平成30年3月20日
日本原子力学会水化学部会
第32回定例研究会

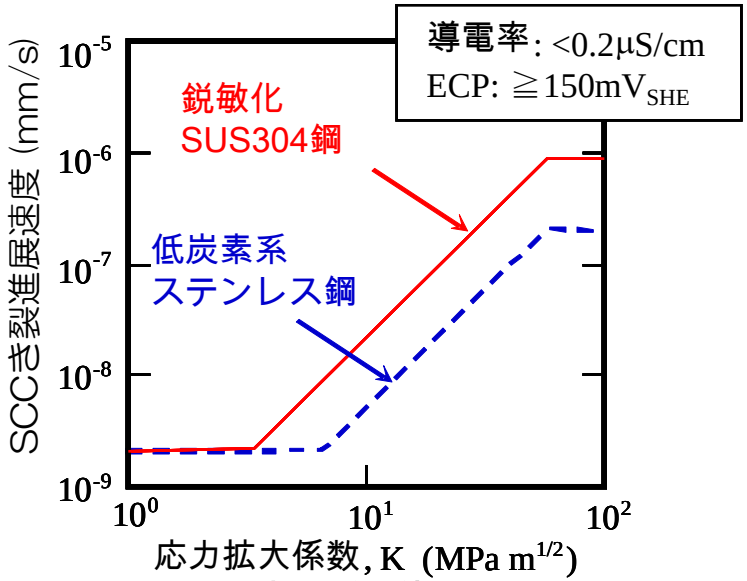
部会活動報告

水化学部会技術報告書
「沸騰水型原子炉一次冷却水の腐食環境の評価手法に関する現状と課題（仮題）」作成状況について

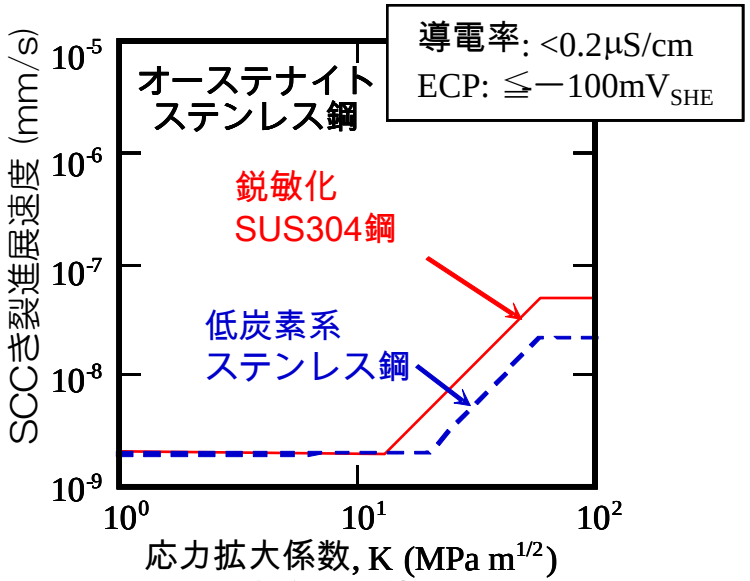
技術報告書作成の経緯

日本機械学会／維持規格

ＥＣＰに応じたき裂進展速度線図を規定
（プラント点検周期に反映）



a) 通常水質条件（NWC）



b) 水素注入条件（HWC）

き裂進展速度の比　HWC/NWC=1/18

＜き裂進展線図適用に対する課題＞

（１）ＨＷＣ／ＮＷＣ条件の混在時の扱いが不明確

⇒ＨＷＣガイドラインでＨＷＣ稼働率による評価方法を規定

（２）現状の維持規格では環境緩和効果の確認方法が不明確

・ＥＣＰ測定部⇒適用可能

・ＥＣＰ未測定部⇒**ＨＷＣ標準でモデル解析による評価方法を規定**

技術報告書作成の経緯

ＥＣＰ未測定部におけるき裂進展速度線図適用のスキーム

日本機械学会
維持規格

ＥＣＰに応じたき裂進展速度線図を規定
プラントの環境条件に応じた維持管理が可能

日本原子力技術協会※１
ＨＷＣガイドライン※２

き裂進展速度線図適用の条件を規定
評価対象部位におけるき裂進展速度を低減できる
ＥＣＰが確保できる水素注入量が満足されていれば、
ＨＷＣ条件でのき裂進展速度線図を適用可能

整備済み

検討中

日本原子力学会
ＨＷＣ標準※３

モデル解析によるＥＣＰ評価手法を規定
低ＥＣＰが確保される水素注入条件を評価する手順を標準化（＝水素注入量に対して評価対象部位におけるＥＣＰを解析する手順を標準化）

※１）現在は原子力安全推進協会
※２）予防保全工法ガイドライン〔水素注入による環境改善効果の評価方法〕
（平成２４年３月制定、平成２９年３月第２版発行）
※３）沸騰水型原子炉一次冷却系の腐食環境の定量評価に関する基本手順（仮称）

