

NRA 技術報告

NRA Technical Report Series

廃止措置の終了確認における敷地土壌等の状況の技術的判定方法

Determination Methods of Condition of Soil etc. on
Confirmation of Completion of Decommissioning

大塚 楓¹ 島田 太郎² 高橋 宏明¹

OTSUKA Kaede, SHIMADA Taro and TAKAHASHI Hiroaki

¹原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ 放射線・廃棄物研究部門

Division of Research for Radiation Protection and Radioactive Waste Management, Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

²国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

安全研究・防災支援部門 安全研究センター 燃料サイクル安全研究ディビジョン
廃棄物・環境安全研究グループ

Waste and Environmental Safety Research Group, Fuel Cycle Safety Research Division, Nuclear Safety Research Center, Japan Atomic Energy Agency

原子力規制委員会

Nuclear Regulation Authority

令和6年5月

May 2024

本報告は、原子力規制庁長官官房技術基盤グループが行った安全研究等の成果をまとめたものです。原子力規制委員会は、これらの成果が広く利用されることを期待し適時に公表することとしています。なお、本報告の内容を規制基準、評価ガイド等として審査や検査に活用する場合には、別途原子力規制委員会の判断が行われることとなります。

本報告の内容に関するご質問は、下記にお問い合わせください。

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 放射線・廃棄物研究部門
〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル
電話：03-5114-2225
ファックス：03-5114-2235

廃止措置の終了確認における敷地土壌等の状況の技術的判定方法

大塚 楓¹ 島田 太郎² 高橋 宏明¹¹原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ
放射線・廃棄物研究部門²国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
安全研究・防災支援部門 安全研究センター 燃料サイクル安全研究
ディビジョン 廃棄物・環境安全研究グループ

要 旨

原子炉又は原子力事業を廃止するときは、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年法律第 166 号）に基づき、あらかじめ原子力規制委員会の認可を受けた廃止措置計画に従って廃止措置を実施し、廃止措置が終了したときは、その結果が「原子力規制委員会規則で定める基準」に適合していることについて、原子力規制委員会の確認を受けなければならない。しかし、その確認の具体的な方法は定められておらず、2016 年に受けた国際原子力機関の総合規制評価サービスミッションにおいて、廃止措置の終了後におけるサイト解放に関する基準を規定すべきであることが指摘された。これを受けて、原子力規制委員会は 2022 年に「廃止措置の終了確認における敷地土壌等の状況の判定に関するガイド」（令和 4 年 3 月 30 日、原子力規制委員会）を制定した。

同ガイドで定めている敷地土壌等の放射線測定による判定方法を適切に実施するには、試料の採取方法を具体的に定めた方がよいと考えられる。また、同ガイドは東京電力福島第一原子力発電所事故に由来するフォールアウト（以下「1F フォールアウト」という。）の影響を受けた廃止措置対象施設は対象外としているが、東日本の一部地域においては 1F フォールアウトの影響が無視できないと考えられる。そこで、本技術報告では、平成 29 年度から令和 2 年度にかけて国立研究開発法人日本原子力研究開発機構で実施した委託研究「廃止措置・クリアランスに関する検討」の成果等を踏まえ、1F フォールアウトの影響がない場合及び影響がある場合の廃止措置対象施設に係る土壌及び残存施設について、試料の採取方法を含む判定方法の一例を提案する。

Determination Methods of Condition of Soil etc. on Confirmation of Completion of
Decommissioning

OTSUKA Kaede¹, SHIMADA Taro², and TAKAHASHI Hiroaki¹

¹Division of Research for Radiation Protection and Radioactive Waste Management,
Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

² Waste and Environmental Safety Research Group, Fuel Cycle Safety Research Division, Nuclear
Safety Research Center, Japan Atomic Energy Agency

Abstract

Based on the Act on Regulation of Nuclear Source Materials, Nuclear Fuel Materials and Reactors (Act No. 166 of 1957), a licensee shall develop a decommissioning plan and submit it to the Nuclear Regulation Authority (hereinafter referred to as “NRA”) when a nuclear power reactor or nuclear power business is to be decommissioned. When the decommissioning is completed, the result shall be confirmed by the NRA as being in compliance with the "criteria specified by the NRA”, but no specific method has been established. As a result of Integrated Regulatory Review Service which was conducted in 2016, the International Atomic Energy Agency advised that criteria be established for site release after the completion of decommissioning. In response of the advice, the NRA issued “The guide for determining the condition of site soil etc.” in 2022.

To properly implement the Guide, it was considered that a specific method for collecting samples should be identified. Moreover, the Guide does not cover facilities affected by the fallout from the TEPCO’s Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident (hereinafter referred to as "1F fallout"). The Secretariat of the NRA had commissioned the research to the Japan Atomic Energy Agency (hereinafter referred to as “JAEA”) between 2019 and 2022, in order to develop determination methods of condition of soil etc., of the decommissioning facility affected by 1F fallout. This report proposes one of the determination methods of condition of soil etc. on confirmation of completion of decommissioning, based on the result of commissioning research conducted by the JAEA.

目次

1. はじめに	1
1.1 背景	1
1.2 本技術報告の位置づけ	1
2. 敷地土壌等の状況に係る判定の妥当性確認方法の提案	2
2.1 1F フォールアウトの影響がない廃止措置対象施設に係る確認方法	2
2.1.1 土壌の評価単位の妥当性確認方法	3
2.1.2 地下汚染を除去した場合の土壌の状況に係る判定の妥当性確認方法	4
2.1.3 残存施設の放射線測定の妥当性確認方法	5
2.2 1F フォールアウトの影響がある廃止措置対象施設に係る確認方法	6
2.2.1 1F フォールアウトの影響を考慮した土壌の状況に係る判定の妥当性確認方法	7
2.2.2 残存施設の状況に係る判定の妥当性確認方法	13
3. まとめ	15
参考文献一覧	16
執筆者一覧	17

目 次

図 1	地下汚染を除去した場合の試料採取方法	5
図 2	浸透汚染を除去した場合の残存施設からの試料採取方法	7
図 3	1F フォールアウトの影響を考慮した土壌の状況に係る判定フロー	8
図 4	1 m メッシュ内での土壌試料採取地点選定方法	11
図 5	1F フォールアウトの影響がある残存施設の状況に係る判定フロー	15

略 語 表

IAEA	International Atomic Energy Agency (国際原子力機関)
IRRS	Integrated Regulatory Review Service (総合規制評価サービス)
JAEA	Japan Atomic Energy Agency (日本原子力研究開発機構)

