



AESJ-SC-S010:202X

(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

－ コバルト 60 イオン:202X

202X 年 X 月

一般社団法人 日本原子力学会

入 参 保 租 用

入
参
保
粗
用

入
参
保
租
民

まえがき

“沸騰水型原子炉の水化学分析方法 — コバルト 60 イオン：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、被ばく低減による作業従事者の安全性確保の観点から、冷却材のコバルト 60 イオン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、高温高压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 などでは標準化されていない原子炉水に含まれるコバルト 60 イオン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、作業従事者の被ばく線量低減のため、原子炉水に含まれるコバルト 60 イオン濃度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、通常運転時の原子炉水のコバルト 60 イオンの推奨値及び分析頻度が規定されています。コバルト 60 は γ 線放出核種で、その濃度はゲルマニウム検出器を用いて計測されますが、信頼性の高い定量分析では計測前に試料から不溶解性の金属不純物を分離する化学操作が重要です。この標準では、コバルト 60 イオン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 - Cobalt 60 ion : 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 cobalt 60 ion concentration of reactor coolant for the purpose of contributing to 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 water 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 cobalt 60 ion concentration of reactor coolant as AESJ standards, which have not been standardized in Japanese Industrial Standards (JIS). In BWRs, cobalt 60 ion concentrations of reactor coolant are analyzed to reduce the personnel exposure dose, and the Water Chemistry Guidelines for Boiling Water Reactors specifies the recommended value and analysis frequency of cobalt 60 ion of reactor coolant under plant normal operation. Cobalt 60 is a gamma ray emitting nuclide and the concentration of cobalt 60 ion is measured using a germanium detector. In a reliable quantitative analysis, it is important to eliminate insoluble metal impurities in sampling before measurement. This standard stipulates concretely general items for cobalt 60 ion 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 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。

入
参
保
租
民

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 一般事項	2
4.1 化学分析方法の通則	2
4.2 化学分析に用いる器具類及び水	2
4.3 放射性試料の取扱い	2
5 サンプルング	2
5.1 試料容器	2
5.2 サンプルング操作	2
6 化学分析方法	2
6.1 陽イオン交換フィルタ法	2
6.2 ろ過法	4
7 品質保証	5
附属書 A（参考）サンプルング系統の例	6
解説	7

入
参
保
粗
田

日本原子力学会標準
沸騰水型原子炉の水化学分析方法
—コバルト 60 イオン：202X

The Water Chemistry Analysis Methods of Boiling Water Reactor
- Cobalt 60 ion : 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、通常運転時の原子炉水の推奨値及び測定頻度が規定された被ばく線量に大きく寄与するコバルト 60 イオン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

この標準は、運転中における BWR 原子炉水から試料を採取し、コバルト 60 イオン濃度を定量するための化学分析方法について規定する。

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 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 R 3503 化学分析用ガラス器具

JIS R 3505 ガラス製体積計

JIS Z 1703 ポリエチレンびん

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、次による。

3.1

陽イオン交換フィルタ法 (cation exchange filter method)

採取試料中のコバルト 60 イオンを陽イオン交換ろ紙に吸着させて測定する方法

3.2

ろ過法 (filtration method)

採取試料中のコバルト 60 イオンを含んだ原子炉水をメンブランフィルタによってろ過し、ろ過後の原子炉水を測定する方法

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 化学分析に用いる器具類及び水

4.2.1 器具類

4.2.1.1 ガラス器具

JIS R 3503 に規定するもの。

4.2.1.2 メスシリンダ

JIS R 3505 に規定するもの。

4.2.1.3 メンブランフィルタ

孔径 0.45 μm の網目をもつ外径 25 mm～47 mm のろ紙とする。

4.2.1.4 ゲルマニウム検出器

ゲルマニウム単結晶を半導体として用いる放射線検出器とする (**JIS Z 4001** 参照)。

4.2.2 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、ろ紙及びイオン交換樹脂は放射性廃棄物として処理する。

5 サンプルング

5.1 試料容器

JIS Z 1703 に規定する試料容器 (例 共栓つきポリエチレンびん) 又は相当品とする。

5.2 サンプルング操作

試料のサンプルングに当たっては、配管及び装置内をサンプルング配管内の体積の 3 倍量以上[1]の原子炉水で置換し、洗浄する。ただし、検出点からサンプル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。試料容器は、試料水で共洗いし、その後、試料をサンプルングする。共洗い回数は 3 回程度とすることが望ましい (**附属書 A** 参照)。

