

# 共同研究成果報告書

## 低濃度放射能測定の信頼性確保に関する研究

Research on establishment of reliability for low concentration activity measurement

原子力規制庁長官官房技術基盤グループ

Regulatory Standard and Research Department, Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

学校法人後藤育英会東京都市大学

Tokyo City University

令和5年3月

March, 2023

本報告書は、原子力規制庁長官官房技術基盤グループ及び学校法人後藤育英会東京都市大学が行った共同研究の活動内容・成果をとりまとめたものです。

なお、本報告書の内容を規制基準、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。

本報告書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

## 目次

1	はじめに .....	1
2	研究目的 .....	1
3	研究内容 .....	1
4	実施体制 .....	1
5	実施内容及び結果.....	2
5.1	低濃度放射能濃度測定における測定の不確かさの導出に関する検討.....	2
5.2	測定対象物の情報抽出に関する検討.....	10
5.2.1	測定対象物の位置及び材質についての情報を得る手法についての検討 .....	10
5.2.2	収納容器中の対象物及び線源の位置と放射能の評価結果の関係についての検討 .....	13
6	おわりに .....	17
7	成果発表リスト .....	18
8	共同研究参加者（令和3年3月時点の所属、役職等） .....	18
	参考文献リスト .....	19

## 1 はじめに

本書は、令和元年5月1日から令和3年3月31日に実施した原子力規制庁及び東京都市大学による共同研究（「低濃度放射能測定の信頼性確保に関する研究」）の成果報告書である。なお、本報告書の内容の一部は令和3年6月に発行された原子力規制庁の安全研究成果報告「放射性廃棄物等の放射能濃度評価技術に関する研究」RREP-2021-3001<sup>1</sup>に記載されている。

## 2 研究目的

低濃度放射能測定では、自己遮蔽の大きな金属の廃棄物又は部位によって自己遮蔽の影響の異なる金属及び有機物（プラスチック、ビニール等）から構成される電気盤などが測定対象物として想定される。その汚染分布や密度分布が不明である場合には、最も自己遮蔽が大きな箇所に汚染が集中するというような保守性を持たせて放射能濃度の測定値（評価結果の上限値）を求めることになる。これらの放射能濃度の測定は、環境バックグラウンドに近いレベルでの放射線測定となるため、過度に保守性を持たせると放射線検出器の応答が統計的に有意とみなせない程度の指示のときでも放射能濃度の測定値が規制上の基準値を超えた値となり得ることから、測定対象物の特性を考慮に入れた補正等の複雑な処理を含む測定手段が取られることになる。

本研究では、こうした測定手段を通じて得られる放射能濃度の測定値が、十分な信頼性を確保されていることを確認するための解析手法の考案と知見の蓄積を目的とした。

## 3 研究内容

測定に係る様々な要因の不確かさを抽出し放射能濃度の評価結果の不確かさへ反映することについて、既往知見を基にケーススタディを実施し、放射能濃度の測定値に十分な信頼性が確保されることを確認するための手法を検証し、適用条件の評価を行うとともに課題を抽出した。

上記と併せて、測定対象物の組成や、密度、放射能汚染等の分布といった放射能濃度の測定に影響する情報を抽出することについて、既往知見を基にケーススタディを実施し適用条件の評価を行うとともに課題を抽出した。

## 4 実施体制

研究の実施に当たって、原子力規制庁と東京都市大学は共同研究協定を締結した。実施体制として、原子力規制庁は測定法及びデータ処理法の妥当性を確認するための手法の検証を、東京都市大学は測定体系の構築及びデータ処理技術の開発を担当した。

## 5 実施内容及び結果

本研究では、低放射能濃度測定において採用されることが見込まれる複雑なデータ処理も含め、放射能濃度の評価結果の不確かさを導出する手法を検討した。また、測定対象物の放射能濃度の測定に影響する情報を抽出する手法についても検討した。前者の実施内容及び結果を5.1 に、後者の実施内容及び結果を5.2 に示す。

### 5.1 低濃度放射能濃度測定における測定の不確かさの導出に関する検討

測定の不確かさに係る最新の国際規格等の基準文書を参考に、低濃度放射能測定に係る評価体系を設定しその条件下における測定の不確かさの導出とその適用に係るデータ処理の流れを明確化し、適用条件の評価を行った。

また、テルル化カドミウム亜鉛検出器（以下「CZT検出器」という。）に対して波形処理技術を適用することで検出限界が改善することを示した。これにより、放射能濃度の測定値の信頼性を確保する方法として、放射線測定のデータ処理法が適用可能であることを実験により示した。

#### 5.1.1 放射線測定の不確かさの導出と適用

本内容については7章に掲げる成果発表リスト1. に示す論文として公表されている。以下にその概要を示す。

測定を通じて得られた評価値には、測定の不確かさが伴う。不確かさが評価値と比較して十分に小さな値であればその影響は無視し得るが、低濃度放射能測定のように、不確かさが評価値の数%程度となるような場合には無視できない。クリアランス対象物のような低い放射能を測定する際には、対象物に由来する放射線障害に係るリスクが小さいので不確かさの影響を考慮して基準値への適合性の判断を行うと、過度な保守性をもたせることになるという意見<sup>2</sup>もあるが、計量及び計測の分野での標準的な考え方とは必ずしも一致しない。そこで、測定結果が基準値を下回ることの確認において、不確かさをどのように扱うかについての既往文献及び海外事例を調査し、クリアランスの確認への適用について取りまとめた。

以前は、測定結果の品質を表す指標は国際的に一意的に定められておらず、「誤差」、「精度」などの様々な用語が異なった意味で使用されていた。それらを国際的に統一するために、国際標準化機構（ISO）、国際電気標準会議（IEC）、国際臨床化学連合（IFCC）、国際試験所認定協力機構（ILAC）、国際純正・応用化学連合（IUPAC）及び国際度量衡局（BIPM）によって構成される計量計測関連ガイドに関する合同委員会（以下「JCGM」という。）により、「測定の不確かさ」が定義され、測定の不確かさの表現のガイド（以下「GUM」という。）がISO/IEC Guide 98-3:2008（JCGM 100）<sup>3</sup>として発行されている。測定結果の基準値への適合性評価については、JCGMより、GUMの考え方をを用いた判断の方法が、ISO/IEC Guide 98-4:2012（JCGM 106）<sup>4</sup>としてまとめられている。現時点では、国家計量標準及びトレ

一サビリティがあることを示すための校正において、上記GUMに従って導出された測定の不確かさが校正証明書に併記されることが国内外で実施されている。放射線測定分野においては、国際規格としてISO 11929シリーズ<sup>5,6,7,8</sup>が定められ、測定の不確かさ及びそれに関連する決定しきい値並びに検出限界及び包含区間の上下限という特性値が規定されている。このうち、特にクリアランスの確認では、放射能濃度の測定値の基準値への適合性評価に関連する特性値が包含区間の上限である。

