

総説（教授就任記念講演）

核・放射化学の紹介

— 重元素科学から環境放射能・無機分析化学，医用機器開発まで —

阪 間 稔

徳島大学大学院ヘルスバイオサイエンス研究部放射線基礎科学分野

（平成26年11月25日受付）（平成26年12月9日受理）

はじめに

「核・放射化学」という分野をご承知でしょうか？ほとんどの人は、聞き慣れない分野かと思われるが、マリー・キュリー博士（図1）と言えば、きっと聞き覚えがあるだろう。まさに、マリーがこの核・放射化学，“Nuclear and Radiochemistry”，を約120年前に創設した人物である。この19世紀末は、放射線や放射性物質の存在が人類初めて明らかにされた黎明期であり，多くの研究者がその未知なる研究領域への魅力に引きつけられた^{1,2)}。その潮流の中，物理学と双璧を成す形で化学的な側面から放射線や放射性物質の新しい発見や，その化



図1 実験室でのマリー・キュリー博士の様子（前澤博名誉教授から頂きました波蘭国の絵はがきより）

学的特性を解明していく偉大な化学者の一人として，マリーはまさにパイオニアであった。その大きな功績は，かの有名な放射化学的手法を用いた新元素ポロニウムとラジウムの発見である^{3,4)}。また，ノーベル物理学賞（1903年）と化学賞（1911年）の受賞は，マリーを世界的にも最も著名な女性研究者である固たる地位を築き上げたことにほかならない。まさに，これは近代史の女流錬金術師といえる。私は，このマリーに憧れを抱く現代の核・放射化学者，もしくは現代錬金術師の精神で，核・放射化学研究に携わっている。現在，核・放射化学が関連する研究分野は，基礎科学的から環境，エネルギー，工業・材料，生命科学，医学，農業，教育などの応用科学分野まで広範な範囲に及んでいる⁵⁾。その中でも，これまでの研究及び最新の研究成果を，広範かつ柔軟性の高い核・放射化学者としての得意を交えながら，重元素・超重元素の科学，環境放射能・無機分析化学，放射線防護・医用機器開発，放射線挙動シミュレーション解析を中心に概説する。

核・放射化学のフロンティア基礎研究：原子核，超重元素の科学

「核・放射化学」と言う言葉について簡潔に説明すると，そもそもこの名称は，放射化学と核化学の二つの名称を掛け合わせたものであり，特に広範な意味合いを持つ前者の「放射化学」が後者の「核化学」を包括していると，放射化学関連の研究者たちのコミュニティでは，そのように捉えられている。筆者が所属する日本放射化

学会編の放射化学用語辞典⁶⁾では、放射化学とは放射性元素、放射性核種を対象とする化学、元素や化合物までも含めて研究する物理学と化学の境界に位置する学問分野、と記載されており、さらに核化学とは原子核物理学と一般的によく対比され、物理学的手法だけでなく化学的な手法を用いた研究方向性により、物質の基本構成である原子核の核的特性や、新核種・新元素合成、極限領域下の核構造ならびに核反応構造などを解明する学問分野として記載されている。まず最初に、核・放射化学研究者にとっては、究極かつ永遠のテーマである「新元素の化学」を中心とした原子核、重・超重元素科学の研究について、最新の動向を概説する。

ここで挙げる重元素とは、特に原子番号92番のウラン元素以降を指し、超ウラン元素領域とも呼ばれている(図2)。この領域から、特に中性子が少ない側の原子核の存在範囲を示す陽子ドリップラインと既知核種との限界ラインとの間に、大きな隙間が生じている^{7,8)}。この領域は、中性子不足アクチノイド核種領域(図3)と呼ばれており、この核種領域の実験データが不足⁹⁻¹¹⁾す

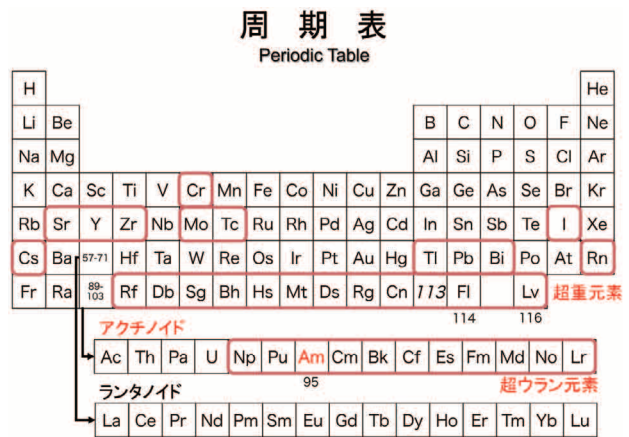


図2 元素の周期表

るために、この領域よりもさらに重い元素・原子核の壊変特性や安定性、その核構造の理解、超重元素の核種生成過程の解明などに対して大きな障壁となっている。そこで、われわれは日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター・超アクチノイド元素化学グループとの共同研究により、ガスジェット結合型オンライン同位体分離器

