

(一社)日本原子力学会 水化学部会
第31回 定例研究会「プラント再稼働後の水化学」

WPE-OG-0944

この資料及びこの資料に基づく計算機並びに記録計等の出力を複写、第三者へ開示または公開しないよう願います。

新設プラント(ABWRプラント)向けの水化学の 取り組みについて

2017年10月13日

日立GEニュークリア・エナジー(株)

原C部 原化計

1. 新設プラント(ABWR)の主要仕様
2. ABWRプラント水化学管理の目的と方針
3. 環境線量率低減対策適用技術
4. 主な環境線量率低減対策
 - (1) 大気酸化処理
 - (2) Hi-Fコート
 - (3) 弁ステライト材料選定

1. 新設プラント(ABWR)の主要仕様_BWR変遷

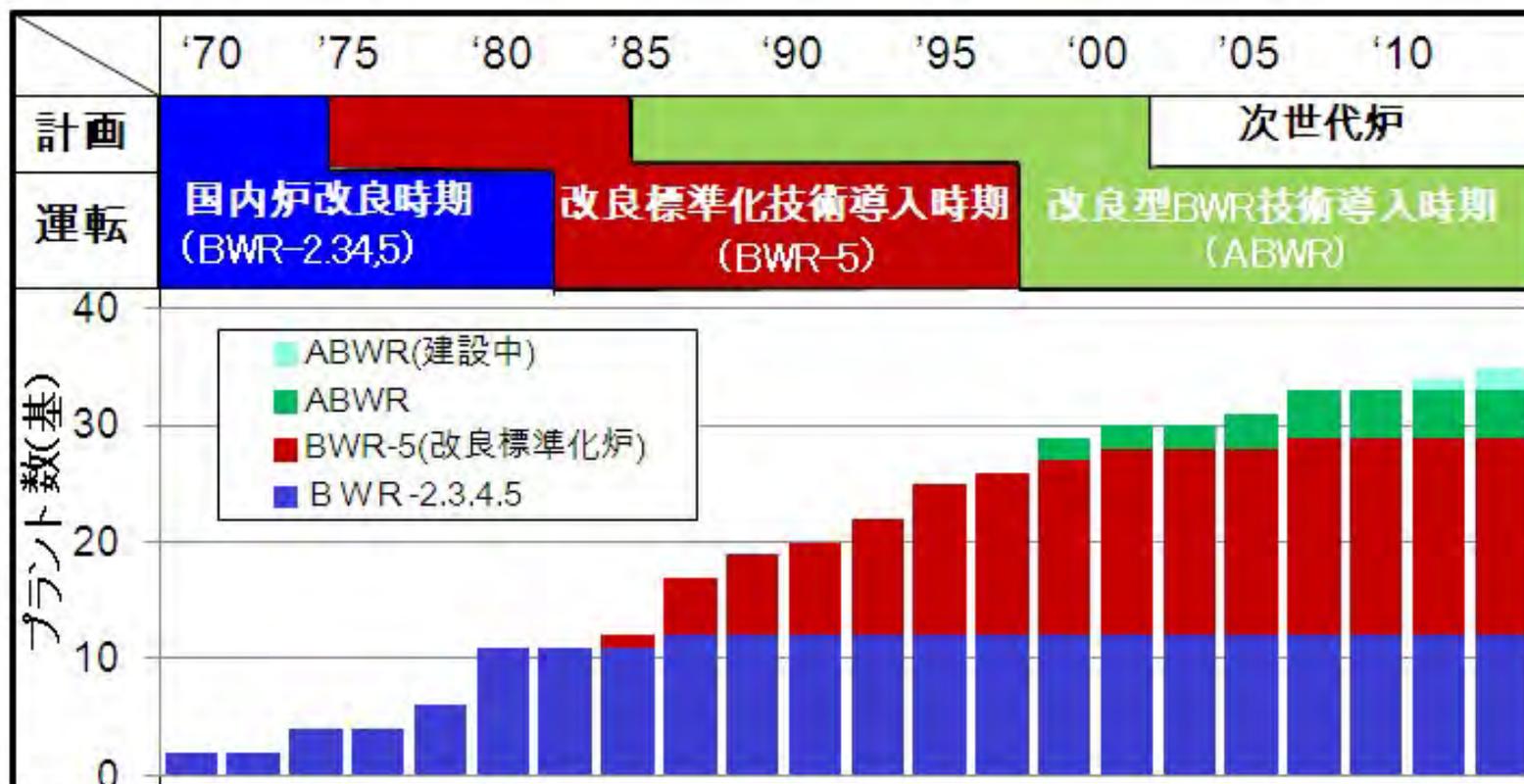


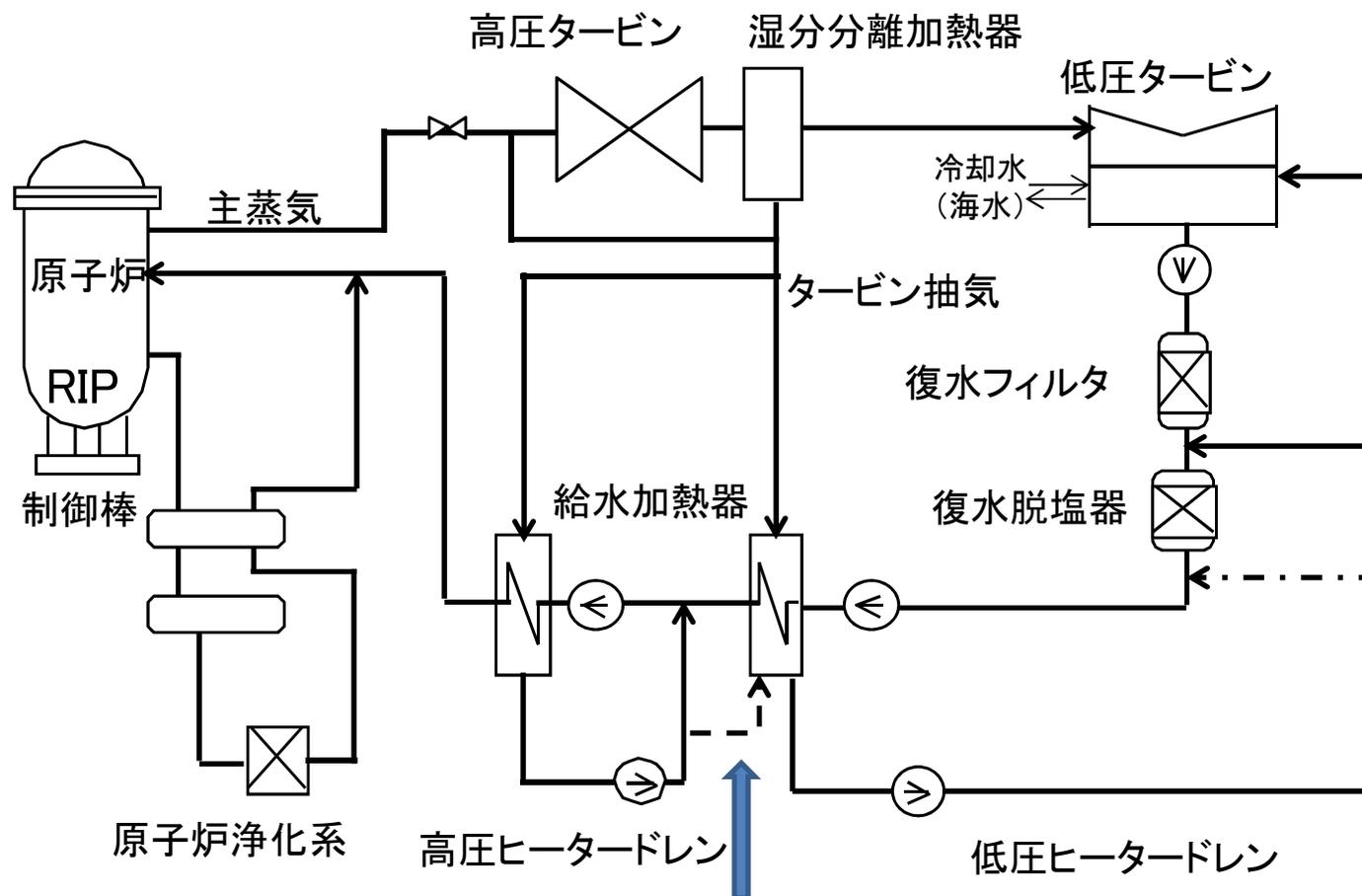
図 国内BWR技術改良の変遷

会沢、布施、佐藤、斉藤、石丸:「BWR被ばく線量低減技術と志賀第二原子力発電所(ABWR)の実績」
平成25年度火力原子力発電論文集 2014年4月

1. 新設プラント(ABWR)の主要仕様_設備

| 項目 | BWR-5 | ABWR | 備考 |
|-------------|-----------------|-----------|----------------------------------|
| 原子炉熱出力(MWt) | 3293 | 3926 | |
| 発電機出力(Mwe) | 1100 | 1356 | |
| 給水流量(t/h) | 6420 | 7600 | |
| 燃料集合体(体) | 764体 | 872体 | |
| 出力制御 | PLR+ ジェットポンプ | インターナルポンプ | ABWRはPLRが無い ためD/W内主線源はCUW、RHR |
| 制御棒駆動 | CRD | FMCRD | |
| CUW流量比 | 2% | 2% | |
| 復水浄化系 | CF+CD | CF+CD | |
| タービン系システム | カスケード方式 | ドレンアップ方式 | 図1参照 |