用語の定義

廃止措置	事業の廃止に伴う措置。実用発電用原子炉については、当該実用発電用原子炉の解体、核燃料物質の譲渡し、核燃料物質による汚染の除去、核燃料物質によって汚染された物の廃棄その他の原子力規制委員会規則で定める実用発電用原子炉の廃止に伴う措置
廃止措置終了確認	実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第 121 条に適合することの確認
サイト解放	廃止措置が終了し、原子力施設の土壌を含む敷地及び残存する建屋を自由に利用することができる状況とすること。
敷地土壌	廃止措置対象施設の敷地（原子炉の場合にあっては、設置許可申請書に記載する敷地から除外しようとする廃止措置対象施設の敷地）に係る土壌
残存施設	廃止措置終了確認を受けるときに廃止措置対象施設の敷地に残存する施設
事業由来汚染	廃止措置対象施設、残存施設又は敷地土壌に生ずる汚染であって原子炉（同一の設置許可に属する又は属していた他の原子炉を含む。）又は原子力事業及びそれらの廃止措置に由来するもの（事故、故障その他の異常により生じたものを含む。）
浸透汚染	建屋の床面、壁面等に存在するひび割れ等から、コンクリート内部に浸透した汚染
評価単位	放射能濃度確認対象物に含まれる放射性物質（放射能濃度の評価に用いるものに限る。）の平均放射能濃度の決定を行う範囲
測定単位	評価単位のうち 1 回の測定で取り扱う単位とする範囲
評価対象エリア	廃止措置対象の敷地内であって、地形的特徴（地形（斜面方位）、土質及び植生を含む表面の被覆状態）により分類されたそれぞれの領域
BG 参照エリア	廃止措置対象施設の敷地の外側であって、それぞれの評価対象エリアと同様の地形的特徴を有しており、バックグラウンド（BG）レベルの参照に使用可能な領域

1. はじめに

1.1 背景

原子炉又は原子力事業を廃止するときは、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和 32 年法律第 166 号。以下「原子炉等規制法」という。）に基づき、あらかじめ原子力規制委員会の認可を受けた廃止措置計画に従って廃止措置を実施し、廃止措置が終了したときは、その結果が「原子力規制委員会規則で定める基準」（以下「終了確認の基準」という。）に適合していることについて、原子力規制委員会の確認を受けなければならない¹。

実用発電用原子炉の廃止措置の終了確認の基準は、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則（昭和 53 年通商産業省令第 77 号）第 121 条に、①核燃料物質の譲渡しが完了していること、②廃止措置対象施設の敷地に係る土壌及び当該敷地に残存する施設が放射線による障害の防止の措置を必要としない状況にあること、③核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の廃棄が終了していること、及び④放射線管理記録の原子力規制委員会が指定する機関への引渡しが完了していること、と規定されているが、②についての具体的な基準は定められておらず、2016 年に受けた国際原子力機関（以下「IAEA」という。）の総合規制評価サービス（以下「IRRS」という。）ミッションにおいて、廃止措置の終了後におけるサイト解放に関する基準を規定すべきであることが指摘された²。

これを受けて、原子力規制委員会はサイト解放の具体的な基準を整備するとともに、サイト解放基準への適合性の判断に必要な放射線測定方法を、2022 年に「廃止措置の終了確認における敷地土壌等の状況の判定に関するガイド」³（令和 4 年 3 月 30 日、原子力規制委員会。以下「判定ガイド」という。）として制定した。

判定ガイドでは、敷地土壌の状況に係る判定方法及び残存施設の状況に係る判定方法（敷地土壌と残存施設を合わせて、以下「敷地土壌等」という。）が規定されているが、測定による敷地土壌等に含まれる放射能濃度の評価を行う観点から、敷地土壌等からの試料採取の方法を具体的に規定することが望ましいと考えられる。また、判定ガイドは、「廃止措置対象施設又は敷地土壌が、フォールアウト由来の放射性物質、天然由来の放射性物質その他の放射性物質（事業由来汚染に係るものを除く。）により有意な影響を受けている場合には、適用しない。」とされているが、全国の土壌中の放射能濃度によれば⁴、東日本の一部の地域においては東京電力福島第一原子力発電所事故（以下「1F 事故」という。）由来のフォールアウト（以下「1F フォールアウト」という。）の影響が無視できないと考えられるため、そのような施設に対する廃止措置終了確認の具体的な方法を規定することが望ましいと考えられる。

1.2 本技術報告の位置づけ

原子力規制庁技術基盤グループ核燃料廃棄物研究部門（現、放射線・廃棄物研究部門）では、廃止措置終了確認の具体的方法の整備に必要な科学的・技術的知見を得ることを目

的に、平成 29 年度から令和 2 年度にかけて国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下「JAEA」という。）への委託研究「廃止措置・クリアランスに関する検討」を実施した。委託研究の成果自体は「廃止措置終了確認手順の検討」（JAEA-Research 2024-004）⁵（以下「JAEA 技報」という。）として公表されている。

本技術報告は、実用発電用原子炉の廃止措置の終了確認の基準である実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則（昭和 53 年通商産業省令第 77 号）第 121 条第 1 項第二号（廃止措置対象施設の敷地に係る土壌及び当該敷地に残存する施設が放射線による障害の防止の措置を必要としない状況にあること）の具体的な確認手順として活用されることを目的として、原子力規制庁が委託研究の成果等を踏まえて検討した、原子炉施設を念頭に敷地土壌の状況に係る判定方法及び残存施設の状況に係る判定方法について、測定による評価を行う観点から試料採取の方法等、具体的に規定することが望ましいと考えられるものについて、その方法の一例を提案するものである。さらに、判定ガイドの適用外となっている、1F フォールアウトの影響が想定される施設に対しても、廃止措置終了確認の具体的な方法の一例を提案するものである。なお、本技術報告において使用する用語は、原子炉等規制法、同法に基づく事業規則等及び判定ガイドにおいて使用する用語の例による。

2. 敷地土壌等の状況に係る判定の妥当性確認方法の提案

2.1 1F フォールアウトの影響がない廃止措置対象に係る確認方法

判定ガイドでは、事業由来汚染がある土壌及びその恐れがある土壌を除去することその他必要な措置を講ずることにより、事業由来の汚染区域の土壌から事業由来汚染が適切に除去されていることを確認することとしている。その際、土壌から汚染が除去されていることを確認するために具体的な項目として、申請者による、①評価に用いる放射性物質の選定、②評価単位の設定、③土壌中の放射性物質の平均放射能濃度の決定方法、④放射線測定装置の選択及び測定条件、を確認することが示されている。

