

原子力発電プラントの水化学に関する 国際会議2016 (NPC 2016) Brighton の概要

一般財団法人 電力中央研究所
材料科学研究所

河村浩孝

平成29年3月1日(水)
日本原子力発電(株)本店



本日の内容

1. 水化学国際会議 (NPC)
2. 基調講演 (英国, 米国, 日本の動向)
3. PWR一次系の水化学管理技術に係る動向
4. PWR二次系の水化学管理技術に係る動向
5. BWRの水化学管理技術に係る動向
6. 高経年化技術に係る動向
7. 燃料被覆管健全性/水化学の相互作用に係る動向
8. 補機系に係る動向
9. 放射線化学に係る動向
10. 福島第一発電所事故に係る動向
11. コアメンバー会議
12. 寸感

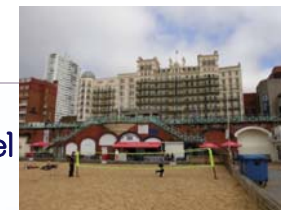
1. NPCとは

- Nuclear Plant Chemistry Conference, 水化学国際会議
- 1977年に英国Bournemouthで英国と日本の2国間会議として開催されて以降, 参加国を増やしながらかつ2,3年毎に開催
- 原子力水化学分野で唯一の国際会議

開催年	開催地/ホスト	開催年	開催地/ホスト
1977	英国(ポーンマス)	1998	日本(柏崎/東電)
1980	英国(ポーンマス)	2000	英国(ポーンマス)
1983	英国(ポーンマス)	2002	フランス(アビニオン)
1986	英国(ポーンマス)	2004	米国(サンフランシスコ)
1988	日本(東京/東電・原電)	2006	韓国(済州島)
1989	英国(ポーンマス)	2008	ドイツ(ベルリン)
1991	日本(福井/関電・原電)	2010	カナダ(ケベック)
1992	英国(ポーンマス)	2012	フランス(パリ)
1994	フランス(ニース)	2014	日本(札幌/北海道電)
1996	英国(ポーンマス)	2016	英国(ブライトン)

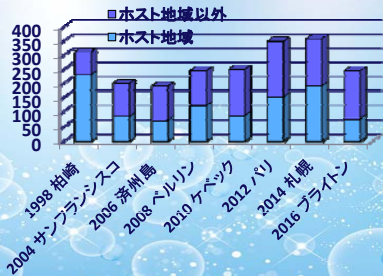
NPC2016の概要

- 期間: 2016年10月2日(日)~7日(金)
- 場所: 英国Brighton市, The Grand Brighton Hotel
Brightonは英国の南東部の海沿い, 15万人規模のリゾート地
近隣にBrighton大学やSussex大学があり, 若者の多い町
- 主催: The Nuclear Institute
- Chairman: Dr. Andy Rudge (EDF Energy Nuclear Generation)
- 参加者: 地元英国をはじめ, 日本, EU諸国, 米国, カナダ, 韓国, 中国等
から243名が参加(日本から31名が参加, 英国に次いで2番目)
- オーラルセッション: 10/3(月)~10/6(木)
基調講演: 3件
一般講演: 15セッション(8つの技術項目), 56件
PWR一次系, PWR二次系, BWR, 高経年化技術, 燃料と水化学, 補機系, 放射線化学,
事故マネジメント
- ポスターセッション: 10/3(月)~10/5(水)の午後 115件
- 放射線分解・電気化学に関するWS: 10/7(金), 15(日本から4件)
- テクニカルツアー: 10/7(金), Dungeness B発電所(AGR初号機)

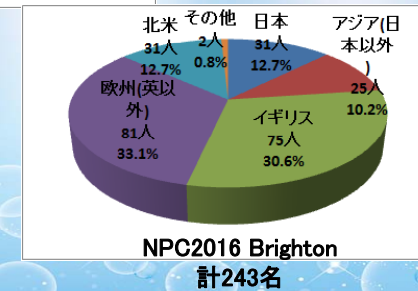
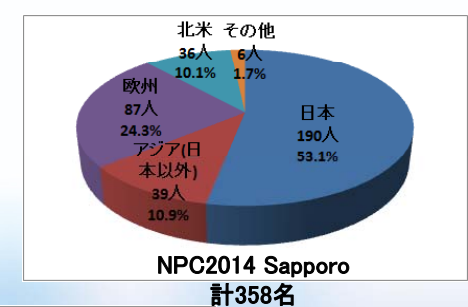
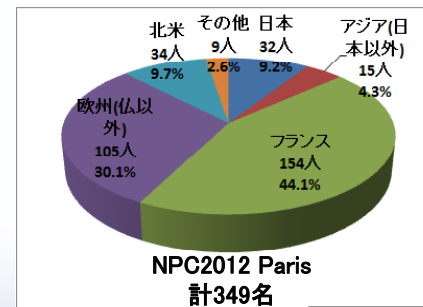


