



AESJ-SC-S011:202X

(案)

日本原子力学会標準

沸騰水型原子炉の水化学分析方法

- 金属不純物:202X

202X年X月

一般社団法人 日本原子力学会

心 眼 保 植 用

心 眼 保 植 用

心 眼 保 植 用

## まえがき

“沸騰水型原子炉の水化学分析方法 — 金属不純物：202X”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 BWR 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発行したものです。この標準では、プラントシステム全体の信頼性の維持、向上、及び被ばく低減による作業従事者の安全性確保の観点から、冷却材の金属不純物濃度を化学分析するための具体的方法を規定しています。

沸騰水型原子炉（BWR：Boiling Water Reactor）では、高温高圧環境下で構造材料及び燃料被覆管が冷却材及び減速材としての水と接触しており、腐食反応によって、水質によっては構造材料及び燃料被覆管の健全性に影響を及ぼす可能性があります。また、構造材料の腐食によって発生する腐食生成物が水中に溶け出し炉心で放射化され材料の表面に移行して蓄積しますと、これが線源となって作業従事者の被ばく線量の上昇の原因となります。このため、水化学管理を適切に行うための指針の制定が必要とされてきました。

このような状況のもと、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、軽水炉の自主的安全性向上の取組みのもとに水化学管理指針を策定することとなりました。水化学管理の目的は、構造材料及び燃料被覆管の健全性維持、並びに作業従事者の被ばく低減の3項目です。原子力安全の基本原則のうち、構造材料及び燃料被覆管の健全性維持は、“放射線リスク源を閉じ込めること”に繋がり、被ばく低減は、“人と環境を護ること”に繋がります。これらの概念を体系化し、原子力安全の達成、維持、向上に資することを目指した“沸騰水型原子炉の水化学管理指針：202X”を制定しました。

“沸騰水型原子炉の水化学管理指針：202X”では、構造材料及び燃料被覆管の健全性維持、並びに被ばく低減の観点から、通常運転時の原子炉水の水化学管理項目、診断項目、推奨値、アクションレベル、アクションレベル逸脱時の対応及び分析頻度並びに原子炉水の停止時の分析頻度等を規定しています。また、品質管理の箇条で規定されている化学分析は、BWRにおける水化学管理の品質を担保するものであり、原子力安全に係る“異常・故障の発生防止”及び“異常・故障の検知及び拡大防止”に該当します。BWRシステム全体の安全性確保に係る項目について適切に運用管理するためには、精度の高い信頼性に優れた化学分析を行う必要があります。“沸騰水型原子炉の水化学管理指針：202X”を下支えするための化学分析方法の策定が求められていました。

この標準では、これら項目のうちJISなどで標準化されていない原子炉水等に含まれる金属不純物の化学分析方法を日本原子力学会標準として規定しました。沸騰水型原子炉では、燃料健全性維持及び被ばく線量低減のため、系統水に含まれる金属不純物を化学分析しており、“沸騰水型原子炉の水化学管理指針：202X”において、通常運転時、起動時の原子炉水等の金属不純物の推奨値及び分析頻度が規定されています。金属不純物は、蛍光X線分析装置、原子吸光光度計及び高周波プラズマ質量分析計を用いて計測されますが、系統水の水質状況を詳細に把握するためには、溶解性と不溶解性の金属不純物を分離してサンプリングする化学操作が重要です。この標準では、金属不純物の化学分析の具体的な方法に関する一般事項、サンプリング、器具及び装置、並びに化学分析操作を規定しています。

この標準を策定した後も、安全性向上に係る国内外の新知見を発電所の運用管理に適切に反映するため、プラントの運転経験及び新知見に基づく適用事例を解析しフィードバックを図ることによって、最新の化学分析技術を取り入れ、標準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。

## Foreword

"The Water Chemistry Analysis Methods of Boiling Water Reactor - Metal Impurities : 202X" was developed according to the discussions of the Water Chemistry Guideline Working Group for Boiling Water Reactor, the Water Chemistry Committee, the System Safety Committee, and the Standards Committee organized by the Atomic Energy Society of Japan (AESJ). This standard stipulates concrete methods of analyzing the metal impurities concentration of reactor coolant for the purpose of contributing to maintaining and improving the reliability of all plant systems and securing the safety of workers by reducing the personnel exposure dose.

In Boiling Water Reactors (BWR), the structural materials and fuel claddings are immersed in the water used as coolant and moderator under a high-temperature and high-pressure environment, and the integrity of the structural materials and fuel claddings may be affected by corrosion reactions depending on the water quality. Moreover, if the corrosion products generated by the corrosion of structural materials are released to and deposited on the surface of the fuel claddings, and then activated in the reactor core, the corrosion products will act as the radiation source and will cause an increase in the personnel dosage. For this reason, the establishment of BWR water chemistry guidelines to achieve the appropriate water quality management has been needed.

Under such circumstances, water chemistry guidelines shall be established independently to improve the safety of the light water reactors, based on the lessons learned from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, which occurred in 2011. Water quality management has the following 3 purposes: Maintaining the integrity of the structural materials, maintaining the integrity of the fuel claddings, and reducing the personnel exposure dose. From the viewpoint of fundamental principles for nuclear safety, maintaining the integrity of the structural materials and fuel claddings leads to "confining sources of radiation risks", and reducing the personnel exposure dose leads to "protecting people and the environment". These concepts have been systemized, and the "Water Chemistry Guidelines for Boiling Water Reactors : 202X" was established for the purpose of contributing to achievement, maintenance, and improvement of nuclear safety.

The Water Chemistry Guidelines for Boiling Water Reactors stipulates control parameters, diagnostic parameters, recommended values, action levels, responses when there is deviation from the action levels and analysis frequency for water chemistry for reactor water during normal operation, as well as analysis frequency during shutdown, established from the viewpoint of maintaining the integrity of the structural materials and fuel claddings, and reducing the personnel exposure dose. Furthermore, the chemical-analysis that is stipulated as a quality management item assures the quality of BWR water chemistry management, and falls under "To prevent the occurrence of failures or abnormal conditions" and "To detect the failures or abnormal conditions and prevent the escalation of any such failures and abnormal conditions" for nuclear safety. In order to carry out operation management appropriately for the items concerning securing the safety of all the BWR systems, it is necessary to perform high-precision chemical-analysis measurement with outstanding reliability, and the establishment of standard chemical-analysis methods is required to underpin the Water Chemistry Guidelines for Boiling Water Reactors.

