



TOHOKU
UNIVERSITY

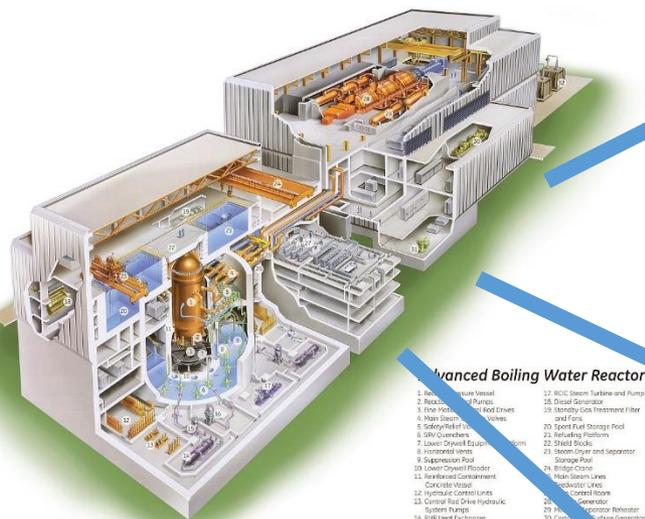
日本原子力学会 シンポジウム
東電福島第一原子力発電所の廃炉について
－ 廃炉の現状と課題、その対応策 －
平成29年3月11日(土)、機械振興会館(東京)

設備の健全性と高経年化対策

東北大学 原子炉廃止措置基盤研究センター

渡邊 豊、青木孝行

原子力発電所の各種設備と機能



BWR 3次元構造

出典: Tuumaenergia.eeホームページ
<http://www.tuumaenergia.ee/index.php?id=95>

**機械設備
(鋼構造物)**

- ・原子炉容器
- ・格納容器
- ・配管・弁
- ・その他

機能

- ・構造保持機能
- ・耐圧機能
- ・冷却
- ・その他

電気設備

- ・再循環ポンプモータ
- ・電源盤
- ・ケーブル
- ・その他

機能

- ・モータ駆動機能
- ・電気供給機能
- ・その他

**土木建築設備
(コンクリート構造物)**

- ・原子炉建屋
- ・タービン建屋
- ・その他

機能

- ・構造保持機能
- ・バウンダリー機能
- ・その他

制御設備

- ・ロジック回路
- ・センサ、トランスミッタ
- ・ケーブル
- ・その他

機能

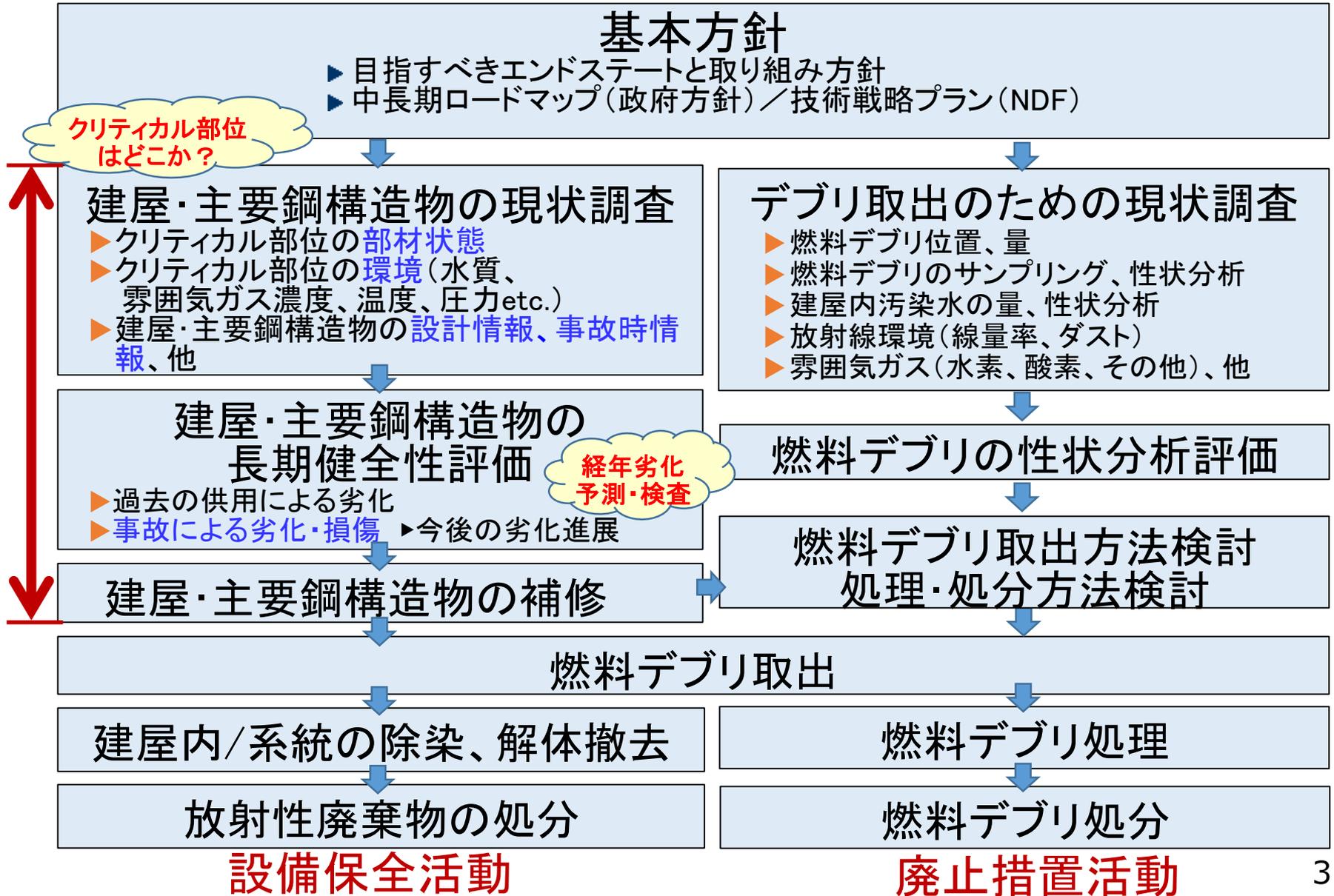
- ・信号発信機能
- ・計測機能
- ・表示機能
- ・その他

事故炉廃止措置時における 原子力発電所の安全機能

- ① 止める → 核分裂連鎖反応の停止
(再臨界の防止)
- ② 冷やす → 炉心燃料・使用済燃料からの崩壊熱の除去
(温度上昇、再熔融の防止)
- ③ 閉じ込める → 放射性物質の閉じ込め
(バウンダリーの劣化予測、劣化抑制、補修)
- ④ 作業者の被曝抑制