技術報告書作成の経緯

- 日本原子力学会標準委員会システム安全専門部会水化学管理分科会で、ＨＷＣ標準作業化を設置し、「沸騰水型原子炉一次冷却系の腐食環境の定量評価に関する基本手順」通称、ＨＷＣ標準）を学会標準として制定すべく、平成24年より作成を開始。
- システム安全専門部部会でのコメントを受け、標準化を見送ることとした。
- 水化学部会の技術報告として、「沸騰水型原子炉一次冷却系の腐食環境の評価手法に関する現状と課題」として学会より発行するため平成27年度より作成を開始。

技術報告書の構成案

まえがき

１．水素注入技術の概要

２．実機への適用実績

（腐食環境評価の目的や国内外の実績等）

３．腐食環境評価手法

（評価手法の詳細）

４．解析結果と実機ベンチマーク

（BWRの解析結果と実機データのベンチマーク）

５．腐食環境評価の現状と課題

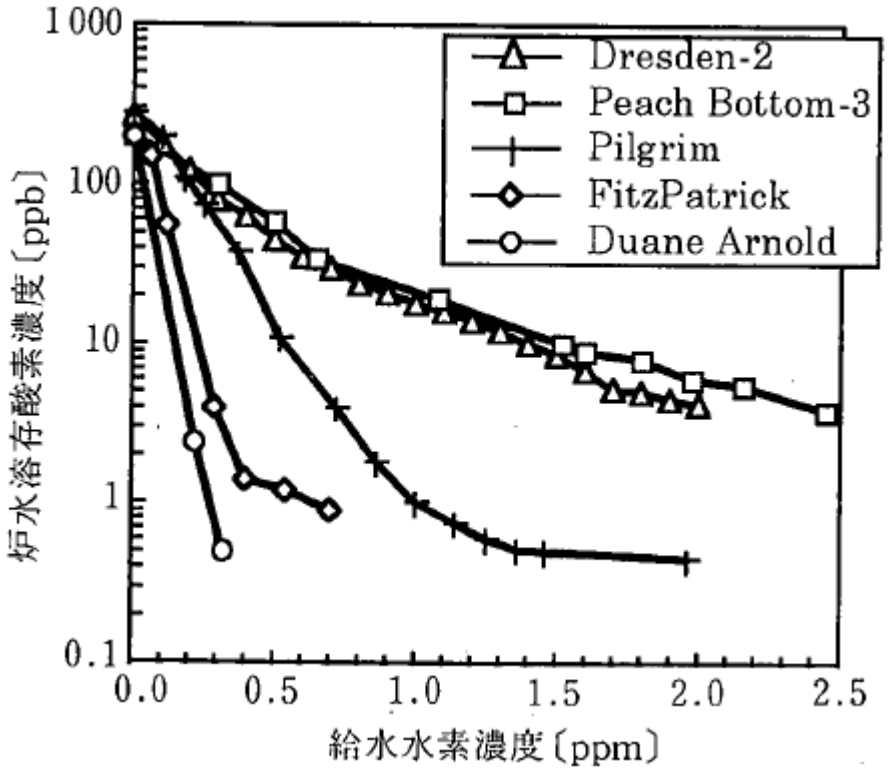
（モデル評価の現状と課題、実機体系のモデル化の現状と課題）

６．まとめ

あとがき

本日は、２章から５章の内容概要を紹介

実機への水素注入適用実績