NPCの参加者および発表件数の推移

	参加国数	参加人数 (同伴者除く)	発表論文数 (招待/口頭/ポスター)
NPC2012 Paris	28か国	349名	207(0/61/146)
NPC2014 Sapporo	26か国	358名	234(11/77/146) ※うち特別 45(8/15/22)
NPC2016 Brighton	21か国	243名	174(3/56/115)



NPCの参加者の大陸別内訳



NPC2016の発表件数(登録時)

セッションピックス		招待講演	口頭発表	ポスター発表	計
S1	基調講演	3	-	-	3
S2, S7, S14	PWR一次系水化学	-	12	36	48
S3, S9	BWR水化学	-	8	17	25
S4, S13	補機系の水化学/ 廃棄水処理	-	8	16	24
S5, S11	軽水炉二次冷却系の水化学 (蒸気サイクル)	-	8	24	32
S6, S15	プラントの寿命管理および高経年化	-	8	9	17
S8	燃料と水化学との相互作用	-	4	16	20
S10	水化学と放射線	-	4	0	4
S12, S16	高温炉と事故マネジメント	-	8	8	16
合計		3	60	126	189

2. 基調講演の概要 一英国、米国、日本の動向一

- 主催者が3件(3カ国)を選定
- 英国は、これまでのガス炉, PWRに加えて, 6基のBWRを建設準備中 **ALARP (As Low As is Reasonably Practicable)の精神**に則り, 水化学を含む設計要項に対しライセンスを発行 (世界的にも特徴がある許認可, 国内では, 安全審査, 工事認可でも水化学に言及することはない)
- 米国EPRIはプラント水化学の標準, ガイドラインを定期的に改定しており, 参考となる世界全体の水化学の動向を紹介
- 日本からは, 福島事故の影響を受け, 原子力の再活性化に懸命に努力している現状を紹介
- 水化学に対する各国のスタンスが異なる様子が発表され興味深い

英国の動向 (Michael Paul Redmond: ONR)

- ONR(Office for Nuclear Regulation): 英国内の安全保障措置確保のために設置した機関。行政とは独立, 原子力エネルギーの安全・安心を規制(放射性物質の輸送を管轄)
- ALARP (As Low As is Reasonably Practicable)の精神に則り, 設計, 建設, 運転の各段階で安全性を確認。特に, 化学の視点から詳細なチェックを実施
- 6サイトでの計画が進行中。Hinkley Point CとSizewell C(UK-EPR)では設計審査GDA(Generic Design Assessments)が完了。Hinkley Point Cでは建設・運転審査NSL(Nuclear Site Licence)も終了。Wylfa NewyddとOldbury B(ABWR)のGDAは2017年12月完了予定
- GDAでは, 反応度制御, 構造材健全性, 燃料健全性と良好な燃焼, 線量率上昇抑制, 事故時の放射性物質放出抑制の5点から水化学を評価

引用文献: M. P. Redmond, "Regulating Chemistry for Nuclear Power Stations in the UK", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 1, (2016).

米国の動向 (Daniel Wells, EPRI)

- 原子力プラントの効果的な化学管理は, ①一次系圧力バウンダリの健全性確保, ②燃料の健全性確保, ③線量率低減
- 各水化学ガイドラインを継続的に改善するとともに, 1000サイクル以上の運転モードに対応する化学DBを作成・維持
- BWRでは, オンライン貴金属注入(OnLine NobleChem™, OLNC)が主流
- PWR一次系の水素濃度管理では, 高濃度水素添加プラントが増大

引用文献: D. Wells, "Chemistry Control to Meet the Demands of Modern Nuclear Power Plant Operation", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 2, (2016).

日本の動向 (勝村部会長, 日本アイソトープ協会)

- 福島第一発電所事故の概況をレビューし, 新規規制基準を紹介すると共に, さらなる安全運転を目指した水化学管理, 制御の方向性を提示
- 併せて, 事故からの復旧状況, 今後40年余に亘り展開する廃炉作業に向けた水化学の寄与を紹介
- 各国から関心を集めたのは, 長期間停止時の水化学管理

引用文献: Y. Katsumura, "Latest activities of the water chemistry group in Japan", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 3, (2016).

3. PWR一次系の水化学管理技術に係る重要課題

重要課題: 線源強度低減, Ni基合金等のSCC緩和

- (1) 亜鉛注入
⇒ 線源強度低減, Ni基合金の一次系応力腐食割れ(Primary Water Stress Corrosion Cracking, PWSCC)緩和
- (2) 高リチウム運転
⇒ 線源強度低減
- (3) 溶存水素(DH)濃度最適化運転(高DH運転)
⇒ Ni基合金のPWSCC緩和
- (4) ^{110m}Agによる線源強度評価
⇒ 線源強度低減
- (5) pH調整剤としてのKOHの適用可能性
⇒ 線源強度低減

セッション総括:

➢ 線源強度低減に係る新たな取り組みの紹介(日本と異なる取り組み)

(1) 亜鉛注入による被ばく低減技術とSCC緩和

- 日本:線量率低減を目的に5ppb程度の低濃度亜鉛注入
- 国外:PWSCC抑制を目的に数十ppbの高濃度注入が主流
- 近年,低濃度注入でもPWSCC改善効果が認められつつある
- 線量率低減効果と燃料のクラッド誘因型出力変動
(Crud Induced Power Shift, CIPS) や材料への影響を適切に見極める
必要あり
- ほう酸のリサイクルにより Zn_2SiO_4 が熱力学的に析出
⇒ B-Si-Znの相互作用の明確化が必要

引用文献: O. A. Ramos, et. al., "Enhance of Silica Management in French PWR Fleet", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 7, (2016).

