

HITACHI



GE VERNOVA

第52回水化学部会定例研究会

BWRにおける高経年化対策としての環境緩和 技術の適用と標準策定に向けた検討状況

日立GEベルノバニュークリアエナジー

長瀬 誠

2025/12/10

目次

- 1 ．高経年化対策とは
- 2 ．環境緩和技術
- 3 ．環境緩和技術の標準化への動き
- 4 ．まとめ

1 . 高経年化対策とは

1-1 BWRプラントの高経年化とその影響

○ 高経年化技術評価：

原子力発電所の長期運転に伴う設備・材料の劣化（経年劣化）に対して、安全性・信頼性を維持するための技術的な評価と対策をまとめて規制庁の認可を受ける必要があります。運転開始から30年を超える原子炉に対して、運転延長を見据えた保守・検査・材料評価などを体系的に実施するものです。

○ 高経年化技術評価において評価が必要な主な劣化事象

（日本原子力学会原子力発電所の高経年化対策実施基準）

- 中性子照射脆化
- 照射誘起応力腐食割れ（IASCC：Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking）
- ステンレス鋳鋼の熱時効 他

○ 劣化によるプラントへの主な影響：

- 冷却材漏えいなどバウンダリ機能への影響（バウンダリ機能の低下）
- 機器に求められる性能低下への影響（熱交換器の熱交換機能低下など）
- 劣化による機器の耐震安全性への影響（支持機能の低下など）

1-2 高経年化対策の技術的アプローチ

○ 劣化事象に対して実施している対策：

<通常時の保全活動>

- 適切な点検頻度ならびに点検箇所の設定（点検による劣化状況の把握と保守による復旧）

<運転期間延長に向けた取り組み>

- 材料劣化（SCC、FAC など）の抑制
- 機器の取替

SCC : Stress Corrosion Cracking
FAC : Flow Accelerated Corrosion

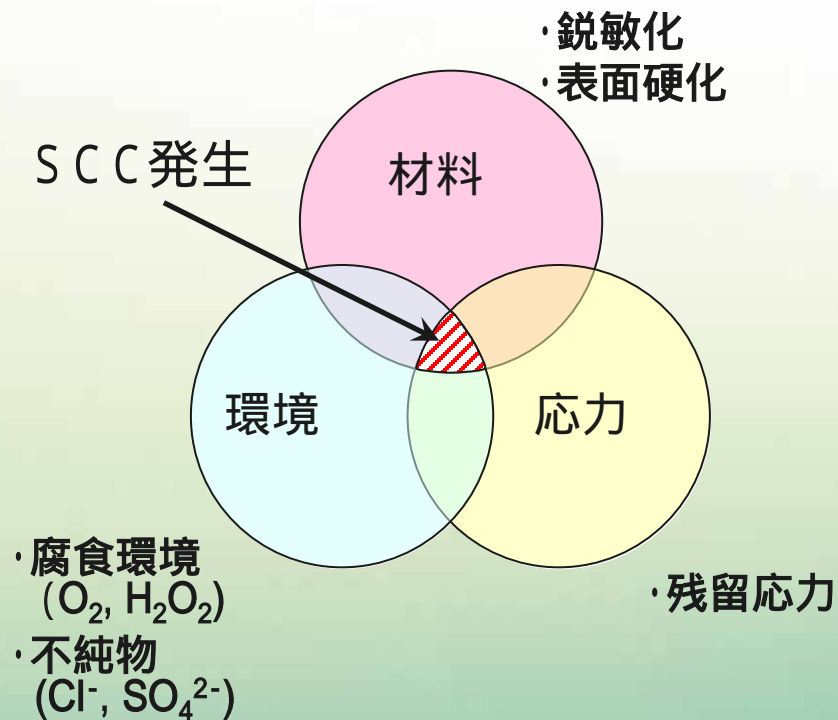
計画的に保守、予防保全を実施することで60年超運転を実現

本日は水化学に関連する炉内構造物のSCC抑制技術（腐食環境緩和）と環境緩和に関する将来の水化学標準の策定を準備検討するWGの活動を紹介

2 . 環境緩和技術

2-1 応力腐食割れ

応力腐食割れ(Stress Corrosion Cracking, SCC)は、応力、材料、環境の因子が重畳した際に発生する。
ステンレス鋼では主に再循環配管やシュラウド等の溶接部近傍に、Ni基合金では溶接部に多くSCCが発生する。



