

(一社)日本原子力学会「水化学部会」第34回定例研究会
於 東北電力(株) 本店

**PWRプラントにおける
最近の被ばく低減に関する取り組みについて
— 新たな抜本対策の創出に向けて —**

2018/10/5

石原伸夫
三菱重工業 パワードメイン 原子力事業部

三菱重工業株式会社

1. はじめに

2. 現状

3. 影響因子の分析

4. まとめ

- 国内PWRは亜鉛注入を2000年台中期に本格導入(伊方3号機で完了予定)した結果、線量率が40%低減したが、今後、更に抜本的な対策の創出が求められている。
- その対策案創出に向け、水質・運転手順に大きな変化がないにも係らず、各サイクル線量率の経時変化(図1)において、各サイクル間での線量率の低下率(図2)が大きく変動していることに着目している。

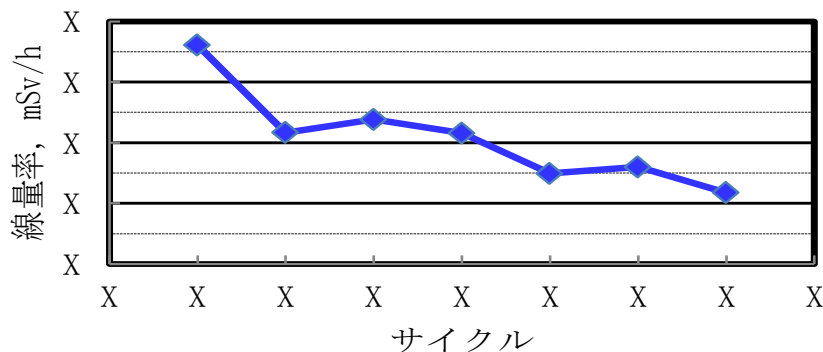


図1 線量率の経時変化

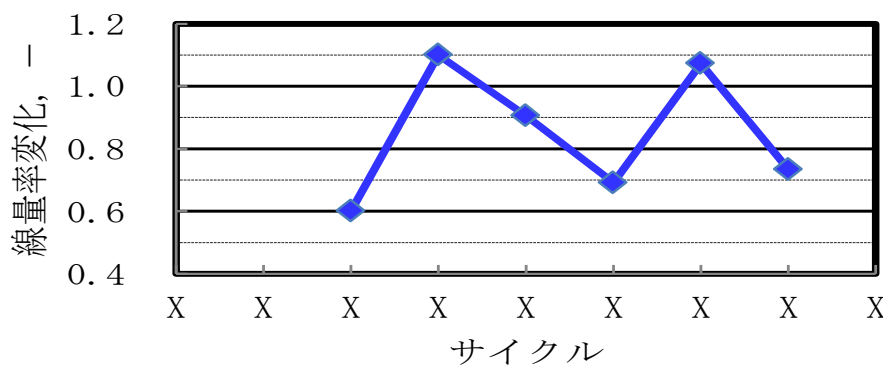


図2 各サイクルでの線量率の変化率

- 線量率低下に影響を与える未解明の因子があり、新たな対策に繋がる可能性がある。

2. 現状

2.1 米国の取り組み

2.2 日本の取り組み

米国ではサイクル末期(EOC)ほう素濃度上昇により、停止時線量率低下例あり。(図3参照)