引用文献: D. Wells, "Chemistry Control to Meet the Demands of Modern Nuclear Power Plant Operation", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 2, (2016).

- OSCARコード(CEA開発)を用いた亜鉛注入の影響を評価
- Znは酸化皮膜の内層皮膜内のCo取り込み抑制に効果を有するが,溶液中のCo濃度と外層皮膜内のCoの取り込みは亜鉛注入により増加

引用文献: F. Dacquit et. al., "Zinc effect on the primary circuit contamination of a Belgian PWR using the OSCAR V1.3 code", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 80, (2016).

(2) 米国PWRにおける高pH運転基数の推移

Comanche Peak 2号機の第7サイクル(2002年5月~2003年10月, Li濃度5ppm, B濃度1425ppmの高pH運転($pH_T=7.3$))の結果, ①出力変動時の腐食生成物の移行量は最小, ② ^{58}Co と ^{60}Co の濃度および被覆管表面の酸化物量は第6サイクルよりも低下, ③被覆管の腐食挙動およびNi合金のPWSCCに影響を及ぼさない, ④腐食生成物の除去量は第6サイクルよりも低減, ⑤停止時の過酸化水素添加により $^{58}Co/Ni$ 比は低下
これを受け, 第8サイクル(2003年11月~)ではLi濃度6ppm($pH_T=7.4$)で順調に運転
他プラントでも, pHを6.9から7.4に上げると腐食生成物量は低減



- CIPS (Crud Induced Power Shift) のリスク低減
- 近年, 米国を中心に高pH運転を採用するPWRが増加

引用文献: D. Wells, "Chemistry Control to Meet the Demands of Modern Nuclear Power Plant Operation", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 2, (2016).

(3) DH最適化運転の推移

- ◆ 米国のPWRを中心に, Ni合金のPWSCC対策としてDH濃度を
25~50cc-STP/kg- H_2O とする高濃度水素添加プラントが増大

引用文献: D. Wells, "Chemistry Control to Meet the Demands of Modern Nuclear Power Plant Operation", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 2, (2016).

(4) ^{110m}Ag に係る線源強度評価

- 国外PWRでは ^{110m}Ag による線量寄与が散見
- AgはCVCSの熱交換器やサンプリング系統などの特定部位に多く沈着
- 原因: AgIの析出, コロイド
- Agの生成源:
 - ① 炉心容器シール材からの溶出
 - ② Ag-In-Cd制御棒破損時の放出
- 対策:
 - ① 酸化運転温度の上昇
 - ② pH低下
 - ③ 酸化運転前のI濃度低下
 - ④ DO濃度の速やかな増加

引用文献: Moëz Benfarah et. al., "Study of PWR Contamination by ^{110m}Ag Using Thermochemical Simulation of Silver, Iodine and Silver Iodide Under PWR Coolant Conditions", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 70, (2016).

引用文献: Martin Bachet et. al., "Main conclusions from the MAI workshop on silver 110m contamination in pressurized water reactors", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 70, (2016).

(5) その他の被ばく低減技術

◆ pH制御としてのKOHの適用性評価

- PWRのpH制御に使用する⁷LiOHの供給に係わる懸念から、代替剤としてのKOHを検討
- VVERの実績に基づき、燃料被覆管、SG伝熱管等への影響は小さいと評価
- ⁴²Kによる線量増加が懸念事項

引用文献: K. Fruzzetti, "Evaluation of Potassium Hydroxides for Reactor Coolant PH Control in Western PWRs", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 6, (2016).

◆ その他の線量低減対策

- KKG, Angra II, Atucha IIを対象に、線量率低下を目的としたHFT時と出力運転時の化学管理を紹介
- 高pH運転と亜鉛注入の組み合わせによる保護膜形成による線量率低下

引用文献: A. Drexler et. al., "Chemistry concept for dose rate minimization treatment of new and decontaminated PWRs and PHWRs", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 5, (2016).

