

軽水炉利用高度化に対応した 線量率低減技術の開発

(12) 腐食生成物挙動評価モデルの高度化およびプラント予測評価

東芝エネルギーシステムズ株式会社 ○洞山 祐介、青井 洋美、根岸 孝次、原 宇広

中部電力株式会社 稲垣 博光

2020.9.17

日本原子力学会 2020年秋の大会 オンライン開催

Contents

01 背景

02 課題と目的

03 評価モデルの概要

04 評価モデルの改良点

05 プラント予測評価結果

06 まとめ



1. 背景

- 再稼働後の沸騰水型原子炉（BWR）では、「被ばく低減対策」や「予防保全対策」として様々な水化学技術が適用されることで、水質管理方法の多様化が想定される。
- これらの水化学技術は配管線量率へ複合的に影響を及ぼし合うことから、個々のプラントに合わせた最適な水化学技術の組合せを選択する必要がある。
- 組合せを選択するためには、適用効果を定量的に評価することが可能な腐食生成物挙動評価モデル（以下、評価モデルとする）が不可欠である。

2. 課題と目的

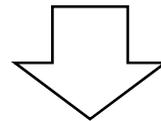
課題

新たな水化学技術（※）の適用時に、既存の評価モデルでは再現できない事象が増加しており、モデルの改良が必要であった。

※新たな水化学技術

被ばく低減対策：極低鉄高Ni制御、炉水Ni制御、亜鉛注入

予防保全対策：貴金属注入、酸化チタン注入



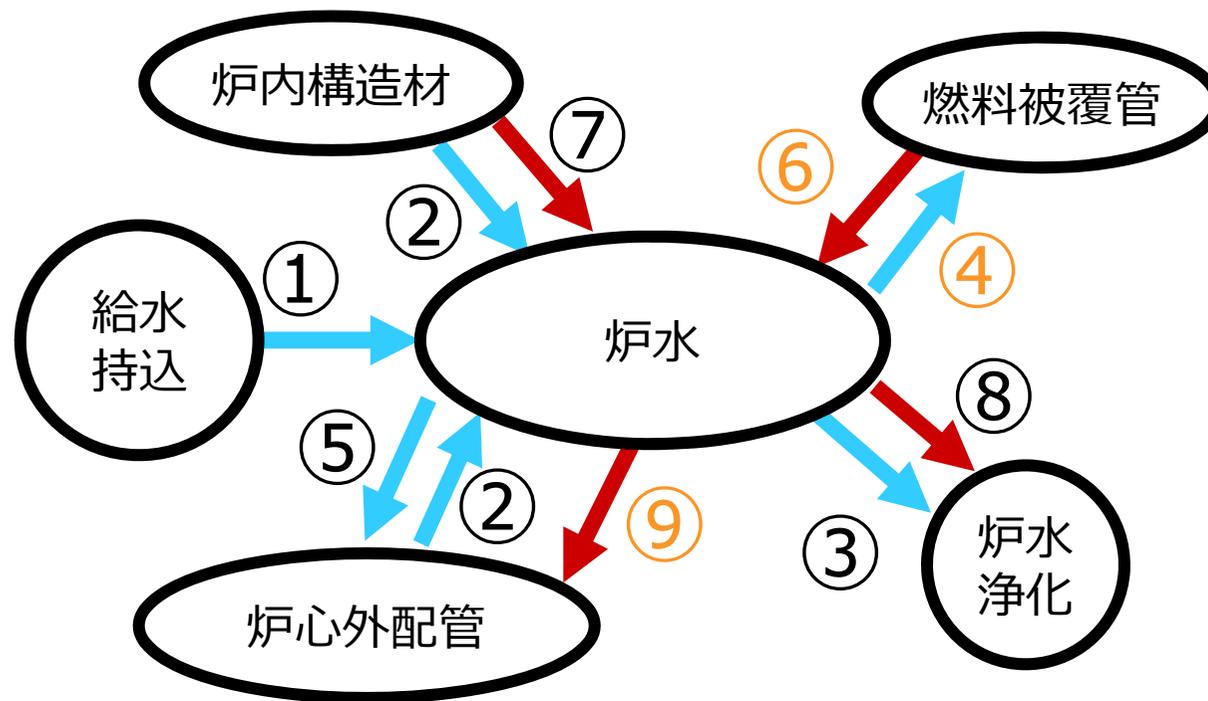
目的

再稼働後の最適な水質管理方法の提案に向け、既存の評価モデルを新たな水化学技術に対応させ、適用効果を定量的に評価可能な評価モデルを構築する。

3. 評価モデルの概要 – 基本概念 –

● 評価モデルの概念図

- 金属発生・移行挙動
- 放射能発生・移行挙動



No.	項目	分類
①	給水持込み	金属
②	炉内構造材、炉心外配管腐食	金属
③	炉水浄化	金属
④	燃料への付着	金属
⑤	炉心外配管への付着	金属
⑥	燃料からの溶出	放射能
⑦	炉内構造材からの溶出	放射能
⑧	炉水浄化	放射能
⑨	炉心外配管への付着	放射能

: 本研究での改良パラメータ

炉水を中心とした「金属」と「放射能」のマスバランスを評価するモデル

