

# 1F固体廃棄物分析における 分析対象核種の選定について

2024年12月5日

**TEPCO**

東京電力ホールディングス株式会社

- 2024年3月に公表した「東京電力福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた固体廃棄物の分析計画（2024年度）」では、固体廃棄物に対する分析対象核種及び考え方として下記を提示した（次項は当該資料抜粋）。

① 分析対象核種として30核種を設定

H-3,C-14,Cl-36,Ca-41,Co-60,Ni-63,Se-79,Sr-90,Zr-93,Mo-93,Nb-94,Tc-99,Ru-106,  
Pd-107,Ag-108m,Sb-125,Sn-126,I-129,Cs-137,Eu-154,U-234,U-235,U-236,U-238,  
Np-237,Pu-238,Pu-239,Pu-240,Am-241,Cm-244

② 優先的に分析を進める核種として10核種を設定

C-14,Cl-36,Co-60,Ni-63, Sr-90,Tc-99,I-129,Cs-137,Pu-238, Am-241

③ 状況・条件に応じて更新（廃炉進捗に伴い具体化する条件等の反映，再利用を考慮した分析対象核種の追加など）

- 上記の設定は，2021年度の「廃炉・汚染水・処理水対策事業」に関する補助事業成果として示された1F固体廃棄物を対象とした分析対象核種をベースに，実際の分析実施における合理性や分析ニーズを反映して整理を行ったものである。
- 本資料では，上記の設定の考え方・根拠について説明する。

# 参考：分析対象核種について

2024年3月28日 廃炉・汚染水・処理水対策チーム  
 会合事務局会議（第124回）資料より抜粋



- 固体廃棄物を対象とした当面の分析における対象核種を下表に整理した。
- 核種の選定は、既存の放射性廃棄物処分の安全評価事例に基づき、処分施設の設計・安全評価において有意な影響を有する可能性があると考えられる核種を抽出した。将来的にはIF固有の条件（廃棄物特性など）を踏まえ、必要に応じて更新する。

表 分析対象核種

| 核種      | 分析対象 <sup>※1</sup> | 優先核種 <sup>※2</sup> |
|---------|--------------------|--------------------|
| H-3     | ○                  |                    |
| C-14    | ○                  | ○                  |
| Cl-36   | ○                  | ○                  |
| Ca-41   | ○                  |                    |
| Co-60   | ○                  | ○                  |
| Ni-63   | ○                  | ○                  |
| Se-79   | ○                  |                    |
| Sr-90   | ○                  | ○                  |
| Zr-93   | ○                  |                    |
| Mo-93   | ○                  |                    |
| Nb-94   | ○                  |                    |
| Tc-99   | ○                  | ○                  |
| Ru-106  | ○                  |                    |
| Pd-107  | ○                  |                    |
| Ag-108m | ○                  |                    |

| 核種     | 分析対象 <sup>※1</sup> | 優先核種 <sup>※2</sup> |
|--------|--------------------|--------------------|
| Sb-125 | ○                  |                    |
| Sn-126 | ○                  |                    |
| I-129  | ○                  | ○                  |
| Cs-137 | ○                  | ○                  |
| Eu-154 | ○                  |                    |
| U-234  | ○                  |                    |
| U-235  | ○                  |                    |
| U-236  | ○                  |                    |
| U-238  | ○                  |                    |
| Np-237 | ○                  |                    |
| Pu-238 | ○                  | ○                  |
| Pu-239 | ○                  |                    |
| Pu-240 | ○                  |                    |
| Am-241 | ○                  | ○                  |
| Cm-244 | ○                  |                    |

- 分析下限値(目標)は、クリアランス基準をめやすに設定する（具体は廃棄物毎に検討する）。
- 再利用の可能性のある対象物は、再利用形態を考慮した分析対象核種を設定する。

※1：既存の放射性廃棄物の安全評価事例等より抽出した核種 → 合理的に可能な範囲で分析を実施する

※2：処分区分の濃度上限値設定核種（特に重要度の高い核種） → 原則、全量に対して分析を実施する

# 1F固体廃棄物の汚染状態について

- 1F固体廃棄物で想定される汚染状態のパターンを下図に示す。
- 発電所の運転に伴い生じた事故前の汚染と事故由来の汚染に区分され、汚染状態はそれらの組み合わせによるパターンが想定される。1F固体廃棄物の分析では、特に(2)(3)への対応が重要となる。
- 事故前汚染と事故由来汚染では、汚染経路・汚染機構の違いから重要性の高い核種は異なる可能性がある。
- 分析対象核種は、両者を包含できるように抽出する。

| (1)事故前汚染  | (2)事故前汚染 + 事故由来汚染   | (3)事故由来汚染  |
|---|---|--|
| <p>【汚染種類】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 発電所運転に伴う汚染               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 通常炉L1廃棄物相当の汚染</li> <li>✓ 通常炉L2廃棄物相当の汚染</li> <li>✓ 通常炉L3廃棄物相当の汚染</li> <li>✓ 通常炉クリアランス相当の汚染</li> </ul> </li> </ul> | <p>【汚染種類】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 事故前汚染 と 事故由来汚染の重畳</li> </ul> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;"> <div style="border: 1px solid blue; padding: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 発電所運転に伴い発生した汚染               <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 通常炉L1廃棄物相当の汚染</li> <li>✓ 通常炉L2廃棄物相当の汚染</li> <li>✓ 通常炉L3廃棄物相当の汚染</li> <li>✓ 通常炉クリアランス相当の汚染</li> </ul> </li> </ul> </div> <div style="font-size: 2em;">+</div> <div style="border: 1px solid green; padding: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 事故に伴い放出された核種による汚染</li> <li>• 廃炉作業に伴い生じる汚染</li> </ul> </div> </div> | <p>【汚染種類】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 事故に伴い放出された核種による汚染</li> <li>• 廃炉作業に伴い生じる汚染</li> </ul>  |
| <p>【主な部位】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 5・6号機の事故前汚染部位（事故由来汚染無し）</li> <li>• 震災前廃棄物（事故由来汚染無し）</li> </ul>   | <p>【主な部位】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1～4号機の事故前汚染部位（原子炉領域等）</li> <li>• 震災前廃棄物（事故由来汚染有り）</li> </ul>   | <p>【主な部位】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 事故由来の汚染を受けた部位（事故前汚染無し）</li> <li>• 水処理二次廃棄物</li> </ul> |