4. PWR二次系の水化学管理技術に係る重要課題

重要課題: 鉄持込抑制と蓄積鉄の除去

- (1) 高pH運転 ⇒ 系統内の腐食抑制
- (2) 分散剤 ⇒ SGのファウリング対策, 系統内のFe濃度抑制
- (3) フィルムフォーミングアミンの適用
⇒ 系統内のFe濃度抑制, 鉄系材料の腐食抑制
- (4) 化学洗浄 ⇒ SGのファウリング対策, 系統内のスラッジ除去
- (5) ヒドラジン代替剤
⇒ がん原性薬品代替剤としてのDEHAのDoel-2適用試験

セッション総括:

- 分散剤(PAA) は試行段階にあり, 適用条件の最適化等が期待
- がん原生を有するヒドラジンに対する代替剤(DEHA)の検討が進行中
- フィルムフォーミングアミンの試用も積極化

(1) 高pH運転 – SG二次側への鉄持ち込み抑制 –

- 二次冷却材の高pH化により系統内のFe低減
- 二次系材料構成に応じたpH調整剤(種類・添加濃度)の最適化が主要テーマ
- ETA, アンモニア, DMA, モルフォリンおよびそれらの組み合わせが採用
- 日本も海外知見を参考にpH調整剤の最適化を図る必要あり

引用文献: D. Wells, "Chemistry Control to Meet the Demands of Modern Nuclear Power Plant Operation", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 2, (2016).

(2) 分散剤 – SG二次側の鉄除去 –

- 分散剤(Polyacrylic acid, PAA)はSG二次側の鉄スケールを水中に分散して除去する技術, 1990年代後半より開発
 - 10基程度で試運用中, SG汚れ係数の回復を確認
 - 注入法:
①運転中(On-line), ②保管中(WLU), ③クリーンアップ時(LPR), ④スラッジランシング
 - Brainwood 1号機に加え, Doel 3号機でも, 運転停止直前に高濃度で短時間, 分散剤を注入
 - 鉄スケール除去, SG伝熱性能回復は, ASCA洗浄と同程度
- 引用文献: K. Fruzzetti et. al., "PWR Secondary Dispersant Operating Experience Update" Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference, NPC2016, Paper 16, (2016).
- ラボ試験の結果, PAA存の在下では, 模擬伝熱管(TT690合金)にFe₂O₃が形成, PAA無と比較して液相のFe濃度が約6倍と評価

引用文献: M. Roy et. al., "Fouling of Steam Generator Tubes in Nuclear Power Plants: Investigation on the Preventive Effect of Polyacrylic Acid on Iron Oxides Deposition" Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference, NPC2016, Paper 18, (2016).

(3) フィルムフォーミングアミン (FFA)

- 100ppm以上のFFAにより腐食抑制効果発現
- FFAは沸騰伝熱面の伝熱率を増加
- PWR適用試験では、実施後1週間程度で金属表面にFFAが吸着し、Feの移行率は50%減少
- 流体力学、粒子輸送、粒子間/表面の静電力を考慮した計算法を開発
- SG内の腐食生成物の析出パターンはキドニー型で、析出量は中心が最大、大径粒子は中央に析出し、小径粒子は外周側に析出
- FFA適用により粒子径は小さくなる

引用文献: L. Rudolph et. al., "CFD calculation method for the assessment of the impact of Film Forming Amines on local deposition at the tube sheet of steam generators" Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference, NPC2016, Paper 61, (2016).

引用文献: S. Choi et al., "Filing Amine Use in PWRs: A Pathway to Wider Use", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference, NPC2016, Paper 60, (2016).

(3) フィルムフォーミングアミン (FFA)

- FFAの1種であるオクタデシルアミン(ODA)は228°Cと300°Cの両条件下で炭素鋼の腐食速度を減少
- ODA注入は、炭素鋼表面に酸化皮膜が存在している状態でも、金属光沢表面状態で注入した場合と同様の効果
- FAC発生部位でもODAは効果的に作用と推測
- いったんODA皮膜が形成されると、228°Cでは少なくとも10日間は保護皮膜を保持し、腐食を抑制
- 温度低下によりODAの効果も低下

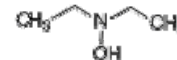
引用文献: E. Jäppinen et. al., "Effect of octadecylamine on carbon steel corrosion under PWR secondary side conditions" Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference, NPC2016, Paper 61, (2016).

(4) 化学洗浄 – SG二次側の鉄除去 –

- 従来の化学洗浄
 - ① Hard洗浄: SGOG (EPRI), HTCC (AREVA),
 - ② Soft洗浄: ASCA (DEI), DMT (AREVA), PACCO (COMEX) の特徴と,
- 近年開発された化学洗浄
 - ③ iASCA (DEI), DART (AREVA) の概要紹介
- スケール対策技術として分散剤,
- 超音波洗浄(UEC)等の技術を紹介
- これら技術はEPRI Sourcebook (レポート番号3002005090)に収録

引用文献: M. J. Little et. al., "Updated Experience with Steam Generator Secondary Side Deposit Management" Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference, NPC2016, Paper 17, (2016).

