

JANSI-WCH-001

技術報告書

プラント材料健全性維持高度化
(副資材管理及び長期保管手法) に関する調査

2023 年度最終報告書

2023 年 3 月

一般社団法人 原子力安全推進協会

原子力安全推進協会は本報告書の記載内容に対する説明責任を持つが、本報告書を使用することによって生じる問題などに対して一切の責任を持たない。

従って、本報告書の使用者は、関連した活動の結果発生する問題や第三者の知的財産権の侵害に対し補償する責任が使用者にあることを認識して、本報告書を使用する責任を持つ。

目次

	ページ
1. まえがき	1-1
2. 業務計画	2-1
2.1 業務目的	2-1
2.2 業務内容	2-1
2.2.1 清浄度管理と副資材の管理	2-1
2.2.2 プラント長期停止時の系統保管要領	2-1
2.2.3 まとめ	2-1
2.3 業務期間	2-1
2.4 業務体制	2-2
2.5 業務工程	2-2
3. 業務内容及び成果	3.1-1
3.1 清浄度管理と副資材の管理	3.1-1
3.1.1 清浄度管理方針	3.1-1
3.1.2 管理対象成分の選定	3.1-5
3.1.3 清浄度管理要領	3.1-8
3.1.4 洗浄と清浄度確認要領	3.1-23
3.2 プラント長期停止時の系統保管要領	3.2-1
3.2.1 系統毎の保管要領に関する考え方の整理	3.2-1
3.2.2 各種保管方法の整理	3.2-2
3.2.3 機器満水保管期間中の保管水水質確認要領	3.2-10
3.2.4 機器満水保管中器内作業時の保管水条件について	3.2-15
4. まとめ	4-1
4.1 清浄度管理と副資材の管理	4-1
4.2 プラント長期停止時の系統保管要領	4-2
5. あとがき	5-1
6. 参考文献	6-1

図表一覧

ページ

表 3.1.1-1	諸外国で確認された清浄度管理に関連する不具合事例数（1995 年以降）	3.1-1
表 3.1.1-2	国内で確認された清浄度管理に関連する主な不具合事例	3.1-3
表 3.1.1-3	諸外国で確認された清浄度管理に関連する具体的な不具合事例	3.1-4
表 3.1.2-1	損傷形態と発生しやすい箇所・材料	3.1-5
表 3.1.2-2 (1/2)	材料健全性に影響を与える元素材料健全性に影響を与える元素	3.1-6
表 3.1.2-2 (2/2)	材料健全性に影響を与える元素	3.1-7
表 3.1.3-1	管理区分設定で留意すべき点	3.1-11
表 3.1.3-2	副資材種別の例	3.1-13
表 3.1.3-3	副資材中の元素含有量の管理値設定における考え方の例 (1/2)	3.1-16
表 3.1.3-3	副資材中の元素含有量の管理値設定における考え方の例 (2/2)	3.1-17
表 3.1.3-4	特殊管理を行った方が良いと考えられる副資材の例	3.1-20
表 3.1.3-5	副資材分析手法の例	3.1-21
表 3.1.3-6	副資材の管理リストに記載することが望まれる項目例	3.1-22
表 3.2.1-1	各保管方法の適用機器の一例	3.2-1
図 3.2.2-1	炭素鋼の腐食に及ぼす溶存酸素の影響 ^[5]	3.2-3
図 3.2.2-2	満水保管条件での炭素鋼の腐食量 ^[6]	3.2-3
図 3.2.2-3	系統内の銅系材料によるヒドラジンの消費挙動 ^[7]	3.2-4
図 3.2.2-4	炭素鋼の腐食に及ぼす溶存酸素の影響（図 3.2.2-1 再掲） ^[5]	3.2-5
図 3.2.2-5	液膜と腐食速度の関係 ^[8]	3.2-7
図 3.2.2-6	相対湿度と重量増加量の関係 ^[8]	3.2-7
図 3.2.3-1	ヒドラジンによる満水保管時ヒドラジン濃度の変化（三菱社内データ）	3.2-11
図 3.2.3-2	実機プラント保管時ヒドラジン濃度の挙動の一例（系統隔離良好時）	3.2-12
図 3.2.3-3	実機プラント保管時ヒドラジン濃度の挙動の一例（系統隔離不十分）	3.2-13
図 3.2.4-1	酸素飽和水における保管水ヒドラジン濃度と炭素鋼の腐食速度の関係	3.2-16

略語表

略語	正式名称	備考
PWR	加圧水型原子炉 Pressurized Water Reactor	「PWR プラント」と記載した場合は「加圧水型原子力発電プラント」
BWR	沸騰水型軽水炉 Boiling Water Reactor	「BWR プラント」と記載した場合は「沸騰水型原子力発電プラント」
VVER	ロシア型加圧水型原子炉 Atomic Power Station with Water-Cooled and Water-Moderated Reactor (このロシア語表記から)	
NPC	水化学国際会議 International Conference on Nuclear Plant Chemistry	直後に記載される 4 桁の数字は開催年（西暦）を示す。
SCC	応力腐食割れ Stress Corrosion Cracking	塩化物イオンに起因するものを、別途 CISCC と記す。
PWSCC	PWR 1 次系における応力腐食割れ Primary Water Stress Corrosion Cracking	
IGA	粒界腐食 Inter Granular Attack	
CVCS	化学体積制御系統 Chemical and Volume Control System	国内 PWR での略称
SIS	安全注入設備 Safety Injection System	国内 PWR での略称
ECT	渦電流探傷検査 Eddy Current Test	
BP	ビジネスパートナー Business Partner	本報告書では、主に材料・配管・設備等を製作するメーカー、および発電所に立ち入る工事施工会社を指す。
INPO	原子力発電運転協会 Institute of Nuclear Power Operations	米国の機関
mdd	mg/dm ² /day	腐食速度の単位
IA	制御空気 Instrument Air	

用語の定義

用語	定義
清浄度	原子力発電プラント構成材料表面における、構成材料の腐食等の原因となりえる元素残存量
副資材	原子力発電プラント設備・機材の現地建設時、定期検査時、計画外停止時等の点検および補修等に使用する非金属資材、消耗品（使用により消耗する工具等を含む）
600 合金	Ni 基合金であるインコネル 600（商標名）
銅系材料	主成分として銅を含む材料

1. まえがき

原子力発電所の安全・安定運転の確保を目的に実施している水化学管理が、設備・機器のさらなる環境改善を進めるとともに、プラント性能確保等のニーズに調和的に応えるために、電気事業者は広範囲の管理項目や目標値を定めて管理を実施している。

このような水化学管理のうち、構成材料健全性に影響を及ぼすものとして外部からの不純物持込み影響が挙げられる。PWR プラントの場合、近年の水質管理高度化により、冷却材中の不純物濃度は低減されているが、一部のプラントでは冷却材中のフッ化物イオン濃度や硫酸イオン濃度の上昇が確認されており、持込み源として改造工事等で使用された副資材が疑われている。このため、今後の更なる水化学管理の高度化に対しては、副資材管理等を含む清浄度管理の高度化が重要となっている状況である。

また、2011年に発生した福島第一原子力発電所の事故をきっかけに国内の原子力発電所は長期間にわたり停止しているが、この長期間の停止期間中の不純物持込み影響を最小限に抑制するためには、適切な保管要領の策定が必要である。長期保管に関しては、一般的な手法が存在しており、一部、公開されているものもあるが、寒冷地では湿式保管が不適になるケースや酸欠事故防止の観点から大型機器の窒素シール保管が適用されないケース等、必ずしも統一されてはならず、電気事業者各社で個別に対応している状況である。

2. 業務計画

2.1 業務目的

本委託調査では、原子力発電所の更なる安全・安定運転に資するべく、副資材管理等を含む清浄度管理および長期保管手法について調査し、技術的な根拠や要領について整備する。

なお、調査は NPC2023 等の最新情報含む公開文献調査も実施する。

2.2 業務内容

本委託にて調査、検討を行う項目を以下に示す。

2.2.1 清浄度管理と副資材の管理

- (1) 清浄度管理方針
- (2) 管理対象成分の選定
- (3) 清浄度管理要領
 - a. 管理方法
 - b. 管理区分（対象系統区分）
 - c. 溶接管理要領
 - d. 副資材管理要領と副資材管理分析区分
- (4) 洗浄と清浄度確認要領

2.2.2 プラント長期停止時の系統保管要領

- (1) 系統毎の保管要領に関する考え方の整理
- (2) 各種保管方法の整理
- (3) 機器満水保管期間中の保管水水質確認要領
- (4) 機器満水保管中器内作業時の保管水条件について

2.2.3 まとめ

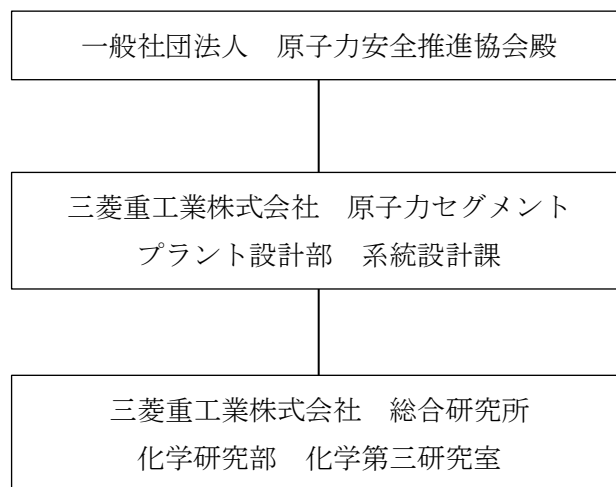
上記の検討結果の根拠となったバックデータ等の技術情報も含め資料化し、報告書としてまとめる。

2.3 業務期間

自 : 2023年5月18日

至 : 2024年3月18日

2.4 業務体制



2.5 業務工程

業務項目	2023 年度	
	上半期	下半期
清浄度管理と副資材の管理	■	
プラント長期停止時の系統保管要領	■	
まとめ	■	■
報告	▼ 中間	報告書提出 最終 ▼

3. 業務内容及び成果

3.1 清浄度管理と副資材の管理

3.1.1 清浄度管理方針

原子力発電プラントの主要系統を構成する材料は高温、高圧環境で使用されるケースが多く、構成材料の損傷はプラントの安全性に多大な影響を与える。この構成材料の損傷形態のうち、割れの発生・進展及び割れの発生につながる腐食は材料表面の化学的環境に大きく影響を受ける。そのため、構成材料の接液部のみならず、接液していない部分についても清浄な状態に保つ清浄度管理が重要となる。

表 3.1.1-1 に示した通り、諸外国（主に米国）の原子力発電所において、清浄度管理が不十分だったことにより、水質悪化や構成材料の損傷（主に割れ）等の不具合が多く発生しており、場合によってはプラント停止に至るケースも確認されている。近年では、過去に発生した不具合事例を教訓に清浄度管理が高度化されているものの、不具合の発生件数はそれほど減少していない。

従って、原子力発電プラントにおける清浄度管理の適正な実施、並びに継続的な見直しが重要である。

表 3.1.1-1 諸外国で確認された清浄度管理に関連する不具合事例数（1995 年以降）

発生年	発生件数	主な事例
1995～1999 年	14	CISCC, Cl 混入, 硫酸イオン混入
2000～2004 年	24	CISCC, Cl 混入, F 混入, 硫酸イオン混入, Na 混入
2005～2009 年	16	CISCC, Cl 混入, 硫酸イオン混入
2010～2014 年	14	CISCC, Cl 混入, Na 混入
2015～2019 年	13	CISCC, Cl 混入, Na 混入, 硫酸腐食
2020 年以降	9	CISCC, Cl 混入

※ INPO 情報より集計

国内外で確認された、清浄度管理が不十分であることに起因する不具合について、主な発生原因は以下の通りである。また、それぞれの具体的な事例のうち国内事例を表 3.1.1-2 に、海外事例を表 3.1.1-3 に示す。

- ・ 材料健全性に影響を与える元素（具体的な元素は 3.1.2 項参照）を多量に含んだ材料を使用した。
- ・ 工事の際に使用した副資材を排除し忘れて系統内に残留した。
- ・ 材料表面の洗浄が不十分で、材料健全性に影響を与える元素が残留した（環境起因の汚れのケースもある）。

以上の通り、材料健全性に影響を与える元素の付着、持ち込みを制限するためには、使用する副資材の元素含有量を制限するだけでは不十分であり、確実な洗浄や副資材を排除できなかった場合の影響まで考慮した管理が肝要である。

