

# 放射能分布の逆問題解法での モンテカルロ法による測定の不確かさ評価

令和2年8月20日

長官官房技術基盤グループ  
核燃料廃棄物研究部門  
酒井 宏隆

---

# 1. 研究の背景・目的

## 低濃度放射能計測分野（特にクリアランス測定）における課題

- **検出限界（検出下限）**
  - 通常の放射能計測：測定値が検出限界より十分大きく、不確かさはあまり問題にならない
  - 低濃度放射能計測：測定値が検出限界に近く、不確かさの考慮が重要
- **クリアランス測定の審査基準**:不確かさを考慮することを明確化
- 測定対象物の放射線・放射能が、基準値を下回ることの妥当性及び実際に検出が行われていること（検出限界を低く抑えていること）を**測定の不確かさを考慮して定量的に示す**必要性が高まっている。  
(参考)：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(2019年9月)

### 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 $\Sigma D_j / C_j$ 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)

# 1. 研究の背景・目的

---

従来：測定値に安全率を乗じて保守性を設定し、測定結果の基準値適合を説明  
(例：最大放射能法等)

- 安全率には定性的なものも多数存在
- 「安全率」「保守性」の定義が曖昧（偏り／ばらつき／マージン）



- ISO規格に基づく測定の不確かさの考え方により、定量的、一義的に適合性の表現が可能

一方で、複雑な演算で測定の不確かさを導出することに課題

低濃度放射能計測での**複雑な演算を含む測定**に注目し、例として、放射線検出器の測定値から放射能の濃度分布を推定する**逆問題解法を用いた濃度推定で値を求める**ことを想定し、その**測定の不確かさの導出**の可能性を示すことを研究の目的とした。

**放射能分布測定への逆問題解法の適用による測定の不確かさを評価**

---

# 1. 研究の背景・目的

---

## 本発表の構成

### 1. 研究の背景・目的

### 2. 計量・計測分野における不確かさ

- 2.1 計量・計測分野における不確かさの定義
- 2.2 測定モデル化と不確かさ
- 2.3 放射線計測分野での特有の取扱い

### 3. 放射能分布測定への逆問題解法の適用

- 3.1 想定した測定体系
- 3.2 逆問題解法の構成
- 3.3 逆問題解法の推定値の不確かさの計算
- 3.4 実測による評価

### 4. まとめと課題

参考：関連する技術文書



本研究の前提となる重要な概念である「測定の不確かさ」について説明

具体的な実験・検討結果を説明

# 1. 研究の背景・目的

---

## 本発表の構成

### 1. 研究の背景・目的

### 2. 計量・計測分野における不確かさ

- 2.1 計量・計測分野における不確かさの定義
- 2.2 測定モデル化と不確かさ
- 2.3 放射線計測分野での特有の取扱い

### 3. 放射能分布測定への逆問題解法の適用

- 3.1 想定した測定体系
- 3.2 逆問題解法の構成
- 3.3 逆問題解法の推定値の不確かさの計算
- 3.4 実測による評価

### 4. まとめと課題

参考：関連する技術文書



本研究の前提となる重要な概念である「測定の不確かさ」について説明

具体的な実験・検討結果を説明

## 2. 計量・計測分野における不確かさ

---

### 計量・計測分野における概況

- 従来、「誤差」、「精度」等異なった定義・概念が使用されていたが、「測定の不確かさ」として測定・評価により得られた値の信頼性を、定量化する考え方の定義が国際的に統一されつつあり、ISO/IEC Guide 98-3として文書化されている。
- 放射線計測分野においてもこの流れが取り入れられつつあり、測定の不確かさの具体的な適用法を規定した国際規格であるISO 11929が発行されている。

以下、本研究の前提となる重要な概念である「**測定の不確かさ**」について説明する。

## 2. 計量・計測分野における不確かさ

### 2.1 計量・計測分野における不確かさの定義

#### 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

両者を関連付けて評価するための手段が定まっておらず、分野、地域、人で都度解釈



この両者を総合的に評価して、測定の妥当性を定量化する、計量・計測分野の統一した方法論：

#### 「測定の不確かさ」

国際的に用語・考え方が定義されている

ISO/IEC Guide 98-3, Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) (日本語訳：今井 秀孝, 測定における不確かさの表現のガイド[GUM]ハンドブック, 日本規格協会, 248p, (2018))

- 計量・計測分野に特化した定義であり、リスク解析等で用いられる「不確かさ」という用語とは必ずしも意味が同一なわけではない。

## 2. 計量・計測分野における不確かさ

### 2.2 測定モデル化と不確かさ

#### 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。

#### 測定の不確かさの要点

- 「誤差」とは真の値が完全に分かっているときに、その測定によって得られた値との差
- 未知の測定対象物の測定によってある値が得られたときの真値は不明
- 測定により求めた値に付随するのは「誤差」ではなく、「測定の不確かさ」
- 測定をモデル化した上で測定に影響する因子を抽出し、その測定により得られる値への影響を評価することが測定の不確かさの算出

(1) 最初に、測定・評価を行う量がどのように得られるかの関係性をモデル化、又は、数式化して影響する因子を抽出する。

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) = (x_1 - x_2 \cdot x_3 - x_4) \cdot \frac{x_6 \cdot x_8 \dots}{x_5 \cdot x_7 \dots}$$
$$= (x_1 - x_2 \cdot x_3 - x_4) \cdot w$$

$y$  : 測定値

$x_n$  : 測定に影響する因子

ISO 11929では放射線測定を一般化したモデル式をこのように規定  
 $x_1$ を測定時計数率、 $x_2$ をバックグラウンド計数率、 $x_3$ をバックグラウンドに乗じる補正、 $x_4$ を計数率を減算する形での補正、 $x_5$ 以降を換算係数に係る因子として用いることを想定



## 2. 計量・計測分野における不確かさ

### 2.2 測定モデル化と不確かさ

(2) 測定等を通し、測定に影響する因子の値とその不確かさを求める。

$x_n$  : 測定に影響する因子の値

$u(x_n)$  : 測定に影響する因子の値 $x_n$ の不確かさ

(3) 測定に影響する因子の不確かさを合成し測定の不確かさを求める。

- 各因子が独立で測定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

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

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} = W; \frac{\partial f}{\partial x_2} = -x_3 \cdot W; \frac{\partial f}{\partial x_3} = -x_2 \cdot W; \frac{\partial f}{\partial x_4} = -W; \frac{\partial f}{\partial x_i} = \pm \frac{y}{x_i} (i \geq 5)$$

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

## 2. 計量・計測分野における不確かさ

### 2.3 放射線計測分野での特有の取扱い

$x_1$  : 時間 $t_g$ で得られた計数 $c_g$ であるときの計数率である  $n_g = c_g / t_g$ を代入

$$u(x_1) = \sqrt{c_g} / t_g = \sqrt{n_g} / t_g \text{の関係がある。}$$

- ランダムな離散事象である放射線計測による検出器の計数（カウント数）の確率分布はポアソン分布となる。
- その標準不確かさは計数の平方根になる。（例：100カウントの標準不確かさは10カウント）

このとき、

$x_2$  : 時間 $t_0$ で得られた計数 $c_0$ によるバックグラウンドの計数率 $n_0$

換算係数

例：カウント毎秒からBq/gに変換

$$x_2 = n_0 = c_0 / t_0 \text{とする。}$$

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) = (x_1 - x_2 \cdot x_3 - x_4) \cdot w \\ = (n_g - n_0 \cdot x_3 - x_4) \cdot w$$

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

$$= \sqrt{w^2 \cdot \left( \frac{n_g}{t_g} + x_3^2 \cdot \frac{n_0}{t_0} + n_0^2 \cdot u^2(x_3) + u^2(x_4) \right) + y^2 \cdot u_{rel}^2(w)} \quad \text{となる。}$$

$u_{rel}(w)$ :  $w$ の相対不確かさ  $\frac{u(w)}{w}$

## 2. 計量・計測分野における不確かさ

### 2.3 放射線計測分野での特有の取扱い

**ISO 11929:2010** Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the confidence interval) for measurements of ionizing radiation -- Fundamentals and application, International Organization for Standardization.

