

共同研究成果報告書

測定の不確かさ概念の導入による放射線 計測・同位体分析の信頼性確保に係る研究

原子力規制委員会 原子力規制庁
国立研究開発法人産業技術総合研究所
国立大学法人東京大学
学校法人五島育英会東京都市大学

令和7年7月

1. 研究目的

放射線計測学分野において国際的な測定の不確かさの考え方の適用等の計量学的な取り扱いが近年標準的になりつつある一方で、化学分析分野に含まれる同位体分析等では必ずしも同じ測定の不確かさの考え方に依拠して評価を行っているわけではない。このため、放射線の定量評価を行う際に、原子核から放出される崩壊による放射線の計測による手法によるものと、原子数を計数することによる同位体分析等によるものとの、評価値に付随する値の不確かさの表現方法が必ずしも一律のものとなっていない。

そこで、本研究では、両者の評価を通じて得られる放射能濃度の値が同一の信頼性をもってその不確かさが付されていることを確認するための関連分野も含めた知見の蓄積を目的とする。

2. 研究内容

2.1 放射線計測と同位体分析に係る不確かさ評価の検討

測定分野において国際的に JCGM 100 「Evaluation of measurement data Guide to the expression of uncertainty in measurement」(以下、「GUM」という。)¹を基準文書として、不確かさの評価がなされるようになっており、放射線計測分野では関連する特性値である決定しきい値、検出限界、包含区間の上下限といった値の定義を ISO 11929 シリーズ「Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the coverage interval) for measurements of ionizing radiation」²⁻⁶にて、規定されており、国内でも近年適用が進められており、原子力規制関係ではクリアランスの審査基準⁷においてもこの考え方が導入されている。

一方で同位体分析分野においても GUM の適用はすすめられているものの、ISO 11929とは異なった方法で精度管理等が行われており⁸、同位体分析から得られた評価値に付される精度評価の指標は必ずしも、放射線計測分野における測定の不確かさと同一のものではない。こうした両分野の計測、分析手法の差異を評価し、そこから得られる分析値を同様の評価指標で確認するための知見の蓄積を実際の試験等を通じて行った。

2.2 周辺分野、最新技術への適用性評価

放射線計測分野において国際的な測定の不確かさの考え方が普及しつつあるものの、その適用は、現時点では国内においては廃棄物を対象としたものが中心となっている⁷。放射線防護等も含めた周辺分野及びその最新の計測分析技術に対してまでも国内では普及がされていないことから、そうした周辺技術に対する今後の影響を評価するための知見を蓄積した。

3. 実施方法

3.1 同位体分析と放射線計測に係る不確かさ評価の検討

同位体分析に係る放射能評価値を得るまでの一連のプロセスを可視化するとともに、それぞれのプロセスで発生する不確かさがその最終的な評価値の不確かさにどのように合成され、影響するかについて、関連する基準文書の調査を行った上で、実際の実験等を通じて知見を蓄積した。その際、同分野において実施されている従来の手法と、放射線計測分野において行っている手法との比較を各段階において明確にするとともに、その差異について放射線計測分野においても反映すべき事項の有無を留意しながら研究を進めた。その結果として、国家計量標準に紐付いた値のトレーサビリティについて、不確かさを付した形でどのように確保するかについての知見を蓄積した。このために、東京大学に設置されていた原子力規制庁所有の誘導結合プラズマ質量分析計及び関連する機器を産業技術総合研究所の環境創生研究部門に移設した。

3.2 周辺分野、最新技術への適用性評価

上記で得られた知見について、放射性廃棄物以外も含めた放射線計測、特に放射線防護及び最新の放射線計測技術に対する影響を評価し、それらに対する知見を蓄積した。このために原子力規制庁は、被測定物の特性評価のための放射線発生装置及び関連する機器を産業技術総合研究所の分析計測標準研究部門に設置した。

4. 研究実施分担

項目	原子力 規制庁	産業技 術総合 研究所	東京大 学	東京都 市大学
3.1 同位体分析と放射線計測に係る不確かさ評価 の検討 プロセスの可視化、基準文書の調査、クリアラン ス確認の放射線計測でとられる手法との比較	◎	○	○	○
同位体分析分野の手法の評価	○	○	◎	
放射線計測分野の手法の評価	○	○		◎
同位体分析の実施	○	◎	○	○
3.2 周辺分野、最新技術への適用性評価	◎	○	○	○

◎：主実施者、○：実施者

5. 共同研究参加者

区分	氏名	所属部局・職名	本研究における役割
原子力規制庁	酒井宏隆	技術基盤グループ・ 上席技術研究調査官（廃棄・廃止措置担当）	研究の統括
	柚木彰	同・主任技術研究調査官	研究の統括の補佐
	高橋宏明	同・主任技術研究調査官	同位体分析関係の担当責任者
	森泉純	同・主任技術研究調査官	放射線防護計測分野への影響評価の担当責任者
	澁谷憲悟	同・主任技術研究調査官	放射線計測関係、最新技術適用への影響評価の担当責任者
	吉居大樹	同・副主任技術研究調査官	クリアランス関係の研究内容との調整、最新技術適用への影響の実施
	深井恵	同・技術研究調査官	同位体分析関係の実施
	伊豆本幸恵	同・技術研究調査官	放射線防護計測分野への影響評価
	山本康太	同・技術研究調査官	同位体分析関係の実施
産業技術総合研究所	仲宗根峻也	同・技術研究調査官	放射線計測関係及び最新技術適用への影響評価の実施
	槇納好岐	環境創生研究部門・ 主任研究員	3.1 の同位体分析試験の実施
	藤原健	分析計測標準研究部門・グループリーダー	3.2 の被測定物の特性評価に係る試験の実施
	木村大海	同・研究員	3.2 の被測定物の特性評価に係る試験の実施
	松本哲郎	同・主任研究員	3.2 の放射化試験に係る評価