よって、原子力発電プラントにおいて、以下の点を考慮した清浄度管理の実施を推奨する。

なお、本報告書では材料表面を清浄に保つための洗浄管理と、不純物の持ち込みを制限する副資材の管理を合わせて清浄度管理と呼称している（場合によって副資材の管理を清浄度管理と別に扱う例もある）。また、このうち副資材の管理は、不純物による不具合防止のために重要な管理であるため、特に詳細に記載する。

【副資材の管理】

- ・ 材料健全性に影響を与える元素の含有量を制限し、制限を満足した副資材を登録・使用する。
- ・ 元素含有量の制限値については、資材が排除できなかった場合を考慮した十分に安全側の値（具体的な安全率はケースによって異なるが、管理上現実的な範囲で可能な限り高い安全率とすることを推奨する）とすることが推奨される。
- ・ 使用した資材は除去されることを前提とし、除去できたことを確認する方法を規定する（以下の洗浄管理と共通としても良い）。

【洗浄管理】

- ・ 材料健全性に影響を与える元素の付着残留量を制限し、制限を満足するための洗浄方法と、元素残留量の測定方法を規定する。
- ・ 洗浄管理は副資材の使用後だけでなく、工場での製作時、プラントへの納入時、設置済み設備の日常管理等、幅広い範囲に適用することが推奨される。

表 3.1.1-2 国内で確認された清浄度管理に関連する主な不具合事例

発生年	炉型	事象	要因	概要
1995	PWR	キャノピーシール漏洩	CISCC	<p>【製造時の清浄度管理不足】</p> <p>出力運転中に格納容器サンプル水位が漸増傾向を示したため、念のため原子炉を停止し詳細点検を実施。出力分布調整用制御棒駆動装置のキャノピーシール部に貫通割れが確認された。当該キャノピーシール部内の残留水から Cl が検出されたことから、塩化物起因の SCC が発生したものと考えられる。なお、Cl は工場製作時に持ち込まれた可能性が指摘されている。</p>
1996	PWR	CVCS 抽出配管漏洩	低融点金属割れ	<p>【製造時の清浄度管理不足】</p> <p>出力運転中に CVCS 抽出配管よりわずかな蒸気漏洩を発見したため、原子炉を停止して詳細点検を実施。エルボ腹側外面の事項方向に、貫通割れが確認された。また、貫通割れ部近傍に Zn の付着が確認された。エルボ製作工程で付着した Zn が、低融点金属割れを引き起こしたと考えられる。</p>
2000	PWR	充てん配管漏洩	CISCC (テープ SCC)	<p>【副資材の管理不足】</p> <p>定検時の点検において、充填ライン待機系配管に亀裂を確認。建設時に識別のために張り付けられた塩化ビニールテープが残留し、塩化物起因の SCC が発生したものと考えられる^[1]。</p>
2006	BWR	主蒸気圧力検出器漏洩	低融点金属割れ	<p>【清浄度管理不足】</p> <p>主蒸気圧力検出器付近からの水の漏洩を確認したため、当該検出器の元弁を閉止し、調査を実施。検出器の成型、加工を行う際に使用したハンダ (Bi, Pb, Sn, Cd など) がわずかに残留し、ハンダ成分である Bi による低融点金属割れを引き起こしたと考えられる。</p>

※ 引用文献がないものは「原子力施設情報公開ライブラリー (ニューシア)」より引用

表 3.1.1-3 諸外国で確認された清浄度管理に関連する具体的な不具合事例

発生年	発生国	炉型	事象	要因	概要
1997	ドイツ	PWR	SIS 配管割れ	CISCC (テープ SCC)	【副資材の管理不足, 清浄度管理不足】 建設時に SIS 配管に使用したポリ塩化ビニルテープの粘着成分が残留していた。これが運転中の高温により分解し、塩化物が生成され SCC を引き起こした。
2001	米国	PWR	中性子検出器 案内配管汚染	不適切な 副資材の使用	【副資材の管理不足】 中性子検出器案内配管から高濃度の Cl, F および SO ₄ が検出された。要因は拭取りに使用した副資材からの汚染と判断された。
2003	米国	PWR	2 次系 Na 濃度 急上昇	汚れ残留	【清浄度管理不足, BP への指示不十分】 ヒータドレンポンプを起動した直後、蒸気発生器 2 次側器内水中の Na 濃度が急上昇した。調査の結果、ヒータドレンポンプのメンテナンスを担当したメーカーが十分な洗浄を実施していなかったことが判明した。
2016	ハンガリー	VVER	Al シート残留	資材排除忘れ	【副資材の管理不足】 使用済燃料ピット冷却系統の弁点検時に、配管内部から Al の破片を発見した。これは配管の ECT 実施時に使用した Al シートを排除し忘れたものと判明。 当該発電所では持込資材のリストを作成していなかった。
2020	米国	BWR	ほう酸注入 配管割れ	CISCC	【副資材の管理不足】 保温材用接着剤に Cl が含まれており、SCC が発生した。

※ 「INPO 情報」より引用

3.1.2 管理対象成分の選定

原子力発電プラントにおいて、清浄度管理において考慮すべき材料損傷形態と、それぞれの損傷が発生しやすい箇所及び材料を表 3.1.2-1 に示す。また、それぞれの損傷形態に影響を与える元素を抽出し、三菱及び欧米基準の評価と共に表 3.1.2-2 にまとめた。

このうち、塩化物をはじめとしたハロゲン元素等による SCC が最も発生事例が多く、厳密な管理が必要である。特に、塩化物イオンは材料外面に付着した場合にも SCC を生じる事例が報告されており、最も厳密に管理する必要がある。また、塩化物イオンと同じハロゲン元素であるフッ化物イオンについては、システムの浄化設備で多く使用されている混床樹脂での除去が難しく、持ち込みによる影響が長期にわたって残留することもあり、近年は持込管理の必要性が高まっている。

表 3.1.2-1 損傷形態と発生しやすい箇所・材料

損傷形態	発生しやすい箇所・材料	事象の概要
応力腐食割れ (SCC)	<p>【箇所】 溶接部近傍</p> <p>Ni 基合金 (600 合金等) 使用部</p> <p>【材料】 オーステナイト系ステンレス鋼 Ni 基合金 (600 合金等)</p>	引っぱり応力, SCC を生じる材料, SCC が生じる環境が重なった際に発生する割れが発生, 進展する現象。 塩化物イオンをはじめとしたハロゲン元素に起因する報告例が多い。
粒界腐食 (IGA)	<p>【箇所】 濃縮環境 (沸騰条件の狭隘部)</p> <p>【材料】 Ni 基合金 (600 合金等)</p>	金属の結晶粒界が選択的に腐食する現象。 主に PWR の蒸気発生器 2 次系環境で問題となる事象である。
低融点金属割れ	<p>【箇所】 溶接部, 高温部</p>	低融点金属が高温部で液体化し, 液体金属と固体金属が接することで液体金属脆化を生じ, 割れが発生する。 溶接部等の高温部で母材金属と合金を形成し, 割れを生じる現象も低融点金属割れに含めている。

表 3.1.2-2 (1/2) 材料健全性に影響を与える元素材料健全性に影響を与える元素

元素	関連する損傷形態				材料への影響	参考	
	SCC	IGA	低融点金属割れ	その他		米国基準での評価 ^[2]	欧州基準での評価 ^{[3][4]}
Na	—	○	—	—	沸騰条件かつ狭隘部等で濃縮されることで pH が上昇する。これにより IGA が発生する恐れがある。 PWR の蒸気発生器 2 次側等の IGA を生じやすい材料を使用・高温・沸騰条件・狭隘部ありの条件にて特に問題となる。	濃縮苛性アルカリは PWR の蒸気発生器伝熱管の IGA の原因となる。	記述なし。
K	—	○	—	—	Na と同様に濃縮環境にて pH を上昇させる可能性があり、IGA の原因となる。	濃縮苛性アルカリは PWR の蒸気発生器伝熱管の IGA の原因となる。	記述なし。
Cl	○	—	—	○	主にオーステナイト系ステンレス鋼に対して、塩化物イオンに起因した ClSCC の原因となる。 過去に塩化物を起因とした損傷事例が多く報告されている。	イオン状の形態で SCC を引き起こすことが知られている。	オーステナイト系ステンレス鋼と Ni 基合金に対して SCC の原因物質となる。 また、低合金鋼でも応力腐食の可能性はある。
F	○	—	—	○	Cl と同じハロゲン元素であり、SCC の原因となる可能性がある。 混床樹脂で除去が難しい元素であり、系統内に持ち込まれた場合、長期にわたり残留、蓄積する可能性がある。	イオン状の形態で SCC を引き起こすことが知られている。	オーステナイト系ステンレス鋼と Ni 基合金に対して SCC の原因物質となる。 また、低合金鋼でも応力腐食の可能性はある。
S	○	○	—	○	S ²⁻ イオンは鋭敏化材料の SCC の原因となる可能性がある。	インコネル合金に対して IGA を起こす。 また、インコネル合金以外の Ni 基合金及びステンレス鋼の腐食割れに寄与する。	オーステナイト系ステンレス鋼と Ni 基合金に対して SCC の原因物質となる。 また、低合金鋼でも応力腐食の可能性はある。
Hg	—	—	○	○	低融点金属割れを引き起こす。 また、金属と接するとアマルガム化して、金属を侵食する恐れがある。	低融点金属割れを起こす可能性がある。 また、燃料被覆管に影響し、損傷を生じる可能性がある。	Ni 基合金及びジルコニウム合金に対して応力腐食を起こす可能性がある。 また、ステンレス鋼及び Ni 基合金の割れ腐食に寄与する。
Pb	○	—	○	○	低融点金属割れを引き起こす。 また、酸化物 SCC に寄与する可能性がある。	低融点金属割れを起こす可能性がある。 また、燃料被覆管に影響し、損傷を生じる可能性がある。	Ni 基合金及びジルコニウム合金に対して応力腐食を起こす可能性がある。 また、ステンレス鋼及び Ni 基合金の割れ腐食に寄与する。
Cd	—	—	○	○	溶接等の高温加熱時に他金属と合金を形成し、低融点金属割れを引き起こす可能性がある。	低融点金属割れを起こす可能性がある。 また、燃料被覆管に影響し、損傷を生じる可能性がある。	ステンレス鋼及び Ni 基合金の割れ腐食に寄与する。

表 3.1.2-2 (2/2) 材料健全性に影響を与える元素

元素	関連する損傷形態				材料への影響	参考	
	SCC	IGA	低融点金属割れ	その他		米国基準での評価 ^[2]	欧州基準での評価 ^{[3][4]}
Bi	○	—	○	○	溶接等の高温加熱時に他金属と合金を形成し、低融点金属割れを引き起こす可能性があり、国内でも損傷実績が報告されている。 また、酸化剤として電位を上昇させ、SCC 発生に寄与する可能性がある。	低融点金属割れを起こす可能性がある。 また、燃料被覆管に影響し、損傷を生じる可能性がある。	ステンレス鋼及び Ni 基合金の割れ腐食に寄与する。
Sn	—	—	○	○	溶接等の高温加熱時に他金属と合金を形成し、低融点金属割れを引き起こす可能性がある。	低融点金属割れを起こす可能性がある。 また、燃料被覆管に影響し、損傷を生じる可能性がある。	ステンレス鋼及び Ni 基合金の割れ腐食に寄与する。
Zn	—	—	○	○	金属 Zn は溶接等の高温加熱時に低融点金属を引き起こす可能性があり、国内でも損傷実績が報告されている。 ただし、影響があるのは金属形態に限定されるため、添加形態の確認が取れる場合は管理対象外としても良い。	低融点金属割れを起こす可能性がある。 また、燃料被覆管に影響し、損傷を生じる可能性がある。	事故時に水素放出の原因となる。
Sb	—	—	○	○	溶接等の高温加熱時に他金属と合金を形成し、低融点金属割れを引き起こす可能性がある。	低融点金属割れを起こす可能性がある。 また、燃料被覆管に影響し、損傷を生じる可能性がある。	ステンレス鋼及び Ni 基合金の割れ腐食に寄与する。
As	—	—	—	○	有毒物質であり取扱いに注意を要する。 副資材に含有する可能性は低い。	材料に損傷を与える（詳細記述なし）。	ステンレス鋼及び Ni 基合金の割れ腐食に寄与する。
In	—	—	○	—	溶接等の高温加熱時に他金属と合金を形成し、低融点金属割れを引き起こす可能性がある。	低融点金属割れを起こす可能性がある。 また、燃料被覆管に影響し、損傷を生じる可能性がある。	ステンレス鋼及び Ni 基合金の割れ腐食に寄与する。
Br	○	—	—	—	Cl と同じハロゲン元素であり、SCC の原因となる可能性がある。	記述なし。	オーステナイト系ステンレス鋼と Ni 基合金に対して SCC の原因物質となる。 また、低合金鋼でも応力腐食の可能性はある。
Cu	○	○	○	○	酸化物及びイオン状の形態で Ni 基合金の腐食電位を上昇させるため、腐食に関連する損傷形態に寄与する可能性がある。	材料に損傷を与える（詳細記述なし）。	ステンレス鋼及び Ni 基合金の割れ腐食に寄与する。

