



AESJ-SC-S0XX:20XX

日本原子力学会標準

加圧水型原子炉二次系の水化学管理指針：20XX

公衆審査版

20XX 年 XX 月

一般社団法人 日本原子力学会

公眾審查版

まえがき

この指針は、一般社団法人日本原子力学会が、標準委員会 システム安全専門部会 水化学管理分科会 PWR 水化学管理指針作業会、同分科会、同専門部会及び同委員会での審議を経て制定したものです。この指針では、発電用軽水型原子炉の安全確保に係る冷却水などの水質管理（以下、“水化学管理”という。）が担っている役割を達成すべく管理方法を規定しています。その実践を通じ、プラントシステム全体の信頼性の維持、及び向上によるプラントの安全確保が期待されます。

加圧水型原子炉（PWR：Pressurized Water Reactor）の二次系では、高温高圧環境下で構造材料が原子炉一次冷却材としての水と接触しています。一般に、金属材料と水の界面では腐食反応がおこりますが、とりわけ PWR 二次系のような高温高圧環境下では、水質悪化に伴い構造材料の健全性に影響を及ぼすことが懸念されます。特に水質悪化が長期間にわたると、蒸気発生器伝熱管の二次系側から発生・進展した腐食亀裂などの損傷が伝熱管の貫通に至り、一次系に含まれる放射性物質が二次系に放出されると、冷却材中に微量に含まれる化学物質のみならず放射性物質の環境放出に繋がる可能性があります。また、流れ加速型腐食（FAC：Flow-Accelerated Corrosion）による二次系配管の減肉は、系外への高温蒸気の噴出に繋がることから、作業従事者の安全確保の観点から重要な管理項目のひとつとなります。

腐食損傷の抑制による構造材料の健全性維持、特に、原子炉一次冷却材の二次系への漏えいによる汚染防止を目的とした蒸気発生器伝熱管の健全性確保による冷却機能の維持は、原子力安全の基本原則のうち、“放射線リスク源を閉じ込めること”及び“人と環境を護ること”に繋がります。原子力発電所全体としては、労働安全にも考慮する必要があることから、二次系配管の減肉管理も視野に入れた水化学管理を適切に行うことにより構造材料の健全性を継続的に維持していくことが求められます。

しかし、腐食損傷抑制対策としての水化学管理による運用変更では、多種の構造材料の健全性を維持することが求められており、電気事業者（以下、“事業者”という。）は、プラントシステムを包括的に捉え、多様な課題に対して、調和的に解決する必要があります。

このような状況の下、国内原子力発電所では、事業者が腐食や線源強度上昇に係る種々の試験結果や40年超にわたる運転経験から水化学管理に係る運用（管理項目、管理値、管理頻度、管理値逸脱時の措置など）を定めるとともに、国内外の知見及び最新技術を適宜取込むことによって、水化学管理を実施してきました。しかし、2011年に発生した福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえ、日本原子力学会は、原子力安全の基本原則を体系化し、原子力安全の達成、維持、向上に資することを目指し、規格類を整備することになりました。このため、軽水炉の自主的安全性向上への概念を取り入れた水化学管理指針を策定することとなりました。策定に当たっては、事業者間に限らず、異なる分野の専門家と利害関係を越えた公開の場で水化学管理のあり方を議論することが社会的に要求されています。このため、公平、公正、公開の原則に基づく日本原子力学会標準として水化学管理指針を策定することによって、福島第一原子力発電所事故後の安全性向上に係る取組みを示すことが期待されます。

この指針は、事業者やメーカーの技術者にとって、より良い水化学管理を実践していく上で拠り所となるもので、解説に記載された管理値などの設定に係る技術根拠は、若手技術者への技術伝承のみならず、大学などの機関の研究者にとっても教材として幅広く機能することを期待しています。

この指針を策定した後も、安全性向上に係る新知見及び水化学などに係る最新技術を発電所の運用に適切に反映するため、国内外のプラントの運転経験及び新知見を解析しフィードバックを図ることにより、最新の水化学管理を取り入れ、指針の改定を行っていきます。このような活動を通じて、原子力発電所の

継続的な安全性向上に寄与できるものと期待されます。

公衆審査版

Foreword

The guidelines were developed according to the discussions of the Water Chemistry Guideline Working Group for Pressurized Water Reactors, the Water Chemistry Committee, the System Safety Committee, and the Standards Committee organized by the Atomic Energy Society of Japan (AESJ). These guidelines stipulate the methodology of pressurized water reactor (PWR) secondary coolant control (also known as water chemistry control). Through the practice of these guidelines, we expect to maintain and improve the reliability of PWR secondary systems and secure the safety of workers at PWRs.

In the PWR secondary coolant system, the structural materials are immersed in the secondary water as a coolant under a high-temperature and high-pressure environment. Generally, corrosion occurs at the interface of water and structural materials and is accelerated under a high-temperature and high-pressure environment; the integrity of structural materials is affected by the water quality. Especially, if an inappropriate water quality management is conducted for a long time, stress corrosion cracking (SCC) is propagated through the wall thickness of steam generator (SG) tube, and coolant leakage may be occurred from the primary to secondary side in SG. When the primary to secondary leakage occurs, the radioactive species as well as chemical species in the secondary coolant may be leaked to the out of station. In addition, the wall thinning of the secondary coolant pipe caused by flow-accelerated corrosion(FAC) is an important issue from the viewpoint of safety for the plant workers, because the wall thinning will cause the steam leakage from the secondary system the outside of the station

To ensure the secondary system safety, assurance of secondary system component material integrity, especially SG tubing integrity to prevent the radioactive contamination from the primary to secondary leakage, and maintain heat removal function from primary system, may be related strongly to “confining sources of radiation risks” and “protecting people and the environment from radiation” in the nuclear safety principle rule. Pipe wall thinning control is related to the labor safety principle rule. Both of the rules are important to operate PWR from the viewpoint of safety and reliability. Therefore, to ensure the nuclear safety, secondary system component material integrity is continuously needed using the appropriate water chemistry control techniques.

However, changes in water chemistry as the material corrosion control technique should be done to maintain the several kinds of secondary system component materials integrities which have different corrosion mechanism. Thus, the various issues must be solved harmoniously by understanding the plant system comprehensively.

Japanese utilities have created a water chemistry control methodology independently and implemented it for more than 40 years. This methodology was based on the state-of-the-art scientific understanding and technical background such as PWR field experience. Based on the lessons learned from the 2011 Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, the AESJ has systemized the above fundamental principles and aimed to achieve, maintain, and improve the nuclear safety. From the viewpoint of fundamental principles for nuclear safety, PWR secondary water chemistry guidelines shall be established independently to improve the safety of PWR. It is also required socially that not just Japanese utilities, but experts from different fields of industry and academia transcend their sectional interests and gather in a public forum to discuss the concept of water chemistry management. Establishing water chemistry guidelines as a standard of the AESJ based on the principles of fairness, justice and openness will show the society's efforts to improve safety after the accident.

The technical basis listed in the guidelines will contribute to the creation of more human resources for developing water chemistry experts and academic researchers, including those of the next generation.

After the guidelines have been established, they will be reviewed every five years, and the necessity of revision will be discussed at all times. The feedback from field experiences and case studies based on the state-of-the-art scientific understanding and the latest PWR operation technology all over the world will be incorporated into the guideline, and then the guidelines will be updated in order to appropriately apply new observations related to safety improvements to plant operation management. These activities will contribute to ensured and improved sustainably of PWRs safety and reliability.

制定：20XX年X月X日

この標準についての意見又は質問は、一般社団法人日本原子力学会事務局標準委員会担当（〒105-0004 東京都港区新橋 2-3-7 TEL 03-3508-1263）にご連絡ください。

公衆審査版

免責条項

この標準は、審議の公正、中立、透明性を確保することを基本方針とした標準委員会規約に従って、所属業種のバランスに配慮して選出された委員で構成された委員会にて、専門知識及び関心を有する人々が参加できるように配慮しながら審議され、さらにその草案に対して産業界、学界、規制当局を含め広く社会から意見を求める公衆審査の手続きを経て制定されました。

一般社団法人日本原子力学会は、この標準に関する説明責任を有しますが、この標準に基づく設備の建設、維持、廃止などの活動に起因する損害に対しては責任を有しません。また、この標準に関連して主張される特許権及び著作権の有効性を判断する責任もそれらの利用によって生じた特許権や著作権の侵害に係る損害賠償請求に応じる責任もありません。そうした責任はすべてこの標準の利用者にあります。

なお、この標準の審議に規制当局、産業界の委員が参加している場合においても、この標準が規制当局及び産業界によって承認されたことを意味するものではありません。

Disclaimer

This standard was developed and approved by the Standards Committee of AESJ in accordance with the Standards Committee Rules, which assure fairness, impartiality, and transparency in the process of deliberating on a standard. The Committee is composed of individuals who are competent or interested in the subject and elected, keeping the balance of organizations they belong in the subject, with their professional affiliations well-balanced as specified in the Rules. Furthermore, the standard proposed by the Committee was made available for public review and comment, providing an opportunity for additional input from industry, academia, regulatory agencies and the public-at-large.

AESJ accepts responsibility for interpreting this standard, but no responsibility is assumed for any detriment caused by the actions based on this standard during construction, operation, or decommissioning of facilities. AESJ does not endorse or approve any item, construction, device or activity based on this standard.

AESJ does not take any position with respect to the validity of any patent rights or copyrights claimed in relation to any items mentioned in this document, nor assume any liability for the infringement of patent rights or copyrights as a result of using this standard. The risk of infringement of such rights shall be assumed entirely by the users.

The Committee acknowledges with appreciation the participation by regulatory agency representatives and industry-affiliated representatives, whose contribution is not to be interpreted that the government or industry has endorsed this standard.

著作権

文書による出版者の事前了解なしに、この標準のいかなる形の複写・転載も行ってはなりません。この標準の著作権は、すべて一般社団法人日本原子力学会に帰属します。

Copyright

No part of this document may be reproduced in any form, without the prior written permission of the AESJ.

Copyright © 20XX Atomic Energy Society of Japan

All Right Reserved

公衆審査版

日本原子力学会における原子力標準の策定について

標準委員会は、原子力安全の確保を目指して公平、公正、公開の原則のもと、学术界、産業界及び国の機関等に広く所属する幅広い分野の専門家の参加を得て、活動を進めています。東京電力福島第一原子力発電所の事故からの多くの教訓を踏まえて、原子力安全の向上を最も重要な目標として、国際的なエクセレンスに学び、我が国の社会経済的環境、国民性、産業構造の変化や技術の発達等を十分勘案し、原子力発電所など原子力に係るシステムや製品、仕組みに関連する基準を原子力標準として随時制定し、それを新たな知見を随時反映して改定していくことが、標準委員会の使命です。原子力標準は安全性向上に資する最新の知恵の体系であり、真摯な議論を踏まえて、国民が最新の知見を迅速に活用することを可能としています。また原子力安全を最優先として市場競争を行っている産業界は、当該技術が標準化されたことを前提として、比較優位性を生み出す技術開発等に努力を傾け、ひいては原子力安全をより確実にする活動に注力することが可能となります。

我が国においてはこれまで、国民の生活の質を確保し、経済社会の安定な発展を支えるため、国の規制機関が要の基準を国家標準として制定し、行政判断に使用してきました。さらに近年では、機能性化として標準策定の活動を学会に委ねる方向が進展してきました。しかしながら今後は、早期に体系化を整えることに加えて、新知見の取入れをより迅速に行うようにすることで、技術やニーズの変化に合わせて標準を適正化していく作業を加速し、原子力安全の確保の観点で決して陳腐化が起らないように努めなければなりません。学会における標準の策定活動を通じて、福島第一原子力発電所事故の再発を防ぐことはもちろんのこと、いわゆる安全神話が復活することがないように努めていきたいと考えます。標準委員会としては、原子力安全を担う原子力規制委員会とも緊密な協働の下で、学会が中核となって、全てのステークホルダーから専門家が参画して真摯に議論を深め、優先度を明らかにしつつ、原子力安全の目標を達成するため適正な原子力標準を迅速に策定する役割を担っていきます。

このような精神に則り、標準委員会においては構成する委員一人ひとりが専門家として学会の倫理規程を遵守し、公平、公正、公開の原則のもとに原子力安全の向上に資する原子力標準を策定していきます。公衆審査を経て制定される標準を規制機関と産業界が安全性向上を図るために利用していくことになれば、新しい技術的知見を迅速に、また国民の利用に供することになります。さらに、これらを国際的な標準として提示していく努力を行うことも学会の役割であり、その実現は我が国の国際技術戦略に加え、福島第一原子力発電所事故後の国際社会における原子力安全に対して重要な貢献となると考えます。

20XX年XX月

標準委員会
委員長 関村 直人

原子力標準の位置付けについて

“加圧水型原子炉二次系の水化学管理指針：20XX”は、1999年9月22日に設置された日本原子力学会標準委員会 (Standards Committee of AESJ) が、原子力施設の安全性と信頼性を確保してその技術水準の維持・向上を図る観点から、原子力施設の設計・建設・運転・廃止措置などの活動において実現すべき技術のあり方を、原子力技術の提供者、利用者、専門家の有する最新の知見を踏まえ、影響を受ける可能性のある関係者の意見をパブリックコメントをも通じて聴取するなど公平、公正、公開の原則を遵守しながら審議し、合意したところを文書化した原子力標準の一つです。

標準委員会は、専門家集団の果たすべきこのような役割と責任を意識しながら、原子力施設の安全性と信頼性の達成に必要なニーズに対応する標準策定活動を行うために、公平、公正、公開の原則に則って定めた運営規則に従い、システム安全専門部会でこの標準の原案を作成しました。この標準が標準委員会設置の趣旨を踏まえて各方面で活用されることを期待します。

なお、この内容については、常に最新知見を原子力標準に反映すべく、原則として5年ごとに改定することとしておりますので、本委員会はこの標準の利用に際してのご質問や改定に向けてのご提案をいつでも歓迎します。

20XX年X月

標準委員会
委員長 関村 直人

システム安全専門部会の活動について

システム安全専門部会（以下、本専門部会）は、標準委員会の下で、原子力施設のシステム安全に関する標準を制定する活動を行っています。“システム安全”のゴールは、複雑な原子力施設をシステムとしてとらえ、総合的な安全を確保することです。具体的には、原子力システムの安全設計や、運転や保守における安全確保に関する考え方などについて、最新の技術的知見を標準としてまとめるとともに、継続的な改善を進める活動を行っています。

2011年3月11日の東日本大震災によって引き起こされた東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故によって、原子力発電に対する国民の信頼が大きく損なわれました。国内外で多くの事故調査報告書が刊行され、様々な視点からの改善提案がなされており、数多くの具体的な安全性向上対策が積極的に進められています。本専門部会の活動についても、しっかりと反省し、二度と大規模な事故を起こさないために、改善を進めていく必要があります。具体的には、従来不十分であった、シビアアクシデントの発生防止、拡大防止及び影響緩和のために必要な標準の策定に、体系的かつ一体的に取り組んでいます。さらに、原子力発電の安全・安定運転に対して従来から取り組んでいる、自主的安全性向上、高経年化対策、炉心燃料、水化学などの標準にも従来に増して安全性の徹底が求められており、引き続き積極的に改善を進めていきます。

このような多くの課題に対して、原子力発電の安全性及び信頼性の一層の向上を図るためには、関係する産業界、学术界、国・官界、学協会が俯瞰的かつ有機的な連携を図っていくことが必要です。さらに、原子力発電所の安全を確保するための体系を確立するために、国の規則として定められる性能規定に基づいて、仕様規定となる標準を民間規格として策定する重要性はさらに増しています。また国の規則と標準がシームレスな関係となり、総合的な安全確保に活用されることが重要です。本専門部会では、国内外の関係組織との役割分担を明確にしつつ、公平性、公正性、公開性を確保しながら、原子力施設のシステム安全に係る標準を体系的かつ計画的に整備する活動を推進しています。対象とする標準としては、国の規制に含まれるものから産業界の諸活動における手引き類までを含みます。国際的な視点がますます重要になってきており、専門部会の活動にも国際的活動を積極的に取り組んでいきます。

本専門部会は公開で行われていますので、事前に連絡頂ければ傍聴することができます。また審議過程は議事録として残し、ホームページにも掲載されますので、活動状況を確認いただくこともできます。

標準は、継続的に改善されていくことが必要です。新技術の開発状況や新たに得られた知見に基づいて適切に改定されていくことによって、その利用価値が維持できるものです。少なくとも年に一度は本専門部会で改定の必要性について検討を行うとともに、原則として5年ごとに改定版を発行することを目標に、活動を進めていきたいと考えています。

20XX年6月

標準委員会
システム安全専門部会
部会長 岡本 孝司

標準委員，専門部会，分科会，作業会，委員名簿

標準委員会

(順不同，敬称略)
(2016年6月15日現在)

委員長	関村 直人	東京大学	委員	多田 伸雄	(一社)日本電機工業会
幹事	山口 彰	東京大学	委員	谷本 亮二	三菱マテリアル(株)
委員	青柳 春樹	元日本原燃(株)	委員	鶴来 俊弘	中部電力(株)
委員	姉川 尚史	東京電力ホールディングス(株)	委員	寺井 隆幸	東京大学
委員	井口 哲夫	名古屋大学	委員	中井 良大	(国研)日本原子力研究開発機構
委員	<h1>制定後修正</h1>				
委員					
委員	河井 忠比古	(一社)原子力安全推進協会	委員	吉原 健介	関西電力(株)
委員	清水 直孝	日本原子力保険プール	委員	渡邊 宏	日揮(株)
委員	高橋 久永	三菱重工業(株)			

発

システム安全専門部会

(順不同, 敬称略)
(2016年5月31日現在)

部会長	岡本 孝司	東京大学	委員	後藤 大輔	(株)グローバル・ニューク リア・フュエル・ジャパン
副部会長	中村 武彦	(国研)日本原子力研究開発 機構	委員	中川 信幸	(株)原子力エンジニアリン グ
幹事	西村 洋一	(一社)原子力安全推進協会	委員	西田 浩二	日立 GE ニュークリア・ エナジー(株)
委員	有田 誠二	三菱重工業(株)	委員	久宗 健志	日本原子力発電(株)
委員	青木 繁明	三菱原子燃料(株)			
委員	阿部 弘亨	東京大学			
委員	<div data-bbox="311 781 1267 963" data-label="Text"> <h1>制定後修正</h1> </div>				
委員			委員	宮原 信哉	(国研)日本原子力研究開発 機構

水化学管理分科会

(順不同, 敬称略)
(2017年5月16日現在)

主査 勝村 庸介 (公社)日本アイソトープ協 委員 高木 純一 (株)東芝

副主
幹事
委員
委員
委員

制定後修正

エナ
開発

	研究所	機関
委員	河合 宣夫 中部電力(株)	委員 長谷川 英規 東京電力 HD(株)
委員	河村 浩孝 (一財)電力中央研究所	委員 久宗 健志 日本原子力発電(株)
委員	篠原 靖周 ニュークリア・デベロップ メント(株)	委員 水野 孝之 元三重大学
委員	荘田 泰彦 三菱重工業(株)	委員 室屋 裕佐 大阪大学

旧委員

会沢 元浩 (日立 GE ニュークリア・エナジー(株)), 牧平 淳智 (東京電力 (株)), 福村 卓也 ((株)原子力安全システム研究所), 平野 秀朗 ((一財)電力中央研究所)

常時参加者

佐藤 正俊 (原子力規制庁), 平野 秀朗 (元 (一財)電力中央研究所), 西村 孝夫 (三菱重工業 (株)), 甲川 憲隆 (ニュークリア・デベロップメント (株)), 手塚 稔也 (北海道電力 (株)), 鈴木 純一 (東京電力 HD (株)), 山崎 裕司 (東北電力 (株)), 井上 英彦 (中部電力 (株)), 山口 綱基 (北陸電力 (株)), 須澤 克則 (中国電力 (株)), 三島 清太郎 (四国電力 (株)), 古賀 優一 (九州電力 (株)), 中野 佑介 (日本原子力発電 (株)), 山田 浩巳 (電源開発 (株)), 梅原 隆司 ((一社)原子力安全推進協会)

PWR 水化学管理指針作業会

(順不同, 敬称略)
(2017年5月26日現在)

主査	河村 浩孝	(一財)電力中央研究所	委員	寺地 巧	(株)原子力安全システム 研究所
副主査	荘田 泰彦	三菱重工業(株)	委員	中野 信夫	関西電力(株)
幹事	梅原 隆司	(一社)原子力安全推進協会	委員	中野 佑介	日本原子力発電(株)
委員	古賀 優一	九州電力(株)	委員	西村 孝夫	三菱重工業(株)
委員	手塚 稔也	北海道電力(株)	委員	三島 清太郎	四国電力(株)

旧委
平野
一
協会
真鏡

制定後修正

推進
)

常時参加者

美濃 健太 (日本原子力発電(株))

標準の利用に当たって

標準は対象とする技術，活動あるいは結果の仕様について関係者のコンセンサスを規定しているものです。標準にはこうあるべきという義務的事項の他，こうあってもよいとして合意された非義務的な事項も含まれています。しかし，標準は，対象としている技術，活動あるいは結果の仕様について，規定している以外のものを排除するものではありません。

また，標準が規定のために引用している他規格・標準は，記載された年度版のものに限定されます。標準は全体として利用されることを前提に作成されており，公式な解釈は標準委員会が行います。標準委員会はそれ以外の解釈については責任を持ちません。標準を使用するに当たってはこれらのことを踏まえてください。

なお，標準委員会では，技術の進歩に対応するため，定期的に標準を見直しています。利用に当たっては，標準が最新版であることを確認して下さい。

公衆審査版

目 次

	ページ
序文.....	1
1 適用範囲.....	1
2 引用規格.....	1
3 用語及び定義.....	1
4 PWR 二次系水化学管理.....	3
4.1 PWR 二次系水化学管理の実施.....	3
4.2 管理項目, 制御項目及び診断項目.....	3
4.3 管理, 制御及び診断対象.....	5
4.4 アクションレベル, 制御値, 推奨値及び測定頻度.....	5
5 品質管理.....	13
5.1 一般事項.....	13
5.2 サンプルング方法.....	13
5.3 分析方法.....	13
5.4 水質データ管理.....	13
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.....	15
附属書 B (参考) PWR 二次系の運転モードの例.....	17
附属書 C (参考) PWR 二次冷却系における管理, 診断及び制御系統とサンプルング箇所の例.....	19
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.....	21
附属書 E (参考) アクションレベル, 推奨値及び制御値の考え方.....	32
附属書 F (参考) 測定頻度の設定の考え方.....	53
附属書 G (参考) サンプルング方法の例.....	65
附属書 H (参考) 水質分析方法の例.....	67
附属書 I (参考) 水質データの評価方法の例.....	68
解説.....	70
1 制定の趣旨.....	70
2 制定の経緯.....	70
3 制定後のフォロー.....	71
4 審議中に問題となった事項及び懸案事項.....	72
5 PWR のシステムの概要.....	72
6 水化学管理の考え方.....	74
7 SG 構成材料健全性に対する水化学の役割.....	77
8 構成材料健全性に対する水化学の役割.....	92
9 スケール付着抑制に対する水化学の役割.....	99
10 二次系試料採取設備及び水質監視計器.....	110
11 プラント運用に関わる事項.....	116

12 海外の水化学指針との比較..... 122

公眾審查版

日本原子力学会標準

加圧水型原子炉二次系の水化学管理指針：20XX

Secondary Water Chemistry Guidelines for Pressurized Water Reactors：20XX

序文

加圧水型原子炉（PWR）は、一次冷却系の冷却材が有する熱を、熱交換器である蒸気発生器内の伝熱管を介し二次系に伝え、蒸気を発生し、蒸気タービンを回し発電する原子炉である。二次系においては、一次冷却材と同様、軽水を用い、構造材料の長期健全性の維持を目的として、水化学管理が実施されている。この指針は、PWR 二次系のより良い水化学管理のための標準的な方法を規定することにより、原子力安全の継続的な改善に寄与することを目的としている。

1 適用範囲

この指針は、事業者が現行の PWR の原子力安全の確保において考慮すべき標準的な二次系及びそれに附随する設備の水化学管理方法について規定する。

2 引用規格

次に掲げる規格及び標準は、この指針に引用されることによって、この指針の規定の一部を構成する。これらの引用規格のうちで、西暦年を付記してあるものは、記載の年の版を適用し、その後の改訂版（追補を含む）は適用しない。

なお、引用規格とこの指針の規定に相違がある場合は、この指針の規定を優先する。

JIS Z 4001 原子力用語

JIS K 0211 分析化学用語（基礎部分）

JEAC 4111-2009 原子力発電所における安全のための品質保証規程

3 用語及び定義

この指針で用いる主な用語及び定義は、**JIS Z 4001**、**JIS K 0211** によるほか、次による。

3.1

管理項目 (Control Parameters)

構造材料の長期健全性を損なうおそれのあることが明らかになっている水質項目であり、アクションレベルを設定する項目。

3.2

アクションレベル (Action Level)

構造材料の長期健全性確保の観点から必要となる措置の実施を判断するため、管理項目に設定する値。

注記 アクションレベルにはアクションレベル 1, 2, 3 がある。

3.3

推奨値 (Recommended Value)

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。

3.4

制御項目 (Conditioning Parameters)

薬品添加などにより適切に水質制御を実施すべき水質項目。

3.5

診断項目 (Diagnostic Parameters)

水化学管理の状態を把握し、構造材料腐食などの診断を目的として設定する項目。

3.6

二次系 (Secondary System)

蒸気発生器，高圧タービン，湿分分離加熱器，低圧タービン，復水器，復水ポンプ，復水脱塩設備，低圧給水加熱器，脱気器，給水ポンプ，高圧給水加熱器など及びそれらを結ぶ熱伝達ループ。

3.7

運転モード (Operation Mode)

二次系通常運転時，二次系起動時，二次系停止時，二次系停止中を含む PWR 二次系の運転状態。

3.8

二次系通常運転時 (Power Operation)

発電機並列から，発電機出力を降下させる操作を開始するまでの期間。

3.9

二次系起動時 (Start up)

蒸気発生器への水張り開始から発電機並列までの期間。

3.10

二次系停止時 (Shut down)

通常運転時から原子炉停止のために出力降下させる操作を始めてから余熱除去系統の運転開始により蒸気発生器による除熱が不要となるまでの期間。

3.11

二次系停止中 (Outage)

蒸気発生器による除熱が不要となった後，原子炉を起動するために蒸気発生器への水張りを開始するまでの期間（クリーンアップも含む）。

3.12

改良水化学 (Improved water chemistry)

現在の水化学管理方法と比較して更なる構造材健全性確保を目的とした水質管理方法。

3.13

二次系統水 (Secondary coolant water)

二次系を流れる水及び蒸気。

3.14

蒸気発生器器内水 (Steam Generator blowdown water)

蒸気発生器器内の二次側に属する水。

3.15

給水 (Feed water)

二次系の脱気器以降¹⁾，蒸気発生器までに属する水。

注¹⁾ 脱気器がないプラントは，“脱気器以降”を“主給水ポンプ以降”とする。

3.16

復水 (Condensate water)

二次系の復水器ホットウェルから脱気器入口までに属する水。

3.17**抽気・ドレン (Exhaust, heater drain)**

湿分分離器ドレン，低圧抽気ドレン，高圧抽気ドレンなどの水。

3.18**二次系補給水 (Secondary make up water)**

海水又は河川水などから補給水処理設備によって製造され，二次系純水タンクに補給される水。

3.19**二次系純水タンク水 (Secondary make up water storage tank water)**

二次系への補給水及び一次冷却系補給水の原水となる水。

3.20**クリーンアップ (Secondary System clean up)**

プラント起動に先立って，定期検査工事時に混入した不純物及び工事期間中に発生したさびなどを除去することを目的として二次系をフラッシングすること。

3.21**クレビス部 (Crevice region)**

蒸気発生器伝熱管と管支持板管穴，及び管板上堆積スラッジ²⁾との間の狭あい部。

注²⁾ スラッジは，粒子状の鉄を主成分とする金属酸化物の堆積物である。

4 PWR 二次系水化学管理**4.1 PWR 二次系水化学管理の実施**

原子力安全の確保に向け，PWR では，構造材料の健全性維持を目的として，二次系統水の管理が行われている。また，機器の性能維持に着目した管理も行われている。

これらを達成するために，各水化学管理の項目には下記の管理項目，制御項目及び診断項目を定めて管理している（**解説 2.3** 参照）。

なお，自主的安全性向上を図るため，この指針に最新知見及び技術を取り込むべく PDCA サイクルを実践し，必要に応じこれら項目の見直しを行う（**解説 3** 参照）。

4.2 管理項目，制御項目及び診断項目**4.2.1 管理項目****4.2.1.1 一般事項**

管理項目は，構造材の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ある。設定されたアクションレベルに対して非安全側に移行（以下，これを“アクションレベルに至る”といい，逆に安全側に移行することを“アクションレベルから回復する”という。）した場合にはレベルごとに適切な措置を実施する。

4.2.1.2 アクションレベル

この指針では，アクションレベルを次のように大別する。

- a) **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。
- b) **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。

c) **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。

4.2.1.3 アクションレベルに至った場合の措置

各アクションレベルに至った場合の措置は次のとおりとする。ただし、アクションレベルに至った状態で運転モードの移行を伴った場合は、運転モードが移行した時点より移行後の運転モードにおける水質管理を実施することとする。

a) **アクションレベル 1 に至った場合の措置** 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¹⁾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。

注¹⁾ アクションレベルに至ってから回復までの許容時間（以下、“許容時間”という。）1 週間の考え方については、**附属書 A**を参照。

b) **アクションレベル 2 に至った場合の措置** 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²⁾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措置を検討する。

注²⁾ 許容時間 24 時間の考え方については、**附属書 A**を参照。

c) **アクションレベル 3 に至った場合の措置** 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、出力降下又はプラント停止の措置を講じる。

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プラント運転状態を維持できる。

4.2.1.4 推奨値の設定

アクションレベルの設定に加えて、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推奨値を設定する。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。

4.2.1.5 測定頻度

管理項目の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に、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。

4.2.2 制御項目

4.2.2.1 一般事項

制御項目は、薬品添加などにより適切に水質制御を実施すべき水質項目であり、必要に応じて制御値を設定して各々の数値を満足するように水質改善措置を行う。

4.2.2.2 制御値の設定

プラント設備の健全性確保の観点から、薬品添加などにより満足させるべき値として必要に応じて制御値を設定する。

4.2.2.3 測定頻度

制御項目の制御値を満足しているかどうかを確認するために、制御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。

4.2.3 診断項目

4.2.3.1 一般事項

水化学管理の状態を把握するため、構造材料の腐食などの診断を目的として設定する項目であり、推奨

値を設けた項目についてはその値を達成することが望まれる。

4.2.3.2 推奨値の設定

管理項目と同様に、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推奨値を設定する。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。

4.2.3.3 測定頻度

診断項目の推奨値を達成しているかどうかを確認するために、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。

4.3 管理、制御及び診断対象

4.3.1 一般事項

管理、制御及び診断項目として設定する水質項目は、各々の運転モード及び系統に区別して規定する。

4.3.2 運転モード

この指針では、PWR 二次系における運転モードを次のように大別する。
なお、二次系運転モードと一般的な PWR の運転操作との関連性については、**附属書 B** で説明する。

- a) 二次系通常運転時
- b) 二次系起動時
- c) 二次系停止時
- d) 二次系停止中

4.3.3 管理、制御及び診断系統水

この指針では、次に示す系統の水質項目などを管理項目、制御項目又は診断項目として規定する。サンプリング箇所の例については、**附属書 C** で説明する。

- a) 蒸気発生器器内水
- b) 復水ポンプ出口水
- c) 復水脱塩装置出口水
- d) 高圧給水加熱器出口水
- e) 二次系補給水
- f) 二次系純水タンク水
- g) 二次系統水

4.4 アクションレベル、制御値、推奨値及び測定頻度

4.4.1 一般事項

この指針で規定する管理項目、制御項目及び診断項目と各々の設定値は次に示すとおりとする。

なお、管理項目、制御項目及び診断項目の分類の考え方については**附属書 D**、アクションレベル、推奨値及び制御値の考え方については**附属書 E**、測定頻度の設定の考え方については**附属書 F**による。

4.4.2 二次系通常運転時

4.4.2.1 蒸気発生器器内水

二次系通常運転時の蒸気発生器（以下 SG）器内水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を**表 1**に、診断項目の推奨値及び測定頻度を**表 2**に示す。

表 1—二次系通常運転時—SG 器内水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		
pH (at 25°C ^{a)})	—	—	<8	—	—	1 回/週
ナトリウム	μg/L	>5	>50	>300	≤1	1 回/日 ^{b)}
塩化物イオン	μg/L	>10	>100	>2 000	≤2	1 回/日 ^{b)}
硫酸イオン	μg/L	>10	>100	—	≤2	1 回/日 ^{b)}

注^{a)} 測定後に 25°C に換算した値とする。
 注^{b)} 水質監視計器が設置されている場合は，計器による傾向監視を推奨する。

表 2—二次系通常運転時—SG 器内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		
全放射能	Bq/cm ³	—	1 回/月 ^{a)}

注^{a)} SG ブローダウン水モニタによる連続測定を実施する。

4.4.2.2 高圧給水加熱器出口水

二次系通常運転時の高圧給水加熱器出口水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を表 3 に，制御項目の制御値及び測定頻度を表 4 に，診断項目の推奨値及び測定頻度を表 5 に示す。

表 3—二次系通常運転時—高圧給水加熱器出口水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		
ヒドラジン	μg/L	<50	—	—	—	1 回/日 ^{a)}
溶存酸素	μg/L	—	>5	—	—	1 回/週 ^{a)}
全銅 ^{a)}	μg/L	>1	—	—	—	1 回/週
鉛	μg/L	>10	—	—	—	1 回/月

注^{a)} 水質監視計器による連続測定を推奨する。計器を設置する系統は脱気器入口水としてもよい。
 注^{b)} 構成材料に銅系材料を使用しているプラントに適用する。

表 4—二次系通常運転時—高圧給水加熱器出口水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		
ヒドラジン	μg/L	プラントごと ^{a)}	1回/日 ^{b)}
pH (at 25°C ^{c)})	—	プラントごと ^{a)}	1回/日 ^{b)}

注 ^{a)} プラントごとの系統設備，系統構成により適切な条件を設定する。
^{b)} 水質監視計器による連続測定を推奨する。計器を設置する系統は脱気器入口水としてもよい。
^{c)} 測定後に 25°C に換算した値とする。

表 5—二次系通常運転時—高圧給水加熱器出口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		
pH 調整剤	mg/L	プラントごと ^{a)}	適宜
電気伝導率	mS/m	プラントごと ^{a)}	1回/日 ^{c)}
鉄	μg/L	≤5 ^{b)}	1回/週

注 ^{a)} プラントごとの系統設備，系統構成により適切な条件を設定する。
^{b)} プラントごとの系統設備，構成，水処理条件によって得られる適切な値を考慮する。
^{c)} 水質監視計器による連続測定を推奨する。計器を設置する系統は脱気器入口水としてもよい。

4.4.2.3 復水ポンプ出口水

二次系通常運転時の復水ポンプ出口水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を表 6 に，診断項目の推奨値及び測定頻度を表 7 に示す。

表 6—二次系通常運転時—復水ポンプ出口水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		
カチオン電気伝導率 ^{a)}	mS/m	>0.03	>0.05	—	—	連続計器監視 ^{b)}
ナトリウム ^{a)}	μg/L	>10	>20	—	—	連続計器監視 ^{b)}

注 ^{a)} 最低限どちらかの計器で監視を行うこと。
^{b)} 水質監視計器保守，点検などによる設備停止時は，復水器ホットウェル検塩装置などの関連水質監視計器，又は手分析による監視を行う。

表 7—二次系通常運転時—復水ポンプ出口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		
溶存酸素 ^{a)}	μg/L	—	1回/日

注 ^{a)} 復水器，低圧給水加熱器など真空域に銅系材料を使用しているプラントでは，監視強化のため推奨値の設定を検討する。

4.4.2.4 二次系純水タンク水

二次系通常運転時の二次系純水タンク水における診断項目の推奨値及び測定頻度を表 8 に示す。

表 8—二次系通常運転時-二次系純水タンク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		
電気伝導率	mS/m	≤0.1	1 回/月
ナトリウム	μg/L	≤5	1 回/月
塩化物イオン	μg/L	≤10	1 回/月
硫酸イオン	μg/L	≤10	1 回/月

4.4.2.5 復水脱塩設備出口水

二次系通常運転時の復水脱塩設備出口水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を表 9 に、診断項目の推奨値及び測定頻度を表 10 に示す。

表 9—二次系通常運転時-復水脱塩設備出口水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	mS/m	>0.01	—	—	—	1 回/日 ^{a)}

注^{a)} 水質監視計器による連続測定を推奨する。

表 10—二次系通常運転時-復水脱塩設備出口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		
ナトリウム	μg/L	≤0.06	適宜 ^{a)}
塩化物イオン	μg/L	≤0.15	適宜 ^{a)}
硫酸イオン	μg/L	≤0.15	適宜 ^{a)}

注^{a)} 復水脱塩設備出口水電気伝導率上昇時、又は通常運転時に SG 器内水不純物濃度が大きく変動した場合に確認する。

4.4.3 二次系起動時

4.4.3.1 SG 器内水

二次系起動時の SG 器内水における診断項目の推奨値及び測定頻度を表 11 に示す。

表 11—二次系起動時—SG 器内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		
カチオン電気伝導率	mS/m	≤ 0.2	1回 ^{a)}
ナトリウム	$\mu\text{g/L}$	≤ 50	1回 ^{a)}
塩化物イオン	$\mu\text{g/L}$	≤ 100	1回 ^{a)}
鉛	$\mu\text{g/L}$	≤ 100	1回 ^{a)}

注^{a)} 原子炉一次冷却材昇温後、発電機並列前に推奨値を満足していることを確認する。

4.4.3.2 高圧給水加熱器出口水

二次系起動時の高圧給水加熱器出口水における診断項目の推奨値及び測定頻度を表 12 に示す。

表 12—二次系起動時—高圧給水加熱器出口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		
pH (at 25°C ^{a)})	—	プラントごと ^{b)}	適宜 ^{c)}
電気伝導率	mS/m	プラントごと ^{b)}	適宜 ^{c)}
ヒドラジン	$\mu\text{g/L}$	≥ 50	適宜 ^{c)}
溶存酸素	$\mu\text{g/L}$	≤ 5	1回 ^{d)}

注^{a)} 測定後に 25°C に換算した値とする。
^{b)} プラントごとの系統設備、系統構成により適切な条件を設定する。
^{c)} pH, 電気伝導率, ヒドラジンはプラント出力に応じて、適宜確認、調整することが必要であるため測定頻度を適宜としている。
^{d)} 原子炉一次冷却材昇温後、発電機並列前に推奨値を満足していることを確認する。

4.4.3.3 復水ポンプ出口水

二次系起動時の復水ポンプ出口水の診断項目の推奨値及び測定頻度を表 13 に示す。

表 13—二次系起動時—復水ポンプ出口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		
カチオン電気伝導率 ^{a)}	mS/m	≤ 0.03	1回 ^{b)}
ナトリウム ^{a)}	$\mu\text{g/L}$	≤ 10	1回 ^{b)}

注^{a)} 最低限どちらかの計器で監視を行うこと。
^{b)} 原子炉一次冷却材昇温後、発電機並列前に推奨値を満足していることを確認する。また、水質監視計器による連続測定を推奨する。

4.4.4 二次系停止時

4.4.4.1 高圧給水加熱器出口水

二次系停止時の高圧給水加熱器出口水における診断項目の推奨値及び測定頻度を表 14 に示す。

表 14—二次系停止時—高圧給水加熱器出口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		
pH (at 25°C ^{a)})	—	プラントごと ^{b)}	適宜 ^{c)}
電気伝導率	mS/m	プラントごと ^{b)}	適宜 ^{c)}
ヒドラジン	µg/L	≧50	適宜 ^{c)}
注 ^{a)} 測定後に 25°C に換算した値とする。 ^{b)} プラントごとの系統設備，系統構成により適切な条件を設定する。 ^{c)} pH，電気伝導率，ヒドラジンはプラント出力に応じて，適宜確認，調整することが必要であるため測定頻度を適宜としている。			

4.4.4.2 復水ポンプ出口水

二次系停止時の復水ポンプ出口水における診断項目の推奨値及び測定頻度を表 15 に示す。

表 15—二次系停止時—復水ポンプ出口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		
カチオン電気伝導率 ^{a)}	mS/m	≦0.03	1 回 ^{b)}
ナトリウム ^{a)}	µg/L	≦10	1 回 ^{b)}
注 ^{a)} 最低限どちらかの計器で監視を行うこと。 ^{b)} 水質監視計器による連続測定を推奨する。			

4.4.5 二次系停止中

4.4.5.1 SG 器内水

二次系停止中の SG 器内水における診断項目の推奨値及び測定頻度について，ヒドラジン及びアンモニア併用時を表 16 に，ヒドラジン単独時を表 17 に示す。

表 16—二次系停止中—ヒドラジン，アンモニア併用時の SG 器内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		
pH	—	≥ 10	保管操作完了後適宜 ^{a)}
ヒドラジン	mg/L	20~500 ^{b)}	保管操作完了後適宜 ^{a)}
ナトリウム ^{c)}	μg/L	—	保管操作中
塩化物イオン ^{c)}	μg/L	—	保管操作中
硫酸イオン ^{c)}	μg/L	—	保管操作中
<p>注記 SG 二次側を湿式保管とする際に適用する。また，保管時の SG 気相部は窒素シール（正圧）とする。</p> <p>注 a) 保管操作完了後 1~2 週間の低下傾向の確認。低下濃度が小さい場合は，その後必要に応じ確認する。</p> <p>b) アンモニア併用時のヒドラジン推奨値。実機保管実績に基づいて保管初期低下濃度を設定し，SG 二次側保管水濃度を推奨値範囲内とする。</p> <p>c) 二次系純水タンクから補給する場合は，二次系純水タンクの確認を行う。</p>			