This standard stipulates the methods of analyzing the metal impurities concentration of reactor coolant as AESJ standards, which have not been standardized in Japanese Industrial Standards (JIS). In BWRs, metal impurities of reactor coolant are analyzed to maintain the integrity of the fuel claddings and reduce the personnel exposure dose, and the Water Chemistry Guidelines for Boiling Water Reactors specifies the recommended value and analysis frequency of metal impurities of reactor coolant under plant normal operation and during start-up. Metal impurities are measured using X-ray fluorescence spectrometers, atomic absorption spectrophotometers, and high frequency plasma mass spectrometers. In order to grasp the water quality condition of reactor coolant in detail, it is important to

separate soluble and insoluble metal impurities in sampling. This standard stipulates concretely general items for metal impurities analysis methods, sampling, instruments, equipment, and analytical practice.

After this standard has been established, the feedback from plant operation experiences and case studies based on new observations, and the latest chemical-analysis technology will be incorporated into the standard, and then this standard will be updated in order to appropriately apply new observations related to safety improvements to plant operation management. These activities will contribute to the continuous improvement of nuclear power plant safety.

---

制定：202X年X月XX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。

心 眼 保 植 用

## 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 .....	2
4 一般事項 .....	2
4.1 化学分析方法の通則 .....	2
4.2 化学分析に用いる試薬類, 器具類及び水 .....	2
4.3 放射性試料の取扱い .....	3
5 サンプルング .....	3
5.1 器具類 .....	3
5.2 サンプルング操作 .....	3
6 化学分析方法 .....	4
6.1 蛍光 X 線分析法 .....	4
6.2 原子吸光光度法 .....	4
6.3 高周波プラズマ質量分析法 .....	5
7 品質保証 .....	6
附属書 A (参考) サンプルング系統の例 .....	7
解説 .....	8

心 眼 保 植 用

日本原子力学会標準  
沸騰水型原子炉の水化学分析方法  
－金属不純物:202X

The Water Chemistry Analysis Methods of Boiling Water Reactor  
- Metal Impurities : 202X

## 序文

この標準は、AESJ-SC-S007:202X“沸騰水型原子炉の水化学管理指針”において原子炉水等の推奨値及び測定頻度が規定された金属不純物の化学分析方法を規定することによって、沸騰水型原子炉（BWR）システム全体の安全性確保に資することを目的としている。

## 1 適用範囲

この標準では、BWR 原子炉水、給・復水、使用済燃料プール水及び復水貯蔵タンク水（以下、“原子炉水等”という。）から試料を採取し、金属不純物を定量するための具体的な方法に関する一般事項、サンプリング方法及び前処理方法を規定する。

なお、金属不純物濃度の化学分析操作に係る具体的方法については、関連する JIS 規格に従う。

## 2 引用規格

次に掲げる規格は、この標準に引用されることによって、この標準の規定の一部を構成する。これらの引用規格は、その追補をも含む。また、記載の年の版だけがこの規格を構成するものであって、その後の改訂（改正、改定）版・追補には適用しない。西暦年の付記がない引用規格は、その最新版（追補をも含む。）を適用する。

なお、引用規格とこの標準の規定とに相違がある場合は、この標準の規定を優先する。

- JIS K 0050 化学分析方法通則
- JIS K 0101 工業用水試験方法
- JIS K 0102 工場排水試験方法
- JIS K 0119 蛍光 X 線分析通則
- JIS K 0121 原子吸光分析通則
- JIS K 0133 高周波プラズマ質量分析通則
- JIS K 0211 分析化学用語（基礎部門）
- JIS K 0216 分析化学用語（環境部門）
- JIS K 0557 用水・排水の試験に用いる水
- JIS K 8180 塩酸（試薬）
- JIS K 8541 硝酸（試薬）
- JIS R 3503 化学分析用ガラス器具
- JIS R 3505 ガラス製体積計
- JIS Z 4001 原子力用語

AESJ-SC-S007:202X 沸騰水型原子炉の水化学管理指針

原子力施設の保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の基準に関する規則（令和2年原子力規制委員会規則第2号）

### 3 用語及び定義

この標準で用いる主な用語及び定義は、**JIS Z 4001**, **JIS K 0101**, **JIS K 0102**, **JIS K 0211**, **JIS K 0216** 及び **AESJ-SC-S007:202X** によるほか、**3.1**, **3.2**, **3.3**, **3.4** による。

#### 3.1

##### 金属不純物 (metal impurities)

系統水に含まれる溶解性成分及び不溶解性成分の金属 5 元素 (クロム, 鉄, コバルト, ニッケル, 銅)

#### 3.2

##### サンプリングホルダ (sample holder)

金属不純物の化学分析に用いる系統水をサンプリングするために用いるメンブランフィルタ及びイオン交換ろ紙を収納するホルダ

#### 3.3

##### 溶解性成分 (soluble components)

孔径 0.45  $\mu\text{m}$  のメンブランフィルタを通過する金属元素[1]

#### 3.4

##### 不溶解性成分 (insoluble components)

孔径 0.45  $\mu\text{m}$  のメンブランフィルタで捕集される金属元素[1]

### 4 一般事項

#### 4.1 化学分析方法の通則

化学分析方法に共通する一般事項は、**JIS K 0050** による。また、化学分析に係る活動は原子力発電所の品質保証活動の一環として実施する。

#### 4.2 化学分析に用いる試薬類, 器具類及び水

##### 4.2.1 試薬類

- a) JIS マーク表示品の最上級品質の試薬類を用いる。
- b) 試薬類の濃度は、質量濃度は  $\text{g/L}$  又は  $\text{mg/L}$ , モル濃度は  $\text{mol/L}$  又は  $\text{mmol/L}$  で示す。化合物については、無水物としての質量を用いる。
- c) 試薬類の溶液名称の後に括弧で示される濃度は、標準液以外は概略の濃度である。

**例** 水酸化ナトリウム水溶液 (0.1  $\text{mol/L}$ ) は約 0.1  $\text{mol/L}$  であることを示す。

溶液名称の前に示された濃度は、正確な濃度であるが、端数のない数値で示されているので、別途、ファクタを求める必要がある。

- d) 試薬類の名称は、“国際純正及び応用化学連合” (IUPAC) の無機化学命名法及び有機化学命名法に基づき、(公社) 日本化学会が定めた化合物命名法[2]及び JIS 試薬名称による。

##### 4.2.2 器具類

###### 4.2.2.1 ガラス器具

JIS R 3503 に規定するもの。

#### 4.2.2.2 ガラス製体積計

JIS R 3505 に規定するもの。

#### 4.2.3 水

JIS K 0557 に規定する A3 の水とする。

### 4.3 放射性試料の取扱い

原子炉水等は放射性物質を含有するため、放射性物質の取扱いに適した設備において、被ばくに留意して化学分析操作を行う。化学分析後の廃液及びろ紙は放射性廃棄物として処理する。