ここで、汚染が除去されていることを試料の測定により確認する観点からは②の妥当性の具体的な判定方法を定めることが望ましい。具体的には、土壌汚染の鉛直方向及び水平方向の広がりを踏まえ、適切な濃度評価を行ったと判断できるように、土壌試料の採取範囲を定めることが望ましいと考えられる。なお、①、③及び④については、判定ガイドの記載で十分と考えられるため、本技術報告では扱わない。

また、判定ガイドでは、残存施設の状況に係る判定方法として、「廃止措置開始前及び廃止措置期間中における汚染状況調査の結果並びに汚染状況等に係る記録に加えて、次に掲げる区域について適切な方法により行われた放射線測定の結果をもとに、当該残存施設に放射線障害防止の措置を必要とする事業由来汚染がないことが明らかにされていることを確認する。」とある。ここで、適切な方法により放射線測定が行われていることを確認するための具体的な方法を定めることが望ましいと考えられる。

2.1.1 土壌の評価単位の妥当性確認方法

土壌の評価単位の設定について判定ガイドでは次のように定めている。

土壌中の放射性物質の放射能濃度の分布の均一性及びその想定される放射能濃度を考慮した適切なものであること。具体的には、以下の要件を満足するものであること。

- 汚染の程度が大きく異なると考えられる範囲を一つの評価単位としていないこと。
- 重量に換算しておおむね 10 トンを超えないこと。

分析に用いる土壌試料の採取においては、事業由来汚染を除去した領域以外の領域の土壌を多く含むような採取を行うと、平均放射能濃度が低く評価され、非安全側の評価となる。そのため、試料採取方法の妥当性確認のために必要な事項を定める必要がある。具体的には、試料採取深さ、評価単位に対応する土壌表面積、採取方法及び放射能濃度の分布の均一性が次のとおりとされていることを確認する。

(1) 試料採取深さの設定

事業由来汚染に係る放射性核種には、水溶性の核種と不溶性の核種が想定される。事業に由来して放出され地表に沈着した放射性核種は、降雨等の影響により土壌中に浸透することが考えられる。土壌に浸透しやすい水溶性の放射性核種については、チョルノーベリ原子力発電所事故及び 1F 事故後の土壌中の水溶性の放射性セシウムの分布について、チョルノーベリ原子力発電所事故由来の放射性セシウムは地表から 10 cm、1F 事故由来の放射性セシウムは地表から 5 cm の範囲に大部分がとどまっているとの報告がなされている⁶。

他方、土壌に浸透しにくい不溶性の放射性核種については、クリアランス審査基準⁷において、浸透汚染がない場合でも、決定される放射能濃度が過小評価とならないように適切な厚さで試料採取することが示されており、例えば建屋コンクリートの場合は 5 cm 程度の厚さを考慮して採取することが示されている。

以上より、土壌試料の採取深さが次のとおりであることを確認する。

- ① 土壌の試料採取を行う際の最大深さは地表から 10 cm までとしていること。

(2) 評価単位に対応する土壌表面積の設定

判定ガイドでは、1つの評価単位は重量に換算して最大 10 トンを超えないこと、とされている。2.1.1. (1) で試料採取深さを地表から 10 cm までとし、1つの評価単位が重量換算で最大 10 トンを超えないようにするには、土壌の密度を踏まえて評価単位に対応する土壌表面積（以下「土壌表面積」という。）を決める必要がある。土壌の密度は土壌の種類によって異なることが知られており、例えば、土壌のかさ密度が 1.6 g/cm³の場合、

1つの試料を採取する際の土壌表面積は最大 62 m²となる。

以上より、土壌表面積が次のとおりであることを確認する。

- ① 採取する土壌の密度及び採取深さを踏まえて土壌表面積が設定されていること。

(3) 試料採取方法

土壌試料の分析による判定では、限られた数の試料から事業由来汚染を除去した領域の平均放射能濃度を評価する必要がある。そのため、汚染の見落としを避けるために、ガンマ線エネルギースペクトルを取得可能な放射線測定装置を用いてサーベイを行った後に、ガンマ線放出核種の計数率が最も高い箇所を含むように試料採取を行う必要がある。

以上より、次を考慮して試料採取を行っていることを確認する。

- ① 事業由来汚染を除去した範囲において、ガンマ線エネルギースペクトルを取得可能な放射線測定装置を用いてサーベイを行い、ガンマ線放出核種（汚染履歴に基づき、⁶⁰Co 又は ¹³⁷Cs）の計数率が最も高い箇所から 1 点及びその周辺から 4 点の試料を採取していること。
- ② 5 点の試料採取地点は等間隔となっていること。

(4) 放射能濃度の分布の均一性

評価単位における放射能濃度分布の均一性については、判定ガイドに定められており、次を考慮して評価していることを確認する。

- ① 1つの評価単位を測定単位に分割し、それぞれの測定単位から採取した土壌試料について評価に用いる放射性物質の $\Sigma (D_j / C_j)$ が 10 を超えないこと⁷。ここで、 D_j は、土壌に含まれる評価に用いる放射性物質 j の平均放射能濃度 (Bq/kg)、 C_j は、「工場等において用いた資材その他の物に含まれる放射性物質の放射能濃度が放射線による障害の防止のための措置を必要としないものであることの確認等に関する規則」（令和二年原子力規制委員会規則第十六号）別表第 2 欄に掲げる放射性物質 j の放射能濃度である。
- ② 測定単位に分割する際に、汚染の履歴等を考慮して、汚染の程度が大きく異なると考えられる物を一つの測定単位としていないこと。

2.1.2 地下汚染を除去した場合の土壌の状況に係る判定の妥当性確認方法

地下汚染を除去した場合には、汚染土壌に接していた面から鉛直方向及び地下水の流動方向に浸透汚染が生じている可能性がある。そこで、2.1.1 (1) の考え方を準用し、図 1 のように、汚染土壌に接していた面から 10 cm の範囲で、かつ、重量が 10 トンを超えないように評価単位を設定し、試料を採取することが適切と考えられる。また、10 トンを超える場合には、汚染履歴より、放射性物質の移行方向に沿って上流側から領域①、領域②の

ように1つの評価単位が10 トンを超えないように複数の評価単位を設定する必要がある。以上より、地下汚染を除去した場合には、次を考慮して放射能濃度が決定されていることを確認する。

- ① 土壌の試料採取を行う際の最大深さは、汚染土壌に接していた面から10 cm までとしていること。
- ② 評価単位が10 トンを超えないこと。
- ③ 評価単位が10 トンを超える場合には、汚染履歴より、放射性物質の移行方向に沿って上流側から領域①、領域②のように1つの評価単位が10 トンを超えないように複数の評価単位を設定して試料採取されていること。