ある測定を通じて得られた評価値が $y$ のとき、それがある確率密度関数に従うと仮定し、その標準偏差（不確かさ）を $u(y)$ とした場合、その時の測定を通じて得られた評価結果の上限値（ $y^p$ ）は定数 $k$ （確率密度関数が正規分布で片側に限界値がある区間の包含確率を95%と仮定した場合は $k=1.645$ ）を用いて、(1)式で表すことができる。

$$y^p = y + k \times u(y) \quad \text{----- (1)}$$

この包含区間の上限 $y^p$ が基準値を超えないことを確認することが、適合性の評価となる。ドイツでは、放射線防護委員会がこの考え方にに基づき、放射線防護分野における測定での適合性評価を行うよう勧告している<sup>9</sup>。また、クリアランス制度への適用として、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）のマニュアル<sup>10</sup>、イギリスの原子力産業界の業界団体であるNuclear Instituteの発行するクリアランスに関するガイド<sup>11</sup>及びドイツの国家工業標準（DIN）規格<sup>12</sup>において同様に、放射能濃度が基準値を超えないことの判断に不確かさの考慮を求めている。このようにクリアランス制度が実際に運用され資材の再利用が進められているヨーロッパにおいて、不確かさをを用いた適合性評価の考え方の下でクリアランス制度が運用されている事例を確認した。

以上のように、その対象物を放射性廃棄物としての管理から外してよいかを判断するために行う測定においては、計量・計測分野の標準的な手法を用いて基準値への適合性の判断が行われていることを確認した。

### 5. 1. 2 不確かさの放射線測定における適用例

上記の考え方で不確かさが定義されていることを踏まえて、その具体的な適用例についての評価をCZT検出器に対する波形処理法による改良を通じて行った。本内容については成果発表リスト2.の発表及び3.に示す論文として公表されている。以下に成果発表リスト3.の論文の概要を示す。

CZT検出器は、放射線とCZT結晶内との相互作用位置により出力波形が変化する。したがって波高値がそろわないために、この検出器のエネルギースペクトルの全エネルギー吸収ピークは、低エネルギー側にテールを引く形状を示す。波高値を補正して、エネルギースペクトルを改善する手段として波形処理技術が用いられている<sup>13,14</sup>。本研究では、このような波形処理技術の適用によるスペクトル形状の改善度合いを定量的に評価するために、ISO

11929に基づきピーク計数の検出限界計数を適用した。

本研究ではCZT検出器として、 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ のCZT結晶をBNCコネクタパッケージにマウントしたものをを用いた。検出器への印加電圧を $500\text{ V}$ とし、 $^{137}\text{Cs}$  (約 $1\text{ MBq}$ ) 線源を検出器表面から約 $1\text{ cm}$ 離して設置し、図 5.1.1 に示す測定体系により、前置増幅器の出力波形を分解能 $12\text{ bit}$ の $80\text{ MHz}$ サンプリングデジタイザで取得した。そのデジタル波形に対して図 5.1.2 に示す処理を行い、放射線の検出器結晶中での相互作用位置による波高の違いを補正した。処理前の波形の例を図 5.1.3 に、Slow-to-fast ratioとTrapezoidal filterの処理前後の波高値の関係を

図 5.1.4 に示す。

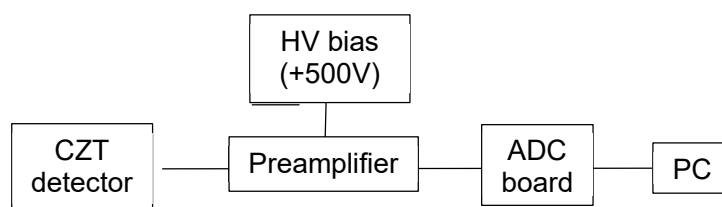


図 5.1.1 測定体系

(成果発表リスト 3. に示す論文からの抜粋 (Fig. 2))

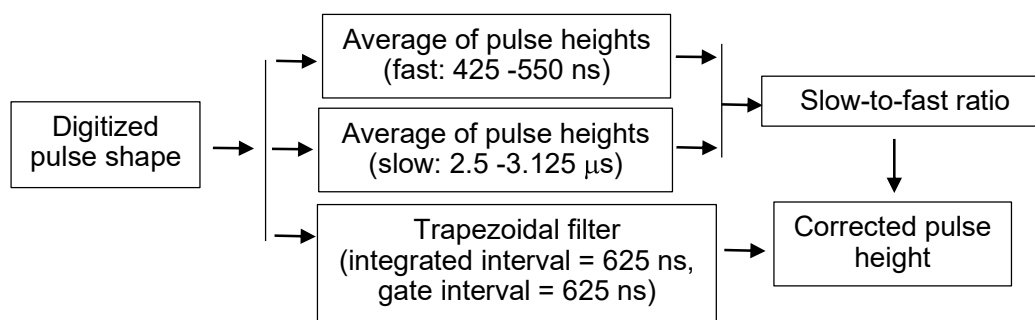


図 5.1.2 波形処理の流れ

(成果発表リスト 3. に示す論文からの抜粋(Fig. 3))

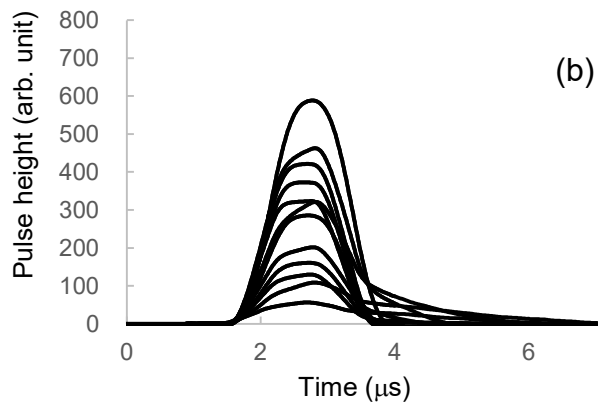
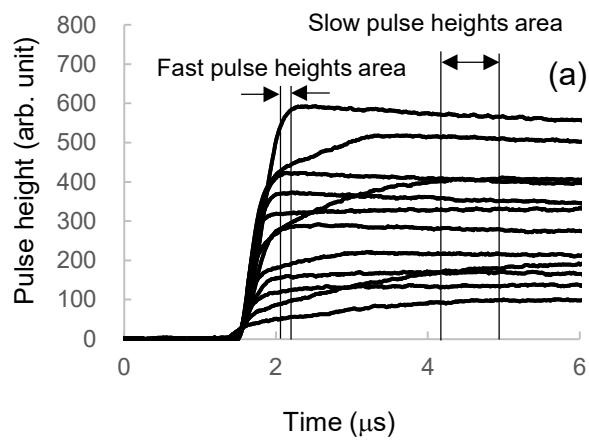


図 5.1.3 実際に使用した波形の例(a) Slow-to-fast ratio を求めるのに使用した波形、(b) Trapezoidal filter を通した後の波形 (成果発表リスト 3. に示す論文からの抜粋(Fig. 4))