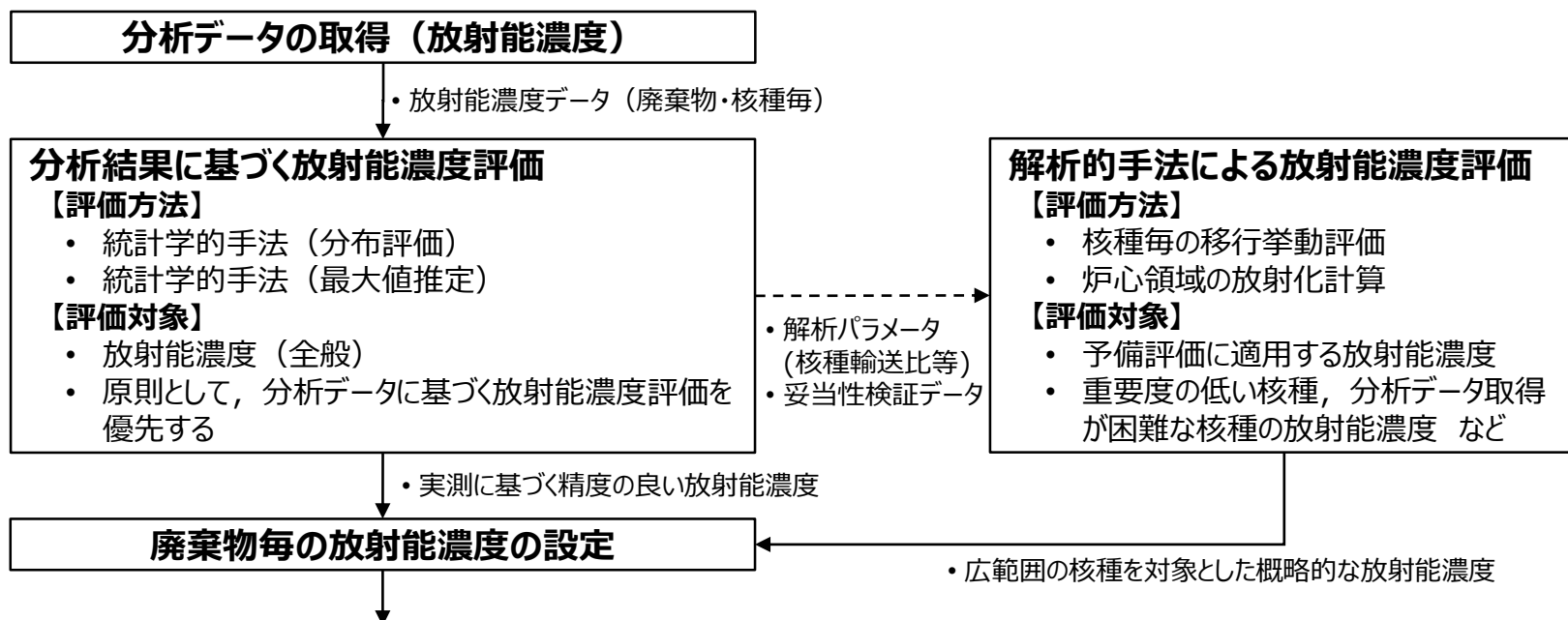
図 1F固体廃棄物の汚染状態のパターン（重畳）のイメージ

- 固体廃棄物の分析は、対象物の材質・状態が多様であり、また、汚染レベルの幅が広く、バラツキ、不均一性も大きい。それぞれの状態に応じた分取・前処理・分析を行う必要があるため、分析の難易度・作業負荷が高い。
- 分析データの利用ニーズは検討対象・プロセスによって変化し、それに伴い分析に対する要求も変化する。中長期的な視点で柔軟に分析計画を策定・更新し、また、段階的に分析数の補強、分析精度の向上を進めるなどの対応が必要となる。

表 固体廃棄物分析の特徴

| 項目                  | 特徴  |
|---------------------|---|
| 対象物の材質・状態及び汚染状態の多様性 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 廃棄物の材質・状態が多様である。個々の試料の材質・状態に応じた分取・前処理・分析方法を決定する必要がある。</li> <li>• 汚染レベルの幅が広い。高線量の試料を扱う場合には、作業に制約が生じる可能性がある。</li> <li>• 汚染のバラツキ、不均一性が大きい。代表性・保守性の担保を念頭に置いた試料採取・分取・前処理が必要となる。</li> <li>• 上記のとおり、材質・汚染状態の多様性から、分析の難易度・作業負荷が高い。分析数は制限される。</li> </ul>  |
| 分析データの利用ニーズの多様性     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 検討対象・プロセスによって分析に対する要求は変化する。</li> <li>• 中長期的な視点で柔軟に分析計画を策定・更新し、また、段階的に分析数の補強、分析精度の向上を進めるなどの対応が必要となる。</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>□ 検討対象             <ul style="list-style-type: none"> <li>保管管理、再利用、廃棄体化</li> </ul> </li> <li>□ 実施プロセス             <ul style="list-style-type: none"> <li>I .対策の基本方針の策定</li> <li>II .対策の全体像構築、対策の具体化（廃棄物ストリーム構築を含む）</li> <li>III .制度整備・技術基準策定</li> <li>IV .許認可対応（施設で扱う放射エネルギー・放射能濃度の上限の設定）</li> <li>V .後段規制対応（個々の廃棄物の基準適合性の管理）</li> </ul> </li> </ul> |

- 固体廃棄物の分析データ（放射能濃度）の反映先のイメージを下図に整理した。
- 放射能濃度の評価は、実データに基づく評価と解析的手法による推算を組み合わせて行う。
- 評価した放射能濃度の反映先は当面は下図Ⅰ.～Ⅲ.となる。まずは、対策を講ずる上で重要となる支配核種及び概略的な放射能濃度の把握を進める必要がある。
- 後段への対応に向けた分析の緊急性は低いものの、合理的に試料採取・分析ができるタイミングは限られるため、計画的に分析データの蓄積を進めていく。



## 評価した放射能濃度の反映先

対応プロセス

- Ⅰ. 対策の基本方針の策定
- Ⅱ. 対策の全体像構築，対策の具体化（廃棄物ストリーム構築を含む）
- Ⅲ. 制度整備・技術基準策定
- Ⅳ. 許認可対応（施設で扱う放射エネルギー・濃度上限の設定）
- Ⅴ. 後段規制対応（個々の廃棄物の基準適合性の管理）

低  
精度・  
信頼性  
高

- 廃棄物の特徴・性状の理解
- 支配核種の特定
- 概略的な放射エネルギー・濃度の推定
- ↓
- 施設設計上の放射エネルギーの設定（上限値＝廃棄物の基準設定）
- ↓
- 個体毎の放射エネルギー管理