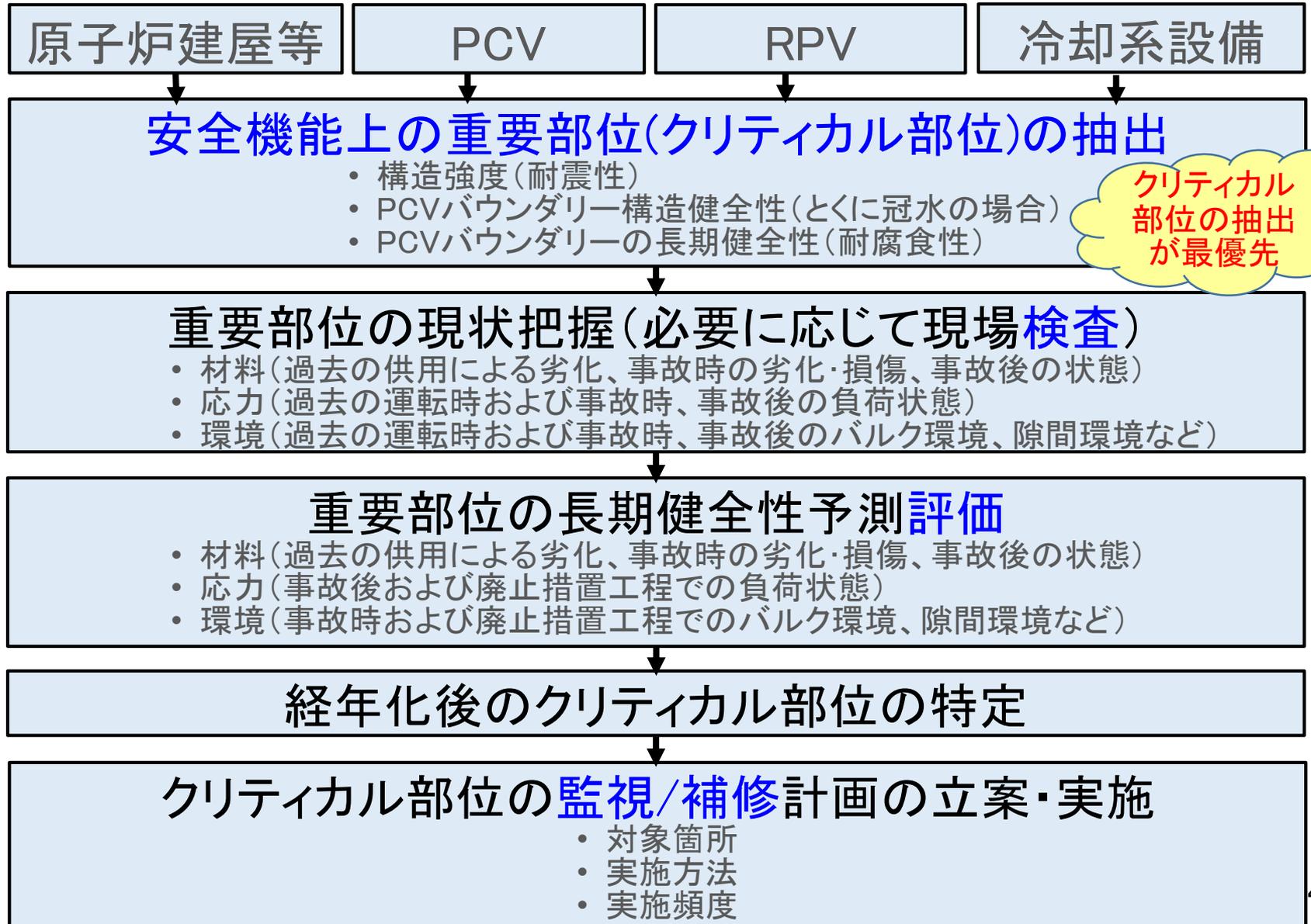
廃止措置時でも
常に安全機能の維持が必要

事故炉廃止措置の検討プロセス

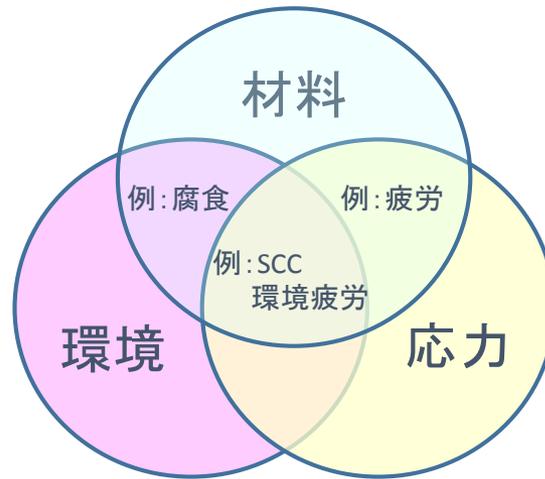


設備健全性維持の戦略的検討

設備保全活動



経年劣化3要素と過酷事故炉



供用中の通常炉	経年劣化3要素	廃止措置時の過酷事故炉
照射、熱時効による経年劣化	材料	通常運転による経年劣化 + 事故時荷重 ^{注1)} によるダメージ ^{注2)}
高温・高圧の水環境 (BWR環境、PWR環境)	環境	低温(常温)、低圧(常圧)、水、空気 局所的に特殊環境(海水、隙間、他)
圧力・温度・製造による応力 外荷重(地震、竜巻等)	応力(荷重)	製造・事故時荷重 ^{注1)} による応力 外荷重(地震、竜巻等)

注1) 過大圧力・温度、大地震、水素爆発、

注2) き裂(ひび割れ)、材質変化(高温)、MCCI

供用中通常炉 と 福島第一発電所1～4号機 『経年劣化事象』の比較

供用中の通常炉	経年劣化事象	廃止措置時の過酷事故炉
原子炉圧力容器の脆化	中性子照射脆化	劣化進展可能性低(中性子源)
一次系機器の低サイクル疲労 小口径配管の高サイクル疲労	疲労	小口径配管の高サイクル疲労 (動的機器や流動振動源の周辺)
ステンレス鋼、Ni基合金のIGSCC ステンレス鋼のIASCC	応力腐食割れ	ステンレス鋼の塩化物SCC
2相ステンレス鋼	熱時効	劣化進展可能性低(低温)
FAC、LDI、海水腐食	腐食	設計条件から大幅に逸脱した環境 条件(DO、Cl ⁻ 等不純物イオン、pH、 微生物・・・)
高温部や高線量率箇所	絶縁劣化	劣化進展可能性低(低温)
高温箇所、高中性子照射箇所	コンクリート劣化	RPVペデスタル(MCCI) 大地震・爆発等によるダメージ箇所 (鉄筋腐食:ひび割れ部+冷却材)
フレット疲労、摩耗などの懸念 箇所	その他	劣化進展可能性低(低温)

1F『鋼構造物』の経年劣化

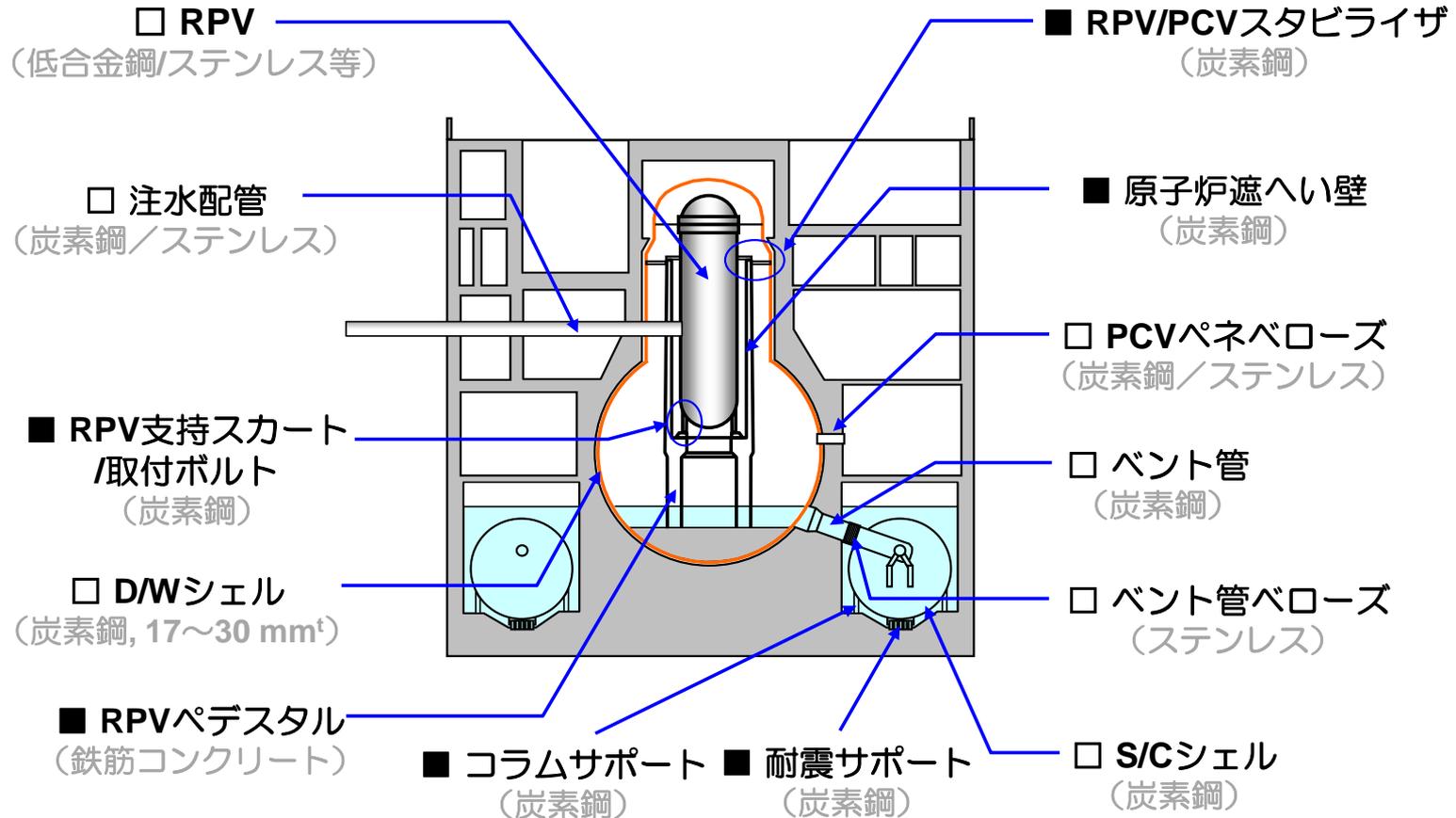
— 最大要因は腐食

“腐食は避けられない(平衡論)。しかし、コントロールはできる(速度論)。”

必要な技術は、

- 的確な腐食予測(どの機器の何処にどの程度の?)
- 腐食抑制手段の準備と評価
- 予測に基づく効果的な検査と対応策(補修等)

1F原子炉の構造・材質と要求機能



腐食抑制対象

炭素鋼機器: 均一腐食, 流動腐食, ガルバニック腐食, MIC
 ステンレス機器: 塩化物局部腐食, MIC

主たる要求機能

- バウンダリ機能
- 構造支持機能(耐震性)

合金の種類と想定される腐食モード

RPV, PCV, 配管系: <炭素鋼、低合金鋼>

- 全面腐食(均一、不均一)
- 流速下腐食
- 異種金属接触腐食

燃料プールライナー、配管系: <ステンレス鋼>

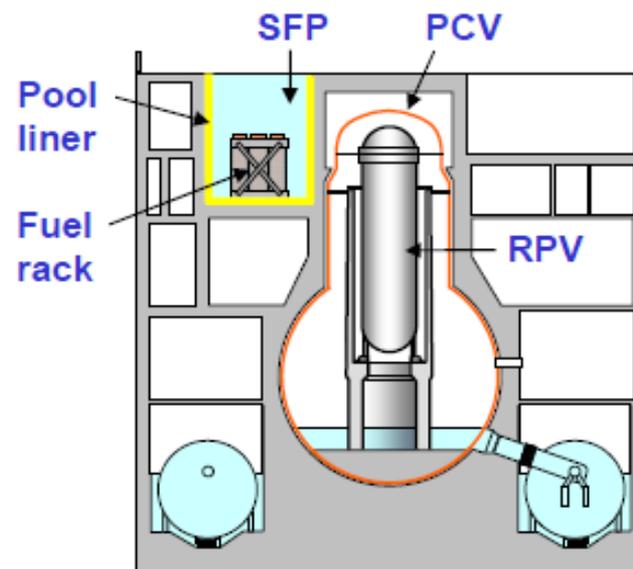
- 局部腐食(すきま腐食、孔食、応力腐食割れ)