3. 評価モデルの概要 –これまでの発表履歴–

- BWR電力共研の成果として、これまで下記の発表を実施

発表先	シリーズ 番号	タイトル	発表者	発表内容	
				試験	解析
日本原子力学会 2016秋	(1)	通常水質、水素注入環境水質における 内層/外層へのCo-60付着試験結果	日立	○	–
	(2)	全体計画	中部電力	○	○
日本原子力学会 2017秋	(3)	貴金属注入水質における Co-60付着試験結果	日立	○	–
	(4)	腐食生成物挙動評価モデルの高度化	東芝	–	○
日本原子力学会 2019秋	(5)	沸騰場環境での燃料被覆管への クラッド付着挙動評価	東芝	○ (④)	–
	(6)	酸化チタン適用時の放射能付着量評価	東芝	○ (⑨)	–
	(7)	酸化チタン適用時の放射能付着に 対する水質影響	東芝	○ (⑨)	–
日本原子力学会 2020春	(8)	鉄/ニッケル比制御模擬条件における、通常時水質、および 水素注入水質での燃料被覆管へのクラッド付着・溶出試験結果	日立	○	–
日本原子力学会 2020秋	(9)	通常水質、水素注入水質における 燃料被覆管へのクラッド付着・溶出試験結果	日立	○	–
	(10)	貴金属注入と亜鉛注入の影響を考慮した 腐食生成物挙動評価モデルの高度化	日立	–	○
	(11)	酸化チタン注入適用時の燃料被覆管への クラッド付着挙動評価	東芝	○ (④)	–
	(12)	腐食生成物挙動評価モデルの高度化 およびプラント予測評価	東芝	–	○

3. 評価モデルの概要 – マスバランス –

● マスバランス方程式による記述

金属バランス：
$$V \frac{dC_i^n}{dt} = \underbrace{X_i^n}_{\text{給水持込}} + \underbrace{(\zeta_i^n M_i - \delta_i^n C_i^n V)}_{\text{燃料表面の付着・溶出}} + \underbrace{\sum_k (\zeta_i^n m_{i,k}^n - \delta_{i,k}^n C_i^n V)}_{\text{構造材表面の付着・溶出}} - \underbrace{\beta C_i^n V}_{\text{炉水浄化}}$$