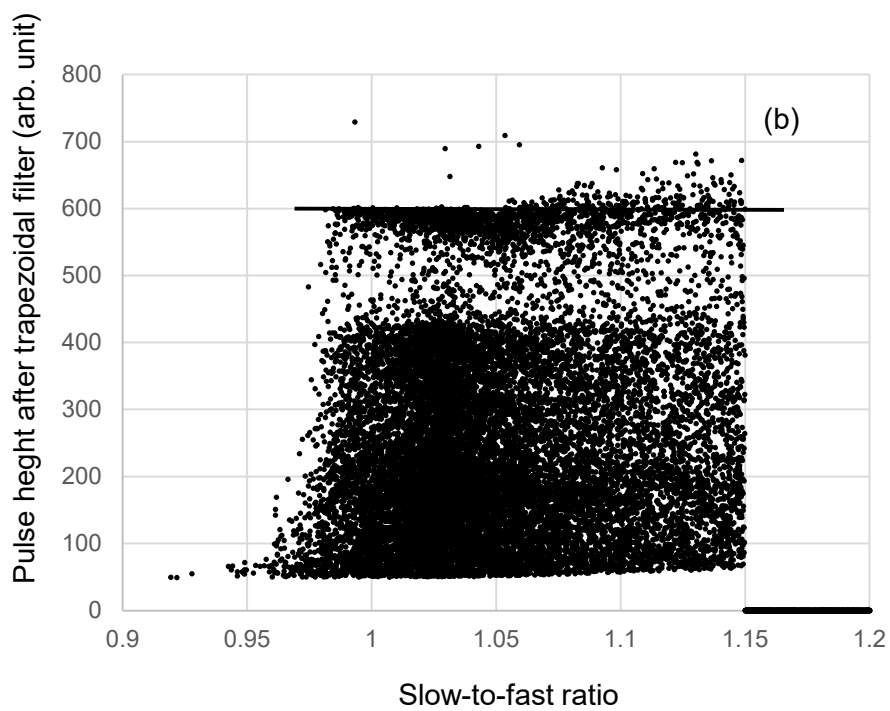
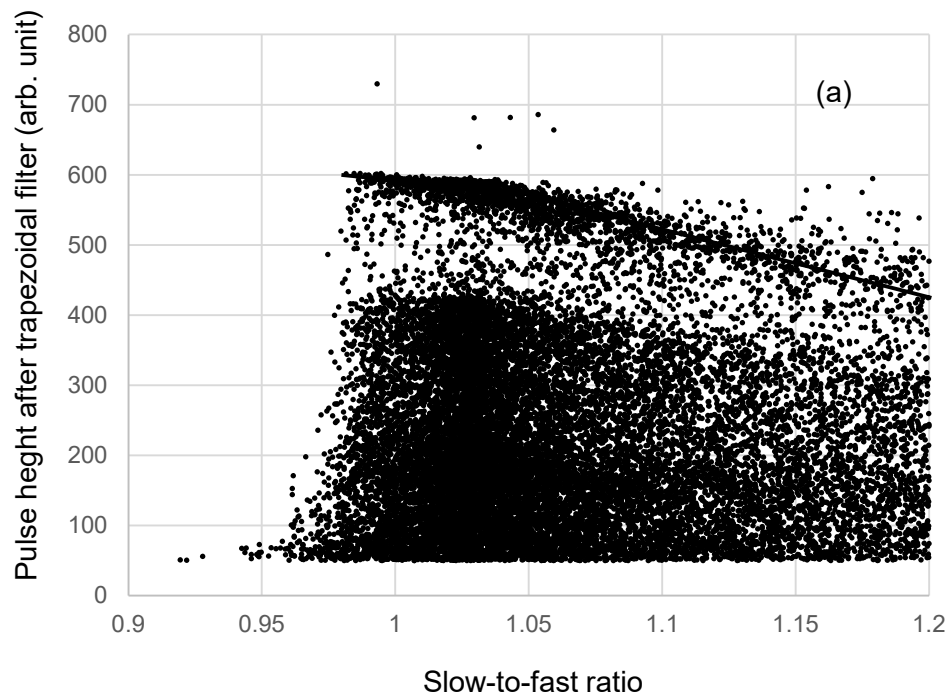


図 5.1.4 波形処理前(a)、波形処理後(b)の Slow-to-fast ratio と波高のプロット  
 (成果発表リスト 3. に示す論文からの抜粋(Fig. 5))

図 5.1.4 に示すとおり、本処理を通じて放射線の結晶中での相互作用位置による波高値の違いが補正されている。このうち、低倍率のものを選択してエネルギースペクトルとしてプロットし直すと図 5.1.5 のようになる。ここで、この改良の度合いを表現するために、まず図 5.1.6 のようにスペクトル上に計数領域を設定し、それらの計数領域の計数からそれぞれのエネルギースペクトルにおける決定しきい値と、検出限界を求めた。その結果、それぞれ決定しきい値は 57.74 カウントから 40.56 カウントに、検出限界は 118.18 カウントから 83.83 カウントに改善することを確認した。また、このような検出限界がネット計数の関数となる場合、スペクトル形状を保ったまま全体の計数を減らしていったとき、ネット計数  $y$  と検出限界計数  $y^{\#}$  とが同一になる計数がこの検出器の検出限界であると考えられる。ネット計数及び検出限界は、計数  $n_1, n_g$  及び  $n_2$  の比率を保ったまま増減させると、図 5.1.7 のようになり、処理前の場合には検出限界が 13 カウントであるのに対し、処理後には 6 カウントに改善することも確認した。このような特性値の改善は、測定対象物の放射能が低い場合の信頼性確保に対して有効である。

このように、ISO 11929 に規定された不確かさに関する特性値である決定しきい値と検出限界を用いることで、検出器の特性改善具合を定量的に表すことができることを確認した。

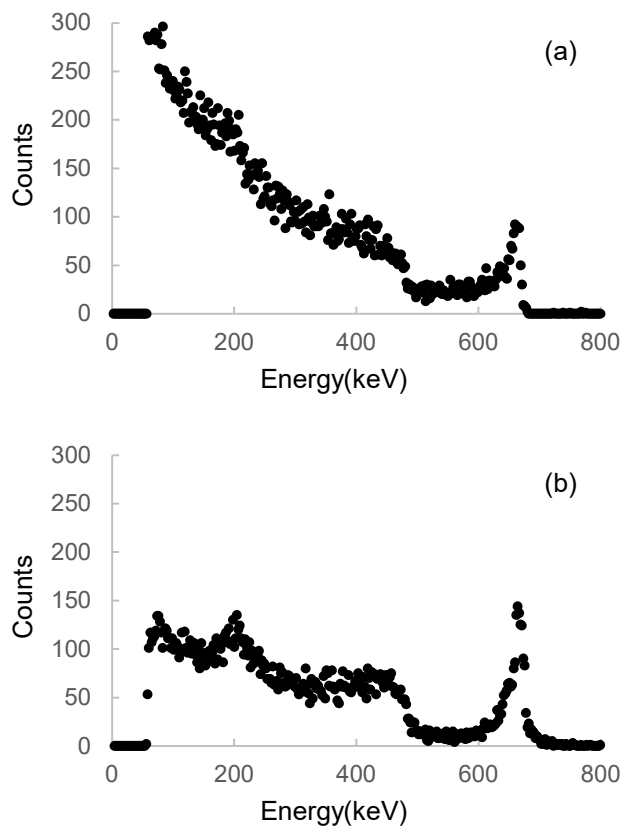


図 5.1.5 波形処理前(a)、波形処理後(b)のエネルギースペクトル

(成果発表リスト3. に示す論文からの抜粋(Fig. 6))

