

原子力発電プラントの水化学に関する
国際会議2014札幌
(NPC 2014 SAPPORO)
実施報告

2015年3月12日

日本原子力学会 水化学部会
NPC2014札幌 実行委員会

目次

1. 開催概要

2. 技術成果報告

2.1 基調講演

2.2 福島関連

2.3 BWR関連

2.4 PWR関連

2.5 その他

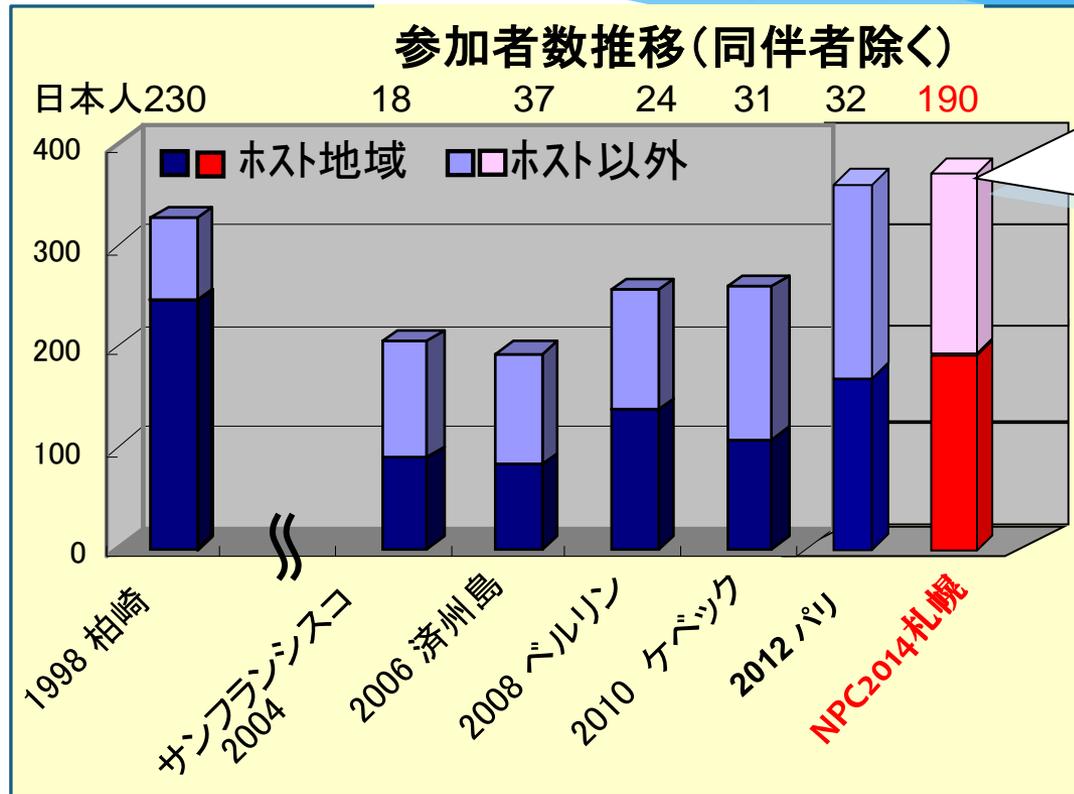
1. 開催概要

(1) 概況

- 会議名 Nuclear Plant Chemistry Conference 2014 SAPPORO
- 会期 2014年10月26日(日)～31日(金) 6日間
- 場所 北海道札幌市 ロイトン札幌
- 主催 日本原子力学会
- 参加者 **26ヶ国 372名**(日190, 米27, 仏23, 韓21, 英19, 加9, スウェーデン9, スイス9, 中9, 台8, フィンランド6, アルゼンチン4, チェコ4, 独4, 露4, スロバキア2, その他10, 同伴者14名)
- 発表 **招待講演11件、口頭発表77件、ポスター発表146件**
(うち特別セッション 招待8件, 口頭15件, ポスター22件)
- その他: 東京, 福井, 柏崎に続いて**4回目の日本開催**
2014年日本開催の意義を考慮し、**福島事故関連セッション設置**
投稿論文が想定以上となり, 運営都合上, **一部併列セッション運営**

1. 開催概要

(2) 参加者数



参加者実績
372名(同伴者含む)

国内 190名 } 358名
 海外 168名 }
 同伴者 14名

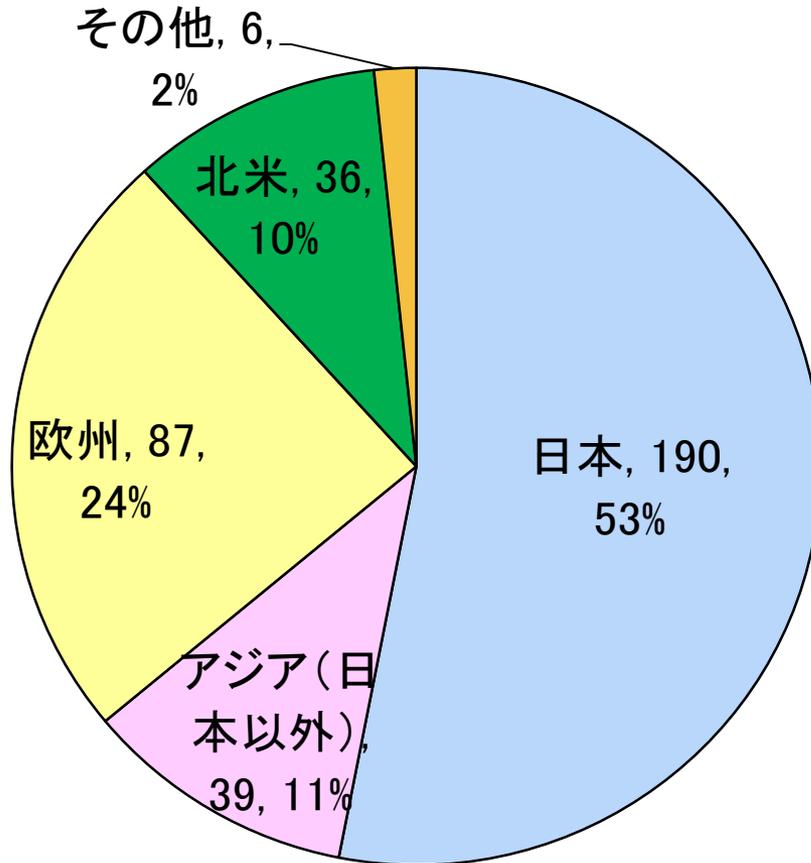
目標参加者数
 250名以上
 国内 150名以上
 海外 100名以上

ここ10年で最多

	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パリ	28か国	349人	207(0/61/146)
NPC2014札幌	26か国	358名	234(11/77/146) ※うち特別 45(8/15/22)

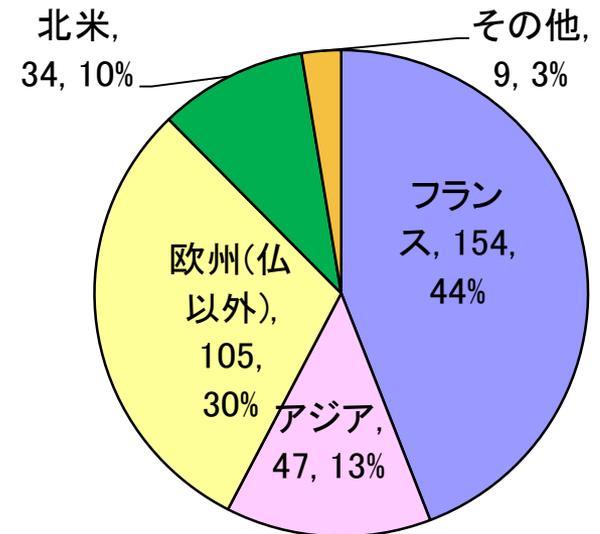
1. 開催概要

(3) 参加者地域別内訳(同伴者除く)



NPC2014 札幌
計358名

日本を除く地域別の参加人数では、欧州が最も多く、次いでアジア、北米の順



(参考)NPC2012 パリ
計349名

1. 開催概要

(4) 発表件数内訳

Session Topic		招待講演	口頭発表	ポスター発表	計
基調講演		3	—	—	3
S1	BWR 運転経験	—	5	14	19
S2	PWR VVER & CANDU/PHWR運転経験	—	8	14	22
S3	BWR関連の科学的知見	—	1	12	13
	PWR関連の科学的知見	—	11	21	32
S4	軽水炉二次冷却系の水化学 (蒸気サイクル)	—	5	4	9
S5	プラントの寿命管理および高経年化	—	5	9	14
S6	燃料と水化学との相互作用	—	5	10	15
S7	水化学管理最適化の計画とコンプライアンス管理	—	4	2	6
S8	保全 (除染と洗浄)	—	10	6	16
S9	補機系の水化学/ 廃棄水処理	—	4	16	20
S10	将来技術/基礎科学	—	4	16	20
特別S	福島第一発電所事故に関する特別セッション	8	15	22	45
合計		11	77	146	234

特別セッションでの発表が最多(約20%)、一般セッションでは概ねバランスよく分散

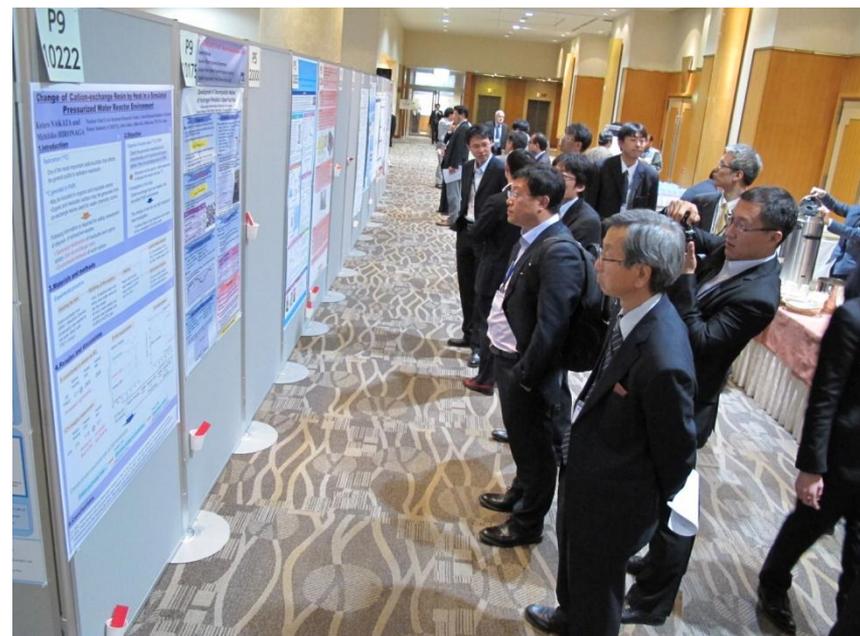
1. 開催概要

(5) 発表の様子

本会場



パラレルセッション会場



ポスター会場

1. 開催概要

(6) 優秀ポスター発表表彰式



受賞者8名に表彰状と記念品を贈呈

最優秀賞に選ばれたJiaxin Chen氏
(Studsvik Nuclear AB)



1. 開催概要

(7) 公式行事

10月26日(日) 大会初日

➤ レセプション

10月29日(水)

➤ 優秀ポスター発表表彰式

➤ Official Banquet

(実行委員会とダウケミカルの共催)



Banquet 北海道経済連合会会長 大内様ご挨拶

10月31日(金)

