

放射化学ニュース

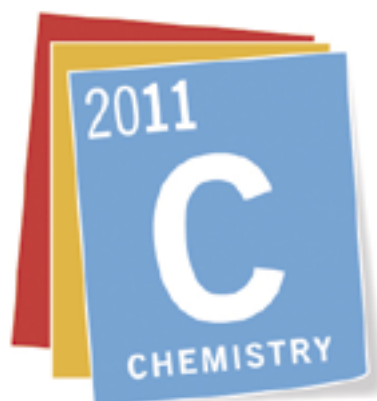
第24号

解説

大強度パルス中性子を適用した中性子核反応測定装置ANNRI

特集

福島第一原子力発電所の事故に関連した取り組み
世界化学年を記念して



International Year of
CHEMISTRY
2011



日本放射化学会

The Japan Society of Nuclear and Radiochemical Sciences

放射化学ニュース

第 24 号

平成 23 年 (2011 年) 8 月 31 日

目次

解説

- 大強度パルス中性子を適用した中性子核反応測定装置 ANNRI (原田秀郎、木村 敦、大島真澄) …… 1

特別記事

福島第一原子力発電所の事故に関連した取り組み

1. 福島第一原子力発電所事故への取り組み (永目諭一郎) …… 8
2. 放射能高汚染水からの無線吸着剤によるセシウムの選択的分離 (三村 均、佐藤修彰、桐島 陽) …… 9
3. 地球惑星科学連合と日本放射化学会の連携プロジェクト (篠原 厚、齊藤 敬) …… 20
4. 農産物の放射能汚染問題に関連した福島県への協力 (村松康行) …… 25
5. 福島県農業総合センター果樹研究所等での放射性物質対策試験 (大槻 勤) …… 28
6. 日本分析化学会・日本地球化学会・日本放射化学会 共同講演会「放射能・放射線を正しく理解する～福島第一原子力発電所事故に関連して～」(永目諭一郎) …… 29

特別寄稿

- 福島第一原発事故と IAEA の事故評価尺度の不備 (吉原賢二) …… 30

特集

世界化学年を記念して

- 「放射化学の最前線—マリー・キュリーが目指した(であろう)テーマ—」 …… 33
1. 新元素の合成と化学 (羽場宏光) …… 34
 2. ラジオアイソトープの医学利用 (渡邊茂樹、石岡典子) …… 40
 3. 放射化学を基礎とした核不拡散に関わる分析技術 (宮本ユタカ) …… 46
 4. ラジオアイソトープ利用の最前線 (二ツ川章二) …… 50
 5. 加速器質量分析とその考古学への応用—最近のトピックより (今村峯雄) …… 56
 6. ウラン電池からバナジウム固体塩電池 (VSSB) へ (山村朝雄、大田 卓) …… 61

トピックス

114 番元素ならびに 116 番元素が承認される (永目諭一郎)	67
---	----

施設だより

静岡大学理学部附属放射化学研究施設 (奥野健二)	68
--------------------------------	----

JNRS 論文集

2010 年 JNRS 論文賞受賞論文紹介	71
-----------------------------	----

研究集会だより

海外

MTAA-13 (大浦泰嗣)	72
ISORD-6 に参加して (関本 俊)	74

国内

第 12 回「環境放射能」研究会 (別所光太郎)	75
--------------------------------	----

情報プラザ

1. 3rd International Nuclear Chemistry Congress, Italy	78
2. International Conference Innovative Nuclear Energy Systems toward 2030 and beyond (GLOBAL2011), Japan	78
3. 10th International Conference on Nuclear Analytical Methods in the Life Sciences (NAMLS10), Thailand	78
4. 9th International Conference on Methods and Applications of Radioanalytical Chemistry (MARC IX), USA	78
5. 8th International Conference of Nuclear and Radiochemistry (NRC-8), Italy	78

学位論文要録

Development of microchannel-electrode chip and basic studies for electrochemistry of element 106, seaborgium 大江一弘 (阪大)	79
---	----

学会だより	81
-------------	----

放射化学討論会

2011 日本放射化学会年会・第 55 回放射化学討論会プログラム	86
---	----

賛助会員リスト

広告

表紙の説明

2008 年末に開催された国際連合総会は、キュリー夫人のノーベル化学賞受賞から 100 年目に当たる 2011 年を「世界化学年」(International Year of Chemistry: IYC2011) とすることを決めました。これは日本学術会議化学委員会が国際純正・応用化学連合(IUPAC)からの呼びかけに賛同し、化学委員会 IUPAC 分科会と共に、我が国が共同提案国として国際連合教育科学文化機関(UNESCO)に働きかけ実現したものです。2011 年はまた、IUPAC が設立されて 100 年にも当たります。

世界化学年の統一テーマは“Chemistry-our life, our future”であり、化学に対する社会の理解増進、若い世代の化学への興味喚起、創造的将来への化学者の熱意の支援などを目的としています。日本放射化学会でもキュリー夫人功績を讃え、ここに特集を組むことにしました。今後、新たな放射化学 100 年の歴史をスタートさせる区切りの年でもあります。「表紙は世界化学年を記念したロゴマークです。」

解 説

大強度パルス中性子を適用した中性子核反応測定装置 ANNRI

原田秀郎、木村 敦、大島真澄 (日本原子力研究開発機構)

1. はじめに

中性子共鳴反応を引き起こす中性子エネルギーは、核種によって異なる。よって、核反応を引き起こした中性子のエネルギーを計測することにより、核種の定性・定量分析が可能となる。核反応を引き起こした中性子のエネルギーを計測するためには、放射化法とは全く独立した測定手法である中性子飛行時間法が有効である。これはパルス中性子を適用することで可能となるが、近年、大強度パルス中性子ビームを供給可能な施設が、J-PARCの物質・生命科学実験施設として完成し、その利用が始まっている。本施設には、ビームライン毎に特徴ある装置が設置され、現在16台の実験装置が運用中あるいはコミッショニング中である。

ビームライン No.04 には、中性子飛行時間法を適用可能な中性子核反応測定装置が設置され、運用が開始されている。本装置の愛称は、ANNRI (アンリ) という。Accurate Neutron-Nucleus Reaction measurement Instrument の略である。本装置は、原子力開発の分野で重要な放射性核種の中性子捕獲断面積の信頼性を向上させるために、MEXT 委託事業として、北海道大学、東京工業大学、日本原子力研究開発機構の研究チームが開発したものである。中性子捕獲反応により発生する即発ガンマ線を測定するために、Ge スペクトロメータ及び NaI スペクトロメータが設置されているが、これらは、世界の同種の施設が採用したガンマ線スペクトロメータに比較し、ガンマ線エネルギーの分解能が高いという優れた特徴を有する。

本解説では、ANNRI の装置性能、ANNRI で期待される研究と世界の動向、及び ANNRI の利用方法について紹介する。

2. ANNRI 装置紹介

2.1 ANNRI ビームライン

中性子核反応測定装置 (ANNRI) は J-PARC にある物質・生命科学実験施設 (MLF) のビームライン No.04 に設置されている。ANNRI の構造を図 1 に、外観写真を図 2 に示す。ANNRI の遮蔽体はコンクリート、鉄、ホウ素入り樹脂で構成され、中性子モデレータから 20.5 ~ 25.5m に中流部分の実験領域が、26 ~ 30m に下流部分の実験領域が設けられている。中流部分の実験領域には飛行距離 21.5m の位置に全立体角 Ge スペクトロメータが、下流部分には飛行距離 27.9m の位置に NaI (Tl) スペクトロメータが設置されている。各スペクトロメータの中心部に測定用試料を設置することにより、試料の中性子捕獲で発生するガンマ線とその時の中性子の飛行時間を測定することが出来る。中性子エネルギーは中性子源からサンプルまでの距離と中性子の飛行時間から決めることが出来るため、中性子捕獲で発生するガンマ線と中性子エネルギーの 2 次元分布を得ることが可能である。飛行距離が 21.5m 若しくは 27.5m と長いため、中性子の共鳴ピークを keV 領域まで分解して観測することが出来る。

12 ~ 17m の上流部分領域には、T0 チョッパー、中性子フィルター、ダブルディスクチョッパーが設置されている。T0 チョッパーはガンマ線バーストと高速中性子をカットするもので、これを用いることにより低エネルギー中性子で精度のよい実験が可能となる。中性子フィルターには 8 種類のフィルター (Mn, Co, In, Ag, Cd, Al 及び 2 種類の厚さの Pb) が用意されており、各フィルターを独立に中性子ビーム中に挿入することができ、バックグラウンドの決定等に利用される。ダブルディスクチョッパーは eV 領域の中性子を透過させるバンドフィルターとして用いられる他に、フレームオーバーラップ (1 回前の陽子の入

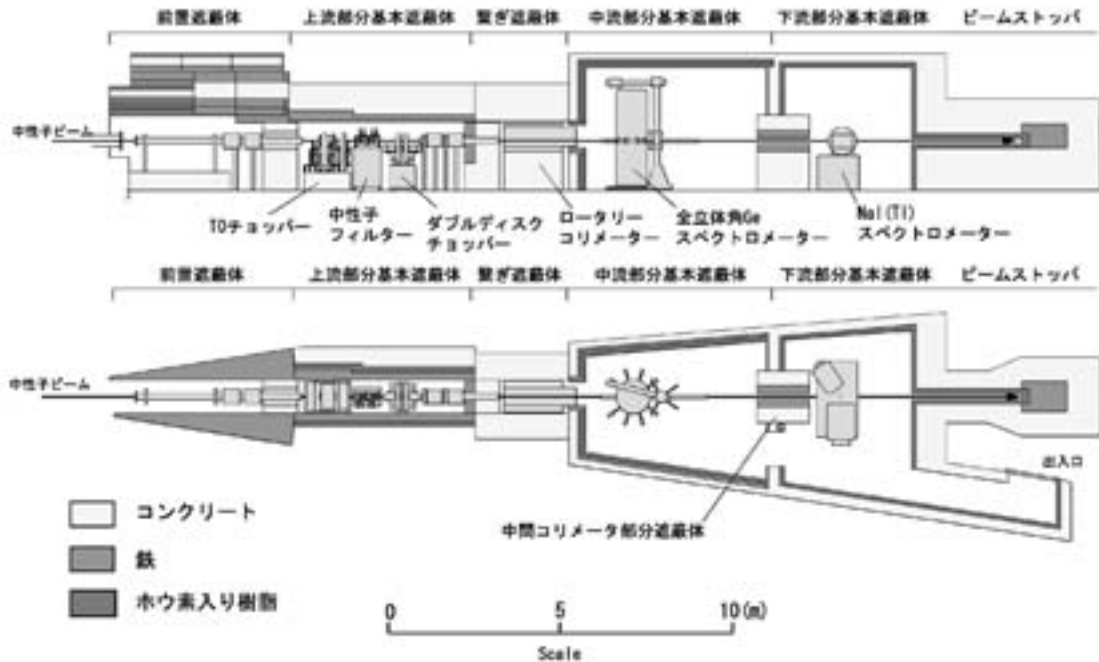


図1 ANNRIの構造図

射で発生したエネルギーの低い中性子が、次の入射で発生した高速の中性子に抜かれてしまい、区別できなくなる現象)を防ぐためのテールカッターとしても利用される。

2.2 中性子ビームの特徴

ANNRIでは、設置された両スペクトロメータの試料に適した空間分布の中性子ビームを形成するために、中性子源からサンプルの間に、複数のコリメータで構成されるコリメータシステムが設置されている。また、17～20mの部分には回転する事によってコリメータ径を選択出来るロータリーコリメータが設置されており、用いる試料の大きさに応じて3mmφ、7mmφ、15mmφ、22mmφ、40mm角の中性子ビームを選択することが可能である。

中性子ビームの、4πGe スペクトロメータのサンプル位置 (L=21.5m) におけるエネルギー分布と空間分布の測定を、位置検出型Li ガラスシンチレーション中性子検出器を用いて行った。その結果、中性子束は期待されるエネルギー依存性を持ち、絶対強度も中性子源シミュレーションによる予測とほぼ一致しており、MLFへの陽子ビーム出力が120 kW時で、1.5-25meVの中性子エネルギー領域の積分値が 5.2×10^{10} n/s/m²、0.9-1.1eVの領域で 1.1×10^9 n/s/m²、0.9-1.1keVの領域で 7.2×10^9 n/s/m²となり、将来の1 MW 運転

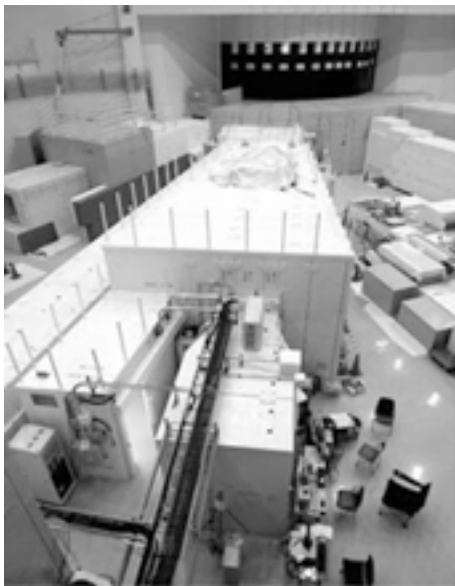


図2 ANNRIの外観写真(ビームライン下流側より上流を望む)

時には、各々 4.3×10^{11} , 9.3×10^9 , and 6.0×10^{10} n/s/m²となる。空間分布はコリメーターシステムの設計どおりである事が確認でき、バックグラウンドが抑制された良質なビームである。[1]

2.3 全立体角 Ge スペクトロメータ

中流部分の実験領域には飛行距離 21.5m の位置に全立体角 Ge スペクトロメータが、設置されている。全立体角 Ge スペクトロメータは2台のクラスター型 Ge 検出器と8台の同軸型 Ge 検出器からなる。クラスター型 Ge 検出器には、7個の Ge 結晶が内蔵されているため、合計22個の Ge 結晶からなる。また、それぞれの Ge 検出器はコンプトン散乱の影響を低減するため、BGO 検出器で覆われた構造となっている。図3に全立体角 Ge スペクトロメータの外観写真を示す。検出効率を改善すると同時に、J-PARC MLF における様々な実験に対応するべく、検出器サンプル間の距離が可変となる構造となっている。全立体角 Ge スペクトロメータの検出効率は1.33MeV の ⁶⁰Co の γ 線に対して 364 ± 0.11 %、エネルギー分解能は半値幅で2.4keVである。[2]

データ収集装置は、J-PARC の実験に備えて改良された高速なものであり、測定に際してガンマ



図3 全立体角 Ge スペクトロメータの外観

線スペクトルの他に、イベント事に、イベント番号、検出器番号、中性子の飛行時間、測定されたガンマ線のエネルギーを記録するモードを持つ。また、シングル測定、同時計数測定の選択が可能になる。

このスペクトロメータはさらに、遮蔽体内で発生する散乱中性子、ガンマ線を遮蔽して低ノイズ測定を可能にする検出器シールド（写真青白色部分）、サンプルで散乱された中性子が検出器に入るのを抑制するための中性子シールド、および多試料の自動測定を可能にするサンプルチェンジャーを備える。

2.4 NaI スペクトロメータ

下流部分基本遮蔽体内には NaI (Tl) スペクトロメータが設置されている。NaI スペクトロメータではシミュレーションにより応答関数が導出されているため、波高重み法による中性子捕獲断面積の絶対測定が可能となる。また、NaI (Tl) 検出器は Ge 検出器よりも応答が速いため、飛行距離が長いことも併せて、全立体角 Ge スペクトロメータよりも高いエネルギー領域の中性子捕獲断面積測定が可能である。図4に NaI (Tl) スペクトロメータを示す。検出器はそれぞれ中性子ビームラインに対し、最近接となる90°と γ 線の角度分布の影響を受けない125°に設置されている。

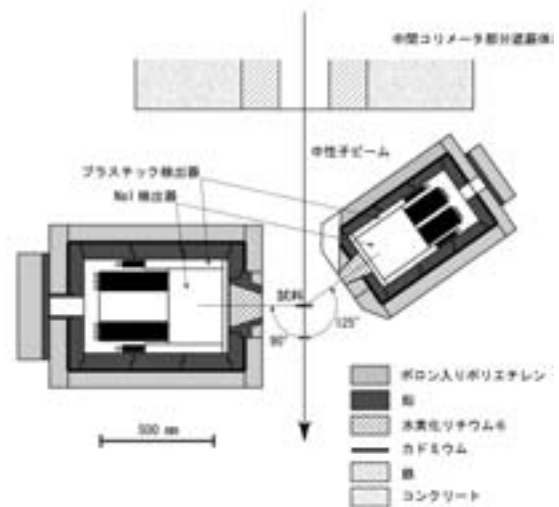


図4 NaI (Tl) スペクトロメータ

3. ANNRI で期待される研究と世界の動向：核データ、宇宙核物理、微量元素分析

3.1 核データ分野

マイナーアクチノイド核種の中性子捕獲微分断面面積の測定に関しては、精度向上に向けた先駆的な研究が我が国で行われ、京都大学原子炉実験所の研究グループが C_6D_6 シンチレーション検出器を適用し、2002年に $Np-237$ の中性子捕獲微分断面面積を測定した。日本原子力研究開発機構の研究グループは、高効率のBGOスペクトロメータを開発し、2005年に $Np-237$ の中性子捕獲微分断面面積を測定した。

しかしながら、比放射能のより高い $Cm-244$ や $Am-241$, $Am-243$ といったサンプルに対しては、従来の測定技術では測定が困難であり、革新炉開発や核変換研究で必要とされる精度で測定することは出来なかった。このため、我が国では原子炉中性子を用いた積分的測定手法である放射化法を適用し、熱中性子捕獲断面面積や共鳴積分値が導出されるに留まっていた。

一方、マイナーアクチノイド核種や長寿命核分裂生成核種の中性子捕獲断面面積を高精度化する必要性がOECD/NEAやIAEAなどの国際機関において認識され、近年欧米を中心に大型核データ測定プロジェクトが進行している。比放射能のより高いサンプルに対する中性子捕獲微分断面面積測定を可能とするために、核破碎反応により発生する大強度パルス中性子ビームを適用した測定装置が米国ロスアラモス国立研究所及び欧州合同素粒子原子核研究機構(CERN)において開発され、2001年頃より測定研究が開始された。この結果、米国ロスアラモス国立研究所の研究グループは、 $Np-237$ 及び $Am-241$ の中性子捕獲微分断面面積測定結果を2008年に報告した。CERNにおいても同様に $Np-237$ 及び $Am-243$ の測定を実施したが、最終結果は報告されていない。両研究グループとも、最先端の中性子捕獲微分断面面積測定用スペクトロメータとして、全立体角 BaF_2 シンチレーションスペクトロメータを開発し適用したが、エネルギー分解能が低いために不純物の影響評価が困難である。

ANNRIにおいては、中性子捕獲微分断面面積測定用に、世界でも類を見ない高分解能かつ高効率

のGeスペクトロメータ、並びに東京工業大学で豊富な利用実績を有するNaIスペクトロメータが設置され、利用可能となった。ANNRIでは、J-PARC/MLFの大強度のパルス中性子ビームを適用した測定が行われ、加速器中性子を用いた測定では世界初となる $Cm-244$ の中性子捕獲微分断面面積測定に適用し [3]、その有用性が実証された。現在、 $Cm-244$ の他、 $Cm-246$ 、 $Am-241$ 、 $Np-237$ などのマイナーアクチノイド核種、そしてさらに $Pd-107$ 、 $Zr-93$ 、 $I-129$ 、 $Tc-99$ などの放射性核分裂生成核種の測定研究が進行中である。

ANNRIの核データ分野での今後の課題としては、炉心設計の観点から、核データの精度の向上が望まれる核種として、 ^{241}Am 、 ^{243}Am 、 ^{244}Cm の核種が挙げられている。特に、数百 eV ~ 数 100-keV の領域まで中性子エネルギー領域範囲を向上させ、過去の測定データを検証する意味も含めて、炉設計からの要求精度を満たす中性子捕獲断面面積データの整備を行うことは重要である。また、新たに核分裂断面面積測定のための装置開発などを行っていくことも重要である。ANNRIは、欧米の核データ測定用パルス中性子ビームラインに比較しても、中性子強度及びビーム品質の両面で優れた装置であり、当該分野での研究展開が国内外から期待されている。

3.2 宇宙核物理分野

約 137 億年前のビックバンによって宇宙は生成され、水素やヘリウム、Li等の軽元素が生成された。より重い炭素、酸素や、鉄や鉛などの金属は銀河系誕生以後に存在した恒星の中の核反応で生成されたのである。これまでの天体観測などにより、鉄より重い元素の99%以上が遅い中性子捕獲反応(s過程)及び、急速な中性子捕獲反応過程(r過程)で生成されたことが明らかになっている。s過程が発生する天体環境は赤色巨星の一種である漸近巨星分枝星などと考えられている。近年の天体観測技術の発達によって銀河系初期に形成された恒星が発見されて、その恒星の元素組成が太陽組成とは異なることが判明した。

金属欠乏星と呼ばれる銀河系初期に誕生した恒星の元素組成は、太陽組成に占めるs過程の組成パターンと類似するが完全に一致しない。このこ

とは、銀河系初期の恒星で発生したs過程は、太陽系誕生前のs過程とは異なることを示している。

一方、地球上に落下してきた始原的隕石と呼ばれる太陽系形成初期の組成を保持した隕石を調べること、太陽系形成に直接的に影響を与えた物質(星間ガス)の情報を得ることができる。マーチソン隕石中のOsの同位体比組成の測定より、太陽組成と比較して、 ^{186}Os の割合が大きく異なるパターンが存在することが判った。実は、 ^{186}Os はs過程で主に生成された同位体であり、s過程の影響が強くてできるためである。 ^{186}Os の組成が大きく異なるということは、太陽系物質に影響を与えた物質は均一ではなく、s過程の影響が大きい物質があり、太陽系形成時に良く混ざって現在の組成になったことを示している。このように、銀河系初期から、太陽系形成直前までのs過程を調べることで、銀河系における物質進化の解明が期待できる。

s過程を特徴づけるのは、恒星の中で発生した中性子放射場である。このときの中性子密度、中性子放射が継続した時間、温度、電子密度などがs過程に影響する。s過程は $kT=8\sim 30\text{keV}$ の平均エネルギーに対応する温度で主に進行したと考えられている。核データの観点からは、 $0\sim 50\text{keV}$ の中性子捕獲反応断面積が最も重要な物理であり、ドイツの研究グループを中心に勢力的に計測されており、太陽組成に対する理解はかなりすすんだと言える。しかし、銀河系の初期、中期のs過程に対する理解は十分ではない。このような異なる天体環境におけるs過程の違いは、分岐点と呼ばれる原子核より重い原子核(同位体)の組成に影響が出やすい。このような分岐点の不安定核には、しばしばベータ崩壊するアイソマーが存在する。そのため、基底状態とアイソマーへの分岐比が重要な物理量なのである。しかし従来の中性子捕獲反応の全断面積計測で使われていたNaIやBaF₂等のシンチレータではエネルギー分解能が十分でなく、例えば8MeVのトータルエネルギーに対して、 $100\sim 300\text{keV}$ のアイソマーへの部分断面積を計測することは困難であった。ANNRIに設置されたGe半導体検出器による断面積計測装置であれば、部分反応断面積の計測が可能になると期待される。なお、このような

分岐点としては ^{85}Kr 以外に ^{108}Ag 、 ^{113}Cd 、 ^{121}Sn 、 ^{152}Eu 、 ^{186}Re などが挙げられる。日本原子力研究開発機構を中心とする研究チームは、研究炉の熱中性子で ^{186}Re のアイソマーと基底状態の生成比を計測し、統計モデルで数十keVまでの生成比を計算している[4]。生成比は10keV前後から生成比が大きく変わることを示唆しており、実験による計測が必要であることを示している。この生成比は原子核の状態密度と密接に関係しており原子核構造の理解と表裏一体である。

以上では中性子そのものが主役となるs過程について述べたが、ビッグバン元素合成や、超新星爆発の初期段階での軽元素の爆発元素合成でも中性子が重要な働きをする。従来の施設で十分な中性子強度が得られていなかったために残された重要な課題として、 $^{17}\text{O}(n,\gamma)^{18}\text{O}$ 反応断面積計測などが挙げられる。天然に存在する ^{17}O 同位体比は0.038%しかなく、95%以上の濃縮試料の入手は困難である。ANNRIの大強度中性子ビームならば少量の試料でも計測が可能であり、Ge半導体検出器であれば50%程度の低濃縮度試料でも測定可能である。一方、超新星爆発の光核反応でも同位体組成が0.1%以下の希少な核種が生成されることがわかっている。ここで主役となるのは(n, γ)反応の逆反応である(γ ,n)反応であり、このような元素合成過程の詳細を知る上でも重要な働きをする[5]。大強度中性子ビームを用いた天体核物理研究としては、CERNのn_TOFが先行しており、既に相当な成果をあげている。しかし、ANNRIにおいても高品質の中性子ビームとGe検出器を中心とした高性能な検出器を組み合わせることで、質的に凌駕することは十分可能であり、今後の展開が期待される。

3.3 微量元素分析・イメージング分野

日本原子力研究開発機構では、J-PARCでのANNRI装置以外に、研究用原子炉JRR-3Mのガイドホールにおいて冷中性子ビームの利用が可能な多重即発ガンマ線分析装置STELLAがあり、運用実績がある。STELLAにおいて実施している即発ガンマ線分析(PGA, MPGA)は、分析ツールとして以下の特徴がある。

- ・中性子が物質の高い透過性を有する。

- ・放出される即発ガンマ線が物質の高い透過性を有する。
- ・ゲルマニウム半導体検出器を用いることで、即発ガンマ線を高分解能で解析できる。
- ・残留放射能レベルが低く、取り扱いが容易。

以上のことから、微量元素分析法として、全試料、非破壊、多元素同時、高確度、大型試料分析 (PGA の場合)、試料の再利用可、放射性あるいは薬品廃棄物が出ないといった特徴を有する。特に、放射化分析と同様、高確度性が大きな特長であり、究極の判断が求められる場合、唯一無二の試料の場合などに重要な役割を果たすことが期待される。前述のように、即発ガンマ線分析 (PGA, MPGA) は現在 JRR-3M 等の研究用原子炉による定常中性子源を持つ施設と J-PARC などのパルス中性子源を持つ施設で実施される。因みに PGA や MPGA などのビーム中性子を用いて行う放射化分析では一般に高強度の中性子源が有利であり、JRR-3M や J-PARC では高感度な分析が可能である。(但し、J-PARC ではいわゆる炉内照射を前提とする放射化分析を行う施設はない。) JRR-3M から得られる定常中性子ビームは冷中性子、熱中性子領域の中性子が占める割合が高く、そのため明瞭な共鳴吸収がなく、 $1/v$ 則が成り立つような軽元素については定常中性子源が有利である。よって、J-PARC において即発ガンマ線分析を実施するメリットとしては以下が挙げられる。

- ・高マトリクスで多元素を含む試料で、重金属 (特に、Cd や Hg など) 汚染の評価などに適する。
- ・分析器の高効率化と自動化により、簡便に迅速分析が可能になる。環境評価など多試料分析に欠かせない。
- ・パルス中性子とチョッパを組み合わせ、即発ガンマ線 (PGA, MPGA) と壊変ガンマ線 (INAA, NAAMG) の同時測定を行うことで、高感度分析の可能性がある。
- ・パルス中性子と飛行時間法測定の組み合わせで、中性子の共鳴吸収を利用した高感度分析の可能性がある。
- ・複数の中性子源施設の確保により、即発ガンマ線分析手段の安定使用が可能になる。特

に、各保守期間において他方の施設が相補的に運転され、常時使用が可能になるメリットは大きい。

- ・中性子共鳴吸収イメージングの利用により、核種のダイナミクス測定、微量元素分布分析、温度分布測定が可能になる。

即発ガンマ線を用いた分析を実施できる機関は、国内では日本原子力研究開発機構に限られ(最近、京都大学原子炉実験所に即発ガンマ線分析装置が設置されたが、J-PARC や JRR-3M に設置されているような高感度、高効率の分析用ではない)、世界でも非常に限られているのが現状である。ただ、原子炉から中性子ビームを取り出す拡張工事が実施、ないしは計画されているところがいくつあり、近い将来、利用頻度が増すことが予想される。一方で、MPGA のような、複数の Ge 半導体検出器を用いたコインシデンス測定を利用する高機能分析は非常に限られた研究所で行われているに過ぎず、J-PARC の ANNRI や JRR-3M の STELLA の様な高機能な装置は世界唯一といってよい。また、パルス中性子を用いた中性子放射化分析それ自体も実施例が少ないが、J-PARC で今後期待されるパルス中性子と多重ガンマ線測定を組み合わせた放射化分析は世界でも例がなく、この分野での今後の日本の活躍が期待される。

4. ANNRI の利用について

MEXT 委託事業として開発された中性子核反応測定装置 (ANNRI) は、日本原子力研究開発機構が MEXT より物品無償貸付の承認を平成 23 年 6 月 22 日に受け、「パルス中性子を用いた原子核科学研究及び中性子核反応測定装置を用いた測定・分析技術の促進」用を使用することが認められた。これにより、2011 年度下期(2011B 期)より、実験課題公募の受付が開始可能となった。申請方法は、以下のサイトをご参照ください。http://j-parc.jp/MatLife/ja/applying/koubou.html

本装置は東日本大震災の影響を受けたものの、現在復旧作業が進められている。実験装置 (ANNRI) の詳細な情報については、上記サイトに記載された実験装置担当者までお問い合わせください。

興味を持たれた皆様の参加を歓迎いたします。

参考文献

- [1] K. Kino, M. Furusaka, F. Hiraga, *et al.*,
“Measurement of energy spectra and spatial
distributions of neutron beams provided by
the ANNRI beamline for capture cross-section
measurements at the J-PARC/MLF”, *Nucl.
Instrum. Methods. Phys. Res. A*, **626**, 58-66 (2011).
- [2] T. Kin, K. Furutaka, S. Goko, *et al.*,
“Development of a 4π Germanium
Spectrometer for Nuclear Data Measurements
at J-PARC,” *the 2009 NSS-MIC Conf. Rec.*,
Orland USA, Oct. 25-31, 2009, N24-2, (2009).
[CD-ROM]
- [3] S. Goko, A. Kimura, H. Harada, *et al.*,
“Measurement of Neutron Capture Cross
Section Ratios of ^{244}Cm Resonances using
NNRI”, *J. Nucl. Sci. Technol.* **47**, [12], 1097-1100
(2010).
- [4] T. Hayakawa, *et al.*, *Astrophys. J.* **628**, 533
(2005).
- [5] S. Goko *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 192501
(2006).

特別記事

福島第一原子力発電所の事故に関連した取り組み

1. 福島第一原子力発電所事故への取り組み

永目諭一郎（日本放射化学会会長）

福島第一原発の事故は、「原発は安全」とする「安全神話」を根底から覆すものでした。事故後5カ月を経過しようとしています。原子炉本体や核燃料の熔融状態さえ分からないという、深刻な事態が依然として続いています。炉心熔融という最悪の事態を引き起こし、多量の放射性物質を環境中に放出し、原発立地周辺の方々の生活を破壊するだけでなく、広く日本全国に、さらには全世界へと大きな影響を及ぼしました。我が国はヒロシマ、ナガサキに続き、フクシマという新たな悲劇を体験することになりました。

これまでに多くの会員のみなさんが原発事故による汚染状況を把握するため、環境中の放射線モニタリングや環境試料中の放射性核種濃度の分析に関わってきました。なかでも福島県内の土壌試料の採取と分析は文科省の管轄のもと、広範な大学や研究所などが参加して全国規模での作業体制ができました。多数の会員のみなさんもこのプロジェクトに参加されています。最近ではセシウム-134、137の分析が集中的に行われていますが、ストロンチウム-90やプルトニウム同位体の分析結果なども報告されています（これまでの活動の概要は、本号でも紹介されています）。また、2011日本放射化学会・第55回放射化学討論会（於長野）における特別セッション－原発問題と放射線教育－でも、これまでの分析結果の発表が数多く予定されています。活発な議論を通してこれまでの総括と今後の方向性を見出していきたいと考えています。前号でも述べましたが、環境中の放射性核種の濃度やその移行挙動に関する詳細かつ正確な情報を発信することは、福島県民のみならず、広く国民に対する私ども日本放射化学会の使命であると考えます。

一方、市民向けの公開シンポジウムなどで、講師やパネリストとしても多くの会員が活動しています。これも放射化学会が社会に向けて貢献できる活動の一つです。今後は学会主催のシンポジウムなどを、福島県を中心に企画していきたいと考えております。みなさんのご協力をお願いいたします。また今回の事故の教訓として、放射能・放射線教育の重要性を痛感しております。9月の放射化学討論会で放射線教育が特別セッションとして取り上げられたのはまさに時機を得た企画といえます。

これまでは関連学協会などの要請に緊急かつ柔軟に対応しておりましたが、今後は9月の放射化学討論会を機に、学会として中・長期的にどう対応していくか、どういう行動を起こしていくか、また系統だったデータの取得や分析結果をどのように活かしていくかなどを検討するため、福島原発事故対応プロジェクト（仮称）をぜひとも立ち上げたいと考えています。長期間にわたる取り組み課題となります。なかでも環境中のストロンチウム-90やプルトニウム同位体など長寿命核種の定量とその汚染状況の把握は本学会ならではの活動になると考えます。また重要な取り組みのひとつとして、周辺住民の方々の生活環境における放射性物質（おもにセシウム）の除染作業があります。故郷を追われた方々が一刻も早く自宅に帰れるように、安心して生活できるような放射線量にまで低下させるための除染作業が必須です。また、原子炉冷却システム（循環注水冷却）で処理された汚染水や海水中からの放射性核種の分離・除去もあります。さらにこれら除染に係わる分離剤の開発なども我々に課せられた課題といえるでしょう。

この原発事故による原子力全般に対する逆風はかなり強いものです。今後の原発の是非も含めて国民的な議論を行う必要があると考えます。ただ

現代社会において、放射性核種や放射線の利用は、医学・薬学、農学などの生命科学や材料科学、環境科学あるいは産業利用など、人々の命や暮らしに直結するツールとなっていることも事実です。私たちは放射化学の重要性に関しては、胸を張ってさらに広く社会や関連学協会へ訴えていく必要があります。

2013年には、本学会が主催して国際会議

APSORC'13が日本で開催されます。フクシマへの取り組みを主題にした特別セッションを組んで、日本放射化学会の活動を報告するとともに、世界的規模での取り組みなどを議論できればと考えています。私たちの専門知識を活かして、本重大事故の克服に貢献するとともに、放射化学のさらなる発展のために、会員のみなさまのご支援、ご協力を重ねてお願い申し上げます。

2. 放射能高汚染水からの無機吸着剤によるセシウムの選択的分離

三村 均、佐藤修彰、桐島 陽 (東北大学)

1. はじめに

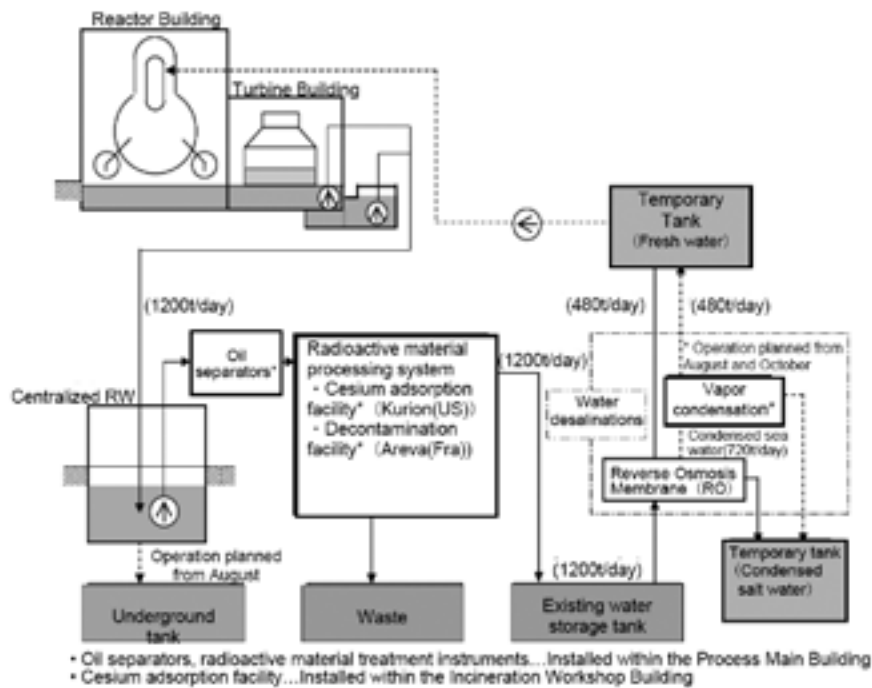
東日本大震災により発生した福島第一原子力発電所事故においては、海水等冷却材の原子炉注入により、原子炉およびタービン建屋内の地下の溜まり水や、敷地内のトレンチなどに放射性物質を多く含んだ数万トン規模の高レベル汚染水 (1) が発生し (表1)⁽¹⁾、作業障害や環境汚染を起こし

ている。その量は原子炉が低温停止するまでの長期にわたり、20万トン以上になると予想されている。

高汚染水処理システム(2)が早期に決定され、現在そのシステムが稼動しようとしている (図1)⁽²⁾。処理システムは、汚染水を浄化して、再び原子炉に冷却水として戻す仕組みで、原子炉安定冷却のために目指す「循環注水冷却」の根幹となる。具体的には、「油分離装置」で、原子炉の潤滑油などの不純物を取り除くことから始まり、ゼオライト鉱物で放射性セシウムを除去する「セシウム吸

表1 滞留水の核種分析結果 (平成23年6月5日時点)⁽¹⁾

号機	1号機	2号機	3号機	4号機	
採取場所	タービン建屋 地下階	タービン建屋 地下階	タービン建屋 地下階	タービン建屋 地下階	
試料採取日	H23.3.26	H23.3.27	H23.3.24	H23.3.24	
検出核種 (半減期) 単位: Bq/cm ³	モリブデン99 (約66時間)	検出限界未満	検出限界未満	検出限界未満	1.0×10^6
	テウネシウム99m (約6時間)	検出限界未満	検出限界未満	2.0×10^3	6.5×10^{-1}
	テルル129m (約34日)	検出限界未満	検出限界未満	検出限界未満	1.3×10^1
	ヨウ素131 (約8日)	1.5×10^5	1.3×10^7	6.8×10^5	4.3×10^3
	ヨウ素132 (約2時間)	検出限界未満	検出限界未満	検出限界未満	1.3×10^1
	テルル132 (約3日)	検出限界未満	検出限界未満	検出限界未満	1.4×10^1
	セシウム134 (約2年)	1.2×10^5	3.1×10^6	1.5×10^6	7.8×10^3
	セシウム136 (約13日)	1.1×10^6	3.2×10^6	2.3×10^6	3.7×10^6
	セシウム137 (約30年)	1.2×10^6	3.0×10^6	1.8×10^6	8.1×10^3
	バリウム140 (約13日)	検出限界未満	6.0×10^5	5.2×10^6	検出限界未満
	ランタン140 (約2日)	検出限界未満	3.4×10^5	9.1×10^3	4.1×10^{-1}

図1 高汚染水の処理システム⁽²⁾

着塔」を通過。さらに、特殊な薬品で放射性物質を沈殿させる「凝集沈殿による高除染装置」に移し、最後に「塩分除去装置」で淡水化する。本システムでは、1日に1,200トンの処理が可能で、年内の処理を目指す計画とされている。高汚染水の処理に伴い、約2,000立方メートルの高レベル放射性廃棄物が出る見込みだが、処理・処分方法などは未定で、システム稼働後も課題は山積している。

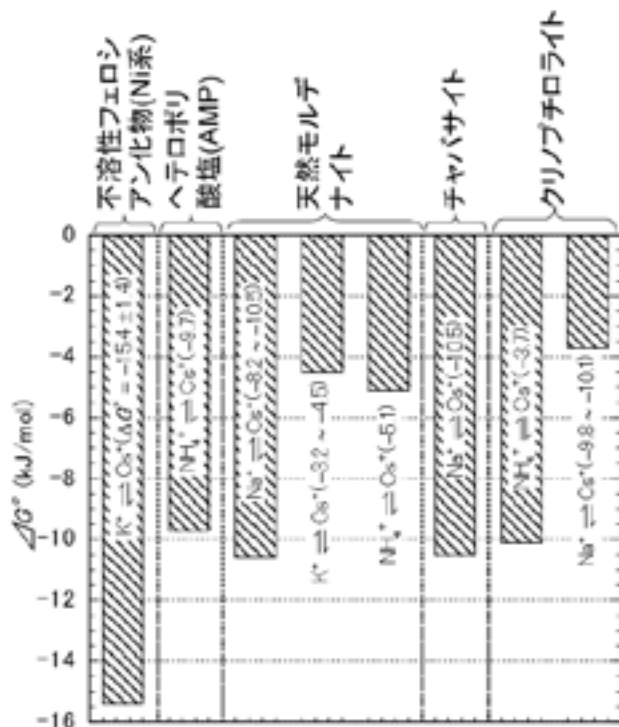
吸着剤による高汚染水中のセシウム、ストロンチウム、ヨウ素の分離と除染について、JAEA・大学有志チーム（日本原子力研究開発機構、北海道大学、東北大学、東京工業大学、京都大学、九州大学）は、原子炉事故直後から、種々の吸着剤について600点に及ぶ試験データを取得し、汚染水処理システムの設計に役立つ吸着データ集として原子力学会バックエンド部会HPに公開してきた⁽³⁾⁽⁴⁾。一方、原子炉より大気中へ放出されたセシウムやヨウ素は福島県を中心に広範囲に拡散し、汚染された雨水や土壌等の対策が緊急の課題となっている。事故後数か月を経過した現在、セシウム (^{137}Cs , ^{134}Cs) による放射能が主であり、セシウムの分離が重要となる。ここでは、種々の

無機系吸着剤によるセシウムの分離特性や汚染水処理について述べ、東北大で実施したトレーサーを用いる海水中のセシウムの分離・除去試験について紹介し、二次廃棄物の処理・処分および今後の課題について述べる。

2. セシウム吸着剤と分離特性

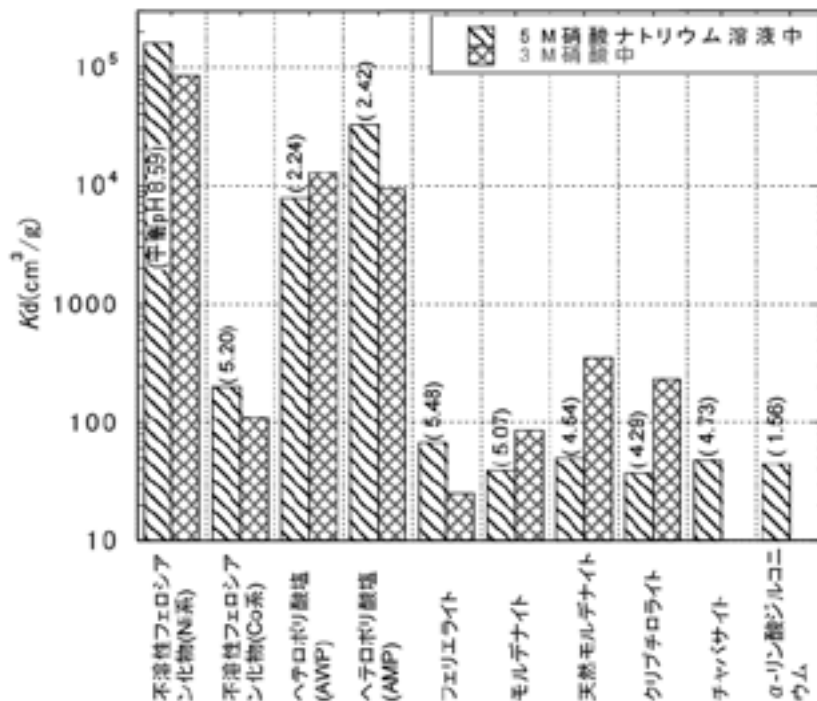
2.1 イオン交換特性

Csの選択的吸着剤は、主に無機イオン交換体に関して数多くの報告がある⁽⁵⁻⁷⁾。放射性高汚染水に関しては、耐放射線性の高い無機イオン交換体の使用に限定される。多くの無機イオン交換体のCsのイオン交換吸着特性が調べられており、イオン交換吸着の選択性を示す指標（イオン交換自由エネルギー変化、 ΔG^0 ）が報告されており、この値がCsを吸着する能力を比較する上で大きな目安となる。図2にはCsに高選択性を示す無機イオン交換体のイオン交換自由エネルギー変化を示す⁽⁸⁻¹¹⁾。マイナス値が大きいものほどCsに選択性が高く、序列としては不溶性フェロシアン化物>ヘテロポリ酸塩（AMP）>ゼオライト群である。実際に高濃度（5 M）のNa塩溶液および高濃度（3 M）の硝酸溶液からのCsの分配係