## (1) 分析対象核種選定の基本的考え方

- 1F固体廃棄物に対する分析対象核種の選定は、下記の項目において安全に対して有意な影響を有する核種を抽出することで行った。
- 核種の抽出は、安全評価における被ばく線量に対する核種毎の寄与率や相対重要度（平均放射能濃度／基準線量相当濃度）などを指標に行った。

表 評価対象核種抽出の考え方

| 項目   | 評価対象核種抽出の考え方   |
|------|--|
| 廃棄体化 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 将来の廃棄体化を想定し、廃棄体の放射能濃度の設定及び放射能濃度管理手法の構築の観点から評価が必要な核種を抽出する。</li> <li>• 1F固体廃棄物の廃棄体基準や処分方法は現時点では整備されていない。そのため、既存の放射性廃棄物に対する評価・検討事例及び補助事業で実施された予備的安全評価（パラメータスタディ）の結果を参照し、幅広の評価対象核種を抽出する。</li> </ul> |
| 再利用  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1F固体廃棄物を対象とした再利用において、安全に対して有意な影響を有する核種を抽出する。</li> <li>• 想定される再利用用途を踏まえた安全評価の結果に基づき核種を抽出する。</li> <li>• 既実施の1F構内におけるコンクリートガラの路盤材への再利用も検討対象とする。</li> </ul>   |
| 保管管理 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1F固体廃棄物の保管施設において、安全に対して有意な影響を有する核種を抽出する。</li> <li>• 想定される保管形態を踏まえた安全評価の結果に基づき核種を抽出する。</li> <li>• 中期的リスクの低減目標マップ※で実現すべき姿に設定された「放射能濃度に基づく屋外保管を含む合理的な保管方法」も検討対象とする。</li> </ul>                     |

※原子力規制委員会，“東京電力福島第一原子力発電所の中期的リスクの低減目標マップ（2024年3月版）”，2024年2月28日。



## (2) 優先核種の設定について

- 固体廃棄物の分析は、前述のとおり難易度・作業の負荷が高い。全ての試料に対して、幅広く抽出した全ての核種の分析を行うことは合理的ではない。
- 分析データの当面の反映先は、廃棄物対策の基本的な方針の策定、課題の理解、対策の具体化（廃棄物ストリーム構築を含む）等である。まずは、廃棄物毎の支配核種及び概略的な放射能濃度の把握が重要であり、それらの評価に資する分析データの取得を優先的に進めるのが合理的である。
- そのため、特に安全評価において被ばく線量に対して寄与率の高い核種を、優先的に分析を進める「優先核種」に設定するものとした。

## (3) 廃棄物毎の個別の調整

- 実際に分析対象とする核種は、設定した分析対象核種及び優先核種を基本とした上で、廃棄物毎の条件、分析施設の能力等を勘案して決定する。
- 一部の核種の安全評価上の有意な影響を否定できる場合などは分析対象核種の絞り込みを行うなど、有効性の高い分析データの取得に合理的にリソースを配分していく。



# 1F固体廃棄物に対する分析対象核種の選定フロー

- 分析対象核種の選定フローを下記に示す。
- a.～d.の検討内容を次項以降に示す。

## a.廃棄体化の観点による核種の抽出

### a1.分析対象核種の抽出

2021年度補助事業成果※

- 下記手順で検討
  - ① 放射線防護の対象の抽出 (ICRP Pub.107)
  - ② 半減期による除外
  - ③ 既存文献に基づく抽出
  - ④ 補助事業における予備的安全評価
  - ⑤ インベントリ推定手法開発に資する追加
  - ⑥ 計算による濃度設定

### a2.優先核種の設定

- 特に安全評価において被ばく線量に対して寄与率の高い核種を優先的に分析を実施する「優先核種」に設定

### 分析対象核種：30核種 優先核種：10核種

H-3, C-14, Cl-36, Ca-41, Co-60, Ni-63, Se-79, Sr-90, Zr-93, Mo-93, Nb-94, Tc-99, Ru-106, Pd-107, Ag-108m, Sb-125, Sn-126, I-129, Cs-137, Eu-154, U-234, U-235, U-236, U-238, Np-237, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Am-241, Cm-244 (太字下線は「優先核種」)

### d.廃棄物毎の個別の調整

- 分析対象核種及び優先核種を基本とした上で、廃棄物毎の条件、分析施設的能力等を勘案して決定する。

※国際廃炉研究開発機構 (IRID), “令和3年度開始「廃炉・汚染水対策事業費補助金 (固体廃棄物の処理・処分に 関する研究開発)」2021年度最終報告”, 2022年9月.

### b.再利用の観点による核種の追加

- 想定される再利用用途を踏まえた安全評価において寄与率の高い核種

+

### c.保管管理の観点による核種の追加

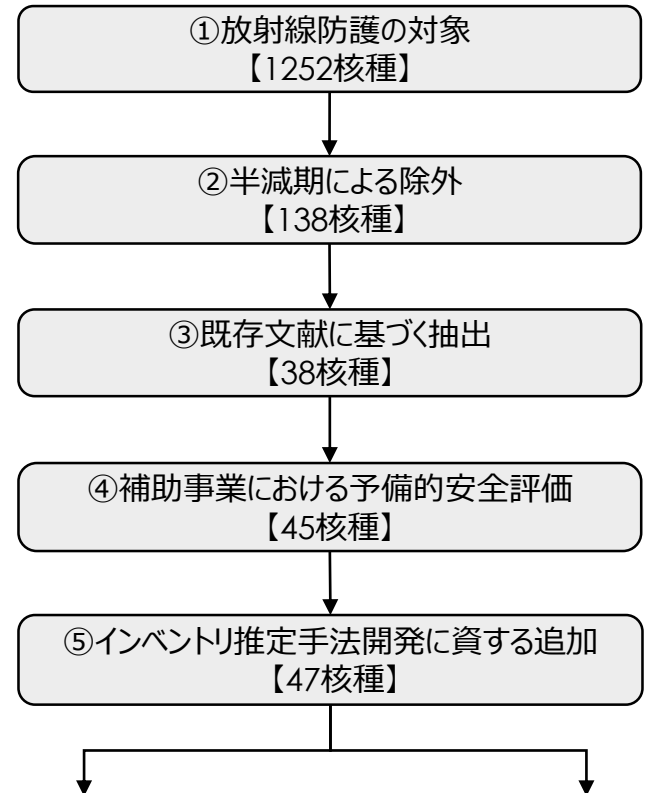
- 想定される保管形態を踏まえた安全評価において寄与率の高い核種

図 分析対象核種の選定フロー (全体)