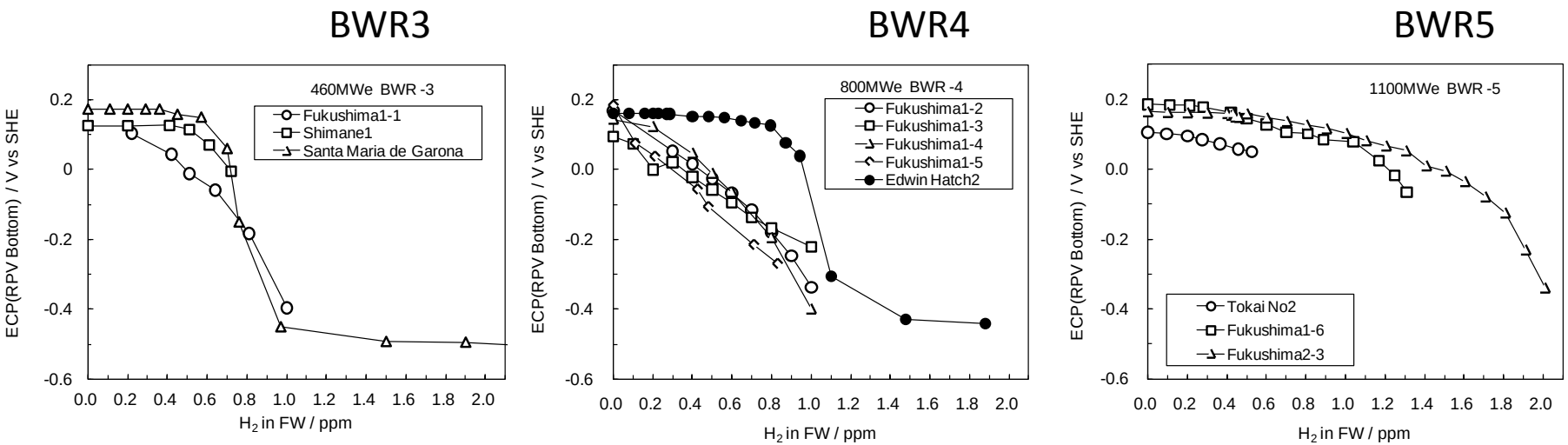


米国BWRの再循環配管系溶存酸素

出典：原子炉水化学ハンドブック（コロナ社）

- プラントごとに水素注入の効果の差が大きい

実機への水素注入適用実績



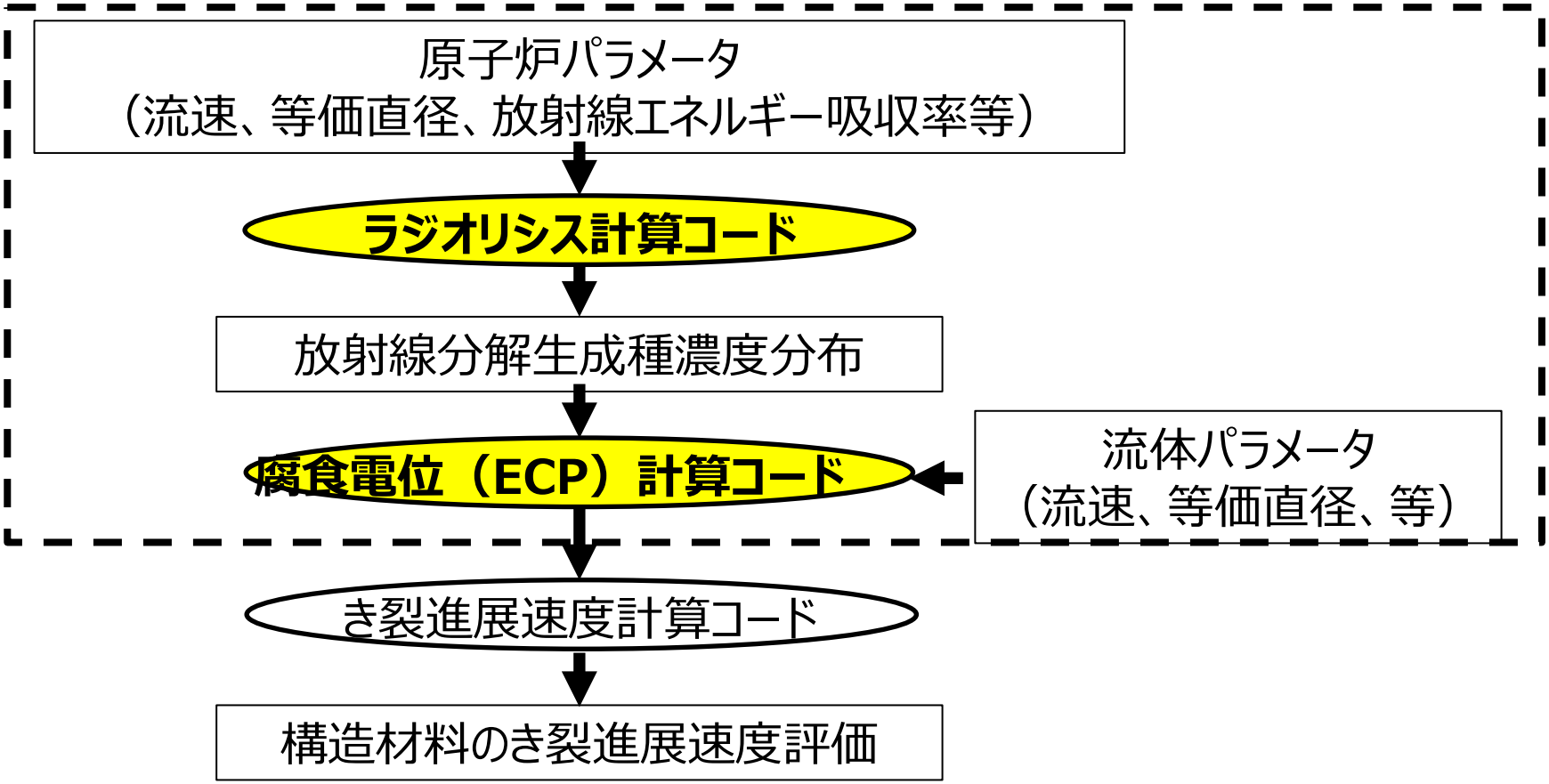
国内外BWRの腐食電位実測例（ボトムドレン、下部プレナム）

出典：
H. Goto, et al., The 13th Chino-Japanese Seminar on Nuclear Safety, Taipei, ROC, JAIF (1999); J. Takagi, et al., Proc. of Water Chemistry 7, BNES, 196 (1996);
H. Takiguchi, et al., J. Nucl. Sci. Technol., 36, 179 (1999);
K. Koyabu et al., Proc. of Symposium on Water Chemistry and Corrosion in NPP in Asia 2009, Nagoya, p117 , AESJ (2009)