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)
  - 従来国内で用いられてきた、バックグラウンドから $3\sigma$ 離れた値を求めるのとは異なり、先に決定しきい値を求めてから検出限界を求める形となっている。
- ・ 包含区間の上下限(Limit of Coverage Interval)

現在、ISO 11929-1~4:2019として改訂中。Part 1~3までは発行済み。現在Part 4が審議中。不確かさの合成に係るモンテカルロ法等に関する記載の充実があるが基本的な考え方は2010年版と変わらない。

## 2. 計量・計測分野における不確かさ

### 2.3 放射線計測分野での特有の取扱い

#### 決定しきい値

IAEA Safety Glossary 2018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

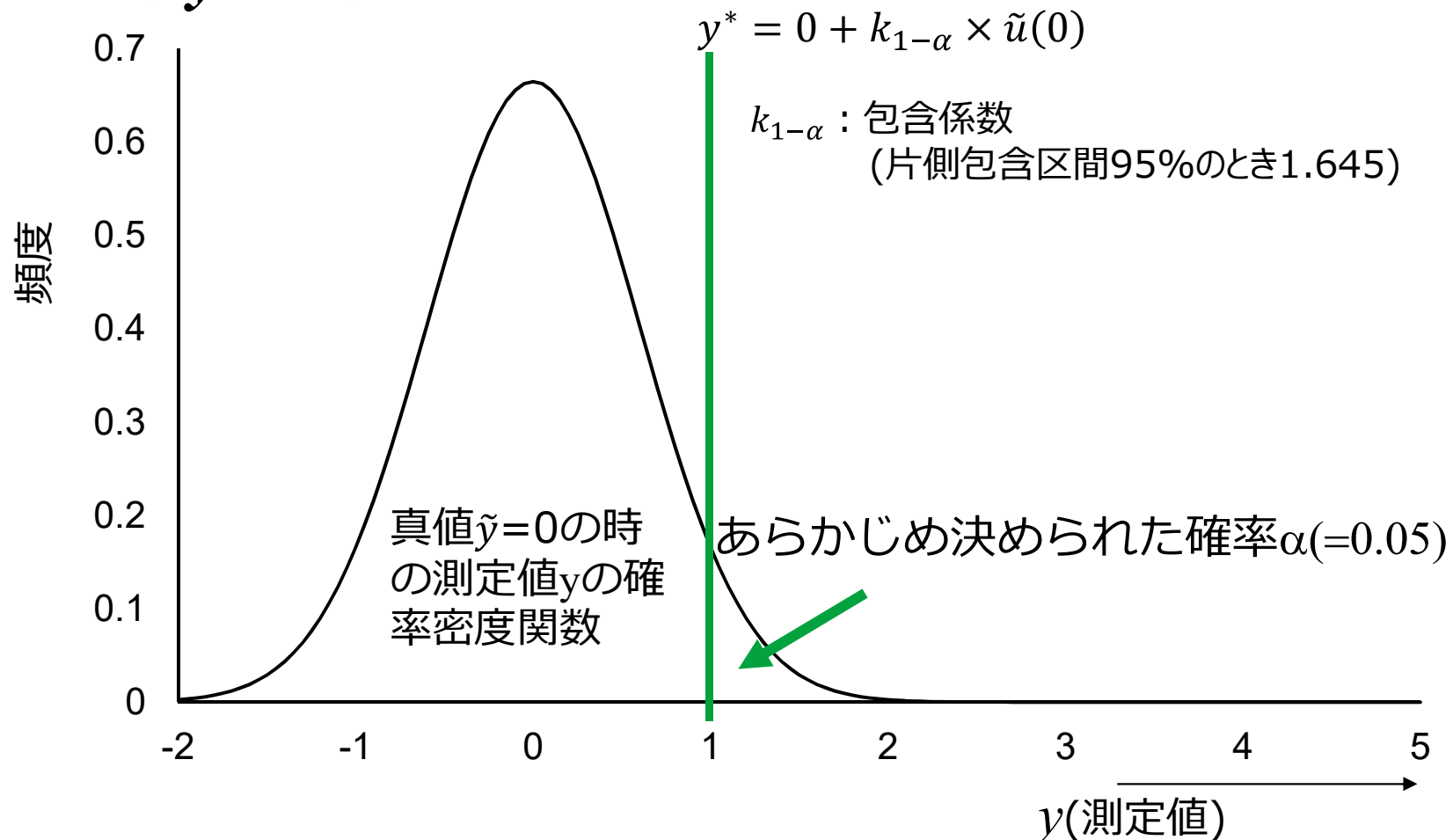
- ・ 最小検出可能放射能を含むサンプルは、統計のばらつきの結果として、50%の割合で放射性物質が含まれないとして扱われる。一方で、バックグラウンドのサンプルは95%の確率で、放射能が含まれないとして扱われる。
- ・ 最小有意放射能は、決定しきい値とも呼ばれる。

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

## 2. 計量・計測分野における不確かさ

### 2.3 放射線計測分野での特有の取扱い

#### 決定しきい値 $y^*$ の求め方



バックグラウンド以外の影響がないのに、影響があると判断される過誤が5% ( $\alpha$ : 危険率) 発生

## 2. 計量・計測分野における不確かさ

### 2.3 放射線計測分野での特有の取扱い

#### 検出限界

IAEA Safety Glossary 2018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

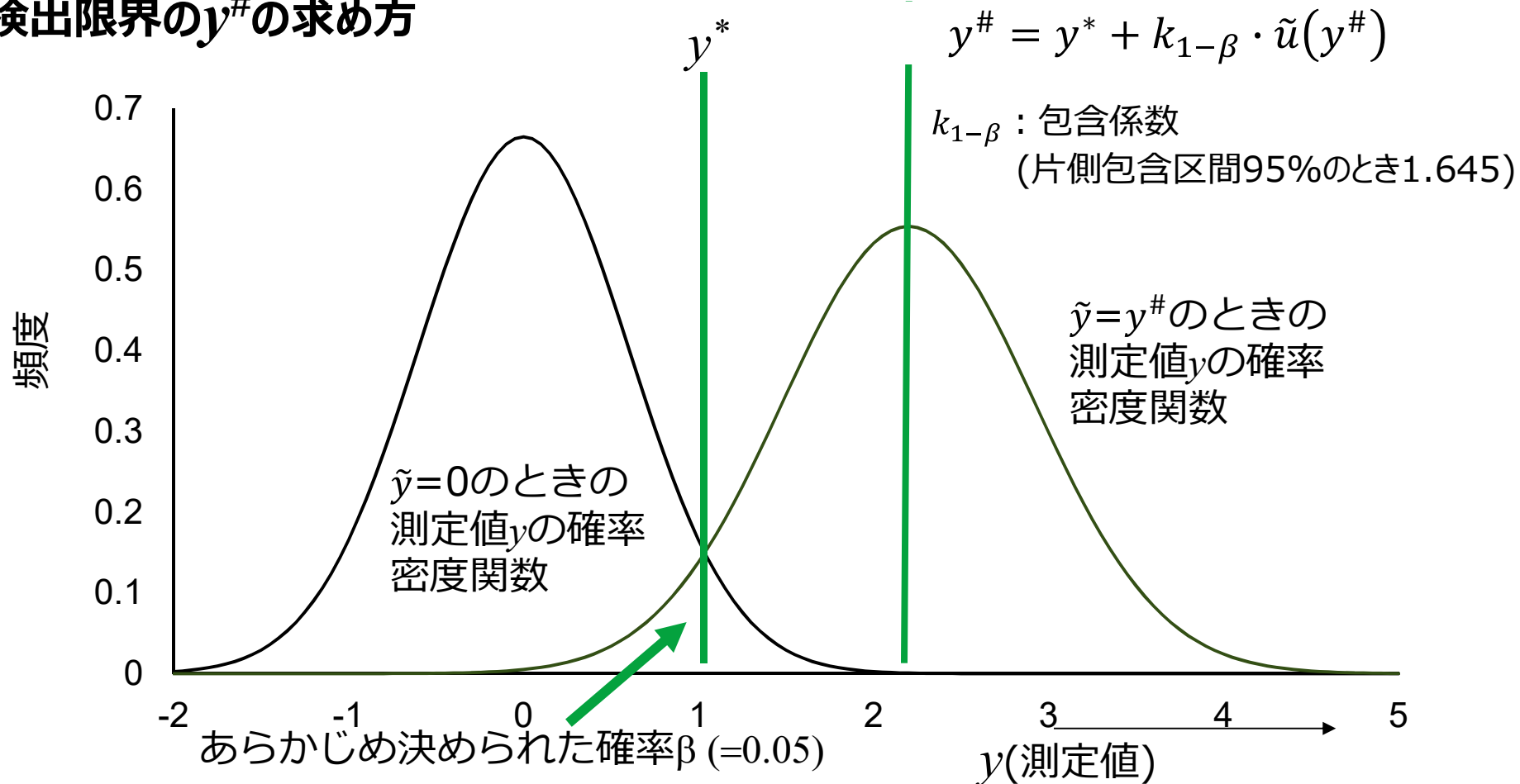
- ・ 一定の信頼の水準は通常95%に設定される、すなわち、正確に最小検出可能放射能を含むサンプルは、統計のばらつきの結果として、5%の確率で放射能が含まれないとして扱われる。
- ・ 最小検出可能放射能は、検出限界又は検出下限と呼ばれる。