新核種探索や α 壊変特性に関する研究が遅れている理由

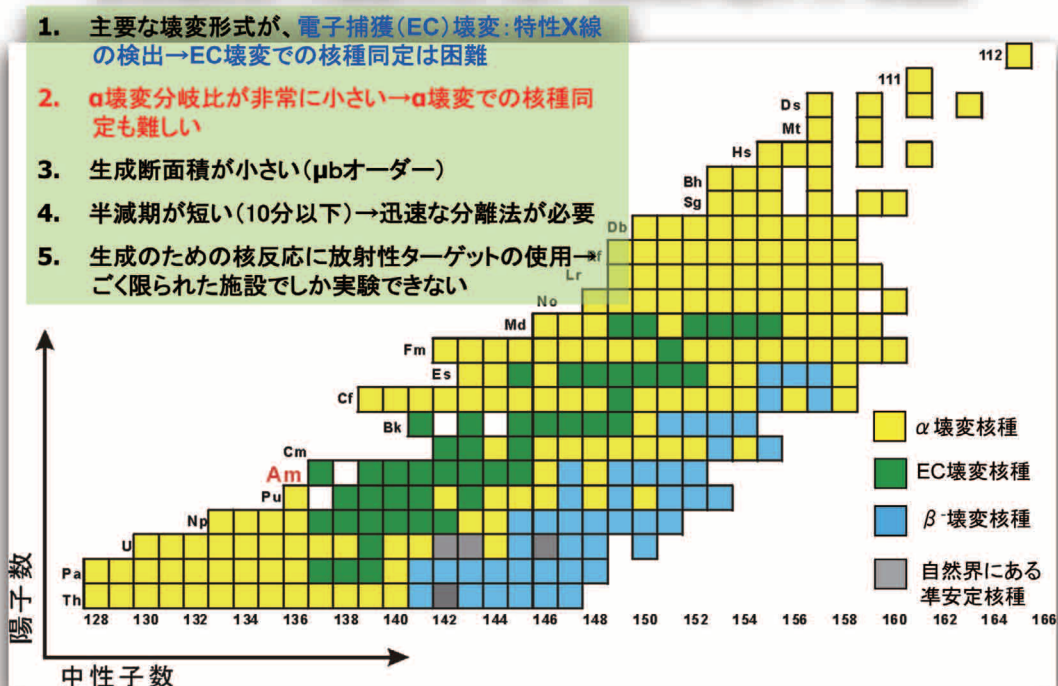


図3 中子不足アクチノイド核種領域 (アメリカシウム元素を中心とした近傍核種領域)

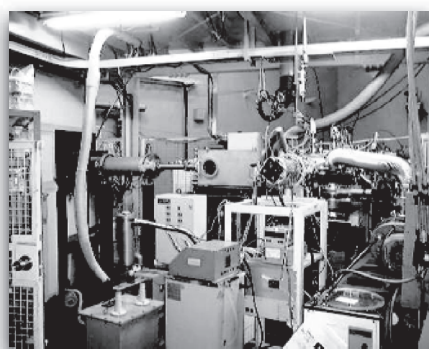
(JAEA-ISOL)¹²⁻¹⁶⁾と高効率の微弱なアルファガンマ線、ガンマ-ガンマ線を同時放射線計測することができる複合型の分離分析測定システム(図4)を開発して、中性子不足アクチノイド核種領域、特にアメリカシウム、キュリウム、バークリウム元素(⁹⁵Am, ⁹⁶Cm, ⁹⁷Bk)を研究対象として研究実験を行ってきた。この一連の研究成果として、従来まで人類未発見であった²³³Am¹⁷⁾, ²³⁷Cm¹⁸⁾, ²⁴¹Bk¹⁹⁾の三つの新核種探索を成功し、さらに^{236g,m}Am, ²³⁵Am, ²³⁴Am, ²²⁹Np, ²³⁸Cmに関する詳細な核データやアルファ壊変特性の系統的な新しい知見を

得ることができた²⁰⁻²²⁾。表1に詳細を示す。この実験手法をさらに重い原子核領域へ適応させるために装置改良を行い、生成量の非常に少ないその領域、特に陽子数101、中性子数153を越える領域でのガンマ線核分光実験に挑んだ。それが102番元素ノーベリウム(²⁵⁷No)の核分光実験であり、そのアルファ壊変を詳細に調べ、²⁵⁷No及びその娘核種である²⁵³Fmの基底状態及び励起準位のエネルギー、スピン・パリティ、一粒子軌道配位を初めて実験的に決定することができた^{23,24)}。

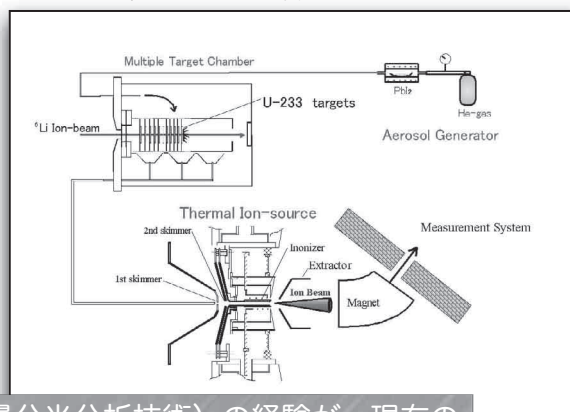
続いて、最新の超重元素に関する化学実験に関して紹

ガスジェット結合型オンライン同位体分離器 (大型の質量分離分析装置)

日本原子力研究開発機構東海にて、アクチノイド元素の標的物質を照射できることができる国内唯一の施設



オンライン同位体分離器
(茨城県の原科研東海)



ここでの質量分離分析(質量分光分析技術)の経験が、現在の研究活動(ICPMSによる元素・同位体比分析)に活かされる

図4 日本原子力研究開発機構ガスジェット結合型オンライン同位体分離器(JAEA-ISOL)¹²⁻¹⁶⁾

表1 中性子不足アクチノイド核種領域のアルファ壊変特性に関する新しい核データ²⁰⁻²²⁾

| 核種 | 核反応系 | 本研究 | | | |
|----------------------------------|------------------------------------------|------------|-----------|----------------|----------------------------|
| | | 生成断面積 (μb) | 半減期 (min) | α壊変エネルギー (keV) | α壊変分岐比 |
| ²³⁶ Am ^{g,m} | ²³⁵ U (⁶ Li, 5n) | 125±46 | 3.6±0.1 | 6150 | (4.0±0.1)×10 ⁻⁵ |
| ²³⁵ Am | ²³³ U (⁶ Li, 4n) | 31±12 | 10.3±0.6 | 6457±14 | (4.0±0.5)×10 ⁻³ |
| | ²³⁵ U (⁶ Li, 6n) | 5±2 | | | |
| ²³⁴ Am | ²³³ U (⁶ Li, 5n) | 9±5 | 3.5±1.3 | not observed | < 4×10 ⁻⁴ |
| ²³³ Am | ²³³ U (⁶ Li, 6n) | <0.9 | 3.2±0.8 | 6780±17 | > 3×10 ⁻² |
| ²²⁹ Np | ²³³ Amの娘核種 | — | 4.0±0.4 | 6893±23 | 0.68±0.11 |
| ²³⁸ Cm | ²³⁷ Np (⁶ Li, 5n) | — | 2.2±0.4h | 6560±10 | — |