6 化学分析方法

6.1 陽イオン交換フィルタ法

6.1.1 適用する濃度範囲

適用する濃度範囲は、 $2 \times 10^{-2} \text{ Bq/mL} \sim 1 \times 10^3 \text{ Bq/mL}$ とする。

6.1.2 器具及び装置

4.2.1 によるほか、次による。

6.1.2.1 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ろ紙とする。

6.1.2.2 吸引ろ過装置

真空ポンプ又はアスピレータによって減圧し、真空度を調整可能なもの。吸引ろ過装置の一例を図 1 に示す。

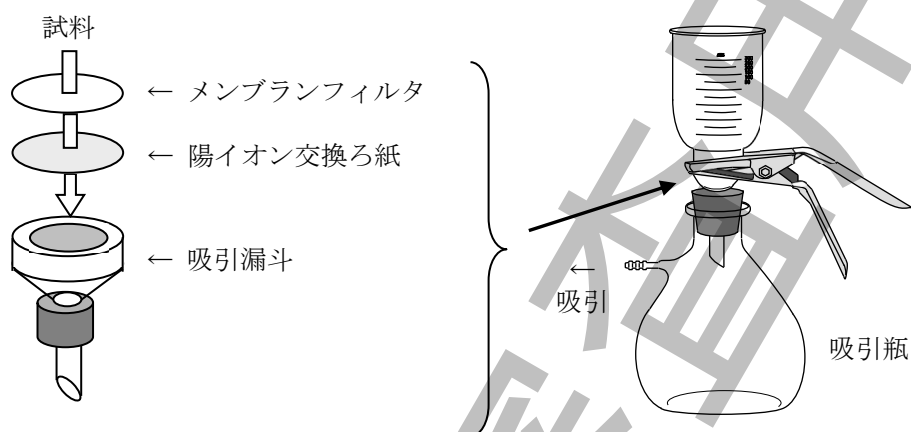


図 1ー陽イオン交換フィルタ法における吸引ろ過装置の例

6.1.3 操作

- メスシリンダは試料水で共洗いし、その後量り取る。共洗い回数は 3 回程度とすることが望ましい。また、メスシリンダへのコバルト 60 イオンの付着を考慮し、水にて洗い流す。
- 図 1 に示すとおり、吸引ろ過装置に下から陽イオン交換ろ紙 1 枚及びメンブランフィルタ 1 枚の順にセットし、ろ過速度が 100 mL/min [2]以下となるように真空度を調整して、試料を吸引ろ過する。さらに通水し、洗浄を行う。陽イオン交換ろ紙に通水する試料が少ない場合には、陽イオン交換ろ紙にコバルト 60 イオンが均一に分布するように、必要に応じて水で試料を適切に希釈してから通水する。メンブランフィルタによって不溶性金属不純物を除去した後に、コバルト 60 イオンを陽イオン交換ろ紙に吸着させ、ゲルマニウム検出器にて測定する。
- 放射能濃度の測定は、図 1 に示す陽イオン交換ろ紙をゲルマニウム検出器にセットし、コバルト 60 イオンのガンマ線のピーク面積からバックグラウンドを差し引いて、式 (1) によって測定時のコバルト 60 イオン濃度を求める[3],[4]。

$$I_c = \frac{N_{\text{net}}}{I_\gamma \times t \times V \times E/100} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 I_c : 測定時のコバルト 60 イオン濃度 (Bq/mL)

N_{net} : ピークの正味計数値 (ピーク面積) (counts)

I_γ : γ 線放出割合 (—)

t : 計数時間 (s) ¹⁾

V : 試料量 (mL)

E : 計数効率 (%)