# a. 廃棄体化の観点による核種の抽出

## a1. 分析対象核種の抽出

- ①放射線防護の対象
  - ICRP Pub.107を参照し、**1252核種**を抽出
- ②半減期による除外
  - 半減期 $T_{1/2} \geq 1y$ の**138核種**を抽出（半減期1年未満の核種を除外）
- ③既存文献に基づく抽出
  - 既存の放射性廃棄物に関する文書（規制関連文書、事業許可申請書、技術レポート）において、重要核種・主要核種として挙げられた**38核種**を抽出
- ④補助事業における予備的安全評価
  - 補助事業において実施されたIF廃棄物に関する予備的安全評価結果（パラメータスタディ）を踏まえて**7核種**を追加し、**45核種**を抽出
- ⑤インベントリ推定手法開発に資する追加
  - 核種移行挙動の評価を目的に、Csに次ぐ揮発性を有する $\gamma$ 核種であるRu-106,Sb-125の**2核種**（移行挙動が確認しやすい核種）を追加し、**評価対象核種：47核種を選定**
- ⑥計算による濃度設定
  - 同位体や平衡計算により推定可能な核種（17核種）は計算で対応するものとし、**分析対象核種：30核種を選定**



### 分析対象核種 【30核種】

| 分析対象：30核種 |         |        |
|-----------|---------|--------|
| H-3       | Nb-94   | U-234  |
| C-14      | Tc-99   | U-235  |
| Cl-36     | Ru-106  | U-236  |
| Ca-41     | Pd-107  | U-238  |
| Co-60     | Ag-108m | Np-237 |
| Ni-63     | Sb-125  | Pu-238 |
| Se-79     | Sn-126  | Pu-239 |
| Sr-90     | I-129   | Pu-240 |
| Zr-93     | Cs-137  | Am-241 |
| Mo-93     | Eu-154  | Cm-244 |

### ⑥計算による濃度設定 【17核種】

| 計算対象：17核種 |        |         |
|-----------|--------|---------|
| Ni-59     | Ra-226 | Pu-242  |
| Cs-135    | Th-229 | Am-242m |
| Sm-151    | Th-230 | Am-243  |
| Eu-152    | Pu-231 | Cm-245  |
| Pb-210    | U-233  | Cm-246  |
| Po-210    | Pu-241 |         |

# a. 廃棄体化の観点による核種の抽出

## a2. 優先核種の設定

- 前項で設定した分析対象核種（30核種）の中から、優先的に分析を実施する核種（10核種）を設定した。
- 「優先核種」は、廃棄物対策を講じる上で重要度の高い核種として安全評価における被ばく線量に対して寄与率の高い核種を抽出するものとし、通常の放射性廃棄物において濃度上限値※が設定された核種を設定した。

表 優先核種（10核種）

| 優先核種   | 廃棄体の区分 |    |    |
|--------|--------|----|----|
|        | L3     | L2 | L1 |
| C-14   |        | ◎  | ◎  |
| Cl-36  |        |    | ◎  |
| Co-60  | ◎      | ◎  |    |
| Ni-63  |        | ◎  |    |
| Sr-90  | ◎      | ◎  |    |
| Tc-99  |        | ◎  | ◎  |
| I-129  |        |    | ◎  |
| Cs-137 | ◎      | ◎  |    |
| Pu-238 |        |    | ◎  |
| Am-241 |        | ◎  |    |

※原子力安全委員会，“低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について”，2007年5月。

## b.再利用の観点による核種の追加

- 1F固体廃棄物に対して想定される再利用の形態を踏まえた評価条件（物量，利用状態，環境条件等）による安全評価結果に基づき，被ばく線量に対して寄与率の高い核種を抽出する。
- 想定する再利用の形態には，1F構内で実施されているコンクリートガラの路盤材への再利用を含む。



図 1F構内におけるコンクリートガラ再利用の例

## c. 保管管理の観点による核種の追加

- 廃棄物保管施設の安全評価では、通常、被ばくに対してCo-60 ,Cs-137などのγ核種の影響が支配的である。
- 一方、中期的リスクの低減目標マップにおいて目標として設定された「放射能濃度に基づく屋外保管を含む合理的な保管方法」の検討を進めるにあたっては、通常 of 廃棄物保管施設とは異なる評価条件になることも考えられる。核種毎の被ばく線量への影響の程度が変わる可能性があることから、想定する保管形態を踏まえた安全評価結果に基づき、被ばく線量に対して寄与率の高い核種を抽出する。
- なお、想定する保管形態の具体化は今後の課題である。分析データの蓄積により廃棄物の放射能濃度を把握し、安全に対して影響の大きい核種に対して効果的な対策を講じた合理的な保管方法及び施設構造について具体化を進めていく。



## d.廃棄物毎の個別の調整

- 分析対象核種（30核種）及び優先核種（10核種）を基本とした上で、廃棄物毎の特性を踏まえて、実際に分析対象とする核種について調整を行う。
- 分析対象核種は幅広く抽出していることから、廃棄物によっては重要度が低い核種が含まれる。分析ニーズを踏まえ、予備的安全評価結果等を参考に、分析対象とする核種について優先順位を考えながら分析リソースを配分する。
- 優先核種は、放射能濃度に基づく合理的な廃棄物対策を講ずるにあたり支配的となる可能性の高い核種であり、原則として分析対象とする。
- 分析ニーズに合わせて段階的に対象核種を拡げていく。