適用上の課題

- ・プラントによっては相関なく、他の影響因子あり
- ・EOCほう素濃度上昇は燃料経済性を悪化させ、適用は限定的

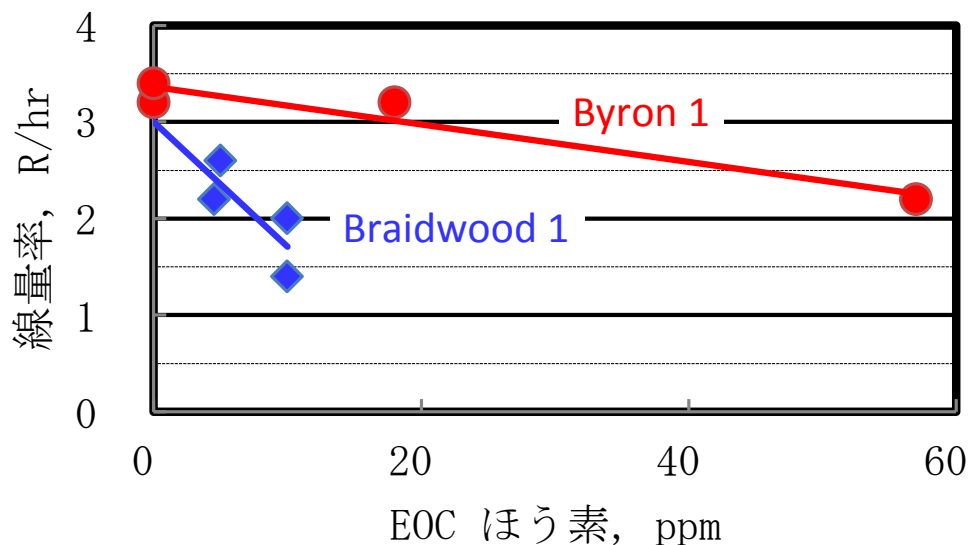


図3 サイクル末期ほう素濃度と線量率

低溶存水素(DH, Dissolved Hydrogen)化により, 燃料表面に付着しやすい金属Niの割合が低下(左図), 燃料付着Ni量も減少し(右図), Ni由来のCo-58低下が期待された。これらの報告により, 震災前まで, 低DH化による被ばく低減研究が進められた。