## 5 サンプリング

### 5.1 器具類

4.2.2 によるほか、5.1.1、5.1.2、5.1.3 による。

#### 5.1.1 メンブランフィルタ

孔径 0.45  $\mu\text{m}$  の網目をもつ外径 25 mm ~47 mm のろ紙とする[1]。

#### 5.1.2 陽イオン交換ろ紙

負の固定電荷をもった多数のイオン交換基を備えたる紙とする。

#### 5.1.3 陰イオン交換ろ紙

正の固定電荷をもった多数のイオン交換基を備えたる紙とする。

### 5.2 サンプリング操作

試料のサンプリングに当たっては、配管をサンプリング配管内の体積の 3 倍量以上[3]の系統水で置換し、洗浄する。ただし、検出点からサンプリング箇所までの一部において系統水を連続的に流している場合は、当該部分の体積を含まない（附属書 A 参照）。

また、図 1 のとおり、6 で示す測定範囲で測定できる量の系統水を、サンプリングホルダを使用して、メンブランフィルタ、陽イオン交換ろ紙、陰イオン交換ろ紙の順に、系統水を通してろ過を行う。

用いるイオン交換ろ紙の性能を考慮し、破過しないよう、適切な流量及びサンプリング時間を設定する。また、不溶性金属不純物のサンプリング配管への付着を抑制し試料の代表性を確保するため、バイパスラインを利用して試料採取点からフィルタ設置ラインとバイパスライン分岐点までの流量を十分に確保する（附属書 A 参照）。

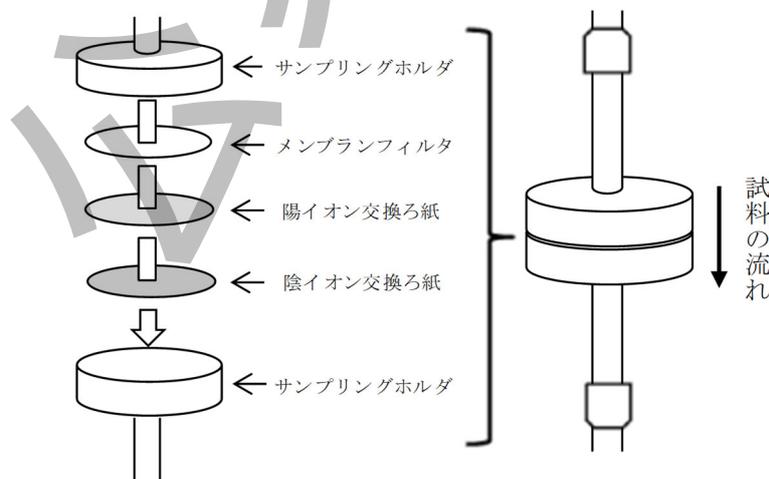


図 1—サンプリング方法の例 6 化学分析方法

## 6 化学分析方法

### 6.1 蛍光 X 線分析法

#### 6.1.1 適用する濃度範囲

適用する濃度範囲は、鉄で  $10^{-2} \mu\text{g/L} \sim 1.5 \times 10^0 \mu\text{g/L}$ 、銅、ニッケル及びクロムで  $10^{-2} \mu\text{g/L} \sim 2 \times 10^0 \mu\text{g/L}$ 、コバルトで  $10^{-3} \mu\text{g/L} \sim 2 \times 10^{-1} \mu\text{g/L}$  とする[4]。

#### 6.1.2 器具及び装置

4.2.2 によるほか、6.1.2.1、6.1.2.2 による。

##### 6.1.2.1 乾燥器又は赤外線電球

乾燥器は  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  以上で乾燥可能で試料の飛散が防止できるもの[5]。

##### 6.1.2.2 蛍光 X 線分析装置

試料から発生する蛍光 X 線を測定し、試料中に含まれる金属元素を測定する。蛍光 X 線分析装置の基本構成及び基本操作については、JIS K 0119 に記載の“波長分散方式”による。

#### 6.1.3 操作

- a) 5.2 にて採取したろ紙を、乾燥器又は赤外線電球で乾燥する。
- b) 乾燥させたろ紙を蛍光 X 線分析装置で測定する。
- c) 測定時の金属不純物重量  $M$  ( $\mu\text{g}$ ) に基づき、金属不純物濃度を式 (1) によって算出する。

$$C = \frac{M}{V} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $C$ : 金属不純物濃度 ( $\mu\text{g/L}$ )

$M$ : 測定時の金属不純物重量 ( $\mu\text{g}$ )

$V$ : 試料量 (L)

### 6.2 原子吸光光度法

#### 6.2.1 適用する濃度範囲

適用する濃度範囲は、鉄で  $10^{-2} \mu\text{g/L} \sim 1.5 \times 10^0 \mu\text{g/L}$ 、銅、ニッケル及びクロムで  $10^{-2} \mu\text{g/L} \sim 2 \times 10^0 \mu\text{g/L}$ 、コバルトで  $10^{-3} \mu\text{g/L} \sim 2 \times 10^{-1} \mu\text{g/L}$  とする[4]。

#### 6.2.2 試薬

##### 6.2.2.1 濃塩酸

JIS K 8180 に規定するもの。

##### 6.2.2.2 濃硝酸

JIS K 8541 に規定するもの。

#### 6.2.3 器具及び装置

4.2.2 によるほか、6.2.3.1、6.2.3.2、6.2.3.3 による。

##### 6.2.3.1 ビーカー又はコニカルビーカー

容量  $100 \text{ mL} \sim 500 \text{ mL}$  のもの。

##### 6.2.3.2 加熱器

$110 \text{ }^\circ\text{C}$  以上に加熱可能なもの[5]。

##### 6.2.3.3 原子吸光光度計

金属元素を含む試料溶液を高温中で原子化させ、特定波長の光を照射すると原子が励起状態に遷移する。この光の吸収 (吸光度) を測定することで元素の定量を行うものである。原子吸光光度計の基本構成及び基本操作については、JIS K 0121 による。

## 6.2.4 操作

- a) ビーカに各々ろ紙を入れ、濃塩酸 15 mL、濃硝酸 1 mL を加え、水で約 50 mL に調製する[6]。
- b) 時計皿で蓋をし、加熱器で加熱し、約 10 mL になるまで濃縮する。この際、陽イオン交換ろ紙及び陰イオン交換ろ紙は沸騰が始まれば直ちにビーカから取り出し、メンブランフィルタは完全に溶解させる。
- c) 放冷後、ビーカの洗浄水も含め 20 mL に調製する。
- d) 原子吸光光度計で測定する。
- e) 測定時の金属不純物濃度  $I_c$  ( $\mu\text{g/L}$ ) に基づき、金属不純物濃度を式 (2) によって算出する。

$$C = \frac{I_c \times 20 \times 10^{-3}}{V} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $C$ : 金属不純物濃度 ( $\mu\text{g/L}$ )