3.1.3 清浄度管理要領

本項では清浄度管理の手法についてまとめた。なお、ここでまとめた内容は三菱が推奨する一例であり、実際の清浄度管理手法はプラントの設計、運用方法等を踏まえたいえで適切に制定することが望ましい。

(1) 管理方法

ここでは清浄度管理の前提及び管理に必要な項目をまとめた。

a. 考慮すべき損傷形態

- ・ SCC
オーステナイト系ステンレス鋼や Ni 基合金使用箇所の問題となる。
特に塩化物をはじめとしたハロゲン元素起因の SCC
- ・ IGA
PWR の蒸気発生器 2 次側等の濃縮環境が存在する箇所の問題となる。
- ・ 低融点金属割れ
低融点金属が液体化するような高温部で問題となる。

b. 対象とすべき材料

- ・ オーステナイト系ステンレス鋼
耐食性が高く、多くのプラント構成機器や安全重要度が高い設備にも使用されている材料である。一方、CISCC 感受性を有し、また鋭敏化した場合は O₂SCC（溶存酸素に起因する SCC）の感受性も有する材料である。
- ・ Ni 基合金
耐食性が高く、特にオーステナイト系ステンレス鋼と比べて CISCC の感受性が低い点が優れている。一方、インコネル 600 合金は高い引張応力の下で PWSCC の感受性を有することが知られている。また高 pH や低 pH の特定の条件で IGA を生じることも知られている。
- ・ 炭素鋼，低合金鋼
材料健全性を損なう事象として最も考慮すべき SCC 感受性が小さいため、上記材料に比べると重要度は低い。ただし、使用量が多いこともあり、IGA 防止の観点からは清浄度管理が重要である。
- ・ その他の材料
その他の材料については、その材料が感受性を有する損傷形態に応じて管理対象とするか否かを判断する。

c. 管理上設定することが望まれる項目

- 対象設備の管理区分の設定

全てのプラント材料に同一の管理を適用すると、厳しい管理が不要な個所であっても過度に厳しい管理が必要となり、負荷が高くなると考えられる。よって、材料の種類、機器・配管の重要度、使用条件、副資材の使用量等に応じて管理区分を設定すると良い。管理区分設定の考え方は本項(2)を参照のこと。

- 管理対象副資材種別の設定

副資材として考慮すべき資材種別のリストを作成する。リストの一例は本項(4)を参照のこと。

- 副資材の成分含有量制限値の設定

材料健全性に影響を与える元素毎に、副資材中の含有量制限値を設定する。含有量制限値設定の考え方は本項(4)を参照のこと。

- 副資材の成分含有量分析方法の設定

分析方法設定の考え方は本項(4)を参照のこと。

- 使用できる副資材のリスト管理

元素含有量が制限値を満足している副資材をリストにより管理する。リスト管理の考え方は本項(4)を参照のこと。

(2) 管理区分（対象系統区分）

前項にて述べた通り，材料の種類，機器・配管の重要度，使用条件等に応じて管理区分を設定すると良い。また，副資材の管理の適用範囲を設定する際は，この管理区分設定と矛盾しないように留意しなければならない。

管理区分を設定する際に留意すべき点を表 3.1.3-1 に示す。

表 3.1.3-1 管理区分設定で留意すべき点

項目	留意点	備考 (PWR での例*)
材料の種類	<p>想定される損傷形態と、材料がその感受性を有するか否かによって区分する。</p> <p>例えば、SCC 防止の管理についてはオーステナイト系ステンレス鋼及び Ni 基合金を重点管理し、それ以外の材料の重要度は低くなる。</p> <p>CISCC 防止の観点からはオーステナイト系ステンレス鋼の管理が重要、等。</p>	<p>PWR では 1 次系はオーステナイト系ステンレス鋼、2 次系は炭素鋼が多いため、1 次系と 2 次系で管理区分を分けるのが良い。</p> <p>ただし、蒸気発生器の Ni 基合金は 1 次系と 2 次系の境界となっているため、1 次系/2 次系共通の管理が妥当であると考えられる。</p>
機器・配管の重要度	<p>機器・配管の安全性の重要度を基に区分する。</p> <p>例えば、放射能を含む冷却材を内包する系統については、配管損傷時の影響が大きいため、より安全側の管理が肝要となる。</p> <p>一方、放射能を含まない、圧力が低い、損傷してもプラント安全性への影響がない等の系統については、管理を緩和しても良いと考えられる。</p>	<p>PWR では 1 次系の圧力バウンダリを最重要管理箇所とするのが良い。</p> <p>一方、1 次系でも圧力が低い系統や、安全上の重要度が低い系統（廃棄物処理系統等）については、管理を緩和しても良い。</p>
使用条件 (温度)	<p>想定される損傷形態によっては、低温時にほとんど発生しないものもある。よって、既往知見等から損傷形態が発生する閾温度を設定し、運転温度によって管理を変更するのも良い。</p>	<p>通常運転温度 (使用温度) と最高使用温度が異なる系統については、設備の重要度を加味して管理区分を設定するのが良い。</p>
使用条件 (通水)	<p>常時通水されている箇所と、内部水が滞留する箇所では管理を変更するのも良い。</p>	<p>滞留箇所でも、キャビティフローが侵入する箇所は通水条件として扱う。</p>

* 材料と環境が同一の場合、BWR にも考え方を適用可能

(3) 溶接管理要領

溶接やろう付け作業は金属を溶かすという性質から、材料健全性に影響を与える元素を金属内に取り込んでしまう可能性がある。そのため、作業後の表面洗浄では材料健全性に影響を与える元素を十分取り除くことができず、損傷に至る可能性が懸念される。加えて、溶接やろう付け作業の入熱に伴う金属材料の膨張・収縮により、金属材料に応力が残留する可能性があるため、SCC 発生リスクが高くなると考えられる。

従って、溶接やろう付け作業に代表される、金属が溶解する温度となる作業においては、作業前・作業中および作業後の全ての工程において確実に材料健全性に影響を与える元素を除去しておく必要がある。溶接やろう付け作業等における材料健全性に影響を与える元素除去の留意事項を以下に例示する。

- ・ 溶接開先や熱影響部分は作業前に十分洗浄し、十分な清浄度とする。また、作業中においても清浄度が確保されるよう留意する。洗浄後の清浄度管理値および確認方法については 3.1.4 項に基づいて設定する。
- ・ 温度チェックのためのクレヨンやラッカー等を、溶接部・溶接開先およびその近傍に近づけてはならない。
- ・ 溶接やろう付けのすす、スラグおよびフラックスは完全に除去する。

(4) 副資材管理要領と副資材管理分析区分

a. 管理対象副資材種別の設定

プラント構成材料に接触する可能性がある副資材は、基本的に全て管理対象とすることが望ましい。具体的な副資材種別の例を表 3.1.3-2 にまとめた。

ただし、実運用において管理が難しいもの、例えば作業員の衣服や個人手配の小型工具といった全てを管理登録するのは現実的ではないものについては、構成材料に直接触れないこと、使用前に適切に洗浄すること、といった使用上の留意点を付記した上で、管理対象外とすることも検討する。

表 3.1.3-2 副資材種別の例

種 別	内 容
非金属性研磨剤類	ブラシ，ペースト，コンパウンド等
粘着製品	粘着テープ，接着剤等
薬品	
洗浄製品（脱脂含む）	洗浄用薬品を水に溶かして使用する場合を含む
塗料	
油	切削油等
切削用品	非金属製品
乾燥剤	
探傷検査剤類	PT，MT，UT，その他検査製品
グリース，潤滑剤等	
マーキング製品	マジック等
非金属性消耗品	
防錆剤	皮膜形成型，その他
水	洗浄水，試験水
パッキン・ガスケット類	
その他	上記に該当しないが，管理が必要なもの

b. 副資材の成分含有量制限値の設定

実際の副資材の管理においては、材料健全性に影響を与える元素（3.1.2 項参照）について、副資材中の含有量の具体的な管理値を定める必要がある。本項ではその管理値を設定する上で着目すべき点、考え方の例を以下および表 3.1.3-3 にまとめた。また、管理値を設定する上で参考となる文献の例を添付資料-1 にまとめた。

(a) 副資材中の元素含有量の管理値設定

副資材の管理を含む清浄度管理においては、使用された副資材が設備供用前に除去されることが重要である。その一方、副資材の除去手法を適切に定め、運用した場合においても、ヒューマンエラー等により副資材が残留する可能性を否定することはできない。

よって、副資材中の材料健全性に影響を与える元素含有量は、副資材が残留しても材料健全性に影響を与えない量とすることが、プラントの安全性向上および安定運転において望ましい。その観点から、各材料健全性に影響を与える元素について、副資材中の含有量管理値の設定で考慮すべき点を以下にまとめた。

イ. ハロゲン元素および S

Cl や F 等のハロゲン元素、および S はオーステナイト系ステンレス鋼等の SCC の原因となることが知られている。副資材の管理において、これらの元素含有量を規定する場合、「接液部」および「非接液部」の両面から管理値を設定する必要がある。

管理値を設定する上で留意した方が良い点を以下に例示する（詳細は表 3.1.3-3）。なお、この例は可能な限り安全側に管理するためのものであり、実運用難しい点がある可能性も考えられるため、実際は実機実績や副資材の使用条件等を基に、才良健全性に影響がないことを確認した上で、実現可能な設定とすることが肝要である。

【接液部】

- ・ 系統内部（接液部）に副資材が残留したことを想定する。
- ・ 残留量を仮定するために、現実的な副資材の使用量*を規定する。
- ・ 系統内に残留した副資材が全量溶解し、系統水中に移行するものとする。
- ・ 系統水の水質管理仕様を逸脱しない元素含有量を管理値とする。
- ・ 使用量の設定が難しい（工事によって大きく変動し、代表値が決められない）等、管理値の設定が困難な場合は、実機実績や公開知見、海外規定等を参考にするのも良い。

【非接液部】

- ・ 非接液部に付着した副資材を除去できなかった場合を想定する。
- ・ 残留量を仮定するために、現実的な副資材の使用量*を規定する。
- ・ SCC が生じない各元素の表面濃度を公開文献等から引用し、この濃度を超えない元素含有量を管理値とする。
- ・ 使用量の設定が難しい（工事によって大きく変動し、代表値が決められない）等、管理値の設定が困難な場合は、実機実績や公開知見、海外規定等を参考にすることも良い。

ロ. 低融点金属**

低融点金属は金属形態で他の金属材料と接触した状態で、高温にさらされると低融点金属割れを生じる恐れがある。一方、低融点金属元素であっても酸化物形態やイオン状であれば低融点金属割れに寄与することはない。従って、低融点金属の管理対象としては系統内面および機器・配管外面の双方とする必要はあるが、含有量管理値はハロゲン元素および S にて述べた 2 つの観点のうち、非接液部と同様の考え方に基づいて設定することを推奨する。

ただし、低融点金属の含有量管理値を設定するための公開文献は乏しいため、実際には先行プラントの実績等を参考にするのが良いと考えられる。

ハ. アルカリ元素

Na や K のようなアルカリ元素（NaOH や KOH のようなアルカリ化合物になり得る元素）が系統水中に存在した場合、沸騰条件下で狭隘部に濃縮されることで、濃縮部の pH が上昇し IGA を生じる可能性が考えられる。

このメカニズムから、アルカリ元素が問題になるのは系統水中にイオン状で存在する場合に限定される。よって、アルカリ元素の含有量管理値は、ハロゲン元素および S にて述べた 2 つの観点のうち、接液部の観点が重要である。また、系統内に沸騰条件となる箇所が存在しない場合（例えば PWR の 1 次系）は、(2)項で述べた管理区分（対象系統区分）の設定において、アルカリ元素を管理対象外とする区分とするのも良い。

* 副資材毎に異なる管理値を設定するとヒューマンエラーにつながる懸念があるため、使用量の多い副資材を代表として管理値を設定することを推奨する。ただし、この考え方で設定した管理値は厳しい値となる可能性があるため、場合によっては個別の管理値を設定する、あるいは使用可否を個別に評価することが有効である。