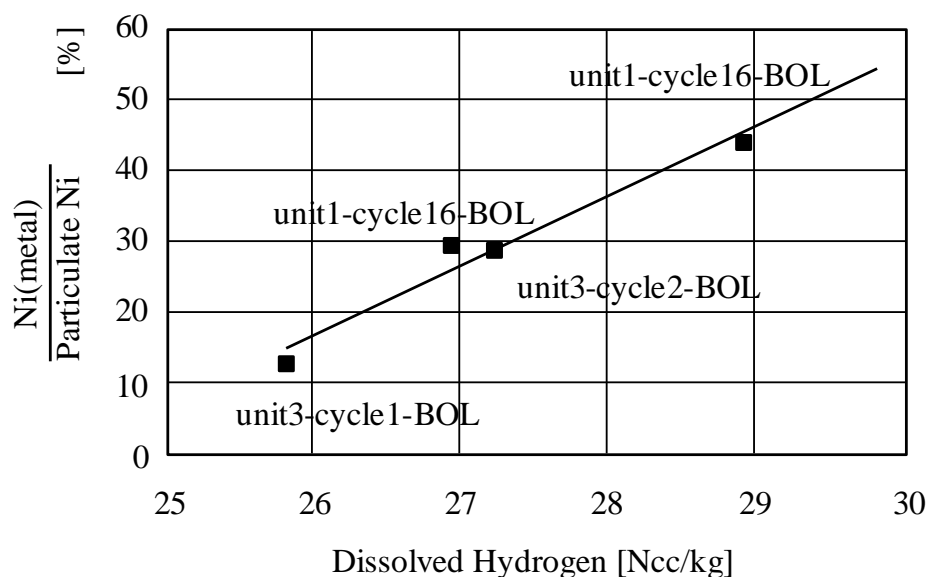


図4 腐食生成物中の金属Ni割合とDH濃度の関係, 石原(四電)ら, 1998 JAIF International Conference

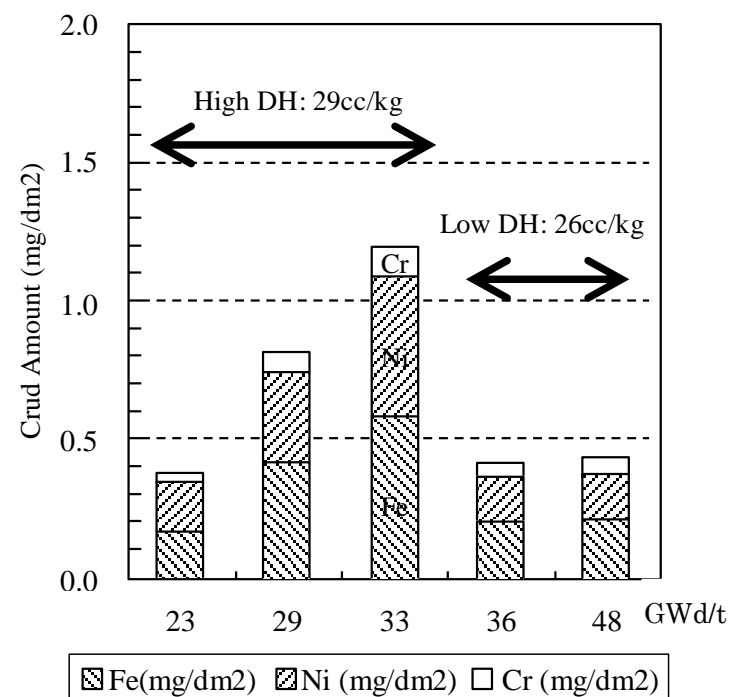


図5 燃料付着クラッド量のDH濃度依存性, 久宗(原電)ら, 1998 JAIF International Conference

3. 影響因子の分析

3.1 放射性核種の生成と沈着

3.2 pH

3.3 DH(溶存水素)

3.4 他の因子と解析の試み

3.1 放射性核種の生成と沈着

- ① 炉外材料腐食によりNi, Coが溶出
- ② 炉心にNi/NiOなどの形態で付着
- ③ 放射化: Ni→Co-58, Co→Co-60
- ④ 溶解・剥離し炉外配管表面に沈着

