



PWR一次系の水化学管理指針の概要

一般財団法人 電力中央研究所 河村浩孝

日本原子力学会水化学部会第23回定例研究会

2015年3月12日

講演内容

1. 我が国における水化学指針制定システムの特徴と原案作成メンバー
2. PWR 一次系の水化学指針
 - 目次
 - プラント運転状態 (プラント運転モード)
 - 哲理 (管理項目, 制御項目, 診断項目, アクションレベル, 推奨値, 測定頻度)
 - 水質データ評価方法の例
 - アクション2に至った場合の是正措置の例
 - 通常運転時の原子炉一次冷却材の管理項目, 制御項目及び診断項目の例
 - 起動時及び停止時の原子炉一次冷却材の管理項目, 制御項目及び診断項目の例
 - 原子炉一次冷却材補給水の診断項目の例
 - 使用済燃料ピット水の制御項目及び診断項目の例
 - 低濃度亜鉛注入
 - 品質管理とPWR水化学制御に係る長期戦略
3. 結言

我が国における水化学管理指針制定システムの特徴

➤ 策定手順

1. 原案の作成（産学界の専門家で構成される**作業会**）
2. 原案の審査（学識経験者を含めた担当**分科会**）
3. 案の審査（学識経験者を含めた**専門部会**）
4. 投票（専門家で構成される**標準委員会**）
5. 公衆審査（学会のHPに掲載，**公衆からの意見聴取**）
6. 修正，審議（**作業会，分科会，専門部会**）
7. 審議，制定（**標準委員会**）

➤ 規定及びガイドラインから構成される学会標準

- 日本原子力学会 BWR 水化学管理指針は，**規定 (the technical specifications (regulatory criteria)) を満たすとともにより良い水化学に関するガイダンスを提供する。**
- 制定後，**5ヶ年間毎に見直しが行われる。**見直しが必要と判断された場合は，**新しい指針として改正される。**

指針原案の作成メンバー(作業会及び分科会)

PWR水化学管理指針作業会

主査：河村 浩孝（一般財団法人 電力中央研究所）
 副主査：荘田 泰彦（三菱重工業株式会社）
 幹事：都筑 康男（一般社団法人 原子力安全推進協会）
 委員：武田 耕太郎（北海道電力株式会社）
 委員：寺地 巧（関西電力株式会社）
 委員：石原 信秋（四国電力株式会社）
 委員：高橋 明（九州電力株式会社）
 委員：中野 佑介（日本原子力発電株式会社）
 委員：西村 孝夫（三菱重工業株式会社）

常時参加者：

佐藤 正俊（原子力規制庁），都筑 康男（一般社団法人 原子力安全推進協会），河村 浩孝（一般財団法人 電力中央研究所），
 武田 耕太郎（北海道電力株式会社），高橋 誠（東北電力株式会社），鈴木 純一（東京電力株式会社），
 山口 綱基（北陸電力株式会社），植村 聡志（中国電力株式会社），石原 信秋（四国電力株式会社），
 高橋 明（九州電力株式会社），中野 佑介，上山 裕（日本原子力発電株式会社），小野寺 聡（電源開発株式会社），
 碓井 直志（日立GEニュークリア・エナジー株式会社），浦田 英浩（株式会社東芝），西村 孝夫（三菱重工業株式会社）

水化学管理指針分科会

主査：勝村 庸介（東京大学） 副
 副主査：内田 俊介（元東北大学）
 幹事：北島 英明（一般社団法人 原子力安全推進協会）
 委員：大橋 伸一（オルガノ株式会社）
 委員：岡田 英俊（一般社団法人 エネルギー総合工学研究所）
 委員：河合 宣夫（中部電力株式会社）
 委員：篠原 靖周（ニュークリア・デベロップメント株式会社）
 委員：荘田 泰彦（三菱重工業株式会社）
 委員：高木 純一（株式会社東芝）
 委員：寺地 巧（関西電力株式会社）
 委員：長瀬 誠（日立GEニュークリア・エナジー株式会社）
 委員：西山 裕孝（独立行政法人 日本原子力研究開発機構）
 委員：久宗 健志（日本原子力発電株式会社）
 委員：平野 秀朗（一般財団法人 電力中央研究所）
 委員：福村 卓也（株式会社原子力安全システム研究所）
 委員：長谷川 英規（東京電力株式会社）
 委員：水野 孝之（元三重大学）

PWR一次系の水化学管理指針の目次構成

【本体】

- 1 適用範囲
- 2 引用規格
- 3 用語及び定義
- 4 PWR一次系水化学管理
 - 4.1 管理項目, 制御項目及び診断項目
 - 4.2 管理, 制御及び診断対象
 - 4.3 アクションレベル設定値, 制御値, 推奨値及び測定頻度
- 5 品質管理
 - 5.1 一般事項
 - 5.2 サンプルング方法
 - 5.3 分析方法
 - 5.4 水質データ管理

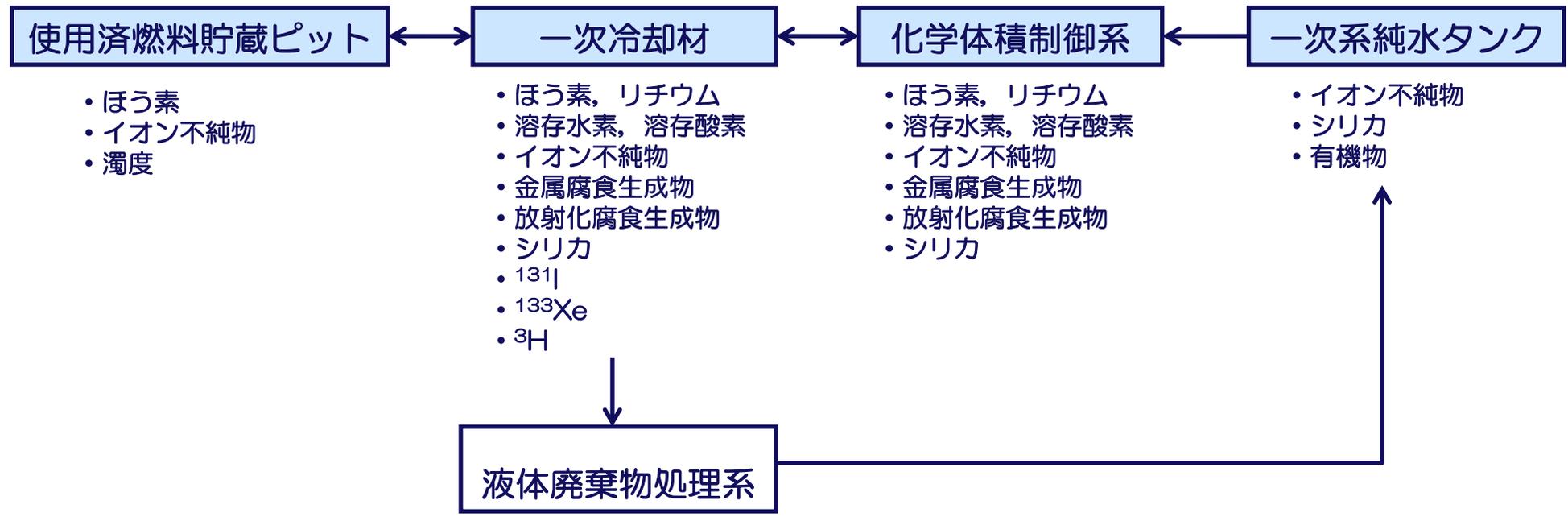
【解説】

- 解説 1: 制定の趣旨
- 解説 2: PWR の概要
- 解説 3: 構造材健全性に対する水化学の役割
- 解説 4: 燃料被覆管に対する水化学の役割
- 解説 5: 被ばく低減に対する水化学の役割
- 解説 6: 廃棄物低減, 炉心の反応度制御について
- 解説 7: 水化学管理の最適化
- 解説 8: 水化学管理の考え方
- 解説 9: 改良水化学技術開発
- 解説 10: 管理値等の単位について
- 解説 11: 原子炉一次冷却材温度の境界温度82℃について
- 解説 12: その他

【附属書】

- 附属書A (参考) アクションレベルに至って
から回復するまでの許容時間の
考え方
- 附属書B (参考) PWRの運転モードの例
- 附属書C (参考) PWR一次系の水化学管理に
関する系統とサンプルング箇
所の例
- 附属書D (参考) 管理項目, 制御項目及び診
断項目の分類の考え方
- 附属書E (参考) アクションレベル設定値, 推
奨値及び制御値の考え方
- 附属書F (参考) 測定頻度の設定の考え方
- 附属書G (参考) サンプルング方法の例
- 附属書H (参考) 分析方法の例
- 附属書I (参考) 水質データの評価方法の例

PWR一次系における水処理の概要



(イオン不純物：塩化物イオン, 硫酸イオン, 硝酸イオン)