注 1) 計数時間は、試料形状、検出器からの距離、検出器の性能などを考慮し、コバルト 60 イオン濃度 2×10^{-2} Bq/mL を計測できる時間とする。

6.2 ろ過法

6.2.1 適用する濃度範囲

適用する濃度範囲は、 2×10^{-2} Bq/mL $\sim$ 1×10^3 Bq/mL とする。

6.2.2 器具及び装置

4.2.1 によるほか、次による。

6.2.2.1 吸引ろ過装置

真空ポンプ又はアスピレータによって減圧し、真空度を調整可能なもの。吸引ろ過装置の一例を図 2 に示す。

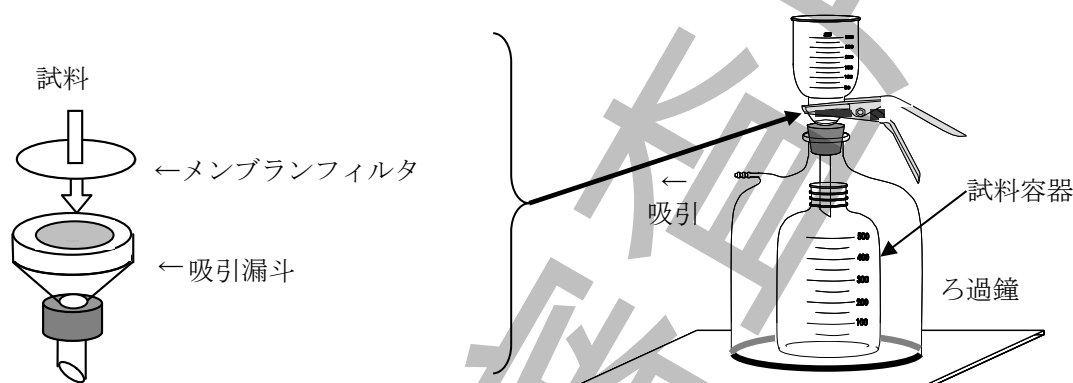


図 2—ろ過法における吸引ろ過装置の例

6.2.3 操作

- メスシリンダは試料水で共洗いし、その後量り取る。共洗い回数は 3 回程度とすることが望ましい。また、メスシリンダへのコバルト 60 イオンの付着を考慮し、水にて洗い流す。
- 図 2 に示すとおり、メンブランフィルタ 1 枚をセットし、不溶性金属不純物を除去した試料水をろ過速度が 100 mL/min[2]以下となるように真空度を調整して、吸引ろ過する。さらに、通水し、洗浄を行う。この試料容器を用いてゲルマニウム検出器にて測定する。
- ゲルマニウム検出器での測定用の試料容器は、校正用標準線源容器の形状等を考慮し選択する。
- 放射能濃度の測定は、図 2 に示する過後の溶液をゲルマニウム検出器にセットし、コバルト 60 イオンのガンマ線のピーク面積からバックグラウンドを差し引いて、式 (2) によって測定時のコバルト 60 イオン濃度を求める[3],[4]。

$$I_c = \frac{N_{\text{net}}}{I_\gamma \times t \times V \times E/100} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 I_c : 測定時のコバルト 60 イオン濃度 (Bq/mL)

N_{net} : ピークの正味計数値 (ピーク面積) (counts)

I_γ : γ 線放出割合 (—)

t : 計数時間 (s) ¹⁾

V : 試料量 (mL)

E : 計数効率 (%)

注¹⁾ 計数時間は、試料**形状**，検出器からの距離，検出器の性能などを考慮し，コバルト 60 イオン濃度 2×10^{-2} Bq/mL を計測できる時間とする。

7 品質保証

コバルト60イオン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] “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)
- [2] “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)
- [3] 原子力規制庁, “ゲルマニウム半導体検出器による γ 線スペクトロメトリー”, 放射能測定法シリーズ No.7, (公財)日本分析センター, (2020)
入手先: <<https://www.kankyo-hoshano.go.jp/wp-content/uploads/2020/12/No7.pdf>>
- [4] 村上悠紀雄, 團野皓文, 小林昌敏他, “放射線データブック”, 地人書館, p.146, ISBN 978-4-8052-0161-9 (4-8052-0161-4) (1982)

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（母材）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、高温高压であるため、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。

