

PWR二次冷却系における 流動加速型腐食に対する評価手法の開発

岡田 英俊 上原 靖 内田 俊介 内藤 正則
(財)エネルギー総合工学研究所

(社)日本原子力学会 水化学部会 第5回定例研究会
日本原子力研究開発機構 システム計算科学センター 7F 大会議室

内容

- 背景と目的
- 流動加速型腐食評価モデルについて
 - 評価モデルの概要
 - 一次元流動解析モデル
 - 一次元酸素・ヒドラジン反応モデル
 - 三次元流動解析モデル
 - 減肉速度評価モデル
- 実機への適用
- まとめ

背景と目的

- 背景

- 原子力発電所への経済性向上の要求

- 出力増強
- 運転期間延長
- 寿命延長

- 配管破断による死傷事故の発生

- 2004年8月9日 美浜三号機 で死傷事故
- 2007年5月9日 latan-1 (Missouri, USA, 725MWe、石炭火力)

- 目的

- PWR二次冷却系での定量的な配管減肉評価手法の確立

内容

- 背景と目的
- 流動加速型腐食評価モデルについて
 - 評価モデルの概要
 - 一次元流動解析モデル
 - 一次元酸素・ヒドラジン反応モデル
 - 三次元流動解析モデル
 - 減肉速度評価モデル
- 実機への適用
- まとめ

FACによる配管減肉評価過程

一次元流動解析コード

流路に沿っての流速、温度分布評価

一次元 酸素-ヒドラジン反応解析コード

流路に沿っての腐食環境評価 ($[O_2]$ 、ECP)