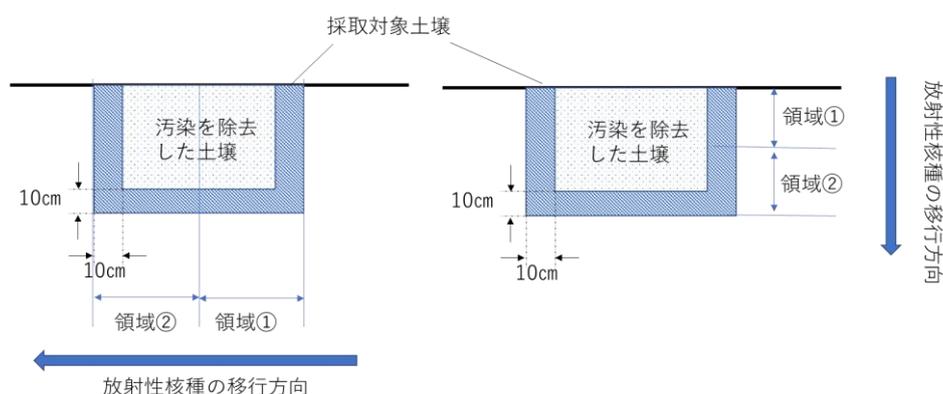


図1 地下汚染を除去した場合の試料採取方法

Figure 1 Soil sampling method when underground contamination was removed

2.1.3 残存施設の放射線測定の妥当性確認方法

判定ガイドの「3. 残存施設の状況に係る判定方法」では、次のように定めている。

廃止措置開始前及び廃止措置期間中における汚染状況調査の結果並びに汚染状況等に係る記録に加えて、次に掲げる区域について適切な方法により行われた放射線測定の結果をもとに、当該残存施設に放射線障害防止の措置を必要とする事業由来汚染がないことが明らかにされていることを確認する。

- ・ 残存施設のうち管理区域として利用されていた区域
- ・ 放射性物質の漏えいの履歴がある区域

同ガイド「2. 敷地土壌の状況に係る判定方法」では、敷地土壌に放射線障害防止の措置を必要とする事業由来汚染がないことの評価方法の例として、「決定された土壌中の放射性物質の放射能濃度がクリアランス規則に規定されているクリアランスレベルを超えていないことを確認する。」ことが示されている。

そこで、残存施設の状況の判定においても、クリアランス審査基準⁷の3.3(3)イの考え方を準用し、浸透汚染の有無を確認した上で、それぞれの状況に応じて次のとおり確認する。

(1) 浸透汚染がなかった場合

クリアランス審査基準⁷では、汚染が表面汚染のみであった場合でも厚い部材の場合には決定される放射能濃度が過小評価とならないように、適切な厚さを考慮して放射能濃度の決定が行われていることとしており、適切な厚さとして建屋コンクリートについては5 cm 程度としている。

以上より、残存施設について浸透汚染がなかった場合には、次を考慮して放射能濃度が決定されていることを確認する。

- ① 建屋コンクリートについて5 cm 程度を考慮して放射能濃度の決定が行われていること。
- ② 評価単位が10 トンを超えないこと。

(2) 浸透汚染がありそれを除去した場合

建屋表面にひび割れ等がある場合、それを經由して浸透汚染が起きると考えられる。浸透汚染があった場合も、浸透汚染がなかった場合の厚さ5 cm 程度を考慮する考え方を準用し、図2のようにひび割れ表面から5 cm 程度の厚さを考慮して放射能濃度を決定することが望ましいと考えられる。

以上より、浸透汚染があり、それを除去した場合には、次を考慮して放射能濃度決定されていることを確認する。

- ① 放射能濃度が過小評価とならないように、ひび割れ等の表面から5 cm 程度の厚さを考慮した評価単位が設定されていること。
- ② 使用する測定装置に応じた適切な測定単位で放射能濃度の決定が行われていること。
- ③ 評価単位が10 トンを超えないこと。

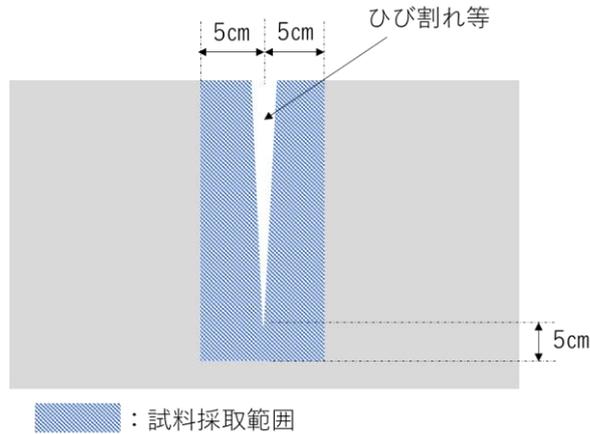


図2 浸透汚染を除去した場合の残存施設からの試料採取方法

Figure 2 Sampling method from remaining building in case of permeate contamination

2.2 1F フォールアウトの影響がある廃止措置対象施設に係る確認方法

1F フォールアウトの影響が想定される場合には、判定ガイドの2. (2) の判断を行うにあたり、試料に含まれる放射性物質が事業由来汚染と 1F フォールアウトの重畳となっている可能性がある。1F 事故から 13 年経過した現時点においては、1F フォールアウトとして考慮する必要がある放射性核種は ^{137}Cs のみであるので、試料の測定で求めた ^{137}Cs の放射能濃度から、1F フォールアウトの影響を除いた事業由来汚染の値で判定ガイドの2. (2) に準拠して判定を行う。

2.2.1 1F フォールアウトの影響を考慮した土壌の状況に係る判定方法

1F フォールアウトの影響を考慮した土壌の状況に係る判定の概要を図3に示す。事業由来汚染を除去した区画については、1F フォールアウトも同様に除去されていると考えられることから、2.1.1 に準拠して土壌採取がされており、判定ガイドの2. (2) に準拠して判定を行っていることを確認する。