燃料被覆管: <ジルカロイ>

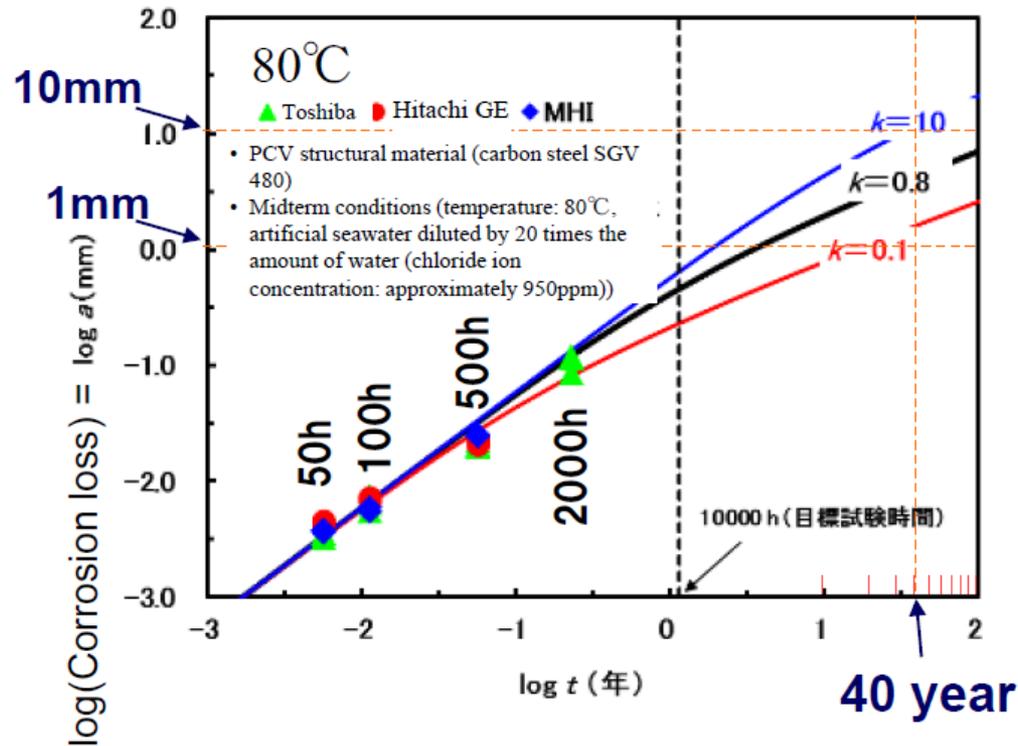
- 局部腐食(すきま腐食、孔食、応力腐食割れ)