実機でのひび割れ



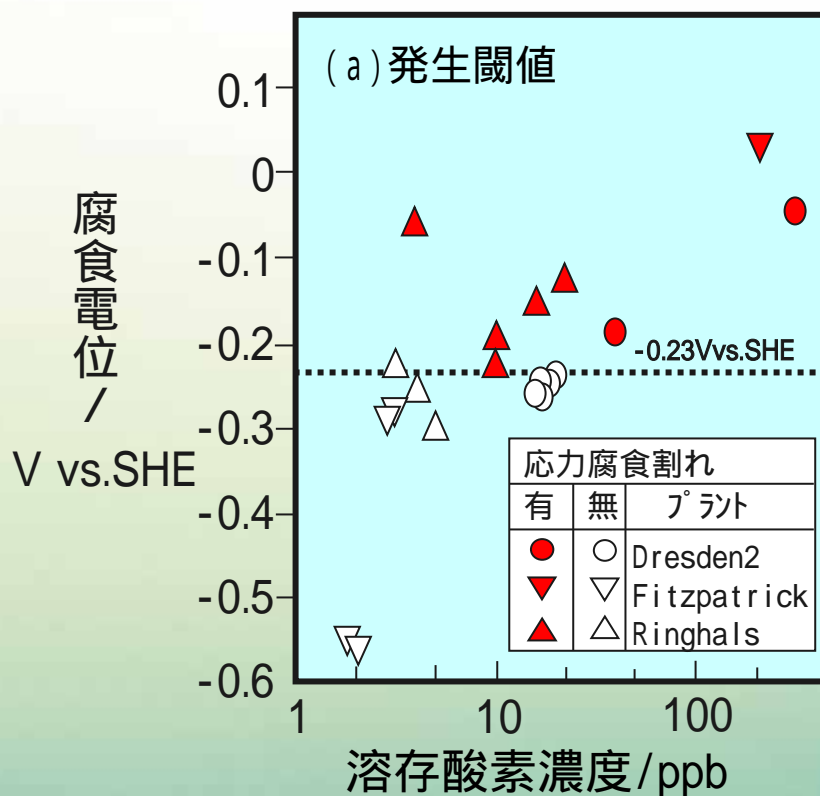
2-2 応力腐食割れ対策

SCC環境を緩和する対策として、米国では全てのBWRプラントで低濃度水素注入とオンライン貴金属注入が適用されている。国内においても、同様の環境緩和対策の導入に向けた動きが活発化してきた。

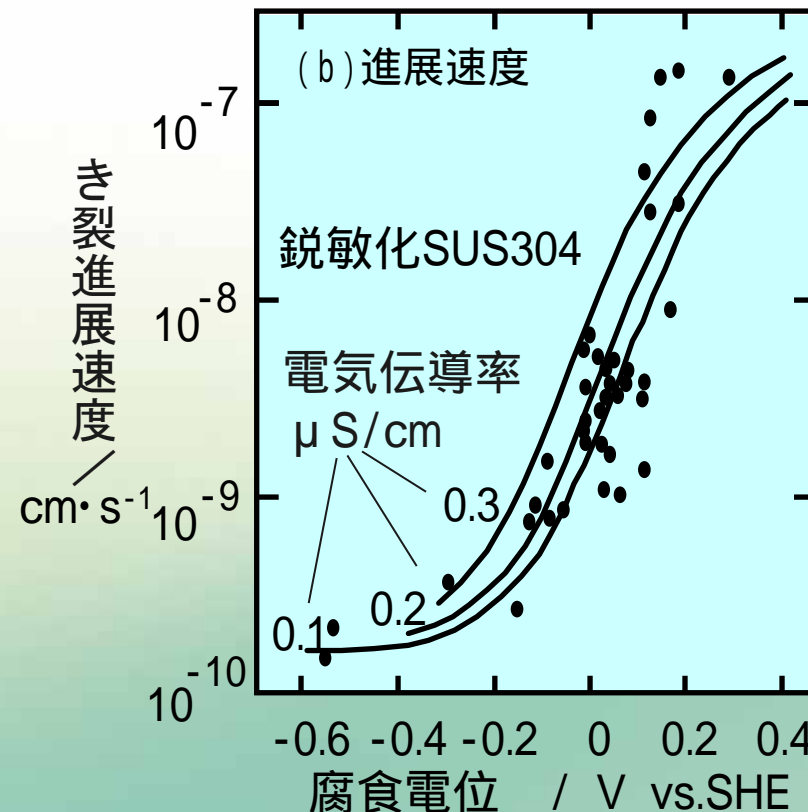
	応力	材料	環境
要因	・溶接残留応力	・鋭敏化 ・硬化層形成	水の放射線分解による 腐食性成分の生成
対策の 考え方	・引張残留応力軽減	・鋭敏化の軽減 ・硬化の軽減	・溶存酸素濃度の低減 ・腐食電位(ECP)制御
具体的 対策	・高周波加熱残留 応力改善法(IHSI) ・ウォ-タジェット ピーニング(WJP) ・表面研磨	・耐食性被覆 ・改良材	・起動時脱気運転 ・水素注入 ・高濃度水素注入 ・貴金属注入 ・起動時水素注入

2-3 水質環境緩和の効果

SCC環境の指標である腐食電位(Electrochemical Corrosion Potential, ECP)を低減することにより、SCCの発生・進展を抑制することができる。