$I_c$ : 測定時の金属不純物濃度 ( $\mu\text{g/L}$ )

$V$ : 試料量 (L)

## 6.3 高周波プラズマ質量分析法

### 6.3.1 適用する濃度範囲

適用する濃度範囲は、鉄で  $10^{-2} \mu\text{g/L} \sim 1.5 \times 10^0 \mu\text{g/L}$ 、銅、ニッケル及びクロムで  $10^{-2} \mu\text{g/L} \sim 2 \times 10^0 \mu\text{g/L}$ 、コバルトで  $10^{-3} \mu\text{g/L} \sim 2 \times 10^{-1} \mu\text{g/L}$  とする[4]。

### 6.3.2 試薬

#### 6.3.2.1 濃塩酸

JIS K 8180 に規定するもの。

#### 6.3.2.2 濃硝酸

JIS K 8541 に規定するもの。

### 6.3.3 器具及び装置

4.2.2 によるほか、次による。

#### 6.3.3.1 ビーカ又はコニカルビーカ

容量 100 mL ~ 500 mL のもの。

#### 6.3.3.2 加熱器

110 °C 以上に加熱可能なもの[5]。

#### 6.3.3.3 高周波プラズマ質量分析計

誘導結合プラズマを励起源として用いた無機元素分析の手法。励起させたイオンを直接質量分析計に導入する。高周波プラズマ質量分析計の基本構成及び基本操作については、JIS K 0133 による。

### 6.3.4 操作

- a) 6.2.4 a)~c)と同様に前処理を行う。金属イオンだけを測定する場合には試料水の前処理は不要である。
- b) 高周波プラズマ質量分析計で測定する。
- c) 測定時の金属不純物濃度  $I_c$  ( $\mu\text{g/L}$ ) に基づき、金属不純物濃度を式 (3) によって算出する。

$$C = \frac{I_c \times 20 \times 10^{-3}}{V} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $C$ : 金属不純物濃度 ( $\mu\text{g/L}$ )

$I_c$ : 測定時の金属不純物濃度 ( $\mu\text{g/L}$ )

$V$ : 試料量 (L)

## 7 品質保証

金属不純物の化学分析に係る品質保証活動については、原子力発電所全体の品質保証として、原子力施設の保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の基準に関する規則（令和2年原子力規制委員会規則第2号）に従って実施する。

---

### 参考文献

- [1] “原子炉水化学ハンドブック”，日本原子力学会編，コロナ社，p276，ISBN 978-4-339-06662-3 (2022)
- [2] “化合物命名法－IUPAC 勧告に準拠－（第2版）”，日本化学会命名法専門委員会編，東京化学同人，東京，ISBN 9784807908882 (2016)
- [3] “加圧水型原子炉一次系の水化学管理指針”AESJ-SC-S008:2019，（一社）日本原子力学会，p.92-p.93，ISBN 978-4-89047-417-2 (2019)
- [4] “沸騰水型原子炉の水化学管理指針” AESJ-SC-S007:202X，（一社）日本原子力学会，p.X，ISBN 978-4-89047-416-5 (202X)
- [5] **JIS B 8224**，“ボイラの給水及びボイラ水－試験方法”，p.142，(2022)
- [6] 大島哲央，“原子吸光分析法を用いるための分析法の実際”，実務表面技術，**Vol.22**，No.2，p.87-p.93(1975).

## 附属書 A (参考) サンプリング系統の例

### 序文

この附属書は、本体のサンプリング操作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 サンプリング系統の例

図 A.1 は、原子炉冷却材浄化系の主配管（母管）から分岐したサンプリング配管及びサンプリングを行う箇所までのサンプリング装置の例である。BWR の原子炉水は、高温高圧であるため、冷却器、減圧機構によって降温、減圧させ、試料をサンプリングする構造になっている。サンプリング配管への不溶解性の金属不純物等の付着を抑制するためにバイパスラインを設置している。

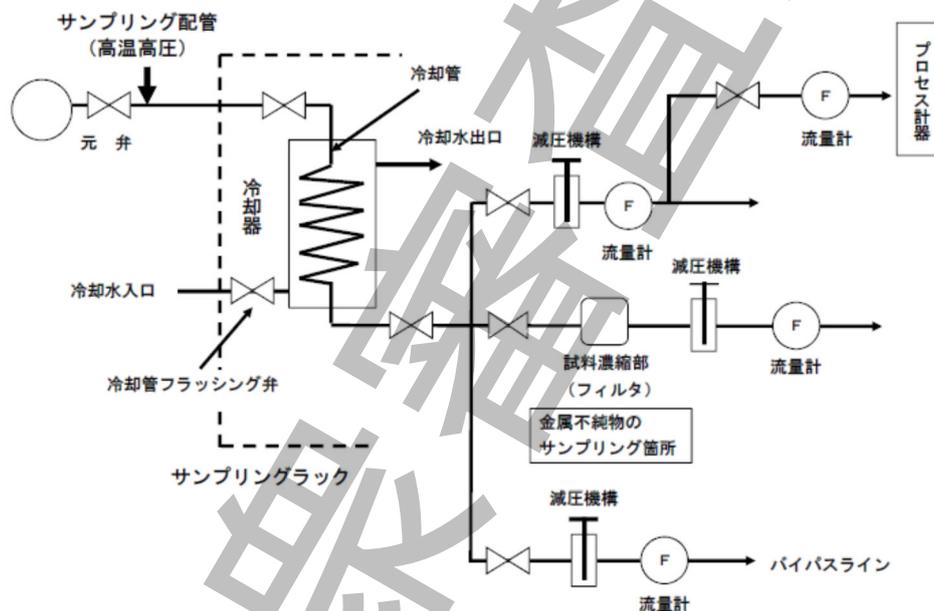


図 A.1—原子炉冷却材浄化系のサンプリングの冷却部及び減圧系統の例

### A.2 サンプリング操作

サンプリングホルダを使用して、メンブランフィルタ、陽イオン交換ろ紙、陰イオン交換ろ紙の順に、系統水を通してろ過を行い、試料をサンプリングする。

サンプリングに先立ち、配管及び装置内をサンプリング配管内の体積の 3 倍量以上[1]の原子炉水で置換えし、洗浄する。ただし、検出点からサンプリング箇所までの一部において原子炉水を連続的に流している場合は、当該部分の体積を含まない。

### 参考文献

- [1] “加圧水型原子炉一次系の水化学管理指針”AESJ-SC-S008:2019, (一社)日本原子力学会, p.92-p.93, ISBN 978-4-89047-417-2 (2019)