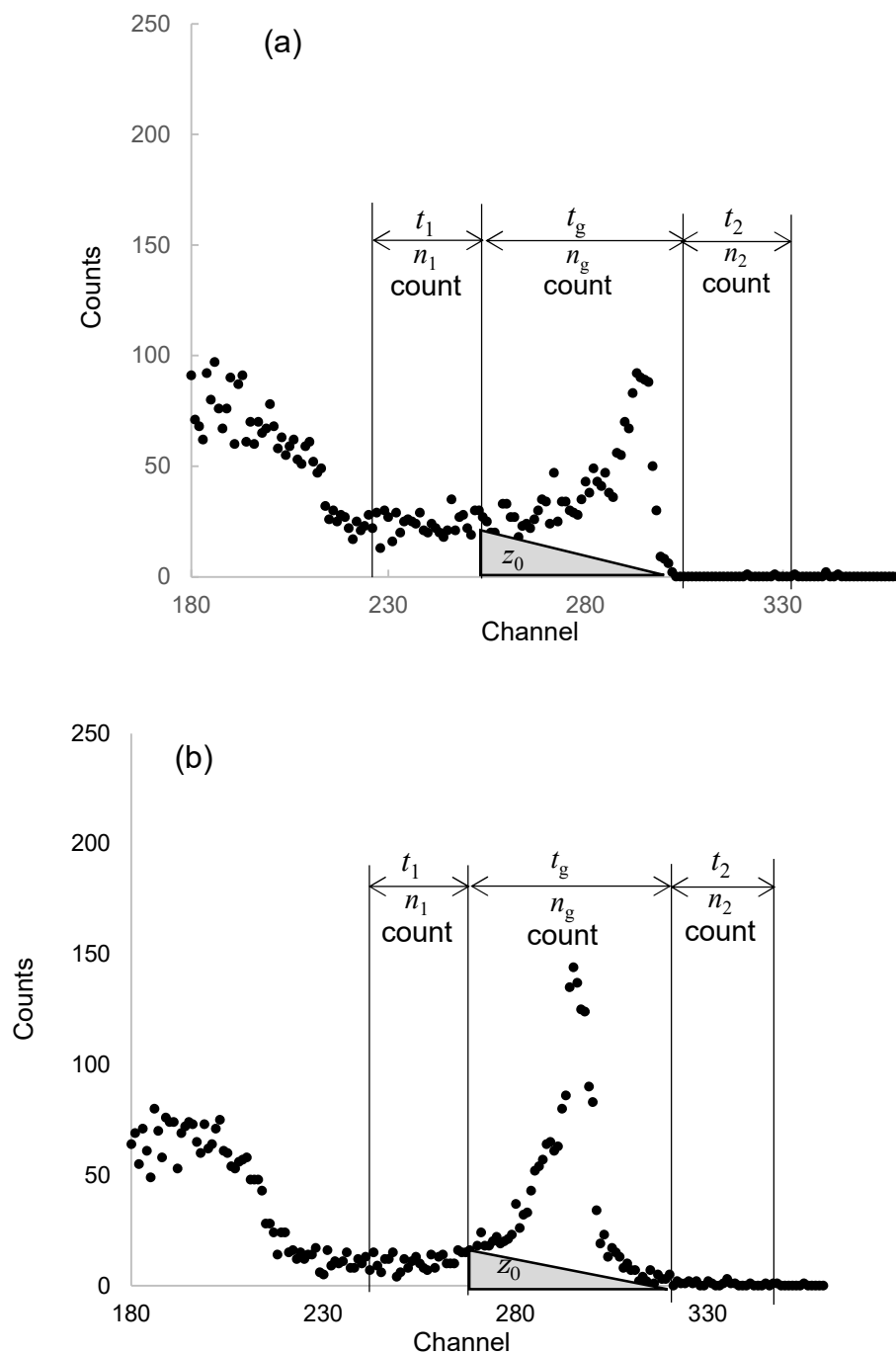


図 5.1.6 波形処理前(a)、波形処理後(b)のエネルギースペクトルの拡大図  
(成果発表リスト3. に示す論文からの抜粋(Fig. 7))

。

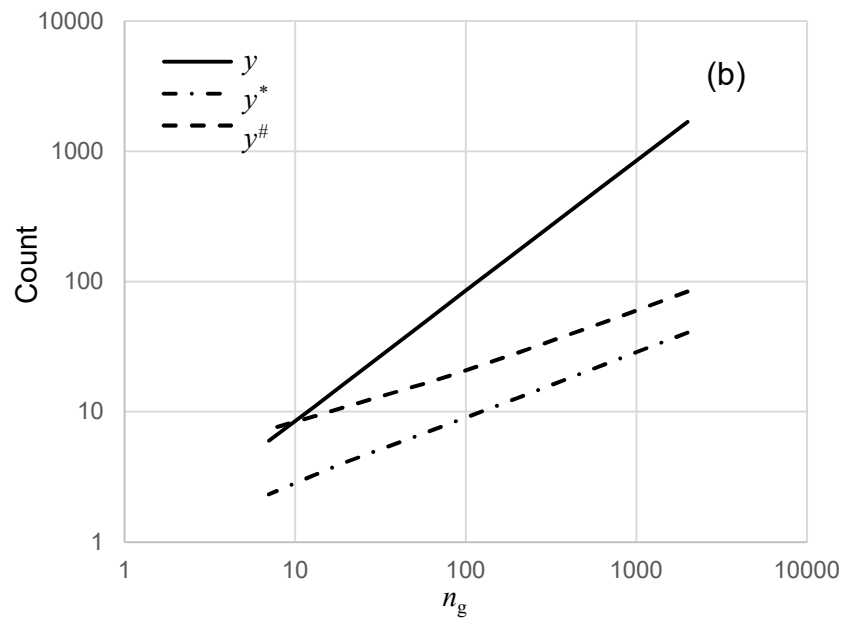
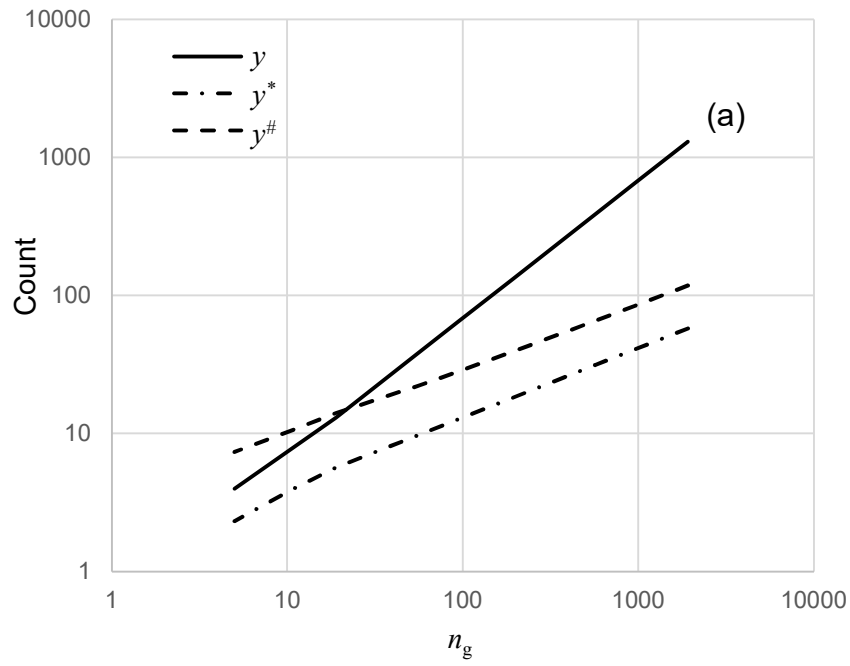