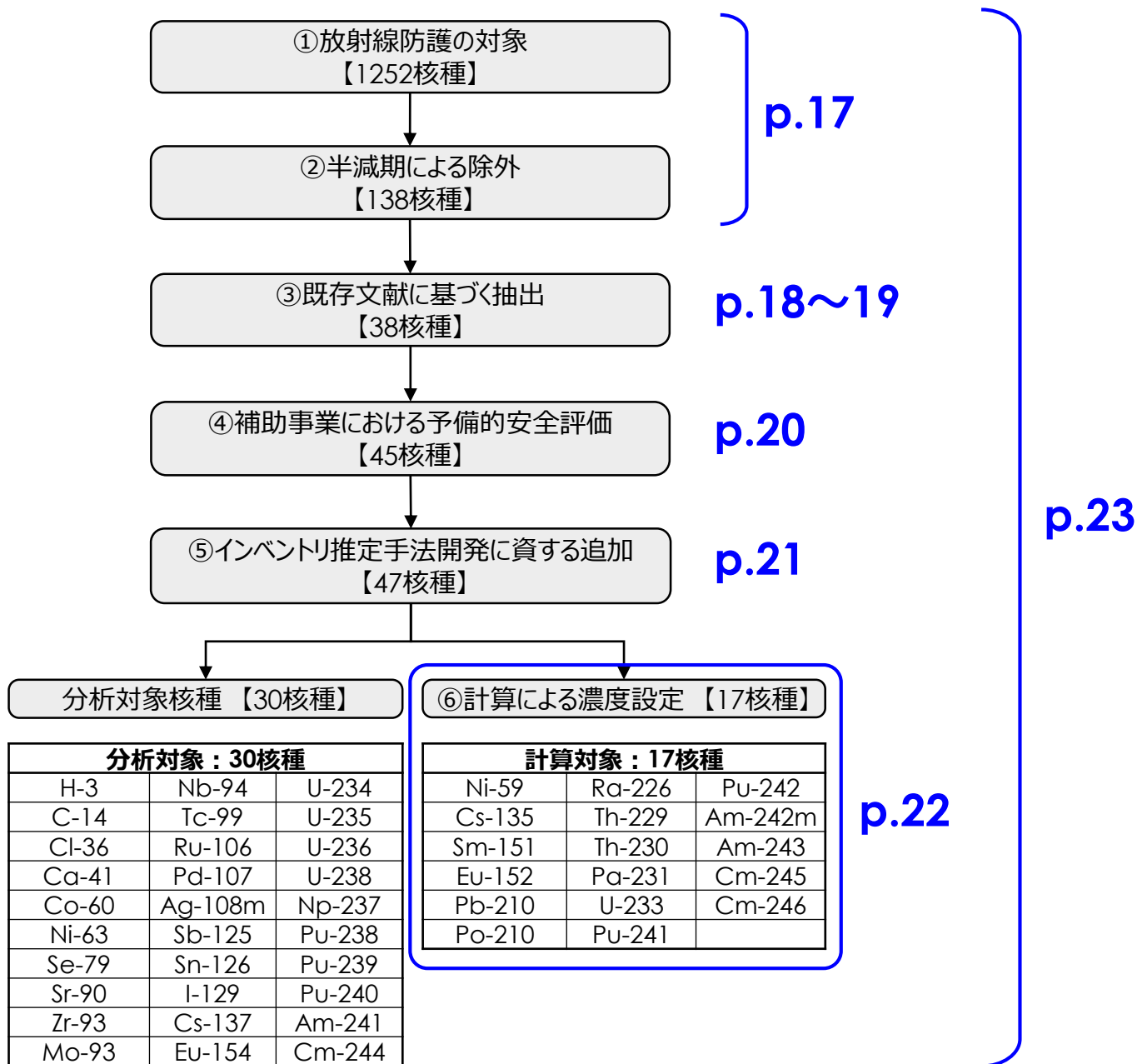
表 実際に分析対象とする核種について調整の考え方

| 分類               |                  | 核種  | 対応   |
|------------------|------------------|---|--|
| 分析対象核種<br>(30核種) | 優先核種<br>(10核種)   | C-14, Cl-36, Co-60, Ni-63,<br>Sr-90, Tc-99, I-129, Cs-137,<br>Pu-238, Am-241  | <ul style="list-style-type: none"> <li>放射能濃度に基づく合理的な廃棄物対策を講ずるにあたり支配的となる可能性の高い核種であり、原則として分析対象とする。</li> </ul>  |
|                  | 優先核種以外<br>(20核種) | H-3, Ca-41, Se-79, Zr-93,<br>Mo-93, Nb-94, Ru-106, Pd-<br>107, Ag-108m, Sb-125, Sn-<br>126, Eu-154, U-234, U-235,<br>U-236, U-238, Np-237, Pu-<br>239, Pu-240, Cm-244 | <ul style="list-style-type: none"> <li>廃棄物の特性、安全評価結果等を踏まえ、重要度が低いと考えられる核種は分析対象から除外、分析頻度を下げるなどの調整を行う。</li> <li>分析ニーズ及び分析施設的能力等を踏まえながら、分析対象を拡げていく。</li> </ul> |

- 1F固体廃棄物の分析対象として、分析対象核種（30核種）及び優先核種（10核種）を設定した。
- 上記の分析対象核種を基本とした上で、実際に分析対象とする核種は廃棄物毎の特性、分析施設的能力等を勘案して調整を行う。
- 必要に応じて、保管管理、再利用の観点による分析対象核種を追加する。それぞれ想定される廃棄物の状態を踏まえた安全評価において、被ばく線量に対する寄与率の高い核種を抽出する。
- 廃炉進捗に伴い具体化される条件・情報を反映し、継続的に安全評価の更新を行い、必要に応じて分析対象核種の見直しを図る。
- なお、廃棄物毎の分析数やその考え方などを整理した1F固体廃棄物の分析計画（2025年度版）を2024年度内に公表予定である。



# 参考



- ① ICRP Pub.107に掲載された核種を評価対象とする【1252核種】
- ② 半減期1年未満の核種を除外【138核種】

表 抽出した核種 (138核種)