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

## 2. 計量・計測分野における不確かさ

### 2.3 放射線計測分野での特有の取扱い

#### 検出限界の $y^\#$ の求め方



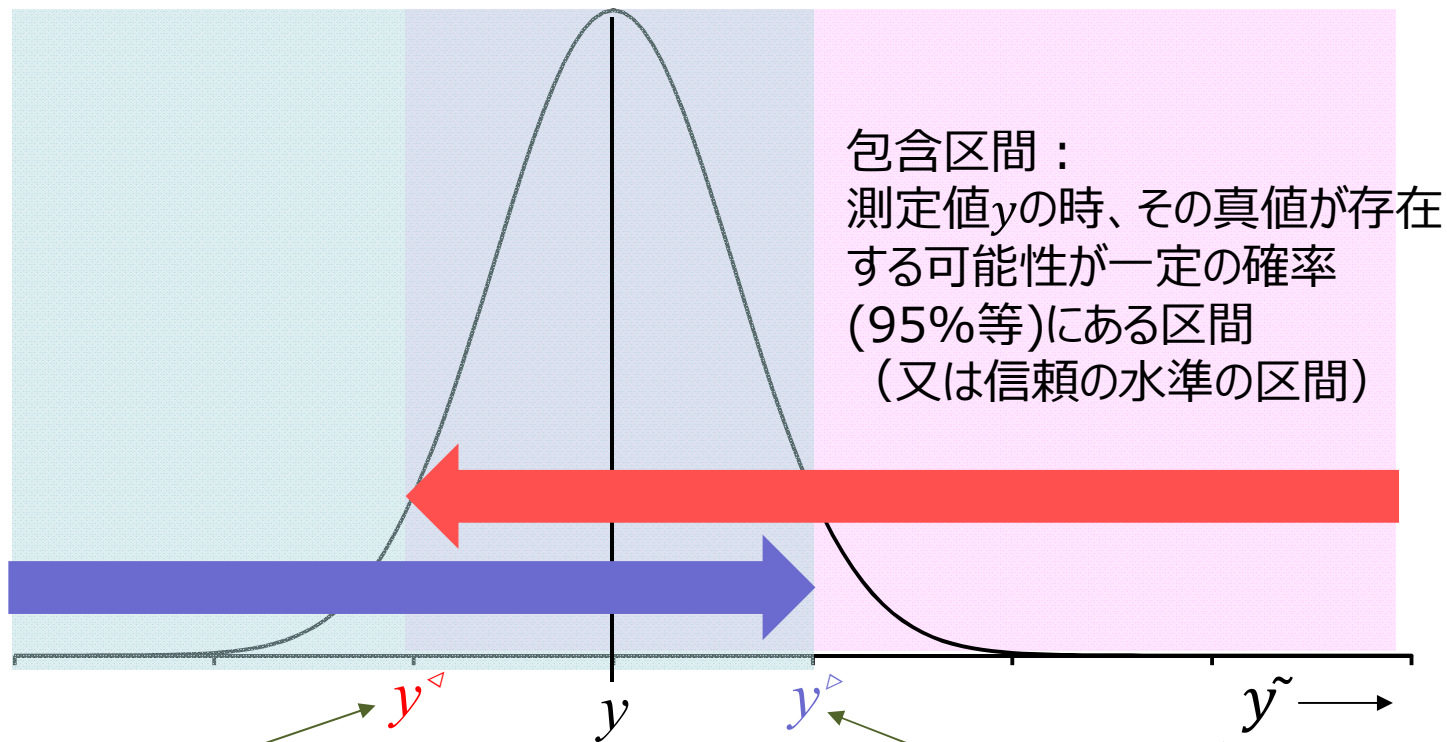
バックグラウンド以外の影響があるときに影響があると95%（検出力）で正しく判断される。

## 2. 計量・計測分野における不確かさ

### 2.3 放射線計測分野での特有の取扱い

#### 測定値の包含区間の上下限の求め方

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



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の判断に使用**



# 1. 研究の背景・目的

---

## 本発表の構成

### 1. 研究の背景・目的

### 2. 計量・計測分野における不確かさ

- 2.1 計量・計測分野における不確かさの定義
- 2.2 測定モデル化と不確かさ
- 2.3 放射線計測分野での特有の取扱い

### 3. 放射能分布測定への逆問題解法の適用

- 3.1 想定した測定体系
- 3.2 逆問題解法の構成
- 3.3 逆問題解法の推定値の不確かさの計算
- 3.4 実測による評価

### 4. まとめと課題

参考：関連する技術文書

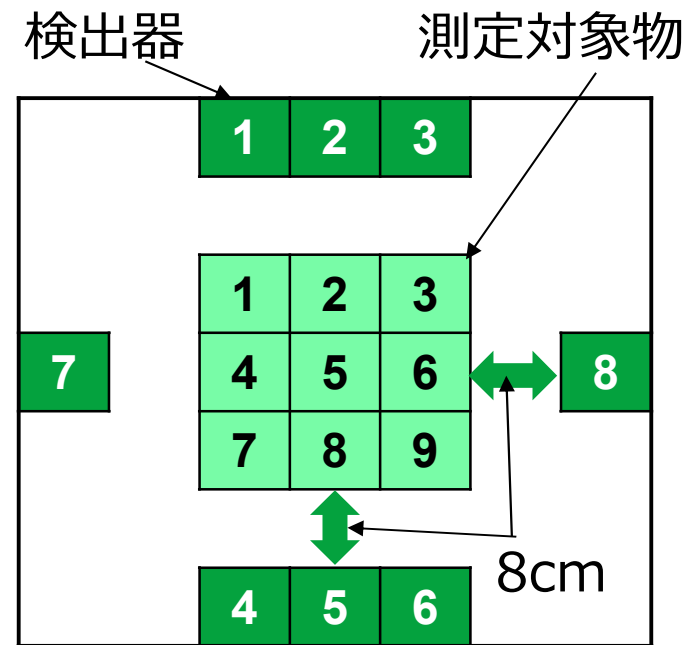
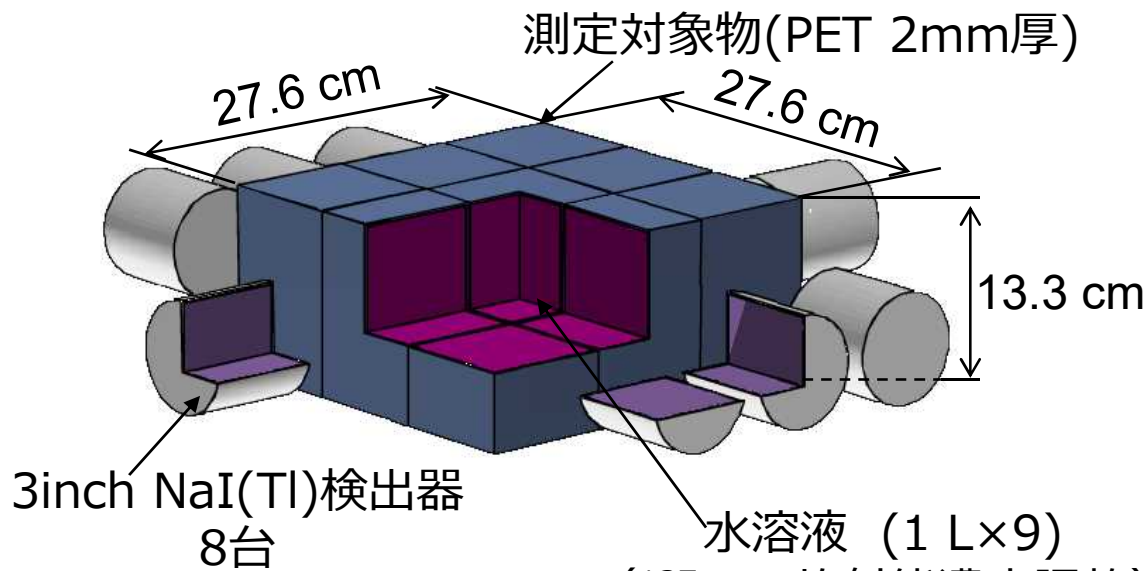


本研究の前提となる  
重要な概念である  
「測定の不確かさ」  
について説明

具体的な実験・検討  
結果を説明

# 3. 放射能分布測定への逆問題解法の適用

## 3.1 検討に用いた測定体系



測定対象物と検出器の配置

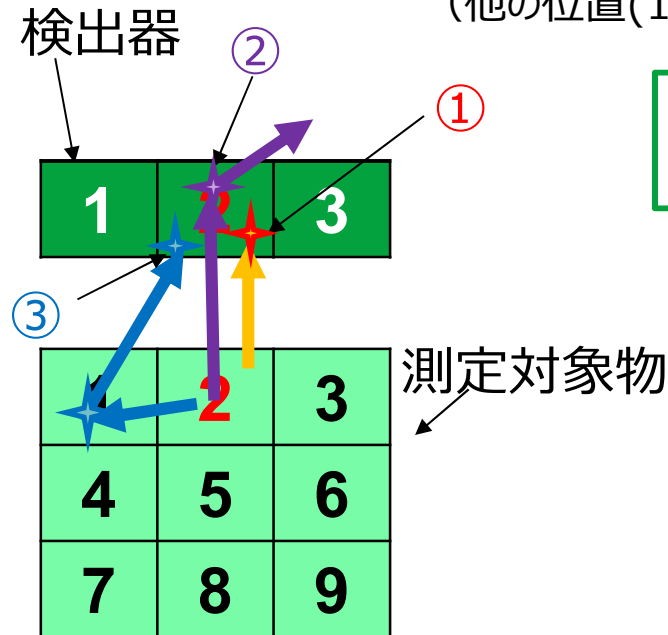
PHITSによるシミュレーションで逆問題解法の成立性を確認後、実測で不確かさの算出を試みた。

参考文献 : T. Sato *et al.*, Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol. 55, 684-690 (2018)