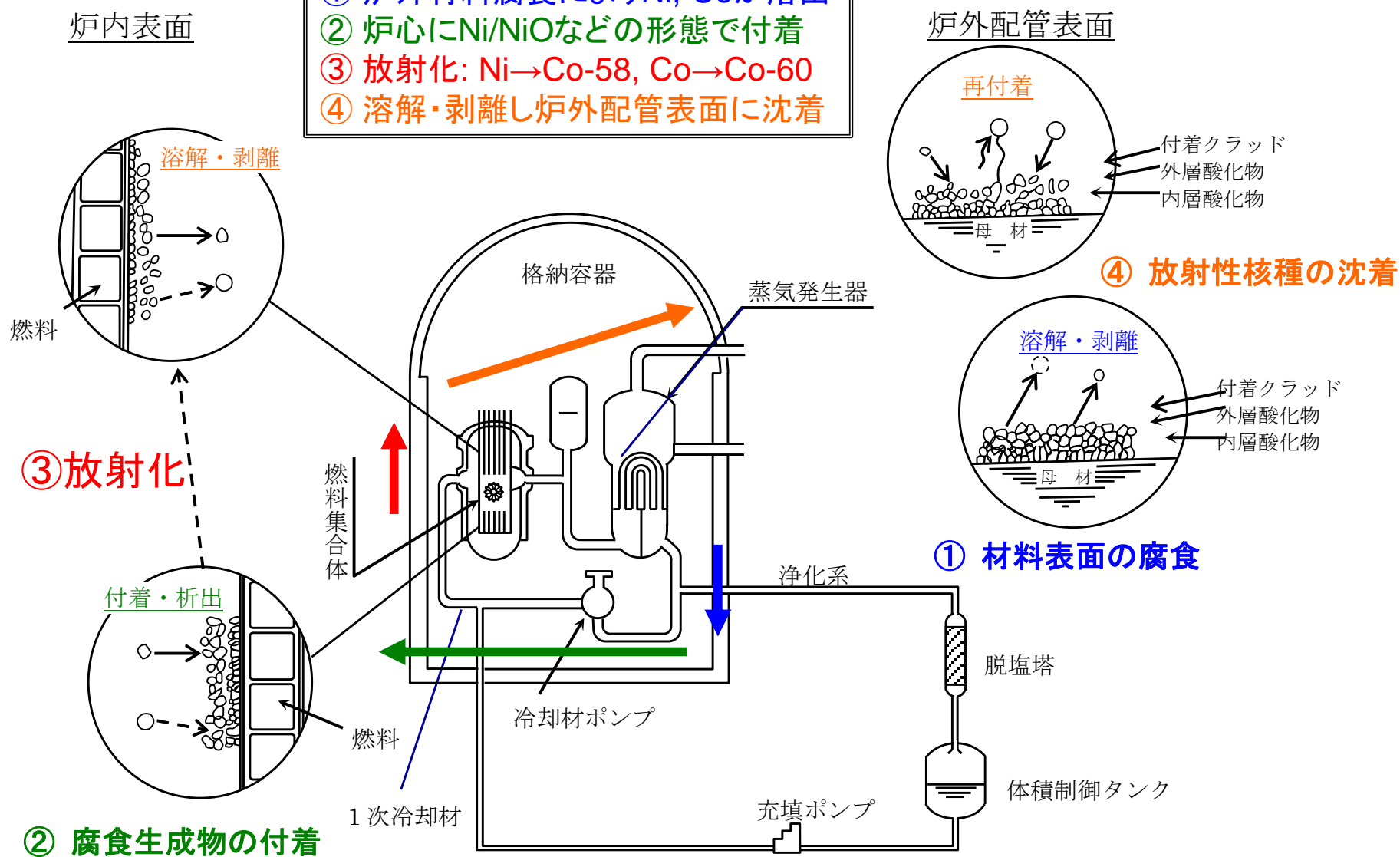


図6 放射性核種の生成と沈着

3.2 pH(1/2)

米国でのサイクル末期(EOC)ほう素濃度上昇は、化学的には様々なpHに影響する。

EOC B濃度高(図中“←”時)に連動するパラメータ

- ① 運転中pH低
 - ①-1 サイクル平均pH低
 - ①-2 サイクル初期pH低
 - ①-3 サイクル末期pH低
- ② 停止時酸化運転時Li濃度高^注
- ③ EOCの高pH一定期間が短い
- ④ サイクル末期炉心出口pH低
- ⑤ 停止時ほう素濃度高

