



原子力規制委員会
Nuclear Regulation Authority

クリアランス制度に関する安全研究

長官官房技術基盤グループ 安全技術管理官（放射線・廃棄物担当）

酒井 宏隆

注：本講義内容は講師の技術的な見解であり原子力規制委員会の見解を示したものではありません。

本講義のポイント

- クリアランス制度の概要を説明できる。
- 測定の不確かさがクリアランス評価で用いられる理由を説明できる。
- 新しい対象物（ケーブル等）のクリアランス確認をどのように行う必要があるかを理解する。
- 今後のクリアランス関係での安全研究の主要な内容を理解する。
- 安全研究が原子力規制の運用を支える仕組みを理解する。

本講義を通じて、以上の点を身につけていただければ幸いです。

目次

日本における放射性廃棄物の概要

3

日本におけるクリアランス制度

6

これまでの安全研究の内容

12

(1) 測定の不確かさの考慮

(2) 新しい審査基準に対応した技術の検討

33

今後の安全研究

48

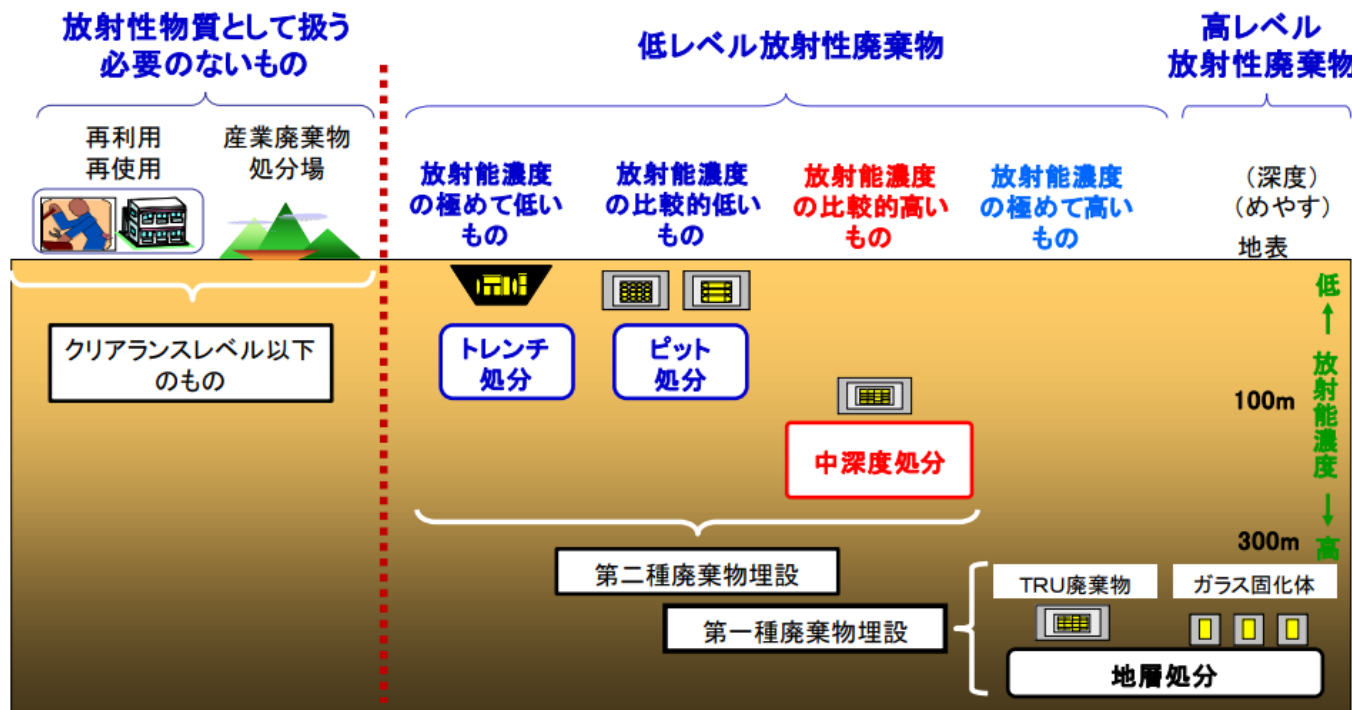
まとめ

53

日本における放射性廃棄物の概要

放射性廃棄物の区分

放射性廃棄物の処分：放射性廃棄物に含まれる放射性物質を起因とするリスクから公衆と生活環境を防護するため、廃棄物の種類や放射能濃度等に応じた埋設の方法により最終的な処分を行う。



【1】 出典：原規技発第 1608312 号「炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について」参考 3, 2016年8月(<https://www.nra.go.jp/data/000403922.pdf>, 2026年1月21日確認)

クリアランス制度：原子力発電所の運転・解体に伴って発生する放射性廃棄物のうち、**放射性物質の放射能濃度が極めて低く、人の健康への影響がほとんどないもの**は、国の許可・確認を得て、普通の廃棄物と同様に再利用や一般産業廃棄物としての処分ができる。

日本における低レベル廃棄物埋設施設

日本原子力発電株式会社
東海低レベル放射性廃棄物
埋設事業所（トレンチ処分）
（茨城県東海村）
審査中

日本原燃株式会社
濃縮・埋設事業所（ピット処分）
（青森県六ヶ所村）
（1号、2号、3号廃棄物埋設施設）

日本原子力研究開発機構
廃棄物埋設実地試験施設
（茨城県東海村）
保全段階

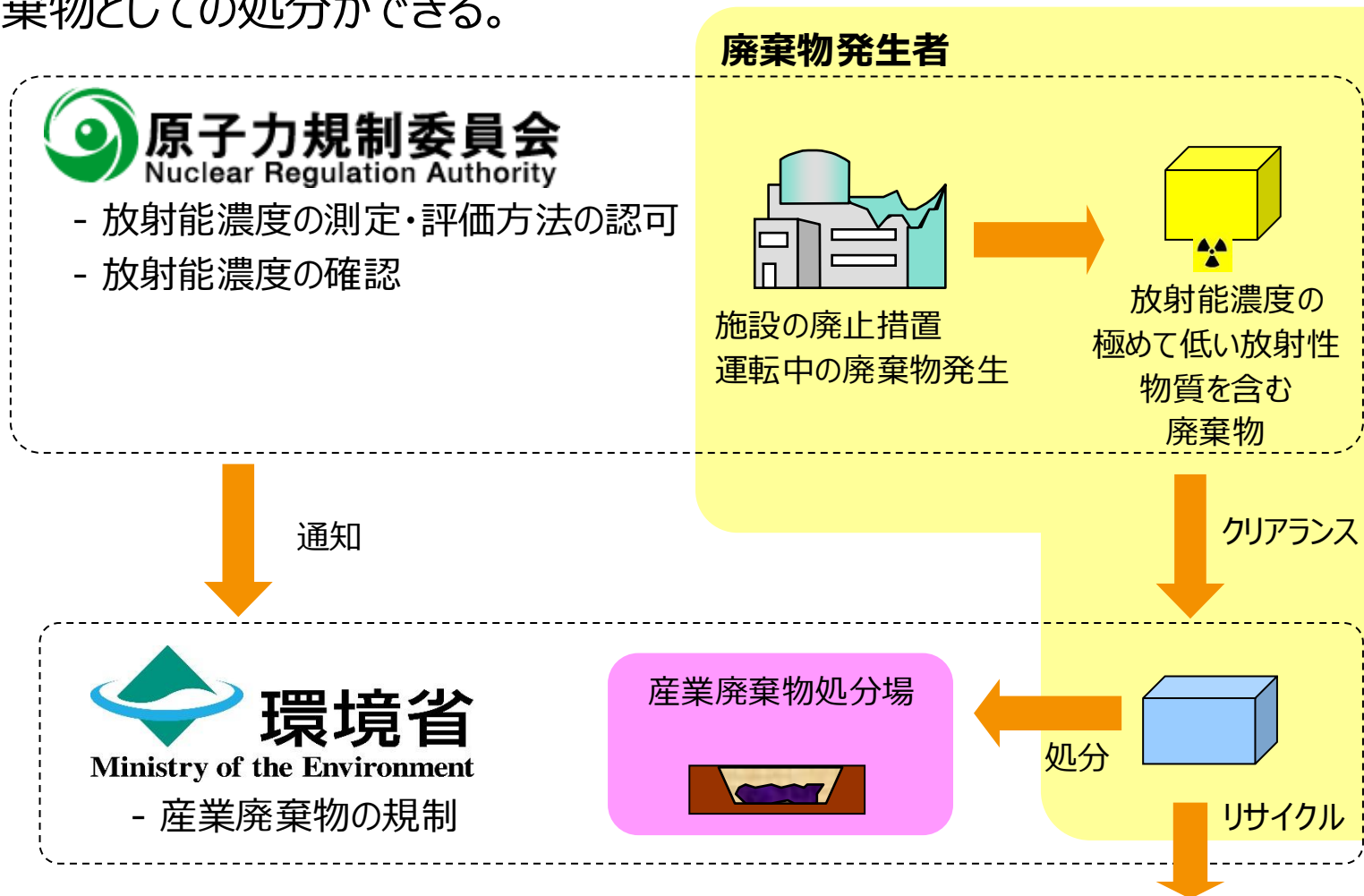
【2】出典：国土地理院「地理院タイル」

(<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>) 白地図に埋設事業所の所在地を追記

日本におけるクリアランス制度

クリアランス制度

原子力発電所の運転・解体に伴って発生する放射性廃棄物のうち、**放射性物質の放射能濃度が極めて低く、人の健康への影響がほとんどないもの**は、国の許可・確認を得て、普通の廃棄物と同様に再利用や一般の産業廃棄物としての処分ができる。



クリアランス・免除・除外

クリアランス (Clearance)

届出された又は認可を受けた行為内の放射性物質又は放射性の物体を、**規制機関による規制上の管理から外す**こと。

免除 (Exemption)

線源又は行為による被ばくと潜在被ばくがあまりにも小さくて、規制上の管理の側面の適用を是認しないか又は実際の線量若しくはリスクのレベルに関係なく、これが防護のための最適な選択肢であることに基づき、ある線源又は行為が、規制上の管理の一部又はすべての側面に従う必要がないとする規制機関による決定。

除外 (Exclusion)

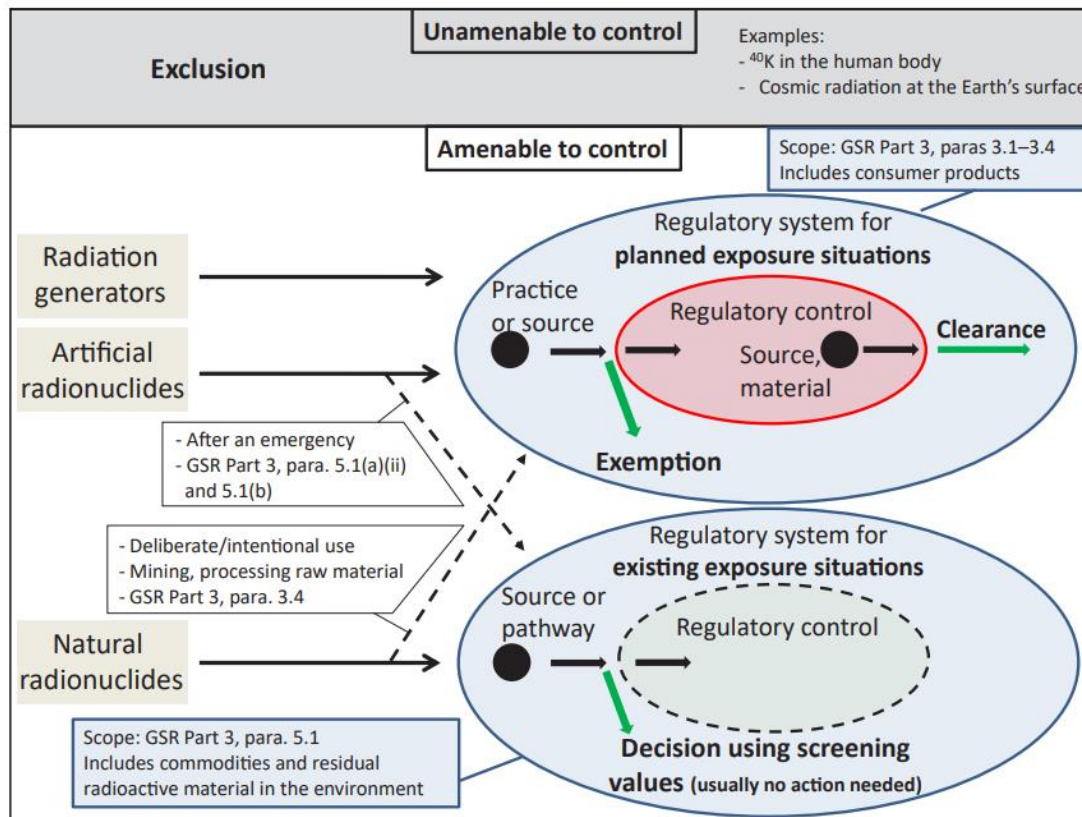
制御がなじまないとみなされる被ばく（宇宙線や体内のK-40からの被ばく等）

計画被ばく状況

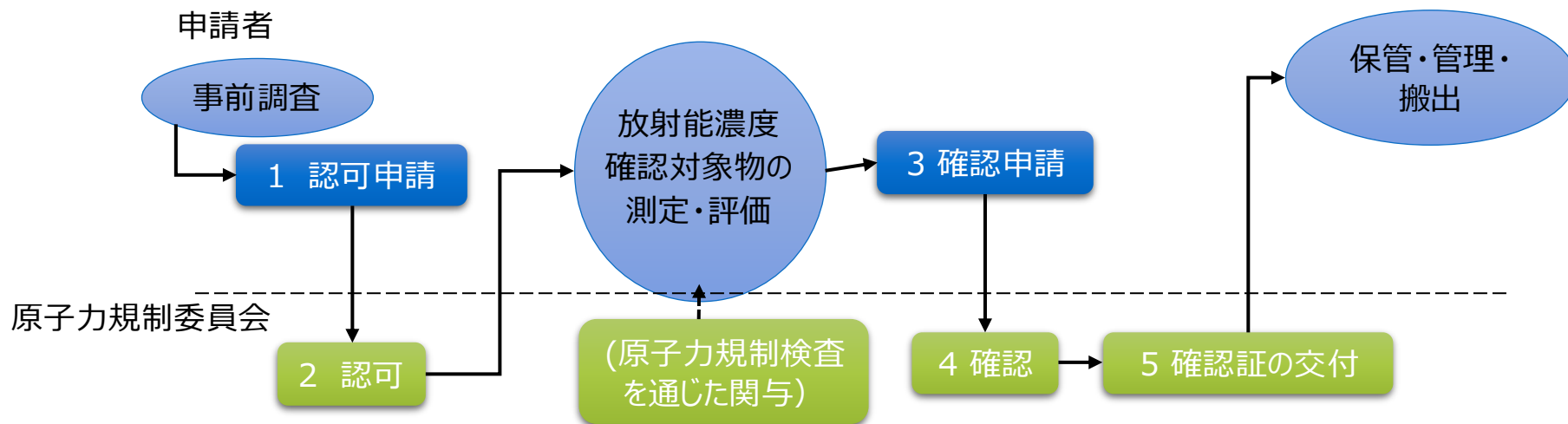
計画に基づく線源の運用や、結果的に線源により被ばくするというような、計画に基づく活動が原因の被ばく状況。線量限度を適用（一般公衆：1mSv/年、職業人100mSv/5年・50mSv/年）