➤ オプションツアー

- 泊発電所: 安全性向上対策として実施されている防潮堤工事の状況や緊急時対策所、中央制御室などを確認
- JSW日本製鋼所 室蘭製作所: 大型製品の機械加工作業や日本刀の製作作業を見学



Banquet 和太鼓(橋本流地獄太鼓)演奏

1. 開催概要

(8) 閉会式とNPC2016開催案内



閉会式の様子



NPC2016開催の案内
(英国開催)

2. 技術成果報告 セッション構成

- Keynote Lecture (10/27)
- Special Session (Invited) – Fukushima Daiichi NPP Accident (10/27)
- Special Session – Fukushima Daiichi NPP Accident (10/29)
- Session 1 – BWR Operating Experience (10/27)
- Session 2 – PWR, VVER & CANDU / PHWR Operating Experience (10/28)
- Session 3 – Water Chemistry Scientific Studies (10/28)
- Session 4 – Secondary Water Chemistry (Steam Cycle) (10/29)
- Session 5 – Life Time Management and Plant Aging (10/29)
- Session 7 – Chemistry Optimization Programs and Compliance Management (10/29)
- Session 8 – Maintenance (10/30)
- Session 9 – Auxiliary Systems, Water and Waste Treatment System (10/30)
- Session 10 – Future Trend and New Development / Scientific Basis (10/30)
- Poster Session (10/27, 28)

2. 技術成果報告

2.1 基調講演

- 原子力発電を先導してきた米国、フランス、日本からそれぞれの水化学の現状と今後の活動について総括報告がなされた。これらの動向は世界の水化学を代表しており、今後の軽水炉の安全・安定運転上重要な役割を担っている。
- **米国**はこれまでHWC, Zn注入、NMCA、OLMC等世界初となる水化学技術を導入してきた。今後も長期的安定運転を目指し水化学の更なる改善(BWR; CoSeq™樹脂によるCoの除去、PWR; 一次系の高pH運転)に取り組む。
- **フランス**は2025年の原子力比率は53%を維持、このため高経年化に備えた水化学(一次系; PWSCC, AOA, 二次系SGのSCC, 配管のFAC対策)開発が主体となる。最近の話題として鉛がAlloy690に与える影響が懸念されている。
- **日本**は1982年に専門委員会、2007年に水化学部会を発足させて以降、水化学国際会議、アジア水化学シンポジウム、及び国内の運営委員会、研究会を主導し、得られた知見をプラント運営・研究開発に反映してきた。今後継続し標準化、ガイドライン、ロードマップの作成、ラジオリシスの研究等に取り組んでいく。

2. 技術成果報告

2.2 福島関連(1/18)

概要

- 今回の特記すべき企画として**福島第一原子力発電所事故の対応と水化学の役割について特別セッション**を設けたことが挙げられる。
- 8件の招待講演に加え、水化学国際会議としては初の**パラレルセッション**を設けて15件の口頭発表が行われ、さらに22件のポスター発表がなされた。海外からの関心も高く、全体の参加者数増大にも寄与したものと思われる。

招待講演

- 招待講演では、経産省より廃止措置等に向けた中長期ロードマップの進捗状況や汚染水対策の考え方、環境省よりオフサイトにおける除染活動の状況の報告があり、東京電力からは事故の発生状況や事故で得られた教訓、汚染水処理対策の実施状況、使用済燃料プールでの腐食抑制対策の実施状況に関する3件の報告があった。
- さらに、日本原子力学会事故調査委員会への水化学部会参加メンバーの報告、事故解析におけるソースターム評価の報告が行われた。
- 一方、**米国のTMI-2事故対応の経験者からは、復旧・除染の取り組み状況の総括的な報告があり、チェルノブイルの最新状況も交えての講演となり関心を集めた。**

2. 技術成果報告

2.2 福島関連(2/18)

- 東京電力からは事故の教訓として**”レジリエント”な設計**とすべきこと、すなわち設計基準事故(DBA)を大幅に超える条件でもプラントが耐性を有する設計とすることが重要との指摘がなされた。(10287)
- また、福島第一原子力発電所の復旧の一環として、汚染水処理対策の実施状況が報告された。～400m³/dayの地下水流入が継続する中、**セシウム除去設備、多核種除去設備**をフル稼働させ、炉心の循環冷却を維持するとともに、滞留する大量の汚染水の早期浄化を目指している。(10290)
- 汚染水対策の要諦として、除去、隔離、漏えい防止がある。
- それぞれ、緊急対策として**トレンチ浄化、止水・舗装、地下水バイパス、根本対策としてサブドレン汲み上げ・浄化、海側遮水壁設置、陸側凍土壁設置**を実施している。(10290)
- 腐食対策としては、海水流入後の原子炉及び燃料プールの材料健全性評価を実施し、**温度低下、脱気、pH管理、塩分除去、等が重要**と指摘された。これらの対策は、実際にプラントに適用されている。(10286)

2. 技術成果報告

2.2 福島関連(3/18)

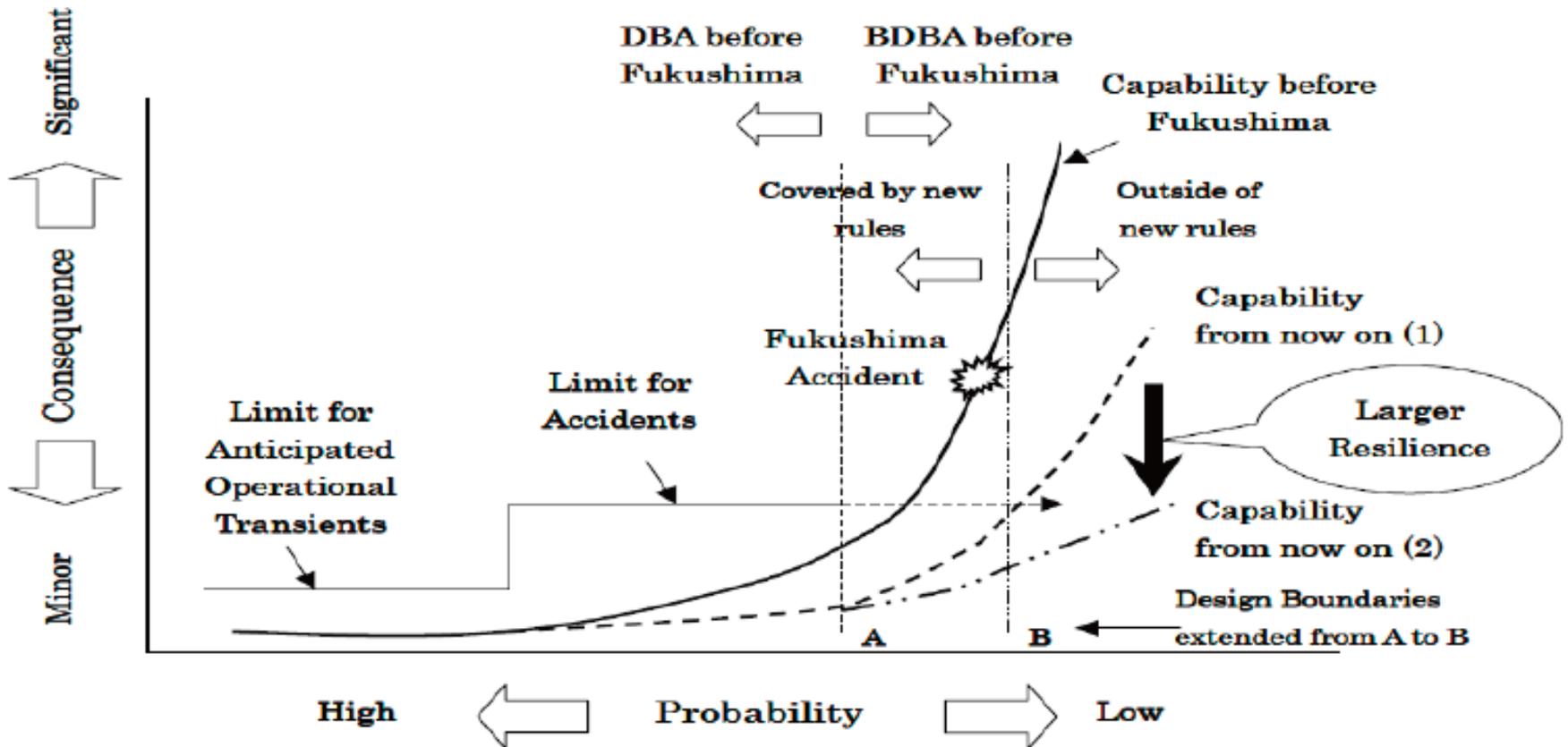


Figure 8. Resilience beyond design boundaries (*10)

(10287)

2. 技術成果報告

2.2 福島関連(4/18)

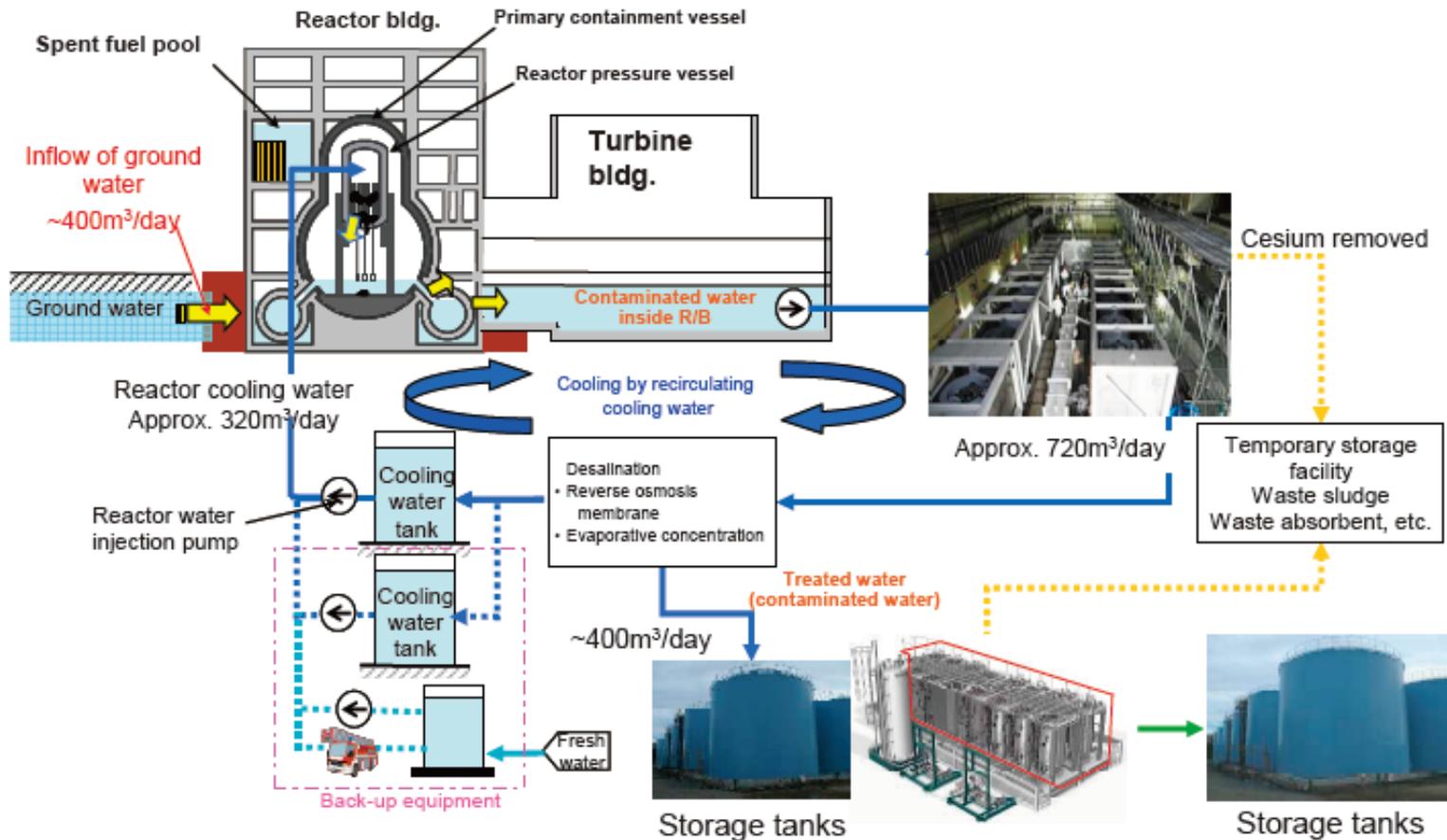


Figure 4. Circulating Water Cooling System (10290)