図 5.1.7 波形処理前(a)、波形処理後(b)の測定体系としての検出限界の導出  
(成果発表リスト3. に示す論文からの抜粋(Fig. 8))

## 5.2 測定対象物の情報抽出に関する検討

クリアランスにおける測定対象物の放射能濃度の評価に当たっては、測定対象物を収納容器に収納したまま、外部から放射線測定器で測定する方法が考えられる<sup>15</sup>。このような体系において放射能濃度を評価するためには、測定対象物による自己遮蔽の影響を把握することが重要であり、そのためには収納容器内における線減弱係数の分布（測定対象物の位置及び材質）についての情報を得ることが必要である。また、測定対象物中の線源の位置が評価結果に及ぼす影響を把握することも重要である。

このような観点から、収納容器内の測定対象物の位置及び材質についての情報を得る手法について検討した。その詳細を5.2.1に示す。さらに、その結果を踏まえて収納容器内における測定対象物の位置と線源の位置が放射能の評価結果にどのように影響するか検討した。その詳細を5.2.2に示す。なお、クリアランスの基準値は放射能濃度（Bq/kg）として示されているが、ここでは放射能（Bq）の評価結果に着目し検討を行った。

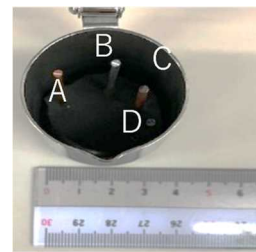
### 5.2.1 測定対象物の位置及び材質についての情報を得る手法についての検討

収納容器に収納された測定対象物の位置及び材質についての情報を得る手法として、非破壊検査等に用いられるX線CT技術に着目した。図 5.2.1 (a)から(d)に示すとおり、ステンレス容器内部に直径2mmの銅、アルミニウム、鉄及びアクリルを挿入したものにX線を照射し、得られた透過画像を再構成した結果（断層画像）から、それぞれの材質を確認できるか実験した。X線発生器は管電圧30～150 kV、管電流0.5 mA、焦点サイズ 0.1 mmのものを使用した。また、検出器はイメージングインテンシファイア（株式会社東芝製E5877CS-PIK）を用いた。

X線発生器

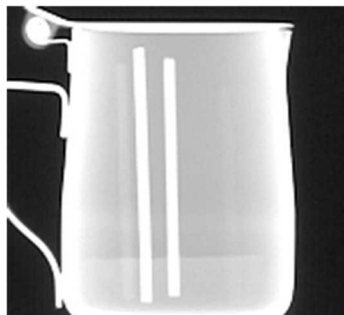


(a)

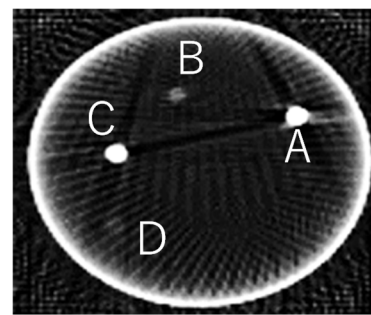


A) 銅  
B) アルミニウム  
C) 鉄  
D) アクリル

(b)



(c)



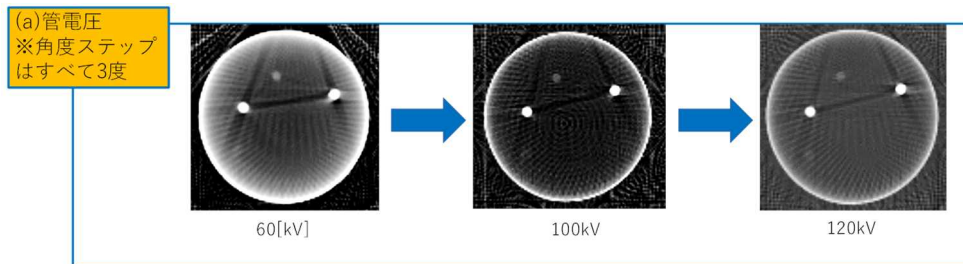
(d)

図 5.2.1 X線 CT 実験

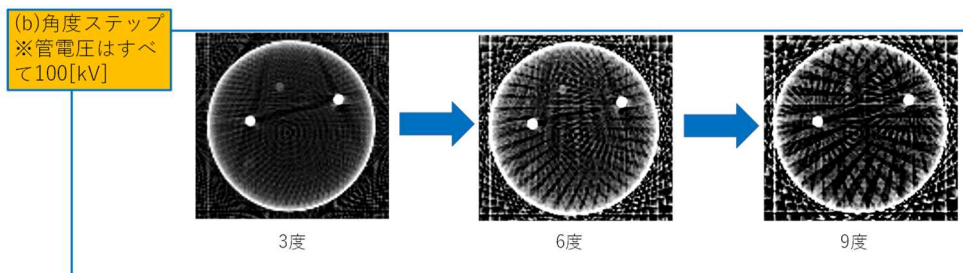
(a:外観の写真、b:収納容器内部の写真、c:透過画像の一例、d:断層画像の一例)  
(成果発表リスト4. に示す発表資料からの抜粋)

X線CTにおいてはX線の管電圧のほか、角度ステップ（収納容器を何度ごとに回転させて透過画像を撮影するか）が重要なパラメータとなることから、管電圧を60 kV、100 kV及び120 kV並びに角度ステップを3度、6度及び9度とした場合についてそれぞれ検討した。得られた透過画像はFBP法（Filtered Back Projection）<sup>16</sup>で再構成し、断層画像を得た。

一例として図 5.2.2 に管電圧及び角度ステップを変化させたときの断層画像を示す。(a)のとおり管電圧を増大させた結果、アーチファクトが低減された。線減弱係数の小さいアクリルに対してはエネルギーの低いX線を使用することが望ましいが、ステンレス製の収納容器に収納されていること及び他の金属棒の位置も併せて特定する必要があることを踏まえると、本実験からX線の管電圧は100 kV以上とする必要があることが分かる。また、角度ステップを変化させた結果、(b)のとおり6度、9度ごとではアーチファクトによりアクリルの位置が不明確となった。



(a)管電圧を変化させたときの断層画像



(b)角度ステップを変化させたときの断層画像

図 5.2.2 管電圧及び角度ステップを変化させたときの断層画像  
(成果発表リスト4. に示す発表資料からの抜粋)

得られた断層画像から各材質のCT値を計算した。その結果を図 5.2.3 に示す。各材質のCT値を比較した結果、管電圧60 kVでは銅と鉄のCT値は同様であり、線減弱係数の大きい物質（銅・鉄）と小さい物質（アルミニウム・アクリル）の区別のみが確認できた。これは、60 kVではX線のエネルギーが低く、銅と鉄ではX線透過量に差がないためと考えられる。一方、管電圧100 kVと120 kVでは銅と鉄の再構成値に差が見られた。このことから、どのような材質の測定対象物が収納容器に収納されているかという事前情報をもとに、複数の管電圧の像を比較することで収納容器内部の測定対象物の位置情報及びその材質を推定することが可能である。また、角度ステップにおける再構成値への依存性は見られなかった。なお、図 5.2.3 の「air」は容器内のある任意の領域の空気の画素値から計算した。負の値となったものについてはアーチファクトの影響と考えられる。