ゼオライト群は K^+ 、 NH_4^+ と Cs^+ の交換では、マイナス値がより低下する。上記の値は、イオン交換等温線からキーランドプロットをもとめ、積分して算出している。Natural Zeolite (G. V. Tsitsishvili, 1992)⁽⁸⁾、原子力誌 (Mimura, 1997, 2001)^{(10) (11)} より抜粋。

図2 Cs 選択性吸着剤のイオン交換自由エネルギー変化



液固比 (V/m) = 100 (7 cm³/0.070 g)、粉末状 (100 メッシュより細)、¹³⁷Cs 添加トレーサー法、10 ppm Cs⁺、25°C、5 日振とう、遠心分離 (10,000rpm, 15 分)、初期 pH4.09。

図3 各種無機イオン交換体のCsの分配係数値

数値 (K_d (cm³/g)、Csの固相と液相での濃度比)を測定すると図3の結果が得られ、不溶性フェロシアン化物 (KNiFC, KCoFC) やヘテロポリ酸塩 (AMP, AWP) が 10³ cm³/g 以上のきわめて高い分配係数 (吸着率としては90%以上)を示す。ただしこれらの高選択性吸着剤は、そのままでは微粉末粒子であり取り扱いが難しく造粒法の開発が必要である。従来より無機多孔体(シリカゲル、ゼオライト)への担持複合体が数多く研究されている^(6,12-15)。一方、ゼオライトは、Na塩溶液からでもCsに高い吸着性を有しており、わが国に豊富に産出すること、粒状としてカラム吸着分離

に使用できる点で現場でのCs除染用吸着剤として優れている。

3. ゼオライトおよび不溶性フェロシアン化物の結晶構造と吸着特性

ゼオライトはアルミノケイ酸塩でありわが国に多量に産出し極めて安価である。Csに選択性の優れたゼオライトは、天然および合成モルデナイト(図4)、クリノプチロライト、合成フェリエライトなどで、いずれもSi/Al (~5)が大きく、トンネル状構造を有しており孔路内にCsイオンが吸着する⁽¹⁶⁾。米国産の“ちょうちん形”のチャ

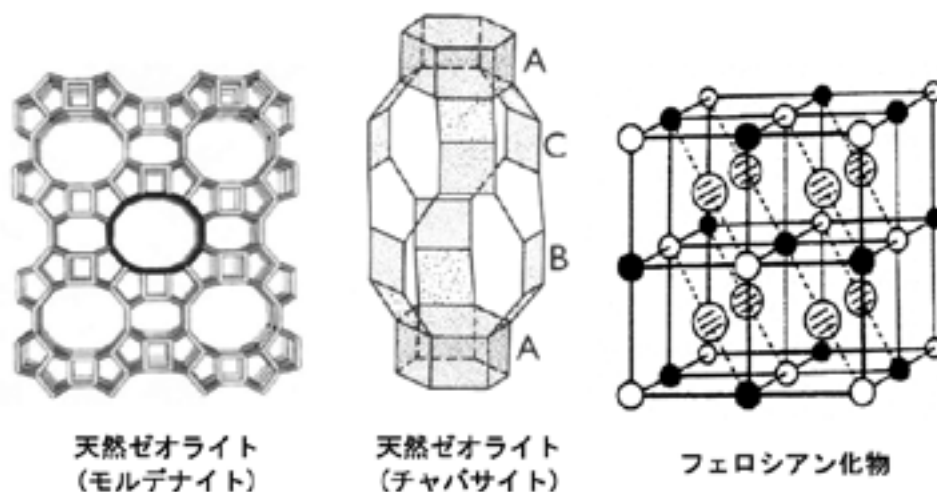


図4 Cs吸着能が高いゼオライト(モルデナイト(左)、チャバサイト(中)、不溶性フェロシアン化物(右))の格子構造⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾

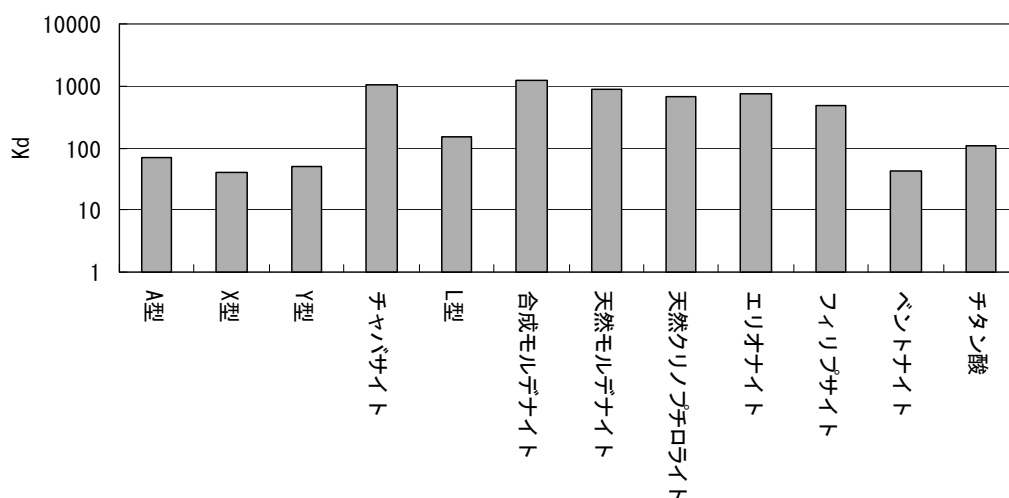


図5 実海水からの各種ゼオライトに対する¹³⁷Csの分配係数値(K_d)の比較 [Cs^+]_{tot.} = 1ppm (初期濃度)

バサイトも Cs 吸着性が高く、内部の空洞に Cs が吸着する⁽⁹⁾。TMI 事故の高汚染水処理に用いられた実績がある。ゼオライトによる Cs の選択的分離および固化に関する基礎的研究は、日本、米国およびフィンランド等で実施された。東北大学で実施した粉末状の各種ゼオライトを用いた実海水からの放射性 Cs の吸着結果を図5に示す。モルデナイトおよびチャバサイトの K_d 値で $10^3 \text{ cm}^3/\text{g}$ 程度の値を示し、90%程度の Cs を吸着することが可能である。

不溶性フェロシアン化物は面心立方格子 (*fcc*) 構造で⁽¹⁷⁾、格子内のトンネル状孔路に位置する交換性陽イオン (K^+ , Ni^{2+} , Co^{2+}) と Cs^+ がイオン交換する。イオン交換吸着が高選択的であり瞬時であるため、“沈殿形成”と表現することも多い。厳密には製法に応じて交換性陽イオンの組成は変化し、非化学的当量組成を有する⁽¹⁸⁾。

4. 各種吸着剤による海水からの放射性 Cs および Sr の吸着試験

高汚染水処理システムにゼオライトを適用する場合には、カラム処理操作が基本である。原子力学会有志チームによる、粒状ゼオライトを中心とした実海水からの Cs の基本的な吸着特性の評価実験が実施された⁽⁴⁾。東北大学では、各種吸着

剤による実海水からの Cs-137 の吸着試験を、Cs の吸着速度、濃縮海水からの吸着、吸着容量に関して検討し、その結果を公表した⁽³⁾。

図6は各種吸着剤による実海水からの Cs-137 の吸着速度を示す。実験は反応容器内の実海水に Cs-137 を添加し、一定時間毎に液相をサンプリングして γ 放射能を測定し、ゼオライトへの Cs の吸着 (分配係数値) の時間変化を調べた。時間経過とともに K_d 値は上昇傾向を示し、ゼオライトは24時間後にほぼ平衡に近づく。吸着性序列 (Cs の K_d 値の序列) は、フェロシアン化物 > モルデナイト、チャバサイト > クリノプチロライト > A, X であり、図2の選択性の序列とよく対応している。ゼオライトの中で、モルデナイトおよびチャバサイトは、24時間後に K_d 値が $800 \text{ cm}^3/\text{g}$ 程度を示し (90%吸着)、粉末状ゼオライトの結果 (図6) に近づくことが分かる。実海水中の Cs-137 の放射能濃度はミリポアフィルター ($0.45\mu\text{m}$) によるろ過後も変化せず、塩酸で pH 調整 (pH 2.4) しても、吸着結果にはほとんど変化が認められないことから、化学種として Cs イオンとしてのイオン交換吸着が支配的である。

図7は各種吸着剤による実海水からの Sr-85 の吸着速度を示す。時間経過とともに K_d 値は上昇傾向を示し、24時間以降でほぼ平衡に近づく。

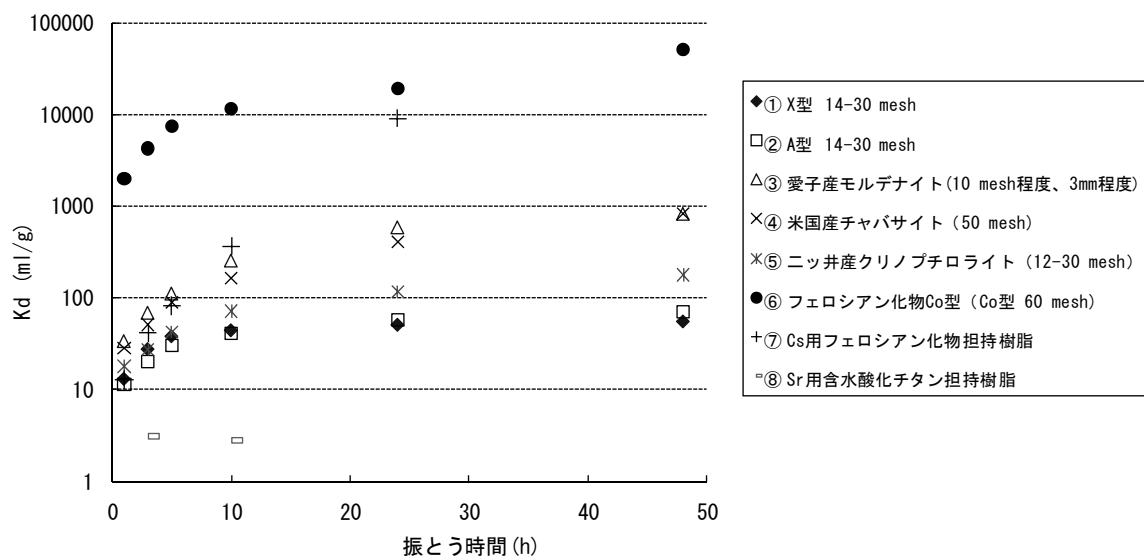


図6 各種吸着剤による実海水からの Cs-137 の吸着速度 ($[\text{Cs}^+]_{\text{tot}} = 1\text{ppm}$ (初期濃度))

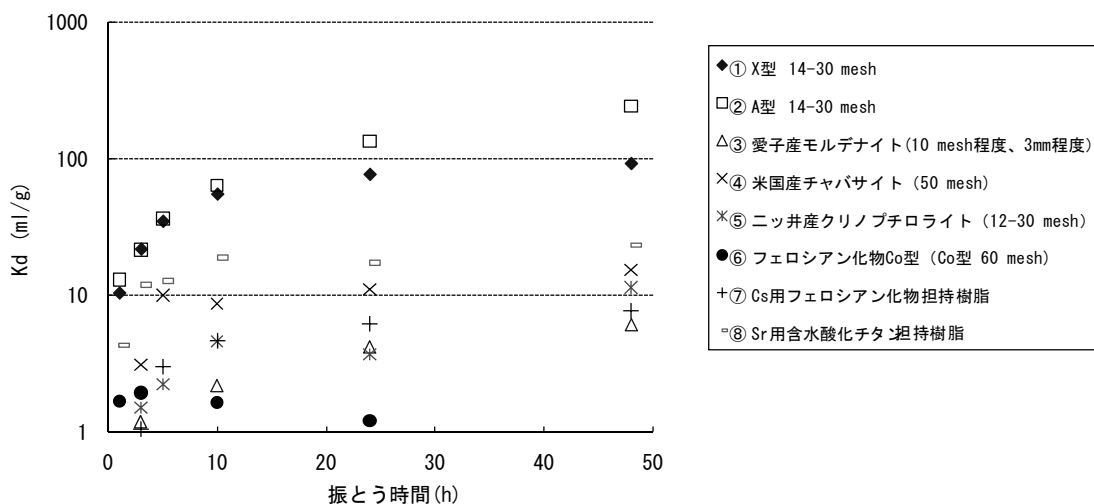


図7 各種吸着剤への実海水からのSr-85の吸着速度 ($[Sr^{2+}]_{tot} \approx 8.5 \text{ ppm}$ (初期濃度))

Csより吸着性が低い、吸着性序列 (Srの K_d 値の序列)は、A型ゼオライト>X型ゼオライト>含水酸化チタン樹脂>チャバサイト>クリノプチロライト>モルデナイトであった。Csの吸着とは逆の傾向を示す。A型ゼオライトの K_d 値は $240 \text{ cm}^3/\text{g}$ (A型ゼオライトはTMI事故時に使用実績有)を示した。

ここでバッチ吸着実験の分配係数と速度定数を関連付けるため、振とう時間を3条件以上変えて

取得されたデータを抽出し、各データで最も大きい振とう時間での値を採用 (24時間あるいは48時間)し、吸着速度との関係を調査した。吸着速度は、 $d[C_s]/dt = -k([C_s] - [C_s]^*)$ と仮定し ($[C_s]^*$: 平衡になったときのCs濃度)、時間に対して $([C_s] - [C_s]^*)$ を片対数プロットすると直線関係が得られる。この傾きを k とし、Csは愛子産モルデナイト (約3 mm)の値との比、SrはA型ゼオライト (14-30 mesh)との比として

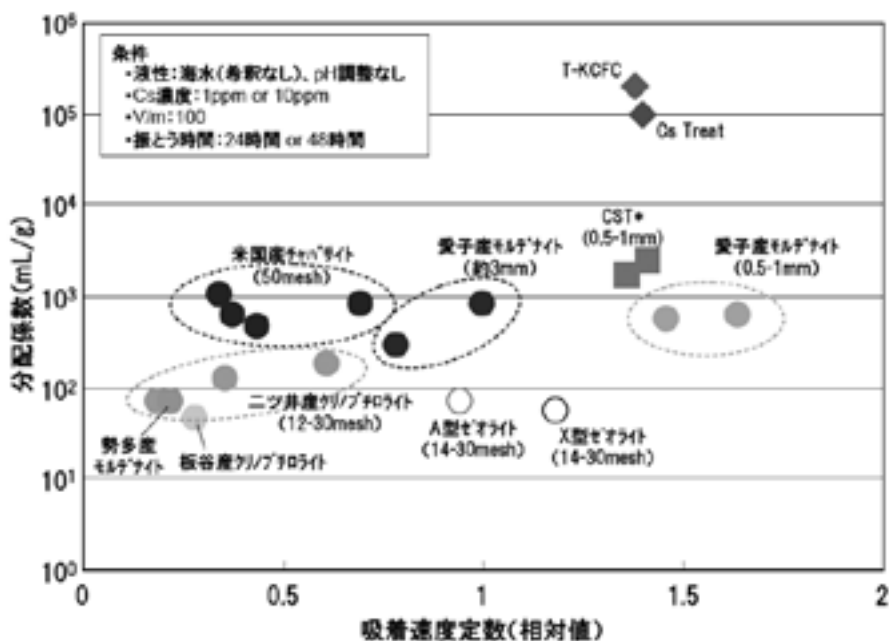


図8 各種Cs吸着剤のCsの分配係数と吸着速度定数との関係

整理した。図8は各種Cs吸着剤のCsの分配係数と吸着速度定数との関係を示す。図から明らかのように、Csの分配係数は前述の通り、高選択性の不溶性フェロシアン化物およびCST（結晶性シリコチタネート）、ゼオライト群に大別される。ゼオライト群は、分配係数値が $10^2 \sim 10^3$ の範囲であるが、吸着速度には大きな差が認めら

れる。このことは、ゼオライトの純度、表面形態、マクロ孔などの物理化学特性に依存していると考えられる。ゼオライト利用に関しては、吸着特性以外に、キャラクタリゼーションを厳密に評価し、固化処理まで含めた総合的な評価で判断することが重要である。図9に示すSrの場合では、構造内部に大きな空洞（スーパーケージ）を有す

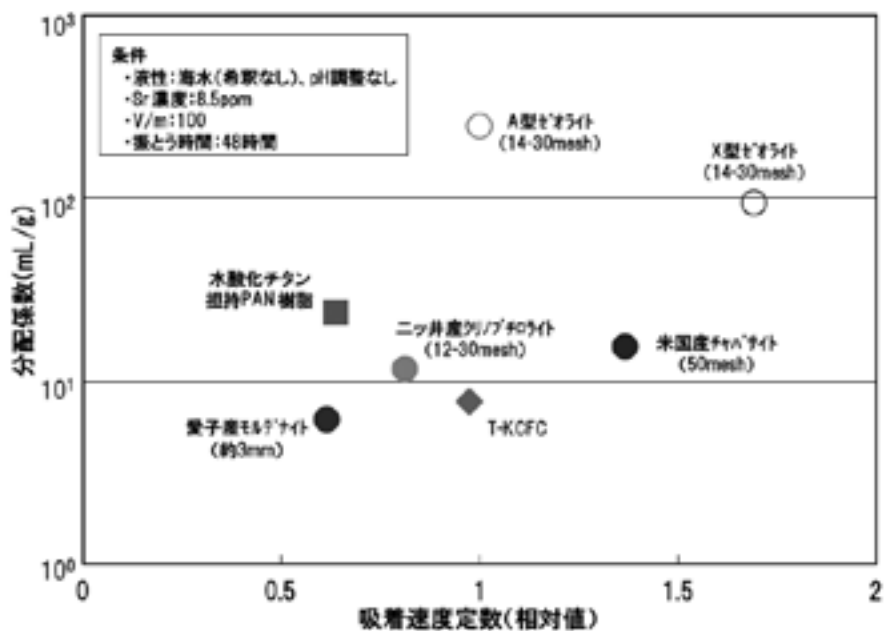


図9 各種Sr吸着剤のSrの分配係数と吸着速度定数との関係

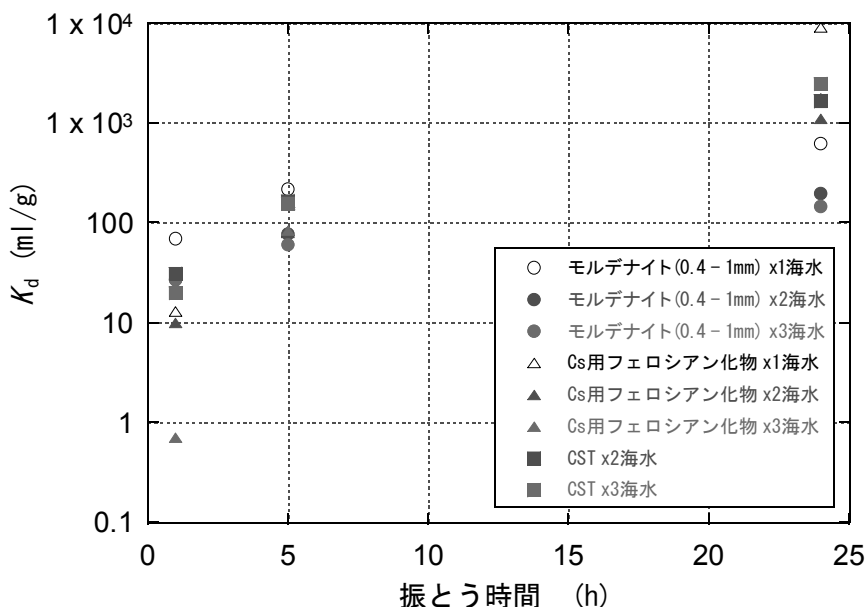


図10 濃縮海水（2倍濃縮、3倍濃縮）からのCsの吸着 $[Cs^+]_{tot} = 1ppm$ （初期濃度）

る A および X 型が Sr に高吸着性を示す⁽⁹⁾。チャバサイトもわずかに吸着性を示すが、クリノプテロライトおよびモルデナイトの吸着性は低い。

図 10 は濃縮海水 (2 倍濃縮、3 倍濃縮) からの Cs の吸着を示す。モルデナイトは、実海水に比べ、海水濃縮度に応じて K_d 値が低下する傾向があり、2 倍濃縮で $K_d = 197$ 、3 倍濃縮では $K_d = 146$ であった。不溶性フェロシアン化物担持樹脂と CST (結晶性シリコチタネート) 樹脂の場合、濃縮海水においても 10^3 以上の高い K_d 値を維持している。吸着性の序列 (Cs の K_d 値の序列) は、CST (IE911) ($K_d = 2,459$ [3 倍濃縮]、不溶性フェロシアン化物担持樹脂 ($K_d = 1,778$ [3 倍濃縮]) \gg 愛子産モルデナイト ($K_d = 146 \sim 197$) (いずれも微粉末化は少ない) であった。なお、実験後の平衡 pH はモルデナイトや不溶性フェロシアン化物担持樹脂ではあまり変化しなかったが、CST では pH ~ 3 まで低下した。

図 11 は海水からのゼオライトへの Cs の吸着等温線およびラングミュアプロットを示す。Cs の濃度を変化させて平衡吸着量の変化を示している。図から明らかのように、吸着等温線 (Cs 平衡吸着量 vs Cs 平衡濃度) は上に凸であり Cs に高選択性を示唆している。吸着形式としては、ラングミュア (Langmuir) 型吸着であり、ラングミュアプロットより、飽和吸着量は 0.716 meq/g (9.5 wt\%) であった。なお、海水の予想される Cs 濃度領域 (1.5 ppm 程度) での Cs 含有率は 0.0845 wt\% と推定される。

以上の結果をまとめると、天然産ゼオライトにより海水から Cs を選択的に吸着できることが確

認された。また高選択性を示す不溶性フェロシアン化物および CST は Cs の高除染に効果的である。各吸着剤での海水からの Cs 吸着性の序列は、イオン交換自由エネルギー変化の序列とよく対応していることが確認された。

5. Cs 吸着ゼオライトの処理・処分

高汚染水の除染で使用された処理媒体 (固体廃棄物) の処理は、ゼオライトに関しては、TMI 事故での水中脱塩装置 (Submerged Demineralizer System, SDS) の報告が詳細になされている⁽¹⁹⁾。図 12 は TMI-2 号炉 SDS/EPICOR-II システムフローを示す⁽²⁰⁾。システムは、 $100 \mu\text{Ci/ml}$ 以上の比較的放射能濃度の高い汚染水を修理するために設計され、SDS による処理済み液は、改良されたイオン交換樹脂を用いる EPCOR-II システムにより更に精製処理された。原子炉建屋汚染水の処理量は約 $2,300 \text{ m}^3$ であった。一個の SDS ライナーには、最大 $55,000 \text{ Ci}$ 程度の Cs と Sr が保有され、内蔵放射エネルギーが大きい。そのため、ゼオライトのボイド中における水の放射線分解により、水素発生が著しく起こる結果となり、真空乾燥、水素-酸素再結合の特殊技術が開発された。

SDS ゼオライトの不動体化を目的とした固化処理は、①ホウケイ酸ガラス、ガラスセラミックス又は玄武岩等を用いるガラス固化、②高密度コンクリート固化、③人造鉱物固化、④多重構造容器による処分が検討され、特に、ホウケイ酸ガラス固化研究は、米国パシフィック・ノースウェスト研究所でイン・キャン溶融 (In-Can Melting)

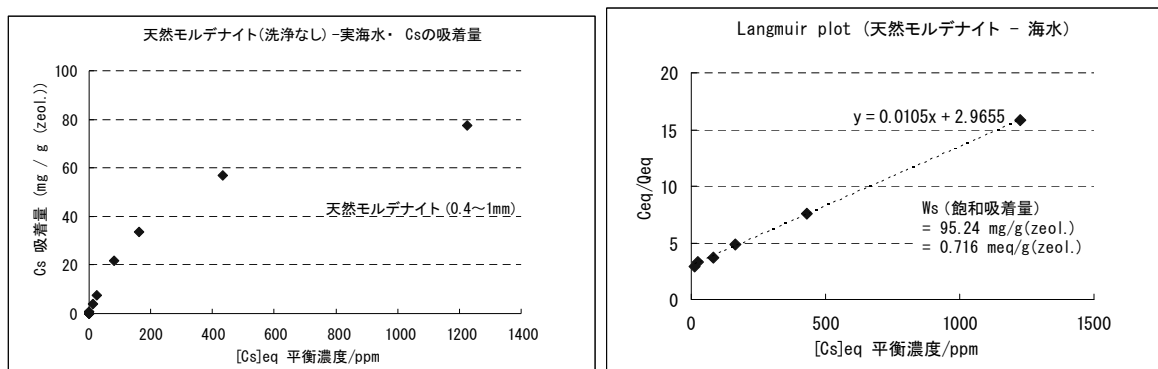


図 11 海水からのゼオライトへの Cs の吸着等温線 (左図) と Cs 吸着のラングミュアプロット (右図)

プロセス(図13)が開発された⁽²¹⁾。ガラス組成は、 B_2O_3 (6.0 wt%), Li_2O (6.0), Na_2O (9.0), TiO_2 (8.0), SiO_2 (11.0)、ゼオライト(チャバサイト)(60.0)

であり、溶融温度は1,050°Cで実施された。安全性の確保として、吸湿性であるゼオライトを取り扱う場合には、水の放射線分解で生成する可燃性

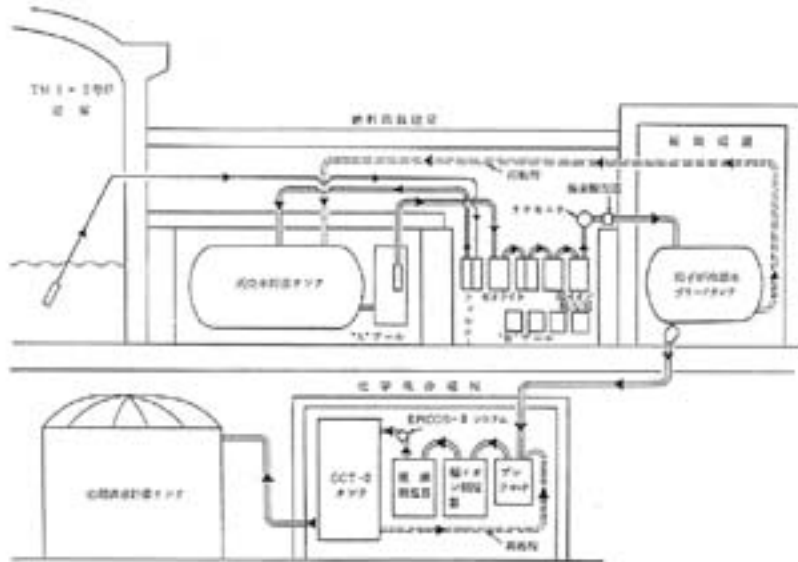


図12 TMI-2号炉 SDS/EPICOR-II システムフロー⁽²⁰⁾

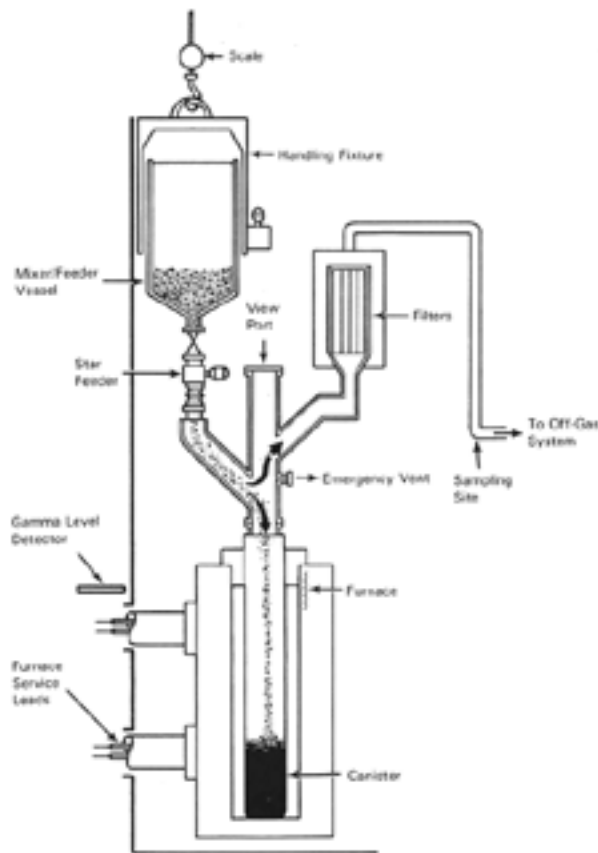


FIGURE 1. Zircaloy vitrification system and off-gas sampling site location.

図13 イン・キャン溶融(In・Can Melting) プロセス⁽²¹⁾

ガス（水素）の措置であり、触媒（白金/パラジウム触媒）を用いた酸素-水素再結合システム、水分除去のための真空乾燥システム開発が行われた。

わが国では、東北大学および原子力機構等で無機イオン交換体を用いた、発熱元素分離・固化の技術開発がなされている^(22, 23)。人造鋳物固化の一例として、各種ゼオライトにCsとSrを吸着後、高温で焼成して発現したCsとSr固定相のキャラクタリゼーション（化学的安定性、機械的強度、相変化、Cs揮発性、Cs浸出性）が詳細に研究されている⁽²²⁾。表2はCs, Sr吸着ゼオライトの高温での再結晶した鋳物相を示す。天然産モルデナイト、クリノプチロライトは高温焼成（>1,000℃）で非晶質化し、溶融が開始する。焼成固化体（1,200℃で3時間焼成）からのCs浸出性は、

$10^{-9} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{d}$ ときわめて低いことが報告されている⁽²⁴⁾。

高汚染水処理により発生するCs吸着ゼオライトは、再処理により発生する高レベル放射性廃棄物やTRU廃棄物に相当する、高放射線量の廃棄物となる可能性がある。現在の放射性廃棄物処分の基本方針では、今回のような発電所の重大事故により発生した高放射線量の廃棄物は想定されていないため、現時点では発生するCs吸着ゼオライトの廃棄物分類を明示することはできない。今後の法体系の整備が必要となる。仮に、この廃棄物を「放射能レベルの比較的高い発電所廃棄物」と見なし、廃棄体中の主要放射性核種（ β, γ 核種）濃度の上限が $1 \times 10^{15} \text{ Bq/t}$ 程度であれば、地下50～100 mの深度の地中に埋設処分する「余裕震度処分」に該当する可能性もあるが⁽²⁵⁾、これ

表2 ゼオライトの高温焼成時の相変化⁽²³⁾

Zeolite	Si/Al ratio	Durability [HNO ₃](M)	Transformation by calcination	
			Cs - form	Sr - form
A	0.7-1.2	<0.1	900°C >1000°C Carn. → Neph.+Pol.	800°C >1100°C Am. →(Hex.→) Tric.
X	1-1.5	<0.1	800-900°C >1100°C Am. → Pol.	900°C >1100°C Am. →(Hex.→) Tric.
Y	1.5-3	----	1000°C >1100°C Am. → Pol.	900°C 1200°C Am. → Tric.
Chabazite	2	<0.1	>1200°C Pol.	>1100°C Tric.
Phillipsite	2.2	----	500-1000°C Cs-feldsper?+Pol.	----
Erionite	3	----	1000°C Erionite+CsAlSiO ₄	----
SM	4.5-5	----	1100°C 1200°C Am. → CsAlSi ₃ O ₁₂	1000°C 1200°C Am. →Tric.+C.+Q.
NM	4.2-5	<1	>1000°C Am.	>1000°C Am.
CP	4.2-5	<1	>1000°C Am.	>1200°C Am.
Ferrierite	6.2-8.4	(10)	1200°C Am. or CsAlSi ₃ O ₁₂ ¹⁾	----

1) CsAlSi₃O₁₂ with Al₂O₃ binder

Carn. : Carnegieite (NaAlSiO₄), Neph. : Nepheline (NaAlSiO₄), Am. : Amorphous, Pol. : Pollucite (CsAlSi₃O₉), Hex. : Hexagonal (SrAl₂Si₂O₉), Tric. : Triclinic (SrAl₂Si₂O₉), C. : Cristobalite, Q. : α -quartz

以上の放射性核種濃度になる場合や、この廃棄物を「使用済燃料の処理」により発生した廃棄物と見なした場合は、地下300m以深の地層に処分する「地層処分」を行うことになる。いずれにしても発生する廃棄物の性状および発生量が判明した後には処分についての設計が必要となる。

6. まとめと今後の課題

以上の結果をまとめると、わが国の天然産ゼオライトにより海水からCsを選択的に吸着できることが確認された。また高選択性を示す不溶性フェロシアン化物およびCSTはCsの高除染に効果的であった。各吸着剤での海水からのCs吸着性の序列は、イオン交換自由エネルギー変化の序列とよく対応していることが確認された。高汚染水からの連続的なCs吸着システムの構築には、より高精度な吸着データの蓄積、吸着剤の化学的および機械的安定性を向上させるための工夫、効率的で安全性の高い処理・処分法の検討が重要である。今後検討すべき課題を図14に列挙する。これらの課題を克服することにより、わが国の優れた吸着剤を有効に利用したコンパクトで効率的な独自の高汚染水処理システムを、産官学の協力体制の元で早急に実現されることが期待される。

謝辞

本論文をまとめるに当たり、貴重な吸着データのまとめを行って頂いた(株)日立製作所 日立研究所 鴨志田守氏、ゼオライト試料を提供していただ

いた新東北化学(株)およびゼオライト工業会の関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 原子力災害対策本部、「原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書」－東京電力福島原子力発電所の事故について－、IV-91、2011年6月
- 2) 東京電力 HP: <http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/fl-roadmap/11042701-j.html>
- 3) 福島第一原子力発電所内汚染水処理技術のための基礎データ収集。日本原子力学会バックエンド部会 HP、(2011)。
- 4) 清水智史、長岡亨、原子力バックエンド研究、18(1)、pp.37-39(2011)。
<http://www.nuce-aesj.org/doku.php>
- 5) 三村均、日本イオン交換学会誌、19(2)、pp.127-140(2008)。
- 6) 三村均、小野寺嘉郎、東北大学工学研究所彙報、56、pp.73-83(2000)。
- 7) 三村均、基礎科学ノート(先端基礎研究センター設立10周年記念特集号)、Vol.11、pp.63-67(2003)。
- 8) G. V. Tsitsishvili, T. G. Andronikashvili, G. N. Kirov and L. D. Filizova, NATURAL ZEOLITES, p.11, p.169(1992), Ellis Horwood.
- 9) D.W.Breck, ZEOLITE MOLECULAR SIEVES, pp. 529-592(1984), Robert E. Krieger Publishing Company.

1)吸着能比較の高精度化
粒度、交換性カチオンを規格化して厳密な比較を実施すべき。
2)吸着剤の吸着性能の向上および高強度化
焼成処理、造粒化、表面改質等による強度、耐性の高度化 多機能ゼオライト、吸着剤の複合化等
3)吸着プロセスの高度化
吸着プロセスの設計・評価、プロセス材料の評価
4)使用済み吸着剤の固化処理技術
セメント固化、焼成固化、ガラス固化、金属マトリックス固化等
5)固化処理時の安全性評価
発熱量、水素発生、熱分解、Cs揮発性、容器との両立性等
6)処分時の安全性評価
浸出性評価、含有核種を考慮した処分方法の最適化

図14 わが国独自の吸着システム構築に関する課題

- 10) Hitoshi MIMURA, Mikio SAITO, Kenichi AKIBA and Yoshio ONODERA, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **38** (10), 872-878 (2001).
- 11) Hitoshi MIMURA, Jukka LEHTO and Risto HARJULA, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **34** (5), 484-489 (1997).
- 12) Hitoshi MIMURA, Masanori KIMURA, Kenichi AKIBA and Yoshio ONODERA, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **36** (1999), 307-310.
- 13) Hitoshi MIMURA, Masanori KIMURA, Kenichi AKIBA and Yoshio ONODERA, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **35** (1998), 392-395.
- 14) HITOSHI MIMURA, MASANORI KIMURA, KENICHI AKIBA, YOSHIO ONODERA, *SEPARATION SCIENCE AND TECHNOLOGY*, **34** (1999), 17-28.
- 15) Hitoshi MIMURA, Masanori KIMURA, Kenichi AKIBA and Yoshio ONODERA, *SOLVENT EXTRACTION AND ION EXCHANGE*, **17** (1999), 403-417.
- 16) 小野嘉夫、八嶋建明、ゼオライトの科学と工学、講談社サイエンティフィク (2000)。
- 17) Hitoshi MIMURA, Jukka LEHTO and Risto HARJULA, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **34** (1997), 582-587.
- 18) H. MIMURA, N. KAGEYAMA, K. AKIBA, M. YONEYA and Y. MIYAMOTO, *Solvent Extr. Ion Exch.*, **16** (1998), 1013-1031.
- 19) U.S.DOE, DOE/NE-0012 (1981).
- 20) 早田邦久、原子力工業 **30** (10)、pp. 55-61 (1984)。
- 21) G. H. Bryan, R. W. Goles, C. A. Knox and D.E. Knowlton, *Nuclear and Chemical Waste Management*, **7**, pp. 141-148 (1987).
- 22) 三村均、山岸功、秋葉健一、日本化学会誌、1989, No. 3, 621 ~ 627。
- 23) 山岸功、JAERI-Review, 2001-027 (2001)。
- 24) 三村均、菅野卓治、日本原子力学会誌、**19**, 170-176 (1977)。
- 25) 原子力安全委員会、低レベル放射性固体廃棄物の埋設処分に係る放射能濃度上限値について、(2007)。

3. 地球惑星科学連合と日本放射化学会の連携プロジェクト

篠原 厚 (阪大院理)、齊藤 敬 (阪大安管)

1. 連携プロジェクト立ち上げの経緯

2011年3月11日に発生したM 9.0の大地震はそれに伴う津波とともに、関東北部から東北の太平洋岸を中心に甚大な被害をもたらした。さらに追い打ちをかけ、ご周知の通り、もう一つの大きな被害が東京電力福島第一原子力発電所の事故によってひきおこされた。原子力発電所が機能を失い、原子炉施設から放射性核種が周辺地域に飛散し、気象条件に応じて周辺に拡散した。その結果、周辺住民に緊急避難等の甚大な影響を与え、農耕地や海洋の汚染が1次産業を主とする当該地域に深刻な問題を投げかけ、さらには、地球規模の大気・海洋汚染へと問題が広がっている。このよう

な状況下、放射性物質による環境汚染の影響を少しでも客観的に予測することは喫緊の課題と言える。この課題に速やかに、かつ効率的に取り組むべく、地球惑星科学連合の主に地球化学と大気化学、および放射化学の研究者が連携して、科学的見地に立った環境汚染の測定を系統的に進めるプロジェクトをスタートさせた。

本プロジェクトは、当初は、地球惑星科学連合の中で科学研究費(緊急課題)の申請を想定した研究体制の構築を検討していた。この過程で、地球化学会会長の海老原充先生から放射化学会の永目会長に、放射性核種分析の面での協力要請があり、三役で相談の結果、私が放射化学会の窓口として、本プロジェクトに加わることで、放射化学との連携を行うこととなった。海老原先生が中心としてまとめられた科研費は、申請はしたもののペンディングのままであるが、この枠組みを元に

して本稿で紹介する環境測定が進められている。文部科学省の土壤調査については、本連携プロジェクトで当初から予定され文科省と交渉してきたものであるが、実際には、本連携チームと、核物理研究センター（RCNP）の谷畑先生、藤原先生が中心に核物理懇談会ベースに別途検討してきた土壤調査計画が合流し実施される形となった（2011.4.11.RCNPにおける会合）。

以下、放射化学会の窓口役として、私が把握している範囲で、連携プロジェクトの活動内容と現状を紹介する。また、土壤調査プロジェクトについては、現場でプロジェクトの実施に尽力された阪大・安管の齊藤敬さんに、その実施内容を紹介頂く。

2. 本プロジェクトの概要と現状

このプロジェクトでは、大気、降水、土壤、地下水のサンプリングを系統的に、かつ広範囲に行い、精密な放射化学分析を実施することにより、正確で客観的な情報を取得し、関係機関や国民に提供すると同時に、出来るだけ多くの科学的知見を抽出し広く社会に公開する。具体的には、原子力発電所から環境中に放出された放射性物質を時間的、空間的に追跡し、環境に放出された放射性核種の種類と量について全体像を把握するとともに、環境中への放射性核種の輸送・拡散・沈着・蓄積の諸過程を詳細に記述することを目的としている。そのために、全体をコントロールし研究を推進する総括班を中心に、放射性核種分析班、大気試料班、降水試料班、土壤試料班、シミュレーション班（後日追加）を立ち上げ、それぞれ連携して活動を進めている。

私が関与している分析班では、はじめに、放射線測定が可能な主な施設の測定器の保有状況のアンケートを取った。また、その際、東北や関東地区にある施設での測定器やその周辺の汚染状況についても記載頂いた。アンケートの結果、最終的にはこの種の測定に協力できる可能性のある施設として25施設、Ge半導体検出器保有数は70台（そのうちプロジェクトに供することが出来る測定器は40台程度）に及んだ。その結果に基づき、大気や降水試料と土壤試料が継続的に出てきた場合の測定担当の調整を行うことにしていた。しかし

ながら、実際には、特に、土壤測定については、文科省との交渉過程で（一部の）主な施設のみが文科省プロジェクトの枠組みに記載され、その施設のみしか測定に関与できない状況になってしまい、一部、積極的に申し出頂いた何人かの方には申し訳ないことになった。この土壤測定については、後半に詳細に紹介される。

一方、初期より始まっていた大気や降水試料の測定については、すでに分析担当も多くの捕集サイトについて決められており、一部について放射化学関係の施設に分析を依頼し、継続的に捕集と分析を進める体勢が出来た。しかしながら、当初の分析依頼が一カ所に集中していたため、大幅に測定が遅れていることが分かり、後日、貯まっていた試料を放射化学関係の施設に急遽測定をお願いすることになった。この点は、もう少し初めの段階から全体を把握し分析担当の調整に関与すべきであったと反省している。現在は、環境への放射性物質の放出が落ち着いたとの判断で、捕集サイトを再検討し、長期的に測定サイトを固定し、それらについて、捕集担当施設と分析担当施設の対応付けを再調整し、現在も捕集と測定が継続されている。図1にサンプリング維持サイトのマップ、表1にその捕集担当と分析担当施設の一覧を示す。なお、この部分の研究活動については、現時点では予算の裏付けはないが、長期的測定になった時点で、ボランティアベースから研究のスタンスに移ったとの共通の理解がある。今後の予算の獲得と、研究発表における協同研究関係を作る（具体的には論文発表の際の共著など）ことで了解されている。実際に、今年の放射化学討論会の福島セッションに、数件の本プロジェクトが関連する環境測定データの発表がなされると思われる。

ここで予算と体制に関して少し付言しよう。土壤測定については（後半で詳しく述べられるが）、ご周知の通り、文部科学省のプロジェクトとして実施されたため、かなりの予算が付き、延べ1000人・日もの多くの人々が参加し、2000点（10000試料）以上に及ぶサンプリングがなされた。ただ、実施の形態は役人独特の発想で、文科省からはJAEAに委託する形が取られた。JAEAからは3分の1の測定を分析センターに再委託、残りの3