# AESJ-SC-S011:202X

## 沸騰水型原子炉の水化学分析方法 - 金属不純物:202X

### 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、標準の一部ではない。

#### 1 制定の趣旨

沸騰水型原子炉 (BWR) プラントでは、構造材料及び燃料の健全性維持、並びに被ばく線量低減のため、系統水に含まれる金属不純物を化学分析している。原子炉水等に含まれる金属不純物を精度良く定量分析するためには、試料のサンプリング、前処理及び測定を適切に行うことが重要である。BWR の水化学管理に用いる化学分析方法には、JIS などで標準化されているものもあるが、金属不純物については標準化された化学分析方法はない。このため、この標準は BWR で用いる金属不純物の化学分析方法を日本原子力学会標準として規定する。

#### 2 制定及び改定の経緯

この標準は、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。同標準は制定から 5 年が経過し、発電所の安全・安定運転の確保及び技術レベル維持・向上等の観点から、標準の見直しを行った。

制定の背景及び必要性を次に示す。

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、軽水炉の自主的安全性向上への取組みが必要とされ、原子力安全の確保及び継続的改善に資することを目的として“沸騰水型原子炉の水化学管理指針 2019”が制定された。同指針では、水化学管理の目的として、構造材料及び燃料被覆管の健全性維持、並びに作業従事者の被ばく低減を謳っているが、これらのうち、構造材料及び燃料被覆管の健全性維持は原子力安全における“放射線リスク源の閉じ込め”，作業従事者の被ばく低減は同じく“人と環境の防護”の達成に資するものである。すなわち、構造材料は原子炉冷却材圧力バウンダリを構成しており、その健全性維持を図ることによって冷却材漏えいリスクを低下させる。また、燃料被覆管は燃料及び核分裂生成物を収納しており、その健全性維持を図ることによって燃料破損のリスクを低下させる。これらはいずれも“放射線リスク源の閉じ込め”に大きく寄与している。一方、原子炉冷却材の水化学管理を適切に行うことによって一次系構造材料の付着放射能レベルを低減し、作業従事者の被ばく低減を達成することが可能となる。これは“人と環境の防護”に大きく寄与している。そのため、同指針では、システム全体の安全性確保に係る項目について、管理項目、診断項目、アクションレベル、アクションレベル逸脱時の措置等を規定し、適切に運用管理することを求めている。

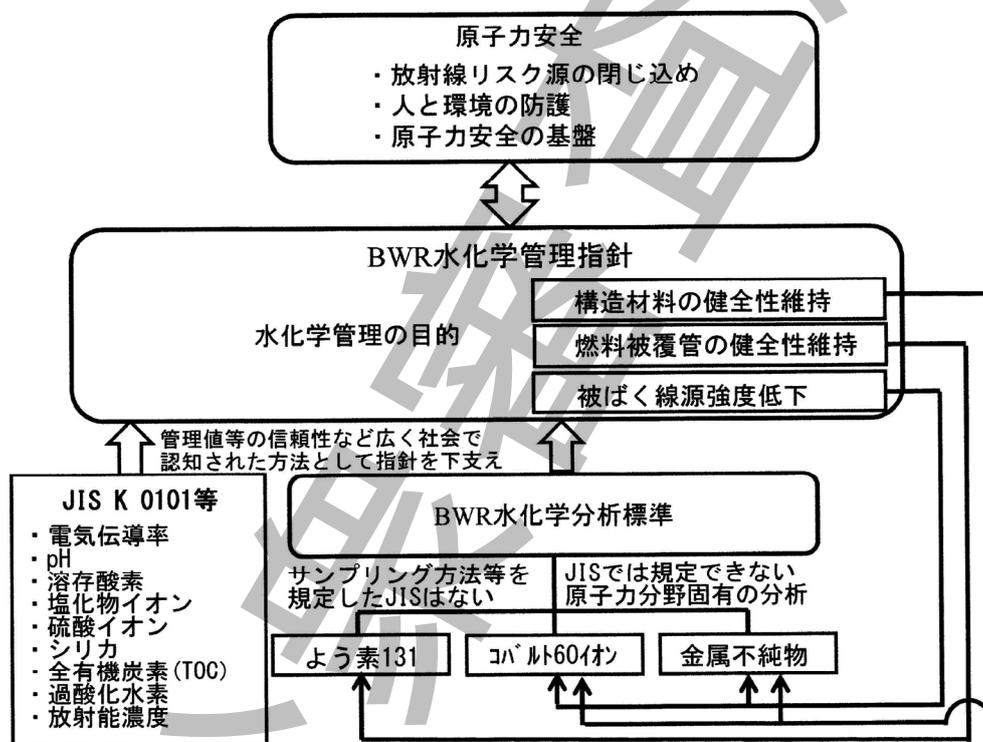
運用管理を適切に実施するためには、標準化した化学分析法に基づいて各項目を分析・評価する必要がある。これらの項目の中には既に JIS などによって化学分析手法が確立しているものも多くあるが、その一方で JIS などでは規定できない原子力分野固有の化学分析項目がある。具体的には、よう素 131、コバルト 60 イオン、金属不純物がそれに該当する。このうち、よう素 131 は、燃料破損が生じた時に原子炉冷却材中に漏えいする核分裂生成物を迅速に検知する核種であり、燃料被覆管の健全性維持を図る上で重要な分析項目である。また、コバルト 60 イオン及び金属不純物は、原子炉冷却材中の濃度を管理するこ

とで構造材料の腐食状態及び炉水放射能挙動を把握することができ、構造材料の健全性維持及び被ばく線源強度低下を図る上で重要な分析項目である。このように、BWR 水化学分析標準は、管理値等の信頼性などが広く社会に認知される方法として“沸騰水型原子炉の水化学管理指針”を下支えするものである。

前述のように、引用した文献に係る最新の知見及び動向、サンプリング操作並びに共洗い操作の記載の拡充を反映し、この標準を改定した。

**解説図 1**に、原子力安全と BWR 水化学管理指針及び BWR 水化学分析標準との関係を示した。

なお、BWR 水化学分析標準に対する原子力安全の要求事項は、上位概念の“沸騰水型原子炉の水化学管理指針”のそれと同一であり、原子力安全にかかわる深層防護のレベル 1 の異常・故障の発生防止及びレベル 2 の異常・故障の検知及び拡大防止に該当する安全基盤と位置付けられる。この体系が完成することで、標準的な化学分析方法による信頼性の高いデータの取得と化学分析技術の進歩に応じた改善等の PDCA が機能し、本来の自主的安全性向上の目的を達成することが可能となる。