**低融点金属割れ以外の腐食事象に影響を与える可能性がある元素については、別途検討が必要。

表 3.1.3-3 副資材中の元素含有量の管理値設定における考え方の例 (1/2)

元素	対象箇所	管理値設定の考え方の例
ハロゲン元素 および S	接液部	<ul style="list-style-type: none"> ・ 接液部に付着した副資材が高温にさらされることで溶解し、含まれているハロゲン元素および S が系統水中に溶出すると想定する。 ・ 管理値の設定に当たっては、接液部に残り残される可能性がある副資材の量を仮定し、その副資材が全て溶解したケースを想定するのが安全側管理となる。 ・ 副資材が溶解した結果として上昇した系統水中のハロゲン元素および S 濃度が、その系統水の水質管理として定められている水質仕様値を超過しないよう、副資材中の含有量管理値を設定することを推奨する。 ・ 使用量の設定が難しい（工事によって大きく変動し、代表値が決められない）等、管理値の設定が困難な場合は、実績実績や公開知見、海外規定等を参考にするのも良い。
	非接液部	<ul style="list-style-type: none"> ・ 材料表面に付着・残留した副資材が、高温にさらされることで分解（水溶化）すると想定する。 ・ 管理値の設定に当たっては、材料表面に付着・残留する可能性がある副資材の量を仮定し、その副資材が全て分解したケースを想定するのが安全側管理となる。 ・ 副資材が分解した結果、材料表面に残留したハロゲン元素および S の表面濃度が、SCC 発生の閾表面濃度を超過しないように、副資材中の含有量管理値を設定することを推奨する。 ・ なお、ハロゲン元素のうち Cl については SCC 発生に対する定量的な知見が多く報告されているが、それに比べて他のハロゲン元素や S については同知見が少ないため、管理値の設定が難しい可能性が考えられる。その場合は、Cl の管理値を十分安全側としたうえで、他のハロゲン元素や S についても同じ管理値とするのも有効であると考えられる。 ・ ただし、Cl の管理値を過度に安全側とした場合、使用できる副資材が極端に制限される可能性も考えられるため、実工事において使用される／使用しなければならない副資材を精査した上で、現実的な管理値とすることを推奨する。 ・ 使用量の設定が難しい（工事によって大きく変動し、代表値が決められない）等、管理値の設定が困難な場合は、実績実績や公開知見、海外規定等を参考にするのも良い。

表 3.1.3-3 副資材中の元素含有量の管理値設定における考え方の例 (2/2)

元素	対象箇所	管理値設定の考え方の例
低融点金属	接液部 非接液部	<ul style="list-style-type: none"> ・ 接液部に残留した低融点金属元素が系統水中に溶解した場合、低融点金属元素はイオン形態となり低融点金属割れに寄与することはない。よって、低融点金属元素の副資材中の含有量管理値は材料表面に付着・残留した場合のみを考慮すればよい。 ・ ハロゲン元素およびSの非接液部と同様に、副資材中の低融点金属元素含有量管理値については、材料表面に付着・残留し得る副資材の量を仮定し、そこに含まれる低融点金属元素量が低融点金属割れに寄与しない値とするのが良い。 ・ ただし、低融点金属元素がどの程度残留した場合に低融点金属割れが発生するかという閾値については、具体的な値を報告している例は乏しいため、低融点金属元素が元素分析で検出されないことを管理値としている例もある。 ・ ただし、低融点金属が一切含まれないことを前提とした場合、経験上使用できる副資材が極端に少なくなり、実工事に悪影響を及ぼす可能性が懸念される。 ・ よって、具体的な副資材中の低融点金属元素含有量の管理値は、先行プラントの管理実績を基に設定するとしても良いと考える。
アルカリ元素	接液部	<ul style="list-style-type: none"> ・ アルカリ元素は系統水中に溶存した上で、狭隘部において濃縮することでIGAに発生の原因となる。そのため、接液部に持ち込まれるアルカリ元素量を管理ことが重要である。 ・ よって、ハロゲン元素およびSの非接液部と同様に、副資材中のアルカリ元素含有量管理値については、接液部に取り残される可能性がある副資材の量を仮定し、その副資材が全て溶解したケースを想定するのが安全側管理となる。 ・ 副資材が溶解した結果として上昇した系統水中の不純物濃度が、その系統水の水質管理として定められている水質仕様値を超過しないよう、副資材中の不純物含有量管理値を設定することを推奨する。 ・ 使用量の設定が難しい（工事によって大きく変動し、代表値が決められない）等、管理値の設定が困難な場合は、実機実績や公開知見、海外規定等を参考にするのも良い。 ・ なお、系統内に沸騰条件となる箇所が存在しない場合（例えばPWRの1次系）は、(2)項で述べた管理区分（対象系統区分）の設定において、アルカリ元素を管理対象外とする区分とするのも良い。

(b) 副資材からの溶出元素量の管理

前項で述べた通り，副資材中の元素含有量の管理において副資材が残留した場合を考慮して管理値を設定することで，十分に安全側管理を行うことができると考えられる。

一方，この管理は安全側管理ということもあり，厳しい管理値であることは否定できない。そのため，機能要求の観点および調達性の観点から，入手できる副資材の全てが元素含有量の管理値を満足せず，副資材の調達ができなくなることで実工事に多大な影響を及ぼす可能性も考えられる。そこで，副資材中の元素含有量の管理よりも比較的現実的な管理方針を別途定めておくことを推奨する。

その1つの例が副資材からの溶出元素量の管理である。これは，副資材が使用される，あるいは残留する可能性がある環境において，その副資材が溶解・分解しないことが確実な場合に限り，副資材中に含まれる元素の全量ではなく，系統水中に溶出し得る元素量を管理するものである。副資材からの溶出元素量の管理について，その管理方針および管理値の設定において考慮すべき点を以下にまとめた。

- ・ 対象とする副資材が使用あるいは残留する可能性がある環境において，その副資材が溶解・分解する可能性がある場合は，この管理を適用してはならない。
- ・ 軽水炉を対象とした管理である場合，水溶性成分の溶出量を管理すればよい。
- ・ 対象となる元素はイオン状成分として材料健全性に影響を与える元素とする（すなわち，低融点金属元素は対象外としても良い）。
- ・ 各元素の管理値は，副資材から元素が溶出し得る形態を想定し，その溶出した元素濃度がその系統水の水質管理として定められている水質仕様値を超過しないように設定する。
- ・ 管理値の設定が困難な場合は，実機実績や公開知見，海外規定等を参考にするのも良い。

(c) 管理値を満足しなかった場合の対応

前述した副資材中の元素含有量の管理，および副資材からの溶出元素量の管理で大部分の副資材は管理登録できると想定されるが，それでもそれぞれの管理値を満足しない副資材を使用せざるを得ない状況は否定できない。

その場合は，その副資材を使用する実際の状況，その副資材が残留した場合の影響等を1件毎に評価し，材料健全への影響が問題ないことを確認する。した上で，その用途に限り使用可といった限定条件を付記して使用を許可することを推奨する。

(d) 特殊管理を行った方が良い副資材

副資材の管理においては基本的に全ての副資材に対して同一の基準を用いた管理とすることが実運用上のミス低減につながり有益であると考えられる。その一方、あえて別途特殊管理を行った方が良いと考えられる副資材もある。その一例を表 3.1.3-4 に示す。

表 3.1.3-4 特殊管理を行った方が良いと考えられる副資材の例

副資材	特殊管理を行う理由	管理方法例
水	<p>プラント設備（仮設設備を含む）の試験水については、副資材として扱う必要がある。</p> <p>その一方、洗浄水については副資材を除去する目的にも用いられるため、厳密には副資材とは言えない。</p> <p>ただし、試験水と洗浄水を個別管理とした場合、管理の煩雑化を招き、ヒューマンエラーにつながる懸念があるため、特殊管理として別途管理方法を定めることを推奨する。</p>	<p>3.1.4 項にて後述する通り、イオン状で材料健全性に影響を与える元素の含有量毎に区分した水質管理仕様を設定し、その中で試験水として使用できる区分を設定する。</p>
パッキン・ガスケット類	<p>パッキン・ガスケット類は系統に設置された状態で設備が供用されるという使用目的から、他の副資材のように設備供用前に排除することができない。</p> <p>一方、パッキン・ガスケット類はその使用環境において溶解・分解することはなく、使用箇所以外に残留する可能性がほとんどない。よって、副資材中の元素含有量の管理を実施する意味合いは小さく、副資材からの溶出元素量の管理のみの適用で良いと考えられる。</p>	<p>前述した副資材からの溶出元素量の管理を実施する。</p> <p>構造および使用状況から、接液部が金属のみであるものについては、管理対象外としても良い。</p>

c. 副資材の成分含有量分析方法の設定

副資材中の材料健全性に影響を与える元素含有量が、前述の管理値を満足しているかを確認するため元素分析を実施することとなるが、その手法をあらかじめ定義しておくのが実際の管理上有効であると考えられる。

副資材は種別により固体のものと液体のものが存在するが、燃焼／溶解等の前処理を行い元素分析に適した液体サンプルとして分析を実施するのが一般的である。従って、液体サンプルを作成するための前処理手法と、元素分析手法の双方を定義しておくことを推奨する。ただし、技術の進歩により新たな分析手法が開発された場合等には、柔軟に最新手法を取り込めるよう定期的に手法の定義を見直すことを推奨する。

前処理手法および元素分析手法の例を表 3.1.3-5 に示す。

なお、前処理および元素分析を外注するケースを想定すると、過度に分析手法を限定する（例えば元素と分析手法を 1 対 1 で紐づける等）のは推奨しないが、分析手法を変更する場合や、外注先を変更する場合は室間テストを実施し、変更後の分析が有効であることを確認する必要がある。

一方、前処理については手法が異なると分析結果に大きな影響を与える懸念があるため、可能な限り限定することを推奨する。

表 3.1.3-5 副資材分析手法の例

前処理手法	元素分析手法
ボンブ燃焼法 マイクロ波加熱分解 燃焼気化吸収 溶解・アルカリ融解 他	イオンクロマトグラフ法 原子吸光光度法 還元気化原子吸光光度法 ICP 発光分光分析法 ICP 質量分析法 他

d. 使用できる副資材のリスト管理

ここまで述べてきた副資材の管理において、管理値を満足した副資材は使用しても良いという扱いとなる。しかし、工事の度に使用する副資材の元素含有量を分析して使用可否を判断するのは現実的ではない。

よって、元素含有量の管理値を満足し使用しても良い、となった副資材をリスト管理することで、工事の都度元素含有量を分析することなくその後の工事で使用できるようにするのが有効である。ただし、リストに登録された副資材はその後いつまでも使用できるとするのではなく、期限を定めて定期的に再分析を実施し、元素含有量が管理値を満足しているかを確認することを推奨する。

このリスト管理において、リストに記載することが望まれる項目を表 3.1.3-6 に例示する。

なお、工事に携わる BP に本リストを提示し、リストにある副資材のみを使用するよう要求（リストにない副資材を使用した場合は申し出てもらい、改めてリスト登録する等）すれば、統一した副資材の管理が可能である。

表 3.1.3-6 副資材の管理リストに記載することが望まれる項目例

項目	備考
副資材種別	表 3.1.3-2 参照
副資材名	製造メーカー、商品名、型番等の詳細を含む
使用箇所	使用される設備等
元素分析結果	分析結果の詳細を別途作成し、参照する方式も良い
溶出元素量分析結果	同上 溶出元素量分析を実施した場合に限る
個別評価結果	個別評価を実施した場合に限る 評価結果の詳細を別途作成し、参照する方式も良い
使用条件	溶出元素量分析や個別評価を実施した場合に限る
使用期限	再分析実施時期

3.1.4 洗浄と清浄度確認要領

材料健全性に影響を与える元素による損傷を防止するためには、これまで述べた副資材の管理と共に、材料健全性に影響を与える元素が材料表面に残留しないように洗浄・除去し、清浄度を適切に維持することが重要である。

本項ではこの洗浄と清浄度の確認について、管理方法を策定する際の考え方をまとめた。

(1) 洗浄水の管理

材料健全性に影響を与える元素の除去手法としては、水洗や薬品を用いた脱脂、機械的な研磨による除去等の手法が考え得られる。このうち、脱脂や機械的な研磨については先に述べた副資材管理により適切な薬品・工具を用いることとなる。

一方、水洗に用いる洗浄水については、材料健全性に影響を与える元素（水溶性成分のみでよい）の含有量を規定しておく必要がある。理想的には全ての洗浄水を純水相当の清澄な水とするのが良いが、これは造水能力の制限等の問題が生じる可能性があり現実的でない。そこで、実際には3.1.3項(2)にて述べた管理区分に応じて、使用できる洗浄水のグレード（純水、復水、水道水など）を区別しておくのが良いと考えられる。