- 今回のPWR水化学管理指針の対象系統
- 今回のPWR水化学管理指針の非対象系統

管理, 制御及び診断系統水

1. 原子炉一次冷却材

一次冷却系（原子炉容器，熱伝達ループ及び加圧器）及びその周辺系統（化学体積制御系及び余熱除去系等）に属する水。

2. 一次冷却系補給水

通常運転時の炉心反応度制御のためのほう酸希釈や一次冷却系への水張り時に使用する水。

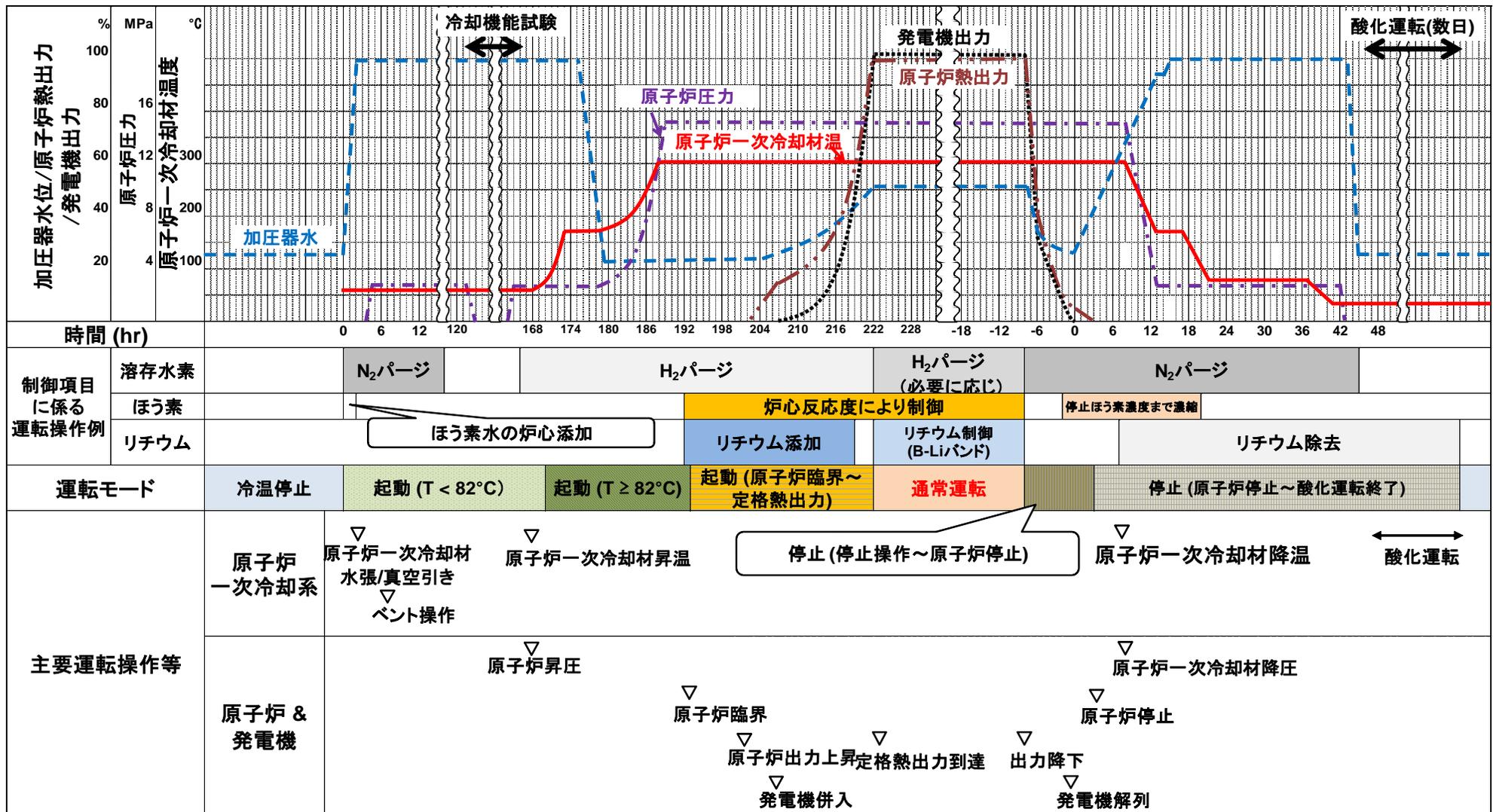
3. 使用済燃料ピット水

使用済燃料ピット及びその周辺の系統（使用済燃料ピット冷却系等）に属する水。

PWR運転モード

1. **通常運転時**：原子炉の起動後，定格熱出力又は定格電気出力に到達してから，原子炉停止のために負荷降下させる操作を開始するまでの原子炉出力運転中の期間。
2. **起動時**：原子炉を起動するために燃料を装荷し，原子炉一次冷却材の水張り操作が完了してから，定格熱出力又は定格電気出力に到達するまでの期間。起動時の運転モードは3つに区分される。
 - a) 原子炉一次冷却材温度82℃未満
 - b) 原子炉一次冷却材温度82℃以上原子炉未臨界
 - c) 原子炉臨界から原子炉出力一定運転まで
3. **停止時**：通常運転時から負荷降下を始めて酸化運転が終了するまでの期間。停止時の運転モードは2つに区分される。
 - a) 負荷降下開始から原子炉停止まで
 - b) 原子炉停止から酸化運転終了まで
4. **改良水化学適用時（低濃度亜鉛注入時）**：炉心外機器・配管の線源強度低減を目的とした低濃度亜鉛注入を実施している期間。

PWRプラントの運転操作と運転モードの関係



PWR一次系水化学管理指針の哲理

- ◆ PWR一次系水化学指針は、管理項目、制御項目及び診断項目とで構成。
- ◆ 管理項目は、構造材健全性及び燃料健全性を損なう恐れのあることが明らかになっている水質項目で3段階のアクションレベルを規定。管理値は、最新の科学的知見及び我が国のプラント運転経験をもとに設定。
- ◆ 制御項目は、リチウム、ほう素、溶存水素など薬品添加等により適切に水質制御を実施すべき水質項目。
- ◆ 診断項目は、水化学管理の状態を把握するため、構造材料及び燃料被覆管の腐食や線量率などの診断を目的として設定する項目（プラントの運転に制約を課さない）。
- ◆ 推奨値は、より良い水化学の実現に向けての設定可能な値。電気事業者が推奨値を満足できない場合、水化学管理者は、逸脱原因を評価し、回復措置を検討。
- ◆ 系統内への不純物の混入はできる限り抑制。
- ◆ 全てのアクションレベルは、プラントの技術仕様を満足するとともに、構造材料及び燃料の健全性への影響に対する定量的知見に基づいて設定。定量データが存在しない場合は、合理的かつ達成可能なアクションレベルが設定。

アクションレベル(PWR, BWR共通)

アクションレベル1

- プラント設備の健全性確保の観点から**長期的にその状態になることを避けるべき値。**
- アクションレベル1に至った場合は、再測定を実施するなど速やかに事象を評価し、原因の究明を試み、アクションレベル1から回復する措置を講じる。
- **1週間以内に回復しない場合は、長期のシステム信頼性への影響を評価する。**

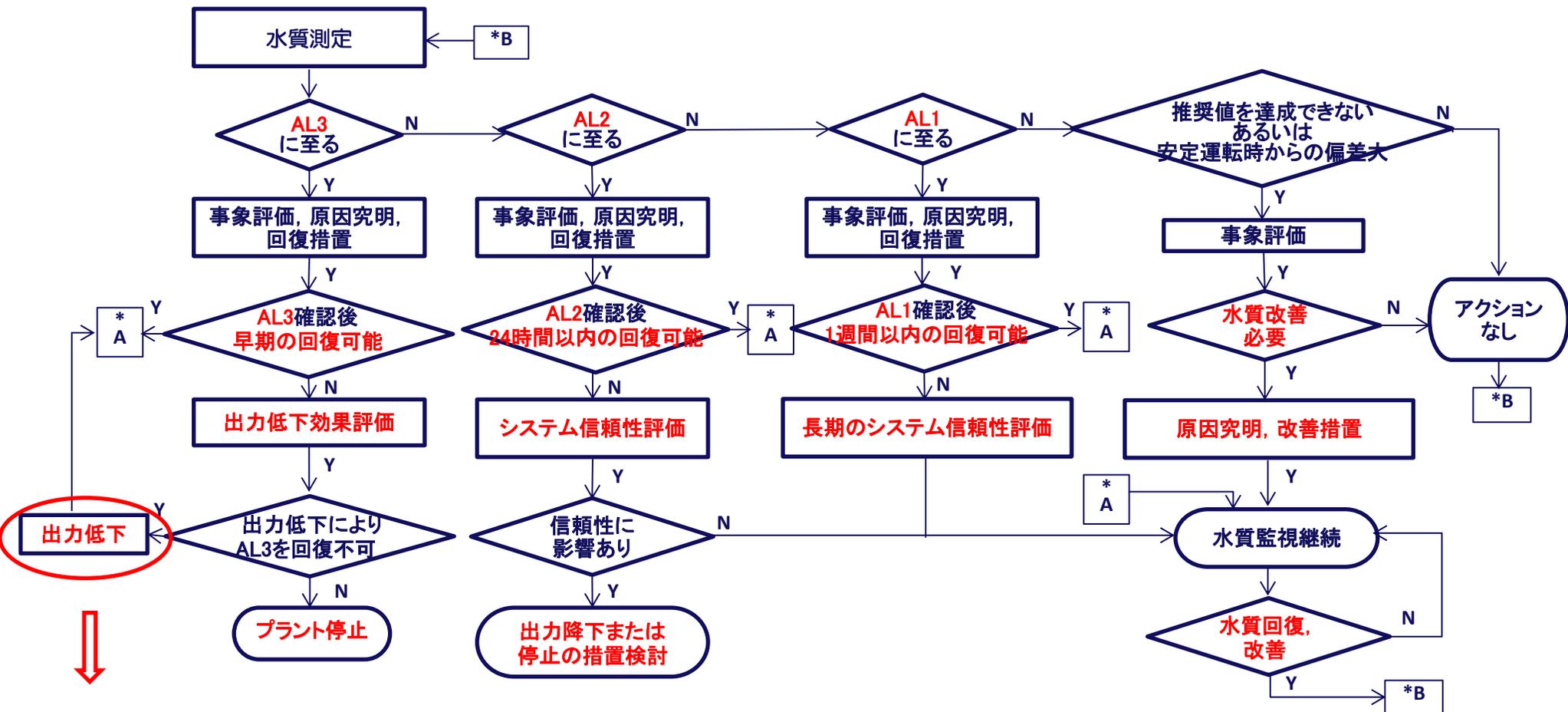
アクションレベル2

- プラント設備の健全性確保の観点から**迅速な回復が要求される値。**
- アクションレベル2に至った場合は、再測定を実施するなど速やかに事象を評価し、原因の究明を試み、アクションレベル2から回復する措置を講じる。
- **24時間以内に回復しない場合は、システム信頼性への影響を評価し、必要に応じて出力降下又は通常停止操作による冷温停止などの措置を検討する。**

アクションレベル3

- プラント設備の健全性確保の観点から**許容できない値。**
- アクションレベル3に至った場合は、再測定を実施するなど速やかに事象を評価し、原因の究明を試み、アクションレベル3から回復する措置を講じる。
- **速やかに回復しない場合、出力降下又は通常停止操作による冷温停止などの措置を講じる。なお、出力降下によりアクションレベル3から回復すると評価される場合は、同措置による回復を確認した上で原子炉運転状態を維持できる。**

水質データ評価方法の例 (PWR, BWR共通)



再測定を実施するなど速やかに事象を評価し、原因の究明を試み、アクションレベル3から回復する措置を講じる。速やかに回復しない場合、出力降下又は通常停止操作による冷温停止などの措置を講ずる。ただし、出力低下によりアクションレベル3から回復すると評価される場合は、原子炉運転状態を維持できる。

アクションレベル2に至ることが想定される要因と 是正措置の例(管理項目, 附属書A)

項目	アクションレベル2に至る要因の例	是正措置の例
電気伝導率	塩化物イオン, ふっ化物イオン及び硫酸イオン濃度上昇	各項目の是正措置に準ずる
	リチウムイオン濃度上昇	リチウムイオンの是正措置に準ずる
	アンモニア濃度上昇 ^{a)}	体積制御タンク気相部の窒素分圧改善
pH	塩化物イオン, ふっ化物イオン及び硫酸イオン濃度上昇	各項目の是正措置に準ずる
	アンモニア濃度上昇 ^{a)}	体積制御タンク気相部の窒素分圧改善
	リチウムイオン濃度上昇	リチウムイオンの是正措置に準ずる
	リチウムイオン濃度低下 ^{b)}	<ul style="list-style-type: none"> • 化学体積制御系陽イオン脱塩塔への通水停止 • リチウムイオン添加
塩化物イオン ふっ化物イオン	化学体積制御系からの溶出	化学体積制御系混床式脱塩塔の切替え
	一次冷却系補給水からの持込み	一次冷却系補給タンク水の張替え
硫酸イオン	化学体積制御系からの溶出	化学体積制御系混床式脱塩塔の切替え
	化学体積制御系混床式脱塩塔若しくは陽イオン脱塩塔からのイオン交換樹脂の流出	<ul style="list-style-type: none"> • 当該脱塩塔の隔離 • 予備系統への切替え
	一次冷却系補給水からの持込み	一次冷却系補給水タンクの張替え

注^{a)} アクションレベル2に至った要因がアンモニア濃度上昇であった場合, システム信頼性への影響は無く, 運転を継続できる。ただし, この状態が継続すると塩化物イオンなどの有害な不純物濃度の上昇を検知することが出来なくなる。よって, これらを検知可能にするため, 是正措置を実施する必要がある。

注^{b)} アクションレベル2に至った要因がリチウムイオン濃度低下であり, リチウムイオン濃度がアクションレベル1に至っている場合, アクションレベル1に至った時の措置を講ずる。

アクションレベル2に至ることが想定される要因と 是正措置の例(制御項目, 附属書A)

項目	アクションレベル2に至る要因の例	是正措置の例
リチウムイオン	化学体積制御系混床式脱塩塔からの溶出	化学体積制御系陽イオン脱塩塔の大容量通水
	化学体積制御系陽イオン脱塩塔からの溶出	化学体積制御系陽イオン脱塩塔の隔離及び新樹脂の装荷
溶存水素	体積制御タンクの圧力変動	体積制御タンクの圧力調整
	体積制御タンク気相部の組成変化	体積制御タンクへの水素パーシ
	<ul style="list-style-type: none"> • 充填ラインへの空気のインリーク • 加圧器の蒸気漏れ 	設備修繕対応
溶存酸素	溶存水素濃度の低下	溶存水素濃度の是正措置に準ずる
	化学体積制御系への空気のインリーク	設備修繕対応

注^{a)} アクションレベル2に至った要因がアンモニア濃度上昇であった場合、システム信頼性への影響は無く、運転を継続できる。ただし、この状態が継続すると塩化物イオンなどの有害な不純物濃度の上昇を検知することが出来なくなる。よって、これらを検知可能にするため、是正措置を実施する必要がある。

注^{b)} アクションレベル2に至った要因がリチウムイオン濃度低下であり、リチウムイオン濃度がアクションレベル1に至っている場合、アクションレベル1に至った時の措置を講ずる。