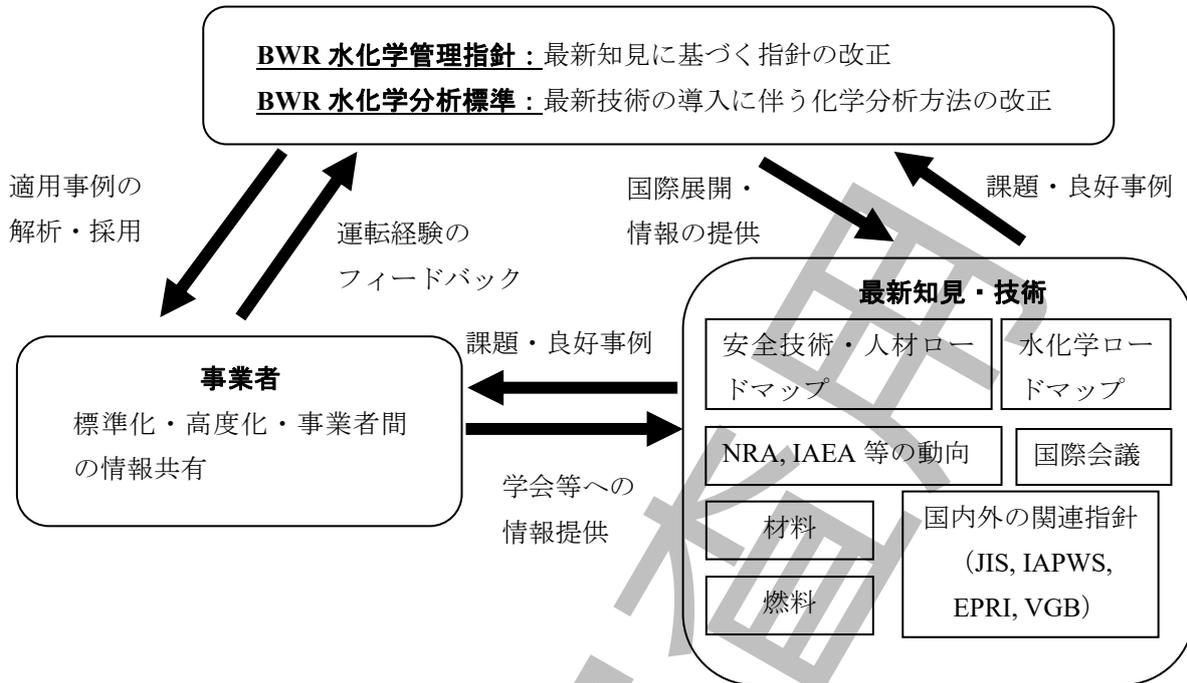


**解説図 1—BWR 水化学分析標準と原子力安全との関わり**

### 3 制定後のフォロー

水化学管理に係る化学分析方法の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。改良水化学の導入又は耐食性の優れた材料への変更などによって水化学管理指針のアクションレベル、推奨値等を見直す際に、必要に応じて関連する化学分析方法の改定を行う。また、国内外における新たな化学分析機器の導入及び化学分析方法の提案等を受け、化学分析方法の改定を行う。この標準を策定した後も、安全性向上に係る新知見を発電所の運用管理に適切に反映するため、プラントの運転経験及び新知見に基づく適用事例を解析しフィードバックを図ることによって、最新の化学分析技術を取り入れ、標準の改定を行

っていく（解説図 2 参照）。このような活動を通じて、BWR の継続的な安全性向上に寄与できるものと期待される。



**注記** NRA:原子力規制委員会, IAEA:国際原子力機関, IAPWS:国際水・蒸気性質協会, EPRI:米国電力研究所, VGB:欧州大規模発電事業者技術協会

解説図 2—BWR 水化学分析標準に最新知見を取込む仕組み

#### 4 審議中問題となった事項など

特に記載すべき事項はなかった。

#### 5 懸案事項

特に記載すべき事項はなかった。

#### 6 サンプルング方法の解説

原子炉水等には、溶解性及び不溶解性の金属不純物が含まれており、メンブランフィルタ及びイオン交換ろ紙に通水することで分離する。メンブランフィルタ及びイオン交換ろ紙をセットしたホルダをサンプルリング配管に直接設置し、通水量を増やすことで濃度の小さい金属不純物をメンブランフィルタ及びろ紙に濃縮することができる。

#### 7 サンプルング箇所

BWR における原子炉水等のサンプルング箇所と、それぞれのサンプルング箇所において金属不純物を化学分析する目的を 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5 に示す。

##### 7.1 原子炉水

原子炉水中の金属不純物は被ばく線量低減のために重要な項目であり、また、燃料被覆管表面に付着し、

熱伝達率を低下させる要因となることから化学分析を行う。原子炉水中の金属不純物は、原子炉給水から持ち込まれた腐食生成物又は原子炉内で発生した腐食生成物の燃料被覆管表面への付着、原子炉冷却材浄化系での除去、機器及び配管表面への付着、燃料付着物からの溶出等によってマスバランスが成り立っている。

## 7.2 給水

給水系の金属不純物は被ばく線量低減のために重要な項目であり、燃料健全性の保証及び給水系の腐食生成物の原子炉内への持込量を把握する観点から化学分析を行う。

## 7.3 復水脱塩装置出口水

復水脱塩装置出口水中の金属不純物は被ばく線量低減のために重要な項目であり、原子炉内に持ち込まれた場合、燃料被覆管に付着し熱伝達率を低下させる要因となるため、復水浄化設備における金属不純物の除去性能を把握する観点から化学分析を行う。

## 7.4 使用済燃料プール水

燃料の取扱いなどを容易に可能とするために使用済燃料プール水を清澄に維持する必要がある。使用済燃料プール水の清澄度に影響が出る要因は主に燃料付着不溶解性金属の剥離であることを考慮して、使用済燃料プール水の清澄度を把握するために使用済燃料プール水中の金属不純物の化学分析を行う。

## 7.5 復水貯蔵タンク水

復水貯蔵タンク水中の金属不純物は、原子炉水へ持ち込まれた場合、被ばく線量低減のために重要な項目であること、また、燃料被覆管表面に大量に付着した場合、熱伝達率を低下させる要因となることから化学分析を行う。

## 8 化学分析対象金属不純物

金属元素については、構造材などの金属材料を構成する金属元素を基に、金属不純物を管理する上で、一般的な金属元素としてクロム、鉄、コバルト、ニッケル、銅の5元素を選定している。

## 9 適用する測定範囲

金属不純物濃度の化学分析に当たり、メンブランフィルタ及びイオン交換ろ紙を用いて溶解性と不溶解性の金属不純物を分離してサンプリングすることができ、それによって、詳細に系統水の水質状況を把握することが可能となる。