1. 新設プラント (ABWR)の主要仕様_タービンシステム



ABWR低圧ヒータードレンの回収先は
◆ 復水器 (BWR-5以前プラントと同じ)。
または
◆ 復水フィルタ入口。
この場合、復水脱塩器出口にも回収可能。

BWR-5以前プラントでは高圧ヒータードレンは低圧ヒータードレンに回収しているため、ヒータードレン系で溶出した金属不純物は復水浄化系で除去。(ABWRは炉内に直接混入)

ABWRプラント系統構成概略図

この資料及びこの資料に基づく計算機並びに記録計等の出力を複写、第三者へ開示または公開しないようお願い致します。

2. ABWRプラント水化学管理の目的と方針

【BWR 水化学管理の目的】

- 構造材料健全性維持
- 燃料被覆管健全性維持
- 作業員被ばく線量低減

ABWR水化学管理
は当面被ばく線量
を主体に推進



| 目的 | BWR-5以前プラント | ABWRプラント |
|------------|---|---|
| 構造材料の健全性維持 | <ul style="list-style-type: none">□ 材料、応力面で対策不十分箇所あり。□ 水質還元環境化推進（水素注入＋貴金属注入等） | <ul style="list-style-type: none">□ 材料、応力面での対策実施。□ 亀裂事例発覚、もしくは60年運転適用時、水質還元環境化検討 |
| 燃料被覆管健全性維持 | <ul style="list-style-type: none">□ 給水系からの金属不純物（Fe、Cu）持ち込み抑制管理 | <ul style="list-style-type: none">□ 給水系からの金属不純物（Fe、Cu）持ち込み抑制管理 |
| 作業員被ばく低減 | <ul style="list-style-type: none">□ 適切な被ばく低減対策の実施（ALARP*） <p>*: As Low As Reasonably Practicable)</p> | <ul style="list-style-type: none">□ 適切な被ばく低減対策の実施（ALARP*） <p>*: As Low As Reasonably Practicable)</p> |