二、三次元流動解析コード

質量移行係数評価

チャート解析

危険部位評価

減肉速度解析コード

減肉速度とECP評価

総合評価

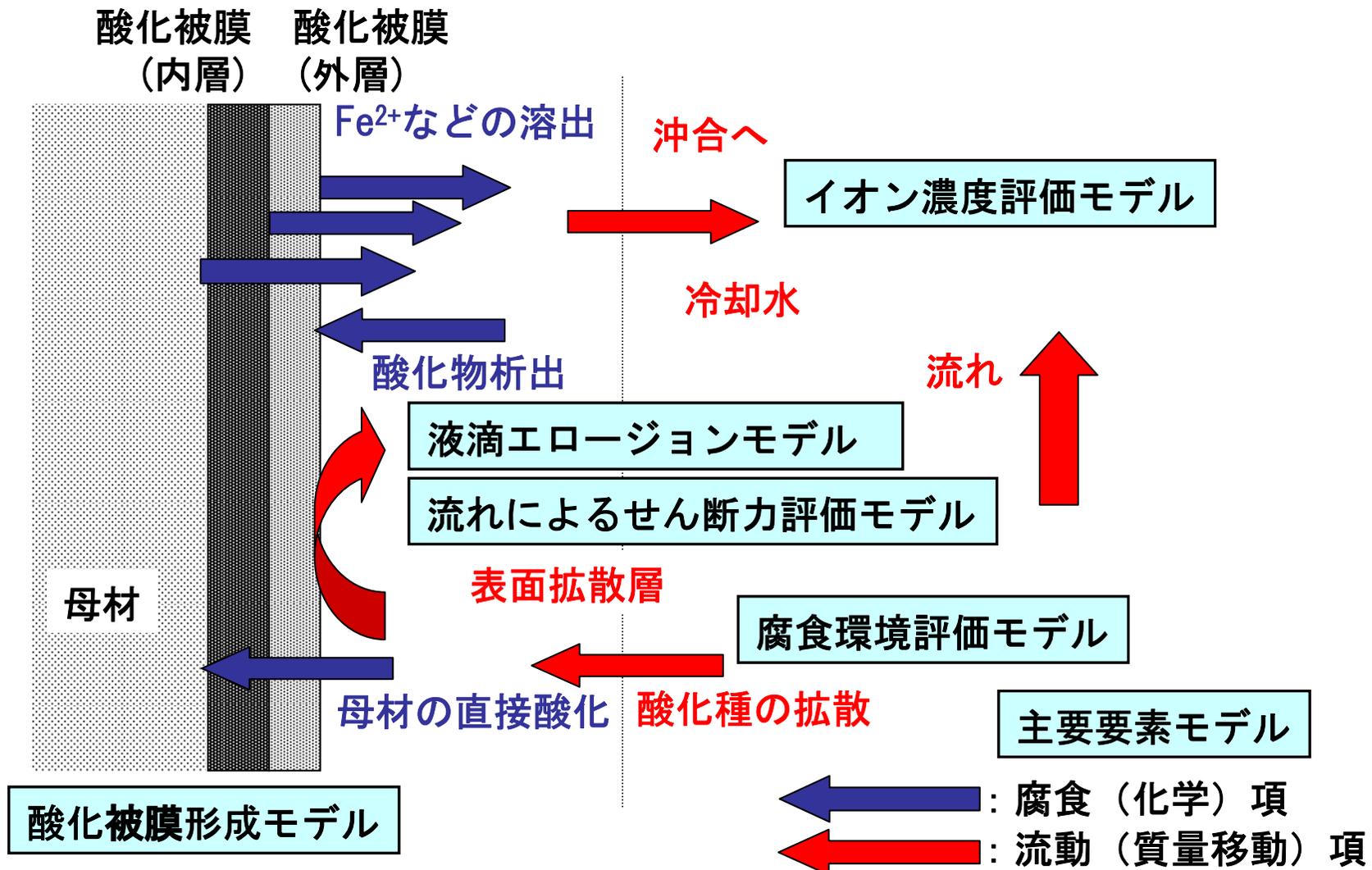
余寿命評価、低減策の有効性評価

 : 流動解析

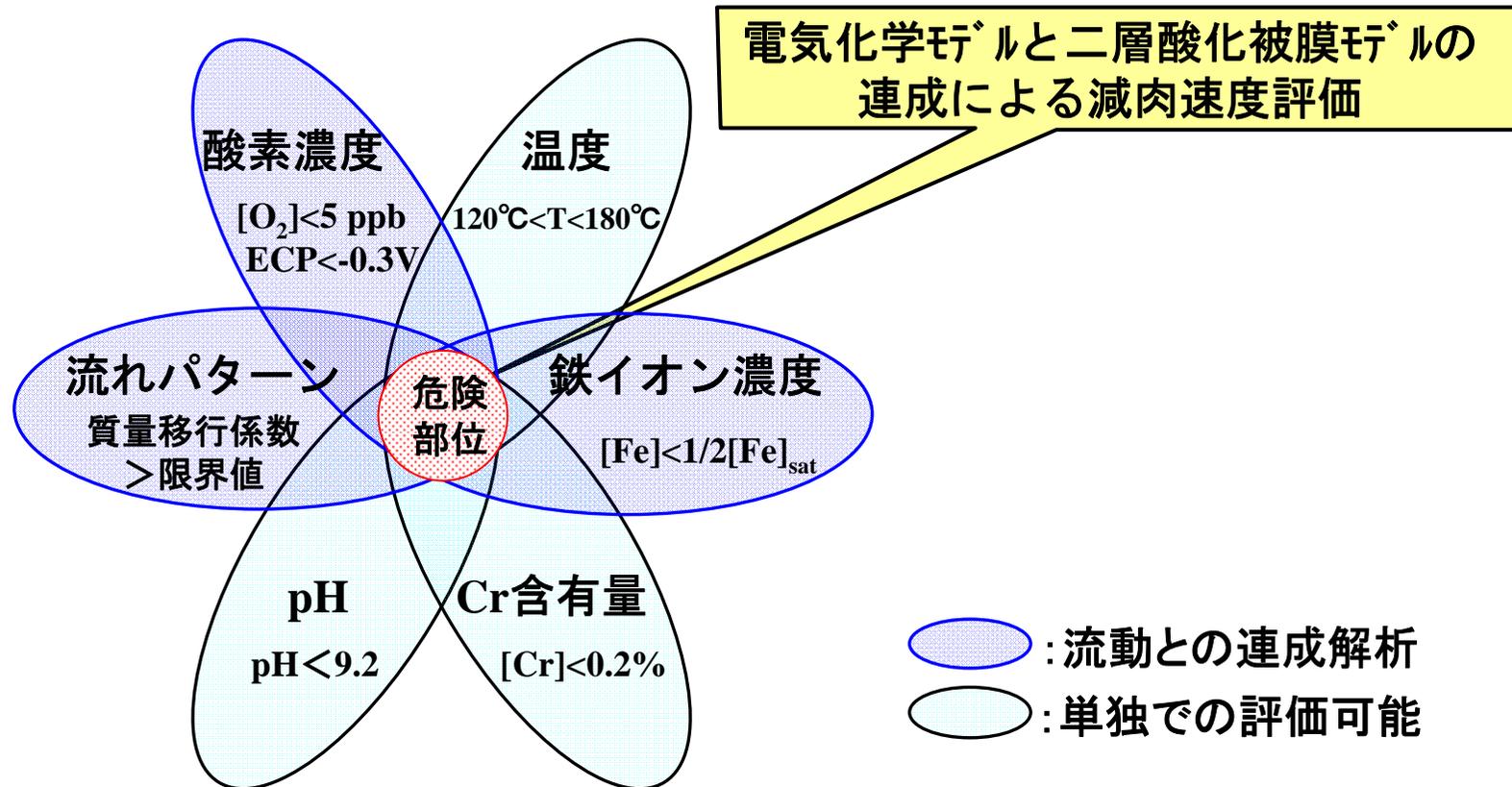
 : 腐食解析

流動加速型腐食評価の要素モデル

流動解析モデルによる質量移行係数評価



FACによる配管減肉発生の高い箇所の抽出



PWR二次冷却系腐食環境評価用計算モデル・コード体系

計算対象	流動条件	酸素濃度分布評価	腐食電位
入力	原子炉諸元 (幾何形状、発熱量、..)	原子炉諸元 (幾何形状、温度、流量)	原子炉諸元 (幾何形状、温度、 流速、皮膜厚さ)
計算 コード	1D CFDコード RELAP5 局所的に、3D CFDコード PLASHY, α-FLOW 適用	O ₂ -ヒドラジン反応解析 RADIOLYSIS-N2H4	混成電位モデル MIXED-POT
出力	各要素ごとの流量、 質量移行係数	酸素濃度分布	主要点のECP 溶解電流密度



計算対象	減肉速度
入力	温度、質量移行係数 [Fe ²⁺] _{bulk} , ECP, 溶解電流密度
計算コード	酸化皮膜形成 (OXIDE-LAYER)
出力	酸化被膜厚さと減肉速度

既存コード
新規コード

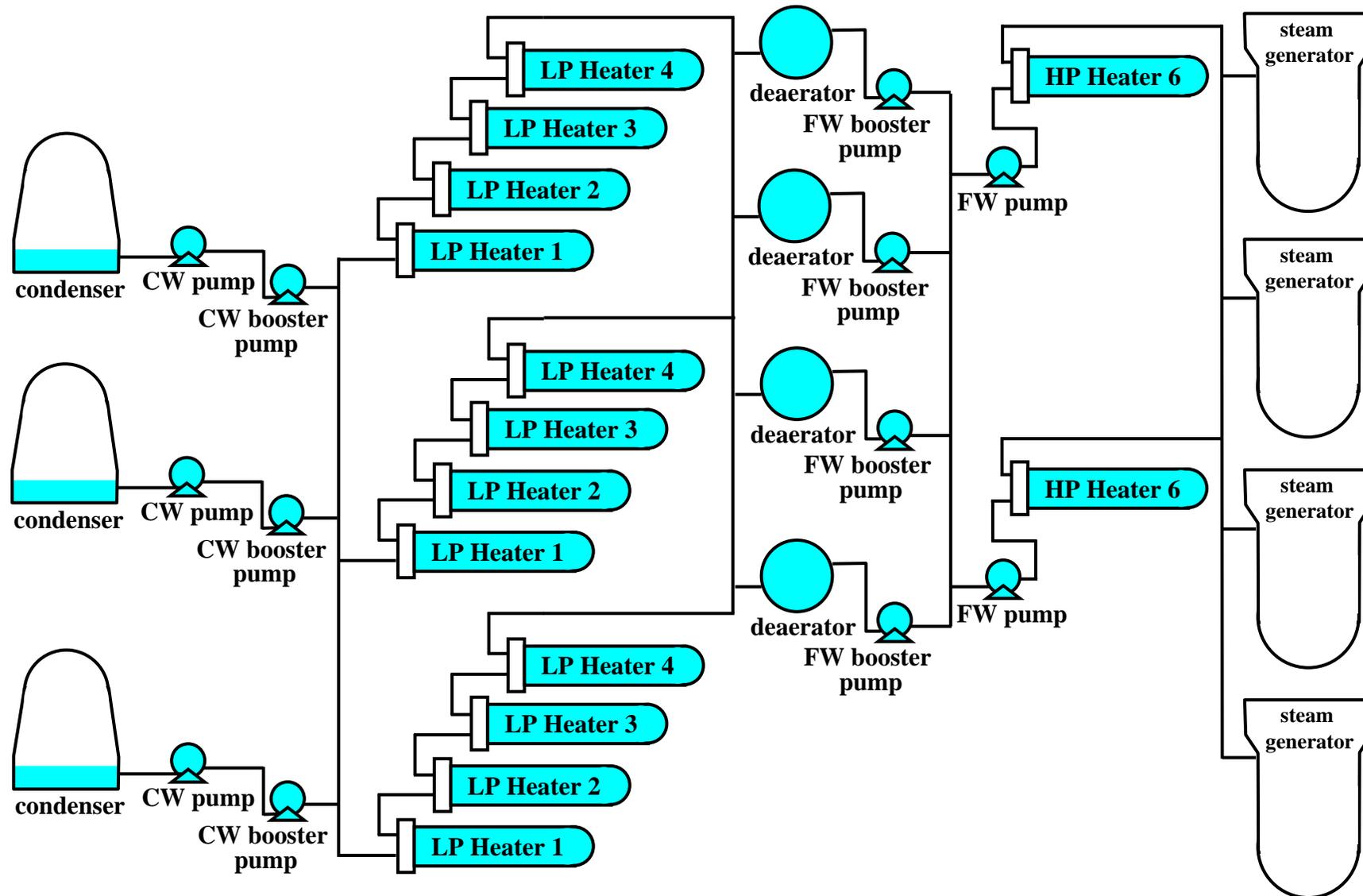
内容

- 背景と目的
- 流動加速型腐食評価モデルについて
 - 評価モデルの概要
 - **一次元流動解析モデル**
 - 一次元酸素・ヒドラジン反応モデル
 - 三次元流動解析モデル
 - 減肉速度評価モデル
- 実機への適用
- まとめ