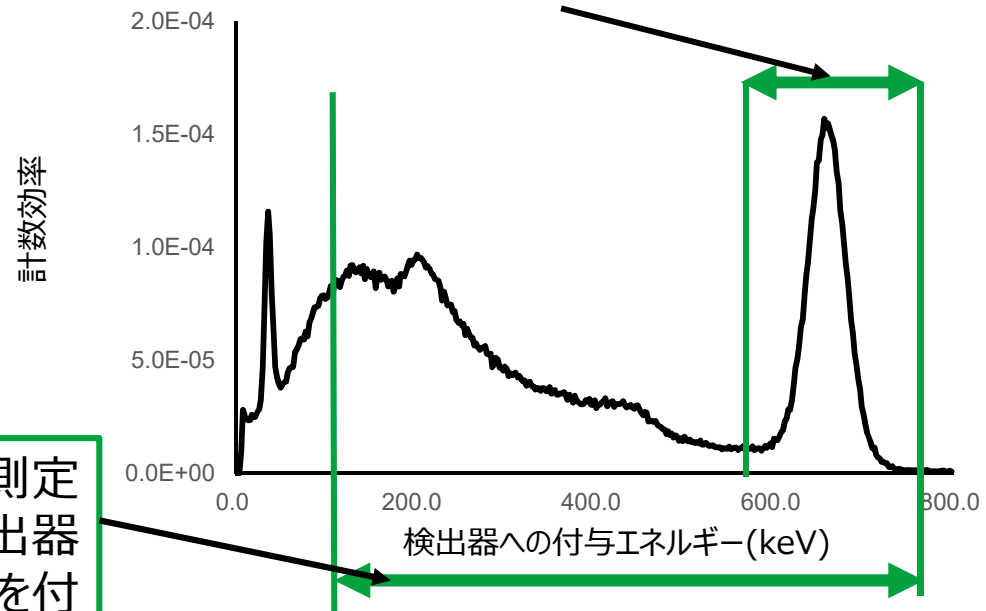
# 3. 放射能分布測定への逆問題解法の適用

## 3.1 検討に用いた測定体系

例：測定対象物の位置 2 に放射能が存在し、検出器 2 の応答を求める場合  
(他の位置(1,3~9)は放射能のないブランク試料で充填されている。)



ピーク領域の効率 (①) : 測定対象物から放出される放射線が、検出器に全てのエネルギーを付与して計数する確率



全領域の効率 (① + ② + ③) : 測定対象物から放出される放射線が検出器に全部 (①) 又は一部のエネルギーを付与して計数する確率 (② + ③)の和

この関係を検出器・位置の全組合せに対して求める。

# 3. 放射能分布測定への逆問題解法の適用

## 3.2 逆問題解法の構成

測定対象物の9等分された各位置に<sup>137</sup>Csが1 Bq存在する時の各検出器の<sup>137</sup>Csのピーク領域の計数率と、全エネルギー領域の計数率の関係

$$\begin{pmatrix} c_{11} & \cdots & c_{19} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{161} & \cdots & c_{169} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_{16} \end{pmatrix}$$

**C**                      ×                      **A**                      =                      **N**

変換行列    各位置の放射能の組合せ                      検出器の計数率の組合せ

前のページの例では、  
 $c_{22}$ :位置2に放射能が存在するときの検出器2の全領域の効率  
 $c_{102}$ :位置2に放射能が存在するときの検出器2のピーク領域の効率

各位置の放射能と、放射線検出器の応答との関係を行列方程式で表現

- $c_{ij}$  : 対象物中の位置jに対する検出器の感度
- $a_j$  : 対象物中の位置jの放射能
- $n_i$  : 検出器の計数率
  - i = 1 ~ 8 : 検出器1 ~ 8の全領域の計数率/効率
  - i = 9 ~ 16 : 検出器1 ~ 8のピーク領域の計数率/効率

参考文献：菅谷信二他 日本原子力学会2016年春の年会 1016, 2016年3月26日-28日, 東北大学 (2016).

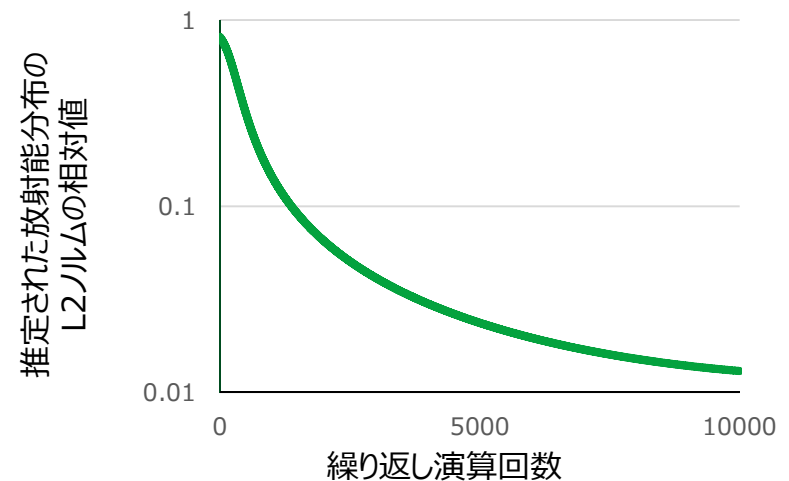
# 3. 放射能分布測定への逆問題解法の適用

## 3.2 逆問題解法の構成

変換行列  $\mathbf{C}$  の各要素  $c_{ij}$  を用いて、事前に推定された放射能強度（初期値： $a_j^0$ ）に対して、観測事象としての検出器の応答（ $n_i$ ）を取り込んだ以下のML-EM法の反復計算により、各位置の放射能（ $a_j$ ）を推定する。

$$a_j^{k+1} = \frac{a_j^k}{\sum_{i=1}^{16} c_{ij}} \sum_{i=1}^{16} \frac{n_i \times c_{ij}}{\sum_{j'=1}^9 (c_{ij'} \times a_{j'}^k)}$$

$a_j^k$ : k回目の反復計算時の放射能の推定値



反復計算回数による収束(10,000回とした)

### 観測事象数

各位置に線源を置いたときの各検出器の応答数  
16(=8(検出器台数)×2(ピーク領域,全領域))

### 推定する情報の数

各位置の放射能 : 9

観測事象数 > 推定する情報数  
優決定の逆問題であり、解の発散可能性は低い。

# 3. 放射能分布測定への逆問題解法の適用

## 3.3 逆問題解法の推定値の不確かさの計算

今回想定したような逆問題解法を用いる場合、繰り返し演算の結果、二乗和による合成が成立する前提条件が担保できず、二乗和の合成の式で不確かさを合成できない。

モンテカルロ法により、測定値を不確かさの範囲で変化させた値で、ML-EM法により各位置の放射能の値を3,000個求め、その標準偏差を放射能の不確かさとした。

前提条件：

- 計数による不確かさのみを考慮し、計数率の補正、及び、他の換算係数の不確かさ( $u_{rel}(w)$ )等は今回は考慮しない。
- Net計数率 $n_i$ のときの計数率の不確かさ $u(n_i)$ を以下とする。

$$u(n_i) = \sqrt{\frac{n_0}{t_g} + \frac{n_0}{t_0} + \frac{n_i}{t_g}}$$

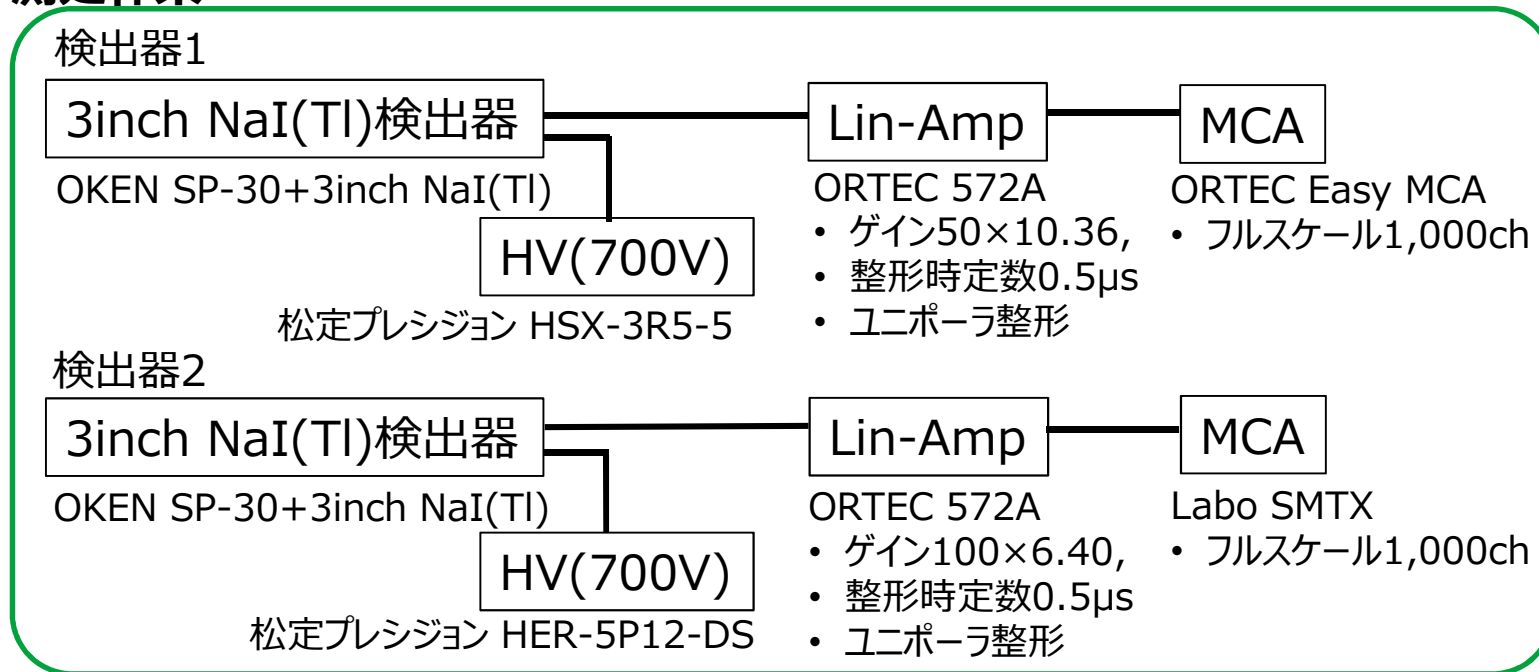
$n_i$  : net計数率  
 $n_0$  : バックグラウンド計数率  
 $t_0$  : バックグラウンド計数時間  
 $t_g$  : 実測定時間