推奨値及び測定頻度 (PWR, BWR共通)

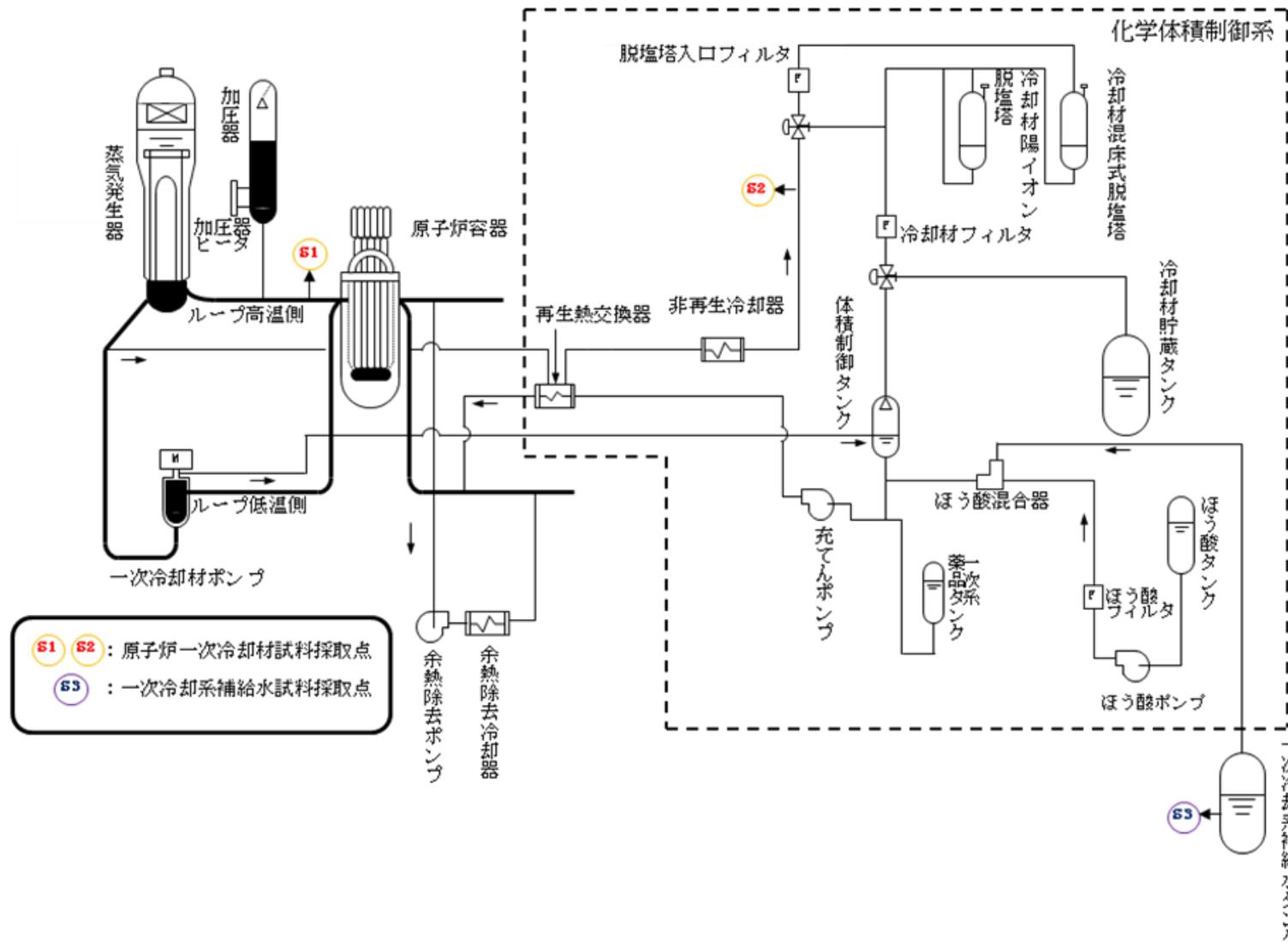
推奨値

- 管理項目及び診断項目で、より良い水化学管理を達成するために維持することが好ましい範囲として必要に応じて設定する値。
- 推奨値を達成できない場合は、必要に応じて再測定を実施するなど事象を評価するとともに対応方針を検討する。

測定頻度

- 管理項目の場合：
アクションレベルに至っていないかどうか及び推奨値を達成しているかどうかを確認するため、管理項目ごとにその重要度を踏まえて適切な頻度で測定する。
- 診断項目の場合：
推奨値を達成しているかどうかを確認するため、また、傾向を把握するために、診断項目ごとにその重要度を踏まえて適切な頻度で測定する。

原子炉一次冷却系及びその周辺システムの概要と サンプリング箇所(附属書C)



通常運転時の原子炉一次冷却材における管理項目の アクションレベル設定値, 推奨値及び測定頻度

項目		アクションレベル			推奨値	測定頻度
名称	単位	1	2	3		
電気伝導率 (at 25°C ^{a)})	mS/m	<想定値-0.5, >想定値+0.5	>4	—	—	1回/日
pH	—	<想定値-0.5, >想定値+0.5 (at 25°C ^{a)})	<4 >11 (at 25°C ^{a)})	—	7.2~7.4 (at 285°C ^{b)})	1回/日
塩化物イオン	μg/L	>50	>150	>1500	≤10 又はプラントごとの低い方	1回/週 ^{c)}
硝酸化物イオン	μg/L	>50	>150	>1500	≤10 又はプラントごとの低い方	1回/週 ^{c)}
硫酸イオン	μg/L	>50	>150	>1500	≤10 又はプラントごとの低い方	1回/週 ^{c)}
リチウムイオン	mg/L	<0.2 >3.5	>6	—	—	1回/週
溶存水素	cm ³ /kg	<25	<15 >50	<5	—	1回/週
溶存酸素	μg/L	>5	>100	>1000	—	1回/月

注^{a)} 測定後に25°Cに換算した値とする。

注^{b)} 測定後に285°Cに換算した値とする。

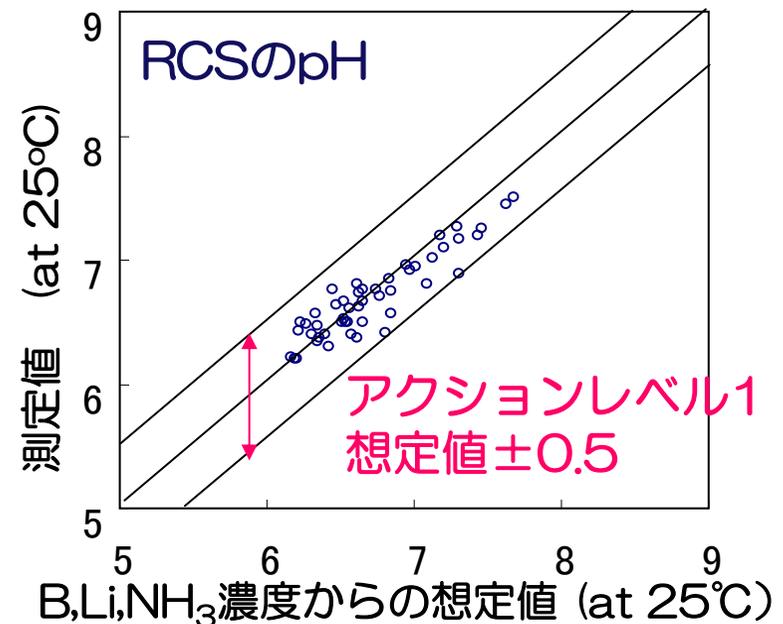
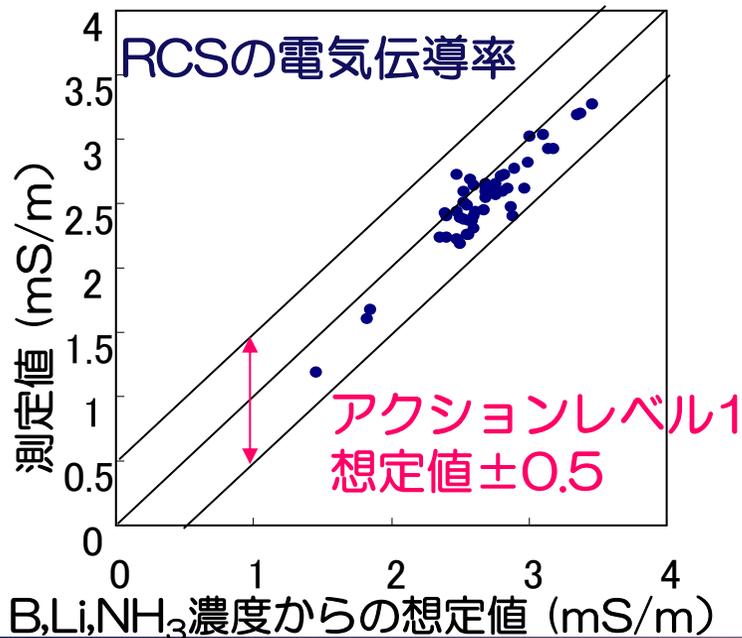
注^{c)} 電気伝導率又はpHがアクションレベル1に至った場合, 必要に応じて確認のための測定を実施する。

原子炉一次冷却材における管理項目の アクションレベル1の±0.5の根拠

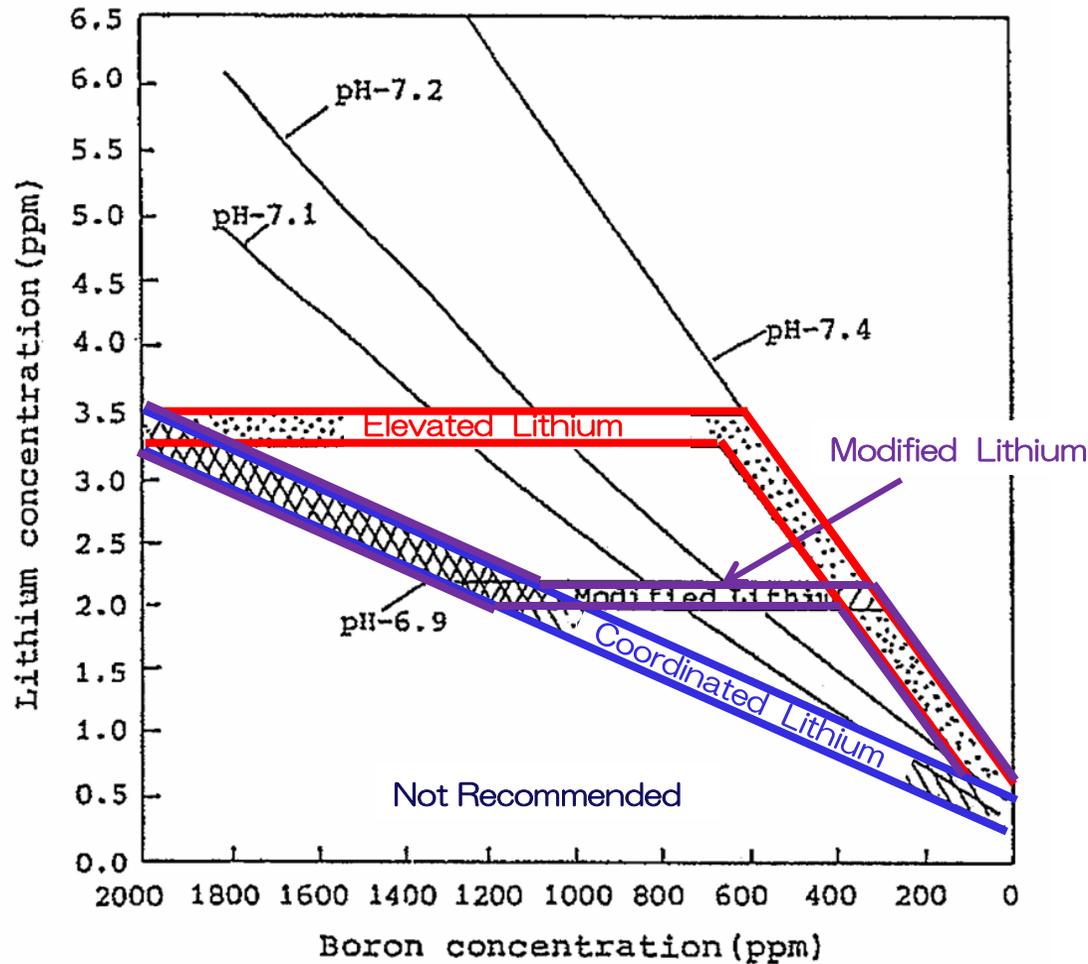
RCSのモニタリング結果例

項目	単位	アクションレベル	
		レベル	値
電気伝導率 (at 25°C)	mS/m	1	<想定値-0.5, >想定値+0.5
		2	>4
		3	-
pH (at 25°C)	—	1	<想定値-0.5, >想定値+0.5
		2	<4, >11
		3	-