2. ABWRプラント水化学管理の目的と方針_被ばく実績

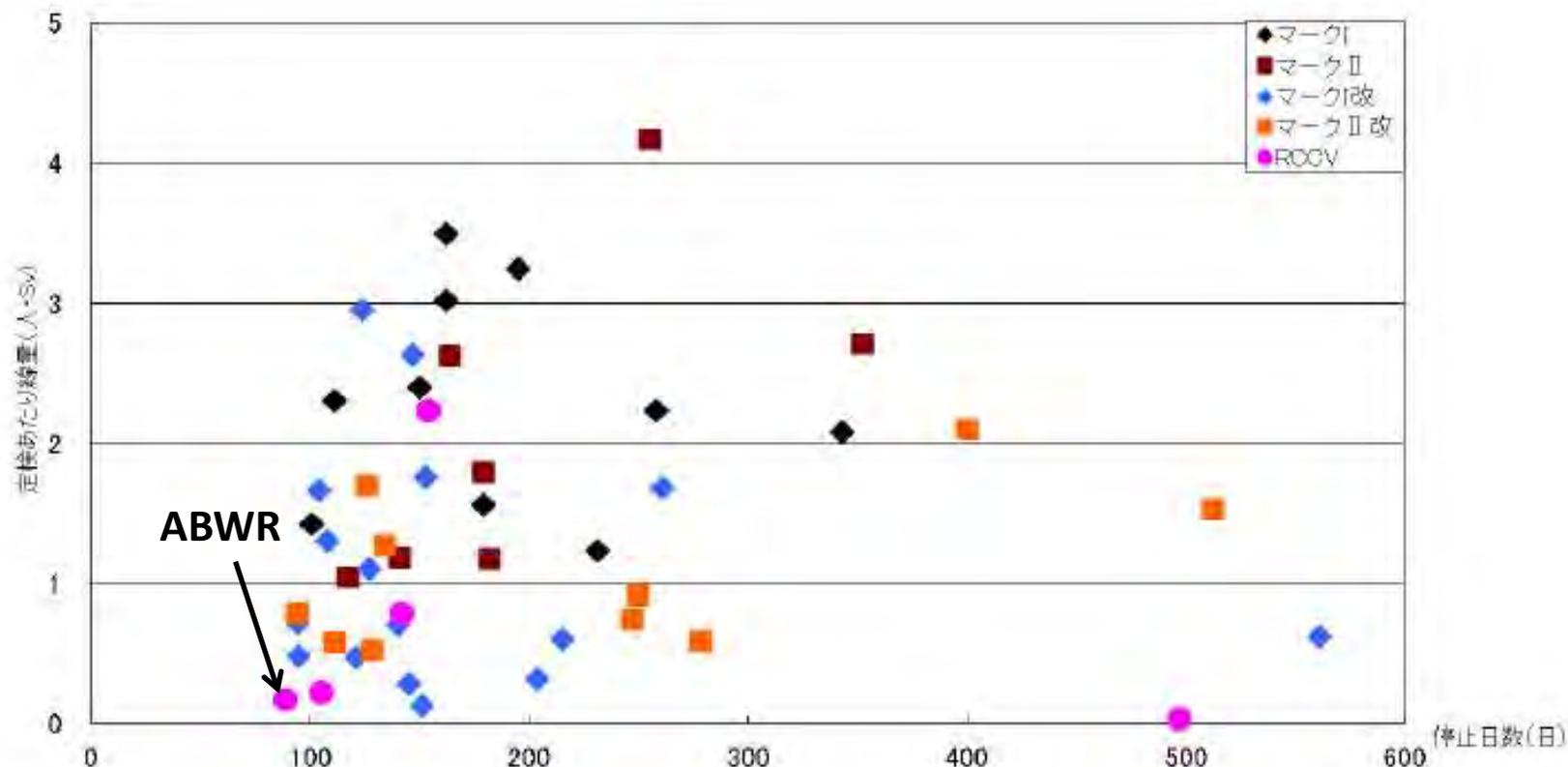


図 格納容器毎の停止日数と集団線量(国内BWR 2006年度～2008年度)【通常工事のみ】

「我が国の実用発電用原子力施設の集団線量の現状と放射線防護の最適化に向けて」
原子力安全・保安部会 放射線管理小委員会 平成22年11月

- RCCV(コンクリート製格納容器)であるABWRプラント被ばく線量は格納容器が広いこと、PLR系統が無いことから、従来プラントと比較して低い傾向にはあるが、大きな差は見られない。
- 以上より、ABWRプラントでも更なる被ばく低減対策推進が必要。

$$\text{被ばく線量} = \left\{ \text{環境線量率} \times (\text{作業時間}) \right\}$$

$$\text{環境線量率} \propto \text{放射能付着量 (配管・機器)}$$

$$\boxed{\text{放射能付着量}} \propto \boxed{\text{放射能付着速度}} \times \boxed{\text{放射能濃度}}$$

付着放射能除去
(化学除染等)

【放射能付着速度抑制】

1) ステンレス鋼

- 給水鉄濃度管理(極低鉄)
- Zn注入
- Hi-Fコート
- 表面平滑化(機械、電解研磨)

2) 炭素鋼

- アルカリプレフィリング
- 大気酸化処理
- RHR低温投入
- Hi-Fコート

【炉水放射能濃度低減】

1) Co持込み抑制

- 低コバルト材
- 弁ステライト材料適正

2) 燃料表面への放射能固定

- 給水鉄濃度管理
- Zn注入

3) 停止時炉水温度降下 緩和運転

3. 環境線量低減対策適用技術_ABWRへの適用

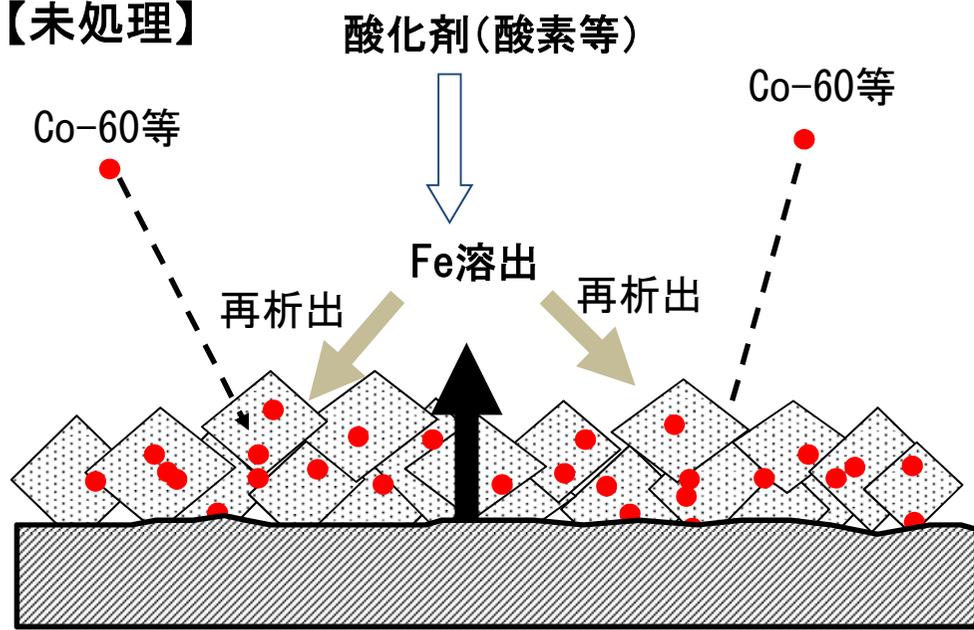
| 項目 | 被ばく低減技術 | BWR-5以前 ¹⁾ | ABWRプラント ¹⁾ | |
|--------|-------------|-----------------------|--|----------------------------|
| 線量低減対策 | クラッド発生抑制、除去 | 復水上流側耐食材 | ○ | ⇒ |
| | | 給水系酸素注入 | ○ | ⇒ |
| | | 定検時保管対策 | ○ | ⇒ |
| | | 復水浄化系2重化 | ○ | ⇒ |
| | 不純物除去 | 炉水浄化系 | ○(CUW 2%) | ⇒ |
| | 低コバルト材採用 | 給水加熱器伝熱管 | ○ | ⇒ + 高圧給水ヒーター-極低Co |
| | | 炉心材料 | ○ | ⇒ |
| | | 弁 | - | ステライト材料適正化 |
| | | その他ステンレス鋼 | ○ | ⇒ |
| | | 燃料支持ばね | ○ | ⇒ |
| | 水質管理 | 水質管理 | 給水鉄濃度管理 極低鉄(高Ni)運転 | 給水鉄濃度管理 |
| | 材料表面処理 | PLR、CUW配管表面処理 | アルカリプレフィルミング(PLR、CUW) 表面平滑化(電解、機械研磨(PLR)) | CUW配管製造時 大気酸化処理 |
| | 放射能付着抑制 | 化学除染+Hi-Fコート | ○(PLR配管施工) | CUW配管施工 |
| | 燃料表面安定化 | Zn注入 | ○ | -(水素注入+貴金属注入時適用) |
| | 運用改善 | RHR低温投入 | ○ | ⇒ |
| | | 停止時炉水温度降下緩和運転 | ○ | ⇒ |

注記1) ○:採用 -:未採用 ⇒ BWR5と同仕様

 : 本発表技術

4. 主な環境線量率低減対策_大気酸化(概念)

