

MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES GROUP

(一社)日本原子力学会「水化学部会」第28回定例研究会

PWRプラント再稼動後の被ばく低減 対策について

平成28年11月18日



ZCS-GE-160090



© 2016 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

内容



1.被ばく低減対策

a. 線源強度に寄与する核種

b. 放射性Coの生成メカニズム

2.PWR線源低減の考え方

- a. 発生抑制
- b. 移行抑制
- c. 除去促進

3. 再稼動後の被ばく低減対策

- a.長期保管後の亜鉛注入皮膜の健全性
- b. 周辺系統の亜鉛注入効果
- c. 溶存水素濃度管理

d. 海外動向(NPC2016含む)



①被ばく線源量の低減(材料改良、水質管理) ②被ばく線源からの距離を取るか遮へいを設置 ③接近時間の短縮(自動化・ロボット化)

a.線源強度に寄与する核種



<u>蒸気発生器水室内の放射線腐食生成物核種組成</u>



 ✓ 主要線源:Co-58およびCo-60

- ✓ Co-58は、SG伝熱管材料からの腐食生成物であるNi-58が放射化することで生成する。
- Co-60は、Co-59が放射化することにより生成する。Co-59の供給源は、コバルト基合金(ステライト)やSG伝熱管やステンレス鋼中の微量不純物である。

原子炉水化学ハンドブック, コロナ社, p.137, 2000

b. 放射性Coの生成メカニズム





2012年軽水炉燃料・材料・水化学夏季セミナー 水化学設計の基本的な考え方(PWR) p.13

2. PWR線源低減の考え方



CP:腐食生成物



原子炉水化学ハンドブック, コロナ社, p.142, 2000

a. 発生抑制の対策



- 材料の改良
 - ・ SG伝熱管材料の変更
 - Co含有率規制強化
 - Co基合金(耐磨耗性材)の代替材使用
 - 電解研磨、材料表面処理
- 水質管理改善

(1)温態機能試験(HFT)時の水化学管理改善 水素+リチウム添加

(2)HFTからの亜鉛注入(腐食抑制)





•水素+Li添加条件でCrリッチな薄い皮膜形成



E. Yamada et al., "CORROSION RATE BY CHEMISTRY CONTOL DURING HOT FUNCTIONAL TEST", 1991 JAIF Conference on Water Chemistry in Nuclear Power Plants



• 水素+Li添加条件腐食量低下(例:TT600材)



E. Yamada et al., "CORROSION RATE BY CHEMISTRY CONTOL DURING HOT FUNCTIONAL TEST", 1991 JAIF Conference on Water Chemistry in Nuclear Power Plants



線量率低下(例:泊1号機)



E. Yamada et al., "CORROSION RATE BY CHEMISTRY CONTOL DURING HOT FUNCTIONAL TEST", 1991 JAIF Conference on Water Chemistry in Nuclear Power Plants



亜鉛注入による金属放出速度の低下

HFTから亜鉛注入を行うことにより腐食抑制効果が期待



J.N.Esposito et al., "The Addition of Zinc to Primary Reactor Coolant for Enhanced PWSCC Resistance", Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, 25-29, 1991



• イオン状CP移行抑制

(1) pH管理改善

(2) 低溶存水素濃度管理(検討中:3.項で後述)

- クラッド状CP移行抑制 (3) クラッドバースト抑制
- 放射能取込抑制
- (4) Co取込抑制
 - 亜鉛注入法

b.-(1) pH管理改善



 pH管理改善:高pH側の管理により燃料付着クラッド量減少 (米国Trojanプラント サイクル2及びサイクル3)





pH管理改善:NUPECプロジェクトにてpH7.3(285℃)での の被ばく線源低減効果を実証



小川 他 "PWR 1次系水質管理法の改良",火力原子力発電 No.499, Vol.49, 1998



改良pH管理:国内プラントの改良pH管理案

- ・高ほう素濃度条件でLi濃度を2.2ppmより高める
- ・材料健全性、燃料健全性上問題なし



原子力発電プラントの水化学最適化の実績と将来展望 日本原子力学会 p.68 2003年8月

b.-(3)クラッドバースト抑制



溶存水素濃度の停止時バンド管理

- 放射線源となるクラッド(腐食生成物)は、1次系配管内面の酸化被膜表面に付着し、線量の増加に寄与する。
- 停止工程中は、ニッケルやフェライトの化学形態が変化しないよう、DH濃 度調整を継続する(クラッドバーストの回避)。



ITO, "Study on Improvement in Shutdown Chemistry for Radiation Exposure Reduction in Nuclear Plants", Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 7. BNES, 1996



・亜鉛注入: PWR水質条件でのCo-60取込抑制効果
・実機(米国)でも亜鉛注入により線量率低下



D. H. Lister, "The Effect of Dissolved Zinc on the Transport of Corrosion Products in PWR", EPRI NP-6975-D, 1990

C.A, Bergmann et al., "Operating and radiation level experience with zinc addition in PWRs", Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 8.BNES, 2000

b.-(4) 亜鉛注入



亜鉛注入:NUPECプロジェクトにて亜鉛注入による被ば く線源低減効果を実証



インコネル部表面の沈着放射能量

原子力発電プラントの水化学最適化の実績と将来展望 日本原子力学会 p.70 2003年8月





M. Matsuura et al., "Application of Zinc Injection to Reduce Radiation Sources at Takahama Unit 4", SYMPOSIUM ON WATER CHEMISTRY AND CORROSION IN NUCLEAR POWER PLANTS IN ASIA 2009, Japan

b.-(4) HFTからの亜鉛注入



- HFTから亜鉛注入を開始した泊3号機では、第1回定検の線 量率の低下傾向が認められた。(リファレンスプラントに比べ、 約50%減)
- 亜鉛注入による放射能取り込み抑制効果と腐食抑制効果に