想定値：
B, Li及びNH₃濃度
から計算された電気
伝導率及びpHの値。



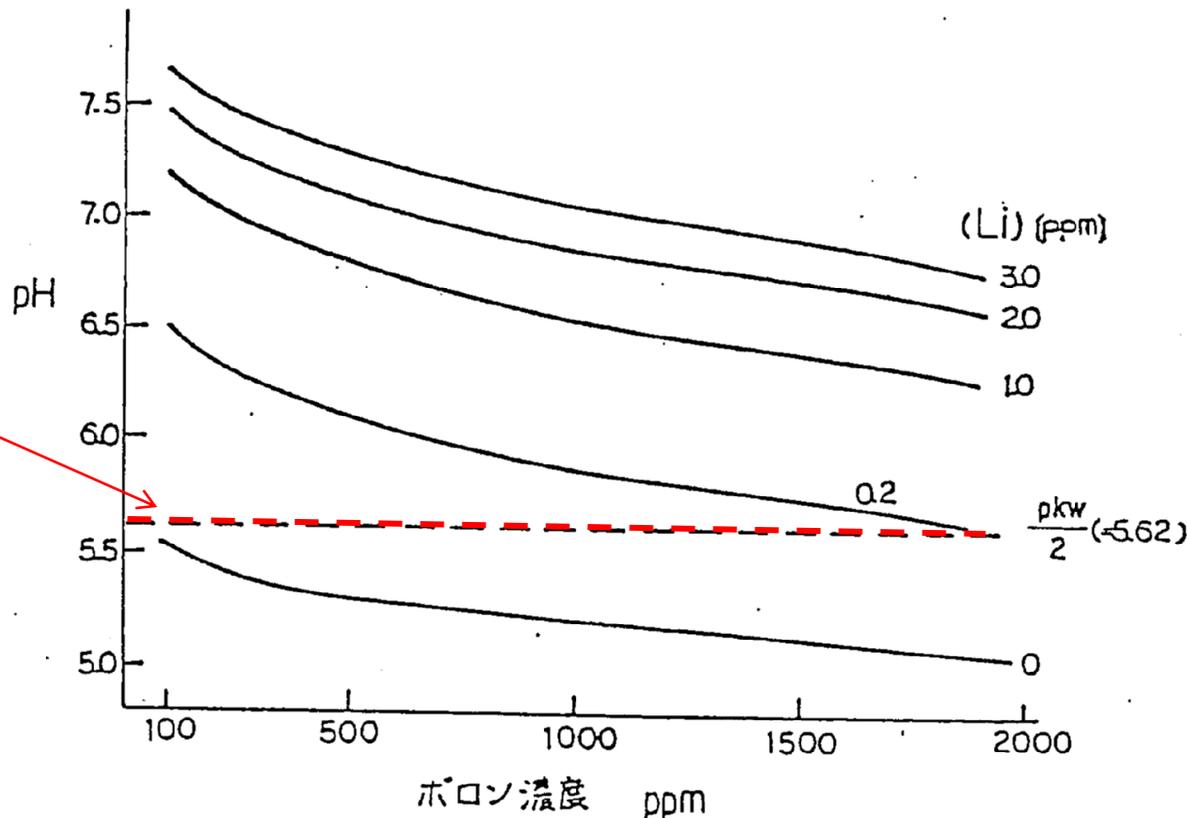
ほう素-リチウム管理バンド (解説)



出典：C. A. Bergmann, "Evaluation of Selected Parameters on Exposure Rates in Westinghouse Designed Nuclear Plants", Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems 5, Bournemouth, BNES, Volume 1, p. 9-16 (1989).

325°CのpHとほう素濃度との関係 (附属書E)

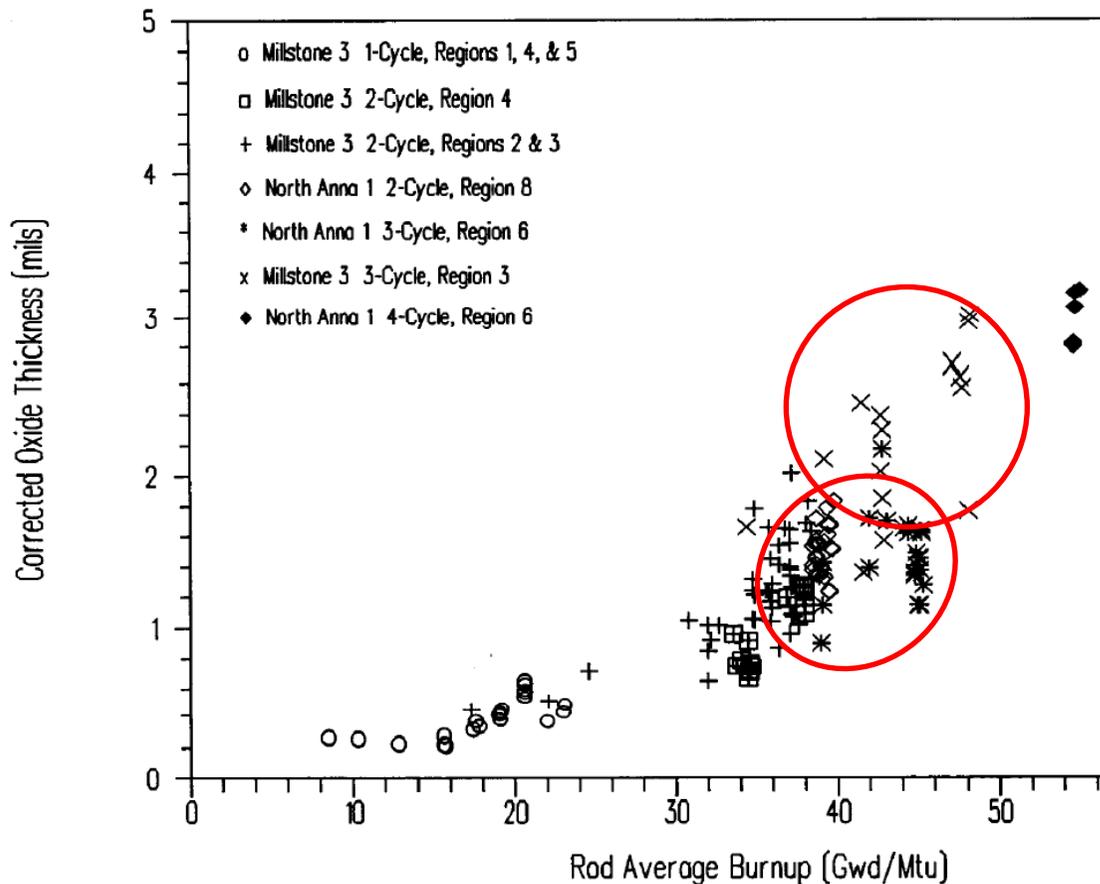
原子炉一次冷却材
の温度 (325°C)
における中性点



Li濃度の下限値0.2mg/Lは、図に示すように原子炉一次冷却材をアルカリ性に保つための最低濃度

ミルストーン3号炉 及びノースアンナ1号炉燃料被覆管の酸化皮膜厚さ(附属書E)

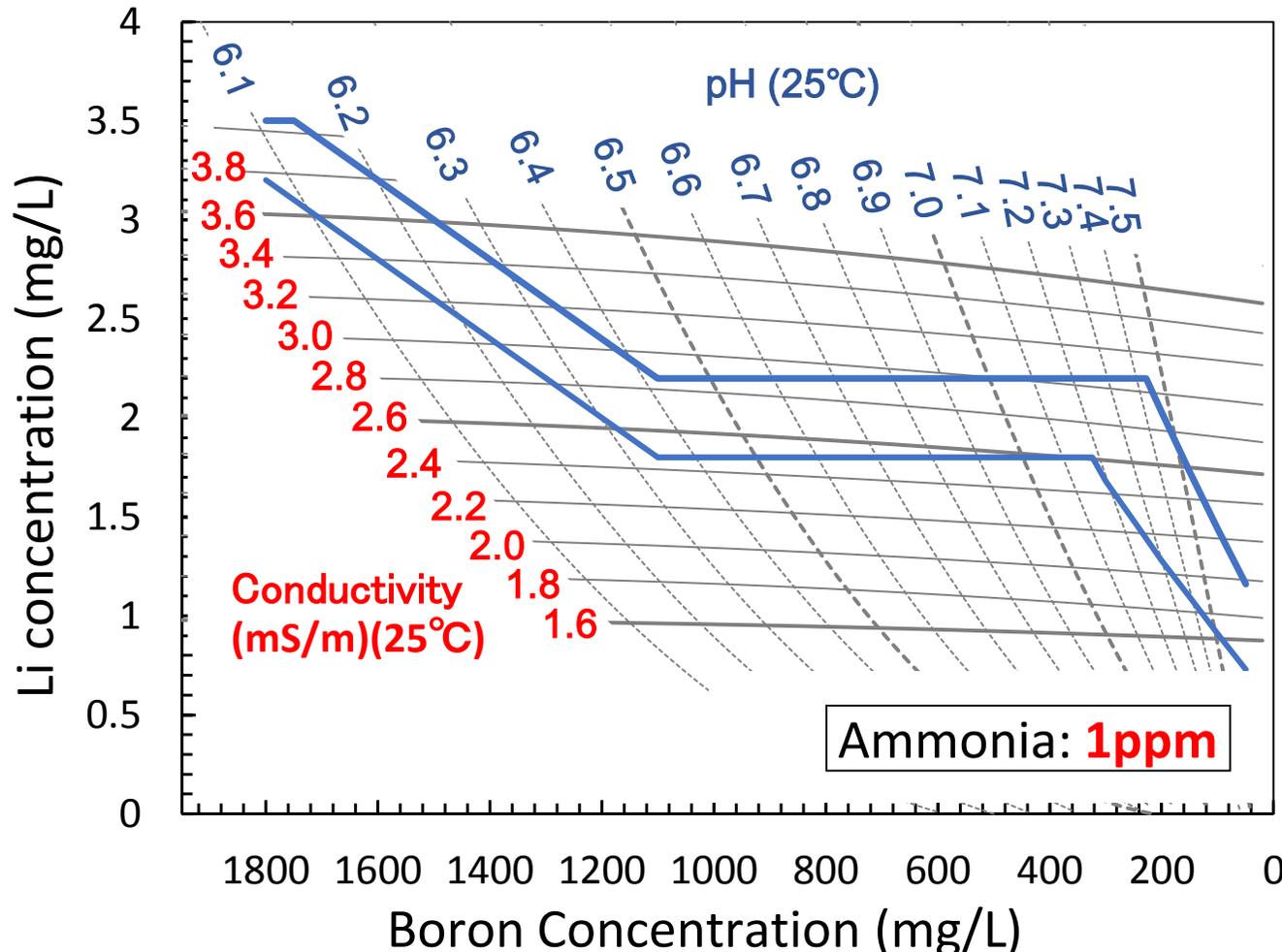
Measured Oxide Thickness vs. Rod Average Burnup
Millstone 3 & North Anna 1 Data



ミルストーン3号炉(Elevated Lithium運転)とノースアンナ1号炉(Coordinated Lithium管理運転)の酸化皮膜厚さは、同等の燃焼度依存性を示すことから、**3.5mg/Lにリチウムを上昇させた場合でも、燃料への影響に問題がないと考えられている。**