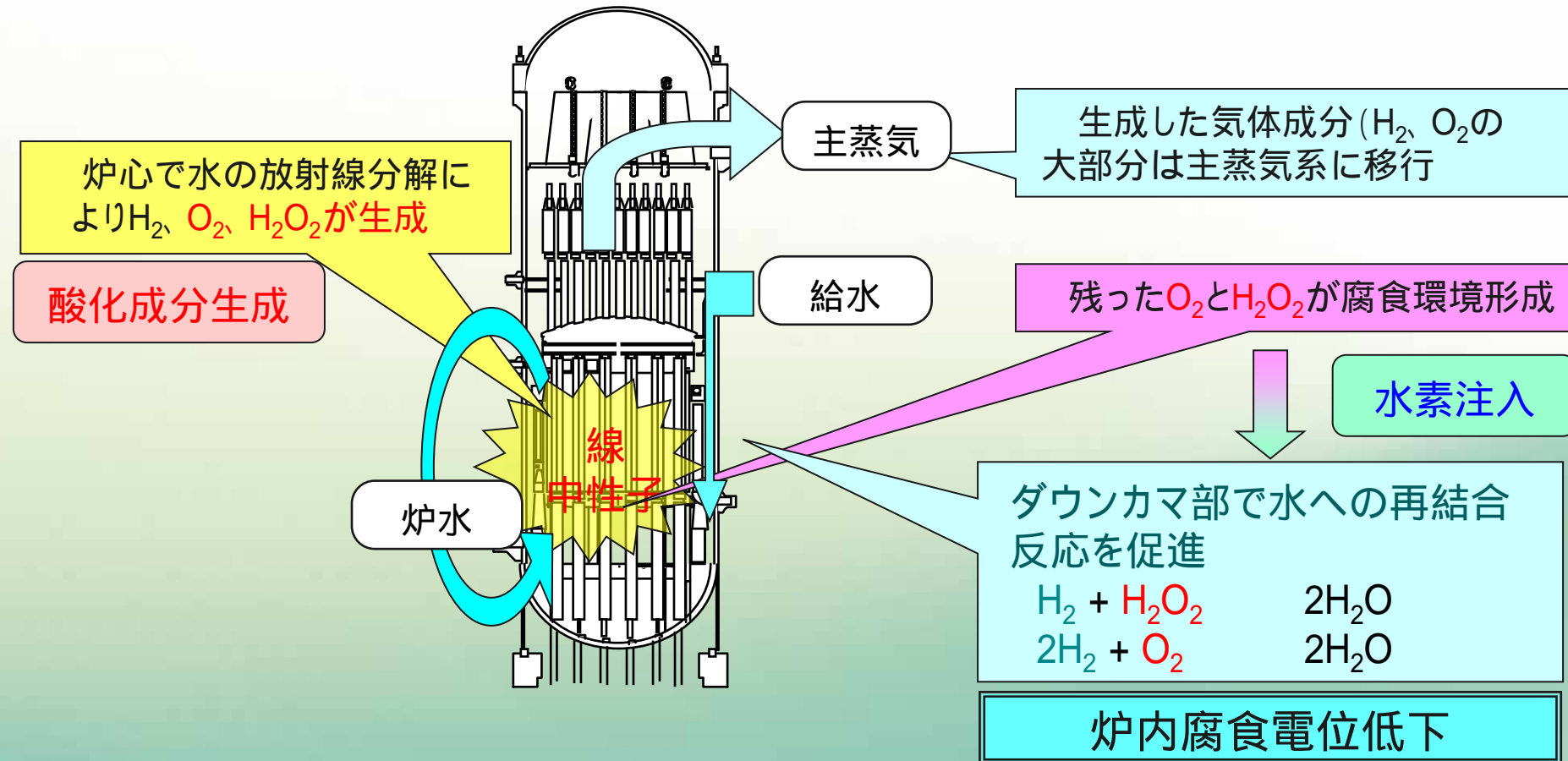
出典: R. L. Cowan et al., "Experience with hydrogen water chemistry in boiling water reactors", Water Chemistry for Nuclear-reactor systems 4. BNES, London (1986)



出典: Peter L. Andresen., "Effect of Noble Metal Coating & Alloying on the Stress Corrosion Crack Growth Rate of Stainless Steel in 288 °C Water", proceedings of the Sixth International Symposium on Environment Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, San Diego (1993)