事業由来汚染がない区画であっても、1F フォールアウトの影響を受けている場合には、検出された ^{137}Cs が履歴にない事業由来汚染に起因するものではないことを判定する必要がある。具体的には、廃止措置対象の敷地を地形的特徴（地形（斜面方位）、土質及び植生を含む表面の被覆状態。以下同様。）で分類する（分類したそれぞれの場所を以下「評価対象エリア」という）。廃止措置対象施設の敷地の外側であって、それぞれの評価対象エリアと同様の地形的特徴を有する場所を「BG 参照エリア」として設定する。BG 参照エリアの土壌の放射能濃度からバックグラウンド由来の ^{137}Cs 放射能濃度を決定し、評価対象エリアの土壌の放射能濃度から除いた値を用いて、判定ガイドの2. (2) に準拠して判定を行う。

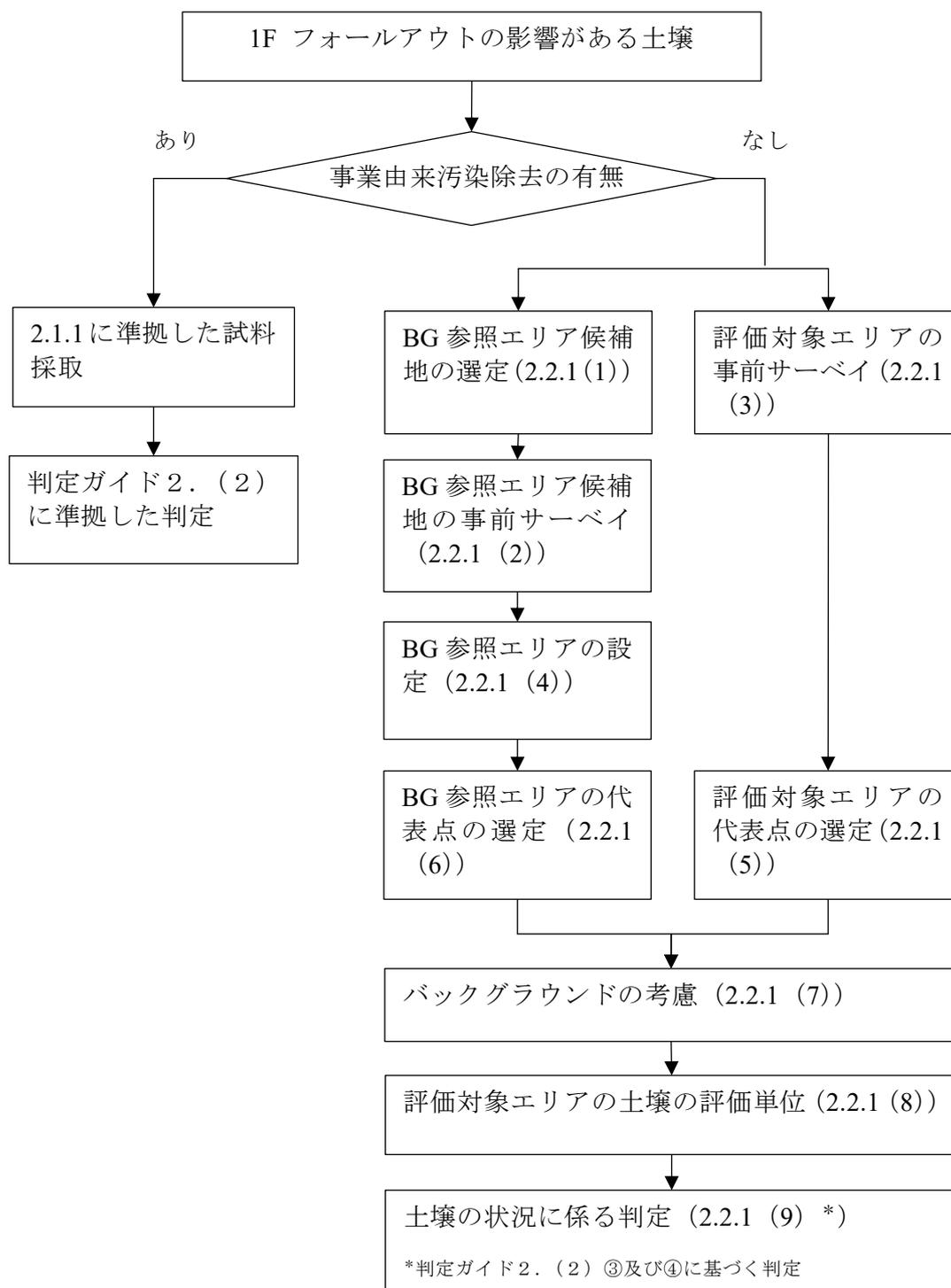


図3 1F フォールアウトの影響を考慮した土壌の状況に係る判定フロー
 Figure 3 Flow of determination of soil condition on confirmation of completion of decommissioning taking into account of 1F fallout

(1) BG 参照エリア候補地の選定

JAEA 技報⁵より、Ge 半導体検出器による測定や統計仮説検定のため、評価対象エリ

アの大きさは 20 m×20 m 以上のサイズが必要である。

BG 参照エリア候補地設定の目的より、同候補地は評価対象エリアと同等の 1F フォールアウトが沈着しており、かつ、地表に沈着した放射性物質が評価対象エリアと同等に保持されている必要がある。そのため、なるべく廃止措置対象施設に近い場所で地形的特徴が同一とみなせる場所を選定する必要がある。土地の形質の変更が行われている場所は、表層土の大規模な入替え等が行われている可能性が高いので避ける必要がある。

また、BG 参照エリア候補地、評価対象エリアのいずれにおいても、エリア内の地形的特徴が均一でない場合、1F フォールアウトによる土壤中の放射能濃度の評価結果に影響が出る。例えば、評価対象エリア内に裸地と植生に覆われている領域がある場合、地表に沈着した放射性物質の保持の状況は裸地と植生に覆われている領域とで異なると考えられ、エリアの平均濃度に影響があることから、地形的特徴が均一な領域を 1 つのエリアとする（裸地を 1 つのエリアとする、草地を 1 つのエリアとする、等）必要がある。

以上より、BG 参照エリア候補地が次を考慮して選定されていることを確認する。

- ① 廃止措置対象施設の敷地境界の外側であって、敷地境界から 1 km 以内の範囲で 2 カ所以上の BG 参照エリア候補地を選定していること。
- ② BG 参照エリア候補地はそれぞれ評価対象エリアと地形的特徴が同一とみなせる領域を選定していること。
- ③ 一つの BG 参照エリア候補地の大きさは 20 m×20 m 以上であること。
- ④ 一つの BG 参照エリア候補地の地形的特徴は均一であること。
- ⑤ BG 参照エリア候補地は土地の形質の変更が行われている場所でないこと。