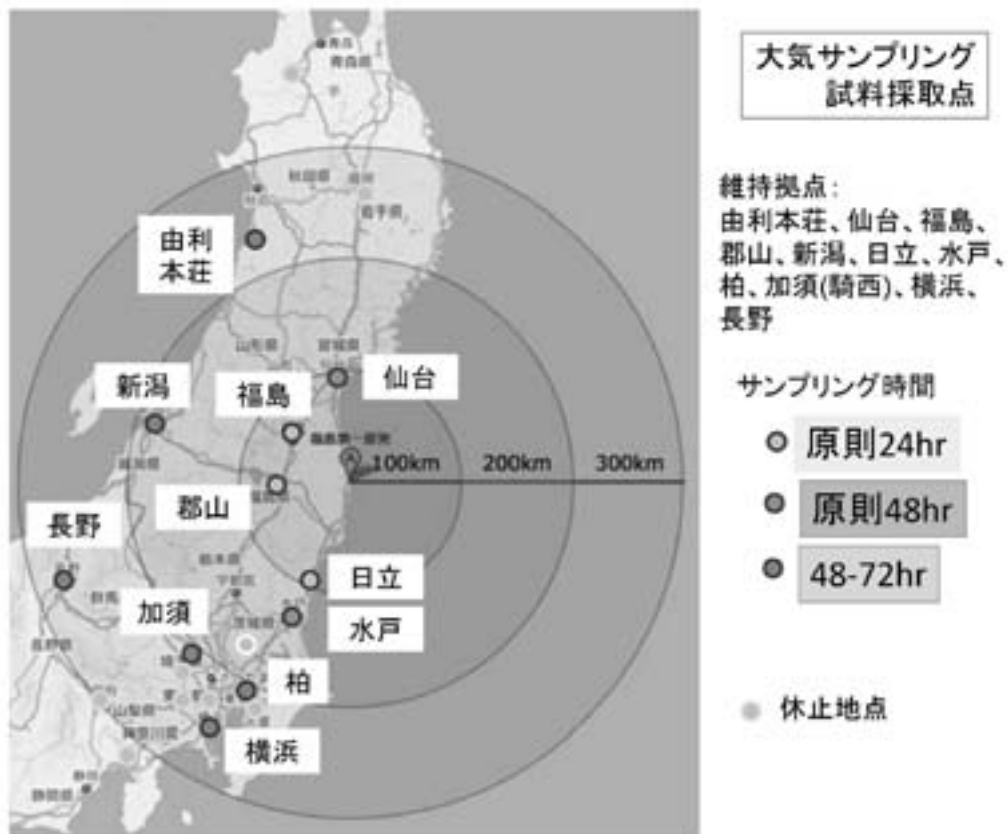


図1 維持サイトのマップ。11箇所のサンプリングサイトを決め、長期的にモニターする。

表1 大気試料サンプリング-分析担当一覧(維持サイト)

	サイト	サンプリング担当	分析担当(6月ごろまで)	分析担当(7月以降)
100km 圏内	福島	福島大(渡邊)	東大 RI (桧垣)	阪大(篠原)
	郡山	日大(長林)	東大 RI (桧垣)	金沢大(横山)
	日立	茨城大(北)	阪大(篠原)	阪大(篠原)
	仙台	宮城教育大(菅原)	東大 RI (桧垣)	東京都市大(本多)
100km 圏外	水戸	茨城大(北)	阪大(篠原)	阪大(篠原)
	柏	東大大気海洋研(植松)	東大 RI (桧垣)	筑波大(末木)
	横浜	東工大(吉田)	東大 RI (桧垣)	東工大(予定)
	加須	埼玉環境科セ(長谷川)	東大 RI (桧垣)	青山学院大(齋藤)
	長野	長野環境保全(佐々木)	東大 RI (桧垣)	青山学院大(齋藤)
	新潟	アジア大気汚染研(大泉)	金沢大(横山)	金沢大(横山)
	由利本荘	秋田県立大(川島)	東大 RI (桧垣)	明治大(小池)

分の2について、サンプリングと測定を大学(東大 CNS と阪大 RCNP) に再委託という形となった。ただ、実際の実施に関しては、4月の会合以降、組織が整備され、5月2日の東大における会

合では、文科省の担当者、分析センターと JAEA から関係者が出席し、連携と分担が決められ、詳細なサンプリングと分析のプロトコル案が示された。また、連休明けにパイロットスタディー

を実施し、その結果に基づきさらに具体的課題の抽出とプロトコルの改訂をすることとなった。また、このとき、サンプリングの実施に関する実務を阪大（RCNP：谷畑、藤原が中心）が、試料の放射能分析（各施設に依頼）を東大（CNS：大塚、下浦が中心）が担当することとした。このようにすぐにでも実施出来る体制が整い準備も進められたが、文科省での手順に時間がかかり、結局（予算的には）6月6日からのスタートとなった。この遅れは ^{131}I のデータ取得には大変厳しいものであった。

これとは独立に、筑波大の恩田先生を中心とする大学連合でのグループが科学技術戦略推進費「重要政策課題への機動的対応の推進及び総合科学技術会議における政策立案のための調査」として「放射性物質による環境影響への対策基盤の確立」（放射性物質の分布状況等に関する調査研究）と題する研究で予算を獲得し、本枠組みの一部として（平行して）研究を進めている。なお、海老原班の緊急科研費の申請は、次年度からは通常の科学研究費の枠組みで検討することとなり、本連携プロジェクトの枠組みを元にし、再構築した上で、恩田先生が中心となり新学術領域の領域申請を行う予定である。具体的になった際には、関係の皆さんのご協力をお願いすることになる。さらに、このような動きの中で、学術会議委・総合理工学委員会の委員である柴田徳思先生が中心となり、原子力事故対応分科会の中に「原発事故による環境汚染調査に関する検討小委員会」が発足され、私を含め本プロジェクトに関連する数名が委員として加わり、現状の課題解決の方策と、長期的視野も含めた方針を検討している。

3. 土壌プロジェクトについて

今回の放射線量等分布マップの作成に向けた空間線量測定及び土壌調査は、政府原子力災害対策本部の「環境モニタリング強化計画」及び「原子力被災者への対応に関する当面の取組方針」に基づき行われた。6月6～14日及び6月27～29日に全国から70を超える研究機関等（大学・大学共同利用機関、独立行政法人、医療法人等）やボランティア企業が参加した。

土壌採取は福島県二本松市岳温泉の「あだたら

ふれあいセンター」を本部とした。本施設はJTの葉たばこ生産者の研修施設であり、100人近い人数を収容できる会議室とサンプリングで使用する物品を収納できる倉庫、サンプリングの練習が可能な畑を有している。今回の土壌採取においては、放射線の測定に関して明るい方々は多かったが、土壌の採取に関して経験者が少なかったため、未経験者はプロジェクトの参加前に本部の畑を利用して頂きサンプリングの練習を行った。また、6月5日にはプロジェクト開始前に、筑波大学の恩田先生が中心となり川俣町で研修をおこなった。この研修において、認識を共有し問題点等を洗い出した後実際のサンプリングに臨んだ。図2にミーティングの様子を示す写真を載せる。



図2 ふれあいセンター会議室におけるミーティングの様子

サンプリングは当初は半径60km圏内を想定していたが、予定よりサンプリング数が増えたため、物品が途中で足りなくなることが予想された。そこで、現地から物品の追加発注を行ったが、当時の福島県内は大震災の影響もあり、物品が予定通りに本部まで届かず参加者にご不便をおかけしこともあった。

また、本プロジェクト開始時点では福島・宮城・茨城・山形・栃木県のサンプリング対象の各市町村すべてに許可を頂いているわけではなかったため、許可が得られた市町村から順次サンプリングを行うこととなった。本プロジェクトに関しての市町村の対応はまちまちであり、非常に協力的で事前に下調べをした上で、サンプ

リングに同行して頂ける市町村もある反面、国や研究機関のこれまでの放射能汚染の対応に不信感を抱いている市町村もあり、文科省およびJAEAの方々には説明と調整に大変苦勞されていた。しかし、いったん採取が始まれば地元の住民も非常に協力的であり、大きな混乱もなく無事予定されていた採取地点を採取することができた。

さらに、直前までサンプリングに行く市町村が決まらないことやサンプリング当日の採取状況から、翌日の班分けとサンプリングポイントの指定した地図等の作成を行わなければならなかったため、作業は深夜～翌朝にまで及ぶことがしばしばで、プロジェクト開始当時スタッフは非常に苦勞していた。しかし、途中から金沢大学、東北大学、千葉大学および大阪大学の教員・学生の一部がサンプリング後に自主的に手伝いにきて頂いたため、後半はスタッフの負担も減り無事サンプリングを終えることができた。手伝いにきて頂いた方々にこの場をお借りして感謝申し上げます。

土壤調査の概要

土壤採取地域は福島県全域及び福島第一原子力発電所から半径100km圏内を対象とし、80km圏内は2kmメッシュ、80km以遠は10kmメッシュで区分分けし、各地点で空間線量率の測定及び土壤の採取を行った。土壤採取に参加した延べ人数は約1000人・日であった。放射性核種分析のため、採取した土壤は全国19機関に配付され、Ge半導体検出器によって(^{131}I , ^{134}Cs 及び ^{137}Cs)を測定、原発事故後に土壤に降下した放射性物質の降下インベントリを求めた。

サンプリングポイントの決定

サンプリングは、主に各市町村に許可を頂いた公共施設(公民館、集会所、学校等)で行った。サンプリングポイント(3m×3m)は平坦でできるだけ植生の少なく、耕作により攪拌されていない土壤を選定した。森林については、未だに樹体に多くのfalloutが付着していると予想されるため、できるだけ避けて場所を決定した。

空間線量率の測定

サンプリングポイントが決定後、空間線量率の測定を行った。測定器はアロカ社製のNaIシンチレーションサーベイメータ(TCS-171B, TCS-

172B)を用い地面から1mの高さの空間線量率(1cm線量当量率)を測定した。空間線量率が $30\mu\text{Sv/h}$ を越える可能性のある地域では、電離箱式サーベイメータを用いた。さらに、地上5cmの位置での測定を行い、3m×3mのサンプリングポイントをサーベイし、極端に線量率に変化がないことを確認後、土壤のサンプリングを行った。

土壤のサンプリング

今回の原発事故由来の ^{131}I , ^{134}Cs 及び ^{137}Cs は表層から5cm以上深くは浸透していないことが、事前調査によってわかっており、サンプリングの時点においても大きくは変化していないと考えられるため、表面から5cmの深さまでの土壤のサンプル採取を行った。3m×3mの範囲において、5-6カ所(5カ所の5cmサンプル、もしくは5カ所の5cmサンプル+1カ所の30cmサンプル)ランダムに地点を選定した。

土壤が柔らかい場合はU-8容器(48mmφ、容積100mL、スチロール樹脂製)を直接地面に挿入し、堅い場合は100mLのステンレス円筒と採土補助器を用いて土壤を採取した。採取地点の地表に植生がほとんどない場合は、その表面に散在する粗大な植物片、木片などを取り除き根系層もあわせて、雑草などの植生が生えている場合は、雑草も含めて土壤として採取した。

採取した土壤は表面の放射能が高く底面が低いいため、採取した状態のままGe半導体検出器で測定を行うと、ジオメトリーが合わず正確な値が得られない。そこで、採取したまま現地でビニル袋内に移し、土壤が均一になるよう十分攪拌してからU-8容器内に戻し密封し測定試料とした。また、5地点に1つの割合で、30cmの鉄製の円筒管を用いてコアサンプルを採取した。図3にサンプリ



図3 土壤サンプリングの様子と土壤試料(U8容器)

ングの様子と土壌試料を示す。

採取した土壌はそれぞれのサンプルはビニル袋に入れ、封をしてラベルを付し、コード・対応地点・GPS 記録・写真などとの対応が可能な必要事項を記録した。

土壌の放射能測定

各研究機関等に送られた試料は、重さおよび試料の高さを測り、汚染を防ぐために梱包してあるビニル袋の上からも一枚袋でカバー・密封し測定を行った。測定は、Ge 半導体検出器で1時間測定を基本とし、一番ピークが小さいと思われる ^{131}I の 384keV の γ 線のカウント数を 300 カウント以上になるように時間延長を行った（実際には、かなりの試料について ^{131}I の測定は困難であった）。 ^{131}I 、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の 365keV、605 keV および 662keV の γ 線強度から、放射性物質の降下インベントリ (Bq/m^2) を求めた。試料の校正には U-8 容器入れ高さを変えて調整した標準土壌 (IAEA-444, Gamma emitting radionuclides in soil) を用いた。現在、報告 (第一報) に向けて

データのまとめを行っている段階であるが、今後、複数の研究機関で同じサンプルを測定してクロスチェックを行い測定値の検証なども行い、より正確な結果とする。

最後に、サンプリングサイトのマップと参加者が記念に残したサインを図4に載せておきます。



図4 土壌サンプリングの場所 (メッシュ) を示したマップと参加者の記念サイン

4. 農産物の放射能汚染問題に関連した福島県への協力

村松康行 (学習院大学理学部)

原発事故による農耕地の汚染が現実になり始めた3月半ば過ぎに、福島県より連絡があり、「放射性物質の農産物への影響に関するアドバイザー」の委嘱を受けました。私は以前、放医研に勤務していた時、放射性物質の測定や農作物への移行に関する研究を行っていましたが、広範囲に汚染された農地を考えると気が遠くなる思いでした。しかし、私の経験が少しでも役立てばと考え引き受けました。それ以来、何度も現地に足を運び、県庁や研究機関の人達と対策を練り、研究計画の助言や研究協力を行っております。また、研究室で様々な試料の分析も続けております。この間、放射化学会のメンバーの支援も数多く受けることができました。ここでは、現在までの福島県への協力の内容や活動について簡単にご紹介いたします。

土壌汚染の把握に対する放射化学会の協力

3月の下旬の時点では、福島県の各地で葉もの野菜に、放射性ヨウ素の基準値 (2000Bq/kg) を超える値が数多くでており、農家の方々は今後はたして農作物 (特に水稻) の作付けをして大丈夫なのか心配をしておりました。そのためには、土壌の汚染状況の把握が急務でした。しかし、その時点ではサーベイメータの数も少なく、また、県が使える Ge 半導体検出器は2台だけであり、農業関係ではゼロでした (現在では台数は増えました)。そこで、大学関係で放射能分析をやってもらえないかとの依頼が私のところに来たので、放射化学会のメンバーリストを使い、協力を求めました。その結果、篠原厚氏 (大阪大学)、大槻勤氏 (東北大学)、沖雄一氏 (京都大学)、横山明彦氏 (金沢大学)、村松久和氏 (信州大学) より協力して下さるとの連絡が直ぐにありました。しかし、環境試料の測定を日常的に行っている研究室はほとんどなく、まずは土壌の分析ができるように装置の効率校正から始めなければなりません。

んでした。そのためには標準試料が必要なので、IAEAに勤務する細谷道夫氏を通じ比較標準試料を手配してもらい、ちょうど日本に来るスタッフがいたので次の週には持ってきてもらえました。また、アイソトープ協会でU8容器に入った標準線源を急いで作成してもらうようお願いしました。更に、田上恵子氏（放医研）からもIAEA比較標準試料や同氏が定量し作成した雨水の比較試料の提供も受けました。そのようなことで、協力機関におけるGe検出器の効率校正も徐々に整っていきました。

当初予定していた水田土壌の実際の分析は、福島県で予算措置ができ、信頼できる民間の分析会社に引き受けてもらえることになった為、我々が測定しなくても済みました。しかし、福島県からは、どこの分析機関も測定の依頼があふれていた状況だったので、放射化学会に属する大学の協力が得られることはとても心強く、土壌のサンプリングを進めることができた大変感謝されました。

我々としても、そのおかげで測定器の校正も進み、その後の土壌分析や環境分析につながったと思います。

土壌から米への移行の評価

さて、農地土壌のサンプリング及び分析と並行して、3月下旬の時点では、土壌中の放射性セシウムがどの程度米に移行するか評価しなければなりません。つまり、土壌—植物系における移行係数（作物／土壌の核種濃度比）を推定する必要があります。土壌の放射性セシウムの濃度が何ベクレル以下であればそこで収穫される米の濃度が食品の規制値である500Bq/kgを超えないか見積もるためです。いろいろな文献を調べ、また、内田滋夫氏（放医研）や久松俊一氏（環境技研）からも貴重な意見が寄せられました。県で行われた検討会には、私、大野剛氏（学習院大）、大槻勤氏などの放射化学会のメンバーも参加しました。移行係数の値は稲の栽培条件や土壌の種類などによっても大きく変わるので、どの値に設定するのが大変でした。検討段階においては県側と農水省の担当者との間で情報交換も行われました。国は当初4月後半までに土壌の規制値を決めると

考えていたようですが、県が独自に土壌分析や米への移行評価を進めていたこともあり、予定を早め4月8日には規制値を決めました。つまり、移行係数として0.1を採用し、土壌の放射性セシウムの濃度が5000 Bq/kg以下では作付をして良いということになりました。

野菜への移行係数を求める研究

農作物への放射性物質の移行や低減化に関する研究は郡山にある福島県農業総合センターで行われております。いくつかの大学や研究機関も協力しております。私に関係しているものは、野菜への移行係数を求める研究で、ポットに汚染土壌を入れて栽培しています。また、土の種類の影響を受けるので、灰色低地土、黒ボク土、褐色森林土など異なる種類を用い、種々の野菜を調べております。測定に当たっては、学習院大で大野剛氏がたくさんのサンプルの測定をこなしてくれております。今のところ得られたデータからは特に高い移行係数値は見られておりません。これは、セシウムが粘土鉱物に吸着し易く根から吸われ難い為です。しかし、農作物の種類は多く、米以外の作物の移行係数に関するデータは非常に限られております。そこで、様々な作物や土壌について、できるだけ早く、システムティックに移行係数を調べていく必要があります。

土壌中における深度分布

福島県の農業総合センター内には、水田、畑、果樹園など様々な圃場があり、そこでそれぞれ5カ所で深度別に土壌を採取し分析しました。また、県の林業研究センターやその他の場所でも土壌中の深度分布などを調べております。その結果、土壌の利用形態によっても異なりますが、ほとんどの場合、表層5cmまでに9割以上の放射性セシウムが蓄積していることが分かりました。これは、セシウムが粘土鉱物に吸着され易いことに起因しています。但し、水田では同じ田んぼ内でも差がとて大きく、特に、水がたまりやすいところでは土壌中濃度が高く、深度分布にも差がありました。また、森林や竹林の土壌では、表面のリター部に高く、放射性セシウムは落ち葉にも吸着しやすいことが分かりました。福島県は森林の占める

割合は7割くらいあるので、今後、森林における放射性セシウムの分布や循環を調べる必要があります。

果実への移行

福島県の果樹研究所に協力して、果樹園での調査研究を進めております。東北大学の大槻勤氏は早い段階で同研究所から依頼され、果樹園内での測定を進めております。同氏がこの稿に続き果樹園については書いておりますので、そちらを参照ください。ここでは、学習院で測定したデータなどを基に簡単に記します。

果実で最初に基準値を超えたものは梅でした。いろいろ検討した結果、土壌から取り込まれる割合は小さいと考えました。梅の木は事故時に葉は出ていなかったものの開花しており、放射性セシウムが花の中の子房に付着したことが原因と推定されました。ビワは事故時に葉が出ており、そこに付着した放射性セシウムが果実部に転流したと考えられます。事故時に葉が出ていなかった果実については、樹皮に付着した放射性セシウムが実の部分に転流する経路が認められたが、樹皮についている総量は葉がある場合に比べ少ないので、サクランボやモモなどでは測定しても規制値を大幅に下回っています。現在、リンゴ、ブドウ、ナシなどは成長段階を追って分析を進めていますが、低い値なのでホッとしております。

今までは、放射性セシウムの農産物への移行経路は土壌からの取り込みが主であると考えられていましたが、上述したように、果実やお茶などでは葉や樹皮に着いたものが転流により実や新芽の部分に移行することが分かりました。

牛の体内の放射性セシウムの測定

汚染された稲わらを食べた牛の問題がおこり、全頭検査という方向で進んでいます（原稿を書いている8月7日の時点）。しかし、これは、肉にしてからの検査であり、牛を屠畜するまでは汚染

しているか分かりません。そこで、生きたまま簡易に測定できないか調べるため、県の畜産研究所のスタッフおよび大槻勤氏と濃度が高い稲わらを食べさせた可能性がある畜産農家を8月初めに訪れ、サーベイメータやNaIシンチレーション検出器（スペクトル分析器付き）による調査を行いました。また、血液や尿を採取し持ち帰り、Ge検出器で測定しました。その結果、GMサーベイメータでもある程度汚染濃度が高い牛であれば、測定できることが分かりました。但し、空間線量が低い場所で測定をする必要があり、牛舎では床だけでなく屋根に付着した放射性セシウムの寄与も無視できなかったです。NaIシンチレーション検出器を獣医さんの協力のもと牛の肛門から直腸に入れ測定も行いました。非汚染の牛では、直腸に入れると、遮蔽効果がありその場の空間線量よりも下がりました。汚染牛では、非汚染の牛に比べはつきりと高い値が出ました。また、血液や尿の分析でも汚染牛では高いことが分かりました。測定の可能性は見えてきましたが、測定した値を肉の濃度にどのように結び付けていくかがこの原稿を書いている時点では課題であります。生きたままの測定と肉の濃度の推定がうまくいけば、屠畜する前に汚染している牛を把握することができます。しかし、現実面では、県に限られたスタッフと測定器で多くの牛の検査をどこまで対応できるかという問題もあります。

終りに

以上、私が放射化学会のメンバーとして学会員の協力のもとで行っている活動についてご紹介いたしました。放射性セシウムの汚染は広がっており、放射化学の分野の知識および測定などのノウハウを生かした協力は、農地だけでなく生活環境の除染や廃棄物対策などいろいろな分野で必要になっていくと思います。会員のアイデアがいろいろなところで生かされることを願っています。

5. 福島県農業総合センター果樹研究所等での放射性物質対策試験

大槻 勤(東北大学電子光物理学研究センター)

折しも3月下旬に学習院大学の村松氏が福島県農水部の放射性物質の農産物への影響に関するアドバイザーとなったのをきっかけに、放射化学学会会員有志でGe検出器を用いた分析支援グループがつくられた。小生は福島に近いこともあり村松氏の誘いをうけて、4月2日～3日に福島県庁および飯舘村を訪問し、県の農業総合センターの多くの方々とお会いした。4月15日、同センター果樹研究所の佐藤守主任研究員などの要請を受けて、当センターの菊永氏や(株)日本環境調査研究所の泉氏とともに同研究所を訪れ、樹園地内の線量測定および土壌サンプリングをし、Ge検出器を用いて福島原発事故由来の放射性同位体による汚染状況の調査をおこなった。その後、東北大学多元物質科学研究所の桐島氏や佐藤氏も加わり、早期には土壌サンプルや下草などを、また果樹の萌芽期から現在までサクランボやモモ、ブドウなどの果実、葉、樹皮などの分析調査をおこない、放射性セシウム等の移行メカニズムと経時的推移の調査をしてきた。また今後も季節ごとに、ナシやリンゴ、ユズ等の果実を調べていく必要がある。当初、根(根群)からの果樹への吸収を心配して土壌0～35cmまでの深度分布を調べたが、根群のある30cm前後にはほとんど放射性セシウムは浸透していないことが分かった。また、樹園地内をGMサーベイメータで放射能強度(計数率)を調べると、接地面では手の届く範囲でも2～3倍のばらつきがあり、サンプリングには注意が必要であることも分かった。さらに果樹の主枝表面部位における計数率は、主枝上部(空を向く面)は下部(地を向く面)よりも3倍から10倍も高く、接地面と同等の主枝もあることが分かってきた。これらの結果より放射性セシウムが地下の根群から果樹へ移行する確率よりも、樹体に直接降り注いだ放射性セシウムの転流率を調べる必要が出てきた。そこで学習院大学の村松グループ、東京大学の中西グループとともに成長段階での放射

性セシウムの転流の可能性を、葉や果実、果梗部等に分けてGe検出器やイメージングプレートを用いて調査してきた。また除染対策の一環として、果樹研究所では農業技術情報「放射性物質試験の最新成果情報」を出して粗皮剥ぎの実施を促すプレスリリースがおこなわれた。この粗皮剥ぎの実施は農作業時における被曝線量の軽減にもつながる。現在、洗浄と粗皮剥ぎを組み合わせた対策を検討中である。しかし、圃場上層部の放射性セシウムの除去対策や削り取った粗皮の処分など今後の課題は多い。

果樹研究所では学習院グループ、東大グループ、そして我々、東北大グループが活動しており、研究所の方々に協力して対策試験を実施している。放射性セシウム対策は、本年ばかりでなく今後も長く実施していかなければならないであろうし、また文献として残すことも重要となろう。

7月初旬から汚染稲藁を与えられた汚染牛が問題になってきた。8月1日にも村松氏および畜産研究所の方々と、汚染稲藁を与えた農家を訪れ汚染牛のスクリーニングやNaIによるスペクトロメトリーを実施した。このことに関しては村松氏が紹介しているので割愛するが、最近では畜産研究所の要請を受けて、福島大学河津・高瀬グループとともに牧草地において、牧草、リター、ルートマット、土壌等に分けた放射性セシウムの汚染調査も始まっている。今後、多くのサンプル測定が望まれるので、当初の放射化学学会会員有志でGe検出器を用いた分析支援グループが力を発揮することが期待される。

東日本大震災による津波と福島原発事故の爪痕を残した。岩手、宮城、福島の沿岸部は巨大津波が押し寄せ、多くの人々が犠牲になった。また、原発事故以降、福島県内の放射能汚染が方々に広がり、深刻な状態がつづくのを見ている。福島に行けば福島原発事故による被害のことを、宮城県や岩手県の沿岸に行くと津波による被害ことを考えさせられ、感傷的にもなる。しかし、そんなことばかり言っていられないので、一歩ずつ進みしかない。

6. 日本分析化学会・日本地球化学会・日本放射化学会 共同講演会「放射能・放射線を正しく理解する～福島第一原子力発電所事故に関連して～」

永目諭一郎

標記共同講演会が、7月9日（土）に川崎市国際交流センターで開催された。事前の申込者数は114名であったが、猛暑のせいかわ75名の参加者であった。3.11の東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故によって、多くの放射性核種が大気や海水などの環境中に放出された。さらには核燃料のメルトダウンというかつてない大惨事も引き起こされている。また放出された放射性核種の影響で、バックグラウンドの放射線レベルが上がっており、福島県だけでなく、宮城県から関東、東海地方にまで影響が出ている現状である。とりわけ若いお母さん方は幼い子供への放射線の影響を強く心配されている。（最近では、セシウムに汚染された牛肉が販売されたというニュースも報道されている。注：シンポジウム後に報道）。

このような状況を踏まえて、上記3学会が、放射能と放射線を正しく理解するための知識を一般社会に提供することを目的として本共同講演会を開催した。放射能とは何か、放射線とは何か、その生体への影響はどのようなものか、また、多数発表されている測定値などはどのように理解したらよいのか、などを市民の方々に分かりやすく解説し、放射能・放射線を正しく理解していただくという趣旨である。当日の講演プログラムを下記に掲載する。

講演終了後は、活発な質疑討論が行われ、予定を30分もオーバーするほどであった。やはり、放射線の人体への影響に関する質問が最も多く、「安全の基準」に係わる問題などから、子供たちへの影響を考慮した内部被ばくの現状、さらに

は、今回の福島原発事故で環境中に放出された放射能とチェルノブイリ原発事故や広島・長崎原爆で放出された放射能との比較などについて多くの質問が寄せられた。また環境中のセシウムやヨウ素の挙動、セシウムのゼオライトへの吸着機構などについても質問があり、専門的な関心の高さが伺えた。一方、個人で購入した放射線測定器の校正や放射線ホルミシスなどにも関心が寄せられていた。

【講演プログラム】

13:00～13:10

主催者挨拶および公開セミナー開催趣旨の説明
（埼玉大学大学院理工学研究科） 渋川雅美

第一部

13:10～13:40

「放射能と放射線の基礎知識」

（日本原子力研究開発機構） 永目諭一郎

13:40～14:20

「放射線の生体への影響」

（放射線医学総合研究所） 田上恵子

14:20～15:00

「福島第一原子力発電所事故の経緯と現状」

（京都大学原子炉実験所） 中島 健

15:00～15:20 休憩

第二部

15:20～16:00

「放射線モニタリングの実際」

（日本原子力研究開発機構） 山口恭弘

16:00～16:40

「放射性物質モニタリングの取り組みと現況」

（首都大学東京大学院理工学研究科） 海老原充

16:40～17:00 質疑討論

特別寄稿

福島第一原発事故と IAEA の事故評価尺度の不備

吉原賢二（東北大学名誉教授）

2011年3月11日東京電力福島第一原子力発電所で地震、津波による原子炉事故が発生した。原子炉は停止したが、その後の燃料冷却系の損傷のために燃料棒のメルトダウンを起こし、水素爆発にいたって、多量の放射性物質を環境中にまき散らした。日本歴史上いまだかつてない事故であった。このため発電所付近の福島県の住民は避難を余儀なくされた。この事故は世界的にも大ニュースとなり、原発推進国のフランスからサルコジ大統領が来日して援助を申し出るなど、世界の注目が集まった。

日本政府の原子力安全・保安院は最初この事故をIAEAの事故評価尺度INESのレベル4とし、その後5に改め、最後に6を飛び越えて7にした。レベル7というのは1986年4月26日に起こったチェルノブイリ事故と同じ最悪の事故ということになる。ロシアでは福島事故はチェルノブイリよりは下と考え、アメリカその他の専門家もレベル6程度と見ていたにもかかわらずである。

私は福島原発から48キロメートル離れたいわき市に住み、避難区域のすぐ近いところでこの事故のニュースを聞き、毎日ハラハラしながらテレビの報道に接した。事故が最悪とされる割には被害が少ないのをいぶかった。事故処理は長引いてはいるが、多くの死者を出したチェルノブイリに比べて福島ではひとりの死者も出ず、放射性物質に汚染された程度も小さく、深刻度はずっと低い。そこでINESの尺度を検討したところ、この尺度そのものに大きな問題があることが分かった。原子力安全・保安院は問題のあるINESをそのまま引用して福島事故を最悪のレベル7としたのである。

日本放射化学会の有志の方々と相談し、私が代表者となって国際原子力機関の現在の事務総長で

ある天野之弥氏に手紙を書くこととした。INESの尺度そのものを改訂すべきことを求めたのである。

INESは放射線や放射能汚染の事故を評価するために定められた国際的な尺度ではあるが、比較的小さな放射線被曝・放射性物質汚染事故などにくわしく、大きな原子炉事故については意外に大雑把なのである。INESでは評価の第一の基準は事業所外への影響をとる。第二が事業所内への影響である。第一の事業所外の影響では放射性物質の外部への放出に着目し、ヨウ素131等価基準で数百から数千テラベクレルの外部放出がレベル5、数千から数万テラベクレル放出がレベル6、それ以上は天井なしのレベル7になってしまう。チェルノブイリは520万テラベクレル、福島は72万テラベクレルでひと桁放出量が違うが、同じレベルに評価される。

第二の事業所内への影響では原子炉などの重大な事故がレベル5、同じく致命的な事故がレベル6、また壊滅、再建不能がレベル7と例示されているが、区分はかなりあいまいである。

特に問題なのは放出放射性物質の量で、チェルノブイリ以上の世界中を巻き込む事故が仮に起こったとしても、今のINESではレベル7ではない。また福島とチェルノブイリが同じレベル7では福島県の人には公平と言えないのではないか。これは放置すべきではないとわれわれは考えたのであった。

天野氏への手紙とその返事は以下に示すとおりである。われわれの手紙は確かに効果があった。天野氏は2011年6月20日からウィーンで開かれたIAEAの閣僚級会合で演説し、INESの見直しの必要性を訴えた（2011年6月21日朝日新聞1面）。今後の経過を見守りたい。

April 29, 2011

Mr. Yukiya Amano,
General Director of International Atomic Energy
Agency
K & K Palais Hotel, Wien, Austria

Dear Mr. Yukiya Amano,

It is a great pleasure and honour to write you this letter for the first time. I am a Japanese scientist who engaged in radiochemistry work, an honorable member of the Japan Society of Nuclear and Radiochemical Sciences, and Professor Emeritus of Tohoku University.

As you have already known the Japanese Government announced that the serious accident of Tokyo Electric Power Company (TEPCO) Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant on March 11, 2011 was ranked up to Level 7, the most serious accident according to INES, the same level as that in the case of Chernobyl Nuclear Power Plant in the Soviet Union on April 26, 1986. As reported by Japanese newspapers, this government announcement on April 12, 2011 was based on estimation of released radioactivity calculated by a computer program 'SPEEDI' and ranking of the INES manual 2008.

However, we hardly agree with their rating which put the Fukushima accident in the same level as the Chernobyl accident. It was questionable rating decision which mechanically traced INES Manual 2008 without consideration of total figures of the accident in depth. The reasons are as follows.

(1) In Fukushima hydrogen explosion (chemical explosion) took place two or three times, while in Chernobyl a kind of nuclear explosion (extraordinary nuclear chain reactions) happened. A large difference of energy generation should be recognized in both cases.

(2) In Fukushima nobody was dead by the accident, while in Chernobyl 29 persons died

instantly after the accident according to official announcement and so many people were likely dead by the radiation effects afterward.

(3) In Fukushima the hazard was limited only in Japan. Actually no harm was recognized in neighboring countries. On the other hand it is well known that in Chernobyl not only people in the Soviet Union but also people in the other countries suffered radiation hazard. Especially in the northern European countries its damage was remarkable.

Therefore, we come to the conclusion that the Fukushima accident should not be on the same level as the Chernobyl case. The official announcement of Japanese Government was not appropriate at all. This view could be also supported by opinions in Russia, USA and other countries. Now it is a chance to revise INES ranking because its concept is clearly imperfect for higher level radioactivity release in the accidents.

Therefore, we decided to send you this letter to improve your INES concept as soon as possible. At the same time we also send a copy of this letter to the Japanese Government to notice their action in official announcement to be careful before consulting with Japanese academic societies.

A group of scientists who are deeply interested in the Fukushima nuclear accident now send you our letter to take an opportunity to provoke your attention on our opinion. We wish you that you do your best efforts for the world and human kind but also on the other hand for the Japanese especially for the Fukushima people living in the agony after the accident.

Sincerely yours,

Kenji Yoshihara, Professor emeritus, Tohoku University

On behalf of a group of scientists of the Japanese Society of Nuclear and Radiochemical Sciences

Kan Kimura, Prof. em. Aoyama Gakuin Univ., Hiromichi Nakahara, Prof. em. Tokyo Metropolitan Univ. Kunihiro Hasegawa, Prof. em. Shizuoka Univ., Takashi Omori, Prof. em. Shizuoka Univ., Hiroshi Kudo, Prof. em. Tohoku Univ. Kenjiro

Kondo, Prof. em. High Energy Accelerator Research Organization, Masanori Yamamoto, Prof. Kanazawa University, Tsutomu Sekine, Prof. Tohoku Univ., Takeyoshi Asano, Former Chief Researcher, Osaka Pref. Univ.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY
AGENCY

THE DIRECTOR GENERAL

16 May 2011

Dear Professor Yoshihara,

Thank you for your letter of 29 April 2011, in which you and a group of colleagues express your views on the use of the International Nuclear and Radiological Event Scale (INES) in relation to the Fukushima Daiichi accident. It is very useful for me to be aware of the opinions of such a knowledgeable and expert group of scientists. I am grateful to you for taking the time to write to me.

As I am sure you are aware, it is the responsibility of each individual country to assign the INES rating if an event occurs on its territory. However, the use of INES for rating events

is assessed regularly by the INES Advisory Committee. Areas in which additional guidance or clarification may be required are identified and discussed at the biennial technical meeting of INES National Officers.

The next meeting of the INES Advisory Committee will be held in July 2011, shortly after a special IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety in the aftermath of the Fukushima Daiichi accident which will take place in June. I have shared your letter with my technical colleagues, who will make sure that a broad range of expert views on INES are made available to participants at the Advisory Committee meeting.

I thank you again for sharing your thoughts on this matter.

Yours sincerely,

Yukiya Amano

特 集

世界化学年を記念して

「放射化学の最前線—マリー・キュリーが目指した（であろう）テーマ—」

放射化学ニュース編集委員会

放射化学ニュース第23号でお知らせしましたように、2011年は「世界化学年」で、各国や各学協会ですべてこれを記念した取り組みがなされています。私たちの身近な雑誌でもあるRadiochim. Acta誌でも最新号で“the man-made heaviest elements”をテーマに特集号を出版いたしました。さらにはNature誌や各種雑誌や新聞等でも世界化学年が報道されています。

本学会でも、第55回放射化学討論会（於長野市）にて福島原発事故関連シンポジウムと組み合わせたセッションが予定されています。一方、放射化学ニュースでも独自の世界化学年特集記事を企画いたしました。内容は、「放射化学の最前線—マリー・キュリーが目指した（であろう）テーマ—」として、新元素の合成や、ラジオアイソトープの利用、環境放射能、微量分析化学、アクチノイド化学などを取り上げました。

最近では、放射線・放射能というキーワードは負のイメージで捉えられがちですが、現代社会において、ラジオアイソトープ、放射線は、医学・薬学、農学などの生命科学や材料科学、環境科学、原子力科学あるいは産業利用など、人々の命や暮らしに直結するツールとなっています。私たちは世界化学年を機に放射化学の重要性をさらに広く社会や関連学協会へ訴えていく必要があります。

キュリー夫人がX線撮影装置を車に装備（プチ・キュリー）して、第一次世界大戦で傷ついた兵士たちの治療にあたったことは有名な話です。彼女は放射線やラジオアイソトープの有用性をいち早く悟った科学者の一人ではないでしょうか。

今回特集で取り上げた話題は、先にも述べましたが、その中でも日本の放射化学が世界的にもトップを走っているといっても過言ではないというテーマのいくつかを取り上げてみました。

1. 新元素の合成と化学

理化学研究所仁科加速器研究センター

羽場宏光

1. はじめに

Marie Curie のノーベル化学賞から 100 年の節目に当たる 2011 年は、世界化学年に定められ、“Chemistry-our life, our future” をスローガンに、世界各国で化学の振興と社会への普及・啓蒙を目的とした取り組みが行われている。1898 年、Marie Curie は、ピエゾ電気計付の電離箱を用い、ピッチブレンドから放射能をたよりに新元素 Po と Ra を発見した。Po は天然から見出された最初の放射性元素で、Marie の発見は、核・放射化学者による新元素探索の始まりである。図 1 に、元素の周期表 (2011 年 7 月現在) を示した。今日では、118 種類の元素が周期表上に規則正しく並び、ちょうど第 7 周期が完結している。元素名は、112 番元素コペルニシウム (copernicium) までが国際純正応用化学連合 (International Union of Pure and Applied Chemistry: IUPAC) によって承認されている [1]。この 100 年間の間に発見された 33 種類の元素を白抜き文字で示したが、Hf と Re を除く 31 元素はすべて放射性元素である。

周期表の最下段に並ぶ超アクチノイド元素 (原子番号 $Z \geq 104$) は、近年超重元素と呼ばれるようになり、核・放射化学者にとって魅力あふれる研究対象となっている。本稿では、新元素の合成とその化学研究の最前線について紹介したい。

2. 新元素の合成

現代の新元素探索は、重イオン加速器を利用し、核融合反応によって超重元素の原子核を人工的に合成して行われる。超重元素の合成確率は極めて小さく、またその寿命も極めて短い。反跳分離装置の発明は、新元素の探索に大きなブレイクスルーをもたらした。理研重イオンリニアック (RILAC) 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) を図 2 に示す。反跳分離装置は、重イオンビームと標的核との核融合反応で生成した超重核を、磁場や電場の組み合わせで数マイクロ秒のうちに選択的に焦点面に取り出すことができる。ここに位置有感型の Si 半導体検出器を配置することによって、低バックグラウンドの下で超重核の α 壊変や自発核分裂壊変を測定することができる。107 番元素ボーリウム (^{262}Bh) から 118 番元素 ($^{294}\text{118}$) までの合成には、すべてこの反跳分離装置が用いられてきた。

族 \ 周期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
1	1 H																	2 He		
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne		
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar		
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr		
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe		
6	55 Cs	56 Ba	57-71 La Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn		
	ランタノイド																			
	アクチノイド			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		
7	87 Fr	88 Ra	89-103 Rf Db Sg Bh Hs Mt Ds Rg Cn	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og		

図 1 元素の周期表 (2011 年 7 月現在)。1911 年以降に発見された 33 種類の元素を白抜き文字で示す。

気体充填型反跳核分離装置 (GARIS)

ガスジェット搬送装置

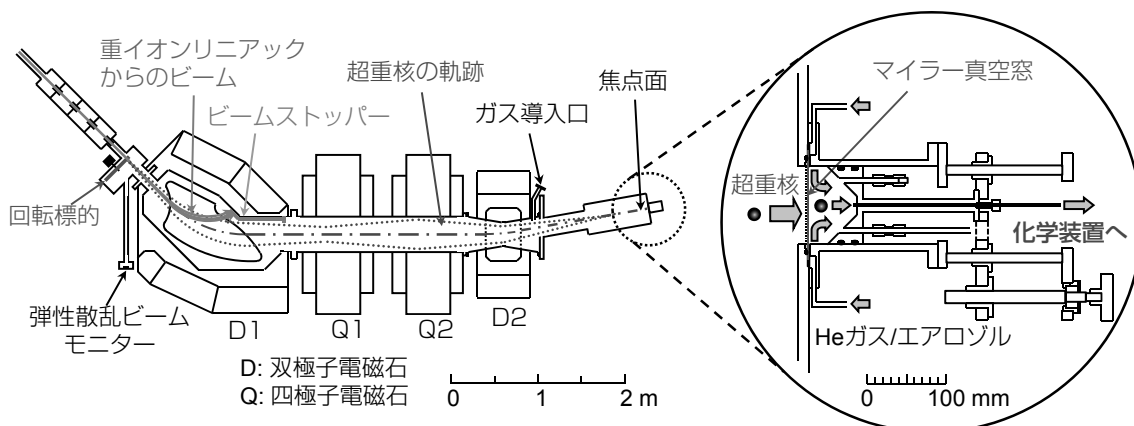


図2 理研気体充填型反跳核分離装置 GARIS と焦点面に設置されたガスジェット搬送装置。

合成核反応には、冷たい核融合と熱い核融合の2つのアプローチが試みられてきた。前者は、ドイツ重イオン研究所 (GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH: GSI) が進めてきた方法で、 ^{208}Pb や ^{209}Bi の原子核を標的にして、 ^{54}Cr 、 ^{58}Fe 、 $^{62, 64}\text{Ni}$ や ^{70}Zn などの重イオンを衝突させて合成する方法である。複合核の励起エネルギーを低く抑えることができ、その結果核分裂の確率を下げ、中性子を1個だけ放出させて目的の超重元素核種を合成することができる。GSI の Hofmann と Münzenberg ら [2] は、SHIP (Separator for Heavy Ion reaction Products) と呼ばれる反跳分離装置を用いて、 ^{262}Bh 、108 番元素ハッシウム (^{265}Hs)、109 番元素マイトネリウム (^{266}Mt)、110 番元素ダームスタチウム (^{269}Ds)、111 番元素レントゲニウム (^{272}Rg)、 ^{277}Cn の6元素を次々と発見した。理研の森田ら [3-6] も、冷たい核融合反応を用いて ^{265}Hs 、 ^{271}Ds 、 ^{272}Rg 、 ^{277}Cn などの追試を行い、2004年、 ^{209}Bi ($^{70}\text{Zn}, n$) $^{278}113$ 反応によって新元素 $^{278}113$ の合成に成功している。2005年には2個目の $^{278}113$ を観測し、31 fb (10^{-15} b) という驚異的に小さな反応断面積を記録している [7]。一方、熱い核融合反応は、ロシアドブナにある合同原子核研究所 (Joint Institute for Nuclear Research: JINR) と米国ローレンスリバモア国立研究所 (Lawrence Livermore National Laboratory: LLNL) の共同研究グループが進めて

きた方法で、アクチノイド標的に ^{48}Ca イオンを衝突させるものである。この反応系では、複合核の励起エネルギーが冷たい核融合反応に比べて高く、3~5個の中性子を放出して超重核が合成される。JINR の Oganessian ら [8, 9] は、 ^{48}Ca ビームを ^{238}U 、 ^{237}Np 、 $^{244,244}\text{Pu}$ 、 ^{243}Am 、 $^{245,248}\text{Cm}$ 、 ^{249}Bk ならびに ^{249}Cf 標的に照射し、Dubna Gas-Filled Recoil Separator (DGFRS) を用いて、 $^{282,283}\text{Cn}$ 、 $^{282}113$ 、 $^{286-289}114$ 、 $^{287,288}115$ 、 $^{290-293}116$ 、 $^{293,294}117$ 、 $^{294}118$ の合成に成功している。これらの元素の生成断面積は0.5~5 pb と報告されており、先述の冷たい核融合反応の系統性と比較して1桁以上大きな値である。最近、GSI や米国ローレンスバークレー国立研究所 (Lawrence Berkeley National Laboratory: LBNL) のグループも、 ^{48}Ca ビームを用いた熱い核融合に着手し、 ^{283}Cn [10]、 $^{286,287}114$ [11]、 $^{288,289}114$ [12] ならびに $^{285}114$ [13] の合成に成功している。