表 17—二次系停止中—ヒドラジン単独時の SG 器内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		
ヒドラジン	mg/L	50~500 ^{a)}	保管操作完了後適宜 ^{b)}
ナトリウム ^{c)}	μg/L	—	保管操作中
塩化物イオン ^{c)}	μg/L	—	保管操作中
硫酸イオン ^{c)}	μg/L	—	保管操作中
<p>注記 SG 二次側を湿式保管とする際に適用する。また，保管時の SG 気相部は窒素シール（正圧）とする。</p> <p>注 a) ヒドラジン単独時のヒドラジン推奨値。実機保管実績に基づいて保管初期低下濃度を設定し，SG 二次側保管水濃度を推奨値範囲内とする。</p> <p>b) 保管操作完了後 1~2 週間の低下傾向の確認。低下濃度が小さい場合は，その後必要に応じ確認する。</p> <p>c) 二次系純水タンクから補給する場合は，二次系純水タンクの確認を行う。</p>			

4.4.5.2 二次系統水

クリーンアップ時の二次系統水における，診断項目の推奨値及び測定頻度を表 18 に示す。なお，対象系統はクリーンアップ最終段階で SG 給水源となる，高圧給水加熱器出口水，又は脱気器器内水とする。

表 18—クリーンアップ時の高圧給水加熱器出口水又は脱気器器内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		
カチオン電気伝導率	mS/m	≤0.03	1回 ^{a)}
濁度	mg/L	≤1	1回 ^{a)}
鉄	μg/L	≤100	1回 ^{a)}
溶存酸素	μg/L	≤50	1回 ^{a)}
ナトリウム	μg/L	≤0.5	1回 ^{a)}
塩化物イオン	μg/L	≤0.5	1回 ^{a)}
鉛	μg/L	≤1	1回 ^{a)}

注^{a)} 1回は、クリーンアップ時に少なくとも1回測定することを示し、SG水張り開始前に推奨値を満足していることを確認する。

4.4.5.3 二次系純水タンク水

二次系停止中の二次系純水タンク水における診断項目の推奨値及び測定頻度を表 19 に示す。

表 19—二次系停止中—二次系純水タンク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		
電気伝導率	mS/m	≤0.1	1回/月
ナトリウム	μg/L	—	適宜 ^{a)}
塩化物イオン	μg/L	—	適宜 ^{a)}
硫酸イオン	μg/L	—	適宜 ^{a)}

注^{a)} SG保管時、又は二次系クリーンアップ開始時に確認する。

4.4.6 運転モードに依らない系統

4.4.6.1 補給水処理装置出口水

補給水処理装置出口水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を表 20 に、診断項目の推奨値及び測定頻度を表 21 に示す。

表 20—補給水処理装置出口水の管理項目におけるアクションレベル、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	mS/m	>0.02	—	—	—	採水時及び1回/日 ^{a)}

注^{a)} 補給水処理装置運転時に適用する。

表 21—補給水処理装置出口水の診断項目における推奨値及び測定頻度

項目		推奨値	測定頻度
名称	単位		
シリカ	μg/L	≤20	適宜 ^{a)}
注^{a)} 補給水処理装置の運転状況，汚れの程度の確認を目的として計測する診断項目のため，プラント設備，運用に応じてプラントごとに頻度を設定することが適切であるため測定頻度を適宜としている。			

5 品質管理

5.1 一般事項

4.4 で示した項目を適切に管理又は診断するためには，系統水の適切なサンプリング方法及び分析方法を選択する必要がある。また，これにより得られた水質データを適切に記録，評価，保存することによって PWR における水化学管理の品質が担保できる。PWR における水質項目のサンプリング方法，分析方法及び得られた水質データの管理方法を次に示す。

なお，原子力発電所では，JEAC 4111: 2009 に基づいて品質保証活動を実施しており，水化学管理においても，基本的にはこれにしたがって品質保証活動を実施している。ここで説明する品質管理は JEAC 4111-2009 に記載される品質保証活動のうち，水化学管理に係る具体的手法を明記するものである。

5.2 サンプリング方法

二次系統水の試料採取位置は，復水，給水，SG，ヒータドレンなど多系統となるため，日常管理の簡便性の観点から，原則として各試料採取位置から試料採取配管を敷設し，タービン建屋内などの一か所に集合させた，集中試料採取設備で試料を採取する。

一方，測定対象が溶解性の低い金属成分の場合，試料採取配管内の温度変化に伴う析出付着，あるいは，試料採取配管又は弁などへ沈降による影響が認められるケースがあり，SGへの最終給水となる高圧給水加熱器出口など，金属成分分析を詳細に実施する必要がある場合には，現場試料採取設備の設置を検討する。

サンプリングに際し，試料採取配管内の滞留による影響を極力最小限にするため，試料水は原則連続通水とし，試料を採取しない期間は，試料採取設備に設けてある試料水回収管に接続して，系統に回収する。

なお，水質監視計器へ通水しているサンプルのうち，pH計などの測定に化学薬品を使用しているものは系外へ排出する。

サンプリング方法の一例を**附属書 G**に記載する。

5.3 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分析方法を用いる。分析方法の例を**附属書 H**に記載する。

5.4 水質データ管理

5.4.1 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，採取系統とともに適切，的確かつ速やかに記録する。

5.4.2 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。水質データの評価方法の例を**附属書 I**に記載する。

5.4.2.1 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** 測定に用いる測定機器は、測定値の正当性確保のため、定期的な校正、適切な保守、調整を行う。
- b) **標準物質などの管理** 分析に使用する標準物質、標準液及び試薬については、原則、国家（国際）標準物質、JIS 規格品を使用する。
- c) **分析器材などの管理** 分析に使用するガラス製体積計、温度計などについては、原則、JIS 規格品を使用する。
- d) **測定員の力量判定と維持** 測定を実施する測定員の力量を判定するとともに、力量を維持するための教育、訓練を行う。

5.4.2.2 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、安定運転時からの水質変動範囲、関連水質項目、関連系統の水質との相関評価を行い、水質異常に対する判断を行う。

5.4.3 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。

公衆審査版

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

序文

この附属書は、本体に関連する事柄を説明するものであり、規定の一部ではない。

A.1 アクションレベル1に至ってから回復するまでの許容時間の考え方

アクションレベル1の設定値は、その値に至ることによって直ちにシステム信頼性に影響を与えるものではないが、長期のシステム信頼性を考慮した場合、それに至らない値で管理することが好ましい。アクションレベル1に至る事象のうち、偶発的又は過渡的な水質変化に起因し、速やかにかつ容易に回復することが可能なものもあるが、それ以外に、回復までに時間を要しアクションレベル1に至った状態が最長で当該運転サイクル終了までの長期に及ぶ場合も考えられる。この指針では、アクションレベル1に至った状態が1週間以上継続した場合、その後のシステム信頼性への影響を考慮しながら運転する必要があるものとして、アクションレベル1に至ってから回復までの許容時間を1週間と定めた。分析などによりアクションレベル1に至ったことを確認してからアクションレベル1を回復したことを確認するまでの期間が1週間を超える場合は、その状態が運転期間中継続した場合のプラントのシステム信頼性への影響を評価する。

A.2 アクションレベル2に至ってから回復するまでの許容時間の考え方

アクションレベル2の設定値は、その値に至ることによって直ちにシステム信頼性を喪失するものではないが、通常管理されている値から大きく乖離しており、当該値に至った状態で運転を継続した経験も少ないことから、迅速に回復することが要求される。アクションレベル2を設定している管理項目とアクションレベル2に至る要因の例及び是正措置の例を表A.1に示す。アクションレベル2に至ったことの確認から原因究明及び是正措置が完了し、水質を安定させるまでの実現可能な期間を24時間と見込み、これをアクションレベル2に至ってから回復までの許容時間と定めた。分析などによりアクションレベル2に至ったことを確認してからアクションレベル2を回復したことを確認するまでの期間が24時間を超える場合は、これによるプラントの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措置を検討する。

表 A.1—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

系統	項目	アクションレベル2に至る要因の例	是正措置の例
SG 器内水	pH	pH 調整剤薬注設備の故障	予備ポンプへの切り替え, 設備修繕対応
		イオン不純物の増加による水質変動	イオン不純物の項目に準ずる

表 A.1—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（続き）

系統	項目	アクションレベル 2 に至る要因の例	是正措置の例
SG 器内水	イオン不純物 (ナトリウム, 塩化物イオン, 硫酸イオン)	復水脱塩設備のイオン交換樹脂劣化による不純物発生	不純物を排出する脱塩塔の特定とその隔離
		復水器における海水漏えいに伴う不純物の持ち込み	海水漏えいが発生した水室の隔離 (出力降下)
高圧給水加熱器 出口水	溶存酸素	ヒドラジン薬注設備の故障	予備ポンプへの切り替え, 設備修繕対応
		脱気器の故障	設備修繕対応
		復水器真空度の低下	
復水ポンプ出口水	カチオン電気伝導率	復水器における海水漏えいに伴う不純物の持ち込み	海水漏えいが発生した水室の隔離 (出力降下)

附属書 B (参考) PWR二次系の運転モードの例

序文

この附属書は、本体に関連する事柄を説明するものであり、規定の一部ではない。

B.1 運転モードと水化学管理

PWR 二次系の環境及び水質はプラントの運転モードによって大きく変わるため、運転モードによって水化学管理の方法を分類することが必要である。この指針は基本的に定常的な運転操作に基づき、二次系通常運転時、二次系起動時、二次系停止時及び二次系停止中の4つの運転モードに区別して管理方法を規定している。緊急停止などの非定常的な運転操作が伴う場合の管理方法は、この指針に規定する限りではない。

B.2 運転モードの区分

図 B.1 に PWR プラントにおける運転操作と二次系運転モードの関係の例を示す。各々の運転モードは次に説明するとおりとする。

なお、下記の運転モードは、本指針で定義する水化学管理上の区分である。

B.2.1 二次系通常運転時

発電機並列から、発電機出力を降下させる操作を開始するまでの期間をいう。

B.2.2 二次系起動時

SG への水張り開始から発電機並列までの期間をいう。

B.2.3 二次系停止時

通常運転時から原子炉停止のために発電機出力を降下させる操作を始めてから余熱除去系統の運転開始により SG による除熱が不要となるまでの期間をいう。

なお、この運転モード期間中の水化学管理は、二次系通常運転時に準拠する。

B.2.4 二次系停止中

SG による除熱が不要となった後、原子炉を起動するために復水系統及び給水系統をクリーンアップし、SG への水張りを開始するまでの期間をいう。

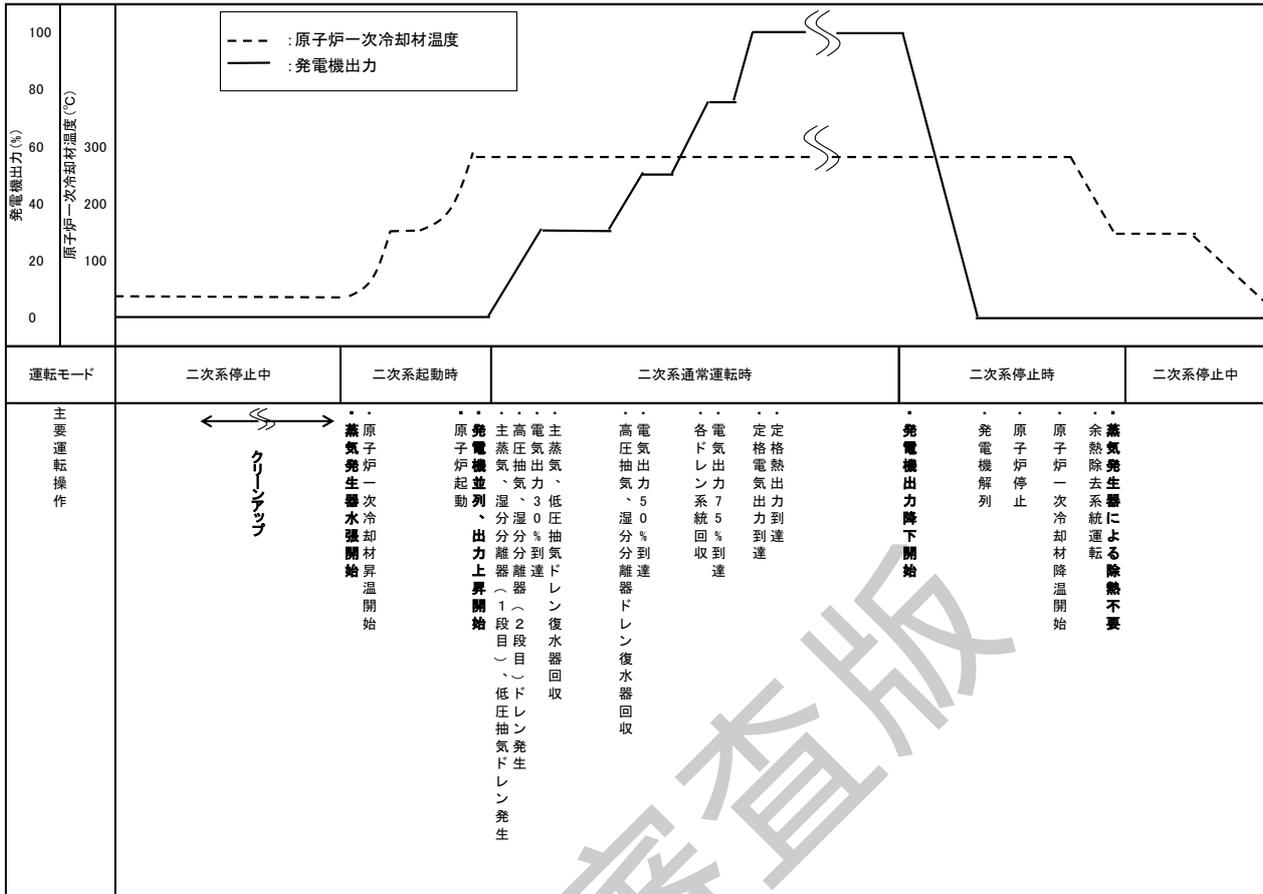


図 B.1-PWR プラントにおける運転操作と二次系運転モードの関係（例）

附属書 C (参考)

PWR 二次系における管理，診断及び制御系統とサンプリング箇所

序文

この附属書は，本体に関連する事柄を説明するものであり，規定の一部ではない。

C.1 PWR 二次系

PWR 二次系では，SG を介して原子炉一次冷却材の熱を受け取り，SG 器内水を蒸発させて，その蒸気でタービン発電機を回転させる。二次系の概要を **図 C.1** に示す。

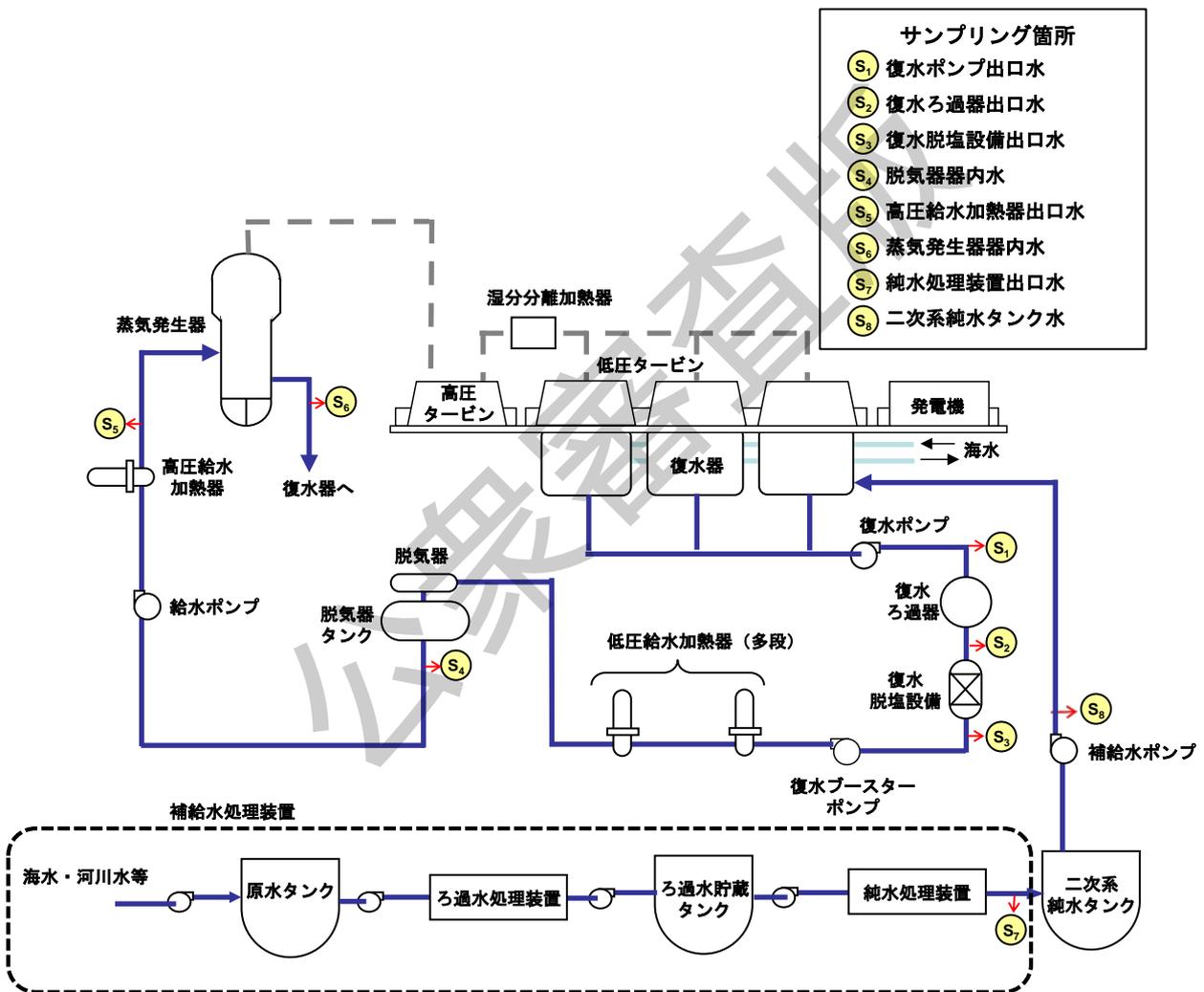


図 C.1—二次系の概要とサンプリング箇所の例

二次系の水は，一般的に次のように分類してサンプリングした水を分析するなどにより，管理，診断及び制御を行う。

- a) **復水ポンプ出口水** 復水器での海水冷却によってタービン排気蒸気が凝縮された水で、復水器伝熱管からの海水漏えいによる二次系の腐食損傷抑止の観点から海水漏えいを早期検知することが重要である。復水は、復水ポンプ出口よりサンプリングして分析を実施することが多い。
- b) **復水ろ過器出口水** 復水が復水ろ過器によって浄化された直後の水であり、金属不純物の二次系への持ち込みによる SG の腐食損傷防止並びに復水脱塩設備健全性維持の観点で適切に水化学管理を実施することが重要である。
- c) **復水脱塩設備出口水** 復水ろ過器出口水が復水脱塩設備によって浄化された直後の水であり、不純物の持ち込みによる SG の腐食損傷防止の観点で適切に水化学管理を実施することが重要である。
- d) **脱気器器内水** 脱気器の器内に属する水で、プラント起動時のクリーンアップ運転の際に SG へ水を供給する前段の水として、SG の腐食損傷抑止の観点で適切に水化学管理を実施することが重要である。脱気器器内水は脱気器後段の脱気器タンクよりサンプリングして分析を実施することが多い。
- e) **高圧給水加熱器出口水** 脱気器から高圧給水加熱器を通じて SG に供給される水であり、溶存酸素又は金属不純物の持ち込みによる SG の腐食損傷防止並びに二次系の還元性環境維持による配管減肉及び金属不純物発生抑制の観点で適切に水化学管理を実施することが重要である。給水は高圧給水加熱器出口よりサンプリングして分析を実施することが多い。
- f) **SG 器内水** SG の器内に属する水で、給水系より水が供給される。蒸気の発生による不純物の濃縮が起こるため、SG の腐食損傷防止の観点で適切に水化学管理を実施することが重要である。SG 器内水は SG ブローダウンよりサンプリングして分析を実施することが多い。
- g) **補給水処理装置出口水** 海水又は河川水などから補給水処理設備によって製造され、二次系純水タンクに補給される水であり、補給水処理設備の性能診断の観点で水化学管理を実施することが重要である。
- h) **二次系純水タンク水** 二次系への補給水及び一次冷却系補給水の原水となる水であり、プラント全体の材料健全性確保の観点から適切に水化学管理を実施することが重要である。二次系純水タンク水は二次系への補給水ポンプ出口よりサンプリングして分析を実施することが多い。

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

序文

この附属書は、本体に関連する事柄を説明するものであり、規定の一部ではない。

D.1 二次系通常運転時

D.1.1 SG器内水

二次系通常運転時のSG器内水における管理項目、制御項目及び診断項目の分類の考え方を表D.1に示す。

表D.1—二次系通常運転時—SG器内水における項目分類の考え方

名称	分類			分類の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目	
pH	○	—	—	pHは腐食、溶解挙動への影響因子であり、構成材料の健全性の観点から重要であり測定が求められる。不純物濃度は管理対象不純物の個別測定により監視されるが、不純物イオン濃度の極性(カチオン、アニオン)を判断するうえで有益なデータとなるため、管理項目とする。
ナトリウム	○	—	—	ナトリウムは酸素、酸化剤の共存環境下において、SG伝熱管材料であるニッケル基合金材のアルカリ環境下での粒界損傷(IGA: Inter Granular Attack)などを発生、進展させる最重要不純物の一つであるため、管理項目とする。
塩化物イオン	○	—	—	塩化物イオンは酸素、酸化剤の共存環境下で、SG構造材であるニッケル基合金材、ステンレス鋼の孔食又は隙間腐食を生じさせる主要因となる不純物である。また、ニッケル基合金材のIGAなどに対しても、酸性環境を形成させる可能性がある不純物であるため、管理項目とする。
硫酸イオン	○	—	—	硫酸イオンは酸素、酸化剤の共存環境下において、SG伝熱管材料であるニッケル基合金材の酸性環境下でのIGAなどを発生、進展させる最重要不純物の一つであり、復水脱塩装置などに使用される、イオン交換樹脂の酸化劣化により放出される可能性があるため、管理項目とする。
全放射能	—	—	○	全放射能は、一次冷却材の環境放出防止の観点から重要な項目であるが、材料健全性確保の観点からの要求ではないため、診断項目とする。

D.1.2 高圧給水加熱器出口水

二次系通常運転時の高圧給水加熱器出口水における管理項目、制御項目及び診断項目の分類の考え方を表D.2に示す。

表 D.2—二次系通常運転時—高圧給水加熱器出口水における項目分類の考え方

名称	分類			分類の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目	
ヒドラジン	○	○	—	ヒドラジンは SG 伝熱管腐食抑制を目的に、系統の還元性雰囲気強化を目的として添加し、系統還元性雰囲気を維持するための下限濃度の管理が必要であるため管理項目とする。また、浄化設備（復水/SGBD : SG Blow Down 脱塩設備など）負荷増大、SG 伝熱性能低下に考慮した適正な濃度範囲に制御する必要があるため、制御項目とする。
溶存酸素	○	—	—	溶存酸素は、腐食電位を増加させ、SG 構造材の IGA など発生、進展、孔食、隙間腐食の発生に大きく影響を及ぼす重要な化学因子であるため、管理項目とする。
全銅	○	—	—	全銅は、銅イオン、あるいは銅酸化物として SG に持ち込まれた際、金属銅に還元される過程で強力な酸化剤として作用し、伝熱管の腐食電位を上昇させ、腐食損傷発生に大きな影響を及ぼすため、管理項目とする。
鉛	○	—	—	国内プラントでは鉛に起因すると想定される SG 伝熱管材料の損傷は認められていないが、海外では SG 器内への鉛遮蔽板の置き忘れなどが原因とされる損傷事例が報告されている。これに類する鉛持込として、二次系系統での異物、清浄度・副資材の管理不足、薬液などの不純物が考えられる。 SG への運転中への鉛の持込がないことを監視するため、管理項目とする。
pH	—	○	—	pH は、SG、復・給水、及び抽気・ドレン系統の炭素鋼系材料の腐食、FAC (Flow Accelerated Corrosion) 抑制、銅系材料の腐食抑制のため、プラント構成材料に基づいて、プラントごとに適切に制御する必要があるため、制御項目とする。
pH 調整剤	—	—	○	pH 調整剤の添加濃度は、電気伝導率でモニタリングするが、適切な添加濃度となっていることを適宜確認するため、診断項目とする。
電気伝導率	—	—	○	電気伝導率は、高圧給水加熱器出口水 pH を適切な範囲に制御するため pH 調整剤が適切に添加されていることをモニタリングする診断項目とする。
鉄	—	—	○	鉄は、SG 二次側へのスケール付着による伝熱性能低下、管支持板閉塞などの影響監視、並びに、復・給水、ドレン系統の腐食抑制監視に対して重要な化学因子となるが、給水処理条件、プラント系統構成によって達成される濃度が異なることから管理項目とはせず、適切な水処理が適用されていることを確認するため、診断項目とする。

D.1.3 復水ポンプ出口水

二次系通常運転時の復水ポンプ出口水における管理項目、制御項目及び診断項目の分類の考え方を表D.3に示す。

表 D.3—二次系通常運転時—復水ポンプ出口水における項目分類の考え方

名称	分類			分類の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目	
カチオン電気伝導率	○	—	—	二次系通常運転時にカチオン電気伝導率が増加する要因は、復水器冷却水である海水の漏れである。海水はSGに持ち込まれた場合、重大な腐食損傷が発生する可能性が大きく、海水漏れ発生時には速やかにプラント出力を制限し、修繕対応を行うこととなるため、管理項目とする。 なお、水質監視計器としてナトリウムイオン電極計を設置する場合もあり、その場合はナトリウムで監視を行ってもよい。
ナトリウム	○	—	—	二次系通常運転時にナトリウムイオン濃度が増加する要因は、復水器冷却水である海水の漏れである。海水はSGに持ち込まれた場合、重大な腐食損傷が発生する可能性が大きく、海水漏れ発生時には速やかにプラント出力を制限し、修繕対応を行うこととなるため、管理項目とする。 なお、水質監視計器としてカチオン電気伝導率計を設置する場合もあり、その場合はカチオン電気伝導率で監視を行ってもよい。
溶存酸素	—	—	○	復水器まわりの真空域の空気の漏れ込み確認として有効であるが、SG伝熱管材料の健全性確保の観点では、高圧給水加熱器出口水で管理することで十分であることから、診断項目とする。

D.1.4 二次系純水タンク水

二次系通常運転時の二次系純水タンク水における管理項目、制御項目及び診断項目の分類の考え方を表D.4に示す。

表 D.4—二次系通常運転時—二次系純水タンク水における項目分類の考え方

名称	分類			分類の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目	
電気伝導率	—	—	○	二次系純水タンク水は一次系補給水の原水となり、また二次系統に直接給水されるが、二次系純水タンク水の補給水源となる補給水処理装置出口水を適切に管理することで水の純度は確保できるため、診断項目とする。
ナトリウム	—	—	○	ナトリウムは酸素、酸化剤の共存環境下において、SG 伝熱管材料であるニッケル基合金材のアルカリ環境下での IGA などを発生、進展させる最重要不純物の一つである。ただし、補給水のナトリウム濃度の大きな変動は電気伝導率の変化によって検知可能であるため、電気伝導率が変化した際の原因究明時に計測する扱いとすることが可能であること、また、二次系純水タンクのナトリウム濃度が高くなっても、直接プラント運用制限には至らないため、診断項目とする。
塩化物イオン	—	—	○	塩化物イオンは酸素、酸化剤の共存環境下で、SG 構造材であるニッケル基合金材、ステンレス鋼の孔食又は隙間腐食を生じさせる主要因となる不純物である。また、ニッケル基合金材の IGA などに対しても、酸性環境を形成させる可能性がある不純物である。ただし、補給水の塩化物イオン濃度の大きな変動は電気伝導率の変化によって検知可能であるため、電気伝導率が変化した際の原因究明時に計測する扱いとすることが可能であること、また、二次系純水タンクの塩化物イオン濃度が高くなっても、直接プラント運用制限には至らないため、診断項目とする。
硫酸イオン	—	—	○	硫酸イオンは酸素、酸化剤の共存環境下で、SG 構造材であるニッケル基合金材、ステンレス鋼の孔食又は隙間腐食を生じさせる主要因となる不純物である。また、ニッケル基合金材の IGA などに対しても、酸性環境を形成させる可能性がある不純物である。ただし、補給水の硫酸イオン濃度の大きな変動は電気伝導率の変化によって検知可能であるため、電気伝導率が変化した際の原因究明時に計測する扱いとすることが可能であること、また、二次系純水タンクの硫酸イオン濃度が高くなっても、直接プラント運用制限には至らないため、診断項目とする。

D.1.5 復水脱塩設備出口水

二次系通常運転時の復水脱塩設備出口水における管理項目、制御項目及び診断項目の分類の考え方を表D.5に示す。

表 D.5—二次系通常運転時—復水脱塩設備出口水における項目分類の考え方

名称	分類			分類の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目	
電気伝導率	○	—	—	電気伝導率は、復水脱塩設備出口水の純度確認のため必要な項目であり、復水脱塩設備の洗浄不良、性能低下による水質悪化は、SGをはじめとする二次系構成材料の健全性に大きな影響を及ぼすため、管理項目とする。
ナトリウム	—	—	○	ナトリウムは酸素、酸化剤の共存環境下において、SG 伝熱管材料であるニッケル基合金材のアルカリ環境下での IGA などを発生、進展させる最重要不純物の一つである。しかしながら、復水脱塩設備出口水ナトリウム濃度は極低濃度であり、復水脱塩設備出口水電気伝導率、あるいは、SG 器内水ナトリウム濃度が変動した場合に原因究明として確認する必要が想定されるため、診断項目とする。
塩化物イオン	—	—	○	塩化物イオンは酸素、酸化剤の共存環境下において、SG 構造材であるニッケル基合金材、ステンレス鋼の孔食又は隙間腐食を生じさせる主要因となる不純物である。また、ニッケル基合金材の IGA などに対しても、酸性環境を形成させる可能性がある不純物である。しかしながら、復水脱塩設備出口水塩化物イオン濃度は極低濃度であり、復水脱塩設備出口水電気伝導率、あるいは、SG 器内水塩化物イオン濃度が変動した場合に原因究明として確認する必要が想定されるため、診断項目とする。
硫酸イオン	—	—	○	硫酸イオンは酸素、酸化剤の共存環境下において、SG 伝熱管材料であるニッケル基合金材の酸性環境下での IGA などを発生、進展させる最重要不純物の一つであり、復水脱塩設備などに使用される、イオン交換樹脂の酸化劣化により放出される可能性がある。しかしながら、復水脱塩設備出口水硫酸イオン濃度は極低濃度であり、復水脱塩設備出口水電気伝導率、あるいは、SG 器内水硫酸イオン濃度が変動した場合に原因究明として確認する必要が想定されるため、診断項目とする。

D.2 二次系起動時

D.2.1 SG器内水

二次系起動時の SG器内水における管理項目、制御項目及び診断項目の分類の考え方を表D.6に示す。

表 D.6—二次系起動時—SG 器内水における項目分類の考え方

名称	分類			分類の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目	
カチオン電気伝導率	—	—	○	カチオン電気伝導率は、二次系起動時の SG への汚れの持ち込みの有無、その程度を総括的に判断できる項目である。SG 水張り開始から発電機並列までの期間は SG 伝熱管の熱流束は低く、SG 二次側での濃縮環境形成はないが、発電機並列後出力上昇が行われ、SG 二次側で濃縮環境が形成されることから、この時点で SG への汚れの持ち込みが低減されることを総括的に確認するため、診断項目とする。
ナトリウム	—	—	○	ナトリウムは酸素、酸化剤の共存環境下において、SG 伝熱管材料であるニッケル基合金材のアルカリ環境下での IGA などを発生、進展させる最重要不純物の一つである。SG 水張り開始から発電機並列までの期間は、SG 二次側での濃縮環境形成はないが、発電機並列後出力上昇が行われ、SG 二次側で濃縮環境が形成されることから、この時点でナトリウムが十分低減されることを確認するため、診断項目とする。
塩化物イオン	—	—	○	塩化物イオンは酸素、酸化剤の共存環境下において、SG 構造材であるニッケル基合金材、ステンレス鋼の孔食又は隙間腐食を生じさせる主要因となる不純物である。また、ニッケル基合金材の IGA などに対しても、酸性環境を形成させる可能性がある不純物である。SG 水張り開始から発電機並列までの期間は、SG 二次側での濃縮環境形成はないが、発電機並列後出力上昇が行われ、SG 二次側で濃縮環境が形成されることから、この時点で塩化物イオンが十分低減されることを確認するため、診断項目とする。
鉛	—	—	○	国内プラントでは鉛に起因すると想定される SG 伝熱管材料の損傷は認められていないが、海外では SG 器内への鉛遮蔽板の置き忘れなどが原因とされる損傷事例が報告されている。これに類する鉛持込として、二次系系統での異物、清浄度・副資材の管理不足、薬液などの不純物が考えられる。 定検工事時に SG 器内での鉛の異物の残留がなかったことを確認するため、診断項目とする。

D.2.2 高圧給水加熱器出口水

二次系起動時の高圧給水加熱器出口水における管理項目、制御項目及び診断項目の分類の考え方を表D.7に示す。

表 D.7—二次系起動時—高圧給水加熱器出口水における項目分類の考え方

名称	分類			分類の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目	
pH	—	—	○	pH は、SG、復・給水、及び抽気・ドレン系統の炭素鋼系材料の腐食、FAC 抑制のため適切に管理する必要があり、二次系起動時においても pH が適切に管理されていることを確認するため、診断項目とする。
電気伝導率	—	—	○	系統構成材料の腐食抑制の観点から、pH 調整剤を添加し、高圧給水加熱器出口水 pH を適切な範囲に管理する必要がある。このため、二次系起動時においても pH が適切に管理されていることを確認するため、診断項目とする。
ヒドラジン	—	—	○	ヒドラジンは SG 伝熱管腐食抑制を目的に、系統の還元性雰囲気強化・維持するために重要であることから、二次系起動時においても還元性雰囲気を確認するため、診断項目とする。
溶存酸素	—	—	○	溶存酸素は、腐食電位を増加させ、SG 構造材の IGA などの発生と進展、孔食、及び隙間腐食の発生に大きく影響を及ぼす重要な化学因子である。SG 水張り開始から発電機並列までの期間は、SG 二次側での濃縮環境の形成はないが、発電機並列後出力上昇が行われ、SG 二次側で濃縮環境が形成されることから、この時点で溶存酸素が十分低減されることを確認するため、診断項目とする。

D.2.3 復水ポンプ出口水

二次系起動時の復水ポンプ出口水における管理項目、制御項目及び診断項目の分類の考え方を表 D.8 に示す。

表 D.8—二次系起動時—復水ポンプ出口水における項目分類の考え方

名称	分類			分類の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目	
カチオン 電気伝導率	—	—	○	復水器冷却水である海水は SG に持ち込まれた場合、重大な腐食損傷が発生する可能性が大きい。発電機並列後出力上昇が行われ、SG 二次側で濃縮環境が形成される。SG 水張り開始から発電機並列までの期間中において、海水漏えいが発生していないことを確認するため、診断項目とする。
ナトリウム	—	—	○	復水器冷却水である海水は SG に持ち込まれた場合、重大な腐食損傷が発生する可能性が大きい。発電機並列後出力上昇が行われ、SG 二次側で濃縮環境が形成される。SG 水張り開始から発電機並列までの期間中において、海水漏えいが発生していないことを確認するため、診断項目とする。

D.3 二次系停止時

D.3.1 高圧給水加熱器出口水

二次系停止時の高圧給水加熱器出口水における管理項目、制御項目及び診断項目の分類の考え方を表D.9に示す。

表 D.9—二次系停止時—高圧給水加熱器出口水における項目分類の考え方

名称	分類			分類の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目	
pH	—	—	○	pH は、SG、復・給水、及び抽気・ドレン系統の炭素鋼系材料の腐食、FAC 抑制のため適切に管理する必要があり、二次系停止時においても pH が適切に管理されていることを確認するため、診断項目とする。
電気伝導率	—	—	○	系統構成材料の腐食抑制の観点から、pH 調整剤を添加し、高圧給水加熱器出口水 pH を適切な範囲に管理する必要がある。このため、二次系停止時においても pH が適切に管理されていることを確認するため、診断項目とする。
ヒドラジン	—	—	○	ヒドラジンは SG 伝熱管腐食抑制を目的に、系統の還元性雰囲気強化・維持するために重要であることから、二次系停止時においても還元性雰囲気を確認するため、診断項目とする。

D.3.2 復水ポンプ出口水

二次系停止時の復水ポンプ出口水における管理項目、制御項目及び診断項目の分類の考え方を表D.10に示す。

表 D.10—二次系停止時—復水ポンプ出口水における項目分類の考え方

名称	分類			分類の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目	
カチオン 電気伝導率	—	—	○	復水器冷却水である海水は SG に持ち込まれた場合、重大な腐食損傷が発生する可能性が大きい。電気出力降下からタービン発電機解列の期間においても、SG 二次側で濃縮環境が形成されるため、海水漏えいが発生していないことを確認するため、診断項目とする。
ナトリウム	—	—	○	復水器冷却水である海水は SG に持ち込まれた場合、重大な腐食損傷が発生する可能性が大きい。電気出力降下からタービン発電機解列の期間においても、SG 二次側で濃縮環境が形成されるため、海水漏えいが発生していないことを確認するため、診断項目とする。

D.4 二次系停止中

D.4.1 SG器内水

二次系停止中の SG器内水における管理項目，制御項目及び診断項目の分類の考え方を表D.11に示す。

表 D.11—二次系停止中—SG 器内水における項目分類の考え方

名称	分類			分類の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目	
pH	—	—	○	ヒドラジン，アンモニア併用の場合は，構成材料の腐食低減を目的として，弱アルカリ環境に保たれていることを確認するため，診断項目とする。
ヒドラジン	—	—	○	二次系停止中に，還元性雰囲気維持，腐食抑制に十分なヒドラジンが残留していることを確認するため，診断項目とする。
ナトリウム	—	—	○	二次系停止中の SG 二次側へのナトリウム持ち込み有無の確認が目的となるが，二次系停止中 SG 二次側は濃縮環境になく，SG 水張り前に保管水を全ブローし SG 二次側の水質調整を実施することから，多量のナトリウム持込が無いことを確認するため，診断項目とする。なお，保管水に二次系純水タンク水を使用する場合は，二次系純水タンク水の純度確認で代替可能とする。
塩化物イオン	—	—	○	二次系停止中の SG 二次側への塩化物イオン持ち込み有無の確認が目的となるが，二次系停止中 SG 二次側は濃縮環境になく，SG 水張り前に保管水を全ブローし SG 二次側の水質調整を実施することから，多量の塩化物イオン持込が無いことを確認するため，診断項目とする。なお，保管水に二次系純水タンク水を使用する場合は，二次系純水タンク水の純度確認で代替可能とする。
硫酸イオン	—	—	○	二次系停止中の SG 二次側への硫酸イオン持ち込み有無の確認が目的となるが，二次系停止中 SG 二次側は濃縮環境になく，SG 水張り前に保管水を全ブローし SG 二次側の水質調整を実施することから，多量の硫酸イオン持込が無いことを確認するため，診断項目とする。なお，保管水に二次系純水タンク水を使用する場合は，二次系純水タンク水の純度確認で代替可能とする。

D.4.2 二次系統水

二次系停止中，クリーンアップ時の二次系統水における管理項目，制御項目及び診断項目の分類の考え方を表D.12に示す。なお，試料採取対象系統は，クリーンアップ時SG給水に際して最終系統となる，脱気器器内水，又は，高圧給水加熱器出口水とする。

表 D.12—クリーンアップ時—二次系統水における項目分類の考え方

名称	分類			分類の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目	
カチオン 電気伝導率	—	—	○	不純物、有機物など汚れの浄化程度を把握し、二次系統の浄化の指標とするため、診断項目とする。
濁度	—	—	○	二次系停止中に発生した鉄さびの浄化程度を把握するため、二次系統の浄化の指標とすることから、診断項目とする。
鉄	—	—	○	二次系停止中に発生した鉄さびの浄化程度を把握するため、二次系統の浄化の指標とすることから、診断項目とする。
溶存酸素	—	—	○	溶存酸素は、腐食電位を増加させ、SG 構造材の粒界損傷（IGA：Inter Granular Attack）などの発生と進展、及び孔食、隙間腐食の発生に大きく影響を及ぼす重要な化学因子となるため、SG 送水前に低減していることを確認することから診断項目とする。
ナトリウム	—	—	○	工事、開放点検などによって二次系停止中に持ち込まれた汚れの浄化程度を把握し、二次系統の浄化の指標とするため、診断項目とする。
塩化物イオン	—	—	○	工事、開放点検などによって二次系停止中に持ち込まれた汚れの浄化程度を把握し、二次系統の浄化の指標とするため、診断項目とする。
鉛	—	—	○	国内プラントでは鉛に起因すると想定される SG 伝熱管材料の損傷は認められていないが、海外では SG 器内への鉛遮蔽板の置き忘れなどが原因とされる損傷事例が報告されている。これに類する鉛持込として、二次系系統での異物、清浄度・副資材の管理不足、薬液などの不純物が考えられる。 定検工事時での管理が確実に実施され、二次系系統から SG への鉛の持込がないことを確認するため、診断項目とする。