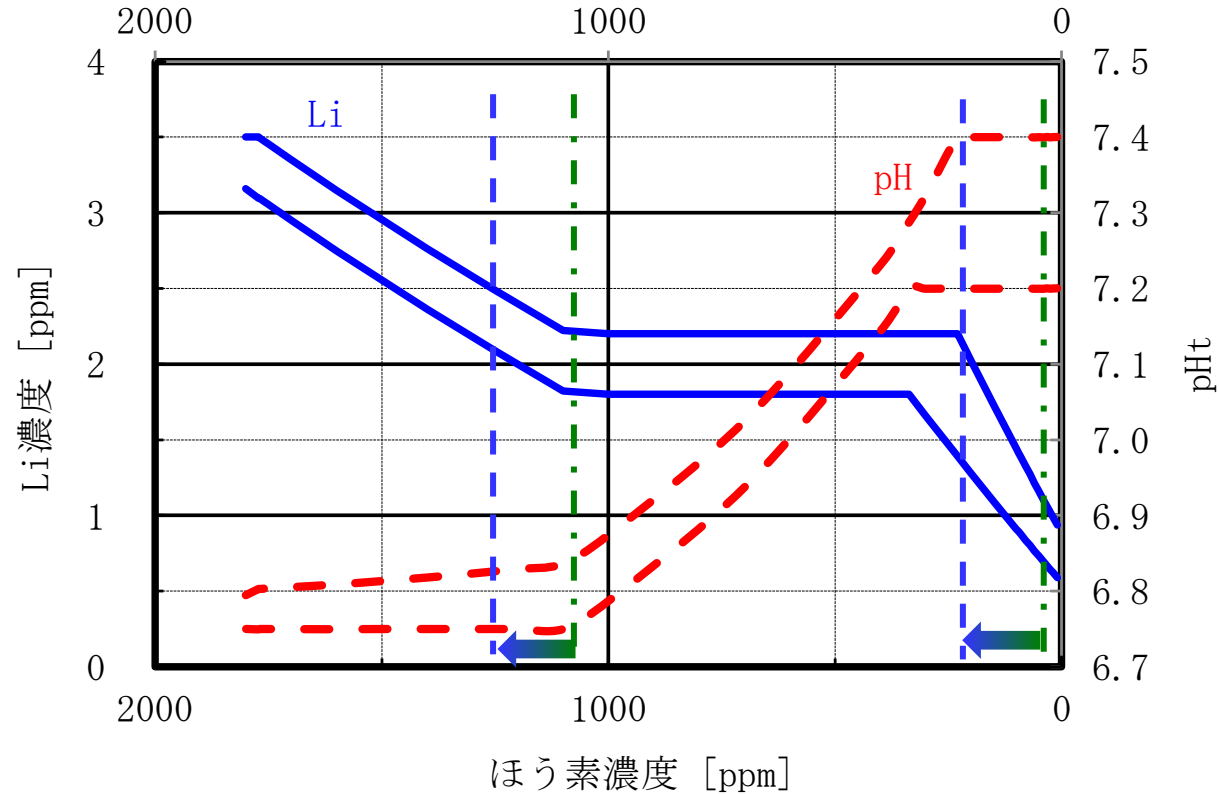


図7A B, Li制御とpHの関係(横軸:ほう素濃度)

注) 温度によってpH特性が変化するため、285°CでのpHを一定としても、高温の炉心出口pHは低下する

EOC B濃度高の時の化学的環境の差

pH管理手順は一定でも、サイクル毎にpHは大きく変動する。

詳細な影響因子の絞り込みは単純ではない

① 運転中pH低

①-1 サイクル平均pH低

①-2 サイクル初期pH低

①-3 サイクル末期pH低

② 停止時酸化運転時Li濃度高

③ EOCの高pH一定期間が短い

④ サイクル末期炉心出口pH高

⑤ 停止時ほう素濃度高(図中表記無)