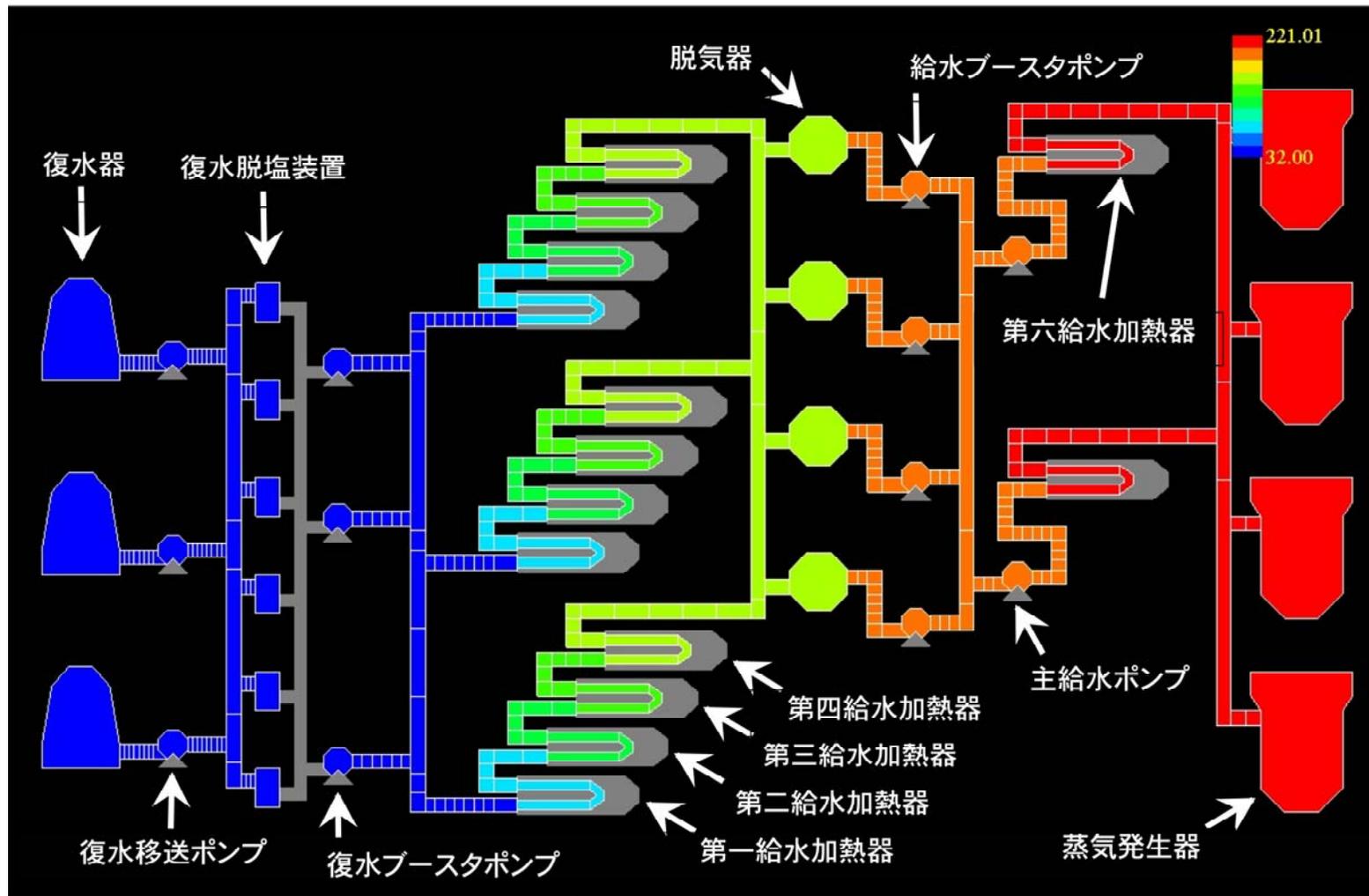
一次元流動解析モデルの概要

- PWR二次冷却系をノード・ジャンクションで近似
- 入力
 - 配管内径、配管長、配管位置
 - ポンプ特性曲線
- 出力
 - 定常状態での配管各要素における物理量
 - 二次冷却水温度
 - 二次冷却水圧力
 - 二次冷却水流速

1GWe級PWR二次冷却系配管



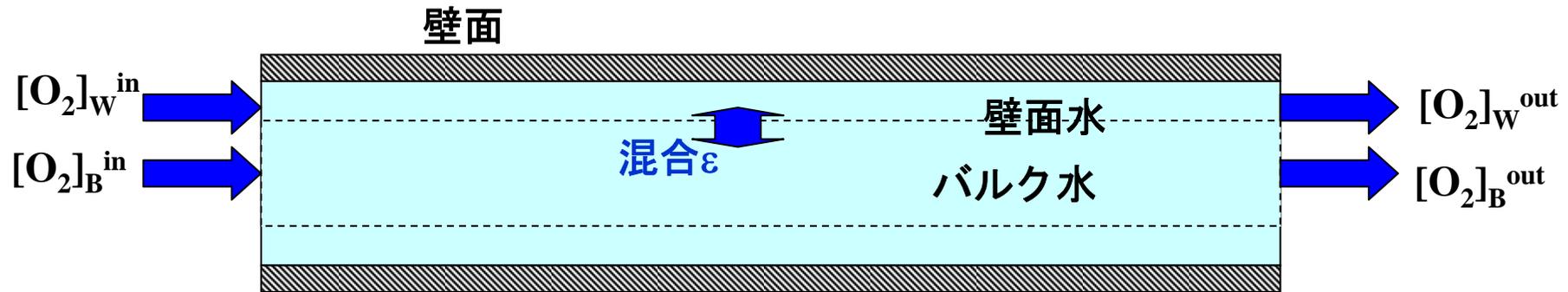
1GWe級PWR二次冷却系の定常状態での温度分布



内容

- 背景と目的
- 流動加速型腐食評価モデルについて
 - 評価モデルの概要
 - 一次元流動解析モデル
 - 一次元酸素・ヒドラジン反応モデル
 - 三次元流動解析モデル
 - 減肉速度評価モデル
- 実機への適用
- まとめ

一次元酸素・ヒドラジン反応モデルの概要



バルク水中での反応と構造物表面での反応に分割

バルク水

$$d[\text{O}_2]_B/dt = -k_b [\text{O}_2]_B^{1/2} [\text{N}_2\text{H}_4]_B - k_s^*(S/V)_B [\text{O}_2]_B^{1/2} [\text{N}_2\text{H}_4]_B^{1/2} + \varepsilon [\text{O}_2]_W - \varepsilon [\text{O}_2]_B \quad (1)$$

$$d[\text{N}_2\text{H}_4]_B/dt = -k_b [\text{O}_2]_B^{1/2} [\text{N}_2\text{H}_4]_B - k_s^*(S/V)_B [\text{O}_2]_B^{1/2} [\text{N}_2\text{H}_4]_B^{1/2} + \varepsilon [\text{N}_2\text{H}_4]_W - \varepsilon [\text{N}_2\text{H}_4]_B \quad (2)$$