(5) Doel 2号機におけるDEHA実機適用試験



- DOは設定値の7ppbより低い4~5ppbで維持、給水系DOは5ppb未満
- DEHAの脱酸素効果は、N₂H₄に比べやや小さいが(給水系でN₂H₄注入時のDO濃度0.1ppbに対し0.4ppb)、SG二次系の脱酸素効果としては充分
- DEHA注入時、SGBD水Feは100~200ppb、給水Feは1ppbから3ppbに上昇
- DEHAはSG上流で熱分解と脱酸素反応、第6予熱器(190~233°C)で消失
- 脱酸素反応により、毒性のアセトアルデヒドが中間生成、最終的には酢酸と水に分解
- 主な熱分解生成物は、非発がん性で揮発性のジエチルアミン(60%)とエチルアミン(10%)
- 有機酸によりSG器内水の酸電気伝導率増、SGBDで有機酸の除去
- 復水エジェクターは、非凝縮性ガス除去用の真空ポンプに比べ揮発性熱分解生成物の除去効率が小さいためTOCは増加、給水pHと電気伝導率は上昇(Doel 2:真空ポンプ無)
- 給水系のDEHAの推奨濃度は50ppb

引用文献: Lieve Verelst et. al., "An Investigation into an Alternative to Hydrazine as an Oxygen Scavenger in the Secondary System of NPPs Literature Review and Plant Trial" Proc. Int. Conf. on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 2016 (NPC 2016), Paper 41, Brighton, UK (2016).

5. BWRの水化学管理技術に係る重要課題

重要課題: ステンレス鋼のSCC環境緩和, 線源強度低減

- (1) 貴金属注入(Noble Metal Chemical Application, NMCA, On Line Noble Metal ChemTM, OLNC)
 - ⇒ 線源強度低減, ステンレス鋼の応力腐食割れ(Stress Corrosion Cracking, SCC)環境緩和
- (2) 亜鉛注入 ⇒ 線源強度低減
- (3) 酸化チタン(TiO₂)被覆
 - ⇒ ステンレス鋼のSCC環境緩和
- (4) 化学除染技術 ⇒ 線源強度低減
- (5) 放射性核種の移行モデル
 - ⇒ BWR線源強度低減(吸着過程における元素の拡散を考慮)

セッション総括:
さらなる技術の進展が期待

(1) NMCA, OLNC, HWC運用基数の推移

- 米国ではオンライン貴金属注入(OnLine NobleChemTM, OLNC)が主流
- DZOを用いた亜鉛注入
- 燃料影響の回避のため給水中DZO濃度を制限しているが, 給水中の鉄クラッド低減の結果, 炉水中のDZO濃度は増加傾向
 - 引用文献: D. Wells, "Chemistry Control to Meet the Demands of Modern Nuclear Power Plant Operation", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 2, (2016).
- EPRIのBWR VIP (BWR Vessel and Internals Project) では, IGSCC抑制対策として貴金属注入を推進
- 近年は運転中に注入を行うOLNCを推奨
 - 炉内のPt付着量は炉外試験片の付着量よりも多い
 - PLR配管, 下部プレナム, ボトムドレン配管内での腐食電位(ECP)は, OLNC実施中に速やかに-230mV(SHE)を下回る
 - VIPでは, Pt粒径, 個数密度分布, 付着量分布の実測値, 炉心シールド再点検の結果等と併せ, IGSCC抑制効果を評価
 - Pt付着量とECP低減効果との相関から, OLNC技術の向上を図る
 - 引用文献: S. E. Garcia, et. al., "IGSCC Mitigation Monitoring Results at BWR Plants with Noble Metal Treatment", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 10, (2016).

(2) BWRにおける亜鉛注入の推移

- ZnとSiの共存により, Zn-Si化合物が形成し, 燃料クラッドの稠密・固着化を促進
- これにより, 被覆管の熱伝達率が低下し, 被覆管表面に蒸気膜を形成し, 被覆管の温度上昇, 耐食性低下, 延性低下に繋がる
- DZO注入速度の増加は, 皮膜内への⁶⁰Coの取り込みを抑制, 粒子状の⁶⁰Co濃度を増加

引用文献: D. Wells, "Chemistry Control to Meet the Demands of Modern Nuclear Power Plant Operation", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 2, (2016).

(3) 酸化チタン(TiO₂)被覆技術

- 光半導体であるTiO₂を用いて, 炉内チェレンコフ光の光励起により腐食電位(ECP)を低下させる技術
- TiO₂単独では, 水素無注入条件でもECPは低下
- TiO₂+貴金属共存下でも貴な方向にシフトしたECPを一定量低下
- 貴金属注入に対するTiO₂の利点:
 - ① 水素注入が不要
 - ② 炉上部も保護対象
 - ③ ⁶⁰Co溶出抑制が期待
 - ④ 燃料被覆管の健全性と両立性

引用文献: J. Takagi et al., "Advances in TiO₂ Injection Technology Development for IGSCC Mitigation under Various Water Chemistry Conditions in BWRs", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference, NPC2016, Paper 11, (2016).

(4) BWRにおける放射性核種の移行モデル

- 多様な運転条件にも対応可能な放射性核種の移行モデルを作成
- 実機データとラボ試験結果を基に、配管線量率と水素注入、Ni/Fe比、亜鉛注入との相関を再検討し、沸騰場を考慮
- 水質変化に伴う配管線量率の変化を凡そ再現
- 水素注入量に応じた腐食速度の変化やZn化合物の形態は未考慮

引用文献: J. Henshaw, et. al., "Material and Activity Transport Modelling in BWRs", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 110, (2016).