(2) 管理区分に応じた洗浄方法の設定

3.1.3項(2)にて述べた管理区分に応じて、使用できる洗浄水のグレード、洗浄を実施するタイミング等を詳細に設定することを推奨する。特に、製造・加工・据付工程における洗浄タイミングについては、据付前の最終工程のみの洗浄でよいのか、それとも製造・加工・据付の全ての工程に渡って都度洗浄を実施すべきなのかを明確にしておくことを推奨する。

また、設備の特徴（面積の大小、狭隘部の有無、メンテナンス性等）を考慮し、水洗、脱脂、機械的な研磨といった洗浄方法の適用対象を定めておくのが有効である。

(3) 清浄度の確認

設備表面の洗浄後、少なくとも設備供用前には、表面の清浄度が十分であることを確認する必要がある。清浄度の確認方法の例を以下に記すが、設備の形状に応じて適切な手法を設定することが肝要である。

- ・ ふき取り面積が十分に大きいもの
→スミヤガーゼ等を用いたふき取り＋元素分析
- ・ ふき取り面積が小さいが浸漬可能なもの
→浸漬状態での煮沸＋元素分析

なお、清浄度の管理値については、副資材中の元素含有量の管理値を設定した際に用いた知見を使用して設定することが望ましい。

3.2 プラント長期停止時の系統保管要領

3.2.1 系統毎の保管要領に関する考え方の整理

PWR 2次系機器・配管の保管方法は、プラント停止時のプラント状態、定検中の点検工事の状況によって異なるが、主に以下の4通りに分類される。

- (1) 湿式保管 ヒドラジン水保管（脱気純水保管）
- (2) 乾式保管 窒素ガス封入保管
- (3) 乾式保管 乾燥空気循環保管
- (4) 乾式保管 自然乾燥保管

三菱の電力殿提案において、PWRの蒸気発生器2次側では湿式保管、復給水系統では乾式保管を基本としている。各保管方法の代表的な適用機器を表3.2.1-1に示す。

PWRの蒸気発生器2次側では、伝熱管健全性の観点から、当該部環境の還元性維持を目的に、湿式保管（ヒドラジン水保管）を適用している。一方、復給水系統では、開放点検、定検工事等による系統隔離が困難な系統が多く湿式保管の維持が難しいため、乾式保管を採用することが多い。ただし、乾式保管に比べて満水保管の方が機器材料の腐食を抑制できるため、復給水系統にあっても系統隔離が可能な場合には、極力湿式保管の適用が望ましい。

表 3.2.1-1 各保管方法の適用機器の一例

保管方法		適用機器（例）
湿式保管	ヒドラジン水保管	蒸気発生器（2次側），低圧給水加熱器水室側， 高圧給水加熱器水室側
乾式保管	窒素ガス封入保管	脱気器，（蒸気発生器気相部）
	乾燥空気循環保管	高圧タービン，低圧タービン，湿分分離加熱器
	自然乾燥保管	復水器，抽気・ドレン配管，ポンプ類

3.2.2 各種保管方法の整理

(1) 湿式保管 ヒドラジン水保管（脱気純水保管）

a. ヒドラジン水保管ができる系統の場合

気相部の窒素シールが可能または気相が無く隔離可能な系統では、脱酸素剤のヒドラジン（ N_2H_4 ）を添加した満水保管により、保管水中の溶存酸素は除去される。このとき、水の pH は弱アルカリ性に保持され、炭素鋼、低合金鋼の腐食速度は低く保たれる。

図 3.2.2-1 は炭素鋼の腐食に及ぼす溶存酸素の影響を水の流動の有無で比較したものである⁵⁾。静止水（図中 0 m/s に相当）の低溶存酸素条件（1 ppb 相当）における腐食速度は、約 1 mdd 程度と低く保たれる。ここで、図中の腐食速度の単位 mdd は $mg/dm^2/day$ を表している。鉄の場合、1 mdd が約 $4.6 \mu m$ /年に相当し、1 年程度の長期であっても健全に機器保管できる。

なお、何らかの理由でヒドラジンが使用できない、あるいは使用を避ける場合は脱気純水での保管も選択肢となる。図 3.2.2-2 に示す通り、脱気純水保管はヒドラジン保管と比較するとわずかに腐食速度が速いものの、空気飽和水（静止水）と比べるとはるかに低い腐食速度となる⁶⁾。なお、同図より空気飽和水であっても循環条件であれば腐食速度を低く保つことができるが、長期に渡り系統内を循環条件に維持することは現実的でない⁷⁾と判断し、ここでは割愛している。

b. ヒドラジン水保管ができない系統の場合

ヒドラジン水保管時に気相が生成して隔離できない系統では、機器、配管材料の腐食抑制並びに運用、管理の軽減の観点から乾式保管を適用することが望ましい。例えば、系統中のヒータに銅系材料が含まれる場合や、系統中のスラッジに酸化銅が存在する場合には、系統内のヒドラジンが消費されて保管水中のヒドラジン濃度が低下する。図 3.2.2-3 に銅系材料によるヒドラジンの消費挙動を示す⁷⁾。系統内に銅系材料がない場合には、一般にヒドラジン濃度の減少は緩やかだが（上図）、銅系材料がある場合には減少が比較的早い（下図）。

そのほか、人体への健康影響の観点では、ヒドラジン自体に発がん性の恐れがあることが報告されている。そのため、ヒドラジンの使用量を削減してアンモニアを添加する管理手法も存在する。系統内の酸素濃度を低く保ちつつ、アンモニアで高 pH を維持することで機器、配管の腐食速度を小さくできる。

例えば、運転停止後に脱気した補給水で保管する場合には、ヒドラジンの低濃度添加および系統隔離の適用で、低濃度ヒドラジン+アンモニアでの保管が可能である。そのほか、運転停止直後の系統水で酸素がない場合には、そのままアンモニアで pH を高く維持して系統隔離する処理も可能である。

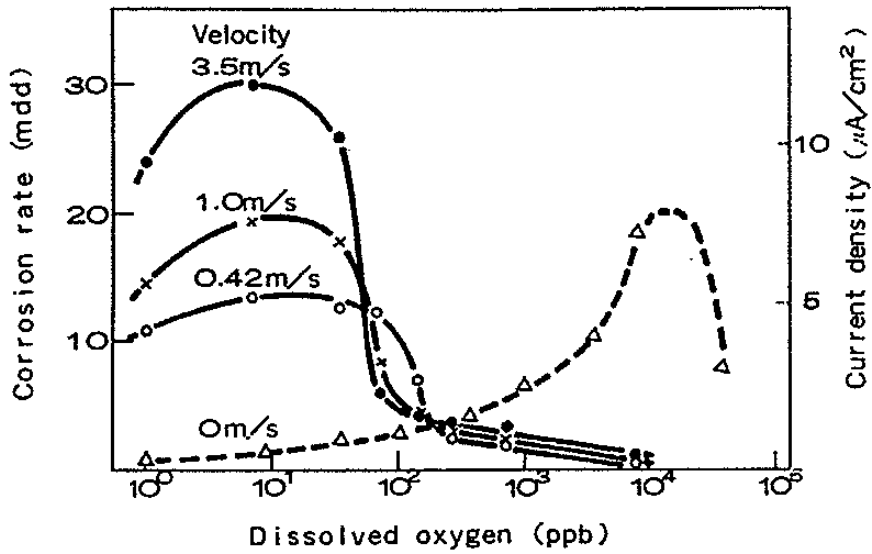


Fig. 5. Relationship between corrosion rate of carbon steel (SB 46) and dissolved oxygen concentration. $33 \pm 2^\circ\text{C}$, specific conductivity $< 0.5 \mu\text{S}/\text{cm}$, immersion periods 500 hours.

図 3.2.2-1 炭素鋼の腐食に及ぼす溶存酸素の影響^[5]

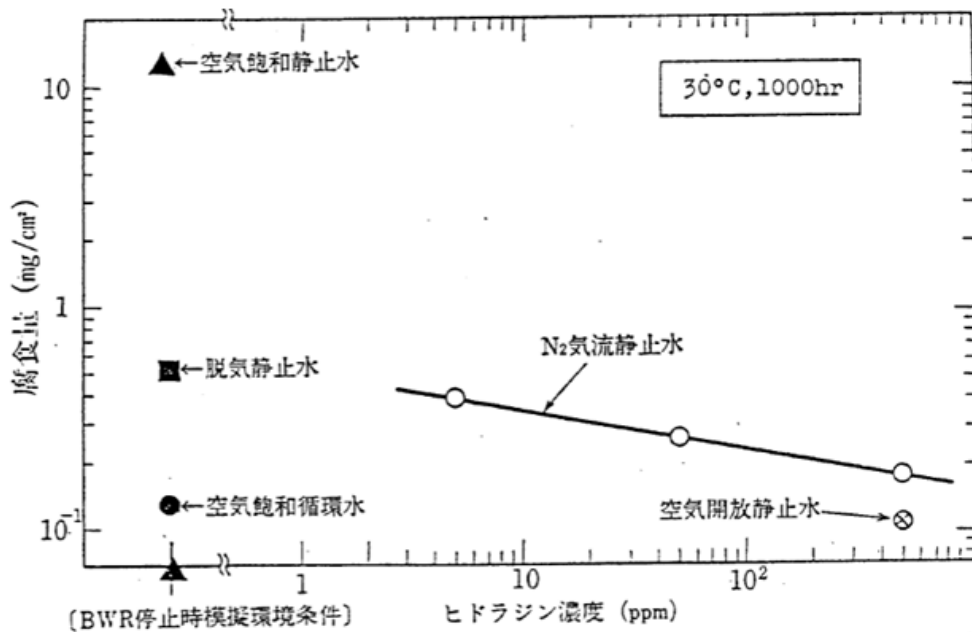


図 3.2.2-2 満水保管条件での炭素鋼の腐食量^[6]

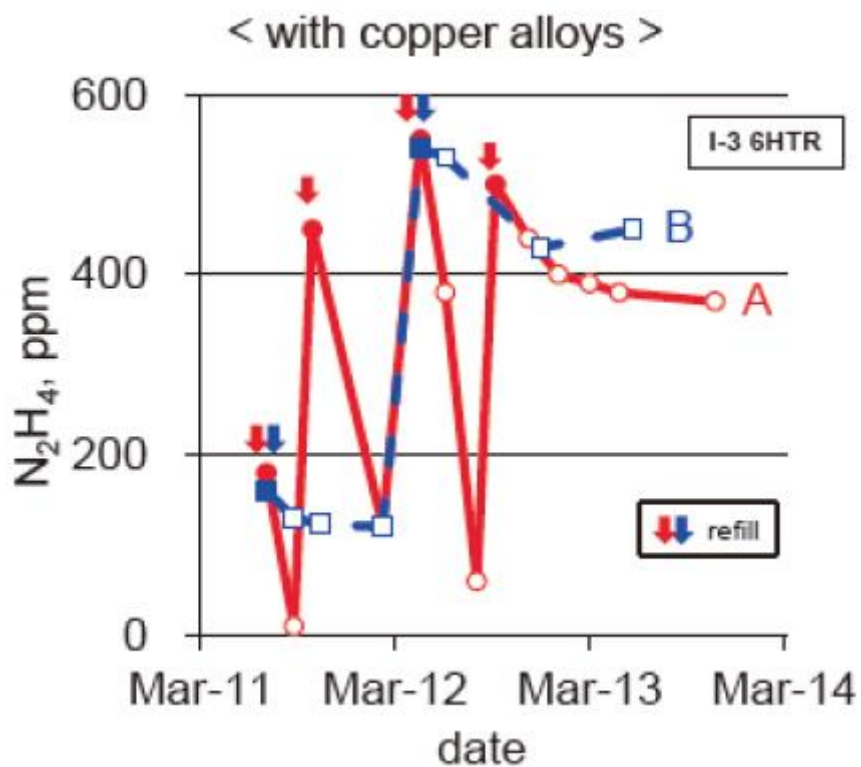
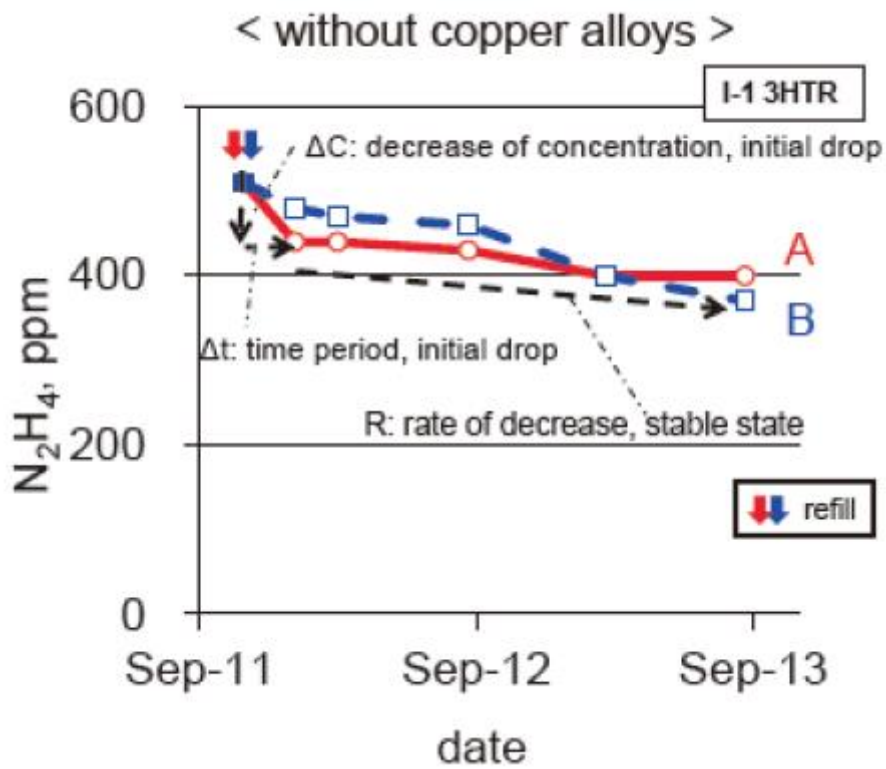