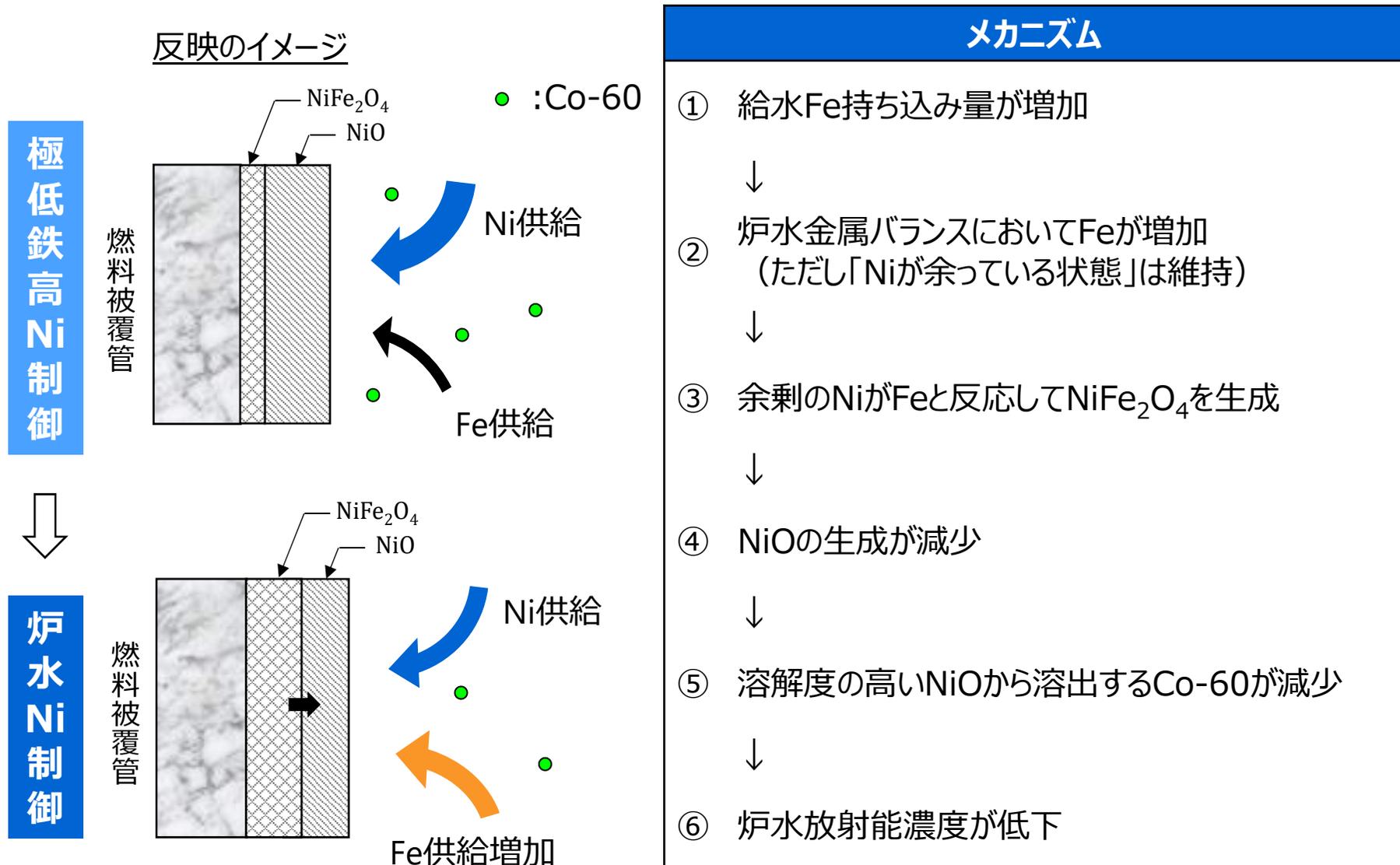
放射能バランス：
$$V \frac{dA_i^n}{dt} = \underbrace{(\zeta_i^n \Gamma_i - \delta_i^n A_i^n V)}_{\text{燃料表面の付着・溶出}} + \underbrace{\sum_k (\zeta_i^n \Gamma_{i,k}^n - \delta_{i,k}^n A_i^n V)}_{\text{構造材表面の付着・溶出}} - \underbrace{\beta A_i^n V}_{\text{炉水浄化}}$$

凡例一覧

記号	意味	単位	記号	意味	単位
C	金属濃度	kg/m ³	δ	付着定数	1/h
A	放射能濃度	Bq/m ³	ζ	溶出・剥離定数	1/h
X	炉内流入量	kg/h	β	浄化系除去定数	1/h
V	炉水体積	m ³	t	時間	h
M	燃料付着金属量	kg	i	金属種類または放射性核種種類	-
m	構造材付着金属量	kg	n	化学形態（イオンorクラッド）	-
Γ	放射能付着量	Bq	k	構造材種類	-