現存被ばく状況

管理の必要性について判断を要するときに既に存在する被ばく状況。
参考レベルを適用（1～20mSv/年のうち低線量域）



【3】出典：GSG-18 Application of the Concept of Clearance, © IAEA, 2023, 127p



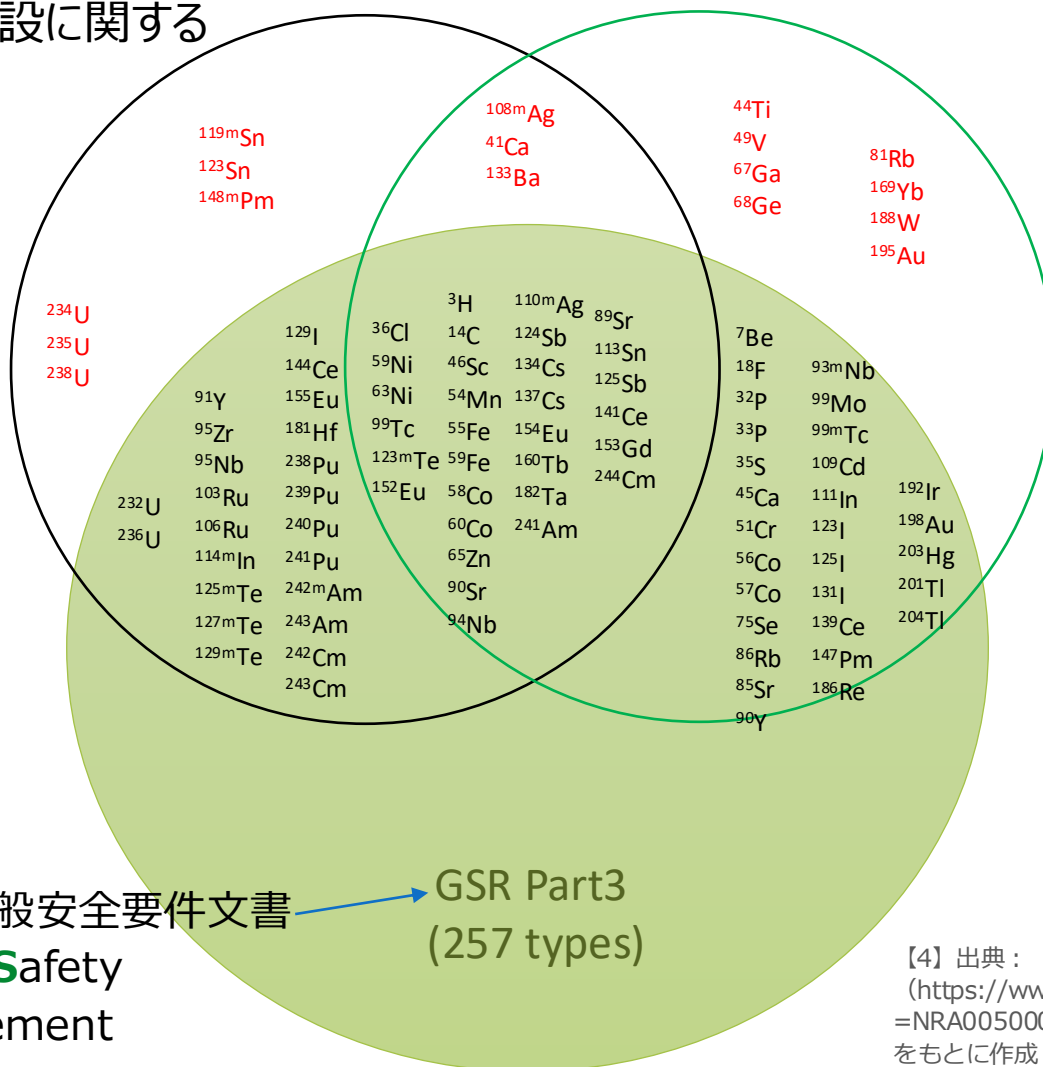
クリアランス規則※

1. 放射能濃度の測定及び評価の方法の認可の申請（第五条）
2. 測定及び評価の方法の認可の基準（第六条）
3. 確認の申請（第三条）
4. 放射能濃度確認証（第四条）

※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）

対象核種(全274核種)

原子力施設に関する
核種



放射性同位元素・放射線
発生装置に関する核種

クリアランスレベルの導出：
原子力発電所を出た資材がリ
サイクル・処分されたときにどん
な被ばくが起こり得るか？を想
定し、被ばく線量10 $\mu\text{Sv}/\text{年}$
を下回る放射能濃度
(Bq/kg) を計算する。
**放射能濃度の導出過程に
おいて測定の不確かさは
考慮されていない。**

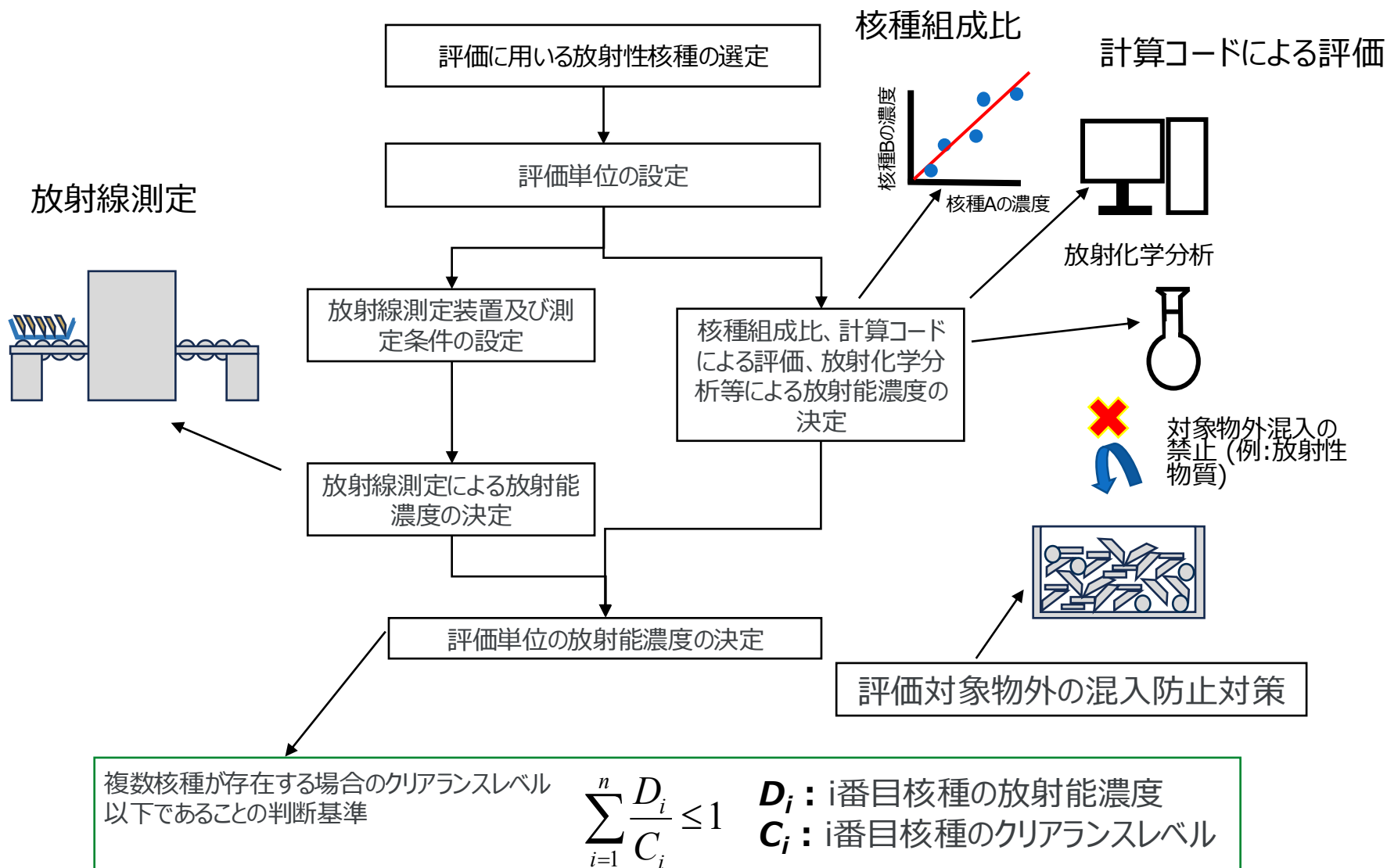
IAEAの一般安全要件文書
General Safety
Requirement

GSR Part3
(257 types)

【4】出典：「第149回放射線審議会総会」（原子力規制委員会）
(<https://www.da.nra.go.jp/view/NRA005000012?contents=NRA005000012-002-007#pdf=NRA005000012-002-007>)
をもとに作成

- 257核種に対しては、IAEAが放射能濃度を計算→日本もその値を採用
- 17核種については日本で独自に値を計算して設定した。
- 原子炉等規制法の対象施設はクリアランス規則の核種が、RI法（放射性同位元素等の規制に関する法律）の対象施設はRI法告示の核種が、規制の対象になる。

クリアランス確認の流れ



これまでの安全研究の内容

(1) 測定の不確かさの考慮

クリアランス確認における測定の不確かさの考慮

クリアランスレベルを超えていない判断をする際の、放射能濃度測定・評価における測定の不確かさの考慮の考え方が明確化されていなかった。



計量・測定分野の標準化された手法や国際的な動向を参考に、クリアランス確認においてどのように測定の不確かさを考慮すべきかを調査・検討した。



クリアランスの審査基準の制定放射能濃度についての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（原規規発第 2506251 号）



IAEAのクリアランスのガイド文書
IAEA GSG-18 Application of
the Concept of Clearance

測定結果の妥当性の定量化

- 統計的変動由来の値のばらつき = 繰り返し測定の標準偏差
- **統計的変動以外**の値の偏り、不正確さ

両者を関連づけて評価するための手段が定まっておらず、分野、地域、人でどのようにも設定できた。「エラーバー」といっても意味合いが都度異なっていた。



この両者を総合的に評価して、測定の妥当性を統一的に定量化するための方法論
：**測定の不確かさ**

測定の結果（ISO/IEC Guide 98-3 3.1.2）

- 測定の結果は測定対象量の値の近似値又は**推定値**に過ぎず、このためその推定値の**不確かさの記述を伴って初めて完全**なものになる。

計量標準とも関連して、測定がどこで行われても、同じ意味で表現されるための手段
ただし、他分野の測定では不確かさが測定値よりも十分に小さいことが多い

放射線計測、特に低濃度の放射能計測

- 測定で得られる値のばらつきが測定で得られた値自身と同じようなオーダーにある。
- 基準値を下回ることの妥当性を**不確かさを考慮して定量的に示す**必要性が高い

- 1980年 誤差、精度、不確かさの各国概念の違いの解消について
CIPM(国際度量衡委員会) からBIPM (国際度量衡局) へ勧告
- 1993年 Guide to the expression of uncertainty in
measurement (GUM) 初版発行
- 1995年 WTO/TBT協定、標準・校正等の国際共通化が求められる
→国家計量標準の「測定の不確かさ」への対応、国際比較
- 1999年 ISO 17025「試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項」発行
- 2000年 ISO 11929:2000シリーズ 1st Edition発行
- 2005年 ISO 17025:2005 校正試験で結果に不確かさを付記
- 2008年 GUM改訂 ISO/IEC Guide 98-3:2008
- 2010年 ISO 11929:2010改訂
- 2012年 適用性評価に関わるISO/IEC Guide 98-4:2012発行
- 2015年 IEC TR 62461「放射線防護計測器の不確かさの評価」発行
- 2016年 SSK(ドイツ放射線防護委員会)の適合性評価に係る勧告
- 2017年 ISO 17025:2017 一般試験でも結果に不確かさを付記
- 2019年~2025年 ISO 11929シリーズ改訂

測定の不確かさの規定

ISO/IEC Guide 98-3 (JCGM100) Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)

測定の不確かさ

- ある測定の結果の妥当性への疑い (ISO/IEC Guide 98-3 2.1)
- 測定の結果に付随した、合理的に測定対象量に結びつけられ得る値のばらつきを特徴付けるパラメータ (ISO/IEC Guide 98-3 2.2.3)

測定対象量をモデル化する。(ISO/IEC Guide 98-3 4.1)

入力量の不確かさのタイプの分類(ISO/IEC Guide 98-3 4.2)

不確かさのタイプA評価(ISO/IEC Guide 98-3 2.3.2)