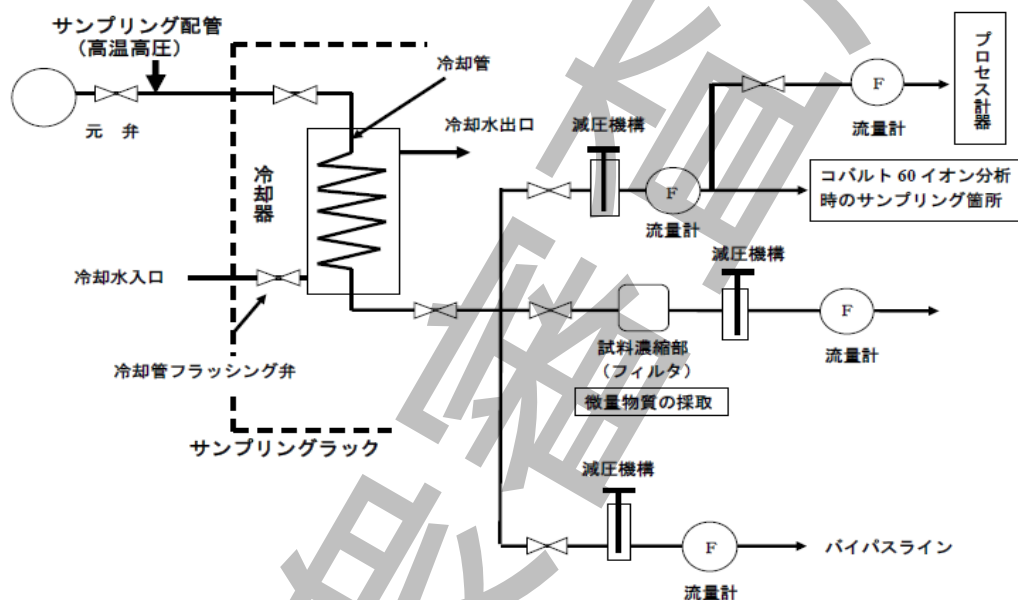


図 A.1—原子炉冷却材浄化系のサンプリングの冷却部及び減圧系統の例

A.2 サンプリング操作

サンプリング箇所から試料を試料容器にサンプリングする。

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。試料容器は、試料水で共洗いし、その後、試料をサンプリングする。共洗い回数は 3 回程度とすることが望ましい。

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-S010:202X

沸騰水型原子炉の水化学分析方法 - コバルト 60 イオン : 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、作業従事者の被ばく線量低減のため、発電所の水化学管理部門においては通常運転時の原子炉水に含まれるコバルト 60 イオンを監視している。原子炉水に含まれるコバルト 60 イオン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コバルト 60 イオン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 で用いるコバルト 60 イオンの化学分析方法を日本原子力学会分析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り組みが必要とされ、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。