燃料ラック: <アルミニウム合金>

- 全面腐食(アルカリ腐食)
- 異種金属接触腐食
- その他要因: 微生物腐食



炭素鋼の全面腐食: 40y長時間予測

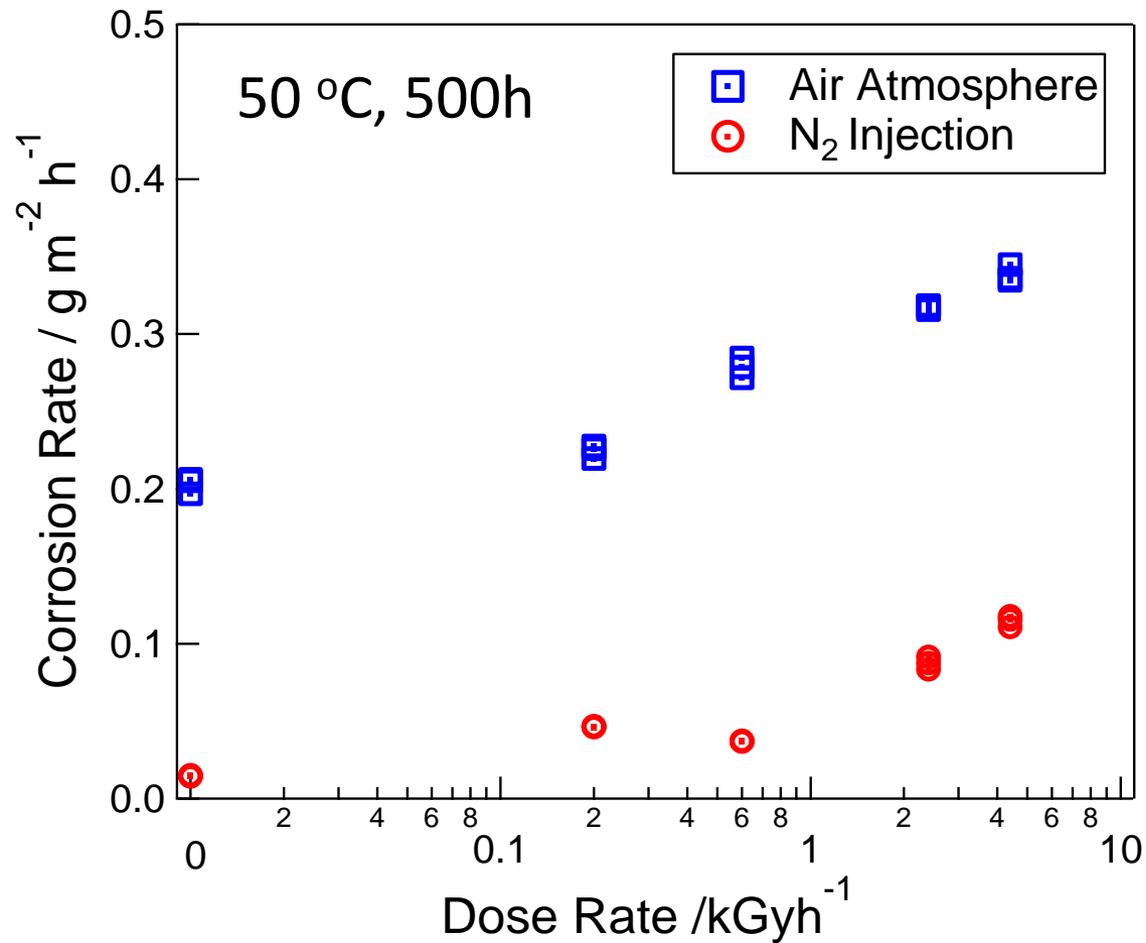


放物線則をベースにした予測式

$$(a + kr_0)^2 = 2kr_0^2t + k^2r_0^2$$

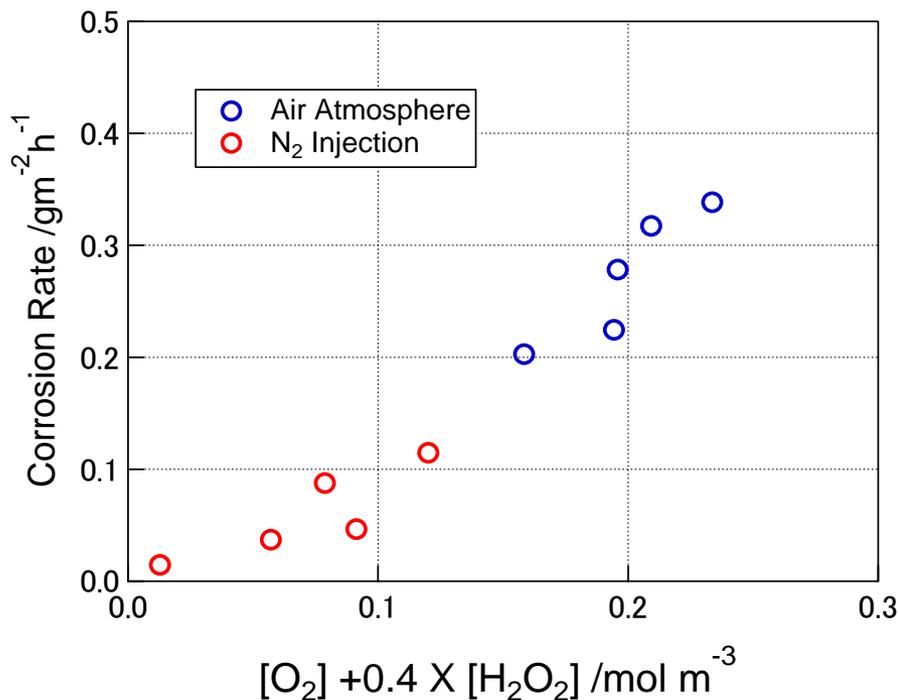
a : 平均腐食減肉厚さ
 t : 時間
 k, r_0 : 定数

炭素鋼の腐食速度に及ぼす γ 線照射線量率の影響

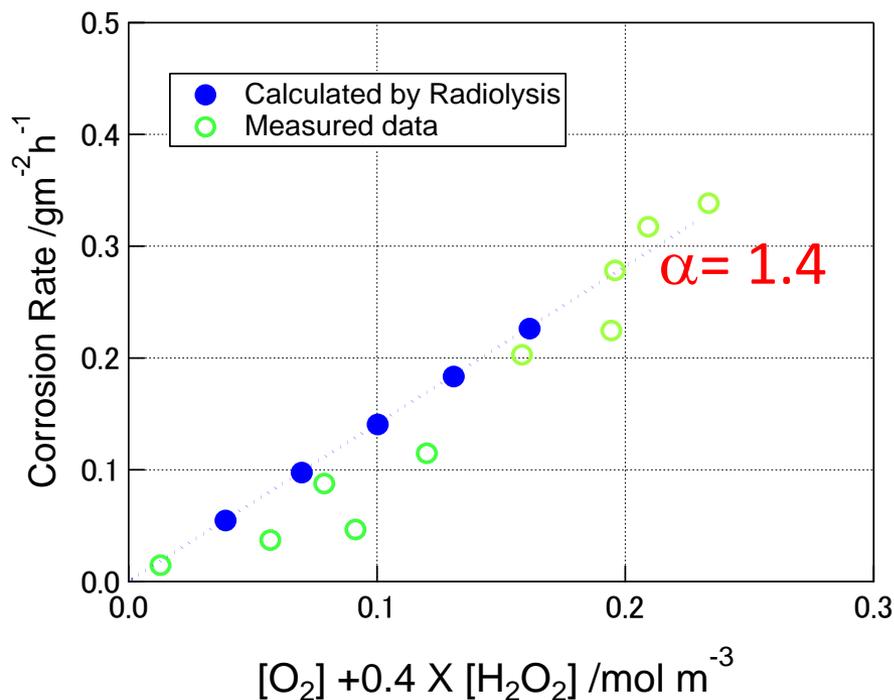


Cathodic reaction indexによる腐食速度の整理

$$C.R. = \alpha \times (C_{O_2} + 0.4 \times C_{H_2O_2})$$



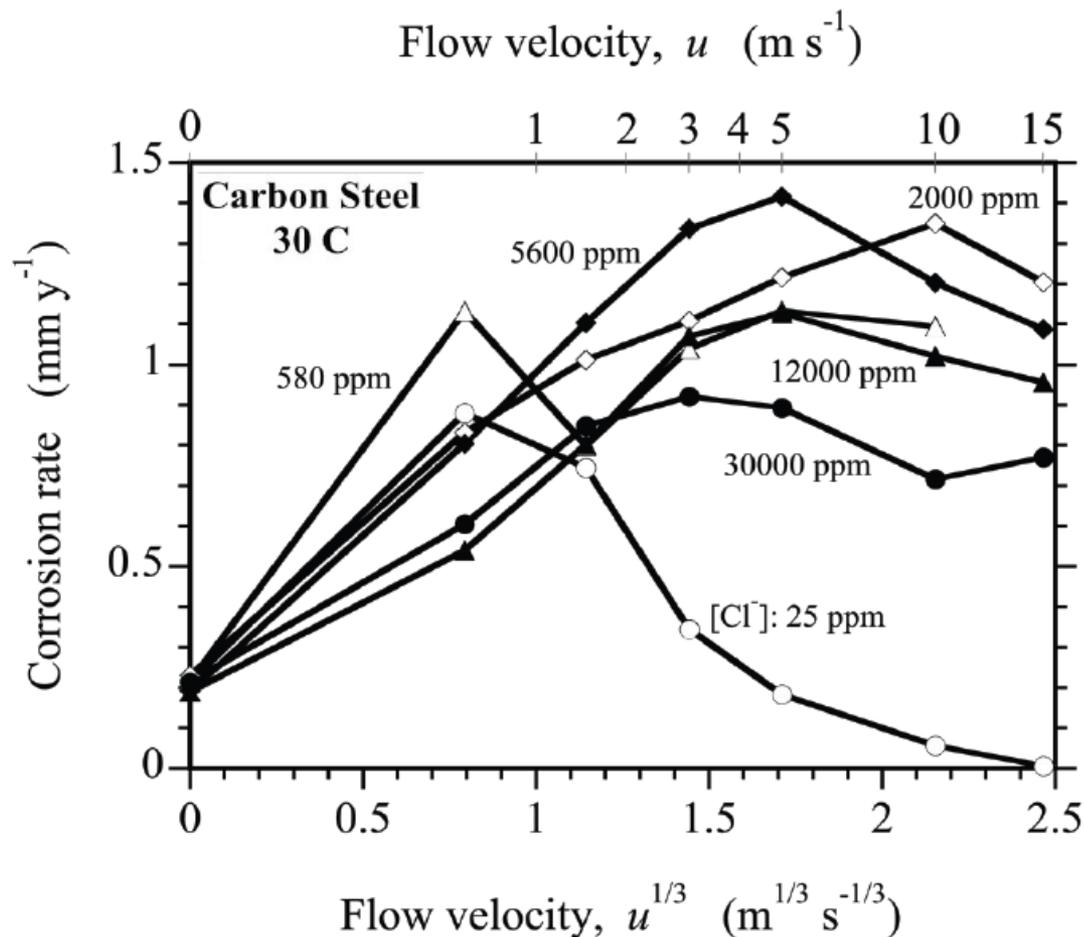
照射下の炭素鋼の腐食速度と
Cathodic reaction index の関係.



ラジオリシス計算で得られた
Cathodic reaction index との関係.

ラジオリシスで生成する酸化剤の量で腐食速度が整理できる

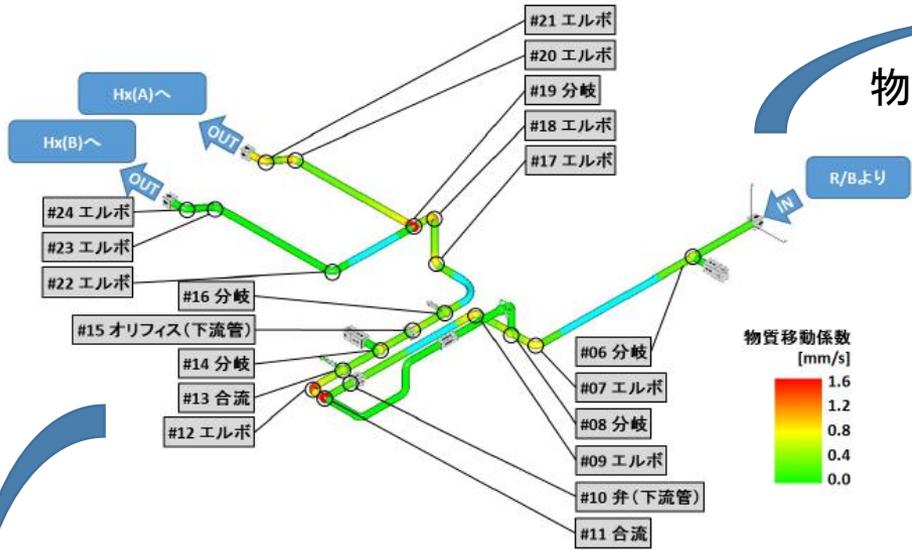
炭素鋼腐食：流動下の腐食速度実測データ (中性塩化物水溶液、30°C)



- 腐食速度は流速の1/3乗に比例。ただし、いずれ飽和。
- 低[Cl⁻]では、流動が不動態化促進。
- 中庸の[Cl⁻]において腐食速度が最大値。高[Cl⁻]では、溶存酸素濃度低下により腐食速度低下。
- 実際の腐食速度上限は1.5mm/y.