2. 技術成果報告

2.2 福島関連(5/18)

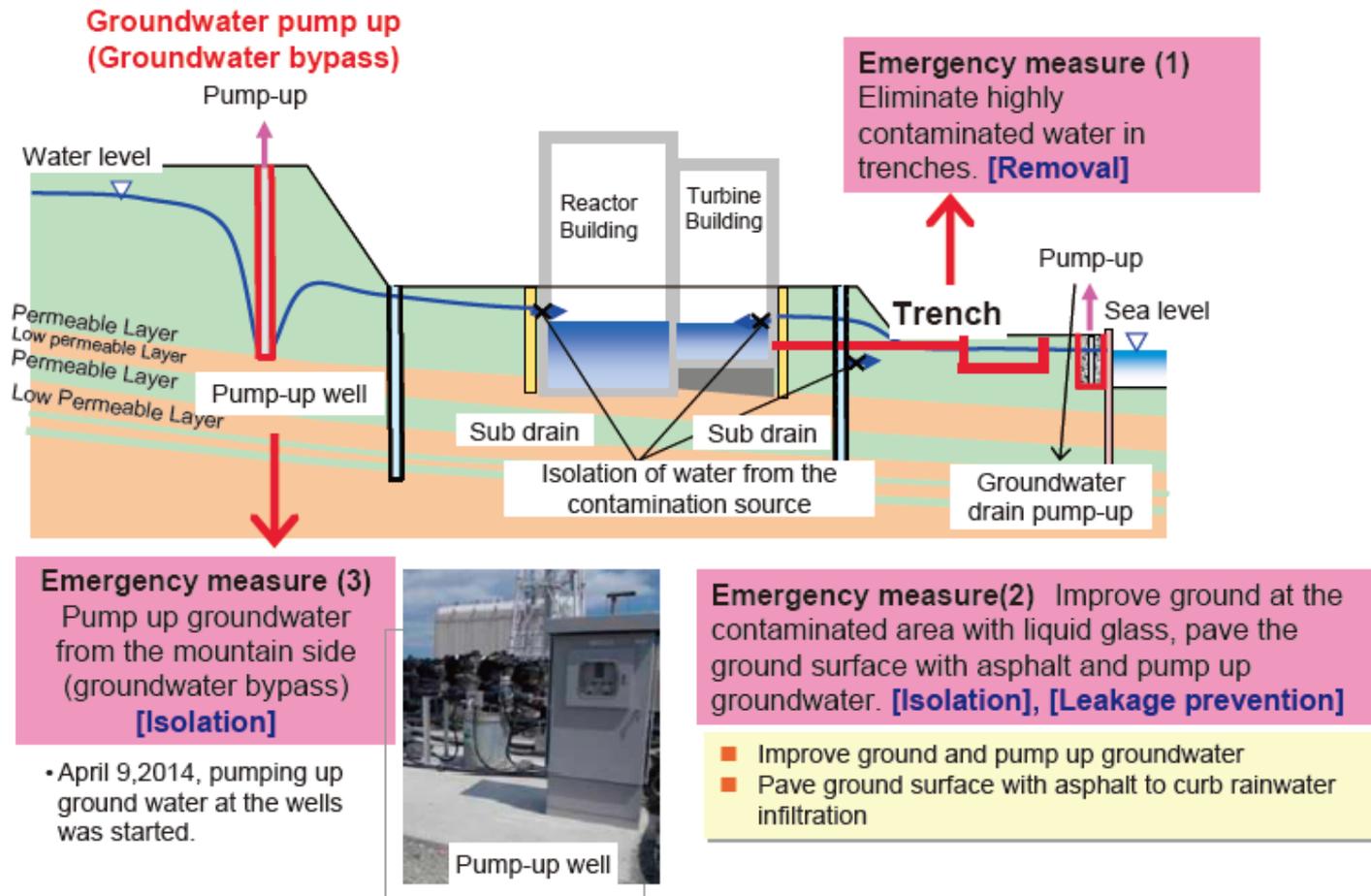


Figure 6. Measures against Contaminated Water – Emergency Measures – (10290)

2. 技術成果報告

2.2 福島関連(6/18)

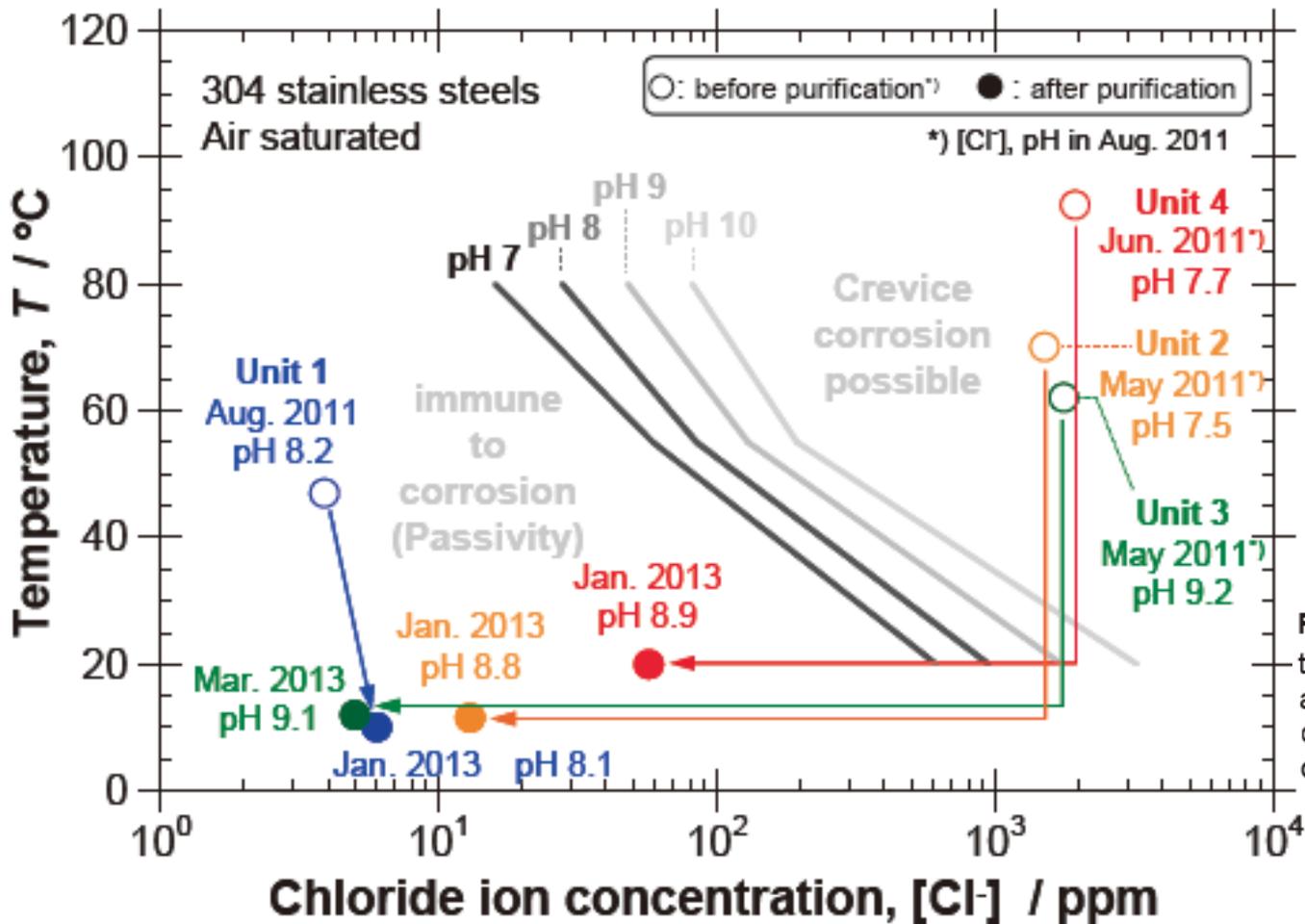


Figure 5. The comparison between the water quality of SFP water [1] and the crevice corrosion initiation diagram for type 304 SS in sodium chloride solution [2].

(10286)

2. 技術成果報告

2.2 福島関連(7/18)

- 事故解析におけるソースターム評価として、JAEAよりヨウ素(I-131)放出挙動について報告がなされた。放射線照射効果を考慮した簡易的なヨウ素気液分配モデルを構築し、既存の計算機解析結果と比較したところ、MELCORでは評価できない**滞留水からのヨウ素放出が重要**であることが示唆された。
(10199)
- 海外からの知見・教訓として、**TMI-2事故の概要及び復旧・放射能除去の実績**が報告された。しかしながら、福島とは状況が異なるため、**デブリの状況を初め、内部を十分に確認すること**が**重要かつ先決**であることが指摘された。
(20004)

2. 技術成果報告

2.2 福島関連(8/18)

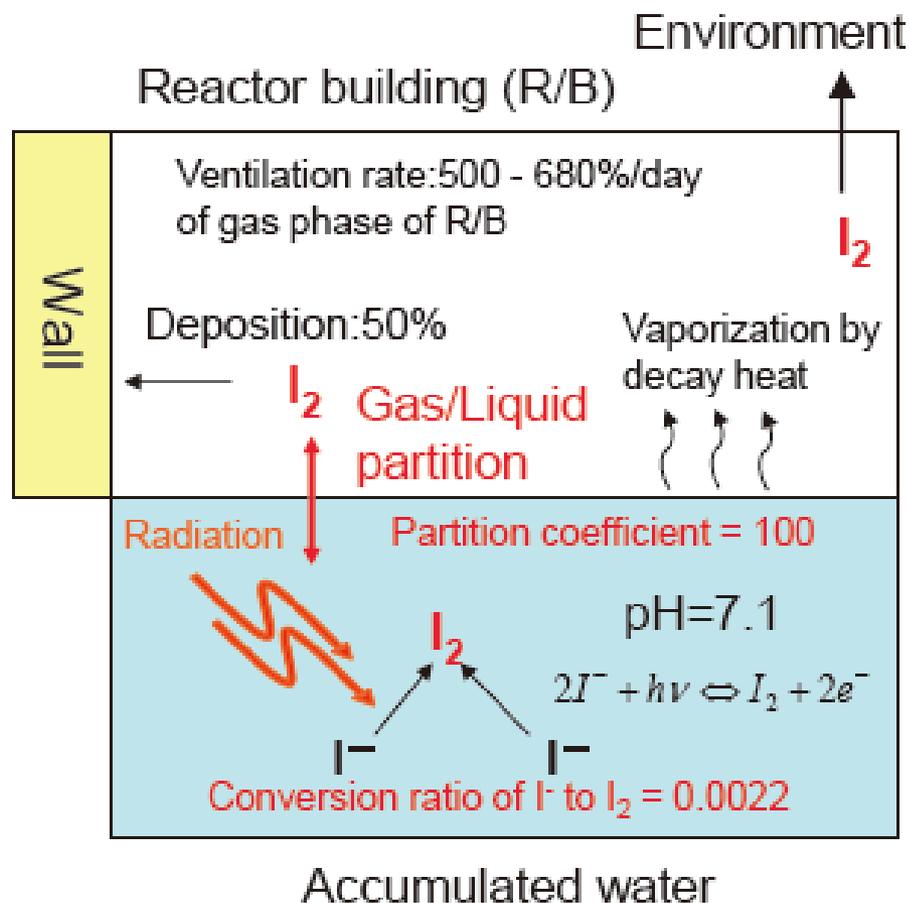


Fig. 8 Simplified Model on I_2 release from accumulated water (10199)