(5) BWR除染技術

- Cofrentes発電所(スペイン)において除染後の再汚染が顕著
- ①白金付着(LTNC™), ②セルファセンプルモノレイヤー(SAM), ③SAM後の白金付着について実機で効果の確認を行い, ③が再汚染抑制に最も効果的

引用文献: J. D. S. Zapata et al., "Decontamination and Post-Decon Passivation treatment of the RRS Loops and RWCU System as a Measure for Collective Dose Reduction and Recontamination Reduction at the NPP Cofrentes in Spain -Update 2016", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 32, (2016).

(6) BWRにおける給水鉄濃度低減対策

- 近年、復水脱塩システムの高度化により、BWR給水Fe濃度は低下

引用文献: D. Wells, "Chemistry Control to Meet the Demands of Modern Nuclear Power Plant Operation", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 2, (2016).

6. 軽水炉の高経年化技術に係る重要課題

重要課題: 経年劣化予測モデル, 二相流下FAC解析モデル, クレビス腐食挙動

セッション総括:

多岐にわたる発表

- PWR二次系の化学管理の発表が中心
- 経年劣化予測モデルの精度向上
- 炭素鋼の二相流下FAC解析モデル
- 304ステンレス鋼のクレビス腐食挙動
- CANDU炉のSG伝熱管の損傷
- インド PHWRフィーダー管のFAC
- 福島事故に係るクレビス腐食
- ほう酸水によるコンクリートの中性化と鉄筋腐食

(1) 気-液二相流FACモデル

- 気-液二相流下でのFACをモデル化
- 单相流のFACモデルを二相流系に適用するため、二相流の実験データにより検証した流動特性(蒸気条件に左右される流れや液滴衝撃)を用い、壁面の液膜の効果/影響を考慮
- 液膜の化学は、金属の反応と酸化皮膜の分解/成長反応に左右され、添加薬品(アンモニア、アミン等)により気液分配係数が異なる
- 酸化皮膜の性状(多孔性、ねじれ、 Fe_3O_4 粒度)もパラメータ

引用文献: D. H. Lister, "Flow-Accelerated Corrosion in Two-Phase Steam-Water Flows: Experiments and Modeling", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 56, (2016).

(2) クレビス部の再不動態化電位

- クレビス腐食は、クレビス部とバルク水環境の電位差により発生・進展
- 304Lおよび316Lステンレス鋼のクレビス腐食の開始電位と再不動態化電位を電気化学試験により調査
- その結果、クレビス腐食が開始する臨界電位は、304L鋼と316L鋼では差はなし
- 再不動態化臨界電位の差は、有意
- **316L鋼の再不動態化臨界電位は、腐食により溶出し、クレビスに濃縮したモリブデン酸塩イオンの影響により304L鋼より貴**

引用文献: Y. Watanabe et. al., "Critical Potentials for Re-Passivation of Corroding Crevice in Corrosion Resistant Alloys" Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference, NPC2016, Paper 58, (2016).

7. 被覆管健全性/水化学の作用に係る重要課題

重要課題: 燃料洗浄, AOA対策, 亜鉛注入, NMCAに関連した燃料被覆管の健全性との相互作用

- (1) PWR関連
AOA対策としてのクラッド付着低減対策
被覆管クラッド性状への亜鉛注入の影響
- (2) BWR関連
被覆管へのPt付着挙動の影響(被覆管へのNMCAの影響評価)

セッション総括:

- 当該分野に関する世界の動向は大きく変化していない
- PWRでは燃料洗浄, AOA対策, 亜鉛注入の影響評価研究
- BWRでは被覆管へのNMCAの影響評価研究

(1) PWR燃料の高効率超音波洗浄

- Ringhals発電所において H_2O_2 を用いた高効率の燃料超音波洗浄 (High Effective Ultrasonic Fuel Cleaning, HE-UFC)を実施
- **停止時クリーンアップ時に比してHE-UFCの方が洗浄効果は大きく、固着クラッドも除去**
- **燃料洗浄により3~5年間で30~60%の線量低減**
- 部分洗浄は高額なクラッド掻き取り調査(クラッドの付着量, 性状, 化学組成の調査)の代替
- 燃料洗浄時に採取したクラッドサンプルは、サイクル間のクラッドのキャリアオーバーの状況を反映

引用文献: B. Bengtsson et. al., "Safety & Radiation Benefits using Frequent and Optimized Fuel Cleaning", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 28, (2016).

(2) PWR亜鉛注入下における燃料被覆管クラッド付着のモデル化

- **物質移動, 飽和溶解度を考慮し, $Li_2B_4O_7$, ZnOおよび Zn_2SiO_4 のクラッド内析出を予測できるZn-B-Si系モデルを検討**
- 実機状況を再現するため, Zn-Bイオン, $Si(OH)_4$, $B(OH)_3$ 間の複雑な化学物質も考慮
- Zn濃度が低い場合, $Li_2B_4O_7$ よりもZnOが析出すると予測したが, 10ppb未満のZn濃度でもCIPSが観察されることと一致しない等, **改良が必要**
- **Zn-BorateとSi-Borateを考慮することで, モデルを精緻化できるため, Zn-BorateとSi-Borate等の高温水中における熱力学データの拡充が重要**

引用文献: J. Henshaw et. al., "Zinc Chemistry in Fuel Crud", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 31, (2016).