2-4 水質環境緩和対策技術（水素注入）

水素注入は、酸素と水素の再結合反応を促進して炉内酸化成分濃度を低減してSCC環境を緩和する。



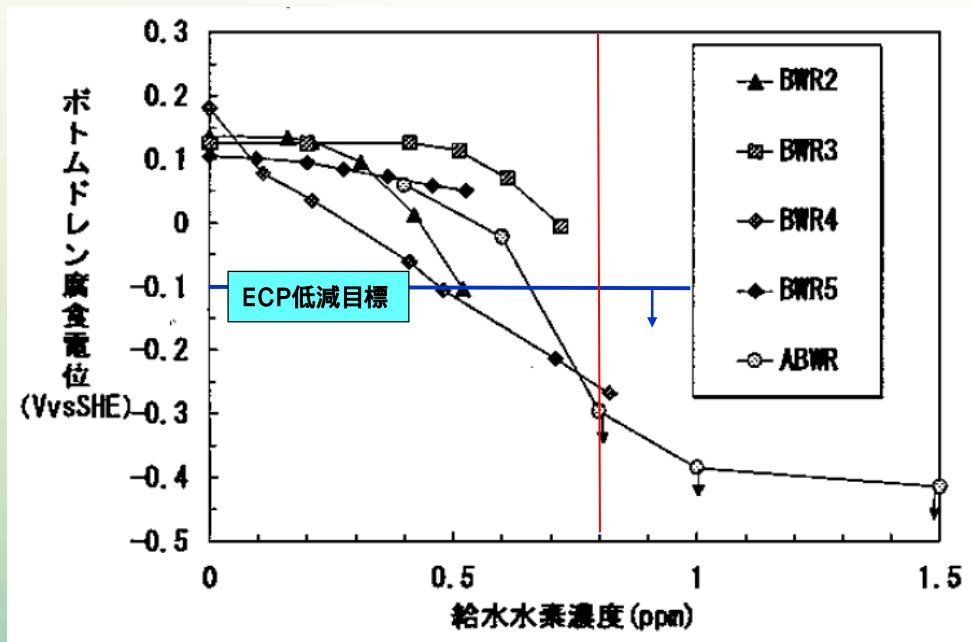
2-5 水素注入の課題

水素注入の効果：水素注入量の増加に伴いECPが低下

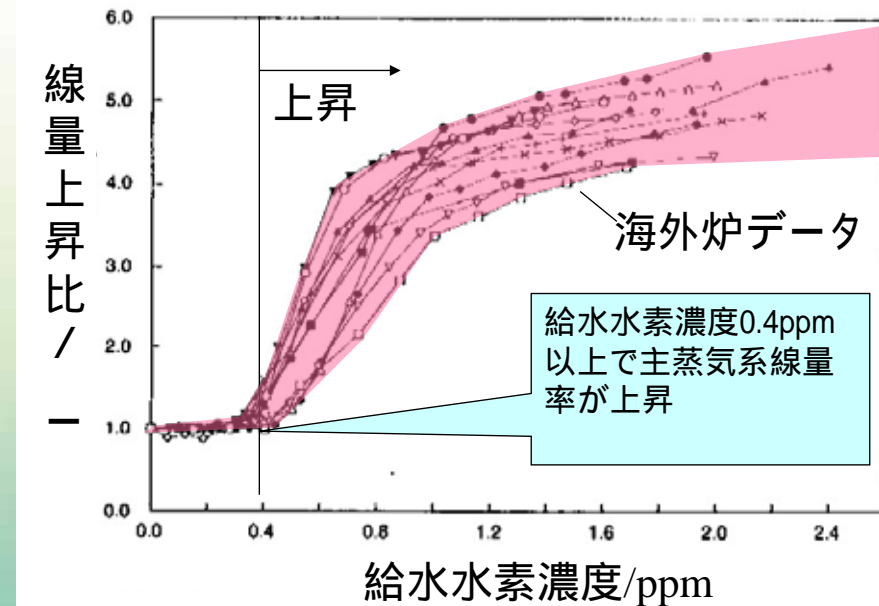
水素注入の問題点：

ECPを低減するために**高濃度の水素の注入が必要**(ボトムドレン：0.8 ppm以上)

高濃度の水素注入の際、炉水中で生成した放射性窒素(N-13,16)の化学形態変化で**主蒸気線量率が上昇**



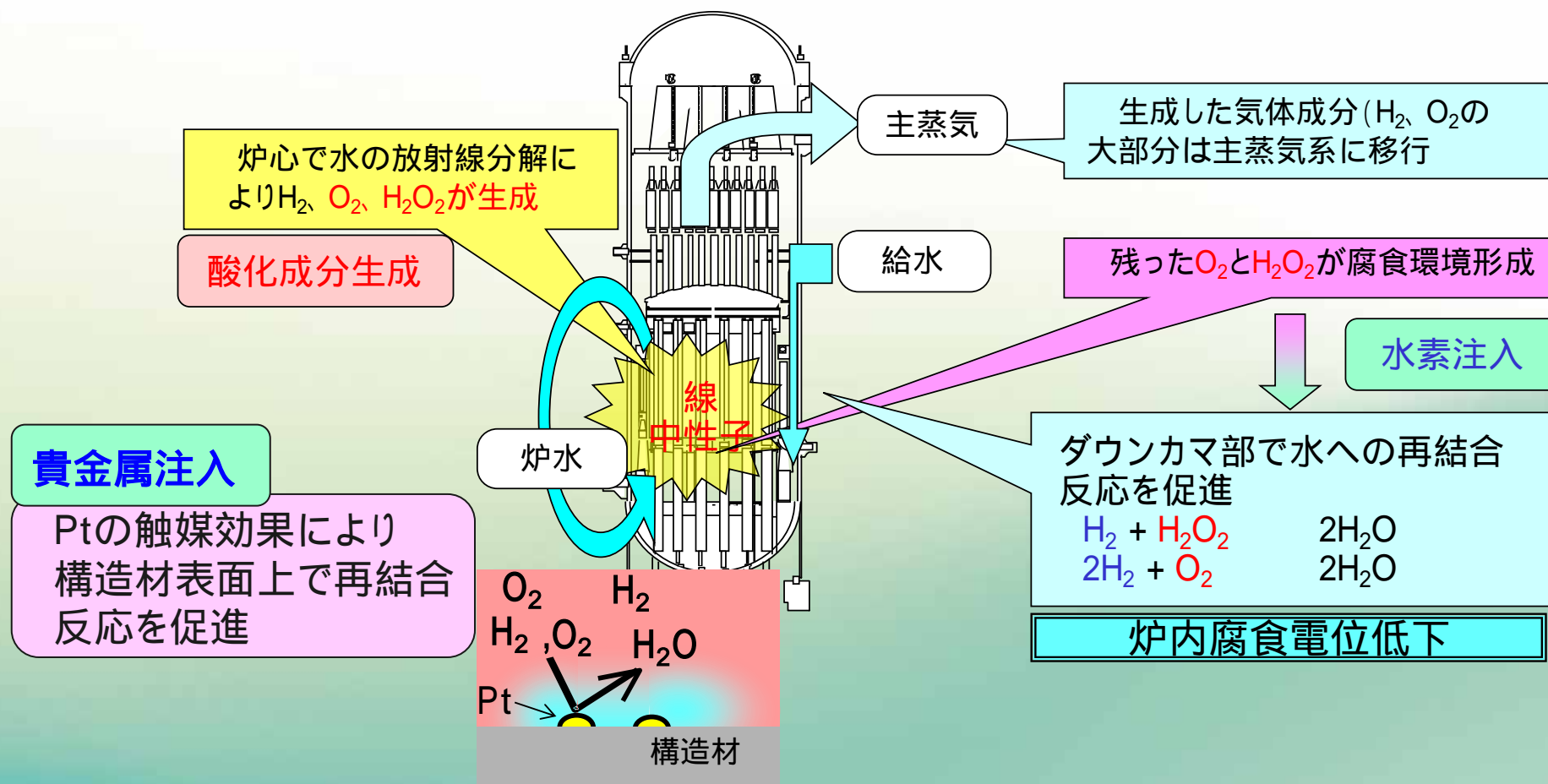
出典：日本原子力学会，“原子力発電プラントの水化学最適化の実績と将来展望”，(2003)