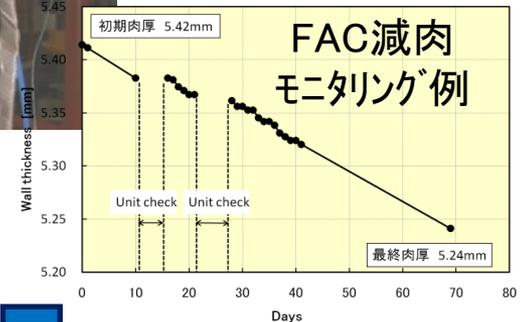
鋼構造物の腐食寿命管理：流動下の腐食

「実機配管系信頼性維持のための腐食予測とモニタリング」



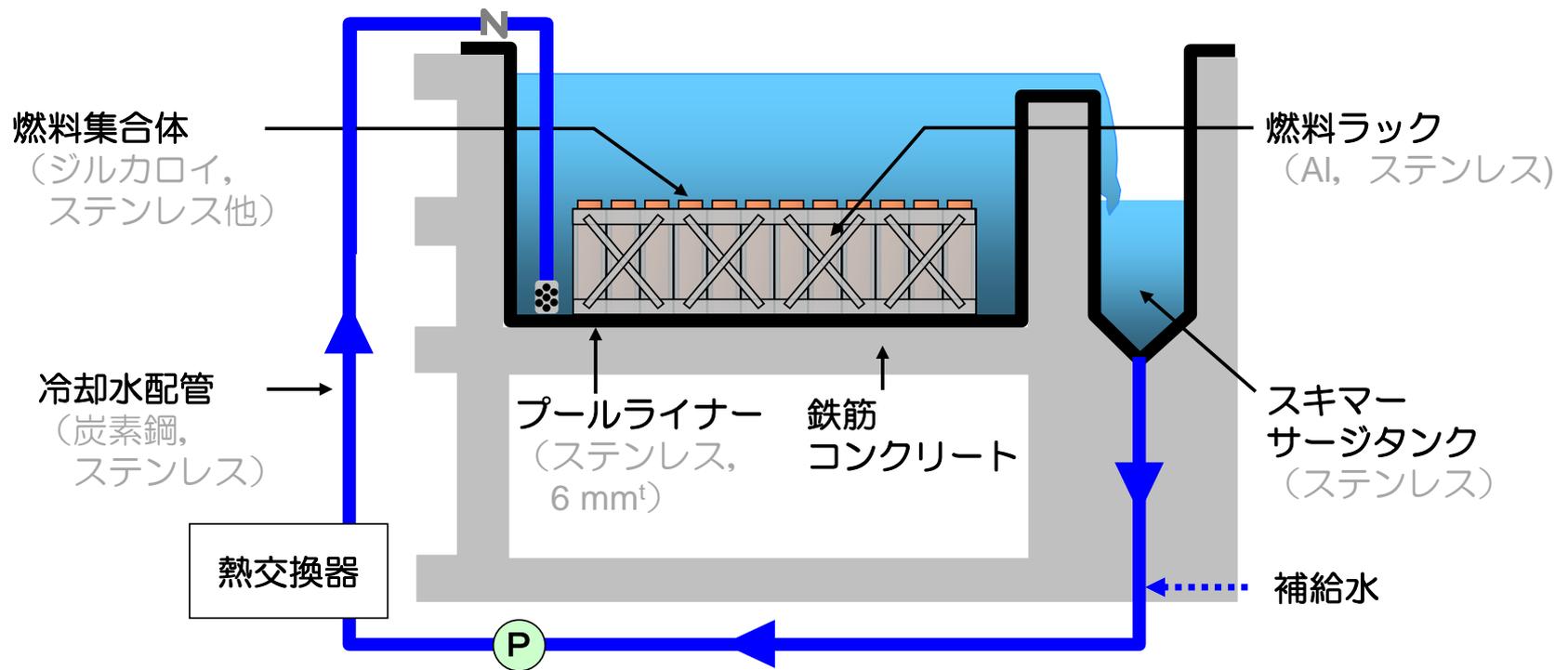
物質移動係数分布の予測
⇒肉厚監視位置の選定

EMATによる肉厚モニタリング



予測とモニタリングを組み合わせた配管系の信頼性維持技術の提案と実証

使用済燃料プールの構造と材質



腐食抑制対象

炭素鋼機器:	流動腐食, ガルバニック腐食, MIC
耐食材料機器:	塩化物局部腐食, MIC
Al機器:	アルカリ腐食

燃料プールの環境条件：震災直後と2015年

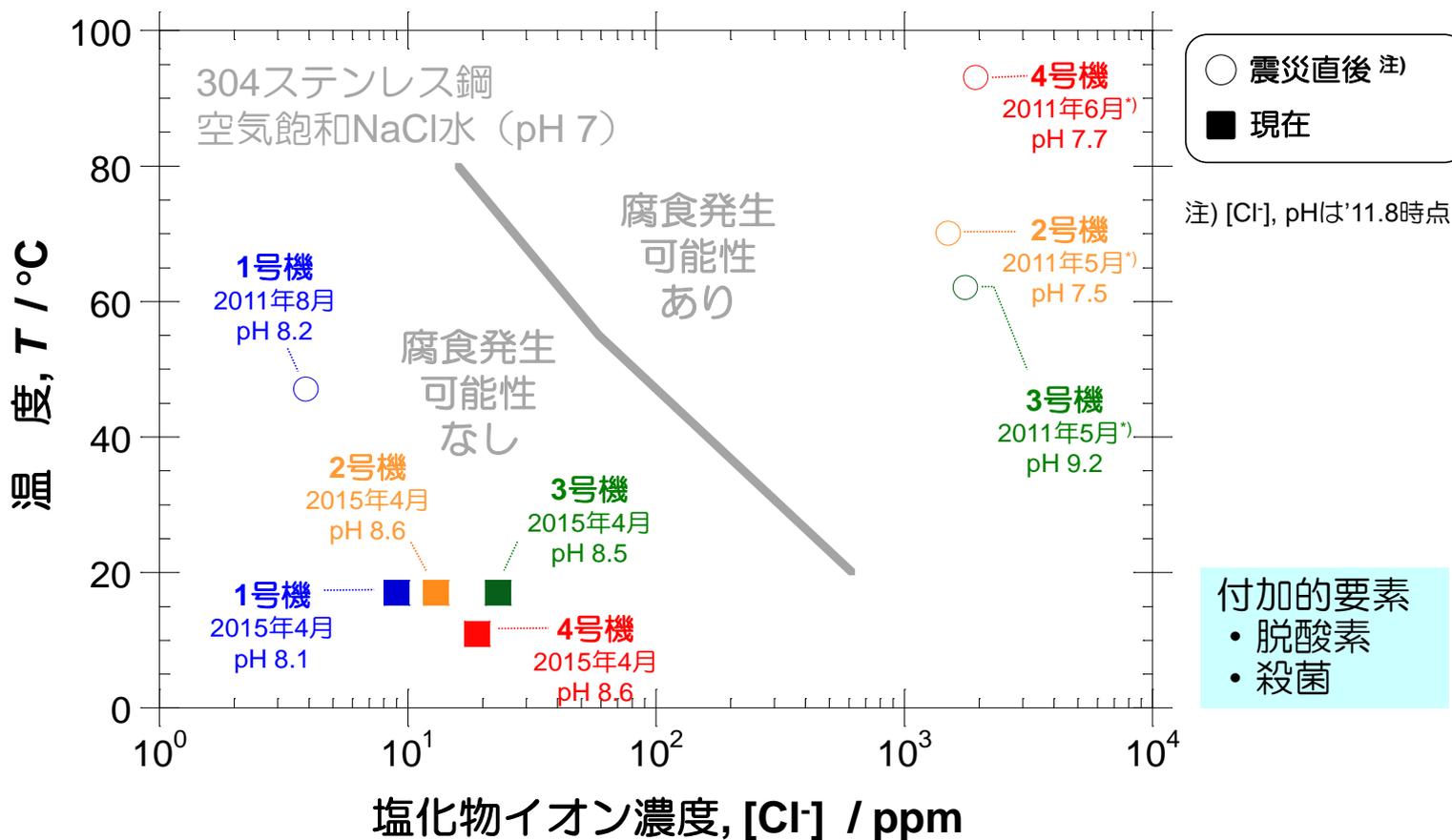


図 304ステンレス鋼のすきま腐食発生領域¹⁾と燃料プール水質との比較

1) M. Akashi, G. Nakayama, T. Fukuda: CORROSION/98 Conf., NACE International, Paper No. 158 (1998).

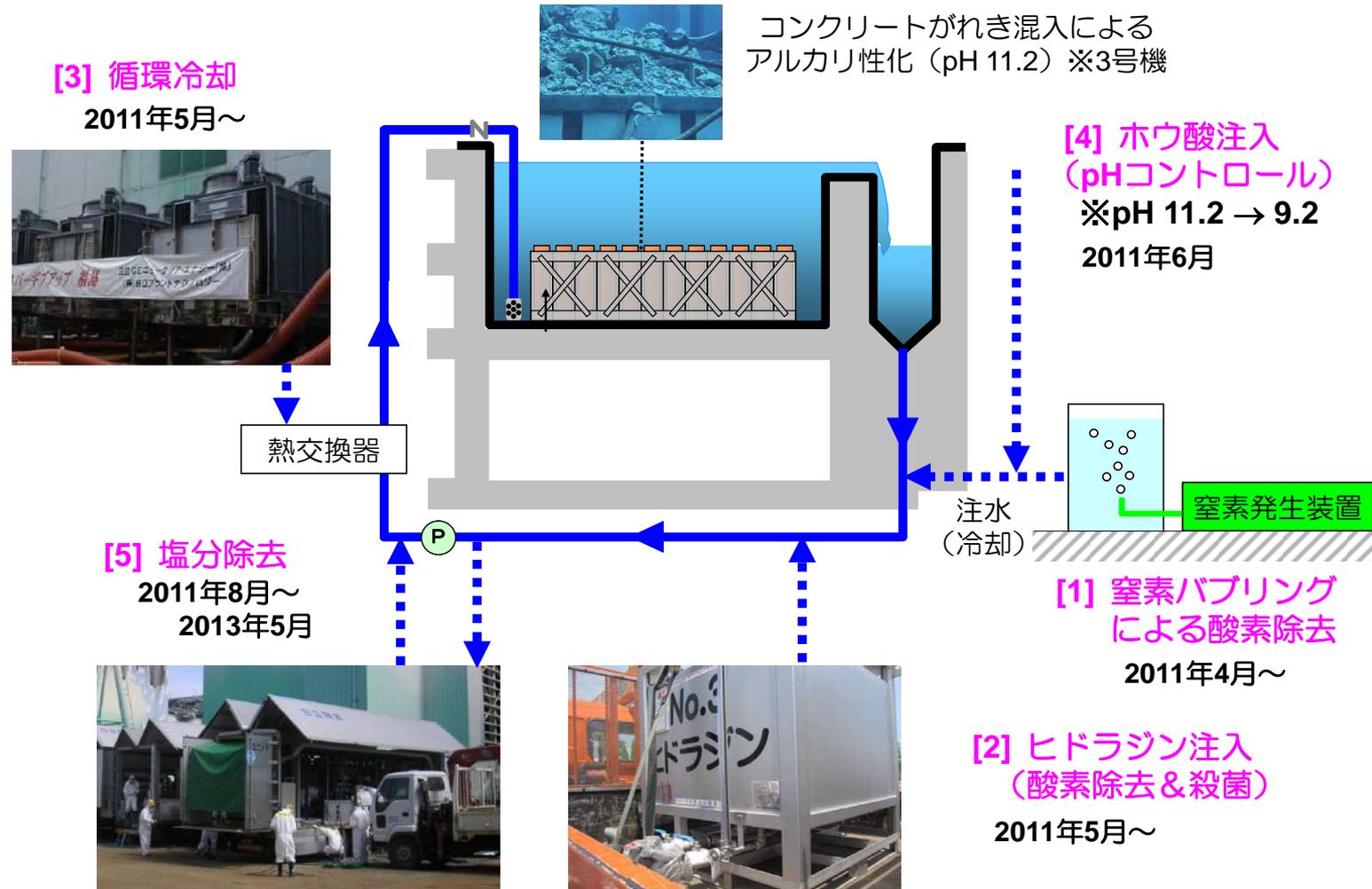
腐食抑制策の例

- 冷却： 水循環、エアフィン
- 脱塩： RO膜、イオン交換
- 溶存酸素低減： 窒素脱気、脱酸素剤 (N_2H_4 , Na_2SO_3)
- カソード防食： 犠牲陽極、外部電源
- インヒビター： PO_4^{3-} , MoO_4^{2-} , WO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^-
- pH制御： NH_3 , H_3BO_3
- 滅菌： N_2H_4 , NaClO , H_2O_2