- 一連の観測値の統計的解析による不確かさ評価の方法
例：測定対象物の核種組成比の実測値M個から測定対象物の核種組成比の算術平均値の不確かさを求める。

不確かさのタイプB評価(ISO/IEC Guide 98-3 2.3.3)

- 一連の観測値の統計的解析以外の手段による不確かさ評価の方法
例：校正に使う標準線源の放射能の不確かさを校正証明書に記載から引用する。

不確かさのタイプを分類することの目的は、2つの方法を明示することであり、両者の成分の性質に差があることを示したものではない(ISO IEC Guide 98-3 3.3.4)。

「真の値」「真値」の概念 (ISO/IEC Guide 98-3 D3.5)

- “測定対象量”は“測定の対象となる**特定の量**”を意味する。
- “測定対象量の値”は“測定の対象となるある特定の**量の値**”を意味する。
- “特定の量”は一般に明確に**規定された量**（現象、物体又は物質の持つ属性で定量的に決定できるもの）と解釈される。
- したがって、“測定対象量の真の値”の**“真の”は不必要**である。

※ただし、個別分野の規格に落とし込まれる際には、“真の値(true value)”という用語は上記を認識した上でなお不確かさに係る説明において使用され続けている。(例：ISO 11929 4.用語の定義等)

測定に関する一連の用語を明確化した。

ISO 11929による測定の不確かさ

ISO 11929 Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the coverage interval) for measurements of ionizing radiation – Fundamentals and application 電離放射線の測定の特性限界 (決定しきい値、検出限界及び包含区間の限界) – 基礎及び応用

Part 1 Elementary applications: 2025年発行

Part 2 Advanced applications: 2019年発行

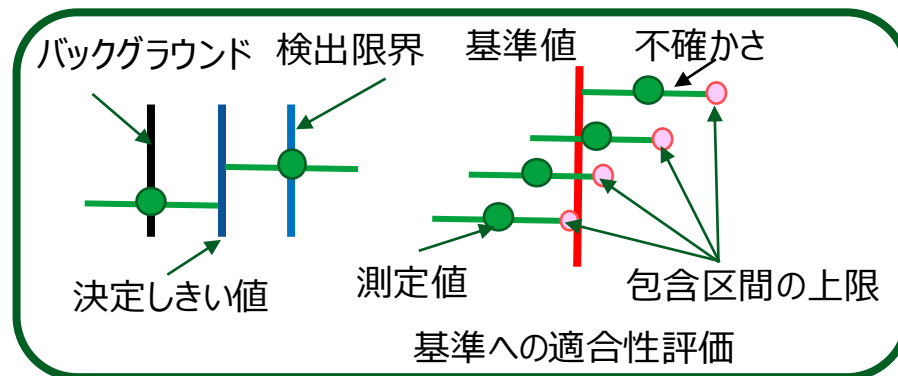
Part 3 Application to unfolding methods: 2019年発行

Part 4 Guidelines to applications: 2022年発行

2021年に日本規格協会から
英和対訳版が出版

GUMの考え方を基に放射線計測特有の条件を加味して以下の特性値を規定

- ・ 決定限界/決定しきい値(Decision Threshold/Decision Limit)
- ・ 検出限界(Detection Limit)
- ・ 包含区間の上下限(Limit of Coverage Interval)



ISO 11929による測定の不確かさ

(1) 測定対象量をモデル化する（大文字は測定対象量^量を意味する）

- ・ 測定対象量に影響を与えるパラメータの量を抽出する
- ・ パラメータの量と測定対象量との関係を数式化する

$$Y = G(X_1, X_2, \dots, X_m) = (X_1 - X_2 \cdot X_3 - X_4) \cdot \frac{X_6 \cdot X_8 \dots}{X_5 \cdot X_7 \dots}$$
$$= (X_1 - X_2 \cdot X_3 - X_4) \cdot W$$

Y : 測定対象量

X_n : 測定に係る入力量

ただし、 $W = \frac{X_6 \cdot X_8 \dots}{X_5 \cdot X_7 \dots}$

(2) 測定等を通し、入力量の値とその不確かさを求める。

（小文字は測定対象量の値^値を意味する）

x_n : 測定に係る入力量 X_n の入力推定値

$u(x_n)$: 測定に係る入力量 X_n の入力推定値の不確かさ

(3) 測定を通して得られた結果から測定値と、測定の不確かさを求める。

- 各入力量が独立で測定対象量の値付近で線形近似が成立する場合には二乗和で合成
- そうでない場合にはモンテカルロ法で合成

$$y = G(x_1, x_2, \dots, x_m) = (x_1 - x_2 \cdot x_3 - x_4) \cdot w \text{ ただし、 } w = \frac{x_6 \cdot x_8 \cdots}{x_5 \cdot x_7 \cdots}$$

$$\frac{\partial G}{\partial X_1} = W; \frac{\partial G}{\partial X_2} = -X_3 \cdot W; \frac{\partial G}{\partial X_3} = -X_2 \cdot W; \frac{\partial G}{\partial X_4} = -W; \frac{\partial G}{\partial X_i} = \pm \frac{Y}{X_i} (i \geq 5)$$

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^m \left\{ \left(\frac{\partial G}{\partial X_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) \right\}$$

$$u(y) = \sqrt{w^2 \cdot \left(u^2(x_1) + x_3^2 \cdot u^2(x_2) + x_2^2 \cdot u^2(x_3) + u^2(x_4) \right) + y^2 \cdot u_{rel}^2(w)}$$

$$\text{ただし、 } u_{rel}^2(w) = \sum_{i=5}^m \frac{u^2(x_i)}{x_i^2}$$

測定対象量をモデル化する→測定の中身の深い理解が必要

(1) 決定しきい値

IAEA Safety and Security Glossaryの特性値の定義（抜粋※）

最小有意放射能(MSA):

サンプル中に存在した場合にバックグラウンドからある一定の信頼の水準で確実に識別できる計数率を生じる放射能。

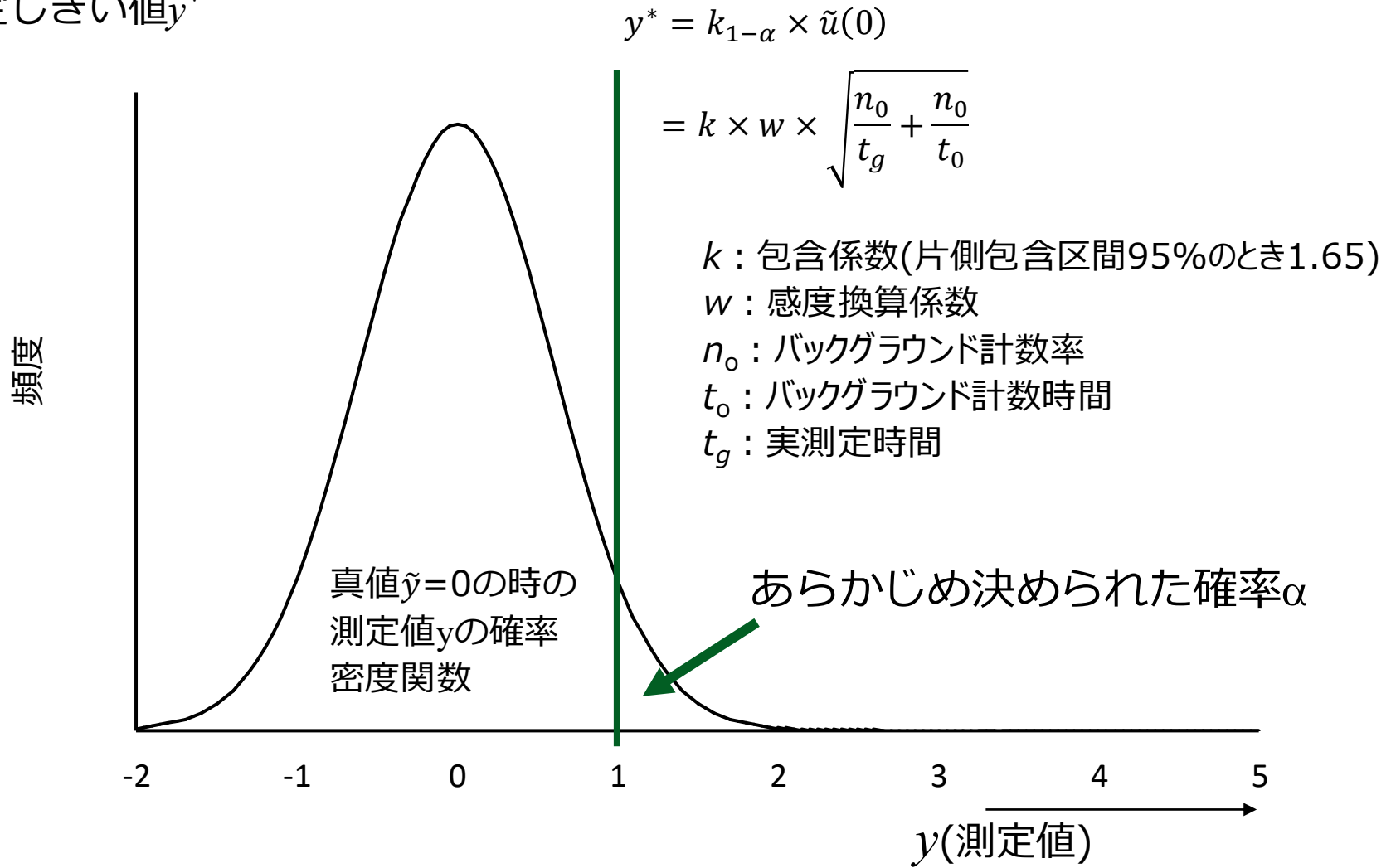
- ・ 最小有意放射能を含むサンプルは、統計のばらつきの結果として、50%の割合で放射性物質が含まれないとして扱われる。一方で、バックグラウンドのサンプルは95%の確率で、放射能が含まれないとして扱われる。
- ・ 最小有意放射能は、**決定しきい値**として参照されることもある。
- ・ 最小有意放射能を含むサンプルからの計数率はcritical levelと呼ばれる。

※：本記載はIAEA Safety and Security Glossary 2022の発表者による仮訳である。

ISO 11929で具体的な式が提示されている。

ISO 11929による測定の不確かさ

決定しきい値 y^*



(2) 検出限界

IAEA Safety and Security Glossaryの特性値の定義（抜粋※）

最小検出可能放射能（MDA）

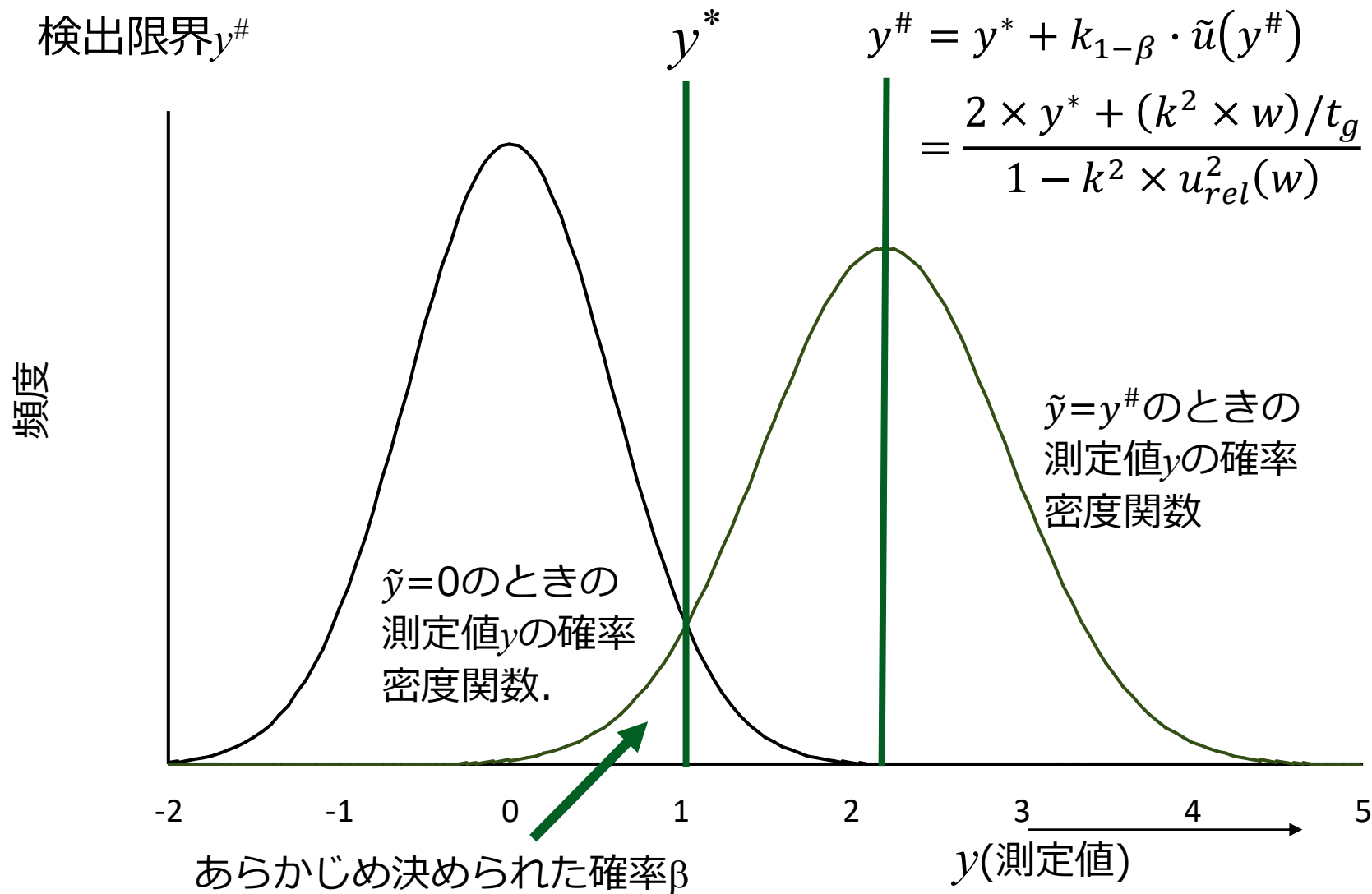
サンプル中に存在した場合に、バックグラウンドを上回ると考えられる計数率を生じる放射能。