金属元素のうち鉄、コバルト、ニッケル、銅の溶解性金属は陽イオンであるため、陰イオン交換ろ紙での測定対象としていない。

なお、クロム金属元素については、クロム単体では3価の陽イオンであるが、BWRの原子炉水等ではクロム酸イオン( $\text{CrO}_4^{2-}$ )として多く存在している。そのため、陰イオン交換ろ紙についてはクロム金属イオンだけ測定対象としている。

測定範囲については水化学管理指針で規定されたアクションレベル及び推奨値を定量可能な範囲として設定した。測定範囲外にて測定する必要がある場合は、通水量を調整するか、別途検量線用試料を調製して検量線を作成する。

## 10 精度

化学分析精度については、試料の調整などにも影響されるが、 $\mu\text{g/L}$ 濃度の試料の定量範囲における蛍光X線分析装置[1],[2]、原子吸光光度計[3]及び高周波プラズマ質量分析計[4]の化学分析精度は、2~10% [5]

である。

### 10.1 ブランクの測定

メンブランフィルタ、陽イオン交換ろ紙、陰イオン交換ろ紙を用いる場合、各々が内包している金属不純物量の確認及び管理として、メンブランフィルタ、陽イオン交換ろ紙、陰イオン交換ろ紙各々を製品ロットごとに、同一ロットについて複数枚測定し金属不純物量を確認する。

### 10.2 定期的な装置性能の確認

蛍光 X 線分析装置、原子吸光光度計及び高周波プラズマ質量分析計の定期的な性能確認、及び継続的な性能維持のための定期的な点検を行うことも重要である。詳細な解説は、**JIS K 0119**, **JIS K 0121**, **JIS K 0133** による。

## 11 定量分析用試料の調製

### 11.1 試料の汚染

試料は種々の原因で汚染し、化学分析誤差を招くので注意が必要である。サンプリングの場合にろ紙を用いる場合、特に表面の汚染は大きな化学分析誤差を生じさせる。試料調製時に注意が必要な汚染は次のとおりである。

- a) 試料表面への接触による汚染
- b) ビーカ等、用いる器具類の汚れからの汚染

### 11.2 試料の飛散

蛍光 X 線分析装置を用いる場合、メンブランフィルタに付着させた金属不純物が剥離、飛散すると、試料を正しく定量できないおそれがある。また、定量分析用試料は放射性物質によって汚染されているため、化学分析装置内部が放射性物質によって汚染する危険があり、さらに、分析者が放射性物質を体内に取り込むおそれがある。そのため、蛍光 X 線分析装置を用いて測定を行う場合は、ホルダに入れる等、操作の前に金属不純物の飛散防止対策を施す。

### 11.3 サンプリングホルダによるサンプリング

サンプリングホルダを使用してのろ過通水によるサンプリングに際しては、サンプリング配管の著しい流量変化が生じると、サンプリング配管に安定付着している金属不純物の剥離、又は、サンプリング配管材料からの金属不純物の溶出が発生するおそれがあるため注意する必要がある。

また、サンプリングホルダを取り付ける前に、サンプリング配管の長さなどを勘案し設定したブロー時間を設定し、都度ラインブローを行う必要がある。

### 11.4 メンブランフィルタ、陽イオン交換ろ紙、陰イオン交換ろ紙の乾燥

蛍光 X 線分析装置を用いて化学分析する場合には、前処理として乾燥器によるメンブランフィルタ、陽イオン交換ろ紙、陰イオン交換ろ紙の乾燥処理を行う。乾燥処理の場合は、試料にひずみ又は縮みといった現象が起きるため、乾燥温度と乾燥時間に注意を払う必要がある。

## 12 化学分析装置の選定について

各化学分析装置については、化学分析の迅速性、定量下限、操作性等を総合的に考慮し選定する。各化学分析方法を比較した表を**解説表 1**に示す。

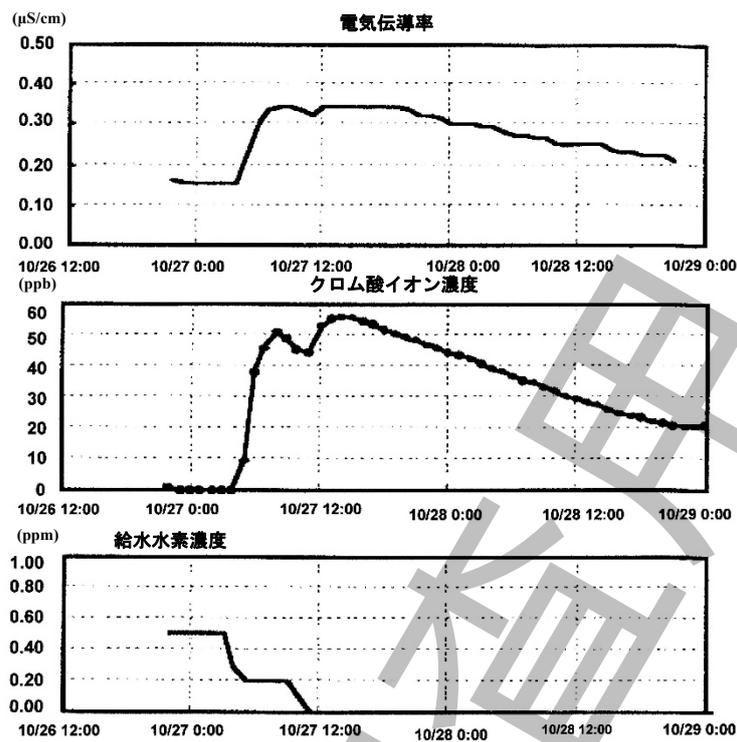
解説表 1—各化学分析装置の比較

化学分析装置	長所	短所
蛍光 X 線分析装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・化学分析の場合、試料を破壊しない。</li> <li>・前処理、測定が簡単である。</li> <li>・化学分析が迅速。</li> <li>・化学的狀態に影響されない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・試料濃度が定量範囲を逸脱した場合、試料希釈操作ができない。</li> </ul>
原子吸光分析装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・試料濃度が定量範囲を逸脱した場合、希釈によって元素ごとに測定が可能。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・多成分の試料を同時に測定することが難しい。</li> <li>・試料の前処理が必要。</li> </ul>
高周波プラズマ質量分析装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・多元素を同時に化学分析することができる。</li> <li>・検量線の直線範囲が広い。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・試料の前処理が必要。</li> </ul>