4. 評価モデルの改良点 – 炉水Ni制御 –

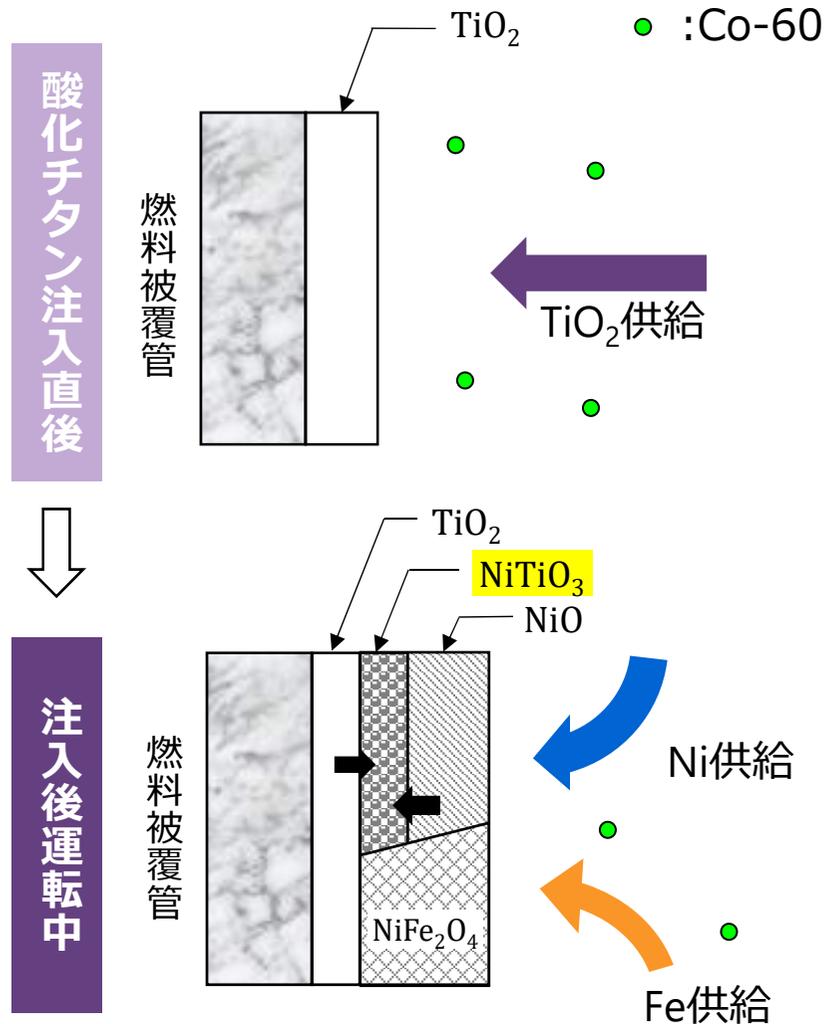
- 「炉水Ni制御」適用時の燃料への金属付着挙動をモデルへ反映



4. 評価モデルの改良点 – 酸化チタン注入 –

- 「酸化チタン注入」適用時の燃料への金属付着挙動をモデルへ反映

反映のイメージ※



メカニズム

- ① 燃料にTiO₂が付着したのち、そのTiO₂が時間に比例してNiTiO₃に形態変化
↓
- ② NiO生成に寄与していたNiがNiTiO₃の生成で消費
↓
- ③ NiOの生成が減少
↓
- ④ 溶解度の高いNiOから溶出するCo-60が減少
↓
- ⑤ 炉水放射能濃度が低下

※図の簡略化のため酸化チタン注入前から存在する酸化皮膜は省略している

5. プラント予測評価 – 評価条件 –

● 評価ケースの設定（対象：Bプラント）

評価 ケース	水質管理方法							
	被ばく低減				予防保全			
	極低鉄 高Ni制御	Ni/Fe比 制御	炉水Ni 制御	亜鉛 注入	通常 水質	水素 注入	貴金属 注入	酸化チタン 注入
現状	○	-	-	-	○	-	-	-
case1	-	-	○	-	○	-	-	-
case2	-	-	○	○	○	-	-	-
case3	-	-	○	-	○	-	-	○