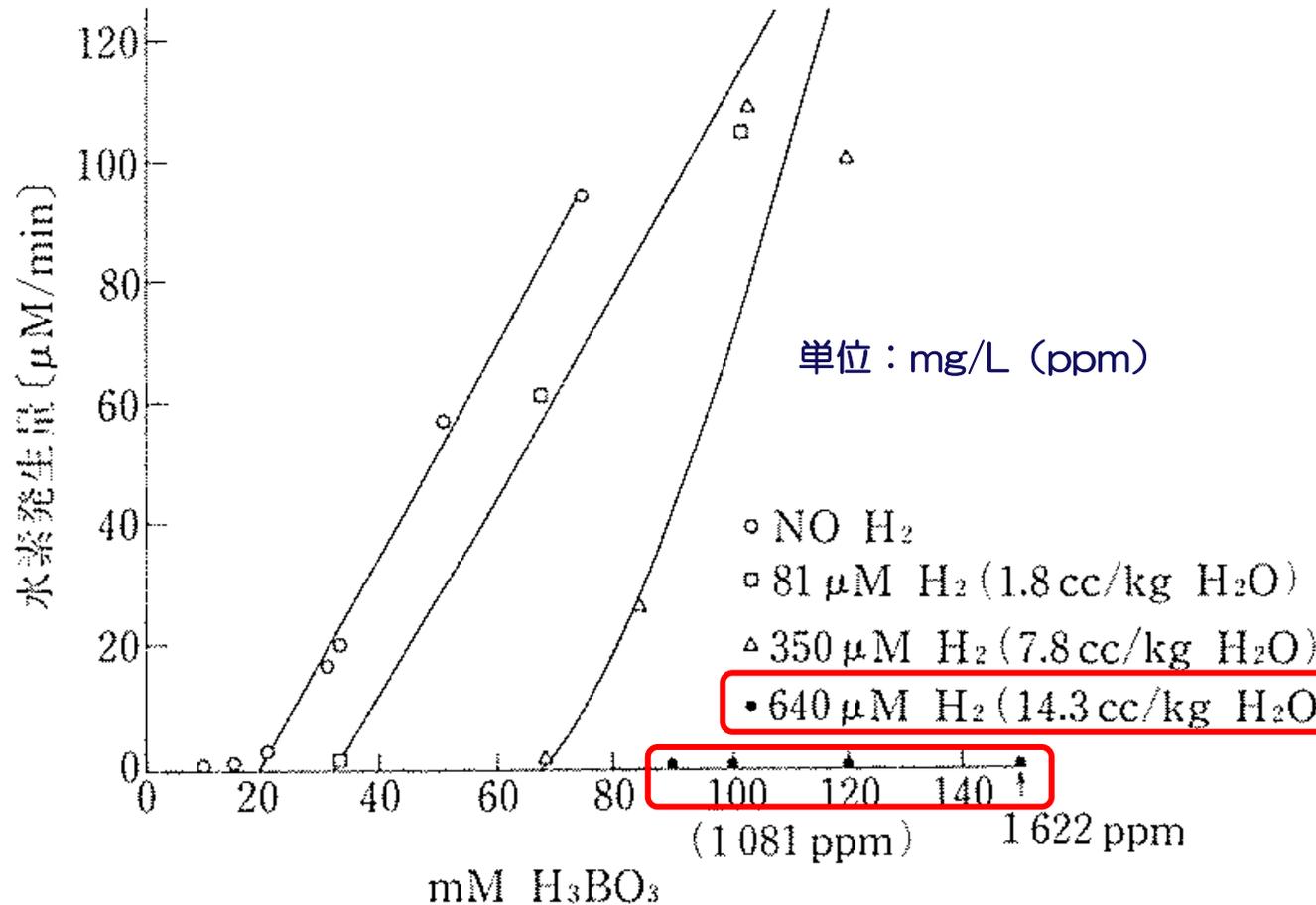
出典： PWR Primary System Chemistry: Experience With Elevated pH at Millstone Point Unit 3: Progress Report Number 2, EPRI, TR-100960, (1992).

通常運転時の原子炉一次冷却材中の アンモニア-電気伝導率-pHとの関係



原子炉一次冷却系では、水と N_2 の放射線分解により NH_3 が生成
 1ppmの NH_3 でも、電気伝導率が4を超えることはないため、
 これをアクションレベル2とする。

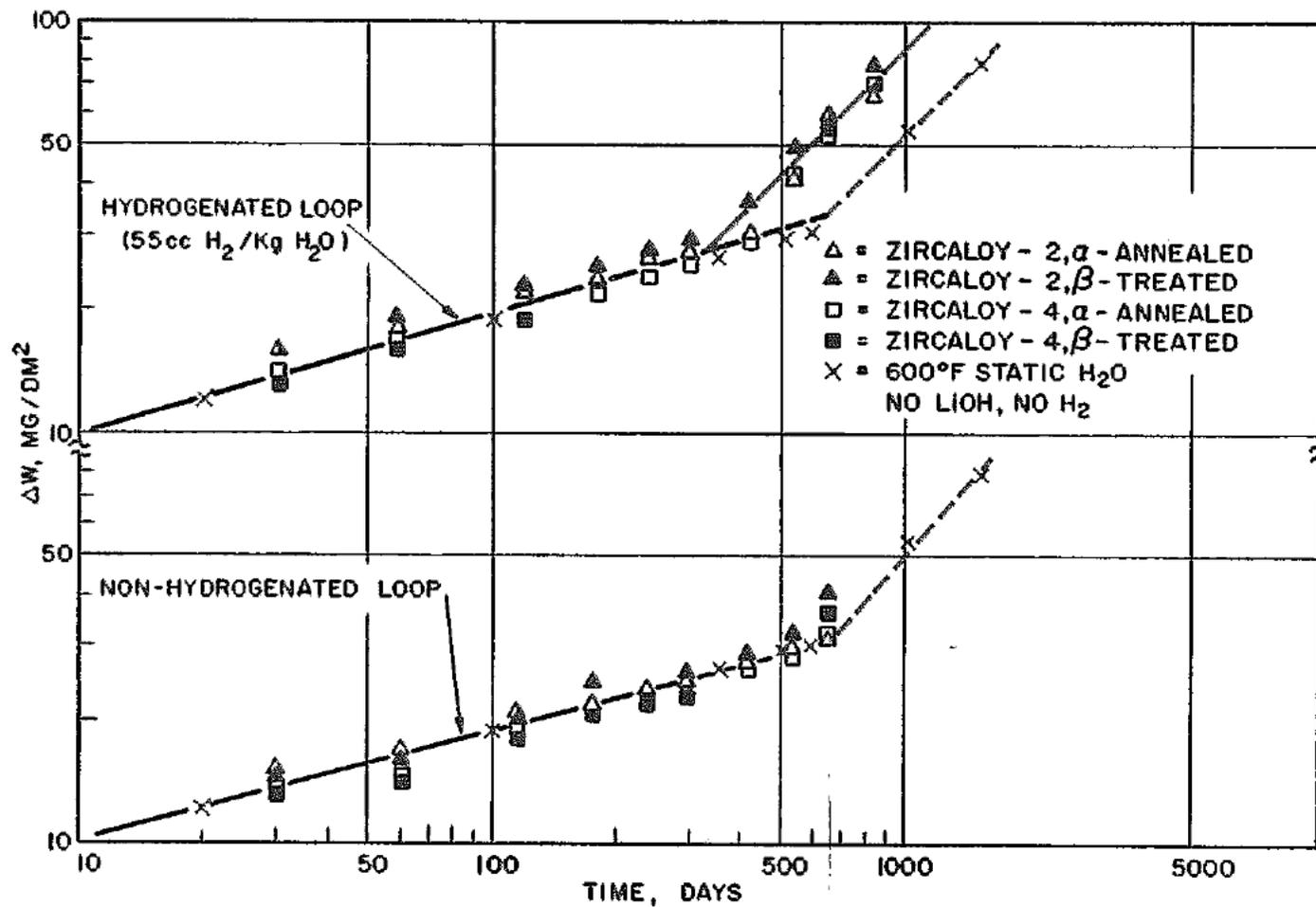
ほう酸水の放射線分解による水素発生量と 初期水素濃度の影響(附属書E)



$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ による粒子線効果で、ほう酸濃度が高いほど放射線分解が起こり易く、これを抑制するためには初期水素添加量を増す必要がある。しかし、実機運転サイクル初期に相当する高ほう酸濃度域においても、初期水素添加量を $14 \text{ cm}^3/\text{kg}$ にすると放射線分解は完全に抑制されている。この実験結果に基づき、PWRでは原子炉一次冷却材中の溶存水素濃度を $15 \text{ cm}^3/\text{kg}$ 以上に維持し、放射線分解による溶存酸素など酸化種の生成を抑制する水化学管理を行っている。

出典 : E. Hillner, "Hydrogen Absorption in Zircaloy during Aqueous Corrosion, Effect of Environment", WAPD-TM-411, (1964).

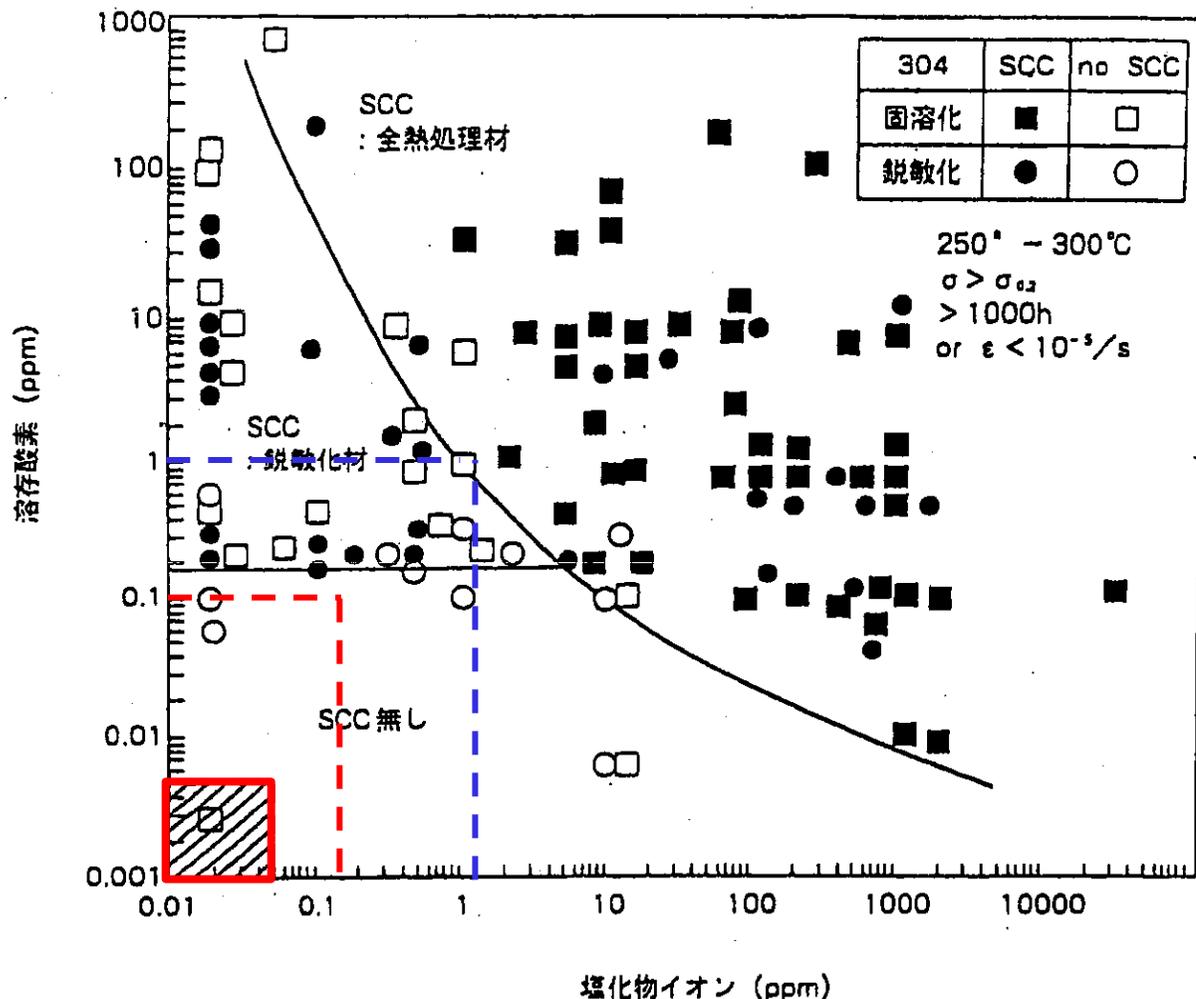
高温水中でのジルカロイ腐食量に対する水素の影響 (附属書E)



図は、水素添加条件と無添加条件での腐食量の時間変化を上下2段に示したもので、**変曲点**までの腐食速度は**55 cm³/kg**と水素添加なしで同等であり、この範囲では溶存水素濃度の違いでは腐食速度に差は無い。これから、**溶存水素濃度の上限値を50cm³/kg**としている。

出典： N. Ryckelynck, F. Chahma, N. Caris, et al., "AREVA's Water Chemistry Guidebook with Chemistry Guidelines for Next Generation Plants (AREVA EPRs)", NPC2012, Paris, (2012).