H. Hayakawa et al., "EFFECTS OF ZINC INJECTION FROM HOT FUNCTIONAL TEST AT TOMARI UNIT3", NPC2012





● 浄化流量増加:浄化流量増加による除去量増

● 除去促進:クラッド溶解度増加による除去量増
 (1)外層クラッド除去
 (2)満水酸化

c.-(1) 外層クラッド除去



- 外層クラッド除去:停止時の溶解源は金属Ni
- 弱還元性で金属Ni溶解増:H₂O₂添加により溶存水素濃度
 0.5 1 20/kg/ご 維持



S. Tawaki et al., "IMPROVEMENT OF SHUTDOWN CHEMISTRY FOR OUTER OXIDE LYER REMOVAL", 1991 JAIF Conference on Water Chemistry in Nuclear Power Plants



- ・停止操作RCS満水時に水質を酸化性状態にし、クラッドの溶解を促進させる。
- •外層クラッド除去と同程度のクラッドが除去される。
- ・定検期間の短縮にもつながる。



原子力発電プラントの水化学最適化の実績と将来展望 日本原子力学会 p..24 2003年8月





- a. 長期保管後の亜鉛注入皮膜の健全性
- b. 周辺系統の亜鉛注入効果
- c. 溶存水素濃度(DH)管理(被ばく低減、材料健全性)
- d. 海外動向(NPC2016含む)

3.-a長期保管後の亜鉛注入皮膜の健全性

通常定検と長期保管模擬条件下での皮膜中亜鉛及びコバル
 ト量→有意差なし →長期保管後も健全



A. Hirose et al., "Appropriate Zinc Addition Management Into PWR Primary Coolant After The Plant Long-Term Maintenance", NPC2014





- 亜鉛注入後は前述のように主系統の線量率は低下するが、原
 子炉容器及び加圧器周りの線量率が低下しない場合がある。
- 亜鉛が十分に回り込まない場所は効果が低い。



H. Hayakawa et al., "EFFECTS OF ZINC INJECTION FROM HOT FUNCTIONAL TEST AT TOMARI UNIT3", NPC2012

3.-c 溶存水素濃度管理(低DH管理:検討中)



- ・低溶存水素濃度管理:溶存水素濃度を低く管理することに よって金属Niを溶解度の高いNiOとする。



原子炉水化学ハンドブック, コロナ社, p.144, 2000年

3.-c 溶存水素濃度管理(低DH管理:検討中)



溶存水素濃度を低く管理することによって燃料付着クラッドの低下が認められる。



K. Hisamune et al., "New Aspect of DH Control in PWR Primary Water Chemistry", 1998 JAIF Conference on Water Chemistry in Nuclear Power Plants

3.-c 溶存水素濃度管理(材料健全性)

ニッケル基合金の一次冷却材による応力腐食割れ(PWSCC)
 感受性については、下図に示すように、溶存水素濃度依存性があることが知られており、今後PWSCC抑制の観点から溶存水素濃度の最適化を図ることも検討されている。



P. L. Andresen, et al., "Effect of Dissolved H₂ in Primary Water on SCC Growth Rate of Ni Alloys", NPC2008

- 🙏 三菱重工
- 近年米国では、運転中では高めの溶存水素濃度管理を志向(35~40Ncc/kg)



PWR Coolant Dissolved Cycle Avg Hydrogen

D. M. Wells, et.al, "Chemistry Control to Meet the Demands of Modern Nuclear Power Plant", NPC 2016



・Co除去樹脂による被ばく低減

- 可溶性(イオン状)Coの除去性能に優れた樹脂を適用。米国BWRプラントにおいて、実機適用実績あり。
- 廃樹脂処理装置での対応が可かどうか検討が必要



S. E. Garcia, et.al, "COBALT SEQUESTRATION RESIN PLANT DEMONSTRATION EXPERIENCE IN BWRS", NPC 2014



・運転中のpH管理
 ✓米国では、近年は一定pH管理を志向



J. Stevens, et al., "Elevated RCS pH Program at Comanche Peak", International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, 2006





• 米国では一定pH管理(オレンジ)プラント数が増加



D. M. Wells, et.al, "Chemistry Control to Meet the Demands of Modern Nuclear Power Plant", NPC 2016



・燃料の超音波除染(UFC、HE-UFCを適用)

•適用後時間遅れはあるが、線量率が低下



M. Little, et.al, "Ultrasonic Fuel Cleaning Update: Case Studies Industry Experience and Lessons Learned", NPC 2016

まとめ



- 再稼動前の被ばく低減対策
 - HFT水質管理
 - pH管理
 - クラッドバースト抑制
 - 亜鉛注入
 - 停止時除去促進
- 再稼働後の被ばく低減対策
 - 長期保管後の亜鉛注入皮膜の健全性
 - 周辺系統の亜鉛注入効果
 - 溶存水素濃度(DH)管理(被ばく低減、材料健全性)→今後の検討課題
 - 海外動向(Co除去樹脂、運転中の一定pH管理、燃料超音波除染)

MOVE THE WORLD FORW>RD