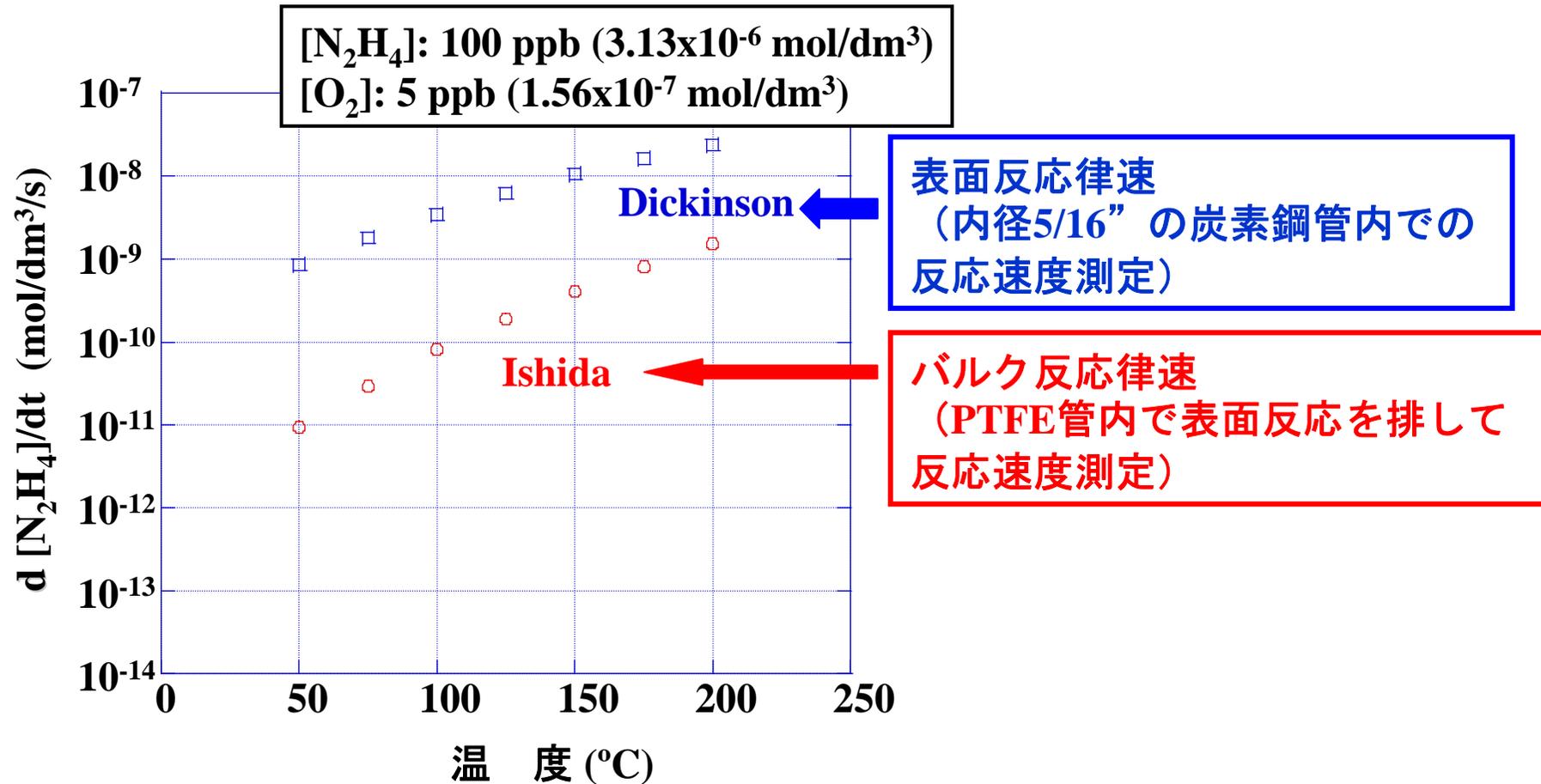
壁面水

$$d[\text{O}_2]_W/dt = -k_b [\text{O}_2]_W^{1/2} [\text{N}_2\text{H}_4]_W - k_s^*(S/V)_W [\text{O}_2]_W^{1/2} [\text{N}_2\text{H}_4]_W^{1/2} + \varepsilon [\text{O}_2]_B - \varepsilon [\text{O}_2]_W \quad (1)$$

$$d[\text{N}_2\text{H}_4]_W/dt = -k_b [\text{O}_2]_W^{1/2} [\text{N}_2\text{H}_4]_W - k_s^*(S/V)_W [\text{O}_2]_W^{1/2} [\text{N}_2\text{H}_4]_W^{1/2} + \varepsilon [\text{N}_2\text{H}_4]_B - \varepsilon [\text{N}_2\text{H}_4]_W \quad (2)$$

[O₂] : 酸素濃度 (mol/dm³)
 [N₂H₄] : ヒドラジン濃度 (mol/dm³)
 k_b : バルク水中での反応速度係数 (M^{1/2}/s)
 k_s^{*} : 表面反応速度係数 (dm/s)
 S : 接液表面積 (dm²)
 V : 要素体積 (dm³)
 ε : 混合比 (1/s)

一次元酸素・ヒドラジン反応モデルにおける反応速度定数の検討



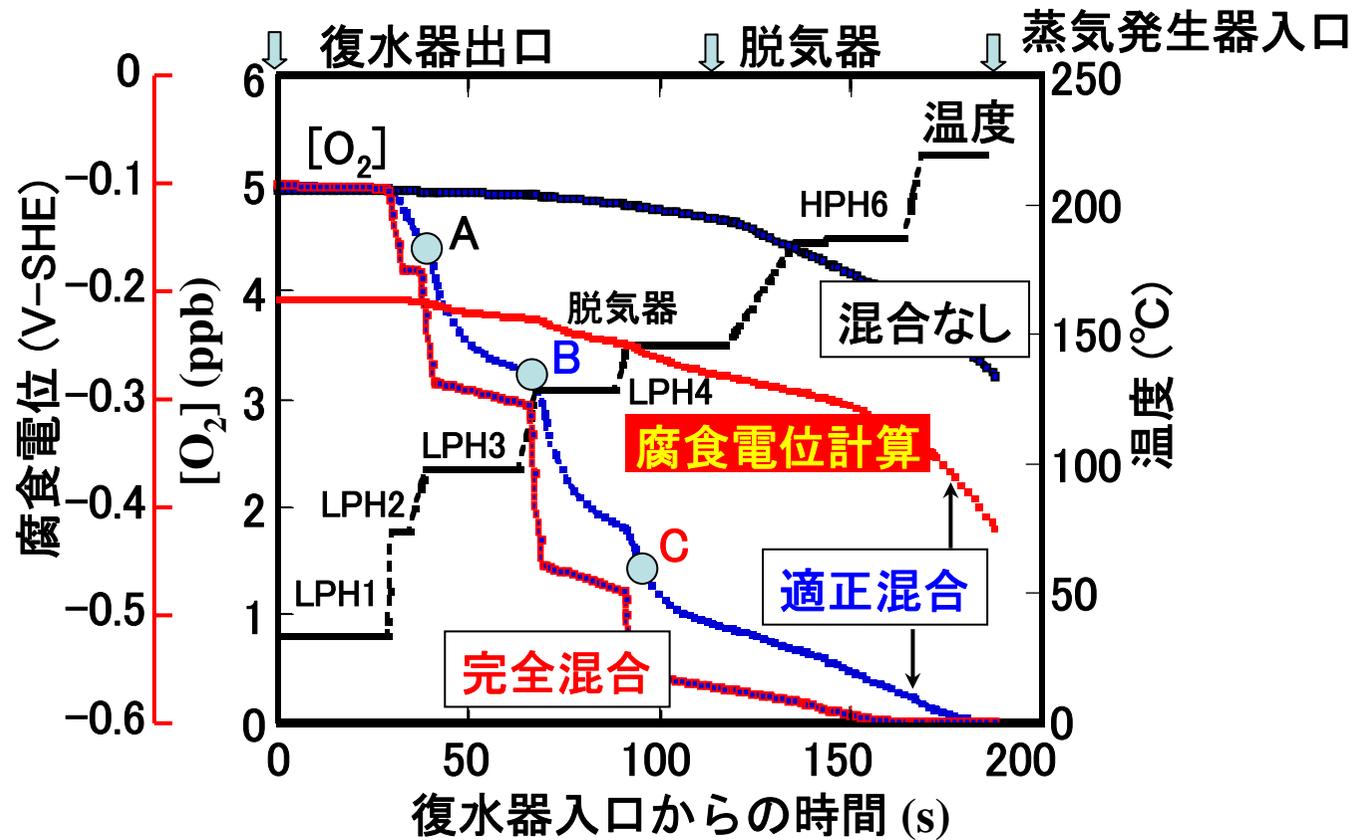
$$k_s^* = 0.9 \exp\{-28,200/(RT)\} \quad (\text{m/s})^1$$

$$k_b = 2.16 \times 10^3 \exp\{-43,000/(RT)\} \quad (\text{m}^{3/2}/\text{mol}^{1/2}/\text{s})^2$$