2. 技術成果報告

2.2 福島関連(9/18)

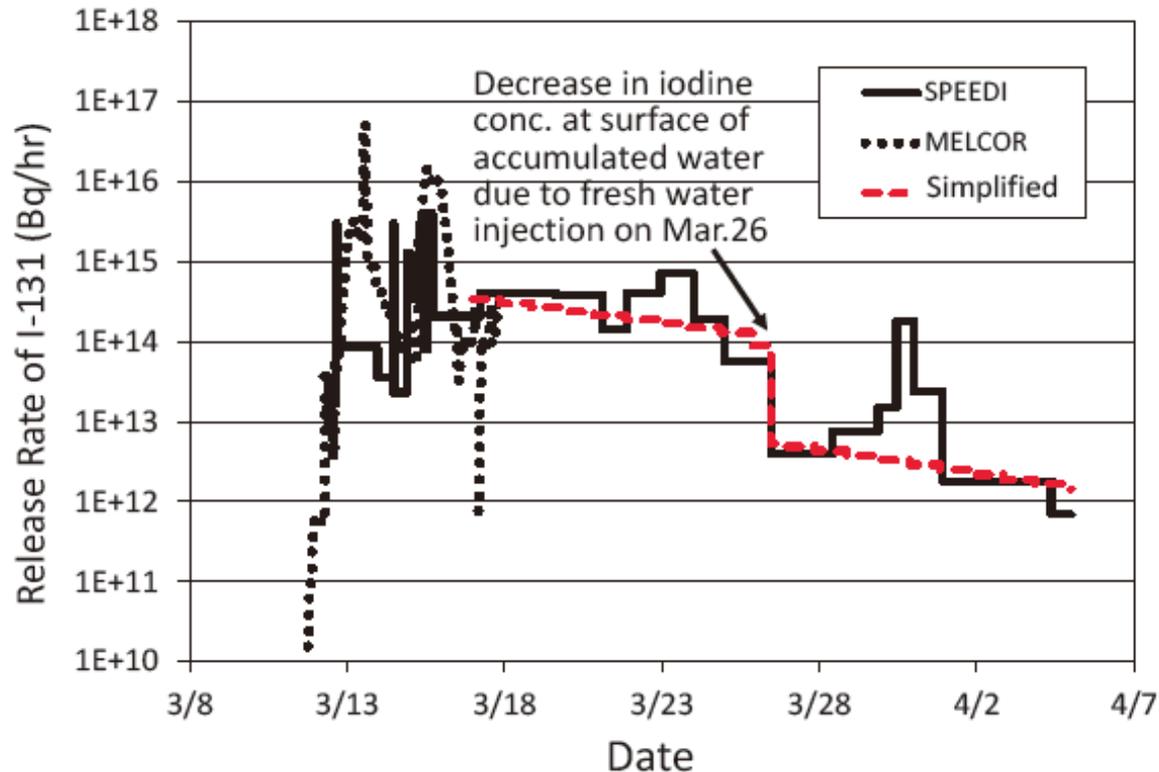


Fig. 9 Comparison of I-131 release rate between simplified release model and reverse estimation from atmospheric dispersion simulation^{[6], [7]} (10199)

2. 技術成果報告

2.2 福島関連(10/18)

パラレルセッション

- パラレルセッションでは、福島汚染水の放射能除去に関連した水処理技術5件、水素、ヨウ素挙動に関する実験的、解析的取組み6件、廃棄物処理関連4件の報告があった。
- 水処理技術では、ゼオライトによるストロンチウム除去(海水系での吸着性能の比較)(10215)、イオン交換樹脂によるセシウム除去(10197)、オフサイト除染でのシュウ酸によるセシウム除去(溶離率の比較)(10229)、等の報告がなされた。
- 特に、**TMI-2事故対応の詳細報告**は、汚染水処理だけでなく、デブリの取り出しや輸送、トリチウム処理、廃棄物処理など、多岐にわたる内容であった(20005)。
- TMI-2の炉心損傷状況は福島とは異なるものの、1979年の事故発生後、**汚染水処理は1989年まで継続し、燃料デブリ取出し完了は1990年までかかったとの報告**がなされ、今後の福島の工程表検討にも資するものと思われる。

2. 技術成果報告

2.2 福島関連(11/18)

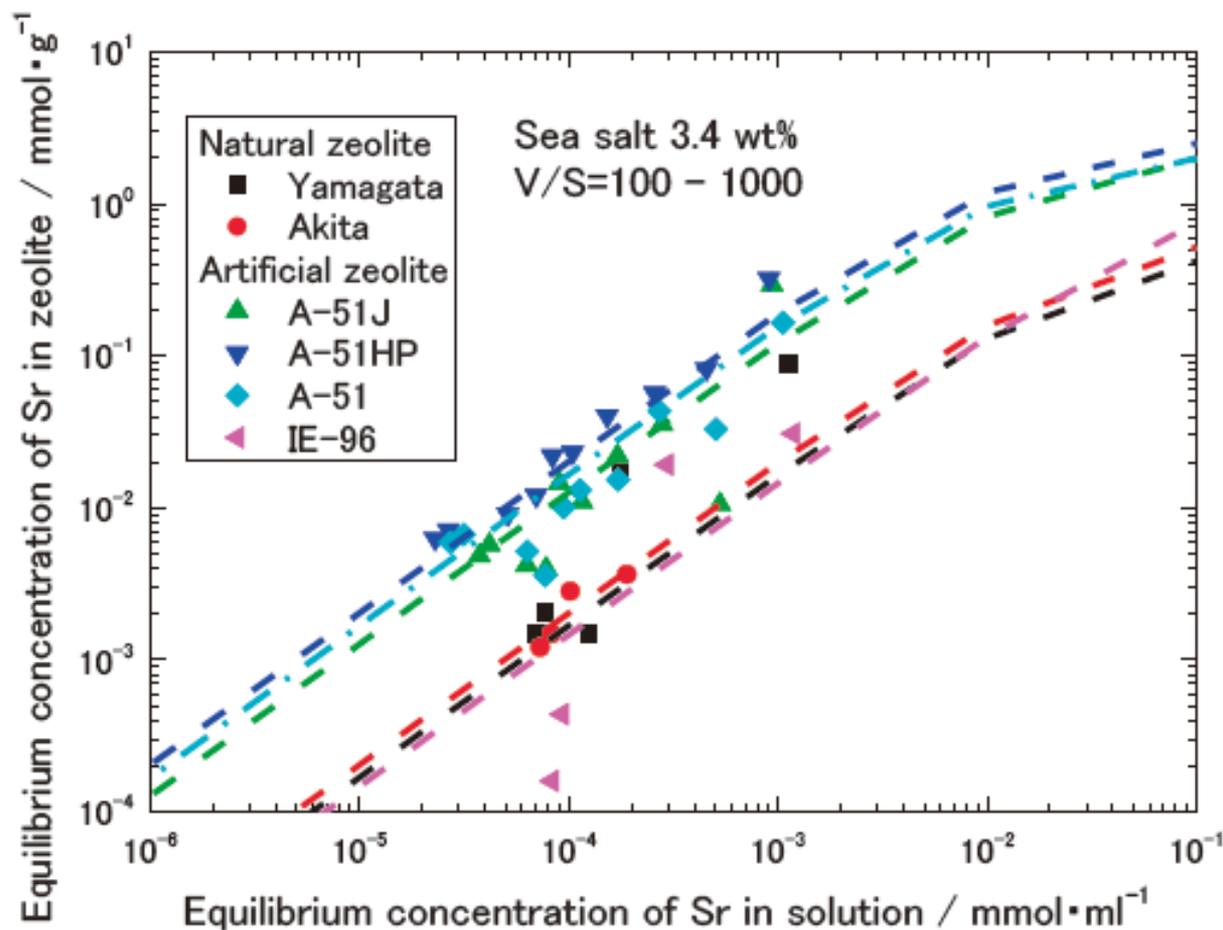


Figure 5. Sr adsorption isotherms of various zeolites in 3.4 wt% sea salt solution (ES-4). (10215)

2. 技術成果報告

2.2 福島関連(12/18)

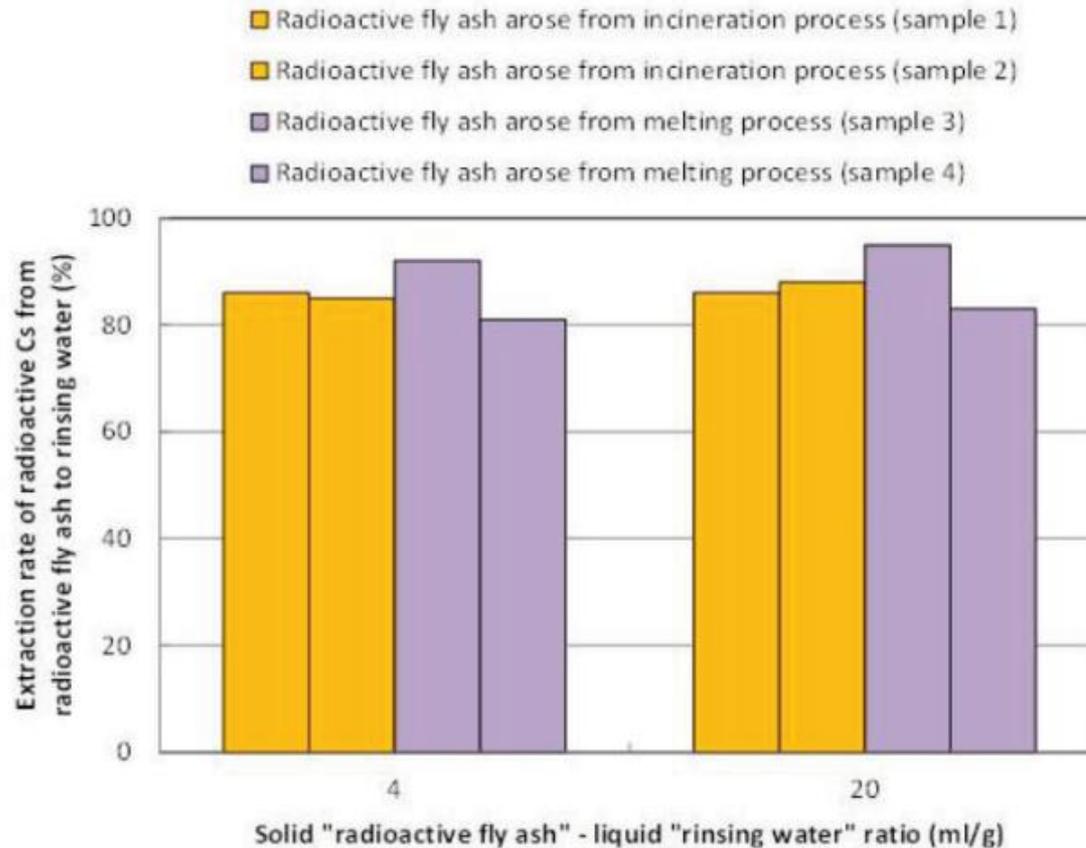


Fig6. Dependence of extraction ratio of radioactive Cs on Liquid –Solid ratio (using actually contaminated fly ash generated by certain incinerators and melting furnace)