- ・ 一定の信頼の水準は通常95%に設定される、すなわち、正確に最小検出可能放射能を含むサンプルは、統計のばらつきの結果として、5%の確率で放射能が含まれないとして扱われる。
- ・ 最小検出可能放射能は、**検出限界**または検出下限として参照されることもある。
- ・ 最小検出可能放射能を含むサンプルからの計数率はdetermination levelと呼ばれる。

※：本記載はIAEA Safety and Security Glossary 2022の発表者による仮訳である。

ISO 11929で具体的な式が提示されている。

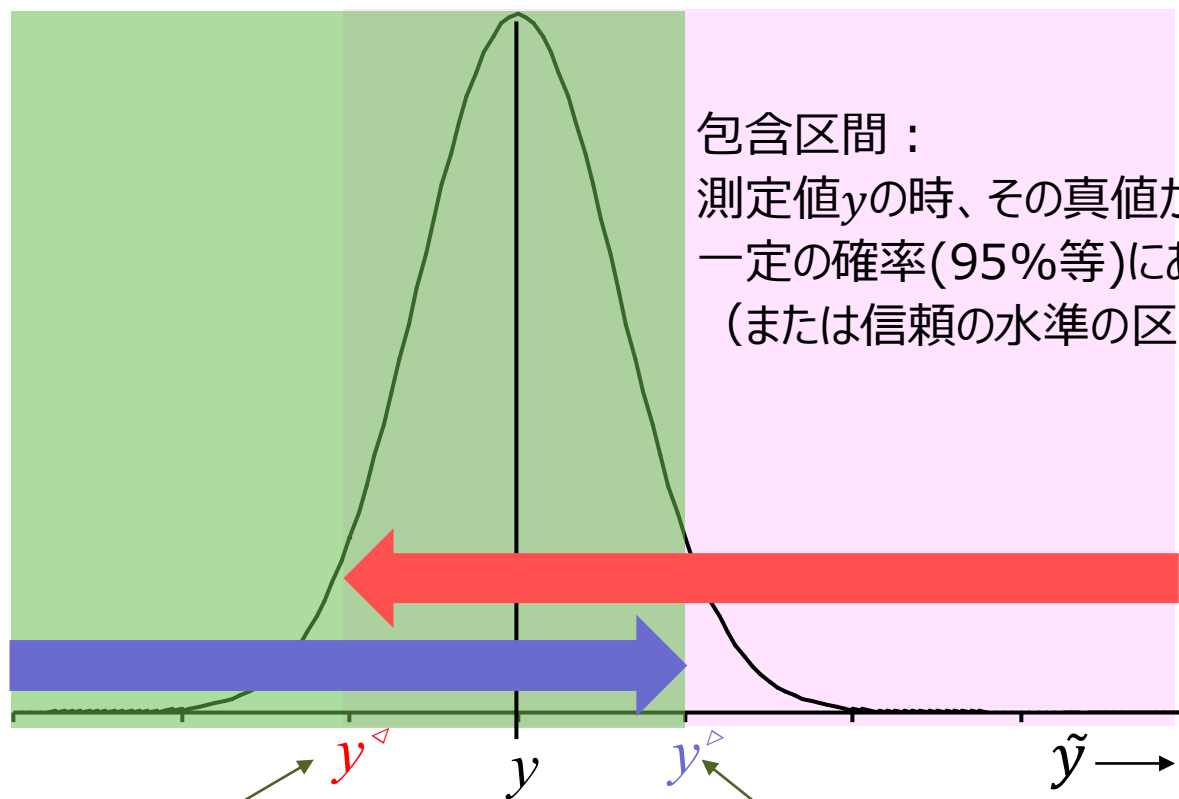
ISO 11929による測定の不確かさ



ISO 11929による測定の不確かさ

(3) 測定値の包含区間の上下限

$$y^{\triangleleft}, y^{\triangleleft} = y \pm k_{1-\gamma/2} \times u(y)$$



測定値の下側に限界がある
片側95%包含区間の下限値

測定値の上側に限界がある
片側95%包含区間の上限値

推定される放射能の真値が基準値を超えているか/下回っているかの判断に使用

測定の不確かさの考慮の比較

	日本原子力学会標準 「クリアランスの判断方法」 (2005)	IAEA GSG-18の記載 (2024) クリアランスの審査基準 (2019)
核種組成比 ※	サンプルの核種組成比の分布の中央値（幾何平均）を用いる。不確かさは大きい。	核種組成比の導出で用いたサンプルの質量と、評価単位的全質量の間の大きな違いを考慮する。
適合性評価	評価値 + 不確かさ ≤ クリアランスレベルの10倍	評価値 + 不確かさ ≤ クリアランスレベル

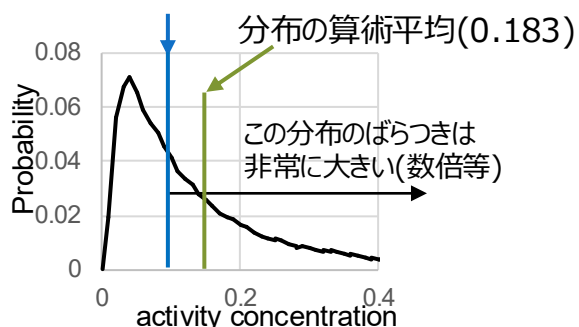
論点：

- 核種組成比に数倍オーダーの大きな不確かさを見込む必要性
- 適合性評価の計量分野での標準的な考え方の適用

※IAEA GSG-18では“Nuclide Vector”から“Scaling Factor”という表記に変更されたが、これは既存のLLWの文書で規定したScaling Factorの特性を備えることまで求めたものではなく、用語の定義上の核種の比という意味ではない。

測定の不確かさの考慮の比較 (核種組成比)

対数正規分布の中央値
(幾何平均)

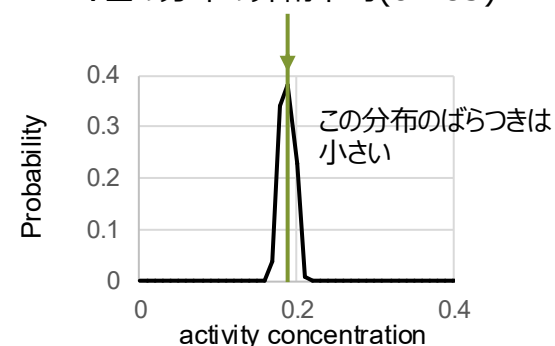


10⁵個の小サンプルの核種組成比の分布
幾何平均0.1、幾何標準偏差3

ランダムに1,000個
ずつサンプルして
それぞれの算術平均
を計算

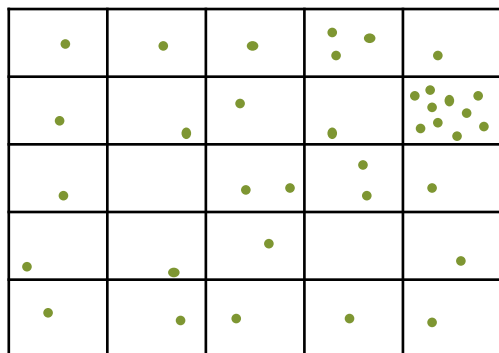


分布の算術平均の推定値
≡左の分布の算術平均(0.183)



母集団の算術平均の推定値の分布

【5】 Sakai, H., et al. Derivation of uncertainty propagation for clearance measurement, Applied Radiation and Isotopes Vol. 170 (2021) 109630の内容をもとに作図



単純化した例として左の場合：(全25ボックス、1ボックスを1kg、・1個を1Bqとする。)

0個：2ボックス
1個：18ボックス
2個：3ボックス
3個：1ボックス
10個：1ボックス

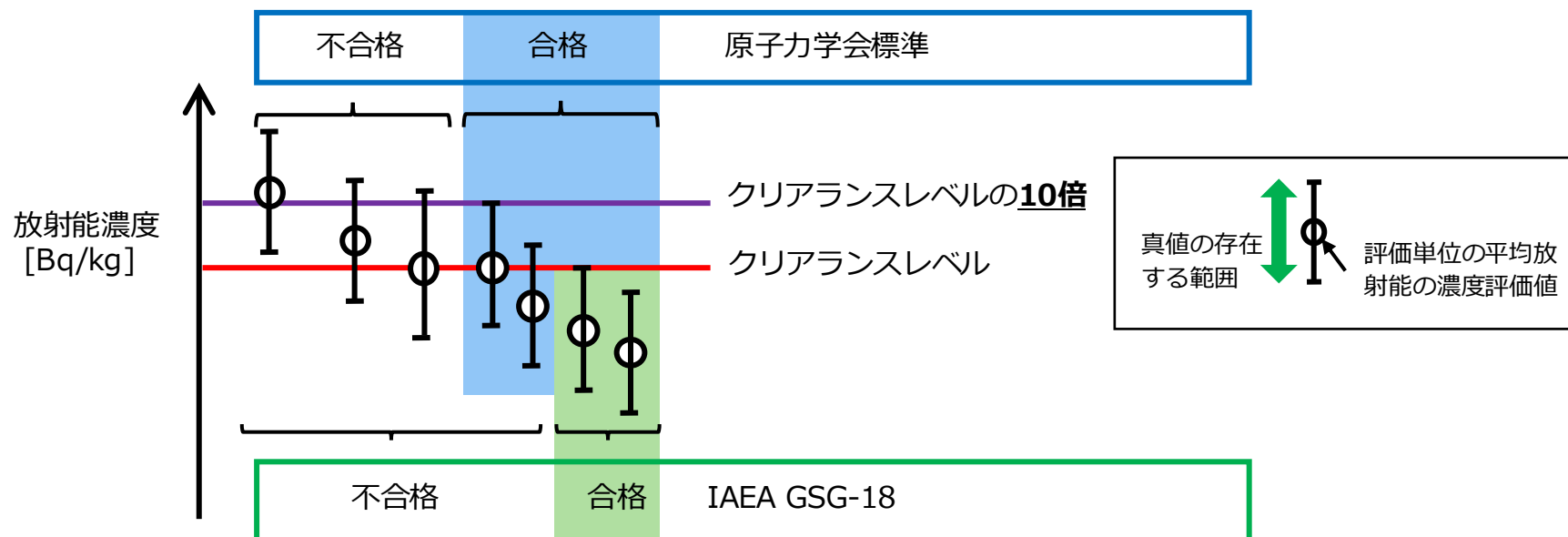
中央値:1.0 (Bq/kg)

算術平均:37/25=1.48(Bq/kg)

サンプルの分布そのもの

サンプルと評価単位の大きさの違いを考慮

測定の不確かさの考慮の比較 (適合性評価)



核種組成比に数倍オーダーの大きな不確かさを見込む必要はないので、適合性評価の計量分野での**標準的な考え方**が適用できる。



ISO/IEC/JISを通した測定の信頼性確保の枠組み

統計学的な見方：第二種の過誤（偽陰性）を抑えるような判断

既存の現場の放射線測定でとられてきた手段：

基準値に近い測定値が得られたら繰り返し測定を行い不確かさを低減する等

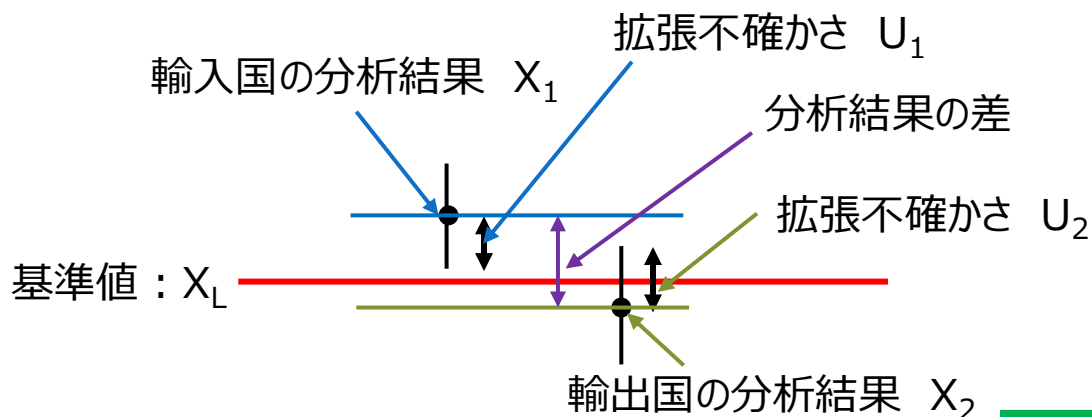
FAO/WHO コーデックス委員会

食品の分析（試験）結果をめぐる紛争解決に関するガイドライン CAC/GL 70-2009

厚労省/農水省HP <https://www.mhlw.go.jp/topics/idsenshi/codex/06/index.html>

http://www.maff.go.jp/j/syouan/kijun/codex/standard_list/pdf/cac_gl70.pdf

輸入国で基準値を超えた分析→輸出国で保存サンプルを分析



$$\text{許容差} : \Delta = (U_1^2 + U_2^2)^{1/2}$$

分析結果の差が許容差よりも小さければ輸入国の分析結果が有効

輸入国 拡張不確かさ U_1	輸出国 拡張不確かさ U_2	許容差 Δ
0.1	0.1	0.14
0.1	0.2	0.22
0	0.1	0.1

「出す側」が自らの測定結果だけで妥当性を主張する場合には拡張不確かさ分下回った分析結果が必要

放射能濃度についての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 原子力規制委員会（原規規発第 2506251 号）

3.3. 放射能濃度の決定方法

(1) 放射線測定法又は「放射性物質の組成比、計算その他の方法」によって評価単位を評価するに当たっては、以下のとおりであること。

イ：放射線測定法によって放射能濃度を決定する場合には、放射線測定値、測定効率（放射線検出器の校正、測定対象物と放射線測定器との位置関係、測定対象物内部での放射線の減衰等）、測定条件（実際の測定条件と測定効率を設定した条件との違い、測定場所周辺のバックグラウンドの変動等）、データ処理（放射能濃度換算等）に起因する**不確かさに関する適切な説明がなされている**こと。

（中略）

(2) 上記(1)に掲げる不確かさを考慮しても評価単位における評価に用いる放射性物質の $\Sigma Dj/Cj$ の**信頼の水準を片側95%としたときの上限値（以下「95%上限値」という。）が1を超えないこと**。ここで、「95%上限値が1を超えないこと」は、上記(1)のイからニまでの方法（の評価に用いた方法に限る。）に起因する不確かさがそれぞれ独立であるとしてモンテカルロ計算等で評価することや、これらの不確かさを考慮した95%上限値を個別に求めておくことにより評価することができる。

（後略）

Annex VII

DEALING WITH UNCERTAINTIES IN CLEARANCE MEASUREMENTS

VII-1. When considering the clearance of materials, due account should be taken of the measurement uncertainties. The upper confidence level of the measurement result should take into account all significant sources of uncertainty and should be below the clearance level. Examples of this approach are provided in Refs [VII-1 to VII-3]. Examples of linking the measurement uncertainty to the detection limit are provided in sections 5.1–5.3 of Ref. [VII-4]. However, noting the overall conservatisms inherent in clearance levels (see paras 4.12–4.16 of this Safety Guide), care should be taken, whenever possible, not to introduce significant additional conservatisms through this mechanism (i.e. by choosing suitable measurements techniques and measurement setups, by selecting appropriate measurement times, etc.).