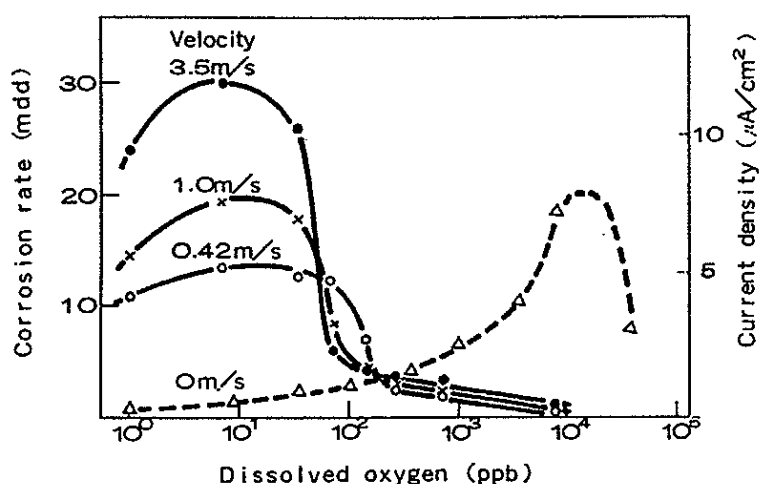
図 3.2.2-3 系統内の銅系材料によるヒドラジンの消費挙動 [7]

(2) 乾式保管 窒素ガス封入保管

窒素ガス封入保管は、系統内を窒素雰囲気中に置換して鋼材表面への酸素供給をなくすことで、腐食を抑制する方法である。湿式保管から窒素封入保管への切り替え時、並びに窒素ガス封入保管期間中には、系統内表面の水分の有無に関わらず、鋼材の腐食を小さく抑えられる。

保管初期には、残留した少量の酸素によって僅かな初期腐食を生じる可能性があるが、残留酸素消費後の腐食は窒素中の不純物酸素によるものとなる。このとき、酸素濃度は空気中の 1/200 以下（水中溶存酸素濃度では数十 ppb 以下程度）のごく低い水準である。

図 3.2.2-4（前述図 3.2.2-1 と同図）では、炭素鋼の腐食に及ぼす溶存酸素の影響を水の流動の有無で比較している⁵⁾。窒素ガス封入保管時の鋼材表面は静止水（図中 0 m/s に相当）に相当し、この条件での腐食速度は約 1 mdd 程度に抑えられる。



Relationship between corrosion rate of carbon steel (SB 46) and dissolved oxygen concentration. 33±2°C, specific conductivity <math>< 0.5 \mu\text{S}/\text{cm}</math>, immersion periods 500 hours.

図 3.2.2-4 炭素鋼の腐食に及ぼす溶存酸素の影響（図 3.2.2-1 再掲）⁵⁾

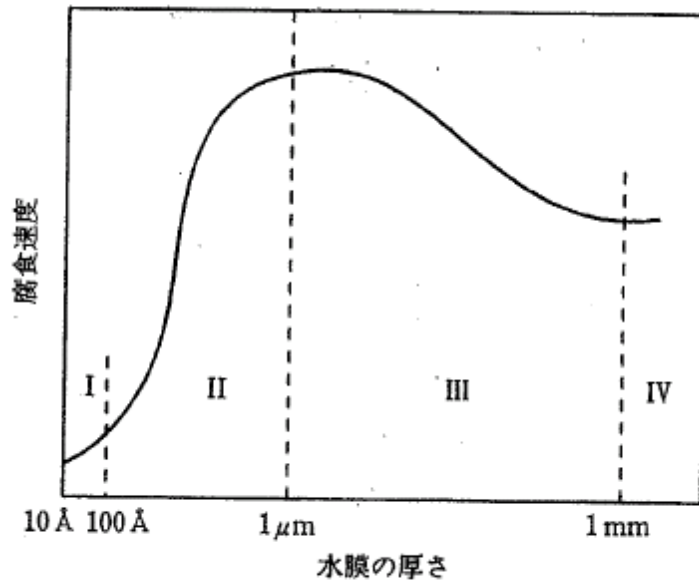
(3) 乾式保管 乾燥空気循環保管

乾式空気循環保管は、系統内の水分を除去して腐食進行を防ぐ方法である。乾燥にあたっては、水分が目に見える状態で存在しないことはもちろん、空気中の湿分によって材料表面に薄い液膜を形成するような湿り大気状態も避ける必要がある。図 3.2.2-5 は材料表面の水膜厚さと腐食速度の関係を定性的に示したものであり、数分子レベルの薄い水膜であれば腐食速度は非常に小さい⁸⁾。図 3.2.2-6 は相対湿度と腐食による重量増加（母材が腐食し材料表面にスケールが生成）を示しており、相対湿度約 60% 以上の場合に材料表面が濡れて腐食速度が早いことが分かる⁸⁾。このため、材料表面から水分を除くためには、乾式保管時の相対湿度を 50 % 以下に保つことを推奨する。相対湿度 50 % 以下で乾式保管を適用した場合の腐食量は湿式保管と同様 1 mdd 未満である。

具体的な乾燥方法としては、主に以下の 5 つがあり、対象機器の構造・条件等に応じて、これらのいずれか、あるいは複数を組み合わせた方法を採用している。

- ・ 除湿機を用いて乾燥空気送気
- ・ 熱風空気を送気し水分除去と乾燥を行う
- ・ ヒータ等で加温を継続
- ・ 乾燥剤のシリカゲルを封入
- ・ 高温ドレン系統等は停止時温度の高い時期にホットブローを行い残熱で乾燥

なお、EPRI NP-5106 Sourcebook for Plant Layup and Equipment Preservation (Revision 1)⁹⁾において、IA 掃気による湿度低下の効果が見られない場合は、ドライヤーを用いて、湿度を 40% 以下に維持することが推奨されており、米国 BWR では除湿機を用いた乾燥空気送気による乾式保管の実績がある。



領域 I : 数分子の水の吸着膜領域 (腐食作用なし)
 領域 II : 10~100 分子層の水の吸着膜領域 (湿り大気条件)
 領域 III : 液膜により酸素供給が遅れ, 腐食速度が低下する領域
 領域 IV : 濡れ大気条件

図 3.2.2-5 液膜と腐食速度の関係^[8]

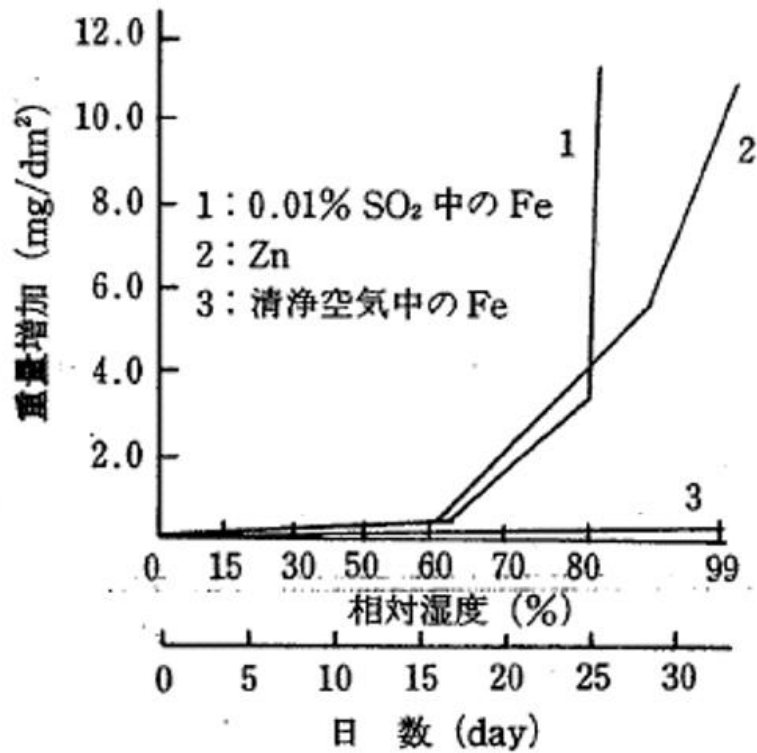


図 3.2.2-6 相対湿度と重量増加量の関係^[8]

(4) 乾式保管 自然乾燥保管

前述の保管方法が適用できない場合、自然乾燥保管を適用する。ここでは、系統隔離可否、系統内乾燥の可否で分類して、腐食程度を整理した。

a. 系統内乾燥でき系統隔離できる場合

ドレン系統、脱気器下流の給水系統などの高温系統では、プラント停止時の系統水温が高い時点でホットブローすることで、機器、配管内表面の乾燥が可能である。このとき、系統内の湿度は低く保たれ、顕著な腐食進行を抑制できる。

自然乾燥保管適用時の腐食量を推定するため、密閉条件下で酸素が消費された場合の平均腐食（減肉）厚みを試算した。前提条件として、1 m の 2 次系最大級配管（径 0.6 m）を密閉系とし、常温・大気圧環境下で系統隔離された空間内の全酸素を腐食（反応式： $4\text{Fe} + 3\text{O}_2 \Rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3$ ）のみで消費するものと仮定した。評価の結果、平均の減肉厚みは $10 \mu\text{m}$ 程度と推定された。

b. 系統内乾燥できず系統隔離できる場合

低圧タービン、復水系統などの低温系統では系統水温度が低く、停止後速やかに全ブローを実施した場合にも材料表面の乾燥が難しい。このように、材料表面に水分が残留する場合や季節変動で結露・濡れ部位が発生する場合には、酸素の供給によって腐食が進行する。

図 3.2.2-4 に示した溶存酸素濃度と腐食速度の関係から^[8]、静止水、溶存酸素濃度飽和（8 ppm at 室温）の腐食速度は約 20 mdd となり、約 $100 \mu\text{m}/\text{年}$ （0.1 mm/年）となる。ここで、水抜き後の系統隔離により密封保管可能な系統では酸素の新たな供給がないため、（保管初期には腐食が進行するが）系統内の酸素が十分消費された以降では腐食速度が減少する。このように、低温系統にあっても水抜き後に系統隔離できれば、自然乾燥保管を適用可能である。

評価条件 : 配管径 0.6 m, 配管長さ 1 m, 25°C, 大気圧, 密閉空気

平均減肉厚み : $1.2 \times 10^{-5} \text{ m} = 12 \mu\text{m}$

前提条件

- ・ 完全密閉であること（新たな空気は 1 年間遮断される）。
- ・ 水たまり等の湿り部分が優先的に腐食することはない。

試算方法

- ① 密閉体積中の酸素量を算出
- ② 腐食反応式の反応モル比から、反応鉄量を算出
- ③ 反応鉄量から反応鉄容積を算出
- ④ 反応鉄容積を配管面積で割り、腐食減肉厚みを算出

c. 系統隔離できない系統の場合

系統隔離できない系統であっても、湿度が低い環境では顕著な腐食進行はないため、水抜き保管が適用可能である。ただし、水溜まり部位や季節変動による結露・濡れ部位では、連続的な酸素供給によって、0.1 mm/年程度の継続的な腐食進行が想定される。そのため、系統隔離できない場合でも対応できる、乾燥空気循環保管を推奨する。