(10229)

2. 技術成果報告

2.2 福島関連(13/18)

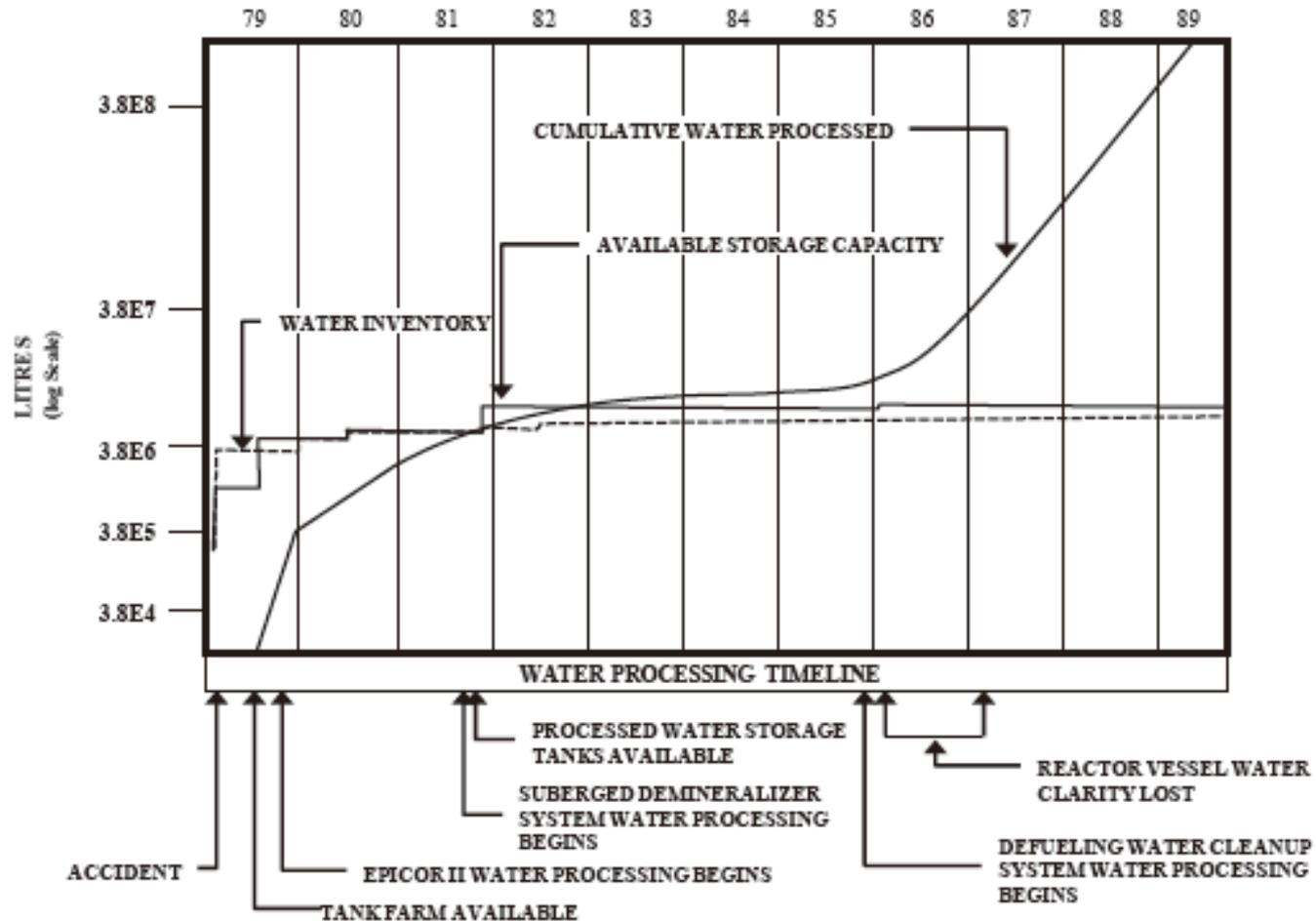


Figure 1. Water Processing Timeline

(2005)

2. 技術成果報告

2.2 福島関連(14/18)

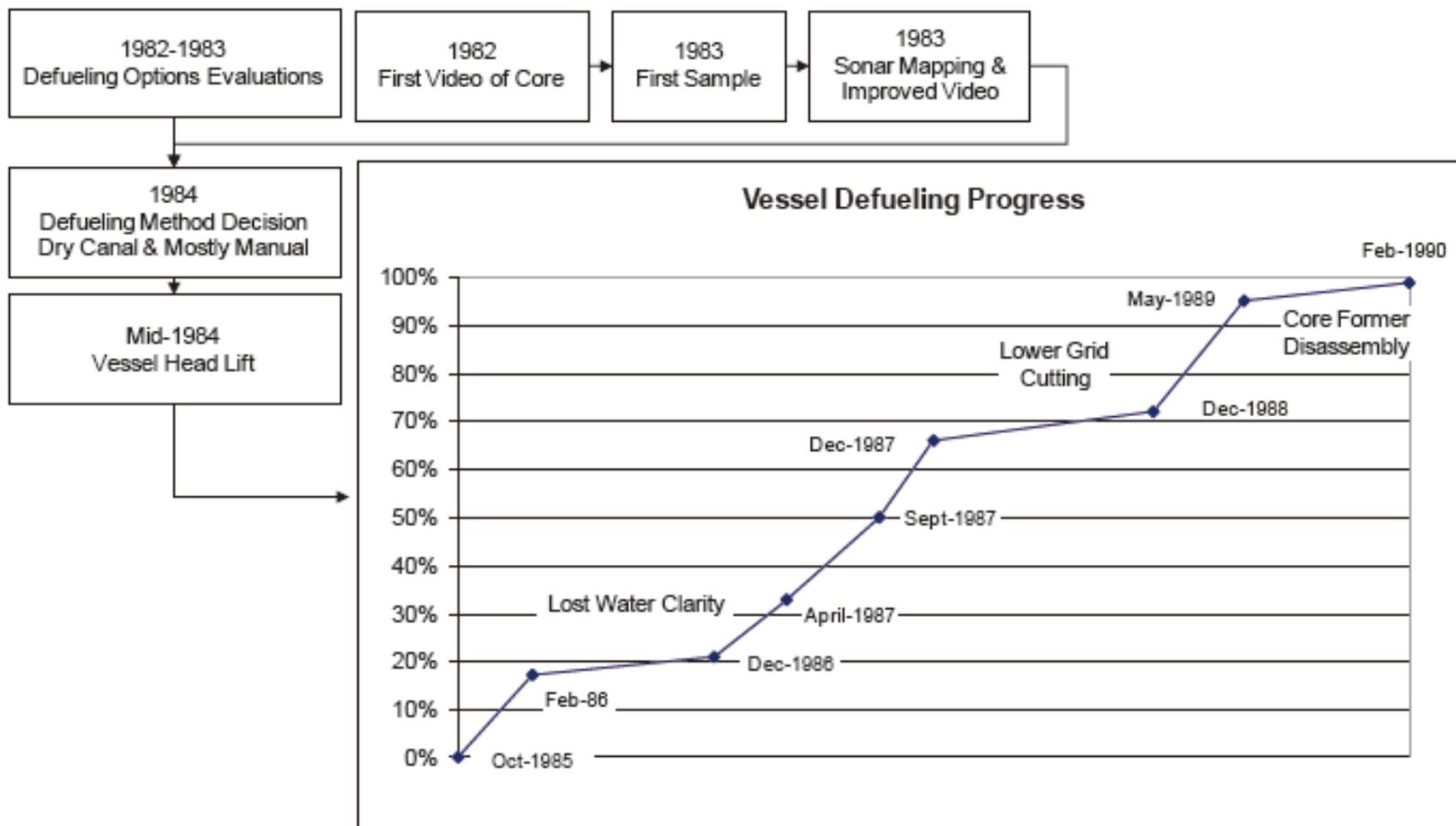


Figure 2. Fuel Removal Timeline (2005)

2. 技術成果報告

2.2 福島関連(15/18)

- 事故進展に重大な影響を与える**水素挙動**について、基礎実験から材料腐食まで照射試験による検討例が報告され、モデル解析と合わせた検討状況が示された。
- 特に、**海水成分存在下では水素の生成率は増大**することが照射実験の成果として示され、今後の事故時水素挙動に際して考慮が必要である。(10242)
- 事故時の公衆被ばくへの影響が大きい**ヨウ素挙動**については、その酸化プロセスを解明することの重要性が示された。(10100)

2. 技術成果報告

2.2 福島関連(16/18)

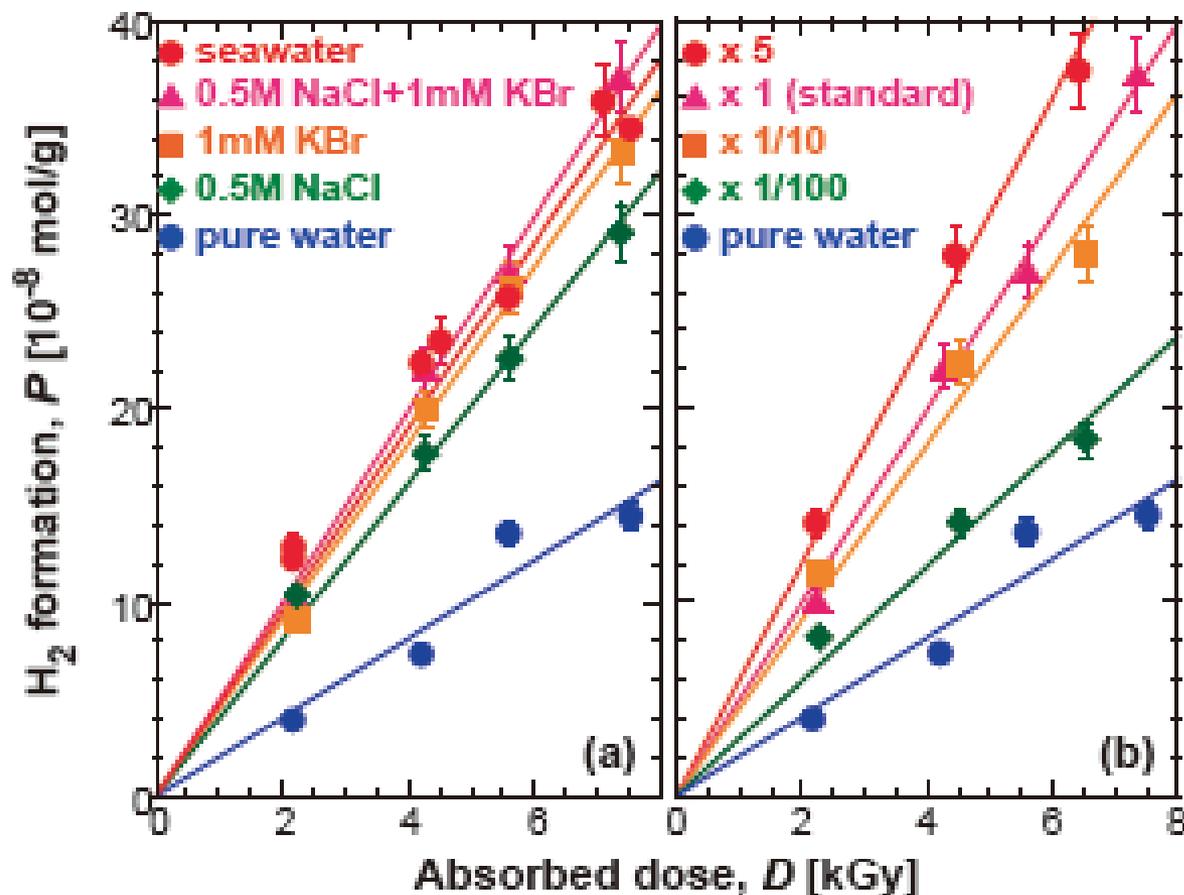


Figure 2. H₂ formation in Co-60 γ -radiolysis of aqueous salt solutions at room temperature, aerated condition and sample height of 1 cm (10242)