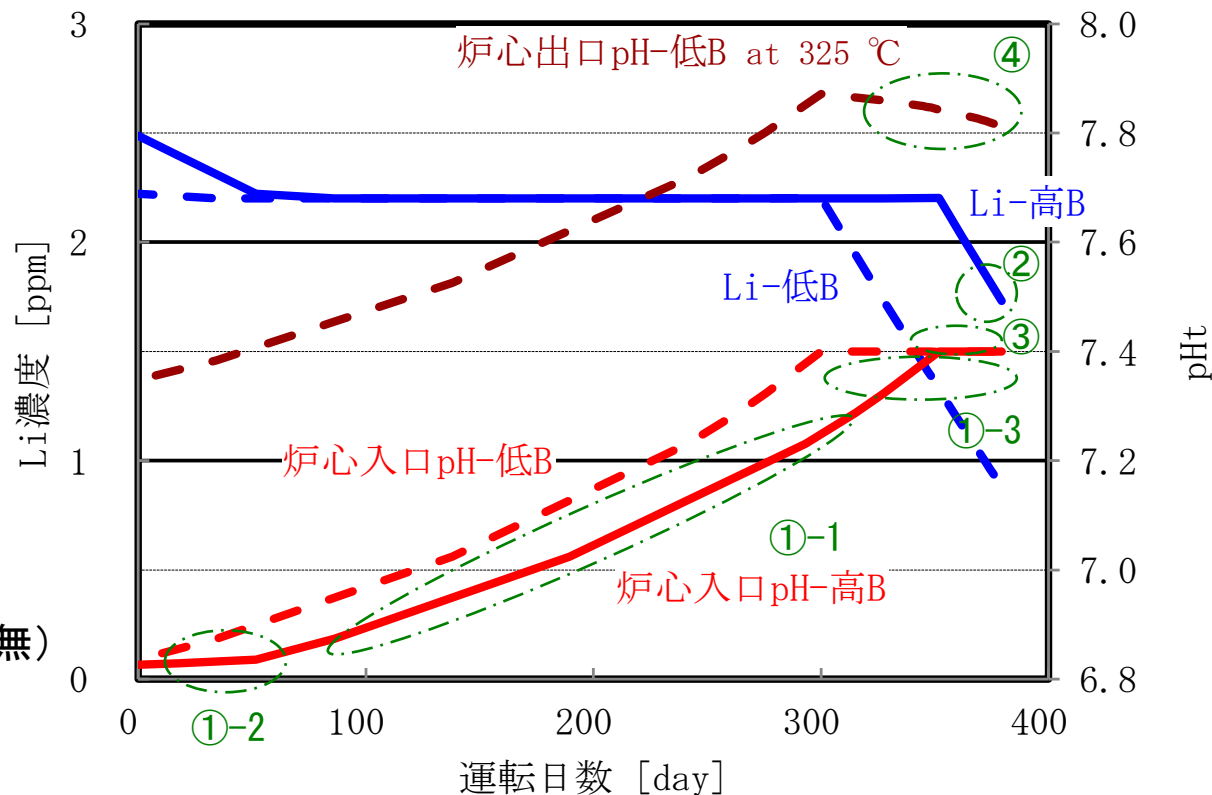


図7B B, Li制御とpHの関係(横軸:運転日数)

燃料表面の付着・放射化

低DH → Ni溶解度低下と燃料表面のNi/NiO比低下 → 線源強度低下(評価コード)

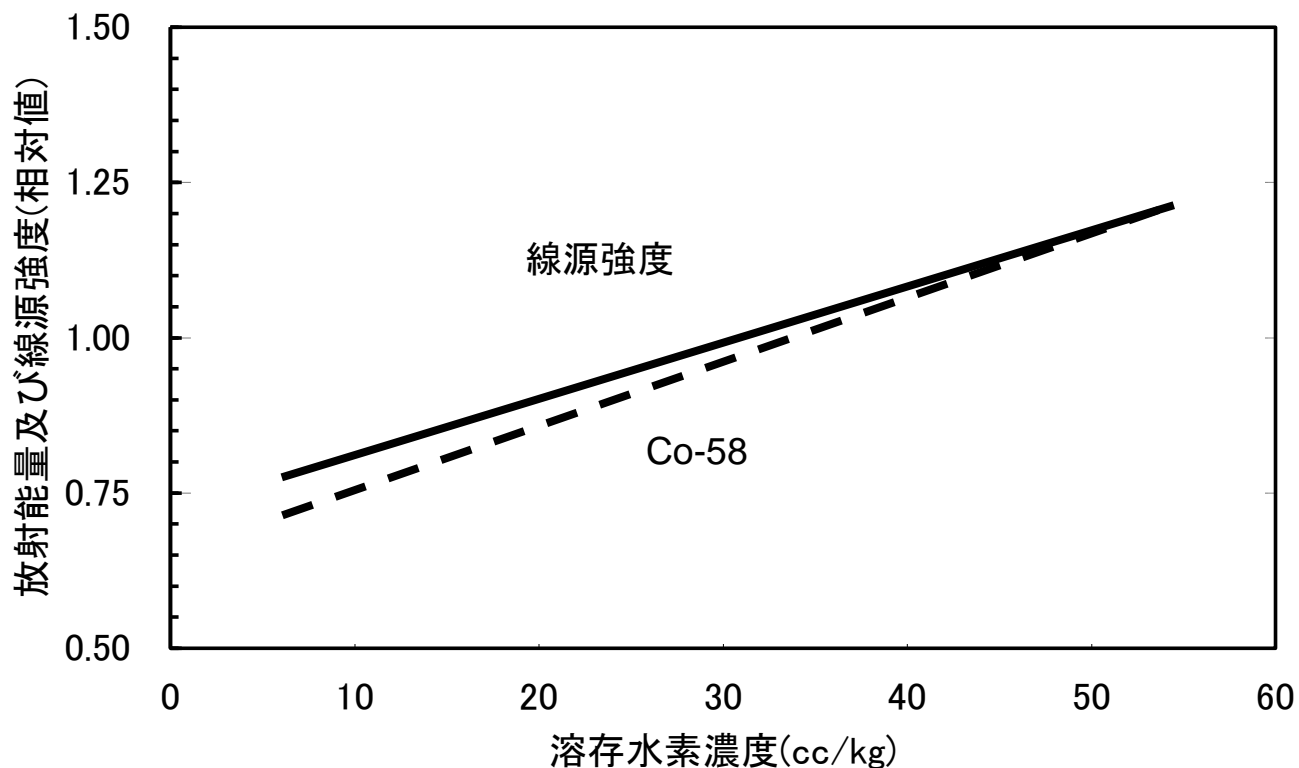
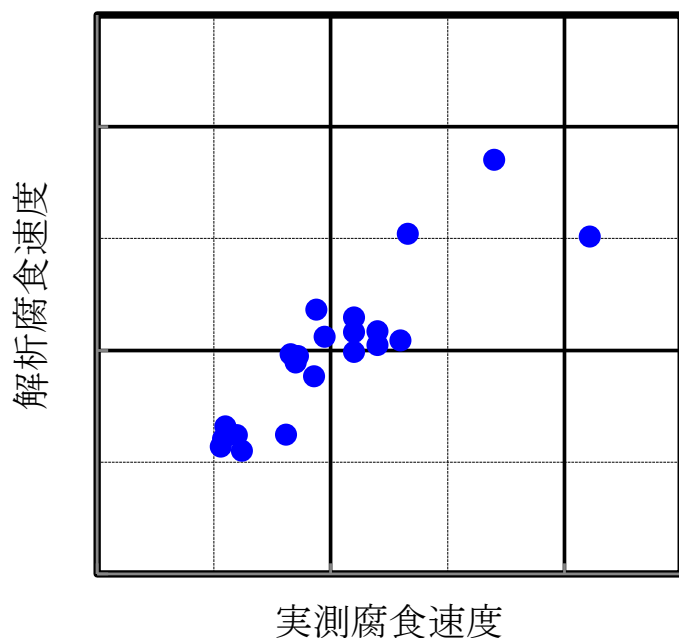