出典：Chien C. Lin, “Prediction of N-16 steam transport in BWRs under hydrogen water chemistry”, Chemistry for Nuclear-reactor systems 7. BNES, London (1996)

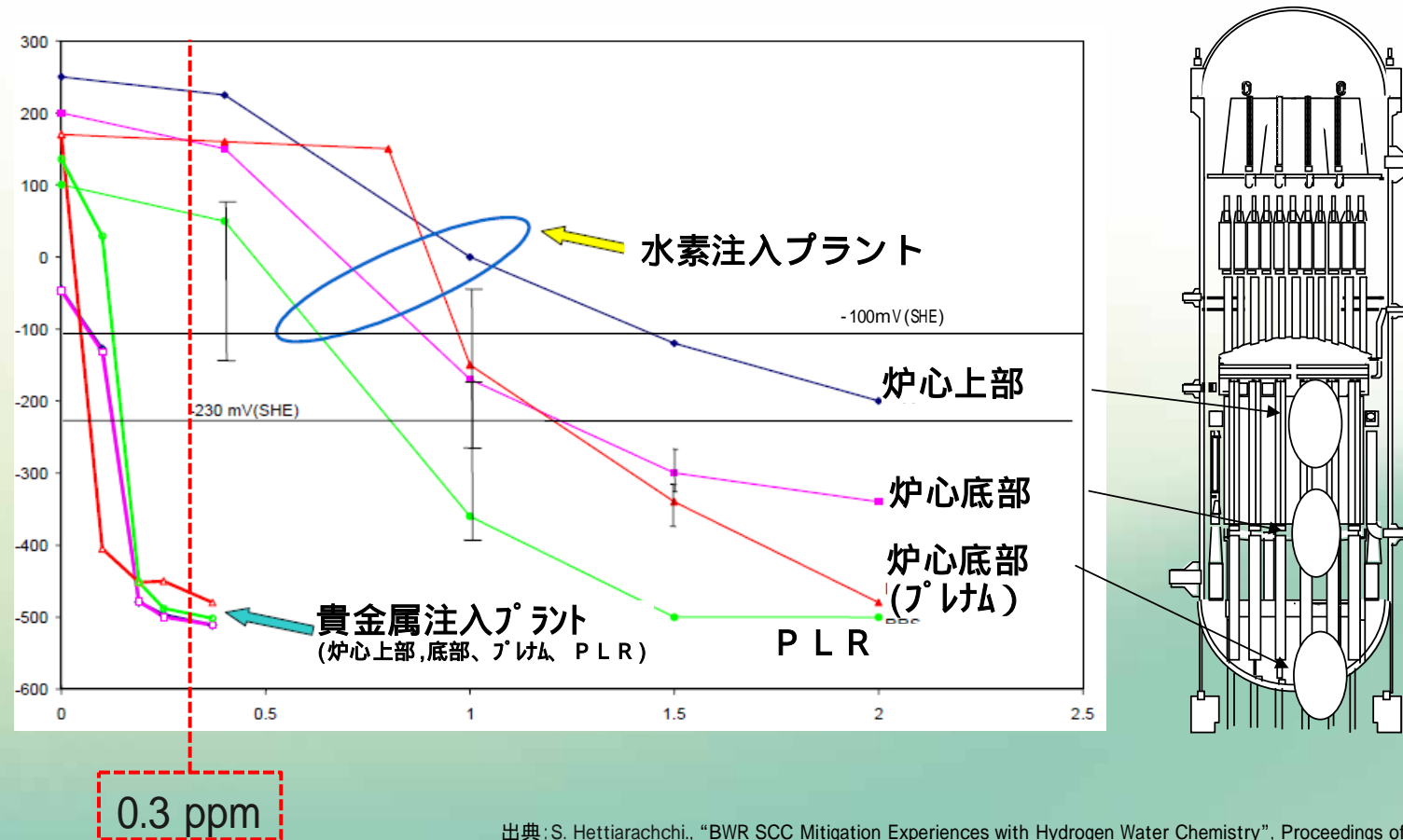
2-6 水質環境緩和対策技術（貴金属注入）

貴金属注入は、注入した貴金属が構造材表面に付着することで、その触媒効果により酸素と水素の再結合反応を促進して炉内酸化成分濃度を低減しSCC環境を効率的に緩和する。



2-7 貴金属注入の効果(1)