D.4.3 二次系純水タンク水

二次系停止中の、二次系純水タンク水における管理項目、制御項目及び診断項目の分類の考え方を表D.13に示す。

表 D.13—二次系停止中—二次系純水タンク水における項目分類の考え方

名称	分類			分類の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目	
電気伝導率	—	—	○	二次系純水タンク水を使用して SG 二次側の保管を行う場合、水の純度を評価するため、診断項目とする。
ナトリウム	—	—	○	電気伝導率の変動した場合、原因究明として確認する必要があるため、診断項目とする。
塩化物イオン	—	—	○	電気伝導率の変動した場合、原因究明として確認する必要があるため、診断項目とする。
硫酸イオン	—	—	○	電気伝導率の変動した場合、原因究明として確認する必要があるため、診断項目とする。

D.5 運転モードに依らない系統

D.5.1 補給水処理装置出口水

補給水処理装置出口水における管理項目、制御項目及び診断項目の分類の考え方を表D.14に示す。

表 D.14—補給水処理装置出口水における項目分類の考え方

名称	分類			分類の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目	
電気伝導率	○	—	—	電気伝導率は、補給水処理装置出口水の純度を確認するために必要な項目であり、二次系統水の補給源となる二次系純水タンク水の原水となることから、水の純度を厳しく管理する必要があるため、管理項目とする。
シリカ	—	—	○	PWR 二次系では、火力プラントのような過熱蒸気ではないため、蒸気へのシリカのキャリーオーバーは非常に小さく、タービンへの付着などの影響は生じていない。補給水処理装置の運転状況、及び汚れの程度を示す指標となるため、診断項目とする。

附属書 E
(参考)
アクションレベル, 推奨値及び制御値の考え方

序文

この附属書は、本体に関連する事柄を説明するものであり、規定の一部ではない。

E.1 二次系通常運転時

E.1.1 SG器内水

二次系通常運転時のSG器内水における管理項目のアクションレベル設定の考え方を**表E.1**に、推奨値設定の考え方を**表E.2**に示す。また、診断項目の推奨値設定の考え方を**表E.3**に示す。

公衆審査版

表 E.1—二次系通常運転時—SG 器内水における管理項目のアクションレベル設定の考え方

名称	単位	アクションレベル		設定の考え方
pH (at 25°C)	—	1	設定せず	SG 器内水の pH は二次系統の水処理設備が健全に機能している場合、給水の水処理条件で決定され、二次系統水の水処理薬液であるアンモニアとヒドラジン濃度で決まるため、アクションレベル 1 の設定は行わない。
		2	<8	SG 主要構造材の一つである炭素鋼の高温水中での腐食は、pH が 8～8.5 以下となると大きく増加することが知られている (図 E.1)。このため、SG 構造材の健全性確保の観点から、pH 8 をアクションレベル 2 に設定する。
		3	設定せず	pH の下限値についてはアクションレベル 2 で設定しているため、上限値の必要性について検討した。上限値としては、銅系材料が残存するプラントでのアンモニアアタックが懸念されるが、当該領域まで pH が上昇するような水質環境においては、カチオン電気伝導率などの pH 計と比較して感度、精度の良い計器での監視が可能のため、重複してアクションレベルを設定する必要性は低いと判断する。
ナトリウム	μg/L	1	>5	ナトリウムは酸素、酸化剤の共存環境下で、SG 伝熱管材料であるニッケル基合金 (TT600) 材のアルカリ環境下での IGA を発生、進展させる最重要不純物の一つである (図 E.2)。このため、安全側に厳しく管理することを目的として、水酸化ナトリウムの気液分配の観点から、SG 二次側の濃縮部で濃縮しうる 10^7 倍 (評価上のミストキャリーオーバー率 10^{-7}) となった際に、当該環境の pHt (300°C) が TT600 材の IGA 発生環境となる 10.5 に安全側余裕を考慮した 10 となるナトリウム濃度 5 μg/L をアクションレベル 1 に設定する (図 E.3)。
		2	>50	酸素、酸化剤が存在しない環境下では、短時間で伝熱管材料に影響を生じることはないと判断しているが、十分に安全側の値として、アクションレベル 1 設定値の 10 倍で、かつ、現行の SG の管支持板形状である BEC (Broached Egg Crate) 型管支持板クレビス部 (管/管支持板接触近傍の濃縮部) で到達する可能性がある濃縮倍率 10^5 倍 (図 E.4) で、当該環境の pHt (300°C) が TT600 材の IGA 発生環境となる 10.5 に安全側余裕を考慮した 10 となるナトリウム濃度 50 μg/L をアクションレベル 2 に設定する (図 E.5)。
		3	>300	プラント即時停止判断を行う値として、現行の SG の管支持板形状である BEC 型管支持板クレビス部 (管/管支持板接触近傍の濃縮部) で到達する可能性がある濃縮倍率 10^3 倍 (図 E.4) で、当該環境の pHt (300°C) が TT600 材の IGA 発生環境となる 10.5 に達するナトリウム濃度 300 μg/L をアクションレベル 3 に設定する。
塩化物イオン	μg/L	1	>10	塩化物イオンは酸素、酸化剤の共存環境下で、SG 構造材であるニッケル基合金材、ステンレス鋼の孔食又は隙間腐食を生じさせる主要因となる不純物である。このため、厳しく管理することを目的として、アクションレベル 2 の 1/10 倍である 10 μg/L をアクションレベル 1 に設定する。
		2	>100	酸素、酸化剤が存在しない環境下では、短時間で伝熱管材料に影響を生じることはないと判断しているが、十分に安全側の値として、酸素、酸化剤が共存した環境下でもニッケル基合金材に孔食などの損傷が発生しない 100 μg/L をアクションレベル 2 に設定する (図 E.6)。
		3	>2 000	酸素、酸化剤が存在しない環境下では、短時間で伝熱管材料に影響を生じることはないと判断しているが、酸素、酸化剤が共存した環境下でニッケル基合金材に有意に孔食などの損傷が発生する可能性が大きくなる 2 000 μg/L をアクションレベル 3 に設定する (図 E.6)。

表 E.1—二次系通常運転時—SG 器内水における管理項目のアクションレベル設定の考え方（続き）

名称	単位	アクションレベル		設定の考え方
硫酸イオン	μg/L	1	>10	塩化物イオンと同様の影響が想定されるため、不純物として十分に低いことを担保する値として、アクションレベル 2 の 1/10 倍である 10 μg/L をアクションレベル 1 に設定する。
		2	>100	酸素、酸化剤が存在しない環境下では、短時間で伝熱管材料に影響を生じることはないと判断しているが、現行 SG の管支持板形状である BEC 型管支持板クレビス部で到達する可能性がある濃縮倍率 10 ⁵ 倍（図 E.4）、ナトリウム共存下で、当該環境の pHt（300℃）が IGA 発生環境となる、濃度 100 μg/L をアクションレベル 2 に設定する（図 E.7）。
		3	設定せず	下記の理由により、アクションレベル 3 の設定は不適と判断した。 硫酸イオン上昇によるプラント即時停止は、海外プラントでも事例がない。更に、国内プラントはカチオン樹脂の再生に硫酸は使用しておらず、硫酸イオンの上昇要因は復水脱塩装置に使用しているカチオン樹脂の劣化が考えられるが、当該要因でアクションレベル 2 を超える濃度上昇の発生は、樹脂の品質管理上、非常に稀であるため。

表 E.2—二次系通常運転時—SG 器内水における管理項目の推奨値設定の考え方

名称	単位	推奨値	設定の考え方
pH (at 25℃)	—	—	SG 構造材の腐食防止による健全性確保の観点から、SG 器内水の pH は適切な値に維持されることが望ましい。しかしながら、二次系機器・配管の腐食、FAC 抑制のため、プラントごとに材料構成(銅系材料の有無など)、浄化設備容量に応じて pH を設定する必要があるため、推奨値は設定しない。 なお、当該目的の達成の為に、高圧給水加熱器出口水の pH をプラントごとに適切な値で制御する（表 E.6）。
ナトリウム	μg/L	≦1	実機プラント実績から 1μg/L 以下の低濃度領域においては、SG 伝熱管材料健全性に大きな影響を及ぼすことを示す報告はない。ただし、長期健全性が確実に担保されているものではないため、プラント運用上可能な範囲で十分に低い濃度に管理する事が望ましい。従って、実機プラント運用上二次系通常運転時に達成が可能な 1 μg/L を推奨値に設定する。
塩化物イオン	μg/L	≦2	実機プラント実績から 2 μg/L 以下の低濃度領域においては、SG 構造材健全性に大きな影響を及ぼすことを示す報告はない。ただし、長期健全性が確実に担保されているものではないため、プラント運用上可能な範囲で十分に低い濃度に管理する事が望ましい。従って、実機プラント運用上二次系通常運転時に達成が可能な 2 μg/L を推奨値に設定する。
硫酸イオン	μg/L	≦2	塩化物イオンと同様に、2 μg/L 以下の領域では SG 構造材健全性に大きな影響を及ぼすことを示す報告はない。ただし、プラント運用上可能な範囲で十分に低い濃度に管理する事が望ましく、推奨値は塩化物イオンと同様の値を設定する。

表 E.3—二次系通常運転時—SG 器内水における診断項目の推奨値設定の考え方

名称	単位	推奨値	設定の考え方
全放射能	Bq/cm ³	—	SG での一次冷却材の漏えいがないことを確認するために計測する重要な項目である。検出されないことが基本となるため、推奨値は設定しない。

表 E.1 から表 E.3 で参照している図及びその図の説明は、下記のとおりである。

- a) pH 高温水中におけるマグネタイトの溶解度に及ぼす pH の関係を図 E.1 に示す。pH は系統構成材料の腐食に与える影響が大きく、マグネタイトの溶解度は pH 8(25 °C)以下で大きく増加する傾向を示す。

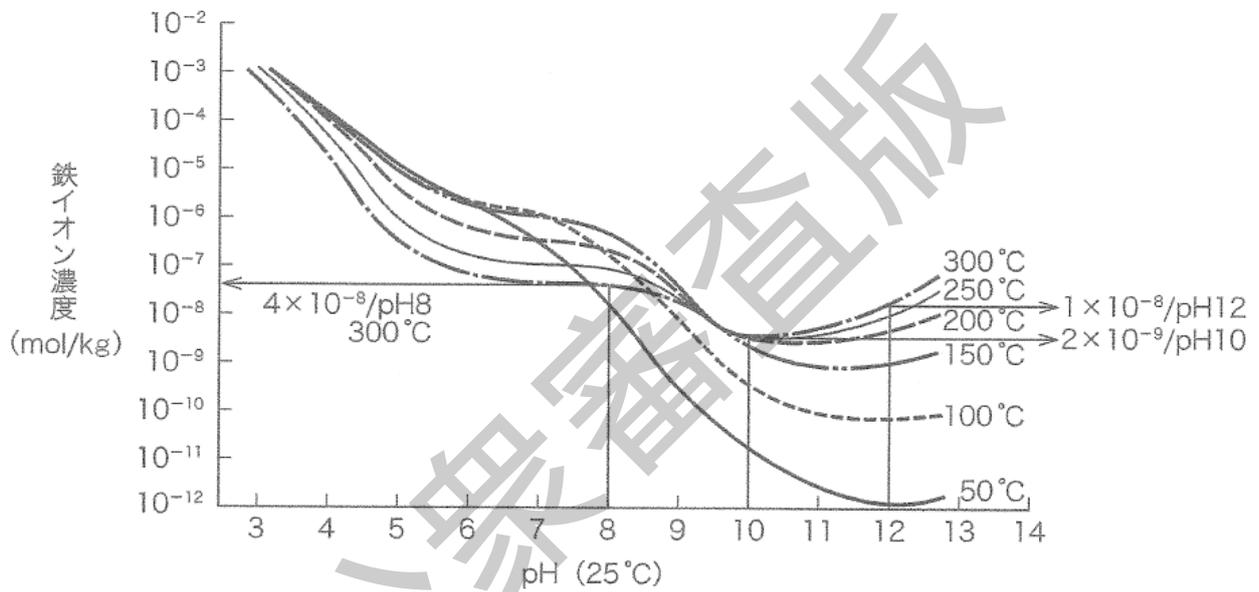
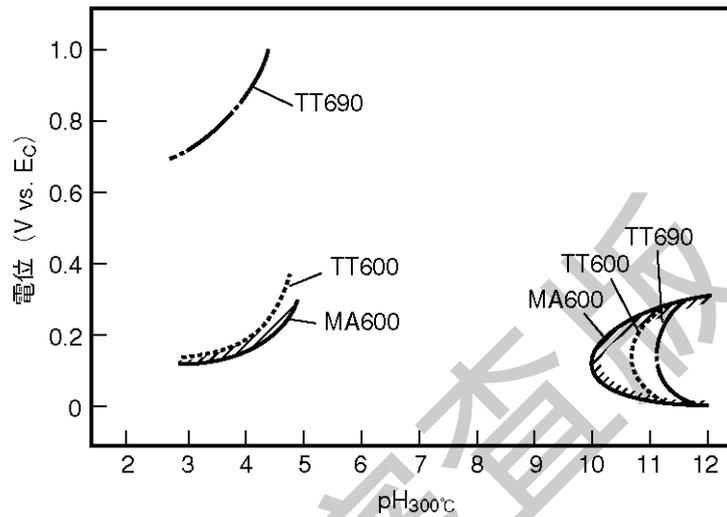


図 E.1—マグネタイトの溶解度に及ぼす pH の影響⁽¹⁾

b) **SG 伝熱管の損傷発生領域** SG 伝熱管材料の IGA 発生感受性を示す損傷マップを **図 E.2** に示す。これより、IGA は運転温度条件下 (300 °C) でのクレビス部 pH_t が強酸性、強アルカリ性環境下で、かつ伝熱管の電位が上昇した場合に損傷発生感受性領域に入る。

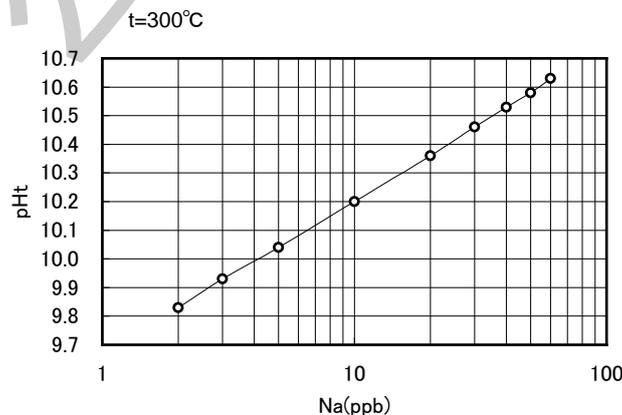
このため、SG 伝熱管の IGA 発生を防止するには、プラント運転条件下でのクレビス部 pH_{300°C} を強酸性あるいは強アルカリ性に偏らせる可能性がある不純物の SG への持込みを低減するとともに、SG 伝熱管の電位を上昇させる可能性のある酸素などの酸化物の持込みを防ぐことが必要である。



(注)電位はニッケル基合金材の腐食電位との電位差

図 E.2—SG 伝熱管材料の IGA 発生環境条件のまとめ ⁽²⁾

c) **ナトリウム濃度** ミストキャリーオーバー率 10^{-7} の条件下において、ナトリウムが単独増加した際のナトリウム濃度とクレビス部 pH_{300°C} の関係を **図 E.3** に示す。これより、ナトリウム濃度 5 μg/L (ppb) 以上でクレビス部 pH_{300°C} は 10 以上となる。



図E.3—ナトリウム単独増加時のクレビス部pH_{300°C}の変化
(ミストキャリーオーバー率 10^{-7})

d) **濃縮倍率** SG 伝熱管, 管支持板管穴形状と濃縮度の関係を図 E.4 に示す。下図は伝熱管表面にスケールの付着がない新管時の試験データであり, 現行 SG の BEC 型管支持板では 10^3 倍程度である。クレビス部へのスケール付着によるクレビスの隙間の減少に伴って濃縮度が增加するデータが得られており, BEC 型管支持板では 10^5 倍程度まで増加する可能性があるものと考えている。

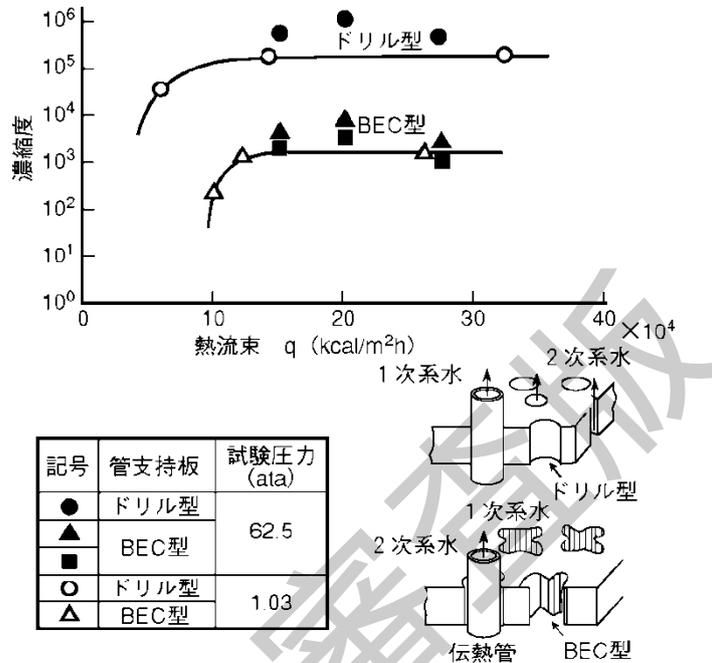
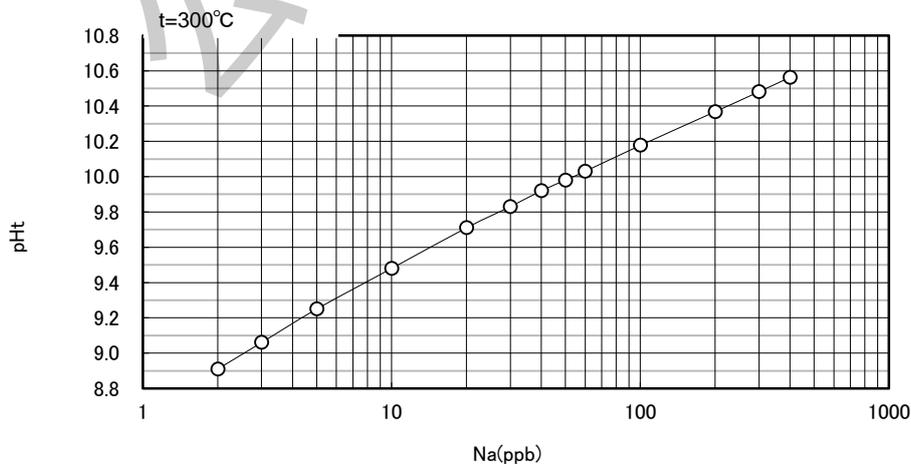


図 E.4—管支持板管穴形状と濃縮倍率⁽³⁾

e) **ナトリウム濃度** ミストキャリオーバ率 10^{-5} の条件下において, ナトリウムが単独増加した際のナトリウム濃度とクレビス部 $\text{pH}_{300^\circ\text{C}}$ の関係を図 E.5 に示す。これより, ナトリウム濃度 $50 \mu\text{g/L}(\text{ppb})$ 以上でクレビス部 $\text{pH}_{300^\circ\text{C}}$ は 10 以上となる。



図E.5—ナトリウム単独増加時のクレビス部 $\text{pH}_{300^\circ\text{C}}$ の変化
(ミストキャリオーバ率 10^{-5})

f) **塩化物イオン** 酸化剤(ヘマタイト及び亜酸化銅)存在下での SG 伝熱管(MA600 合金)のピッティン

グ発生に関する沸騰伝熱試験結果を図 E.6 に示す。国内プラントでは、二次系通常運転時は SG 内の還元性雰囲気十分に維持されており、ピittingが発生することは無いものと判断している。万一、酸化剤が共存した場合は、バルク水中の塩化物イオン濃度 0.1 mg/L (ppm) 程度までは大きな影響は認められないが、2mg/L (ppm) 以上になるとピittingが発生する可能性が増大する。

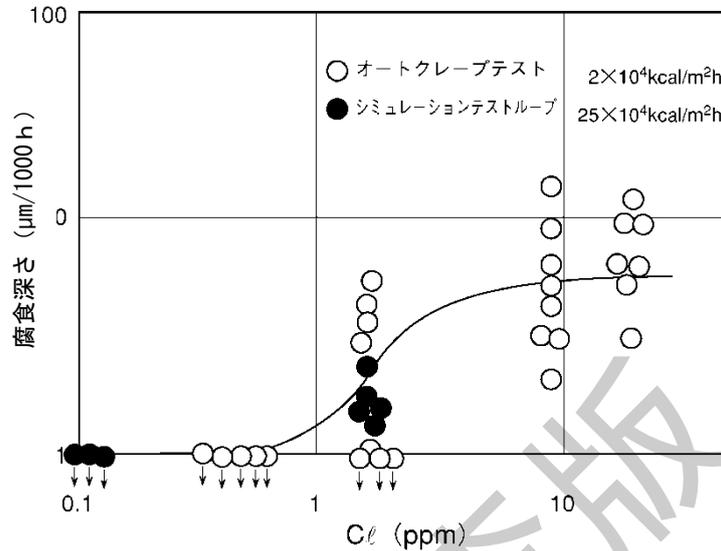
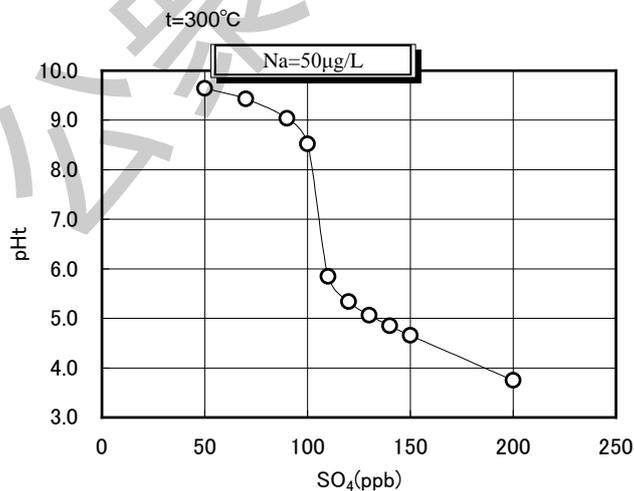


図 E.6—ニッケル基合金 (600 材) の腐食に及ぼす塩素イオンの影響⁽⁴⁾

g) **硫酸イオン** ミストキャリアバ率 10^{-5} の条件下において、ナトリウム共存下で、硫酸イオンが増加した際の硫酸イオン濃度とクレビス部 $\text{pH}_{300^\circ\text{C}}$ の関係を図 E.7 に示す。これより、硫酸イオン濃度 $100\mu\text{g/L}$ (ppb) 以上でクレビス部 $\text{pH}_{300^\circ\text{C}}$ は急激に低下し、5 以下となる。



図E.7—硫酸イオン増加時のクレビス部 $\text{pH}_{300^\circ\text{C}}$ の変化
(ミストキャリアバ率 10^{-5})

E.1.2 高圧給水加熱器出口水

二次系通常運転時の高圧給水加熱器出口水における管理項目のアクションレベル設定の考え方を表E.4に、推奨値設定の考え方を表E.5に示す。また、制御項目の制御値設定の考え方を表E.6に診断項目の推奨値設定の考え方を表E.7に示す。

表 E.4—二次系通常運転時—高圧給水加熱器出口水における管理項目のアクションレベル設定の考え方

名称	単位	アクションレベル		設定の考え方
ヒドラジン	μg/L	1	<50	ヒドラジンは、系統の還元性雰囲気強化し、SG 伝熱管腐食を抑制することを目的として添加する。系統の還元性雰囲気維持のための下限濃度として 50 μg/L をアクションレベル 1 に設定する。(図 E.8)
		2	設定せず	ヒドラジンが短時間で大幅に減少する理由は、酸素漏れ込み（復水系統）、酸化剤の残留・持ち込みである。酸素の漏れ込みは復水溶存酸素濃度の変動で早期、確実に検知可能である。一方、強酸化剤となる銅酸化物については、工事、開放時にスケール中残留銅が酸化されたものは二次系起動初期に還元可能であり、加えて銅系材料使用プラントが減少し、給水で銅濃度は極少濃度で推移していることから、二次系通常運転時にヒドラジンが大幅に減少する可能性は非常に小さい。従って、アクションレベル 2 以上は設定しない。
		3	設定せず	ヒドラジンは伝熱管腐食防止を目的とした還元性雰囲気確認のための重要な指標として活用されているが、ヒドラジン自体の直接的な影響は無いと判断されるため設定しない。
溶存酸素	μg/L	1	設定せず	溶存酸素は、腐食電位を増加させ、構造材料の IGA など発生、進展、孔食、隙間腐食の発生に大きく影響を及ぼす重要な化学因子であるため、アクションレベル 2 として 5μg/L を設定している。5 μg/L 未満は計測技術上困難であるため、アクションレベル 1 の設定は行わない。
		2	>5	溶存酸素は、腐食電位を増加させ、構造材料の IGA など発生、進展、孔食、隙間腐食の発生に大きく影響を及ぼす重要な化学因子であることから、SG への持ち込みを確実に防止する必要があるため、計測技術上検出限界値と判断できる 5 μg/L をアクションレベル 2 に設定する。
		3	設定せず	下記の理由により、アクションレベル 3 の設定は不適と判断した。SG への酸素の持ち込みは種々の伝熱管損傷防止の観点から厳しく管理する必要があるが、不純物が共存しない環境下で直接的な影響を及ぼす可能性は小さいため、アクションレベル 3 は不要と判断する。ただし、SG 器内水不純物濃度確認などのアクションレベル 2 を超えた時点で実施される調査結果を受けて、有効な対応を判断することが望ましい。
全銅	μg/L	1	>1	全銅は、銅イオン、あるいは銅酸化物として SG に持ち込まれた際、金属銅に還元される過程で強力な酸化剤として作用し、SG 伝熱管の腐食電位を上昇させ、腐食損傷発生に大きな影響を及ぼす(図 E.9)ため、SG への持ち込みを厳しく管理する必要があることから、実機プラント実運用濃度レベルである 1 μg/L をアクションレベル 1 に設定する。
		2	設定せず	以下の理由により、アクションレベル 2 の設定は不適と判断した。SG への銅の持ち込みは伝熱管損傷防止の観点から厳しく管理する必要があるが、工事、開放時に酸化されたスケール中の銅は二次系起動初期に還元され、加えて銅系材料排除が推進されており、二次系通常運転時に大幅に増加する可能性は非常に小さいため、アクションレベル 2 は不要と判断する。ただし、SG 器内水不純物濃度確認などのアクションレベル 1 を超えた時点で実施される調査結果を受けて、有効な対応を判

名称	単位	アクションレベル	設定の考え方
			断することが望ましい。

表 E.4—二次系通常運転時—高圧給水加熱器出口水の管理項目におけるアクションレベル
設定の考え方（続き）

名称	単位	アクションレベル	設定の考え方
全銅	μg/L	3 設定せず	以下の理由により、アクションレベル3の設定は不適と判断した。 SG への銅の持ち込みは伝熱管損傷防止の観点から厳しく管理する必要があるが、工事、開放時に酸化されたスケール中の銅は二次系起動初期に還元され、加えて銅系材料排除が推進されており、二次系通常運転時に大幅に増加する可能性は非常に小さい。そのため、SG 器内水不純物濃度確認などのアクションレベル1を超えた時点で実施される調査結果を受けて、有効な対応を判断することが望ましい。
鉛	μg/L	1 >10	SG 伝熱管割れ感受性に及ぼす鉛の影響は明確でないが、ラボデータによれば、SG 器内水鉛濃度を 0.1 mg/L(ppm)未満とすることで影響は限定的となる (図 E.10)。高圧給水加熱器出口水から SG 器内水への濃縮倍率としての 10 倍を考慮し、10 μg/L(0.01 mg/L)をアクションレベル1に設定する。
		2 設定せず	定検時の異物、清浄度、副資材の管理を徹底しており、かつ、クリーンアップ時と起動時の診断が行われているため、運転時にアクションレベル1を大幅に超過する可能性は非常に小さい。
		3 設定せず	定検時の異物、清浄度、副資材の管理を徹底しており、かつ、クリーンアップ時と起動時の診断が行われているため、運転時にアクションレベル1を大幅に超過する可能性は非常に小さい。

表 E.5—二次系通常運転時—高圧給水加熱器出口水における管理項目の推奨値設定の考え方

名称	単位	推奨値	設定の考え方
ヒドラジン	μg/L	—	アクションレベル1の値が推奨値下限となり、上限濃度は復水脱塩設備、SG 器内水浄化設備などを考慮したプラントごとの設定となるため、推奨値は設定しない。
溶存酸素	μg/L	—	アクションレベル2の設定値が、実運用濃度のため推奨値は設定しない。
全銅	μg/L	—	アクションレベル1の設定値が、実運用濃度のため推奨値は設定しない。
鉛	μg/L	—	アクションレベル1の設定値が、実運用濃度のため推奨値は設定しない。

表 E.6—二次系通常運転時—高圧給水加熱器出口水における制御項目の制御値設定の考え方

名称	単位	制御値	設定の考え方
ヒドラジン	μg/L	プラントごと	SG 伝熱管腐食抑制を目的に、系統の還元性雰囲気強化を目的として添加し、浄化設備のイオン負荷増大、SG 伝熱管性能低下抑制を考慮し、プラント設備に応じ、適切な濃度範囲に制御する。
pH	—	プラントごと	二次系機器・配管の腐食、FAC 抑制のため、pH 調整剤を添加し、プ

名称	単位	制御値	設定の考え方
(at 25℃)		と	ラントごとに材料構成, 浄化設備容量に応じて, 適切な範囲に制御する。

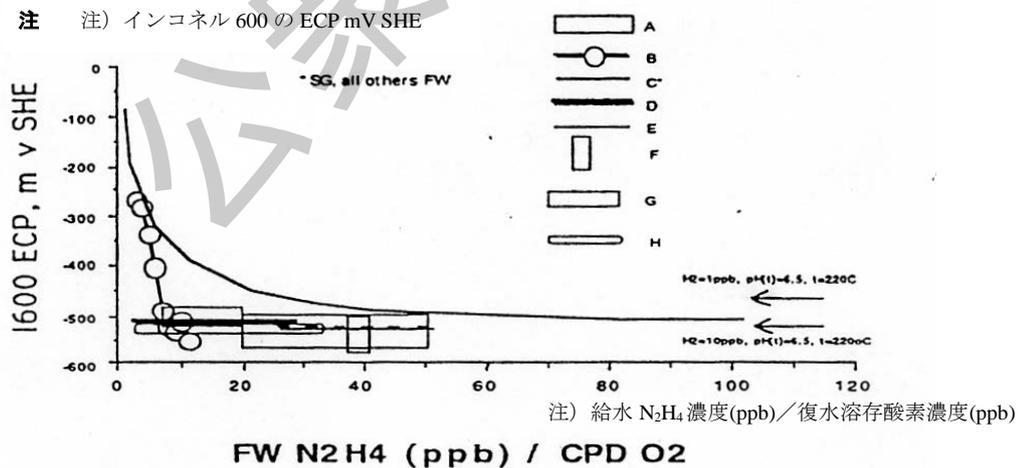
公衆審査版

表 E.7—二次系通常運転時—高圧給水加熱器出口水における診断項目の推奨値設定の考え方

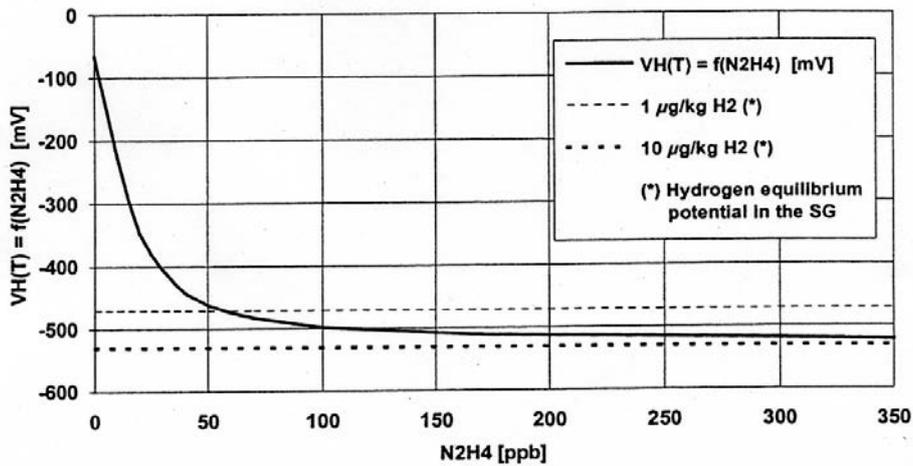
名称	単位	推奨値	設定の考え方
pH調整剤	mg/L	プラントごと	pH調整剤薬液濃度は電気伝導率で制御しており、薬液濃度と電気伝導率の相関、並びに適切な薬液が添加されているか確認を行う。なお、添加薬液濃度はプラント構成材料、給水处理条件に基づいて設定する。
電気伝導率	mS/m	プラントごと	プラントごとに設備構成に応じ、設備構成上達成が可能で、給水鉄低減が期待できるpH値が得られる薬品濃度の電気伝導率を薬品ごとに設定する。なお、制御範囲は、薬液注入設備、pH計測機器のばらつきを考慮した範囲を設定する。
鉄	μg/L	≤5	設備構成に応じ、適用が可能な水処理条件下で得られることが期待できる鉄濃度をプラントごとに設定する。

表 E.4 から表 E.7 で参照している図及びその図の説明は、下記のとおりである。

a) **ヒドラジン濃度** 給水ヒドラジン濃度と復水溶存酸素濃度比に対するニッケル基合金材（インコネル®600 材）の腐食電位の挙動（EPRI データ）を図 E.8-1 に、ヒドラジン濃度に対するインコロイ®800 材の腐食電位の計測結果を図 E.8-2 に示す。図 E.8-1 から、給水ヒドラジン濃度と復水溶存酸素濃度比が 20 以下となると、ニッケル基合金の腐食電位が上昇する傾向を示し、国内プラント通常運転時の復水溶存酸素が 1~2μg/L (ppb) であることを考慮すると、ニッケル基合金材の腐食電位を上昇させないために必要な給水ヒドラジン濃度は、40μg/L と評価できる。一方、図 E.8-2 から、インコロイ 800 材の腐食電位を上昇させないための給水ヒドラジン濃度は 50μg/L 以上となる。以上から、給水ヒドラジン濃度 50μg/L (ppb) 以上の条件であれば二次系統内酸化性雰囲気生成はないものと判断できる。



図E.8-1—給水ECP測定結果と[給水N₂H₄濃度(ppb) / 復水溶存酸素濃度(ppb)]の相関⁽⁵⁾



図E.8-2—ヒドラジン濃度がインコロイ800の腐食電位に及ぼす影響⁽⁶⁾

b) **金属酸化物によるSG伝熱管電位上昇** SG伝熱管の電位を上昇させる金属酸化物の寄与を図E.9に示す。これより、SG伝熱管の電位上昇を防止するためには酸素のみならず銅、鉛などの酸化物の持ち込みを防止することが重要であり、系統構成材からの銅、鉛の排除あるいは銅、鉛の酸化物を生成させない水処理の適用が必要である。

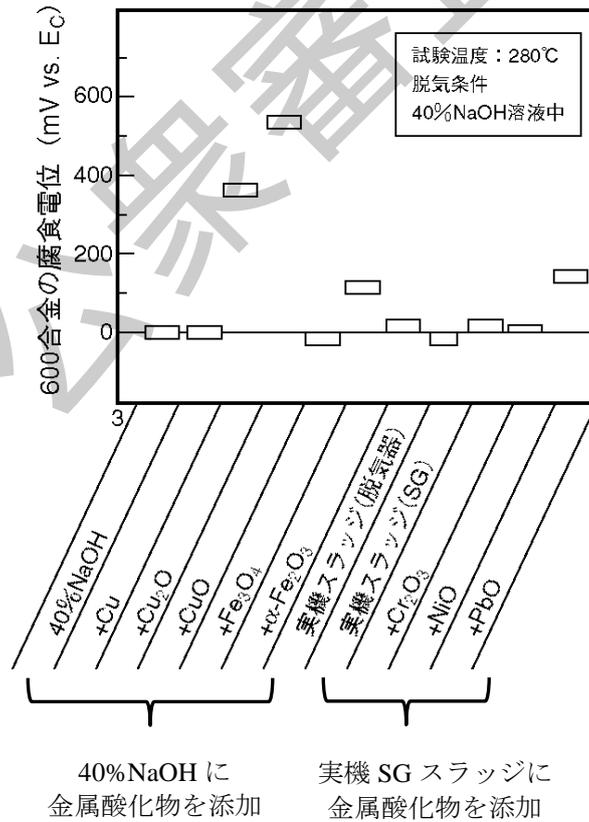


図 E.9—金属酸化物によるSG伝熱管の電位上昇⁽⁷⁾

c) **鉛濃度** 鉛に起因する SG 伝熱管損傷事例を下記に示す。

国内プラントでは、鉛に起因する SG 伝熱管の損傷事例は報告されていない。一方、海外では一部プラントで鉛に起因すると想定される SG 伝熱管損傷事例が報告されており、SG 器内への鉛遮蔽板の置き忘れなど、高濃度条件下で生じている。

SG 伝熱管割れ感受性に対する鉛の影響を下記に示す。種々のラボ試験によるデータ採取が行われているが、SG 伝熱管割れ感受性に及ぼす鉛の影響は明確ではない。このため、鉛は極力低い濃度で維持することが望ましいが、**図 E.10** によれば、SG 器内水鉛濃度を 0.1mg/L (ppm) 未満に抑制すること（**図中丸**に示す。）で影響は限定的となる。

SG 器内水/給水濃縮倍率は下記のとおりである。通常不純物の SG 器内水/給水の濃縮倍率は、SGBD 率によって決まり、例えば SGBD 率 1% の場合 100 倍濃縮となる。一方、国内実機プラント系統水中鉛濃度計測実績によれば、SG 器内水/給水濃度比は 5 倍程度であり、給水から SG 器内への濃縮倍率として 10 倍程度考慮しておく。

給水鉛濃度管理値設定は、以上の考えに基づき、給水鉛濃度管理値として 10 μ g/L を設定する (100 μ g/L \div 10 = 10 μ g/L)。

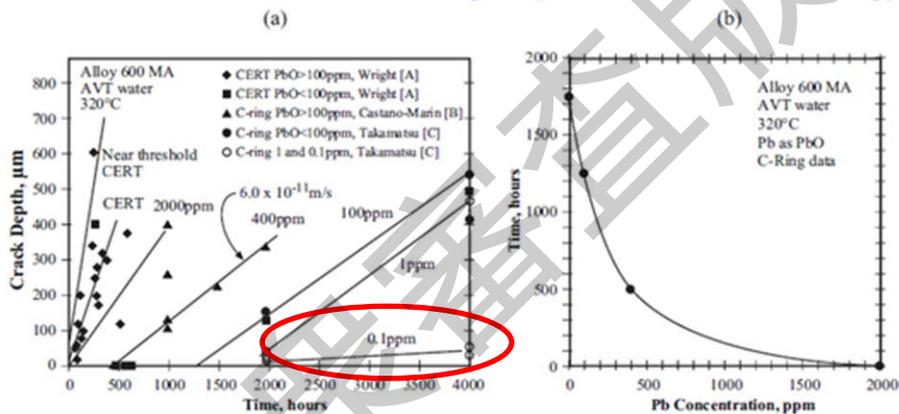


Figure 2 (a) Depth of SCC vs. time for Alloy 600MA in AVT water at 320°C for various concentrations of PbO. From Wright and Mirzai,⁵ [A] Wright and Mirzai,⁵ [B] Castano-Marin et al.,⁷ [C] and Takamatsu et al.⁸ (b) Time of intersection at extrapolated zero thickness vs. concentration of Pb. From Staehle.¹ ©2003 by the American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois.