適用のための必要条件

- 副次影響が無いこと(析出・閉塞、他構造材への悪影響など)
- 高線量下でも有効であること
- 近接工事等が不要であること

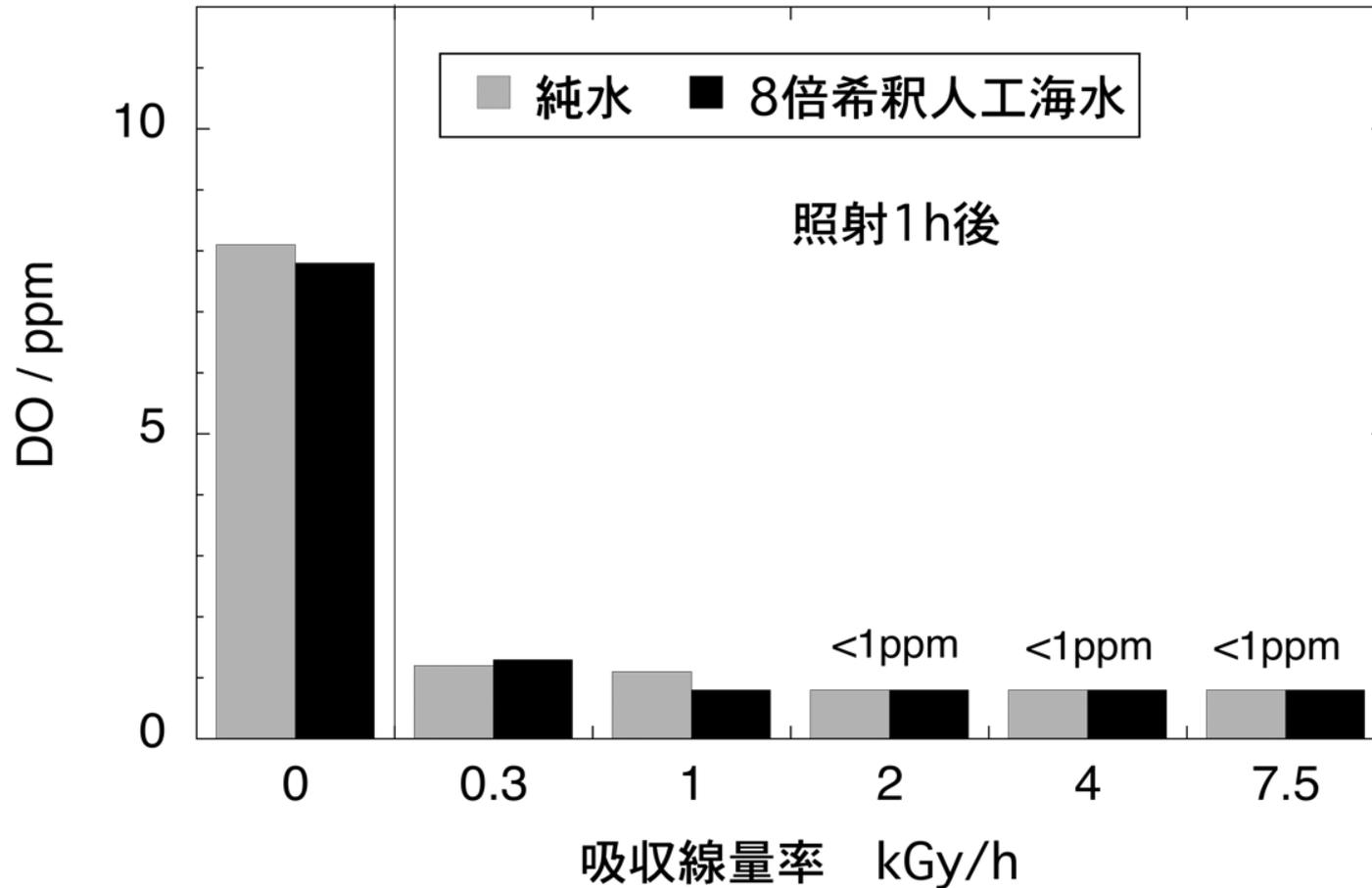
実施中の腐食抑制策（燃料プール）



「福島第一原子力発電所の腐食課題への取組状況と二例」東京電力(株)深谷祐一・熊谷克彦
東北大学「原子炉廃止措置事業」平成27年度第一回専門家会議（2015年）

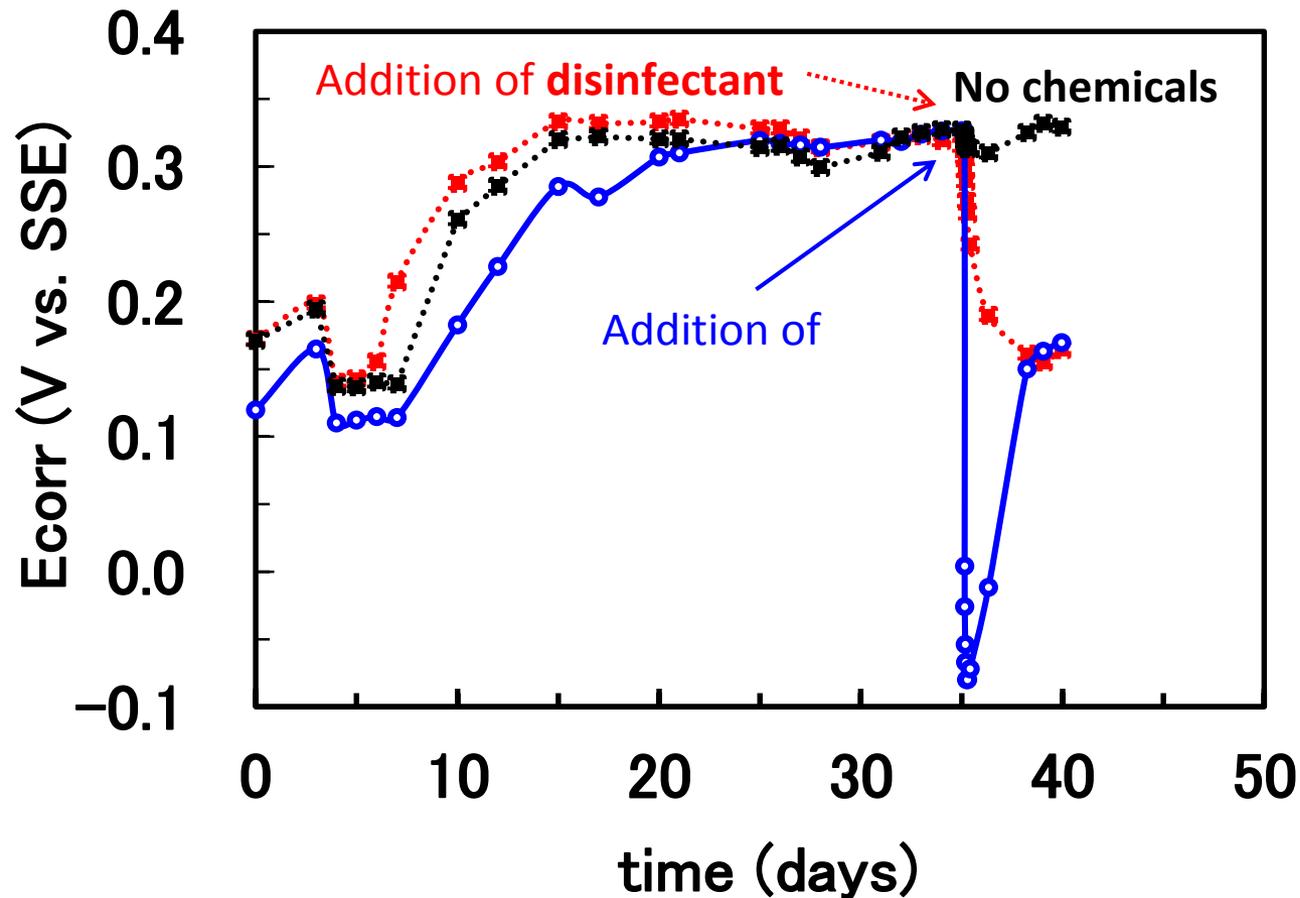
常温域におけるヒドラジン－酸素反応 (25～30°C、1h)

初期 N_2H_4 濃度: $1 \times 10^{-3} \text{ M}$



ヒドラジンによる微生物活性化阻害効果

10-20ppm[Cl]含有水中でのSUS304腐食電位の変化



1F鋼構造物の劣化(腐食)と対策

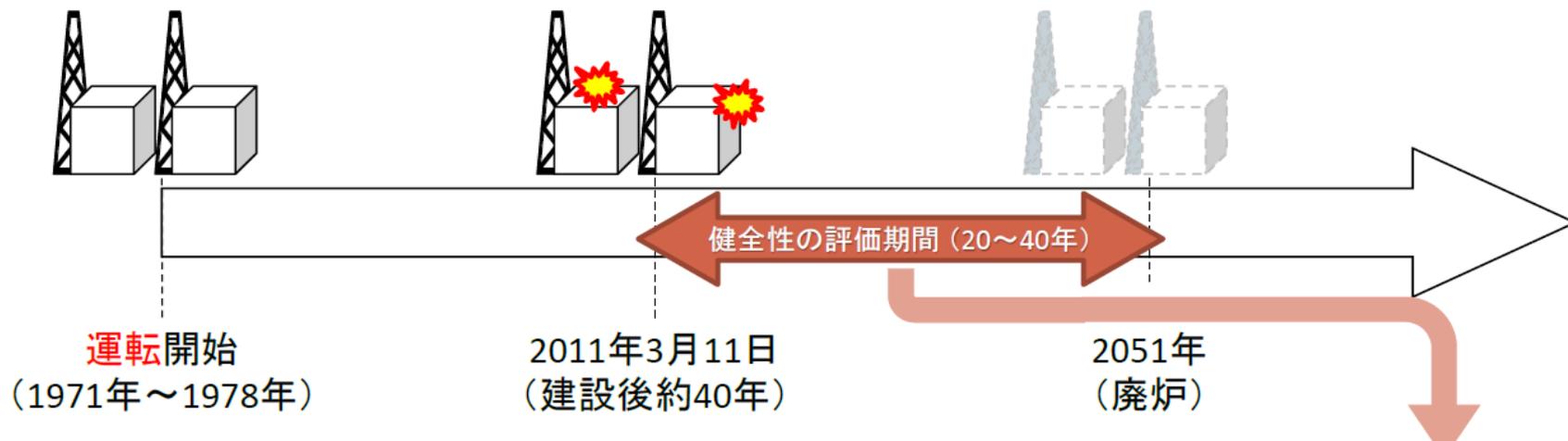
- 1F鋼構造物の経年劣化の最大要因はおそらく腐食である。
- 構造物の要求機能(構造強度あるいは閉じ込め)に応じて、留意すべき腐食モードも異なる(スローリークが問題となる機器かどうか)。
- 廃炉工程の進捗によって、大気の流れ(格納容器の解放)、電気伝導率の上昇(ホウ酸塩等の添加)など、腐食環境の一時的過酷化も予想される。
- 変動要因の多い条件下での予測技術と要所のモニタリング技術が求められる。
- 腐食抑制策は、有害な副次的影響が無いことが絶対的な必要条件となる。カソード能力の抑制が肝要である。
 - ・酸化剤濃度の低減
 - ・実効的カソード面積の低減(電気伝導率の低減)
 - ・微生物の不活性化

1F『RC構造物』の長期健全性

“非線形領域を含む構造性能実力値の長期的評価”

1Fコンクリート構造物の劣化要因：時系列

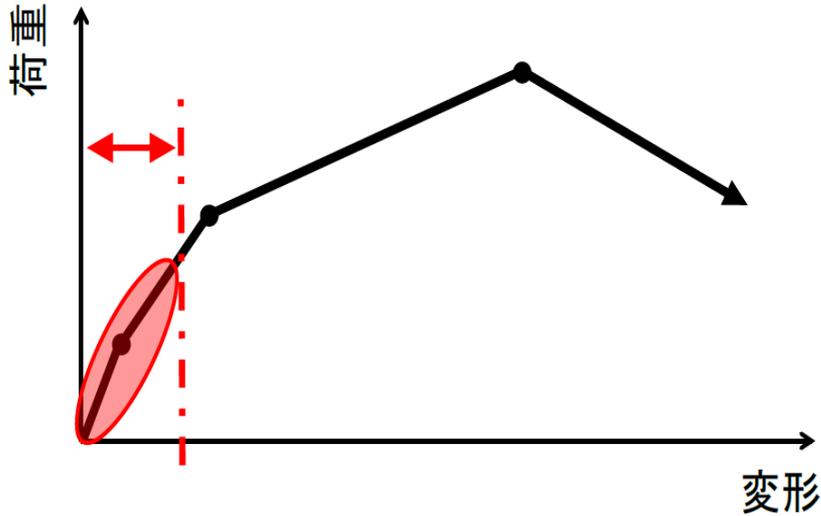
前田匡樹：原子炉廃止措置工学概論講義資料(2016)