※ 2.3項Sheet-9の式で、 $n_g = n_i + n_0$ ,  $x_3 = 1$ ,  $x_4 = 0$ ,  $u_{rel}(w) = 0$ とした場合に相当。

# 3. 放射能分布測定への逆問題解法の適用

## 3.4 実測による評価

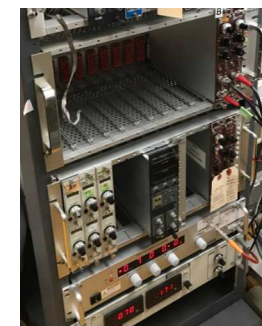
産業技術総合研究所にて非密封RIにより体積線源を作成しデータ取得  
測定体系



MCA(Easy MCA)



MCA(SMTX)



Lin-Amp, HV



NaI(Tl)検出器と測定対象物

両検出器チャンネルとも、MCAでの<sup>137</sup>Cs : 662keV  
γ線の全エネルギー吸収ピークが331chとなるようにゲイン等を調整

# 3. 放射能分布測定への逆問題解法の適用

## 3.4 実測による評価

- 計算条件
- BG計数測定時間：1,000 s
  - 測定対象物の測定時間：300 s
  - 検出器1の全領域のバックグラウンド(BG)計数率：149.2 s<sup>-1</sup>
  - 検出器2の全領域のバックグラウンド(BG)計数率：131.9 s<sup>-1</sup>
  - 検出器1のピーク領域のBG計数率：12.7 s<sup>-1</sup>
  - 検出器2のピーク領域のBG計数率：11.2 s<sup>-1</sup>

モンテカルロ法における  
正規乱数の発生に使用

### 決定しきい値( $a_{all}^*$ )

$u(a_{all,0})$ : (濃度0相当の計数率をML-EM法に入力した時の推定値 ( $a_{all,0}$ ) の不確かさ) から導出

$$a_{all}^* = a_{all,0} + 1.645 \times \tilde{u}(a_{all,0})$$

$$a_{all}^* = 77.049 + 1.645 \times 32.930 \\ = 131.2 \text{ Bq}$$

### 検出限界( $a_{all}^\#$ )

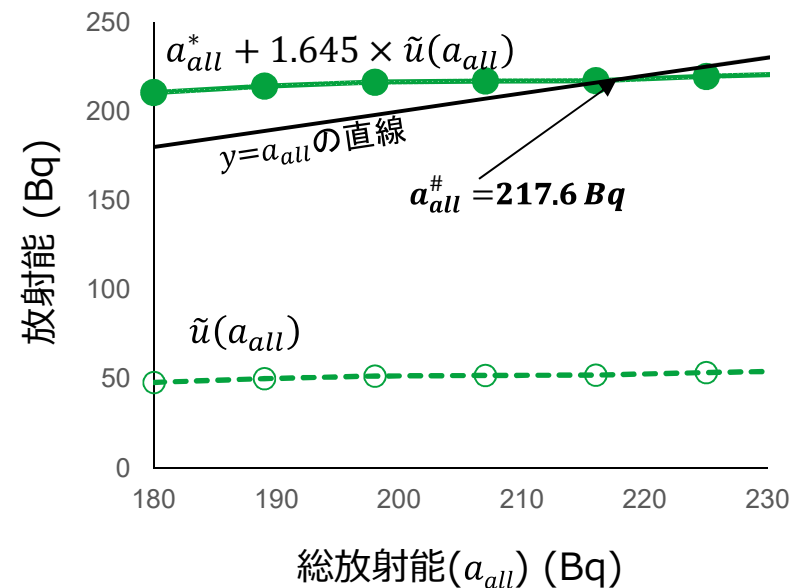
$\tilde{u}(a_{all}^\#)$  (検出限界放射能のときの不確かさ) から再帰的に導出

$$a_{all}^\# = a_{all}^* + 1.645 \times \tilde{u}(a_{all}^\#)$$

$$a_{all}^\# = 217.6 \text{ Bq}$$

### 放射能( $a$ )の包含区間の上限値 ( $a_{all}^\triangleright$ )

$$a_{all}^\triangleright = a_{all} + 1.645 \times u(a_{all})$$

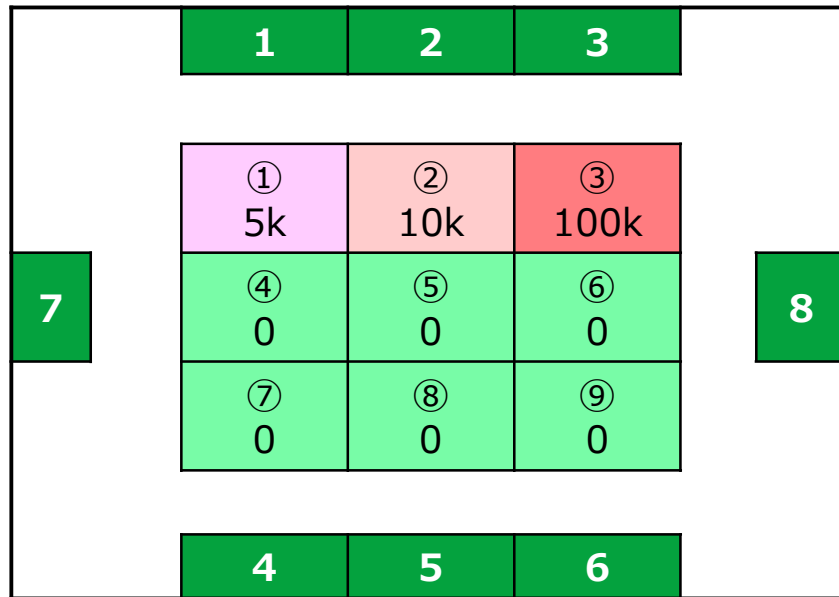




# 3. 放射能分布測定への逆問題解法の適用

## 3.4 実測による評価

片側に放射能が分布する場合



総放射能の包含区間の上限値( $a_{all}^{\triangleright}$ ):

$$a_{all}^{\triangleright} = 1.151 \times 10^5 + 1.645 \times 1.349 \times 10^2 = 1.153 \times 10^5 \text{ (Bq)}$$

ML-EM法による放射能推定値(Bq)

位置	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	総放射能
推定値	$4.97 \times 10^3$	$1.13 \times 10^4$	$9.83 \times 10^4$	$7.32 \times 10^{-3}$	$1.78 \times 10^1$	$5.30 \times 10^2$	$1.54 \times 10^1$	$1.32 \times 10^{-2}$	$3.18 \times 10^{-5}$	$1.15 \times 10^5$
不確かさ	$1.92 \times 10^2$	$4.35 \times 10^2$	$4.02 \times 10^2$	$1.07 \times 10^{-1}$	$5.68 \times 10^1$	$2.18 \times 10^2$	$3.42 \times 10^1$	$3.45 \times 10^{-1}$	$1.50 \times 10^{-3}$	$1.35 \times 10^2$

検出器の応答

	検出器番号	計数率( $s^{-1}$ )
全領域	1	642.1
	2	1,019
	3	1,308
	4	102.2
	5	121.3
	6	131.1
	7	176.0
	8	899.5
ピーク領域	1	199.6
	2	340.2
	3	460.2
	4	19.53
	5	24.38
	6	27.41
	7	42.72
	8	296.1