介すると、超重元素は原子番号103を越える比較的新しい元素領域であり、上述した核種群よりもさらに増してその原子核の核的特性や化学的な性質など、ほとんどわかっていない、まさに前人未踏の研究領域である。超重元素は、大型の重イオン加速器を操り、重イオン核融合反応によって人工的に生成される。この元素領域の放射化学的な興味、もしくは元素周期表を完成させていく開拓心から、原子核が大きくなればなるほど、その核電荷が巨大になり、それにより原子核周囲の電子軌道が大きく変化して、軽い同族元素の系統性（もしくは、元素周期表上の周期性）からは予測もつかないユニークな化学的性質の出現が期待される²⁵⁾。しかし、超重元素の生成率は極めて低く、例えば104番元素ラザホージウム²⁶¹Rfは1分間で3原子ほど、その寿命については1分間にも満たないほど短いため、化学的な実験に供する時には一度に1個の原子しか取り扱うことしかできない。超重元素の化学は、単一原子化学とも呼ばれ、まさに究極の極微量元素分析化学と言える。この化学実験において、最近、世界的な動向の中で革新的な手法を取り組んだ試みがなされている。それは、これまで超重元素の合成や核分光研究などの物理学的な実験手法で利用されてきた反跳核分離装置を化学的な研究実験に活用する方法である。国内では、理化学研究所の羽場らを中心とした理研重イ

オンリニアック施設に設置された気体充填型反跳核分離装置（GAs-filled Recoil Ion Separator: GARIS）²⁶⁾の超重元素化学実験の適用が挙げられる。この反跳核分離装置は、筆者らが上述したガスジェット搬送装置に結合させたオンライン同位体分離器と同種の役割を持つ質量・電荷に関連した分離分析装置である。反跳核分離装置は、大型でかつ多重の弁別機構を有しており、すなわち、重イオン核融合反応で生成した超重核を、磁場や電場の多重機構の組み合わせプライマリビームや副反応生成物から分離し、数マイクロ秒のうちに選択的に（概ね、質量起因で選択的に分離して）焦点面に取り出すことができる。この反跳核分離装置を化学実験の前処理分解装置として利用できれば、目的とする超重元素の微弱な放射能を極低バックグラウンドのもとで化学分析を行うことができる。これにより多様な化学反応系での実験展開が可能となる。羽場らの最新の研究成果²⁷⁾では、この理研GARISによる前処理分解性能評価において比較的生断面積の大きい²⁴⁵Fmをモニター核種として用いて実験を行ったところ、従来法で顕著に見られていた²⁰⁸Pbからの核子移行反応によって大量生成された妨害核種の²¹¹Biや^{211m}Po、^{212m}Poが、このGARISを用いることで完全に除去することができ、分離係数が10,000以上で、さらにガスジェット搬送効率が高い値を示した（図5）。前

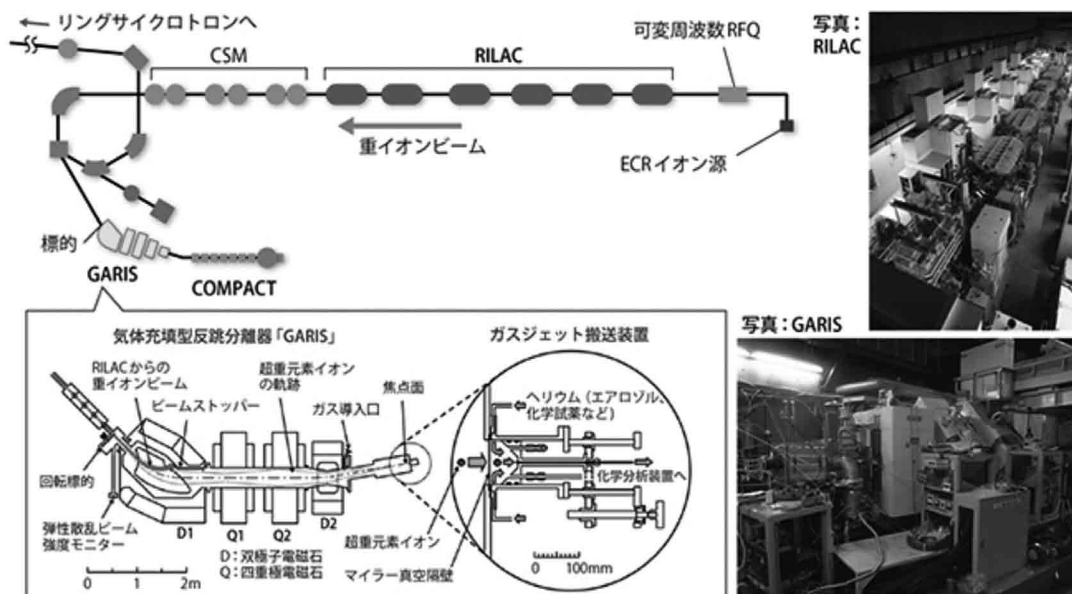


図5 超重元素化学分析システムとGARIS ガスジェット法の概念図²⁷⁾

段分離装置としての反跳核分離装置の有効性が実験的に証明され、超重元素の化学実験への対象となる $^{261}\text{Rf}^{28)}$ や $^{262}\text{Db}^{29)}$ 、 $^{265}\text{Sg}^{30)}$ の合成及び壊変特性に関する詳細なデータをこれまで報告している。今後、これら核種を対象として、例えば、豊嶋らの106番元素のシーボギウムSgのフロー電解カラムによる超重元素領域では初となる酸化還元電位の実験が期待できる。超重元素の化学は、マリー・キュリー博士のPoとRaの発見以来、進化し続ける元素周期表の開拓、元素や原子核の存在領域はどこにあるのか？、次々と発見される新元素の核物理・核化学的性質の解明、前人未踏のg電子軌道の登場観測、まさに核・放射化学研究者としては尽き果てることのない研究テーマが今後も続いていく。