| 核種     | 半減期(y)      | 核種      | 半減期(y)   | 核種      | 半減期(y)      | 核種      | 半減期(y)   |
|--------|-------------|---------|----------|---------|-------------|---------|----------|
| H-3    | 12.32       | Rh-101  | 3.3      | Dy-154  | 3.00E+06    | Th-230  | 7.54E+04 |
| Be-10  | 1.51E+06    | Rh-102m | 3.742    | Ho-163  | 4570        | Th-232  | 1.41E+10 |
| C-14   | 5.70E+03    | Pd-107  | 6.50E+06 | Ho-166m | 1.20E+03    | Pa-231  | 3.28E+04 |
| Na-22  | 2.6019      | Ag-108m | 418      | Tm-171  | 1.92        | U-232   | 68.9     |
| Al-26  | 7.17E+05    | Cd-113  | 7.70E+15 | Np-235  | 1.084462697 | U-233   | 1.59E+05 |
| Si-32  | 132         | Cd-113m | 14.1     | Lu-173  | 1.37        | U-234   | 2.46E+05 |
| Cl-36  | 3.01E+05    | In-115  | 4.41E+14 | Lu-174  | 3.31        | U-235   | 7.04E+08 |
| Ar-39  | 269         | Sn-121m | 43.9     | Lu-176  | 3.85E+10    | U-236   | 2.34E+07 |
| Ar-42  | 32.9        | Sn-126  | 2.30E+05 | Hf-172  | 1.87        | U-238   | 4.47E+09 |
| K-40   | 1.25E+09    | Sb-125  | 2.75856  | Hf-174  | 2.00E+15    | Np-236  | 1.54E+05 |
| Ca-41  | 1.02E+05    | Te-123  | 6.00E+14 | Hf-178m | 31          | Np-237  | 2.14E+06 |
| Ti-44  | 60          | I-129   | 1.57E+07 | Hf-182  | 9.00E+06    | Pu-236  | 2.858    |
| V-50   | 1.50E+17    | Cs-134  | 2.0648   | Ta-179  | 1.82        | Pu-238  | 87.7     |
| Mn-53  | 3.70E+06    | Cs-135  | 2.30E+06 | Re-186m | 2.00E+05    | Pu-239  | 2.41E+04 |
| Fe-55  | 2.737       | Cs-137  | 30.1671  | Re-187  | 4.12E+10    | Pu-240  | 6564     |
| Fe-60  | 1.50E+06    | Ba-133  | 10.52    | Os-186  | 2.00E+15    | Pu-241  | 14.35    |
| Cd-109 | 1.263244353 | La-137  | 6.00E+04 | Os-194  | 6           | Pu-242  | 3.75E+05 |
| Co-60  | 5.2713      | La-138  | 1.02E+11 | Ir-192n | 241         | Pu-244  | 8.00E+07 |
| Ni-59  | 1.01E+05    | Nd-144  | 2.29E+15 | Pt-190  | 6.50E+11    | Am-241  | 432.2    |
| Ni-63  | 100.1       | Pm-145  | 17.7     | Pt-193  | 50          | Am-242m | 141      |
| Se-79  | 2.95E+05    | Pm-146  | 5.53     | Hg-194  | 440         | Am-243  | 7.37E+03 |
| Kr-81  | 2.29E+05    | Pm-147  | 2.6234   | Tl-204  | 3.78        | Cm-243  | 29.1     |
| Kr-85  | 10.756      | Sm-146  | 1.03E+08 | Pb-202  | 5.25E+04    | Cm-244  | 18.1     |
| Rb-87  | 4.92E+10    | Sm-147  | 1.06E+11 | Pb-205  | 1.53E+07    | Cm-245  | 8.50E+03 |
| Sr-90  | 28.79       | Sm-148  | 7.00E+15 | Pb-210  | 22.2        | Cm-246  | 4.76E+03 |
| Zr-93  | 1.53E+06    | Sm-151  | 90       | Bi-207  | 32.9        | Cm-247  | 1.56E+07 |
| Nb-91  | 680         | Eu-150  | 36.9     | Bi-208  | 3.68E+05    | Cm-248  | 3.48E+05 |
| Nb-92  | 3.47E+07    | Eu-152  | 13.537   | Bi-210m | 3.04E+06    | Cm-250  | 8300     |
| Nb-93m | 16.13       | Eu-154  | 8.593    | Po-208  | 2.898       | Bk-247  | 1.38E+03 |
| Nb-94  | 2.03E+04    | Eu-155  | 4.7611   | Po-209  | 102         | Cf-249  | 351      |
| Mo-93  | 4.00E+03    | Gd-148  | 74.6     | Ra-226  | 1600        | Cf-250  | 13.08    |
| Tc-97  | 2.60E+06    | Gd-150  | 1.79E+06 | Ra-228  | 5.75        | Cf-251  | 900      |
| Tc-98  | 4.20E+06    | Gd-152  | 1.08E+14 | Ac-227  | 21.772      | Cf-252  | 2.645    |
| Tc-99  | 2.11E+05    | Tb-157  | 71       | Th-228  | 1.9116      |         |          |
| Ru-106 | 1.0228      | Tb-158  | 180      | Th-229  | 7.34E+03    |         |          |

③既存文献に基づく抽出 【38核種】

- 放射性廃棄物に関する既存の文書・レポートの評価・検討事例において、評価対象として抽出された核種の和集合を分析対象核種として設定した。

表 参照した既存の放射性廃棄物に関する評価・検討事例

| 分類            | 処分区分 |    |    |    | 引用文献   |
|---------------|------|----|----|----|--|
|               | L3   | L2 | L1 | 地層 |  |
| #1 LLW濃度上限値   | ○    | ○  | ○  |    | 原子力安全委員会, "低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について", 平成19年5月.   |
| #2 JNFL L2許認可 |      | ○  |    |    | 日本原燃株式会社, "六ヶ所低レベル放射性廃棄物貯蔵センター 廃棄物埋設事業許可申請書", 昭和63年4月.   |
| #3 JPDR許認可    | ○    |    |    |    | 日本原子力研究所, "日本原子力研究所東海研究所 廃棄物埋設事業許可申請書", 平成5年10月, 平成6年11月一部補正.  |
| #4 TRU2次レポート  | ○    | ○  | ○  | ○  | 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構, "TRU廃棄物処分技術検討書; 第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ", JNC TY1400 2005-013/ FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005年. |
| #5 HLW2次レポート  |      |    |    | ○  | 核燃料サイクル開発機構, "わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性, 地層処分研究開発第2次取りまとめ, 総論レポート", JNC TN1400 99-020, 1999年.               |