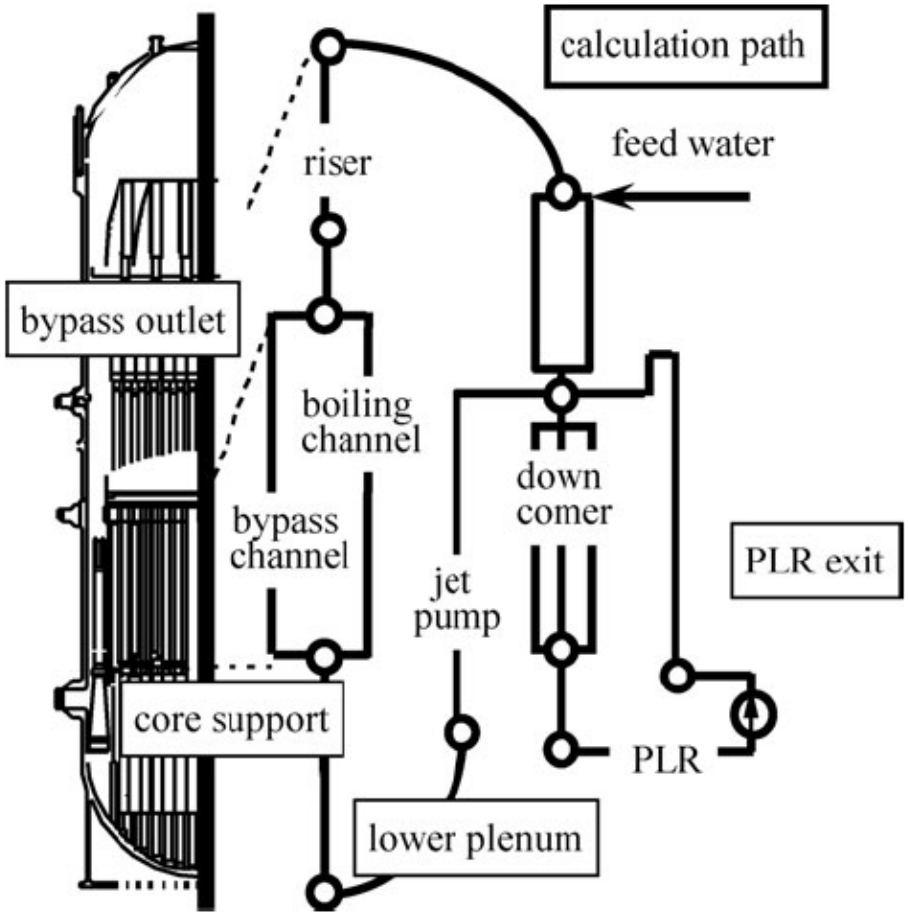
- 炉型が同じであれば概ね同じような応答だが、詳細に比較すると個別に違い

直接測定が困難な部位について、計算により腐食電位を評価する

腐食環境評価手法の概要(1)



腐食環境評価手法の概要(2)



ラジオリシス計算コード用流路設定例

出典：S.Uchida et.al. Journal of Nuclear Science and Technology, Volume 51, No. 1, 24-36(2014)

- BWR一次冷却系の原子炉圧力容器内、再循環系を主対象
- 主要機器、部位を一定の体積を持った流路

ラジオリシス計算コード

水の放射線分解による分解生成物（e_{aq}-，H，OH，H_2，H_2O_2，HO_2）が相互に反応、酸素や過酸化水素が生成する。
基本式

Rate equation along the flow path

$$\underbrace{\partial C_l/\partial t = -\nabla(UC_l)}_{\text{(i)}} \underbrace{+q_l}_{\text{(ii)}}$$

Rate equation due to generation and annihilation of radiolytic species

$$\underbrace{q_l = G_i^{\gamma} P^{\gamma} + G_i^{n} P^{n}}_{\text{(iii)}} \underbrace{+\Sigma_{mn} k_{mn}^{i} C_m C_n}_{\text{(iv)}} \underbrace{-C_i \Sigma_s k_{is} C_s}_{\text{(v)}} \underbrace{+V_f/(1-V_f)(\varepsilon_l^* C_l^{\gamma} - \varepsilon_l C_l)}_{\text{(vi)}}$$

(i) Flow in & flow out
(ii) Radiolysis terms and transfer between liquid and steam phases
(iii) Generation due to radiolytic decomposition of H_2O_2
(iv) Generation due to the reactions of radiolytic species
(v) Disappearance due to the reactions of radiolytic species
(vi) Transfer between liquid and steam phases

出典：S.Uchida et.al. Journal of Nuclear Science and Technology, Volume 51, No. 1, p.24-36(2014)