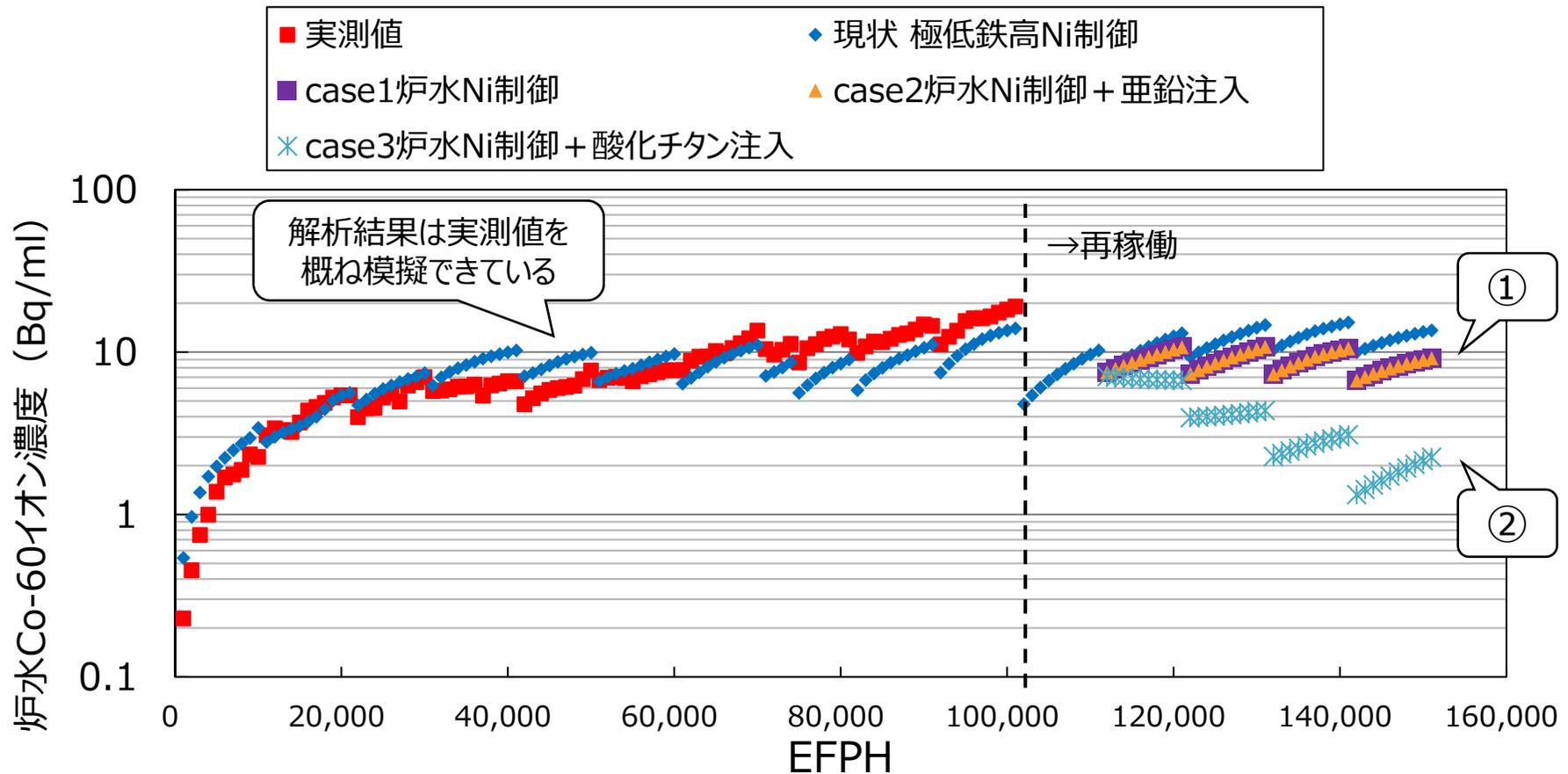
用語の説明

- 極低鉄高Ni制御 : 給水鉄クラッド濃度が0.1ppb以下でかつ、炉水ニッケルイオン濃度が1ppb以上の状態
 Ni/Fe比制御 : 炉水ニッケルイオン濃度が0.2ppb以下の状態
 炉水Ni制御 : 給水側に微量の鉄注入をし、炉水ニッケルイオン濃度を1～2ppbに制御している状態