【未処理】



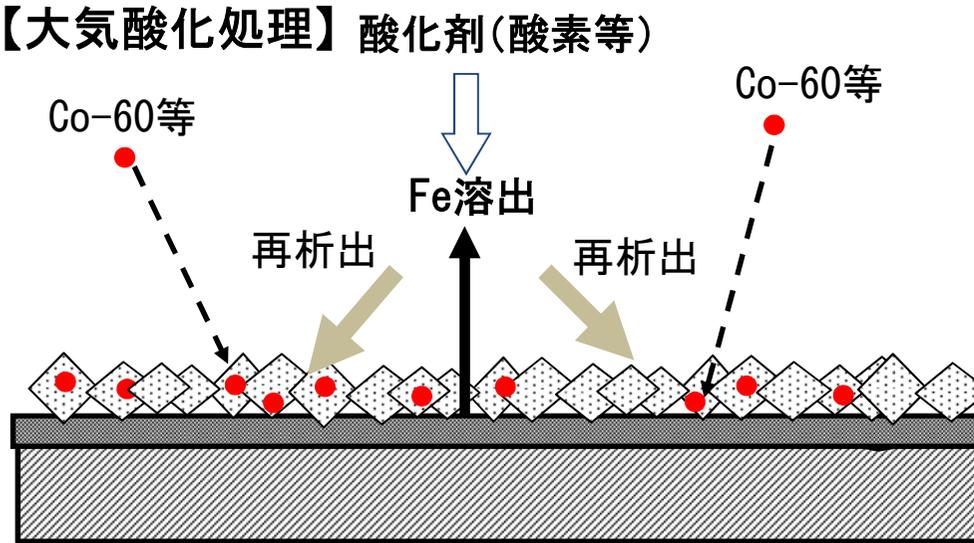
- 炭素鋼表面より溶出してFeが炉水中の酸化剤(酸素等)と反応して配管表面の再析出(酸化皮膜の形成)
- 酸化皮膜形成時、および酸化皮膜形成後に炉水中放射能(Co-60等)と取込む(放射能の付着)

炉水

酸化皮膜 (マグネタイト)

金属母材 (炭素鋼)

【大気酸化処理】



- 配管製造過程での大気酸化処理を行い配管表面に緻密な酸化皮膜を形成
- 大気酸化処理にて形成した酸化皮膜が保護皮膜として機能することで、母材からのFe溶出を抑制し、放射能付着を低減。

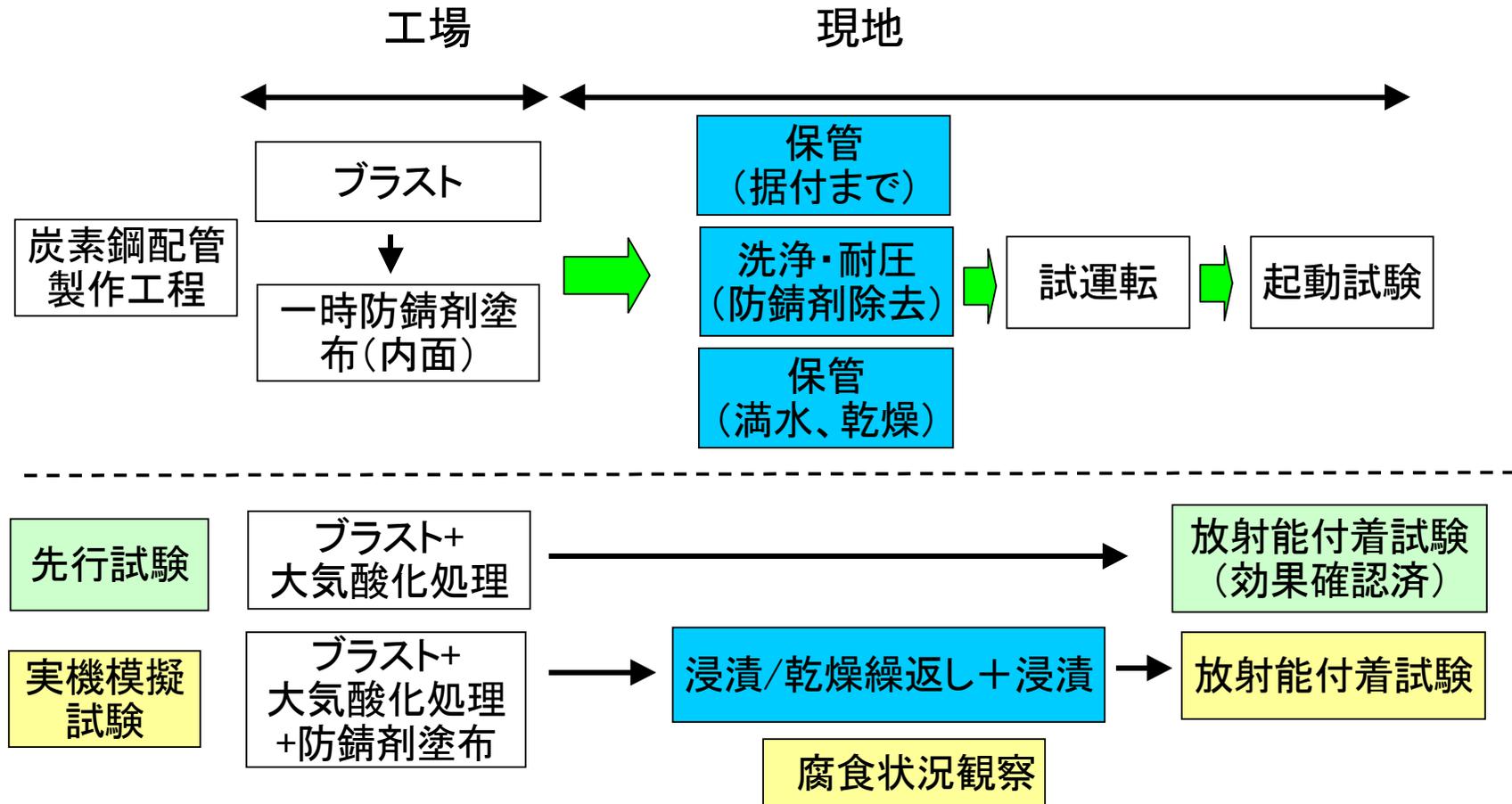
酸化皮膜 (マグネタイト)

大気酸化皮膜 (マグネタイト)