# 1. 研究の背景・目的

---

## 本発表の構成

### 1. 研究の背景・目的

### 2. 計量・計測分野における不確かさ

- 2.1 計量・計測分野における不確かさの定義
- 2.2 測定モデル化と不確かさ
- 2.3 放射線計測分野での特有の取扱い

### 3. 放射能分布測定への逆問題解法の適用

- 3.1 想定した測定体系
- 3.2 逆問題解法の構成とその成立性確認
- 3.3 逆問題解法の推定値の不確かさの計算
- 3.4 実測による評価

### 4. まとめと課題

参考：関連する技術文書



本研究の前提となる重要な概念である「測定の不確かさ」について説明

具体的な実験・検討結果を説明

## 4. まとめと課題

---

### まとめ

- 測定の不確かさの考え方を、複数の検出器を組み合わせた測定体系の出力から逆問題解法により放射能濃度を求める測定に対して適用できることを確認した。
- ISO 11929:2010で規定された**決定しきい値、検出限界、包含区間の上限**が、複雑な測定体系で算出できることを確認した。

## 4. まとめと課題

---

### 今後の課題

#### (1) ML-EM法について

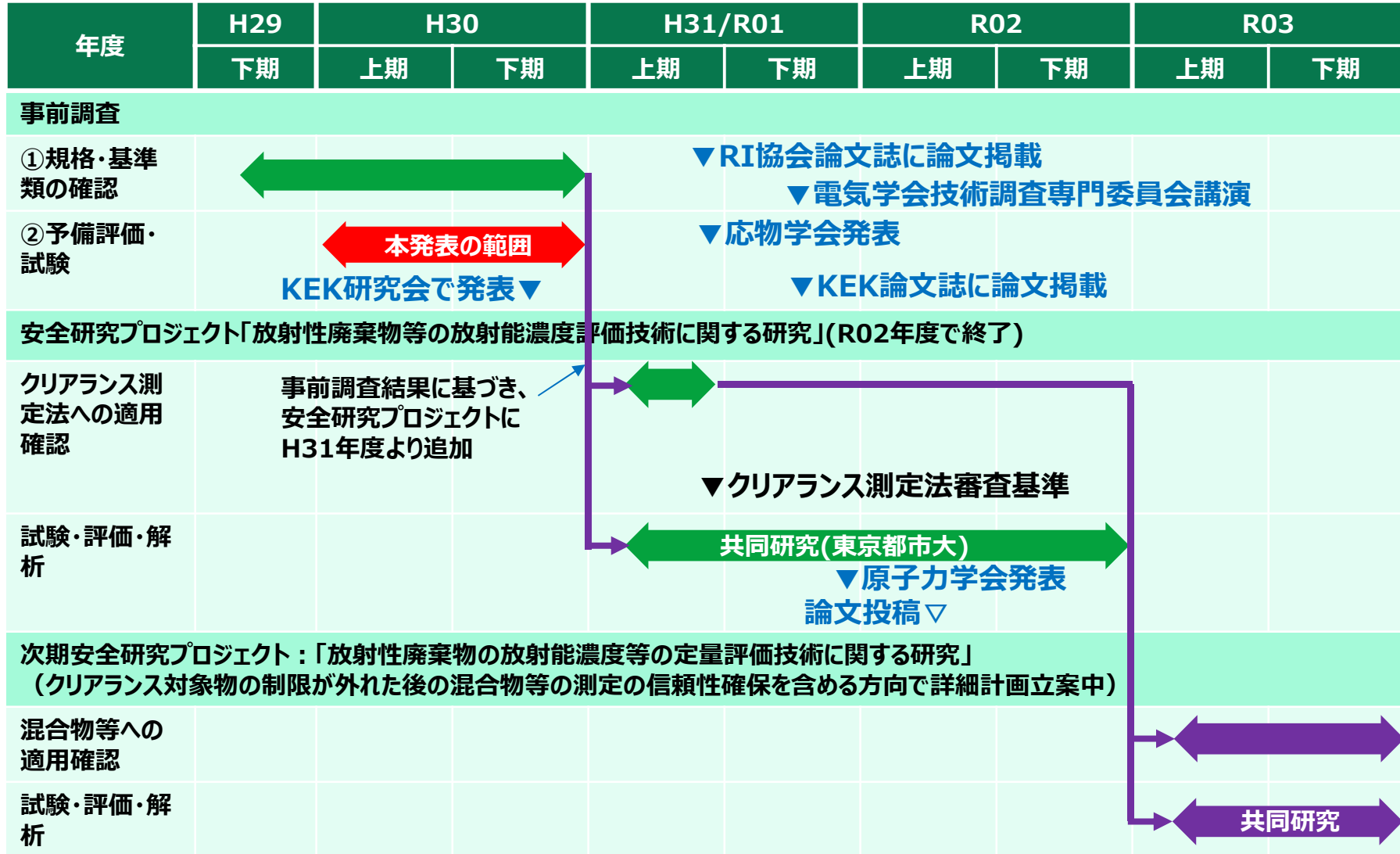
- 今回は除外した以下の不確かさの考慮
  - 感度換算係数の不確かさ
  - ML-EM法の収束度合いに係る不確かさ
  - 他の要因による不確かさ（環境条件、幾何条件等）
- 濃度条件、バックグラウンド計数率が異なる場合の影響の検討
- 決定しきい値、検出限界についての非均一分布の場合の取扱いの検討

#### (2) 測定の不確かさを含む低濃度放射能計測の信頼性確保全般について

- 他の複雑な測定法（イメージング、スペクトルアンフォールディング等）への測定の不確かさの適用検討
- 測定対象物の内部で密度、組成、放射能濃度等が変化する場合（例：樹脂・金属の混合物）の取扱いの検討
- その他、審査における測定の信頼性が確保されていることの適切さを判断するための知見蓄積

# 4. まとめと課題

## 低濃度放射能測定信頼性確保に関する、これまで及び今後のスケジュール



# プロジェクトに関連する技術文書

(緑は本報告に関係)

## 【論文等投稿】

- Sakai, H., Yoshii, T., Kawasaki, S., Derivation of an uncertainty propagation for clearance measurement, Applied Radiation and Isotopes (投稿予定)
- Sakai, H., Yoshii, T., Takasaki, F., Kawarabayashi, J., Evaluation of the detection limit count for the energy spectrum of CZT detector, Nuclear Instruments and Methods Section A (投稿予定)
- 酒井 宏隆, 吉居 大樹, 川崎 智, 放射能分布の逆問題解法でのモンテカルロ法による測定の不確かさ評価, Radiation Detectors and Their Uses, Proceedings of the 33rd Workshop on Radiation Detectors and Their Uses (2019-4) 24 - 32 令和元年12月
- 酒井 宏隆, 吉居 大樹, 川崎 智, 低濃度放射能測定におけるISO 11929に従った測定の不確かさと特性値の導出, RADIOISOTOPES 68(9) 659 - 673 令和元年9月
- 吉居大樹, 酒井宏隆, 川崎 智, 「最大汚染モデル」を用いたドラム缶中のウランクリアランス対象物のウラン放射能の評価方法に関する検討, 日本原子力学会誌(投稿中)

## 【口頭発表】

- 酒井 宏隆, 吉居 大樹, 高崎 史晟, 河原林 順, CZT検出器のエネルギースペクトル形状に対する検出限界計数の評価, 日本原子力学会2020年春の年会 令和2年3月
- 酒井 宏隆, 低濃度放射能計測における測定の不確かさの考慮について, 電気学会 原子力技術委員会 福島第一原子力発電所廃炉に関わる放射線計測技術調査専門委員会 2019年12月
- 吉居 大樹, 酒井 宏隆, 川崎 智, PCB使用安定器内の残留放射能の測定に関する基礎的検討, 日本原子力学会 2019年秋の大会 令和元年9月
- 酒井宏隆, 吉居大樹, 川崎智, 柚木彰, 放射能分布の逆問題解法でのモンテカルロ法による測定の不確かさ評価, 第80回応用物理学会秋季学術講演会 令和元年9月
- 酒井 宏隆, 吉居 大樹, 川崎 智, 放射能分布の逆問題解法でのモンテカルロ法による測定の不確かさ評価, 第33回研究会「放射線検出器とその応用」平成31年1月

# 参考資料 検出限界の従来評価との相違

国内で使用されてきた式の基本形( $n_n - K\sigma \geq 0$ の関係から求めた式)

$$n_n = \frac{K}{2} \left\{ \frac{K}{t_s} + \sqrt{\left(\frac{K}{t_s}\right)^2 + 4n_b \left(\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b}\right)} \right\}$$

- $n_n$  : 検出限界計数率( $s^{-1}$ )
- $K$  : 標準偏差の何倍を取るかの定数(国内では通常3)
- $n_b$  : バックグラウンド計数率( $s^{-1}$ )
- $t_s$  : 試料測定時間 (秒)
- $t_b$  : バックグラウンド測定時間 (秒)

- 計量・計測分野で使われる統計検定の考え方では説明できない独自の考え方
- 検出力を考えずに、危険率にのみ注目
- その際に念のため高めのばらつきを計数率、標準偏差の何倍をとるかの両方で考慮