核・放射化学による応用研究の展開：環境放射能・無機分析化学、放射線防護・医用機器開発、放射線挙動シミュレーション

前項までは、核・放射化学分野の壮大なフロンティア研究の要素を持ち合わせ、国内外の共同研究大型施設並びに多くの共同研究者が協同することで遂行していく研究域であるといえる。しかし、核・放射化学者はそれだけではなく、原子核物理学な側面と放射線計測の知識力を持ち合わせ、それらに放射分析化学的なアプローチを組み込むことで、より広範かつ柔軟性の高い研究領域へ適用拡充が図れるところにある。これにより少数精鋭の個の力だけでも、核・放射化学者は多方面への研究で活躍することができる。そのような応用研究に関して、筆者のこれまでの研究成果から現在進行形の研究分野も含めて概説する。

環境放射能・無機分析化学

最初に、環境放射能と無機元素分析に関する研究について紹介する。筆者の研究室では研究室創設以来、「環境・生体試料における放射性核種と主要・微量元素との相互関係解明に係わる研究」を掲げて研究活動を進めてきた(図6)。従来、環境試料中(海水、河川水、土壌、大気浮遊塵、農作物など)に含まれる放射性核種の放射能濃度分析は、一般的な化学定量分析とは大きく異なる。

環境放射能・無機分析化学

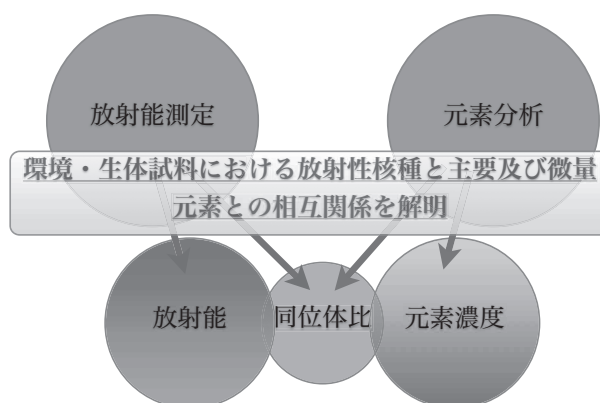


図6 環境・生体試料における放射性核種と主要及び微量元素との相互関係を解明

その特殊性からその放射能濃度分析は、これまで核・放射化学研究者が中心になって行い、化学定量分析を得意とする分析化学者との間に多少なりとも隔たりがあった。そこで、筆者は放射能測定と元素分析、その双方を同時に行うことができる化学実験室を徳島大学保健学棟内に整備し、サンプリングした環境試料を同一の実験室で処理することができ、観測されるデータ、すなわち放射能濃度、元素濃度、そして同位体比を取得し解析できる環境を構築することができた³¹⁾。図7に、元素濃度と同位体比分析を行う主要なリアクションセル方式誘導結合プラズマ質量分析システム(ICP-DRC-MS: PerkinElmer™ ELAN DRC II)を中心とした装置群の概観を示す。この

リアクションセル方式誘導結合プラズマ質量分析 (ICP-DRC-Mass Spectrometry) システム



図7 本学医学部保健学棟に設置されているリアクションセル方式誘導結合プラズマ質量分析システム³¹⁾

装置群は、環境試料を閉鎖系で酸処理分解が可能なマイクロウェーブ、多試料数の取扱いやコンタミネーション防止、均一性の取れた化学分離操作の反復性を可能にする自動固相抽出分離装置、マスペクトル干渉低減用リアクションガス搭載型四重極マスフィルターのICPMS、で構成されている³²⁾。これに放射線測定用の検出器群（ガンマ線測定用のゲルマニウム半導体検出器、アルファ線測定用シリコン半導体検出器搭載の検出器槽）が同一実験室に配備されているのは、国内的に見ても珍しい。（同種類の分析測定システムを構築している研究グループとしては、福島大学の高貝ら^{33,34)}があり、後述する環境中に放出された原発由来核種の分離分析を精力的に行っている。）これら装置群を用いた研究成果として、現在も深刻化が進む東日本大震災がもたらした東京電力福島第一原子力発電所の原子力災害に伴う、環境中に拡散された放射線核種、主にCs-134, Cs-137, Sr-90, Pu同位体（Pu-239, 240, 241）の環境分析が挙げられる。上述した装置群を用いて、福島県飯館村近郊でサンプリングを行った土壌試料ないし雪解け水（付着土壌成分あり）について分析を行った。これら放射性核種は、原子数からみると極微量であり、大量のマトリクス成分から目的成分を捕捉・濃縮することは必要である。そこで、本研究では固相抽出法の中でもイオン排除機能を有するキレート（chelate）型固相抽出剤を用いた。固相抽出法とは、固相と液相との間の相互作用による物理化学的な抽出法であり、今回、捕捉機構にポリスチレンゲルの支持体にイミノ二酢酸基のキレート官能基が結合したものをを用いた。使用した固相抽出剤の詳細は、GLサイエンス社製ME-1、日立ハイテクサイエンス社製NOBIAS PA-1の固相抽出剤³⁵⁾である。その結果、上述の統合型放射能・元素分析測定システムを用いて行った土壌試料の測定では、Sr-90については数100Bq/kg程度、Pu同位体について数Bq/kg程度レベルの検出限界であることを評価した³⁶⁾。また、同システムの大気エアロゾル分析の適用では、原子力災害発生直後2011年4月ころにかけて、中国大陸から飛来してきた黄砂現象と福島第一原発起源の放射性ブルーム動態との現象を同時に捉え、大気エアロゾル成分に含まれる放射性セシウムと安定同位体セシウムの定量分析比較、また他の元素成分の濃度相互関係からその経時的な変化を調べ、その系統性から黄