【6】 出典 : GSG-18 Application of the Concept of Clearance, © IAEA, 2023, 127p

95%といった値は明示されなかったが、信頼区間の上限値がクリアランスレベルを下回することは明示された。

「測定の不確かさ」という科学的・技術的な定量性・同等性が担保された考え方の適用を明確化

1. 測定結果は測定値にその不確かさの記述を伴って初めて完全なものになる。

- 測定対象量が基準値を下回る要求がある場合には、測定値に拡張不確かさを加えても基準値を下回ること（「95%上限値」等）。
- 一方で、測定対象量の値の不確かさが、測定対象量の値に比べ非常に小さい場合には測定値を測定対象量の値とみなせる場合もある。（化学分析の分野の 10σ =定量下限の考え方）

- ・ 測定対象量を数式等で明確にモデル化
- ・ 「量」と「量の値」の違いを認識

2. 測定の信頼性をどこまで確保するかは測定者が決定

- 測定の不確かさを抑制するための測定にコストをかけて適合と判断できる量を増やすか、測定にコストをかけずに、適合したと判断できる量を減らすかは測定者が選択

- ・ 目的に応じた合理的な測定法を測定者自身で選択

3. 測定の不確かさを抑制するための技術

- 汚染分布、核種組成比等があいまいなまま評価を進めると過剰な保守性を設定する必要がある、バックグラウンド状態でも測定の不確かさ込みで基準値を超えてしまう。
→汚染分布の可視化、核種組成比の決定精度の向上等
複雑な演算、処理を行ったときに得られた量の値の不確かさをどう評価するか？
→計算処理能力の向上で、モンテカルロ計算が適用可能な場合も。
- 評価単位を適切に設定し、測定のサンプル数を十分に選ぶことで測定の不確かさを低減させることが可能。

- ・ 測定の不確かさを減らすための技術開発に対する動機

→母集団の算術平均の推定値の不確かさは小さく抑制できる。

これまでの安全研究の内容

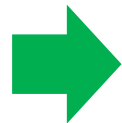
(2) 新しい審査基準に対応した技術の検討

新しい審査基準に対応した技術の検討

クリアランス審査基準：2020年改正

改正前の対象物

- 金属くず
- コンクリートがら
- ガラスくず



改正後の対象物
“固体状の物質”



ケーブル

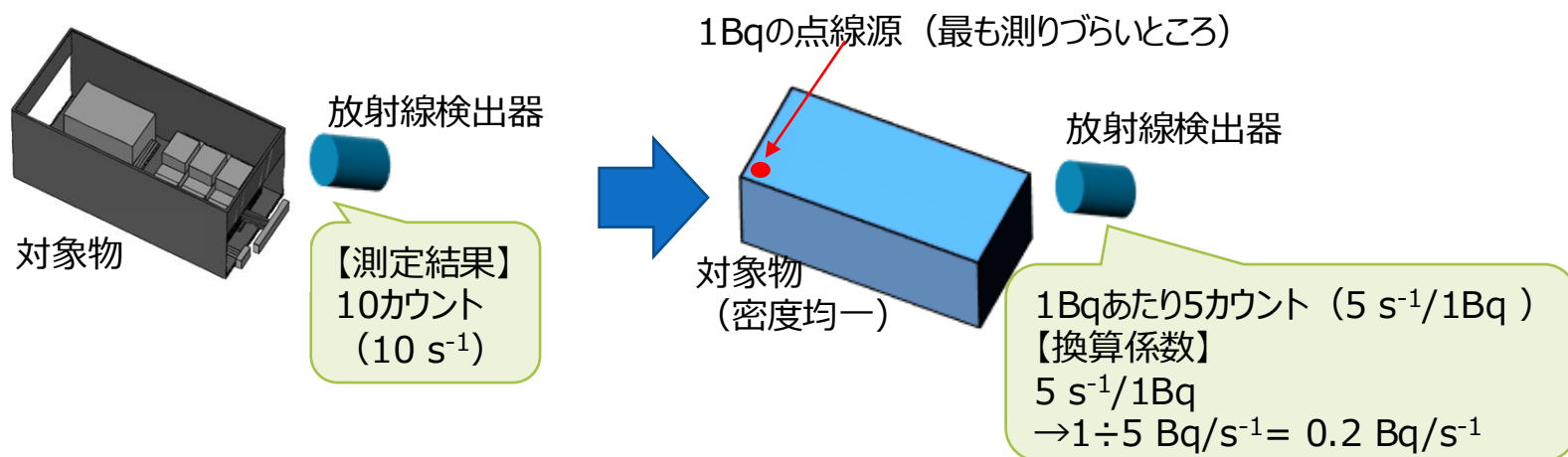
新規クリアランス対象物の例

新たなクリアランス対象物（新規クリアランス対象物）として、ケーブル、配電盤といった金属・プラスチックが混合したものが対象に挙がっている。

【7】出典：吉居大樹，「密度分布をもつクリアランス対象物の放射能評価におけるX線CTを用いた換算係数の選択に関する検討」，東京都市大学博士論文，博士（工学），2023年度（令和5年），甲第202号をもとに作図

- クリアランスできるかどうか？の判断には放射能を求めることが必要
- 放射線測定の結果（ s^{-1} ）を放射能（Bq）に変換するには、換算係数をどうやって決めるか、が最も重要
- 従来のクリアランスでは金属くずやコンクリートに均一密度換算係数を適用して評価
- ケーブルや配電盤のような金属・プラスチックが混合したのものにも、均一密度換算係数が適用可能かの評価を実施

放射能濃度換算係数の考え方



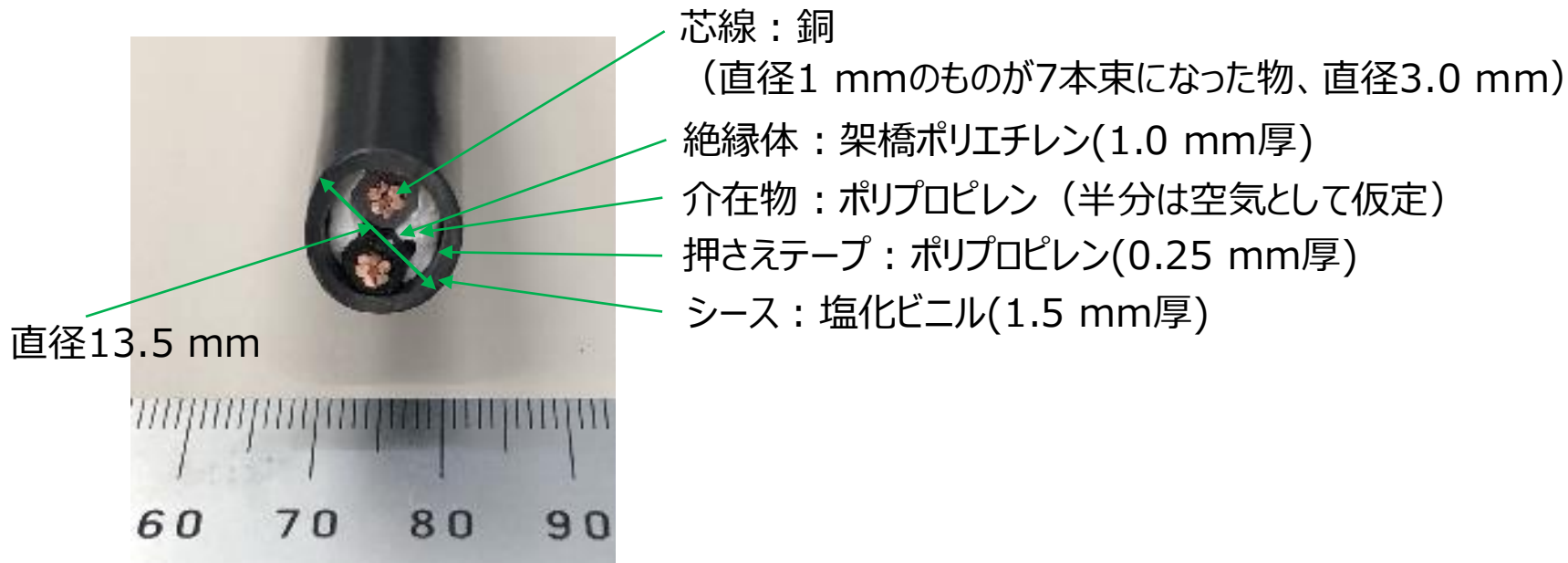
【8】出典：吉居大樹，「密度分布をもつクリアランス対象物の放射能評価におけるX線CTを用いた換算係数の選択に関する検討」，東京都市大学博士論文，博士（工学），2023年度（令和5年），甲第202号をもとに作図

- クリアランスの基準値は放射能濃度 (Bq/kg) のため、放射能 (Bq) がどれくらいか評価する必要がある。
- 放射線測定器の測定結果はカウント = 1 秒間に何本の放射線が入ってきたか？なので、その結果を放射能 (Bq) に変換しなければならない。
- 実際に適用されたものとして、①対象物を密度均一の物体とみなす、②放射線を最も測定しづらいところに1Bqの点線源があるとみなす、の2条件から換算係数 (Bq/s^{-1}) を算出する方法がある（以下「均一密度換算係数」という）。
- 例えば、測定結果が 10 s^{-1} 、換算係数 0.2 Bq/s^{-1} のとき、放射能は $10 \text{ s}^{-1} \times 0.2 \text{ Bq/s}^{-1} = 2 \text{ Bq}$ となる。
対象物の重さで割り算すれば Bq/kg が得られる。

ケーブルの測定に関する検討

研究テーマ：

ケーブル廃棄物に均一密度換算係数を適用したら、放射能を過小評価することなく評価できるのか？



【7】出典：吉居大樹，「密度分布をもつクリ
アランス対象物の放射能評価におけるX線CTを
用いた換算係数の選択に関する検討」，東京都
市大学博士論文，博士（工学），2023年度
（令和5年），甲第202号をもとに作図

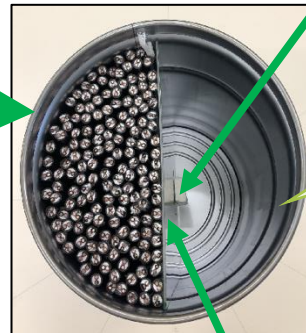
原子力発電所で使用されているケーブルを調査→2軸CVケーブルで検討

2軸CVケーブル
(直径1.35 cm、5.5 SQ)



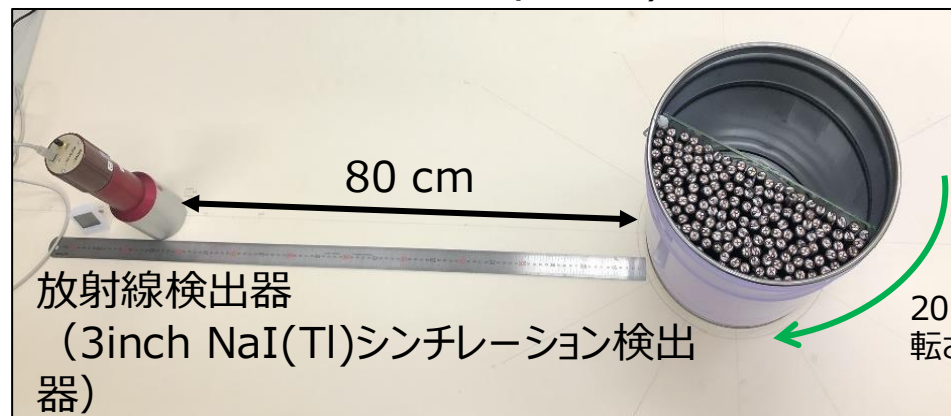
住電日立ケーブル製
600V架橋ポリエチレン絶縁
ビニルシースケーブル
(600VCV5.5SQx2C)

^{137}Cs 線源(1 MBq)



実際に50mのケーブルを購入
して30cmごとに切断、164本
分を挿入した。

仕切り板
(アクリル)



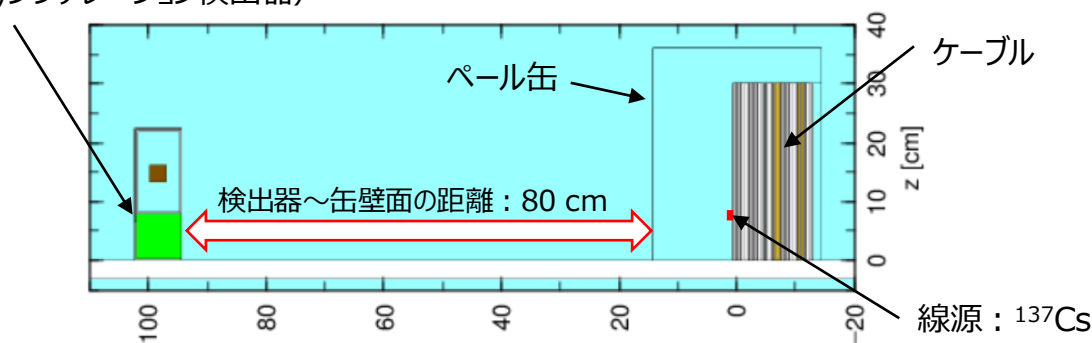
【9】 出典：吉居大樹，「密度分布をもつクリアランス対象物の放射能評価におけるX線CTを用いた換算係数の選択に関する検討」，東京都市大学博士論文，博士（工学），2023年度（令和5年），甲第202号をもとに作図