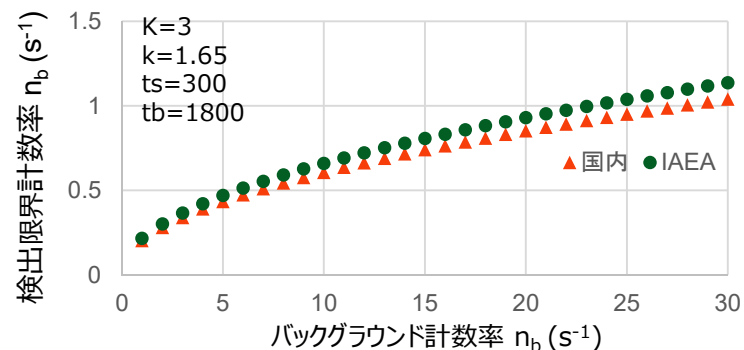
ISO11929/IAEAの検出限界式(Currieの式、決定しきい値を一旦設定後検出限界を求める2段階)

$$n_n = \frac{k^2}{t_s} + 2k \sqrt{n_b \left(\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b}\right)}$$

- 計量・計測分野で使われる統計検定の危険率、検出力の考え方に従った定義で特殊な取扱不要。

$k=1.645$  (信頼の水準 : 95%) ← IAEAの定義

右の例では、従来国内で使用されてきた検出限界は **やや過小評価となる。**



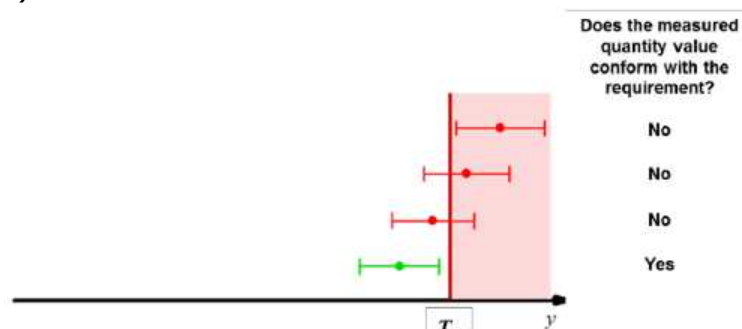
両者の比較

# 参考資料 ドイツでの不確かさの採用例

## ドイツX線令 (RoeV) 及びドイツ放射線防護令 (StrlSchV) の中で計量試験を実施する際の測定の不確かさを考慮する方法について

ドイツ放射線防護委員会勧告(2016年9月)

Method to account for measurement uncertainties when performing metrological tests within the scope of the German X-ray Ordinance (RoeV) and the German Radiation Protection Ordinance (StrlSchV), SSK, Germany, 22p, (2016).



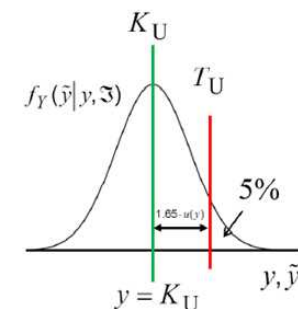
$$y + 1.645 \times u(y) \leq T_U$$

$y$ : 測定値

$u(y)$ : 測定値の不確かさ

$T_U$ : 許容限度(規制等の基準値)

測定値に、その(拡張)不確かさを加えた値が基準値を下回ることと適合していると判断することができる。



$$K_U = T_U - 1.645 \times u(y = K_U)$$

$T_U$ : 許容限度(規制等の基準値)

$K_U$ : 受容限度(測定値との比較値)

$u(y = K_U)$ : 測定値が $K_U$ の時の不確かさ

基準値より、(拡張)不確かさ分だけ下に受容限度を設定し、測定値が受容限度を下回ることと適合していると判断することができる。

ISO/IEC Guide 98-4 と、ISO 11929を引用



# 参考資料 逆問題解法の成立性確認

## シミュレーション計算(PHITS)による事前確認

各変換行列の要素を求めるとき：

測定対象物中の一箇所のみ放射能が存在  
複数の箇所に異なる放射能が存在：

**逆演算**で放射能分布を計算できることを確認

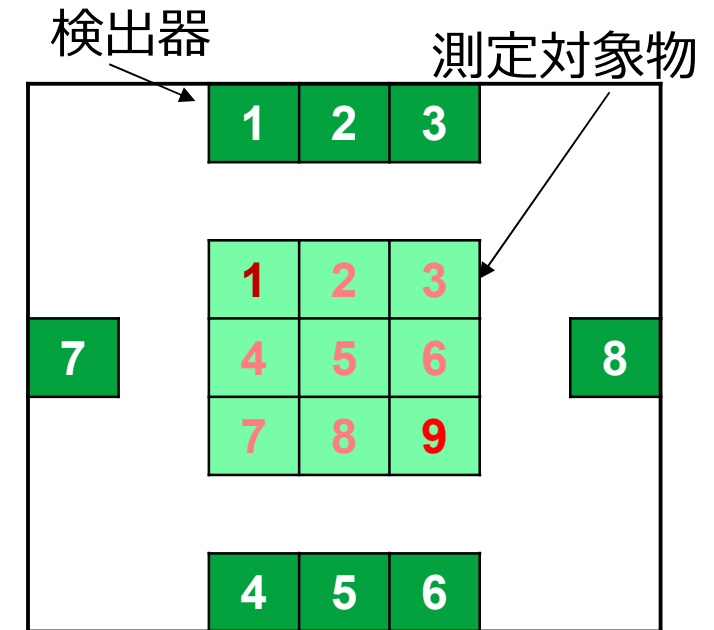
各位置の放射能の組合せ $A_0$ を設定（上段）

各検出器の応答 $N$ を $N = C \times A_0$ から計算



変換行列

各位置の放射能の組合せの推定値 $A$ をML-EM法による逆演算で計算（下段）



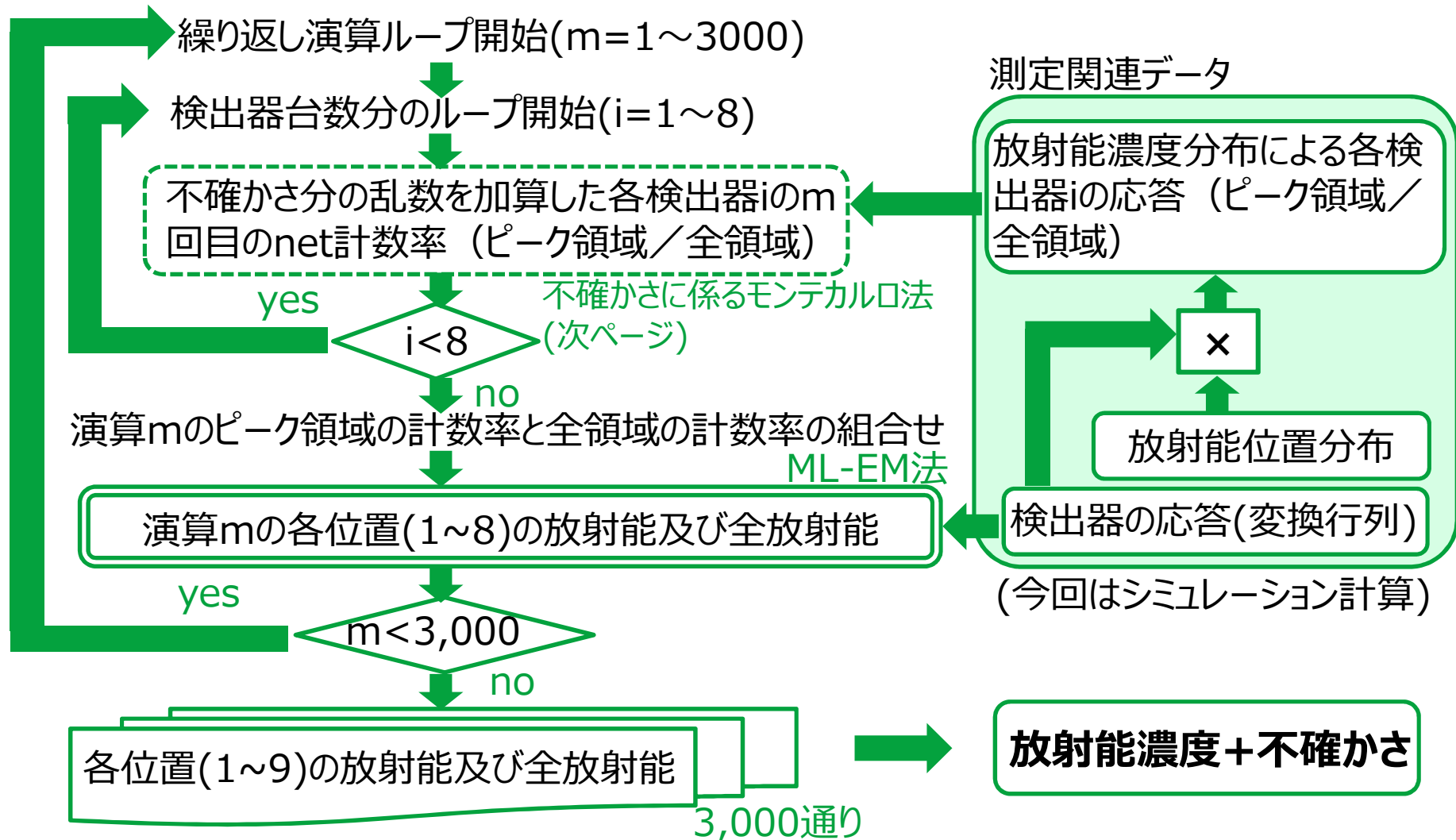
位置	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	総放射能
設定値	$5.00 \times 10^3$	$1.00 \times 10^4$	$1.00 \times 10^5$	0	0	0	0	0	0	$1.15 \times 10^5$
推定値	$4.91 \times 10^3$	$1.01 \times 10^4$	$9.99 \times 10^4$	$4.27 \times 10^1$	$2.33 \times 10^0$	$5.19 \times 10^1$	$4.29 \times 10^0$	$8.85 \times 10^{-2}$	$3.10 \times 10^0$	$1.15 \times 10^5$