図 E.10 SG 伝熱管健全性に及ぼす鉛の影響検討結果⁽⁸⁾

E.1.3 復水ポンプ出口水

二次系通常運転時の復水ポンプ出口水における管理項目のアクションレベル設定の考え方を表E.8に、推奨値設定の考え方を表E.9に示す。また、診断項目の推奨値設定の考え方を表E.10に示す。

表 E.8—二次系通常運転時—復水ポンプ出口水における管理項目のアクションレベル設定の考え方

名称	単位	アクションレベル		設定の考え方
カチオン 電気 伝導率	mS/m	1	>0.03	復水器海水漏えいを極力早く、かつ確実に検知することを目的として、二次系通常運転時の値である 0.01 mS/m に対し、有意に変動が確認可能である 0.03 mS/m をアクションレベル 1 に設定する。
		2	>0.05	高 pH 処理では系統水への炭酸溶解込みの増加、ETA 処理では ETA が分解して生成される有機酸の影響でカチオン電気伝導率が 0.01~0.02 mS/m 程度増加する。このため、これら影響を考慮し 0.05 mS/m をアクションレベル 2 に設定する。
		3	設定せず	SG への海水成分の持ち込みは、伝熱管損傷防止の観点から厳しく管理する必要があるが、カチオン電気伝導率は、炭酸、不純物イオンの総和を示すため、単独パラメータとしての影響は判断が困難である。そのため、アクションレベル 2 を超えた時点で実施される調査結果を受けて、有効な対応を判断することが望ましい。
ナトリウム	μg/L	1	>10	水質監視計器としてナトリウムイオン電極計を設置する場合、カチオン電気伝導率 0.02mS/m の塩化物イオン濃度に相当する海水組成ナトリウム濃度 10μg/L をアクションレベル 1 に設定する。
		2	>20	水質監視計器としてナトリウムイオン電極計を設置する場合、カチオン電気伝導率 0.04mS/m の塩化物イオン濃度に相当する海水組成ナトリウム濃度 20μg/L をアクションレベル 2 に設定する。
		3	設定せず	SG への海水成分の持ち込みは、伝熱管損傷防止の観点から厳しく管理する必要があるが、ナトリウムイオン以外の不純物イオンの影響も受けるため、単独パラメータとしての影響は判断が困難である。そのため、アクションレベル 2 を超えた時点で実施される調査結果を受けて、有効な対応を判断することが望ましい。

表 E.9—二次系通常運転時—復水ポンプ出口水における管理項目の推奨値設定の考え方

名称	単位	推奨値	設定の考え方
カチオン 電気 伝導率	mS/m	設定せず	アクションレベル 1 が、実運用値のため設定しない。

表 E.10—二次系通常運転時—復水ポンプ出口水における診断項目の推奨値設定の考え方

名称	単位	推奨値	設定の考え方
溶存酸素	μg/L	設定せず	真空域の酸素漏れ込み確認としては有効である。しかしながら、SG 伝熱管材料への影響確認は給水にて実施しているため、推奨値の設定は行わない。ただし、復水器細管に銅系材料を用いているプラントでは、別途推奨値を設定することを検討する。

E.1.4 二次系純水タンク水

二次系通常運転時の二次系純水タンク水における診断項目の推奨値設定の考え方を表E.11に示す。

表 E.11—二次系通常運転時—二次系純水タンク水における診断項目の推奨値設定の考え方

名称	単位	推奨値	設定の考え方
電気伝導率	mS/m	≤ 0.1	二次系補給水設備が適切に管理運用されていれば、二次系純水タンク水の純度は確保できる。ただし、二次系純水タンク水は一次系純水タンク、二次系系統への補給源となるため、推奨値として、補給水処理装置出口水への空気中の炭酸溶け込み影響を考慮した 0.1mS/m を推奨値に設定する。
ナトリウム	$\mu\text{g/L}$	≤ 5	二次系純水タンクのナトリウム濃度が高くなっても、直接プラント運用制限には至らないが、SG に直接持ち込まれた場合、並びに二次系停止中の保管水水源となることを考慮し、二次系通常運転時の SG 器内水のアクションレベル 1 である 5 $\mu\text{g/L}$ を推奨値に設定する。
塩化物イオン	$\mu\text{g/L}$	≤ 10	二次系純水タンクの塩化物イオン濃度が高くなっても、直接プラント運用制限には至らないが、SG に直接持ち込まれた場合、並びに二次系停止中の保管水水源となることを考慮し、二次系通常運転時の SG 器内水のアクションレベル 1 である 10 $\mu\text{g/L}$ を推奨値に設定する。
硫酸イオン	$\mu\text{g/L}$	≤ 10	二次系純水タンクの硫酸イオン濃度が高くなっても、直接プラント運用制限には至らないが、SG に直接持ち込まれた場合、並びに二次系停止中の保管水水源となることを考慮し、二次系通常運転時の SG 器内水のアクションレベル 1 である 10 $\mu\text{g/L}$ を推奨値に設定する。

E.1.5 復水浄化設備出口水

E.1.5.1 復水脱塩設備出口水

二次系通常運転時の復水脱塩設備における管理項目のアクションレベル設定の考え方を表 E.12 に示す。
また、診断項目の推奨値設定の考え方を表 E.13 に示す。

表 E.12—二次系通常運転時—復水脱塩設備出口水における管理項目のアクションレベル設定の考え方

名称	単位	アクションレベル		設定の考え方
電気伝導率	mS/m	1	>0.01	復水脱塩設備出口水の純度を確認し、復水脱塩設備の洗浄不良、性能低下による水質悪化を早期に確認するため、設備性能上達成可能であり、実機実績から系統水質への影響がないと判断できる 0.01 mS/m をアクションレベル 1 に設定する。
		2	—	下記の理由により、アクションレベル 2 以上の設定は不適と判断した。二次系系統への不純物持ち込み防止の観点から、復水脱塩設備出口水の純度を確実に確認しておく必要があるが、電気伝導率は、不純物イオンの総和を示すため、単独パラメータとしての影響は判断が困難である。そのため、アクションレベル 1 を超えた時点で実施される調査結果を受けて、有効な対応を判断することが望ましい。
		3	—	

表 E.13—二次系通常運転時—復水脱塩設備出口水における診断項目の推奨値設定の考え方

名称	単位	推奨値	設定の考え方
ナトリウム	μg/L	≦0.06	復水脱塩設備出口水ナトリウム濃度推奨値として, SG 器内水アクションレベル 1 の 5 μg/L を逸脱しない濃度である 0.06 μg/L として設定する ^{a)} 。
塩化物イオン	μg/L	≦0.15	復水脱塩設備出口水塩化物イオン濃度推奨値として, SG 器内水アクションレベル 1 の 10 μg/L を逸脱しない濃度である 0.15 μg/L として設定する ^{b)} 。
硫酸イオン	μg/L	≦0.15	復水脱塩設備出口水塩化物イオン濃度推奨値として, SG 器内水アクションレベル 1 の 10 μg/L を逸脱しない濃度である 0.15 μg/L として設定する ^{b)} 。
<p>注^{a)} ナトリウムの推奨値の設定根拠は下記による。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・前提：復水脱塩設備全量通水（出口水影響最大），復水/給水流量比≒0.6，SG ブローダウン率≒1% ・[復水脱塩設備出口 0.06 μg/L]×[復水/給水流量比 0.6]×[SG 濃縮 100]=3.6 μg/L ≒SG アクションレベル 1 の 5 μg/L <p>注^{b)} 塩化物イオン，硫酸イオンの推奨値の設定根拠は下記による。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・前提：復水脱塩設備全量通水（出口水影響最大），復水/給水流量比≒0.6，SG ブローダウン率≒1% ・[復水脱塩設備出口 0.15 μg/L]×[復水/給水流量比 0.6]×[SG 濃縮 100]=9 μg/L ≒SG アクションレベル 1 の 10 μg/L 			

E.2 二次系起動時

E.2.1 SG器内水

二次系起動時の SG 器内水における診断項目の推奨値設定の考え方を表 E.14 に示す。

表 E.14—二次系起動時—SG 器内水における診断項目の推奨値設定の考え方

名称	単位	推奨値	設定の考え方
カチオン電気伝導率	mS/m	≦0.2	カチオン電気伝導率は, 二次系起動時の SG への汚れの持ち込みの有無, その程度を総括的に判断できる項目である。発電機並列後出力上昇が行われ, SG 二次側で濃縮環境が形成されるため, この時点で SG への汚れの持ち込みが低減されていることを確認するため, 塩化物イオン濃度 100 μg/L に他の不純物の増加分を考慮した 0.2 mS/m を推奨値に設定する。
ナトリウム	μg/L	≦50	発電機並列後出力上昇が行われ, SG 二次側で濃縮環境が形成される前に, SG への汚れの持ち込みが低減されていることを確認するため, 二次系通常運転時アクションレベル 2 としているナトリウム濃度 50 μg/L を推奨値に設定する。
塩化物イオン	μg/L	≦100	発電機並列後出力上昇が行われ, SG 二次側で濃縮環境が形成される前に, SG への汚れの持ち込みが低減されていることを確認するため, 二次系通常運転時アクションレベル 2 としている塩化物イオン濃度 100 μg/L を推奨値に設定する。
鉛	μg/L	≦100	発電機並列後出力上昇が行われ, SG 二次側で濃縮環境が形成される前に, SG 器内への異物などの置き忘れがないことを確認するため診断項目とするが, ラボ試験データから SG 伝熱管材料健全性への影響が限定的と判断できる 100 μg/L を推奨値に設定する。

E.2.2 高圧給水加熱器出口水

二次系起動時の高圧給水加熱器出口水における診断項目の推奨値設定の考え方を表 E.15 に示す。

表 E.15—二次系起動時—高圧給水加熱器出口水における診断項目の推奨値設定の考え方

名称	単位	推奨値	設定の考え方
pH (at 25°C)	—	プラントごと	プラント起動時は復水脱塩設備が全量通水運用となるため、AVT (AVT:All Volatile Treatment) 条件下で運用が可能な pH とし、プラントごとに設備構成に応じて設定する。
電気伝導率	mS/m	プラントごと	プラント起動時は復水脱塩設備が全量通水運用となるため、AVT 条件下で運用が可能な pH とし、薬品濃度の電気伝導率を薬品ごとに設定する。
ヒドラジン	μg/L	≥ 50	起動時は機器開放などによる系統内酸化性雰囲気の早期改善を目的として、プラントごとに濃度を設定する。ただし、推奨値下限濃度は還元性雰囲気確保のために必要な 50μg/L を推奨値に設定する。
溶存酸素	μg/L	≤ 5	酸素持ち込み監視強化の観点から、二次系通常運転時アクションレベル 2 と同じとする。

E.2.3 復水ポンプ出口水

二次系起動時の復水ポンプ出口水における診断項目の推奨値設定の考え方を表 E.16 に示す。

表 E.16—二次系起動時—復水ポンプ出口水における診断項目の推奨値設定の考え方

名称	単位	推奨値	設定の考え方
カチオン電気伝導率	mS/m	≤ 0.03	海水漏えい監視強化の観点から、二次系通常運転時アクションレベル 1 と同じとする。
ナトリウム	μg/L	≤ 10	海水漏えい監視強化の観点から、二次系通常運転時アクションレベル 1 と同じとする。

E.3 二次系停止時

E.3.1 高圧給水加熱器出口水

二次系停止時の高圧給水加熱器出口水における診断項目の推奨値設定の考え方を、表E.17に示す。

表 E.17—二次系停止時—高圧給水加熱器出口水における診断項目の推奨値設定の考え方

名称	単位	推奨値	設定の考え方
pH (at 25°C)	—	プラントごと	プラント停止時は復水脱塩設備が全量通水運用となるため、AVT 条件下で運用が可能な pH とし、プラントごとに設備構成に応じて設定する。
電気伝導率	mS/m	プラントごと	プラント停止時は復水脱塩設備が全量通水運用となるため、AVT 条件下で運用が可能な pH とし、薬品濃度の電気伝導率を薬品ごとに設定する。
ヒドラジン	μg/L	≥ 50	推奨値下限濃度は還元性雰囲気確保のために必要な 50μg/L とする。

E.3.2 復水ポンプ出口水

二次系停止時の復水ポンプ出口水における診断項目の推奨値設定の考え方を、表E.18に示す。

表 E.18—二次系停止時—復水ポンプ出口水における診断項目の推奨値設定の考え方

名称	単位	推奨値	設定の考え方
カチオン電気伝導率	mS/m	≤ 0.03	海水漏えい監視強化の観点から、二次系通常運転時アクションレベル 1 と同じとする。
ナトリウム	μg/L	≤ 10	海水漏えい監視強化の観点から、二次系通常運転時アクションレベル 1 と同じとする。

E.4 二次系停止中

E.4.1 SG器内水

二次系停止中のSG二次側湿式保管時のSG器内水における診断項目の推奨値設定の考え方を、表E.19に示す。

また、SG以外の二次系統の管理方法は解説に述べる。

表E.19—二次系停止中—SG器内水における診断項目の推奨値設定の考え方

名称	単位	推奨値	設定の考え方
pH (at 25°C)	—	≥10	ヒドラジン、アンモニア併用時の場合は、構成材料の腐食低減の観点から、アンモニア添加によるpH上昇は有効であり、プラント設備上アンモニア添加が可能な場合は適用しても良い。プラントごとに設備構成が異なるため、推奨値はプラントごとに設定する。
ヒドラジン	mg/L	20~500	ヒドラジン、アンモニア併用時の場合は、水張り水の溶存酸素(8 mg/L: 常温飽和)の2倍以上のヒドラジン濃度である20 mg/Lに実機保管実績に基づく保管初期低下濃度を設定し添加する。
		50~500	ヒドラジン単独処理時の場合は、50 mg/L(≒保管中基準濃度10 mg/L+水張り水の溶存酸素の2~3倍の20~30 mg/Lに、実機保管実績に基づく保管初期低下濃度を設定し添加する。
ナトリウム	μg/L	—	保管前のSG二次側の清浄度は確保されているため、保管水供給源となる二次系補給水の水質が推奨値を満足していることを確認した上で保管を行う。保管中のSG二次側清浄度は補給水処理装置出口水水質で担保する。
塩化物 イオン	μg/L	—	保管前のSG二次側の清浄度は確保されているため、保管水供給源となる二次系補給水の水質が推奨値を満足していることを確認した上で保管を行う。保管中のSG二次側清浄度は補給水処理装置出口水水質で担保する。
硫酸 イオン	μg/L	—	保管前のSG二次側の清浄度は確保されているため、保管水供給源となる二次系補給水の水質が推奨値を満足していることを確認した上で保管を行う。保管中のSG二次側清浄度は補給水処理装置出口水水質で担保する。

E.4.2 二次系統水

二次系停止中、クリーンアップ時の二次系統水における診断項目の推奨値設定の考え方を表 E.20 に示す。

表 E.20—クリーンアップ時—二次系統水における診断項目の推奨値設定の考え方

名称	単位	推奨値	設定の考え方
カチオン 電気 伝導率	mS/m	≤ 0.03	二次系の浄化の指標として、不純物、有機物など汚れの浄化程度を把握するため管理を行う。管理対象は、クリーンアップの最終ステップとなる、全系統循環クリーンアップ時、又は、脱気器水質調整時とし、SG 送水開始前に極力浄化を促進させることが重要となるため、実機プラント実績、あるいは、復水脱塩設備出口水実績値に幾分の余裕を持たせた 0.03 mS/m を推奨値に設定する。
濁度	mg/L	≤ 1	二次系の浄化の指標として、二次系停止中に発生した鉄さびの浄化程度を把握するため管理を行う。管理対象は、クリーンアップの最終ステップとなる、全系統循環クリーンアップ時、又は、脱気器水質調整時とし、SG 送水開始前に極力浄化を促進させることが重要となるため、実機プラント実績に基づき、1 mg/L を推奨値に設定する。
鉄	$\mu\text{g/L}$	≤ 100	二次系の浄化の指標として、二次系停止中に発生した鉄さびの浄化程度を把握するため管理を行う。管理対象は、クリーンアップの最終ステップとなる、全系統循環クリーンアップ時、又は、脱気器水質調整時とし、SG 送水開始前に極力浄化を促進させることが重要となるため、実機プラント実績に基づき、100 $\mu\text{g/L}$ を推奨値に設定する。
溶存酸素	$\mu\text{g/L}$	≤ 50	溶存酸素は、SG 送水開始前に極力低減しておくことが望ましい。クリーンアップ段階では、原子炉一次冷却材ヒートアップ開始までに達成しておくべき目安値とし、ヒートアップ開始時の管理値である 5 $\mu\text{g/L}$ の 10 倍となる 50 $\mu\text{g/L}$ を推奨値に設定する。
ナトリウム	$\mu\text{g/L}$	≤ 0.5	二次系統浄化の指標として、工事、開放点検などによって二次系停止中に持ち込まれた汚れの浄化程度を把握するため管理を行う。管理対象は、クリーンアップの最終ステップとなる、全系統循環クリーンアップ時、又は、脱気器水質調整時とし、SG 送水開始前に極力浄化を促進させることが重要となるため、実機プラント実績、並びに、次ステップとなる一次系冷却材ヒートアップ開始時の管理値を満足しておくことを考慮し、0.5 $\mu\text{g/L}$ ^{a)} を推奨値に設定する。
塩化物イオン	$\mu\text{g/L}$	≤ 0.5	
鉛	$\mu\text{g/L}$	≤ 1	定検工事での二次系系統での異物、清浄度・副資材の管理不足による SG 器内への鉛の持込がないことを確認するため診断項目とするが、クリーンアップ時は温度が低いため、鉛が存在しても運転時よりはその濃度が低くなることが想定される。そこで、現行分析機器で有意に確認することが可能である 1 $\mu\text{g/L}$ を推奨値に設定する。
<p>注^{a)} 一次系ヒートアップ開始から原子炉臨界までのSG器内水ナトリウム濃度推奨値の50 $\mu\text{g/L}$に対し、クリーンアップ最終段階で満足しておくことが望ましい目安値として設定。 SGブローダウン率を1%とすると、定格運転時のSGでの濃縮倍率は約100倍となる。 このため、クリーンアップ完了時に満足することが望ましい値として、SG器内水ナトリウム推奨値である50 $\mu\text{g/L}$の1/100倍の濃度となる0.5$\mu\text{g/L}$とした。 塩化物イオンの推奨値は、ナトリウムと同じとした。</p>			

E.4.3 二次系純水タンク水

二次系停止中の二次系純水タンクにおける診断項目の推奨値設定の考え方を、表E.21に示す。

表 E.21—二次系停止中—二次系純水タンクにおける診断項目の推奨値設定の考え方

名称	単位	推奨値	設定の考え方
電気伝導率	mS/m	≤0.1	二次系純水タンク水を用いてSG二次側の保管を実施する場合、水の純度を総括的に評価できる電気伝導率を、診断項目として確認を行うことを推奨する。推奨値は二次系通常運転時と同じ、0.1 mS/m を推奨値に設定する。
ナトリウム	μg/L	—	電気伝導率が推奨値を逸脱した際、原因究明のために計測する。補給水処理設備が問題なく稼動している場合は、二次系通常運転時と同等の5 μg/L を満足できるものと判断しているが、ここでは推奨値の設定は行わない。
塩化物イオン	μg/L	—	電気伝導率が推奨値を逸脱した際、原因究明のために計測する。補給水処理設備が問題なく稼動している場合は、二次系通常運転時と同等の10 μg/L を満足できるものと判断しているが、ここでは推奨値の設定は行わない。
硫酸イオン	μg/L	—	

E.5 運転モードに依らない系統

E.5.1 補給水処理装置出口水

補給水処理装置出口水における管理項目のアクションレベル設定の考え方を表E.22に示す。また、診断項目の推奨値設定の考え方を、表E.23に示す。

表 E.22—補給水処理装置出口水における管理項目のアクションレベルの考え方

名称	単位	アクションレベル	設定の考え方	
電気伝導率	mS/m	1	>0.02	水の純度を総括的に評価できる電気伝導率を、管理項目とする。設備性能上達成可能であり、実機実績から系統水質への影響がないと判断できる0.02 mS/m をアクションレベル1 に設定する。
		2	—	下記の理由により、アクションレベル2以上の設定は不適と判断した。一次、二次系統への不純物持ち込み防止の観点から、補給水処理装置出口水の純度を確実に確認しておく必要があるが、電気伝導率は、不純物イオンの総和を示すため、個々の不純物イオンの影響を分離することは困難である。そのため、アクションレベル1を超えた時点で実施される調査結果を受けて、有効な対応を判断することが望ましい。
		3	—	

表 E.23—補給水処理装置出口水における診断項目の推奨値設定の考え方

名称	単位	推奨値	設定の考え方
シリカ	μg/L	≤20	補給水処理装置の運転状況、及び汚れの程度を示す指標として、設備運用実績に基づいて20 μg/L を推奨値に設定する。

参考文献

- (1) H.H.Uhling; Corrosion Handbook, p.525 (1961)
- (2) 八島清爾, 原子力工業, **41**[4], 62-69 (1995)
- (3) I.Ohsaki et.al :Proc. of Internal SG & Heat Exchanger Conf., Tront,2,p.893(1994)
- (4) 原子炉水化学ハンドブック : 日本原子力学会編, p.161
- (5) PWR Secondary Water Chemistry Guide Lines Revision 6 108224 (2004)
- (6) PWR Secondary Water Chemistry Guide Lines Revision 3TR-102134 (1993)
- (7) A. Kishida, H. Takamatsu and H. Kitamura et al., “The Causes and Remedial Measures of Steam Generator Tube Intergranular Attack in Japanese PWR” Proc. 3rd Int. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors (1987) , p.465
- (8) K. Fruzzetti, “Pressurized Water Reactor Lead Sourcebook” EPRI 1013385 (2006)

公眾審查版

附属書 F (参考) 測定頻度の設定の考え方

序文

この附属書は、本体に関連する事柄を説明するものであり、規定の一部ではない。

F.1 二次系通常運転時

F.1.1 SG器内水

二次系通常運転時のSG器内水における管理項目及び診断項目の測定頻度の考え方を表F.1に示す。

表F.1—二次系通常運転時—SG器内水における項目測定頻度の考え方

名称	分類			頻度	設定の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目		
pH	○	—	—	1回/週	SG構成材料健全性確認の観点で重要な項目であるが、通常運転時は給水水処理条件で決定されるため、測定頻度は1回/週とする。
ナトリウム	○	—	—	1回/日	SG構成材料健全性確認の観点で重要な項目であるため、測定頻度は1回/日とする。水質監視計器が設置されている場合は、計器による傾向監視を行う。
塩化物イオン	○	—	—	1回/日	SG構成材料健全性確認の観点で重要な項目であるため、測定頻度は1回/日とする。水質監視計器が設置されている場合は、計器による傾向監視を行う。
硫酸イオン	○	—	—	1回/日	SG構成材料健全性確認の観点で重要な項目であるため、測定頻度は1回/日とする。水質監視計器が設置されている場合は、計器による傾向監視を行う。
全放射能	—	—	○	1回/月	実プラント運用では、監視計器による監視を行っており、監視計器信頼性確認のため、定期的に手分析による確認を実施している。確認頻度については、材料健全性確保の観点からの要求ではないため、月1回としている。

F.1.2 高圧給水加熱器出口水

二次系通常運転時の高圧給水加熱器出口水における管理項目、制御項目及び診断項目の測定頻度の考え方を表F.2に示す。

表 F.2—二次系通常運転時—高圧給水加熱器出口水における項目測定頻度の考え方

名称	分類			頻度	設定の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目		
ヒドラジン	○	○	—	1回/日	SG 伝熱管腐食防止のための系統の還元性雰囲気強化に重要な項目であるため、測定頻度は1回/日とする。水質監視計器が設置されている場合は、計器による連続監視を行う。
溶存酸素	○	—	—	1回/週	プラント通常運転中はプラント運用変更がなければほとんど変化することがなく、復水器真空、脱気温度などの運転パラメータ、復水ポンプ出口溶存酸素濃度、高圧給水加熱器出口水ヒドラジン濃度など他の計測データから変動の有無を確認できるため、1回/週としている。
全銅	○	—	—	1回/週	全銅は、銅酸化物としてSGに持ち込まれた際、強力な酸化剤として作用し、伝熱管の腐食電位を上昇させ、腐食損傷発生に大きな影響を及ぼす項目であるが、給水水処理条件の変更がなければ大きく変動することはないため、測定頻度は1回/週とする。
鉛	○	—	—	1回/月	定検時の異物、清浄度・副資材の管理を徹底しており、国内ではSG伝熱管損傷事例がなく、かつ、クリーンアップ時と起動時の診断を実施することになっており、短時間での濃度上昇及び大きな変動はないと考えられるため、測定頻度は1回/月とする。
pH	—	○	—	1回/日	系統構成材料腐食防止のために重要な項目であり、添加薬液注入制御管理の観点からも重要な項目であるため、測定頻度は1回/日とする。
pH調整剤	—	—	○	適宜	添加薬液濃度は電気伝導率にて制御しているが、添加薬液濃度確認のため適宜測定を行う。
電気伝導率	—	—	○	1回/日	添加薬液濃度モニタリングのため、測定頻度は1回/日とする。水質監視計器が設置されている場合は、計器による連続監視を行う。
鉄	—	—	○	1回/週	鉄は、SG二次側へのスケール付着による伝熱性能低下、管支持板閉塞などの影響監視、並びに、復・給水、ドレン系統の腐食抑制監視に対して重要な化学因子となるが、給水水処理条件の変更がなければ大きく変動することはないため、測定頻度は1回/週とする。

F.1.3 復水ポンプ出口水

二次系通常運転時の復水ポンプ出口水における管理項目及び診断項目の測定頻度の考え方を表F.3に示す。

表 F.3—二次系通常運転時—復水ポンプ出口水における項目測定頻度の考え方

名称	分類			頻度	設定の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目		
カチオン電気伝導率	○	—	—	連続計器監視	海水が SG に持ち込まれた場合、重大な腐食損傷が発生する可能性が大きく、海水漏えいを速やかに検知することが重要であるため、測定頻度は水質監視計器による連続計測とする。 なお、水質監視計器としてナトリウムイオン電極計を設置する場合もあり、その場合はナトリウムで監視を行ってもよい。
ナトリウム	○	—	—	連続計器監視	海水が SG に持ち込まれた場合、重大な腐食損傷が発生する可能性が大きく、海水漏えいを速やかに検知することが重要であるため、測定頻度は水質監視計器による連続計測とする。 なお、水質監視計器としてカチオン電気伝導率計を設置する場合もあり、その場合はカチオン電気伝導率で監視を行ってもよい。
溶存酸素	—	—	○	1 回/日	SG 構成材料健全性確保の観点では、給水で管理することで十分であるが、復水系統の真空域からの空気の漏れ込みを管理することを目的として、測定頻度は 1 回/日とする。

F.1.4 二次系純水タンク水

二次系通常運転時の二次系純水タンク水における診断項目の測定頻度の考え方を表F.4に示す。

表 F.4—二次系通常運転時—二次系純水タンク水における測定頻度の考え方

名称	分類			頻度	設定の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目		
電気伝導率	—	—	○	1回/月	二次系純水タンク水の補給源となる補給水処理装置出口水が適切に管理されていれば、管理値を超える可能性は低いと見做すため、測定頻度は1回/月とする。
ナトリウム	—	—	○	1回/月	高濃度（mg/L オーダー）の不純物混入は電気伝導率により監視可能であるが、SG 伝熱管健全性確保の観点から重要な不純物となるため、低濃度の不純物挙動を把握するため、測定頻度は1回/月とする。
塩化物イオン	—	—	○	1回/月	高濃度（mg/L オーダー）の不純物混入は電気伝導率により監視可能であるが、SG 伝熱管健全性確保の観点から重要な不純物となるため、低濃度の不純物挙動を把握するため、測定頻度は1回/月とする。
硫酸イオン	—	—	○	1回/月	高濃度（mg/L オーダー）の不純物混入は電気伝導率により監視可能であるが、SG 伝熱管健全性確保の観点から重要な不純物となるため、低濃度の不純物挙動を把握するため、測定頻度は1回/月とする。

F.1.5 復水脱塩設備出口水

二次系通常運転時の復水脱塩設備出口水における管理項目及び診断項目の測定頻度の考え方を表F.5に示す。

表 F.5—二次系通常運転時—復水脱塩設備出口水における測定頻度の考え方

名称	分類			頻度	設定の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目		
電気伝導率	○	—	—	1回/日	復水脱塩設備の洗浄不良、性能低下による水質悪化を、早期、かつ確実に確認するため、測定頻度は1回/日とする。水質監視計器が設置されている場合は、計器による連続監視を行う。
ナトリウム	—	—	○	適宜	復水脱塩設備出口水電気伝導率、又は、SG 器内水ナトリウム濃度が変動した場合に原因同定のために確認するため、測定頻度は適宜とする。
塩化物イオン	—	—	○	適宜	復水脱塩設備出口水電気伝導率、又は、SG 器内水塩化物イオン濃度が変動した場合に原因同定のために確認するため、測定頻度は適宜とする。
硫酸イオン	—	—	○	適宜	復水脱塩設備出口水電気伝導率、又は、SG 器内水硫酸イオン濃度が変動した場合に原因同定のために確認するため、測定頻度は適宜とする。

F.2 二次系起動時

F.2.1 SG器内水

二次系起動時の SG器内水における診断項目の測定頻度の考え方を表F.6に示す。

表 F.6—二次系起動時—SG 器内水における測定頻度の考え方

名称	分類			頻度	設定の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目		
カチオン電気伝導率	—	—	○	1回	復水脱塩設備が適切に管理、運用されていれば、当該期間 SG へ汚れが持ち込まれる可能性は低いですが、万一、持ち込まれた場合には重大な腐食損傷を発生させる可能性があるため、発電機並列前に 1 回推奨値を満足していることを確認する。
ナトリウム	—	—	○	1回	復水脱塩設備が適切に管理、運用されていれば、当該期間 SG へナトリウムが持ち込まれる可能性は低いですが、万一、持ち込まれた場合には重大な腐食損傷を発生させる可能性があるため、発電機並列前に 1 回推奨値を満足していることを確認する。
塩化物イオン	—	—	○	1回	復水脱塩設備が適切に管理、運用されていれば、当該期間 SG へ塩化物イオンが持ち込まれる可能性は低いですが、万一、持ち込まれた場合には重大な腐食損傷を発生させる可能性があるため、発電機並列前に 1 回推奨値を満足していることを確認する。
鉛	—	—	○	1回	SG 器内への鉛入り異物の残留を確認し、残留したままの出力上昇を回避するためには起動前に最小 1 回の測定で良い。国内では鉛持込による SG 伝熱管損傷事例はないため、発電機並列前の 1 回の測定とする。

F.2.2 高圧給水加熱器出口水

二次系起動時の高圧給水加熱器出口水における診断項目の測定頻度の考え方を表F.7に示す。

表 F.7—二次系起動時—高圧給水加熱器出口水における測定頻度の考え方

名称	分類			頻度	設定の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目		
pH	—	—	○	適宜	系統構成材料腐食防止のために重要な項目であり、添加薬液注入制御管理の観点からも重要な項目であるため、必要時に適宜測定する。
電気伝導率	—	—	○	適宜	添加薬液注入制御管理の観点から重要な項目であるため、必要時に適宜測定する。
ヒドラジン	—	—	○	適宜	SG 伝熱管腐食防止のための系統の還元性雰囲気強化に重要な項目であるため、必要時に適宜測定する。
溶存酸素	—	—	○	1 回	復水器真空が維持され、脱気器設置プラントでは、脱気器が加熱真空脱気されていれば、当該期間の高圧給水加熱器出口溶存酸素濃度に変化はない。また、当該期間は短期間のため、測定頻度は期間中 1 回とし、発電機並列前に推奨値を満足していることを確認する。

F.2.3 復水ポンプ出口水

二次系起動時の復水ポンプ出口水における診断項目の測定頻度の考え方を表F.8に示す。

表 F.8—二次系起動時—復水ポンプ出口水における測定頻度の考え方

名称	分類			頻度	設定の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目		
カチオン 電気伝導率	—	—	○	1 回	国内プラントでは、当該期間、復水は復水脱塩設備により全量処理されているため、復水器冷却水漏えい発生による影響は小さい。また、当該期間は短期間のため、測定頻度は期間中 1 回とし、発電機並列前に推奨値を満足していることを確認する。 なお、その後の継続運転に際し、海水漏えいの早期検知、回復対応は重要であるため、監視計器による連続監視が望ましい。

F.3 二次系停止時

F.3.1 高圧給水加熱器出口水

二次系停止時の高圧給水加熱器出口水における診断項目の測定頻度の考え方を表F.9に示す。

表 F.9—二次系停止時—高圧給水加熱器出口水における測定頻度の考え方

名称	分類			頻度	設定の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目		
pH	—	—	○	適宜	系統構成材料腐食防止のために重要な項目であり、添加薬液注入制御管理の観点からも重要な項目であるため、必要時に適宜測定する。
電気伝導率	—	—	○	適宜	添加薬液注入制御管理の観点から重要な項目であるため、必要時に適宜測定する。
ヒドラジン	—	—	○	適宜	SG 伝熱管腐食防止のための系統の還元性雰囲気強化に重要な項目であるため、必要時に適宜測定する。

F.3.2 復水ポンプ出口水

二次系停止時の復水ポンプ出口水における診断項目の測定頻度の考え方を表F.10に示す。

表 F.10—二次系停止時—復水ポンプ出口水における測定頻度の考え方

名称	分類			頻度	設定の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目		
カチオン電気伝導率	—	—	○	1回	国内プラントでは、当該期間、復水は復水脱塩設備により全量処理されているため、復水器冷却水漏えい発生による影響は小さいが、停止期間中においても海水漏えいがないことを確認することは重要である。停止時は短いため、測定頻度は期間中1回とする。 なお、停止時においても海水漏えいの早期検知、回復対応は重要であるため、監視計器による連続監視が望ましい。 なお、海水漏えい監視の観点から、監視計器による連続監視を推奨しているが、監視計器の信頼性確認のため、期間中少なくとも1回は手分析による確認を実施することとしている。
ナトリウム	—	—	○	1回	国内プラントでは、当該期間、復水は復水脱塩設備により全量処理されているため、復水器冷却水漏えい発生による影響は小さいが、停止期間中においても海水漏えいがないことを確認することは重要である。停止時は短いため、測定頻度は期間中1回とする。 なお、停止時においても海水漏えいの早期検知、回復対応は重要であるため、監視計器による連続監視が望ましい。 なお、海水漏えい監視の観点から、監視計器による連続監視を推奨しているが、監視計器の信頼性確認のため、期間中少なくとも1回は手分析による確認を実施することとしている。

F.4 二次系停止中

F.4.1 SG器内水

二次系停止中のSG器内水における診断項目の測定頻度の考え方を表F.11に示す。

表 F.11—二次系停止中—SG 器内水における測定頻度の考え方

名称	分類			頻度	設定の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目		
pH	—	—	○	保管後適宜	保管初期の測定頻度は、ヒドラジン濃度の低下挙動に応じ、適宜設定する。
ヒドラジン	—	—	○	保管後適宜	保管初期の測定頻度は、ヒドラジン濃度の低下挙動に応じ、適宜設定する。 保管期間が長期となる場合は、保管初期 4 週間は 1 回/週の頻度で確認を行い、保管開始 2 週間以降もヒドラジン濃度低下が継続する場合は、系統隔離の確認、再保管の可否を検討する。
ナトリウム	—	—	○	保管時	保管前の SG 二次側器内清浄度は確保できているため、保管時に、保管水供給源となる二次系純水タンク水の水質が推奨値を満足していることを確認した上で保管を行う。
塩化物イオン	—	—	○	保管時	保管前の SG 二次側器内清浄度は確保できているため、保管時に、保管水供給源となる二次系純水タンク水の水質が推奨値を満足していることを確認した上で保管を行う。
硫酸イオン	—	—	○	保管時	保管前の SG 二次側器内清浄度は確保できているため、保管時に、保管水供給源となる二次系純水タンク水の水質が推奨値を満足していることを確認した上で保管を行う。

F.4.2 二次系統水

二次系停止中のクリーンアップ時の二次系統水における診断項目の測定頻度の考え方を表F.12に示す。
なお、試料採取対象系統は、クリーンアップ時SG給水に際して最終系統となる、脱気器器内水、又は、高圧給水加熱器出口水とする。

表 F.12—二次系停止中のクリーンアップ時の二次系統水における測定頻度の考え方

名称	分類			頻度	設定の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目		
カチオン 電気伝導率	—	—	○	1回	二次系純水タンク水、及び復水脱塩設備が適切に管理、運用されていれば、当該期間のSGへの汚れの持ち込みはほとんどない。また、当該期間は短期間のため、測定頻度は期間中1回とし、SG水張り前に推奨値を満足していることを確認する。
濁度	—	—	○	1回	停止中の保管管理、クリーンアップ時の二次系純水タンク水、及び復水浄化設備が適切に管理、運用されていれば、クリーンアップ時SG水張り前に濁度が大きく上昇することはない。また、当該期間は短期間のため、測定頻度は期間中1回とし、SG水張り前に推奨値を満足していることを確認する。
鉄	—	—	○	1回	停止中の保管管理、クリーンアップ時の二次系純水タンク水、及び復水浄化設備が適切に管理、運用されていれば、クリーンアップ時SG水張り前に鉄濃度が大きく上昇することはない。また、当該期間は短期間のため、測定頻度は期間中1回とし、SG水張り前に推奨値を満足していることを確認する。
溶存酸素	—	—	○	1回	復水器真空が維持（され、脱気器が加熱真空脱気）されていれば、当該期間の高圧給水加熱器出口溶存酸素濃度に変化はない。また、当該期間は短期間のため、測定頻度は期間中1回とし、SG水張り前に推奨値を満足していることを確認する。
ナトリウム	—	—	○	1回	二次系純水タンク水、及び復水脱塩設備が適切に管理、運用されていれば、当該期間SGへナトリウムが持ち込まれる可能性は低いですが、万一、持ち込まれた場合には重大な腐食損傷を発生させる可能性があるため、SG水張り前に1回推奨値を満足していることを確認する。

表 F.12—二次系停止中のクリーンアップ時の二次系統水における測定頻度の考え方（続き）

名称	分類			頻度	設定の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目		
塩化物イオン	—	—	○	1回	二次系純水タンク水、及び復水脱塩設備が適切に管理、運用されていれば、当該期間 SG へ塩化物イオンが持ち込まれる可能性は低い。万一、持ち込まれた場合には重大な腐食損傷を発生させる可能性があるため、SG 水張り前に 1 回推奨値を満足していることを確認する。
鉛	—	—	○	1回	SG 器内への異物の残留を確認するためには SG 水張り前に最小 1 回の測定が良い。国内では鉛持込による SG 伝熱管損傷事例はないため、クリーンアップ時の 1 回の測定とする。

F.4.3 二次系純水タンク水

二次系停止中の二次系純水タンク水における診断項目の測定頻度の考え方を表F.13に示す。

表 F.13—二次系停止中—二次系純水タンク水における測定頻度の考え方

名称	分類			頻度	設定の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目		
電気伝導率	—	—	○	1回/月	二次系純水タンク水の補給源となる補給水処理装置出口水が適切に管理されていれば、管理値を超える可能性は低いため、測定頻度は 1 回/月とする。なお、SG 二次側保管、並びにクリーンアップ開始時に、水質確認を実施する。
ナトリウム	—	—	○	適宜	電気伝導率の変動した場合に原因同定のために確認するため、測定頻度は適宜とする。
塩化物イオン	—	—	○	適宜	電気伝導率の変動した場合に原因同定のために確認するため、測定頻度は適宜とする。
硫酸イオン	—	—	○	適宜	電気伝導率の変動した場合に原因同定のために確認するため、測定頻度は適宜とする。

F.5 運転モードに依らない系統

F.5.1 補給水処理装置出口水

純水処理出口水の管理項目及び診断項目の測定頻度の考え方を表F.14に示す。

表 F.14－補給水処理装置出口水における測定頻度の考え方

名称	分類			頻度	設定の考え方
	管理項目	制御項目	診断項目		
電気伝導率	○	—	—	採水時及び 1回/日 ^{a)}	一・二次系統水補給源となる二次系純水タンク水の原水となるため、純水処理出口水の純度確認は重要であり、Mix Bed Polisher (MBP)採水時に出口水質を確認する。
シリカ	—	—	○	適宜	補給水処理装置の運転状況、汚れの程度の確認を目的とするため、測定頻度は適宜とする。

注^{a)} 補給水処理装置運転時に適用する。

附属書 G (参考) サンプリング方法の例

序文

この附属書は、本体に関連する事柄を説明するものであり、規定の一部ではない。

G.1 サンプリング方法の例

サンプリング方法の例として、二次系統水をサンプリングする場合の設備構成例を図G.1に示す。

試料採取設備の構成材質は、ステンレス鋼とし、適切な冷却器、及び減圧機構を有するものとする。

二次系統水の試料採取位置は、復水、給水、SG、ヒータドレンなど多系統となるため、日常管理の簡便性の観点から、各試料採取位置から試料採取配管を敷設し、タービン建屋内などの一か所に集合させた、集中試料採取設備での試料採取を原則とする。

一方、測定対象が溶解性の低い金属成分の場合、試料採取配管内の温度変化に伴う析出付着、又は、試料採取配管及び弁などへの沈降により、集中試料採取設備での測定値が低く評価されることがある。このため、SGへの最終給水となる高圧給水加熱器出口など、金属成分分析を詳細に実施する必要がある場合には、現場試料採取設備の設置を検討する。

なお、現場試料採取設備の設備構成は集中試料採取設備とほぼ同等であるが、微量金属成分の計測精度向上の観点から、集積試料採取用のフィルターホルダーを設置する場合もある。

二次系統水の水質分析では、微量金属成分、及び微量イオン不純物成分濃度の正確な確認を目的とするため、サンプリングに際し、試料採取配管内流量変動による鉄酸化物などの剥離、配管内へのイオン性不純物の付着、滞留による影響を最小限とするため、試料水は連続通水とし、手分析ラインは、試料を採取しない期間、試料採取設備に設けてある試料水回収管に接続して、系統に回収する（復水回収タンク經由復水器回収）。一方、水質監視計器通水サンプルも基本的には系統回収するが、pH計など測定に化学薬品を使用しているものについては系外排出する。

また、二次系統の主要構成材料由来である鉄酸化物が試料採取配管内に付着、沈降し、金属成分の測定値に影響を及ぼす可能性があるため、定期的に試料採取系統のフラッシングを実施する。