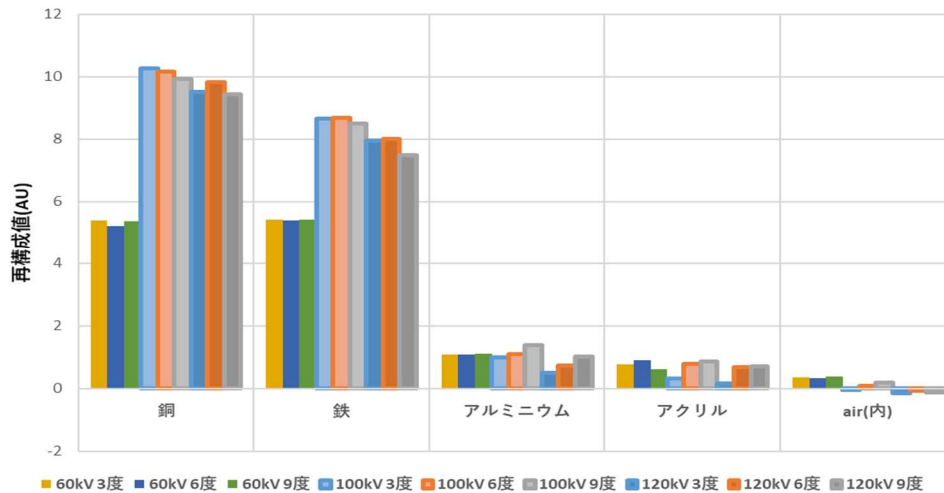


図 5.2.3 CT 値の結果  
(成果発表リスト 4. に示す発表資料からの抜粋)

本実験より、FBP法による再構成では管電圧100 kV以上であれば物質の位置及び材質の区別ができ、容器内の体系の把握が可能であることが分かった。また、複数の管電圧を使用することにより、事前情報がある場合は物質の位置及びその材質の推定が可能であることが確認できた。なお、本結果は対象物の材質及び性状に依存すると考えられるものの、あらかじめ角度ステップ、管電圧といったパラメータを調整しつつX線CT及び上述のような検討を行うことで、本実験とは異なる材質及び性状であっても適用は可能であると考えられる。

#### 5.2.2 収納容器中の対象物及び線源の位置と放射能の評価結果の関係についての検討

測定対象物を収納した収納容器を回転させつつ、外部からの放射線測定器により測定して放射能濃度を評価する場合、カウント ( $s^{-1}$ ) から放射能 (Bq) への換算が重要である。従来のクリアランスにおいては、「測定対象物は密度均一であり、放射能はその中心部分に点線源として存在している」と想定し、計算から換算係数を設定する手法が採られた実績がある<sup>17</sup> (以下本換算係数を「密度均一換算係数」という)。密度均一換算係数は簡易的に値を定められ、かつ保守的な結果が得られるというメリットがあるが、測定対象物が金属のみといった単一の材質で構成されることを前提に用いられてきた。密度均一換算係数がこの前提とは異なる金属・プラスチック混合物に対しても適用可能か否か確認することが重要である。

5.2.1 より、収納容器内部にどのような物質が含まれるかという事前情報をもとに、X線CTにより物質の位置及び種類を推定できることが明らかになった。この結果を踏まえて、金属・プラスチック混合物であるケーブルを例に、金属製の収納容器にケーブルが収納された場合を想定し、密度均一換算係数により放射能を評価した。

まず、図 5.2.4 に示すとおり市販の2軸ケーブル (住電日立ケーブル株式会社製600 V架



橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル、直径1.35 cm、5.5 sq) を収納容器 (直径28.6 cm、高さ36.1 cm、肉厚0.04 cm、材質：鉄の20リットルペール缶) に164本収納した。このとき、ケーブルによる遮蔽の影響が最も強くなる領域と最も弱くなる領域が混在する条件で試験を実施するために、(b)に示すとおり収納容器の半分にケーブルが収納された状態とした。線源は1 MBqの $^{137}\text{Cs}$ とし、662 keVの $\gamma$ 線の全吸収ピークを収納容器壁面から80 cmの位置に設置した3 inchのNaI(Tl)シンチレーション検出器により測定した。収納容器の回転を模擬するため、検出器は収納容器に対して30度ごとに設置、測定した。



図 5.2.4 ケーブルを収納した収納容器の放射線計測試験  
(成果発表リスト5. に示す発表資料からの抜粋)

また、上述の実験体系をモンテカルロ計算コードPHITS<sup>18</sup>において再現した。ただし、ケーブルの本数は上述の実験では164本であったが、PHITSにおいては188本と異なっている。これは、実験では手作業でケーブルを収納したこと、PHITSでは六方最密充填でケーブルを収納する体系としたことによるものである。PHITSによる計算では、収納容器の回転を模擬するために検出器を収納容器に対して10度ごとに設置するとともに、図 5.2.5 に示すとおり、【ケース1】(実験を模擬した体系)に加えて、ランダムに位置を決定した【ケース2】及び可能な限り均質な体系となるようにケーブルを収納した【ケース3】の三通りを設定した。さらに、線源の位置の違いによる影響を検討するため、ケース1では収納容器の中心から外側に向けてA、B、C、D、E、B'、C'、D'及びE'の九通りの線源の位置を設定した。

また、ケース 2 及びケース 3 についても同様に線源の位置をA、B、C、D及びEの五通りをそれぞれ設定した。なお、ケース 1、2 及び 3 は全てケーブルの本数は188本である。そのため、収納容器のかさ密度はケース 1、2 及び 3 と同一の値である。

密度均一換算係数については、図 5.2.5 の条件をもとに188本のケーブルの質量を20リットルペール缶の体積で除したかさ密度で構成される密度均一の円柱を想定し、その中心部分に単位線源 ( $^{137}\text{Cs}$ ) がある場合のNaI(Tl)シンチレーション検出器における662 keVの全吸収ピークカウント率をPHITSにより計算した。なお、密度均一換算係数の計算における円柱と検出器の位置関係については実験と同様のものである。

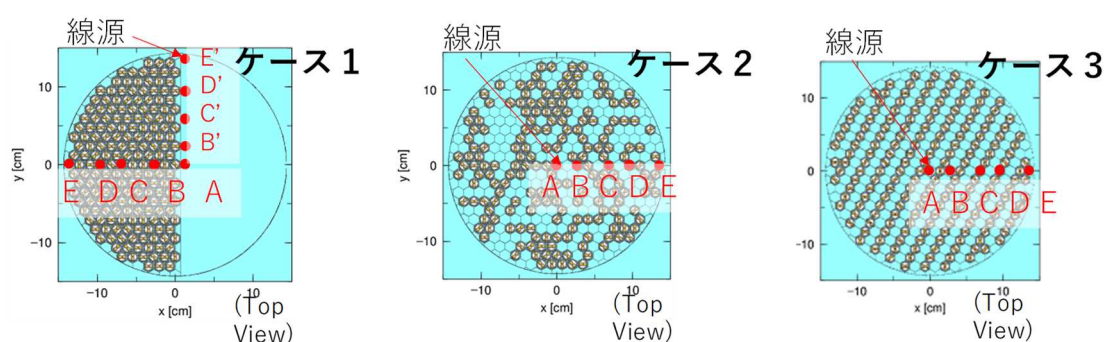


図 5.2.5 PHITSにおけるケーブルの収納体系及び線源の位置  
(成果発表リスト 5. に示す発表資料からの抜粋)