表 既存文献に基づく抽出 評価結果

| 核種      | LLW濃度上限値 |       |       | 埋設事業許可申請書 |          | 技術レポート |       |
|---------|----------|-------|-------|-----------|----------|--------|-------|
|         | L3       | L2    | L1    | L2(JNFL)  | L3(JPDR) | TRU2次  | HLW2次 |
| H-3     |          |       |       | ○         | ○        | ○      |       |
| C-14    | -        | 1E+11 | 1E+16 | ○         | ○        | ○      |       |
| Cl-36   | -        | -     | 1E+13 |           | ○        | ○      |       |
| Ca-41   |          |       |       |           | ○        |        |       |
| Co-60   | 1E+10    | 1E+15 | -     | ○         | ○        | ○      |       |
| Ni-59   |          |       |       | ○         |          | ○      |       |
| Ni-63   | -        | 1E+13 | -     | ○         | ○        | ○      |       |
| Se-79   |          |       |       |           |          | ○      | ○     |
| Sr-90   | 1E+07    | 1E+13 | -     | ○         | ○        | ○      |       |
| Zr-93   |          |       |       |           |          | ○      | ○     |
| Nb-94   |          |       |       | ○         |          | ○      | ○     |
| Mo-93   |          |       |       |           |          | ○      |       |
| Tc-99   | -        | 1E+09 | 1E+14 | ○         |          | ○      | ○     |
| Pd-107  |          |       |       |           |          | ○      | ○     |
| Sn-126  |          |       |       |           |          | ○      | ○     |
| I-129   | -        | -     | 1E+12 | ○         |          | ○      |       |
| Cs-135  |          |       |       |           |          | ○      | ○     |
| Cs-137  | 1E+08    | 1E+14 | -     | ○         | ○        | ○      |       |
| Sm-151  |          |       |       |           |          |        | ○     |
| Eu-152  |          |       |       |           | ○        |        |       |
| Eu-154  |          |       |       |           | ○        |        |       |
| 全α      | -        | 1E+10 | 1E+11 | ○         | ○        | ○      |       |
| U-233   |          |       |       |           |          | ○      | ○     |
| U-234   |          |       |       |           |          | ○      | ○     |
| U-235   |          |       |       |           |          | ○      | ○     |
| U-236   |          |       |       |           |          | ○      | ○     |
| U-238   |          |       |       |           |          | ○      | ○     |
| Np-237  |          |       |       |           |          | ○      | ○     |
| Pu-238  |          |       |       |           |          | ○      |       |
| Pu-239  |          |       |       |           |          | ○      | ○     |
| Pu-240  |          |       |       |           |          | ○      | ○     |
| Pu-241  |          |       |       |           |          | ○      | ○     |
| Pu-242  |          |       |       |           |          | ○      | ○     |
| Am-241  |          |       |       |           |          | ○      | ○     |
| Am-242m |          |       |       |           |          | ○      |       |
| Am-243  |          |       |       |           |          | ○      | ○     |
| Cm-244  |          |       |       |           |          | ○      |       |
| Cm-245  |          |       |       |           |          | ○      | ○     |
| Cm-246  |          |       |       |           |          |        | ○     |

## ④補助事業における予備的安全評価 【7核種追加 → 45核種】

- 補助事業（2020年度）で実施した1F固体廃棄物を対象とした予備的安全評価結果を参考に、7核種(Ag-108m,Pb-210,Po-210,Ra-226,Th-229,Th-230,Pa-231)を追加して45核種とした。
- 予備的安全評価は、現時点において具体的な評価条件の設定が困難であることから、放射能濃度、廃棄物溶出率、バリアの有無・性能などに関するパラメータスタディの形で実施されている。
- 上記評価結果において、各検討ケースの被ばく線量に対して寄与率1/1000以上の核種を抽出し、③で抽出した38核種に含まれていない7核種を追加した。

⑤インベントリ推定手法開発に資する追加 【2核種追加 → 47核種】

- インベントリ推定手法開発における核種移行挙動の評価を目的に、Csに次ぐ揮発性を有するγ核種であるRu-106,Sb-125の2核種（移行挙動が評価しやすい核種）を追加した。

表 核種移行挙動評価の観点から評価対象として追加する核種

| 原子番号 | 核種      | 半減期 (y)  | 壊変形式  | ④までに抽出した核種<br>(45核種) | 核種移行挙動の着眼点             | 備考 |
|------|---------|----------|-------|----------------------|------------------------|----|
| 1    | H-3     | 12.32    | β-    | ○                    | 揮発性                    |    |
| 6    | C-14    | 5.70E+03 | β-    | ○                    | 揮発性                    |    |
| 27   | Co-60   | 5.2713   | β-    | ○                    | 代表的な放射化核種・<br>基準（キー核種） |    |
| 34   | Se-79   | 2.95E+05 | β-    | ○                    | 揮発性                    |    |
| 38   | Sr-90   | 28.79    | β-    | ○                    | 代表的な汚染核種               |    |
| 44   | Ru-106  | 1.0228   | β-    |                      | 揮発性（中間的）               | 追加 |
| 47   | Ag-108m | 418      | EC IT | ○                    | 揮発性（中間的）               |    |
| 50   | Sn-126  | 2.30E+05 | β-    | ○                    | 揮発性（中間的）               |    |
| 51   | Sb-125  | 2.75856  | β-    |                      | 揮発性（中間的）               | 追加 |
| 55   | Cs-137  | 30.1671  | β-    | ○                    | 代表的な汚染核種・<br>基準（キー核種）  |    |
| 63   | Eu-154  | 8.593    | β- EC | ○                    | アクチノイド核種との類似性          |    |
| 92   | U-235   | 7.04E+08 | α     | ○                    | 燃料の主成分・親核種             |    |
| 92   | U-236   | 2.34E+07 | α     | ○                    | 燃料成分                   |    |
| 92   | U-238   | 4.47E+09 | α SF  | ○                    | 燃料の主成分・親核種             |    |
| 93   | Np-237  | 2.14E+06 | α     | ○                    | アクチノイド核種の系統性・親核種       |    |
| 95   | Am-241  | 432.2    | α     | ○                    | アクチノイド核種の系統性・親核種       |    |
| 96   | Cm-244  | 18.1     | α SF  | ○                    | アクチノイド核種の系統性・親核種       |    |



# 補助事業成果 ⑥計算による濃度設定

## ⑥計算による濃度設定 【17核種除外 → 30核種】

- 同位体や放射平衡の関係から計算により評価できる可能性を検討した。
- 論理的な計算で評価可能であり、既往の分析で不検出もしくは定量の実績がない核種は計算で評価を行うものとし、分析対象から除外した。
- 同位体として評価できるのは、Ni-59（Ni-63の同位体）、Cs-135（Cs-137の同位体）、Eu-152（Eu-154の同位体）。Sm-151は分析しうる同位体がないので、化学的な性質が似ているEu-152を参照して計算するものとした。