3. 新元素の化学

次々発見される超重元素はどのような化学的性質 (電子状態) を示すのだろうか? 超重元素の領域では、大きな原子核電荷によって電子軌道が著しく変化し (相対論効果)、周期表の位置からは予測もつかないユニークな性質の出現が期待されている。しかし、超重元素の生成率は極めて低く (例えば、 $^{261}\text{Rf}^a$: 3 原子/分、 ^{269}Hs : 3 原子

／日 [14])、寿命は1分間にも満たないくらい短いため、一度にわずか1個の原子しか取り扱うことができない。超重元素の化学は、単一原子の化学 (atom-at-a-time chemistry) と呼ばれ、まさに究極の微量元素分析である。この分野の実験的研究は、大強度重イオン加速器などの特殊な設備を要するため、世界的に見ても米国、ロシア、ドイツ、スイス、フランス、日本の数ヶ所の研究所でのみ実験が行われてきた。溶液系の化学で106番元素シーボーギウム (Sg) まで、気相系で、Hs までと Cn と114番元素についての報告がある。これらの化学研究については、最近の総説 [14-16] に良く纏められているので参照いただきたい。我が国では、日本原子力研究開発機構 (原子力機構) 先端基礎研究センターを中心とする核化学研究グループによって、104番元素ラザホージウム (Rf) の系統的な溶液化学研究が行われてきた [17-26]。α線計測装置に結合された自動迅速イオン交換分離装置 AIDA (Automated Ion-exchange separation apparatus coupled with the Detection system for Alpha spectroscopy) を用いて、HCl [17-20]、HNO₃ [17]、HF [21, 22]、HF/HNO₃ [23-25] ならびに H₂SO₄/HNO₃ 系 [26] における ²⁶¹Rf^a のイオン交換挙動や溶媒抽出挙動が詳細に調べられ、Rf の錯形成反応や化学種に関する貴重な知見が得られている。以下に、近年注目を集めつつある、反跳分離装置を利用した新しい超重元素化学研究とその展望について解説する。

従来の化学実験では、標的から反跳分離された超重核はヘリウム中で減速され、ガスジェット法によって気体あるいは液体クロマトグラフ装置に搬送されてその化学的性質が調べられてきた。核種の同定は、超重核の放射性壊変に伴って放出される α線や核分裂片を測定することによって行われてきた。しかし、この実験手法では、標的構成物質から生成する大量の副反応生成物もすべて化学分析装置に導入されるため、生成率の極めて小さな超重核の放射線計測が妨害され、研究対象とできる元素種や化学実験系が著しく制限される。さらに、近年、加速器技術の進歩とともに、1 pμA (6.25×10¹² 粒子/秒) を超える大強度の重イオンビームを利用できるようになってきたが、標的チャンバー内に生じるプラズマが原因と

なり、ガスジェット搬送効率が激減するという深刻な問題も生じている。このような背景の中、これまで超重元素の合成・核分光研究に利用されてきた反跳分離装置を用いた超重元素化学研究が注目を集めている [27, 28]。反跳分離装置を化学実験の前段分離装置として利用できれば、目的とする超重元素核種を極低バックグラウンドの下で化学分析できる。大強度重イオンビームを利用でき、さらにガスジェット搬送効率を増大できる。また、重イオンビームの分離除去によって、多様な化学反応系における実験が可能となる。

反跳分離装置を有する世界の超重元素研究拠点では、それを利用した化学実験の準備が進められている。理研では、図2に示したように、GARIS で分離された超重元素を化学実験室に引き出すためのガスジェット搬送システムの開発が行われている [29-31]。最近、筆者らは、化学実験の対象となる ²⁶¹Rf ならびに ²⁶⁵Sg をそれぞれ ²⁴⁸Cm (¹⁸O, 5n) ²⁶¹Rf, ²⁴⁸Cm (²²Ne, 5n) ²⁶⁵Sg 反応によって合成し、GARIS による分離の後、化学実験室まで引き出すことに成功している [32-34]。一方、LBNL では、世界に先駆けて Berkeley Gas-filled Separator (BGS) とガスジェット搬送装置を組み合わせ、HsO₄ の気相化学研究に向けた低温ガスクロマトグラフ装置の開発 [35]、Rf の軽い同族元素である ⁸⁵Zr や ¹⁶⁹Hf の溶媒抽出 [36] と気相化学分離 [37]、さらにオンライン液-液抽出装置 SISAK (Short-lived Isotopes Studied by the AKUFVE-technique) を用いた ²⁵⁷Rf の溶媒抽出 [38, 39] に成功している。GSI-Mainz 大学では、TASCA (TransActinide Separator and Chemistry Apparatus) と呼ばれる新型の気体充填型反跳分離装置を開発し [27]、²⁶¹Rf^a のイオン交換研究や ¹⁷⁵⁻¹⁷⁷Os の電気化学研究を開始している [40]。Bern 大学の Wittwer ら [41] も、JINR の DGFERS を利用し、114番元素 (²⁸⁹114) の気相化学実験に着手しつつある。

4. 今後の展望

2011年6月、113番以降の新元素合成実験が IUPAC と国際純正応用物理学連合 (International Union of Pure and Applied Physics: IUPAP) の合同調査委員会によって審査され、その結果114番

元素 ($^{287}114$) ならびに 116 番元素 ($^{291}116$) の存在が承認された [42]。JINR と LLNL の共同研究グループに命名権が与えられ、間もなく周期表に 2 つの新元素が誕生する (図 1 参照)。理研では、我が国発の 113 番元素の発見をより確固たるものにするため、 $^{248}\text{Cm}({}^{23}\text{Na}, 5n)^{266}\text{Bh}$ 反応による曾孫核 ^{266}Bh の合成 [43] や 3 原子目の $^{278}113$ を求めて $^{209}\text{Bi}({}^{70}\text{Zn}, n)^{278}113$ 実験を継続している。また、将来計画として、それぞれ $^{208}\text{Pb}({}^{76}\text{Ge}, n)^{283}114$ と $^{248}\text{Cm}({}^{54}\text{Cr}, xn)^{302-x}120$ 反応による 114 番、120 番元素の合成が検討されている [44]。一方、JINR のグループは、逸早く $^{244}\text{Pu}({}^{58}\text{Fe}, xn)^{302-x}120$ 反応による 120 番新元素の合成を試み、反応断面積の上限值として 0.4 pb を報告している [45]。GSI-Mainz 大学では、TASCA を用いて、それぞれ $^{249}\text{Cf}({}^{50}\text{Ti}, xn)^{299-x}120$ 、 $^{249}\text{Bk}({}^{50}\text{Ti}, xn)^{299-x}119$ 反応による 120 番と 119 番元素の合成実験が計画されている [46]。

熱い核融合反応によって合成される Cn 以降の新元素核種は、その α 壊変鎖が既知の娘核に繋がらないため、原子番号と質量数を明確に決定する実験手法の開発が重要な課題である。JINR では、超重核の質量数を 1u (原子質量単位) 以下の分解能で決定するためのオンライン同位体分離装置 (Mass Analyzer of Super Heavy Atoms: MASHA) の開発が進められている [47]。GSI-Mainz 大学ならびに LBNL では、反跳分離装置の焦点面 Si 検出器を Ge 検出器で囲み、 α 壊変に伴って放出される X 線の測定から超重核の原子番号を決定する実験が計画されている [48-50]。また、新元素探索における新しい核反応アプローチとして、 $^{248}\text{Cm} + {}^{48}\text{Ca}$ などの核子移行反応によって生成する超重核を収集するための Inelastic Reaction isotope Separator (IRiS) の設計が GSI-Mainz 大学で始まっている [51]。

超重元素の化学研究においては、近年 JINR と GSI を拠点として、最重元素領域にある Cn や 114 番元素の気相化学研究が競って行われている [27, 52-54]。これらの実験では、標的から反跳分離された生成核すべてが低温ガスクロマトグラフ装置に導入され、元素単体としての揮発性が Hg や Rn と比較されてきた。しかし、化学実験の対象となった ^{283}Cn や $^{287,288}114$ の核データには曖昧

さがあり、観測された事象数も少なく、得られた結果は研究所間で矛盾することもあった。反応断面積が非常に小さいこれらの元素を対象とした実験には、今後、反跳分離装置と組み合わせた化学実験が主流となるであろう [41, 55]。また、反跳分離装置を利用することによって、有機系の錯形成試薬もビームに破壊されることなく初めて使用可能となり [37]、気相化学研究の対象とできる化合物の種類も今後増大されると思われる。

溶液化学研究では、Oslo 大学のグループが、液-液抽出装置 SISAK とそれに連結した液体シンチレーション計数装置を開発している [38, 39, 56]。液体シンチレーション計数装置は、エネルギー分解能が Si 半導体検出器に比べて劣るため、従来法では副反応生成物の α や β 線が妨害し、超重元素の実験には利用困難であった。Omtvedt ら [38] は、 $^{208}\text{Pb}({}^{50}\text{Ti}, n)^{257}\text{Rf}$ 反応で合成した ^{257}Rf (半減期 $T_{1/2} = 4.0$ s) を BGS で分離後 SISAK へガスジェット搬送し、リン酸ジブチルトルエンに抽出することに成功している。大阪大学の小森ら [57] も、最近 $^{248}\text{Cm}({}^{18}\text{O}, 5n)^{261}\text{Rf}^a$ 反応によってより長寿命の $^{261}\text{Rf}^a$ ($T_{1/2}=68$ s) を合成し、これを GARIS ガスジェット法で化学実験室に引き出し、液体シンチレーション計数装置を用いて検出することに成功している。小森らの計測系は、将来、マイクロ化学チップを利用した液-液抽出装置 [58] などに結合される予定である。

我が国の核化学研究グループは、先述の Rf の系統的溶液化学研究 [17-26] を 105 番元素ドブニウム (Db) や Sg に拡大していくことを計画している。原子力機構では、新型の自動迅速イオン交換分離装置 AIDA II を開発し、タンデム加速器を用いて ^{262}Db のイオン交換研究を開始している [59, 60]。一方、Sg の溶液化学研究は、これまでに GSI による 2 報 [61, 62] があるのみで、直接的に ^{265}Sg の壊変を捉えた実験はなく、僅か数個の娘核の時間相関事象 ($^{261}\text{Rf} \rightarrow ^{257}\text{No} \rightarrow$) に基づいて化学の議論がなされている。当時の ^{265}Sg の核データは近年大幅に修正され [34, 63]、長寿命の核異性体 $^{265}\text{Sg}^b$ ($T_{1/2} = 15$ s) や $^{248}\text{Cm}({}^{22}\text{Ne}, 5n)^{265}\text{Sg}^{a,b}$ 反応の断面積が明らかとなった。理研では、RILAC と AVF サイクロトロン の両

施設においてSgの溶液化学研究に向けた装置開発が進められており、近い将来、世界初とも言えるSgの溶液化学研究への期待が膨らむ。イオン交換や溶媒抽出とは異なる新しいアプローチとして、電気化学的手法の開発が原子力機構で進められている。豊嶋ら [64, 65] は、作用電極を陽イオン交換体によって化学修飾したフロー電解カラムを開発し、102番元素 No^{2+} を No^{3+} に酸化することに成功している。Sgは、6+や4+の酸化状態をとることが理論的に予測されており、超重元素領域では初となる酸化還元電位の測定が期待される。

5. おわりに

最近、Pyykkö [66] によって172番元素までの電子状態がExtended Average Level Dirac-Fock法によって計算され、図3の周期表が提案された。今後、119番や120番元素が発見されれば、

周期表に新しい周期、すなわち第8周期が誕生する。121番～138番元素は5g遷移元素と予測され、人類が初めてg電子軌道に触れる日も近いかもしれない。新元素の化学は、MarieのPoとRaの発見以来、我々放射化学者を魅了し続けてきた研究課題である。次の100年間には、いくつの元素が発見されるだろうか？ そして新発見の元素はどのような核的・化学的性質を示すだろうか？

新元素の合成と化学研究分野における我が国の発展と貢献は目覚ましく、世界のトップレベルを進む時代を迎えている。世界化学年を機に、多くの学生が本研究分野に興味を抱き、次世代を担ってくれることを切に願う。幸運なことに、我が国には新元素を創り出すことができる世界最先端の加速器群がある。世界的財産とも言えるこれらの施設を大いに活用し、国際協力の下、新元素の化学という科学の最も基本的な研究課題にチャレンジしていただきたい。

族	1																	18	電子軌道		
1	1																	2	1s		
	H																	He			
2	3	4													5	6	7	8	9	10	2s 2p
	Li	Be													B	C	N	O	F	Ne	
3	11	12	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	3s 3p		
	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar			
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	4s 3d 4p		
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr			
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	5s 4d 5p		
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe			
6	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	6s 5d 6p		
	Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn			
7	87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	7s 6d 7p		
	Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn		?	?						
8	119	120	121	156	157	158	159	160	161	162	163	164	139	140	169	170	171	172	8s 7d 8p		
9	165	166											167	168	9s 9p						
6	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			4f			
	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu						
7	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			5f			
	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr						
8	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155			6f			
8	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	5g		

図3 1-173番元素の周期表 [66]。

参考文献

- [1] K. Tatsumi and J. Corish, *Pure Appl. Chem.* **82**, 753 (2010).
- [2] S. Hofmann and G. Münzenberg, *Rev. Mod. Phys.* **72**, 733 (2000).
- [3] K. Morita *et al.*, *Eur. Phys. J. A* **21**, 257 (2004).
- [4] K. Morita *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn* **73**, 1738 (2004).
- [5] K. Morita *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn* **76**, 043201 (2007).
- [6] K. Morita *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **73**, 2593 (2004).
- [7] K. Morita *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **76**, 045001 (2007).
- [8] Yu. Ts. Oganessian, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **34**, R165 (2007).
- [9] Yu. Ts. Oganessian *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 142502 (2010).
- [10] S. Hofmann *et al.*, *Eur. Phys. J. A* **32**, 251 (2007).
- [11] L. Stavsetra *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 132502 (2009).
- [12] Ch. E. Düllmann *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 252701 (2010).
- [13] P. A. Ellison *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 182701 (2010).
- [14] M. Schädel, *Angew. Chem. Int. Ed.* **45**, 368 (2006).
- [15] 永目諭一郎、*ぶんせき* No. 5, 234 (2009).
- [16] 工藤久昭、*ぶんせき* No. 12, 678 (2009).
- [17] H. Haba *et al.*, *J. Nucl. Radiochem. Sci.* **3**, 143 (2002).
- [18] H. Haba *et al.*, *Radiochim. Acta* **95**, 1 (2007).
- [19] H. Haba *et al.*, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **82**, 698 (2009).
- [20] A. Toyoshima *et al.*, *J. Nucl. Radiochem. Sci.* **11**, 7 (2010).
- [21] H. Haba *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **126**, 5219 (2004).
- [22] A. Toyoshima *et al.*, *J. Nucl. Radiochem. Sci.* **5**, 45 (2004).
- [23] Y. Ishii *et al.*, *Chem. Lett.* **37**, 288 (2008).
- [24] A. Toyoshima *et al.*, *Radiochim. Acta* **96**, 125 (2008).
- [25] Y. Ishii *et al.*, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* (in press).
- [26] Z. Li *et al.*, *Radiochim. Acta* (in press).
- [27] M. Schädel, *J. Nucl. Radiochem. Sci.* **8**, 47 (2007).
- [28] Ch. E. Düllmann, *Eur. Phys. J. D* **45**, 75 (2007).
- [29] H. Haba *et al.*, *J. Nucl. Radiochem. Sci.* **8**, 55 (2007).
- [30] H. Haba *et al.*, *Eur. Phys. J. D* **45**, 81 (2007).
- [31] H. Haba *et al.*, *J. Nucl. Radiochem. Sci.* **9**, 27 (2008).
- [32] H. Haba *et al.*, *Chem. Lett.* **38**, 426 (2009).
- [33] H. Haba *et al.*, *Phys. Rev. C* **83**, 034602 (2011).
- [34] H. Haba, presentation at the 9th Workshop on Recoil Separator for Superheavy Element Chemistry (TASCA10), Nov. 18, 2010, GSI, Darmstadt, Germany (<http://www-win.gsi.de/tasca10/>).
- [35] U. W. Kirbach *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. A* **484**, 587 (2002).
- [36] R. Sudowe *et al.*, *Radiochim. Acta* **94**, 123 (2006).
- [37] Ch. E. Düllmann *et al.*, *Radiochim. Acta* **97**, 403 (2009).
- [38] J. P. Omtvedt *et al.*, *J. Nucl. Radiochem. Sci.* **3**, 121 (2002).
- [39] L. Stavsetra *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. A* **543**, 509 (2005).
- [40] J. Even *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. A* **638**, 157 (2011).
- [41] D. Wittwer *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. B* **268**, 28 (2010).
- [42] R. C. Barber *et al.*, *Pure Appl. Chem.* **83**, 1485 (2011).
- [43] K. Morita *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **78**, 064201 (2009).
- [44] 森田浩介 (私信).
- [45] Yu. Ts. Oganessian *et al.*, *Phys. Rev. C* **79**, 024603 (2009).

- [46] Ch. E. Düllmann, presentation at TASCAl0 (<http://www-win.gsi.de/tasca10/>).
- [47] Yu. Ts. Oganessian *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. B **204**, 606 (2003).
- [48] D. Rudolph, presentation at TASCAl0 (<http://www-win.gsi.de/tasca10/>).
- [49] L.-L. Andersson *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A **622**, 164 (2010).
- [50] K. E. Gregorich, presentation at TASCAl0 (<http://www-win.gsi.de/tasca10/>).
- [51] J. Dvorak, presentation at the 2nd Workshop on Inelastic Reaction Isotope Separator for Heavy Elements, Nov. 19, 2010, GSI, Darmstadt, Germany (<http://www-win.gsi.de/iris-fall-2010/>).
- [52] R. Eichler *et al.*, Nature **447**, 72 (2007).
- [53] R. Eichler *et al.*, Angew. Chem. Int. Ed. **47**, 3262 (2008).
- [54] R. Eichler *et al.*, Radiochim. Acta **98**, 133 (2010).
- [55] A. Yakushev, presentation at TASCAl0 (<http://www-win.gsi.de/tasca10/>).
- [56] J. P. Omtvedt *et al.*, Eur. Phys. J. D **45**, 91 (2007).
- [57] Y. Komori *et al.*, RIKEN Accel. Prog. Rep. **43**, 267 (2010).
- [58] K. Ooe *et al.*, J. Nucl. Radiochem. Sci. **8**, 59 (2004).
- [59] K. Tsukada, Radiochim. Acta **97**, 83 (2009).
- [60] Y. Kasamatsu *et al.*, Chem. Lett. **38**, 1084 (2009).
- [61] M. Schädel *et al.*, Radiochim. Acta **77**, 149 (1997).
- [62] M. Schädel *et al.*, Radiochim. Acta **83**, 163 (1998).
- [63] Ch. E. Düllmann *et al.*, Phys. Rev. C **77**, 064320 (2008).
- [64] A. Toyoshima *et al.*, Radiochim. Acta **96**, 323 (2008).
- [65] A. Toyoshima *et al.*, J. Am. Chem. Soc. **131**, 9180 (2009).
- [66] P. Pyykkö, Phys. Chem. Chem. Phys. **13**, 161 (2011).

2. ラジオアイソトープの医学利用

日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門 RI 医療応用研究グループ
渡邊茂樹・石岡典子

はじめに

ラジオアイソトープ (RI) は、医学分野において診断および治療に幅広く利用されており、放出する放射線によって使い分けられている。例えば、 γ 線を放出する RI は、 γ 線が持つ高い透過力を利用して体外から対象とする臓器の機能や疾患の画像化に用いられる。これは核医学検査と呼ばれ、日本においては1960年代より実施されており、現在では ^{99m}Tc を中心に ^{123}I , ^{131}I , ^{67}Ga , ^{111}In , ^{201}Tl などの RI をトレーサとして、SPECT (単一光子放射断層撮像法) やガンマカメラを用いた脳血流や心機能などの機能検査、あるいは、がんの局

在や転移の有無などの検査が行われている。1980年代からは、ポジトロンが放出する511 keVの消滅 γ 線を利用したPET (ポジトロン断層撮像法) による検査が行われるようになった。この検査では ^{11}C や ^{18}F が用いられているが、特に ^{18}F 標識フルオロデオキシグルコース (^{18}F -FDG) が、がんの良悪性や転移の有無を調べるのに有用であること、ガンマカメラやSPECTを用いる検査に比べ定量性・感度・空間分解能に優れることから、国内外で急速に普及している。また、がん診断の他、循環器や脳機能の検査への利用に関する研究も進められており、特に近年ではアルツハイマー病の早期診断への利用が期待されている。

一方で β 線を放出する RI は、高い細胞殺傷能力を利用して治療に応用できる。その歴史は前述の核医学検査よりも古く、1950年代から実施されている。国内では長らく ^{131}I を用いた甲状腺疾患あるいは神経内分泌腫瘍の治療が行われていた

が、近年では、がんの骨転移における疼痛緩和を目的とした⁸⁹Srが2007年に認可された他、その翌年には悪性リンパ腫などの治療を目的とした⁹⁰Y標識イブリツモマブーチウキセタン（ゼヴァリン）が認可されて高い治療成績を収めているなど、新たな展開を見せている。また、日本国内での臨床利用はないが、 α 線放出RIを用いた治療も実施されている他、オージェ電子を放出するRIによる治療の試みも報告されている。

このように、これまでも医学分野において多くのRIとそれを標識した薬剤が臨床で利用されているが、その種類は未だ十分とは言えず、また、診断あるいは治療を行う上での課題も多いため、より有用なRIおよび標識薬剤の開発が切望されている。

以上のような背景から、我々は、高崎量子応用研究所イオン照射研究施設（TIARA）のAVFサイクロトロンを利用した新規PET診断用RIである⁶⁴Cuおよび⁷⁶Brに関する研究を進めると共に、原子力科学研究所の研究用原子炉JRR-3を用いて新規治療用RIである¹⁸⁶Re、¹⁸⁸Re、¹⁷⁷Luの製造研究を行い、群馬大学をはじめ、京都大学、千葉大学、東京大学、千代田テクノルと共同で、「がん」を対象として、上述のRIを標識した新規薬剤の開発に関する研究を進めている。本稿では当グループで研究を進めてきたRI製造および標識薬剤について紹介する。

⁶⁴Cu

⁶⁴Cuはポジトロン放出RIであることからPETへの利用が可能である。加えて、半減期が12.7時間と、現在臨床で利用されているPET診断用RI（¹¹C、¹⁵O、¹⁸F）に比べて長いのが特徴である。従って、これまでのPET診断用RIでは困難であった、疾患に対する親和性が高いものの集積に時間を要する抗体やペプチドなどを用いたPET診断用薬剤の開発が可能となる。また、国内に限定してみると、これまでのPET診断用RIは、利用する施設内での製造が基本であり、市販薬剤のような供給体制は¹⁸F-FDGにおいて実施されているのみである（ただし、その供給可能な地域も限定されている）。それに対し、⁶⁴Cuはその半減期の長さを利用することで、全国各地への供給

が可能になると考えられる。我々は、この⁶⁴Cuに着目し、新規製造法と標識薬剤開発に関する研究を行った。

新規製造法は⁶⁴NiO（濃縮度：99.7%）に入射エネルギー12 MeVの陽子ビームを照射し、⁶⁴Ni(p,n)⁶⁴Cu反応により⁶⁴Cuを製造した後、イミノ二酢酸を導入したキレート交換樹脂を用いて分離・精製することとした。はじめに分離条件を検討した結果、0.1M HCl溶液10 mLで⁶⁴Cuだけを樹脂に吸着させ、⁶⁴Niと副生成物である放射性Coを選択的に溶出することができた。さらに1M HCl溶液10 mLを用いることで樹脂から⁶⁴Cuを溶出できることが明らかとなった。この結果、図1に示すような分離条件で、安定した高収率（平均収率89%、 $n = 12$ ）、かつ従来法である陰イオン交換樹脂を用いた製造と比較して約1/3の時間（約2時間）で製造が可能となった¹⁾。

次に、がんに対して高い親和性を持つ抗体やペプチドを用いた⁶⁴Cu標識薬剤の合成と評価を行った。その一つとして、悪性リンパ腫などに多く発現するCD20抗原に対して高い親和性を示す抗体NuB2に、銅を捕捉する二官能性キレーターとして1, 4, 8, 11-tetraazacyclotetradecane-N, N', N'', N'''-tetraacetic acid (TETA)を導入し、さらに⁶⁴Cuを標識した⁶⁴Cu-TETA-NuB2を調製し、悪性リンパ腫移植マウスにおける体内分布を評

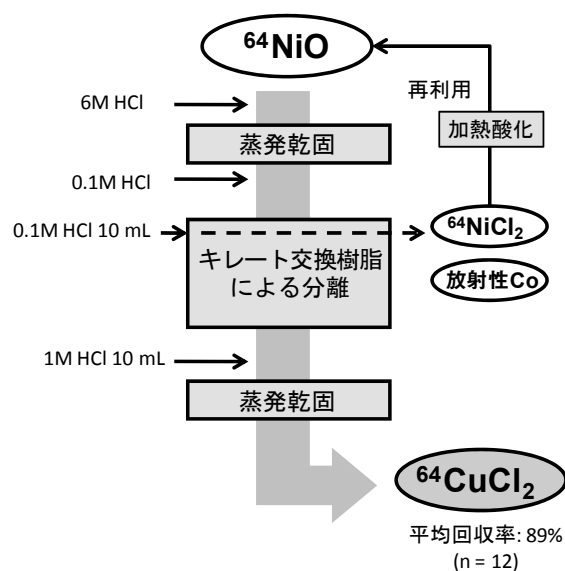


図1 キレート交換樹脂を用いた⁶⁴Cuの製造スキーム

価した。その結果、 ^{64}Cu -TETA-NuB2は標識率90%で調製可能であった。また、投与24時間後において ^{64}Cu -TETA-NuB2は腫瘍へと高集積した。その集積率は約10 %dose/gであった。投与24時間後における小動物用PETを用いたイメージングでは、がんを描出する画像を取得することができた²⁾。次に、乳がんなどに多く発現するHER2受容体を標的とする抗体 Trastuzumab に、キレート部位を1, 4, 8, 10-tetraazadodecane-N, N', N'', N'''-tetra-azaacetic acid (DOTA) とする ^{64}Cu -DOTA-Trastuzumabを調製し、その有用性を評価した。 ^{64}Cu -DOTA-TrastuzumabをHER2過剰発現腫瘍である非小細胞肺癌移植マウスに投与すると、24時間後には腫瘍に高集積することを確認し、さらにPETイメージングによる腫瘍の画像化にも成功した(図2)³⁾。

^{64}Cu 標識ペプチドとしては、内分泌系腫瘍に多く発現するソマトスタチン受容体に対し高い親和性を持つオクトレオチド誘導体DOTA-TOC(D-Phe-Tyr-オクトレオチド)に ^{64}Cu を標識した ^{64}Cu -DOTA-TOCを合成し、その有用性を検討した。 ^{64}Cu -DOTA-TOCを、ソマトスタチン受容体発現腫瘍である神経膠芽腫を移植したマウスに投与した結果、24時間後のPETイメー

ジングにおいて腫瘍を描出する画像を取得し、 ^{64}Cu -DOTA-TOCがソマトスタチン受容体発現腫瘍のPET診断用薬剤として有用であることを明らかにした⁴⁾。以上の様な ^{64}Cu 標識薬剤は、 ^{64}Cu が小型サイクロトロンで製造可能であること、また、標識薬剤合成が二官能性キレーターを用いて比較的簡便であることから、今後医学分野において広く利用されることが期待される。

^{76}Br

^{76}Br は、フッ素やヨウ素と同じハロゲンであることから、 ^{18}F や ^{123}I などのハロゲン核種を ^{76}Br に置換した薬剤の開発が可能である。また、 ^{64}Cu などの金属RIと異なり共有結合により直接標識できることから、低分子への導入が可能であることも特徴の一つである。我々はこの ^{76}Br の製造とその標識薬剤の開発に関する研究を進めてきた。 ^{76}Br は Cu^{76}Se ターゲット(濃縮度:99.67%)に、入射エネルギー20 MeVの陽子ビームを照射することで $^{76}\text{Se}(p, n)^{76}\text{Br}$ 反応により ^{76}Br を製造し、その後、乾式蒸留法により ^{76}Br を分離する方法で製造している。現在では1回あたり300 MBq程度の ^{76}Br を定常的に製造することが可能となっている。

褐色細胞腫などのノルエピネフリントランスポーター(NET)を発現するがんの診断では、ノルエピネフリン誘導体である ^{123}I -MIBGが臨床で用いられている。しかし、 ^{123}I -MIBGはSPECT診断用薬剤であり分解能がやや劣ることから、定量性や分解能に優れたPET検査を導入することができれば、より精度の高い診断が可能になる。そこで我々は、 ^{123}I を ^{76}Br へと置換した ^{76}Br -MBBGを合成し、PET診断用薬剤としての有用性を評価した。 ^{76}Br -MBBGは、非放射性MIBGを前駆体とするハロゲン交換反応により平均収率44%で合成した。 ^{76}Br -MBBGを褐色細胞腫移植マウスに投与し、MBBGの体内分布を評価した。その結果、MBBGは腫瘍に特異的に集積し、投与3時間後には32.0 %dose/gという非常に高い値を示し、血中の放射能量は投与の早い段階(投与30分後)からほとんど滞留しないことが明らかとなった(図3)。

上記の実験結果から、腫瘍/血液比を算出す

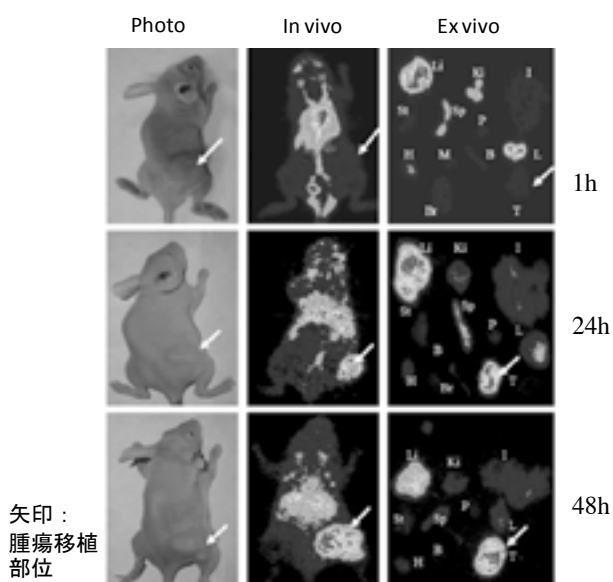


図2 ^{64}Cu -DOTA-Trastuzumabを用いた非小細胞肺癌の(a) in vivoおよび(b) ex vivoのPET画像

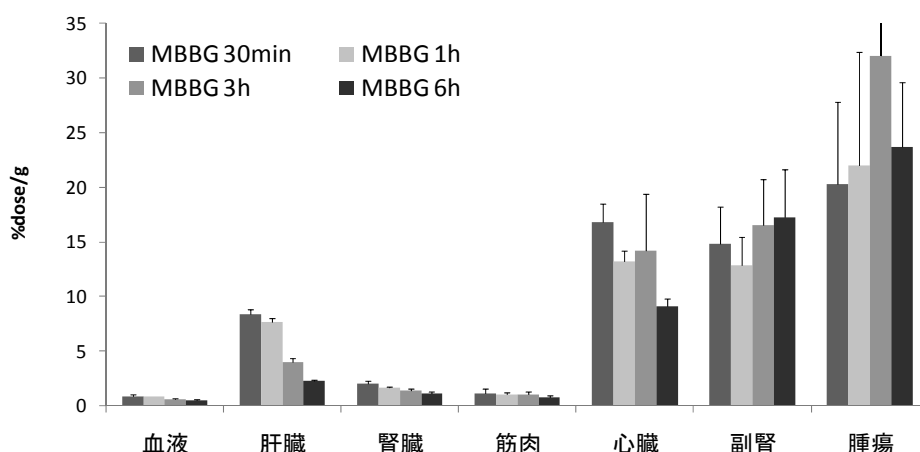


図3 ⁷⁶Br-MBBG の褐色細胞腫移植マウスにおける体内分布

ると、腫瘍の描出が十分可能な値 (544、投与3時間後) が得られた。次に、小動物用 PET を用いてイメージング実験を行った。その結果、図4に示すように、腫瘍に MBBG が集積し、明瞭に描出する画像を取得した⁵⁾。以上の検討から、⁷⁶Br-MBBG は褐色細胞腫の PET 診断用薬剤として有用であることが明らかとなった。

¹⁸F あるいは ¹¹C を標識したアミノ酸トレーサは、¹⁸F-FDG に比べ非標的組織への集積が低

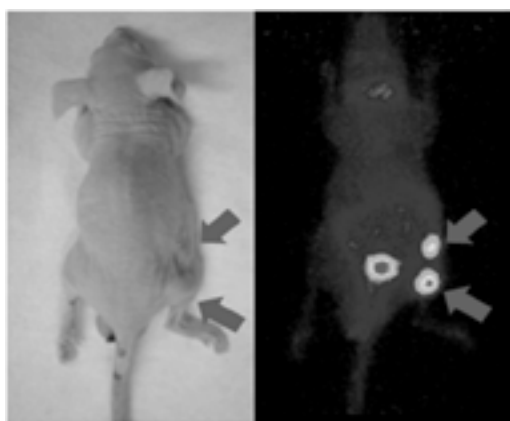


図4 ⁷⁶Br-MBBG を用いた褐色細胞腫の PET 画像

いことから、FDG では検査が困難な頭頸部や脳における腫瘍イメージング剤として臨床で利用されている。しかし、¹⁸F や ¹¹C では半減期が短いことから、より半減期が長い ⁷⁶Br を用い

ることで全国各地での利用が可能になる。そこで、⁷⁶Br をアミノ酸である α メチルチロシンに標識した ⁷⁶Br-BAMT を合成し、その有用性を検討した。BAMT の合成は酸化剤存在下で求電子置換反応により α メチルチロシンを臭素化することで行い、標識率 30% で合成した。得られた ⁷⁶Br-BAMT を大腸がん移植マウスに投与して体内分布を検討した結果、腫瘍への集積が認められ、その値は類似の化学構造を持つアミノ酸トレーサ ¹⁸F-FAMT よりも高いものであった。また、小動物用 PET を用いてイメージング実験を行った結果、腫瘍を描出する画像を取得することができ、腫瘍イメージング剤として利用可能であることを明らかにした⁷⁾。

¹⁷⁷Lu

¹⁷⁷Lu は半減期 6.7 日の β 線放出 RI であり、先行認可されている 90Y (約 27 日) に比べ長い半減期を有していることから、がん に長時間 β 線を照射することによる高い治療効果が期待できる。また、薬剤の集積は個人により異なるため、治療前に集積確認を行うことが必須となっているが、 β 線のみを放出する 90Y では薬剤の集積を直接画像化することができないため、化学的性質が比較的類似している ¹¹¹In を用いて集積を画像化する。それに対し ¹⁷⁷Lu は、エネルギーの低い γ 線も同時に放出することから、1 種類の RI で治療と診断が可能となる。我々は ¹⁷⁷Lu にも着目し、製造

及び標識薬剤開発に関する研究を進めてきた。

^{177}Lu の製造は $^{176}\text{Yb}_2\text{O}_3$ (濃縮度 :99.7%) をターゲットとする $^{176}\text{Yb} (n, \gamma) ^{177}\text{Yb} \rightarrow ^{177}\text{Lu}$ による間接法により製造した⁷⁾。この方法により無担体 ^{177}Lu を製造することが可能となる。これまでの検討の結果、Ln-Resin により ^{175}Yb と ^{177}Lu の予備分離を行い (図5)、その後 HPLC を用いることで ^{177}Lu を精製することが可能となった。現在では動物を用いた治療効果実験の実施には十分な 200 ~ 300 MBq 程度の ^{177}Lu が製造可能となっている。また、 ^{177}Lu は金属であり、キレート部位を導入することで容易に治療用薬剤とすることができる。そこで、我々は前述の悪性リンパ腫に集積する抗体 (NuB2) に、Lu を捕捉可能な DOTA を導入して ^{177}Lu を標識した ^{177}Lu -DOTA-NuB2 の開発を進めてきた。当初は ^{177}Lu に含まれる不純物により標識が阻害された (標識率 :<5%)。そこで不純物を低減するために、HPLC で分離後に陽イオン交換樹脂および陰イオン交換樹脂での精製を行った。その結果、 ^{177}Lu -DOTA-NuB2 を標識率 80% 以上で、効率よく標識することが可能となった。次に ^{177}Lu -DOTA-NuB2 を担がんマウ

スに投与し、その治療効果を検討した。その結果、実施数は少ないものの、腫瘍の増殖抑制や縮小等明らかな治療効果の取得に成功している。以上の結果から、 ^{177}Lu は治療用 RI として有用であることが明らかとなった。今後は大量の ^{177}Lu (GBq オーダー) を製造可能な方法の開発および抗腫瘍効果に関する検討を行う予定である。

おわりに

RI の医学利用は現在では多岐にわたっているだけでなく、他の検査や治療にはない大きなメリットがある。たとえば診断においては、一度に全身を検査できる上に、体内の深部における疾患の画像化ができるといった点が挙げられる。また、治療においては副作用がほとんどない、また、外科手術が困難な疾患や化学療法での効果が小さい疾患に対して有効となるケースがあるなどといった特徴がある。したがって、今後の医療の発展において RI の医学利用は、ますます重要な役割を果たしていくと考える。

我々は加速器および原子炉を用いて、診断および治療に適した新規医療用 RI の製造と標識薬剤

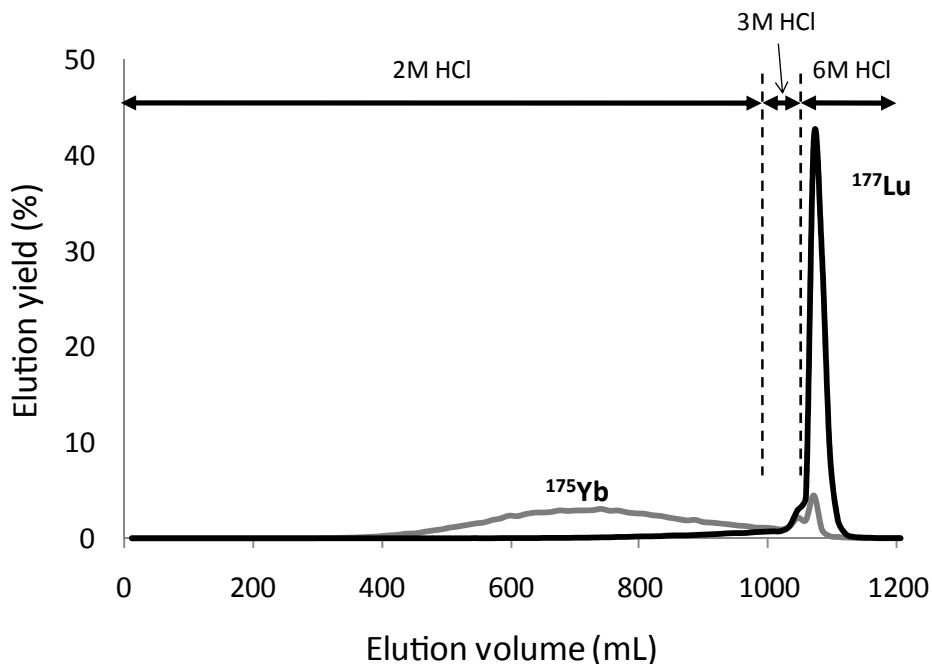


図5 Ln-Resin における ^{175}Yb - ^{177}Lu の溶離曲線

の開発に関する研究を行ってきたが、これからも⁶⁴Cuや⁷⁶Br標識薬剤が¹⁸F-FDGの弱点を補う薬剤になりうることを考え、研究を進めていく予定である。また、治療用RIとしては¹⁷⁷Luに関する研究に加え、 α 線放出RIによる治療に向けたRI製造とその標識薬剤の開発も行い、放射化学の発展に貢献していきたい。

謝 辞

本稿での成果は橋本和幸氏、渡辺智氏、大島康宏氏（以上原子力機構）、花岡宏史氏、Pramila Paudyal氏、飯田靖彦氏、遠藤啓吾氏（以上、群馬大学）と共同で実施した研究である。また、¹⁷⁷Luに関する研究は、文部科学省原子力基礎基盤戦略研究イニシアティブにより実施された「先進的ながん診断・治療を実現するRI-DDS開発研究」の研究成果である。

参考文献

- 1) Sh. Watanabe, Sa. Watanabe, J. Liang, H. Hanaoka, K. Endo, N. S. Ishioka, "Chelating ion-exchange methods for the preparation of no-carrier-added ⁶⁴Cu", *Nucl. Med. Biol.*, **36**, 587 (2009)
- 2) Sh. Watanabe, Y. Iida, N. Suzui, T. Katabuchi, S. Ishii, N. Kawachi, H. Hanaoka, Sa. Watanabe, S. Matsushashi, K. Endo, N. S. Ishioka, "Production of no-carrier-added ⁶⁴Cu and applications to molecular imaging by PET and PETIS", *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **280**, 199 (2009)
- 3) P. Paudyal, B. Paudyal, H. Hanaoka, N. Oriuchi, Y. Iida, H. Yoshioka, H. Tominaga, Sa. Watanabe, Sh. Watanabe, N. S. Ishioka, K. Endo, "Imaging and biodistribution of Her2/neu expression in non-small cell lung cancer xenografts with ⁶⁴Cu-labeled trastuzumab PET.", *Cancer Sci.*, **101**, 1045 (2010)
- 4) H. Hanaoka, H. Tominaga, K. Yamada, P. Paudyal, Y. Iida, Sh. Watanabe, B. Paudyal, T. Higuchi, N. Oriuchi, K. Endo, "Evaluation of ⁶⁴Cu-labeled DOTA-D-Phe¹-Tyr³-octreotide (⁶⁴Cu-DOTA-TOC) for imaging somatostatin receptor-expressing tumors" *Ann. Nucl. Med.*, **23**, 559 (2009)
- 5) Sh. Watanabe, H. Hanaoka, J. Liang, Y. Iida, K. Endo, N. S. Ishioka, "PET imaging of norepinephrine transporter-expressing tumors using ⁷⁶Br-MBBG", *J. Nucl. Med.*, **51**, 1472 (2010)
- 6) Y. Ohshima, H. Hanaoka, Sh. Watanabe, Y. Sugo, Sa. Watanabe, H. Tominaga, N. Oriuchi, K. Endo, N. S. Ishioka, "Preparation and biological evaluation of 3- [⁷⁶Br] bromo- α -methyl-L-tyrosine, a novel tyrosine analog for positron emission tomography imaging of tumors. *Nucl. Med. Biol.*, in press (2011)
- 7) K. Hashimoto, H. Matsuoka, S. Uchida, "Production of no-carrier-added ¹⁷⁷Lu via the ¹⁷⁶Yb (n, γ)¹⁷⁷Yb \rightarrow ¹⁷⁷Lu Process", *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **255**, 575 (2003)

3. 放射化学を基礎とした核不拡散に関わる分析技術

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学
研究部門

宮本ユタカ

1. 背景

キュリー夫妻を始めとして数多くの化学者が放射化学的な手法を用いて科学史上に輝かしい業績を後世に残している。得られた科学的知識は原子力発電など原子力技術にも応用されて平和利用が進んできた。その一方で、核兵器など国際的な問題を引き起こす一面も原子力技術は見せてきた。原子力技術の平和利用のために、国際原子力機関 (IAEA) は“Atoms for Peace”の名の下に設立された国際機関であり、その活動の重要な部分を占めるのが国際社会の核活動監視機能である [1]。核不拡散条約 (NPT) 締結国が保有する核物質と関連施設を IAEA に申告して、核兵器開発に結びつく未申告活動が行われていないことを IAEA が査察および検認してきた。これを保障措置 (safeguards) と呼ぶ。IAEA は 1996 年に「環境サンプリング手法」を導入し、保障措置の強化と効率化を図った [2-4]。この方法は原子力施設内部及び周辺から採取した環境試料に含まれる極微量の核物質を分析することで、未申告の核物質や原子力活動の「痕跡」を探知するのである。刑事事件現場で鑑識 (forensics) が採取した証拠品から違法薬物や爆発物などの成分分析を行って、違法行為の痕跡を探知するようなものである。