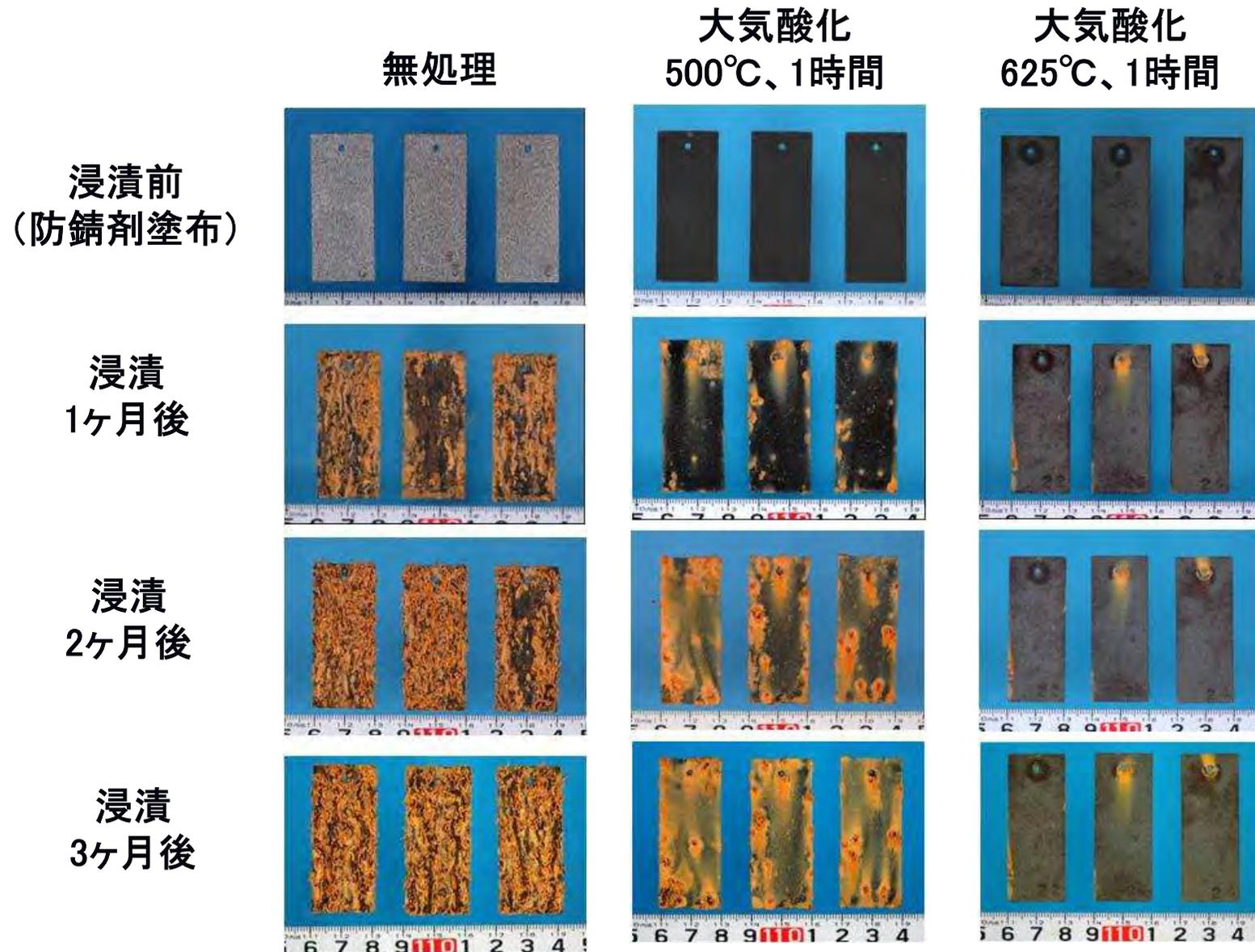
金属母材 (炭素鋼)

この資料及びこの資料に基づく計算機並びに記録計等の出力を複写、第三者へ開示または公開しないようお願い致します。

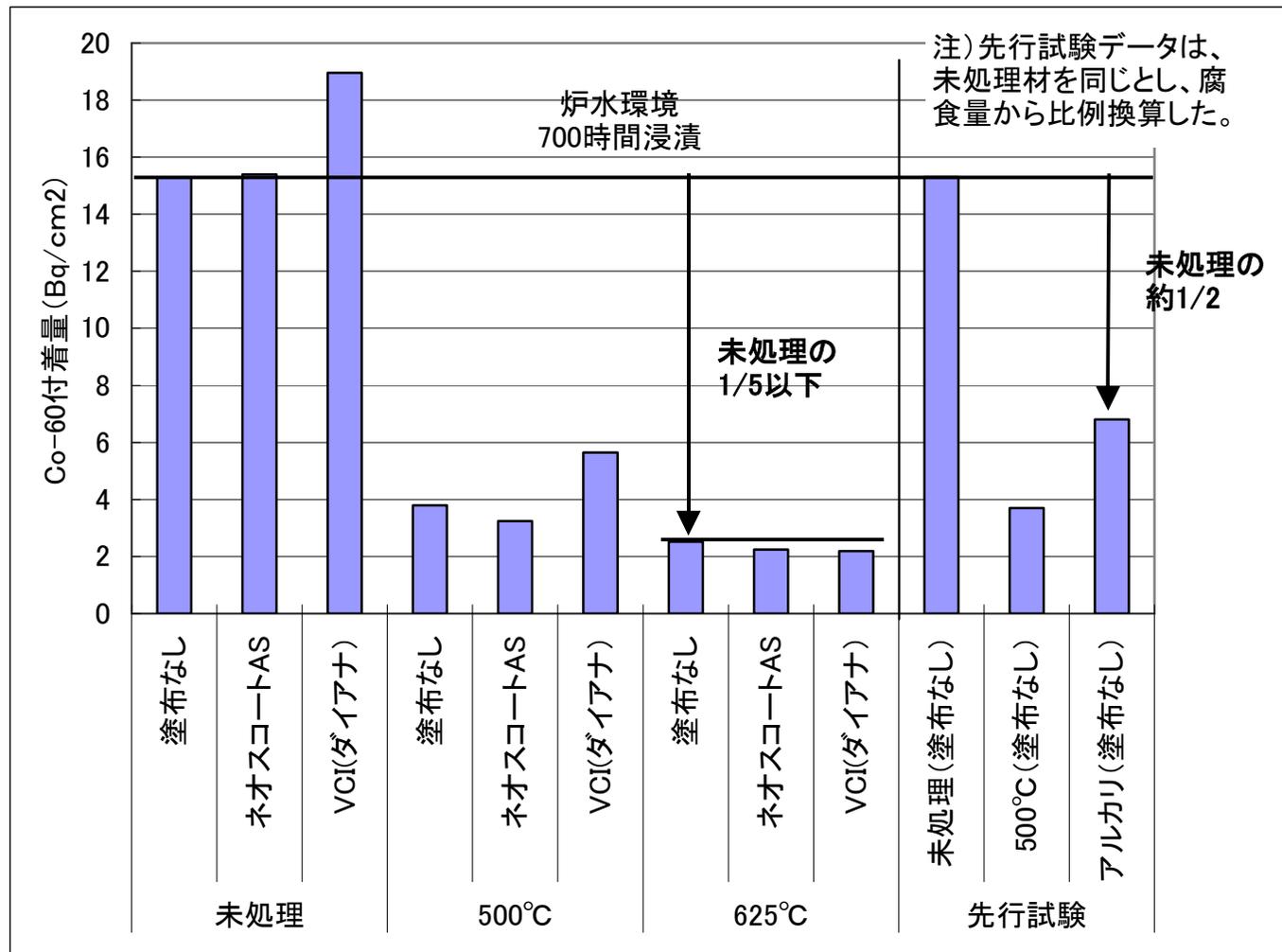
4. 主な環境線量率低減対策_大気酸化(処理条件)