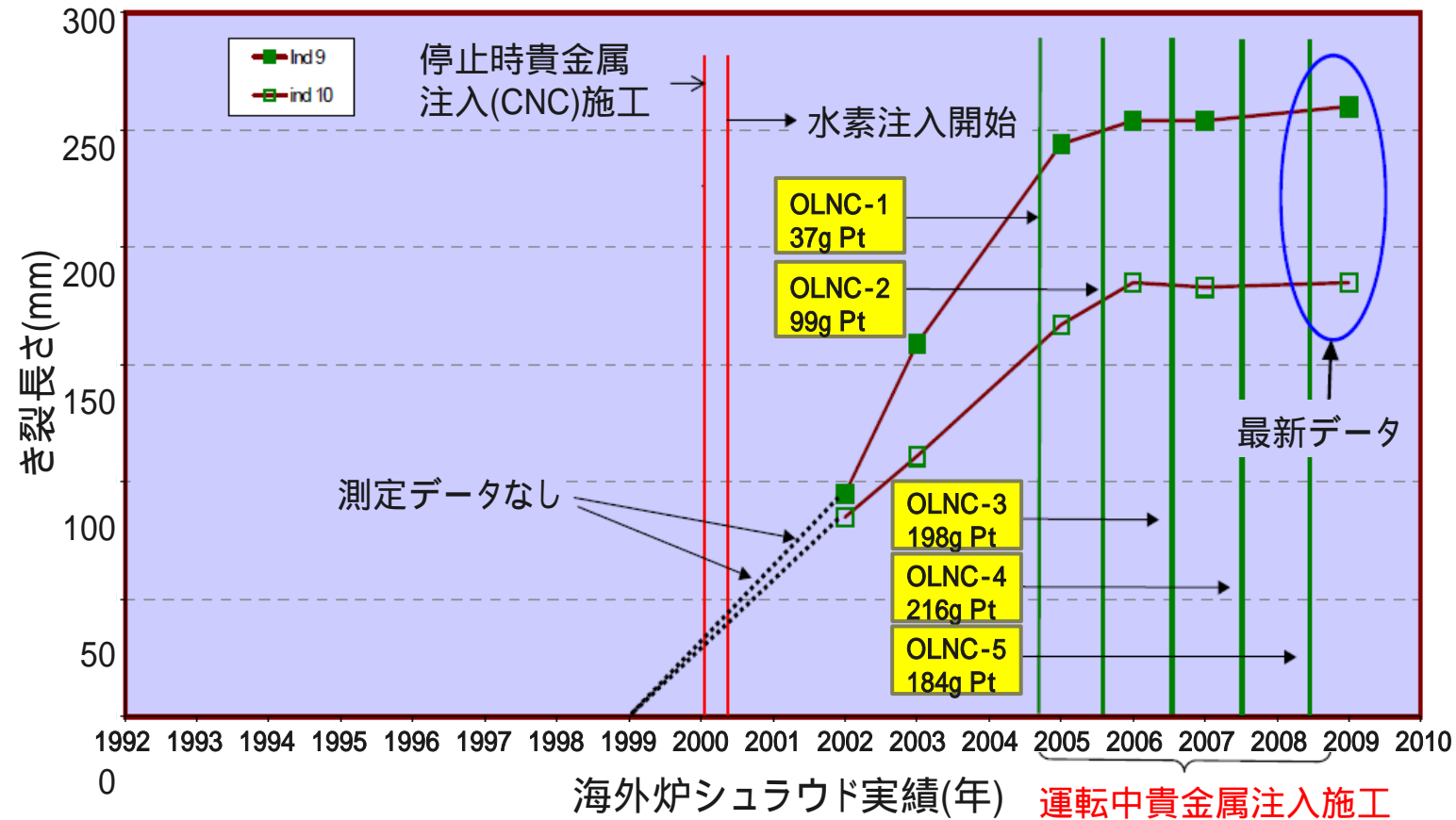
主蒸気線量率が上昇しない程度の低濃度(～0.3ppm)の水素注入でECPが低下



出典: S. Hettiarachchi, "BWR SCC Mitigation Experiences with Hydrogen Water Chemistry", Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System (2005)

2-8 貴金属注入の効果(2)

実機シュラウドにおいて、運転中貴金属注入施工後にき裂の進展が抑制



出典: S. Hettiarachchi et al., "Water Chemistry Improvements in an Operating Boiling Water Reactor (BWR) and Associated Benefits", NPC2010, Quebec (2010)

3 . 環境緩和技術の標準化への動き

3-1 BWR環境緩和標準策定事前検討WGの設立

WGの設立

米国では、BWRVIP-62に基づく環境緩和条件（ECP、Pt付着量、HWC稼働率）を満たすことで検査緩和が可能となっている。国内でも複数のBWRプラントが再稼働して今後環境緩和技術の適用が進むものと想定され、標準策定に向けた技術課題の整理と実機データの取得等が必要となっています。水化学管理分科会主査のリードの下で、環境緩和標準策定に向けたWGを2025年5月に設置し、検討を開始しています。

検討事項

1. 環境緩和標準を構成する標準やガイドラインの体系の検討
2. 標準策定に向けたロードマップの検討
3. 環境緩和技術を適用した際の副次効果とその対策に関する検討
4. 環境緩和技術の技術的根拠となるデータの収集や追加取得に関する検討
5. EPRI の BWRVIP 情報の活用する方法に関する検討