2. 分析技術

2.1 保障措置環境試料

IAEA 査察官は、原子力関連施設内部でごくわずかに放出された核物質を「スワイプ」と呼ばれる 10 cm 角の綿製の布で疑わしい箇所を拭き取って持ち帰る (写真 1)。この「環境」試料に付着した U や Pu の量や同位体比を分析すれば、その結果は未申告活動の探知につながる。特に同位体比の分析結果は重要である。表 1 に示すように U 及び Pu の同位体比からどのような原子力活動を行ったのか分かる。核兵器を製造するためには ^{235}U や ^{239}Pu を高く同位体濃縮することが必



写真 1 原子力施設から環境試料を採取する IAEA 査察官

表 1 ウランおよびプルトニウムの同位体比と関連する原子力活動

同位体比	原子力活動
$^{235}\text{U}/^{238}\text{U} \geq 0.9$	核兵器利用可能
$^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0.0072$	天然組成
$0.01 \leq ^{235}\text{U}/^{238}\text{U} \leq 0.05$	原子力発電
$^{234}\text{U}/^{238}\text{U} \geq 0.0055$	同位体濃縮
$^{236}\text{U}/^{238}\text{U} \geq 10^{-10}$	再処理
$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu} \leq 0.01$	核兵器利用可能
$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu} \approx 0.18$	グローバルフォールアウト
0.042	長崎原爆起源 [5]
0.035	Nevada [5]
0.036	Semipalatinsk [5]
0.21 - 0.36	Bikini 環礁土壌 [5]
$0.2 < ^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu} < 0.5$	原子力発電

要となる。U については、 ^{234}U や ^{236}U の同位体比から濃縮や使用済み燃料の再処理の履歴が分かる [6]。ホットセル内のような多量の核物質を扱う場所を拭き取った試料では、U は数十 μg 、Pu は数十 ng と多量に付着していることもあるが、壁や配管などを拭き取った試料に付着している U 量は $10^{-11} \sim 10^{-8}$ g (^{238}U に換算して $10^{-7} \sim 10^{-4}$ Bq)、Pu は $10^{-15} \sim 10^{-13}$ g (^{239}Pu に換算して $10^{-5} \sim 10^{-3}$ Bq) と極微量である。

2.2 極微量分析法

採取された試料の分析法は、スワイプ試料全体を溶解して分析する「バルク分析」とスワイプ試料から核物質粒子を拾い出して分析する「パーティクル分析」に大別される。IAEA は適切な探

知ができるように試料によって分析法を選択する。バルク分析では試料全体の平均的な情報が得られる。また、スワイプに染み込んだ試料や拾い出すことが困難な微細粒子なども分析できるので、極微量 Pu の検出などに優れている。パーティクル分析では粒子を個別に分析するので、多量の粒子中に存在する少数の特徴的な粒子の分析に威力を発揮する。例えば、低濃縮ウラン取扱施設における未申告高濃縮ウラン粒子の検出などに優れている。

IAEA では 1995 年にウィーン郊外にある保障措置分析所 (SAL) 内にクリーンラボを建設した [7]。ここで査察官が採取してきた保障措置環境試料の分析や、査察に用いるスワイプ試料の準備などを行う。世界中で採取する試料は年間 400 ~ 800 試料にもなる。そのため、分析能力の増強と複数の分析所による分析値の二重チェックを目的として、SAL を中心に世界各国の研究所から成る IAEA ネットワーク分析所 (NWAL) が組織されている。各 NWAL は分析能力や処理能力などに応じて IAEA から送付される試料を分析して、その結果を IAEA に報告する。採取場所などの情報は知らされないし、分析結果の考察も行わない。NWAL として活動するには分析精度や正確さなどの技術基準審査を合格して IAEA から認証を得なければならない。IAEA は不定期に濃度や同位体比が既知の品質管理試料を NWAL に内容を知らせずに分析させて保障措置試料の分析能力を維持管理している。現在、NWAL は英、米、仏、露、フィンランド、オーストラリア、ブラジル、日本など合計 20 箇所ある。また、韓国や中国なども分析所として認証を得ようと準備を進めている。日本では 2001 年に日本原子力研究開発機構 (旧日本原子力研究所) 内にクリーンルーム施設「高度環境分析研究棟 (CLEAR)」を整備し、2003 年に IAEA から NWAL として認証を取得した。CLEAR は酸分解などの化学操作や、 ^{244}Pu ならびに ^{233}U の核物質スパイクの使用、ICP-MS などの精密分析機器の安定動作などを考慮して設計された放射化学操作が可能な大型クリーンラボである。ここでは使用する試薬や器具類は U 不純物量が少ないものを吟味して使うだけではなく、非沸騰蒸留した硝酸や混酸で容器を洗浄する

など、可能な限り周辺環境から試料が U で「汚染」しないように様々な手間が施されている。このように細心の注意を払っているため、品質管理試料の分析値の正確さは NWAL の中でも常に上位を保っている。また、分析試料を受け取ってから 60 日以内と迅速に測定結果を報告しているので、原子力機構は IAEA からとても信頼されているアジアの NWAL である。

各 NWAL ではそれぞれ得意とする分析や標準試料、品質管理試料の調製などを行っており、原子力機構ではバルク分析と粒子分析の両方を行っている [8-11]。このために開発した最新の研究成果は学会や学術論文誌などを通して広く国内外に発信している。日本放射化学討論会では関連する研究開発の成果を含めて毎年発表 (2003 年から 2010 年までに合計 25 件) しており、その一部については学会の学術論文誌 (Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences) にも掲載している [9, 12]。このような研究成果の情報発信の場を提供している日本放射化学会は発信源として重要な役割を果たしている。保障措置の極微量分析技術を応用、展開した研究成果の中には、日本放射化学会奨励賞 [13] や JNRS 誌論文賞を受賞した研究成果 [12] もあり、新しい微量分析技術の研究成果が期待されている。

2.3 バルク分析

バルク分析では、植物などの環境試料と同様に灰化処理の後、硝酸などで酸分解するのが一般的である。ICP-MS は多元素同時分析ができるが、測定溶液に共存元素が多いと分析元素の正確な同位体比分析を妨害する。Ir, Pt, W, Pb などの元素は、アルゴンや酸素との分子イオン ($^{194}\text{Pt}^{40}\text{Ar}^+$, $^{193}\text{Ir}^{16}\text{O}_3^+$ 等) が U や Pu のピークに重なり分析を妨害することがある [14, 15]。また、Na や Fe 等が多量に存在するとマトリックス効果で分析元素のイオン強度が変化してしまう [16]。Fe, W, Pb 等は原子力施設の構造物から試料と共に拭き取られやすく、特に U や Pu 量が極微量になると分析元素に対する妨害元素量の比が高くなるので妨害元素の分離・除去が正確な分析に欠かせない。原子力機構では妨害元素の効果的な分離法について取り組み、より正確で信頼性の高い分析を目指

している [17]。

PuやUの分離精製は陰イオン交換カラムや抽出クロマトカラム (Eichrom 製 TEVA, UTEVA 等) を用いる方法が採られている [18, 19]。定量は一定量のスパイク (^{242}Pu , ^{233}U) を試料に添加する同位体希釈法が採用されている。同位体比の測定には二重収束型の高分解能 ICP-MS や表面電離型質量分析装置 (TIMS) が用いられ、測定試料の調製が容易な ICP-MS が増加傾向にある。また、検出器はシングルコレクタ型からマルチチャンネル型に変わりつつある。オーストラリアの研究所 (ANSTO) では加速器質量分析装置 (AMS) を用いて ^{236}U の分析を行っているのが特徴的である [20]。

分析装置の更新や分析法の改良などにより、バルク分析技術力はどの NWAL でも年々向上してきており、最近の検出下限値は ^{239}Pu では 10 fg (fg: 10^{-15} g) 近くまで下がってきている。このような極微量を扱う分析では、同位体希釈法に用いるスパイクや高濃度の分析試料による相互汚染が極わずかであっても、分析結果の正確さに大きく影響を及ぼす。そのため、濃度が大きく異なる試料の混在を避けるとか、施設に高含有量の試料を不用意に持ち込まないなどの注意が必要である。筆者の経験からすると、クリーンラボ内の実験器具や分析装置を致命的に汚さずに扱える実質上の上限量は、ウランに関しては 1 試料につき $1\ \mu\text{g}$ (10 mBq)、Pu に関しては 1 pg (2 mBq) と思われる。高含有量の試料をクリーンラボに持ち込まないようにするため、試料を受け取るとふり分け (スクリーニング) が行われる。この検査には非破壊分析が可能な放射能測定や蛍光 X 線元素組成分析法が主として用いられる。原子力機構では、低エネルギー Ge 検出器に反同時計数回路を用いた極微量放射線測定システムを開発し、U などアクチノイド核種が放出する低エネルギー γ 線領域のコンプトンバックグラウンドを 1/10 に下げることが成功した [21]。また、10cm 角のスワイプ試料表面に X 線を走査させて付着している試料の蛍光 X 線元素分析ができる装置を開発した [22]。この装置は大気雰囲気下で試料の元素分布を簡便かつ定量的に測定できるので、妨害元素の除去・分離対策を検討する上で非常に役立っている。

2.4 パーティクル分析 (1) SIMS 法

スワイプ材に付着した核物質粒子を分析するためには塵など数多くの粒子から目的の核物質粒子を拾い出す作業が重要となる。超音波洗浄器でスワイプ材から粒子をふり落とす方法を採用している NWAL もあるが、原子力機構では掃除機のように粒子を吸い込んで Si ウェハ上に乗集するインパクター方式を開発した (写真 2) [23]。この方法は極めて簡便だけでなく、粒子を適度に試料台に分散できる利点がある。この優れた回収法を採用する他の NWAL も出てきて標準法になりつつある。また、捕集した粒子は走査型電子顕微鏡 (SEM) の反射電子画像および蛍光 X 線分析から核物質粒子を特定し、SEM 観察下でガラス製キャピラリーに静電力で拾い上げて隣の Si ウェハ上に乗せる技術を開発した [24]。これを二次イオン質量分析装置 (SIMS) に移し、個々の粒子について U および Pu の同位体比を分析する。IAEA が要求する精度で SIMS が分析できる粒子は粒径が $1\ \mu\text{m}$ 以上である。SIMS でも ICP-MS と同様に共存元素の分子イオンによるピークの重なりが起きる。特に Pb 粒子が U 粒子に付着していると、Pb の分子イオン ($^{206}\text{Pb}^{12}\text{C}^{16}\text{O}^+$, $^{208}\text{Pb}^{12}\text{C}^{16}\text{O}^+$) が存在度の低い ^{234}U や ^{236}U の同位体分析を妨害する。原子力機構では U 粒子を Pb 粒子から物理的に分けて測定する工夫を開発した [25]。最近では分解能 (M/ Δ M) が 6000 の高分解能 SIMS (LG-SIMS) が開発され、分光学的に分子イオンとウランのピークを分けることができる。IAEA では 2010 年 3 月に LG-SIMS などの大型の分析機器を装備したクリーンラボの増築



写真2 スワイプ試料から粒子を捕集する吸引器

に着工し、装置の分析試験が開始されている。

2.5 パーティクル分析 (2) FT-TIMS 法

フィッシュントラック (FT) - 表面電離型質量分析 (TIMS) 法はパーティクル分析法の1つで、遠心分離法によるウラン濃縮工場で採取されるような粒径 $1 \mu\text{m}$ 以下の極めて細かい粒子に対して適用される。この方法は2つの分析技術を組み合わせて行われる。核物質粒子の場所を FT 法で特定し、TIMS で試料の同位体比を分析する。FT 法はポリカーボネイト製の薄いフィルムに粒子試料を埋め込み、FT 検出材と重ねて原子炉中性子で照射した後、エッチング剤で核分裂飛跡を「現像」する。飛跡ができた部分に存在する粒子試料をフィルムとともにレーザーで切り出して TIMS で同位体分析をする。原子力機構では、この分析技術に次のような様々な独自の工夫を凝らした。例えば、試料フィルムと検出材を一端のみ固定して照射することにより、エッチング像と試料位置がずれないので確実に核物質粒子を拾い出せる [26]。エッチング時間を制御すると $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比が高い U 粒子を選択的に検出できる [27] などである。試料を原子炉で中性子照射しないで FT 検出材に1週間曝露すると、半減期が比較的短い Pu から放出される α 線によってできる飛跡が得られる。これを中性子誘導核分裂によってできる飛跡と重ね合わせることで Pu 粒子と U 粒子が混在する中から Pu のみを選別することができた。Pu 粒子分析のみに限れば原子炉照射の必要がないことも魅力的である [28]。TIMS による極微量分析の技術開発では、フィラメント加熱電流を制御して連続加熱することにより 0.4 pg の U が正確に同位体分析できた [29]。

原子力機構はこれらの分析技術を使い、NWAL の中では数少ない優れた FT-TIMS 法によるパーティクル分析も可能な分析所となった。

3. その他の分析技術

最近の傾向としては、保障措置環境試料中の Pu に対して ^{241}Pu (半減期 14.35 年) と β^- 壊変生成核種 ^{241}Am (半減期 432.2 年) の比から、Pu が精製された時期を推定する分析技術 (年代測定) を開発する動きも出ている [30]。原子力機構では、

Pu 同位体標準溶液から調製した粒径が数 μm の Pu 粒子 1 個を陰イオン交換により ^{241}Am と ^{241}Pu に分離し、精製時期を推定する極微量同位体比分離・分析技術を開発した [31]。

IAEA 保障措置は国家の核疑惑を対象としているが、米国の 9.11 事件以降、非国家組織による核物質を使ったテロ行為が懸念されている。そこで FBI などの捜査機関が遺留品の鑑識を行うため必要な分析技術 (核鑑識: nuclear forensics) の開発を米国や欧州の研究所が中心となって進めている。欧州の超ウラン研究所 (ITU) では一般環境から発見された立方体のウラン金属塊を分析し、 $^{234}\text{U} - ^{230}\text{Th}$ 年代法と $^{235}\text{U} - ^{231}\text{Pa}$ 年代法から 1943 年に精製された臨界集合体の一部であることを突き止めている [32-34]。

アクチノイドの化学分離法、微弱放射線測定、質量分析、フィッシュントラック法、年代測定法など、56 年に渡って日本放射化学討論会で蓄積されてきた放射化学の研究成果を基礎として、原子力機構では核不拡散に関わる極微量分析技術の研究開発を進めており、その成果で NWAL の一員として IAEA 保障措置の分析技術と質の向上を牽引している。ここで述べた分析技術は対象試料が原子力施設由来 (人工物) であるが、自然界に存在する物質の分析にもそのまま応用が可能である。この分野の分析技術が国際社会に直接的に貢献するだけでなく、自然科学の基礎基盤研究にも貢献できればと願う。

本記事には文部科学省から委託を受けて実施した「保障措置環境試料分析開発調査」の成果の一部が含まれる。

参考文献

- [1] 外務省 HP、http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/atom/iaea/iaea_g.html
- [2] 久野祐輔、原子力 eye、**51**, 24 (2005).
- [3] 久野祐輔、ぶんせき、**1**, 11 (2003).
- [4] D.L.Donohue, *J. Alloys Compd.*, **271-273**, 11 (1998).
- [5] K.Hirose *et al.*, *J. Environ. Monit.*, **5**, 1 (2003).
- [6] A.Axelsson *et al.*, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **282**, 725 (2009).
- [7] 久野祐輔、日本原子力学会誌、**46**, 50 (2004).

- [8] S.Usuda *et al.*, *J. Environ. Anal. Chem.*, **86**, 663 (2006).
- [9] S.Usuda *et al.*, *J. Nucl. Radiochem. Sci.*, **11**, A5 (2010).
- [10] 臼田重和 他、*KEK Proceedings*, **2007-16**, 13 (2008).
- [11] Y.Hanzawa *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **40**, 49 (2003).
- [12] Y.Miyamoto *et al.*, *J. Nucl. Radiochem. Sci.*, **10**, 7 (2009).
- [13] Y.S.Kokubu *et al.*, *Appl. Radiat. Isot.*, **65**, 465 (2007).
- [14] M.Magara *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **39**, 308 (2002).
- [15] F.Pointurier *et al.*, *J. Anal. At. Spectrom.*, **23**, 94 (2008).
- [16] M.Magara *et al.*, *J. Anal. At. Spectrom.*, **17**, 1157 (2002).
- [17] 宮本ユタカ 他、*J. Nucl. Radiochem. Sci. Suppl.*, **10**, 61 (2009).
- [18] 高橋正人 他、*KEK Proceedings*, **2002-7**, 31 (2002).
- [19] M.L.D.P. Gody *et al.*, *J. Environ. Radioactivity*, **100**, 613 (2009).
- [20] M.A.C. Hotchkis *et al.*, *Nucl. Instrum. Method B*, **268**, 1257 (2010).
- [21] K.Yasuda *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol. Suppl.*, **3**, 576 (2002).
- [22] 安田健一郎 他、第46回アイソトープ・放射線研究発表会要旨集、p.137 (2002).
- [23] F.Esaka *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **41**, 1027 (2004).
- [24] F.Esaka *et al.*, *J. Trace and Microprobe Tech.*, **19**, 487 (2001).
- [25] F.Esaka *et al.*, *Talanta*, **71**, 1011 (2007).
- [26] 李 致圭、ぶんせき、**4**, 181 (2010).
- [27] C.G.Lee *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **46**, 809 (2009).
- [28] C.G.Lee *et al.*, *Talanta*, **85**, 644 (2011).
- [29] D.Suzuki *et al.*, *Int. J. Mass Spectrom.*, **294**, 23 (2010).
- [30] Z.Mácsik *et al.*, *Appl. Radiat. Isotopes* **68**, 2147 (2010).
- [31] F.Esaka *et al.*, *Talanta*, **83**, 569 (2010).
- [32] K.Mayer *et al.*, "Karlsruher Nuklidkarte Commemoration of the 50th anniversary", *Ed. G.Pfennig et al.*, p.268 (2008).
- [33] K.Mayer *et al.*, *J. Alloy Compd.*, **444**, 50 (2007).
- [34] K.Mayer *et al.*, *Radiochim. Acta*, **97**, 261 (2009).

4. ラジオアイソトープ利用の最前線

日本アイソトープ協会

ニツ川章二

1. はじめに

「キュリー夫妻は、学問的信念と執着心で、ポヘミヤのヨアムスタール鉱山からの酸化ウランを抽出した大量のピッチブレンドの残りかすから、放射能を頼りに新物質を探すという苦勞の多い仕事に挑戦しました。そして何カ月かの不屈の努力の末、強い放射能を持つ二つの新元素、ビスマスに性質が似たポロニウムを1898年7月に、バリウムによく似たラジウムをその年の12月に発見しました。その四年後、1トン以上のピッチブレ

ンドから青い光を発する純粋なラジウム塩0.1gが取り出されました。新元素ラジウムは、学問対象に止まらず、産業における蛍光物質として、また、医療における皮膚疾患や悪性腫瘍の治療薬としての有効性等が次々と明らかになりました。キュリー夫妻は、ラジウム精製法に対する特許を取得せず公開したため、他の科学者たちは何の妨げもなくラジウムを精製使用することができました。」(「放射性同位元素物語」¹⁾及び「Wikipedia」より)

キュリー夫妻が発見したラジウムは当初からその産業・医療への有効性が認められていた。その発見から約110年、今ではラジオアイソトープ(RI)は医療、工業、産業、研究等幅広い分野で

利用され、私たちの生活の質を向上させている。我が国における RI 利用の現状を紹介する。

2. 日本アイソトープ協会の役割

昭和12年、理化学研究所仁科研究室にサイクロトロンが建設され我が国における RI の製造と利用が始まった。製造された RI は研究分野だけではなく、産業・医療分野でも利用されていた。昭和20年、第二次世界大戦が終戦となり、連合軍がサイクロトロンを解体・撤去、東京湾に投棄することにより、この RI 利用は中断された。しかし、昭和25年、米国から故仁科芳雄博士に RI が寄贈されたことにより RI 利用が再開されたこととなった。翌年からの民間貿易の再開に伴い、RI の利用と放射線障害の防止に関する知識・技術の研究開発、これら知識・技術の普及・啓発及び RI の一括輸入とその配分（供給）の実務を行う使用者・研究者の団体として日本放射性同位元素協会（現「日本アイソトープ協会」）が発足した。昭和29年、組織強化と充実のため社団法人に改組し、放射線安全取扱いと公共の安全確保に配慮

した RI の供給から廃棄までの業務を開始することとなった。²⁾

現在、日本アイソトープ協会は RI・放射性医薬品の供給から廃棄までを一貫管理することにより、放射線の安全管理に寄与するとともに、国民に安心と安全を与えている。具体的には、全国の利用者から RI の注文を受け、注文された RI が使用者の許可・届出内容と一致していることを確認した後、輸入又は製造して使用者へ供給している。また、RI を使用した後の使用しなくなった RI 及び RI 廃棄物は回収・集荷し、製造所へ返却又は当協会施設で貯蔵・処理している。日本アイソトープ協会の RI の供給から廃棄までの一貫管理体制を図1に示す。

3. 放射性同位元素の利用状況³⁾

放射線障害防止法施行時点からの、使用許可・届出事業所数（放射線発生装置を含む）の年度推移を図2に示す。法施行以来、RI 利用方法の拡大とともに事業所数は徐々に増加してきたが、1998年をピークとして減少してきている。特に

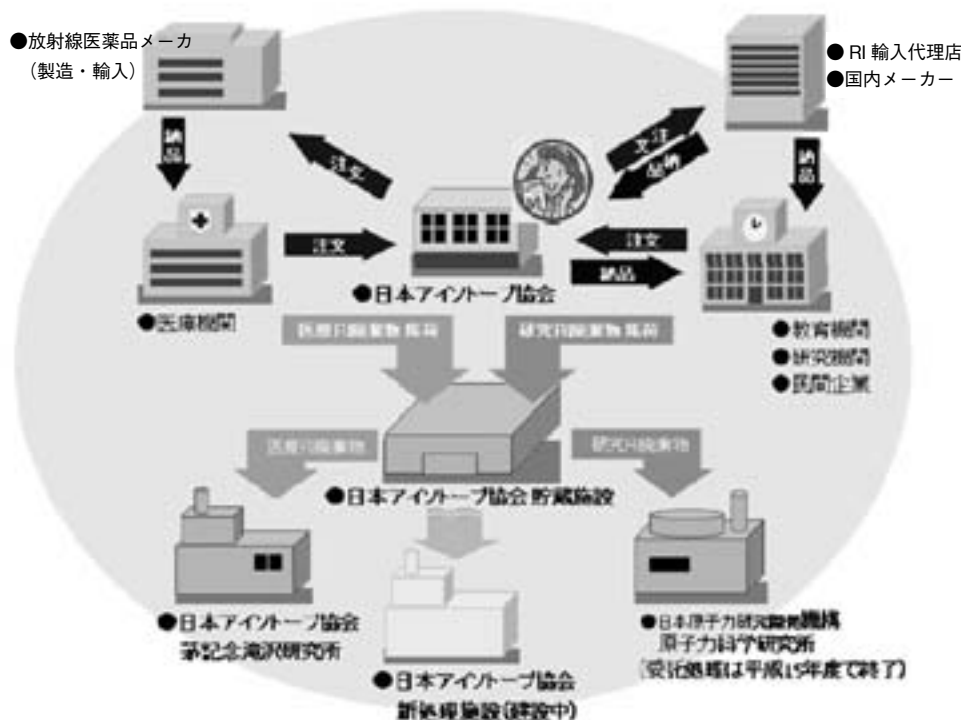


図1 RIの供給から廃棄までの一貫管理体制

研究所及び試験所等の研究機関、衛生検査所等のその他の機関の減少が著しい。2010年度の使用許可・届出事業所数（放射性医薬品使用事業所は含まれていない）は5,799であり、設置事業所数の多い都道府県は東京、大阪、神奈川、愛知、茨城、兵庫、千葉である。なお、2007年度から、事業所数が急激な増加をしているのは、放射線障害防止法の一部が改正され、それまで規制対象外の密封線源として届出なしに使用することができた校正用線源、レベル計、水分密度計等を表示付認証機器として届出をする必要が生じたためである。従来と同様の基準に当てはめると事業所数は減少している。

2010年度の実績によれば、表示付認証機器を除いたRIの利用形態では、延べ数として約70%が密封RIの利用である。特に、産業分野の利用である民間企業では、約90%が密封RI利用である。台数の多い密封RIを使用している装備機器は、主としてAm-241を用いる密度計が2,454台、主としてKr-85、Pm-147を用いる厚さ計が2,442台、Ni-63、H-3を用いるガスクロマトグラフが1,244台、Co-60、Cs-137を用いるレベル計が1,184

台、主としてIr-192、Co-60を用いる非破壊検査装置が1,008台である。主な表示付認証機器として使用されているのは、ガスクロマトグラフが2,382台、校正用線源が2,171台、爆発物・薬物検知器が816台、水分密度計が472台、レベル計が429台である。

医療機関における密封RIの主な利用としては、遠隔照射治療装置としてCo-60線源を用いるテレコバルト、ガンマナイフが70台使用されている。ガンマナイフの台数は増加しているが、テレコバルトは性能が向上した直線加速器に置き換わってきており新設はない。高線量率近接治療装置としてCo-60、Ir-192を用いたリモートアフターローディング装置が171台使用されている。主な低線量率近接治療装置としてI-125シード線源が107施設、Au-198グレインが39施設で使用されている。教育及び研究機関としての利用は、非密封RIの利用が主体である。教育・研究開発のために、556施設において非密封RIが利用されている。また、Ni-63を用いたガスクロマトグラフが455台使用されている。民間企業においては、1,029施設において密封RIが利用されており、Ir-192、

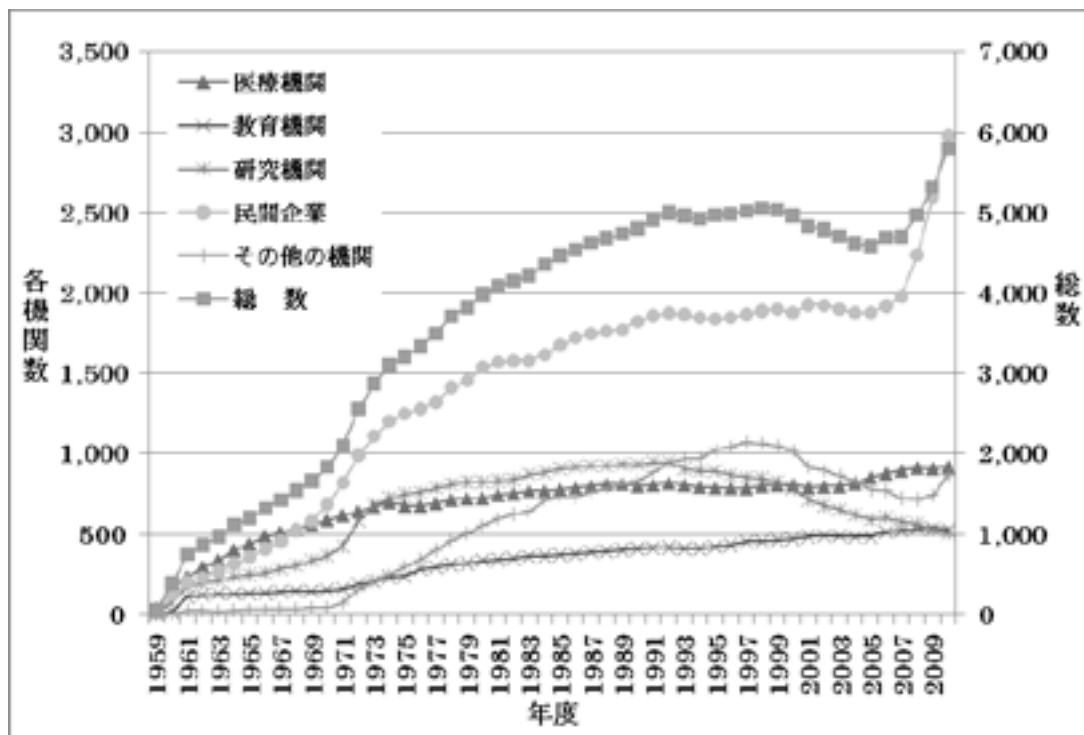


図2 使用許可・届出事業所数の年度推移

Co-60 を主に用いる非破壊検査装置が 958 台使用されている。装備機器としては、Kr-85、Am-241 を主に用いる厚さ計が 2,436 台、Ni-63 を用いたガスクロマトグラフが 479 台、Cs-137、Co-60 を用いたレベル計が 1,183 台使用されている。

4. 放射性同位元素・放射性医薬品の供給状況⁴⁾

当協会を經由して供給された放射性同位元素及び放射性医薬品の供給数量の年度推移は次のとおりである。

4.1 非密封 RI の供給数量

非密封 RI の主な利用は教育を含む研究開発分野であり、標識化合物又は精製 RI として供給されている。また、非密封 RI は密封 RI 線源の原料等としても利用されている。主な非密封 RI の供給数量の年度推移を図 3 に示す。2008 年度及び 2009 年度に精製 RI として大量の H-3 が供給されたため合計数量が増えたが、全体的には減少傾向が続いている。その原因は、厳しい法規制、放射線利用への抵抗感、RI 廃棄物料金の高額化、

代替試薬の性能の向上等により代替試薬への切り替えが進んでいるためと思われる。この分野では、核種毎の数量は密封 RI に比較すると少ないが、多種類の核種が利用されている。精製 RI の主な核種は P-32、I-125、Cr-51 及び I-131 である。一方、標識化合物の主な核種は P-32、C-14、H-3、S-35 及び P-33 である。標識化合物のうち、P-32、S-35 及び P-33 はヌクレオチド製品として遺伝子工学分野で主に利用されてきたが、数量の減少が著しい。C-14 は特別合成品として安定的に供給されている。また、F-18、I-125 等、放射性医薬品として使用されている核種が研究開発でも利用されている。核種別ではライフサイエンス分野で多く利用されている H-3、C-14、P-32 及び S-35 の供給数量が全体の約 80% を占めている。なお、RI 協会が製造している密封 RI 線源のための原料はこの非密封 RI の供給数量には含まれていない。

4.2 密封 RI 線源の供給数量

主な密封 RI 線源の供給数量の年度推移を図 4 に示す。2006 年度の密封 RI の供給数量は約

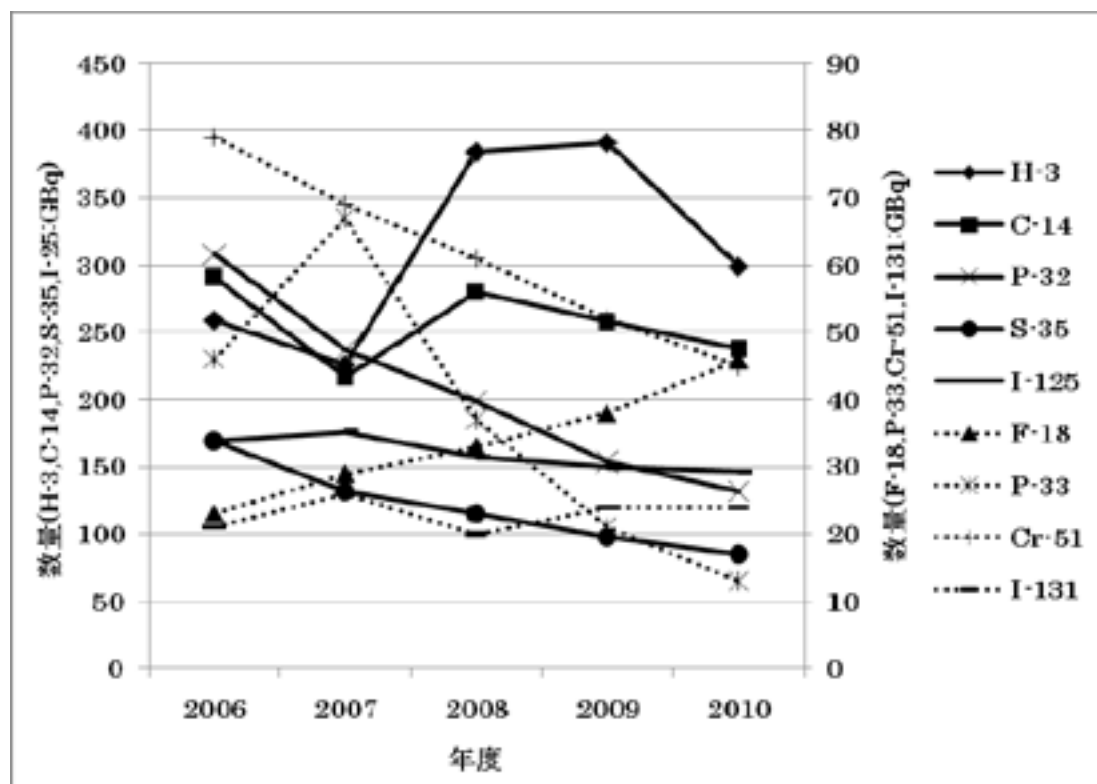


図3 非密封 RI の供給数量の年度推移

136PBqであり、線源個数は約28万個である。非密封RIの減少傾向に対して密封RIの供給数量は安定的に推移している。線源個数のうち、前立腺がん治療のための永久挿入用I-125シード線源が約25万個を占めている。密封RIの個数当たりの数量の大きい核種はCo-60、Ir-192及びCs-137である。一方、線源個数の多い主な核種はI-125、Am241、Ir-192、Au-198であるが、個々の線源の数量は小さい。

Co-60線源は主に、上述の医療分野におけるガンマナイフ用及び産業分野における放射線照射用として供給されている。また、Co-60放射線照射用線源は研究開発分野へも供給されている。1個あたり約370TBqの棒状Co-60線源は主に医療用具の放射線滅菌用として利用されている。また、ジャガイモの芽止め、昆虫の不妊化処置等にも利用されている。放射線照射装置は、1台に数百本程度の線源が装填されており、照射対象物の量や線源の減衰等にあわせて線源の増量、交換が行われる。Co-60は、厚さ計、レベル計等の工業ゲージ用線源、校正用線源等としても供給されているが、使用する個々の線源の数量は放射線照射用線源と比べて小さく、Co-60の供給数量の大部分は

放射線照射用線源である。

パイプ等の溶接部の非破壊検査用線源としては、主にIr-192が供給されている。通常非破壊検査用線源は1個あたり370GBqであり、産業分野におけるIr-192線源の利用は大部分が非破壊検査用である。検査対象によって、非破壊検査用線源としてCo-60、Yb-169及びCf-252も供給されている。Cs-137は、主に工業用ゲージ、校正用等の線源として供給されている。Ni-63はガスクロマトグラフ用線源として供給されている。その他、Kr-85及びAm241が厚さ計等の工業ゲージ用の線源として供給されている。密封RIを利用した産業機器は、高感度、過激な環境への耐性、メンテナンスの容易さ等からその有効性が認められ、安定的に利用されている。

医療分野では、上述のとおり、主にCo-60がガンマナイフの遠隔治療用密封線源として、Ir-192及びCo-60が腔内照射のための高線量率近接治療アフターローディング用線源として、I-125が永久挿入用線源として供給されている。特に、前立腺がん治療用として供給されているI-125永久挿入用線源は、保険適用以来、著しい増加を示している。一方、低線量率近接治療のための一時留置

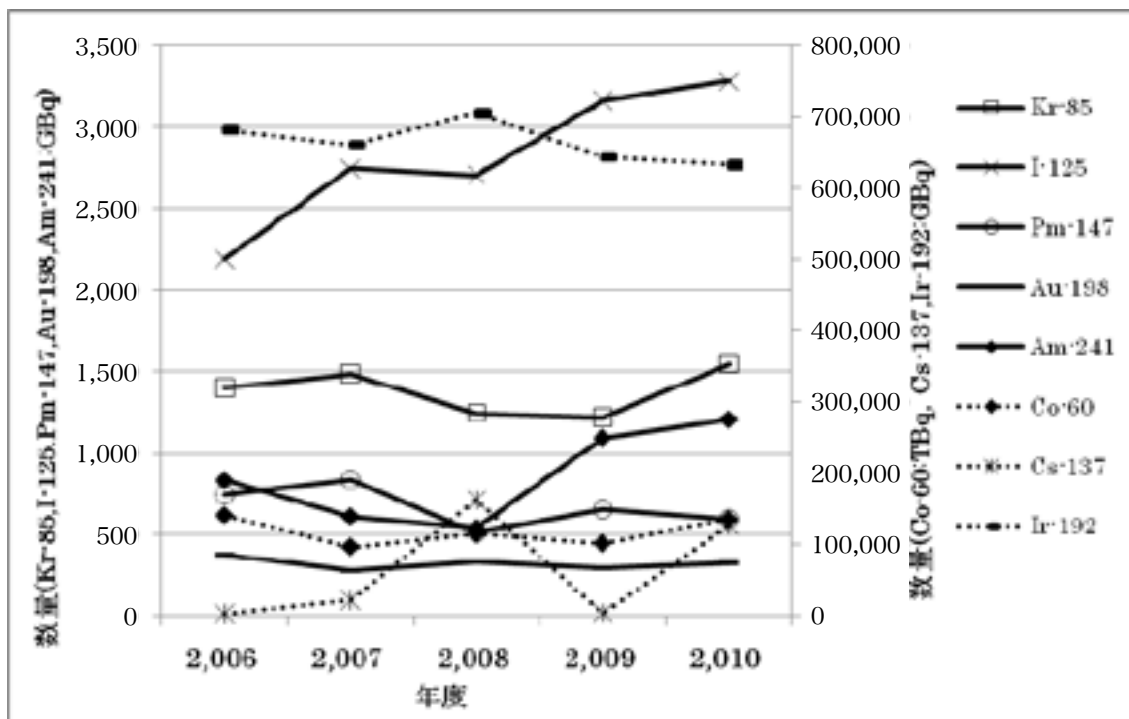


図4 密封RIの供給数量の年度推移

用線源として Ir-192 が供給されてきたが、他の治療法に置き換わり供給数量は年々減少してきている。医療分野における密封 RI 線源の利用は、国の推進しているがん撲滅運動に連動して拡大してきている。

4.3 放射性医薬品の供給数量

放射性医薬品（医療分野における非密封 RI 利用）は、高感度で身体に負担の少ない診断方法として 1970 年代後半から急激に増加してきた。しかし、インビトロ（体外）診断薬は、非密封 RI と同様、他の代替え試薬の性能の向上に伴い、また、過剰な法規制等の影響もあり、1990 年代をピークとして減少してきている。また、インビボ（体内）診断薬も減少傾向となってきたが、近年、FDG-PET に代表されるようにより短半減期で診断能力の優れた放射性医薬品の利用が可能となり、利用分野の拡大が期待されている。現在、インビボ診断薬としては Tc-99m 製剤の数量が全体の約 80% である。よって、2009 年から 2010 年にかけて発生した Mo 原料の世界的供給不足は核医学全体に大きな影響を与えた。放射性医薬品（インビボ）の供給数量の年度推移を図 5 に示す。な

お、2009 年度末における放射性医薬品（インビボ）使用施設数は 1,263 である。

近年、治療薬としての放射性医薬品が注目されてきている。以前から、I-131 が甲状腺機能亢進症及び甲状腺がんの治療薬として使用されてきたが、最近、骨転移疼痛緩和剤として Sr-89、がんの放射免疫療法のための薬剤として Y-90 の利用が可能となり、その利用が順調に拡大してきている。治療用放射性医薬品（Sr-89 & Y-90）の供給数量の年度推移を図 6 に示す。体内治療薬は、近接組織に高いエネルギーを付与することが必要であるため使用する核種の半減期・線質等が診断薬とは異なる。そのため、利用には施設等をはじめ様々な制約が考えられるものの、今後利用拡大の期待が大きい分野である。

5 おわりに

放射線・放射能の発見から約 110 年、RI は教育・研究分野だけではなく、医療、工業、産業等、様々な分野で利用されている。しかし、今回の福島第一原子力発電所事故における国民の反応に見られるように、RI が身近なところで利用されていることは意外と知られていない。今回の事故を

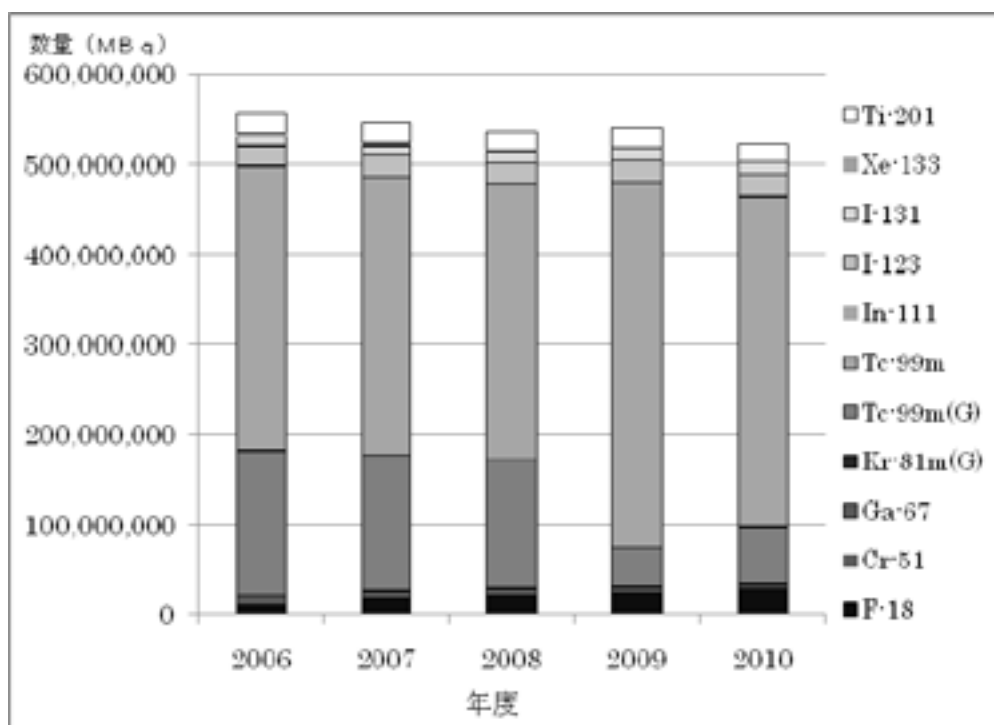


図5 放射性医薬品（インビボ）の供給数量の年度推移

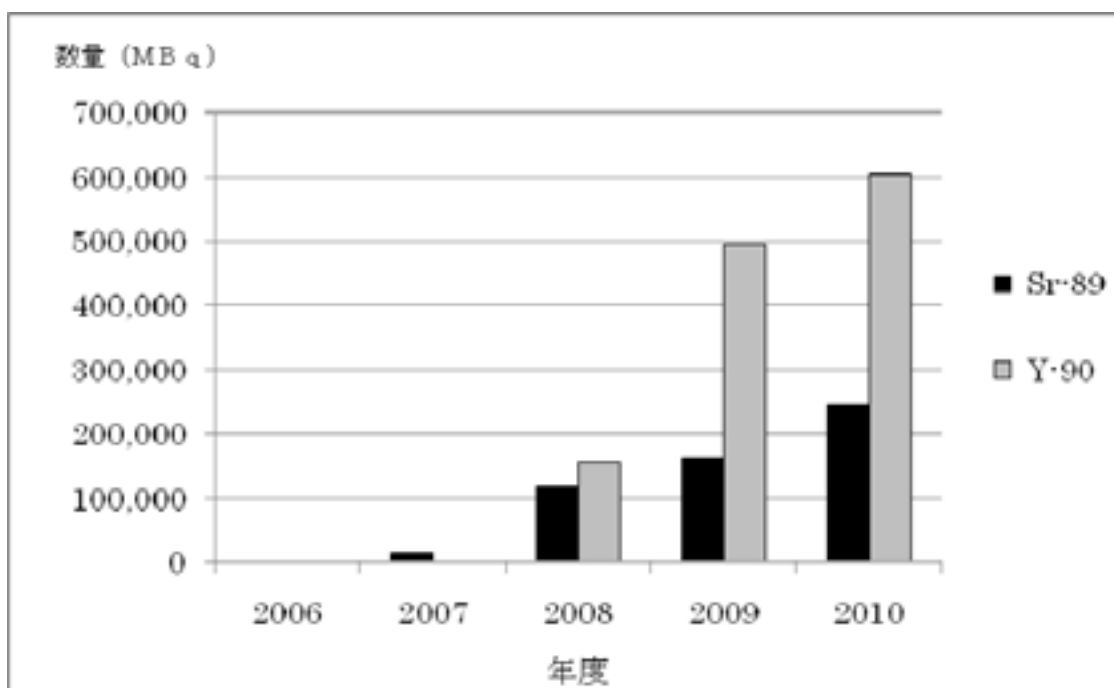


図6 治療用放射性医薬品 (Sr-89 & Y-90) の供給数量の年度推移

契機として、国民の理解の拡大に努め、さらなる RI 利用を推進していきたい。

参考資料

- 1) 放射性同位元素物語: 井上勝也、松浦辰男 (研成社、1992)
- 2) 日本アイソトープ協会 50 年史: 日本アイソトープ協会
- 3) 放射線利用統計 2010: 日本アイソトープ協会
- 4) アイソトープ流通統計 2010: 日本アイソトープ協会