ML-EM法による逆演算後の値が、設定値と一致することを確認

**評価に用いた体系でML-EM法による逆問題解法による推定が成立することを確認**

# 参考資料 不確かさの計算処理(1/2)

計算処理のフローチャート



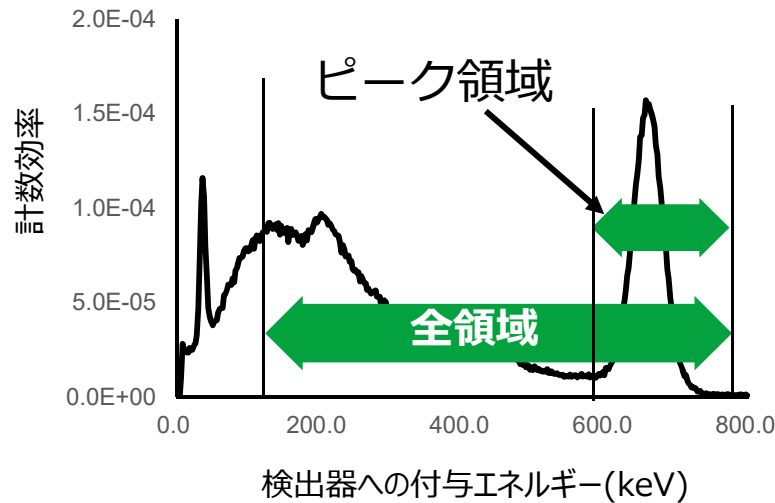
# 参考資料 不確かさの計算処理(2/2)

不確かさに係るモンテカルロ法

ピーク領域のnet計数率/BG計数率  
 ↓  
 ピーク領域のnet計数率の標準偏差  
 ↓  
 中心値0、上記標準偏差の正規分布乱数

① ピーク領域のnet計数率 + 乱数  
 (負となった場合はゼロ)

m回目の検出器iのピーク領域の計数率



<全領域-ピーク領域>のnet計数率/BG計数率  
 ↓  
 <全領域-ピーク領域>のnet計数率の標準偏差  
 ↓  
 中心値0、上記標準偏差の正規分布乱数

② <全領域-ピーク領域>のnet計数率 + 乱数  
 (負となった場合はゼロ)

全領域の計数 = ① + ②

繰り返し回数m回目の検出器iの全領域の計数率

計数の標準偏差

$$u(n_i) = \sqrt{\frac{n_0}{t_g} + \frac{n_0}{t_0} + \frac{n_i}{t_g}}$$

# 参考資料 ML-EM法での決定しきい値

決定しきい値の通常の表式： $a^* = k_{1-\alpha} \times \tilde{u}(0)$



今回用いたML-EM法の推定値は常に非負の値をとるので、真値0Bqの相当のときの計数率を入力としたML-EM法による総濃度推定値が0Bqではない。

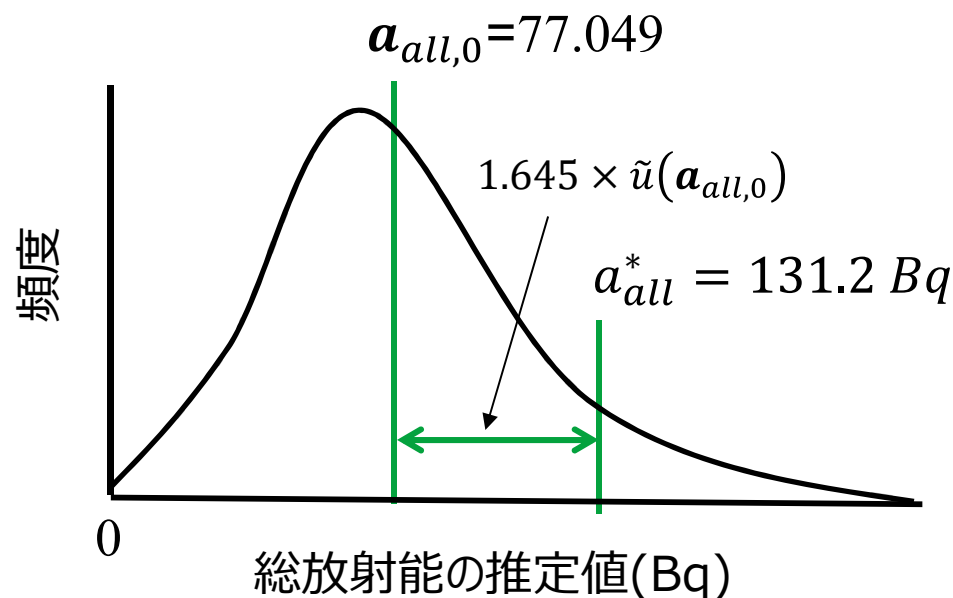


IAEAの定義「バックグラウンドからある一定の信頼の水準で確実に識別できる計数率を生じる放射能」から以下とする。

$$a_{all}^* = a_{all,0} + 1.645 \times \tilde{u}(a_{all,0})$$

全放射能の決定しきい値

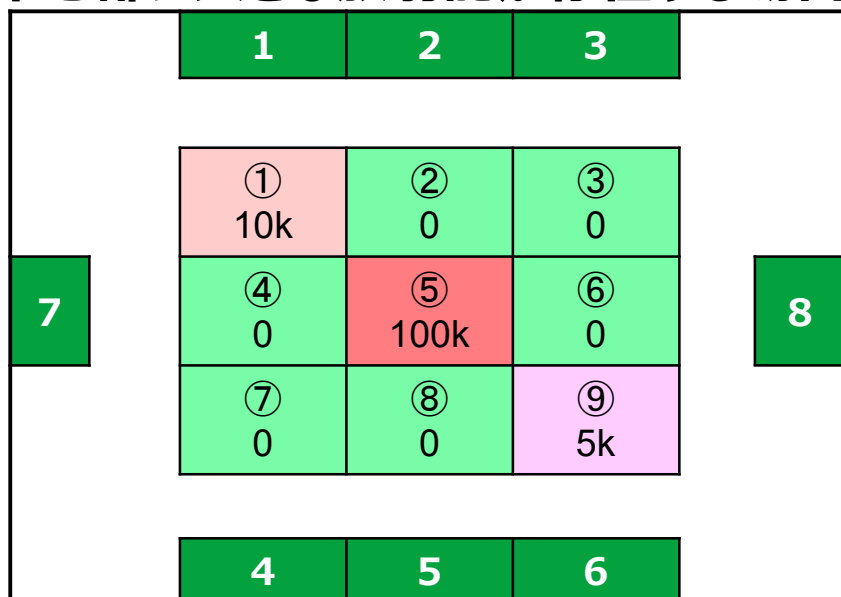
$$\begin{aligned} a_{all}^* &= 77.049 + 1.645 \times 32.930 \\ &= 131.2 \text{ Bq} \end{aligned}$$



$a_{all,0}$ : 真値0Bq相当の計数率のときのML-EM法による総濃度推定値

# 参考資料 別配置での逆問題解法の結果

## 中心部に大きな放射能が存在する場合



総放射能の包含区間の上限値( $a_{all}^{\triangleright}$ ):  

$$a_{all}^{\triangleright} = 1.141 \times 10^5 + 1.645 \times 2.258 \times 10^2$$

$$= 1.145 \times 10^5 \text{ (Bq)}$$

## ML-EM法による放射能推定値(Bq)

位置	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	総放射能
推定値	$9.45 \times 10^3$	$2.66 \times 10^2$	$5.05 \times 10^{-1}$	$1.15 \times 10^2$	$9.93 \times 10^4$	$4.57 \times 10^1$	$2.76 \times 10^{-3}$	$1.17 \times 10^1$	$4.94 \times 10^3$	$1.14 \times 10^5$
不確かさ	$2.02 \times 10^2$	$2.67 \times 10^2$	$3.63 \times 10^0$	$1.31 \times 10^2$	$5.62 \times 10^2$	$7.47 \times 10^1$	$2.93 \times 10^{-2}$	$2.91 \times 10^1$	$1.83 \times 10^2$	$2.26 \times 10^2$

## 検出器の応答

	検出器番号	計数率( $s^{-1}$ )
全領域	1	439.7
	2	430.7
	3	374.3
	4	353.4
	5	393.0
	6	389.9
	7	429.3
	8	393.7
ピーク領域	1	118.6
	2	110.3
	3	91.47
	4	85.65
	5	96.73
	6	99.51
	7	110.1
	8	97.41