砂による放射性セシウム成分の洗浄効果現象の存在を推定することができた³⁷⁾。

放射線防護・医用機器開発,放射線挙動シミュレーション

次に、放射線防護の考えに基づく医用機器開発の「ヨウ素シード品質管理測定システム」と、このシステム設計（漏洩線量の評価や最適な検出条件の設定など）や、医療用小型加速器施設内で発生する中性子に伴う放射化問題など、それら放射線挙動解析に活用しているモンテカルロ・シミュレーション計算コード利用について概説する。

前立腺がんは近年最も増加率が高く問題視されている。この前立腺がんの有効な治療法として前立腺がん永久密封小線源治療法がある。この治療法は、シードと呼ばれる微小線源形状に梱包されている放射性物質（ヨウ素I-125）を60個～150個程度を前立腺に永久挿入して、がん組織を死滅させる治療法であり、日本では2003年に認可された。本療法は、シード挿入時に関わる治療時間が1～2時間程度と非常に短く、入院期間も短く、他の治療法と比較して治療後の患者に後遺症が出にくいメリット（QOLが高い）があり、欧米では広く定着している。しかしながら、線源自体が非常に小さいので製造・出荷時における品質管理保証や各病院施設での線量保証責任が重要視され、関連協会のガイドライン（米国医学物理学学会AAPM³⁸⁾や日本放射線腫瘍学会QA委員会³⁹⁾など）で線源保証責任の実施が推奨されているにもかかわらず、現場の多忙さゆえに国内外ともに線源強度に関する品質管理業務がほとんど行われていないのが現状である。この問題を解決するために徳島大学と地元企業とが共同し、さらに医工連携が加わって新しいヨウ素シード品質管理測定システム（Brachytherapy Seeds Quality Assurance System: BSQAS）の開発に至った（図8）。その結果、装置筐体及び電気回路の小型化によりポータブル化が加速され、忠実に国際市場（日本・米国）調査のニーズを取り入れ、高精度化・効率化・小型化・汎用化・簡易化・低コスト化等、すべてを達成することができ、国内の大手メーカーとの販売契約を取り交わす段階に来ている。今回の完成装置を徳島大学病院放射線治療科に導入し実績を積み、日本国内はもとより米国・欧州、

新BSQASシステムにおける品質管理測定ワークフロー

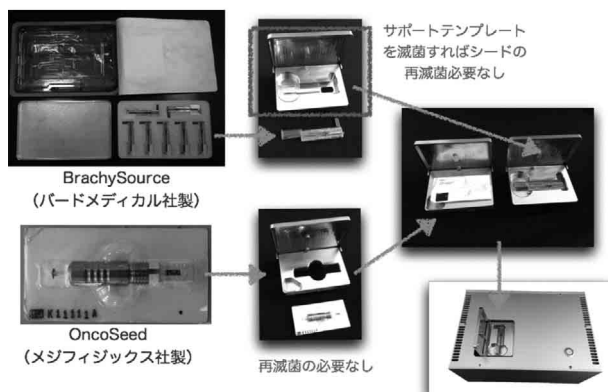


図8 新しいヨウ素シード品質管理測定システム (Brachytherapy Seeds Quality Assurance System: BSQAS) の概観と品質管理測定ワークフロー

豪州などを中心に海外市場への展開を視野に入れて、さらなる装置開発を進めている。

最後に、放射線挙動シミュレーション解析について概説する。上述の医用機器開発設計の段階においても、また放射線防護の評価や放射線計測の最適化、粒子線治療の患者への影響、さらに装置や施設の放射化問題に関しても、測定対象とする放射線線源から発生する放射線の挙動を予め模擬することはたいへん有効である。筆者は、最近の研究においてモンテカルロ・シミュレーションを基盤とした放射線挙動解析、粒子・重イオン輸送計算コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)⁴⁰⁾を対象としており、その手法を用いた評価計算やこのような手法で重要となる体系設定の構築法についても概説する。この計算コードは、中性子、陽子、重イオンを含む原子核、電子、光子などほぼすべての粒子の輸送を記述することができる代表的な計算コードの一つである。特に、医学物理分野では EGS5⁴¹⁾が、素粒子・原子核分野では GEANT4⁴²⁾が有名であるが、大型加速器の遮蔽計算において PHITS は以前から使用されており、近年、そのユーザー数は多分野からの利用と相まって急速な増加傾向となっている。2014年9月の PHITS 研究会 (茨城県東海村) では、その数が約1,000名を超えているとの報告があった。PHITS は Fortran90形式で書かれたプログラムであり、Windows, Mac OSX, Linux 上で使用可能である。Windows と Mac については、そ

れそれぞれに対応した実行ファイルが整っており、簡便なインストーラーも整備されて容易にかつ初心者でもすぐに使用できる。模擬する体系の舞台は、任意の3次元空間を想定しており、数 mm から数千 km の広い空間スケールを扱うことができる。設定によっては、 μm オーダーの空間体も取り扱うことができるので、放射線生物学の細胞レベルにおける生物学的効果比 (RBE) に関係した LET や y 分布の評価計算 (マクロ・マイクロドジメトリの融合) も適用できる⁴¹⁾。また、人体などを模擬したボクセルファントムを扱うことができ、より精度の高い人体内での吸収線量を調べることができる (図9)。計算できる物理量には、粒子フルエンス (T-track)、発熱量 (T-heat)、吸収線量や LET (T-deposit)、核反応による生成粒子 (T-product) などがある。タリー (Tally) と呼ばれる仮想検出器をその空間内に任意に配置することで、任意の領域におけるさまざまな物理量を自在に導出することができる。初級者にとっても非常に扱いやすい計算コードであるといえる。筆者はこの PHITS を用いて、開発してきたヨウ素シード品質管理測定システムにおける筐体外への漏洩放射線量状況と、この開発装置で採用している可動型シングルスリットコリメータでのヨウ素 I-125シードからの放射線を模擬する評価計算を実行した (図9, 10)。その評価計算から最適な装置設計を、また装置から出力される放射線強度プロファイルを再現する研究を行っている。最近では筆者の研究室学生によって PHITS 計算コードを頻繁に活用してもらい、診療放射線技師として興味を持たれる原発由来放射性核種のパーティクル状物質を呼吸し、肺に沈着した時の線量評価や、一般 X 線撮影時の患者を支持している時に診療放射線技師の手や上腕などで受ける散乱 X 線による被ばく線量を、実測することなく PHITS から導出される換算係数を用いることで推定評価する方法を開発した。このように見えない放射線をシミュレーション計算によって可視化させ、その分布強度を推定できることは、核・放射化学者だけでなく放射線に関連した研究者にとって、非常に興味深く、放射線初学者である放射線技術科学専攻学生 (自ら計算を実行) や、現在、筆者が原子力災害復興支援活動の一環で訪れている主に福島県の小中学生たちへ放射線教育の中で、放射線シミュレーション飛跡図 (図10) を見せると、目を大きく光らせて