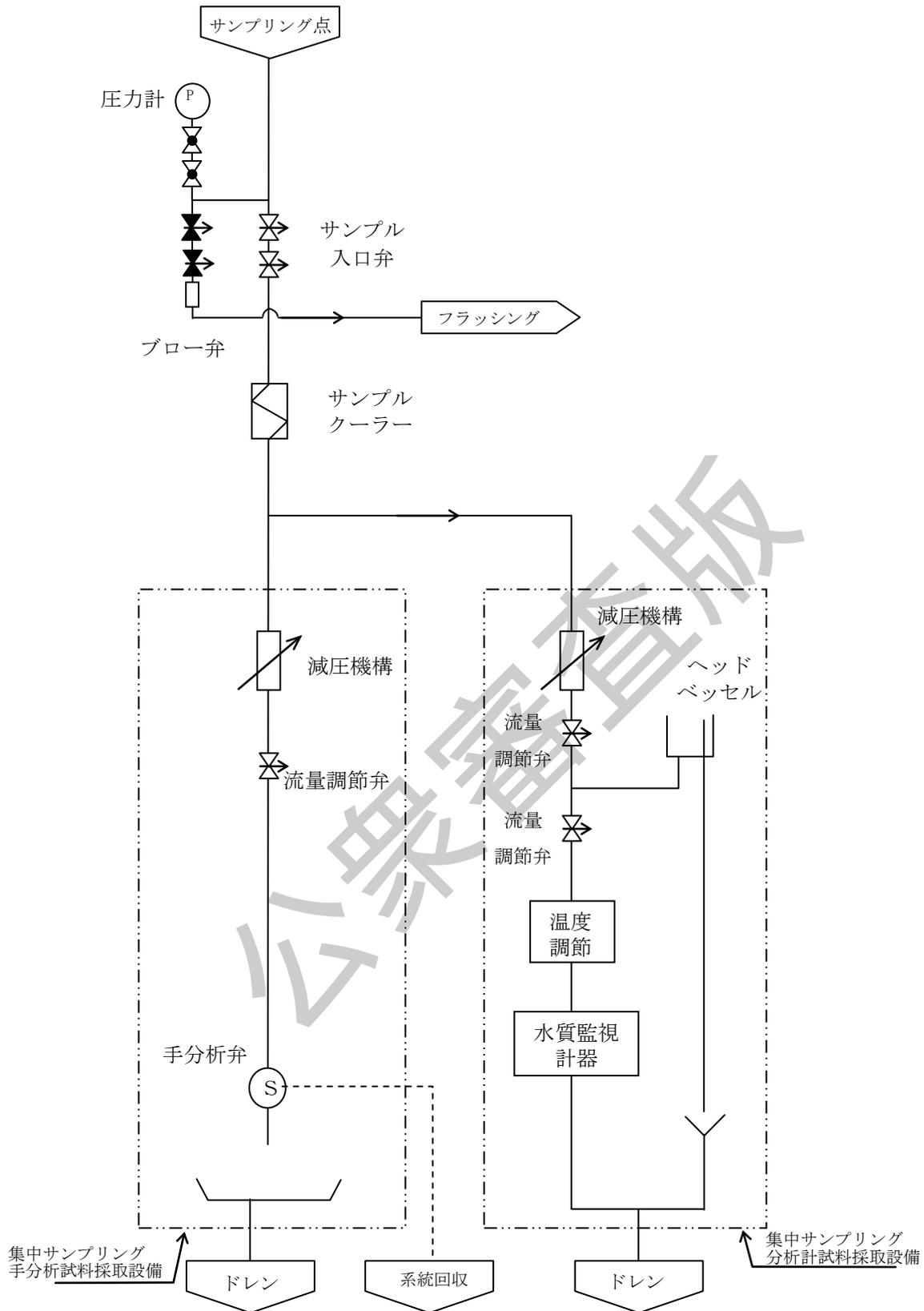


図 G.1—試料採取設備の構成例

附属書 H

(参考)

水質分析方法の例

序文

この附属書は、本体に関連する事柄を説明するものであり、規定の一部ではない。

H.1 水質分析方法の例

二次系統水化学分析方法の一覧を表 H.1 に示す。分析方法は JIS に規定されている。

表 H.1—PWR 二次系統水の化学分析項目と分析方法の概要

分析項目	分析方法
pH(25℃)	JIS B 8224 ボイラの給水及びボイラ水—試験方法(8.1), ガラス電極法
電気伝導率(25℃)	JIS B 8224 ボイラの給水及びボイラ水—試験方法(9.1), 白金黒電極法
カチオン 電気伝導率(25℃)	JIS B 8224 ボイラの給水及びボイラ水—試験方法(9.2), 強酸性陽イオン交換樹脂(水素イオン型)層通過後の電気伝導率
アンモニア	JIS B 8224 ボイラの給水及びボイラ水—試験方法(25.1,25.3), インドフェノール青吸光光度法, イオンクロマトグラフ法
エタノールアミン	JIS K 0127 イオンクロマトグラフィー通則, イオンクロマトグラフ法
ヒドラジン	JIS B 8224 ボイラの給水及びボイラ水—試験方法(24.1,24.2), パラジメチルベンズアルデヒド吸光光度法, よう素滴定法
溶存酸素	JIS B 8224 ボイラの給水及びボイラ水—試験方法(17.1,17.2,17.3), ウインクラーク法, インジゴカルミン比色法, 隔膜電極法
鉄	JIS B 8224 ボイラの給水及びボイラ水—試験方法(32.2,32.3,32.4,32.5,32.6), TPTZ 吸光光度法, フレーム原子吸光法, 電気加熱原子吸光法, ICP 発光分光分析法, 高周波プラズマ質量分析法
全銅	JIS B 8224 ボイラの給水及びボイラ水—試験方法(29.1 備考 5,29.2,29.3,29.4,29.5), ジンコン吸光光度法, フレーム原子吸光法, 電気加熱原子吸光法, ICP 発光分光分析法, 高周波プラズマ質量分析法
鉛	JIS K 0101 工業用水試験方法(56.2,56.4), 電気加熱原子吸光法, ICP 質量分析法
シリカ	JIS B 8224 ボイラの給水及びボイラ水—試験方法(23.1.1), モリブデン青吸光光度法
ナトリウム	JIS B 8224 ボイラの給水及びボイラ水—試験方法(26.2~6), フレーム原子吸光法, 電気加熱原子吸光法, 高周波プラズマ質量分析法, イオン電極法, イオンクロマトグラフ法
塩化物イオン	JIS B 8224 ボイラの給水及びボイラ水—試験方法(19.2,19.5), チオシアン酸水銀(II)吸光光度法, イオンクロマトグラフ法
硫酸イオン	JIS B 8224 ボイラの給水及びボイラ水—試験方法(21.4), イオンクロマトグラフ法
有機体炭素(TOC)	JIS K 0101 工業用水試験方法(20.1), 燃焼酸化-赤外線式 TOC 分析法
濁度	JIS K 0101 工業用水試験方法(9.2,9.4), 透過光濁度, 積分球濁度

附属書 I

(参考)

水質データの評価方法の例

序文

この附属書は、本体に関連する事柄を説明するものであり、規定の一部ではない。

I.1 水質データ評価方法の例

水質データ評価方法の例を図I.1に示す。

水質分析によって採取された水質データは、逐次アクションレベル、過去の水質データとの照合を行い、アクションレベルに達している場合は、速やかに原因推定を行うとともに、適切な回復措置を講じる。

水質がアクションレベル2、あるいは3に達し、回復措置を講じても回復が困難と判断される場合は、プラントシステム信頼性影響評価あるいは出力降下の効果評価を実施する。その結果、アクションレベル2の評価で信頼性に影響がある場合は、出力降下又は停止の措置を検討する。アクションレベル3の評価で出力降下によりアクションレベル3が回復可能であれば、出力を降下して運転を継続し、回復不可の場合はプラントを停止する¹⁾。

また、プラントの信頼性維持及び向上を図る目的から、アクションレベル1を超える兆候段階での検知と水質影響の拡大防止が重要である。このため、水質測定結果が推奨値を達成できない、あるいは安定運転時の値²⁾に対し偏差が大きい場合は、事象を評価し、水質の回復及び改善が必要な場合には、その原因の推定及び回復又は改善措置などを講じる。

注 ¹⁾ 通常運転時に二次系で想定される大きな不純物混入は、復水器細管漏えい、及び復水脱塩設備樹脂の再生不良、又は再生剤の混入である。

復水器細管漏えい発生時の措置は、復水脱塩設備全量通水に移行し、漏えい対象水室隔離（復水器片肺（一部出力降下）運転移行）を行い、対象管施栓処置をすることにより半日程度で水質回復が可能である。

また、復水脱塩設備樹脂の再生不良及び再生剤混入時の措置は、原因となる樹脂塔の採水停止により水質回復は可能である。

なお、再生不良により採水開始時に樹脂塔出口電気伝導率が高い場合は、インターロックにより採水できない設計となっている。

しかしながら、複数の細管破断など、多量の海水成分がSGに持ち込まれる場合には、SG伝熱管損傷が発生し、原子炉一次冷却材が二次系系統水に漏れ出すリスクが高まる。このため、アクションレベル3に至り、回復が見込めない場合にはプラント停止とする処置が適切である。

²⁾ 安定運転時の値とは、各運転モードにおいて、プラントの運転上の異常がなく、これまでの長期にわたる運転経験から得られた日常的な水質の値。プラントごとに値は異なる。

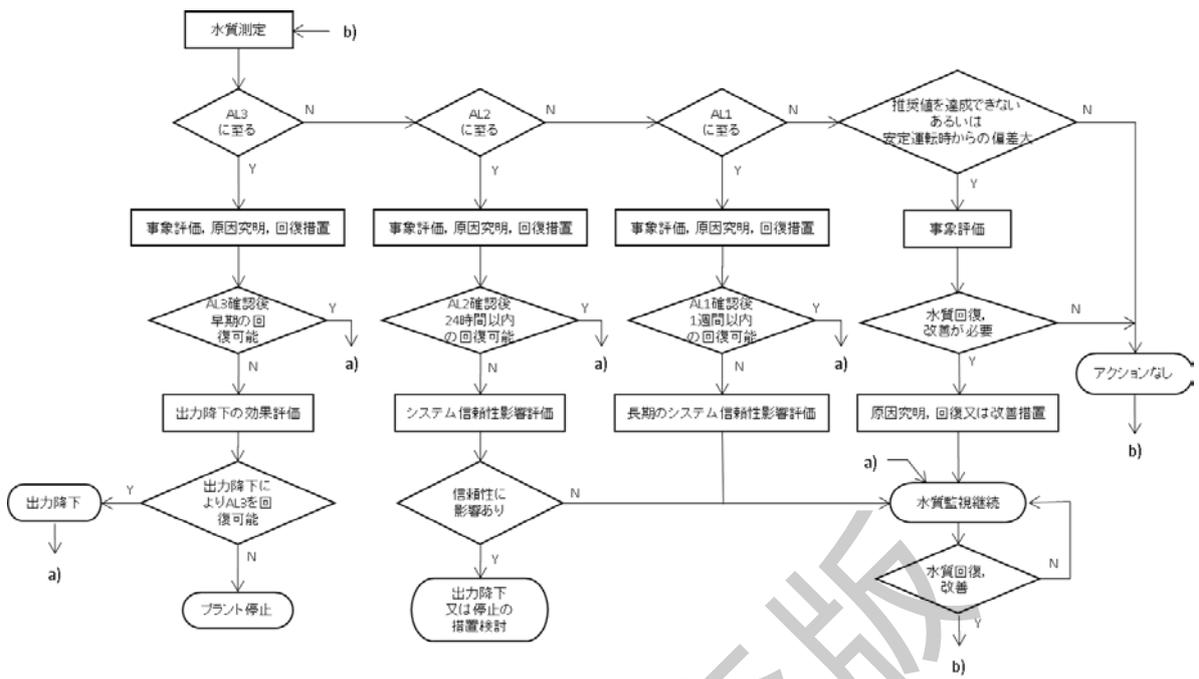


図 I.1—水質データ評価方法の例

AESJ-SC-S0XX:20XX
加圧水型原子炉二次系の水化学管理指針：20XX
解 説

この解説は、本体及び附属書に記載した事柄並びにこれらに関連した事柄を説明するものであり、指針の一部ではない。

1 制定の趣旨

我が国において PWR の二次系水化学管理に用いる指針は、国内外での運転実績及びこれまでの知見などを基に事業者が独自検討し運用しており、標準化したものはない。近年、海外では腐食に関する試験データ及び原子力プラントにおける運転実績をベースとした水化学管理手法をまとめたガイドライン^{(1),(2)}が発行されており、過去の知見の共有とより良い水化学管理の運用が図られている。また、国際原子力機関からは、水化学管理の考え方に係る安全指針が発行されている⁽³⁾。そこで、この指針は現行の PWR で用いる二次系統水の水化学管理の規範となるべく水化学管理方法を日本原子力学会標準として規定することにより、原子力安全の継続的な改善に寄与することを目的としている。

2 制定の経緯

この指針は、標準委員会 システム安全専門部会の下に設けられた水化学管理分科会及びその作業会において原案作成を行い、同専門部会及び同委員会の審議並びに公衆審査を経て制定した。検討経緯を次に示す。

2.1 背景

水化学管理に関しては、2000年に日本原子力学会から原子炉水化学ハンドブックが発行され、水化学の基礎、原子炉材料（構造材料と燃料被覆材料）の腐食、水化学管理などがまとめられている。また、水化学管理指針に先立ち2010年には、PWR 一次冷却材の分析方法（ほう素、溶存水素、放射性よう素）を日本原子力学会標準として発行した。これらは、原子力発電所の水化学管理関係者のみならず多くの技術者などに役立っている。

一方、海外では事業者及びその研究機関によって水化学ガイドラインが制定され、過去の知見の共有とより良い水化学管理の運用を図るために各国の原子力発電所で適用されている。

この様な海外状況を踏まえ、40年を超える運転実績のある日本国内の原子力発電所に対しても、人と環境を放射線リスクから防護するための安全性向上、それに繋がるより良い水化学管理を目指した水化学管理指針の制定が強く望まれていた。

2.2 検討会の設置、検討経緯

水化学管理指針策定のため、2007年に（社）日本原子力学会 標準委員会 発電炉部会（後のシステム安全専門部会）の下に水化学管理分科会、2008年に BWR/PWR 水化学管理指針作業会を設置した。分科会及びその作業会にはメーカー、事業者、学術研究者などの水化学関係者が集ま

り水化学管理指針案の検討を開始した。しかし、冷却水は構造材料及び燃料と接することから、分科会の上位組織であるシステム安全専門部会から、原子力発電所の安全性確保には、水化学関係者のみの検討ではなく、材料・燃料の専門家も加えた検討が必要であるとの指摘があった。このため分科会の指針検討は一時中断し、水化学、材料及び燃料分野の専門家で構成する“システム安全合同タスクグループ”（以下、“合同タスク”という。）を2010年3月に設置し、水化学管理指針策定方針など（水化学管理標準（指針）の位置付け、策定すべき標準の体系的整理、標準策定の優先順位など）の検討を開始した。合同タスクは、検討中に福島第一原子力発電所事故があり一時中断したが、2013年4月にその検討結果をシステム安全専門部会に報告した。

2.3 水化学管理指針案の検討

合同タスクでの検討結果を基に分科会及び作業会では、水化学管理指針案の検討を再開した。この指針では、通常運転を主とし、水化学管理実績、材料・燃料分野の技術・知見、海外の動向などを含む原子力発電所の安全性確保に係る公開の最新知見・技術を反映した管理項目、制御項目、診断項目の定義、アクションレベル1～3の定義、アクションレベル1～3に至った場合の具体的な措置、制御値、推奨値の設定及び測定頻度などを設定した。また、PWRでは、薬品添加などにより適切に水質制御を実施すべき水質項目として新たに“制御項目”を導入した。これら規定の考え方、技術的根拠、国外の指針との差異、国内水化学管理技術に関する今後の戦略などについては、英文の学術論文として取り纏められており、国外の専門家のレビューを受けている⁽⁴⁾。

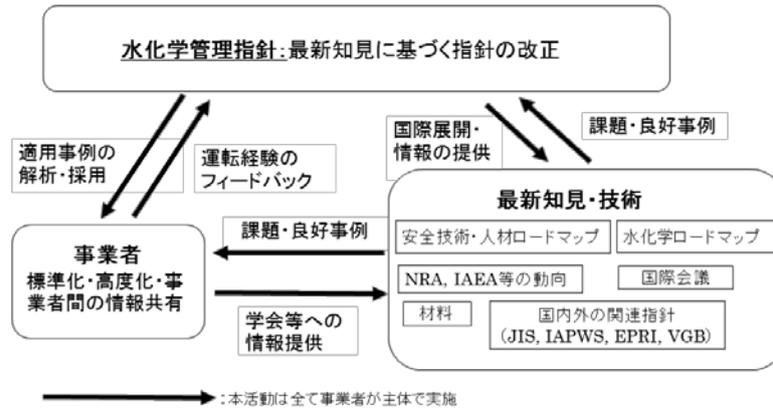
システム安全専門部会及び標準委員会における審議の過程で、さらなる安全性向上に向け、福島第一原子力発電所事故の教訓反映、新知見などを取り入れる継続的な検討などを解説に追加記載した。

3 制定後のフォロー

水化学分野においても自主的安全性向上を取り入れる必要があるため、改良水化学の導入及び耐食性に優れた材料への変更などによって水化学管理方法の設定条件の変更が可能となった場合、又は新たな知見により水化学管理方法の設定条件の変更が必要となった場合には、適宜、アクションレベル、推奨値などの見直しを行う。

さらに、福島第一原子力発電所事故後の安全性向上への取組みについては、“軽水炉安全技術・人材ロードマップ”⁽⁵⁾に取りまとめられている。そのため、当該ロードマップに示された研究開発の成果をこの指針に適宜、適切に取り込み（解説図1参照）、安全性向上を目指す。

プラント構造材料の選定及び交換に際しては、事前に構造材料の健全性への水化学管理の影響を予測することにより、保全活動に留まることなく、リスクの程度を勘案しつつ水化学面からの安全性向上措置を講じ、原子力安全の継続的な改善に寄与することを目指す。



解説図 1—水化学管理指針における PDCA サイクル

4 審議中問題となった事項及び懸案事項

問題となった事項及び懸案事項はなかった。

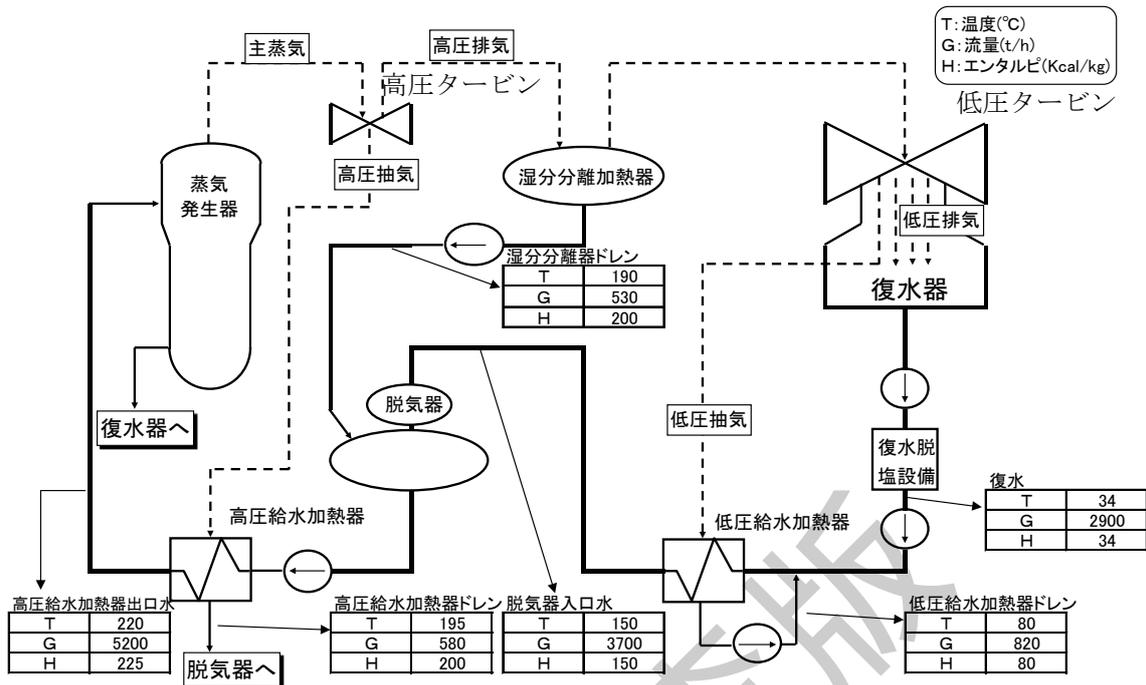
5 PWR システムの概要

PWR 二次系の概略及びヒートバランスの一例を解説図 2 に示す⁶⁾。PWR は大きく一次系と二次系に区別され、PWR 二次系では、SG で一次冷却系（一次系）から熱を受取り、二次系水を蒸発させて、その蒸気でタービン発電機を回転させる。その後、復水器で凝縮した復水は、給水加熱器及び脱気器で順次加熱され、220℃前後の温度で SG に給水される。

SG の型式は、再循環型と貫流型があるが、諸外国では再循環型が多く採用され、国内 PWR では再循環型のみが採用されている。

PWR の二次系の構成は、従来の火力発電プラントの復給水系とほぼ同じであるが、異なる点として次の項目があげられる。

- a) 二次系水の蒸発は伝熱管外面（熱交換器胴側）で生じる。
- b) 発生した蒸気は飽和蒸気であり、高圧排気中の湿分を除去するための湿分分離器及び分離されたドレン（脱気器へ回収）がある。
- c) 高圧蒸気系統の温度及び圧力が低い（PWR：280℃/5.5～6MPa 程度、火力発電プラント（超臨界圧ボイラ）：550℃/25MPa 程度）。
- d) 飽和蒸気タービンであるため、電気出力当りの系統容量・流量が大きい。



解説図 2-PWR (3 ループ) 二次系ヒートバランスの一例

上記に示したとおり、系統構成が従来の火力発電プラントとほぼ同様であるため、二次系の系統構成材料は、SG 伝熱管を除いて火力発電プラントとほぼ同じ考え方で設定されている。

復水器冷却管：チタン、又は銅合金（諸外国ではステンレス鋼使用例あり）

低圧給水加熱器管：ステンレス鋼、又は銅合金

高圧給水加熱器管：ステンレス鋼、又は銅合金

SG 伝熱管：インコネル 690、又は 600 合金（ドイツではインコロイ 800 材）

湿分分離加熱器管：ステンレス鋼、又は銅合金

配管、タンク類：炭素鋼、低合金鋼又はステンレス鋼

一方、従来の火力発電プラントとの根本的な相違点となる SG は、縦型 U 字管式熱交換器で、その伝熱管はステンレス鋼の管支持板に支持されているが、この管支持板と伝熱管の接触部及び管板上スラッジ堆積部には、狭い隙間（以下、“クレビス部”という。）が存在する。

SG の二次系側（以下、“SG 二次側”という。）の温度及び圧力条件は前述のとおり、火力発電プラントの超臨界圧ボイラよりも低く、その点においては水化学管理に必ずしも厳密なものを要求されないが、管外蒸発であることが火力発電プラントに比して厳密な水化学管理を要求される理由となっている。すなわち、管外蒸発面のクレビス部では、熱流動条件が他の部分とは異なることから、水中の不純物が凝縮し、極端な場合には腐食を引起こす環境を形成する可能性があるため、PWR 二次系の水化学管理は超臨界圧プラントよりも厳しいものとしている。

6 水化学管理の考え方

6.1 水化学管理の基本理念

PWR 二次系は、系統構成が火力発電プラントと類似であることから、運転開始初期は火力発電プラントの水処理手法を踏襲し、りん酸塩処理が適用された。しかしながら、PWR の SG 二次側は、他の熱交換器及び火力発電プラントのボイラとは異なり、管外蒸発によって蒸気を発生する構造となっていることから、管支持板/伝熱管接触部あるいは管板上などに存在するクレビス部では、SG 器内水の沸騰、蒸発に起因する乾湿 (Dry & Wet) 交番が生じて二次系統水中の不純物が濃縮し、当該部の環境は系統水よりも非常に厳しい環境条件となり、国内でも伝熱管の減肉、粒界腐食損傷 (IGA : Inter Granular Attack) などの腐食現象が経験されている。

これら腐食を防止又は抑制することを目的として、二次系処理手法は、先のりん酸塩処理からアンモニア (NH_3) 及びヒドラジン (N_2H_4) を用いた全揮発性薬品処理 (AVT: All Volatile Treatment) に切り替えられ、水処理薬品の当該濃縮部への残留をなくすとともに、復水脱塩設備の設置、SG ブローダウン回収設備の設置、補給水処理設備の高度化など系統内への不純物混入防止及び浄化対策を強化し、系統内不純物低減対策を図ってきた。

二次系水化学管理における基本理念を解説図 3 に示すが、水化学管理の基本項目は次の 4 点に集約される。

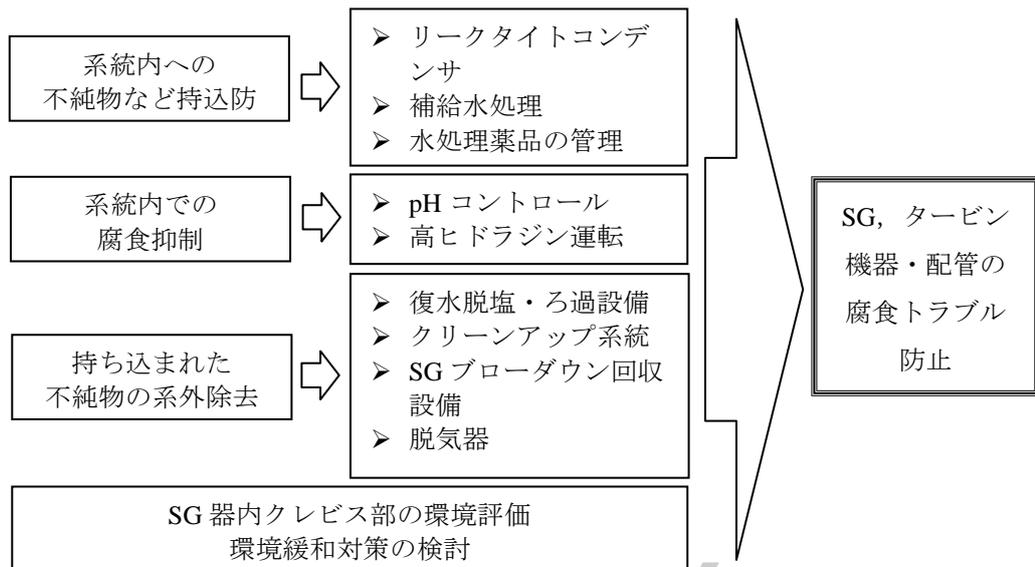
- a) 系統内への不純物及び腐食生成物持込み防止
- b) 系統構成機器の腐食防止及び腐食生成物の SG への持込み防止
- c) 持ち込まれた不純物及び腐食生成物の除去
- d) SG 器内クレビス部の環境評価及び緩和対策検討

基本の第一は、SG のクレビス部、又はタービンでの局所的な濃縮を考慮した、系統内への不純物及び腐食生成物の持込み防止である。具体的には、冷却海水の漏えい及び空気の漏れこみに対する復水器信頼性の向上 (リークタイトコンデンサを使用することで冷却水 (海水) 及び酸素の混入を防止するなど)、復水脱塩設備の活用、補給水処理装置の適切な管理及び水処理薬品 (アンモニア及びヒドラジン) 中の不純物管理、副資材 (防錆剤、パッキンなど有機系材料他) 使用に対する厳密な管理があげられる。

第二は、二次系を構成する機器及び配管などの腐食防止である。これは、各機器自身の健全性維持のみならず、腐食生成物の SG への持込み低減という観点からも重要である。具体的には、アンモニアなどの pH 調整剤による二次系統水の pH コントロール、ヒドラジンによる二次系統水の脱酸素、還元性雰囲気強化があげられる。

第三は、持ち込まれた不純物及び腐食生成物の除去である。具体的には、復水脱塩設備、復水ろ過器の設置と適正運用、クリーンアップ系統、及び SG ブローダウン回収設備の設置と有効利用、脱気器による溶存酸素の除去があげられる。

第四は、SG 器内クレビス部の環境を良好な状態に維持することである。具体的には、SG 器内クレビス部の環境評価を適切に行うとともに、クレビス部環境変動時には環境緩和対策を的確に講じることが重要である。



解説図 3—二次系水化学管理の基本理念

6.2 二次系水化学管理の変遷

国内 PWR における二次系水処理手法の変遷を解説図 4 に示す⁽⁷⁾。

1970 年代初頭から半ばまでの初期 PWR4 プラントにおける二次系水処理手法は、火力発電プラントにおける水処理手法を踏襲するりん酸塩処理を実施した。りん酸塩には緩衝作用があり、不純物の持ち込みには余裕があったことから、不純物低減についてはそれほど重要視されていなかった。しかし、りん酸ナトリウムが SG 器内のクレビス部に局所的に濃縮/残留し、SG 伝熱管の減肉・破損が問題となった。

りん酸塩処理に代わり、1974 年から 1975 年にかけて順次ヒドラジン及びアンモニアに代表される揮発性薬剤を使用した AVT 処理に切り替えられた。AVT への切替えにより、りん酸塩処理で発生していた減肉損傷は抑えることができたが、ヒドラジン及びアンモニアには緩衝作用がなく、遊離アルカリの持ち込みによる SG 伝熱管への IGA の発生が顕在化してきた。このように、系統内へ混入した不純物によるクレビス部環境の悪化を抑制するため、不純物濃度低減の重要度が大きくなった。

不純物持込み抑制の観点から 1980 年代初期から随時復水脱塩設備が追設され、1984 年からは還元性雰囲気強化のために高ヒドラジン運転が採用された。また、IGA の発生が比較的多い一部のプラントでは AVT による影響でアルカリ側へ傾いていたクレビス部環境を中和することを目的としてほう酸注入が実施された。

なお、ほう酸注入を実施したプラントでは、その後 SG の取替えが実施されたことから、1997 年以降は実施されていない。

後述する SG 伝熱管材料の改善とあわせ、こうした水化学管理手法の高度化によって SG 伝熱管の健全性は向上し、IGA といったトラブルは大幅に削減したことから、近年における水化学管理はプラント性能の低下抑制が重要となっている。1997 年からは、抽気系統の流れ加速型腐

7 SG 構成材料健全性に対する水化学の役割

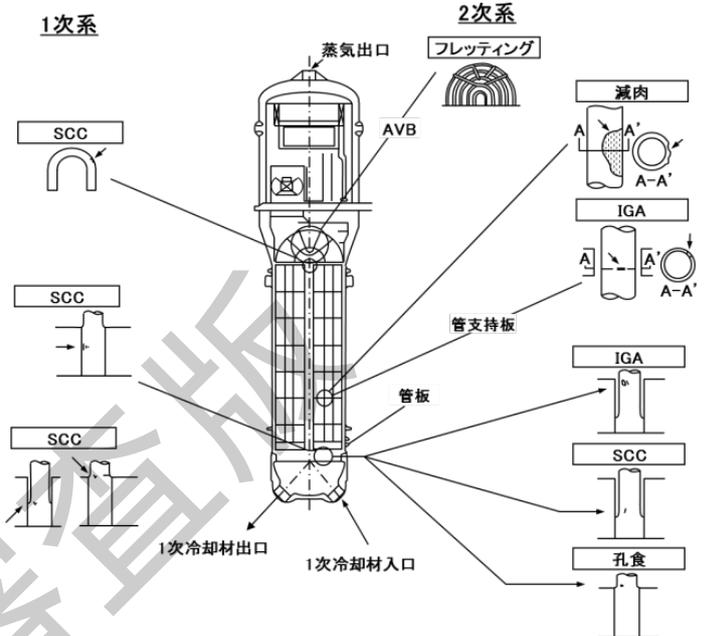
7.1 SG における腐食とその防止

給水中の不純物は SG に持ち込まれるが、SG 器内水の連続的なブローダウンにより、SG 器内の不純物濃度は低濃度に維持されている。しかし、SG 器内には、構造及び熱負荷の観点から濃縮倍率の高い部位が存在し、SG 器内水とは異なった水質環境条件となるため、これに起因する腐食が発生する。

SG では、PWR の運転が開始された 1970 年代始め以来、種々の要因による伝熱管損傷⁽⁸⁾を経験してきた。二次系については解説図 5⁽⁹⁾に示すように、SG 二次側（伝熱管外面側）からの減肉、応力腐食割れ（SCC：Stress Corrosion Cracking）、IGA 及び孔食（ピitting）が国内において経験されている。

一方、国外においては、上記に加え、二次側からのデンティングと呼ばれる、炭素鋼製管支持板の腐食、それともなう腐食生成物の体積膨張による伝熱管の変形が発生⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾したことが報告されている。

主な腐食の概要を次にまとめる。



解説図 5—SG の構造と腐食損傷発生部位

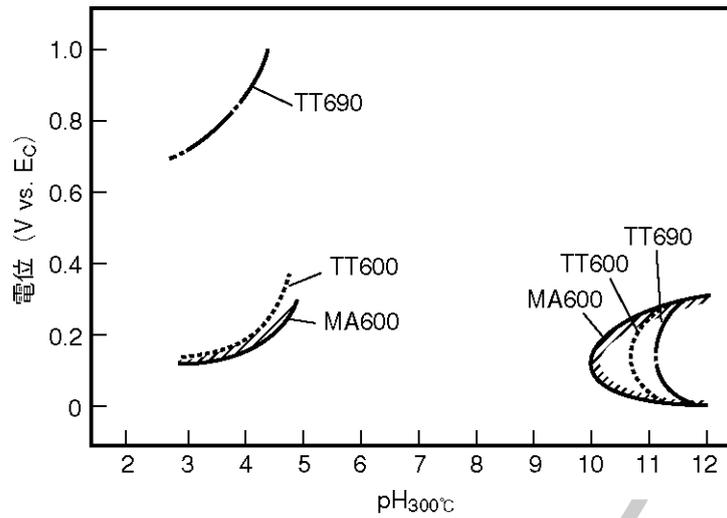
7.2 SG 二次側における腐食

a) IGA （一財）発電設備技術検査協会による“蒸気発生器伝熱管信頼性実証試験”など⁽⁴⁾⁽⁶⁾において実施された、IGA 発生環境に関する研究結果の概要を次に示す。

各種 SG 伝熱管材料の IGA 発生条件を把握することを目的に、種々の環境条件下で低歪引っ張り試験法により IGA 発生条件の検討が行なわれた。試験結果を解説図 6⁽¹¹⁾に示す。

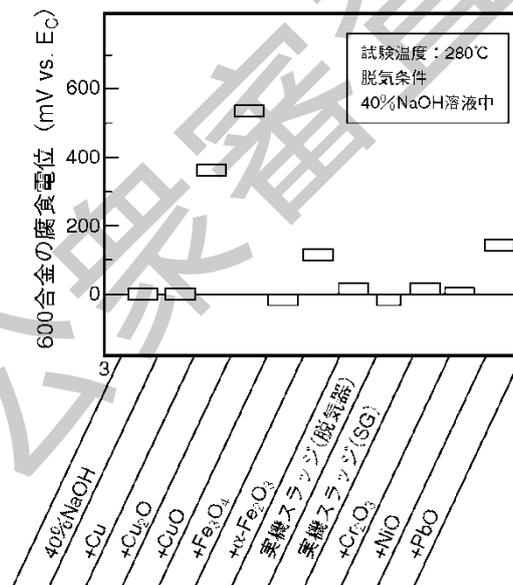
いずれの SG 伝熱管材料とも、高温水中において酸性及びアルカリ性条件で IGA 感受性を示し、酸性条件ではインコネル 600 合金（MA600：MA=Mill Annealed）、TT600 合金（TT=Thermal Treated）が $\text{pH}_{300^\circ\text{C}} 4.5$ 以下、かつ腐食電位（ E_c ）+200mV 以上の電位条件で IGA 感受性を示し、TT690 合金は $E_c+800\text{mV}$ 以上の過不働態領域でのみ感受性が認められた。

アルカリ性環境では、MA600 合金は $\text{pH}_{300^\circ\text{C}} 10$ 以上で、TT600 合金は $\text{pH}_{300^\circ\text{C}} 10.5$ 以上で、TT690 合金は $\text{pH}_{300^\circ\text{C}} 11.3$ 以上で、いずれの SG 伝熱管材料とも活性溶解-不働態遷移領域付近の電位条件で IGA 感受性を示した。



解説図 6—SG 伝熱管材料の IGA 発生環境条件のまとめ

一方、腐食電位については解説図 7⁽¹²⁾に示すように、高温アルカリ溶液中で電位を上昇させる酸化物である CuO, Cu₂O, α-Fe₂O₃, PbO が共存した場合に、損傷電位領域に入る。



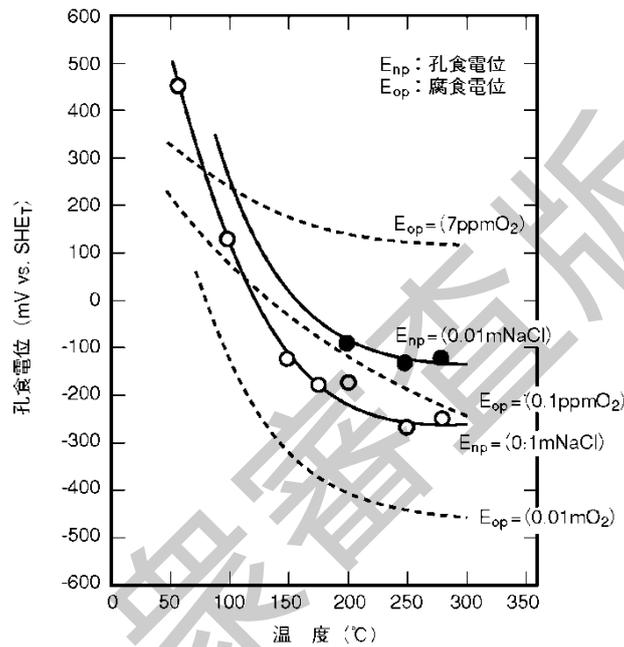
解説図 7—280℃・40%水酸化ナトリウム溶液中の MA600 合金の腐食電位に及ぼす各種酸化物の影響

b) ピットイング ピットイングは、国内 PWR での発生事例は極めて少ないが、重要な腐食形態の一つである。この腐食現象は塩化物イオンと酸化剤の共存によるもので、二次系統の還元対策強化により、発生は防止されている。

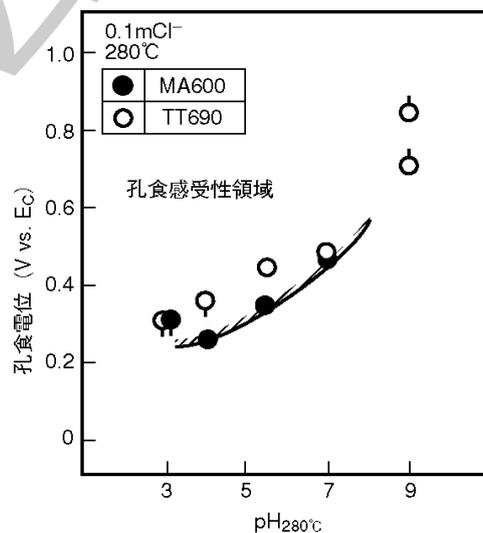
ピットイングの形態は一般的に間口が広くて浅い形状をとり、発生部位は管板上のスラッジ堆積部が主である。

ピitting発生に対する孔食電位の温度依存性を調査した結果⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾を解説図8に示す。この結果は溶存酸素が低く環境が還元性の状態にあると、塩化物イオンのみではピittingは発生しないことを示しており、ピittingが発生するには溶存酸素あるいは、解説図7に示した、電位を上昇させる酸化物、特に電位を大きく上昇させる銅酸化物 (CuO , Cu_2O) の存在が必要である。

また、MA600合金、TT690合金の孔食電位のpH依存性を調べた結果を解説図9⁽¹⁰⁾に示す。ピittingの発生はアルカリ側ほど生じにくいことが示されており、SG伝熱管材料間で耐孔食性に関し大差は認められない。



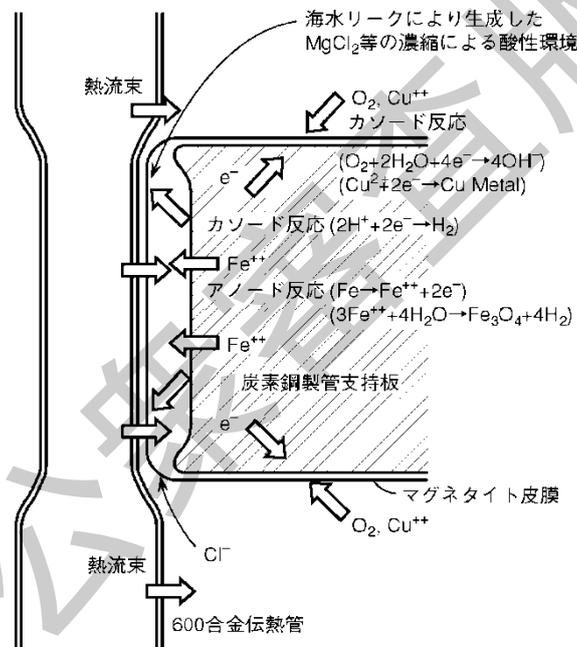
解説図8—ピitting発生に関するMA600合金の孔食電位の温度と塩化物イオン濃度依存性



解説図9—MA600及びTT690合金の孔食電位(E_c)比較とpH依存性

c) **デンティング** デンティングは、炭素鋼製管支持板の腐食と、それにもなう腐食生成物の体積膨張により伝熱管が変形⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹⁶⁾する現象である。デンティングは国内プラントでの発生事例は軽微で、かつ少ないが、国外 PWR で発生事例があり、**解説図 10**⁽¹¹⁾に示すような発生メカニズムによる。復水脱塩設備のないプラントでは復水器のリークなどにより塩分が SG 管支持板のクレビス部に濃縮し、ここで酸性塩化物環境を形成すると、管支持板の炭素鋼が腐食し生成した鉄酸化物は体積膨張するので伝熱管を圧迫し、さらには変形を生じさせる。この際、溶存酸素、酸化性の酸化物などの酸化剤があるとデンティングを加速する。

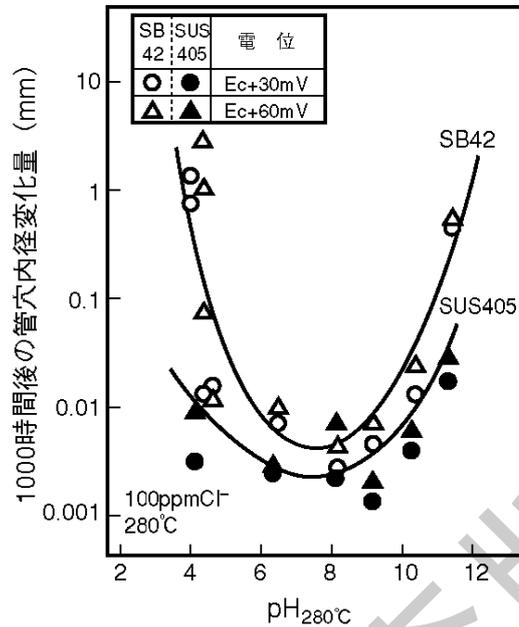
デンティング防止に対する環境面からの対策は、塩分の混入防止、還元性雰囲気との維持となる。一方、材料面からの対策として管支持板の材料を炭素鋼から耐食性の高いフェライト系ステンレス鋼の SUS405 に変更することにより、**解説図 11**⁽¹⁷⁾に示すとおり、腐食による管穴内径の変化量は酸性、アルカリ側とも炭素鋼 (SB42) の 1/2~1/10 倍となり、後述するクレビス部の濃縮倍率の低い BEC 型管支持板構造への変更と相まって、本現象に対する裕度は格段に向上している。