5. 加速器質量分析とその考古学への応用 —最近のトピックより

今村峯雄

1. はじめに

加速器質量分析 (AMS) は、 ^{10}Be 、 ^{14}C 、 ^{26}Al 、 ^{36}Cl 、 ^{129}I 等、おもに半減期の長い放射性元素を測定する最も高感度でかつ高精度な測定手段として考古学、環境科学、医学生物学を含む様々な分野で用いられている。その中で、 ^{14}C -AMS は最も広く用いられており、特に ^{14}C 年代測定は、考古学ばかりでなく古環境研究などでも重要な研究手段となっている。ここでは、AMS ^{14}C 年代測定に関連した最近の考古・歴史研究への応用例を紹介

し、その役割と展望について記すこととする。

2. AMS による ^{14}C 測定の現状

^{14}C 年代測定の原理について知っておられる読者でも、AMS による測定の具体的な流れについては不案内な方もおられると思うので、その概略について述べておく。

測定の対象となるのは有機起源の炭素試料である。前処理によって汚染を除き、二酸化炭素に変換し精製して、通常、水素還元によってグラファイト化する。AMS ではグラファイト試料を加速器質量分析装置でイオン化し同位体比 $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ を測る。 ^{14}C はイオン数で測定するが、最新の装置では 1 試料あたり 25 ~ 50 万の計数

を得ているので、計数の統計誤差は0.15～0.2%のオーダーである。この計数を得るのに、放射線計数であれば、現代炭素（233ベクレル/kg炭素）1グラムの炭素試料でも10～20日を要する。AMSでは1ミリグラムで数十分の測定で十分である。

結果 ^{14}C 年代測定は現在ほとんどが加速器質量分析によって測定されるようになった。計数のみが測定精度を決めるわけではないが、トップクラスの測定施設では年代測定につけられる誤差は $\pm 15 \sim 20$ ^{14}C -yr程度まで高精度化されている。民間機関による依頼測定も広く行われており、AMS装置を持たない研究者も年代研究に参加する機会が得られている。測定値は、過去の大気中の ^{14}C 濃度の変化の効果を較正して、歴年スケール（cal ADなど）で表示するが、こうした「暦年較正」のサービスも民間機関によって提供される。考古研究者も公的機関や専門家に頼ることなく、独自の考えで研究を進める機会を得ており、 ^{14}C 年代測定が考古研究者に浸透するのに役立っているものと思われる。

3. トピックから－「沓形遺跡、弥生時代の大津波跡」

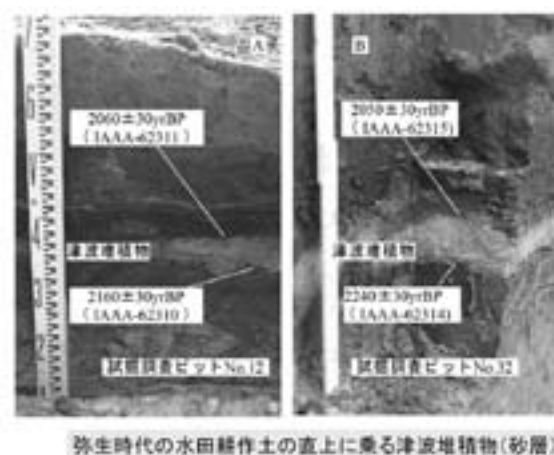
「弥生時代にも今回並みの津波 仙台平野、東北学院大調査」という小さな見出しの新聞報道で、約2千年前の巨大津波の存在を筆者が知ったのは、東日本大震災から2ヶ月を過ぎた5月半ばころのことである。記事は、松本秀明教授らによって数年前に行われ、今回被災地となった仙台市若林区にある沓形遺跡の調査で2000年前の津波堆積物が見つかったことや、今回の津波堆積物との比較から、弥生の津波は当時の海岸線から約3.3～4.1キロ内陸まで達したという内容である。

この弥生時代の大津波の概報は、2006年7月に仙台市教育委員会による現地説明会資料として公表されており、詳しい内容が松本秀明・吉田真幸両氏によって2010年の遺跡調査報告書で報告されている(1)。

津波堆積層の地層からは考古学編年で弥生時代中期中葉後半に相当する土器片が多数発見された。歴博（国立歴史民俗博物館）で行ってきた ^{14}C による年代と考古編年の対応関係からは、暦

年代で前100年ころに相当する。さらに、腐植物試料の ^{14}C 年代（測定値）が、加速器分析研究所（株）で測定され、2地点の津波堆積物直下で ~ 2200 ^{14}C yrBP、直上で ~ 2050 ^{14}C yrBPが得られ（誤差はそれぞれ ± 30 ）となっている（図1）。上下のデータの間中値を津波襲来期の数値と考えると ~ 2100 年前のことである（図2参照）。東日本大震災の津波は869年の貞観11年5月の津波から1142年を経て起こったが、それ以前の同規模津波を前100年頃とすると約970年を経て貞観大津波が起こったことになる。

この弥生時代の津波の事実が、もっと広く知れ渡っていたならば・・・という思いは多くの人に共通のものであろう。科学者が科学の立場から研究成果を発言する重要性について思いを新たにしたい出来事であった。



弥生時代の水田耕作土の直上に乗る津波堆積物（砂層）

図1 文献1より

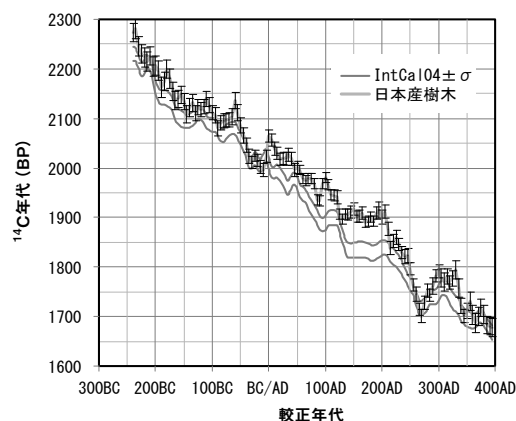


図2 日本産樹木の ^{14}C 年代（尾寄らによる）

4. 考古編年と暦年代

上でも触れた考古学編年と実年代のことについて若干触れておきたい。日本の先史考古学では、出土する土器の形や模様によって時代を分類する土器型式編年が発達している。土器型式編年はそれだけでは年代の絶対値（実年代）が分からないが発掘の際の時代情報を直ちに得るのには便利である。そこで国立歴史民俗博物館研究グループでは、土器型式が明確な多数の資料について、ススや焦げのほか同時期に廃棄されたと判断される木炭、種実、漆などを試料として地域ごと、遺跡ごとに系統的に ^{14}C 測定を行い、土器編年と実年代の対応関係を明らかにしてきた。

日本では明治時代以来、多くの遺跡が発掘され考古学調査によって詳細に調べられてきた。ことに戦後は発掘調査の数も膨大になった。それらの情報は、相互に比較分類し、文化的な特徴を整理する過程で体系化される。土器型式編年もその一環である。年代を考古編年ではなく暦年代のスケールに変換することは、歴史の流れを実年代に沿って記述することにほかならない。その一例が、灌漑による水田耕作である。

灌漑稲作は前10世紀後半に九州北部に始まって九州東部や瀬戸内を経て東進し、6世紀に近畿、濃尾平野に、さらに北陸を経由して4世紀初頭には津軽平野に達したと考えられるようになった。仙台平野では弥生時代中期3世紀に稲作が行われたが弥生時代後期には途絶していた。この理由として日本列島の気候寒冷化を唱える説が有力である。しかし、上記の杢形遺跡の事実は、大津波が及ぼした影響の可能性を浮かび上がらせる。津波は、古代史の流れを考えるうえで従来なかった視点である。西日本の遺跡についても無縁でないかもしれない。一つの事実が既成の考え方を覆す可能性を秘めている。

5. 箸墓の年代と「較正曲線」の問題

箸墓など古墳発生前の年代については、多くの古代史ファンの存在もあって関心が高い課題である。多くの有力な古墳が陵墓参考地として学術調査の立ち入りを禁止している状況にあるから、埋葬者に関しては憶測に基づいた推測も多く、それがまた諸説を生むことになる。箸墓はその代表で

あり、年輪年代法や ^{14}C 年代法による期待が大きい対象である。

箸墓がつくられる年代は土器型式で「布留0式」と呼ばれる様式の土器が用いられた時期に当たる。布留0に先行する「庄内3式」の時期は年輪年代法から紀元200年前後に相当するとみられている。 ^{14}C 年代法では、この時期にはやっかいな問題が存在する。図2にみるように、紀元1～2世紀には、日本産の年輪の ^{14}C は世界標準のINTCAL04などと明らかな差異が認められている。歴博グループでは、尾壽大真らが中心となって弥生時代を網羅する年代の年輪の ^{14}C を測定した。図はその一部であり、 ^{14}C が数十炭素年系統的に古い方向にシフトしていることが分かる。したがって、この時期には、前後する時代を含めて ^{14}C の較正曲線は日本産の樹木のデータに依拠しなければならない。

箸墓の年代はまさにこの日本産樹木の特異性の影響を受ける部分である。歴博グループでは、発掘によって得られる考古学的所見を重視しながら測定データを吟味して年代を特定した。さらに、布留0に先行する「庄内3式」や後続する「布留1式」との連続性を考慮して、箸墓の完成時期を240～260ADと推測した（文献2）。

6. 歴史時代研究への応用1

歴史時代の研究は、ほとんどが文書の形で残った「記録」に依拠している。文書はしばしば書写され、時には偽物がつくられる。したがって書写された年代を特定することは、資料評価の根幹に関わる重要な作業である。

名古屋大学の小田寛貴氏らは「古筆切」（能筆の流麗な書で、物語・歌集の古写本の断簡）と呼ばれる資料を使って、微量の紙片を回収しその ^{14}C をはかって、想定年代と ^{14}C 年代値（測定値）との関係を明らかにした。その結果、奥書・内容ならびに書風（1～数年の誤差）から年代が明らかかな場合は、測定値が「較正曲線」上に並ぶが、筆者が伝承である極札の場合は、多くが想定される年代より若い ^{14}C 年代値を示した。この結果は、古文書において、「書写年代」＝「紙の年代」（ ^{14}C 年代測定法による）であること、歴史文書の年代

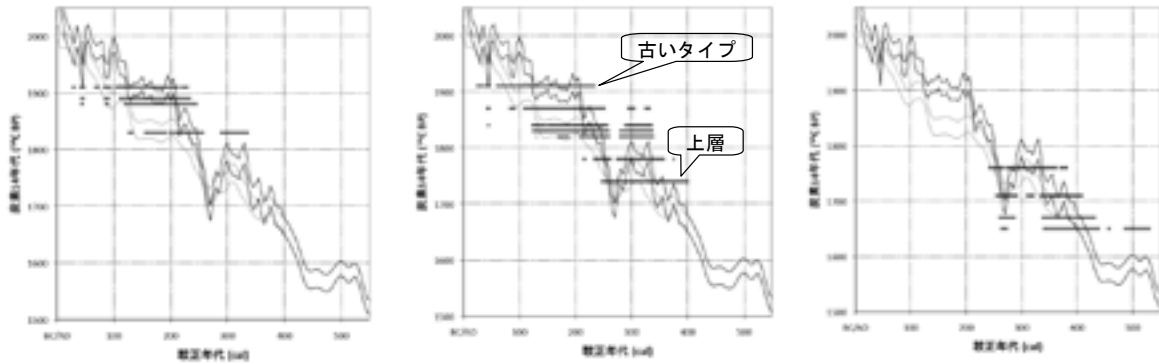


図3 箸墓関連の14C年代(一部):左図、庄内3式期(纏向石塚)、中央、布留0式一箸墓造成期(箸墓周溝)、右図、布留1式(東田大塚)、以上、文献2より。

判定に明確な自然科学的判断基準を導入できることを示しており、将来的に歴史文書の研究に新しい道を開くことになる。

7. 歴史時代研究への応用 2-ウィグルマッチ法による年代の精密化

¹⁴C 較正曲線は滑らかな曲線ではなく、凸凹(wiggle)がある。この凸凹を利用して、較正年代を精度よく決定する方法が「ウィグルマッチ法」(wiggle-matching)と呼ばれる。樹木年輪のようなサンプルから、ある間隔で複数の試料を採取しそれぞれの¹⁴C年代を測定して、一連の結果が較正曲線に最もよく合致する場所を統計的に解析する。結果は、確率の形で得られる。

「ウィグルマッチ法」の応用例は多数に上るが、ここでは古民家(重要文化財)の例について示す。

¹⁴Cによる古民家研究は、武蔵大・中尾七重氏らが精力的に進めている。歴博グループは研究協力し研究推進をしてきた。文化財の¹⁴C研究では、一旦文化財指定がなされると試料採取がままならないという困難がある。幸い文化財指定に先立って解体修理を行ない復原保存する際に発生する旧部材を利用する機会が多い。その中から建築史的観点から建築当初の木材と判断される部材を選定する。図4は、日本最古の現存民家とされる箱木家住宅(神戸市、重要文化財)のケースである。江戸中期には「千年家」と呼ばれていた。当初材の1つは11年の年輪しか持たない広葉樹であったが、ウィグルマッチによる年代解析結果、

AD1294+13/-9年と得られた。すなわち鎌倉期の建築であることが明らかとなり、文化財復原工事調査で検出されていた鎌倉時代の土器片の存在と整合する結果となった。

図5は群馬県桐生市に所在する彦部家住宅(重要文化財)の例で、22年輪のスギ材を分析した。この場合2年輪ごと、11試料の¹⁴Cデータを得た。また、較正用基準データとして、Stuiver et al. (1998)の1年輪ごとのデータセット(AD1510-1950)を採用した(4)。この場合、較正曲線の短周期の変化が影響するので、日本産樹木について地域効果が微妙に関わる。地域効果を名古屋大学による測定値(文献5)から得た約-10¹⁴C yearとすると、収束のよい結果となった。これは、測定値を直接Stuiverら(1998)のデータセットと比べた結果からも支持される。

20年前後の年輪を利用しての±1年レベルで

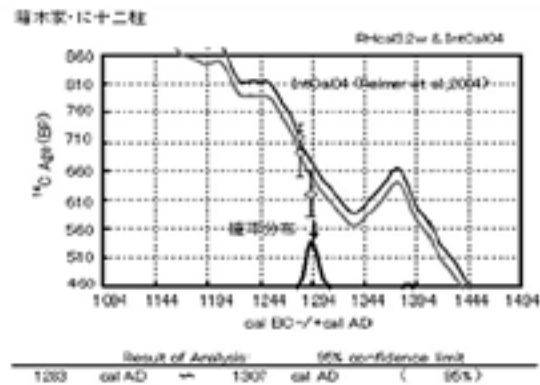


図4 重文箱木家住宅の例

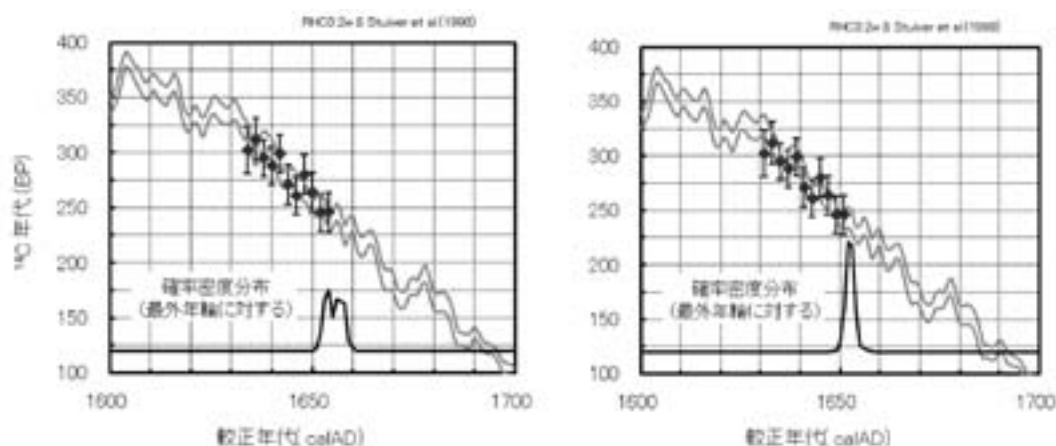


図5 重文彦部家住宅のウイグルマッチの例 (左図：地域効果なし、右：地域効果 -10 ¹⁴C-years). 測定値のプロットはピーク値の年代データに対応させて表示。

の年代判定が可能であることを示している。

8. むすび

AMSと考古学に関してほぼ定期的で開催される国際会議が、毎年開かれている。まず、AMSに関連する国際会議 (International Conference on Accelerator Mass Spectrometry) が3年ごとに開かれ会議録はNIM誌に発表される。また、やはり3年ごとに、¹⁴Cの利用と方法を中心に International Conference on Radiocarbon が開かれていて、会議録は Radiocarbon 誌に発表されて

いる。さらに、Radiocarbon and Archaeology の名称で自然科学と考古学の専門家が集まって議論する国際会議も開かれるようになり、上記の2会議を埋める形で3年ごとに開催されることになっている。これらの国際会議に日本の考古学研究者が参加するのはまれであるが、いつか常時参加する時代が到来することを願っている。

文献

- (1) 松本秀明・吉田真幸「仙台市東部沓形遺跡にみられる津波堆積物の分布と年代」『沓形遺跡』仙台市文化財調査報告書 363集、4-12, 2010。
- (2) 春成秀壘・小林謙一・坂本稔・今村峯雄・尾寄大真・藤尾慎一郎・西本豊弘「古墳出現期の炭素14年代測定」『国立歴史民俗博物館研究報告』第163集、133-176、2011。
- (3) 小田寛貴・池田和臣、安裕明「炭素14年代測定法を用いた古筆切の伝承筆者と書写年代の相違に関する研究」『日本文化財科学会第27大会研究発表要旨集』134-135, 2010。
- (4) M.Stuiver et al.: Radiocarbon, 40, 1127-1151, 1998。
- (5) 宮原ほか: 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書 16, 57-64, 2005。

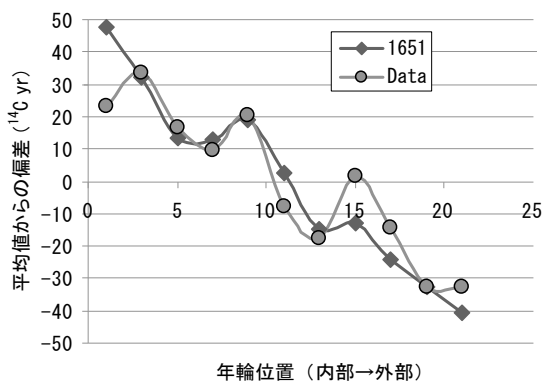


図6 重文彦部家住宅の¹⁴C年代値パターンの検証、最外年代をAD1651とすると Stuiver (1998) に一致

6. ウラン電池からバナジウム固体塩電池 (VSSB) へ

東北大学金属材料研究所

山村朝雄、大田 卓

1. スマートグリッドと蓄電池

東日本大震災では東京電力(株)福島第一発電所の重大事故を端緒として、日本は経済の維持成長に必要な長期的エネルギー源を何に求めるかについて再検討を余儀なくされている。8月26日に国会で成立した「電力事業者による再生可能エネルギーの電気の調達に関する特別措置法」は、太陽光・風力等による電気を全量・定額で電力会社が買い取る「固定価格制度」を確立するものである。固定価格制度は自然エネルギーの推進するための経済的な仕組みであり、導入国は現在83カ国に到っている。今回の電力不足問題は日本の送電網の問題を顕在化させるとともに、企業・家庭での対応として、節電、ピークカット、再生エネルギー導入による自家消費・売電・蓄電の機運が高まったが、これらを一括して解決する技術に次世代送電網(スマートグリッド)がある。

スマートグリッドはスマートハウスあるいはスマートシティに設置されるスマートメーターと蓄電池により需給マッチングや経路制御を行い送電網の信頼性を高めるもので、数千の電力会社が系統接続される米国で提案された。結節点を送受信、一時蓄積、経路制御という機能を持って情報単位(パケット)を扱うインターネットの発想の展開であると言われる。アメリカではオバマ大統領のグリーンニューディール政策で環境・エネルギー分野に80兆ドルの投資がなされた。

電力貯蔵用蓄電池としての日本の取り組みは、通産省工業技術院で行われたムーンライト計画(1978-1993年度)を端緒とし、ナトリウム・硫黄電池等とともにレドックスフロー電池が研究された。両極に同一金属のイオンから成るバナジウム・レドックスフロー電池(VRFB)の発明(1986年、豪)の後、我が国では1996年から実用化され、風力発電の出力平滑化にも試験された。

私たちは、この間、反応の律速過程と電池のエネルギー効率という観点から電池を考え、ウラン・

レドックスフロー電池(URFB)を考案し研究を進めてきた[2]。本稿では2006年以降の展開をまとめながら、電池反応の律速段階の工夫によりバナジウム固体塩電池(VSSB)を生み出したこと、さらにエネルギー状況に関わる認識を同じくする人々との共同研究により、これが実用電池として期待されて企業との共同研究が進む段階にこぎ着けるに至った経緯にも簡単に触れてみたい。

2. 反応の律速過程と電池のエネルギー効率

電池の充放電では、正負両極での反応の起こりやすさ、すなわち過電圧の小ささが、エネルギー損失を防ぐ。レドックスフロー電池では、固液表面での不均一反応による電気化学反応が進行するとともに、電解液のごく一部を電極に接触させる。ここでの電流密度*j*に対する過電圧*η*の関係は、バトラーボルマー式により与えられる。

ここで、*j*_{0,±}は交換電流密度、*α*は透過係数、*k*₀は標準電極反応速度定数、*C*_Oと*C*_Rはそれぞれ酸化形と還元形の濃度である。後述するウラン電池のように、高速な電極反応(*k*₀ > 10⁻² cm s⁻¹)を行う活物質では、充放電時の電流密度が上昇しても、過電圧によるエネルギー損失がほとんどない

$$j_{\pm} = j_{0,\pm} \left\{ e^{-\alpha \eta / \eta_0} - e^{(1-\alpha) \eta / \eta_0} \right\}$$

$$j_{0,\pm} = F A k_0 C_O^{(1-\alpha)} C_R^{\alpha}$$

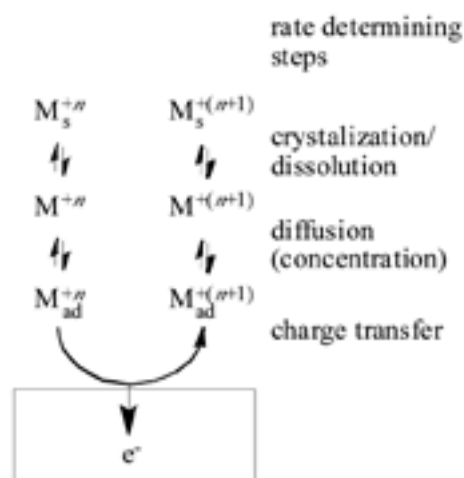


図1 電池反応における律速段階。sは固体状態、adは電極上の化学種を意味する。

($j = 120 \text{ mA cm}^{-2}$ に対してエネルギー効率の低下は数パーセント)。他方、バナジウムのように k_0 が大きくなると ($k_0 = 10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$)、急峻に上昇する過電圧のために、エネルギー損失は20%程度に高まる。

これ以外の実用電池では、電極・電解液・活物質を三次元化して接触表面積を大きくしているため、見かけの j_0 が大きく、物質移動過程が律速となる。このとき物質輸送は泳動と拡散により担われる (図1)。

3. ウラン電池

アクチノイド (An) のうち、ウラン、ネプツニウム、プルトニウム、アメリシウムでは、+3価から+6価までのイオンは An^{3+} 、 An^{4+} 、 AnO_2^+ 、 AnO_2^{2+} であり、ウランは二組の等構造イオン対 ($\text{An}^{3+}/\text{An}^{4+}$ と $\text{AnO}_2^+/\text{AnO}_2^{2+}$) を有する。等構造のイオン対の反応は活性化エネルギーが低く、これら二組のイオン対の酸化還元反応が速いことは古くから知られている。他方、アクチノイド以外の元素がもつ等構造のイオン対は、バナジウムで見られるように高々1組であり、ウラン等のアクチノイドが二組の高速の酸化還元対をもつことは特異と言える。この高速の二組の酸化還元対を電池の両極反応として利用すれば、後述するように両極における過電圧が小さく、エネルギー効率の優れた電池が期待できる [4]。

実際、ネプツニウムの $\text{Np}^{3+}/\text{Np}^{4+}$ および $\text{NpO}_2^+/\text{NpO}_2^{2+}$ の電極反応は高速である (焼結黒鉛上で、それぞれ $k_0 = 1.9 \times 10^{-2}$ および $1.5 \times 10^{-2} \text{ cm s}^{-1}$) [5]。このため、ネプツニウム電池 (非フロー型電池) ではバナジウム電池より電圧降下が小さい結果を示した [6]。

電池活物質としてのウラン β -ジケトン錯体の利用との観点から、ウランVI価とウランIV価錯体について系統的研究を行った。配位子の塩基性 $\text{p}K_a$ が增大すると、+6価/+5価と+4価/+3価の酸化還元電位は負側にシフトする [4]。正電荷をもつウランイオンに対して、負電荷をもつ電子を供与すると、配位による安定化エネルギーが増大するためと理解してよい。このような配位子による錯体物性の系統性は、ウラン+5価では吸収帯にも見られる [7]。錯体の酸化還元反応は

HOMO 単位にある電子を移動することに対応し、このように電位の制御が可能となる (図3)。フロスト図によれば、配位子なしで+5価が不均化しないと仮定すれば、ウラン電池は $0.52 + 0.17 = 0.69 \text{ V}$ の電池電位をもつが、テトラケトン配位子



図2 使用した β -ジケトン配位子 (左) とテトラケトン配位子 T (右)

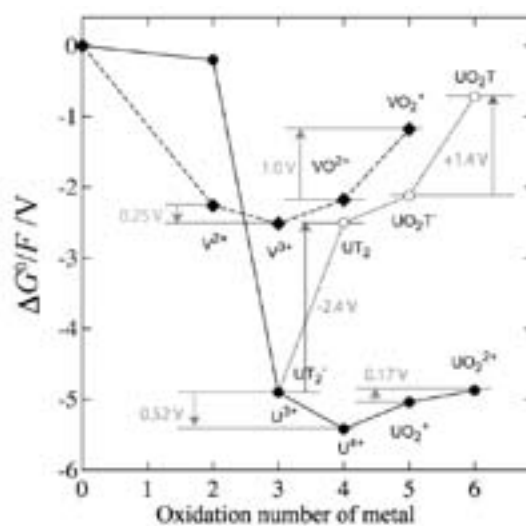


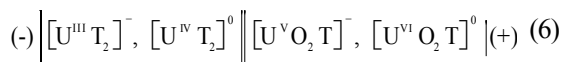
図3 酸化還元電位 [1] より作成したウラン、およびバナジウムのフロスト図。点線はウラン・テトラケトン錯体の測定された $\text{U}^{3+}/\text{U}^{4+}$ および $\text{UO}_2^+/\text{UO}_2^{2+}$ の酸化還元電位 [3] を含めた。



図4 ウラン・レドックスフロー電池 (充電前)

により $-2.4 + 1.4 = -1.0$ Vの電池電位をもつ(図3)。

電極反応の前後でウランイオンの実効電荷が変化し、配位子の解離と会合の反応を示すことは、等構造という要請に反するため、これを防ぐ目的でテトラケトン配位子 T を創製した (図2)。二組の等構造イオン対を電池の両極反応として利用するウラン電池を提案した [3]。



この錯体の両極反応は単純かつ高速の、レドックスフロー電池に適した反応であることが判明した。活物質として、ウラン・テトラケトン錯体を 10 mM の濃度で含むジメチルスルホキシドと *N,N*-ジメチルホルムアミドの混合溶液をもつ電池を製作し、モーターを回す程度の放電に成功した。一方、電池のエネルギー効率は低く、この問題が非プロトン性溶液中におけるウランの+5価と+3価の不安定性に起因することが判明した。このことから、ウランの+5価と+3価の錯体の物性化学研究を行うことにより、安定な錯体構築の方法を検討した。

4. ウランのV価錯体の物性化学

ウラン+5価は、アクチノイドに特徴的なジオキソイオンとして存在し、酸素や水のある大気雰囲気では不均化反応や酸化により、容易にVI価やIV価に変わることが知られており、研究例は限定的である。そこで、電解還元の方法に改善を重ね、完全にV価のウランβ-ジケトン錯体の固体を調製した(図5)。

高酸化状態にあるアクチノイドが形成するジ

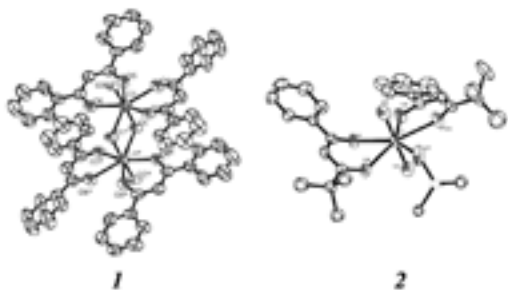


図5 ウラニルV価β-ジケトン錯体 (1: ジベンゾイルメタン錯体, 2: ベンゾイルピバロイルメタン錯体)

オキソ構造 ($[\text{O}=\text{An}=\text{O}]^{n+}$; $n = 1$ or 2) では、中心金属の5*f*電子は酸素原子からの結晶電場による強い軸異方性を持つと期待できる。ウランV価イオン(電子配置 f^1)は「自由イオン」として $^2F_{5/2}$ の基底項を持ち、有効磁気モーメント(μ_{eff})はLS結合を仮定すると $2.54 \mu_B$ である。軸方向に強い結晶電場を受けた基底項を考慮した中村らの完全なイジングモデル [8] では2.14程度と自由イオンよりも小さな値を示す。現在報告されているウラニルV価錯体の多くは室温において $2.2 - 2.6 \mu_B$ の有効磁気モーメントを示し、実際に基底項に対する強い軸異方性と励起項からの温度に依存しない常磁性(TIP)の存在により説明され、赤道面への配位原子の効果は小さいと考えられている。

ウランV価β-ジケトン錯体では赤道面へ配位した酸素原子からの結晶電場による影響が無視できない。室温で観察される有効磁気モーメント $1.5 - 1.7 \mu_B$ は、イジングモデルでは説明できない。この値は正八面体に近い構造を取るウランV価塩化物で示される値に近く、実際の配位構造である五方両錐構造を赤道面に対してより異方性の強い結晶電場を考慮することにより説明できるだろう。

5. ウランのIII価錯体の物性化学

ウラン+3価の知られている錯体のほぼ全ては非ウエルナー型(すなわち有機金属錯体)であるが、ウランの+6価、+5価と大部分の+4価の錯体は直接の金属-炭素結合のない古典的なウエルナー型(逆供与配位)である。ウラン電池の活物質として全ての酸化状態のウランと錯体をつくる単一の配位子はウエルナー型配位子であることが望ましい。

置換マロンアミド誘導体は、核燃料再処理として開発されているDIAMEX法の有力な抽出剤として広範囲に研究され多くの酸化状態のアクチノイド、希土類と安定なウエルナー型錯体をつくる。置換マロンアミドのうち*N,N,N',N'*-テトラメチルマロンアミド配位子(tmma)のウランIII価錯体の調製法が知られており、活物質のための配位子の有力な候補であるが、ほとんど情報がない。そこで、このウラン+3価錯体の調製と同定を行い、



図6 ピリジン溶液から調製したウランⅢ価三塩化物溶媒和錯体の結晶構造 (左:二量体、右:三量体)

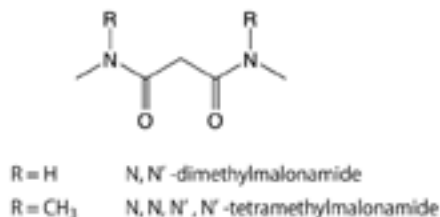


図7 置換マロンアミド誘導体

N,N-ジメチルホルムアミド中溶媒で分光学的方法により、安定性が半減期11時間であることを明らかにした。しかし、ウラン電池の活物質としては十分ではなく、更なるウラン+3価錯体の検討が必要である。

ウラン+3価化合物の調製において、ハロゲン化合物、特にヨウ化物 UI_3 や $UI_3(thf)_4$ (THF = テトラヒドロフラン) はウラン+3価化合物の合成の出発物質として中心的役割を担っているが、入手または取り扱いに困難が伴うウラン金属を出発物質として調製される。我々はウラン酸化物の酸溶解液の電解還元によりウラン+3価塩化物 $UCl_3(thf)_{15}$ を容易に調製する方法を確立した。 $UCl_3(thf)_{15}$ は THF はもちろんのこと、ピリジン(Py) やジメチルホルムアミド、アセトニトリルの極性溶媒に溶解し、特に THF や Py 中ではウランⅢ価が比較的安定に存在し、錯体合成の出発物質になりうる。 $UCl_3(thf)_{15}$ を 2 - 300 K において磁化率の測定を行った結果、有効磁気モーメントは U^{3+} の自由イオンに期待される値 ($3.62 \mu_B; f^3$) と同程度の $3.58 \mu_B$ であった。このことは、配位子である Cl 原子や溶媒和分子によるウランⅢ価イオンの *f* 電子への結晶場の影響は小さいことが示唆される。

ウランⅢ価の簡便な調製法を用いて、tmma を配位子としたウランと希土類の+3価錯体を調

製し、結晶構造から結合の強さを検討した。それぞれの金属中心に対して tmma 配位子が4つ配位しており、酸素原子が八配位した square antiprism の配位構造を取っている。M-O の平均結合距離は、希土類に対してはイオン半径の増大により、長くなっているが、ウランは希土類のイオン半径に対する M-O 距離の直線からはずれており、希土類より結合が強いと考えられる。また、tmma の C=O の平均結合距離は希土類ではすべて同じ程度 (1.25 \AA) であるのに対し、ウランでは希土類より長くなっている (1.27 \AA)。U-O の結合が強いことにより、C=O の結合が弱くなっていることを示唆する。

+3 価のウランとネオジムについて tmma と *N,N'*-ジメチルマロンアミド配位子 (dmma) の錯体を調製し、2 - 300 K において磁化率の測定を行った。室温での有効磁気モーメントは U、Nd 錯体共に $tmma > dmma$ であった。このことは結晶場による基底項の分裂の大きさが dmma 配位子の方が大きいことを示唆する。同一配位子の錯体での室温での有効磁気モーメントは $U < Nd$ で、Nd より U の方が基底項の分裂の大きさが大きいことを示唆するものである。

6. エネルギー密度を高めたバナジウム固体塩電池

電池開発の潮流として、電池スタックの積層によりどのような大容量の蓄電池も構築できるといふ「小は大を兼ねる」モジュール化が開発思想になっている。このため、種々の電池形式(表1)の中で、もともと大容量電池として開発され

表1 電池形式とその性能

電池形式	体積エネルギー密度 /Wh L ⁻¹	重量エネルギー密度 /Wh kg ⁻¹	出力密度 /W kg ⁻¹
バナジウム・レドックスフロー (VRFB)	32	18	
バナジウム固体塩 (VSSB)	300	100	>1000
リチウムイオン	200-400	100-160	400-3000
ニッケル水素	150-300	60-80	150-2000
鉛	90	35	100-200
ナトリウム硫黄 (NaS)	170	120	

たナトリウム・硫黄電池、バナジウム・レドックスフロー電池の利用は非常に限定されている。他方、携帯電話等のモバイルデバイスに用いられるニッケル水素電池やリチウムイオン電池が自動車用電池ばかりか、スマートグリッド用途でも有望視されつつある。

電池の特性として、発火しない安全性、リサイクル性が問われていることも最近の潮流である。鉛は重金属であり鉛蓄電池はやむをえずに使用されているのみであるし、ナトリウム・硫黄電池は金属ナトリウムを使うため設置場所が限られる。リチウムイオン電池は発火の問題は抑制されつつあるが、リサイクル性には大きな障害がある。この状況において、我々はバナジウム・レドックスフロー電池のエネルギー密度を劇的に向上させながら、有機溶媒等を用いず、完全なリサイクルが可能な電池として、バナジウム固体塩電池を開発した。

バナジウムは2対のレドックス対を有する元素として最も軽いこと、遷移金属元素として4番目に地球上で存在量が多いこと等、電池活物質として優れた性質があるが、ジオキソイオンを形成し多数の酸化状態を取り得ること(図2)という点でウランと類似点が多い。実際、採掘においてバナジウムにはウランが良く随伴する。バナジウムイオン(VO_2^+)のような屈曲構造は他にも例が多いが、ウラニルイオンのようなアクチニルイオン(AnO_2^{2+})は厳格な直線構造であるという違いがある。この興味深い違いは σ 結合に対する5f軌道の寄与によるものである[9]。

バナジウム塩を固体電極上に担持し、反応に関わるごく微量部分のみ溶解して反応に関わる形式(図1)により、微量の液体を含む固体形式の電池を作った(図8)[10]。インピーダンス法により、この電池の律速段階を探っているが、現時点では電荷移動律速のように見え、結晶化/溶解過程は律速段階ではないようである。

本電池のエネルギー密度として77 Wh/kgという値を得たが、これはバナジウム・レドックスフロー電池の18 Wh/kgの4倍以上の値であり、ニッケル水素電池と同程度、鉛蓄電池を大きくしのぐ性能が得られる。小宮山善八・京大名誉教授の指摘する高性能電池の備える特性である、「高い充

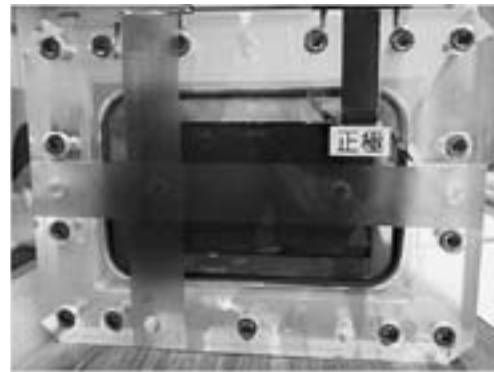


図8 バナジウム固体塩電池のプロトタイプ (1.5 V、1 Ah タイプ)

電深度での保存特性]、「深度の深い放電でのサイクル特性]、「低い充電深度での高出力密度]、「安全性を確保した上での高いエネルギー密度」というポイントを満たす電池になりつつある。現在では、企業との共同研究により1.5 V-10 Ahタイプ、100 V-60 Whタイプ等の電池の試作が進められている。

おわりに

本稿では、ウラン・レドックスフロー電池の研究と、これより派生した研究等について述べた。特に、錯体反応の律速段階に着目してエネルギー効率を下げないようにしながら、エネルギー密度を向上させる試みがバナジウム固体塩電池を派生したことについて述べた。

謝辞

ウラン電池・錯体研究では、東北大金研の佐藤伊佐務氏、白崎謙次技術職員、名大院理の佐藤憲昭教授には大変お世話になりました。バナジウム固体塩電池の知財戦略については創光技術事務所の筒井潔氏に、プロトタイプ製造にあたってはアマゾン電池(株)の藤本喜久氏、富安博氏、クオルテック(株)の志方廣一氏、小野寺恒太氏にお世話になりました。本研究においては、文科省科研費基盤研究(S)20224015「価数不安定性を持つアクチノイド化合物に特有の新奇量子状態の研究」、基盤研究(B)22360408「高いエネルギー密度を有するハイブリッド自動車用バナジウム固体電池の開発」、基盤研究(C)22550053「一軸配向

性の配位子場を持つウラン錯体の物性化学」の補助を受けたことに感謝します。

参考文献

- [1] A. J. Bard, R. Parsons, J. Jordan, Standard Potentials, Aqueous Solutions, IUPAC (Marcel Dekker), New York, 1985.
- [2] 山村朝雄、塩川佳伸、化学工業、57 (2006) 381.
- [3] T. Yamamura, K. Shirasaki, H. Sato, Y. Nakamura, H. Tomiyasu, I. Satoh, Y. Shiokawa, J. Phys. Chem. C, 111 (2007) 18812.
- [4] T. Yamamura, Y. Shiokawa, H. Yamana, H. Moriyama, Electrochim. Acta, 48 (2002) 43.
- [5] T. Yamamura, N. Watanabe, T. Yano, Y. Shiokawa, J. Electrochem. Soc., 152 (2005) A830.
- [6] T. Yamamura, N. Watanabe, Y. Shiokawa, J. Alloys Compds., 408-412C (2006) 1260.
- [7] T. Yamamura, S. Iwata, S. Iwamaru, H. Tomiyasu, J. Chem. Soc., Faraday Trans., 90 (1994) 3253.
- [8] 中本忠宏、中村彰夫、佐伯正克、固体物理、34 (1999) 825.
- [9] K. Tatsumi, R. Hoffmann, Inorg. Chem., 19 (1980) 2656.
- [10] T. Yamamura, X. Wu, S. Ohta, K. Shirasaki, H. Sakuraba, I. Satoh, T. Shikama, J. Power Sources, 196 (2011) 4003.

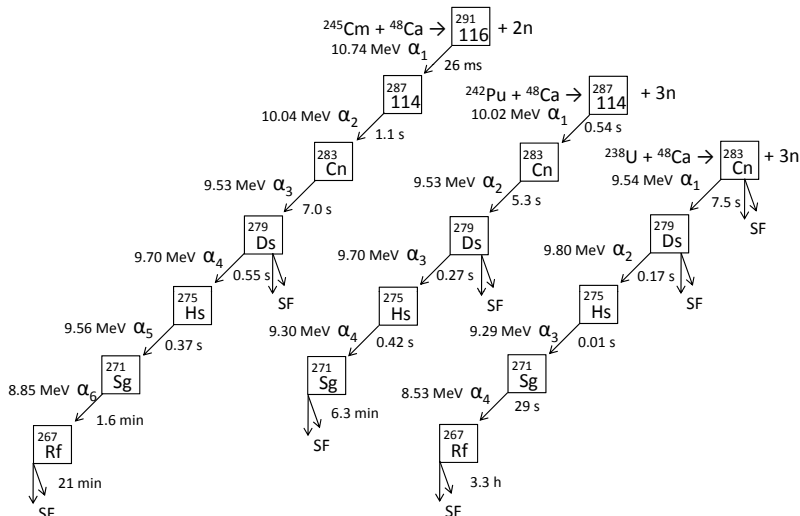
トピックス

114番元素ならびに116番元素が承認される

永目諭一郎 (原子力機構)

新元素の承認を審査する IUPAC/IUPAP Joint Working Party (JWP) は、これまで報告されている実験データならびに関連文献を精査し、新元素承認に関わる基準 [1-3] に基づいて、114番ならびに116番元素発見が、ロシア・合同原子核研究所 Joint Institute for Nuclear Research (JINR) と米国ローレンスリバモア国立研究所 Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) の共同研究チームによることを決定した [4]。報告では図1に示すように、「3つの独立したルートで合成された生成物ないしはその壊変生成物に、 ^{283}Cn (コペルニシウム-283) が存在している。 ^{283}Cn から α 壊変を逆に遡れば親核種 (新元素) の原子番号と質量数が明確に決定できる」と述べている。つまり、 $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ で合成された $^{287}\text{114}$ からの壊変連鎖がよく再現されていること、さらに $^{245}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ で合成された $^{291}\text{116}$ の壊変に、先の $^{287}\text{114}$ の壊変で確認されている ^{283}Cn を含む α 壊変連鎖が確認されたこと、で両元素の発見にクレジットを与えている。 $(^{283}\text{Cn}$ の α 壊変連鎖は他にドイツ重イオン研究所において $^{238}\text{U} + ^{48}\text{Ca}$ 反応 [8] で、また米国ローレンスバークレー国立研究所でも $^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$ 反応 [9] で合成された $^{287}\text{114}$ の α 壊変でも確認されている。) この結果、JINR と LLNL の共同チームに両元素の命名権が与えられた。一方、113, 115 および 118 番元素の承認は、今回は見送られることになった。(117 番元素の合成 [10] は、上記審査開始後に報告されたので、審査の対象にはなっていない。)

- [1] R. C. Barber *et al.* Prog. Part. Nucl. Phys. **29**, 453 (1992).
- [2] P. J. Karol *et al.* Pure Appl. Chem. **73**, 959 (2001).
- [3] 解説として 永目諭一郎、中原弘道、日本物理学会誌, **60**, 707 (2005).
- [4] R. C. Barber *et al.* Pure Appl. Chem. **83**, 1485 (2011).
- [5] Yu. Ts. Oganessian *et al.* Eur. Phys. J. A **19**, 3 (2004).
- [6] Yu. Ts. Oganessian *et al.* Phys. Rev. C **70**, 064609 (2004).
- [7] Yu. Ts. Oganessian *et al.* Phys. Rev. C **69**, 054607 (2004).
- [8] S. Hofmann *et al.* Eur. Phys. J. A **32**, 251 (2007).
- [9] L. Stavestra *et al.* Phys. Rev. Lett. **103**, 132502 (2009).
- [10] Yu. Ts. Oganessian *et al.* Phys. Rev. Lett. **104**, 142502 (2010).