クリアランスの測定と同じような測定試験を実施し、 ^{137}Cs から放出される γ 線のカウントを測定した。

シミュレーション計算による評価体系

放射線検出器

(3inch NaI(Tl)シンチレーション検出器)



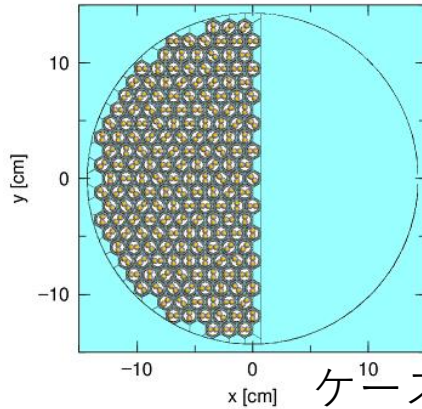
【10】 出典：吉居大樹，「密度分布をもつクリアランス対象物の放射能評価におけるX線CTを用いた換算係数の選択に関する検討」，東京都市大学博士論文，博士（工学），2023年度（令和5年），甲第202号をもとに作図

- 実験と同様の体系を、JAEAが開発し、遮蔽、検出器応答等で広く使われているモンテカルロ計算コードPHITS ver. 3.260※でシミュレーション計算を行い検証
- 線源から放出される放射線の飛跡を計算することで、放射線測定実験をコンピュータ上で再現し、放射線検出器の測定結果：カウントを計算により取得した。

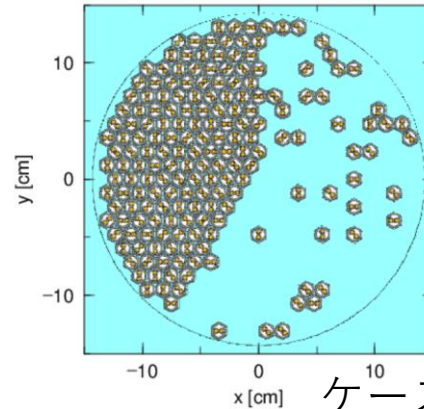
計算なので、ケーブルの配置や線源の位置を好きなところに変えられる
→ 様々な条件の放射線検出器の測定結果が実験せずに行われる。

※T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, Y. Matsuya, N. Matsuda, Y. Hirata, T. Sekikawa, L. Yao, P.E. Tsai, H.N. Ratliff, H. Iwase, Y. Sakaki, K. Sugihara, N. Shigyo, L. Sihver and K. Niita, Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System - PHITS version 3.33, J. Nucl. Sci. Technol. 61, 127-135 (2024)より引用

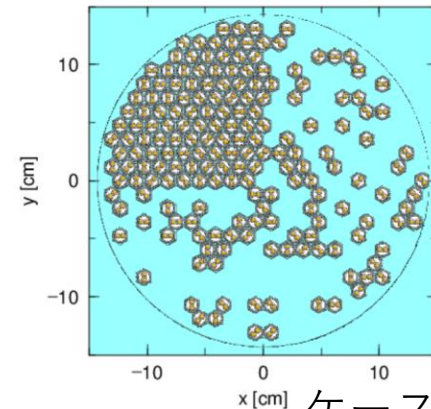
シミュレーション計算による評価体系



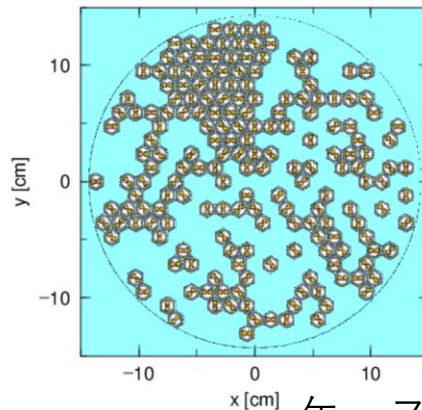
ケース 1



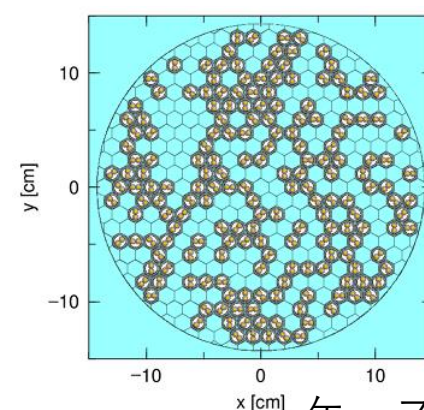
ケース 2



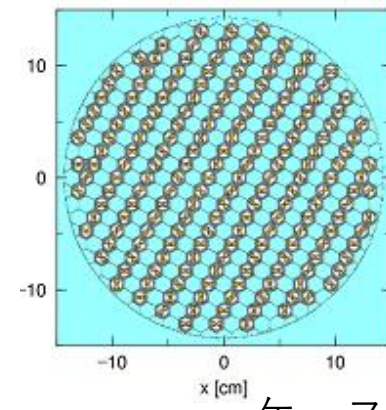
ケース 3



ケース 4



ケース 5

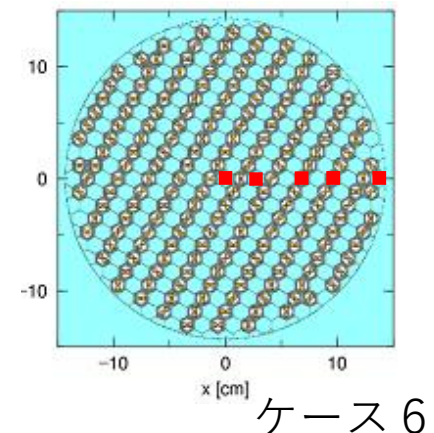
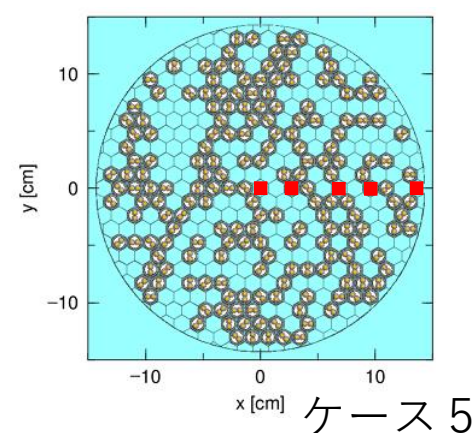
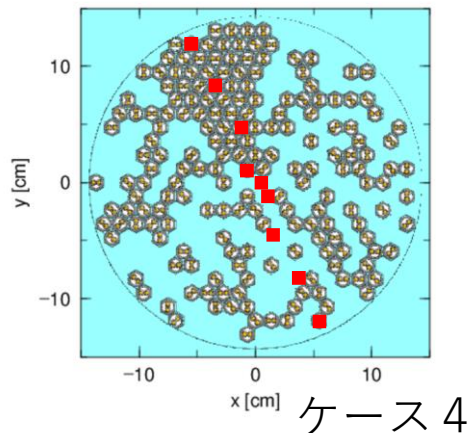
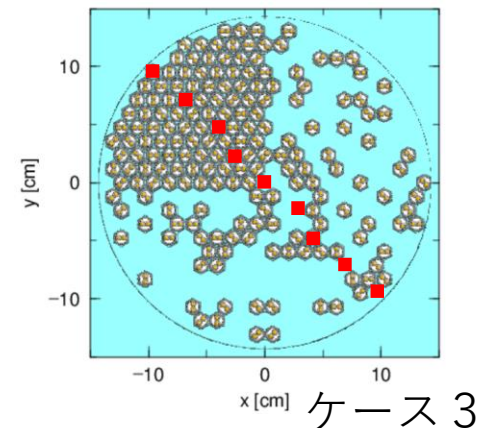
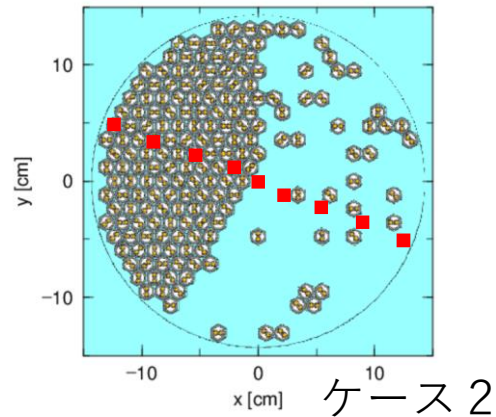
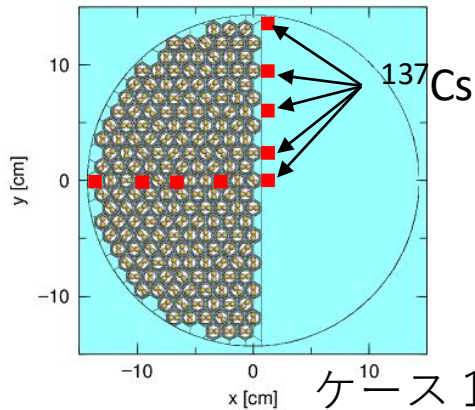


ケース 6

【11】 出典：吉居大樹，「密度分布をもつクリアランス対象物の放射能評価におけるX線CTを用いた換算係数の選択に関する検討」，東京都市大学博士論文，博士（工学），2023年度（令和5年），甲第202号をもとに作図

ケーブルの本数を変えずに、ばらつきだけを変える。
→計算（モンテカルロ計算コードPHITS）で検証

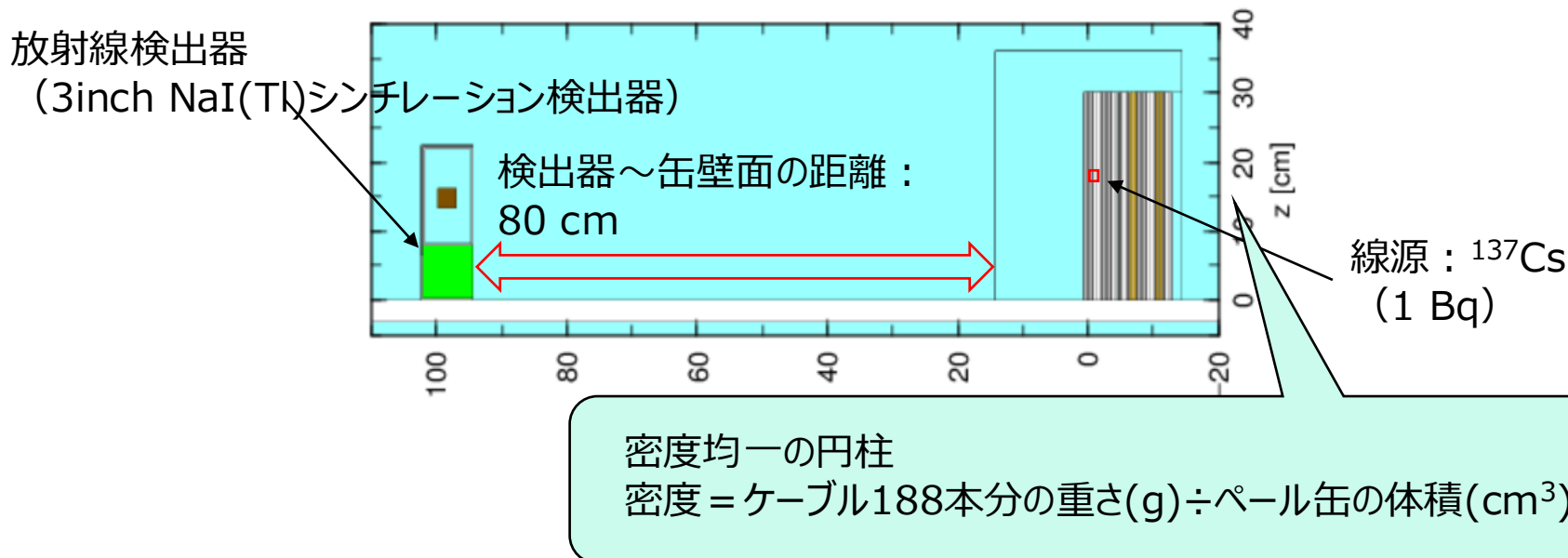
シミュレーション計算による評価体系



【12】 出典：吉居大樹，「密度分布をもつクリアランス対象物の放射能評価におけるX線CTを用いた換算係数の選択に関する検討」，東京都市大学博士論文，博士（工学），2023年度（令和5年），甲第202号をもとに作図

様々な位置に ^{137}Cs が存在する場合に放射線検出器の結果がどうなるか検証
→ケーブルのばらつき、線源の位置を変えて全46通りの放射線測定実験をシミュレーションした。

均一密度換算係数の作り方



【13】出典：吉居大樹，「密度分布をもつクリアランス対象物の放射能評価におけるX線CTを用いた換算係数の選択に関する検討」，東京都市大学博士論文，博士（工学），2023年度（令和5年），甲第202号をもとに作図

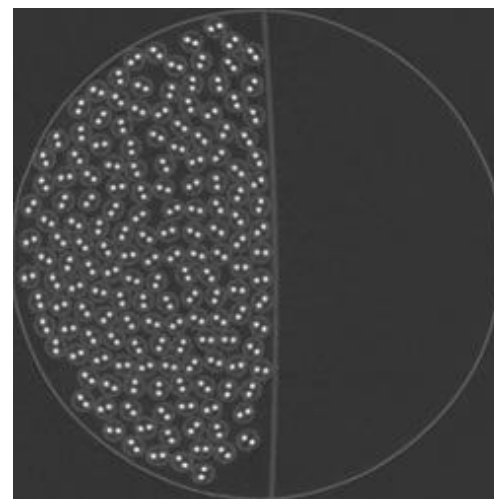
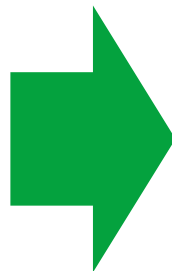
- 密度均一の円柱の中心に1Bqの ^{137}Cs があるときのカウントをシミュレーションした。
- 得られたカウントの逆数を均一密度換算係数とした。