304ステンレス鋼のSCC発生に及ぼす塩化物イオン、 溶存酸素濃度の影響(附属書E)



仮に酸素100 $\mu\text{g/L}$ (ppb) が存在した場合でも、塩化物 SCCが発生しない条件として150 $\mu\text{g/L}$ (ppb)を塩化物イオンのアクションレベル2として設定する。また、溶存酸素は100 $\mu\text{g/L}$ (ppb)以下であれば塩化物イオンが数 mg/LあってもSCCは発生し難いとされる。この濃度を溶存酸素のアクションレベル2とする。

注) 図中のハッチングは PWR一次系通常運転水質条件を示す。

出典 : M. O. Speidel, "Overview of Methods for Corrosion Testing as Related to PWR Steam Generator and BWR Piping problems", The 1st US-Japan Joint Symposium on Light Water Reactors, Fuji, Japan,

原子炉一次冷却材における管理項目のアクションレベル設定値 及び測定頻度に関する国外指針との比較

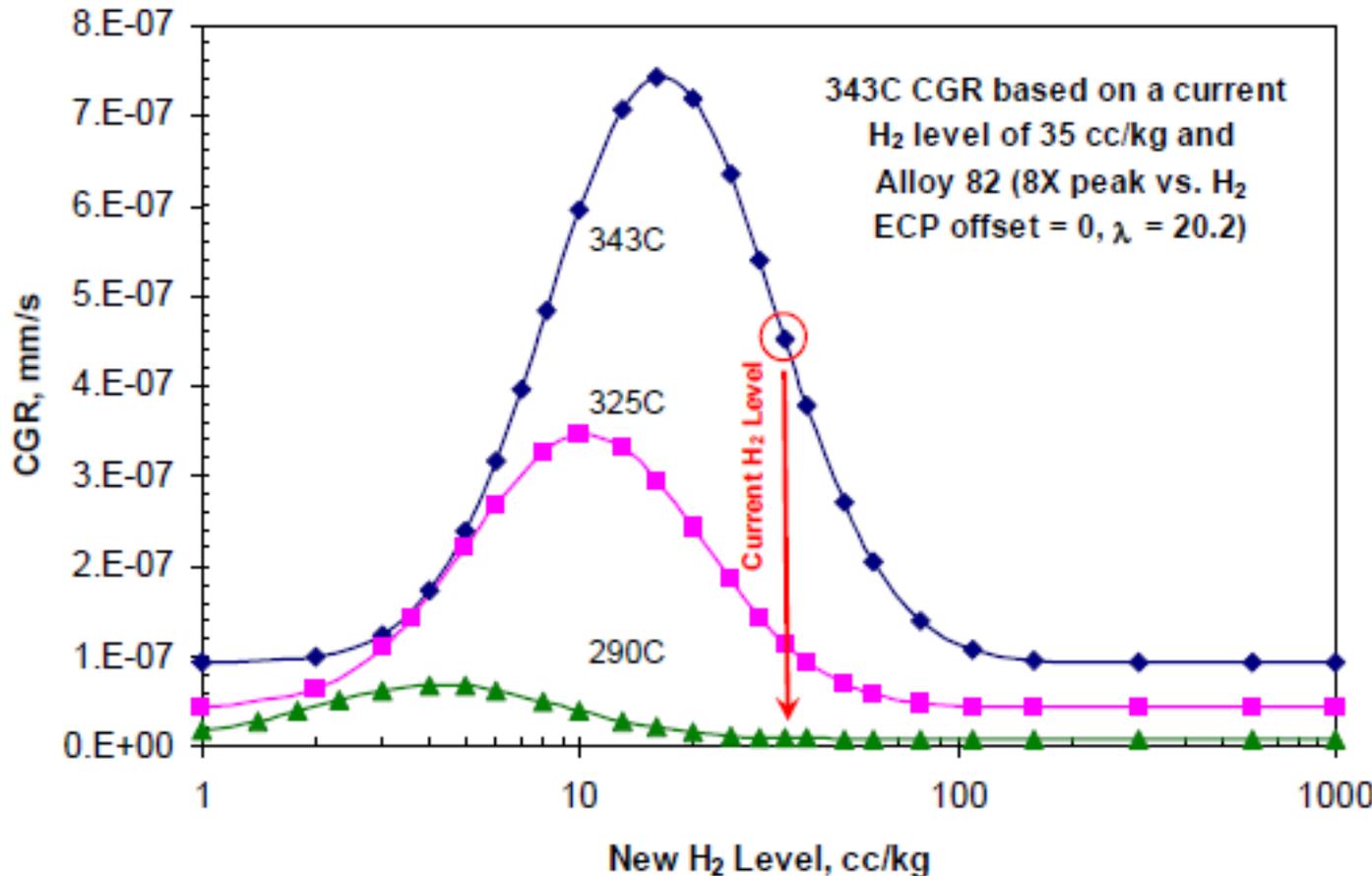
項目	日本原子力学会指針			EPRI ガイドライン(rev.4)			VGB ガイドライン (WC2006)	
	アクションレベル		頻度	アクションレベル		頻度	アクションレベル	
	レベル	値		レベル	値		レベル	値
電気伝導率 (mS/m) (at 25°C ^a)	1	<想定値-0.5, >想定値+0.5	D	日本原子力学会指針のコンセプト - 不純物イオンに関しては、電気伝導率とpH測定からも監視できる。 - 国外指針に比べ測定頻度が少ないのは、電気伝導率とpH測定である程度推測可能であるため。 - 分析標準等により高い分析精度が確保できる。 - 不純物イオンの連続監視は重要。				
	2	>4						
	3	-						
pH (at 25°C)	1	<想定値-0.5, >想定値+0.5	D					
	2	<4, >11						
	3	-						
塩化物イオン (μg/L)	1	>50	W	1		3/w	1	>100
	2	>150		2	>150		2	>200
	3	>1500		3	>1500		3	>1000
硝酸化物イオン (μg/L)	1	>50	W	1		3/w		
	2	>150		2	>150			
	3	>1500		3	>1500			
硫酸イオン (μg/L)	1	>50	W	1		1/w	1	>100
	2	>150		2	>150		2	>200
	3	>1500		3	>1500		3	>1000
リチウムイオン (mg/L)	1	<0.2, >3.5	W	1		3/w	1	
	2	>6		2	-		2	
	3	-		3	-		3	
溶存水素 (cm ³ /kg)	1	<25	W	1	<25, >50	3/w	1	<1.5(ppm)
	2	<15, >50		2	<15		2	<1, >4(ppm)
	3	<5		3	<5		3	<0.5, >5(ppm)
溶存酸素 (μg/L)	1	>5	M	1	>5	3/w	1	
	2	>100		2			2	
	3	>1000		3	>100		3	

通常運転時の原子炉一次冷却材における 制御項目の制御値及び測定頻度

項目		制御値	測定頻度
名称	単位		
リチウムイオン	mg/L	プラントごと	1回/週 ^{a)}
溶存水素	cm ³ /kg	25~35	1回/週 ^{a)}
ほう素	mg/L	核設計及び炉心反応度 に依存	1回/週

注^{a)}管理項目における測定頻度に準ずる。

ニッケル基合金のき裂進展速度に対する 溶存水素濃度の影響(解説)



600合金のSCC進展速度は特定の溶存水素濃度で増加すると考えられ、これらの知見を受けて40cm³/kgを超える高存水素濃度を適用するプラントが海外では増加している。一方で、き裂発生については低溶存水素濃度側で感受性が低下することが報告されている。被ばく低減も含めた最適な溶存水素濃度については、現在も議論が継続されている。

出典： P. L. Andresen, J. Hickling, A. Ahluwalia et al., "Effect of Dissolved H₂ in Primary Water on the SCC Growth Rate of Ni Alloys," Proc. of Nuclear Plant Chemistry Conf., Berlin, (2008).

通常運転時の原子炉一次冷却材における 診断項目の推奨値及び測定頻度

項目		推奨値	測定頻度
名称	単位		
アンモニア	mg/L	—	1回/月
γ核種 ^{a)}	Bq/cm ³	プラントごと	1回/月
シリカ	mg/L	≤0.5	1回/月
よう素131	Bq/cm ³	—	1回/週
キセノン133	Bq/cm ³	—	2回/月
トリチウム	Bq/cm ³	プラントごと	1回/月
金属不純物 ^{b)}	μg/L	—	1回/月
濁度	mg/L	—	1回/3ヶ月

注^{a)} プラント毎に適切な核種, 値を設定する。
 注^{b)} プラント毎に適切な金属不純物の項目を設定する。

原子炉一次冷却材82°C未満における 診断項目の推奨値及び測定頻度

項目		推奨値	測定頻度
名称	単位		
塩化物イオン	μg/L	≦150	1回/週
ふっ化物イオン	μg/L	≦150	1回/週
硫酸イオン	μg/L	≦150	1回/週
濁度	mg/L	—	1回/週

原子炉一次冷却材82°C以上原子炉未臨界における管理項目の アクションレベル, 推奨値及び測定頻度

項目		アクションレベル			推奨値	測定頻度
名称	単位	1	2	3		
塩化物イオン	μg/L	—	>150	—	—	1回
ふっ化物イオン	μg/L	—	>150	—	—	1回
硫酸イオン	μg/L	—	>150	—	—	1回
溶存酸素	μg/L	—	>100	—	—	1回/日（濃度低下後は1回/週）

起動時は濃度変化が大きい可能性があるため、原子炉停止に至らないアクションレベル2以下で管理する。したがって、リチウムイオン(アクションレベル1のみ)を除き、アクションレベル1及び3は設けない。

原子炉臨界から原子炉出力一定運転までにおける管理項目の アクションレベル, 推奨値及び測定頻度

項目		アクションレベル			推奨値	測定頻度
名称	単位	1	2	3		
電気伝導率(at 25°C ^{a)})	mS/m	—	>4		—	1回/日
pH(at 25°C ^{a)})	—	—	<4 >11	—	—	1回/日
塩化物イオン	μg/L	—	>150	—	—	1回/週
硝酸化物イオン	μg/L	—	>150	—	—	1回/週
硫酸イオン	μg/L	—	>150	—	—	1回/週
リチウムイオン	mg/L	<0.2 >3.5	—	—	—	1回
溶存水素	cm ³ /kg	—	<15 >50	—	—	1回/週
溶存酸素	μg/L	—	>100	—	—	1回/週

注^{a)} 測定後に25°Cに換算した値とする。

原子炉臨界から原子炉出力一定運転までにおける 原子炉一次冷却材の制御項目の制御値及び測定頻度

項目		制御値	測定頻度
名称	単位		
リチウムイオン	mg/L	0.2~3.5	1回
溶存水素	cm ³ /kg	25~35	1回/週
ほう素	mg/L	核設計及び炉心反応度に 依存	1回/3日