2. 技術成果報告

2.2 福島関連(17/18)

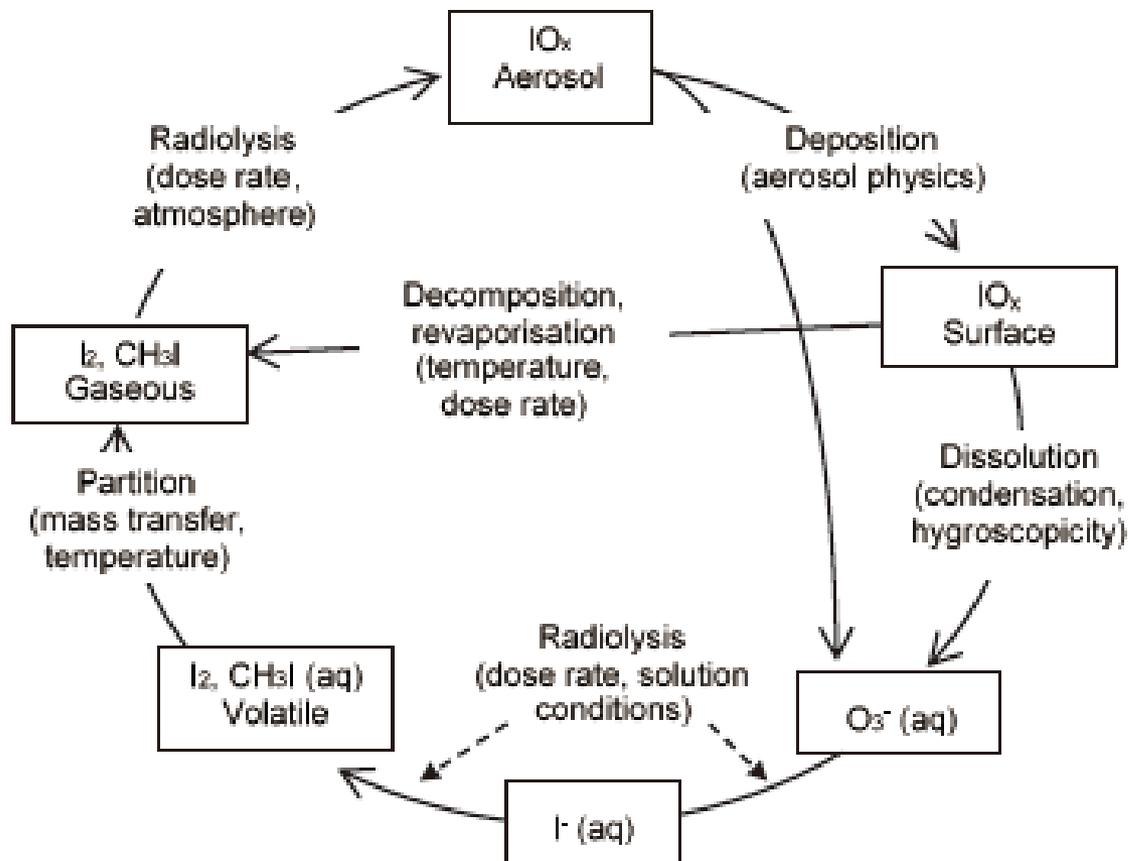


Figure 4. Simplified Reaction Scheme and some of the Important Rate Dependencies
(10100)

2. 技術成果報告

2.2 福島関連(18/18)

総括

- 本会議において、**福島第一原子力発電所の廃止措置に関連した日本国内での取り組み**を網羅的に報告し、国外の関係者へ発信することは、重要課題の一つであり、今回の特別セッションの開催は大きな意義があった。
- 海外の知見として**TMI-2事故の経験と教訓**を共有し、福島復旧との論点比較を行った点は、今後の検討に資するものと思われる。特に、事前のシミュレーションも大事であるが、実際の状況を把握することが最も重要であり、TMI-2の手法に拘泥することなく、**早期に内部状況の確認を行うことが重要**との報告者コメントに留意したい。
- これまでの水化学国際会議の特色であるワンセッション方式に対し、今回、初めて平行セッションを採用し、福島特別セッションを設けた。出席者の配分はバランス良く行われ、今後の会議運営に向け、良好な経験を蓄積できたと考える。

2. 技術成果報告

2.3 BWR関連

BWR重要課題: SCC抑制と被ばく低減→**貴金属注入(NMCA・OLNC)**、**Zn注入**などの発表が中心。また、原子炉再循環ポンプの効率低下対策として**酸化チタン(TiO₂)被覆技術**の発表があった。

(1) オンライン貴金属注入(OLNC) [1/2]

- OLNCは現在33プラントで適用中。
- 今回会議では、同技術を世界で初めて適用した**KKMの水質及び放射能挙動データ**が報告された。
- KKMの運転経験は、**国内プラントへのOLNC技術の導入・定着**に役立つ。
- 右図はOLNC施工中の炉水中の白金濃度の推移。**施工を重ねる毎に濃度が低下傾向を示し、白金の付着効率が高まっていることを示唆。**

Comparison of Measured Pt Concentration 2007 to 2013

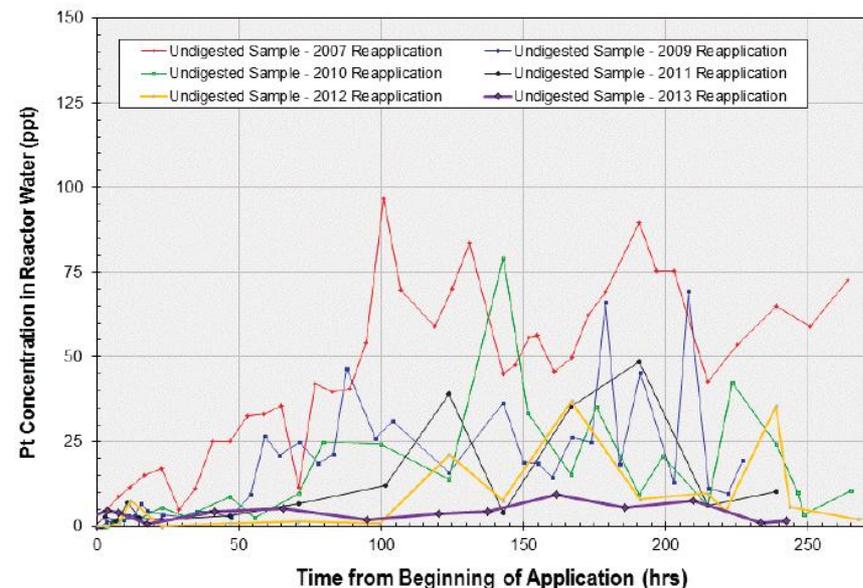


Figure 3. Reactor water Platinum concentration during OLNC applications at KKM.

原子炉水中の貴金属(白金)濃度の推移

2. 技術成果報告

2.3 BWR関連

(1) オンライン貴金属注入(OLNC) [2/2]

- OLNC施工中に原子炉浄化系のF/D張り替え期間中に主蒸気系配管の電気伝導度が急上昇。(左図) ← 逆洗用補給水・空気に含まれる二酸化炭素の影響
- OLNC施工開始直後に、炉水への放射化腐食生成物の放出が観測されるが、注入した白金の放射化物であるAu-199は数日遅れて放出される。(右図)
← 放射化腐食生成物の放出は炉心外表面から生じていることを示唆

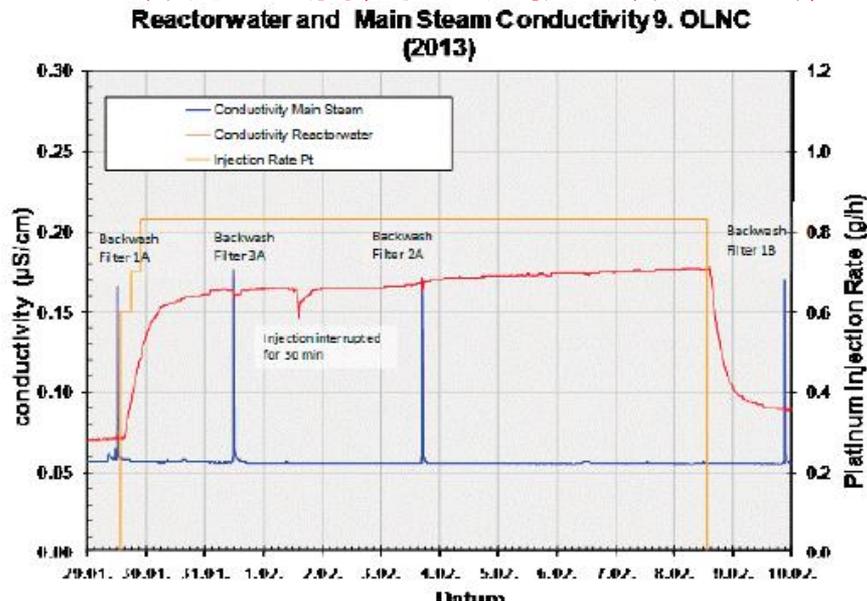


Figure 2. Main Steam and Reactor Water Conductivity during RWCU Filter Bed Changes.