	建設時	3.11震災前	3.11震災	将来(廃炉まで)
地震動	設計用地震動と応答	中小地震の記録 ひび割れ・損傷	本震・余震の記録 ひび割れ・損傷	想定する地震動のレベル
爆発	....	....	衝撃荷重の大きさ・影響 範囲、ひび割れ・損傷	....
放射線	....	通常運転時の低レベル放射線	炉心溶融による高放射線	....
熱	....	通常運転時の熱	炉心溶融による高温 注水による急速な冷却	....
塩分	使用骨材	飛来塩分	海水(津波/冷却時)	飛来塩分、中性化・腐食の予測

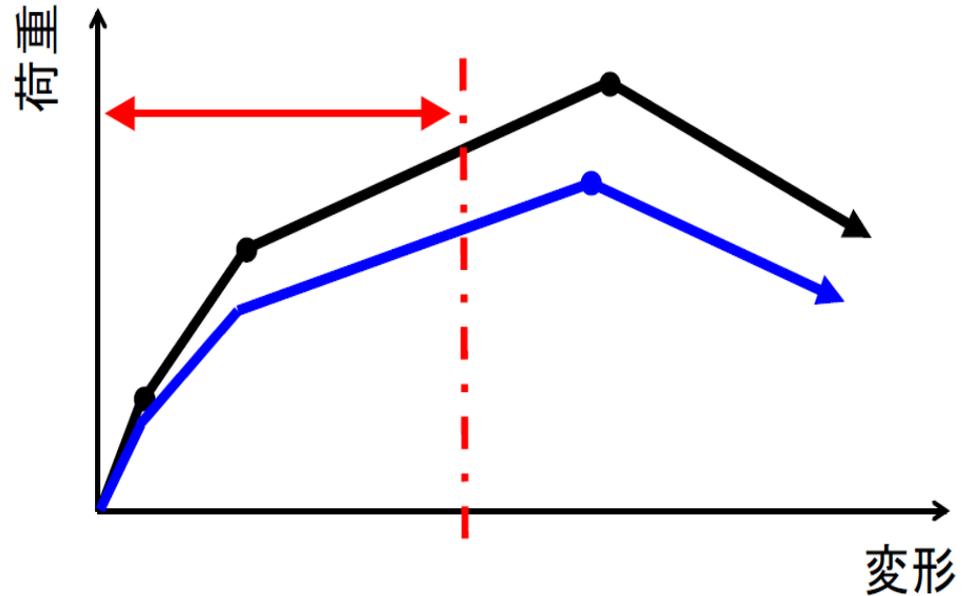
□従来の評価(設計)の対象

想定外力(地震動)による応答 \leq 弾性範囲

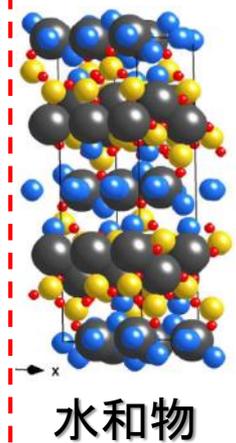
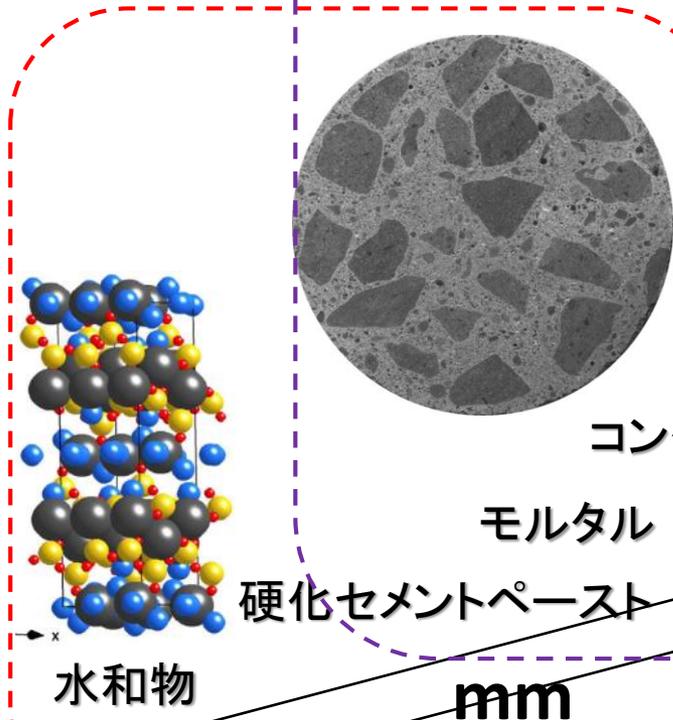


□今後の評価の対象

想定を超える外力や経年劣化による非線形化
⇒非線形領域を考慮した応答や構造性能劣化
の評価体系整備が重要



RC構造物評価のスケール: 素材～構造物まで



硬化セメントペースト

モルタル

コンクリート

mm

cm

m



RC部材

Application for the evaluation of crack propagation at Gently-2 Nuclear power plant after 30 years of AAR – assurance of air tightness of containment building and non-loss of long term post-tensioning

Reactor Building – cross section

INVESTIGATION OF CRACK PROPAGATION DURING CONTAINMENT PRESSURE TEST

DAMAGE PROPAGATION AFTER 30 YEARS OF AAR

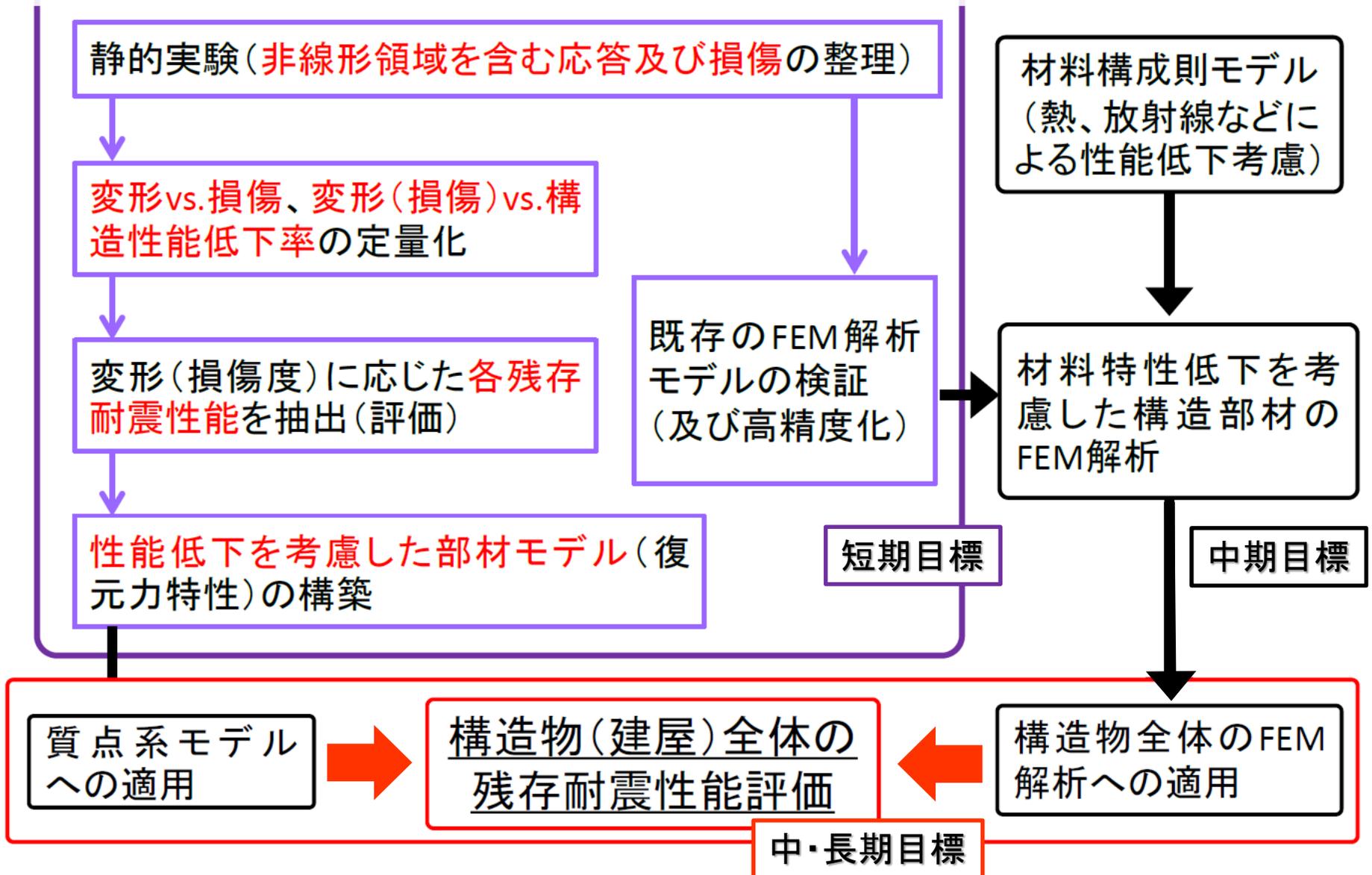
RC構造物

材料物性の変化 → 構造物の性能

事故炉RC構造物の性能評価タスク

前田匡樹：原子炉廃止措置工学概論講義資料(2016)

◎非線形領域を含めた構造部材(耐力壁)の応答・損傷度評価



RC造耐震壁の静的載荷実験による損傷と性能劣化の評価(構造)

東北大学: 廃止措置研究・人材育成等強化プログラム報告書(2016)