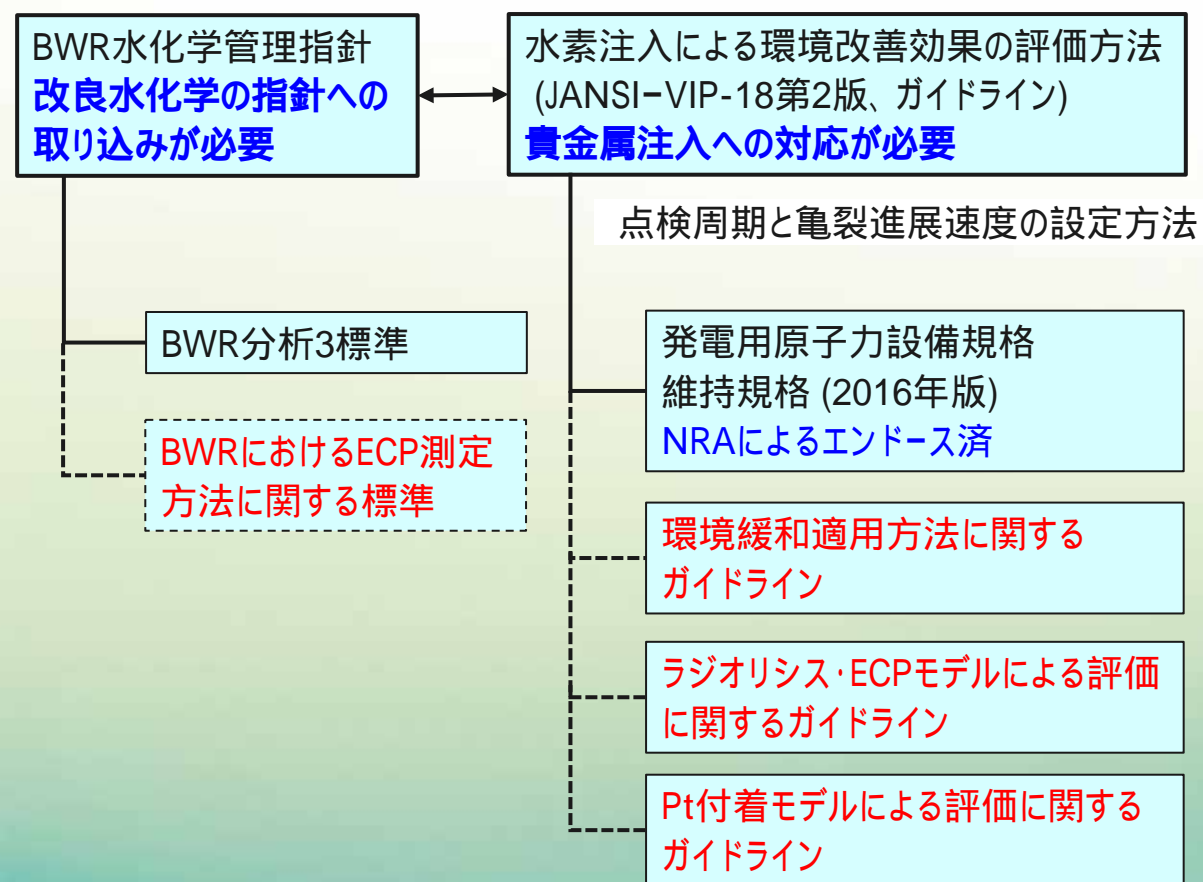
WG委員

大学、研究機関、原子力安全推進協会、BWR 電力、BWR プラントメーカーの水化学管理分科会および BWR 水化学管理指針作業会の委員など

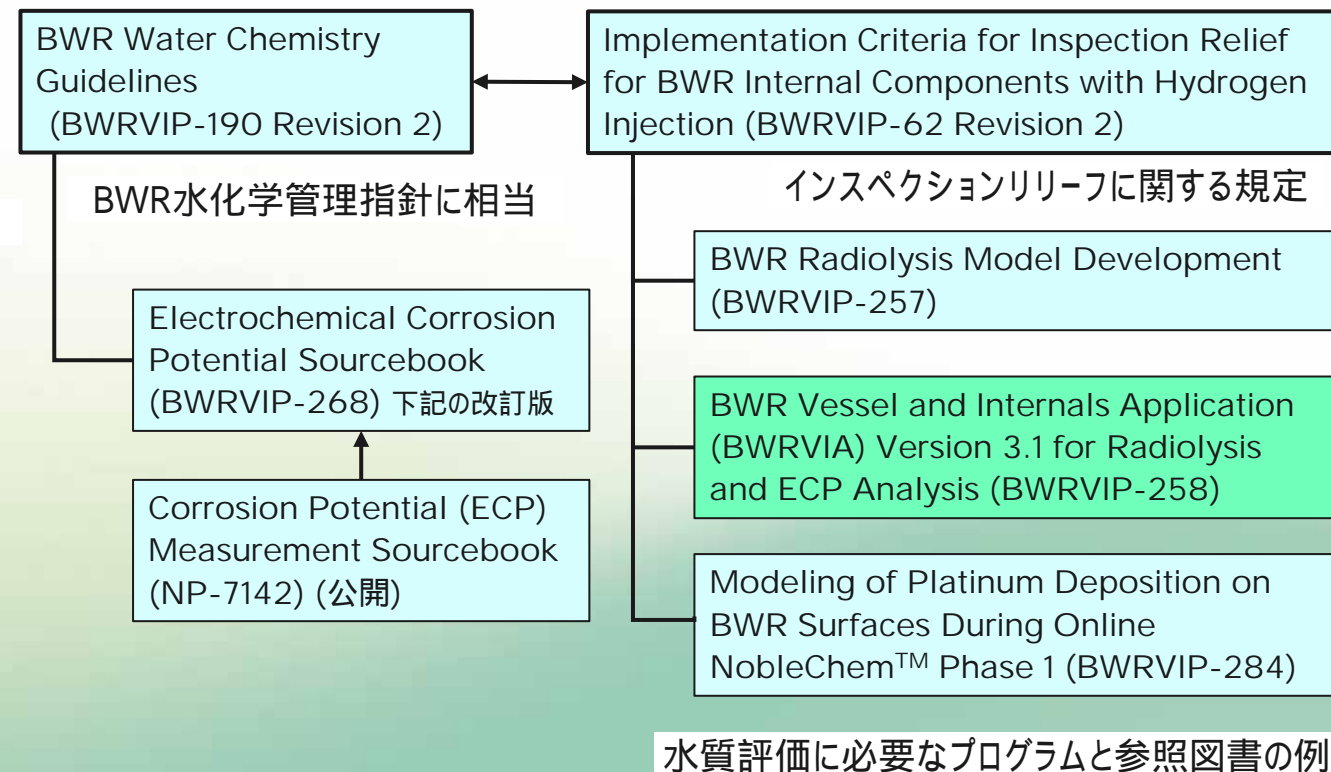
（WGの活動詳細は、[BWR環境緩和標準策定事前検討WG – 水化学部会](#)を参照）