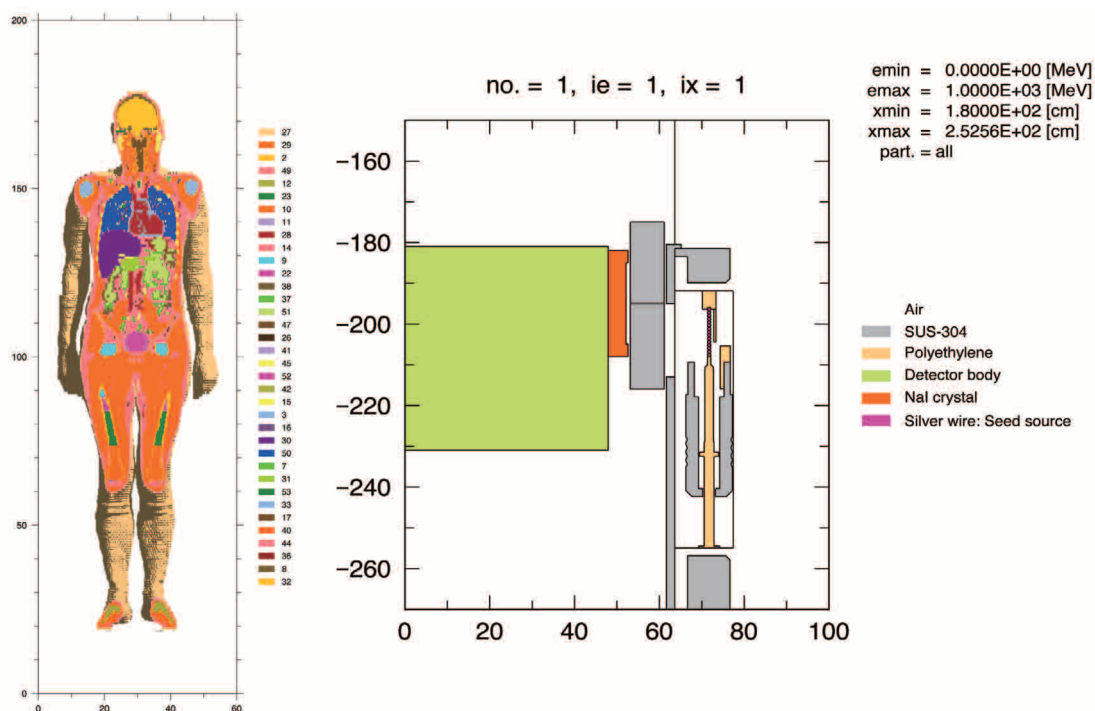


図9 粒子・重イオン輸送計算コードPHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)⁴⁰⁾による、ボクセルファントム体系設定(左図)とヨウ素シード品質管理測定システムの体系設定の様子(右図)。DICOM2PHITSプログラムによって、DICOMデータからPHITS入力データに変換、3D CADデータ(単位はmm)から中国科学院核能安全技术研究所FDS TeamによるSuper MCAMソフトウェア⁴²⁾を使用してPHITS入力データに変換している。

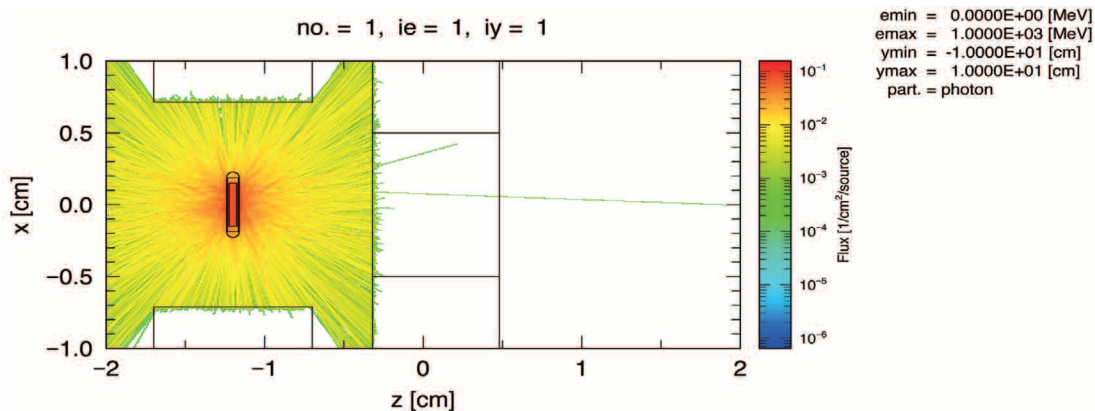


図10 簡易体系のもとPHITS計算コードによるシングルスリットコリメータ(0.1mm×10.0mmスリット)を通過するヨウ素I-125シード線源からの放射線飛跡図(T-track)

驚いている。このことから、今後の放射線教育分野へもこのPHITS計算コードの利用効果が期待できる。

おわりに

核・放射化学者としての活躍する研究領域は、非常に

多岐に渡っており、基礎科学分野から医学を含めた応用科学研究まで幅広く対応できる。昨今、iPS細胞やLED研究などの生命科学や材料科学が流行の研究分野であるかもしれないが、核・放射化学という研究分野をこの機会に知ってもらい、自らこれまでの研究を先進的に推し進め、この分野が永続的に活躍できるよう期待する。