表 核種移行挙動評価の観点から評価対象として追加する核種

| 原子番号 | 核種      | 半減期 (y)  | 壊変形式     |           |         |      |
|------|---------|----------|----------|-----------|---------|------|
|      |         |          |          | 計算（同位体など） | 計算（娘核種） | 検出実績 |
| 28   | Ni-59   | 1.01E+05 | EC β+    | ✓         |         | 未    |
| 55   | Cs-135  | 2.30E+06 | β-       | ✓         |         | 未    |
| 62   | Sm-151  | 90       | β-       | ✓         |         | 未    |
| 63   | Eu-152  | 13.537   | EC β+ β- | ✓         |         | 未    |
| 82   | Pb-210  | 22.2     | β- α     |           | ✓       | 未    |
| 84   | Po-210  | 0.379    | α        |           | ✓       | 未    |
| 88   | Ra-226  | 1600     | α        |           | ✓       | 未    |
| 90   | Th-229  | 7.34E+03 | α        | ✓         | ✓       | 未    |
| 90   | Th-230  | 7.54E+04 | α        | ✓         | ✓       | 未    |
| 91   | Pa-231  | 3.28E+04 | α        |           | ✓       | 未    |
| 92   | U-233   | 1.59E+05 | α        | ✓         |         | 未    |
| 94   | Pu-241  | 14.35    | B- α     | ✓         |         | ✓    |
| 94   | Pu-242  | 3.75E+05 | α SF     | ✓         |         | ✓    |
| 95   | Am-242m | 141      | It α     | ✓         |         | 未    |
| 95   | Am-243  | 7.37E+03 | α        | ✓         |         | ✓    |
| 96   | Cm-245  | 8.50E+03 | α SF     | ✓         |         | 未    |
| 96   | Cm-246  | 4.76E+03 | α SF     | ✓         |         | 未    |

## 表 分析対象核種まとめ（補助事業成果）

| 原子番号 | 核種      | 半減期      |   | 選定の要素 |        |           |     | 分析対象核種<br>○：分析 -：計算 |
|------|---------|----------|---|-------|--------|-----------|-----|---------------------|
|      |         |          |   | ③既存文書 | ④予備的評価 | ⑤核種移行挙動   | ⑥計算 |                     |
| 1    | H-3     | 12.32    | y | ✓     | ✓      | 揮発性       |     | ○                   |
| 6    | C-14    | 5.70E+03 | y | ✓     | ✓      | 揮発性       |     | ○                   |
| 17   | Cl-36   | 3.01E+05 | y | ✓     | ✓      |           |     | ○                   |
| 20   | Ca-41   | 1.02E+05 | y | ✓     |        |           |     | ○                   |
| 27   | Co-60   | 5.2713   | y | ✓     |        | 放射化代表・基準  |     | ○                   |
| 28   | Ni-59   | 1.01E+05 | y | ✓     | ✓      |           | ✓   | -                   |
| 28   | Ni-63   | 100.1    | y | ✓     | ✓      |           |     | ○                   |
| 34   | Se-79   | 2.95E+05 | y | ✓     | ✓      | 揮発性       |     | ○                   |
| 38   | Sr-90   | 28.79    | y | ✓     | ✓      | 汚染代表      |     | ○                   |
| 40   | Zr-93   | 1.53E+06 | y | ✓     |        |           |     | ○                   |
| 41   | Nb-94   | 2.03E+04 | y | ✓     | ✓      |           |     | ○                   |
| 42   | Mo-93   | 4.00E+03 | y | ✓     |        |           |     | ○                   |
| 43   | Tc-99   | 2.11E+05 | y | ✓     | ✓      |           |     | ○                   |
| 44   | Ru-106  | 1.0228   | y |       |        | 揮発性（中間的）  |     | ○                   |
| 46   | Pd-107  | 6.50E+06 | y | ✓     |        |           |     | ○                   |
| 47   | Ag-108m | 418      | y |       | ✓      | 揮発性（中間的）  |     | ○                   |
| 50   | Sn-126  | 2.30E+05 | y | ✓     | ✓      | 揮発性（中間的）  |     | ○                   |
| 51   | Sb-125  | 2.75856  | y |       |        | 揮発性（中間的）  |     | ○                   |
| 53   | I-129   | 1.57E+07 | y | ✓     | ✓      |           |     | ○                   |
| 55   | Cs-135  | 2.30E+06 | y | ✓     | ✓      |           | ✓   | -                   |
| 55   | Cs-137  | 30.1671  | y | ✓     | ✓      | 汚染代表・基準   |     | ○                   |
| 62   | Sm-151  | 90       | y | ✓     |        |           | ✓   | -                   |
| 63   | Eu-152  | 13.537   | y | ✓     |        |           | ✓   | -                   |
| 63   | Eu-154  | 8.593    | y | ✓     |        | アクチニド核種類似 |     | ○                   |
| 82   | Pb-210  | 22.2     | y |       | ✓      |           | ✓   | -                   |
| 84   | Po-210  | 0.379    | y |       |        |           | ✓   | -                   |
| 88   | Ra-226  | 1600     | y |       | ✓      |           | ✓   | -                   |
| 90   | Th-229  | 7.34E+03 | y |       | ✓      |           | ✓   | -                   |
| 90   | Th-230  | 7.54E+04 | y |       | ✓      |           | ✓   | -                   |
| 91   | Pa-231  | 3.28E+04 | y |       | ✓      |           | ✓   | -                   |
| 92   | U-233   | 1.59E+05 | y | ✓     |        |           | ✓   | -                   |
| 92   | U-234   | 2.46E+05 | y | ✓     | ✓      |           |     | ○                   |
| 92   | U-235   | 7.04E+08 | y | ✓     |        | 燃料主成分・親核種 |     | ○                   |
| 92   | U-236   | 2.34E+07 | y | ✓     | ✓      | 燃料成分      |     | ○                   |
| 92   | U-238   | 4.47E+09 | y | ✓     | ✓      | 燃料主成分・親核種 |     | ○                   |
| 93   | Np-237  | 2.14E+06 | y | ✓     | ✓      | アクチニド・親核種 |     | ○                   |
| 94   | Pu-238  | 87.7     | y | ✓     | ✓      |           |     | ○                   |
| 94   | Pu-239  | 2.41E+04 | y | ✓     | ✓      |           |     | ○                   |
| 94   | Pu-240  | 6564     | y | ✓     | ✓      |           |     | ○                   |
| 94   | Pu-241  | 14.35    | y | ✓     |        |           | ✓   | -                   |
| 94   | Pu-242  | 3.75E+05 | y | ✓     | ✓      |           | ✓   | -                   |
| 95   | Am-241  | 432.2    | y | ✓     | ✓      | アクチニド・親核種 |     | ○                   |
| 95   | Am-242m | 141      | y | ✓     |        |           | ✓   | -                   |
| 95   | Am-243  | 7.37E+03 | y | ✓     | ✓      |           | ✓   | -                   |
| 96   | Cm-244  | 18.1     | y | ✓     |        | アクチニド・親核種 |     | ○                   |
| 96   | Cm-245  | 8.50E+03 | y | ✓     |        |           | ✓   | -                   |
| 96   | Cm-246  | 4.76E+03 | y | ✓     |        |           | ✓   | -                   |