～RC壁試験体の静的載荷実～

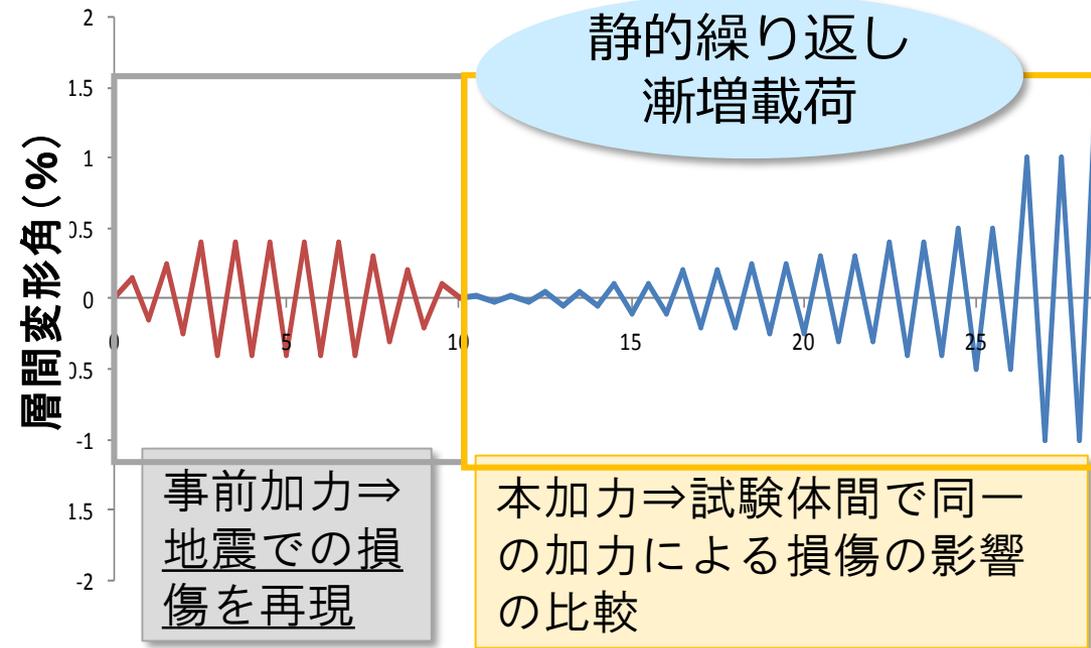
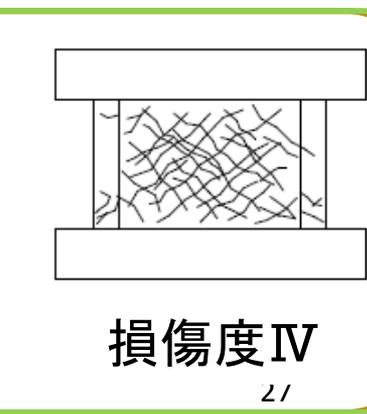
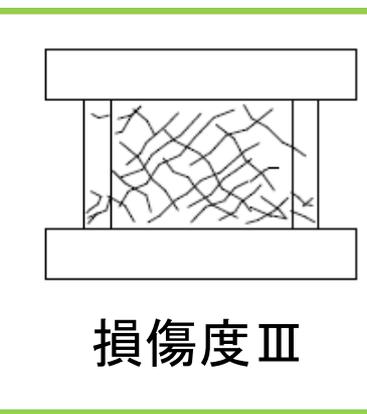
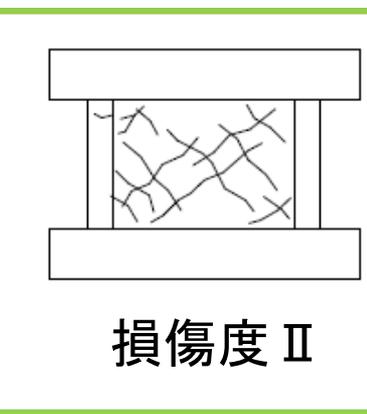
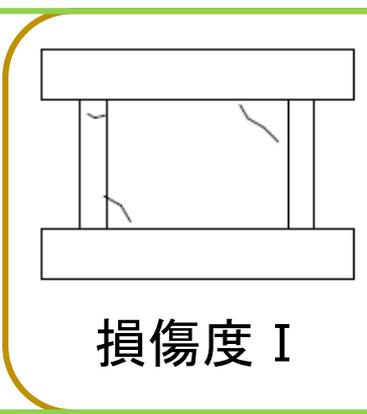
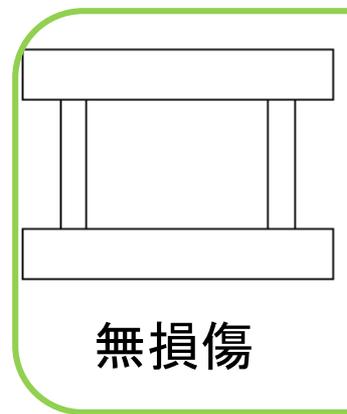


写真 加力装置



構造性能低下の評価

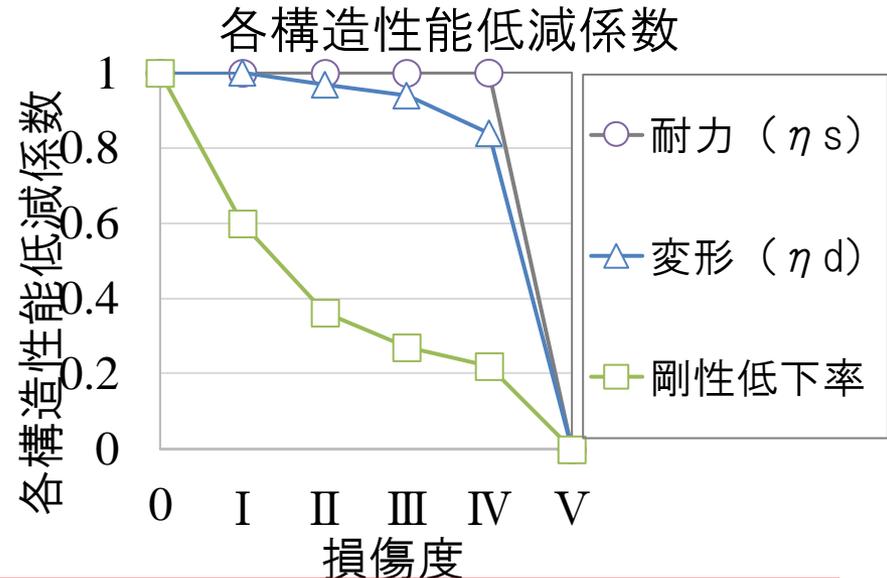
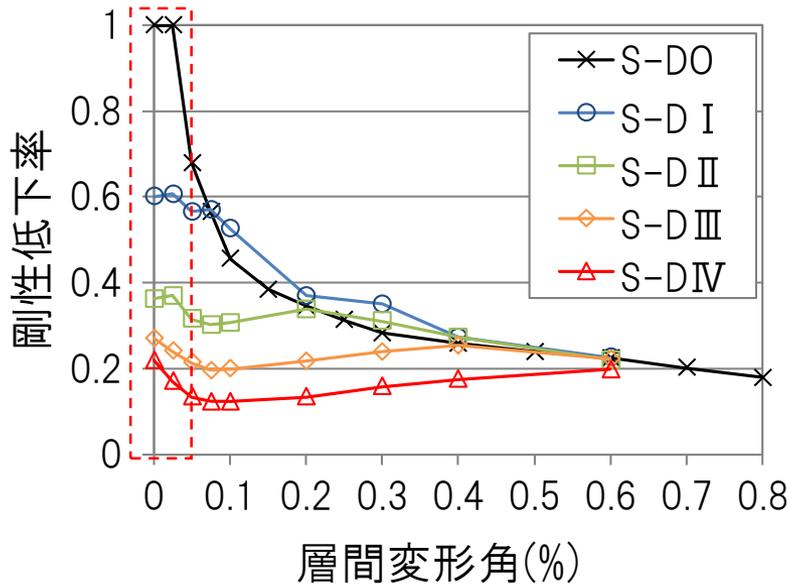
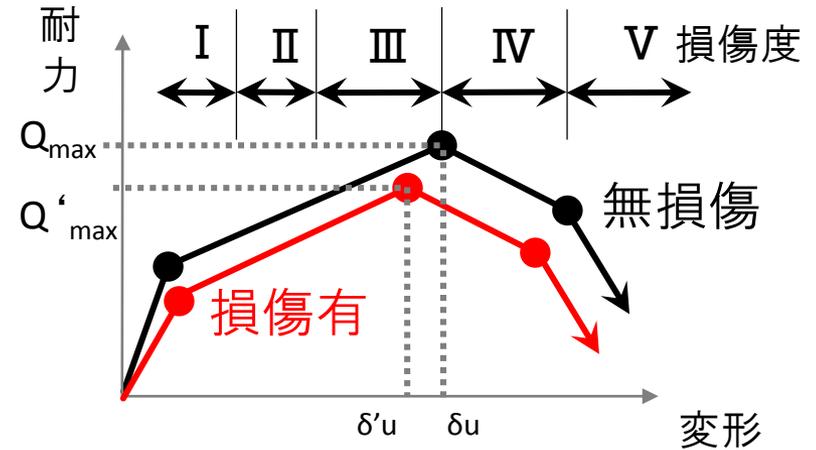
東北大学: 廃止措置研究・人材育成等強化プログラム報告書(2016)

耐力の低下率 η_s $\eta_s = \frac{Q'_{max}}{Q_{max}}$

Q_{max} ; 無損傷の耐震壁の最大耐力
 Q'_{max} ; 損傷後の耐震壁の最大耐力

変形性能の低下率 η_d $\eta_d = \frac{\delta_u}{\delta'_u}$

δ_u ; 無損傷耐震壁の最大耐力時の変形
 δ'_u ; 損傷有耐震壁の最大耐力時の変形



耐力および変形性能は、損傷度Ⅲまでほとんど劣化しない。剛性低下は早いステージから現れる。

1F『RC構造物』の長期健全性

“非線形領域を含む構造性能実力値の長期的評価”

必要な技術は、

- 材料構成則（熱、海水など事故時履歴による性能変化を考慮）
- 非線形領域を含むRC構造部材の損傷度、応答評価モデル
- 放射線影響、中性化、アルカリ骨材等による経年変化の評価
- 効果的な検査と対応策（補修等）

まとめ：設備の高経年化対策

- クリティカル部位の同定⇒優先課題
安全上の要求機能と劣化モードに基づく判断
- 経年劣化現象の的確な予測技術（現象の原理解明に基づいた予測）
- 要所の検査・モニタリング技術*
- 補修技術・機能代替策*

* 作業者の被曝低減が必須である。遠隔技術の他、短時間施工技術、遮蔽技術が望まれる。