- プラントパラメータ：流速、吸収線量率（n、γ）、ボイド率等
- 放射線化学パラメータ：G値、反応速度定数

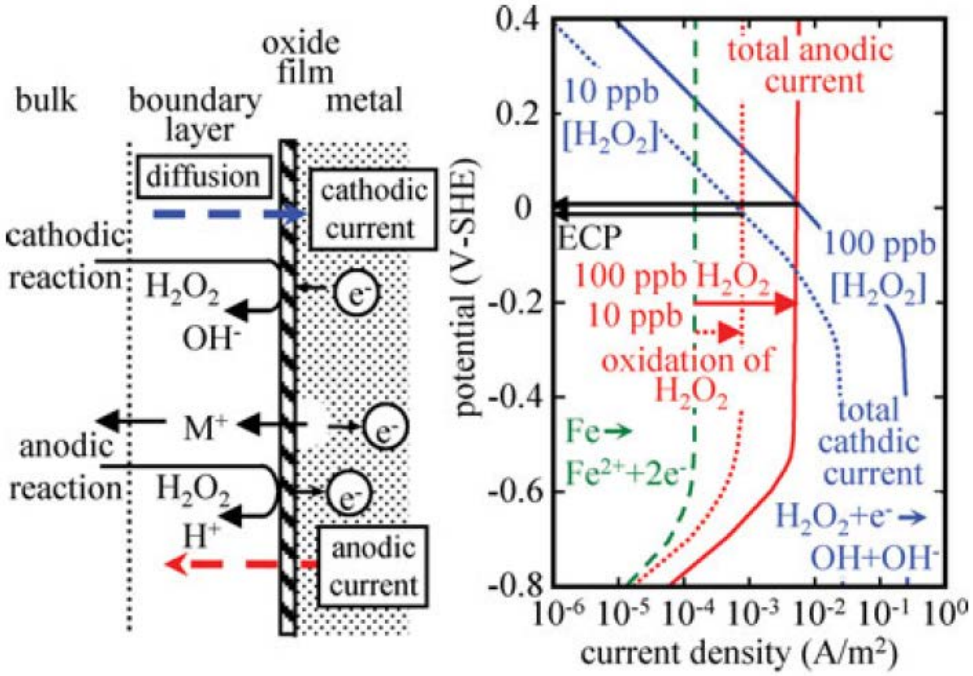
腐食電位（ECP）計算コード

基本式： IA(φ) ＋ IC(φ) ＝ 0

φ： 腐食電位。

IA(φ)：全アノード電流密度。電位がφのときの溶存する水素の電極表面上での酸化反応及び金属の酸化溶解に伴う電流密度の総和とする。

IC(φ)：全カソード電流。電位がφのときの溶存する酸素，及び過酸化水素の電極表面上での還元反応に伴う電流密度の総和とする。

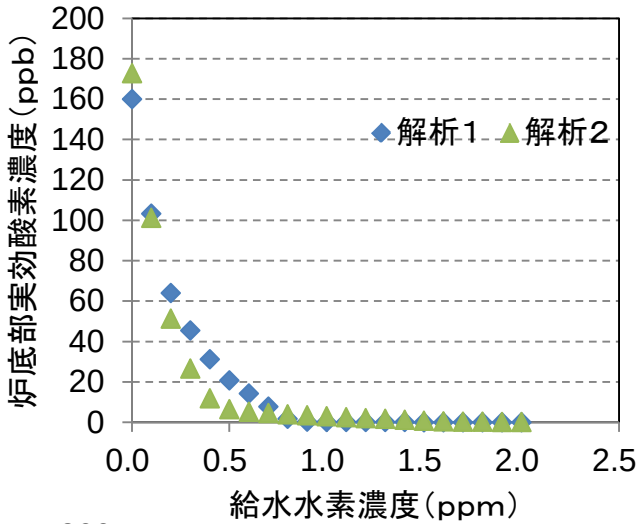


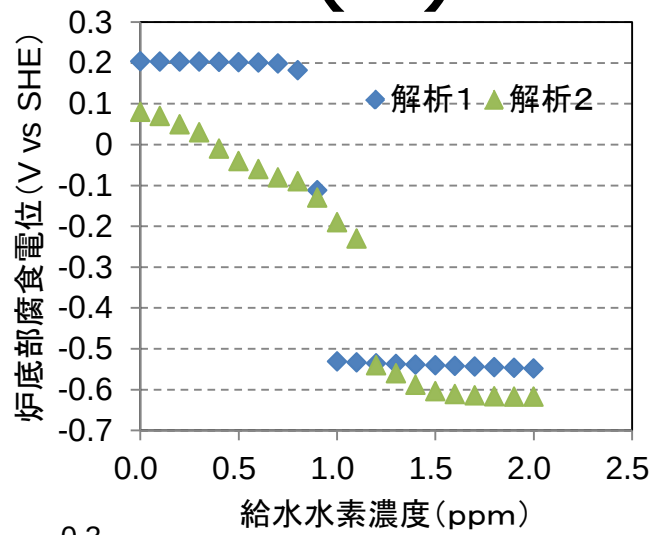
(a) Cathodic and anodic reactions. (b) Charge balance.