謝 辞

核・放射化学の道へ確固たる志を導いて頂きました中原弘道名誉教授（東京都立大学），学位取得の際に指導を賜りました海老原充教授（首都大学東京），永目諭一郎博士（日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター副センター長，茨城大学大学院理工学研究科教授），末木啓介教授（筑波大学大学院），研究実験や解析等を支援して頂きました大浦泰嗣准教授（首都大学東京），塚田和明博士（日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター），浅井雅人博士（日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター），私自身にとって初めての指導大学院生であった長野裕介君（徳島大学大学院保健科学教育部卒），原子力災害復興支援や放射線計測実験で指導を賜っている中山信太郎教授（徳島大学大学院 SAS 研究部），徳島大学医療短期大学部からご支援・ご助言頂きました前澤博名誉教授（徳島大学），このような機会をいただきました徳島医学会関係の皆様へ厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Friedlander, G., Kennedy, J. W., Macias, E. S., Miller, J. M.: Nuclear and Radiochemistry, John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 1981, pp. 1-16
- 2) Choppin, G. R., Liljenzin, J. O., Rydberg, J.: Radiochemistry and Nuclear Chemistry, Third edition, Elsevier Inc., 2001; 柴田誠一, 大久保嘉高, 白井理, 高宮幸一, 藤井俊行 (訳): 放射化学, 丸善出版, 東京, 2004, pp. 1-11
- 3) Curie, P., Curie, M.: Sur une Substance Nouvelle Radio-active, Contennee dans la Pechblende. *Compt. Rend.*, 127 : 175, 1898
- 4) Curie, M.: Radioactivit , Paris, 1935
- 5) 海老原充: 現代放射化学. 1 版, 化学同人, 京都, 2005, pp. 165-180
- 6) 日本放射化学会編: 放射化学用語辞典, 2006年版, 2006, p. 22
- 7) Shinohara, N., Novikov, Y. N., Münzenberg, G., Wollnik, H., *et al.*: Search for "missing" α -emitters for the mass mapping of superheavy elements. *JAERI-Review*, 029 : 45-46, 2002
- 8) Sakama, M.: Ph. D. thesis, Alpha-decay properties of neutron deficient americium isotopes, TMU-1123, Tokyo Metropolitan University, 2004
- 9) Hall, H. L.: Ph. D. thesis, Delayed-fission properties of neutron-deficient americium nuclei, LBL-27878, Lawrence Berkeley Laboratory, 1980
- 10) Higgins, G. H.: Ph. D. thesis, An investigation of the isotopes of americium and curium, UCRL-1796, University of California, Radiation Laboratory, 1952
- 11) Rasumussen, J. O.: Alpha-decay: Alpha-, Beta-, and Gamma-ray Spectrometry, North-Holland, Amsterdam, 1966, p. 701
- 12) Ichikawa, S., Asai, M., Tsukada, K., Osa, A., *et al.*: Mass separation of neutron-rich isotopes using a gas-jet coupled thermal ion source. *Nucl. Instr. and Meth., A* 374 : 330-334, 1966
- 13) Ichikawa, S., Tsukada, K., Asai, M., Osa, A., *et al.*: Search for unknown isotopes using the JAERI-ISOL. *Nucl. Instr. and Meth., B* 126 : 205-208, 1997
- 14) Tsukada, K., Ichikawa, S., Hatsukawa, Y., Nishinaka, I., *et al.*: Half-life of the electron capture decaying isotope ^{236}Am . *Phys. Rev., C* 57 : 2057, 1998
- 15) Ichikawa, S., Tsukada, K., Asai, M., Haba, H., *et al.*: Performance of the multiple target He/PbI₂ aerosol jet system for mass separation of neutron-deficient actinide isotopes. *Nucl. Instr. and Meth., B* 187 : 548-554, 2002
- 16) Nagame, Y., Asai, M., Haba, H., Tsukada, K., *et al.*: Status and prospects of heavy element nuclear chemistry research at JAERI. *J. Nucl. and Radiochem. Sci.*, 3(1) : 129-132, 2002
- 17) Sakama, M., Tsukada, K., Asai, M., Ichikawa, S., *et al.*: New isotope ^{233}Am . *Eur. Phys. J., A* 9 : 303-305, 2000
- 18) Asai, M., Tsukada, K., Ichikawa, S., Sakama, M., *et al.*: α decay of ^{238}Cm and the new isotope ^{237}Cm . *Phys. Rev., C* 73 : 067301, 2006
- 19) Asai, M., Tsukada, K., Ichikawa, S., Sakama, M., *et al.*: Identification of the new isotope ^{241}Bk . *Eur. Phys. J., A* 16 : 17-19, 2003