図8 線源強度評価コード ACE II によるDH濃度と線源強度の評価結果イメージ

材料表面の腐食

高DH → 金属腐食速度低下(下図) → 線量率低減側に作用

(被ばくに直接関与するインコネル・ステンレスにおけるDHと腐食の実機データは、材料の経年変化影響もあり明確でない。一方、燃料被覆管では水質と腐食速度の関係が明確に出た例がある。)



燃料被覆管腐食速度への影響

DH 5 NmL/kg-H₂O上昇で22%低下

pH 0.1上昇で20%低下

Zn 5 ppb注入で39%低下

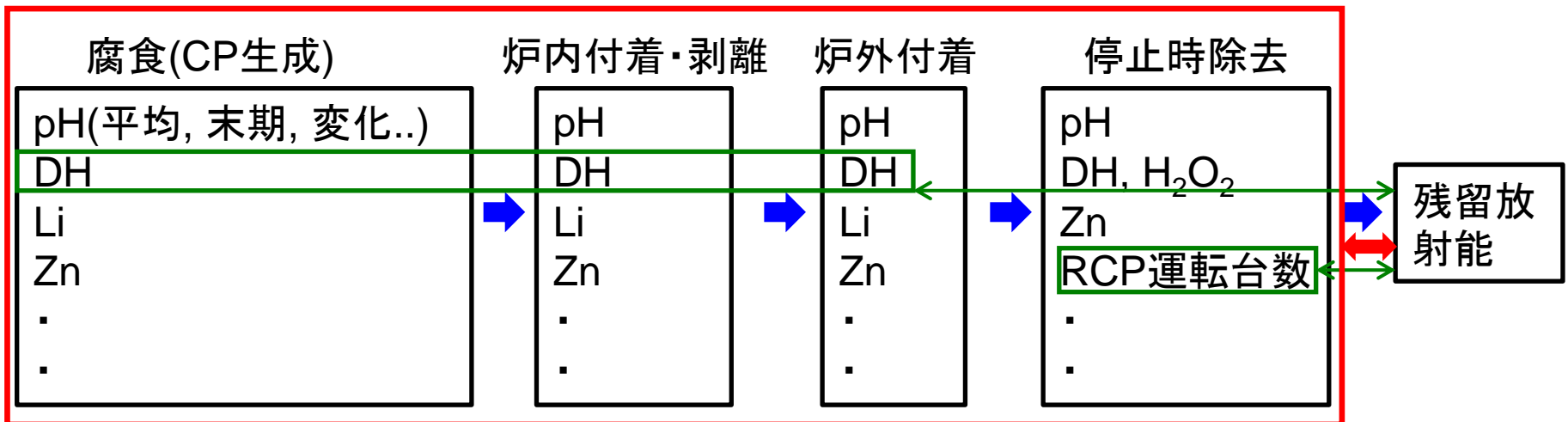
図9 炉心よう素レベルより推定解析した燃料被覆管の腐食速度 実測と解析の比較

プラント全体としてのDH影響は、現状、明確でない

- **理論:** 燃料表面付着の観点では低DHが良く、その供給源となる腐食の観点では高DHが良いため、バランスしてDH依存性が小さい可能性がある。
- **実機例:** 運転制限によりDH濃度が通常より5 NmL/kg-H₂O以上低下した例があるが、明確な線量率低下は見られていない。