(2) BG 参照エリア候補地の事前サーベイ

判定ガイドに基づく判定を行うためには、ガンマ線エネルギースペクトルを取得可能であり、かつ、¹³⁷Cs についてクリアランスレベルの 1/10 である 0.01 Bq/g^(注) 程度の放射能濃度を検出できる放射線測定装置を用いる必要がある。

JAEA 技報⁵によると、ガンマ線エネルギースペクトルが取得可能な放射線測定装置としては、可搬型 Ge 半導体検出器、NaI(Tl)検出器、CeBr₃ 検出器、LaBr₃ 検出器、ガンマカメラ等がある。

以上より、BG 参照エリア候補地の事前サーベイが次を考慮して行われていることを確認する。

- ① ガンマ線エネルギースペクトルを取得可能な放射線測定装置を選択していること。
- ② 装置の選定に際しては、1 m メッシュ内において、クリアランスレベルの 1/10 で

^(注) 「工場等において用いた資材その他の物に含まれる放射性物質の放射能濃度が放射線による障害の防止のための措置を必要としないものであることの確認等に関する規則」におけるクリアランスレベルの単位は Bq/kg であるが、本技術報告では引用する JAEA 技報の記載に準拠して Bq/g とする。

ある 0.01 Bq/g 程度の土壌中 ^{137}Cs 放射能濃度を検出できる放射線測定装置を選択していること。

- ③ 選定した放射線測定装置の特性に応じて 1 m メッシュ内の放射能濃度を代表できる検出器高さ及びコリメータの設置・設定を行っていること。

(3) 評価対象エリアの事前サーベイ

評価対象エリアと BG 参照エリアは地形的特徴が同じ場所を設定することから、それぞれの事前サーベイの方法は同じになる。

以上より、評価対象エリアの事前サーベイが次を考慮して行われていることを確認する。

- ① 事前サーベイが本技術報告 2.2.1 (2) に準拠して行われていること。

(4) BG 参照エリアの設定

JAEA 技報⁵では、バックグラウンド設定における基本的な考え方として、BG 参照エリアにおけるバックグラウンドを過大評価することは避けるべきであるとしている。また、一般に、土壌試料の ^{137}Cs 放射能濃度の測定においては、日本分析化学会が頒布する放射性セシウムを含む標準土壌試料を Ge 半導体検出器により測定し、値付けされた土壌に対する 661.7 keV の計数率を評価し、次いで採取した試料を封入した U-8 容器を同様に測定し、得られた計数率から標準試料の放射能濃度と計数率をもとに、試料ごとの放射能濃度を評価するとしている。

以上より、本技術報告 2.2.1 (2) のサーベイ結果に基づき、次を考慮して BG 参照エリアを設定していることを確認する。

- ① BG 参照エリア候補地において、その中心及びエリアの四隅から土壌を採取していること。
- ② 土壌の採取にあたっては、測定体系の違いによる放射能濃度測定への影響がないように、同一形状の容器（例えば U-8 容器）を使用していること。
- ③ 土壌の採取にあたっては、周囲の土壌の影響を受けないように、容器を逆さまにして土壌に打ち込み、容器が満杯になるまで土壌を詰め込んでいること。
- ④ 土壌の分析は、「放射能測定法シリーズ No.7 ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー」⁸に準拠して行っていること。
- ⑤ 採取した土壌試料の ^{137}Cs 放射能濃度の平均値を当該候補地の平均放射能濃度としていること。
- ⑥ BG 参照エリア候補地のうち、最も平均放射能濃度が低い候補地を BG 参照エリアとして設定していること。

(5) 評価対象エリアの代表点の選定

JAEA 技報⁵では、評価対象エリアの放射能濃度は、評価対象エリアと BG 参照エリアそれぞれから採取した試料の分析により設定することから、放射能濃度が極端に低い部分又は高い部分のみを採取するような不適切な試料採取により、評価対象エリアの放射能濃度を過小評価、または BG 参照エリアの放射能濃度を過大評価することを避け、平均放射能濃度を評価することが重要であるとしている。そのため、後述の統計検定に用いる代表点の選定としては、本技術報告 2.2.1 (3) で取得した評価対象エリアのサーベイ結果に基づき、計数率の極大点及び最小点を含み、計数率に対して満遍なく網羅し、かつ、代表点の空間的分布が均一になるように選定する必要がある。

以上より、評価対象エリアの代表点が次を考慮して選定されていることを確認する。

- ① 周辺と比較してエネルギースペクトル上の ^{137}Cs の計数率が極大値となる地点が複数ある場合には、それぞれの地点及び最小の計数率となる位置を代表点として選定していること。
- ② 極大値が 1 つしか現れない場合には、当該地点及び最小の計数率となる地点を代表点として選定していること。
- ③ 上記①、②いずれの場合にも、極大計数率と最小計数率の間の代表点については、計数率に対して満遍なく網羅し、かつ、代表点の空間的分布が均一になるように合計で 60 点以上となるように代表点を選定していること。
- ④ 各代表点において、図 4 に示す 1 m メッシュ内から 2.2.1 (4) ②～③に準拠して試料採取を行い、2.2.1 (4) ④に準拠して放射能濃度を決定していること。

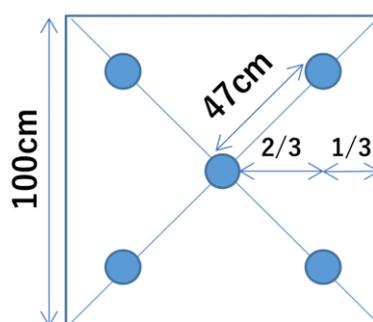


図 4 1 m メッシュ内での土壌試料採取地点選定方法

Figure 4 Selection methods of sampling points within the 1m mesh

(6) BG 参照エリアの代表点の選定

評価対象エリアの放射能濃度と比較するため、BG 参照エリアの代表点の選定方法は評価対象エリアの代表点の選定方法と同じである必要がある。

以上より、BG 参照エリアの代表点が次を考慮して選定されていることを確認する。

- ① 本技術報告 2.2.1 (2) と同様の方法で BG 参照エリアの事前サーベイを行っている

こと。

- ② 本技術報告 2.2.1 (5) と同様の方法で BG 参照エリアの代表点を設定し、放射能濃度の評価が行われていること。

(7) バックグラウンドの考慮

対象とする放射能濃度が非常に低いものであるため、JAEA 技報⁵では測定及び分析の不確かさを踏まえて、3 つのケースに分けてバックグラウンドの考慮の方法を検討している。