3-2 BWR環境緩和関連の図書体系の比較

日本の図書体系（案）



EPRIの図書（プログラムを含む）体系（参考）



3-3 BWRにおけるECP測定方法に関する標準

○ 必要性

環境緩和標準にとって重要なパラメータであるECPの測定値を信頼性の高いものとするためには、その測定方法に関する標準またはガイドラインに沿って測定することが必要である。

○ 国内実績

震災以前に実施されていた水素注入プラントで多数の測定実績がある。

○ 技術的課題

BWRの炉水は純度が高いために溶液抵抗が大きく、精度の高い測定値を得るためには内部抵抗の高い測定機器を用いることや外部からのノイズなども考慮した測定方法を標準化する必要がある。

○ 標準またはガイドライン作成上の課題

先行事例に関するデータの開示、データの整理と策定作業に必要なファンドの調達

○ 優先度

国内プラントにおける貴金属注入時のECP挙動を環境緩和標準のエビデンスにしていくためにも、最優先で策定することが望ましい。

3-4 BWRにおける環境緩和適用方法に関するガイドライン

○ 必要性

環境緩和技術の適用によって、SCCの緩和を目指す際に適用技術ごとにその実施方法（水素注入量の設定方法、監視パラメータの選定など）に関する標準またはガイドラインに沿って実施することが望ましい。

○ 国内実績

震災以前に実施されていた水素注入及び停止時貴金属注入に関しては実施した実績がある。

○ 技術的課題

オンライン貴金属注入に関しては国内実績がないため、米国の先行実績を参考にする必要がある。

○ 標準またはガイドライン作成上の課題

先行事例に関するデータの開示、データの整理と策定作業に必要なファンドの調達

○ 優先度

国内プラントにおいて環境緩和効果の実利を早期に得るためには優先的に策定することが望ましい。

3-5 水化学管理指針の改訂

○ 必要性

改良水化学に関するパラメータの指針への取り込みが必要である。

○ 国内実績

CNCの適用は3プラントあるものの、OLNCは実績なし。DZOは震災前からの適用実績あり。

○ 海外実績

OLNC及びDZOの適用実績も多数あり、EPRIの水化学ガイドラインが先行して図書化済みで適宜改訂。

○ 技術的課題

米国におけるパラメータの設定根拠の確認と妥当性検討が必要。

○ 指針改訂上の課題

DZOは環境緩和適用プラントでは効果が高いのでほぼ必須と考えられるが、NWCでも効果があるため先行して指針に取り込むことも考えられる。

○ 優先度

OLNCの実機適用はこれからのため、優先度は低いが、DZO適用中プラントもあるため、DZOの優先度は高い。

3-6 環境緩和標準策定に関わる検討スケジュール例

作業項目	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
課題の整理と工程検討										
ファンドの準備	予算化									
ECP測定標準		原案作成	審議・修正	発行						
環境緩和適用方法			原案作成	審議・修正	発行					
環境緩和評価GL				原案作成	審議・修正	発行				
Pt付着モデルGL			モデルの開発	原案作成	審議・修正	発行				
JANSI-VIP-18改定				体制の再構築と 予算化	改訂方針の検討および原案作成	審議・修正	改訂発行			
水化学管理指針改定	改訂発行	改訂方針の検討および原案作成	審議・修正	改訂発行	改訂方針の検討および原案作成	審議・修正				

4 . まとめ

まとめ

BWRプラントの高経年化対策の 1 つと考えられる水質環境緩和技術の適用によるSCC対策の概要と、この環境緩和技術を適用していくために将来必要となる標準類を策定する準備としてBWR環境緩和標準策定事前検討WGの設立と活動状況の一部を紹介した。

- 高経年化プラントでは、高経年化技術評価の中で保全計画を策定する必要性があり、予防保全技術の一つとして、水質環境緩和によるSCCの発生抑制と亀裂進展抑制が挙げられる。
- 環境緩和技術としては、貴金属注入と低濃度水素注入が世界のBWRプラントの主流となっており、その効果に関して主蒸気系の線量上昇を伴わないで腐食電位を効率的に低減できることを紹介した。
- 国内においても将来の採用に向けた検討が活発化してきていることから、現在の水化学管理指針では規定されていない環境緩和技術について、将来の標準化に向けた準備を開始するためのWGが設立されており、そのWGでの検討状況について紹介した。

HITACHI



GE VERNOVA