3.4 その他の因子と解析の試み(1/2)

- ① **理論**: pH, DH影響は, ミクロな化学的作用が理解し易いが, プラントとしてバランスし, 線量率全体に与える定量的積み上げは容易でない。
- ② **実機例(単相関)**: 米国では, 停止時のRCP運転台数の影響調査など物理的な作用の解析の取り組みもあるが, 多数の運転パラメータとの単相関解析は容易でない。
 ↓ (従来の限界の打破)
- ③ **実機統計解析**: 運転パラメータを列挙して多変量解析し, 先に相関を見出し, 従来の運転範囲で運転パラメータを最適化, 後から相関の高い因子について, 現象面からメカニズムを解析するアプローチが有効と考える。



多変量解析による線量率の予測解析は可能(試解析例 図10)

(実測値の数に対して、考慮すべき因子数が多いため、一般的な解析は不可であり、統計学に基づき開発した解析ツール、手作業による試行錯誤方式の両面で試解析を実施。実測にフィットする解析式は出せるが、要因解析にはデータ数の拡大が必要)

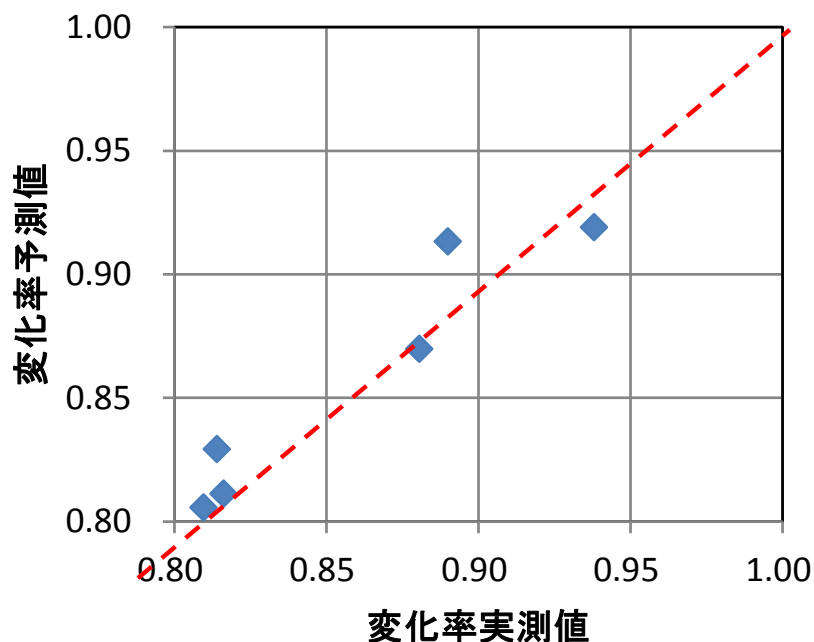


図10 MHIにて開発した多変量解析ツールによる実プラントの試解析例

(原子力以外のプラント解析への適用例あり)

4. まとめ

- 課題: サイクル毎の線量低下率は約 $-10\sim+40\%$ で変動しており, 未解明因子が存在
- pH: pH管理手順は一定でも, サイクル毎のpHは大きく変動
- DH: 正と負の作用が考えられ, DH影響は不明確
- 今後の取り組みへの提言: 理論や実機の単相関解析に代わり多変量解析を提案

この方法であれば, 2, 3年で実機運転への反映, その後の持続的な改良, 長期的には規格の改定などを含めた抜本的な改定が可能であると期待する。

MOVE THE WORLD FORWARD

**MITSUBISHI
HEAVY
INDUSTRIES
GROUP**