4. 主な環境線量率低減対策_大気酸化(外観)



4. 主な環境線量率低減対策_大気酸化 (^{60}Co 付着量)



- 625°C(焼鈍条件) 1h処理で放射能付着量は未処理時と比較して1/5に低下
- 従来技術のアルカリプレフィルミングと比較しても1/2に低下

4. 主な環境線量率低減対策_Hi-Fコート(概念)

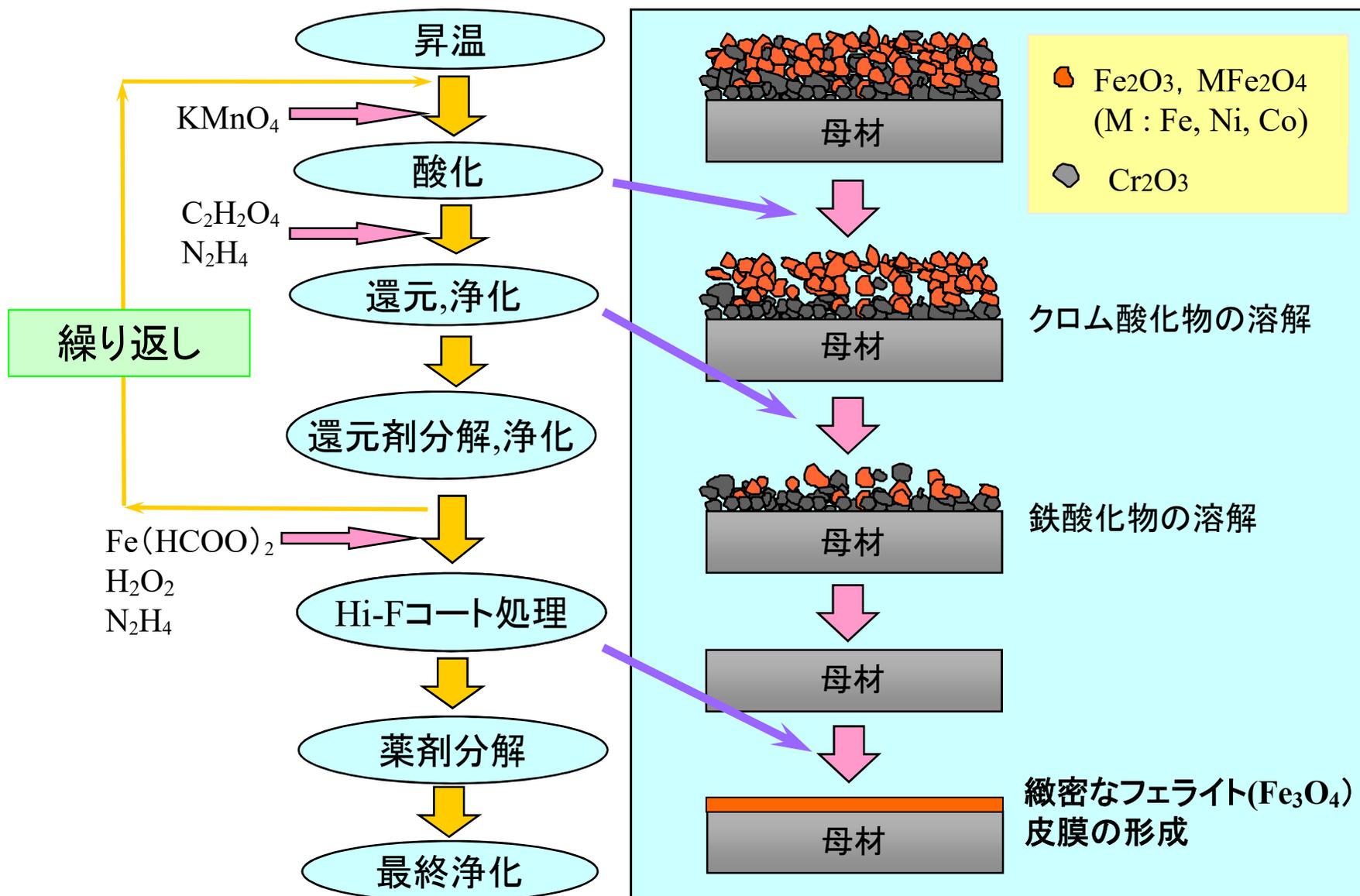
| | | Hi-Fコート皮膜 | 実機酸化皮膜 |
|--------|----|-------------------------|---|
| 化学形態 | 外層 | Fe_3O_4 | Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 、 $\text{Ni}(\text{Co})\text{Fe}_2\text{O}_4$ |
| | 内層 | — | CoCr_2O_4 、 Cr_2O_3 |
| 粒子サイズ | | $< 0.2 \mu\text{m}$ | $1 \sim 10 \mu\text{m}$ |
| 皮膜厚さ | | $< 0.5 \mu\text{m}$ | $3 \sim 10 \mu\text{m}$ |
| 皮膜形成温度 | | 90°C | 280°C |

再汚染抑制効果発現の原理

緻密な外層マグネタイト皮膜が、還元環境下で形成されるCoを取込み易い内層酸化皮膜(クロマイト)の形成を抑制

Hi-Fコート: Hitachi Ferrite Coatingから命名
特許出願済(特開2006-38483)

4. 主な環境線量率低減対策_Hi-Fコート(施工手順)

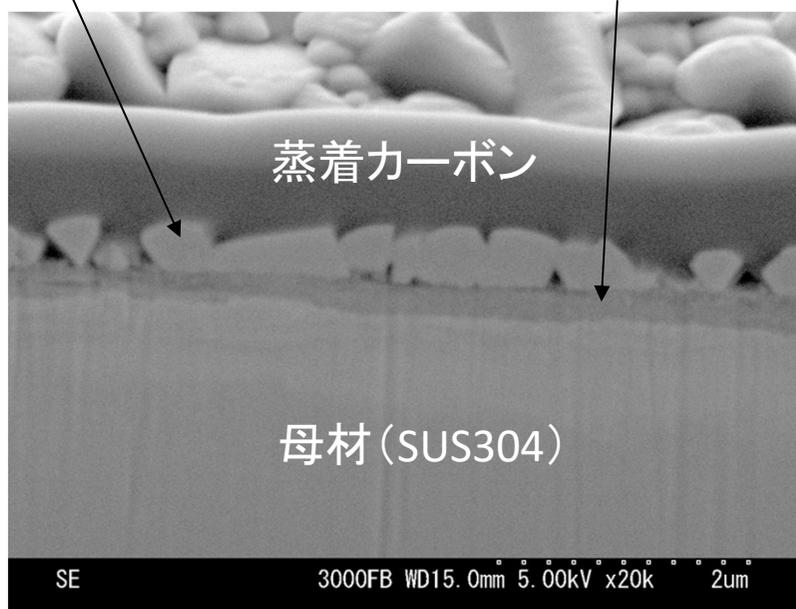


4. 主な環境線量率低減対策_Hi-Fコート(施工後断面)