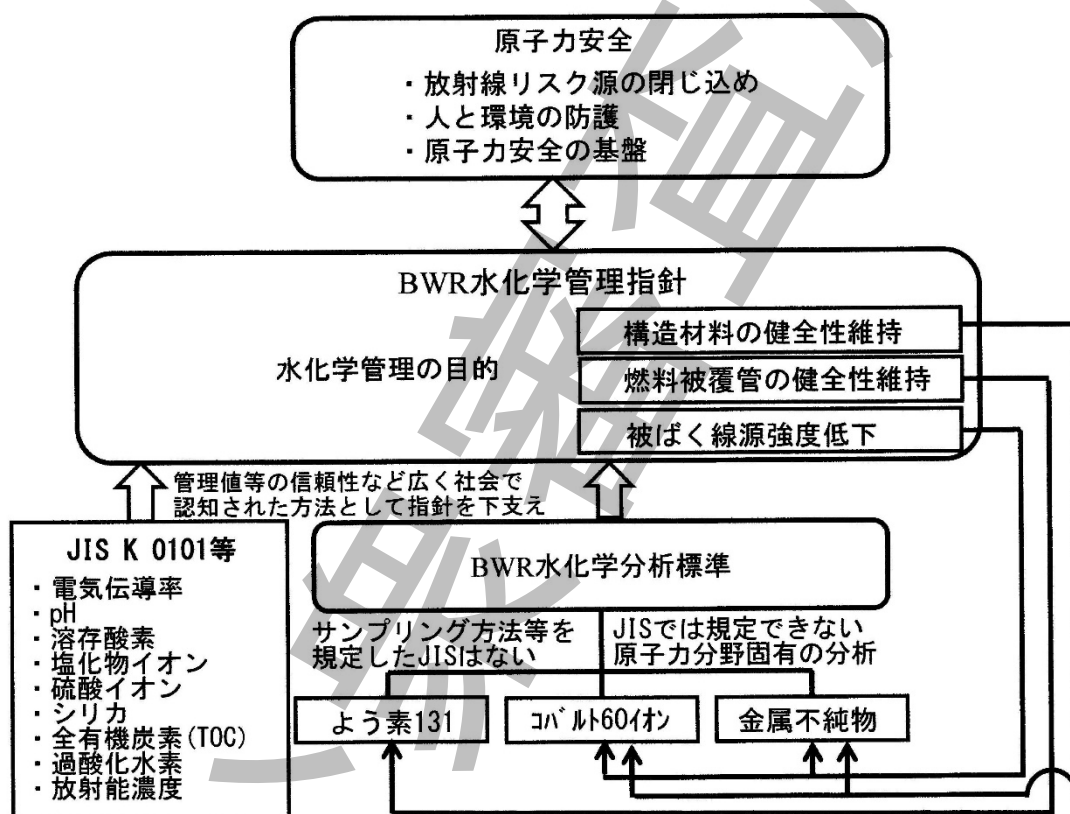
運用管理を適切に実施するためには、標準化した化学分析法に基づいて各項目を分析・評価する必要がある。これらの項目の中には既に JIS などによって化学分析手法が確立しているものも多くあるが、その一方で JIS などでは規定できない原子力分野固有の化学分析項目がある。具体的には、よう素 131、コバルト 60 イオン、金属不純物がそれに該当する。このうち、よう素 131 は燃料破損が生じた時に原子炉冷却材中に漏えいする核分裂生成物を迅速に検知する核種であり、燃料被覆管の健全性維持を図る上で重要な分析項目である。また、コバルト 60 イオン及び金属不純物は、原子炉冷却材中の濃度を管理することで

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、原子力安全に関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。

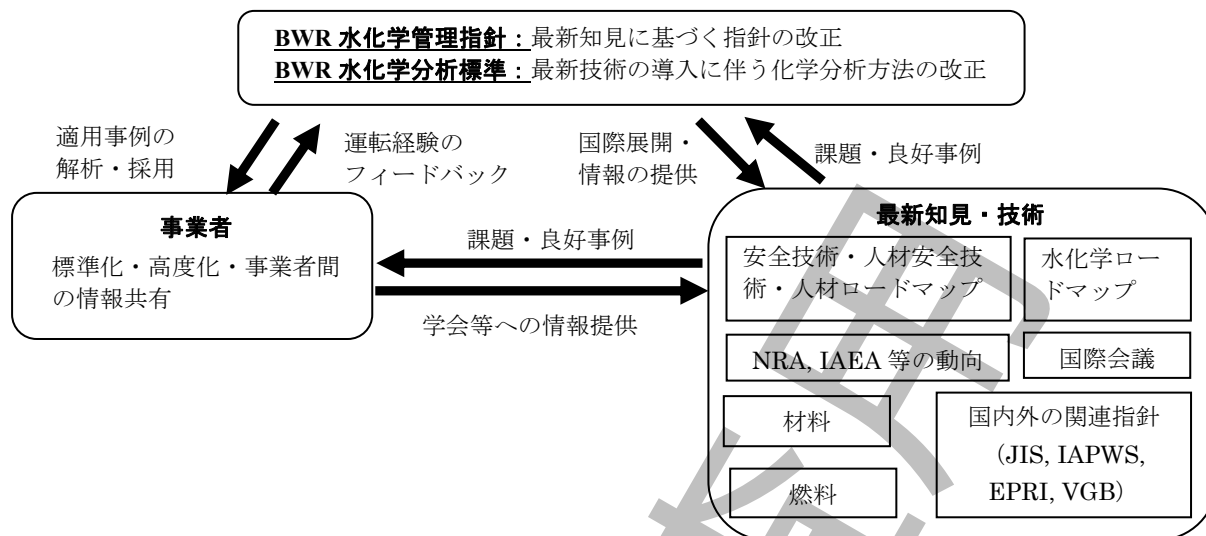


解説図 1—BWR 水化学分析標準と原子力安全との関わり

3 制定後のフォロー

水化学管理に関わ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 化学分析方法の解説

原子炉水に含まれるコバルト 60 イオンを化学分析する方法を述べる。利用する化学分析方法には、陽イオン交換フィルタ法及びろ過法があり、計数効率、特徴等を考慮し、適切に選定する（解説 10 参照）。