- ラジオリシス計算コードの結果がインプット
- パラメータ：アノード分極曲線、カソード分極曲線（電流密度、Tafel勾配）

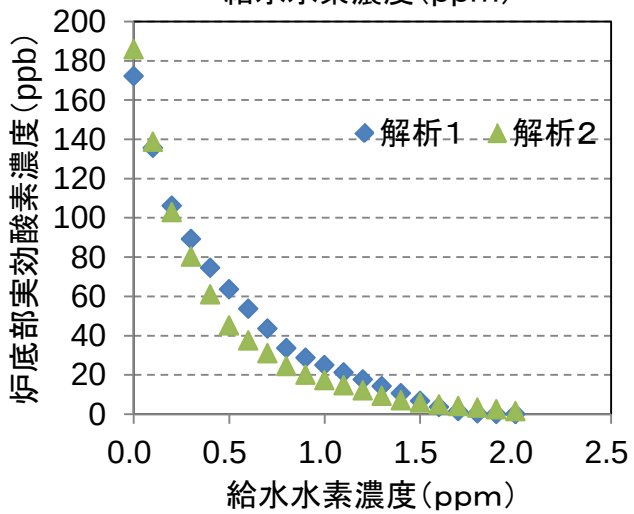
出典：S.Uchida et.al. Journal of Nuclear Science and Technology, Volume 51, No. 1, pl24-36(2014)

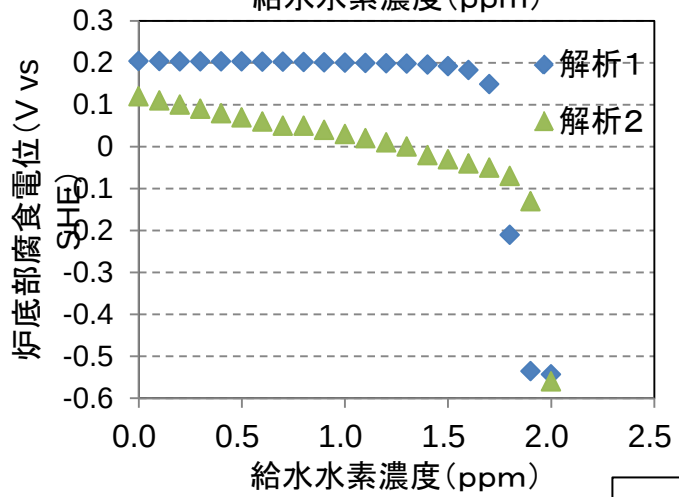
解析結果(2)