BG 参照エリアの設定で評価した ^{137}Cs 平均放射能濃度が 0.1 Bq/g 以下の場合に行う、統計検定により評価対象エリアの ^{137}Cs が 1F フォールアウト起源であることを判定する方法 (①)、平均放射能濃度の平均値が 0.1 Bq/g を超え 1.0 Bq/g を超えない範囲にある場合に行う、事前サーベイ及び代表点測定の結果を利用した平均クリギング⁵により評価する方法 (②)、平均放射能濃度が 1.0 Bq/g 以上の場合に行う、同位体比を用いて評価対象エリアの事業由来の放射能濃度を直接設定する方法 (③) がある。

① BG 参照エリアの ^{137}Cs 放射能濃度が 0.1 Bq/g 以下の場合

JAEA 技報⁵では、BG 参照エリアで選定された代表点における 1 m メッシュの放射能濃度にデータ群の差を判定するために許容する誤差 (以下「許容値」という。) を加えた放射能濃度 60 点と、評価対象エリアで選定された 1 m メッシュの放射能濃度 60 点の 2 群データを用いてウィルコクソン順位和検定⁵による統計仮説検定を実施している。評価対象エリアの ^{137}Cs 放射能濃度が許容値を加えた BG 参照エリアの ^{137}Cs 放射能濃度を超過しているという帰無仮説が棄却されると、許容値の範囲内で評価対象エリアの核種はすべて 1F フォールアウト起源とみなされる、すなわち施設起源の ^{137}Cs 放射能濃度は 0 とみなすことができるとしている。なお、帰無仮説が棄却されない場合には、②の評価を行っていることを確認する必要がある。

以上より、ウィルコクソンの順位和検定が次を考慮して行われていることを確認する。

- a. 許容値を 0.01 Bq/g に設定していること。
- b. ウィルコクソンの順位和検定による第 1 種過誤率 (検定により求めた p 値がこの値を超えなければ有意差なしと判断する値) は片側 95%信頼区間内を参考に 0.05 としていること。

② BG 参照エリアの ^{137}Cs 平均放射能濃度が 0.1 Bq/g を超え、1.0 Bq/g 未満である場合

JAEA 技報⁵では、事前サーベイ及び代表点測定の結果を利用した平均クリギング⁵による平均値の片側 95%信頼区間下限値をバックグラウンドとして設定できるとし

ている。算出されたバックグラウンドを評価対象エリアで評価した ^{137}Cs 放射能濃度から一律に差し引いて、事業由来汚染の ^{137}Cs 放射能濃度分布を設定できるとしている。

以上より、平均クリギングによるバックグラウンド評価が次を考慮して行われていることを確認する。

- a. BG 参照エリアで事前サーベイにより求めた 1 m メッシュの計数率分布と代表点の放射能濃度から平均クリギングを実行し平均放射能濃度及び放射能濃度値の不確かさを求め、平均放射能濃度の片側 95 %信頼下限値をバックグラウンドとしての ^{137}Cs 放射能濃度としていることを確認すること。

③ BG 参照エリアの ^{137}Cs 平均放射能濃度が 1.0 Bq/g 以上の場合

JAEA 技報⁵では、 ^{135}Cs と ^{137}Cs の半減期の違いから、評価対象エリアの土壤中の $^{135}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比、1F フォールアウト起源の $^{135}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比及び廃止措置対象施設の $^{135}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比（例えば、当該施設で発生した放射性廃棄物の $^{135}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比）から、事業由来汚染の放射能濃度を直接的に評価できるとしている。

以上より、同位体比による評価が次を考慮して行われていることを確認する。

- a. 事業由来の汚染に係る試料（建屋内に残存する固体状廃棄物、濃縮廃液等）を採取していること。
- b. 質量分析等（例えば表面電離型質量分析：TIMS）により事業由来汚染の $^{135}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比⁹を求め、事業由来の ^{137}Cs 放射能濃度を決定していること。

(8) 評価対象エリアの土壌の評価単位

土壌の放射能濃度の評価における試料採取方法等は 1F フォールアウトの有無に影響されない。

以上より、評価対象エリアの土壌の評価単位が次を考慮して決定されていることを確認する。

- ① 本技術報告 2.1.1 の方法に準拠していること。

(9) 土壌の状況に係る判定

評価対象エリアの土壌の ^{137}Cs の放射能濃度について、本技術報告 2.2.1 (7) の方法でバックグラウンドを考慮した上で、判定ガイド 2. (2) ③及び④の方法により土壌の状態の判定が行われていることを確認する。

2.2.2 残存施設の状況に係る判定の妥当性確認方法

残存施設は敷地土壌と異なり廃止措置終了確認後に解体されてリサイクルや産業廃棄物として処分される可能性がある。これを踏まえ、「東京電力株式会社福島第一原子力発電

所事故に係るフォールアウトによる原子力施設における資材等の安全規制上の取扱いについて」(平成 24 年 3 月 原子力安全・保安院 放射性廃棄物規制課、原子力安全基盤機構 廃棄物燃料輸送安全部)¹⁰では、フォールアウトの影響を踏まえてクリアランスレベルを満足する考え方を示している。1F フォールアウトの影響を受けた残存施設に関しては、この考え方に準拠して、フォールアウトの影響を踏まえて判定ガイド 2.(2) ②及び④の判定が行われていることを確認する。1F フォールアウトの影響を考慮した残存建屋の状態に係る判定の概要を図 5 に示す。

また、事業由来汚染がない場合でも、残存施設の表面状態によって 1F フォールアウトの浸透汚染の可能性がある。そこで、事業由来汚染除去の有無及び 1F フォールアウトの浸透汚染の可能性の有無に応じて次のとおりであることを確認する。

(1) 事業由来汚染の除去を行った残存施設の状況の判定方法

残存施設においても敷地土壌と同様に、事業由来汚染を除去した場合には残存施設表面に付着した 1F フォールアウトも除去されていると考えられることから、1F フォールアウトの影響がない残存施設と同様の方法で確認ができると考えられる。

以上より、事業由来汚染の除去を行った場合には、浸透汚染の有無に応じて次のとおりであることを確認する。

- ① 事業由来の浸透汚染がなかった場合には、本技術報告 2.1.2 (1) に準拠して試料が採取され、判定ガイド 2.(2) ②及び④に準拠した判定が行われていること。
- ② 事業由来の浸透汚染を除去した場合には、本技術報告 2.1.2 (2) に準拠して試料が採取され、判定ガイド 2.(2) ②及び④に準拠した判定が行われていること。