実際の断層画像の取得

- ケーブルを使った放射線測定を実験とシミュレーションから検証しカウントを得た。
- 均一密度換算係数も作ったので、放射能を計算する準備は整った。
- ケーブルの「ばらつき」によって放射能の結果は変わるのでは？ → 「ばらつき」を数値で表すことはできないか？
- 「収納容器にケーブルを入れた状態」の断面画像が得られれば、「ばらつき」の評価に使えるかも → **X線CTによる断層画像を取得**



(写真)



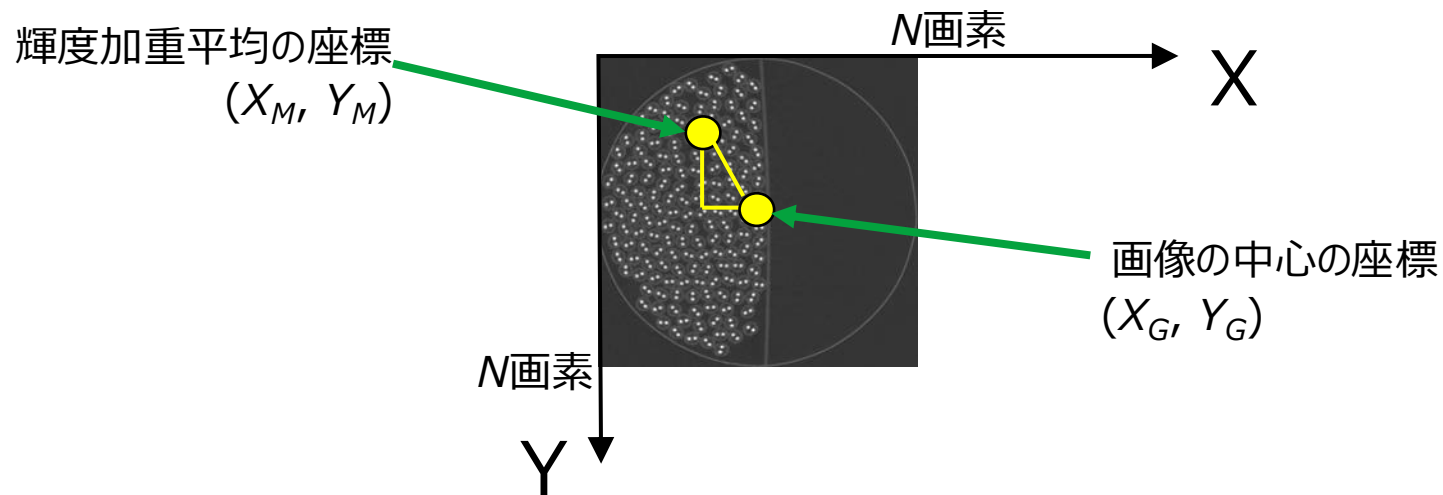
(X線CTによる断層画像)

【14】 出典：吉居大樹，「密度分布をもつクリアランス対象物の放射能評価におけるX線CTを用いた換算係数の選択に関する検討」，東京都市大学博士論文，博士（工学），2023年度（令和5年），甲第202号をもとに作図

断層画像取得結果

- X線CTの断層画像の各画素は「輝度」と呼ばれる値を持っている。
- 例えば、白=255、黒=0、灰色は0～255の間の値をとる。つまり画像は数値の集合体
- Takayama※らは画像が数値の集まりであることを利用して、「ばらつき」を α として定量評価する研究を行っていた。ここでは、この手法を採用した。

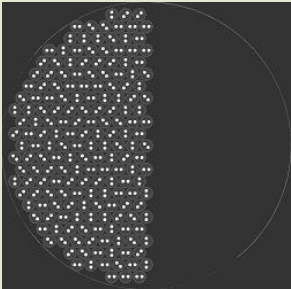
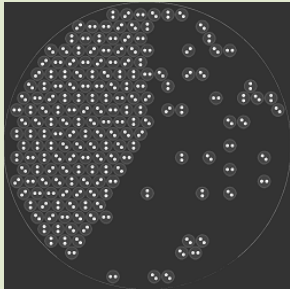
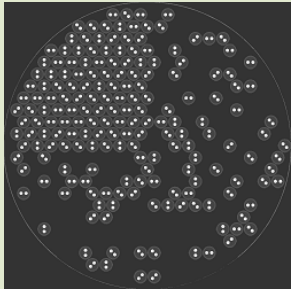
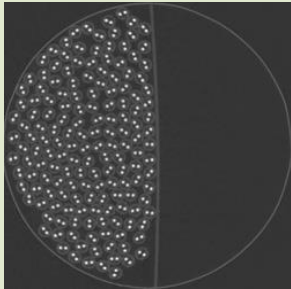
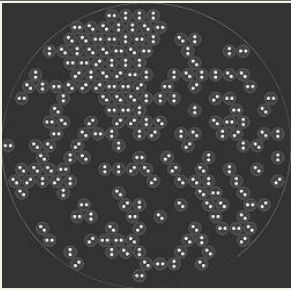
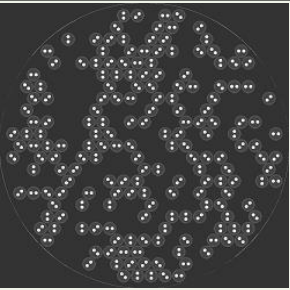
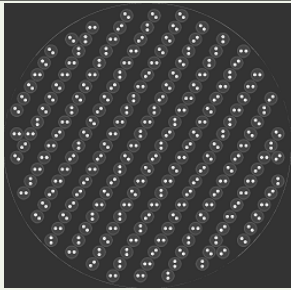
※ Takayama, Y., Tozawa, T., Kato, H., Akaneya, Y., 1996. A Method for Evaluation of Uniformity in Grain Structure, Journal of the Japan Institute of Metals 60(1), 44-49, (in Japanese) https://doi.org/10.2320/jinstmet1952.60.1_44より引用



$$\alpha = \frac{2}{N} \sqrt{(X_M - X_G)^2 + (Y_M - Y_G)^2}$$

【14】 出典：吉居大樹，「密度分布をもつクリアランス対象物の放射能評価におけるX線CTを用いた換算係数の選択に関する検討」，東京都市大学博士論文，博士（工学），2023年度（令和5年），甲第202号をもとに作図

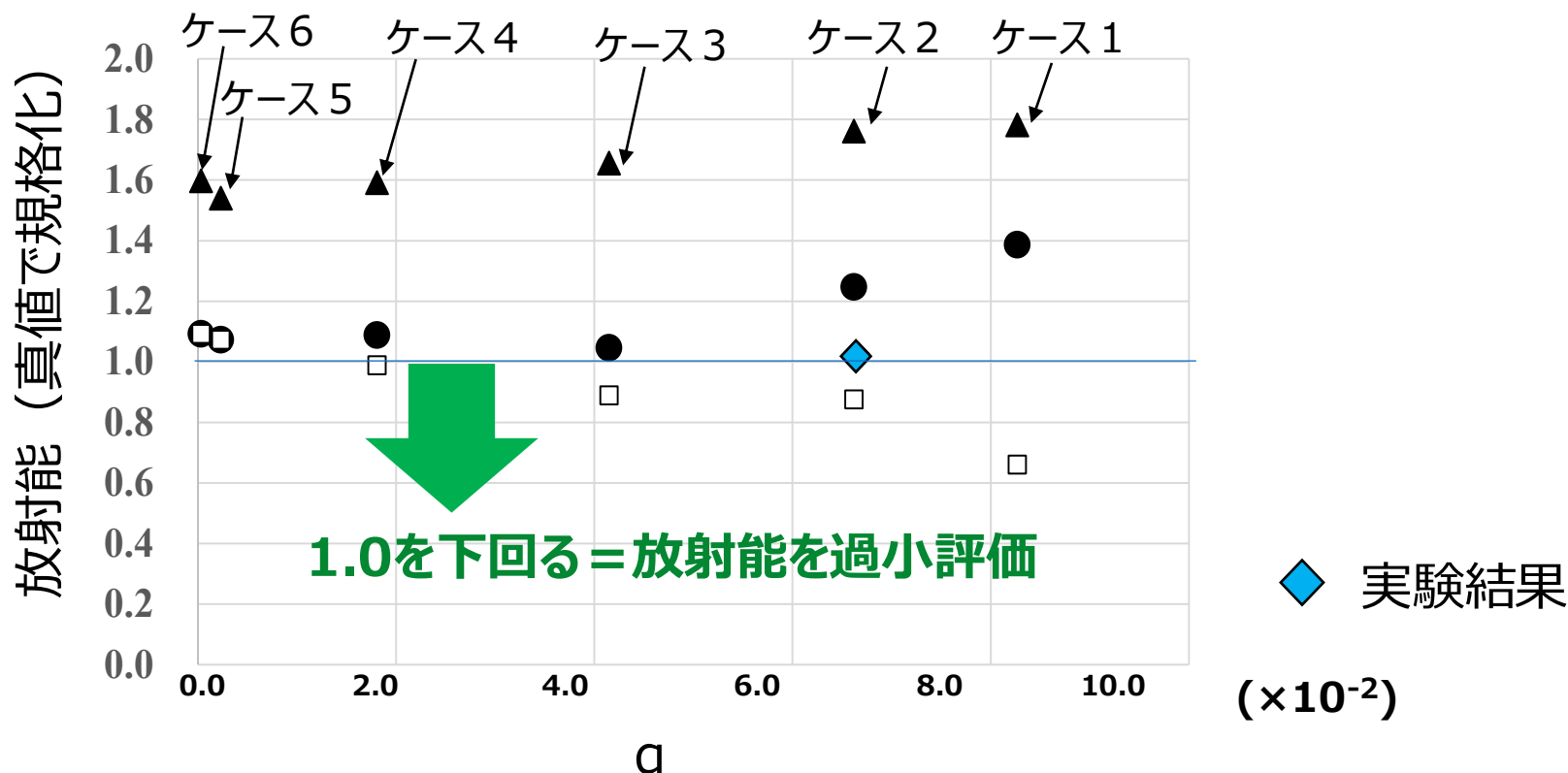
断層画像とばらつき「 α 」の関係

ケース	1	2	3	実験値
断面画像				
α ($\times 10^{-2}$)	8.27	6.62	4.15	6.66
ケース	4	5	6	
断面画像				
α ($\times 10^{-2}$)	1.81	2.29×10^{-1}	2.92×10^{-2}	

【15】出典：吉居大樹，「密度分布をもつクリアランス対象物の放射能評価におけるX線CTを用いた換算係数の選択に関する検討」，東京都市大学博士論文，博士（工学），2023年度（令和5年），甲第202号をもとに作図

ばらつきが大きいほど、 α も大きくなる

過小評価の防止への検討



【16】出典：吉居大樹，「密度分布をもつクリアランス対象物の放射能評価におけるX線CTを用いた換算係数の選択に関する検討」，東京都市大学博士論文，博士（工学），2023年度（令和5年），甲第202号をもとに作図

- ばらつき α が大きくなるにつれて最大値と最小値の幅が大きくなった。
- 最小放射能は α がケース4のものより大きくなると、過小評価となった。
- 密度分布をもつ対象物に密度均一換算係数を適用する場合、保守的な評価にならない条件があること、その条件はばらつき α により判別できることが分かった。
- 実験結果はケース1よりもケース2に近い結果となった。ケーブルの本数の違い、ケーブル固定用のアクリル板の存在により α の値が異なったためと考えられる。

研究テーマ：

ケーブル廃棄物に均一密度換算係数を適用したら、放射能を過小評価することなく評価できるのか？

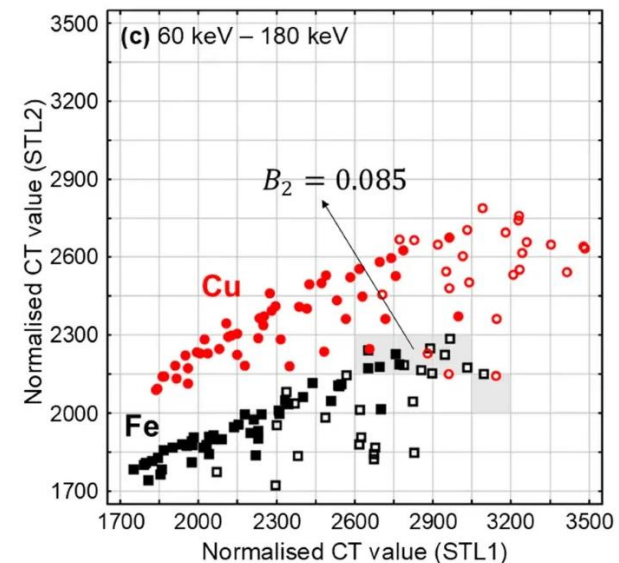
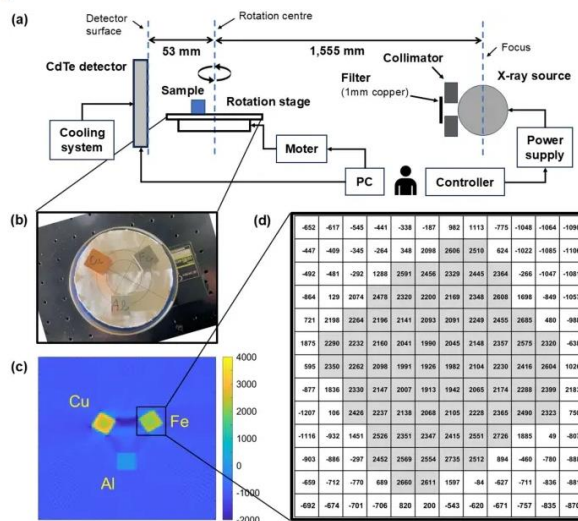