個々のプラントに適用可能な水化学技術の組合せを検討し、評価ケースを設定

5. プラント予測評価 – 炉水放射能濃度 –

● Co-60イオン放射能濃度の予測評価結果



①

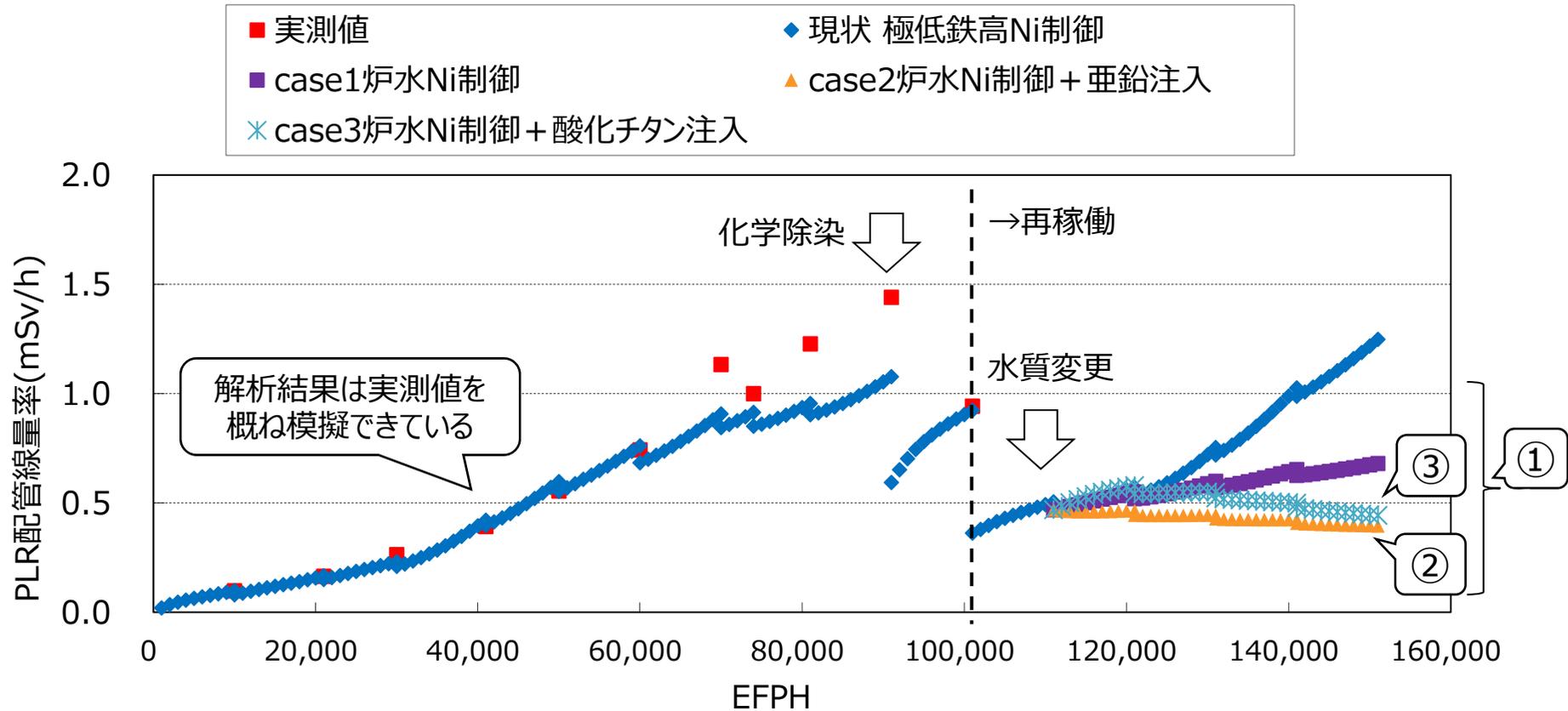
• case 1 ,2では、「炉水Ni制御」の効果により炉水放射能濃度が低下

②

• case3では、「酸化チタン注入」の効果により大幅に炉水放射能濃度が低下

5. プラント予測評価 – PLR配管線量率 –

● 配管線量率の予測評価結果



- ① • case1～3のいずれも、炉水放射能濃度の低下を受け、PLR配管線量率も低下
- ② • case2では、「亜鉛注入」の効果によりPLR配管線量率が低下
- ③ • case3では、「酸化チタン注入」の効果によりPLR配管線量率が低下

6. まとめ

- プラント再稼働後の水質管理方法の多様化を見据え、既存の評価モデルに対し、ラボ試験データから取得したパラメータを反映し、水化学技術の適用効果を**定量的に評価可能なモデル**を構築した。
- 構築した評価モデルを用いて、Bプラントを対象としたケーススタディを行い、以下の結果を得た。
 - **炉水放射能濃度**が最も低下するのは、「**炉水Ni制御 + 酸化チタン注入**」のケースである。
 - **PLR配管線量率**が最も低下するのは、「**炉水Ni制御 + 亜鉛注入**」のケースである。
- 今後は、実機プラントの**燃料付着物調査**を実施し、実機データをもとにモデル評価結果を**検証**していくことが望まれる。

TOSHIBA