解説図 10—デンティング発生メカニズムの一例

最近の海外損傷事例によれば、最新プラントの SG で管板直上部にデンティングが確認されている。デンティングは Cold Leg 側に発生し、ハードスラッジの蓄積と相関が認められるが、水質、スラッジ組成との相関が調査されているものの、原因は不明である。ただし、TT690 伝熱管プラントでは SCC に進展した事例は報告されていない。

国内との相違点として、伝熱管配列 (国外 PWR では伝熱面積増加のため三角配列)、スケール組成の違い (国内 PWR では鉄が主成分であるが、国外 PWR ではアルミ、シリカなどが多い) があげられる。



解説図 11—管支持板間穴内径変化量に及ぼす pH 及び材料の影響

d) **減肉** 減肉は、初期の PWR で二次系水処理手法としてりん酸塩処理が行なわれた際、伝熱管と管支持板間のクレビス部に濃縮したりん酸塩により、伝熱管が腐食、減肉した事象である。二次系水処理手法が AVT に切替えられた以降、伝熱管の減肉による障害は発生していない。

7.3 SG 伝熱管の腐食防止

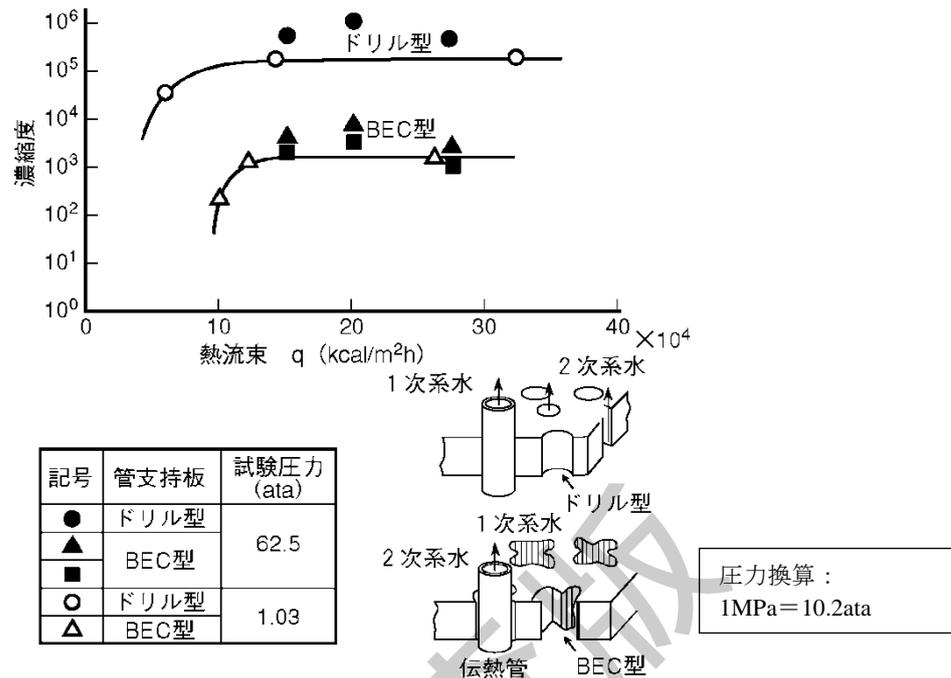
7.3.1 IGA の抑制

1980~90 年代において、PWR 二次系では、SG 伝熱管の IGA 抑制、防止が最重要課題となっていた。国内外で経験された IGA は SG 二次側クレビス部への遊離アルカリの濃縮に基づく強アルカリ環境の生成が主原因であり、水化学管理面、材料面から種々の対策がとられた。

7.3.1.1 材料面からの対策

材料、構造面からの対策として、管支持板管穴形状の変更によるクレビス部の濃縮度の低減及び SG 伝熱管材料改善による耐 IGA 性の向上が図られた。

SG 二次側クレビス部内では、沸騰に伴う乾湿交番により局部濃縮が生じ、この濃縮度はクレビス部形状に大きく依存するため、SG 伝熱管の信頼性向上の一施策として、濃縮度の小さな管支持板管穴形状の選定があげられる。解説図 12 に、管支持板管穴形状と濃縮度の関係⁽¹⁰⁾を示す。従来のドリル型（丸穴）と比較して四葉状穴（BEC : Broached Egg Crate）型管支持板の改善効果を調べた結果は、実機圧、大気圧のいずれの条件とも、従来のドリル型では高熱流束条件下では約 $10^5 \sim 10^6$ 倍の濃縮度となるのに対し、BEC 型では約 10^3 倍であり、100 倍以上の濃縮度低減効果が認められている。



解説図 12—管支持板クレビス部の熱流束と濃縮度の関係

一方、SG 伝熱管材料の改善については、初期 SG 伝熱管材料として、ニッケル基合金である MA600 を使用していたが、一次系冷却材側（管内面側）からの応力腐食割れ（PWSCC：Primary Water SCC）が多く発生したため、U ベンド部の割れ感受性緩和を目的として特殊熱処理を施した TT600 合金が適用された。その後、材料中のクロム（Cr）含有率を増加した（ニッケル含有率は減少）TT690 合金が使用されるようになり、伝熱管の PWSCC、IGA 感受性は大幅に改善された。

BEC 型管穴形状は高浜 3 号機（昭和 57 年営業運転開始）以降の新設プラント及び取り替え SG には全て採用されており、TT690 伝熱管は大飯 3 号機（平成 3 年営業運転開始）以降の新設プラント及び取り替え SG に採用されている。

7.3.1.2 水化学管理面からの対応

7.3.1.2.1 遊離アルカリの持ち込み防止

IGA の発生要因は主に SG への遊離アルカリの持ち込みであると考えられていたため、遊離アルカリ持ち込み防止対策として、復水脱塩設備出口水、SG 器内水のナトリウム/塩化物イオンのモル比（以下 Na/Cl モル比）管理が実施されてきた。また、系外からの不純物持ち込み対策として、新設、既設プラントともに建設、定期点検工事時には清浄度管理が実施されており、溶接管理（遊離アルカリを含むアーク溶接を可能な限り排除し、TIG（Tungsten Inert Gas）溶接、又は MAG（Metal Active Gas）溶接を用いる。）、遊離アルカリを含まない副資材の使用、開放機器の洗浄などが徹底して行われている。補給水についても、設備の高度化により出口水質の管理を厳しくするとともに、MBP（Mix Bed Polisher）出口水管理に Na/Cl モル比管理を適用し、遊離アルカリの系外からの持ち込みが排除されている。

なお、Na/Cl モル比管理については、後述のとおり最近のプラントの水質ではナトリウム及び塩化物イオンが必ずしも主成分とはなっていないこと及び最近の知見から SG 器内水中の各不純物のクレビス部への濃縮挙動が異なり、SG 器内水の組成とクレビス部の液組成が 1 対 1 の相関を有していないことから、SG 器内水質管理ではクレビス部環境を評価することができないため SG 器内水の水管理指標を見直す必要性が生じてきた。

7.3.1.2.2 清浄度管理

プラント建設時及び改造工事施工時においては、製作・据付け時に使用した副資材、溶接残留物に起因する不純物の残留により、SG 二次側構成材料の腐食損傷が起こる可能性がある。これを防止するためには、製作・据付け時の不純物持ち込みを可能な限り低減することが必要であり、このために清浄度管理を徹底して実施している。

- a) **清浄度管理範囲** 管理対象範囲は、二次系統水、蒸気に接触する可能性のある設備。
- b) **清浄度管理対象元素** 清浄度管理対象元素は、アルカリ性、酸性環境を形成する可能性がある元素及び SG 伝熱管保護皮膜に悪影響を及ぼす可能性がある下記の元素である。

[管理対象元素] ナトリウム、カリウム、塩化物イオン、ふっ化物イオン、硫酸イオン、銅、鉛、水銀

c) 清浄度管理対象

- ・溶接施工法

SG 伝熱管損傷の原因となる主要な管理対象不純物は、被覆アーク溶接時に発生するため、管理対象不純物を発生しない TIG、MAG 化を推進するとともに、被覆アーク溶接箇所の周辺に残存する不純物を極力除去する。

- ・副資材及びパッキン材、ガスケット材の管理

防錆剤、洗浄剤、潤滑剤、シール材、探傷検査剤、マーキング剤などの副資材及びパッキン材、ガスケット材については、管理対象元素について使用前に確実に確認を行い、使用に際し管理する。また、代替材料がなく使用しなければならない場合は、洗浄（機器単体での洗浄、プラント起動前のクリーンアップ、低負荷時ドレン処理）により残留不純物を除去する。

- d) **工事施工後の内面清浄度の確保** 工場製作時において適切な洗浄、清掃処置（酸洗、グリッドブラスト、ジェット洗浄など）を施すとともに、現地据付け時においても、適切な洗浄・清掃処置（ジェット洗浄など）を施し、内面清浄度の向上を図る。

また、洗浄後にスミヤ法による内面清浄度確認を行うこともある。

7.3.1.2.3 ほう酸注入

ほう酸注入はクレビス部のアルカリ環境中和手法としてほう酸の効果を期待したものであり、IGA 損傷の顕在化したプラントに対して実施されてきた。ほう酸添加方法としては、プラント起動前の高濃度ほう酸浸漬及び定常運転時の連続注入（SG 器内水ほう酸濃度 5～10ppm）が実施されてきたが、ほう酸注入を実施したプラントはその後全て SG が取り替えられ、現在国内のプラントでほう酸注入を行っているプラントは無い。

7.3.1.2.4 酸化剤持ち込み防止

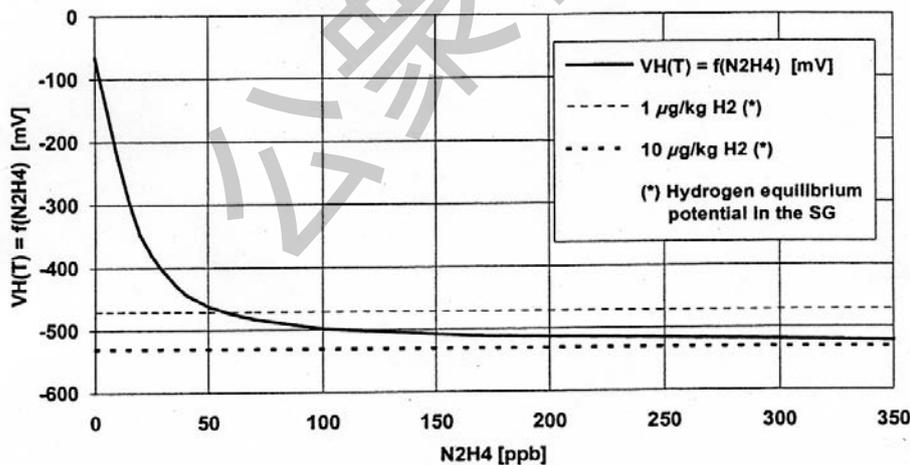
SG 伝熱管の IGA は、伝熱管の電位が腐食電位から上昇した領域で発生することが確認されており、電位上昇には銅酸化物などの酸化剤が関与する。溶存酸素を除去し二次系の還元性雰囲気強化するため及び二次系内で生成した酸化剤を還元し SG への酸化剤持ち込みを防止するため、給水ヒドラジン濃度を 0.2~0.6ppm で運用する高ヒドラジン運転が適用された。

一方、給水ヒドラジン濃度の上昇は、復水脱塩設備など浄化設備入口イオン負荷の増加、SG 器内付着スケールの還元溶解によるスケールちゅう密化促進による SG 伝熱性能の低下につながる可能性が示唆され、通常運転時の給水ヒドラジン濃度適正化の検討が行われた。

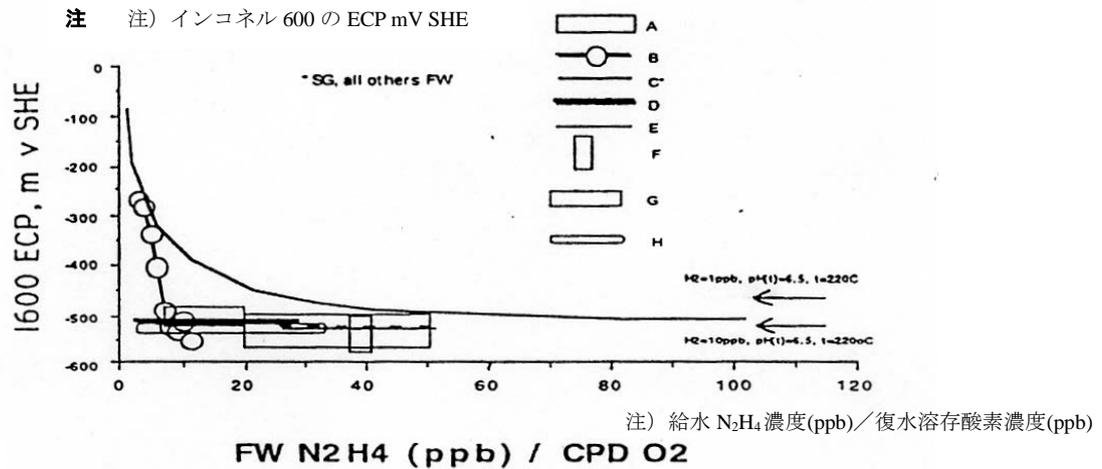
二次系の還元性雰囲気の維持に必要な給水ヒドラジン濃度を評価する手法として、給水中懸濁物に含まれるヘマタイト($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)含有率に着目し、給水ヒドラジン濃度に対する関係を整理した結果、**解説図 13**⁽¹⁸⁾に示すとおり、給水ヒドラジン濃度 50~100 $\mu\text{g/L}$ 以上で、給水懸濁物中ヘマタイト含有率に変化がなく、二次系の還元性雰囲気が維持できる。

また、給水ヒドラジン濃度と復水溶存酸素濃度比に対するニッケル基合金材 (MA600 合金) の腐食電位の挙動を**解説図 14**⁽¹⁹⁾に示す。**解説図 14** から、給水ヒドラジン濃度と復水溶存酸素濃度比が 20~40 以下となると、ニッケル基合金の腐食電位が上昇する傾向を示し、国内 PWR 通常運転時の復水溶存酸素が 1~2 $\mu\text{g/L}$ (ppb) であることを考慮すると、ニッケル基合金材の腐食電位を上昇させないために必要な給水ヒドラジン濃度は、40~80 $\mu\text{g/L}$ 程度となる。

これら評価結果に基づき、国内 PWR 通常運転時の給水ヒドラジン濃度管理値として 50 $\mu\text{g/L}$ を設定し、実機の運用実績は 100~200 $\mu\text{g/L}$ となっている。



解説図 13—給水中のヒドラジン濃度がインコロイ 800 の腐食電位に及ぼす影響



解説図 14—給水 ECP 測定結果と[給水 N₂H₄濃度 (ppb) / 復水溶存酸素濃度 (ppb)]の相関

なお、現在脱酸素剤として広く適用されているヒドラジンはがん原性が報告され、取扱い上の危険性が指摘されており、1997年に制定されたPRTR法（環境汚染物質排出移動登録の略で、有害物質移動量の届出制度）により管理対象物質として使用状況の公開が義務付けられているほか、将来的には使用制限がかかる可能性がある。このため、国内外でヒドラジンの代替薬剤の検討が行われてきている。

ヒドラジン代替材として、カルボヒドラジド（CHZ）、ジエチルヒドロキシアミン（DEHA）による実機プラント試運用が行われるようになってきている。CHZは二次系統内での昇温に伴ってヒドラジンを生成するため、プラント運転中高温部では従来と同様の脱酸素、還元効果が期待できるが、低温部、特にプラント停止中の機器保管に対して効果がないとされている。

一方、DEHAはベルギーのDoel-2で試運用が行われ、ヒドラジンと同等の脱酸素性能を確認したが、DEHAの分解によって生成した有機酸によって、SG器内水カチオン電気伝導率の上昇、pH低下及び電位上昇などの影響が確認され、今後運用に対する影響評価を実施する必要がある。また、機器保管効果については確認されていない⁽²⁰⁾。

7.3.2 ピッチングの抑制 ピッチングは、塩化物イオンと酸化剤の共存により発生する腐食であり、SG伝熱管材料の違いが影響しないことから、その対応策は塩化物イオン及び酸化剤の持ち込み防止となる。

塩化物イオンの主な持ち込み源は、復水器冷却水である海水成分の漏えい及び復水脱塩設備再生剤である塩酸である。このため、海水漏えい対策として、復水器冷却管のアルミブラスからタンへの材料改善によるリークタイト化及び復水全量処理型の復水脱塩設備の設置による復水脱塩設備下流側への海水成分の混入防止があげられる。

復水脱塩設備からの塩化物イオン持ち込み防止対策としては、復水脱塩設備出口水質は樹脂再

生時の塩化物イオン型樹脂 (R-Cl) 量に依存することから、復水脱塩設備樹脂再生工程における樹脂分離の徹底、中間樹脂抜き取り再生法の適用などによる、アニオン樹脂逆再生の防止があげられる。また、再生剤持ち込みの防止については通水前洗浄工程の徹底などがあげられる。

一方、酸化剤の持ち込み防止対策としては、前項の IGA と同様に還元性雰囲気強化対策があげられる。

7.4 SG クレビス部環境評価技術の開発

7.4.1 従来のクレビス部環境評価技術

従来からプラント運転中のクレビス部環境評価、管理手法として、**a)**プラント停止時のハイドラウトリターン (HOR) 評価、**b)**SG 器内水 Na/Cl モル比管理を行ってきた。

国内 PWR 通常運転時の典型的な SG 器内水質及び停止時の HOR 量及び HOR 量から評価したクレビス部 pH_{300℃} 評価結果を解説表 1、解説図 15 及び解説図 16 に示す⁽²¹⁾。

これより、通常運転中の SG 器内水不純物は低く良好に管理されており、その結果として、停止時の HOR 量は少なく、HOR 量から評価したクレビス部 pH_{300℃} は、5~7 とほぼ中性から弱アルカリ環境となっており、クレビス部環境は良好であると評価してきた。しかしながら、HOR 結果に基づくクレビス部環境評価については、プラント停止後となり、運転中の評価が行えないこと、また、HOR はクレビス部からのみ生じると仮定していることから、クレビス部の他の寄与が不明確であるという問題点がある。

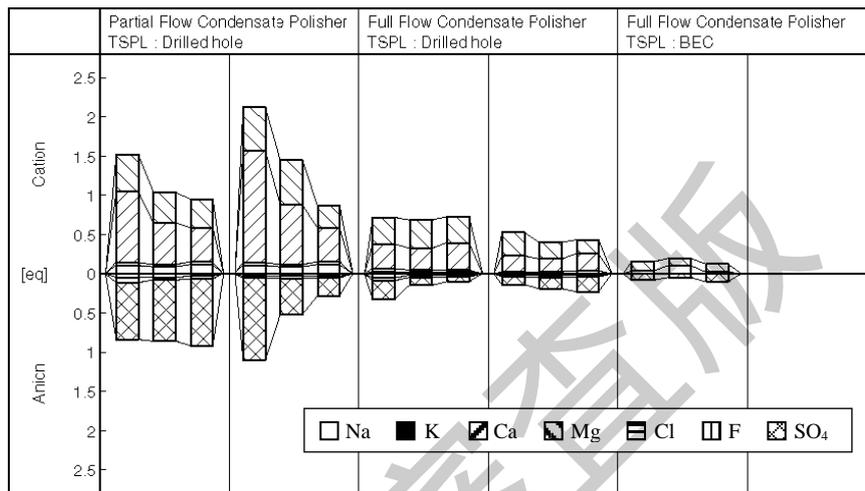
一方、SG への遊離アルカリ持ち込み対策として、従来から SG 器内水の Na/Cl モル比管理 (Na/Cl<0.7) を実施してきた。Na/Cl モル比管理は過剰の塩化物イオンを存在させることにより、遊離アルカリを存在しなくすることをベースとした管理であり、二次系統における不純物の主成分がナトリウムと塩化物イオンであり、復水脱塩設備出口水質によって規定されるということを基本とした水化学管理手法である⁽²²⁾。

しかしながら、復水脱塩設備再生方法の改善(分離再生方式の導入など)、清浄度管理の実施などによりナトリウム、塩化物イオンが大幅に低減され、二次系統における不純物としてナトリウム及び塩化物イオンが必ずしも主成分ではなくなってきた(カリウム、カルシウム、マグネシウム、硫酸イオンなどそれ以外の不純物と同等レベルまで低くなった)こと及び最近のクレビス部濃縮試験結果によれば不純物の成分ごとにクレビス部への濃縮挙動は異なり、SG 器内水とクレビス部の化学組成は同等でないことが明らかとなり、SG クレビス部環境をより適切に評価していくためには新たな評価手法の導入が必要となってきた。

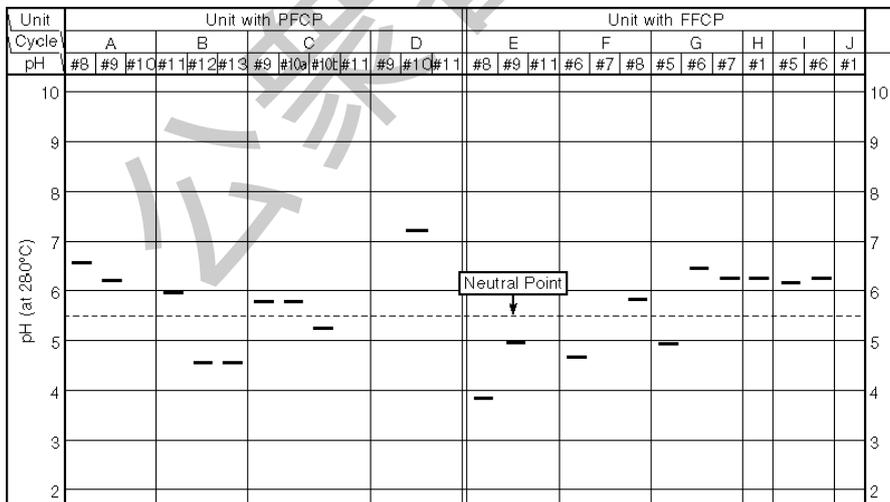
解説表 1—SG 器内水不純物濃度の一例

化学種 (不純物成分)	濃度 (μg/L)
Na	0.02~0.1
K	0.02~0.1

Ca	0.01~0.1
Mg	0.01~0.1
Cl	0.1~0.5
SO ₄	0.2~0.5
SiO ₂	3~5



解説図 15—国内 PWR 停止時 HOR 評価の一例



解説図 16— HOR に基づくクレビス環境評価の一例

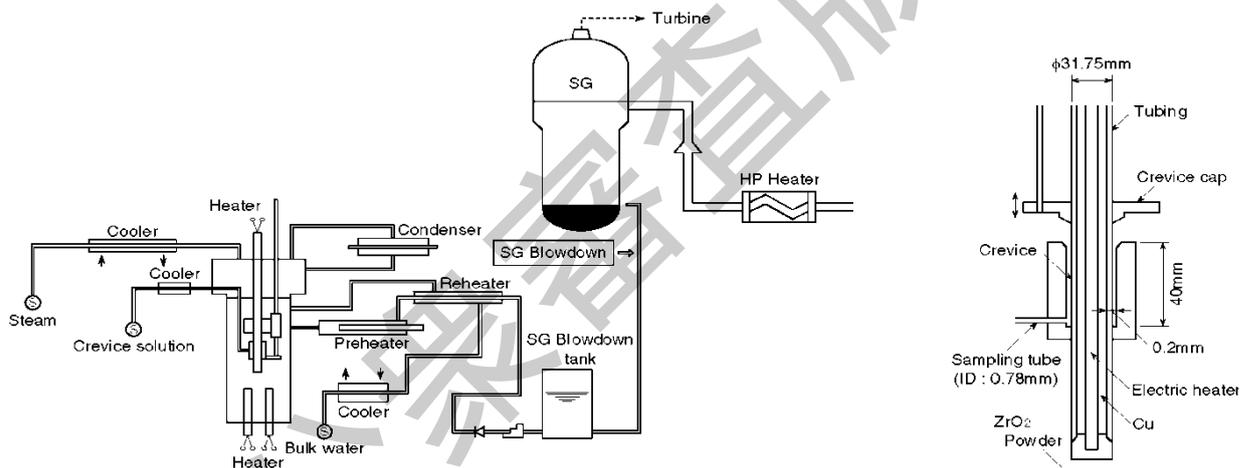
7.4.2 新たなクレビス部環境推定，管理技術

クレビス部環境を管理し，環境緩和策を検討する上で，SG クレビス部化学環境を適時，かつより正確に評価していくことが重要である。このため，管理技術の改善手法として，クレビスモ

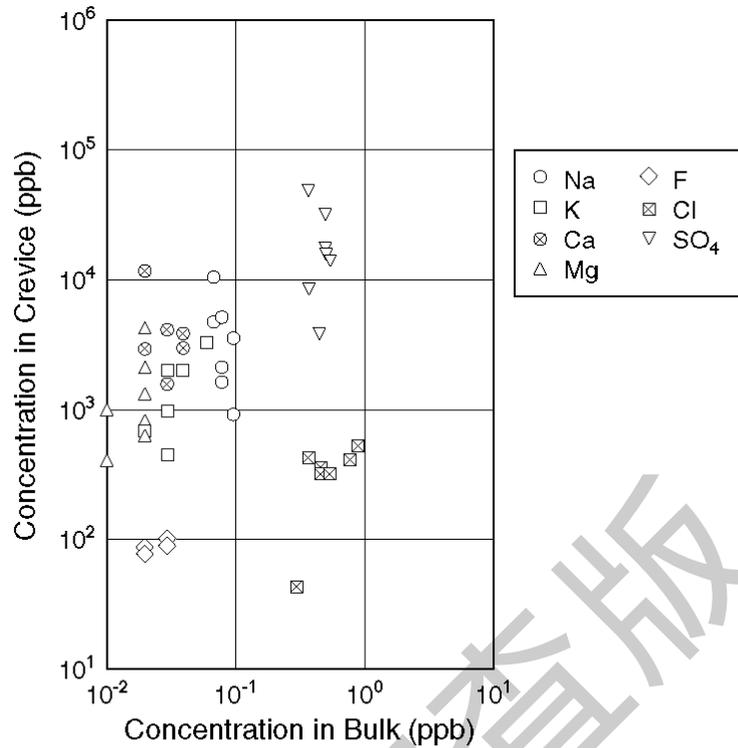
ニタリングシステム及びSG器内水水質からクレビス部環境を評価する計算コードの開発を推進してきた。それぞれの管理技術の概要を下記に示す。

a) クレビスモニタリングシステム クレビスモニタリングシステムの概要を**解説図 17**に示す⁽²³⁾。クレビスモニタリングシステムは、オートクレーブ内に設置した模擬クレビス部に、実機SGブローダウン水を導入し、Dry & Wet環境を再現させたクレビス部模擬部に、ある一定時間SG器内水を濃縮し、その濃縮液を実際に取り出してクレビス部環境を評価するものである。実機での測定結果の一例を**解説図 18**⁽²⁴⁾に示す。各不純物のクレビス部濃縮液とSG器内水の濃度比は、ナトリウム、カリウム、カルシウム、マグネシウム及び硫酸イオンは 10^5 倍程度であるのに対し、塩化物イオン及びふっ化物イオンは 10^3 倍程度と、化学成分ごとにクレビス部への濃縮挙動は異なり、その結果としてクレビス部内とSG器内水の化学組成は異なることを示している。

なお、本システムで得られたクレビス部濃縮液組成に対し、高温平衡計算を行うことによりクレビス部 $\text{pH}_{300^\circ\text{C}}$ を評価することが可能である。



解説図 17—クレビスモニタリングシステム系統概念図



解説図 18—クレビスモニタリング試験結果の一例

b) クレビス濃縮計算コード クレビス部濃縮計算 モデルの概念及び計算のフローチャートを解説図 19 に、各不純物のマスバランス計算モデルを下記に示す⁽²³⁾。

$$\rho V \frac{dC_i}{dt} = C_{bi}m_i - \sum D_{vj}C_i\alpha_{ji}m_o - C_i(m_i - m_o) \dots(1)$$

ここで V : クレビス部容積

ρ : 密度

t : 時間

C_i : クレビス部内濃度(i 成分)

C_{bi} : 器内水中濃度(i 成分)

m_i : クレビス部への流入水量

m_o : クレビス部からの蒸気発生量

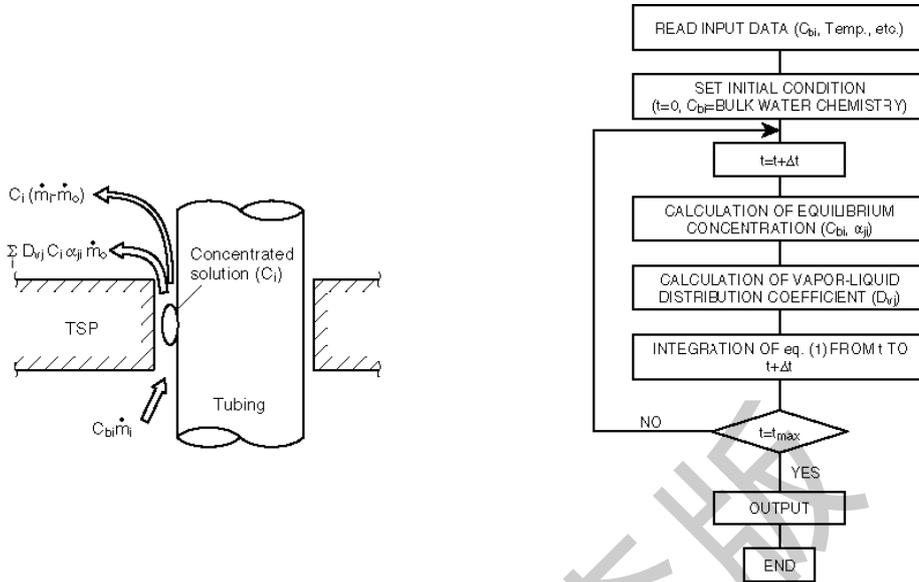
D_{vj} : 気液分配係数(j 化合物)

α_{ji} : j 化合物の I 成分中モル比

本計算コードにおいて、各不純物成分の気液分配係数が濃縮計算過程において重要な因子となっている。

本計算コードはクレビス部濃縮組成を算出した後、その組成に対して高温での平衡計算を行い、

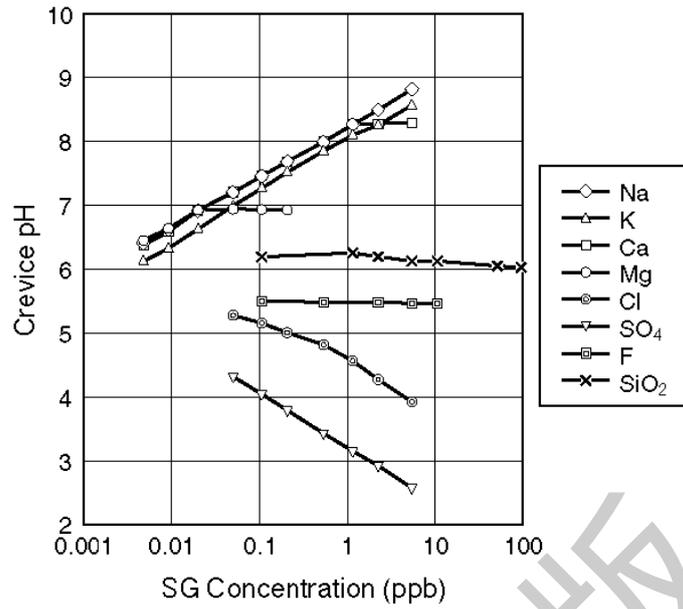
クレビス部 $\text{pH}_{300\text{C}}$ を算出している。



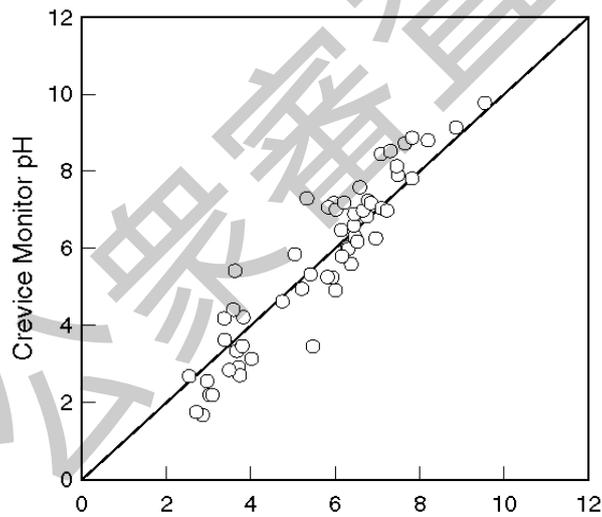
解説図 19—計算モデル及び計算フロー

本計算コードを用いて、あるベースとなる SG 器内水不純物濃度に対し各不純物成分を単独で増加させた場合の評価結果を解説図 20 に示す⁽¹⁹⁾。これより、クレビス部環境に対しアルカリ側に寄与が大きい成分はナトリウム及びカリウムであり、酸性側に寄与が大きい成分は硫酸イオンであることが解る。

なお、本計算コードの妥当性の検証は、クレビス部 $\text{pH}_{300\text{C}}$ 計算結果を先のクレビスモニタリング試験クレビス部濃縮液 $\text{pH}_{300\text{C}}$ の結果と対比することによって行っている。解説図 21 に計算コードとクレビスモニタリング試験結果に基づくクレビス部 $\text{pH}_{300\text{C}}$ 評価結果を対比して示す⁽²⁵⁾。両者は非常に良い相関を示しており、このことは、クレビス濃縮計算コードが実機クレビス部を模擬した濃縮環境を適切に再現できていることを示しており、実機 SG クレビス部環境をタイムリーに評価していくことが可能である。



解説図 20—各不純物がクレビス pH_{300°C}に及ぼす影響

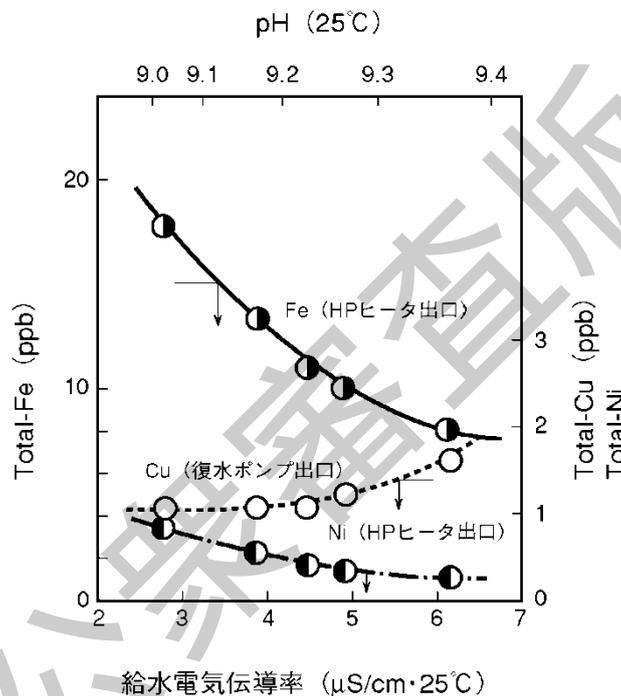


解説図 21—濃縮計算コードとクレビスモニタ濃縮液 pH_{300°C}の比較

8 構造材料の長期健全性に対する水化学の役割

二次系機器は炭素鋼などの鉄系材料, 熱交換器伝熱管に一部用いられている銅系材料から構成されている。構造材料の長期健全性確保のためには, これら構成材料の腐食を極力低減することが必要であり, この腐食低減が SG の長期健全性確保につながる。

鉄系材料からの鉄の溶出抑制については解説図 22⁽²⁶⁾に示すとおり, 二次系統水の $\text{pH}_{25^\circ\text{C}}$ を極力高く維持することが有効であるが, 銅系材料は $\text{pH}_{25^\circ\text{C}}$ が高くなるほど溶出量が多くなる傾向を示すため, 鉄系材料と銅系材料が共存するプラントでは, 双方からの溶出を極力小さくする適正な $\text{pH}_{25^\circ\text{C}}$ を選択することが重要である。鉄及び銅の溶出抑制並びに二次系機器へのスケール付着抑制に対する基本的な考え方を次に示す。



解説図 22—給水 $\text{pH}_{25^\circ\text{C}}$ (電気伝導率) と系統鉄, 銅及びニッケルの挙動

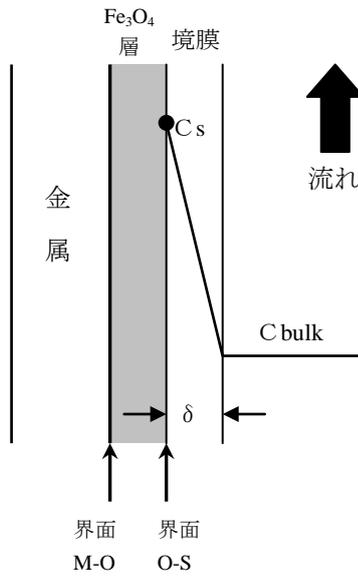
8.1 鉄の溶出抑制

二次系機器からの主な鉄溶出メカニズムとして FAC があげられる。二次系統内での溶出モデルの概念図を解説図 23 に示す。

系統内の高温領域では材料表面から溶出した鉄イオン種 (Fe^{2+} , $\text{Fe}(\text{OH})_2$) が速やかにマグネタイト (Fe_3O_4) に形態変化する。

低流速環境では, 材料表面の酸化鉄スケール上境界膜の溶液内に鉄イオンが飽和することとなり, さらに Fe_3O_4 結晶が付着することとなる。

一方, 高流速環境では, 鉄イオン種が流れにより連続的に持ち去られ, Fe_3O_4 の還元溶解が進行 (その系で平衡になろうとする) することとなり, 低流速部位に比較して減肉が加速される。



解説図 23-FAC モデルの概念図

実機の FAC が発生している材料表面には通常 $1\mu\text{m}$ 以下の薄い緻密な Fe_3O_4 層の存在が確認されていることから、母材からの鉄イオンの溶出、溶出した鉄イオンからの Fe_3O_4 の生成と、 Fe_3O_4 の還元溶解が連続して生じ、 $1\mu\text{m}$ 以下の薄い Fe_3O_4 被膜が常に表面上でバランスした状態にあり、一定の速い速度で腐食が進行しているものと考えられる。

FAC 速度が溶解したイオンの境膜内の拡散によって律速されると考えると、反応速度は式(2)で与えられる。

$$m = k(C_S - C_{\text{bulk}}) \dots \dots (2)$$

ここで

m : FAC 速度

C_S : Fe_3O_4 の各環境条件下での飽和溶解度

C_{bulk} : 二次系統水器内での鉄イオン濃度 一般には $C_S \gg C_{\text{bulk}}$ で $C_{\text{bulk}} \approx 0$ と近似でき

る

k : 物質移動係数(= D/δ)

D : 境膜内鉄イオンの拡散係数

δ : 境膜厚さ

また、乱流域での物質移動係数として式(3)が提案されている。

$$k = 0.0296u(\nu/D)^{-2/3} \cdot \text{Re}^{-0.2} \dots \dots (3)$$

ここで

Re : ud/ν

u : 流速

ν : 動粘性係数(= μ/ρ)

D : 拡散係数

μ : 粘性係数

ρ : 密度

FAC 速度が(2)式で決定される場合、その速度は下記の因子により決定される。

$$k=f(\text{流れ, 温度など}) \cdots \cdots (4)$$

$$C_s=f(\text{pH}_{25^\circ\text{C}}, \text{温度, 形成される酸化物種, 材料, 溶存酸素濃度など}) \cdots \cdots (5)$$

ここで、上記(4)式で流れの寄与を材料表面から鉄イオンを連続的に持ち去る速さのみと考え、流速は材料表面からの鉄の溶出(反応)速度に寄与することになり、表面被膜などとの平衡関係でどれだけの鉄が溶け出し得るかは Fe_3O_4 の溶解度の関数となる。 Fe_3O_4 の溶解度については、二次系統内の同一系統に限定して考えた場合、(3-4)式中の温度、材料、溶存酸素濃度は同一となり、FAC 速度は $\text{pH}_{25^\circ\text{C}}$ の関数となる。

FAC 速度と $\text{pH}_{25^\circ\text{C}}$ 、材料中 Cr 含有率、温度及び流速との関係を解説図 24～解説図 27 に示す⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾。

これより、FAC 速度は当該系統の $\text{pH}_{25^\circ\text{C}}$ の上昇及び材料の改善によって大幅に低減され、流速の増加によって加速されること、また、 $150\sim 180^\circ\text{C}$ 付近で最大となることを示している。

このことから、二次系機器からの鉄の溶出を抑制し、SG への鉄持込を減少するためには、二次系統水の $\text{pH}_{25^\circ\text{C}}$ を十分な鉄溶出抑制効果が期待できる範囲に維持することが重要であり、また、系統温度が FAC 速度の最大となる $150\sim 180^\circ\text{C}$ 付近となる系統、又は、材料表面の流速が速くなる部位、例えば曲がり配管部、抽気系統などには材料中の Cr 含有率を高めた低合金鋼、ステンレス鋼などの鉄溶出抑制材料を用いることが有効な対策となる。