- できる場合とできない場合がある。
- できる場合とできない場合の境界は、ケーブルのばらつきを評価すれば分かる。
- **ケーブルをクリアランスするなら、放射線測定する前にX線CTによる断層画像の取得等を通じて、ばらつきの評価をしないといけない。**

- ① クリアランスのルールが変わった
- ② 新ルールで新たに対象となるケーブルに対しては、放射線測定以外の技術も必要になる

- 銅の熱中性子領域での放射化断面積の測定
 - 信頼できる断面積データが整備されていない
 - JRR-3を用いた照射実験→生成した ^{63}Ni 量の測定(液体シンチレーションカウンタ、質量分析)
- フォトンカウンティングCTによる元素弁別
 - 元素の違いにより、主要測定核種が異なる
 - エネルギー閾値を変化させた測定の組み合わせでアルミニウム・鉄・銅の弁別可能性の提示

Fig. 1



左【17】 右【18】 出典: Shibuya, K., Nakasone, S., Yoshii, T. *et al.* Discriminability of selected periods III-IV elements in photon-counting computed tomography using a pixelated CdTe detector. *Sci Rep* 15, 42645 (2025).
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-26812-5> / CC BY 4.0

今後の安全研究

集中処理施設の目的

- クリアランス推定物（極低レベルの放射性廃棄物）を福井県内の複数の原子力発電所から集荷
- リサイクルのために切断、除染、溶融、放射能測定を行う。

準備会社が2025年8月に設立

出資元:

- 福井県
- 嶺南地域市町村
- 原子力施設及び金融機関

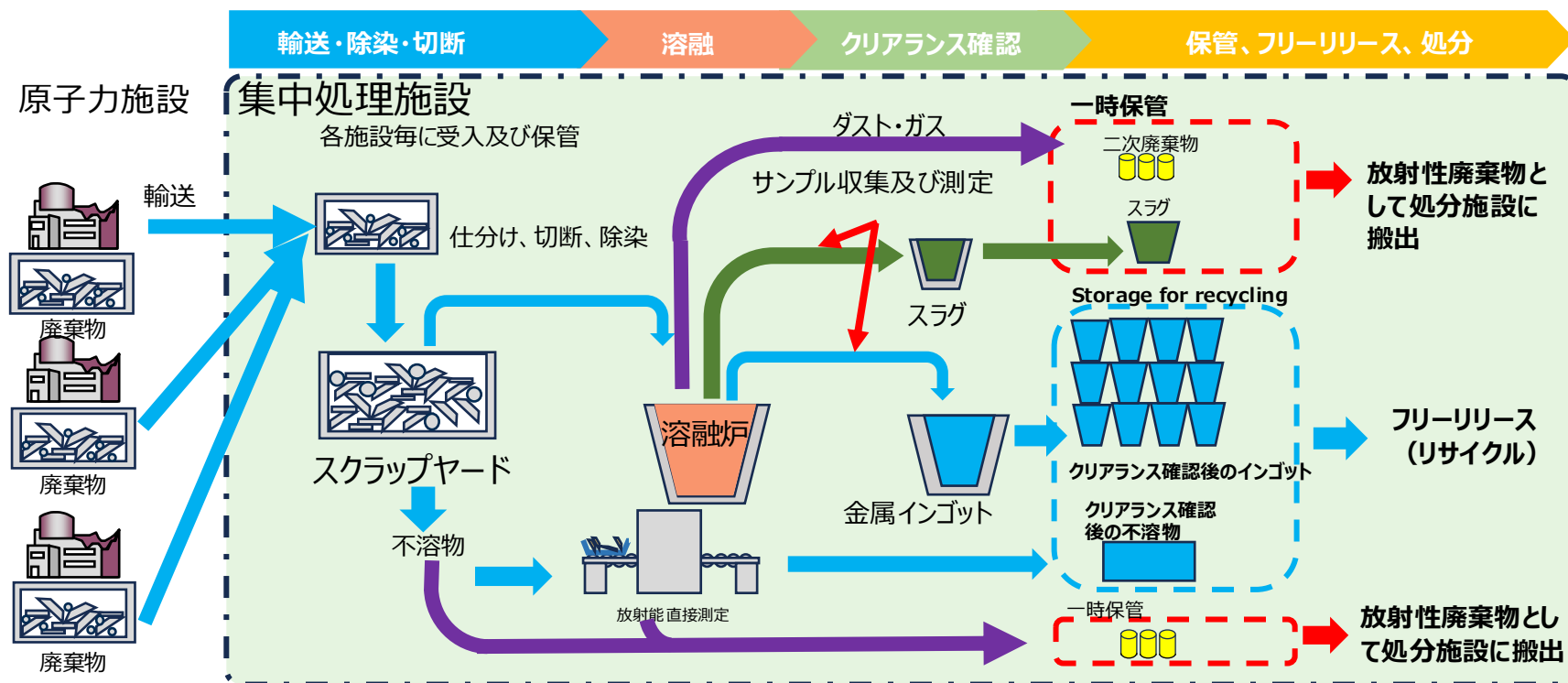


【19】出典：国土地理院「地理院タイル」

(<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>) 白地図に福井県の位置を追記

集中クリアランス施設

福井県にて計画中



「第1回福井県クリアランス集中処理事業に係る意見交換会合」資料1（2023年7月31日実施）（<https://www.nra.go.jp/data/000443107.pdf>）をもとに作図

- これまでに日本において溶融炉による溶融後の金属の放射能濃度評価によるクリアランスレベル確認は行われていない。
- 潜在的な課題の抽出を行う必要

クリアランス審査基準の改正

- 2025年6月：集中処理施設における溶融後のクリアランスを考慮して、クリアランス審査基準を改正
- 改正において、「**溶融等をしても放射能濃度がクリアランスレベル以下になる見込みのない資材その他の物を、クリアランスレベル以下とする目的で、意図的に放射性物質によって汚染されていない物等と混合し、又は希釈することを防止するために必要な措置が講じられていること**」を明確化（IAEA GSG-18の2.20項と整合）
- 以下の内容はクリアランス確認方法の審査・検査の段階で判断
 - 溶融による核種移行効果、均一化効果：溶融による核種移行効果及び均一化効果については、これらの効果を見込んだ放射能濃度の計測及び評価の方法を決定するため、新規事業主体が、国内外の研究結果に加え、新たに設計・建設する溶融炉におけるデータを基に核種移行効果及び均一化効果を説明する必要がある。
 - 情報の受け渡し：集中処理施設は、溶融処理後のクリアランス測定及び方法の認可の審査並びにクリアランス確認を円滑に進めるため、廃棄物発生者（原子力施設）から、溶融処理前のクリアランス対象物に係る汚染の履歴、放射能濃度などの必要な情報を受け取る必要がある。

対応した安全研究

- 将来の審査・検査に必要となる知見の蓄積を目的として2025年度から開始された安全研究計画において以下の内容を含んだ研究を開始している。
 - 金属溶融後の放射性物質分布の均質性
 - 放射能濃度確認のためのサンプリング法
 - 金属層と溶融層の分離
 - 溶融金属の溶融ロット間の同等性・均一性を担保する条件

上記と関連して放射性金属廃棄物の溶融リサイクルの実績のある以下の海外事業者の現地調査を実施済み又は計画中

- スウェーデン・サイクライフ社(2023年)
- ドイツ・ジンベルカンブ社(2024年)
- 米国の事業者(2025年～)

まとめ

本講義のポイント（振り返り）

クリアランス制度の意味を説明できるようになる。

- クリアランス制度は、放射能濃度が極めて低く、追加的な放射線防護措置が不要な廃棄物を「規制の対象外」とし、一般廃棄物として再利用・処分できるようにする仕組みである。放射性廃棄物を適切に区分し、資源循環や最終処分量軽減を可能にすることが目的で、国による測定方法の認可と確認を経て安全性が確保される。

測定の不確かさがクリアランス評価にどのように用いられるかを理解する。

- 測定を通じて得た測定値には統計的変動や機器性能、校正条件の違いなどに起因する「測定の不確かさ」が必ず付随する。クリアランス評価を行った後の対象物に、実際には基準値を超えた濃度の放射性物質の汚染があるのに誤って規制の対象から外される可能性を抑制するために、測定の不確かさを考慮してクリアランスの確認を行う必要がある。

本講義のポイント（振り返り）

新しい対象物（ケーブル等）のクリアランス確認をどのように行う必要があるかを理解する。

- 金属・樹脂などが混在したケーブル類は密度分布や内部の元素分布が不均一で、従来の金属のみで校正されていた物質の「均一密度換算係数」では放射能を過小評価する場合がある。そこで、X線CT等により内部の配置のばらつきを数値化するなどして、そのばらつきに応じて設定された換算係数が妥当かを判断する必要がある。

今後のクリアランス関係での安全研究の主要な内容を理解する。

- 溶融後の金属のクリアランス確認に対する規制の運用に向けて、放射能分布の均質化、サンプリング方法の妥当性、核種移行効果の把握、溶融ロット間の同等性評価などの溶融後の金属に関する研究を行う。集中クリアランス施設における溶融プロセスの特徴や金属・不溶物の分離挙動など、審査・検査に必要な科学的・技術的な裏付けの取得が求められており、海外事業者の調査も進め、実証データを蓄積することが計画されている。

安全研究が原子力規制の運用を支える仕組みを理解する。

- クリアランス制度の運用には、事業者の示したデータに対する、測定方法の信頼性確保、換算係数設定の妥当性、新対象物への適用性の実証などの確認を行うための科学的・技術的な知見の蓄積が不可欠である。
- 安全研究は、審査基準の整合性確保のための情報提供、審査・検査で生じる技術的検討事項に関する知見の蓄積などを通じ、原子力規制の技術的信頼性を支えている。
- そのためには、関係する技術分野の規格・標準化についての動向把握、国内外の最新の技術的知見の収集、自ら実施する実験・解析により得られた結果などを組み合わせ、規制活動において活用しやすい形に成果を取りまとめることが必要である。

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【1】	†	原規技発第 1608312 号「炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について」参考 3, 2016年8月 (https://www.nra.go.jp/data/000403922.pdf , 2026年1月21日確認)
【2】	†	国土地理院「地理院タイル」(https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html) 白地図に埋設事業所の所在地を追記
【3】	†	GSG-18 Application of the Concept of Clearance, © IAEA, 2023, 127p
【4】	†	「第149回放射線審議会総会」(原子力規制委員会) (https://www.da.nra.go.jp/view/NRA005000012?contents=NRA005000012-002-007#pdf=NRA005000012-002-007) をもとに作成
【5】	†	Sakai, H., et al. Derivation of uncertainty propagation for clearance measurement, Applied Radiation and Isotopes Vol. 170 (2021) 109630の内容をもとに作図
【6】	†	GSG-18 Application of the Concept of Clearance, © IAEA, 2023, 127p
【7】	†	吉居大樹, 「密度分布をもつクリアランス対象物の放射能評価におけるX線CTを用いた換算係数の選択に関する検討」, 東京都市大学博士論文, 博士(工学), 2023年度(令和5年), 甲第202号をもとに作図
【8】	†	吉居大樹, 「密度分布をもつクリアランス対象物の放射能評価におけるX線CTを用いた換算係数の選択に関する検討」, 東京都市大学博士論文, 博士(工学), 2023年度(令和5年), 甲第202号をもとに作図
【9】	†	吉居大樹, 「密度分布をもつクリアランス対象物の放射能評価におけるX線CTを用いた換算係数の選択に関する検討」, 東京都市大学博士論文, 博士(工学), 2023年度(令和5年), 甲第202号をもとに作図
【10】	†	吉居大樹, 「密度分布をもつクリアランス対象物の放射能評価におけるX線CTを用いた換算係数の選択に関する検討」, 東京都市大学博士論文, 博士(工学), 2023年度(令和5年), 甲第202号をもとに作図

出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【11】	†	吉居大樹, 「密度分布をもつクリアランス対象物の放射能評価におけるX線CTを用いた換算係数の選択に関する検討」, 東京都市大学博士論文, 博士(工学), 2023年度(令和5年), 甲第202号をもとに作図
【12】	†	吉居大樹, 「密度分布をもつクリアランス対象物の放射能評価におけるX線CTを用いた換算係数の選択に関する検討」, 東京都市大学博士論文, 博士(工学), 2023年度(令和5年), 甲第202号をもとに作図
【13】	†	吉居大樹, 「密度分布をもつクリアランス対象物の放射能評価におけるX線CTを用いた換算係数の選択に関する検討」, 東京都市大学博士論文, 博士(工学), 2023年度(令和5年), 甲第202号をもとに作図
【14】	†	吉居大樹, 「密度分布をもつクリアランス対象物の放射能評価におけるX線CTを用いた換算係数の選択に関する検討」, 東京都市大学博士論文, 博士(工学), 2023年度(令和5年), 甲第202号をもとに作図
【15】	†	吉居大樹, 「密度分布をもつクリアランス対象物の放射能評価におけるX線CTを用いた換算係数の選択に関する検討」, 東京都市大学博士論文, 博士(工学), 2023年度(令和5年), 甲第202号をもとに作図
【16】	†	吉居大樹, 「密度分布をもつクリアランス対象物の放射能評価におけるX線CTを用いた換算係数の選択に関する検討」, 東京都市大学博士論文, 博士(工学), 2023年度(令和5年), 甲第202号をもとに作図
【17】		Shibuya, K., Nakasone, S., Yoshii, T. et al. Discriminability of selected periods III–IV elements in photon-counting computed tomography using a pixelated CdTe detector. Sci Rep 15, 42645 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-26812-5 / CC BY 4.0
【18】		Shibuya, K., Nakasone, S., Yoshii, T. et al. Discriminability of selected periods III–IV elements in photon-counting computed tomography using a pixelated CdTe detector. Sci Rep 15, 42645 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-26812-5 / CC BY 4.0
【19】	†	国土地理院「地理院タイル」(https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html) 白地図に福井県の位置を追記