folyamatosan akkumulálódik az acélfelületet borító oxidfilmben, és a feldúsulás mértékét és időfüggését az oxidréteg képződése és növekedése határozza meg. Ugyanakkor saját tapasztalataink [17, 25, 32] – más kutatási eredményekkel [38] összhangban – a PWR és VVER reaktorokra jellemző korrózióálló acél szerkezeti anyag/reduktív vízüzem rendszerben egyértelműen arra engednek következtetni, hogy a  $^{60}Co$  megkötődése a kvázi-stacioner állapotban levő oxid szemcsék felületén dominánsan szorpciós és ioncsérés folyamatok révén történik, azaz a kontaminációt elsősorban a kobalt akkumuláció és nem az oxidréteg képződés kinetikája befolyásolja.

Összefoglalásképpen megállapítható, hogy a sugárzási terek nagyságának és kiterjedésének becslését célszerű összekapcsolni a korróziótermék-transzport-folyamatok (elsősorban a részecske-transzport) modellezésével. Hangsúlyozni kell azonban, hogy a valós üzemi folyamatokat leíró modell nuklid-specifikus, azaz valamennyi domináns korróziótermék és radionuklid esetén figyelembe veszi a keletkezés és transzport korábban tárgyalt alapfolyamatait,

illetve azok mértékét és jellegét befolyásoló fontosabb tényezőket.

**Összefoglalás**

A primerköri szerkezeti anyagok és a hőhordozó közötti kölcsönhatások eredményeként bonyolult és egymással összefüggő korróziós, vízkémiai és kontaminációs folyamatok játszódnak le, amelyek alapvetően befolyásolják a radioaktív és inaktív korróziótermékek transzportjának jellegét és mértékét. Megállapítható, hogy a radioaktív korróziótermékek transzportja minimálisra csökkenthető a hűtőközeg optimális vízkémiai paramétereinek megválasztásával, biztosítva ezzel a minimális korróziótermék-kioldódást a hőhordozóba. A  $^{60}Co$  izotóptól származó sugárzási szint csökkentésének további kritériuma minimális kobalt tartalmú (<0,02%) szerkezeti anyag alkalmazása. A radioaktív sugárzási terek nagyságának és kiterjedésének becslését célszerű összekapcsolni a korróziótermék transzport (elsősorban a részecske-transzport) folyamatok modellezésével. Hangsúlyozni kell azonban, hogy a valós üzemi folyamatokat leíró modell nuklidspecifikus, azaz valamennyi domináns korróziótermékek radionuklid esetén tematikusan figyelembe veszi a keletkezés és transzport alapfolyamatait, illetve azok mértékét és jellegét befolyásoló fontosabb tényezőket. Ismereteink szerint ilyen komplex modell a VVER-típusú nyomottvízes reaktorok vonatkozásában jelenleg nem áll rendelkezésre.