ステンレス鋼ではマグネタイトの緻密な皮膜を形成(膜厚:約0.3 μ m)

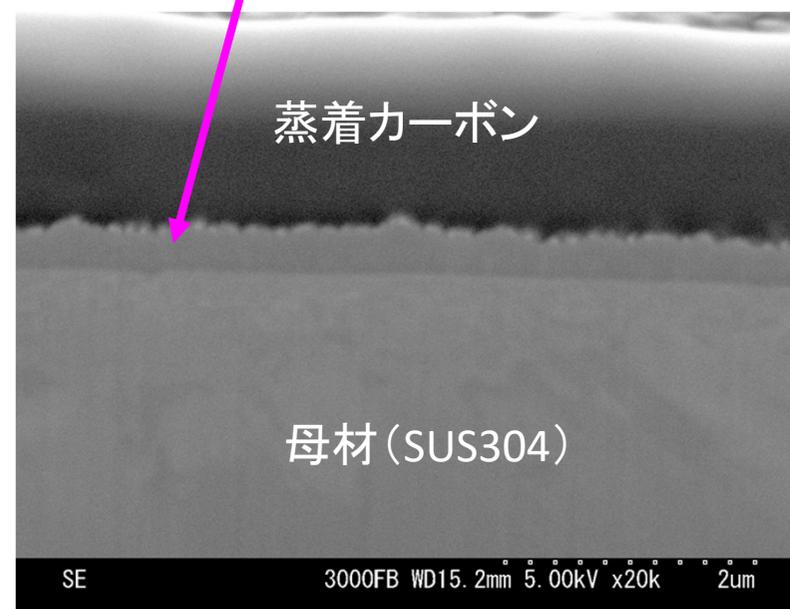
外層(マグネタイト粒子)

内層(クロマイト)



NWC環境200hの皮膜
(DO: 300 ppb)

コーティング層(マグネタイト)

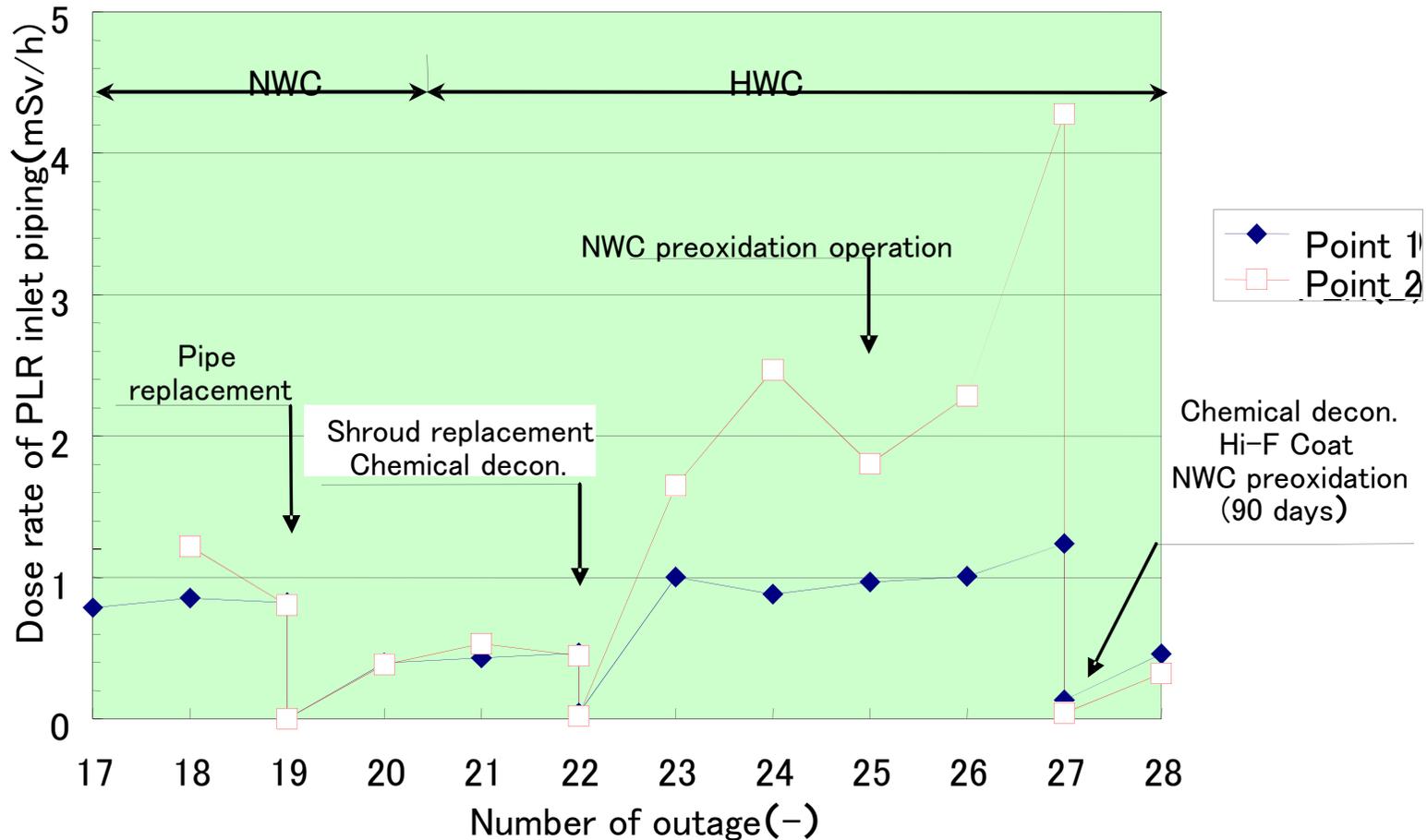


Hi-Fコートの皮膜

4. 主な環境線量率低減対策_Hi-Fコート (PLR配管(ステンレス鋼)線量率低減効果)

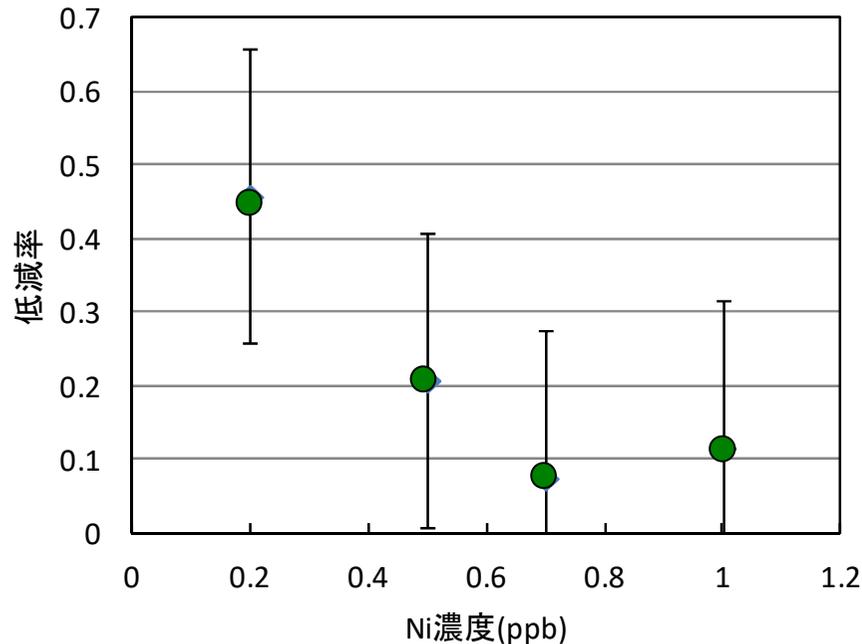
【ステンレス鋼へのHi-Fコート施工実績】

- 島根原子力発電所PLR配管に施工し、化学除染サイクルでの再汚染抑制効果を確認。



H. Matsubara et. al., "Development of Hi-F Coat for Carbon Steel Piping", 2010 ISOE Asia ALARA Symposium

4. 主な環境線量率低減対策_Hi-Fコート (CUW配管(炭素鋼)への適用)