6.1 陽イオン交換フィルタ法

採取した原子炉水には、溶解性の放射性イオン成分及び不溶解性の放射性金属不純物（以下、“放射性クラッド”という。）が含まれており、メンブランフィルタによって放射性クラッドを除去した後に、陽イオン交換ろ紙にコバルト 60 イオンを吸着させて測定用試料として採取する。吸引漏斗へは、6.1.2.2 の図 1 に示すとおり、上からメンブランフィルタ及び陽イオン交換ろ紙の順にセットする。

なお、6.1.2.2 の図 1 に示すように 1 枚目にセットしたメンブランフィルタにて放射性クラッドを測定用試料として採取することができ、また、陰イオン交換ろ紙をセットすることによって放射性陰イオンを同時に採取することができる。

6.2 ろ過法

採取した原子炉水には、溶解性の放射性イオン成分及び放射性クラッドが含まれている。6.2.2.1 の図 2 に示すとおり、メンブランフィルタによって放射性クラッドを除去し、ろ過後の原子炉水を測定用試料として採取する。

7 放射能測定

ゲルマニウム検出器による計測方法は、“ゲルマニウム半導体検出器によるγ線スペクトロメトリー”[1]に基づき実施する。

7.1 ゲルマニウム検出器

放射能測定に用いるゲルマニウム検出器の仕様例を次に示す。

- － 25 cm 相対効率：10 %～40 %
- － 1 333 keV において FWHM（半値幅）：1.6 keV～2.2 keV
- － 1 333 keV において FWTM（1/10 値幅）：3.5 keV～4.2 keV
- － ピーク・コンプトン比：30：1 以上（コバルト 60 1 333 keVγ 線に対して）

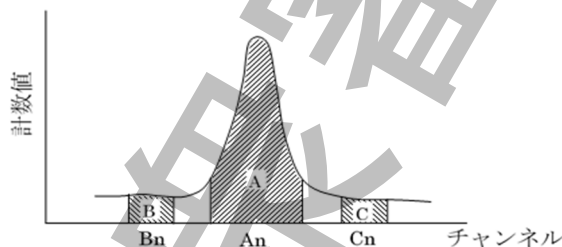
7.2 ピークの正味計数値及び誤差

γ 線エネルギーに相当するピークの正味計数値（以下，“ピーク面積”という。）は，独立したピーク及び複合ピーク，妨害ピークがある場合などについて計算方法が示されている[1]。例として解説図 3 に示すような独立したピークでのピーク面積及び標準偏差は次のように求められる。

ピーク中心領域の A 及びピーク中心から低エネルギー側及び高エネルギー側に対して目的とするピーク領域と同じチャンネル数とした B，C 領域の計数値を用いて，ピーク面積及びその標準偏差は次のように計算される。したがって，精度よく放射能測定を行うためにはピーク領域に含まれるバックグラウンドを十分に下げることが重要である。

コベル法とは，ピーク領域（解説図3のA領域）のカウント数からベースライン領域（解説図3のB及びC領域）のカウント数を引くことでピーク面積を求める方法である。

$$\begin{aligned} \text{ピーク面積} & N_{\text{net}} = A - B - C \\ \text{ピーク面積の標準偏差} & \sigma N = \sqrt{A + B + C} \end{aligned}$$



解説図 3ーコベル法によるピーク面積

7.3 不感時間¹⁾

不感時間については計測器側で測定時間を補正するが，過度に不感時間が大きいとエネルギー直線性及びエネルギー分解能に影響するため，放射エネルギーを調整する必要がある。

注 ¹⁾ 入力した信号を多重波高分析器が処理していて次のデータを受け付けることのできない時間の和，又は測定時間に対するパーセントをいう。

7.4 放射能減衰補正

放射能の減衰補正の式を式（1）に示す[1]。

$$I = I_0 \times \exp(\lambda t_1) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで， I ：減衰補正後のコバルト 60 イオン濃度（Bq/mL）