OLNC施工時の主蒸気及び炉水電導度の変化

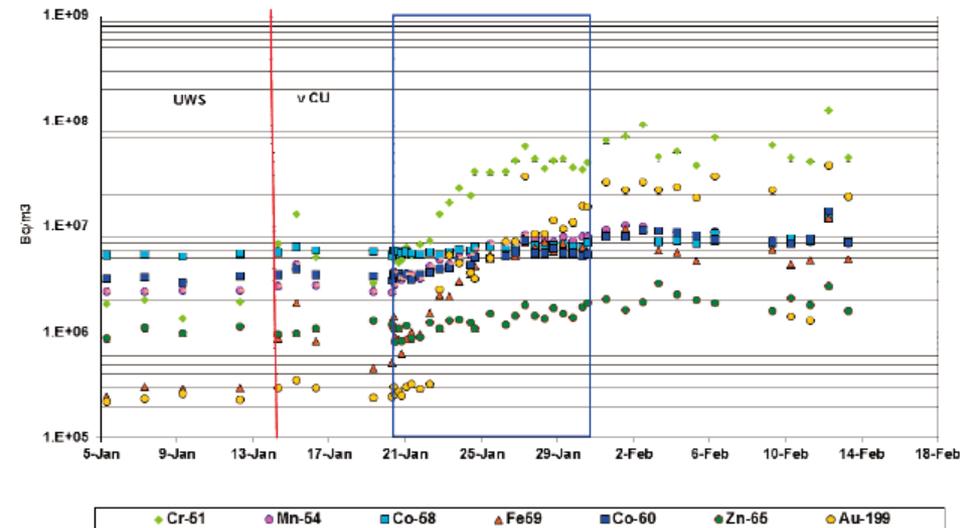


Figure 6. Isotopic release along with delayed Au-199 release during OLNC - KKM

OLNC施工時の炉水放射性核種の変化

2. 技術成果報告

2.3 BWR関連

(2) SCC抑制と被ばく低減

- 米国BWRプラントでは、SCC抑制と被ばく低減を同時達成すべく、**貴金属注入、水素注入、亜鉛注入を組み合わせた環境改善方策が展開されている。**
- 亜鉛注入濃度は、原子炉水のCo-60/Zn比を $2 \times 10^{-5} \mu \text{Ci/ml/ppb}$ 未満とするよう制御している。
- 亜鉛注入下で、**貴金属注入を繰り返し施工すると、その除染効果により、線量率が経年的に低下傾向となるのが一般的とされているが、線源の蓄積量が多いプラントでは上昇に転じることもあり要注意(右図)**
- 国内プラントでも亜鉛注入と貴金属注入を併用する動向にあり、適切な管理のために有効な知見が得られた。

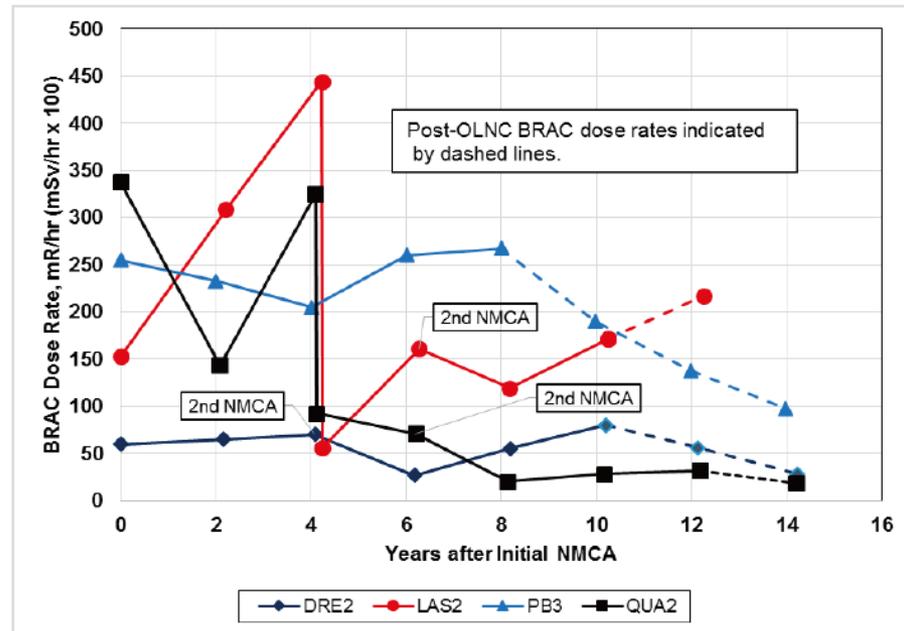


Figure 2. Post-NMCA BRAC Dose Rate History at Selected BWRs

貴金属注入開始後の配管線量率の推移

2. 技術成果報告

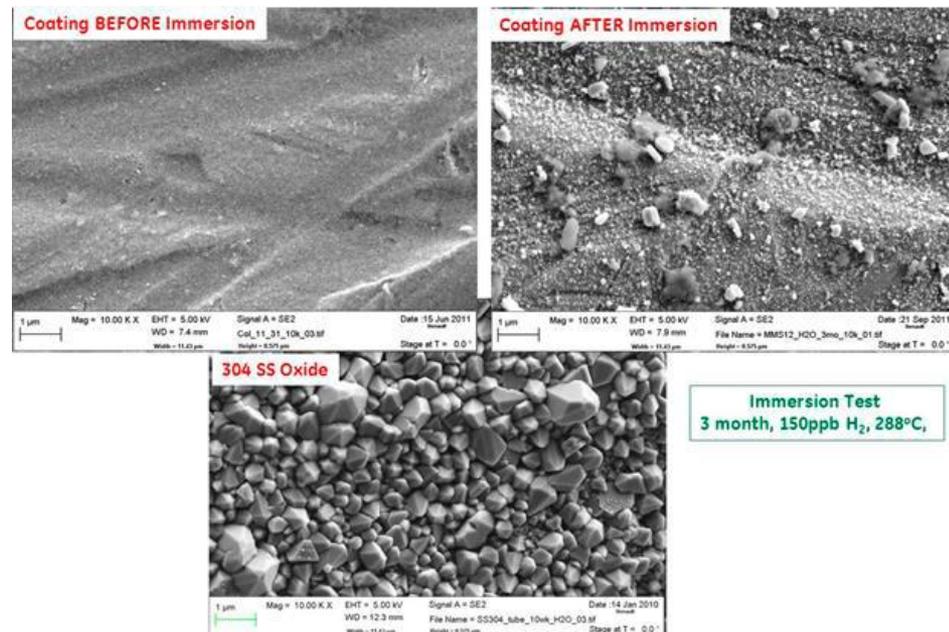
2.3 BWR関連

(3)酸化チタン(TiO_2)被覆技術

- ノズル等へのクラッド付着・蓄積により、ジェットポンプ性能の低下が生じる。その抑制対策として開発中の TiO_2 被覆技術(コロイド被膜法)の状況報告がなされた。
- 材料表面を TiO_2 で被覆すると、被覆が無い場合に比べて、クラッドの付着は大幅に減少(右図)
- 同技術は、腐食の緩和により、Co-60等の放射性核種の付着も低減できる可能性を有している。
- コロイド被膜法は、化学蒸着法に比べ、酸化チタン前駆体、構成材料の寸法や形状に関する制約がないため、実機適用性にも優れる。

被覆試験体(曝露前)

被覆試験体(3ヶ月曝露後)



未被覆試験体(曝露後)

高温流水環境で連続曝露した各試験体の表面状態

2. 技術成果報告

2.4 PWR関連

PWR一次系重要課題: 被ばく低減とSCC改善 → 亜鉛注入

SG二次側の新たな課題: 伝熱管のデンティング → 鉄持込抑制と蓄積した鉄除去

(1) 亜鉛注入による被ばく低減とSCC改善

- 亜鉛注入は既に80以上のPWRプラントで採用中。
- 5ppb程度の低濃度亜鉛注入により、大幅な線量率低減に効果が得られる。
- SCC抑制には数十ppbの高濃度注入が有効とされてきたが、**低濃度注入でもSCC改善効果があることが判明。**(右図)
- 一方、CIPSへの影響を懸念して亜鉛注入に慎重な姿勢を示している国もあり、**線量率低減効果と燃料・材料への影響を適切に見極める必要あ**

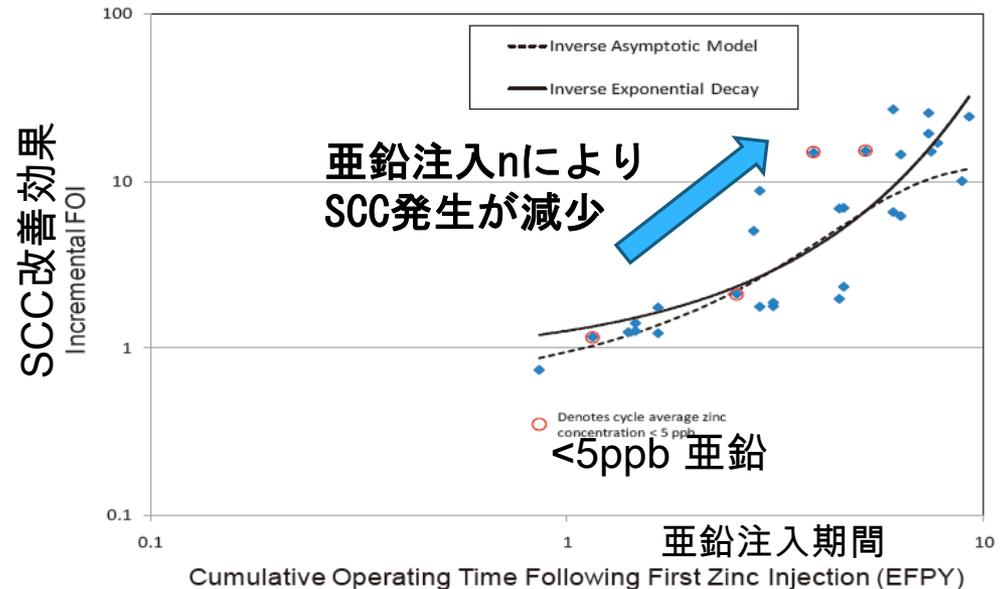


Figure 5. Incremental Factor of Improvement vs. Cumulative Operating Time Following First Zinc Injection

亜鉛注入積算時間とSCC改善度の関係

2. 技術成果報告

2.4 PWR関連

(2) 最新型SGのデンティング問題(1/2)

- 海外プラント13基の最新型SG(新設・取替)で、すでに解決したものと考えられていた伝熱管の腐食損傷(デンティング)が再発
- デンティングは、管板と伝熱管の隙間部に不純物が沸騰濃縮して管板が腐食、腐食生成物の体積膨張により、伝熱管が圧迫・変形し、場合によってはSCCに至る事象
- デンティングは全てスラッジが堆積・固着した領域の管板直上で発生