## Irodalomjegyzék

- [1]. IAEA: *Coolant technology of water cooled reactors, Volume 3: Activity transport mechanisms in water cooled reactors*, IAEA-TECDOC-667, Vienna, Austria, (1992)
- [2]. C. C. Lin: *Prog. in Nucl. Energ.* 51, 207 (2009)
- [3]. E. W. Thornton, S. M. Walker: *Reanalysis of solubility data: results for nickel oxide and magnetite*; CEBG Report TPRD/B/1011/R87 (1987)
- [4]. J. W. Cobble, R. C. Murray, P. J. Turner, K. Chen: *High-temperature thermodynamic data for species in aqueous solution*; EPRI Report NP-2400 (1982)
- [5]. T. E. Rummery, D. D. Macdonald: *J. Nuclear Material*, 55, 23 (1975)
- [6]. C. A. Bergmann, D. E. Durkosh, W. T. Lindsay, J. Roesmer: *The role of coolant chemistry in PWR radiation field buildup*; EPRI Report, NP-4247 (1985)
- [7]. R. H. Kunig, Y. L. Sandler: *The solubility of simulated primary circuit corrosion products*; EPRI Report NP-4248, (1986)
- [8]. J. Y. Chung, K. J. Lee: *High Temperature Sci*, 30, 51 (1990)
- [9]. V. F. Baston, M. F. Garbaskas, J. Bozeman: *Nucl. Technol.* 114, 334 (1996)
- [10]. H. P. Hermansson: *The stability of magnetite and its significance as a passivating film in the repository environment*, SKI Report, ISSN 1104-1374 (2004)
- [11]. G. Choppin, J. Rydberg, J. O. Liljenzin: *Radiochemistry and Nuclear Chemistry*. Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford, (1995)
- [12]. J. A. Ayres: *Decontamination of Nuclear Reactors and Equipment*, The Ronald Press, New York, (1970)
- [13]. D. H. Lister: *Some aspects of corrosion in cooling water systems and their effects on corrosion product transport*, EUROCORR, 28 September – 2 October, 2003, Budapest, Hungary
- [14]. C. J. Wood: *Prog. in Nucl. Energ.* 23, 35 (1990)
- [15]. C. J. Wood, C. N. Spalaris: *Sourcebook for Chemical Decontamination of Nuclear Power Plants*, EPRI Report, NP-6433, Palo Alto, California, (1989)
- [16]. G. Hirschberg, P. Baradlai, K. Varga, G. Myburg, J. Schunk, P. Tilky, P. Stoddart: *J. Nucl. Mater.* 265, 273 (1999)
- [17]. K. Varga, G. Hirschberg, Z. Németh, G. Myburg, J. Schunk, P. Tilky: *J. Nucl. Mater.* 298, 231 (2001)
- [18]. P. Murray: *Nucl. Technology* 74, 324 (1986)
- [19]. G. C. W. Comley: *Prog. in Nucl. Energ.* 16, 41 (1985)
- [20]. D. H. Lister: *Water Chem. of Nucl. React. Systems* 6, BNES, London, (1992)
- [21]. H. Weitze, D. Braun, S. Odar, G. U. Greger, K. H. Walter, K. G. Weber: *Dose rate build-up investigations and modelling for Goesgen and Neckarwestheim*; BNES Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 4, London, UK, (1986)
- [22]. M. Metge, P. Beslu, A. Lalet: *Cobalt sources in PWR primary systems – PACTOLE predictions*, BNES Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 4, London, UK, (1986)
- [23]. C. A. Bergmann, J. Roesmer, D. W. Perone: *Primary-side deposits on PWR steam generator tubes*; EPRI Report NP-2968 (1983)
- [24]. H. Ocken: *<sup>60</sup>Co inventories from wear and corrosion*; EPRI seminar on Reducing Cobalt In Nuclear Plant Materials to Control Radiation Fields, Seattle, Washington, 13-14 May (1986)
- [25]. K. Varga, J. Schunk, E. H. Deák: *VVER reactors in Nuclear corrosion science and engineering*, (Ed.: Damien Féron), Woodhead Publishing, Cambridge, (közlésre elfogadva), (2011)
- [26]. EQUIST 2001 A szabványos acélok adatbázisa, SACIT Acéltanácsadó Kft, Budapest, (2001)
- [27]. C. A. Bergmann: *Trends of plant radiation fields in Westinghouse designed plants*; EPRI Seminar on PWR Water Chemistry and Radiation Field Control, Berkeley, California, 19-21 March, (1986)
- [28]. J. Burclova: *Water Chemistry of nuclear reactor systems* 5, 23-28 October, Bournemouth, UK (1989)
- [29]. P. Pinacci, J. Sejvar: *Impact of cobalt sources on radiation fields in the Italian PWR using the CORA corrosion product transport model*; BNES Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 4, London, UK, (1986)
- [30]. Varga K.: *Észrevételek a „A korróziós részecskék tartózkodási idejének és morfológiájának vizsgálata” című tanulmányhoz, Szakértői jelentés a PA Zrt számára* (2010)
- [31]. H. P. Hermansson, M. Stigenberg, G. Wikmark: *Kinetics in passivating oxide films*, BNES Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 7, 1, London, UK, (1996)
- [32]. K. Varga: *The role of interfacial phenomena in the contamination and decontamination of nuclear reactors*, Radiotracer Studies of Interfaces (Ed. G. Horányi), Interface Science and Technology, Elsevier B.V., Amsterdam, 3 (2004)
- [33]. C. C. Lin, F. R. Smith: *BWR Cobalt Deposition Studies: Final Report*. Electric Power Research Institute Report EPRI Report NP-5808 (1988)
- [34]. D. H. Lister: *Nucl. Sci Eng.* 59, 406 (1976)
- [35]. K. Ishigure, C. Matssuur, M. Mizuotchi, M. Takahashi: *Isotope exchange processes of cobalt ions on the surface of crud particle*, BNES Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 4, London, UK, (1986)
- [36]. Navrotsky, O. J. Kleppa: *J. Inorg. Nucl. Chem.* 29, 2701 (1967)
- [37]. K. Ishida, D. Lister: *New model of cobalt activity accumulation on stainless steel piping surface under boiling water reactor condition*, Nuclear Plant Chemistry conference (NPC 2010), 3-7 October, 2010, Quebec, Canada
- [38]. S. Ono, M. Haginuma, M. Kumagai, M. Kitamura, K. Tachibana, K. Ishigure: *J. Nucl. Sci and Technol.*, 32, 125 (1995)