一方、FAC 速度に対する溶存酸素濃度の影響を解説図 28 に示す⁽²⁹⁾。これより、FAC 速度は溶存酸素濃度に影響され、溶存酸素濃度が高くなると減少する。これは、炭素鋼表面に溶解度が小さい 3 価の鉄酸化物であるヘマタイト(Fe_2O_3)が生成され安定な環境となるためである。FAC 抑制を目的として、系統の溶存酸素濃度を適度に高めることは有効となるが、SG 伝熱管健全性確保の観点からは酸化性雰囲気形成は防止すべきであり、慎重な対応が必要である。

前述のとおり、二次系配管、機器の FAC 速度は pH、溶存酸素濃度、材料中 Cr 含有率、温度、及び流速によって変化するが、温度、及び流速はプラント機能上変更できず、材料中 Cr 含有率増加は材料改善対応となる。このため、FAC 抑制に対する水化学管理面からの対応としては、pH を上昇させること、溶存酸素濃度を適切な範囲に管理することが有効となるが、溶存酸素濃度の増加は、SG 伝熱管材料健全性確保の観点から、SG への酸素並びに銅酸化物などの酸化剤の持ち込み防止が重要であり、慎重に対応することが必要である。このため、全プラントに対して直ちに適用ができ、有効な手法は pH の上昇(適正な範囲での管理)となる。

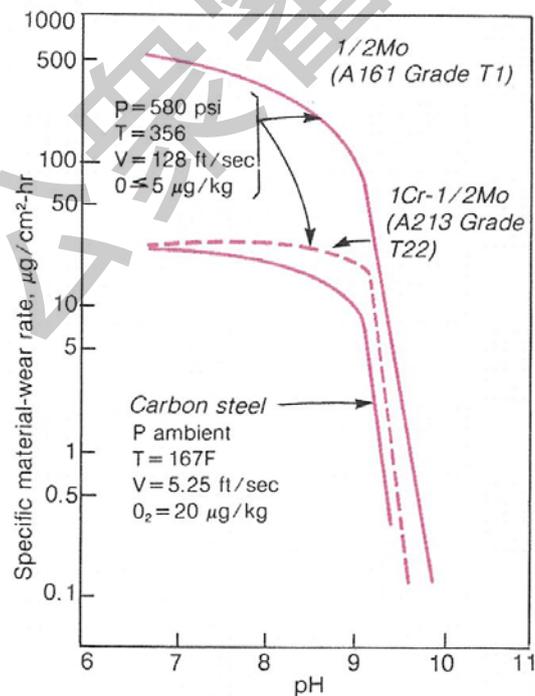
本指針に従って、系統構成材料、系統構成に応じて、極力高い pH に維持することにより、FAC 速度を低減することが可能であり、日本機械学会規格発電用設備規格 配管減肉管理に関する規格(2016年版)(JSME E CA1-2016)においても、FAC に関する参考資料 1 に“2.3.2 水化学因子の影響”が記載されており、給水の pH を 9.2 付近から 10 近辺までに高める運用と、その運

用の結果、減肉速度が50%程度低下した事例が記載されている。

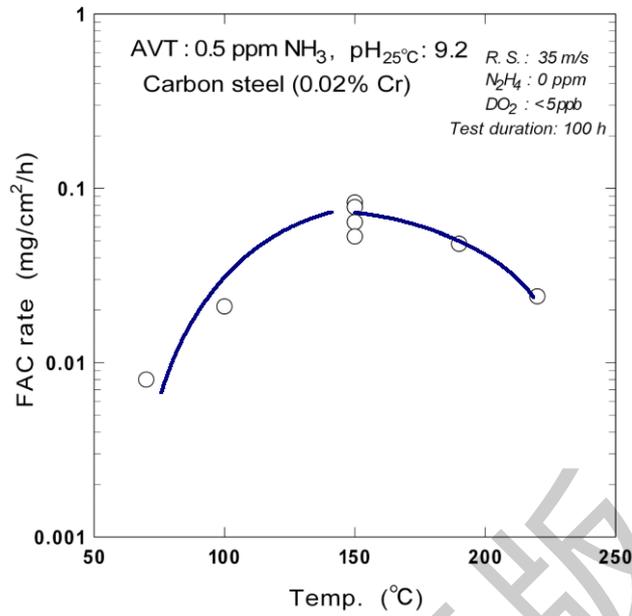
しかしながら、発電用原子力設備規格 加圧水型原子力発電所 配管減肉管理に関する技術規格（2016年版）（JSME S NG1-2016）のA総則 A-1000 目的に関連して、[解説 A-1000 目的]（厚さ測定による配管減肉管理）においては、“流体流れによる配管減肉事象の管理手法としては、厚さ測定による管理の他に、材料変更などの設計管理、pH調整及び酸素注入などの水質管理があるが、現状、PWRでは厚さ測定による管理を軸に配管減肉事象を管理していることから、本規格では厚さ測定による管理の方法を規定する。”とあり、現状の日本機械学会規格には、水質管理による環境緩和効果は含まれていない。

本指針の水化学管理に基づいてプラント管理を行うことにより、FACによる配管減肉速度が緩和されることから、今後、事業者は水化学管理の高度化を実践した高pH処理適用プラントなどの減肉速度低減実績データを蓄積し、環境緩和によるFAC抑制効果の定量化を行っていくことが望まれる。

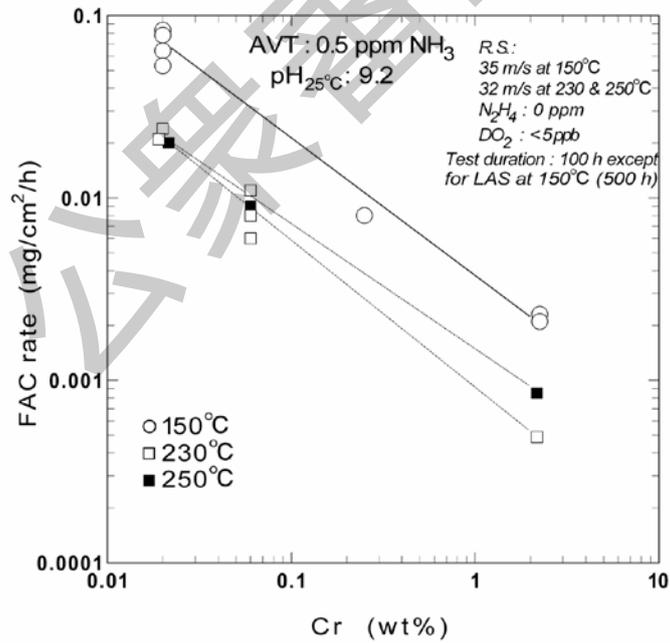
このような水化学管理改善によるFAC抑制データに基づき、日本原子力学会は必要に応じて本指針のアクションレベル、制御値、推奨値の見直しを行うとともに、日本機械学会と積極的な意見交換、情報共有を行い、日本機械学会規格で定められている配管減肉検査頻度、並びに配管取替頻度等、配管減肉管理の最適化に取り組むことにより、より一層の安全性向上を目指す。



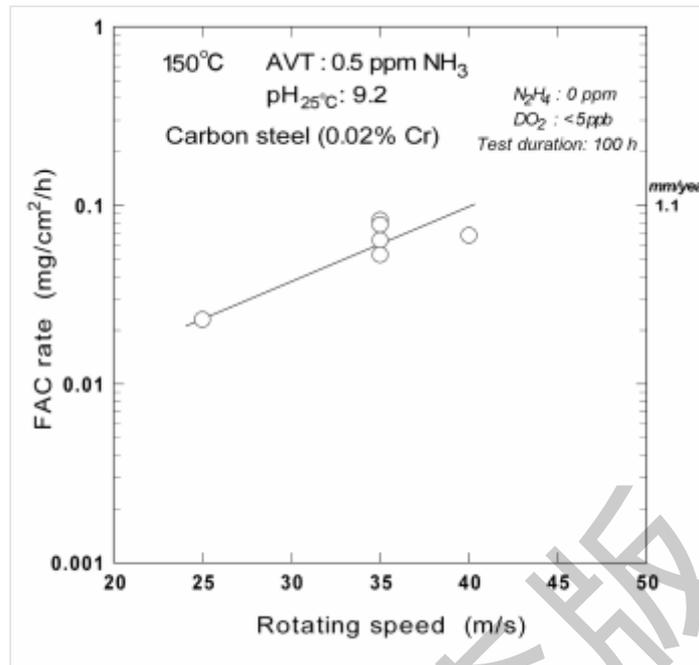
解説図 24—炭素鋼及び低合金鋼 FAC 速度と $\text{pH}_{40^\circ\text{C}}$ の関係の一例



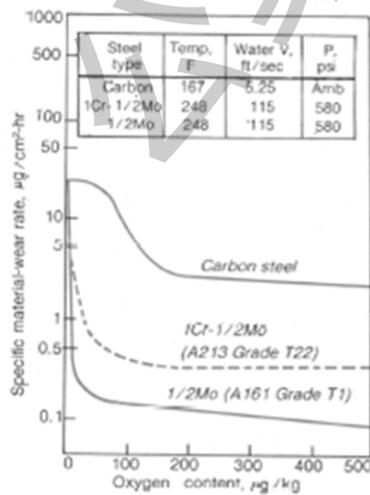
解説図 25—炭素鋼の FAC 速度と温度の関係の一例



解説図 26—FAC 速度と材料中 Cr 含有率の関係の一例



解説図 27—炭素鋼の FAC 速度と流速の関係の一例



【試験条件】

(炭素鋼)

- 温度：75°C
- pH_{25°C}：7
- 溶存酸素：0~500 µg/L
- 流速：1.6 m/s

(0.5%Mo 鋼・1Cr-0.5Mo 鋼)

- 温度：120°C
- pH_{25°C}：7
- 溶存酸素：0~500µg/L
- 流速：35 m/s

解説図 28—炭素鋼の FAC 速度に及ぼす溶存酸素濃度の関係

8.2 銅の溶出抑制

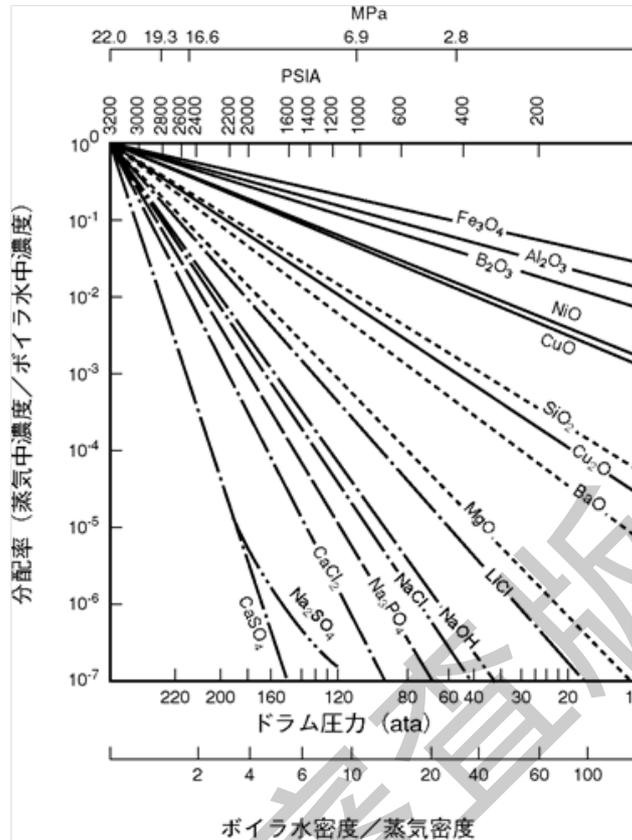
前述のとおり、二次系統の復水器冷却管、給水加熱器管及び湿分分離加熱器管には、従来から伝熱性能向上の観点から、アルミブラス管、キュプロニッケル管などの銅系材料が使用されてきた。銅系材料からの銅の溶出は**解説図 22**に示すとおり、 $\text{pH}_{25\text{C}}$ が上昇すると増加傾向を示し、酸素の共存が律速条件となるため、系統への酸素の持込を極力防止することが重要である。このため、銅系材料の溶出を極力防止するためには、系統 pH を適切な範囲に管理するとともに、系統内に持ち込まれた酸素を除去する、又は生成された酸化物を還元し金属とするため、ヒドラジンなどの脱酸素剤、還元剤の濃度を適正に維持することが重要である。

一方、先述のとおり、炭素鋼など鉄系材料の FAC を抑制するためには、系統の $\text{pH}_{25\text{C}}$ を 9.8~10 程度まで上昇させることが有効であるため、熱交換器管材料を銅系からチタン、ステンレスに変更することが検討、推進されている。

8.3 蒸気純度の管理

主蒸気系統における腐食は、湿り蒸気環境下での腐食であり、原子力タービンの使用蒸気温度における腐食現象は、SCC、腐食疲労及び FAC である。SCC と腐食疲労の主要因は、蒸気中に含まれる塩化物イオン、硫酸イオンなどの不純物がタービン部材の隙間部などの凝縮水に溶存、濃縮することによるものと考えられており、これら腐食現象は低圧タービンの乾き蒸気から湿り蒸気への境界付近で発生することが多い。

解説図 29 に、蒸気圧力と金属酸化物、塩類の気液分配率の関係を示す⁽²⁸⁾。これより、PWR 二次系の蒸気条件である 5.4~5.9MPa 程度の圧力条件下では、蒸気側への不純物類の分配は非常に小さいことから、SG 器内水不純物濃度を適切に管理することにより、タービン構成材料の健全性に影響はないものと考えている。



解説図 29—ボイラ水中の金属酸化物，塩類の気液分配率

9 スケール付着抑制に対する水化学の役割

PWR 二次系で発生した鉄（鉄イオン，鉄酸化物）は，SG 器内及び高压系統の機器（例えば給水ポンプ）に付着し，プラント性能に影響を及ぼす。

プラント長期安定運転継続の観点から，二次系機器からの鉄の溶出を抑制し，SG 器内，高压系統へのスケール付着を抑制することが水化学の重要な役割の一つとなる。

スケールの付着・成長には流動条件，温度，系統材料，給水の処理手法（水処理剤，pH）が複雑に絡み合った事象であり，正確な予測及び解析は難しいが，下記に現状得られている知見及び対応策の一例をまとめる。

9.1 二次系におけるスケール付着影響

a) SG 二次側スケール付着 プラント運転期間の長期化に伴い，系統各部で生成された腐食生成物（主として鉄酸化物）が SG へ持ち込まれ，SG 二次側器内で伝熱管などにスケールとして付着し，伝熱管に付着した場合，伝熱管の熱抵抗となり，スケールの成長とともに伝熱性能の低下につながる。また，BEC 型管支持板の管穴に付着した場合，BEC 管穴を閉塞し SG 水位振動の発生リスクを高める。

SG の経年的な性能を確認するパラメータとして，SG 汚れ係数があり，国内代表プラントに

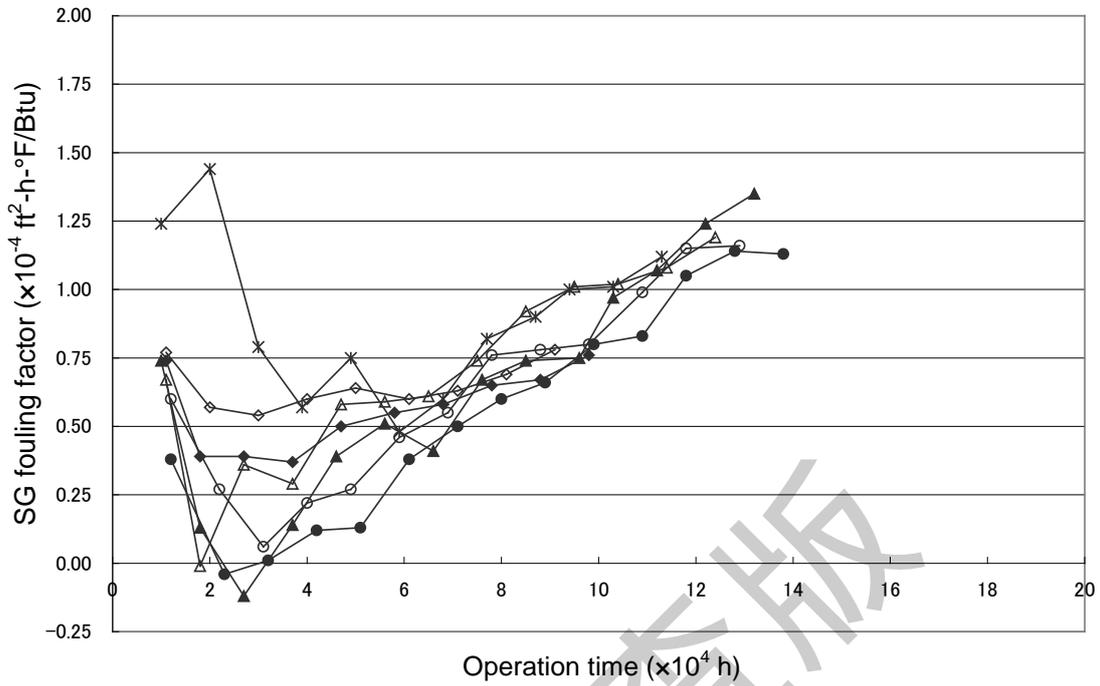
における SG 汚れ係数の推移と、スケール付着挙動の関係を**解説図 30**に示す⁽⁷⁾。

プラント運転初期の段階においては、汚れ係数は低下傾向を示す。これは、平滑な SG 伝熱管表面に粗密層スケールが形成することにより、管外表面積は増加することにより沸騰核が形成され、伝熱性能は増加するためである。その後運転時間の長期化に伴いスケールが成長すると、スケール下層にちゅう密なスケールが形成され、ちゅう密層の増加によって伝熱管の伝熱抵抗となり、SG 伝熱性能は低下し、汚れ係数は増加傾向を示す。

b) 二次系機器 SG 以外の二次系機器では、一例として、給水ポンプへのスケール付着が挙げられる。給水ポンプのインペラへのスケール付着に伴い**解説図 31**に示すようなポンプ駆動力の増加影響が生じる⁽²⁹⁾。ポンプ駆動蒸気量は全蒸気量の約 1%程度あり、その増加はプラントの発電機出力に影響する。

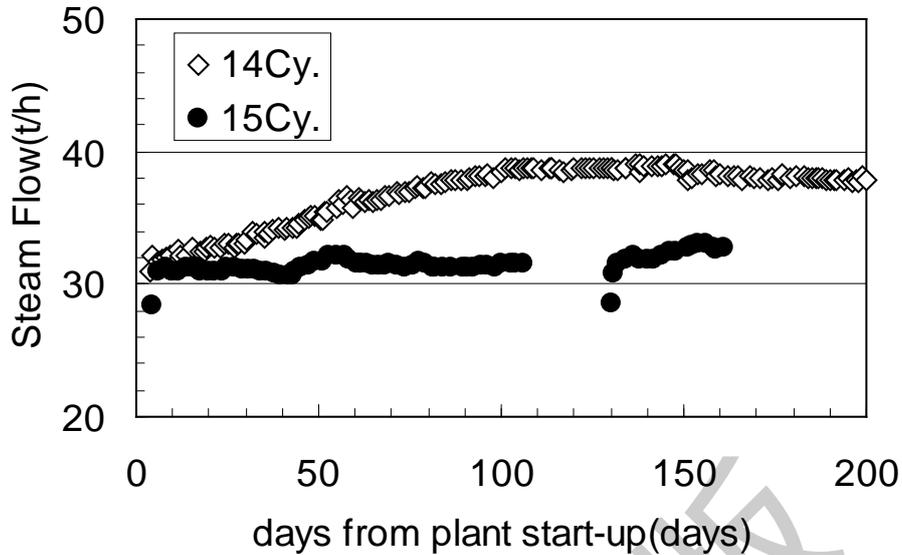
なお、**解説図 31**は敦賀 2 号機実績であるが、二次系の水処理手法は第 14 サイクルが AVT、第 15 サイクルが高 pH 処理であり、高 pH 処理適用による水質改善効果(給水ポンプ駆動蒸気量の増加抑制)が認められている。

給水ポンプ以外では、高圧給水加熱器伝熱管内面へのスケール付着による出入口差圧の上昇、給水流量計へのスケール付着による流量計指示値変動、各種ポンプストレナ差圧上昇などの事象が経験されている。



	1	2	3	4	5
Adhesion behavior of scales					
Structure of scales	-	coarse layer	coarse layer and dense layer (growing dense layer)		
Heat-transfer performance	-		Max.		
SG tube fouling factor	-		Min.		
	Larger surface area with scale adhesion to the SG tubes makes heat transfer performance higher.			Heat transfer resistance with dense layer growth makes heat transfer performance impaired. (Rf growth)	

解説図 30—国内 PWR における SG 汚れ係数の増加挙動とスケール付着挙動の推定



解説図 31—給水ポンプ駆動蒸気量増加挙動の一例

9.2 二次系スケール付着メカニズム

9.2.1 スケール付着メカニズム

二次系におけるスケール付着事象は、流動条件、材料、温度、pH、ヒドラジン濃度などが複雑に絡み合った事象であり、事象の解釈及び予測が困難である。

鉄酸化物の機器表面への付着は、両者の間に何らかの力 (driving force) が働いていることを示しており、SG 伝熱管へのスケール付着メカニズムについては、実験室で各種試験を実施しており、SG 二次側に持ち込まれた、あるいは鉄酸化物の還元溶解により供給される鉄イオンの析出、又は沸騰残さによるスケール付着が主要因であり、付着速度は鉄濃度と共に増加すると考えられる。また、ヒドラジン濃度の増加と共にスケール付着速度も増加する実験結果が得られており、これは、前述した鉄酸化物 (Fe_3O_4) の還元溶解による鉄イオンの供給が関与していることを示唆しているものと考えられる。

他の二次系機器へのスケール付着についても、同様に複数の因子が絡み合って生じているものと考えられ、二次系機器へのスケール付着抑制として、系統からの鉄供給低減が最も効果的であるものと考えている。

9.2.2 系統からの鉄供給

前項で二次系機器へのスケール付着抑制に対し、系統構成材料からの鉄供給低減が効果的であることを述べた。二次系統における AVT 条件下での鉄発生挙動調査結果の一例を解説図 32 に示す。

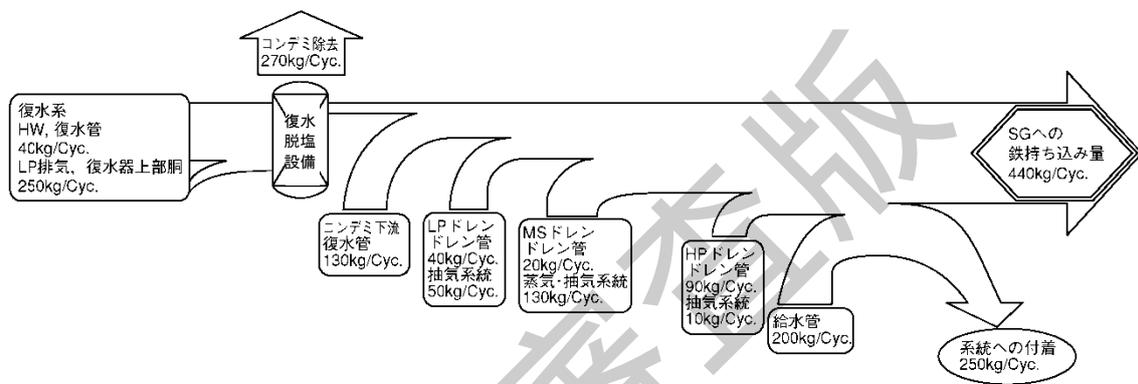
この結果によれば、AVT 環境下で鉄の発生量が多い系統は、高圧タービン排気、低圧タービン排気、低圧抽気などの気液二相流となる系統での FAC による発生量が多く、二次系全体の鉄発生量の 50%以上を占めており、これら系統からの鉄発生を抑制することが重要であることが

わかる。

気液二相流の系統における鉄発生は、AVTでpH調整剤として用いているアンモニアが当該環境下での気液分配が大きく、気液二相流系統では蒸気中の水滴（ミスト）中のアンモニアの分配が小さく、これによって配管、機器表面水膜でのpHが低下し、鉄の溶出が促進されることに起因している。

このため、気液二相流の系統の水膜（ミスト）のpH上昇を目的として、系統全体のアンモニア濃度を高め、気液二相流の系統のアンモニア濃度を増加させる高pH処理（給水pH_{25℃}9.8以上）、あるいは、当該環境下での気液分配がアンモニアと比較して小さい、有機アミン類を用いた代替アミン処理の適用が推進されている。

コンデミ：復水脱塩設備



解説図 32—二次系統からの鉄発生量調査結果の一例

9.3 スケール付着影響抑制対策

SGをはじめとする二次系機器へのスケール付着に起因する不具合発生の可能性を防止するための方策として、系統からの鉄溶出を低減し、SGへの鉄持ち込みを水化学管理の改善、材料改善により低減する方法と、スラッジランシング、高圧水洗浄のように付着したスケールを除去する方法がある。

9.3.1 スケール付着抑制

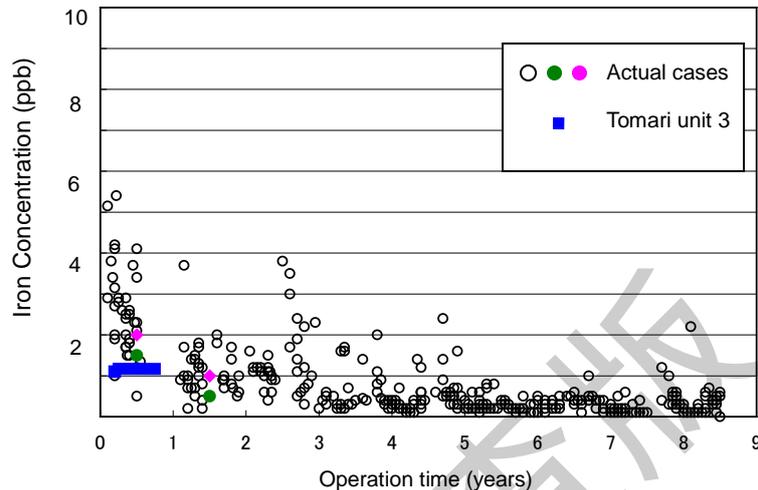
a) **給水鉄低減** SG二次側をはじめとする、二次系機器へのスケール付着を抑制するためには、系統構成材料からの鉄溶出を抑制することが重要であり、このためには、鉄の発生源を同定し、適切な鉄発生抑制対策を施す必要がある。

現在、給水鉄低減を目的とした水質改善手法として、高pH処理及び、代替アミン処理の適用を進めており、下記にそれぞれの水処理方法の特徴をまとめる。

1) **高pH処理** 高pH処理は、アンモニア注入量を増加することにより、給水pH_{25℃}を9.8以上に管理することで、気液二相流の系統、单相流の系統ともpHを上昇させ、系統構成材料からの鉄溶出を抑制しようとするものである。解説図24に示した、鉄系材料のpHとFAC速度の関係から、pH_{25℃}が9.6以上となるとFACが大幅に抑制されることを示しており、二次系でpHが低くなる湿分分離加熱器ドレン（MSドレン）のpH_{25℃}を9.6以上に上昇させるため、給水pH_{25℃}

を 9.8 以上に設定している。

また、国内外 PWR における高 pH 処理適用実績を解説図 33 に示す⁽⁷⁾。これによれば、給水の pH_{25℃} を 9.8 以上に管理することで、給水の鉄濃度を 1μg/L(ppb)以下程度に維持することができると報告されている。



解説図 33—国内外プラント高 pH 処理条件下給水鉄濃度実績

系統構成材料からの鉄溶出低減のためには、二次系統水の pH を高くすることが望ましいが、主要系統構成材料の一つに銅系材料を使用している国内既設プラントへの適用にあたっては、給水の pH_{25℃} を 9.2 から大きく上昇させることは、大幅な設備改善を伴うこととなる。また、高 pH 処理条件下では、給水アンモニア濃度が、AVT の約 10～20 倍 (pH_{25℃}:9.2=0.5mg/L, pH_{25℃}:9.8=5mg/L, pH_{25℃}:10=13mg/L) 以上となることから、復水脱塩設備へのアンモニア流入量が大幅に増加し、復水脱塩設備運用としてバイパス運用が必須となり、海水漏えいなど水質異常時早期対応のための改造が必要となる。

一方、SG ブローダウンは復水器へ回収し復水脱塩設備で浄化しているが、復水脱塩設備をバイパス運用とした場合、二次系統水中不純物を浄化するため、SG ブローダウン浄化設備（既設復水脱塩設備への回収系統追設、又は専用浄化設備の設置）の設置が必要となる。

2) 代替アミン処理 代替アミン処理は、pH 調整剤をアンモニアよりも二次系統環境での気液分配が小さいアミン類を適用し、選択的に気液二相流の系統におけるミスト（配管内表面水膜）の pH を上昇させ、気液二相流系統からの鉄発生（主に FAC）を抑制することを目的とした手法である。

代替アミン処理は、最初に仏国でモルフォリンの実機適用が開始され、給水の鉄濃度を AVT の約 1/2 程度まで低減可能と報告された。国内 PWR プラントへの適用にあたって検討を実施した結果、モルフォリンは高温の解離が小さく単相流の系統でアンモニアと同等の pH を維持する

ためには7~10mg/Lの高濃度にすることが必要であり、復水脱塩設備全量通水運用ができないこと、また、高温安定性が小さく熱分解で多量の有機酸(酢酸、ギ酸など)を生じ、低圧タービン乾湿交番部でpH低下による低圧タービン円板材(ディスク材)のSCC感受性が增大する可能性があることから、国内PWRへの適用は見送られた。

一方、米国のEPRI(Electric Power Research Institute)が実施した代替アミンのスクリーニングにより、ETAの米国プラントへの適用が推進され、給水の鉄濃度を1~2 μ g/Lまで低減可能であるとの報告を受け、国内PWRへの適用性検討が実施され、1997年から国内17プラントで適用が開始された。

また、pH調整剤にETAを使用した高pH処理も一部のプラントで適用され、高アンモニア処理と同様に給水の鉄濃度1 μ g/Lが達成できると報告された。

なお、ETAはCOD(Chemical Oxygen Demand:化学的酸素要求量)への出現率が50~70%と大きく、ETA処理の適用にあたり、復水脱塩設備再生排水の排水処理設備の設置が必要となる。

b) その他の水処理方法 スケール付着抑制を目的とした、二次系機器のFAC抑制対策として、国内外で検討が進められている水処理手法について、概要を下記に示す。これら水処理手法については、今後引き続き実機プラント適用実績、研究開発状況の確認を行い、国内PWRへの適用性について検討を進めていくことが重要である。

1) フィルムフォーミングアミン フィルムフォーミングアミン(FFA:Film Forming Amine)は、二次系統水に有機系アミン(化学式は下記参照)を添加し、機器、配管表面に疎水性被膜を形成し、二次系機器の腐食抑制を目的とした技術である⁽³⁰⁾。

FFA 化学式⁽²⁷⁾: $R^1-(NH-R^2-)_n-NH_2$

ここで

$n=0\sim7$

$R^1=(-C_mH_{2m+1})$: $m=12\sim18$

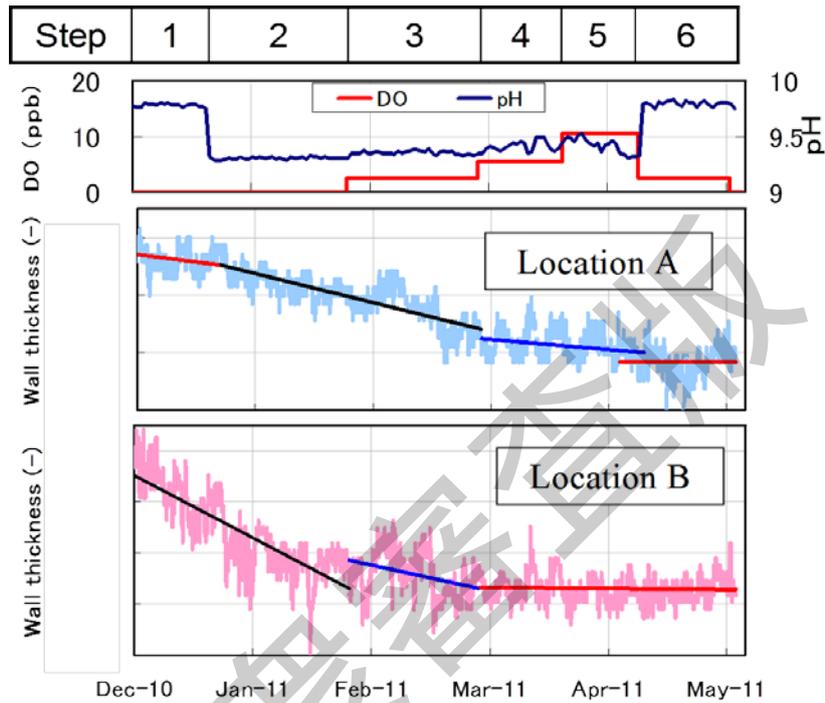
$R^2=(-C_xH_{2x-})$: $x=1\sim4$

FFAは火力発電プラントで実績があり、特に二次系統水のpHを上昇できないプラントでの腐食生成物発生抑制を狙いとしている。PWRでは、AREVA社製プラントに試験適用を行い、定検時の開放点検結果から、機器表面のはっ水性を確認し、被膜が形成されていたものと判断されている。また、FFA適用後、運転中の懸濁状腐食生成物は減少傾向を示し、SGへの鉄持ち込み抑制が期待でき⁽³¹⁾、適用性の検討が進められている。

2) 酸素注入 二次系機器のFAC抑制対策検討の一環として、敦賀2号機において、AVT(pH_{25℃} 9.3)及び高pH(pH_{25℃} 9.8)処理条件下でのFAC抑制に対する酸素濃度の検討が行われた。実機試験時の水質実績と、配管減肉速度の挙動を解説図34に示す⁽²⁷⁾。

これより、AVT 処理条件では溶存酸素濃度を 5 $\mu\text{g/L}$ (ppb)程度、高 pH 処理条件では 2 $\mu\text{g/L}$ (ppb)程度とすることで、FAC 抑制に効果があることを示すデータが得られた。

しかしながら、酸素注入の適用に当たっては、SG 伝熱管損傷リスクへの対応として酸素、酸化剤持込み影響確認と対応策の明確化、適用可能プラントの差別化（銅系材料使用プラントへの適用困難など）が必須である。



解説図 34—敦賀 2 号機酸素注入時の水質実績と配管減肉速度計測結果

9.3.2 付着スケール除去

SG 器内へのスケール付着に対する取り組みとして、スケールの付着抑制及び付着スケールの除去が挙げられる。スケール付着抑制は前項までに記載をした水化学管理が挙げられ、付着スケールの除去としては、化学的に付着スケールを溶解させる化学洗浄と、物理的に高圧ジェット水により付着スケールを物理的に除去する手法が挙げられる。本項では国内 PWR に適用されているスケール除去技術の概要について述べる。

- a) **化学洗浄** 化学洗浄については EPRI を中心に 1970 年代後半から 1980 年代にかけて研究され、SIEMENS 法、EPRI 式及び Westinghouse (WH) 式といった手法が実機に適用された。化学洗浄手法の一例を解説表 2 に示す⁽³³⁾。

解説表 2—SG 二次側化学洗浄手法の一例

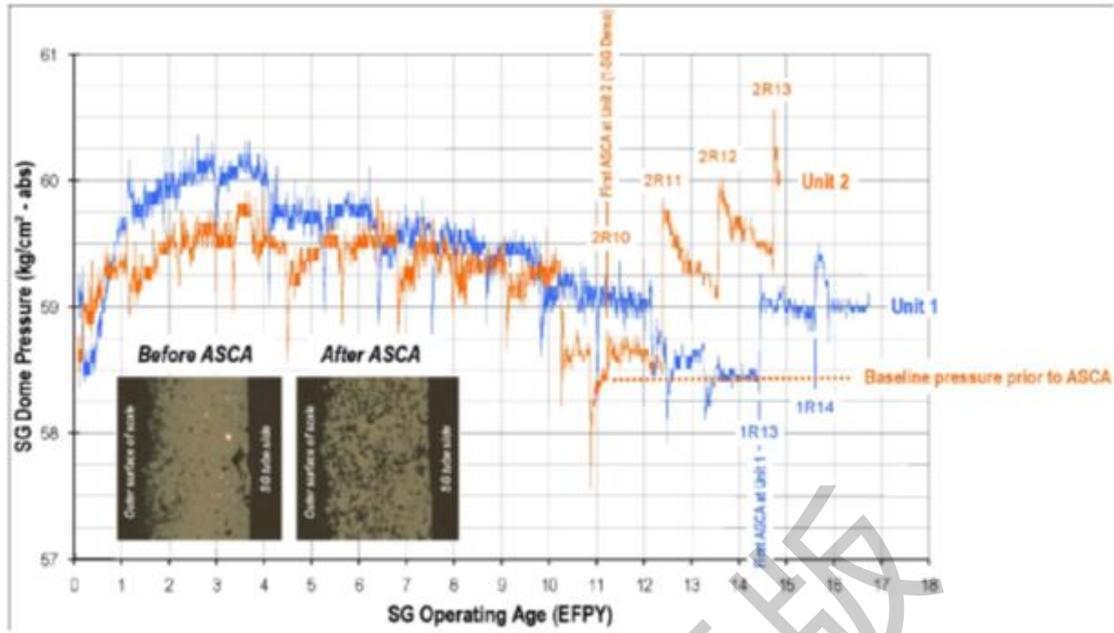
手法名	概要	洗浄条件			
		洗浄	洗浄液	温度	時間
SIEMENS法	欧州プラントでの実績多数有り。	鉄洗浄	ニトリロ三酢酸 (NTA)	160℃	2hr
			エチレンジアミン四酢酸 (EDTA)	170℃	2hr
		銅洗浄	エチレンジアミン (EDA)	60℃	30hr
EPRI式	米国EPRIにより開発。 米国での実績多い。	鉄洗浄	エチレンジアミン四酢酸 (EDTA)	90℃	30hr
		銅洗浄	エチレンジアミン四酢酸 (EDTA)	40℃	5hr
WH式	EPRI式洗浄液条件下で、液流動を発生させることを目的としたPPC法 (Pressure Pulse Cleaning)。	鉄洗浄	エチレンジアミン四酢酸 (EDTA)	90℃	30hr

国内 PWR においては、1990 年に美浜 1 号機及び大飯 1 号機にて SG 器内下部を部分的に洗浄した実績がある。スラッジランシングと比較して良好な除去効果が確認された反面、構成材料への腐食の可能性があることが示唆された。

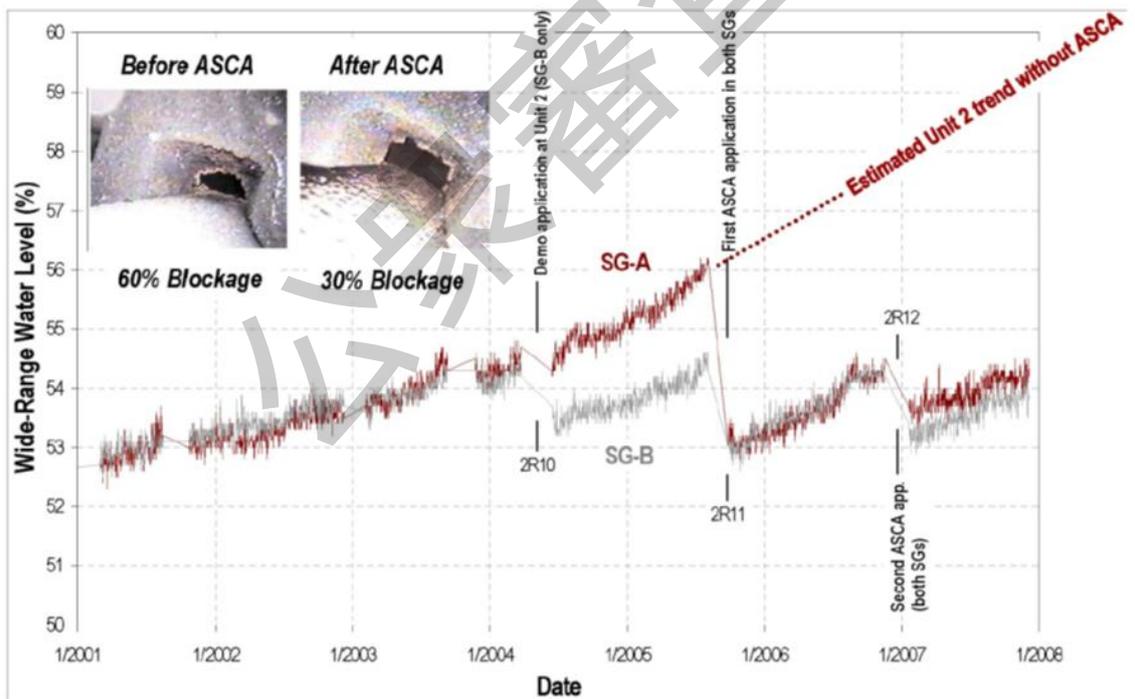
近年では SG 器内を希薄化洗液で洗浄する ASCA (Advanced Scale Conditioning Agent) 洗浄が一部のプラントで適用されている。ASCA 洗浄は 1999 年頃に DEI (Dominion Engineering Institute) 社と WH 社にて開発され、2000 年頃から米国にて適用されている化学洗浄法であり、SG 伝熱管に固着しているスケールの空隙層又は脆弱性の増加及びスケール中に含まれる銅の除去を目的としており、定期的な適用により、SG 伝熱管の伝熱性能の回復及び BEC 閉塞率の改善が可能である。

国内では泊 2 号機にて初回適用がされており、適用前後の主蒸気圧力の挙動を解説図 35 に、SG 広域水位の変化挙動を解説図 36 に示す⁽³⁴⁾。ASCA 洗浄の適用により、2~3 サイクル程度の主蒸気圧力の回復、及び BEC 管支持板管穴閉塞の回復 (SG 広域水位の低下) が確認されている。