- 20) Sakama, M., Asai, M., Tsukada, K., Ichikawa, S., *et al.* : α -decays of neutron-deficient americium isotopes. *Phys. Rev., C* **69** : 041308, 2004
- 21) Asai, M., Sakama, M., Tsukada, K., Ichikawa, S., *et al.* : Proton-neutron configurations in $^{236g,m}\text{Am}$ and its EC-decay daughter ^{236}Pu . *Eur. Phys. J., A* **23** : 395-400, 2005
- 22) Sakama, M., Tsukada, K., Asai, M., Ichikawa, S., *et al.* : Nuclear decay properties of the neutrondeficient actinides. *J. Nucl. Sci. Technol., Sup.* **3** : 34-37, 2002
- 23) Asai, M., Tsukada, K., Sakama, M., Ichikawa, S., *et al.* : Experimental identification of spinparities and single-particle configurations in ^{257}No and its α -decay daughter ^{253}Fm . *Phys. Rev. Lett.*, **95** : 102502, 2005
- 24) Asai, M., Tsukada, K., Sakama, M., Haba, H., *et al.* : Ground-state configuration of the $N=157$ nucleus ^{259}No . *Phys. Rev., C* **87** : 014332, 2013
- 25) Pershina, V., Fricke, B. : Theoretical study of the physicochemical properties of the light transactinides. *J. Alloys and Com.*, 213/214 : 33-37, 1994
- 26) Morita, K., Yoshida, A., Inamura, T. T., Koizumi, M., *et al.* : RIKEN isotope separator on-line GARIS/IGISOL. *Nucl. Instr. and Meth., B* **70** : 220-225, 1992
- 27) Haba, H., Kaji, D., Kikunaga, H., Akiyama, T., *et al.* : Development of gas-jet transport system coupled to the RIKEN gas-filled recoil ion separator GARIS for superheavy element chemistry. *J. Nucl. and Radiochem., Sci.*, **8**(2) : 55-58, 2007
- 28) Haba, H., Kaji, D., Kikunaga, H., Kudou, K., *et al.* : Production and decay properties of the 1.9-s isometric state in ^{261}Rf . *Phys. Rev., C* **83** : 034602, 2011
- 29) Haba, H., Huang, M., Kaji, D., Kanaya, J., *et al.* : Production of ^{262}Db in the $^{248}\text{Cm} (^{19}\text{F}, 5n) ^{262}\text{Db}$ reaction and decay properties of ^{262}Db and ^{258}Lr . : *Phys. Rev., C* **89** : 024618, 2014
- 30) Haba, H., Kaji, D., Kudou, K., Morita, K., *et al.* : Production of ^{265}Sg in the $^{248}\text{Cm} (^{22}\text{Ne}, 5n) ^{265}\text{Sg}$ reaction and decay properties of two isometric states in ^{265}Sg . : *Phys. Rev., C* **85** : 024611, 2012
- 31) Sakama, M., Saze, T., Kitade, T., Shikino, O. : Development of elemental and isotopic analysis of uranium and thorium in material using an automatic SPE injection equipment coupled to ICPDRC-MS. : *International Journal of Modern Physics, B* **25**(31) : 4175-4179, 2011
- 32) Takahashi, J., Yamada, N. : Development of collision/reaction for reduction of spectral interference in ICP mass spectrometry. : *BUNSEKI KAGAKU*, **53**(11) : 1257-1277, 2004
- 33) Takagai, Y., Furukawa, M., Kameo, Y., Suzuki, K. : Sequential inductively coupled plasma quadrupole mass-spectrometric quantification of radioactive strontium-90 incorporating cascade separation steps for radioactive contamination rapid survey. : *Anal. Methods*, **6** : 355-362, 2014
- 34) Takagai, Y., Furukawa, M., Nagahashi, Y., Takase, T., *et al.* : Isotope ratio analysis of ^{235}U and ^{238}U nuclide using a microwave digestion associated with ICP-MS and the large areal soil survey related to Fukushima Dai-ichi Nuclear Disaster. : *BUNSEKI KAGAKU*, **60**(12) : 947-957, 2011
- 35) 井上嘉則 : ポリマー系固相抽出剤の開発と応用. *S. I. NEWS*, **49**(1) : 8-12, 2006
- 36) Sakama, M., Nagano, Y., Saze, T., Higaki, S., *et al.* : Application of ICP-DRC-MS to Screening Test of Strontium and Plutonium in Environmental Samples at Fukushima. : *Applied Radiation and Isotopes*, **81** : 201-207, 2013
- 37) Sakama, M., Nagano, Y., Kitade, T., Shikino, O., *et al.* : Correlation between asian dust and specific radioactives of fission products included in airborne samples in Tokushima, Shikoku island, Japan, due to the Fukushima Nuclear Accident. : *Nuclear Data Sheets*, **120** : 250-253, 2014
- 38) Yu, Ya., Anderson, L. L., Mellenberg, D. E., Nath, R., *et al.* : Permanent prostate seed implant brachytherapy : report of the american association of physicists in medicine task group no. 64. : *Med. Phys.*, **26**(10) : 2054-2076, 1999
- 39) 日本放射線腫瘍学会 QA 委員会, ^{125}I 永久挿入治療

- 物理 QA ガイドライン検討専門小委員会：¹²⁵I 永久挿入治療の物理的品質保証に関するガイドライン：13-17, 2010
- 40) Sato, T., Niita, K., Matsuda, N., Hashimoto, S., *et al.* : Particle and heavy ion transport code system, PHITS, version 2.52. : J. Nucl. Sci. Tech., 50(9) : 913-923, 2013
- 41) Sato, T., Watanabe, R., Niita, K. : Development of calculation method for estimating specific energy distribution in complex radiation fields. : Radiat. Prot. Dosim., 122(1-4) : 41-45, 2006
- 42) Wu, Y., FDS Team. : CAD-based interface programs for fusion neutron transport simulation. : Fusion Engineering and Design, 84 : 1987-1992, 2009

Introduction of nuclear and radiochemistry

-from heavy and superheavy elemental science toward radioactivity in the environment, inorganic analytical chemistry and the application of scientific technology to development of medical device-

Minoru Sakama

Department of Radiological Science, Institute of Health Biosciences, Tokushima University Graduate School, Tokushima, Japan

SUMMARY

The end of the late 19th century, nuclear and radiochemistry was firstly constructed by one of great chemists, Marie Curie. At that time, she had carried out the first discovery of two new elements, polonium and radium, using chemical decomposition and separation methods of the first exercise in radiochemistry of uranium ores. Currently, nuclear and radiochemistry plays an important role in various fundamental and applied research fields from physics, chemistry, and biology, toward the environment, energy, industrial materials, life science, medicine, agriculture, education, and so on. This review is focused mainly on the introduction of current nuclear and radiochemistry, in particular, from the nuclear sciences of transuranium nuclides including recent experimental works of superheavy element chemistry toward radioactivity in the environment, inorganic analytical chemistry and the application of scientific technology to development of medical device.

Key words : heavy and superheavy elements, radioactivity in the environment, inorganic analytical chemistry, brachytherapy, PHITS