	真鍋征也	同・研究員	3.2 の放射化試験に係る評価
	増田明彦	同・主任研究員	3.2 の放射化試験に係る評価
	原野英樹	同・研究グループ長	3.2 の放射化試験に係る評価
東京大学	平田岳史	地殻化学実験施設・教授	同位体分析の検討に対するレビュー
東京都市大学	河原林順	理工学部原子力安全工学科・教授	放射線計測関係の検討、放射線防護計測分野の影響評価に対するレビュー
	武内 威	東京都市大学大学院総合理工学研究科共同原子力専攻・博士前期課程	放射線計測関係の検討、放射線防護計測分野の影響評価に対する調査、実験の実施

6. 研究実施工程

項目	年度		令和5年度		令和6年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期
(1) 放射線計測と同位体分析に係る不確かさ評価の検討			誘導結合プラズマ質量分析計移設			
				実験・評価及び検証、対象の拡大		
(2) 周辺分野、最新技術への適用性評価			文献調査、事前検討		放射線発生装置導入	
					測定・評価及び検証	

7. 成果概要

原子力規制庁は、放射線計測及び同位体分析から得られる放射能濃度の値が同一の信頼性をもってその不確かさが付されていることを確認するための関連分野も含めた知見の蓄積を目的とし、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人東京大学及び学校法人五島育英会東京都市大学と共同研究を実施し、以下の成果を得た。

- 検量線法による定量分析及び同位体分析における測定の不確かさをそれぞれ実験的に評価することで、不確かさ要因についての基礎的知見を得た。従来の放射能測定で検量線に相当するのは放射能に対する測定器の指示値の直線性であるが、バックグラウンド放射線の影響や測定器の計数損失、いわゆる数え落としの影響がない範囲では直線性が大きくずれることがない。そのため低レベル放射能測定の際も、放射能と指示値の関係は、測定が容易な比較的高い放射能で求めている。一方、化学分析では測定しようとする対象の濃度付近で検量線を作成することが多い。そのため対象濃度が低い場合など検量線の持つ不確かさを適正に評価しないと、正しい測定の不確かさが得られない。実際、最小二乗法による検量線の不確かさを考慮するだけでは、定量値の不確かさを3倍程度過小評価する場合があります。繰り返し測定により、検量線の各測定値のばらつきも評価に加える必要があることが分かった。同位体分析における測定の不確かさについては、四重極型誘導結合プラズマ質量分析計の(i)パルスカウンティングモード(信号強度 10^4 s^{-1})、(ii)アナログモード(信号強度 10^7 s^{-1})及び(iii)多重検出器型誘導結合プラズマ質量分析計での同位体比測定値のばらつきを比較し、(ii)では(i)よりもばらつきが10倍近く悪化すること及びばらつき0.1%以下を達成するためには(iii)が必要であることが分かった。さらに、放射線計測用の放射性標準溶液では放射性物質が安定して溶液中に存在できるように過剰量の安定同位体を担体として添加することが多い。しかし、同位体分析では、試料中に過剰量の安定同位体が共存すると、放射性同位体の測定を妨害する可能性があるため、担体の使用は制限される。このように、従来の放射能測定と、化学分析による放射性物質量の測定には様々な違いがあり、試料の前処理を考慮した不確かさ評価、検量線法以外の分析手法に係る不確かさ評価等が必要であることが明らかになった。
- 金属、プラスチックが混合したクリアランス対象物を想定し、放射線計測の結果(s^{-1})を放射能(Bq)へと換算する換算係数について、従来用いられてきた換算係数の設定手法に代わる手法を考案し、その実効性をシミュレーションにより検証した。その結果から、従来用いられてきた換算係数に代わる新しい換算係数を作成するに当たっての留意事項を整理した⁽¹⁾。さらに、本手法を実施するために必要な材料弁別技術としてX線CTに着目し、特に検出器側にて特定の光子エネルギーに着目して画像再構成を行うフォトンカウンティングCTについて検討し、材料弁別技術の適用性とその課題について整理した^(2,3,4)。これらの成果は今後の不確かさ評価における基礎データとして活用されることが期待される。

8. 公表成果一覧

- 1 YOSHII, T., KAWARABAYASHI, J., "Development of a practical conversion factor for evaluating radioactivity in mixed metal and plastic clearance object", Applied Radiation and Isotopes, Vol.217, pp. 111670-111680, 2025.
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2025.111670>
- 2 澁谷憲悟、仲宗根峻也、吉居大樹、柚木彰、酒井宏隆、藤原健、河原林順、「フォトンカウンティングCTにおける金属元素（アルミニウム、鉄及び銅）の弁別」、第71回応用物理学会春季学術講演会、令和6年
- 3 武内威、吉居大樹、河原林順、「フォトンカウンティングCTを用いた低中原子番号物質の同定の検討」、第71回応用物理学会春季学術講演会、令和6年
- 4 武内威、河原林順、酒井宏隆、吉居大樹、「質量減弱係数による元素推定のための測定エネルギーの決定」、次世代放射線シンポジウム2024（第36回放射線夏の学校）、令和6年

9. 参考文献

- 1 JCGM 100, Uncertainty of Measurement – Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. International Organization for Standardization, Geneva, 2008.
http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf.
- 2 ISO 11929, 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, Geneva, 2010.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 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.

- 6 ISO 11929-4, 2020. 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.
- 7 原子力規制委員会、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、令和元年9月11日制定、令和2年7月29日改正、令和3年9月29日改正
- 8 上本道久、「検出限界と定量下限の考え方」、ぶんせき、2010年5月号、pp.216-211、平成22年