負荷降下開始から原子炉停止までにおける 原子炉一次冷却材の制御項目の制御値及び測定頻度

項目		制御値	測定頻度
名称	単位		
溶存水素	cm ³ /kg	15~50	1回/日
ほう素	mg/L	核設計及び炉心反応度 に依存	1回

負荷降下開始から原子炉停止までにおける 原子炉一次冷却材の診断項目の推奨値及び測定頻度

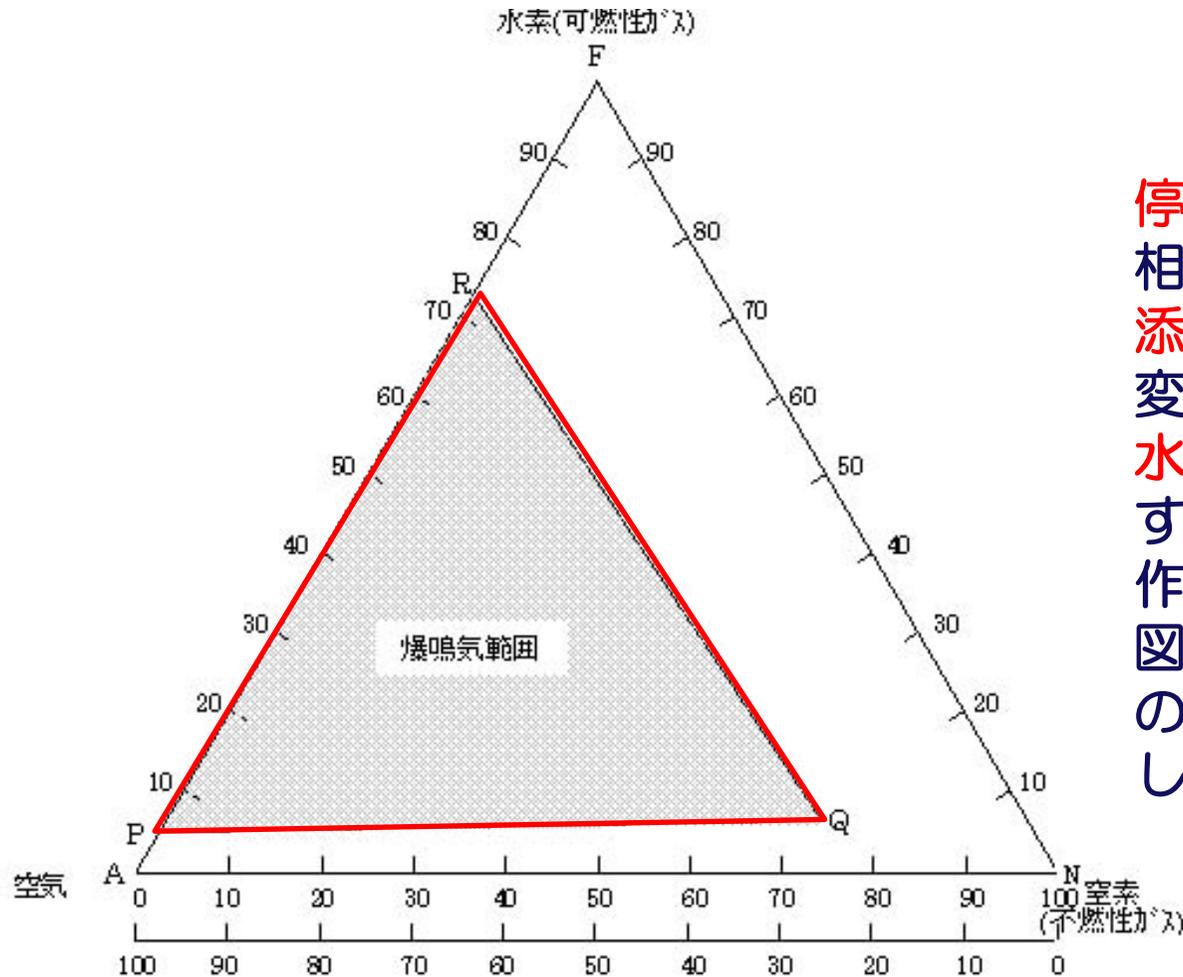
項目		推奨値	測定頻度
名称	単位		
電気伝導率 (at 25°C ^{a)})	mS/m	≤4	1回/日
pH (at 25°C ^{a)})	—	4~11	1回/日
塩化物イオン	μg/L	≤150	1回/週
ふっ化物イオン	μg/L	≤150	1回/週
硫酸イオン	μg/L	≤150	1回/週
リチウムイオン	mg/L	—	1回
溶存酸素	μg/L	≤100	1回/週
よう素131	Bq/cm ³	—	1回

注^{a)} 測定後に25°Cに換算した値とする。

原子炉停止から酸化運転終了までにおける 原子炉一次冷却材の制御項目の制御値及び測定頻度

項目		制御値	測定頻度
名称	単位		
溶存水素	cm ³ /kg	≤5	系統開放前に1回
ほう素	mg/L	核設計及び炉心反応度 に依存	1回

水素ガスの空气中爆鳴気範囲(附属書E)



室温

単位：(vol%)

停止時は、体積制御タンク気相部のガス置換により、水素添加雰囲気から大気飽和へと変える必要がある。この際、水素と酸素による燃焼を防止するため、窒素置換による操作が行われている。図の塗りつぶし部が空気中の水素ガスの爆鳴気範囲を示している。

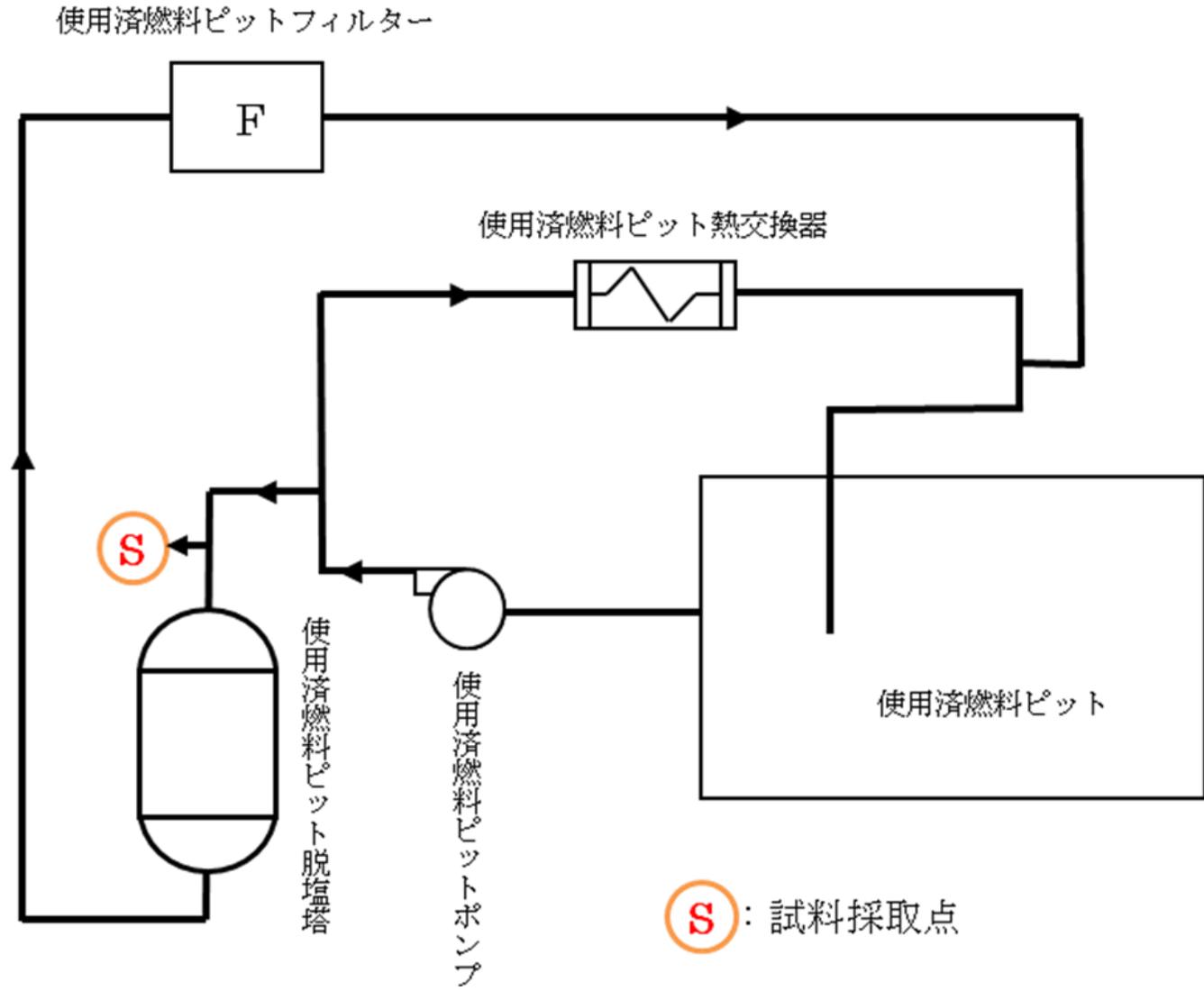
出典：北川徹三，”化学安全工学”，日刊工業新聞社(1973).

原子炉一次冷却系補給水における 診断項目の制御値及び測定頻度

項目		推奨値	測定頻度
名称	単位		
電気伝導率 (at 25°C ^{a)})	mS/m	≤0.2	1回/月
塩化物イオン	μg/L	≤150	1回/月
硝酸化物イオン	μg/L	≤150	1回/月
硫酸イオン	μg/L	≤150	1回/月
溶存酸素	μg/L	≤300	1回/3ヶ月
シリカ	mg/L	—	1回/3ヶ月

注^{a)} 測定後に25°Cに換算した値とする。

使用済燃料ピットの概要およびサンプリング箇所 (附属書C)