BWR4





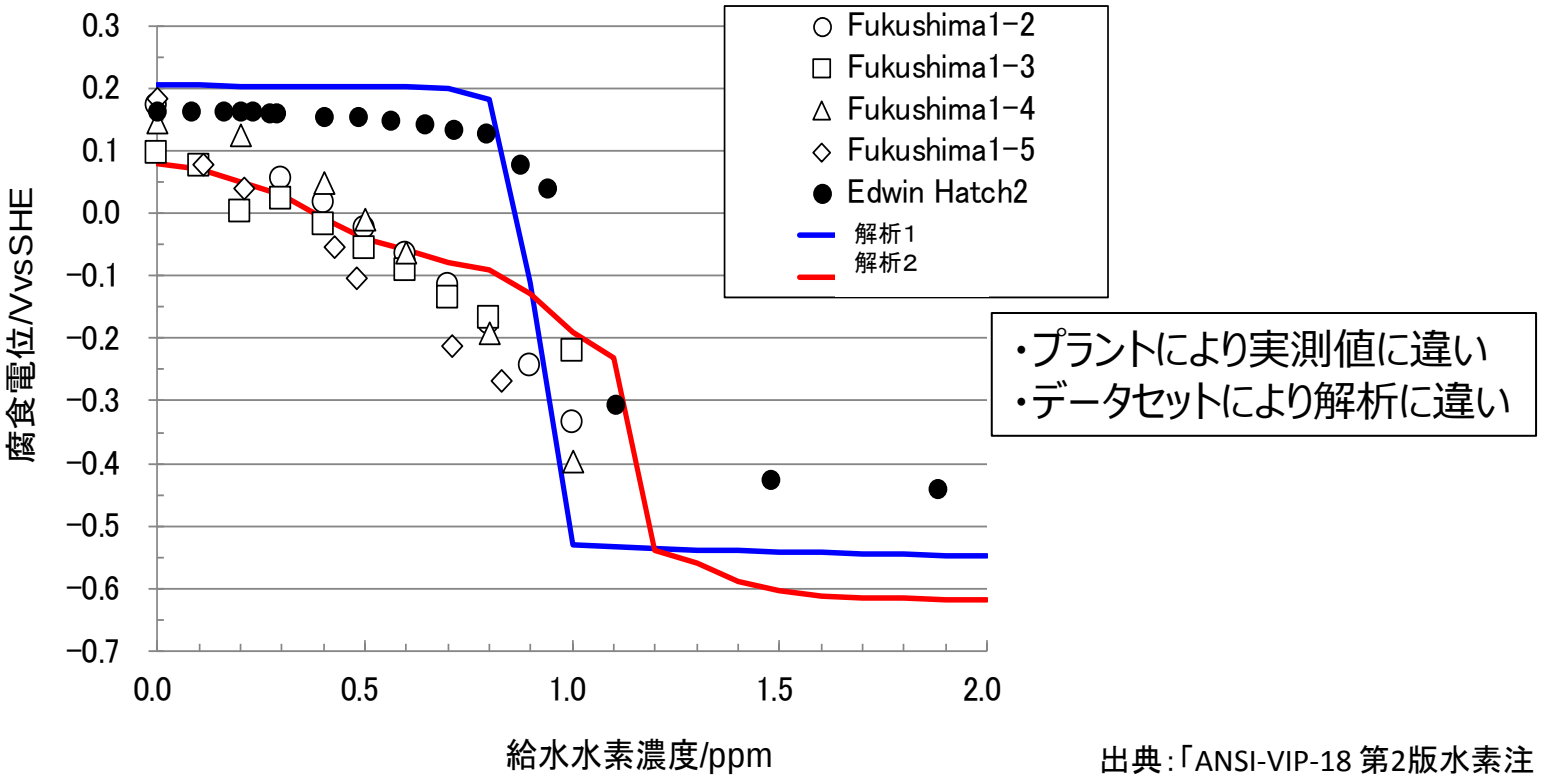
BWR5

炉底部の実効酸素濃度（左）と腐食電位（右）の解析結果

二機関で解析を実施
一部用いるパラメータに違い

二つの解析で実効酸素濃度はおおむね一致、
腐食電位の傾向はやや異なるが、電位低下に必要な水素量は一致

解析結果と実機データの比較



解析結果と実機データ比較（BWR4炉底部）

出典:「ANSI-VIP-18 第2版水素注入による環境改善効果の評価方法」をもとに作成

腐食電位の実測値はプラントにより異なるが、いずれの解析も傾向を再現しているが標準化するには課題が残る

腐食環境評価の現状と課題(1)

(dm^3·mol^{-1}·s^{-1})

No.	Reaction	Reaction rate at 280°C
1	$e^-_{aq}+H_2O \rightarrow H+OH^-$	1.69×10^{2}
2	$e^-_{aq}+H^+ \rightarrow H$	2.54×10^{11}
3	$H \rightarrow e^-_{aq}+H^+$	1.00×10^{5}
4	$e^-_{aq}+OH \rightarrow OH^-$	3.17×10^{11}
5	$e^-_{aq}+H_2O_2 \rightarrow OH+OH^-$	1.38×10^{11}
6	$H+H \rightarrow H_2$	1.06×10^{11}
7	$e^-_{aq}+HO_2 \rightarrow HO_2^-$	2.12×10^{11}
8	$e^-_{aq}+O_2 \rightarrow O_2^-$	2.01×10^{11}
9	$e^-_{aq}+e^-_{aq}+H_2O+H_2O \rightarrow OH^-+H_2+OH^-$	1.74×10^{7}
10	$OH+OH \rightarrow H_2O_2$	4.76×10^{10}
11	$OH^-+H \rightarrow e^-_{aq}+H_2O$	6.88×10^{8}
12	$e^-_{aq}+H+H_2O \rightarrow OH^-+H_2$	4.76×10^{9}
13	$e^-_{aq}+HO_2^-+H_2O \rightarrow OH+OH^-+OH^-$	6.67×10^{8}
14	$H+OH \rightarrow H_2O$	2.12×10^{11}
15	$OH+H_2 \rightarrow H+H_2O$	1.27×10^{9}
16	$H+H_2O \rightarrow OH+H_2$	1.10×10^{3}
17	$H+O_2 \rightarrow HO_2$	2.01×10^{11}
18	$H+HO_2 \rightarrow H_2O_2$	2.11×10^{11}
19	$H+O_2^- \rightarrow HO_2^-$	2.11×10^{11}
20	$e^-_{aq}+O_2^-+H_2O \rightarrow HO_2^-+OH^-$	1.13×10^{8}
21	$H+H_2O_2 \rightarrow OH+H_2O$	3.07×10^{9}
22	$OH+H_2O_2 \rightarrow H_2O+HO_2$	3.91×10^{8}
23	$OH+HO_2 \rightarrow H_2O+O_2$	1.27×10^{11}
24	$OH^-+H_2O_2 \rightarrow HO_2^-+H_2O$	1.72×10^{10}
25	$HO_2^-+H_2O \rightarrow OH^-+H_2O_2$	1.08×10^{5}
26	$HO_2+HO_2 \rightarrow H_2O_2+O_2$	9.29×10^{7}
27	$HO_2 \rightarrow O_2^-+H^+$	8.46×10^{6}
28	$O_2^-+H^+ \rightarrow HO_2$	5.29×10^{11}
29	$HO_2+O_2^- \rightarrow O_2+HO_2^-$	5.16×10^{8}
30	$H^++OH^- \rightarrow H_2O$	1.48×10^{12}
31	$H_2O \rightarrow H^++OH^-$	1.81×10^{-1}
32	$O_2^-+OH \rightarrow OH^-+O_2$	1.27×10^{11}
33	$2O_2^-+2H_2O \rightarrow O_2+H_2O_2+2OH^-$	1.93×10^{5}
34	$2H_2O_2 \rightarrow 2H_2O+O_2$	2.00×10^{-2}

G値と反応速度データセットの例

(n/100 eV)

	e^-_{aq}	H^+	H	OH	H_2	H_2O_2
Gamma	3.41	3.41	0.87	4.86	0.60	0.31
Neutron	0.68	0.68	0.52	1.66	1.52	1.29

1)ラジオリシス計算コード

・放射線化学パラメータであるG値（ガンマ線、中性子）や反応速度定数は長年にわたり整備が続けられている。いくつかの反応についてその重要性が指摘されており、これらの反応速度定数の更なる充実が必要。