1) N. L. Dickinson, et al., *Proc. American Power Conf*, XIX, 692 (1957)

2) K. Ishida, et al. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 43, 65 (2006)

一次元酸素・ヒドラジン反応モデルによる実機の腐食電位解析



ϵ (混合比): 流体解析コードにより計算

内容

- 背景と目的
- 流動加速型腐食評価モデルについて
 - 評価モデルの概要
 - 一次元流動解析モデル
 - 一次元酸素・ヒドラジン反応モデル
 - **三次元流動解析モデル**
 - 減肉速度評価モデル
- 実機への適用
- まとめ

三次元流動解析モデルの概要

<入力>

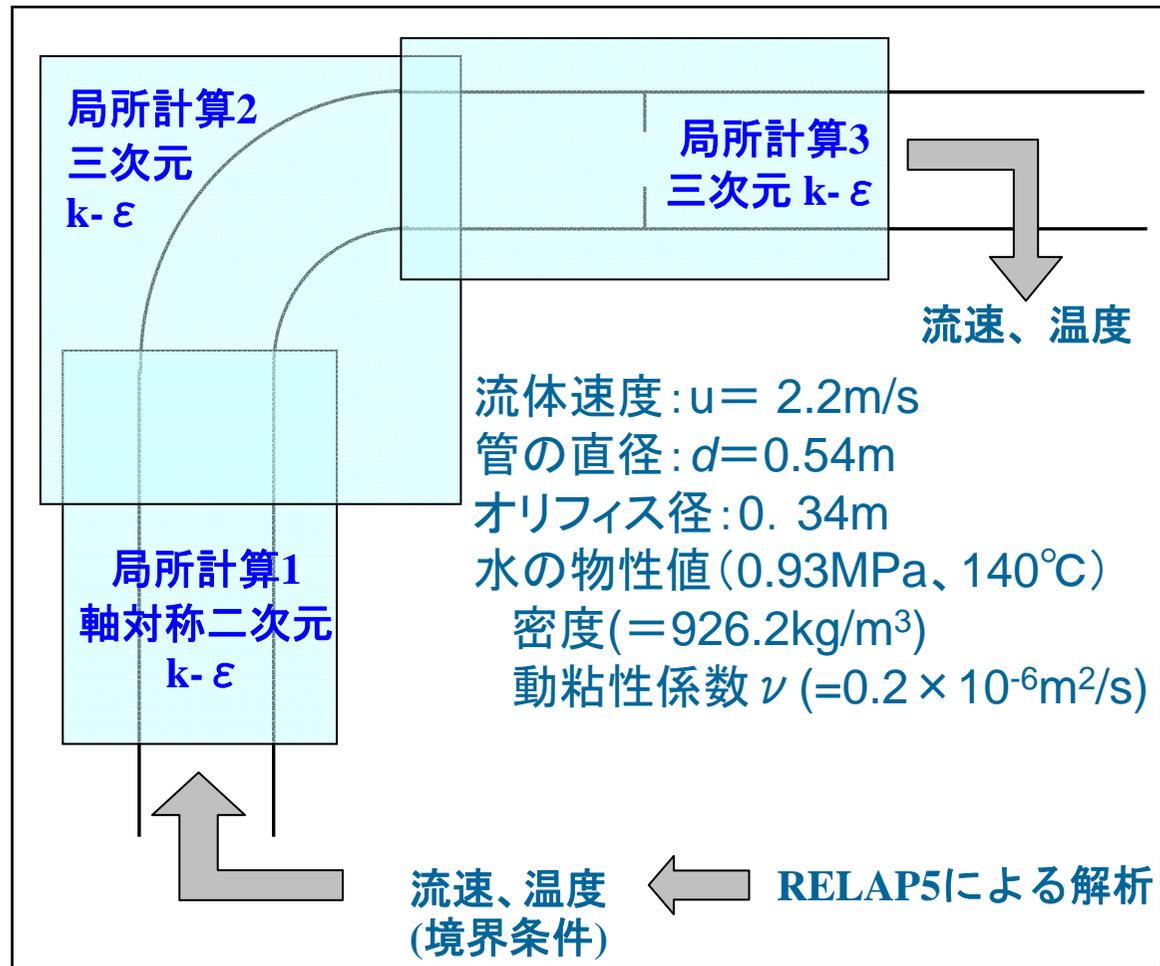
- ・流速
 - ・温度
- (RELAP5による解析結果)

<出力>

- ・流速分布
- ・乱流エネルギー

境界層厚さ
質量移行係数

壁近傍 $\sim 20 \mu\text{m}$ の物質移動を解析



内容

- 背景と目的
- 流動加速型腐食評価モデルについて
 - 評価モデルの概要
 - 一次元流動解析モデル
 - 一次元酸素・ヒドラジン反応モデル
 - 三次元流動解析モデル
 - 減肉速度評価モデル
- 実機への適用
- まとめ

減肉速度評価モデルの概要

	電気化学モデル [静的モデル]	二層酸化被膜モデル [動的モデル]
計算概要	アノード/カソード電流を 計算	酸化皮膜の成長・ 溶解・結晶形態変化
入力	温度,pH,酸化種濃度 質量移行係数 酸化被膜厚さ ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 比)	腐食電位 質量移行係数 電流
出力	腐食電位 電流	酸化皮膜厚さ ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 比)

連成解析

電気化学モデルについて

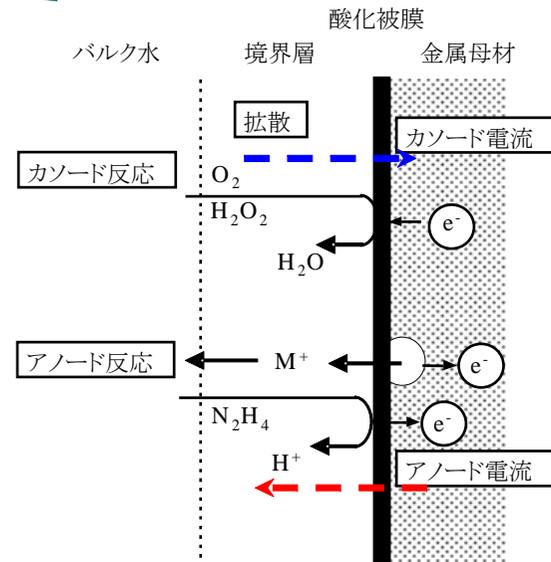
カソード反応:



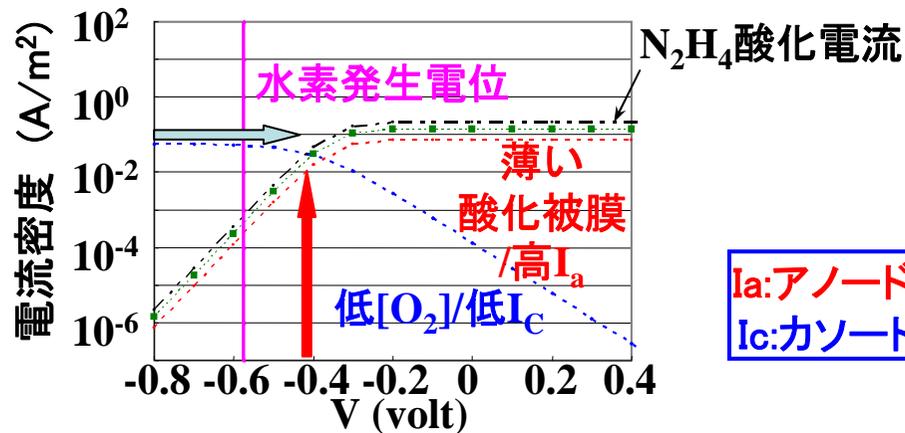
アノード反応:



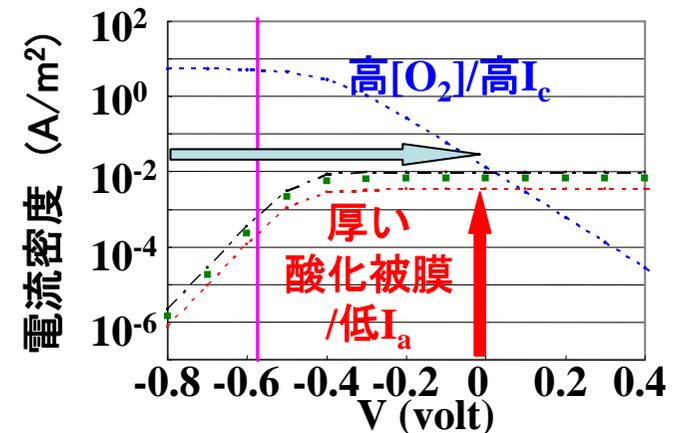
ヒドラジンの酸化反応電流が重畳



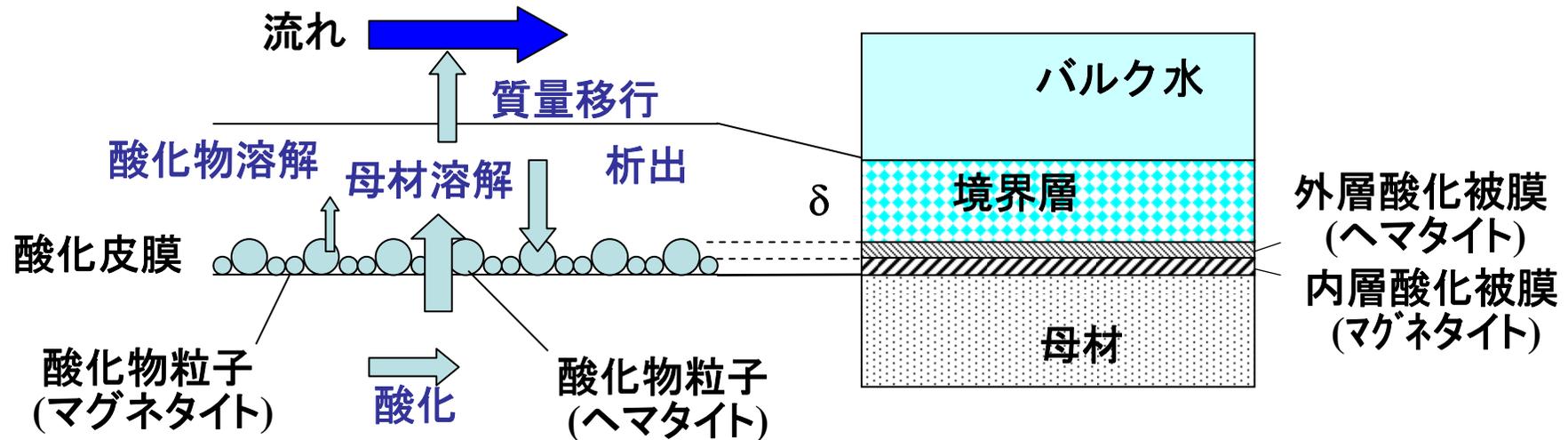
低酸素濃度



高酸素濃度



二層酸化被膜モデルについて



ステンレス鋼の腐食解析用に開発した二層酸化被膜モデルを炭素鋼用に改良

	ステンレス鋼	炭素鋼
被膜構造	二層酸化膜 ・ 直接酸化による内層 ・ 結晶析出による外層	二層酸化膜 ・ 直接酸化による内層 ・ 結晶析出による外層 小径粒子(マグネタイト), 大径粒子(ヘマタイト)
母材の溶解	母材が直接酸化により一旦内層を形成後内層が溶解	母材の直接溶解

二層酸化皮膜モデルの基本式

母材 $dM/dt = -\zeta_{in} M^* / \{ \omega_m (T_{min} + T_m) + \omega_h T_h \}$

境界層内での第二鉄イオン、酸化物粒子の濃度

$$dC/dt = \zeta_{in} M^* / \{ \omega_m (T_{min} + T_m) + \omega_h T_h \} / \tau_b - \delta_m C T_m^{2/3} C_m^{1/3} f_m \tau_b - \delta_h C T_h^{2/3} C_h^{1/3} f_h \tau_b - k_g C / C_{sat} f_b(C) - k(C - C_b) + \zeta_m T_m / \tau_b + \zeta_h T_h / \tau_b$$

$$dC_p/dt = k_g C / C_{sat} f_b(C) / W_m - k_d C_p - k(C_p - C_{pb})$$

内層酸化被膜 (マグネタイト粒子の個数密度と皮膜厚さ)

$$dC_m/dt = k_g C / C_{sat} f_b(C) / (W_m) - (\chi + k_m) C_m$$

$$dT_m/dt = \delta_m C T_m^{2/3} C_m^{1/3} f_m \tau_b^2 + k_g C / C_{sat} f_b(C) \tau_b - (\zeta_m + \chi + k_m) T_m + \chi M_m / \{ \omega_m (T_{min} + T_m) + \omega_h T_h \}$$

外層酸化被膜 (ヘマタイト粒子の個数密度と皮膜厚さ)

$$dC_h/dt = \chi C_m - k_h C_h$$

$$dT_h/dt = \chi T_m + \delta_h C T_h^{2/3} C_h^{1/3} f_h \tau_b^2 - (\zeta_h + k_h) T_h$$

C, C_p : 第1鉄イオンと酸化物粒子の濃度 (mol/m³)

C_s : 第1鉄イオンの飽和濃度 (mol/m³)

C_m, C_h : 表面のマグネタイト、ヘマタイト粒子濃度 (1/m³)

M : 母材の初期厚さ (mol/m²)

T_m, T_h : 表面のマグネタイト、ヘマタイト皮膜厚さ (mol/m²)

T_{min} : 限界厚さ (mol/m³)

W_m : 析出時のマグネタイト酸化物の質量 (mol)

k, k_m, k_h : 境界層からの質量移行係数 (1/s)

k_g : 酸化物生成速度係数 (1/s)

r_m, r_h : 酸化物粒子の平均径 (m)

t : 浸漬時間 (s)

α : 腐食速度係数 (mol²/m⁴/s)

β : 定数 (m⁶/mol²)

χ : [O₂]の関数として与えられるヘマタイト化係数

$\chi([O_2]) = \chi_0(a + b[O_2])$

δ_m, δ_h : 酸化物粒子の第1鉄イオン吸着係数 (1/m²/s)

ρ_m, ρ_h : マグネタイト、ヘマタイト粒子の密度 (kg/m³)

τ_b : 境界層厚さ (m)

ξ : 変換係数 (kg/mol)

ω_m, ω_h : 腐食抵抗係数 (m²/mol)

$\zeta_{in} M^*$: 母材からの第1鉄イオン溶出速度 (mol/m²/s)

ζ_m, ζ_h : 酸化物からの溶出係数 (1/s)