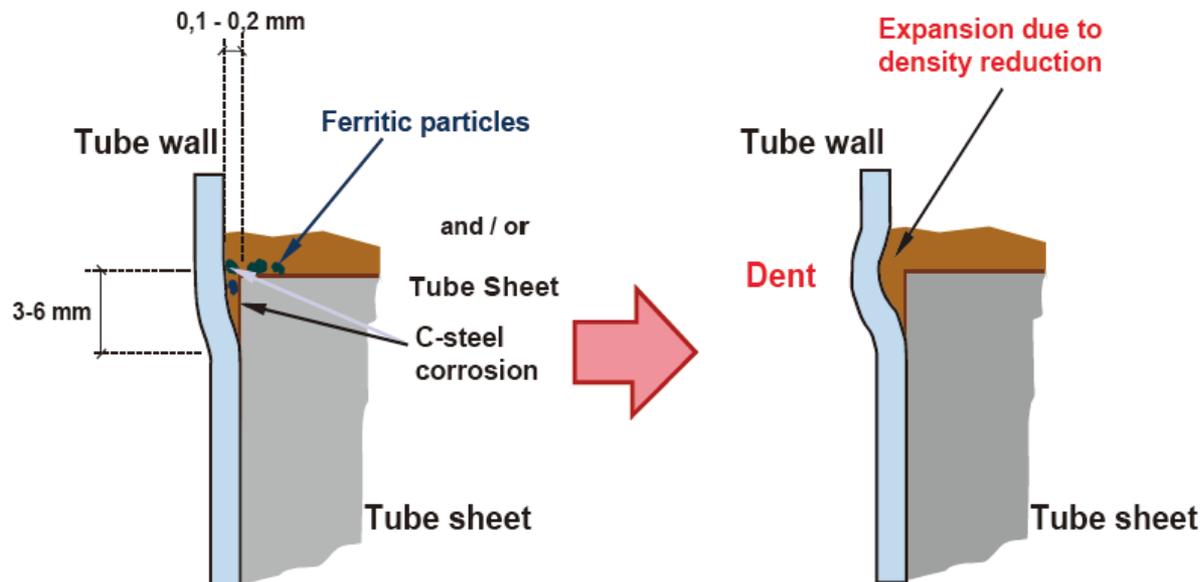


Figure 7: Denting mechanism on the tube sheet in enrolled tube areas

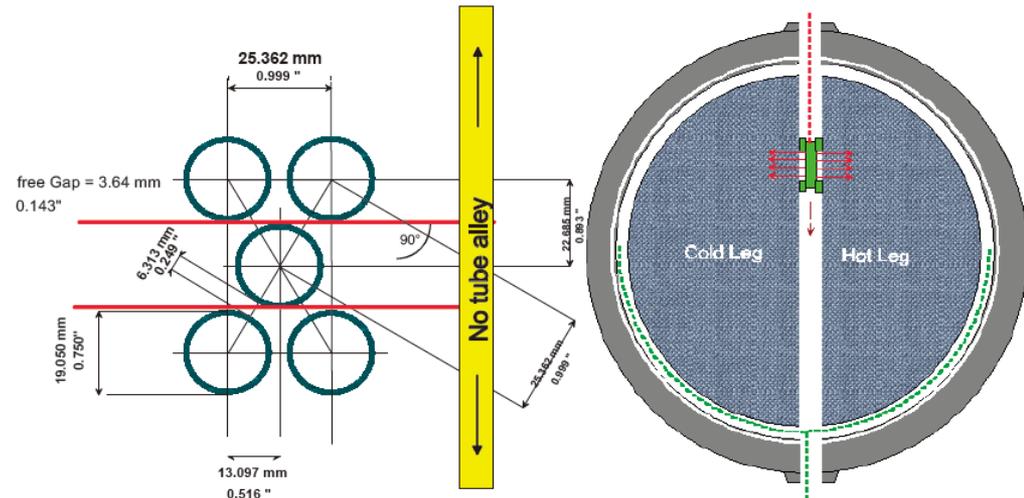
管板直上部におけるデンティング機構

2. 技術成果報告

2.4 PWR関連

(2)最新型SGのデンティング問題(2/2)

- **最新型SGは、大型化を抑制しつつ蒸気発生量を増やすため、小径・薄肉の伝熱管を稠密に配列**
- **このため管板にスラッジが堆積・ハード化し、不純物が濃縮されやすい**
- **従来配列でも、出力向上のため蒸気発生量増加させている最新型SGではデンティングが発生**
- **今後、国内PWRでも、出力向上や最新型SGの採用が進むため、SG設計や運転・維持管理への警鐘として重要な知見**
- **給水中の鉄濃度や不純物の更なる低減、SG洗浄の方法や頻度の最適化などが水化学対策として必要**



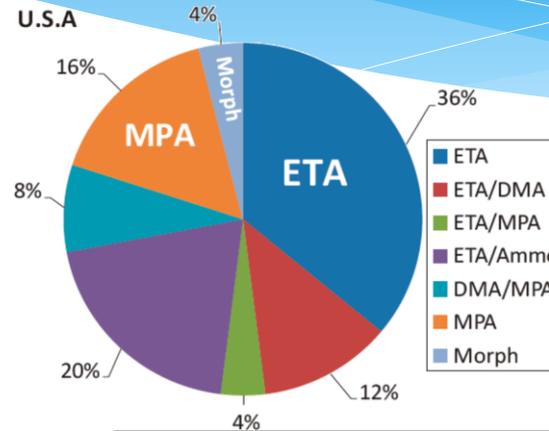
最新型SGの伝熱管配列の例

2. 技術成果報告

2.4 PWR関連

(3) SG2次側への鉄持込抑制

- **二次冷却材の高pH化により鉄低減が進められている。(右下図)**
- **二次系材料構成に応じた、pH調整剤(種類・添加濃度)の最適化の検討が主要テーマ。**
- pH調整剤として、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用いられている。(右上図)
- 例えば、仏からは、ETA 3.5-4ppm+アンモニア1.5ppmの混合が最適であるという提案があった。
- 今後も海外との情報共有を図り、**pH調整剤の最適化に努めることが重要。**



ETA: エタノールアミン
 DMA: ジメチルアミン
 MPA: 3-メトキシプロピルアミン
 Ammo: アンモニア
 Morph: モルフォリン

米国で用いられている二次冷却材pH調整剤

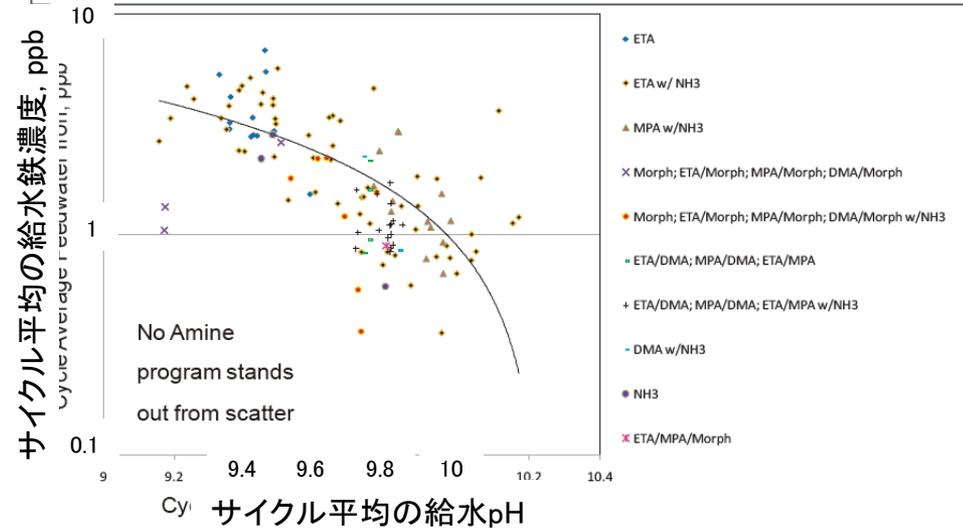


Figure 8. Feedwater Iron versus Feedwater pH Based on EPRI's PWR CMA Database

給水pHと鉄濃度の関係

2. 技術成果報告

2.4 PWR関連

(3) SG二次側からの鉄除去

① 化学洗浄

- 従来の濃厚法 (KWU、EPRI) に比べ、施工時間・廃液処理の負荷が少ない**希薄法 (ASCA、DMT) の適用が拡大**。

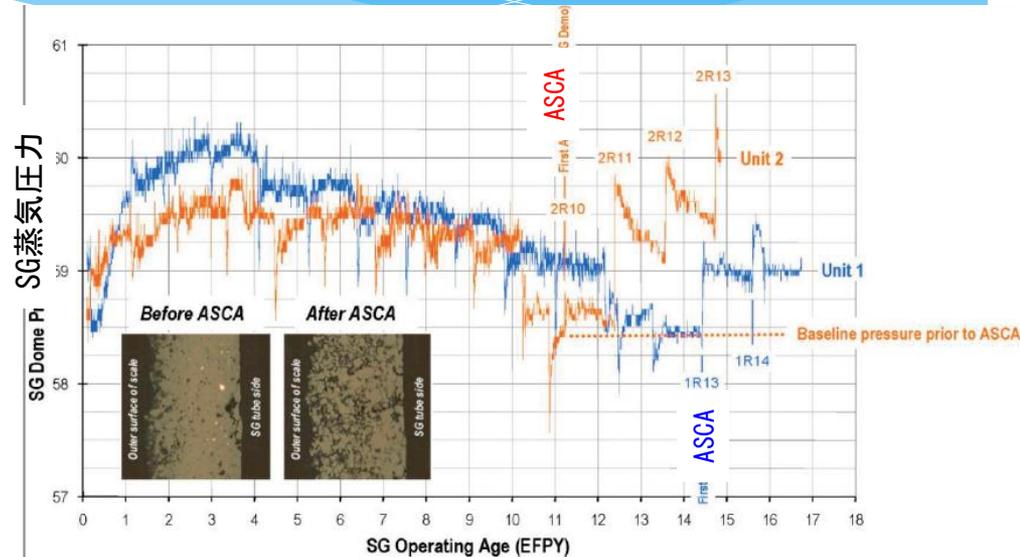
- 希薄法でも、**繰り返し施工によりSG熱効率改善**に効果あり。(右上図)

② 分散剤

- **運転中に微量のPAA(ポリアクリル酸)**を給水から注入し、SG内の**鉄スケール**を水中に分散して除去する技術で、**10基程度の試行実績あり**。

- 今回停止前に短期間高濃度で注入した結果ASCAと同程度の鉄除去量、SG伝熱性能回復が報告された。(右下図)

- 国内でも、**安全性向上、経済性両側面**で導入を検討する価値あり。



ASCA繰り返し適用によるSG蒸気圧力の回復
SG表面に付着したスケールに空隙が生じ、熱効率が大きく改善



フィルターに回収された除去後の鉄スケール

2. 技術成果報告

2.5 その他

高経年化管理と寿命延長

- プラントの寿命延長を目指し、IGSCC進展メカニズム解明やFAC予測モデルなどの基礎的な取り組みについて個別の課題や事象についての発表があった。
- 高経年化プラントの寿命延伸が重要性が指摘され、水化学を含む規格・基準の整備や国際会議の主催など関連活動についてIAEAから紹介された。

水化学と燃料

- 貴金属注入、不純物、高Liなど、水化学環境変化がおよぼす燃料被覆管健全性への影響についての発表があった。
- 高リチウム環境(Li濃度3.8~4.5 ppm)は、ジルカロイ4の酸化膜厚は不変でその腐食速度を高めるリスクは小さいとの報告があった。

最適化プログラムとコンプライアンス管理

- 米国のBWRにおける最近の水化学の進歩状況、日本の水化学管理指針制定に関するもの、フランスの原子力発電所に於ける化学管理を中心とした検査に関する発表があり、活発な意見交換がなされた。

2. 技術成果報告

2.5 その他

(1) 我が国における水化学管理指針

- 欧米や日本では、水化学管理の妥当性を説明し、継続的改善を行うため、業界ガイドラインを制定し、必要に応じ改訂を行ってきた。
- 我が国では、さらに透明性を高め、説明責任を果たす観点から、最新のプラント水管理実績・技術知見をもとに、学協会ガイドラインを策定中。
- 今回会議では、管理項目・アクションレベル・診断項目・推奨値の設定根拠等を中心に、我が国の学協会ガイドライン案を議論し、海外関係者の理解を得た。
- 学協会ガイドラインの場合、制定前にパブコメを受ける必要があり、海外からは、徹底した透明性を追求する我が国の取り組みに関心が寄せられた。
- 本指針案は、今後、標準委員会の場で議論を重ね、専門家による書面投票及び公衆審査を経た後、日本原子力学会の標準として2015年末に制定・発行される予定。

業界ガイドライン

EPRI指針

VGB指針



日本原子力学会

水化学管理指針案
(策定中)

学協会ガイドライン



電中研
水化学管理手引書

業界ガイドライン

終わりに

- (1) NPC 2014 札幌 実施報告
水化学部会HPに掲載中

<http://www.aesj.or.jp/~wchem/>

- (2) NPC2014札幌 口頭発表スライドの配布
NPC2014札幌HPから、ダウンロード可

<http://npc2014.net/>