(3) BWR燃料被覆管へのPt付着の影響

- ラボ試験の結果, 付着したPtの粒径はPt注入速度に依存し, **沸騰面の方が非沸騰面よりもPtを引き付け**, Pt注入のタイミングとH₂取込み挙動には相関なし
- 燃料被覆管表面にPtが付着すると触媒作用によりジルカロイの酸化速度が**変化**
- 本試験範囲では, Pt付着によりジルカロイ表面皮膜は**薄化**するものの, **ジルカロイに対する負の影響は認められない**

引用文献: P. V. Grundler et. al., "Influence of Pt Deposition on the Behaviour of Zircaloy Cladding under Boiling Conditions in Simulated BWR Environment", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 30, (2016).

8. 補機系に係る重要課題

重要課題: 水浄化装置, 除染技術

セッション総括:

- 新規廃液フィルタの選定試験, 原子炉キャビティ除染用浄化装置(仮設型, 水中フィルタ&水中用樹脂塔), 除染方法(廃棄物の少ない東芝のT-Ozone法)など, 運転中の発電所の被ばく線量低減策として有効であるほか, 廃炉作業における除染, 福島第一原子力発電所の事故炉の除染にも活用可能な技術
- 国外では, 固定子冷却系関連, 補機冷却系防錆剤の開発等にも着手
- 主系統以外とはいえ, プラント停止につながるため, これら系統の水管理の重要性についても改めて注意喚起

(1) 廃液処理フィルタ膜のファウリング低減方法の開発

- 廃液処理フィルタ膜の**ファウリング(汚染物による膜の閉塞)**が問題
- ファウリングが最小となる膜種および運転方法の比較検証試験を実施
- SiC製無機膜(チューブラー型, 孔径70,000Da)を用いたクロスフロー通水で, 定期的に**Back Pulse Hammer洗淨**(チャンバーに溜めた透過水および加圧空気を急速に解放して逆洗する, いわゆるエアサージ逆洗の一種)を**定期的(10分毎など)**に実施する運転方式が**ファウリングが最小**
- 放射性物質の除去性能も, 比較対象の糸巻きフィルタに**比較ベ30~70倍のDF**

引用文献: M. Devlin et. al., "Membrane filtration and investigation of filter fouling mitigation strategies", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 12, (2016).

(2) T-OZON法の開発

- 二次廃棄物発生量の少ない除染方法として, **BWR除染用のT-OZON™法**を, **PWRの廃炉作業**に適用するため, 除染条件を最適化
- 除染試験の結果, **オゾンによる酸化時間の延長と, シュウ酸による短時間の還元工程の組合せ**により, **600TT合金SG伝熱管材(米国PWRより抜管)の除染効果は十分**
- 酸化膜に浸透したオゾンにより母材界面に鉄リッチ層が生成し, この層が還元工程のシュウ酸で溶解することにより除染効果が改善したと推察

引用文献: K. Negishi et. al., "Development of the Advanced T-OZON™ for PWR Decommissioning", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 15, (2016).

(3) 水冷式の固定子冷却システムの水化学

- 発電機の水冷式固定子冷却システムでは、①水素のリーク、②冷却水路(巻線外のフィルタやストレーナー)の閉塞、③流路内の閉塞、④冷却水のリークを経験
- 本システムの水質管理は、銅系材料の腐食を防止するためのDO範囲(20 μg/L未満または2mg/L以上)の維持とpH調整が主
- 配管閉塞による温度上昇により、プラント停止に至った事例もあるため、運用のポイントを注意喚起

引用文献: A. Odell et. al., "Stator Water Cooling Chemistry: A Review of Recent Industry Issues", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 48, (2016).

9. 放射線化学に係る重要課題

重要課題: 核種の移行挙動, モデル化

セッション総括:

- BWR, PWR, CANDU炉での核種移行挙動に関し、実機データを詳細に解析し、核種の挙動を経験的あるいは機構論的に理解することで、将来的の線量率低減に最適な水化学管理を指向
- 核種の挙動の理解・予測に対し、機構論的な視点に基づく研究が精力的に継続
- その一方で、統計的な手法により経験式を導く取り組みも開始
- 両者の特徴を踏まえ、その知見を活用し、より良い水化学管理の構築に結び付けることが肝要

(1) BWR用の核種移行挙動予測評価

- 多変量解析を用いた核種移行挙動予測評価ツールの開発
- 実機データを用いたクラスター分析や回帰計算によりパラメータを設定した経験的なモデル式を提案(パラメータ毎の寄与を相対的に把握可能)
- BWR再循環系の⁶⁰Co表面線量率を評価した結果、実測よりは若干低いものの定性的な傾向を把握
- OLNCの効果も評価
- PWR一次系への亜鉛注入により線源強度が約50%低下し、プラント停止前10日間のB濃度を低濃度で管理すると停止時の線量が低下すると評価
- サイクル末期のB濃度の効果、停止時の⁵⁸Coの放出と伝熱管材料、表面処理の関係も評価

引用文献: C. A. Gregorich et. al., "Actionable Insights for Reducing Radiation Fields in Nuclear Power Plants through Multivariate Statistical Analysis", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 36, (2016).