3.2.3 機器満水保管期間中の保管水水質確認要領

機器を満水保管とする場合、満水保管が適切に行われていることを確認することを目的として、保管期間中 1～2 回/月程度の頻度で保管水のヒドラジン濃度を確認することを推奨している。

一方、機器内面の保管水水質を的確に把握するためには、試料水採取時に機器末端から試料採取部位までの配管内水を十分に置換する（通常配管容積の 3 倍以上程度を推奨）必要があり、水質確認を実施する毎に機器内面水位が下がり、機器内部に気相が生成して空気が混入することとなる。これより、保管期間が長期にわたる場合には、保管状態の確認回数が多くなり、良好な保管状態が維持できなくなることが懸念される。

このため、保管期間中の保管水中のヒドラジンの消費挙動に基づいて、機器満水保管期間中の水質確認要領について検討した。

(1) 湿式保管時のヒドラジン濃度の変化

a. ラボ試験データに基づく整理

湿式保管時のヒドラジン濃度の変化に関し、保管時初期水張水溶存酸素濃度（飽和、脱気）、保管状態（開放、密封）、及び初期ヒドラジン濃度をパラメータとした保管期間とヒドラジン濃度に関する試験結果を図 3.2.3-1 に示す。

試験結果のうち、実機で保管水に補給水（酸素飽和）を使用し、系統隔離が可能な機器の保管は、図中の初期酸素飽和／液面密封（●）条件に相当するものと判断でき、初期ヒドラジン濃度 100 ppm、300 ppm の何れの条件でも、保管初期 1 週間はヒドラジン濃度が減少するが、それ以降 4 週間放置後までヒドラジン濃度はほとんど低下せず、系統隔離を確実に実施することにより、保管期間が 4 週間以上となった場合でもヒドラジン濃度減少は小さいものと判断できる。

一方、系統隔離が十分できていないケースに相当する、初期酸素飽和／液面開放（○）条件では、保管開始 1 週間経過以降も直線的にヒドラジン濃度が低下しており、初期ヒドラジン濃度 300 ppm では 4 週間後のヒドラジン濃度が 100 ppm 未満まで低下している。

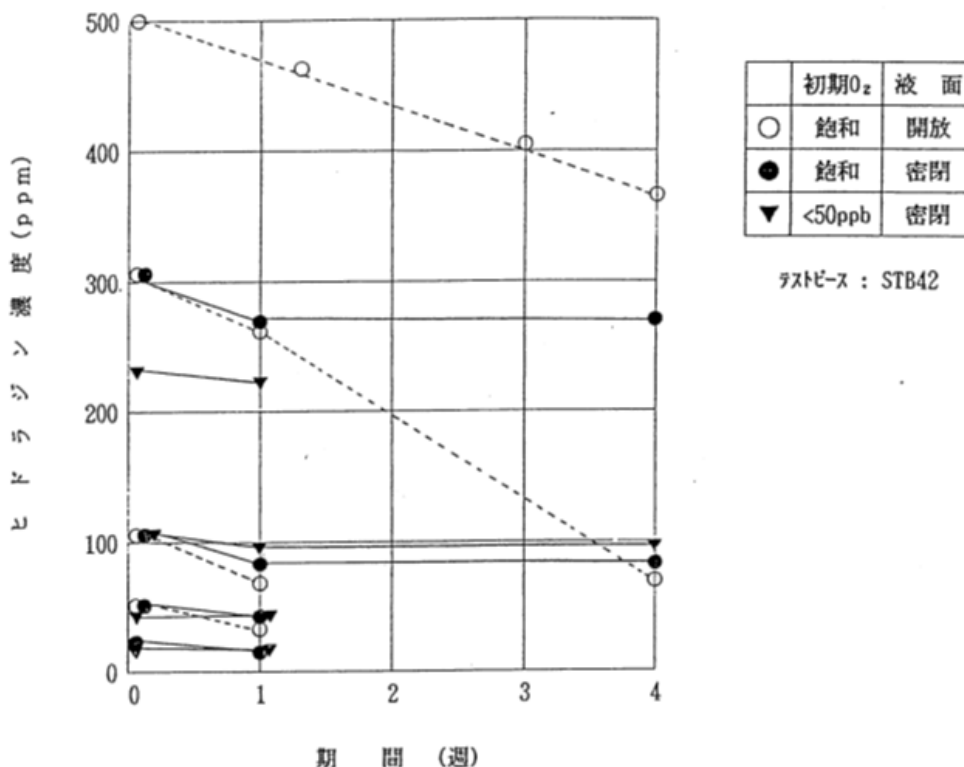


図 3.2.3-1 ヒドラジンによる満水保管時ヒドラジン濃度の変化 (三菱社内データ)

b. 実機プラント実績に基づく整理

実機プラント実績の一例として、機器保管時に気相部が存在するが窒素加圧による系統隔離が可能で、満水側の系統隔離が可能である SG 2 次側の保管期間中のヒドラジン濃度の挙動の一例を図 3.2.3-2、図 3.2.3-3 に示す。

図 3.2.3-2 は気相部を窒素加圧し系統の隔離が十分に実施されていたケースであり、保管開始初期にヒドラジン濃度が若干低下するが、その後は数か月間にわたりヒドラジン濃度の低下が認められないことを示している。

一方、図 3.2.3-3 は気相部の隔離が不十分であったケースであり、保管開始 1 ヶ月以降ヒドラジン濃度が低下し続け、約 2 ヶ月で初期保管時の 1/2 以下である 50 ppm 以下まで低下している。

以上から、実機プラント実績からも a 項で示した試験データと同様に機器保管後系統隔離を確実にを行うことにより、保管水中のヒドラジン濃度を高く、安定して維持することができることを示している。

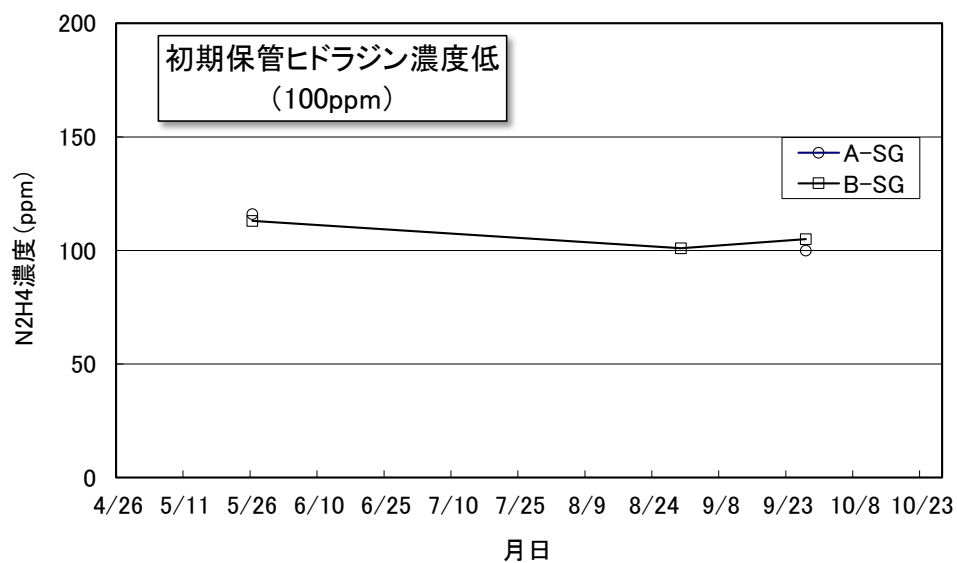
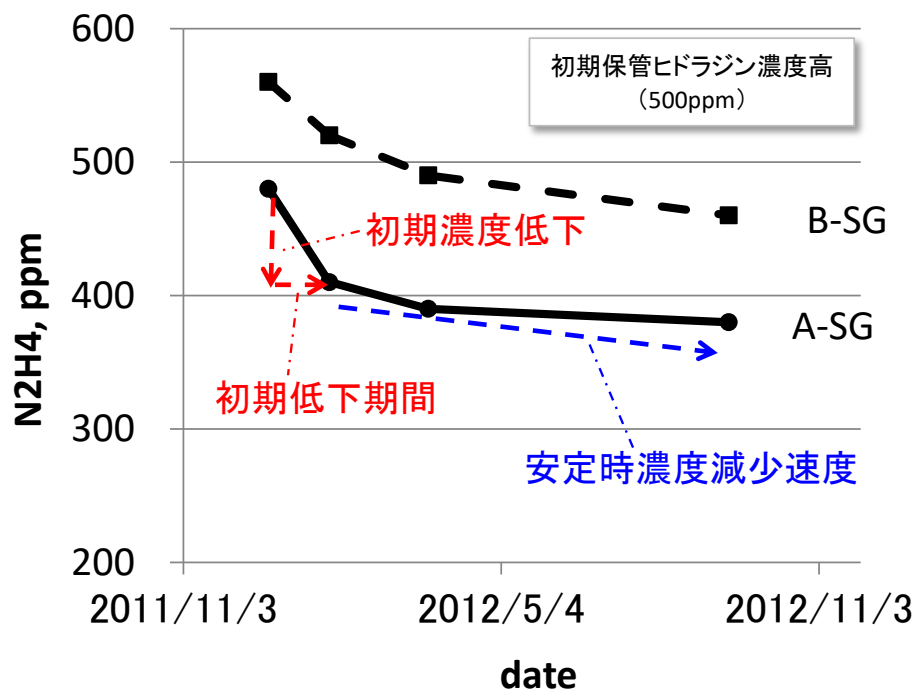


図 3.2.3-2 実機プラント保管時ヒドラジン濃度の挙動の一例 (系統隔離良好時)

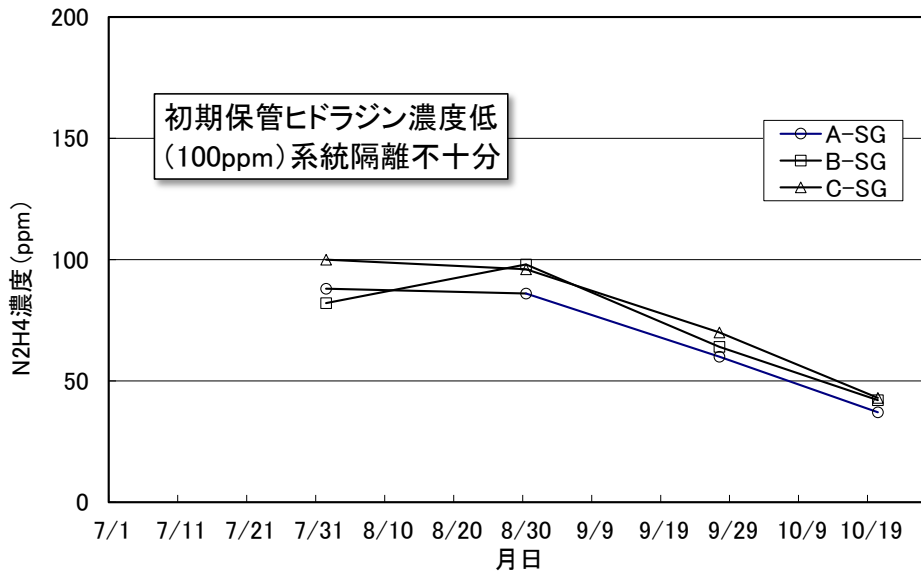


図 3.2.3-3 実機プラント保管時ヒドラジン濃度の挙動の一例（系統隔離不十分）

(2) 機器保管水水質確認と対応要領

前述の(1)項で整理した試験結果、並びに実機プラント実績から、系統隔離が可能（気相部窒素加圧、または気相が無い）で、系統への空気の漏れ込みを防止できる系統については、長期間にわたってヒドラジン濃度を高く維持でき、保管期間中の水質確認頻度を大幅に軽減できることを示している。このため、保管期間中の機器保管状態から、保管期間中のヒドラジン濃度の確認要領と、それに基づく系統保管手法の適正化対応について整理した。