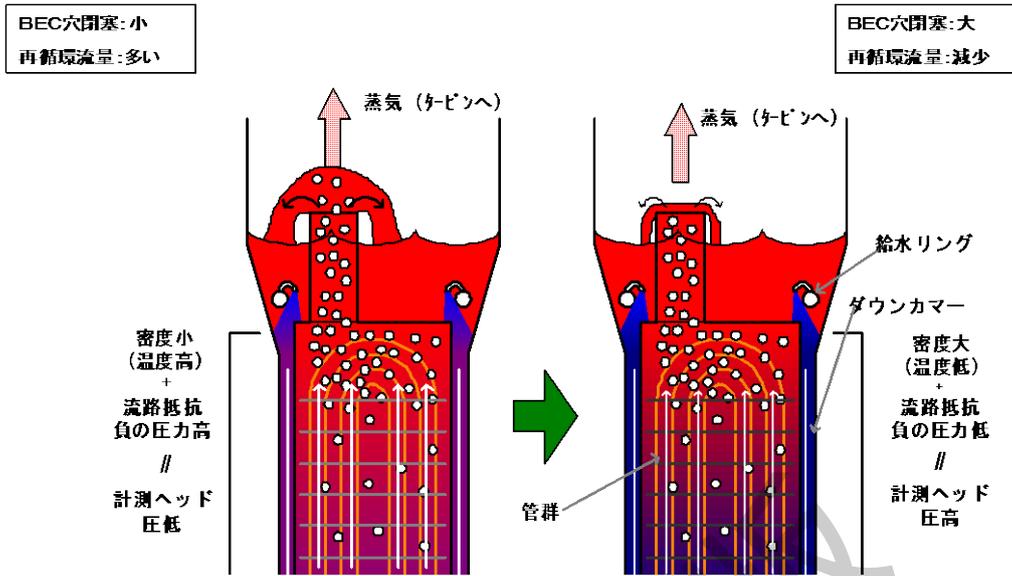
なお、SG 広域水位の監視による BEC 穴閉塞の確認は、解説図 37 に示す通り、BEC 穴閉塞が進展すると SG 再循環流量が減少するため、給水と混合してダウンカマを流れる循環水の温度が低下して密度が大きくなり、それに応じて広域水位が見かけ上増加するため、SG 広域水位の経時的な変化の確認により、BEC 穴閉塞の進展傾向が把握できるものである。



解説図 35—ASCA 洗浄前後主蒸気圧力推移の一例



解説図 36—ASCA 洗浄前後の SG 広域水位の一例

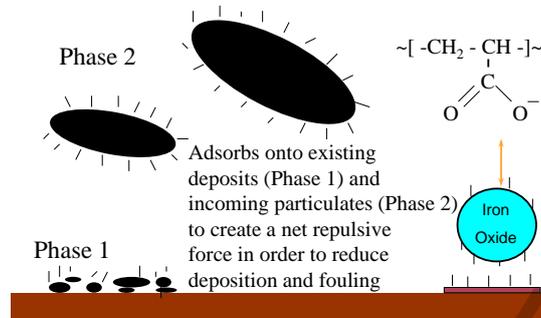


解説図 37—SG の BEC 穴閉塞と SG 広域水位指示値との関係

b) **物理洗浄** SG 伝熱管の腐食防止及び汚れ防止の観点から、定期検査期間中に SG 管板上のスラッジランシングが行われている。スラッジランシングとは、ヒドラジン水を用いて高压ジェット水 (約 15MPa) にて SG 管板上に堆積しているスラッジを除去するものであり、管群内洗浄にも適用可能な、除去性能が高い装置が開発、適用されている。また、上述の管群内挿入型スラッジランシングは、比較的長い工期を必要とするため、SG 器内管板上に超音波振動子を挿入し、主にキャビテーション (溶存酸素などの微小な気泡が核となって、無数の真空に近い微小空洞 (キャビティ) が発生しこれが崩壊するとき強力な衝撃力が発生) 作用による衝撃と、簡単な管板上洗浄装置を組み合わせた洗浄手法の適用による洗浄工期短縮が検討され、一部のプラントで適用されている。

国内 PWR では、概ね毎定検スラッジランシングを実施しており、スラッジ組成、スラッジ量に基づいて、前サイクル運転中の水化学管理、プラント経年変化などを評価し、運転中の水化学管理にも反映している。

c) **その他のスケール除去手法** その他のスケール除去手法として、米国 EPRI 主導にて検討、実機適用が図られている分散剤がある。分散剤によるスケール付着抑制メカニズムは、**解説図 38** に示すとおり、分散剤の主成分であるポリアクリル酸（PAA）が粒子表面に吸着し、負に帯電することで粒子を分散させ、吸着抑制及び付着防止能力が発現するというものである。



解説図 38—分散剤のスケール付着抑制効果（概念図）

分散剤の適用は米国 EPRI 主導のもと、2009 年から米国プラントでの適用実績が開始され、以下の 4 つの手法の適用が検討されている。現状では、いずれの手法も最適な処理条件は確定されていない。

- ・ 運転中（On-line）：給水中の PAA 濃度最大 10 μ g/L で運転中に連続注入
- ・ プラント停止時（Hybrid）：サイクル末期、保管時、スラッジランシング時に注入
- ・ 保管中（WLU）：保管中の SG 器内に PAA 濃度を 1~100 mg/L で添加
- ・ クリーンアップ中（LPR）：PAA 濃度を最大 1mg/L で循環クリーンアップ

上記注入手法のうち、運転中及びプラント停止時のスラッジ除去効果が大きいと報告されており、引き続き検討が進められている。なお、ASCA 洗浄と異なり、分散剤注入はスケール中の銅を積極的に除去できるものではない。

10 二次系試料採取設備及び水質監視計器

二次系試料採取設備及び水質監視計器について基本的な考え方を次に示す。

10.1 試料採取設備

試料採取設備設置の目的は、運転中の二次系各部の水質状況から正常な運転管理がなされているか、系統構成材料の腐食損傷を発生させる可能性のある不純物の混入がないか、あるいは熱交換器などの伝熱管漏えいなどの不具合が発生していないかを早期かつ確実に判断していくことにある。

従来から試料採取設備は日常管理の簡便性を考慮し、二次系各部の試料水を 1 箇所集中して導入する集中試料採取設備が適用されているが、この手法では広範囲に渡る二次系各部の試料水を取り出し座から試料採取配管を数十～百数十 m 敷設しなければならない、水化学管理項目によ

っては採用できない場合もある。水化学管理項目ごとの考え方を次に示す。

10.1.1 水処理薬品及びイオン性不純物

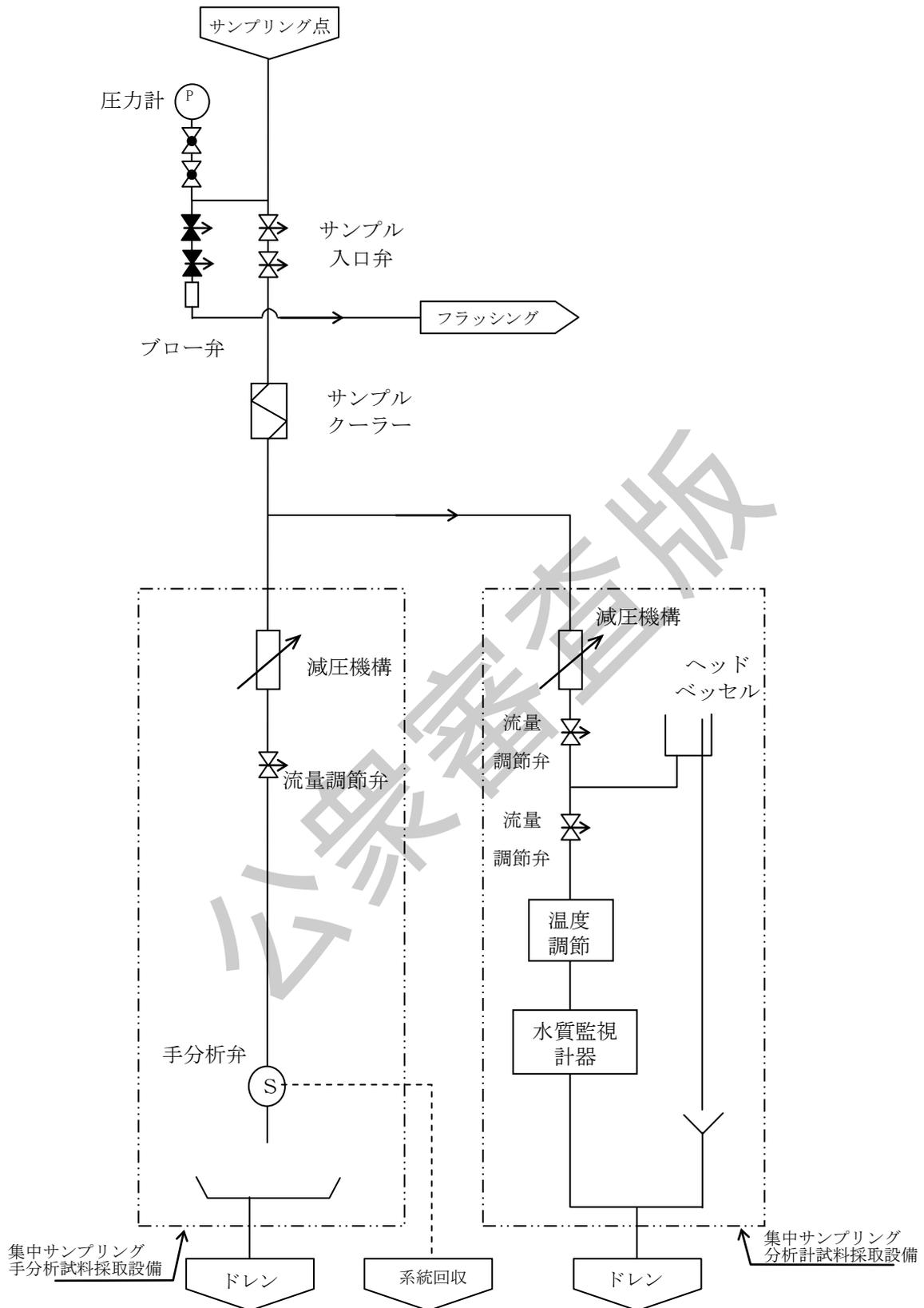
水中への溶解度が大きいアンモニア、ヒドラジン、ナトリウム及び塩化物イオンといったイオン性成分については、各成分が均一に系統水中に分散することから、上記の集中試料採取設備でも十分に評価可能なデータを採取できる。集中試料採取設備の基本概念図の一例を**解説図 39**に示す。

10.1.2 金属成分

水への溶解度が小さい鉄、銅などの金属成分の場合は試料採取配管、弁などへの沈降又は試料採取配管内での温度変化に伴う析出付着現象が発生するため、上述の集中試料採取設備では系統水の性状を正確に評価できない場合がある。

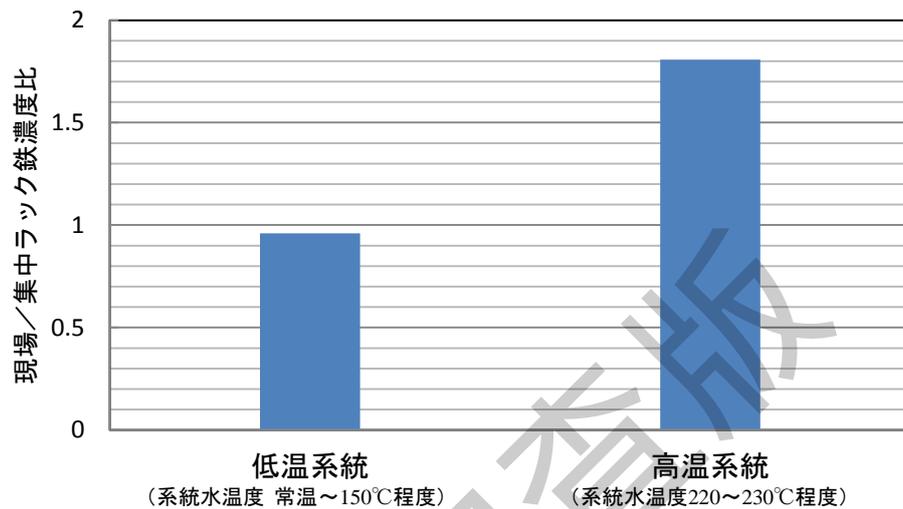
現状の二次系統の課題の一つである SG 二次側のスケール付着影響を確認、解決していくためには、SG へ持ち込まれる鉄の量を的確に把握していく必要があり、このために、二次系各部、特に給水の鉄濃度を正確に把握することは重要である。

高温系統である給水の鉄濃度を測定する場合の試料採取については、**解説図 40**に示すとおり、試料採取配管の温度変化に伴って配管内面への析出付着現象が確認されているため、試料水取り出し座近傍（配管長 10m 程度）に現場試料採取装置を設置することを考慮する。また、高 pH 処理条件下では、系統水中の鉄濃度が非常に低くなり、試料水を直接採取する採取試料水の分析では定量精度が低くなるのが想定されるため、現場試料採取装置には手分析用ラインに加え、フィルター集積採取ラインを設けることを考慮する。現場試料採取設備の基本概念図の一例を**解説図 41**に示す。

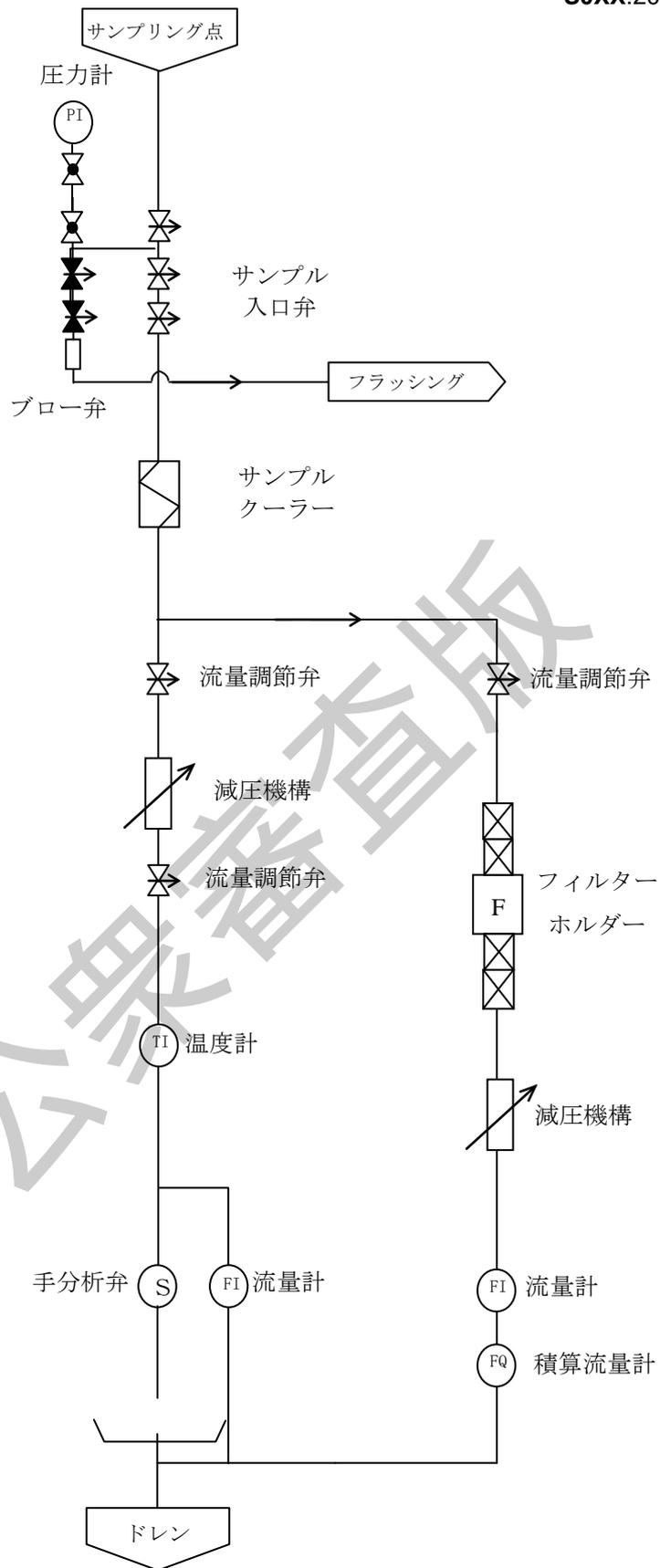


解説図 39—集中試料採取設備概念図の一例

なお、配管内を流れる懸濁性成分を確実に採取するために、試料水取り出し部位に対しては、試料水の速吸引を目的としたプローブ挿入型とする、試料採取配管への懸濁性成分の沈降防止の観点から試料取出し方向を水平方向の上下45度とする、試料採取配管の敷設時は登り勾配とならないようにする、などの事項を考慮する。



解説図 40—現場／集中試料採取設備鉄濃度計測値の比率の例



解説図 41—現場試料採取設備概念図の一例

10.2 水質監視計器

水質監視計器の設置に際しては、プラント運転中の水質状況を連続的、正確、かつ簡便に監視することを目的とし、監視項目ごとに適切な系統、計器を設置することが重要である。

なお、水質監視計器の設置系統、設置機器の検討に際しては、この指針にて設定した水質項目、アクションレベルなどを十分考慮し、下記の項目を対象とする。

10.2.1 二次系への不純物持込防止と浄化確認

- a) ナトリウム、塩化物イオン、硫酸イオンなどイオン性不純物
- b) カチオン電気伝導率
- c) 溶存酸素

a)に示したイオン性不純物については、近年イオンクロマトグラフ又はイオン電極などの低濃度の計測可能な機器の設置も有効と考えられるが、プラント運用からの要求、機器のメンテナンス性を考慮し選定を行う必要がある。

10.2.2 水処理薬品の注入管理（系統材料腐食抑制）

- a) pH
- b) 電気伝導率
- c) 脱酸素剤（ヒドラジン）濃度

10.2.3 水質監視計器の設置系統と設置計器

上記の考え方にに基づき、水質監視計器の設置系統と、設置計器の一例を**解説表 3**に示す。設置の考え方の概要は下記のとおりである。

- a) 水処理薬品の注入管理を目的として、給水に pH 計、電気伝導率計及びヒドラジン計を設置する。設置系統は水処理薬品注入点の下流の脱気器入口としてもよい。また、pH 調整剤濃度と電気伝導率は良好な相関があり、pH 調整剤の注入管理を電気伝導率計で監視することとしてもよく、薬品注入ポンプ制御用として脱気器入口に電気伝導率計を設置する場合がある。
 - b) SG 構成材料（主に炭素鋼）の腐食抑制監視を目的として、SG 器内水に pH 計の設置を考慮する。
 - c) SG への不純物持込監視を目的として SG 器内水にイオンクロマトグラフ、あるいはイオン電極計の設置を考慮する。
 - d) 復水器冷却水（海水）漏えい連続監視を目的として、復水ポンプ出口及び復水器ホットウェルにカチオン電気伝導率計を設置する。
- なお、給水水処理手法、プラント構成によってはナトリウムイオン電極計など他の計器の設置についても考慮する。
- e) 系統及び SG への酸素持込監視を目的として、復水系統（復水ポンプ出口又は脱気器入口）及び給水系統（主給水ポンプ入口又は高圧給水加熱器出口）に溶存酸素計を設置する。設置台数は復水系統、給水系統各 1 台とし、プラント運用上の必要性に応じて切り替えて運用を行う。
 - f) 復水脱塩設備出口水の監視及び復水脱塩設備採水時出口水質連続監視のため、復水脱塩設備出口母管及び各脱塩塔出口に電気伝導率計を設置する。

g) 補給水処理装置機能確認を目的として補給水脱塩設備出口に電気伝導率計を設置する。

解説表 3-水質監視計器の設置系統と設置計器の一例

設備/計器 系統	試料採取設備		水質監視計器					
	集中	現場	pH	電気伝導率	カチオン電気伝導率	溶存酸素	イオンクロマト	ヒドラジン
復水器ホットウェル	—	—	—	—	○*2	—	—	—
復水ポンプ出口	○	—	—	—	○	○	—	—
復水ろ過器出口	—	○	—	—	—	—	*3	—
復水脱塩設備各塔出口	—	○	—	○	—	—	—	—
復水脱塩設備出口母管	—	○	—	○	—	—	—	—
復水ブースターポンプ出口	○	—	—	—	—	—	—	—
脱気器入口	○	—	—	○*1	—	○	—	—
主給水ポンプ入口	○	—	—	—	—	○	*3	—
高圧給水加熱器出口	○	○	○	○	—	○	—	○
SG器内水	○	—	○	—	—	—	○	—
主蒸気	○	—	—	—	—	—	—	—
低圧給水加熱器ドレン	○	—	—	—	—	—	—	—
高圧給水加熱器ドレン	○	—	—	—	—	—	—	—
湿分離器ドレン	○	—	—	—	—	—	—	—
湿分離加熱器ドレン	—	○	—	—	—	—	—	—
補給水処理装置出口	—	○	—	○	—	—	—	—

【備考】*1：脱気器入口の電気伝導率計は薬品注入制御用。 *2：水処理手法によってはナトリウム計など他の計器の設置を検討
*3：切り替え式

11 プラント運用に関わる事項

前項までに、水化学の目的、考え方、アクションレベルなどの設定根拠及び水化学管理実績について記載を行った。プラント起動時などの過渡条件下において、通常運転時のプラント運用と異なる対応を行う場合など、本章にプラント運用面に関する事項をまとめる。

11.1 プラント起動時のヒドラジン濃度の設定について

PWR 二次系では、SG 伝熱管損傷防止のため、二次系統水の還元性強化、維持を目的として、ヒドラジンを添加し、二次系通常運転時の高圧給水加熱器出口水アクションレベル1として50μg/Lを設定している。一方、二次系通常運転時の高圧給水加熱器出口水ヒドラジン濃度制御値及び起動時の高圧給水加熱器出口水ヒドラジン濃度推奨値は、“プラントごとに適切な値を設定する”としているが、下記に示す事項を考慮し、ヒドラジン濃度を設定することが望ましい。

11.1.1 通常運転時

二次系通常運転時における高圧給水加熱器出口水のヒドラジン濃度制御値の設定については、系統構成材料（銅系材料の使用有無など）及びプラント設備容量（復水脱塩装置など）、給水処理手法を考慮し、適切な濃度を設定する。

11.1.2 起動時

a) プラント起動時は、定検期間中の工事、機器内部点検などによる開放により空気が入り、二

次系機器の内面に付着しているスケール内の金属銅が酸化されることなどにより、二次系統の還元性雰囲気は通常運転時と比較して弱まっていることが想定される。このため、二次系統に還元性雰囲気を早期に形成させること目的として、クリーンアップから原子炉起動までは SG への給水（脱気器タンク水）のヒドラジン濃度を 1~3mg/L とし、原子炉起動、発電機並列から発電機出力 100%到達までは高圧給水加熱器出口水のヒドラジン濃度は 0.5~0.6mg/L 程度で運用されるケースがある。高圧給水加熱器出口水のヒドラジン濃度を高くすると、SG 器内で Fe_3O_4 の還元溶解、再析出による伝熱管表面のスケールのちゅう密化が進み、SG 汚れ係数増加を促進する可能性があるが、プラント起動時は短時間のため影響は小さいと判断する。

b) ETA 処理適用プラントでは、二次系起動時の初期などは、二次系統の還元性雰囲気が通常運転時と比較して弱く、銅酸化物などの酸化剤が存在する場合、二次系統内での ETA の分解が促進され、ETA による pH 管理ができないケースがある。このような場合、発電機出力 100%到達前は二次系統に ETA を注入せず、ヒドラジン単独処理を行い、ヒドラジンの熱分解によって生成するアンモニアによって、二次系統水の $\text{pH}_{25^\circ\text{C}}$ を 9~9.2 程度に維持する運用を行うことがある。

なお、この場合の高圧給水加熱器出口水のヒドラジン濃度は、1~2mg/L 程度となる。

11.2 復水浄化設備について

11.2.1 復水脱塩設備の運用について

復水脱塩設備設置の主目的は、プラント起動時における定検工事などで持ち込まれた汚れの浄化、通常運転期間中の系統浄化の維持及び復水器細管漏えいなど水質異常時の水質浄化である。プラント運用モードごとの復水脱塩設備運用の考え方を次に示す。

11.2.1.1 起動時

二次系クリーンアップ開始から発電機並列までの期間、定検工事、機器開放などにより系統内に持ち込まれた汚れを早期に浄化することを目的として、復水全量浄化とする。

11.2.1.2 通常運転時

a) **発電機並列から発電機出力 100%到達** 抽気、ドレン系統は発電機並列以降通水されるため、これらの系統から持ち込まれる汚れを純水使用量を低減しつつ、確実に浄化するため、発電機出力 100%到達までの期間は、プラント運用上可能な時期まで給水加熱器ドレンを復水器回収（非常用回収）し、復水脱塩設備で浄化する。復水器回収で系統の汚れが十分浄化されたのを確認したうえで常用系統回収を行うことにより、SG への汚れの持ち込みを大幅に低減することができる。

b) **発電機出力 100%到達後** 発電機出力 100%到達後は、系統内に持ち込まれる汚れは非常に少なくなるため、復水脱塩装置を復水全量通水で浄化する必要性は小さくなる。このため、高 pH 処理、高 ETA 処理の適用に際し、復水脱塩設備による浄化は復水浄化の部分浄化、あるいは SG ブローダウンの浄化とすることも可能である。また、AVT 条件下でも部分浄化での運用が可能であり、この場合は、水処理薬品注入量の低減、復水脱塩設備再生頻度の低減など、水処理薬品による環境負荷を軽減することが期待できる。

なお、復水脱塩設備による復水の部分浄化、SGブローダウンの浄化時に復水器細管漏えいなどの水質異常が発生した場合には、速やかに復水全量浄化とし、海水成分など汚れなどのSGへの持ち込みを極力低減する処置をとる。

11.2.2 二次系クリーンアップ時復水ろ過器、復水脱塩設備の水質確認について

この指針では、プラント起動時における復水ろ過器、復水脱塩設備採水前後水質確認時期について具体的に記述していない。上記水質確認は、一般的に二次系クリーンアップ初期に実施されることが多く、水質確認時期と水質確認項目の一例を次に示す。

11.2.2.1 復水ろ過器

- a) 採水前：ろ過器入口の濁度，鉄濃度
- b) 採水直後：ろ過器入口，出口の濁度，鉄濃度
- c) 復水水質悪化時（タービン起動，発電機並列，ドレン復水器回収直後など）：ろ過器入口，出口の濁度，鉄濃度

11.2.2.2 復水脱塩設備

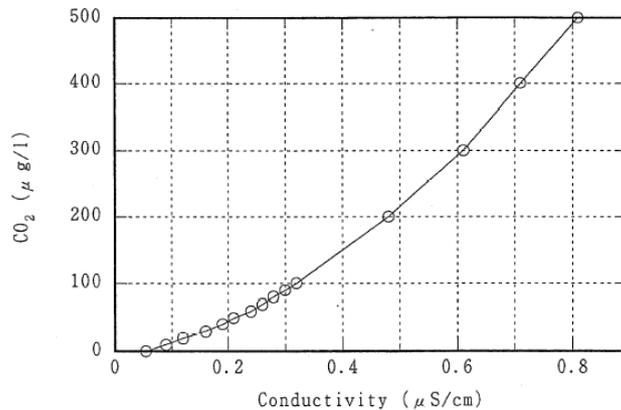
- a) 採水前：復水脱塩設備入口の濁度，鉄濃度，全有機炭素（TOC）
- b) 採水直後：復水脱塩設備入口の濁度，鉄濃度，TOC
復水脱塩設備出口の電気伝導率，ナトリウム，塩化物イオン，硫酸イオン濃度
- c) 復水水質悪化時（タービン起動，発電機並列，ドレン復水器回収直後など）
：復水脱塩設備入口の濁度，鉄濃度，TOC
復水脱塩設備出口の電気伝導率，ナトリウム，塩化物イオン，硫酸イオン濃度

11.3 復水ポンプ出口水のカチオン電気伝導率の運用について

復水ポンプ出口水のカチオン電気伝導率は、通常運転時PWR二次系の主な不純物持ち込み要因となる、復水器冷却水である海水の漏えいを早期、かつ確実に検知するために最も重要な水質監視項目の一つである。カチオン電気伝導率は、系統の水をH型強酸性カチオン樹脂に通水し、電気伝導率を計測する手法であり、系統に注入され電気伝導率を上昇させる成分であるアンモニア、ヒドラジンを除去するとともに、海水の主成分である塩化ナトリウム（NaCl）を塩酸（HCl）とし、計測感度を高め、微量の海水漏えいでも検知可能することを目的としたものである。

一方、PWRの二次系統水に存在するもので、海水の主成分である塩化物イオン以外にカチオン電気伝導率を上昇させる成分として、炭酸及び有機酸が考えられる。

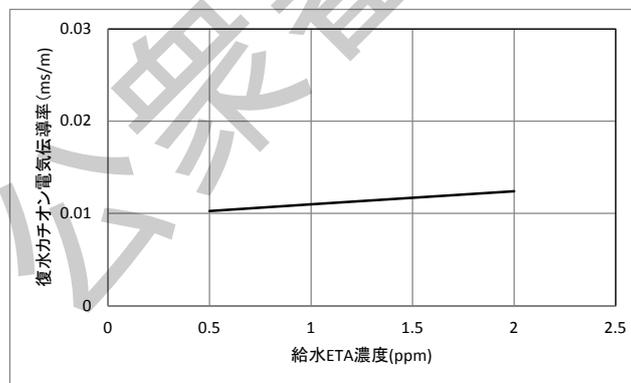
炭酸は、主給水ポンプシール水、タービングランド蒸気など、プラント運転中に大気と接触する系統から復水器に持ち込まれ、特に高pH処理などにより二次系統のpHが高くなる場合は炭酸の吸収効率が增加し、復水ポンプ出口水のカチオン電気伝導率の増加幅が大きくなる。解説図42に電気伝導率と炭酸の関係を示すが、高pH処理適用プラントの実績によれば、復水ポンプ出口水のカチオン電気伝導率が0.01～0.02mS/m程度増加する。



解説図 42—電気伝導率と炭酸の関係

また, ETA 処理を適用しているプラントでは, 系統内で ETA が熱分解して有機酸が生成され, 生成された有機酸によって二次系統水のカチオン電気伝導率が上昇する。解説図 43 に ETA 処理プラント有機酸濃度の実績に基づいて評価した, 給水 ETA 濃度と復水ポンプ出口水のカチオン電気伝導率の関係を示す。ETA 処理プラントの実績によれば, 給水の ETA 濃度 1~3mg/L で, 復水ポンプ出口水のカチオン電気伝導率が 0.01~0.02mS/m 程度増加する。

以上に示した実機の実績に基づき, 高 pH 処理, ETA 処理適用プラントでは, 復水ポンプ出口水カチオン電気伝導率の監視に際し, 通常運転時の炭酸, 有機酸によるベースの電気伝導率を評価, 確認し, 海水漏えい検知レベルの設定に際して考慮することが重要である。



解説図 43—実機有機酸濃度実績に基づくカチオン電気伝導率計算結果の一例

11.4 二次系純水タンク内面工事施工後のフラッシングについて

二次系純水タンクの内面塗装工事など補修工事を実施した場合は, 定期検査後のプラント起動時に二次系への有機物の持ち込みが増加する可能性がある。二次系に有機物が持ち込まれた場合, 有機物, あるいは有機物が分解して生成される有機酸は気液分配が大きく, SG 器内に濃縮することなく蒸気側へ移行することになるため, SG 伝熱管健全性に直接大きな影響を及ぼすことはない。しかしながら, 有機物は復水脱塩設備樹脂での浄化効率が小さく, 浄化に時間を要すること, 低圧タービン最終段付近の乾湿交番域で濃縮し, 当該部環境を若干酸性側とする可能性は

否定できないことから、二次系純水タンクの内面工事を実施した場合は、プラント起動前に次に示すフラッシング及び水質確認を行う。

- a) 工事終了後、純水による内面洗浄を十分に行う。
- b) タンク内への水の張替えを実施し、TOC 濃度が浄化完了の目安となる濃度を満足するまで繰り返す。
- c) 浄化完了の目安となる濃度は、復水脱塩設備樹脂、復水ろ過器の汚染に考慮し、二次系クリーンアップ時における復水脱塩設備の採水時の目標濃度である TOC 濃度 0.5mg/L 未満を設定する。

11.5 SG 伝熱管健全性確保による二次系、環境への放射能漏えい防止

二次系の水化学管理の第一目的は、SG 伝熱管の健全性確保である。万が一 SG 伝熱管が損傷した場合でも、二次系統水が一次系に混入することはなく、燃料の健全性に直接の影響はない。しかしながら、SG 伝熱管が損傷した場合、一次冷却材が二次系に漏れ出すこととなり、環境への放射性物質漏えいリスクが高まる。従って、SG 伝熱管の健全性を確保することにより、二次系、環境への放射性物質漏えい防止につながる。

なお、二次系へのトリチウム移行については、国内では総量規制により厳しく管理されており、問題はない。

12 海外の水化学指針との比較

本指針を海外の水化学指針として、現在特に欧米等で広く参照、運用されている EPRI (Electric Power Research Institute) の二次系水化学ガイドライン⁽¹⁾と比較すると、水化学管理の目的が SG をはじめとする二次系設備の長期健全性、性能確保と同一であるため、水化学管理項目、管理値ともほぼ同等である。しかしながら、一部の項目で設定の考え方、アクションレベル（以下 AL）設定値が異なるものがあり、これらに対する本指針での考え方は次のとおりである。

12.1 SG 器内水

- a) カチオン電気伝導率は水の純度を示す指標として用いられるが、不純物の種類を判別することはできない。また、近年の高 pH 化に伴う炭酸イオン濃度の上昇や ETA 分解に起因する有機酸増加など、SG 伝熱管健全性に影響しないと考えられる要因によっても変動する。そのため、カチオン電気伝導率を AL として定めず、直接的に SG 伝熱管健全性に影響がある不純物（ナトリウム、塩化物イオン、硫酸イオン）を AL として設定することとした。
- b) 不純物濃度の設定値も若干異なる項目があるが、本指針では国内プラント運用実績、国内で実施した材料試験データに基づいて設定した。

12.2 高圧給水加熱器出口水（給水）

- a) 給水処理条件の管理のうち、pH の管理について、本指針では高圧給水加熱器出口水（給水）の pH を制御項目、pH 調整剤と電気伝導率を管理項目（推奨値）としているのに対し、EPRI GL では pH 調整剤濃度を管理項目としている。この考え方の相違は次の理由によるものである。
- － 給水条件で制御すべき項目は pH であること、pH 調整剤の種類によってその pH に到達する濃度が異なるが、国内プラントの pH 調整剤はアンモニア、又は ETA の何れかを単独で使用していることから、本指針では pH を制御項目とした。
 - － 一方、海外、特に米国のプラントでは複数の pH 調整剤を混合して使用するケースが多く、薬液注入濃度を電気伝導率で管理することはできず、個別の pH 調整剤濃度を把握する必要があるため、EPRI GL では pH 調整剤濃度での管理としている。
- b) 給水鉄濃度は、プラントごとの化学管理プログラム（pH 設定範囲）、系統構成、系統材料によって得られる値であるため、管理値ではなく推奨値とした。
- c) 溶存酸素濃度は、EPRI GL ではプラント運転実績に基づいて定めているが、本指針においては SG 伝熱管健全性確保の観点から、溶存酸素計で有意に検出が可能な値に設定した。
- d) 鉛が SG 伝熱管割れ感受性に及ぼす影響は明確ではないが、海外で損傷が経験されていることも考慮し、管理項目として設定した。

なお、管理値については、実機実績濃度、並びに鉛の SG 伝熱管健全性に及ぼす影響なども考慮し、今後継続して検討を行う。

12.3 復水ポンプ出口水（復水）

- a) 国内プラントは、全て復水海水冷却プラントであるため、海水漏えい監視として、復水ポンプ出口水の海水成分監視を強化する。監視方法としては、カチオン電気伝導率、あるいはナトリウムのいずれかを監視することとした。
- b) SG への酸素の持込み管理として、高圧給水加熱器出口で溶存酸素濃度を管理しており、国内プラントでは低圧給水加熱器下流に脱気器を設置していることから、復水の溶存酸素は、真空系統での空気漏れ込みの有無、その程度を把握する目的となる。このため、診断項目とし、推奨値は設定していない。

なお、復水器細管材料に銅系材料を使用しているプラントでは、当該管のアンモニアアタック防止の観点から、推奨値の設定を検討する。

公衆審査版

参考文献

- (1) PWR Secondary Water Chemistry Guidelines:, Revision 6, EPRI 1008224, Palo Alto, (2004).
- (2) H. Neder, M. Juergensen, D. Wolter et al., "VGB primary and secondary side water chemistry guidelines for PWR plants", *Proc. International Nuclear Plant Chemistry Conference*, NPC2006, Paper 1.3, (2006).
- (3) INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Chemistry Programme for Water Cooled Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-13, IAEA, Vienna (2011).
- (4) H.Kawamura, Y, Shoda, T. Terachi et al., "PWR Secondary Water Chemistry Guidelines in Japan - Purposes and Technical Backgrounds -", *Nuclear Engineering and Design*, to be published.
- (5) 自主的安全性向上・技術・人材ワーキンググループ, 日本原子力学会 安全対策高度化技術検討特別専門委員会, "軽水炉安全技術・人材ロードマップ", 平成 27 年 6 月
- (6) 原子炉水化学ハンドブック 日本原子力学会編, p.160 (2000)
- (7) A.Maeda et al. Proc. of International Conference on Water Chemistry of Nuclear Systems, NPC2012, (2012)
- (8) H. Takamatsu, *Nuclear Engineering International*, 36, Jan., p.27 (1991)
- (9) 原子炉水化学ハンドブック 日本原子力学会編, p.165 (2000)
- (10) 八島清爾, 防食技術, **30**, 594-595 (1981))
- (11) 八島清爾, 原子力工業, **41**[4], 62-69 (1995)
- (12) T. Tsuruta, N. Fukumoto, and T. Ochi, unpublished data quoted in A. Kishida et al., Proc. of the 3rd Internl. Symp. on Env. Degr. of Mat. In Nuclear Power Systems, NACE, p.465 (1987)
- (13) J. R. Park and S. Smialowska, Proc. of the 2nd internl. Symp. on Env. Degr. of Mat. in Nuclear Power Systems, NACE, p.456 (1985)
- (14) S. Smialowska, EPRI NP-5037, "Causes of and Corrective Actions for Pitting in SG Tubings", Feb. (1987)
- (15) I. Ohsaki, K. Ohnishi, Y. Ohkubo, T. Hattori, and S. Tokunaga, Proc. of 2nd Internl. Steam Generator & Heat Exchanger Conf., Tronto, Vol.2, p.8- 93, June (1994)
- (16) 原子炉水化学ハンドブック 日本原子力学会編, p.169 (2000)
- (17) 原子炉水化学ハンドブック 日本原子力学会編, p.173 (2000)
- (18) EPRI PWR Secondary Water Chemistry Guideline, Rev.3 TR-102134 (1993), F-4
- (19) EPRI PWR Secondary Water Chemistry Guideline, Rev.6 1008224 (2004), 3-17
- (20) L. Verelist, B. Dufrang, R. Wolfe et al., NPC2016
- (21) S. Miyazaki, "State of the Art of Water Chemistry of Japanese PWR," Proc. of Seminar on Water Chemistry of Nuclear Reactor System 95, Tokyo, Japan. 1995, p.19.
- (22) T. Hattori, "Operating Experiences of Steam Generator Water Chemistry in Japanese PWR," Proc. of Steam Generator and Heat Exchanger Conference, Toronto, page 2-69.
- (23) Y.Shoda, E.Kadokami, T.Hattori, "Examination of New Bulk Water Molar Ratio Index for Crevice

- Environment Estimation,” Water Chemistry of nuclear reactor systems 7, Bournemouth, 1996,p.608
- (24)Tsuruta, S. Okamoto, E. Kadokami, H. Takamatsu, “IGA/SCC Crack Propagation Rate Measurement on Alloy 600 SG Tubing Using a Side Stream Model Boiler,” The 3rd JSME/ASME Joint International Conference on Nuclear Engineering, Kyoto, Japan. 1995, p. 291..
- (25) Y. Shoda, E. Kadokami, T. Hattori, “Rvaminatoon of New Bulk Eater Molar Ratio Index for Crevide Environment Estimation”
- (26) 原子炉水化学ハンドブック 日本原子力学会編, p.161 (2000)
- (27) O.Jonas,"Control Erosion/Corrosion of Steels in Wet Steam",Power, March, p102(1985)
- (28) The ASME Handbook on Water Technology for Thermal Power System, p1388(1989)
- (29) E.Kadoi, T. Ohira, W. Sugino and K. Otoha, “The Experience of High AVT in Tsuruga unit-2 -The first Application in Japanese PWR-”, Symposium on Water Chemistry and Corrosion of Nuclear Power Plants in Asia, Korea, 2005.
- (30) Katrin Stiller, Tobias Wittig, Michael Urschey, “The Analysis of Film-Foming Amines-Methods, Possibilities,Limits and Recommendations.” PPChem. ISSN1438-5325
- (31) U.Ramminger, S.Hoffmann-Wankerl and J.Fandrich, AREVA NP GmbH. “The application of film-foming amines in secondary side chemistry treatment of NPPs” Nuclear Plant Chemistry Paris. 26.Sep.2012.
- (32) W. Sugino et.al., “Effectiveness of Oxygen Treatment on FAC Mitigation in PWR Secondary System” EJAM, Vol.5, No.1, NT53
- (33) 原子炉水化学ハンドブック : 日本原子力学会編, p.175(2000)
- (34) M, Little, R.Varrin, A.Pellman, M.Kreider, "Advanced Scale Conditioning Agent (ASCA) Applications : 2012 Experience Update", Proceedings of NPC 2012, Paris, 2012, Paper No.O60-140 (2012).