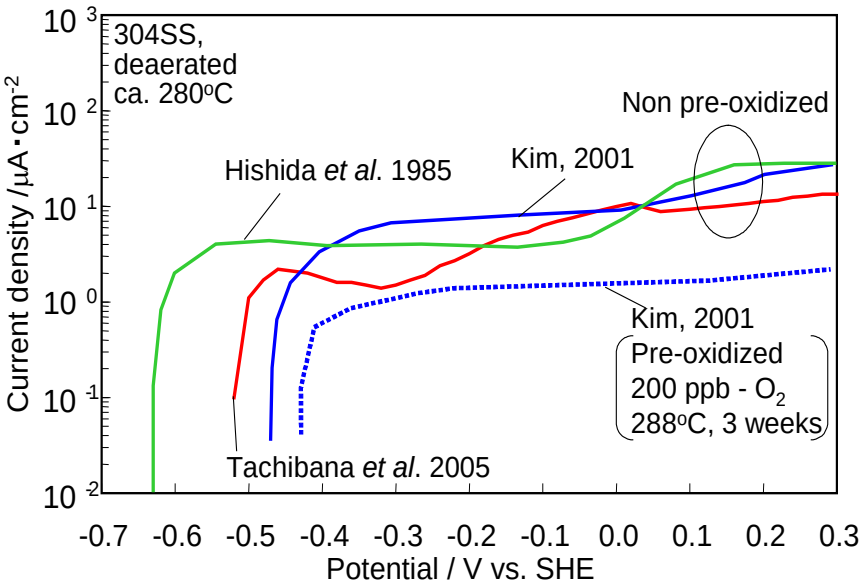
例）$OH + H_2 \rightarrow H_2O + H$,

$H_2O + H \rightarrow OH + H_2$

・プラントパラメータである流動や吸収線量率は水素・酸素再結合反応への影響が大きいため、精度向上が必要

出典：N.Ichikawa et al. Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 40, No. 11, p. 941–950 (2003)

腐食環境評価の現状と課題(2)



アノード分極極曲線の測定例

出典：Y. Wada, S. et.al., 6th Workshop on LWR Coolant Water Radiolysis and Electrochemistry, 27 Oct. 2006, Jeju, Korea (2006).

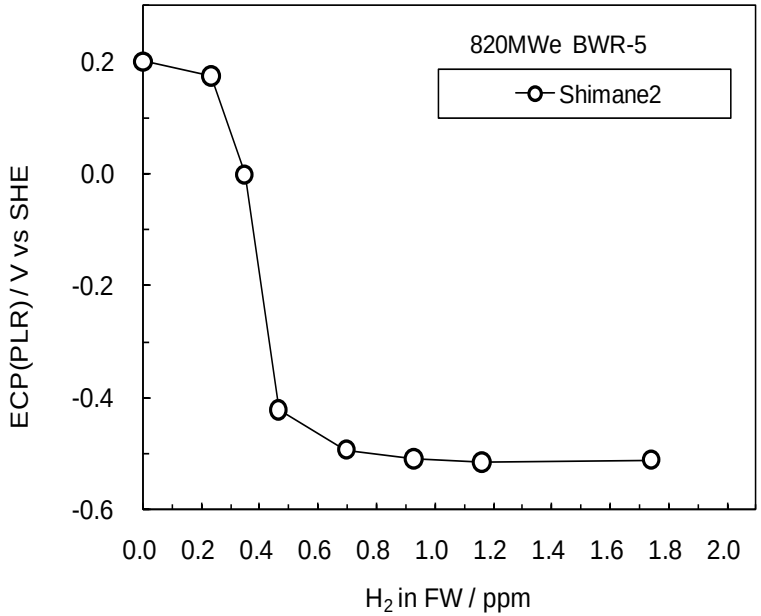
2)腐食電位計算コード

・高温水中での金属のアノード分極曲線の測定例が少なく、十分に確立していない。

・腐食電位評価に用いている流速等のデータは、一次元で評価を実施しているが、実機プラントにおける流れは複雑であり、この流れが腐食電位に大きく影響を及ぼすため、流れの影響を解析モデル等により評価することが必要

・電気化学パラメータや高温での物性値（例えば、高温水中での過酸化水素の拡散係数）の確立が必要

腐食環境評価の現状と課題(3)



820MWe－BWR5のPLRサンプリングラインでのECP実測値

出典：K. Ishida, et al., Proc. of NPC'08 - International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems - September 14 -18, 2008, L04-3, (2008)

3)プラントでの実測値

・ラジオリシス計算コード、腐食電位計算コードの妥当性を評価するためには、実機での水質、腐食電位の充実が必要

・炉内の保護対部位にできるだけ近い場所、可能な限り炉内にECPセンサを設置して腐食電位を測定することが求められる。

まとめ

- 水素注入による環境改善効果の定量的評価手法を提示。現状の評価精度にはまだ向上の余地があり、評価手法が標準や規格には至っていないものの、BWRプラントの運用に当たり、環境改善の指標を与え、事業者の判断に有効な知見を与えるものである。
- 現在、ドラフト版に対してコメントをいただき、2018年度の発行をめざし、改訂作業を実施中。