コバルト付着低減率のニッケル濃度依存性
(亜鉛注入+NWC環境)*

$$\text{低減率} = 1 - \frac{\text{Hi-Fコート有のCo付着量}}{\text{Hi-Fコート無のCo付着量}}$$

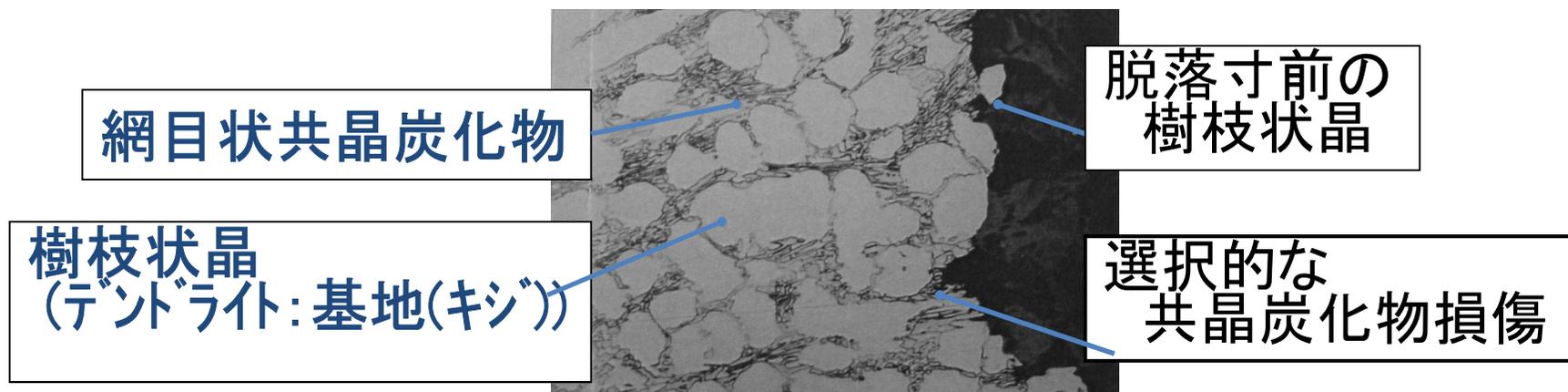
【炭素鋼配管へのHi-Fコート】

- 炭素鋼への施工性については確認済み
- 炭素鋼へ施工したHi-Fコートの低減効果は約1/2。ただし、炉水Niイオン濃度が高い条件ではCo-60取込み抑制効果が得られない。(左図参照)
- 炉水Niイオン濃度は給水からの鉄クラッドの持込み量の低下に伴い上昇するため、最適な給水鉄濃度管理を行い、炉水Niイオン濃度を下げることが、炭素鋼へのHi-Fコート効果面では重要。

*稲垣 他、Hi-Fコートによる炭素鋼へのBWR環境におけるコバルト付着の抑制、2017年春の年会、2106

■ 従来弁: 弁座にステライト™(Co基合金)肉盛

- ・弁座面あれ (腐食、エロージョン)
- ・弁座割れ (発生起点は腐食部)
- ・Co溶出  被ばくの主因
- ・Corrosion Bonding (安全弁設定圧ドリフト: NRC IN2006-24)

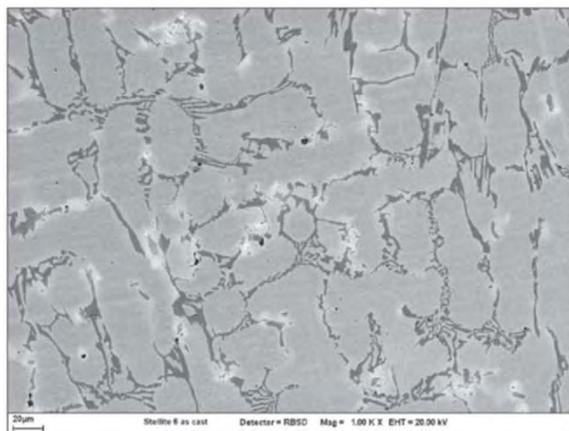


弁座(ステライト#6 溶着)の著しい面あれ発生部の断面SEM像
ヒ-外レン系弁座エロージョン損傷の例: 共晶炭化物の選択的な腐食と基地の脱落が進行中

4. 主な線量低減対策_弁ステライト材選定(耐食性)

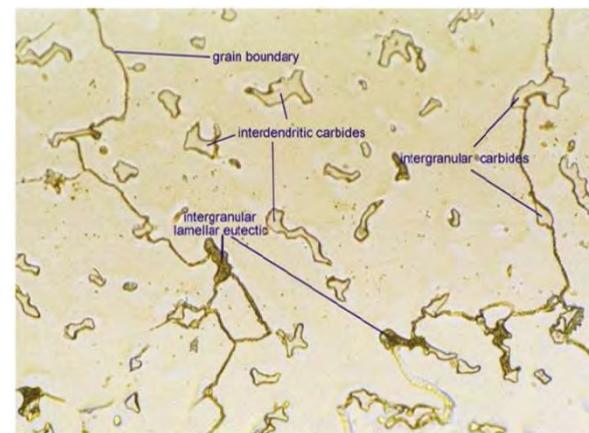
- Stellite #21はStellite #6に比べて耐食性が高く、Co溶出量は約1/3と評価。
(#6は炭化物相が連続相であるのに対し、#21は分散相)
- 弁摺動部での材質をStellite #6からStellite #21変更することはCo溶出抑制。
- 一次系の弁について、弁点検、Co溶出量評価でCo溶出量が多いと判断された弁 (Stellite #6) をStellite #21に交換することは環境線量率低減上 (Co低減) 有効。

ステライト#6



Scanning Electron Micrograph of Cast Stellite 6 at 1000x magnification.

ステライト#21



Optical Micrograph of a Stellite 21 investment casting (as-cast, etched, 200X). The carbides in Stellite 21 are usually of the type $(Cr, Mo, Co)_{23}C_6$.

ステライト#6, #21の金属組織の比較(Exocor社HPより)