$f_b(C) = \exp[-b\{(Cs-C)^2 + \{(Cs-C)^2\}^{1/2}(Cs-C)\}]$

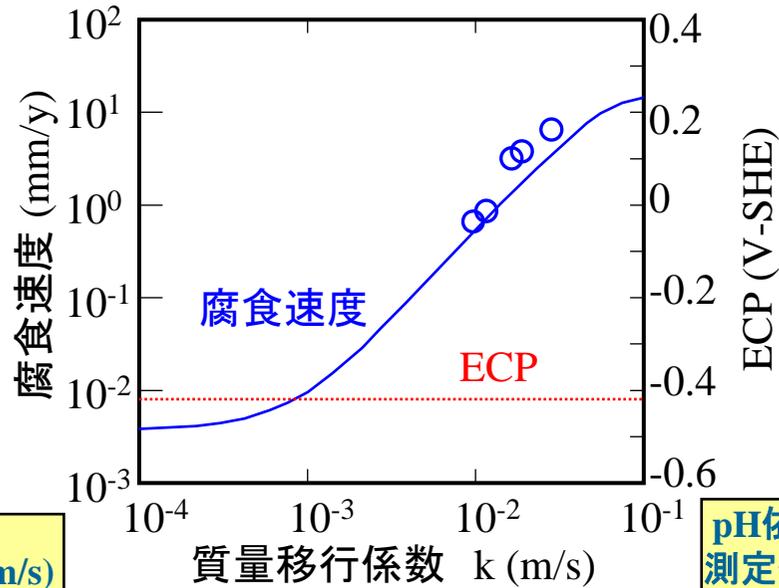
$f_m = 4\pi\{3x/(4\pi r_m \tau_b)\}^{2/3}$ $f_h = 4\pi\{3x/(4\pi r_h \tau_b)\}^{2/3}$

$4/3\pi r_m^3 \rho_m C_m \tau_b = \xi T_m$ $r_m = (T_m/C_m)^{1/3} (3\xi/(4\pi r_m \tau_b))^{1/3}$

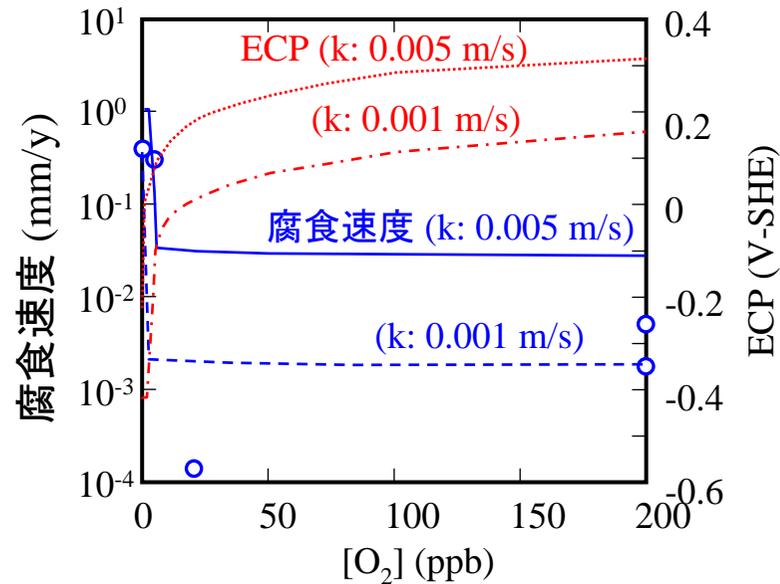
$4/3\pi r_h^3 \rho_h = \xi T_h/C_h/\tau_b$ $r_h = (T_h/C_h)^{1/3} (3\xi/(4\pi r_h \tau_b))^{1/3}$

実験結果による減肉速度評価モデルの検証

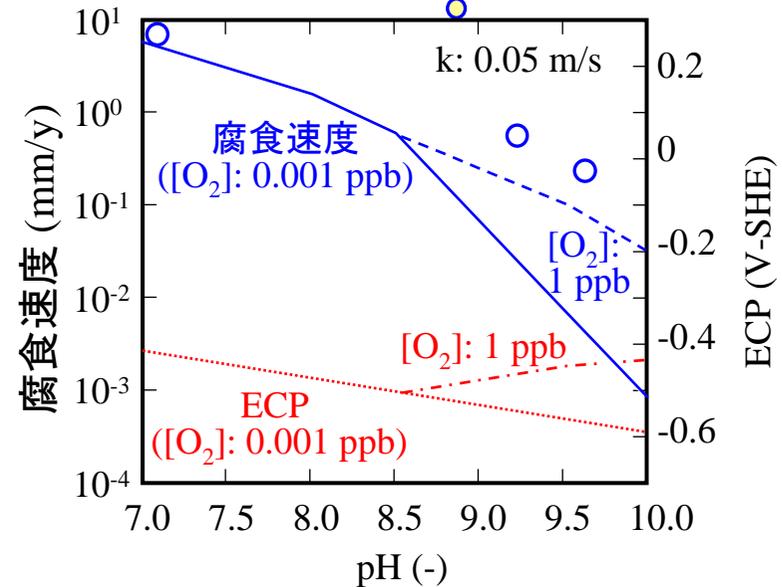
質量移行係数依存性
測定値: Satoh, et al. ($[O_2] < 1 \text{ppb}$)



$[O_2]$ 依存性
測定値: Brush and Pearl (pH:7, $k: 0.005 \text{m/s}$)