I_0 ：測定時のコバルト 60 イオン濃度（Bq/mL）

λ ：崩壊定数（ min^{-1} ）

t_1 ：減衰時間（min）

7.5 放射能測定への影響緩和

コバルト 60 は、半減期が 5.27 年と十分長く、また、 γ 線エネルギーは 1 MeV を超えるエネルギーであり、妨害核種となるものがほとんどなく、放射能測定への影響緩和は必要としない。

8 適用する濃度範囲

適用する濃度範囲については、試料形状、検出器からの距離、検出器の性能などに応じて可変である。濃度として 2×10^{-2} Bq/mL[2]～ 1×10^3 Bq/mL[3]を濃度範囲としたが、試料量、計測時間などの選択によって濃度範囲を拡張できる。ただし、その場合には総合精度の検証を要する点に留意する。

9 総合精度

総合精度は、陽イオン交換フィルタ法又はろ過法による操作における誤差²⁾及びゲルマニウム検出器による計測での誤差となり、計測誤差が大きく寄与することとなる。この標準に規定した計測条件を適切に選定することによってコバルト 60 イオン濃度の計数誤差は大きくても 15 %程度であり、大きくても総合精度としては 20 %程度が得られる[4],[5],[6]。被ばく線量に影響する線源の状況を把握することを目的とした本化学分析項目においては、20 %程度の総合精度が得られれば十分に検知することができるため、化学分析方法としては妥当である。

注記 この標準の化学分析方法に用いる装置及び器具などは、それぞれ固有の許容誤差をもつ。誤差表示についてできるだけ客観的に表示することを第一義とする観点から、それらの許容誤差に基づき式 (2) で計算される値を総合精度 P とするのが適切である。

$$P = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + \dots} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 a , b , c , $\dots$ は、装置及び器具などがもつ許容誤差を示す。

注²⁾ クラッド成分の除去のために用いるろ紙のロットが変わった場合、ろ紙を 2 枚重ねることによって捕集効率を求めることができる。

10 各化学分析方法の比較

各化学分析方法における計数効率の比較を示す。

陽イオン交換フィルタ法は、イオン交換ろ紙（外形 47 mm 程度）に濃縮するため、大きな計数効率で測定可能である。

ろ過法は、イオン交換ろ紙を用いないため、濃縮がないことから比較的計数効率は小さくなる。

なお、妨害核種の影響、化学分析の煩雑さ及び化学分析精度については、二つの化学分析方法は同等である。

参考文献

- [1] 原子力規制庁, “ゲルマニウム半導体検出器による γ 線スペクトロメトリー”, 放射能測定法シリーズ No. 7, (公財) 日本分析センター, (2020)
入手先: <<https://www.kankyo-hoshano.go.jp/wp-content/uploads/2020/12/No7.pdf>>
- [2] “発電用軽水型原子炉施設における放出放射性物質の測定に関する指針”, (昭和 53 年 9 月 29 日原子力委員会決定 一部改訂平成 13 年 3 月 29 日原子力安全委員会)
入手先: <<https://www.nsr.go.jp/>>
- [3] Motohiro AIZAWA, Yoshinori CHIBA, Hideyuki HOSOKAWA, Katsumi OHSUMI, Shunsuke UCHIDA & Noboru ISHIZAWA, “A Mechanism for Corrosion Product Deposition on the Carbon Steel Piping in the Residual Heat Removal System of BWRs”, *Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY*, Vol. 39, No. 10, p. 1041–1050 (2002).
- [4] “沸騰水型原子炉の水化学分析方法—よう素 131 : 202X”, **AESJ-SC-S009:202X**, (一社) 日本原子力学会, p.18, ISBN 978-4-89047-423-3 (202X)
- [5] 海野泰裕, 柚木 彰, 三浦 勉, 濱松潮香, 八戸真弓, 等々力節子, “玄米試料を用いた放射能測定の技能試験”, *RADIOISOTOPES*, 65, 181-190 (2016).
- [6] IAEA/AQ/51 : IAEA-RML-2015-01 “Proficiency Test for Determination of Radionuclides in Sea Water”, IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 51.