### 13 水素注入条件下でのクロムの化学形態について

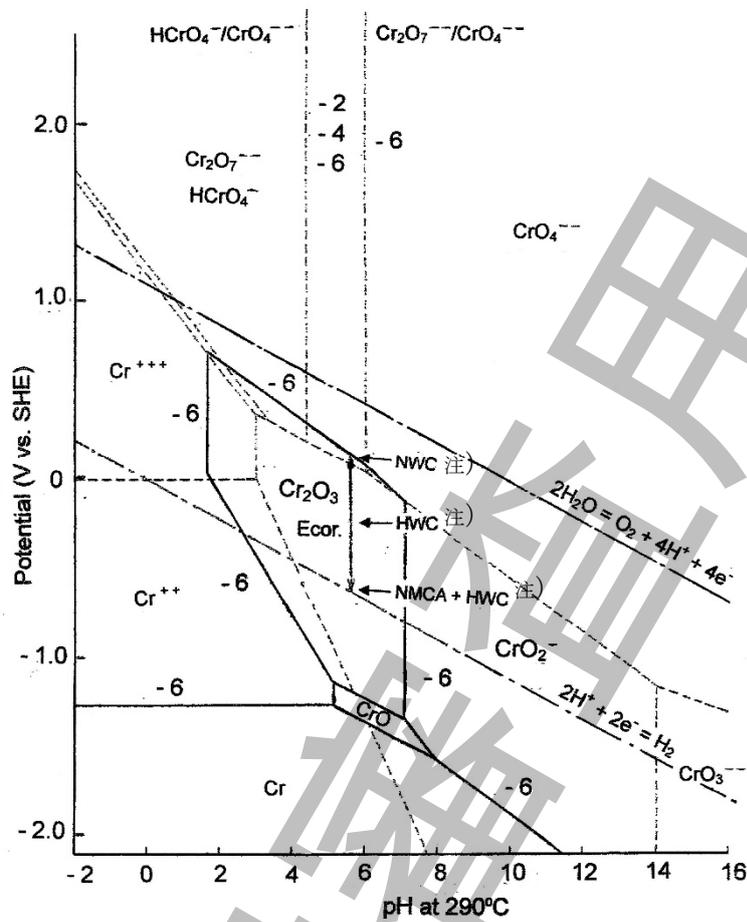
通常水化学環境では、クロム酸イオンが支配的なためイオンを主体的に管理するが、水素注入環境ではクロム酸化物が支配的となるので不溶性成分も併せて管理する必要がある。水素注入の停止時には、**解説図 3** に示すようにクロム酸濃度の急上昇によって、電気伝導率が急速に増加する[6]。290 °Cにおけるクロム-水系の電位-pH 図を**解説図 4** に示す[7]。また、同図中に通常水化学 (NWC) 適用時、水素水化学 (HWC) 及び貴金属注入 (NMCA+HWC) 適用時のステンレス鋼の腐食電位 (Corrosion Potential, Ecor.) のおおよその値を矢印で示す[8], [9]。水素注入及び貴金属注入条件下ではステンレス鋼の腐食電位は、**解説図 4** のクロムの電位-pH 図に示すようにクロム酸化物 (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Chromic oxide, 酸化クロム酸 (III))) の安定な不動態皮膜形成電位領域にある[7]。しかしながら、水素注入停止時では、これまで HWC 環境又は NMCA+HWC 環境下で安定化していたクロム酸化物が酸化性環境に変わることによってニクロム酸イオン (Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>) 及びクロム酸イオン (CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) として原子炉水中に溶出する。これに伴い、電気伝導率が一時的に上昇するが、原子炉冷却材浄化系による浄化が正常に機能していれば、一時的な上昇を抑えることができる[6]。

なお、原子炉水の温度条件 288 °Cでは、ニクロム酸イオン及びクロム酸イオンの両方が存在するが、250 °C以下になると、 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CrO}_4^{2-} + 2\text{H}^+$ の反応が進み、クロム酸イオンの方が、ニクロム酸イオンよりも安定で多く存在するようになる[7],[10],[11]。このため、室温でのサンプリング測定時には**解説図 3** に示すようにクロム酸イオンだけが検出されると考えられる。



(出典 : A.Fujimori, Y. Minagawa and M. Arai, "Variation of Water Chemistry Parameters under HWC Conditions", 1998 JAIF International Conference on Water Chemistry in Nuclear Power Plants, p218-224, (1998).)

解説図 3-水素注入停止時の炉水水質変化



**注記** NWC：通常水化学適用時の 304 ステンレス鋼の腐食電位  
 HWC：水素水化学適用時の 304 ステンレス鋼の腐食電位  
 NMCA+HWC：貴金属注入適用時の 304 ステンレス鋼の腐食電位

(出典：平野秀朗，黛正己，黒沢辰雄，“高温水におけるステンレス鋼の応力腐食割れに及ぼす溶存酸素の影響”，防食技術，Vol.31, No.8, p.517-p.525, (1982).)

解説図 4-290 °Cにおけるクロム-水系の電位-pH 図

**参考文献**

- [1] 村山正樹, 西川奈緒美, 丸山和晃, “蛍光 X 線分析装置の定量分析精度に関する解析”, 三重県科学技術振興センター工業研究部研究報告 28 号, p.115-p.122
- [2] “波長分散型蛍光 X 線分析装置の原理と応用”, JAIMA 一般社団法人 日本分析機器工業会
- [3] 保田和雄, 松平俊次, 佐藤繁, 菅原理夫, 竹内久祐, “原子吸光分析の研究”, 日立評論, Vol.44, No.8, p.38-p.46(1962)
- [4] 森田昌敏, “ICP 質量分析法”, 計測と制御, **Vol.31**, No.1, p.186-p.188 (1992).
- [5] JIS B 8224, “ボイラの給水及びボイラ水—試験方法”, p.106 p.110, p.118, p.119 (2022)
- [6] A.Fujimori, Y. Minagawa and M. Arai, “Variation of Water Chemistry Parameters under HWC Conditions”, 1998 JAIF International Conference on Water Chemistry in Nuclear Power Plants, p.218-p.224, (1998).
- [7] 平野秀朗, 黛正己, 黒沢辰雄, “高温水におけるステンレス鋼の応力腐食割れに及ぼす溶存酸素の影響”, 防食技術, **Vol.31**, No.8, p.517-p.525, (1982).
- [8] S. Uchida, H. Takiguchi and D. H. Lister, “Instrumentation for Monitoring and Control of Water Chemistry for Light-Water-Cooled Nuclear Power Plants”, Power Plant Chemistry, **12**[5], 278-295, (2010).
- [9] Y.J.Kim, "Effect of Noble Metal Addition on Electrochemical Polarization Behavior of Hydrogen Oxidation and Oxygen Reduction on Type 304 Stainless Steel in High-Temperature Water", Corrosion, p.456-p.461, (1999).
- [10] EPRI NP-3137, “Computer-Calculated Potential pH Diagrams to 300°C, Volume1: Executive Summary”, (1983).
- [11] EPRI NP-3137, “Computer-Calculated Potential pH Diagrams to 300°C, Volume 2: Handbook of Diagrams”, (1983).