まず、実験と PHITS による計算の結果を比較したグラフを図 5.2.6 に示す。グラフは縦軸に全吸収ピークカウント率 ( $\text{s}^{-1}$ ) を、横軸に収納容器に対する検出器の角度をとったものである。空気の領域 (0 度から 90 度の範囲) では実験結果と計算結果は一致した。また、ケーブルの領域 (100 度から 180 度の範囲) においても両者はおおよそ一致したものの、計算結果では角度が大きくなるほど全吸収ピークカウント率が低下した。これは、計算では六方最密充填でケーブルを収納したことに伴い、角度が 180 度に近づくと線源-検出器間でのケーブルの本数が増大したことによるものである。

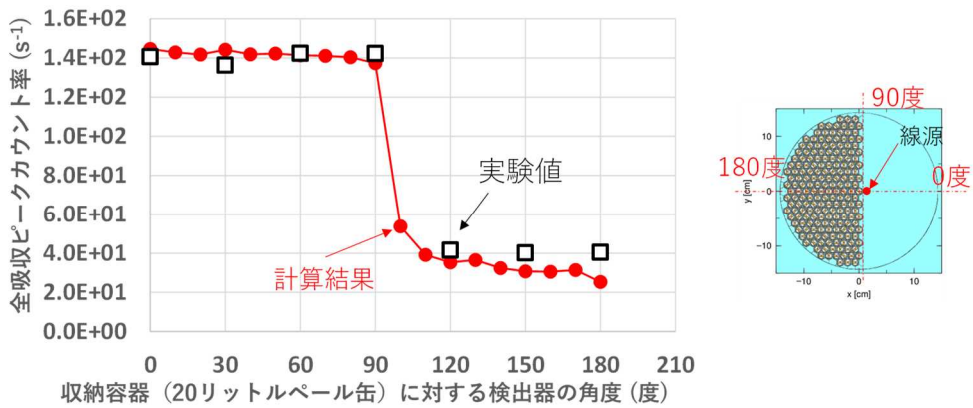


図 5.2.6 実験結果と PHITS 計算結果の比較  
(成果発表リスト 5. に示す発表資料から一部編集)

次に、PHITSによる計算から得られた結果について、全吸収ピークカウント率の周方向の平均値をとり、密度均一換算係数を乗じることで放射能 (Bq) とした。その結果を図 5.2.7 に示す。グラフ中のエラーバーは放射能の不確かさ ( $2\sigma$ 相当) を示している。同じかさ密度及び密度均一換算係数であっても、放射能の評価結果にはばらつきが見られた。特にケース 1 の B、C及びDといったケーブルの遮蔽の影響が強い領域に線源がある場合、放射能は過小評価されることが明らかになった。このことから、放射能の評価結果は線源の位置の違いのみならず、ケーブルの位置についても影響を受けていることが分かる。よって、クリアランスの評価においてはこのような収納容器内部の測定対象物の位置についての情報を取得することが重要である。

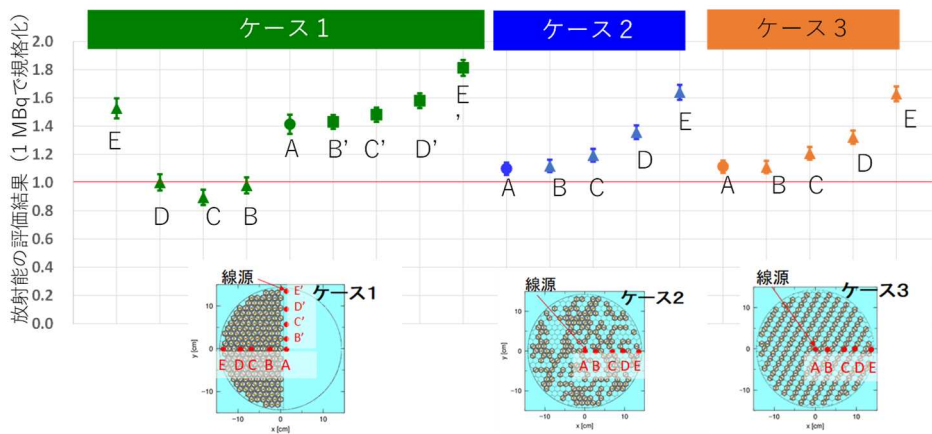


図 5.2.7 各ケーブルの配置・線源の位置における放射能の評価結果  
(成果発表リスト 5. に示す発表資料からの抜粋)

また、実験に使用したケーブル及びペール缶をX線CT撮影し、再構成した結果を図 5.2.

8に示す。図 5.2.8 では、X線CT撮影及び再構成に当たって株式会社東芝製の産業用CTスキャナTOSCANER-24500twinを使用した。本装置はX線発生器、測定ステージ、検出器及び再構成用の計算機が一体となっており、X線管電圧450 kV、管電流3.3 mA、焦点サイズ 0.4又は1.0 mm（可変）である。また、検出器はLDA検出器（Line Detector Array：線状検出器）である。図 5.2.8のとおり、ケーブルの芯線及び絶縁材を区別することが可能である。このことから、あらかじめ図 5.2.7のようなケーブルの位置及び線源の分布の違いによる放射能の評価結果の変動を把握した上で、測定対象物を収納した収納容器をX線CT撮影し、断層画像から収納容器内部の様子を把握すれば、「ケース1のような収納状態の対象物は測定対象から除外する又は詰替えを行う」といった対処を採ることで過小評価を避けることが可能であると考えられる。

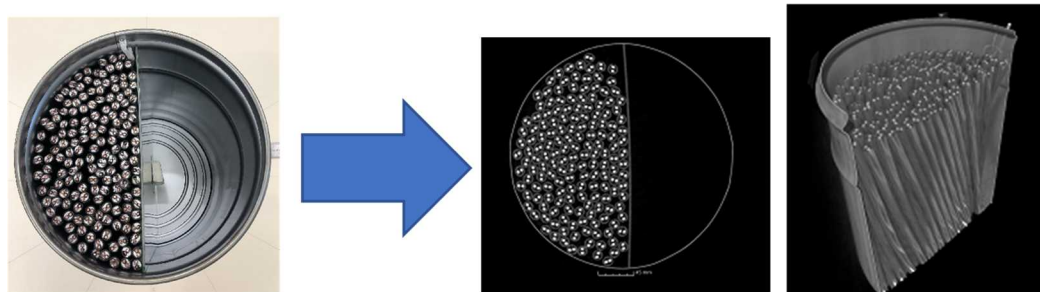


図 5.2.8 ケーブルと収納容器の X 線 CT による断層画像及び 3D 再構成結果

## 6 おわりに

金属・プラスチックが混合した資材がクリアランス対象となることを念頭に、放射能濃度の測定値が、十分な信頼性を確保されて算出されていることを確認するための解析手法の考案と知見の蓄積を目的として、令和元年5月1日から令和3年3月31日にかけて、原子力規制庁及び東京都市大学とで共同研究（「低濃度放射能測定の信頼性確保に関する研究」）を実施した。