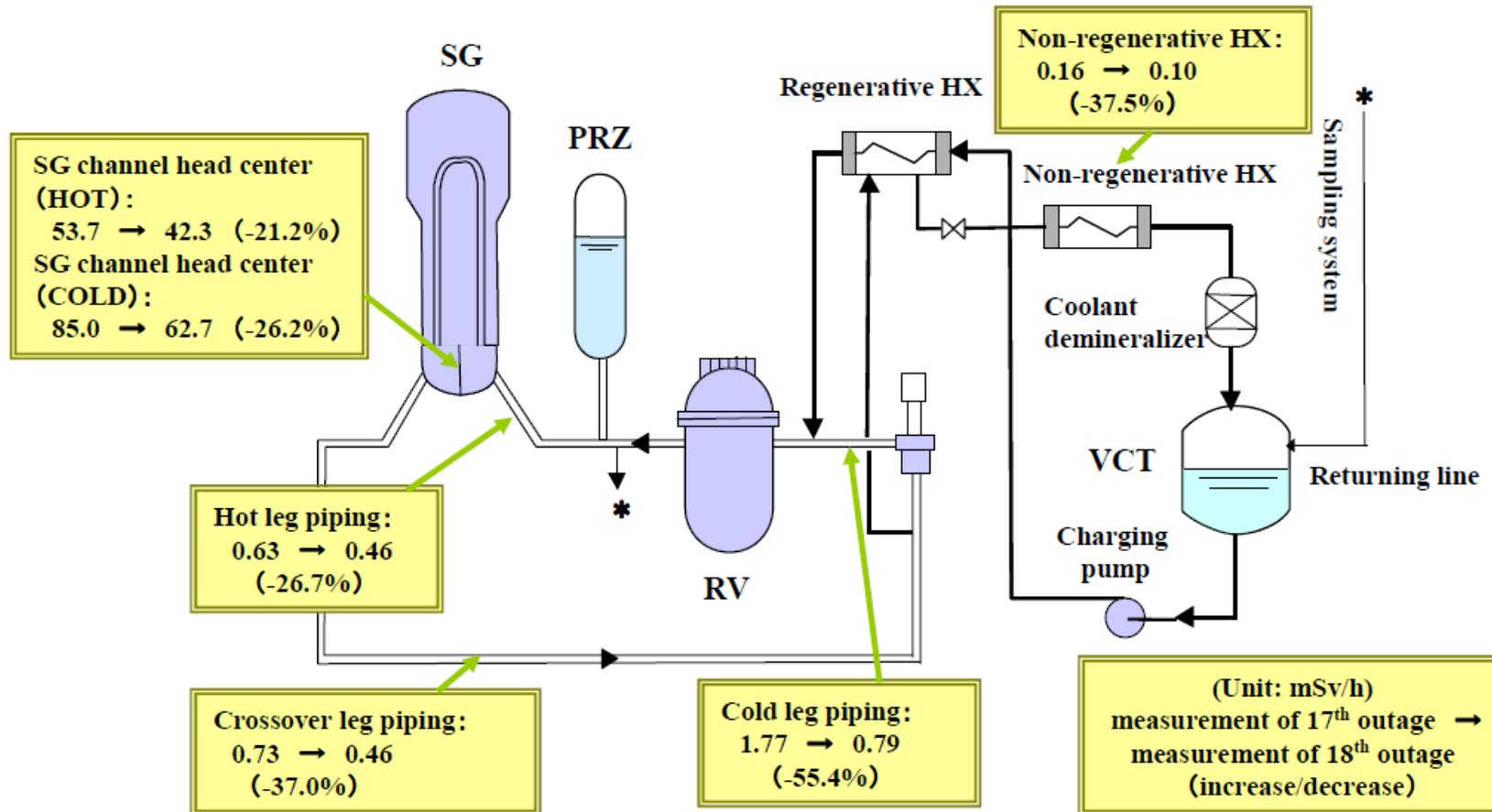
使用済燃料ピット水における 診断項目の推奨値及び測定頻度

項目		推奨値	測定頻度
名称	単位		
塩化物イオン	$\mu\text{g/L}$	≤ 150	1回/月
ふっ化イオン	$\mu\text{g/L}$	≤ 150	1回/月
硫酸イオン	$\mu\text{g/L}$	≤ 150	1回/月
濁度	mg/L	—	1回/月

低濃度亜鉛注入適用時の原子炉一次冷却材における 亜鉛の制御値及び測定頻度

項目		制御値	測定頻度
名称	単位		
亜鉛	μg/L	2~8	1回/週 ^{a)}
注 ^{a)} 亜鉛を初注入する場合は測定頻度を適宜増加させる。			

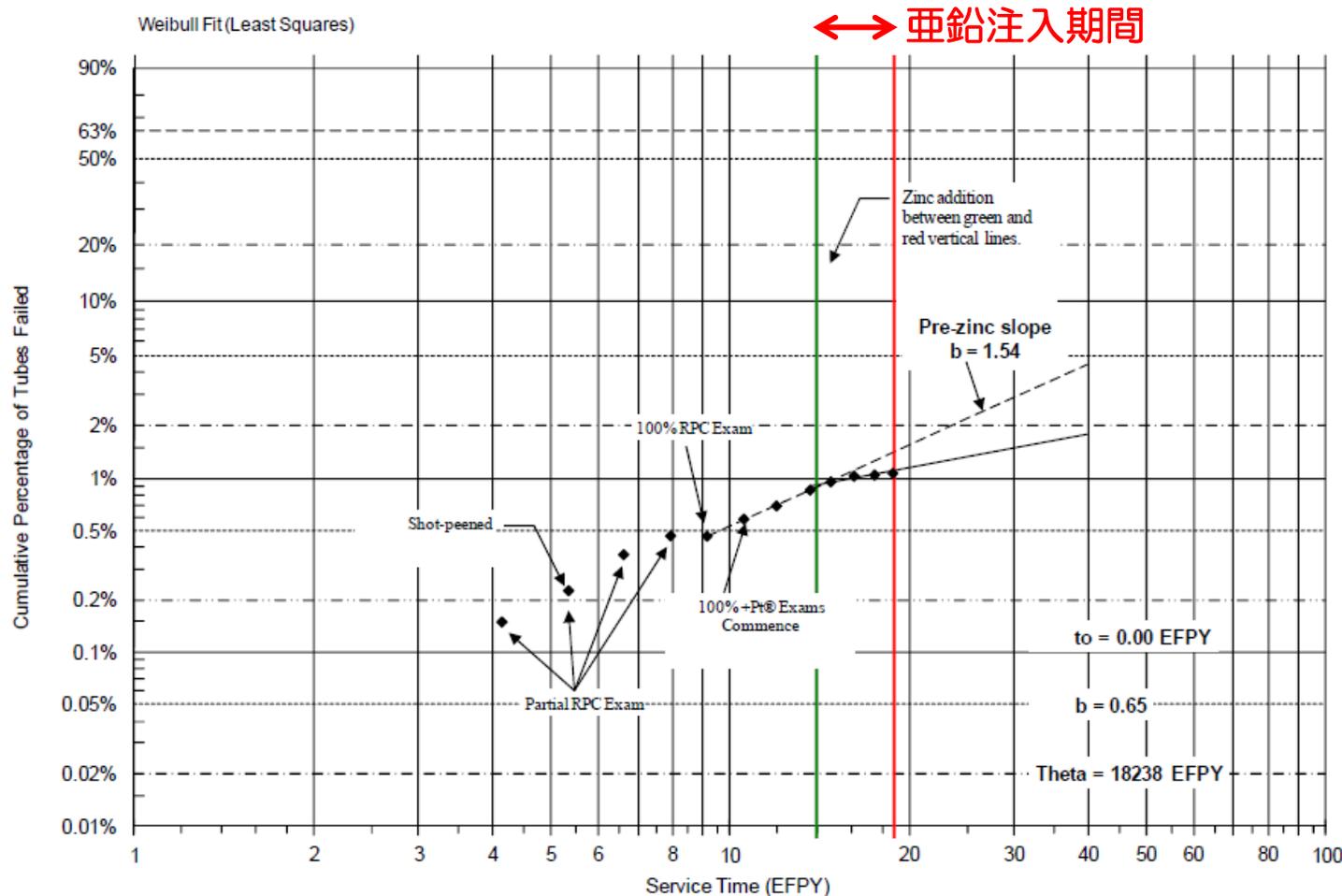
高浜4号機での亜鉛注入による線量率低減効果 (附属書E)



亜鉛濃度 $5 \mu\text{g/L}$ でも十分な線源低減効果を得られる。

出典： M. Matsuura, M. Aoki, M. Tsukamoto, et al., “Application of Zinc Injection to Reduce Radiation Sources at Takahama Unit 4”, SYMPOSIUM ON WATER CHEMISTRY AND CORROSION IN NUCLEAR POWER PLANTS IN ASIA 2009).

亜鉛注入による蒸気発生器伝熱管の損傷率変化 (解説)



米国PWR蒸気発生器伝熱管の損傷率変化についてのワイブル分布を示し，10ppb以上の亜鉛注入以降，新たな損傷増加が抑制されている。

出典： K. Fruzzetti, S. Choi, C. Haas et al., “PWR water chemistry controls: A perspective on industry initiatives and trends relative to operating experience and the EPRI PWR water chemistry guidelines,” Proc of Nuclear Plant Chemistry Conf., Quebec, Oct. 3-7, (2010)

PWR原子炉一次冷却材の化学分析項目と分析方法の概要 (附属書G)

分析項目	分析方法
電気伝導率 (at 25°C)	JIS K 0101:1998 工業用水試験方法, 電気伝導率計
pH(at 25°C)	JIS K 0101:1998 工業用水試験方法, ガラス電極法
塩化物イオン	JIS K 0101:1998 工業用水試験方法, チオシアン酸水銀(Ⅱ)吸光光度法又はJIS K 0556:1995 超純水中の陰イオン試験方法, イオンクロマトグラフ法
ふっ化物イオン	JIS K 0556:1995 超純水中の陰イオン試験方法, イオンクロマトグラフ法
硫酸イオン	JIS K 0556:1995 超純水中の陰イオン試験方法, イオンクロマトグラフ法
溶存酸素	JIS B 8224:2005 ボイラの給水及びボイラ水—試験方法, インジゴカルミン比色法, 又はJIS K 0803:1995 溶存酸素自動計測器, 溶存酸素計
リチウムイオン	JIS K 0121:2006 原子吸光分析通則, 原子吸光光度法 *ASTM D3561に原子吸光(フレイム法)を用いたリチウムイオンの分析例あり
溶存水素	AESJ-SC-S003:2010加圧水型原子炉一次冷却材の化学分析方法—溶存水素:2010, 隔膜法, ガスクロマトグラフ法
ほう素	AESJ-SC-S002:2010加圧水型原子炉一次冷却材の化学分析方法—ほう素:2010, pH滴定法, 電位差滴定法
アンモニア	JIS K 0101:1998 工業用水試験方法, インドフェノール青吸光光度法
γ核種	ゲルマニウム半導体検出器を用いたろ過分離測定法(ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー 平成4年改訂 文部科学省)
シリカ	JIS K 0101:1998 工業用水試験方法, モリブデン青吸光光度法
よう素131	AESJ-SC-S004:2010加圧水型原子炉一次冷却材の化学分析方法—放射性よう素:2010, 沈殿法, アニオンペーパー法
キセノン133	抽出後(抽出法は, 溶存水素のガスクロマトグラフ法と同じ), ゲルマニウム半導体検出器で測定
トリチウム	蒸留及びイオン交換樹脂で前処理後, 液体シンチレーション検出器を用いて検出(トリチウム分析法 平成14年改訂 文部科学省)
金属不純物	JIS K 0121:2006 原子吸光分析通則, 原子吸光光度法, JIS K 0119:2008 蛍光X線分析通則, 蛍光X線分析法, JIS K 0133:2007 高周波プラズマ質量分析通則, 高周波プラズマ質量分析法
濁度	JIS K 0101:1998 工業用水試験方法, 積分球式濁度計

品質管理

1. サンプルング方法

系統水などの試料採取には、連続測定計器を用いた連続サンプルング、及び測定の都度必要量の試料水のサンプルングを行う方法などがあり、分析する項目ごとに適切なサンプルング方法を選択する。

2. 分析方法

各項目の分析には、基本的にはそれぞれJISなどの規格類に規定された適切な分析方法を用いる。

3. 水質データ管理

- ◆ 記録 水質データの活用及び運用を考慮し、水質分析によって得られたデータは、採取日時、採取系統とともに的確かつ速やかに記録する。
- ◆ 評価 水質分析によって得られた測定値から、水質変動を極力早期、かつ的確に確認するため、水質データの評価に際し、考慮しておくことが望ましい事項を次に示す。
 - 測定値の正当性確保 水質分析に際し、次の事項を考慮して実施することにより、測定値の正当性を確保する。a) 測定機器の管理, b) 標準物質等の管理, c) 分析器材等の管理, d) 測定員の力量判定と維持
 - 測定値の妥当性評価 水質変動時、測定値の妥当性について、安定な運転状態からの水質変動範囲、関連水質項目、関連系統水質との相関評価を行い、水質異常に対する判断を行う。
- ◆ 保存 データの保存期間については、事業者ごとに適切に設定することとする。

PWR水化学制御に係る長期戦略

1. 原子炉一次冷却系における腐食防止

- (1) 高濃度亜鉛注入
- (2) 溶存水素濃度の最適化

2. 被ばく線量の低減

- (1) 亜鉛注入
- (2) 溶存水素濃度の最適化
- (3) pH一定運転（高リチウム，濃縮¹⁰B）

3. 水化学最適化のための将来への取組

長期サイクル運転等

結言

- PWR一次系水化学管理指針の原案は、ほぼ出来上がり、日本原子力学会・標準委員会の審査へと進む状況にある。
- PWR一次系水化学管理指針は、日本原子力学会年会の企画セッションや夏季セミナー等で広く公開・議論し、専門家による書面投票及び公衆審査を経た後、日本原子力学会の標準として2015年末に制定・発行される計画である。

謝辞

本指針原案を取り纏めるにあたり，ご支援，ご鞭撻
頂きました勝村庸介東大教授，石樽顕吉東大名誉教授，
内田俊介東北大元教授，水野孝之三重大元教授に深く
感謝いたします。

ご清聴有難うございました!

kawamuh@criepi.denken.or.jp