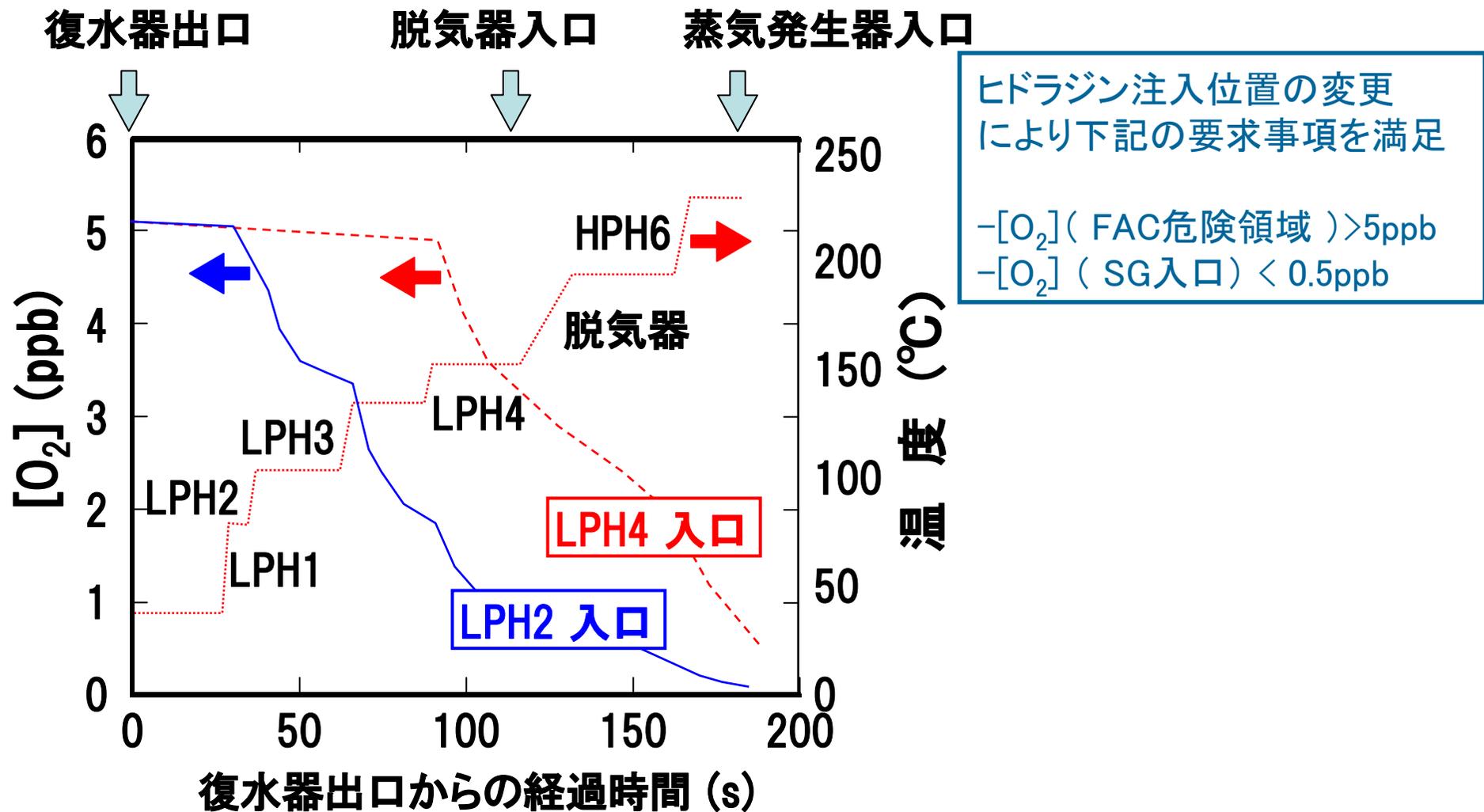
pH依存性
測定値: Heitmann and Schub



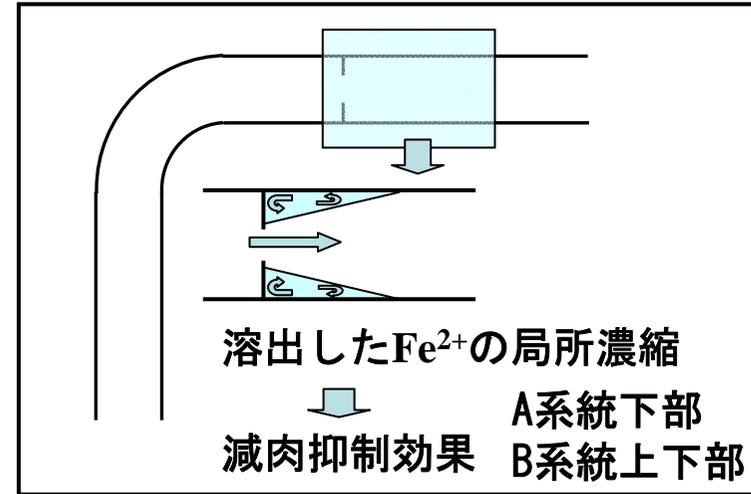
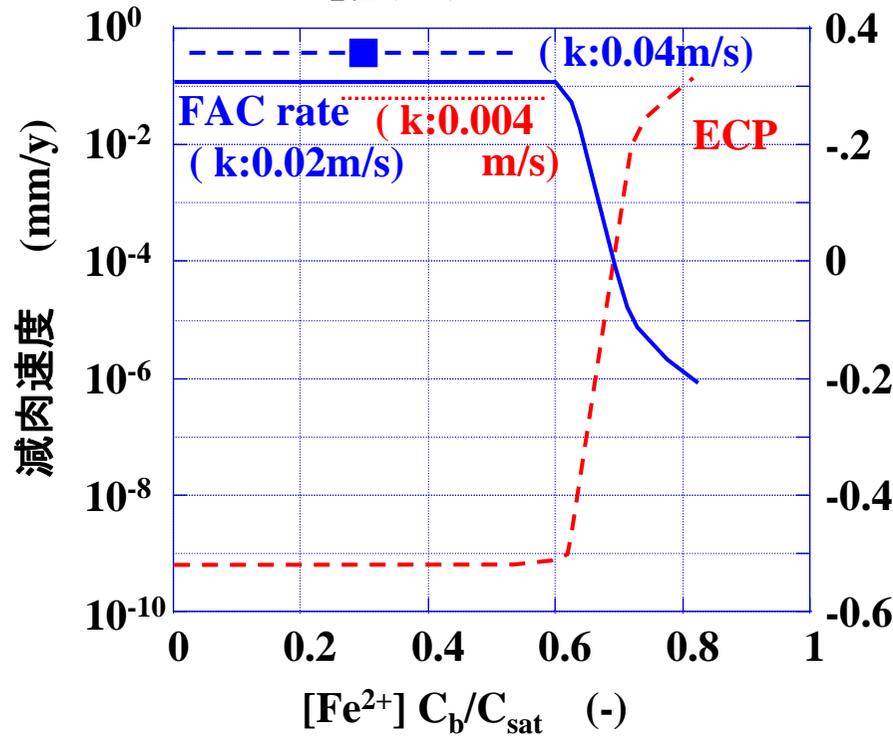
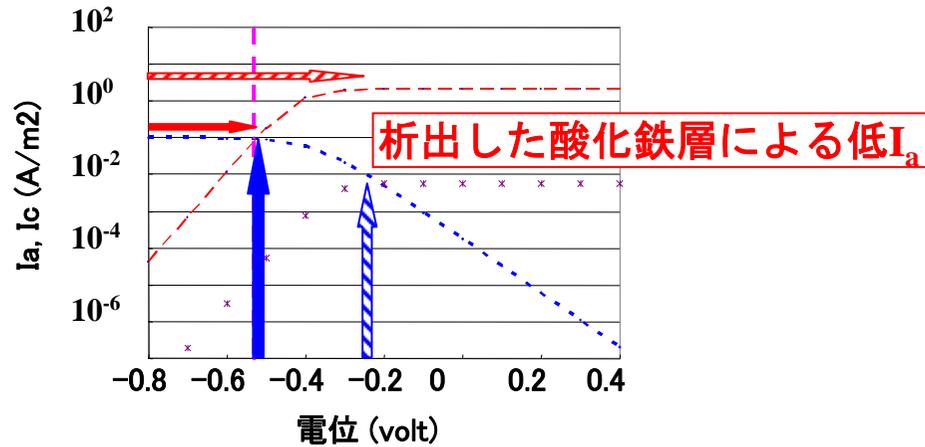
内容

- 背景と目的
- 流動加速型腐食評価モデルについて
 - 評価モデルの概要
 - 一次元流動解析モデル
 - 一次元酸素・ヒドラジン反応モデル
 - 三次元流動解析モデル
 - 減肉速度評価モデル
- 実機への適用
- まとめ

PWR二次冷却系でのヒドラジン注入位置の検討

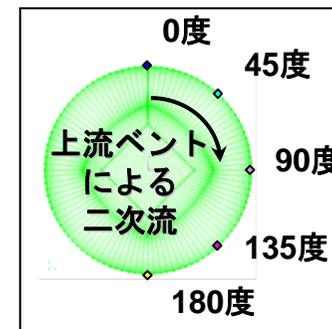


美浜3号機での事象評価



溶出した Fe^{2+} の移行と下部での濃縮
 A系統上部は溶解継続

方位角方向の二次流生成



まとめ

- PWR二次冷却系での定量的な配管減肉評価手法の提案
 - － 流動解析モデル
 - － 酸素・ヒドラジン反応モデル
 - － 電気化学モデルと二層酸化被膜モデルとの結合モデル
- 実機への適用
 - － ヒドラジン注入位置の二次冷却系酸素濃度への影響
 - － 美浜三号機での配管破断事象の解析
- 今後の展開
 - － 実機への適用の促進