低濃度放射能濃度測定における測定の不確かさの導出に関する検討については、測定結果が基準値を下回ることを確認において、不確かさをどのように扱うかについての既往文献及び海外事例を調査し、クリアランスの確認への適用について取りまとめた。また、放射能濃度の評価値の信頼性を確認するための手法に関連して、放射線検出器の応答の改善が評価値の信頼性にどのように影響するかを、計量・計測分野で使われている測定の不確かさに関連する検出限界値で評価できることを、CZT検出器の特性の波形処理技術適用による改良を通じて実験的に確認した。

測定対象物の情報抽出に関する検討については、X線CTにより収納容器内に収納された測定対象物の位置及び材質についての情報を取得する具体的な方法及び条件を実験から明らかにした。また、放射線計測試験及びモンテカルロ計算からケーブルを収納容器に入れ外部

から放射線を測定し放射能を評価する体系において、ケーブルの位置が放射能の評価結果に及ぼす影響について検討した。これらの結果から、ケーブルをクリアランス対象物とする場合に過小評価を避けるために必要な手法を検討した。

今後は、X線CTによる測定対象物の情報抽出の手法としてFBP法以外の再構成手法についても検討し、再構成手法の違いによって測定対象物の情報抽出に違いがみられるか確認する。また、今回は測定対象物をケーブルに絞って検討したが、金属・プラスチックから構成されるクリアランスの対象物として電気盤も挙げられていることから、電気盤を測定する場合の留意事項についても今後検討を進める。

## 7 成果発表リスト

1. Sakai, H., Yoshii, T., Kawasaki, S., Derivation of uncertainty propagation for clearance measurement, *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 170, 109630, 2021.
2. 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、令和2年3月、日本原子力学会春の年会（講演は中止、予稿のみ公表）
3. Sakai, H., Yoshii, T., Takasaki, F., Kawarabayashi, J., Evaluation of the detection limit of net count in peak for the energy spectrum of CZT detector, *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 169, 109569, 2021.
4. 田川裕晶、河原林順、羽倉尚人、CTを用いたプラスチック金属混合物のクリアランス測定の信頼度向上の検討、令和3年1月20日、第35回研究会「放射線検出器とその応用」（オンライン開催）
5. 吉居 大樹、酒井 宏隆、田川 裕晶、河原林 順、収納容器内に偏在したクリアランス対象物の放射能評価に関する検討、令和3年3月18日 日本原子力学会 春の年会（オンライン開催）

## 8 共同研究参加者（令和3年3月時点の所属、役職等）

東京都市大学

- ・理工学部 原子力安全工学科 教授 河原林 順、
- ・大学院総合理工学研究科 共同原子力専攻 修士2年 田川 裕晶

原子力規制委員会原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ核燃料廃棄物研究部門

- ・核燃料廃棄物政策研究官 片山 二郎
- ・主任技術研究調査官 酒井 宏隆
- ・技術研究調査官 吉居 大樹

## 参考文献リスト

---

- 1 酒井 宏隆、大塚 伊知郎、高橋 宏明、佐藤 由子、吉居 大樹、古田 美憲、深井 恵、安全研究成果報告 放射性廃棄物等の放射能濃度評価技術に関する研究、RREP-2021-3001、原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ、2021年6月  
<https://www.nsr.go.jp/data/000355425.pdf>
- 2 Hattori, T., Trend of strengthening clearance regulation in Japan and concerns about its worldwide effects on regulations for natural and artificial radionuclides, *Annals of the ICRP*, Vol. 49, 98-112, 2020.
- 3 JCGM 100, Uncertainty of measurement -- Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement, International Organization for Standardization, Geneva, 2008.
- 4 JCGM 106, Uncertainty of measurement -- Part 4: Role of uncertainty in measurement in conformity assessment, International Organization for Standardization, Geneva, 2012.
- 5 ISO 11929-1, Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the coverage interval) for measurements of ionizing radiation -- Fundamentals and application -- Part 1: Elementary applications, International Organization for Standardization, Geneva, 2019.
- 6 ISO 11929-2, Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the coverage interval) for measurements of ionizing radiation -- Fundamentals and application -- Part 2: Advanced applications, International Organization for Standardization, Geneva, 2019.
- 7 ISO 11929-3, Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the coverage interval) for measurements of ionizing radiation -- Fundamentals and application -- Part 3: Applications to unfolding methods, International Organization for Standardization, Geneva, 2019.
- 8 ISO 11929-4, Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the coverage interval) for measurements of ionizing radiation -- Fundamentals and application -- Part 4: Guidelines to applications, International Organization for Standardization, Geneva, 2020.
- 9 Strahlenschutzkommission (SSK), 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), Germany, 2016.  
[https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse\\_PDF/2016/2016-09-15\\_Empf\\_Messunsicherheiten\\_e.pdf](https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2016/2016-09-15_Empf_Messunsicherheiten_e.pdf)
- 10 SKB, Clearance during Dismantling and Demolition of Nuclear Facilities. SKB Report R-17-05. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Solna, 2017. <https://www.skb.se/publikation/2488457/R-17-05.pdf>
- 11 CEWG, Clearance and Radiological Sentencing: Principles, Process and Practices. Nuclear Industry Safety Directors Forum, London, 2017.  
[https://www.nuclearinst.com/write/MediaUploads/SDF%20documents/CEWG/Clearance\\_and\\_Exemption\\_GPG\\_2.01.pdf](https://www.nuclearinst.com/write/MediaUploads/SDF%20documents/CEWG/Clearance_and_Exemption_GPG_2.01.pdf)
- 12 DIN, Activity Measurement Methods for the Clearance of Radioactive Substances and Nuclear Facility Components – Part 1: Fundamentals. DIN 25457-1: 2014–12, German Institute for Standardization, Berlin, 2014.
- 13 H. Sakai et al., Improvement of energy spectrum characteristics of CdZnTe semiconductor detector by means of digital waveform processing with neural network algorithm, *Nucl. Instrum. & Meth., A*, 400 401 - 408 (1997)
- 14 池田 他、小型化合物半導体検出器の高線量率場での測定に関するデジタル処理の基礎検討、第56回アイソトープ・放射線研究発表会(東京) 1a-IV-03 (2019)

- 
- 15 日本原子力発電株式会社、東海発電所において用いた資材等に含まれる放射性物質の放射能濃度の測定及び評価方法の認可申請書、平成18年9月
  - 16 H. Wiczonek, "The image quality of FBP and MLEM reconstruction," *Phys. Med. Biol.*, Vol. 55, No. 11, pp. 3161 - 3176, 2010, DOI. 10.1088/0031-9155/55/11/012.
  - 17 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、新型転換炉原型炉ふげんにおいて用いた資材等に含まれる放射性物質の放射能濃度の測定及び評価方法の認可申請書、平成30年8月
  - 18 Tatsuhiko Sato, Yosuke Iwamoto, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Ogawa, Takuya Furuta, Shin-ichiro Abe, Takeshi Kai, Pi-En Tsai, Norihiro Matsuda, Hiroshi Iwase, Nobuhiro Shigyo, Lembit Sihver and Koji Niita, Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02, *J. Nucl. Sci. Technol.* 55(5-6), 684-690 (2018)