図1 JINR-LLNL 共同チームの実験で観測された α 壊変連鎖 [5-7]。

施設だより

静岡大学理学部附属放射化学研究施設

奥野健二（静岡大学理学部附属放射科学研究施設）

1. 放射科学研究施設（旧放射化学研究施設）のあらまし

静岡大学では昭和26年にラジオアイソトープ利用及び放射化学に関する研究が始まり、昭和29年に起きた第五福竜丸のビキニ海域における水爆実験による被災事件においてその汚染状況の調査研究を行うこととなり、その研究範囲が飛躍的に増大した。そんな中、昭和33年4月に静岡大学文理学部に東京大学理学部放射化学講座について全国で二番目の放射化学関連研究拠点として「放射化学研究施設（現：放射科学研究施設）」が設置された。放射化学実験棟は昭和43年8月理学部とともに静岡市大谷地区に移転した際に建設され、理学部のみならず全学における放射能利用研究活動の中心としての役割を果たしてきた。

この間、日本における放射化学の黎明期にあたる昭和30年代には、「死の灰」に代表される核分裂生成物の分離分析法の開発を行ってきた。静岡大学を中心として開発した新しい分離分析法は、分析化学にも多大な貢献をした。さらに、原爆・水爆の実験によって核分裂生成物がファールアウトとして日本に降り注ぐようになると、食品中に含まれる核分裂生成物の濃度の定量が要求されるようになり、地域社会に密着した水産物及び茶葉中の核分裂生成物の濃度を継続して測定し、環境放射能の測定法の基礎を築いた。昭和40年代には種々のアルカリ金属塩について、コバルト-60照射装置によるガンマ線放射線分解機構を明らかにした。さらに原子炉内放射線や反跳粒子線による放射線分解反応機構を提案するとともに、同位体希釈分析法による定量法として sub- and super-equivalence 法を日本においては最初に導入し、その原理および問題点を明らかにすることにより、同位体希釈分析法の一手法として確立させた。平成に入ってから、DNAの放射線損傷につい

てこれまで放射線化学の観点からの研究を進め、静岡県特産緑茶の主要成分であるカテキン類が放射線照射に伴うDNA損傷に対して防御効果があることを明らかにした。また、使用済核燃料処理において解決されなければならない問題の一つである、 ^{238}U の核変換に由来する長半減期超プルトニウム元素（アクチノイド、5fブロック元素）を、多量に生ずる核分裂生成物のランタノイド（4fブロック元素）からの分離手法に関する研究を進めるとともに、反跳トリチウムのホットアトム挙動の知見を核融合炉開発に応用し、核融合炉におけるトリチウムの取扱いおよび、その安全性評価研究、高速増殖炉からのトリチウム回収技術開発、発電所におけるリアルタイムトリチウム計測システム開発等の研究を展開しており、放射化学の視点から原子力分野の発展に大きく貢献してきた。これらの放射化学及び原子力分野における研究及び教育の成果が評価されるとともに今後の放射能利用研究の発展に備え、平成17年度には放射化学実験棟の全面改修が行なわれ、使用核種数及び使用数量を増加させた。平成20年には機関名を「放射科学研究施設」とあらため、研究分野を放射化学のみならず放射科学まで広めることとなった。

また、教育面では、理学研究科に、物理学、化学、生物科学および地球科学の各専門性に加え、「放射科学」の幅広い知識をあわせもつ高度な専門知識を持つ原子力人材の育成を目的として「放射科学教育プログラム」を設置し、放射科学関連講義として理学部に7講義・1実習科目を設置し、学生への放射線取扱主任者受験を積極的に進めており、学部2、3年生でも合格者を輩出している。この実績が評価され、文部科学省および経済産業省の原子力人材育成プログラムに採択されている。特に近年では中部電力浜岡原子力発電所と連携した放射線管理実習プログラムを構築し、学

習効果を高めている。

これらの50年以上にわたる放射化学及び原子力分野における研究・教育への貢献が評価され、平成22年3月には日本原子力学会における「原子力歴史構築賞」を受賞し、当施設の歴史的重要性が認識された。

平成22年度には、本施設のコバルト60照射設備を理学部の特色ある教育の一つとして放射科学教育に活用すべく改修を行った。これにより研究分野では材料科学分野、生命科学分野や地球科学分野等にも積極的に利用することができ、さらには、学外への広範な利用を促すことで、本装置の効率的な運用も可能となり、大学間のみならず民間への利用も期待することができる。

以下にその設備の概要を示す。

2. コバルト照射設備の概要

2.1 装置仕様

外部照射型コバルト60ガンマ線照射システムの主な仕様は次の通りである。

- 1) 核種: コバルト60
 - 2) 線源強度: 74TBq
 - 3) 設置場所での漏洩線量率は、装置表面から1mの位置にて $20\mu\text{Sv/h}$ 以下
 - 4) 停電時及び地震発生時には、自動的に線源が格納される構造
 - 5) 線源収納容器はBM型輸送物としての承認を得る
 - 6) 制御盤は、照射室の放射線モニタの信号を制御し、線源の状態を表示できること
 - 7) 照射のログ情報を記憶し、必要に応じてその情報を取り出すことが可能
 - 8) 照射室入室中は照射が出来ないこと
- などの仕様を満足している

2.2 外部照射型コバルト60ガンマ線照射システムの構成

- 1) PC-2000SC型線源収納容器(図1)の仕様
線源収納容器はBM型輸送物の容器承認を取得済である。
線源収納容量最大 ^{60}Co 85TBq
漏洩線量当量率表面から1mの位置 $20\mu\text{Sv/h}$ 以下

外形寸法 $\phi 570 \times 725$

L mm

重量 2033 kg

2) 線源仕様

線源寸法 $\phi 11.2 \times 210$ Lmm

3) 制御盤仕様(図2)

照射室出入口扉の開閉、線源の照射・格納、インターロック及びタイマー情報の表示ならびに駆動制御を行う。

照射室内設置の放射線モニタの信号の状態を表示し、線源の格納・照射状態を表示する。

電源 AC100V 50/60Hz 1500W 以下

制御 シーケンサによるプログラマブル制御

タイマ機能 最大9999時間59分59秒

到達線量値を入力し、設定が可能である。

ログ情報 照射開始時刻、照射終了時刻等のログをメモリに保存し、必要に応じてSDカードにて情報の取出しが可能である。

2.3 設置環境

外部照射型コバルト60ガンマ線照射システムの設置場所を図3に示す。地上に線源収納容器を設置し、地下の照射室に線源を駆動させる照射方式となる。

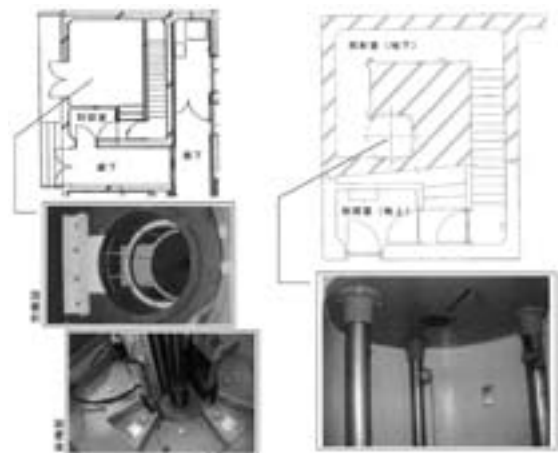


図3 外部照射型コバルト60ガンマ線照射設置環境



図1 線源収納容器



図2 制御盤

2.4 設置配置

外部照射型コバルト 60 ガンマ線照射システムの設置配置を以下に示す。

線源駆動ロッドは、上下をタングステン合金に遮へいされた線源ホルダーに接続された構造である。

線源駆動ロッドをスライドさせ、照射・格納する構造となっている。

線源駆動ロッドのストロークは 600mm である。その移動時間は約 16 秒である。

2.5 照射線量率分布

線源中心高さ上の線量率分布を図4に示す。同

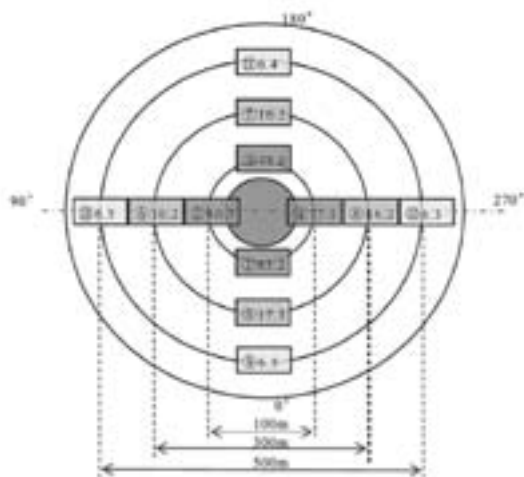


図4 照射線量率分布

周方向の照射均一性は、 $\pm 10\%$ 以内である。

2.6 安全機構

図5-8に示すように様々な安全機構を装備している。

制御盤にはインターロックキーが3本装備されており、この内1本でも OFF の場合は照射操作ができない。また照射室入口扉には電磁式のインターロックが設置されており、この扉が閉状態かつ電磁式インターロックが施錠状態であれば照射できない。停電等の異常が発生した場合は、バックアップ電源により、自動的に線源を上昇させ、格納させる等の安全機構を装備している。

2.7 まとめ

スライド式又は回転式のシャッターを使用することのない、上下エレベーター方式の高エネルギー領域のコバルト 60 ガンマ線照射システムが完成した。この外部照射型コバルト 60 ガンマ線照射システムにより、安全にかつ容易に使用でき、放射線研究に大きく寄与することを期待する。今後、本装置は学内の放射線教育・研究のみならず多くの研究室に活用していただきたいと思っております。ぜひ、ご興味のある方はご相談ください。



図5 インターロックキー非常用停止スイッチ（盤）バックアップ電源



図6 照射室出入口扉 図7 【左】 非常停止スイッチ 【右】 緊急脱出スイッチ 安全スイッチ



図8 感震計

JNRS 論文集

2010年 JNRS 論文賞受賞論文紹介

Characterization of ^{57}Fe Implanted and Annealed SnO_2 (3 % Sb) Films by Depth Selective Conversion Electron Mössbauer Spectroscopy (DCEMS)

K Nomura,^a S. Iio,^a Y. Hirose,^b Z. Németh,^{a, c} K. Yamamoto,^d and H Reuther^e

^a School of Engineering, the University of Tokyo;

^b School of Science, the University of Tokyo;

^c Institute of Chemistry, Eötvös Loránd University, Hungary; ^d Research Center, Institute of Asahi Glass Co. Ltd.; ^e Forschungszentrum Dresden-Rossendorf e.V., Germany

J. Nucl. Radiochem. Sci., Vol. 11, No.1, pp. 1-5, 2010.

概要

希薄磁性半導体における磁氣的相互作用の起源の解明とそのスピントロニクスへの応用の可能性を探ることを目的として著者らは酸化物半導体に希薄な磁性イオンをドーピングし、その希釈効果やクラスター形成についての研究を進めている。特にメスバウアー分光法の一つである転換電子メスバウアー分光法の確立を目指しながら

ら薄膜や表面の状態分析を行ってきた。本論文では、著者らが開発した数100nm厚さの膜の層構造を明らかにできる深さ選択転換電子メスバウアー分光法 (DCEMS) を用い、イオン注入によって作製した ^{57}Fe ドープ酸化スズ (3%Sb) 薄膜を解析した結果を述べている。イオン注入における基盤温度を上げることによって観察される光磁気特性とさらにポストアニールによって現れる光磁気特性について膜構造の違いによる磁性鉄イオンの化学状態の変化を明らかにした。500℃の基盤温度でイオン注入した薄膜にはマグネタイト (Fe_3O_4) のクラスターが生成する。これがポストアニールによって皮膜内部の常磁性 Fe (II) が Fe (III) への酸化を伴いながら表層においてマグヘマイト ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$) に変化し、室温強磁性透明半導体への可能性のある薄膜が700℃まで保たれる。また800℃になると最表面においてヘマタイト ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$) に変化してしまうために強磁性が失われる。このように独自の測定技術の開発によって希薄磁性酸化スズ膜構造のドーピングイオンの振る舞いを詳細に初めて明らかにした。今後もさまざまな薄膜の層状態分析において応用解析がされると期待される。

研究集会だより

海外

MTAA-13 (13th International Conference on Modern Trends in Activation Analysis) 大浦泰嗣 (首都大学東京)

東日本大震災直後の2011年3月13日から18日に開催されたMTAA-13に参加した。MTAAは放射化分析の手法やその応用に関する国際会議で、1回めのMTAA-1は、1961年にアメリカのTexas A&M大学で開催された。13回めにあたるMTAA-13は、50周年となる本年2011年にMTAA-1の開催地であったTexas A&M大学で再び行われた。29カ国から174名の参加があり、口頭84件、ポスター112件の発表があった。日本からは、13名が参加した。

会議は、13日夕方のwelcome receptionから始まった。このreceptionの会場は、George Bush Presidential Library & Museumで、俗にいうパパ・ブッシュゆかりの品々や彼の功績が展示されていた。14日からは、会場をInterdisciplinary Life Science Buildingにうつし、MTAA-1の実行委員長であったWainberdi名誉教授によるMTAAの歴史の紹介からscientific programがスタートした。その後、急逝された故Fritz Grass教授記念セッションが行なわれた。実は、Grass教授を全く知らなかったのだが、特に短寿命核種を用いたINAAで先駆的な仕事をたくさんされてきた方であったことを知った。

MTAAでは毎回Hevesy賞の授与式が行われる。本会では2010年と2011年にそれぞれ受賞されたDarleane C. Hoffman名誉教授とPeter Bode准教授が表彰された。D.C.Hoffman氏については読者の皆様はよくご存じだと思う。Bode准教授は、オランダのデルフト工科大学で中性子

放射化分析を用いた研究に従事され、開発途上国でのINAAの指導を頻繁に行われている。INAA定量値の品質保証、INAAの大型試料への適用、ならびに核科学の教育の貢献によりこの度受賞された。首都大学東京で開催したMTAA-12では、国際放射化分析委員会(ICAA)の会議録担当委員として会議録出版準備のため、会期後再来日してくれた。誠実な人柄で、短期間で多くの作業をこなしていただいた。

14日午後から一般セッションがはじまった。口頭発表は1会場で行われたため、どの会場で講演を聞くか迷うこともなく、ゆったりと聞くことができた。研究炉施設や方法論、様々な応用分野等のテーマごとに発表が行われた。本会のfocusの一つは、"Renewal and revitalization"で、これまでの施設の歩みや研究経過を振り返るとともに今後の計画に関する講演が多かった。また、新しい施設として中国の新研究炉CARRの紹介、このCARR、韓国HANARO炉、ポルトガルRPI炉での即発 γ 線分析(PGAA)装置の新設計画の講演があった。この他にもPGAA装置の設置を希望している炉は多いと聞く。PGAAで先駆的な研究を展開しているハンガリーのRevay氏は、原子力機構JRR-3のPGAA装置は世界一の装置であると紹介され、うれしく感じた。また、考古学分野の講演では、資料の元素組成分析にはPGAAが一番よい、との発表もあった。残留放射能のほとんどない非破壊分析法であるPGAAは今後益々利用が増えていくものと期待できる。

MTAA-13では、新しい試みが行われた。一つは、各応用分野でのセッションのはじめに行なわれた当該分野の概観や放射化分析の役割に関するreview講演で、講演者は必ずしも自ら放射化分析を行っている研究者とは限らないのが特徴である。現在では、放射化分析は微量元素分析の一つの方法であり、いかにその特徴をうまく利用し、

科学を展開していくかのヒントを与える講演であった。2つめは、ナノマテリアル、考古学、核犯罪科学の3分野での特別シンポジウムである。通常的口頭発表セッションで3分野のオーガナイザーによる review 的講演があり、buffet dinner をとった後、3会場にわかれ、シンポジウムが開始された。約1時間の口頭発表のあと、ポスター発表があった。口頭発表者は、ポスター発表も行うのが特徴である。3つめは、ポスター発表者の口頭による1分間の研究紹介である。これは、事前にビデオ撮影され、ポスターセッションの前に会場で流された。本会では、すべての口頭発表もビデオ撮影されており、その多くはweb上で見ることができる。MTAA-13のホームページ (<http://tti.tamu.edu/conferences/mtaal3/>) からリンク付の最終プログラムがダウンロードできるので、ご興味ある方はどうぞ。なお、残念ながらポスター発表者のビデオは見られません。

本会のもう一つの focus は "Participation by students/young scientists" で、事前に Travel Award の募集が行なわれ、要旨の審査によって、16名の学生/若手研究者に参加費免除と旅費の援助が行われ、懇親会で表彰された。日本から下記5名が選ばれた: M. Amirul Islam (首都大)、三浦亜由美 (立正大)、瀧本真己 (京大)、奥村良 (京大)、関本俊 (京大)。

アメリカへ発つ2日前、筑波大のタンデム加速器で実験している時に震災が起き、自動車でかなりの時間をかけ帰宅した。幸い大学のA0プリンタは無事でポスターを印刷し、Ge検出器の処置だけして、帰宅したら、福島原発で爆発のニュース。アメリカへ行かず大学で放射能のモニタリングをすべきでは、と思ったが、沈静化したような官房長官発表があったので、参加することにした。ホテルでテレビをつけると、連日、津波と原発事故の報道がされていた。爆発シーンが何度も繰り返し放映されていた。やはり来るべきではなかったと思いつつも、他人事のように1週間楽しんだ。水曜午後のセッションは15時で終了し、バスでヒューストン市内のHouston Livestock Show and Rodeoへ移動。帰りの出発時間の案内もなくバスから降ろされ、巨大なスタジアムへ。牛の背中から振り落とされないようにがんばるのがロデオか

とっていたが、この他にもいろいろな競技があること、賞金をかけて戦っていることも初めて知った。ロデオとライブがセットになっており、当日は、テキサス出身の歌姫 Marinda Lambert のライブだった。観客の盛り上がりは大変なもので、すごい熱狂ぶりだった。

前回のMTAA-12で事務局を担当したので、会の運営に気がひかれた。1会場だけということもあるが、会期中の運営のスタッフの数がわずかで、MTAA-12では、研究室の学生を総動員して運営に当たったのとは大違いである。全般的に簡素であったが充実した会議で合った。日本は、英語圏ではない、欧米から遠いという面があるが、MTAA-12の準備/運営はいろいろ気を使いすぎたのかなあ、と思ったしだいである。会議録は、J. Radioanal. Nucl. Chem. 誌に peer review 後掲載されるが、本稿執筆時で、JRNC 誌のホームページで online first としてすでに公表されており、そのスピードにも驚いている。(時同じくして、APSORC2009の会議録の校正刷りが届いた・・・)

最終日の閉会式において、福島原発事故に際して "Concerning monitoring of radioactivity from the nuclear reactors at the Fukushima Dai-ichi power plant." と題した決議がされた全文は ICAA のホームページ (<http://www.icaa-mtaa.org/>) に掲載されているが、原発事故に関連した試料の測定等の協力を申し出ていただいた今だ事故収束の見通しは明るくないようであるが、せつかくの申し出を無駄にしないで有効に活用できないかと思う原発事故が研究炉の存続に影響を与えうるのかどうかかわからないが、次の50年に向かって少しでも貢献していきたいと思う

本会議参加にあたり、放射化分析研究会より旅費の援助をいただいた感謝いたします



ISORD-6に参加して

関本 俊（京都大学原子炉実験所）

ISORD-6 (The Sixth International Symposium on Radiation Safety and Detection Technology「放射線安全と計測技術に関する国際シンポジウム」)が、2011年7月12-14日に、マレーシアのランカウイ島において開催された。プロシーディングスがProgress in Nuclear Science and Technologyとして出版されるこの国際会議は、2001年から隔年で開催されており、参加者は主に日本、韓国、中国を中心としたアジア地域において、放射線工学を専門とする研究者である。会議ではまず、上記の三ヶ国及び主催国であるマレーシアの研究者より一件ずつ招待講演が行われ、それに続いて、“Accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant”という題目の特別セッションが組まれた。このセッションでは、はじめに馬場護東北大学名誉教授より、発電所の施設の紹介と、震災により発電所で何が起きたかということについて、時系列での説明が行われた。また中村尚司東北大学名誉教授より、発電所の周辺環境において、どのように汚染が広がったかについて、具体的な放射性核種を挙げながら説明があった。

放射化学会の会員においては、KEKの松村宏氏らにより、“Radiation Detection and Sensor”のセッションで、120 GeV陽子により照射した水中の銅ホイルより生成した放射性コロイドの種類とその生成率についての発表、“Radiation Dosimetry”のセッションで、京大炉の長田直之氏により、高線量区域の空气中に生成するエアロゾルの測定を応用した線量測定に関する発表及び、筆者らにより、超高エネルギー陽子ターゲットステーションにおける ^{32}P の測定結果についての発表があった。松村宏氏及び筆者らによる研究成果は、米国フェルミ国立加速器研究所で行われているJASMIN (Japanese-American Study of Muon Interaction and Neutron detection) プロジェクト (研究代表者：中島宏氏 (JAEA)) の下で得られた成果であり、本プロジェクトに関する発表は上記の他、JAEAの岩元洋介氏より「超高エネルギー 120GeV陽子入射反応による厚いターゲットからの15度及び90度方向における中性子生成エネルギースペクトルの測定」という題目で、米国フェルミ国立加速器研究所における測定、並びに粒子輸送モンテカルロ計算コードPHITS及びFLUKAによるベンチマーク計算結果との比較・検討についての発表や、京大炉の八



写真 メイン会場の様子 (JAEA 岩元氏より提供)

島浩氏により「120GeV陽子入射反応によって生成した中性子のコンクリート遮蔽内分布の測定」という題目で、反陽子ターゲットステーションのコンクリート内における放射化法による中性子分布測定についての発表があった。

放射線工学の分野における会議ということで、遮蔽や放射線防護に関する話題が多くを占めており、以下に興味深いと思われた講演を記す。

・J-PARCニュートリノ実験施設で生成する放射能（冷却水中の ^3H , ^7Be , ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{58}Co 等、Heガス中の ^3H 、コンクリート中の ^7Be , ^{22}Na , ^{54}Mn , ^{46}Sc 等）の測定とMARSによるシミュレーション結果との比較についての発表（KEK・萩原雅之氏）

・高エネルギー中性子場でNaI (TI) 検出器を用い波形弁別法および飛行時間法を適用してガンマ線波高スペクトルを測定した結果についての発表（放医研・鎌田創氏）

・個人線量計に用いられるシリコン素子に中性子が入射した場合の応答特性を測定およびシミュレーションから求めた結果についての発表（放医研・高田真志氏）

また原子力学会・放射線工学部会のグループが、ICRS12（放射線の遮蔽に関する国際会議：2012年9月27日に奈良県新公会堂で開催）への参加募集を積極的に行っていた。

次回のISORDは、2013年に中国で開催される予定である。

国内

第12回「環境放射能」研究会

別所光太郎(高エネルギー加速器研究機構)

第12回「環境放射能」研究会が、平成23年3月8-10日の期間で、つくば市の高エネルギー加速器研究機構において開催された（主催：高エネルギー加速器研究機構 放射線科学センター、日本放射化学会 α 放射体・環境放射能分科会、共催：日本原子力学会 保健物理・環境科学部会、日本放射線影響学会、日本放射線安全管理学会）。当研究会は平成12年にスタートして以降、数名の世話人を中心に運営されており、代表世話人を第1回（平成12年）～第4回（平成15年）は近藤健次郎氏（高エネ研）と三頭聰明氏（東北大）、第5回（平成16年）～第11回（平成22年）は五十嵐康人氏（気象研）と三浦太一氏（高エネ研）が勤めてきた。本年度の第12回研究会開催を機に世話人会メンバー全体を見直し、代表世話人を三浦（高エネ研）、副代表世話人を高宮幸一（京大炉）、田上恵子（放医研）、別所光太郎（高エネ研）が勤めることとなった。第12回研究会では、依頼公演3件、特別講演2件、および一般口頭発表20件、ポスター18件の計43件の発表と約

110名の参加者があり、活発な討論が行われた。

今回の研究会では、昨年の夏に亡くなられた、金沢大学の小村和久先生を追悼する特別セッションが設けられた。小村先生は、JCO臨界事故後の研究グループの立ち上げなど、長年にわたり日本の環境放射能研究をリードされ、本研究会においても設立の準備段階から中心メンバーとして、たいへんご活躍いただきました。3月9日に行われた追悼セッションでは金沢大学の坂本浩氏より「小村和久氏と私」、山本政儀氏より「小村和久先生と低レベル放射能実験施設の歩み」との内容でお話をいただき、皆で小村先生のこれまでのご活躍とお人柄に思いを馳せた後、最後に参加者全員で黙祷を捧げました。

「環境放射能」研究会は、1) 自然環境放射能、2) 放射線・原子力施設環境放射能を基本テーマとし、これに加えて毎回異なる討論主題1～2件を挙げて一般講演を募集するとともに、主題にふさわしい研究者による依頼・招待講演を行ってきた。これまでの研究会の討論主題は、以下のようである。

第1回：JCO事故

第2回：質量分析法の環境放射能研究への新展開

第3回：環境中のアクチニド

第4回：ラドン・トロンとその娘核種

- 第5回：最先端の分析技術－環境放射能研究への応用とその可能性
 第6回：放射性降下物 / 同位体地球化学
 第7回：モデル研究の先端 / 産業活動と環境放射能研究
 第8回：日本における環境中の人工放射能研究 50年
 第9回：放射線の環境影響
 第10回：「セレンディピティ」と「ジャパニティ」
 第11回：環境放射能研究における分析化学的アプローチ

第12回研究会は、「放射線教育における環境放射能研究」を討論主題として開催された。これは、平成23年度から中学校理科第一分野の学習指導要領に「放射線の性質と利用について触れること」という事項が加わり、中学校理科で約30年ぶりに「放射線教育」が行われることになったことを踏まえたもので、放射線・放射能教育の場における環境放射能研究について議論することを目指したものである。はじめに、文部科学省国立教育政策研究所・清原洋一氏から「今回の小・中学校の学習指導要領改訂と理科教育」という演題での依頼講演があり、理科教育全般の立場から、現在の小・中学生の科学に対する意識や興味、自然体験や科学的な体験の現状を分かりやすく紹介していただくとともに、今回の学習指導要領改訂が、科学的な思考力や表現力の育成、科学的な体験の充実などを目指した改革であることについて説明していただいた。このような意図を持った指導要領改訂を契機として、理科や科学に興味を持つ子供たちが少しでも増えていくよう強く望むものである。清原氏の講演に引き続き、信州大院教育学研究科の中條悟氏が、小学校および中学校で実施した放射線教育に関わる研究授業について、原子力・放射線について生徒たちにどのように伝え、生徒たちがどのような反応を示したかについて講演された。さらに、高校生と共に広島で放射線測定を行ってきた経験（奈良学園中高・工藤博幸氏）、簡易放射線測定器「はかるくん」による放射線教育現場の支援（日本科学技術振興財団・掛布智久氏）について講演があり、これらの講演を踏まえ

全体討論を行った。研究会参加者がそれぞれの経験や立場を踏まえて、放射線教育や理科教育に関する考えを出し合うことができ、たいへん有意義なセッションであった。

研究会最終日の3月10日には、放医研・土居主尚氏の「環境放射能における統計学」との演題での依頼講演があった。環境放射能研究においては、多数のデータを取り扱ったり、限られた実験データから何らかの統計処理をして議論を進めたりすることは不可欠であり、統計処理の方法や解析結果の意味について十分に理解した上で議論を進めることが求められる。土居氏の講演では、実験データの解析手法に焦点を絞り、様々な統計的解析手法の目的と概要について、専門家の立場からご説明をいただいた。今後の研究活動遂行において、有用な情報を得た研究者も多かったのではないと思われる。講演後に出された質問に対して、「(統計的には)何も言えない」ということの意味と解釈について、土居氏が分かりやすい説明をされていたことが印象に残っている。

本研究会は、毎年「若手セッション」として、数名の担当者が考えた企画に沿って若手研究者や大学院生が自由な討論を行う場を持っているのも特徴である。今回は、筑波大・木下哲一氏が中心となり研究会参加者にもアンケートをとって準備を進め、環境放射能研究者がどのような方法で実験データを解析し、解析した結果や考察をどのような方法でプレゼンテーションとして示しているかについて紹介し、議論をした。今後も、研究者間の有用な情報交換の場として、若手セッションがよい形で継続することを期待している。

また、今回の研究会ではじめての試みとして、発表後の質疑応答の時間をこれまで以上に長くとり、質疑応答の後に、各講演のプレゼンテーションの方法（スライドの見た目や話し方など）について座長が必ずコメントすることとした。これは、発表内容に関する議論を充実させると共に、プレゼンテーション能力の向上を意図したものである。コメントに苦勞された座長も多かったようであるが、試みとしては面白いものだった。学生や大学院生が講演者の場合には特に有用な試みではないかと思われ、講演者に加えて聴衆や座長にとっても、多少なりともプレゼンテーションの方

法について意識を持つきっかけとなればと期待している。今後もよりよい方法も含め、世話人会で検討を続けていきたい。

最後に、当研究会終了翌日の3月11日の東日本大震災発生にも触れたい。研究会参加者の中には、地震および津波により、たいへん大きな被災をされた方がおられたことも聞いております。被災をされた皆様には、改めて心よりお見舞いを申し上げます。また、震災以降も現在に至るまで、福島第一原子力発電所事故に関連した環境放射能・放射線測定に、研究会参加者を含め、全国の多数の研究者が尽力されていることはご承知の通

りです。来年以降の「環境放射能」研究会には、これまで以上に、情報発信や情報交換の場として重要な役割を果たすことが求められると共に、研究者間の交流促進の拠点としても当研究会が少しでも有用な役割を果たせるよう期待しています。

当研究会では毎回 Proceedings を発行しており、今回も11月頃を目処に出版する予定です。過去の研究会の Proceedings についても多少残部がありますので、入手を希望される場合は、高エネ研・別所 (kotaro.bessho@kek.jp) までご連絡ください。

.....

情報プラザ

.....

1. 3rd International Nuclear Chemistry Congress, Italy

会 期 18 - 23 September 2011

会 場 Swissotel Nai Lert Park, located at 2
Wireless Road, Bangkok 10330, Thailand

会議ホームページ <http://namls10.com/Home>

4. 9th International Conference on Methods and Applications of Radioanalytical Chemistry (MARC IX), USA

会 期 25-30 March 2012

会 場 Kailua-Kona, Hawaii

会議ホームページ <http://altmine.mie.uc.edu/nuclear/marc/>

2. International Conference Innovative Nuclear Energy Systems toward 2030 and beyond (GLOBAL2011), Japan

会 期 11-16 December 2011

会 場 Makuhari Messe

会議ホームページ <http://global2011.org/index.html>

5. 8th International Conference of Nuclear and Radiochemistry (NRC-8), Italy

会 期 16-21 September 2012

会 場 Grand Hotel di Como

会議ホームページ <http://nrc8.mi.infn.it/>

3. 10th International Conference on Nuclear Analytical Methods in the Life Sciences (NAMLS10), Thailand

会 期 15-20 January 2012

会 場 Makuhari Messe

会 場 Swissotel Nai Lert Park, located at 2
Wireless Road, Bangkok 10330, Thailand

会議ホームページ <http://namls10.com/Home>

学位論文要録

Development of microchannel-electrode chip and basic studies for electrochemistry of element 106, seaborgium

(106番元素シーボーギウムの電気化学的研究に向けた電極マイクロチップの開発と基礎研究)

大江一弘 (日本原子力研究開発機構)

学位授与：大阪大学大学院理学研究科化学専攻

主査：篠原 厚

平成23年3月25日

原子番号104番以降の超重元素は、すべて天然に存在しない人工放射性元素であり、加速器を用いた重イオン核融合反応によってのみ製造される。超重元素は生成量が少なく、さらに半減期も短いため、化学実験を行うことが困難であり、その化学的性質はほとんどわかっていない。本研究では、酸化還元活性であると期待されている106番元素シーボーギウム (Sg) に着目し、酸化還元実験を通じてその化学的性質を調べることを目指すこととした。酸化還元は最外殻電子の授受に関する反応であり、これを通じてその電子状態を詳細に調べることが期待される。

Sgの酸化還元挙動を調べるためには、迅速に酸化還元挙動を調べるための化学装置の開発が必要である。また、Sgの同族元素であるモリブデン (Mo)、タングステン (W) を用いて、Sg実験の条件決定等のための基礎データ収集を行う必要がある。さらに化学実験後にSgを検出するため、 ^{248}Cm (^{22}Ne , $5n$) 反応により合成される ^{265}Sg の壊変特性を詳細に調べておく必要がある。そこで本研究では、これらの課題解決のため以下のような実験を行った。

まず、迅速電気化学装置としてマイクロ化学チップに電極を組み込んだ電極マイクロチップの開発を行った。様々な実験による検討を重ねた結



果、最終的に流路は一本道 (流路長 60 mm、流路幅 2 mm、流路深さ 15 μm) とし、作用電極および対電極に Pt/Ti 電極、参照電極に Ag 電極を用いたガラス基板製のものを作製した (Fig. 1)。

この電極マイクロチップを用い、Sg実験へのステップとして102番元素ノーベリウム (No) の電解酸化実験を行った。理化学研究所 AVF サイクロトロンを用いて ^{248}Cm (^{12}C , $5n$) 反応により合成した ^{255}No (半減期 3.1 min) を、He/KCl ガスジェット搬送システムを用いて化学実験室まで搬送し、0.1 M HNO_3 に溶解した。この溶液を電極マイクロチップに流速 3.5 $\mu\text{L}/\text{min}$ で導入し、500 または 1250 mV vs. Ag pseudo-reference electrode の電位を印加して No^{2+} の No^{3+} への電解酸化を行った。その後、0.5 M di-(2-ethylhexyl) phosphoric acid (HDEHP)- CCl_4 溶液を加えて溶媒抽出により No^{2+} と No^{3+} の分離を行った。 α 線測定により両相に分配した No を定量した結果、

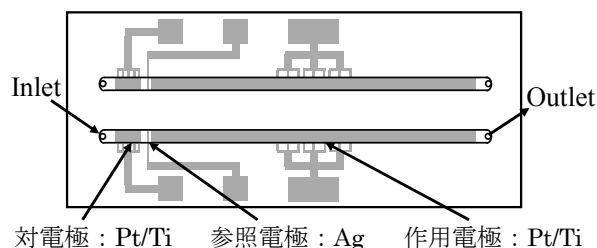


Fig. 1 作製した電極マイクロチップの構造

1250 mV の印加電圧において No が酸化されていることを確認した。そのため、Sg 実験のような単一原子レベルにおいて、電極マイクロチップによる電解が可能であることが示された。

また本研究では、Sg の酸化還元前後の化学挙動の変化を捉えるための実験条件の決定のため、同族元素 Mo、W の塩酸溶液からのイオン対抽出挙動を詳細に調べた。Mo、W は中性から酸性溶液中で多核の錯体であるポリ酸を形成することが知られているが、Sg はその生成量の少なさから、ポリ酸を形成することはない。そのため、Mo、W の抽出挙動を極微量 (約 10^{-13} M) とマクロ量 (10^{-4} - 10^{-2} M) の場合で比較し、Sg 実験に適した条件の探索を行った。実験の結果、6-11 M HCl 溶液において極微量とマクロ量の両者の抽出挙動が一致し、6 M HCl 未満の濃度では結果に差が見られた。この結果は、6-11 M HCl 溶液中において極微量およびマクロ量の Mo、W が同じ化学形で存在することを示しており、この塩酸濃度範囲での実験が Sg 実験に適していることがわかった。さらに、極微量の Mo、W の抽出化学種の推定を行うため、分配比の抽出剤濃度依存性を調べた (Fig. 2)。その結果、抽出化学種の電荷として -1 であることが示唆され、 $\text{MoO}_2\text{Cl}_3^-$ および WO_2Cl_3^- が抽出されていると推定することができた。

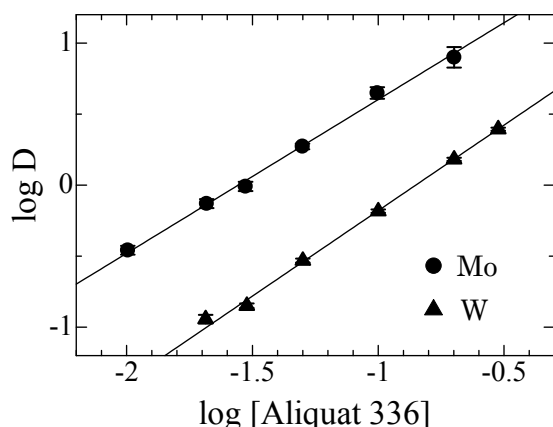


Fig. 2 極微量 Mo、W の分配比の抽出剤濃度依存性
水相：11 M HCl
有機相：Aliquat 336-クロロホルム溶液

さらに、理化学研究所との共同研究により、気体充填型反跳核分離装置 (GARIS) を利用した ^{265}Sg の壊変特性の探索実験を行った。その結果、 ^{265}Sg の α 線を明確に同定することに成功し、詳細な半減期や壊変様式が明らかとなり、Sg の化学実験を行うために有用なデータを取得することができた。

以上の実験により、Sg の酸化還元挙動の研究のための迅速電気化学装置の開発と基礎データの収集を行うことができた。

代表的な発表論文

1. K. Ooe, Y. Tashiro, D. Saika, Y. Kitamoto, K. Matsuo, T. Takabe, T. Kuribayashi, N. Takahashi, T. Yoshimura, W. Sato, K. Takahisa, and A. Shinohara
J. Nucl. Radiochem. Sci. **8**, 59 (2007).
2. K. Ooe, W. Yahagi, Y. Komori, H. Fujisawa, R. Takayama, H. Kikunaga, T. Yoshimura, N. Takahashi, H. Haba, Y. Kudou, Y. Ezaki, and A. Shinohara
Radiochim. Acta in press.