(2) 事業由来汚染がない残存施設の状況の判定方法

事業由来汚染がない場合には汚染を除去していないことから、残存施設の表面へのフォールアウトの沈着のほか、ひび割れ等がある場合には浸透汚染も想定される。また、残存施設については BG 参照エリアを設定することが困難と考えられる。

以上より、1F フォールアウトによる浸透汚染の可能性の有無に応じて次のとおりであることを確認する。

- ① 1F フォールアウトによる浸透汚染が想定される場合には、本技術報告 2.1.2. (2) に準拠して試料が採取され、判定ガイド 2.(2) ②及び④に準拠した判定が行われていること。
- ② 1F フォールアウトによる浸透汚染が想定されない場合には、本技術報告 2.1.2 (1) に準拠して試料が採取され、判定ガイド 2.(2) ②及び④に準拠した判定が行われていること。

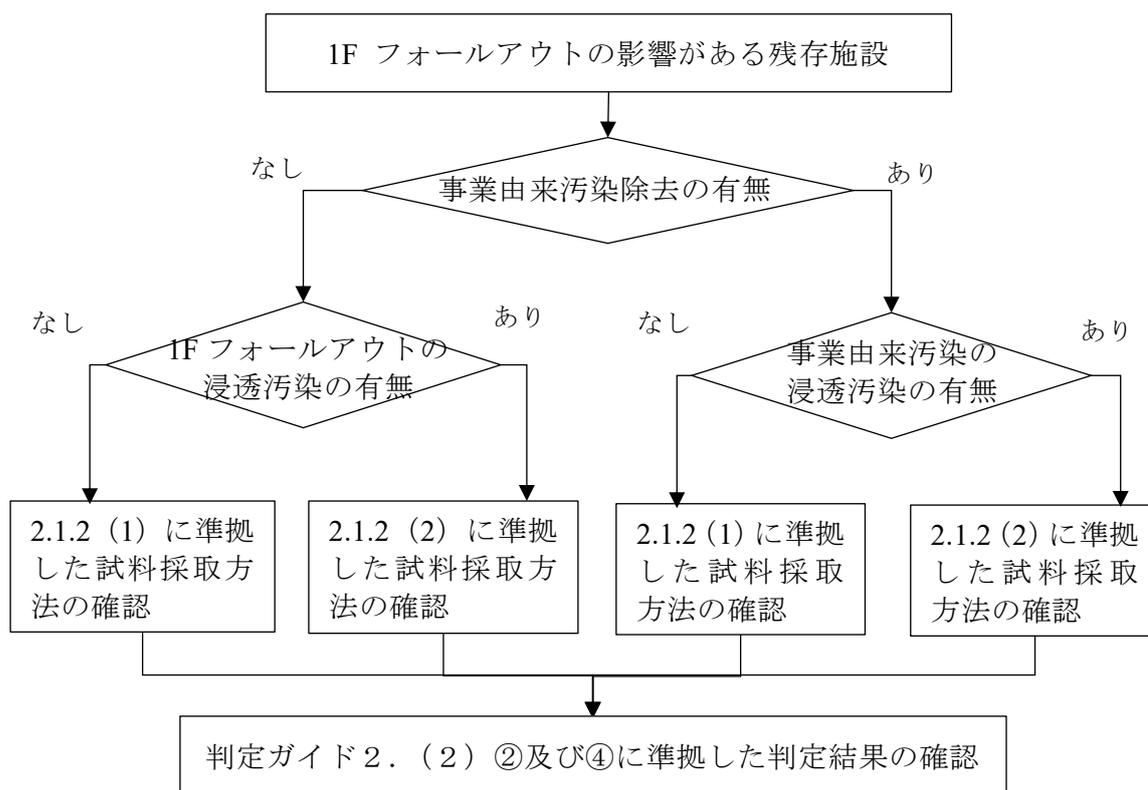


図 5 1F フォールアウトの影響がある残存施設の状況に係る判定フロー

Figure 5 Flow of determination of residual building condition on confirmation of completion of decommissioning taking into account of 1F fallout

3. まとめ

本技術報告では、原子炉施設を念頭に廃止措置終了確認を適切に行う観点で、平成 29 年度から令和 2 年度にかけて実施した JAEA への委託研究「廃止措置・クリアランスに関する検討」の成果に基づき、判定ガイドの運用の観点で明確化しておくことが望ましいと考えられる試料採取方法並びに同ガイドで対象外となっている 1F フォールアウトの影響を受けている廃止措置対象施設の土壌及び残存施設に係る判定方法の一例を提案した。

本技術報告が実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第 121 条の廃止措置終了確認の具体的な方法として活用されることを期待する。

参考文献一覧

- 1 「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」、昭和三十二年法律第百六十六号
- 2 International Atomic Energy Agency, “INTEGRATED REGULATORY REVIEW SERVICE (IRRS) MISSION TO JAPAN”, IAEA-NS-IRRS-2016, 2016.
- 3 原子力規制委員会、「廃止措置の終了確認における敷地土壌等の状況の判定に関するガイド」、令和4年
- 4 日本の環境放射能と放射線ホームページ
<https://www.kankyo-hoshano.go.jp/>（令和6年3月13日確認）
- 5 島田 太郎、島田 亜佐子、三輪 一爾、鍋倉 修英、佐々木 利久、高井 静霞、武田 聖司、「廃止措置終了確認手順の検討」、JAEA-Research 2024-004、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、2024年刊行予定
- 6 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、「平成27年度放射性物質測定調査委託費（東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約）事業」成果報告書、平成28年
- 7 原子力規制委員会、「放射能濃度について確認を受けようとする物に含まれる放射性物質の放射能濃度の測定及び評価の方法に係る審査基準」、令和元年
- 8 原子力規制庁監視情報課、「放射能測定シリーズNo.7 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」、令和2年改訂
- 9 Takahashi, H., Park, K.C., Nomura, M., Shibahara, H., Miura, H., Ohishi, Y., Yuki, M., Tsukahara, T., “Influence of extraction process on Cs isotope ratios for Fukushima Daiichi nuclear power plant accident contaminated soil”, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 329, pp. 327-336, 2021.
- 10 原子力安全・保安院 放射性廃棄物規制課、原子力安全基盤機構 廃棄物燃料輸送安全部、「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に係るフォールアウトによる原子力施設における資材等の安全規制上の取扱いについて」、平成24年

執筆者一覧

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 放射線・廃棄物研究部門
大塚 楓 上席技術研究調査官
高橋 宏明 主任技術研究調査官

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部門 安全研究センター
燃料サイクル安全研究ディビジョン 廃棄物・環境安全研究グループ
島田 太郎 廃棄物・環境安全研究グループ マネージャー