- a. 保管開始1ヶ月後に濃度確認を実施し、ヒドラジン濃度が100 ppm以上残留（初期ヒドラジン濃度300～500 ppmを想定）していることを確認する。その後2週間後に再度ヒドラジン濃度を確認し、大きく濃度が低下していない（判断目安として保管開始1ヶ月目のヒドラジン濃度の10%以内程度）ことが確認できればその後ヒドラジン濃度の確認を行わず、良好な保管状態を維持する。
- b. 上記ヒドラジン濃度の確認において、保管開始1ヶ月後のヒドラジン濃度が100 ppm（初期ヒドラジン濃度300 ppm～500 ppmを想定）から大幅に低い場合（例えば50 ppm未満）、あるいは2回目の濃度確認時にヒドラジン濃度が大きく低下している場合は、系統の密封性が低いものと判断できるため、保管水をブローし可能な範囲を紙ウエス等で極力水分を除去した後乾燥保管に移行することも考慮する。但し、系統隔離が十分に実施でき、再保管時のヒドラジン添加水水漲りが可能である機器、系統については、速やかに再満水保管並びに系統隔離（気相部は窒素シール）を実施する。
- c. なお、系統隔離ができない、満水保管を実施せず、プラント停止時にホットブロー、残水の可能な範囲でのふき取り等により極力乾燥させ、乾燥空気循環、温風送気等の水抜き保管を検討することが望ましい。

3.2.4 機器満水保管中器内作業時の保管水条件について

ヒドラジンは発ガン性のある薬品であることが知られており、欧米において規制強化が進められている。

例えばアメリカにおいては ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists)の勧告(2016年度版)において、1日8時間、1週40時間の平常作業で繰り返し暴露されても、作業者に健康被害を招くことがない気中ヒドラジン濃度の限界値として0.01 ppm(10 ppb)以下が規定されている。

現時点で国内での法規制はないものの、国内でも規制強化の動きがあり、化学物質に係る規制強化を図るため、労働安全衛生規則等が改正され、労働安全衛生規則第577条の2第2項の規定に基づき、ヒドラジン及びその一水和物が、8時間濃度基準値(8時間時間加重平均値)の気中ヒドラジン濃度として0.01 ppm以下が設定され、2024年4月1日から適用される予定である。

上記を受け、機器保管中にその内部の点検、補修工事を行う必要が生じた際の保管水ヒドラジン濃度について検討を行った。

酸素飽和水における保管水ヒドラジン濃度と炭素鋼の腐食速度の関係を図3.2.4-1に示す。これより、炭素鋼の腐食を最小限とするためには、保管水のヒドラジン濃度を200 ppm以上とすることが望ましいと考えられる。

しかしながら、上述の通り機器保管中に点検、補修作業を実施する作業員の健康管理、安全面から保管水のヒドラジン濃度は極力低くすることが望ましいことから、例えば、保管水のヒドラジン濃度を100 ppmまで低減した場合、腐食速度は若干増加するがその腐食深さは1ヶ月で2 μm程度($4 \text{ [mdd]} / 7.86 \text{ [g/cm}^3\text{]} \times 30 \text{ [day]} = 1.5 \text{ [}\mu\text{m}/30 \text{ days]})$)と小さく、機器健全性に影響を及ぼすことはない判断できる。

一方、作業期間中のヒドラジン濃度下限濃度については、最低限飽和酸素濃度(8 ppm as O₂)に対する等量ヒドラジン濃度(8 ppm as N₂H₄)に若干の裕度を見込んだ20 ppm以上とする必要があると判断する。

保管水のヒドラジン濃度を20 ppmとした場合の炭素鋼の腐食量は、図3.2.4-1から10 mddで、炭素鋼の腐食深さは1か月で4 μm程度であり、機器健全性に及ぼす影響は軽微であるものと判断できる。

また、ヒドラジンによる満水保管時に点検、保守作業実施時の実績の一例として、SG2次側において、機器保管中の上部作業時に気中ヒドラジン濃度の計測を実施した実例があり、保管水ヒドラジン濃度100 ppm時の気中ヒドラジン濃度は0.001 ppmオーダーと作業員の健康管理、安全面から設定されている気中ヒドラジン濃度0.01 ppm以下を十分満足していることが確認できている。

以上の検討結果に基づき、機器保管中に器内点検、補修工事等の器内作業を実施する必要が生じた場合の機器保管ヒドラジン濃度は上限値100 ppm、下限値20 ppmとし

て管理し、作業終了後は速やかに保管水のヒドラジン濃度を 200 ppm 以上に増加することを推奨する。

なお、保管水 100 ppm での気中ヒドラジン濃度は十分低いことを確認しているが、気相中ヒドラジン濃度は極力下げることが望ましいため、機器内部作業中は送風機等を用いた機器内部の換気を出来る限り継続して実施することを推奨する。

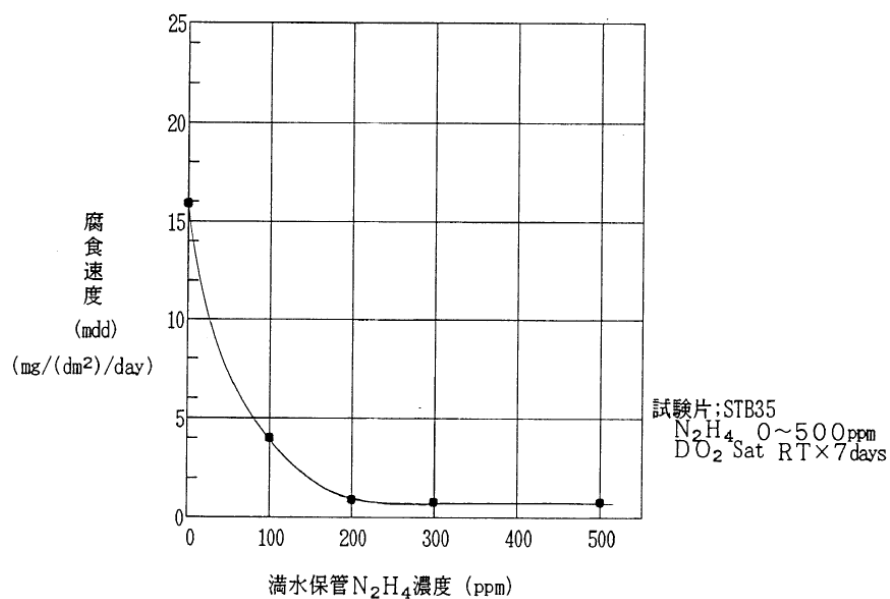


図 3.2.4-1 酸素飽和水における保管水ヒドラジン濃度と炭素鋼の腐食速度の関係

4. まとめ

4.1 清浄度管理と副資材の管理

原子力発電プラントへの不純物持込防止を目的とした副資材の管理と、持ち込まれた不純物を除去する洗浄管理について、その管理方法例および留意点をまとめた。

(1) 清浄度管理方針

- ・ 不純物の持込を防止する副資材の管理だけでなく、不純物を除去する洗浄管理も重要である。

(2) 管理対象成分の選定

- ・ 材料健全性に影響を与える元素としては、ハロゲン元素、低融点金属およびアルカリ元素が挙げられる。

(3) 清浄度管理要領

- ・ 副資材の管理方法としては、材料損傷形態の想定、管理対象とすべき材料の選定、設備の区分、副資材種別の設定、副資材の成分含有量管理値およびその確認方法の設定、使用可能副資材リストの作成等が挙げられる。
- ・ 設備の管理区分は使用材料の種類、設備の重要度および使用環境等を考慮して設定するのが望ましい。
- ・ 溶接部は損傷が生じやすいため、不純物を除去するための規定を設けるのが望ましい。
- ・ 副資材の成分含有量管理値は、損傷形態と影響を与える元素に応じて、接液部および非接液部を対象として設定するのが望ましい。なお、具体的な管理値設定に当たっては各元素が材料損傷に影響を与えない値を、副資材の使用状況に応じて設定するのが望ましいが、これが難しい場合はすでに制定・運用されている規格等を参考にするのも良い。
- ・ 成分含有量管理値を満足しない副資材を使用しなければならない場合は、水溶性成分による管理や、個別の影響評価の実施等、成分含有量管理値以外の判定方法を設定することが望ましい。
- ・ 副資材の成分含有量分析に当たっては、あらかじめ前処理方法や分析方法を定めておくことを推奨する。

(4) 洗浄と清浄度確認要領

- ・ 洗浄に用いる水については、管理区部に応じて使用できる洗浄水のグレード（純水、復水、水道水など）を区別しておくのが良い。
- ・ 管理区分に応じて、使用できる洗浄水のグレード、洗浄を実施するタイミング等を詳細に設定することを推奨する。
- ・ 設備表面の洗浄後、少なくとも設備供用前には、表面の清浄度が十分であることを確認する必要がある。

4.2 プラント長期停止時の系統保管要領

プラント長期停止時の系統保管について、保管方法の例、水質確認や器内作業時の留意点をまとめた。

(1) 系統毎の保管要領に関する考え方の整理

- ・ 機器・配管の保管方法は、主に以下の4通りに分類される。
 - ① 湿式保管 ヒドラジン水保管（脱気純水保管）
 - ② 乾式保管 窒素ガス封入保管
 - ③ 乾式保管 乾燥空気循環保管
 - ④ 乾式保管 自然乾燥保管
- ・ 乾式保管に比べて満水保管の方が機器材料の腐食を抑制できるため、系統隔離が可能な場合には、極力湿式保管の適用が望ましい。

(2) 各種保管方法の整理

- ・ 気相部の窒素シールが可能または気相が無く隔離可能な系統では、脱酸素剤のヒドラジンを添加した満水保管により、腐食速度は低く保たれ、健全に機器保管できる。
- ・ ヒドラジン水保管時に気相が生成して隔離できない系統では、機器、配管材料の腐食抑制並びに運用、管理の軽減の観点から乾式保管を適用することが望ましい。
- ・ 窒素ガス封入保管は、系統内を窒素雰囲気中に置換して鋼材表面への酸素供給をなくすことで、腐食を抑制する方法である。湿式保管から窒素封入保管への切り替え時、並びに窒素ガス封入保管期間中には、系統内表面の水分の有無に関わらず、鋼材の腐食を小さく抑えられる。
- ・ 乾式空気循環保管は、系統内の水分を除去して腐食進行を防ぐ方法である。保管時の相対湿度は50%以下に保つことを推奨する。
- ・ 上記の保管方法が適用できない場合、自然乾燥保管を適用する。

(3) 機器満水保管期間中の保管水水質確認要領

- ・ 機器保管後に系統隔離を確実にを行うことにより、保管水中のヒドラジン濃度を高く、安定して維持することができる。
- ・ 例として初期ヒドラジン濃度300～500 ppmを想定した場合の推奨要領としては、保管開始1ヶ月後に濃度を確認して、100 ppm以上の残留を確認する。その後、2週間後に再度ヒドラジン濃度を確認して、濃度の大きな低下がなければ、追加の濃度確認は実施せずに良好な保管状態を維持する。

(4) 機器満水保管中器内作業時の保管水条件について

- ・ 機器保管中に器内点検、補修工事等の器内作業を実施する必要がある場合の機器保管ヒドラジン濃度は、上限値100 ppm、下限値20 ppmとして管理し、作業終了後は速やかに保管水のヒドラジン濃度を200 ppm以上に増加することを推奨する。

5. あとがき

本調査は、国内原子力プラントにおける不純物に起因する損傷防止に資することを目的としたものである。報告内容を基に、各電力事業者殿の管理が高度化され、原子力安全につながることを期待する。

以上

6. 参考文献

- [1] 重本ら, 塩化ビニールテープ起因応力腐食割れ事象の原因分析およびテープの編成挙動調査, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.53, No.2, 129-135, Feb. 2004
- [2] Guideline for PWR Steam Generator Tubing Specifications and Repair Volume 2, Revision 1 : Guidelines for Procurement of Alloy 690 Steam Generator Tubing, EPRI Technical Report TR 016743-V2R1, EPRI, 1999
- [3] CHEMICAL SPECIFICATIONS OF THE PRODUCTS AND MATERIALS USABLE IN NUCLEAR PLANTS (PMUC), D5710/IMC/1999/007111, POLE INDUSTRIE GDL, 1999
- [4] Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands (RCC-M) Edition 2000, AFCEN, 2000
- [5] 松平ら, 高純度水中における炭素鋼腐食に及ぼす溶存酸素の影響, 28, p.32-37, 防食技術, 腐食防食学会, 1979
- [6] 岩堀 徹ら, BWR 給復水系の停止時の腐食性, 火力原子力発電, Vol.35, No.5, 477-487, 1984
- [7] Ishihara et al. Research of Extended Layup on the Secondary Side in Japanese PWR Plants (Proceedings), NPC, 10178, 2014
- [8] 腐食防食協会, 腐食・防食ハンドブック, 丸善株式会社, p.III-3-1, 2000
- [9] G. C. Allen, Sourcebook for Plant Layup and Equipment Preservation (Revision 1), EPRI, NP-5106, Revision 1, Research Project 2495-15, 1992