(2) PWRの放射性のIとXeの挙動

- Sizewell Bの放射性IとXeの生成・減衰・移行挙動に関するモデルを開発
- プラントデータによるモデル計算をサイクル間で比較し、破損した燃料や燃料要素の線量への寄与を相対的に推測
- パッケージソフトFACSIMILEを用いモデルを構築
- RCSの放射性Iの生成速度(炉の出力に比例)、イオン交換樹脂によるIの除去、析出したIのXeへの崩壊、Xeの気液分配、ガス状XeのVCTからの除去などを考慮
- モデルはSizewell Bの第10と第12サイクルに適用され、IとXeに及ぼす運転条件の影響を再現

引用文献: S. Bowskill et. al., "Modelling of Fission Product Behaviour in Sizewell B Coolant", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 37, (2016).

(3) PWRにおける α 核種の挙動

- BEZNAUでの停止時化学管理と燃料かき取り調査(2007, 2010, 2015年)結果をレビュー
- 1993年と1999年にSG交換, 2015年に原子炉容器上蓋を交換
- 2005年以降, EPRIガイドラインに基づき停止時水化学を最適化し, Niと ^{58}Co を効果的に除去, ホットレグの線量を極めて低く維持
- 停止時は, ^{60}Co よりも ^{58}Co の濃度が高く, 除去物中のNiの含有量はFeの2倍(燃料クラッドのFe含有量はNiの3倍)
- 1号機は第1サイクルの燃料破損により冷却水中に α 核種が多い
- 主要な α 核種は, 新燃料では短半減期の ^{242}Cm , 経年燃料では長半減期の ^{241}Am
- 原子炉容器上蓋でも ^{241}Am は高割合
- 1号機の燃料破損は2001年以降ないことから α 核種は炉外表面から放出

引用文献: I. Mailand et. al., "Alpha Source Term Trend in terms of Dose Rate Reduction in NPP BEZNAU", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 39, (2016).

10. 福島第一発電所事故に係る重要課題

重要課題: 核分裂生成物(FP)挙動, 放射線誘起電解による水素発生

- 福島第一原発事故における核分裂生成物(FP)挙動をFEP(forward evaluation procedure)とBEP(backward evaluation procedure)により評価
- 環境に放出された放射性I, Csは全体の約2%
- サプレッションチャンバー(S/C)でのFP挙動評価から, 初期の500時間では計算評価と実測結果は一致したが, それ以降は, 計算結果は一定になるが, 実測では壁面やトラス底部への吸着の影響で減少
- 原子炉建屋(R/B)では, 初期は ^{134}Cs の影響が大きい, 2000日後には ^{137}Cs の線量への寄与が50%以上

引用文献: S. Uchida et. al., "Fission product behaviour in Fukushima Daiichi NPP under accident conditions", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 44, (2016).

- 事故初期の水素発生を, 放射線誘起電解(radiation-induced electrolysis)に基づき評価
- 1-3号機では半日で 10000m^3 -STPの水素がRPVで発生
- 4号機のSFPでは, 40°C 以上で水素爆発の寄与分の水素発生量が存在

引用文献: G. Saji, "Hydrogen Generation Through Radiation-Induced Electrolysis in the Fukushima Accident", Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference NPC2016, Paper 45, (2016).

NPCのコアメンバー会議

- 次回以降の開催要項の決議等のNPCのステアリングを実施
- 今回, コアメンバーの選出ルールが明文化
石樽先生からの示唆(NPC2014)を契機として, コアメンバー選出のルール化
- 直近過去4回のNPC開催国, 今後2回の開催予定国, 直近過去3回の参加者数が多い3カ国の計9カ国によりコアメンバーを構成
フランス(NPC 2020主催予定), 米国(NPC 2018主催予定), 英国(NPC 2016主催), 日本(NPC 2014主催), カナダ(NPC 2010主催), ドイツ(NPC 2008主催), スウェーデン(2012-2016参加者数(34)), 韓国(2012-2016参加者数(32)), ロシア(2012-2016参加者数(28))
- NPC2018: 米国サンフランシスコにて2018年9月に開催
- NPC2020: SFEN主催により南フランスで開催

寸感

- 新設炉を多く抱える英国や仏国のプラントメーカーを中心に, 新たな水化学法の開発と実機適用が積極的に実施
- 軽水炉の再稼働が進まない日本との格差を感じた
- 国内参加者が大きな刺激を受けたことは言うまでもない
- その一方で, 軽水炉プラントの輸出は, 安全技術に加え水化学も含めた保全技術のパッケージ化も検討されていることもあり, 早い巻き返しが求められる