学会だより

1. 日本放射化学会第51回理事会 [2010学会 年度第2回理事会] 議事要録

日時：平成23年12月11日 13:32～16:32

場所：秋葉原ダイビル18階 第5会議室

出席者：[会長] 永目、[副会長] 篠原（厚）、沖、
[理事] 海老原、田上、百島、松尾、木村、
村松（久）、永井、大槻、深澤、福島、横山、
[監事] 篠原（伸）、村松（康）

欠席者：なし

報告

- 事務局より以下の報告があった。第49回、第50回理事会の議事要録案、および第12回総会の議事録案の説明があり、了承された。また、2010年9月10日から正会員、学生会員の入会者が各2名、退会者が各1名あったことと、個人会費の納付状況についての説明があり、了承された。賛助会員の数に増減がないことが報告され、賛助会員の増加策について意見交換を行った。
- 松尾理事より、会員メーリングリストへの配信と学会ホームページの更新の状況について説明があり、了承された。放射化学ニュース22号から放射化学ニュース誌のホームページ上への全文掲載が始まったことが報告された。また、11月26日に契約変更により学会ホームページがより能力の高いサイトに新規開設されたことが説明され、了承された。
- 木村理事（ジャーナル編集委員長）より、JNRS誌の投稿数および編集状況について説明があり、了承された。また、2011年3月2～4日に開催予定の国際会議“Actinide XAS 2011” (<http://anxas2011.spring8.or.jp/>) のProceedingsをJNRS誌に掲載予定であること、および開催者側より編集委員（Guest editors）を選出したことが報告され、了承さ

れた。JNRS誌がJSTのJournal@rchiveで公開されている（Vol.8（2007）まで）こと、およびVol.9（2008）以降は現在J-STAGEへの公開を継続準備中であることが紹介された。

新しくニュース編集委員長に就任した大槻理事より、放射化学ニュース誌の表紙に主要記事に関する図や写真を載せるなど、体裁を変更することを検討していることが報告され、了承された。記事の充実について意見交換を行った。JNRS誌についても放射化学ニュース誌のように、冊子体が不要な会員には送らないようにしたらよいという発言があり、多くの賛成者があった。

- 篠原（厚）副会長より9月に実施された2010日本放射化学会年会・第54回放射化学討論会について、会計報告を含むまとめの報告があり、了承された。新しい公募セッションなどの取り組みが行われ大成功であったという会長の発言があった。
- 海老原理事（冊子編集委員長）より、放射化学冊子出版事業として第2分冊「環境放射能」が、ほぼ完成した旨報告があり、了承された。
- 永井理事より、本会共催の第48回アイソトープ・放射線研究発表会の運営委員会について報告があり、了承された。

審議

- 学会賞について、特に木村賞のあり方等の意見交換を行った。2011年学会賞及び奨励賞候補者募集について、募集要項の文面を審議し決定した。募集の締切は2月25日とした。
- 2011年の役員選挙の候補者を理事会に推薦する、役員等推薦委員会について人選が行われ、審議の結果、永目会長、篠原、沖両副会長、および今期で退任となる木村理事、福島理事、松尾理事が選ばれた。なお、9月に行われた第12回総会における会則改正により、2011

年に選出される役員に限り、任期は1年となる。

会長の選出に関して現在の、推薦委員会が推薦し理事会の議を経て総会で承認を得る方法は会員に見えにくく、推薦グループから推薦を受けた候補者が会員の選挙により決定される方法の方がわかりやすい、という意見が以前から出されている。今理事会において、会長選挙の導入に向けて、会長の具体的な選挙方法の検討を事務局と担当理事とで開始することとなった。

3. 2011 日本放射化学会年会・第 55 回放射化学討論会について、村松久和理事（同実行委員長）より、2011 年 9 月 20 日から 22 日までの日程で、長野市若里市民文化ホールにおいて開催される予定であることが報告された。日程が日本原子力学会と重なることが指摘されたが、他に選択肢がないため、審議の結果、予定通りの日程にて開催されることとなった。会長より 2011 年は世界化学年にあたるため、討論会で関連の企画を行うことが提案され、企画内容について意見交換を行った。審議の結果、担当理事の下で今後、企画内容を検討することとなった。
4. 永目会長より、2012 日本放射化学会年会・第 56 回放射化学討論会の担当は、東京工業大学の鈴木達也先生にお願いする旨説明があり、審議の結果、了承された。
5. 高齢会員の会費減免について審議した。本件は以前の理事会において審議され、総会（第 9 回）において、75 才以上で申告のあった会員については永年会員として会費を免除するが、学会の財政状況等を考慮し、開始時期は別途検討することとなっていた。永年会員等高齢会員に関する制度のあり方について改めて意見交換を行った。審議の結果、財政状況の改善が認められることから、2011 学会年度より永年会員制度を開始することとし、会員からの申告については、今年行う会費納付の案内の際に該当者に対し通知することとなった。
6. 1) 公益法人改革に伴う、本会の対応について審議した。事務局より新公益法人制度の概要と以前の理事会における審議概要、および

法人化した場合の財政と事務局経費の増加額の見積りについて報告があった。他学会の動向について海老原理事より発言があった。審議の結果、今後も他学会等の動向を見極めながら、慎重に対応していくこととなった。2) 第 12 回「環境放射能」研究会（2011 年 3 月 8 日から 10 日）に対する経費補助について審議し、申請額である 5 万円の支出を承認した。
以上

2. 日本放射化学会第 52 回理事会 [2010 学会年度第 3 回理事会] 議事要録

日時：平成 23 年 3 月 9 日 13:30 ~ 17:20

場所：高エネルギー加速器研究機構 4 号館 1 階 127 号室

出席者：[会長] 永目、[副会長] 篠原（厚）、沖、[理事] 田上、百島、木村、村松（久）、永井、大槻、横山

欠席者：[理事] 海老原、松尾*、深澤*、福島*、[監事] 篠原（伸）*、村松（康）

*委任状提出

報告

1. 事務局より第 51 回理事会の議事要録案の説明があり、了承された。また 2010 年 12 月 8 日から 2011 年 3 月 1 日までに正会員 1 名の退会があったこと、および賛助会員の数に変化がないことが報告され了承された。賛助会員および一般会員の増加策に関して意見交換を行った。さらに事務局より個人会費の納入状況の説明と会計の中間報告があり、了承された。
2. 松尾理事作成の資料に基づき、事務局より 2010 年 12 月 11 日から 2011 年 3 月 7 日までの学会メーリングリストへの配信数、学会ホームページの更新などの報告があり了承された。
3. 木村理事より、JNRS 誌に掲載予定の Actinide XAS 2011 のプロシーディングスの状況等および学会賞受賞者への投稿催促について報告があり了承された。大槻理事より、

放射化学ニュース23号の編集が最終段階に入っていることが報告があり了承された。表紙を含め誌面が一新され、多くの記事が掲載される。

4. その他 1) 百島理事より、編集中であった冊子「環境放射能の最前線」が完成し、現在印刷中である旨報告があり了承された。冊子は次回の雑誌発送時に同封される予定である。2) 事務局より、2012日本放射化学会年会・第56回放射化学討論会は、2012年10月3日から5日の日程で、東京工業大学（大岡山キャンパス）蔵前会館にて開催される予定であることが報告され、了承された。3) 百島理事より日本開催の次回APSORCの組織および開催場所等の検討状況について報告があり、了承された。

審議

- 事務局より、2011年学会賞および奨励賞の応募状況について、今回は奨励賞の応募のみがあったことが報告された。審議の結果、応募者を奨励賞の候補とすることとし、選考委員の選考を行った。
- 会長より、次期役員推薦について、役員等推薦委員会による候補者の推薦が進められていることが報告され、了承された。次期（2011年選出）の役員については、第12回総会での会則改正により任期は2年ではなく、1年となる。選挙管理委員の選出について審議し、選挙関係事務局が置かれている原子力機構の会員から人選を進めることになった。
- 村松（久）理事より本年9月20日（火）～22日（木）に長野市若里市民文化ホールにて開催される2011日本放射化学会年会・第55回放射化学討論会の準備状況について報告があり、締め切り日等のスケジュールが了承された（講演申し込みが6月6日～7月8日、要旨締切8月19日、参加予約申し込み締切8月26日）。各種企画について、特に本年は2011世界化学年にあたることから特別討論の主題としての化学年の企画について意見交換を行った。会長より学会として世界化学年の事業登録を行うことが提案され、審議の結果、

了承された。各種企画については継続して審議することとなった。

- 前回理事会において、会長選挙の導入に向けて具体的な検討に入ることとなった。事務局から会長候補者の推薦の方法、資格等の検討状況が報告された。審議の結果、会長候補者は自薦も可とし、特に推薦人の人数の規定は設けないこと、また役員経験を要するなどの要件も特に設けないこととなった。また、副会長については、新会長が理事の中から選出することとなった。今年の第13回総会に提案できるように制度検討を進めることとなり、具体的な会則、内規等の改正案については事務局が検討することとなった。また、理事については、現在の役員等推薦委員会を拡大し、委員を理事会メンバー以外からも広く選ぶことで、より会員の意向を反映させることとなった。
- 事務局業務の一部外部委託について事務局から提案があった。事務局業務は総務、選挙、学会賞の各担当事務局が行っているが、特に総務担当は負担が大きい。現在のボランティアによる持ち回り事務局の体制をこれからも維持しているのはかなり困難であるため、総務事務局の一部業務（会員管理、会費納付業務など）を業者に委託することが提案された。審議の結果、委託する方向で検討することとなり、事務局で経費の見積もり等を進めることとなった。

以上

3. 会員動向（平成23年2月～平成23年7月）

新規入会（正会員）

氏名	所属
池田 泰久	東京工業大学 原子炉工学研究科
川瀬 雅也	長浜バイオ大学 バイオサイエンス学部
渡辺 茂樹	日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門

新規入会(学生会員)

氏名	所属
高橋 駿介	新潟大学 理学部 化学科
佐藤 大輔	新潟大学 理学部 化学科
齋藤 辰宏	新潟大学 理学部 化学科
田口 司	新潟大学 理学部 化学科
武山 美麗	山形大学大学院 理工学研究科
金谷 佑亮	茨城大学大学院 理工学研究科
佐藤 志彦	筑波大学大学院 生命環境科学研究科

岡井 富雄	盛合 宏樹
日南宗一郎	中山 督
貝谷 英樹	山口 芳香
瀧本 清貴	小林 慶規
李 子杰	瀧本 真己
松岡 伸行	伊藤 泰男
石黒 梨花	

所属変更(個人会員)

氏名	所属
中條 悟	長野県辰野町立辰野西小学校
大江 一弘	日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター
西 正孝	日本原子力研究開発機構 関西光科学研究所
小池 裕也	明治大学理工学部応用化学科
橋本 和幸	日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門
横山 裕也	日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター
西川 恵	日本原燃(株)
木下 哲一	清水建設株式会社 技術研究所 原子力施設技術センター
菊永 英寿	東北大学電子光物理学研究センター
太田 朋子	北海道大学大学院工学院 環境循環システム
佐藤 兼章	日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 事業推進部門
森山 裕丈	京都大学原子炉実験所
堀内 公子	慈恵医科大学 アイソトープ実験研究施設
白田 重和	東北大学大学院 工学研究科
菊池 貴宏	日本原子力研究開発機構 核燃料サイクル工学研究所

退会(個人会員)

氏名	氏名
韋 悦周	本間 溪太郎
岡村 久美子	島根 真太郎
江坂 木の実	川崎 拓馬

4. その他

- ・入退会および会員情報変更の手続きは、本会ホームページ<http://www.radiochem.org/>の入会案内、会員情報変更のページをご覧ください。本会では個人会費の納付については、納付者の氏名、所属を記録するため、郵便振替としております。海外在住等で郵便振替が利用できない場合や、公費による支払いを希望される場合は、事務局までお問い合わせ下さい。
- ・会員への連絡はメーリングリストに配信することを基本としておりますので、できる限りメールアドレスの登録をお願いします。また一部の方は、アドレスの変更が事務局に連絡されていないため不達となっているようです。アドレスを登録しているにも関わらず、情報が届かない会員がおられましたら事務局に必ずご連絡願います。
- ・メーリングリストへ配信したい情報がありましたらネット委員会に依頼して下さい。配信内容は、平文とし必要に応じて他のサイトにリンクする書き方として下さい(添付ファイルは不可)。
依頼先：ネット委員会
jnrs.net2008@radiochem.org
- ・賛助会員は、メーリングリストに新製品案内、会社案内等の広告を配信することができます。これは賛助会員のメリットの一つとして実施されているものですので是非ご利用下さい。
広告配信依頼・その他の問い合わせ先：事務局
jnrs.office2008@radiochem.org

日本放射化学会入会申込書

年 月 日

*会員番号			
ふりがな			
氏名 (自署)	(姓)	(名)	
ローマ字つづり			
生年月日	年 月 日	性別	男・女 (○で囲むこと)
会員種別	正会員 ・ 学生会員 (○で囲むこと)		
勤務先・就学先	名称・部局 ・部・課・ 学科名等		
	所在地		
	職(学年)	指導教官名 (学生の場合)	
	電話	ファックス	
	電子メールアドレス		
自宅	自宅住所		
	電話	ファックス	
	電子メールアドレス		
雑誌等送付先	勤務先 ・ 自宅 (○で囲むこと)		
最終学歴・年次		学位	

備考欄 (学会への要望事項等)

* 本会記入欄

2011 日本放射化学会年会・第55回放射化学討論会 プログラム

(暫定版：2011.8.2 現在)

口頭発表	発表時間 15 分以内、討論含め 20 分以内、交替時間 1 分以内
ポスター発表	発表 2 回、40 分 (ポスター発表 1)、60 分 (ポスター発表 2)
会場	長野市若里市民文化ホール
A 会場	1 日目：ホール、3 日目：会議室 2
B 会場	会議室 1
P 会場 (特別セッション)	1F ホワイエ
P 会場 (一般セッション)	2F プロムナードギャラリー
S 会場	ホール
総合受付	1F エントランス

第 1 日：9 月 20 日 (火)

A 会場 (ホール)

B 会場 (会議室 1)

9:00

総合受付 (エントランス)

9:30

座長：

1A01 Lr の第一イオン化ポテンシャル測定に向けた、表面電離イオン源によるランタノイドのイオン化(原子力機構、茨城大、理研) ○佐藤 望、佐藤哲也、浅井雅人、塚田和明、豊嶋厚史、大江一弘、金谷 佑亮、永目諭一郎、Matthias Schädel、市川 進一

1A02 メンデレビウム (Md) の還元電位測定 (原子力機構、原子力機構/GSI、阪大院理、阪大理) ○豊嶋厚史、李 子杰、浅井雅人、佐藤 望、佐藤哲也、大江一弘、菊池貴宏、金谷佑亮、北辻章浩、塚田和明、永目諭一郎、Schädel Matthias、笠松良崇、鈿 優香、篠原 厚、羽場宏光

1A03 シーボーギウムの溶液化学実験に向けた液体シンチレーション検出システムの開発 (阪大院理、東北大電子光セ) ○小森有希子、菊谷有希、横北卓也、木野愛子、菊永英寿、笠松良崇、吉村 崇、高橋成人、篠原 厚

1A04 高分解能 α 線微細構造測定による重核の核構造研究 (原子力機構、理研仁科セ、阪大院理、名大院工、名大 RI) ○浅井雅人、羽場宏光、佐藤 望、笠松良崇、加治大哉、森本幸司、森田浩介、嶋 洋佑、柴田理尋、塚田和明、佐藤哲也、豊嶋厚史、石井哲朗、永目諭一郎

10:50

11:05

特別講演

座長：

2S01 ナノカーボンの基礎科学と応用 ～グリーンイノベーションに向けて～

(信州大工、信州大カーボン科学研究所長) 遠藤守信

12:25

12:30

核化学分科会
(会議室 2)原子核プローブ分科会
(会議室 1)

.....13:30.....

ポスター発表 1 (P会場)

1P01 - 1P12 ホワイエ

1P13 - 1P30 プロムナードギャラリー

.....14:10.....

2011年世界化学年特別セッション

座長:

1T01 福島第一原子力発電所事故直後のガンマ線測定によって得られた福島県とその近隣県における放射性核種の分布の特徴(高エネ研・放射線科学セ、理研・安全管理部、理研仁科セ) ○松村 宏、斎藤 究、石岡 純、上叢義朋

1T02 福島県走行サーベイと NaI 検出器による γ 線スペクトル解析(九大 RI セ、九大院理、九大理、(財)九州環境管理協会) ○杉原真司、市川竜平、前川暁洋、先崎達也、川村秀久、百島則幸

1T03 福島第1原発事故からの放射性物質 - 筑波大 RIC における観測(筑波大 RIC) ○末木啓介、鈴木路子、坂本健一、伊藤達夫、古川 純、大塩寛紀、松本 宏

1T04 八王子、日野、ならびに加須で採取した大気浮遊粒子中の放射能濃度(首都大院理工、明星大理工、埼玉県環境科学国際セ、気象研) ○大浦泰嗣、松田和秀、米持真一、五十嵐康人、海老原 充

座長:

1B05 固体における高エネルギーイオンのホットアトム化学的過程に関する研究(XXIX) - ステンレス酸化膜の化学状態が水素同位体滞留挙動に及ぼす影響の解明 - (静岡大理放射研、富山大水素同位体科学研究セ、核融合研) ○田口僚久、押尾純也、鈴木優斗、松岡和志、宮原祐人、松山政夫、林 巧、山西敏彦、朝倉大和、大矢恭久、奥野健二

1B06 固体における高エネルギーイオンのホットアトム化学的過程に関する研究(XXVI) 炭素・酸素含有ボロン膜における水素同位体滞留挙動の不純物濃度依存性(静岡大理放射研、核融合研) ○三浦 遼、押尾純也、濱田明公子、川崎浄貴、藤島徹生、芦川直子、相良明男、大矢恭久、奥野健二

1B07 固体における高エネルギーイオンのホットアトム化学的過程に関する研究(XXVII) - 重水素イオンを単独照射したタンゲステンにおける重水素滞留挙動の解明(静岡大理放射研、核融合研、九大応力研) ○内村大道、小林真、鈴木優斗、川崎浄貴、宮原祐人、芦川直子、相良明男、吉田直亮、大矢恭久、奥野健二

1B08 固体における高エネルギーイオンのホットアトム化学的過程に関する研究(XXVIII) 熱中性子照射したチタン酸リチウムにおけるトリチウムの化学的放出過程の解明(静岡大理放射研、京大原子炉) ○戸田健介、小林 真、濱田明公子、松岡和志、藤島徹夫、藤井俊行、山名 元、大矢恭久、奥野健二

.....15:30.....

.....15:40.....

2011年特別セッション

座長:

1T05 福岡市で大気に検出された福島原発事故の放射能(九大) ○百島則幸、杉原真司、市川竜平、横山裕也

1T06 福島第一原発事故により環境中に放出された放射性核種(愛知医大医、原子力資料情報室) ○小島貞男、有信哲哉、小須田誓、加藤元久、古川路明

1T07 福島第一原発周辺の土壌中のヨウ素 129 の分布(東大工、東大院工、日大文理) ○三宅泰斗、田儀和浩、松崎浩之、藤原 健、齊藤拓巳、山形武靖、本多真紀、土屋陽子、中野忠一郎

1T08 福島県および関東地方東部における福島原発事故の放射能調査(清水建設技術研究所、筑波大数理物質、筑波大生命環境、筑波大理工、筑波大研究基盤総合セ、日大文理) ○木下哲一、末木啓介、北川潤一、五十嵐訓、西村朋紘、黄 穎斯、佐藤志彦、半田晃士、高橋 努、笹 公和、佐藤政教、山形武靖

座長:

1B09 水素化リチウム中の ^{57}Mn インビーム・メスバウアー分光(国際基督教大、理研仁科セ、東理大、阪大、日大、金沢大、放医研) ○長友 傑、小林義男、久保謙哉、山田康洋、三原基嗣、宮崎 淳、佐藤 渉、前 和也、佐藤真二、北川敦志

1B10 Fe, Co を共ドーブした ZrO_2 の磁性とメスバウアースペクトル(東大、東理大) ○岡林 潤、野村貴美、河野 伸、山田康洋

1B11 1,3-ビス(4-ピリジル)プロパンで架橋した集積型鉄錯体の混晶化とスピン状態(III) (広島大院理、広島大自然科学研究支援開発セ) ○土手 遥、中島 寛

1B12 ZnO 中にドーブされた極微量の Al と In の高い親和性(金沢大院自然、金沢大理工、福岡大理、京大原子炉) ○小松田沙也加、佐藤 渉、川田 知、大久保嘉高

.....17:00.....

.....17:10.....

座長：

- 1T09** 放射性セシウムの果実への移行に関する調査・研究：
成長段階における濃度変化（学習院大理、福島県農業総合セ、
東北大電子光セ）○村松康行、大野 剛、佐藤 守、織田和優、
安部 充、阿部和博、大槻 勤
- 1T10** 福島第一原子力発電所から放出された放射性セシウム及
びヨウ素の土壤中深度分布と農作物への移行（学習院大理、
福島県相双農林事務所、福島県農業総合セ）○大野 剛、村
松康行、三浦吉則、織田和優、稲川直也、小川 宏、山崎敦子、
小林智之、二階堂英行、佐藤陸人、加藤義明
- 1T11** 福島第一原子力発電所の事故起源 ^{129}I をトレーサーとし
た土壤中のヨウ素の挙動（日大文理、東大院工、東大院工/
日大文理、京大防災研）○本多真紀、松崎浩之、山形武靖、
土屋陽子、中野忠一郎、松四雄騎、永井尚生
- 1T12** フェロシアン化合物含有吸着剤を用いた汚染海水からのセ
シウムの除去（東工大原子炉研）○鈴木達也、金敷利隆、野
村雅夫

座長：

- 1B13** In ドナーをドーブした ZnO の電気伝導異常（金沢大理
工、金沢大院自然、近畿大院産業技術、近畿大産理工、京大
原子炉）○佐藤 渉、小松田沙也加、古本 功、西田哲明、
大久保嘉高
- 1B14** 五配位および六配位構造が相互変換するニトリドテクネ
チウム (V) およびレニウム (V) 錯体の電子状態と光物性（阪
大院理、北大院理、北大院理、北大院総合化学、大同大教養、
東北大高教セ、阪大院理）○池田隼人、吉村 崇、伊藤亮孝、
作田絵里、喜多村 昇、高山 努、関根 勉、篠原 厚
- 1B15** J-PARC ニュートリノ実験施設・電磁ホーン冷却水中に
おける Be-7 のコロイド生成 (KEK) ○別所光太郎、松村 宏、
高橋朝子、高橋一智、萩原雅之、豊田晃弘、榎本和義、文珠
四郎秀昭、大山雄一、山田善一
- 1B16** Mineral Analysis of Some Commercially Available
Japanese Tea Leaves and Tea Infusions by Neutron-induced
Prompt and Delayed Gamma-ray Analysis（首都大院理工、
原子力機構）○Mohammad Amirul Islam、海老原充、本橋
純

.....18:30.....

.....18:40.....

編集委員会

ジャーナル ニュース
(会議室2) (会議室3)

若手の会

(会議室1)

.....19:40.....

ポスター発表1, 2 (P会場)

- 1P01** 四国徳島で観測された福島第一原子力発電所事故由来の大気エアロゾル中に含まれる放射性核種の放射能濃度と黄砂の関係(徳島大院ヘルスバイオサイエンス、徳島大アイソトープ総合セ、徳島大総合科学、徳島大院ソシオ・アーツ・アンド・サイエンス) ○ 阪間 稔、佐瀬卓也、坂口由貴子、伏見賢一、中山信太郎
- 1P02** 放射性核種の場所による相対放射線強度の変動に関する考察(新潟大院自然、新潟大機器分析セ、新潟大理) ○ 富塚知博、後藤真一、小高広太郎、工藤久昭
- 1P03** 福島第一原子力発電所事故後の金沢大学角間キャンパスにおける環境放射能測定について(金沢大理工、金沢大学際科学実験セ、金沢大院自然) ○ 中井美希、○木村 元、長村雄一郎、中西 孝、上杉正樹、横山明彦
- 1P04** 植物試料のイメージングプレート画像による原子力発電所事故由来の放射性降下物の調査(慈恵医大) ○ 箕輪はるか
- 1P05** 福島第一原発事故起源のヨウ素 129 の水系への影響評価(東大工、東大院工、日大文理) ○ 徳山裕憲、松崎浩之、山形武靖、本多真紀、中野忠一郎、土屋陽子、伊藤誠二、森田 明
- 1P06** 遠隔地土壌中の放射性セシウムの測定(東大院工、日大文理) 松崎浩之、山形武靖、本多真紀
- 1P07** 東京における雨水中の¹³⁷Cs濃度と降水量(日大文理、日大院総合基礎科学) ○ 山形武靖、辻田一樹、平野由佳、原田直弥、長谷川憲、本多真紀、井上慶祐、永井尚生
- 1P08** 大阪、名古屋、茨城における福島第一原子力発電所由来の大気中 RI 濃度の経時変化(阪大院理、名大年代測定総合研究セ、名大全学技術セ、茨城大理) ○ 張 子見、中村宏平、塩原直哉也、安田勇輝、篠原 厚、高橋成人、齊藤 敬、小田寛貴、池田晃子、北 和之、笠原理絵
- 1P09** 大阪泉南地方における大気浮遊塵測定(京大原子炉、京大院工) ○ 沖 雄一、長田直之、山崎敬三、柴田誠一
- 1P10** 仙台(三峯峯)における環境放射能測定(東北大電子光セ) ○ 菊永英寿、大槻勤、石川貴嗣、柏木 茂、柴崎義信、鈴木耕拓、菅原由美、高橋 健、高橋重伸、長澤育郎、南部健一、平賀正之、藤村寿子、松田一衛、武藤俊哉、宮原房史、宮部学、山崎寛仁
- 1P11** 樹園地における放射性ヨウ素および放射性セシウムによる汚染状況(東北大電子光セ、日本環境調査研究所、東北大多元研、学習院大、福島県農業総合セ) ○ 大槻 勤、菊永英寿、泉 雄一、桐島 陽、佐藤修彰、村松康行、大野 剛、佐藤 守、阿部 充、阿部和博
- 1P12** 長野市における福島原発事故由来の放射性核種の濃度と放射性エアロゾルの粒径分布(信州大教育) ○ 村松久和、河住恭兵、近藤貴史
- 1P13** 超重核の $\alpha(\epsilon) - \gamma$ 核分光研究を目的としたSi-CdTe 検出器アレイの開発(用)(山形大院理工、理研仁科セ、東理大) ○ 武山美麗、加治大哉、森本幸司、住田貴之、羽場宏光、門叶冬樹
- 1P14** ⁹⁹Moならびに¹⁸¹W トレーサの調製と陰イオン交換研究での利用(首都大院理工、理研仁科セ) ○ 和田彩佳、大浦泰嗣、羽場宏光、金谷淳平
- 1P15** H₂SO₄水溶液系を用いた¹⁰⁴Rfの同族元素Zr、Hfの陽イオン交換の速度論的研究(筑波大院数理工物質科学、原子力機構先端基礎研究セ、原子力機構先端基礎研究セ/GSI) ○ 五十嵐 訓、末木啓介、塚田和明、永目諭一郎、Matthias Schädel
- 1P16** 理研 AVF サイクロトロンを用いた RI 製造と有償頒布(理研、日本アイソトープ協会) ○ 金谷淳平、神原 正、羽場宏光、高橋和也、山田崇裕、脇谷雄一郎、山元真一
- 1P17** Aliquat 336 を用いた5価および6価のMo、Wの溶媒抽出(阪大院理、原子力機構先端基礎研究セ) ○ 横北卓也、大江一弘、小森有希子、菊谷有希、木野愛子、笠松良崇、吉村 崇、高橋成人、篠原 厚
- 1P18** 変形度の大きいLu-175の核融合反応励起関数(金沢大院自然、阪大院理、原子力機構、金沢大理工) ○ 戸田光祐、貝谷英樹、高橋成人、笠松良崇、大江一弘、横山明彦
- 1P19** ラザホージウム化学種解明のための逆相抽出クロマトグラフ用樹脂調整法の再検討(金沢大院自然、金沢大理工、原子力機構) ○ 武田勇樹、重吉祐生、横山明彦、豊嶋厚史
- 1P20** Lrの第一イオン化電位測定を目的としたガスジェット結合型表面電離イオン源の開発(原子力機構先端基礎研究セ、理研) ○ 佐藤哲也、佐藤 望、浅井雅人、塚田和明、豊嶋厚史、市川進一、永目諭一郎、Matthias Schädel
- 1P21** 理研 GARIS gas-jet システムを利用した気相化学の基礎研究(新潟大院自然、新潟大機器分析セ、理研仁科セ、東北大院理、原子力機構先端基礎研究セ、新潟大理) ○ 小嶋貴幸、村山裕史、村上昌史、後藤真一、羽場宏光、加治大哉、森本幸司、工藤祐生、森田浩介、菊永英寿、佐藤哲也、塚田和明、工藤久昭
- 1P22** Rfのオンラインバッチ抽出実験に向けたTIOA/HCl系でのZr、Hfの樹脂を用いた抽出実験(阪大院理) ○ 木野愛子、小森有希子、菊谷有希、横北卓也、笠松良崇、高橋成人、吉村 崇、篠原 厚
- 1P23** FePSe₃の単結晶および粉末試料におけるメスバウア共鳴吸収強度(信州大教育、信州大院教育) ○ 村松久和、中條 悟、望月省吾、堀之内里美、鈴木寛之、永田佳奈子、仲神克彦
- 1P24** メスバウアー分光法による水熱合成 kimzeyite の解析(長浜バイオ大、阪大院理、岡山大院自然、阪大 RIC) 川瀬雅也、○上條亮一、山川純次、斎藤 直
- 1P25** ポルフィリン鉄錯体の凍結溶液のFe-57メスバウアースペクトル(東邦大理、東邦大医) ○ 高橋 正、池崎 章、中村幹夫
- 1P26** メスバウアー分光法を用いたペロブスカイト型マンガン酸化物La_{0.7}Ca_{0.3}Mn_{1-x}Fe_xO₃(0.2 ≤ x ≤ 1)の超微細場測定(金沢大院自然、金沢大理、金沢大理工) ○ 南 大地、鈴木卓也、小松田沙也加、窪田瞳子、佐藤 涉
- 1P27** ZnOの局所場に対する放射線照射の影響(金沢大院自然、東北大電子光セ、金沢大理工) ○ 剛光 貴、小松田沙也加、廣瀬健太郎、大槻 勤、佐藤 涉
- 1P28** ZnO中Fe不純物位置での超微細場測定(金大院自然、東北大電子光セ、阪大院理、金大理工) ○ 鈴木卓也、大槻 勤、笠松良崇、高橋成人、佐藤 涉
- 1P29** シクロヘキサンと四塩化炭素の混合溶液系におけるミュオン転移反応の分子効果(阪大、原子力機構先端基礎研究セ、高エネ研、

国際基督教大) ○藤原一哉、笠松良高、篠原 厚、二宮和彦、髭本 亘、河村成肇、三浦太一、三宅康博、久保謙哉、長友 傑
1P30 ビッグバン元素合成におけるスタウ触媒核融合(東北大院理、理研) ○木野康志、上村正康、肥山詠美子

- 3P01** JAEA-AMS-TONO による ^{10}Be 測定(原子力機構、(株) ペスコ、東大) ○國分陽子、松原章浩、西澤章光、大脇好夫、西尾智博、石丸恒存、松崎浩之
- 3P02** 即発ガンマ線分析装置への自動試料交換装置の設置(原子力機構量子ビーム応用) ○初川雄一、大澤崇人
- 3P03** Gd 造影剤投与ラット体内の Gd および微量元素定量に関する基礎的検討 –アクチバブルトレーサー法の生命科学への応用–(金沢大医、金沢大院医、京大原子炉) ○鷺山幸信、服部知里、長岡三樹矢、高宮幸一、天野良平
- 3P04** パレオ・ラボ Compact-AMS による高精度炭素 14 測定((株) パレオ・ラボ) ○尾畠大真、伊藤 茂、丹生越子、廣田正史、LOMTATIDZE Zaur、JORJOLIANI Ineza、山形秀樹、小林紘一、藤根 久
- 3P05** 福島第一由来の雨水に含有された放射性核種の除去(北大院工、京大原子炉、住鉱資源開発) ○太田朋子、馬原保典、藤原慶子、福谷 哲、窪田卓見、高宮幸一、水落幸広、吉永尚生
- 3P06** 核分裂生成物による葉の表面汚染–福島第一原子力発電所事故(お茶大) ○古田悦子
- 3P07** 川崎市における大気中の放射性鉛同位体の観測(明大、電力中央研究所) ○小池裕也、栗原雄一、高橋賢臣、佐藤 純
- 3P08** 環境水試料柱におけるラドン深度分布の時間変化に関する研究(金沢大院自然、金沢大理工) ○山田記大、前田英太、上杉正樹、佐藤 渉、横山明彦、中西 孝
- 3P09** モナザイトからの放射性核種の浸出実験(慈恵医大) ○堀内公子、箕輪はるか、吉沢幸夫
- 3P10** 町田市および周辺地域における放射性核種の分析(昭和薬大、明治大農) ○遠藤和豊、中村昂介、土田貴久、松岡圭介、本田智香子、塚田正道
- 3P11** 原発事故以前の土壌中の放射性核種 ^{129}I と ^{137}Cs の分布(筑波大院数理工学、筑波大 AMS、京大防災研、東大工) ○北川潤一、末木啓介、笹 公和、高橋 努、木下哲一、松四雄騎、松崎浩之
- 3P12** 地表面下における石灰岩中の宇宙線生成核種 ^{36}Cl の深度プロファイル: 侵食速度の復元に向けて(筑波大院生命環境、京大防災研、筑波大院数理工学、筑波大 AMS) ○西村朋紘、松四雄騎、末木啓介、笹 公和、高橋 努、木下哲一、天野孝洋、北川潤一、黒住和奈
- 3P13** 茨城県北部土壌中の福島原発由来放射性核種(茨城大院理工・原子力機構、原子力機構) ○金谷佑亮、佐藤哲也、佐藤 望、塚田和明、浅井雅人、豊嶋厚史、大江一弘、永目諭一郎、宮本ユタカ、安田健一郎、二宮和彦、光岡真一、松田 誠、石山博恒
- 3P14** 密封放射能標準ガンマ体積線源を用いた Ge 検出器のサム・コインシデンスの補正の検討(金沢大 LLRL) ○浜島靖典
- 3P15** 南仙台の海水、河川水の放射能測定(東北大院理、東北大院薬、東北大高教セ) ○木野康志、大内浩子、関根 勉
- 3P16** HDEHP/HNO₃ 系における Bk と Md の溶媒抽出挙動(阪大理、阪大院理、東北大電子光セ、原子力機構先端基礎研究セ) 鈞 優香、○笠松良崇、高山玲央奈、菊永英寿、豊嶋厚史、塚田和明、浅井雅人、佐藤哲也、李 子杰、佐藤 望、菊池貴幸、金谷佑亮、永目諭一郎、大江一弘、小森有希子、吉村 崇、高橋成人
- 3P17** 亜鉛欠乏マウス精巢中における微量元素の定量およびタンパク質の変化(静岡大院理、静岡大理放射研) ○田中宏宗、下山弘高、秋葉慎一郎、池田裕亮、矢永誠人
- 3P18** 鳥取県東伯郡湯梨浜町方面東郷鉾山で産出した放射性鉍物の分析(長浜バイオ大、岡山大院自然、阪大 RIC) ○川瀬雅也、山川純次、藤原裕子、溝淵由紀、齋藤 直
- 3P19** 東シナ海表層海水の ^{226}Ra 、 ^{228}Ra および ^{228}Th 濃度の季節変動(金沢大 LLRL、中央水産研究所、西海区水産研究所、日本海洋科学振興財団) ○井上睦夫、吉田圭佑、皆川昌幸、清本容子、小藤久毅、長尾誠也、浜島靖典、山本政儀
- 3P20** Pb-210(ex)、Cs-137、及び Be-7 を用いた九頭竜川における河川懸濁粒子の流出挙動の推定(金沢大 LLRL) ○金森正樹、長尾誠也、落合伸也、山本政儀
- 3P21** 高塩分温鉍泉のラジウム同位体(金沢大 LLRL、幌延地圏環境研究所、富山大理、北海道立総合研究機構) ○高田貴裕、山本政儀、長尾誠也、玉村修司、富田純平、張 勁、秋田藤夫
- 3P22** $^{210}\text{Pbex}$ と ^{137}Cs をトレーサーとした 里山地域における河川懸濁粒子の供給源の評価(金沢大院自然、金沢大 LLRL) ○徳成武勇、鈴木智代、落合伸也、長尾誠也、山本政儀
- 3P23** $\text{Li}_{2+x}\text{TiO}_{3+y}$ からの水の放出挙動(金沢大院自然、富山大水素研、静岡大理放射研) ○水内理映子、原 正憲、松山政夫、大矢恭久、奥野健二

第2日：9月21日（水）

S会場（ホール）

9:00

2011年世界化学年特別セッション

座長：

2T01 小中学校における放射線教育（信州大院教育）○中條 悟

2T02 中高生が考えた広島浄化と被爆地差別－計測器と歩んだ8年間－（奈良学園中学校・高等学校）○工藤博幸

9:40

10:00

2011年世界化学年企画
福島原発事故 特別シンポジウム

座長：

2S01 福島原発事故の経緯と現状（京大原子炉）山名 元

2S02 放射性物質の環境での挙動と飲食物への移行（学習院大）村松康行

2S03 放射線の生体への影響～福島原発事故のリスクを理解するために～（放医研）今岡 達彦

12:30

13:30

2011年世界化学年特別セッション
（依頼講演）

座長：

2T03 福島原子力発電所事故後の学会の対応－連携の重要性（首都大院理工）海老原 充

2T03 科学としての放射線教育を（東北放射線科学センター）工藤 博司

15:00

15:10

総会

16:25

16:35

奨励賞受賞講演

座長：

2S04

17:05

18:00

懇親会（メトロポリタン長野）

20:00

第2日：9月22日（木）

A会場（会議室2）

B会場（会議室1）

9:00

座長：

3A01 福島第一原発事故後に観測された雨水中の放射性物質と
その変化（原子力機構）○安田健一郎、宮本ユタカ、間柄正明、
木村貴海

3A02 茶葉からの放射性セシウムの抽出率の検討（国際基督教
大/東大RIC、東大RIC、東大院工、国際基督教大）○矢野
有紀子、桧垣正吾、廣田昌大、野村貴美、久保謙哉

3A03 土壌における福島原発事故由来の放射性核種の深度分布
（筑波大院生命環境科学、筑波大院数理物質科学）○佐藤志彦、
末木啓介、北川潤一、五十嵐 順、笹 公和

3A04 福島県内の河川水中放射性セシウムの濃度変動（金沢大
LLRL、金沢大院自然）○長尾誠也、金森正樹、落合伸也、井
上睦夫、濱島靖典、山本政儀

座長：

3B01 $^{248}\text{Cm} + ^{18}\text{O}$ 反応による Rf 同位体の励起関数の測定（新
潟大院自然、新潟大機器分析セ、理研仁科セ、東理大院理工、
埼玉大院理工、東北大院理、原子力機構先端基礎研究セ、新
潟大理）○村上昌史、後藤真一、村山裕史、小嶋貴幸、加治
大哉、森本幸司、羽場宏光、住田貴之、酒井隆太郎、工藤祐生、
米田 晃、森田浩介、菊永英寿、笠松良崇、佐藤哲也、工藤
久昭

3B02 アクチノイドターゲット重イオン融合核分裂における核
分裂片角度異方性 II（原子力機構先端基礎研究セ、金沢大理
工）○西中一朗、西尾勝久、谷川勝至、牧井宏之、若林泰生、
光岡真一、横山明彦

3B03 放射化学的手法を用いたカルボキシ金属フラーレンの合
成に関する研究（首都大院理工）○竹内絵里奈、濱野達行、
秋山和彦、久富木志郎

3B04 ルイス酸による金属フラーレン分離の効率化（首都大院
理工）○濱野達行、竹内絵里奈、秋山和彦、久富木志郎

10:20

10:35

ポスター発表2（P会場）

3P01 - 3P23 プロムナードギャラリー

11:35

11:50

α 放射体・環境放射能分科会
（会議室2）

放射化分析分科会
（会議室1）

12:50

12:55

座長：

3A05 水道水中の放射性ヨウ素除去に関する検討（放医研）○
田上恵子、内田滋夫

3A06 植物の光合成で固定される水素に関する研究—大気水蒸
気と土壤水—（九大院理、九大RIセ）○市川竜平、百島則幸、
杉原真司

3A07 日本海におけるU-236の分布（広島大院理、Univ. of
Vienna、広島大院工、金沢大LLRL）○坂口 綾、門倉彰伸、
Peter Steier、静間 清、高橋嘉夫、山本政儀

座長：

3B05 多重即発ガンマ線分析法によるNMIJ CRM 8133a（PP
樹脂）中Cd, Hgの定量性能の評価（産総研、原子力機構）○
三浦 勉、藤 暢輔、古高和禎、木村 敦、小泉光生、大島真澄、
原 かつお、金 政浩、中村詔司、原田秀郎

3B06 ミュオンX線による物体内部非破壊多元素同時分析（国
際基督教大、原子力機構、高エネ研、国立歴史民俗博物館）
○久保謙哉、長友 傑、鈴木栄男、二宮和彦、髭本 亘、坂
元真一、河村成肇、ストラッサー パトリック、下村浩一郎、
三宅康博、齋藤 努

3B07 原子力機構タンデム加速器施設でのLiイオンビームを
用いた有用放射性同位元素Atの製造、利用に関する核・放
射化学研究（原子力機構先端基礎研究セ、金沢大理工、金沢
大医、金沢大院医、金沢大院自然、金沢大理、原子力機構量
子ビーム応用）○西中一朗、横山明彦、鷺山幸信、天野良平、
山田紀大、石黒梨花、牧井宏之、橋本和幸

13:55

14:00

座長：

3A08 南極氷床コア中の塩素 36 測定による 11 ka 付近の宇宙線強度変動の研究（筑波大院生命環境科学、筑波大、京大、産総研、弘前大、東大、国立極地研）○黒住和奈、笹 公和、末木啓介、高橋 努、松四雄騎、木下哲一、戸崎裕貴、堀内一穂、松崎浩之、本山秀明

3A09 太平洋赤道域の海水柱中におけるプルトニウム同位体の時系列変化（弘前大被ばく研、放医研防護セ）○山田正俊、鄭 建

3A10 東京湾における底質中元素の化学状態による貧酸素水塊の評価（東大院総合文化）○起 孝志、小豆川勝見、松尾基之

座長：

3B08 新規 R-BTP 吸着剤を用いた簡素化 MA 分離プロセス確立への挑戦-2（東北大 CYRIC、東北大院工、産総研東北センター）○白田重和、倉岡悦周、李 崢、徐 源来、劉 瑞芹、金 聖潤、和久井喜人、林 拓道、山崎浩道

3B09 リン系抽出剤を用いたランタノイドとアクチノイドの溶媒抽出（原子力機構）○宮下 直、北辻章浩、木村貴海

3B10 2つの salophen 型配位子が配位した新規ウラン V 価錯体の合成と性質（阪大院理）○中塚和人、吉村 崇、篠原厚

..... 15 : 00

..... 15 : 10

若手優秀賞授賞式

..... 15 : 20

日 程 表(案)

9月20日(火)	
(開場 8:30 受付 8:45)	
A	B
ホール	会議室1
9:00 総合受付	
9:30 核化学 1A01 1A02 1A03 1A04	原子核プローブ 1B01 1B02 1B03 1B04
10:50 (特別講演) 1S01	
12:25 核化学 分科会 (会議室2)	12:30 原子核プローブ 分科会 (会議室1)
13:30 ポスター1 1P01-1P12:ホワイエ(1F) 1P13-1P30:プロムナードギャラリー	
14:10 2011世界化学年 特別セッション 1T01 1T02 1T03 1T04	14:10 原子核プローブ 1B05 1B06 1B07 1B08
15:30 2011世界化学年 特別セッション 1T05 1T06 1T07 1T08	15:30 原子核プローブ 1B09 1B10 1B11 1B12
17:00 2011世界化学年 特別セッション 1T09 1T10 1T11 1T12	17:00 核プローブその他 1B13 1B14 1B15 1B16
18:30 編集委員会 ジャーナル (会議室2) ニュース (会議室3)	18:40 若手の会 (会議室1)
19:40	19:40

9月21日(水)	
(開場 8:30 受付 8:45)	
S	
ホール	
9:00 2011世界化学年企画 特別セッション 2T01 2T02	
9:40	
10:00 2011世界化学年企画 福島原発事故 特別シンポジウム 2S01 2S02 2S03	
12:30	
13:30 2011世界化学年企画 特別セッション (依頼講演) 2T03 2T04	
15:00	
15:10	
総 会	
16:25	
16:35 奨励賞講演 2S04	
17:05	
18:00 懇親会	
20:00	

9月22日(木)	
(開場 8:30 受付 8:45)	
A	B
会議室2	会議室1
9:00 環境放射能 3A01 3A02 3A03 3A04	核化学 3B01 3B02 同位体 3B03 3B04
10:20	
10:35	
ポスター2 3P01-3P23:プロムナードギャラリー	
11:35	
11:50 α 放射体・環境 放射能分科会 (会議室2)	
放射化分析 分科会 (会議室1)	
12:50	
12:55 環境放射能 3A05 3A06 3A07	
放射化分析・医学 3B05 3B06 3B07	
13:55	
14:00 宇宙・地球化学 3A08 3A09 3A10	
アクチノイド 3B08 3B09 3B10	
15:00	
15:10	
15:20 若手優秀賞授賞式	

学位論文要録執筆候補者の推薦について

「学位論文要録」欄では、最近2年間の範囲で博士の学位を授与された会員の方々の学位論文内容を抄録の形で掲載致しております。現代の放射化学およびその関連領域における進歩についての情報を読者の方々に提供することが主な目的であります。しかし、編集委員会が広範な領域で活躍されている執筆候補者につきまして、遺漏なく情報を得ることは困難であります。このため、会員の皆様に同欄の執筆候補者(学位取得者)を推薦いただきたく存じます。自薦・他薦は問いません。詳しくは編集委員会にご照会下さい。

☆ ☆ ☆

「会員の声」欄へのご寄稿のお願い

本誌では、学会や学会出版物に関する会員の皆様の意見を掲載するために、「会員の声」欄を設けております。1000字以内(形式自由)におまとめいただき、編集委員会または学会事務局にお送り下さい。掲載の可否につきましては当方にご一任下さい。

☆ ☆ ☆

会員の異動に伴う連絡のお願い

会員の移動に伴い、所属、連絡先等に変更が生じた場合には、会員担当 高宮 幸一(〒590-0494 大阪府泉南郡熊取町朝代西2丁目1010番地 京都大学原子炉実験所原子力基礎工学研究部門同位体製造管理工学研究分野(柴田研究室)内 日本放射化学会事務局、FAX:072-451-2632、E-mail:takamiya@rri.kyoto-u.ac.jp)にご連絡下さい。

放射化学ニュース 第24号

平成23年(2011年)8月31日発行

編集

日本放射化学会編集委員会(放射化学ニュース担当)

委員長:大槻 勤、委員:中島 覚、佐々木隆之、箕輪はるか、濱島靖典、大矢恭久、安田健一郎、阿部琢也

連絡先:〒982-0826 仙台市太白区三神峯1-2-1 東北大学電子光理学研究センター
E-mail: ohtsuki@LNS.tohoku.ac.jp

発行

日本放射化学会

事務局長:沖 雄一

Web: <http://www.radiochem.org/> または、<http://wwwsoc.nii.ac.jp/jnrs/>

事務局 所在地:〒590-0494 大阪府泉南郡熊取町朝代西2丁目1010番地

京都大学原子炉実験所原子力基礎工学研究部門同位体製造管理工学研究分野(柴田研究室)内

E-mail: jnrs.office2008@radiochem.org

印刷

松枝印刷株式会社

〒303-0034 茨城県常総市水海道天満町2438

賛助会員

株式会社アトックス

日立アロカメディカル株式会社

キャンベラジャパン株式会社

クリアパルス株式会社

サンゴバン株式会社

セイコー・イージーアンドジー株式会社

大栄無線電機株式会社

株式会社千代田テクノル

東京ニュークリア・サービス株式会社

東北ニュークリア株式会社

長瀬ランダウア株式会社

株式会社日本環境調査研究所

富士電機システムズ株式会社

富士フィルム RI ファーマ株式会社

株式会社ラボラトリ・イクイップメント・コーポレーション

財団法人 原子力安全技術センター

新潟県放射線監視センター

独立行政法人 日本原子力研究開発機構

財団法人 日本分析センター

財団法人 放射線影響協会

財団法人 放射線利用振興協会

北海道電力株式会社

東北電力株式会社

中部電力株式会社

北陸電力株式会社

中国電力株式会社

九州電力株式会社



財団法人 原子力安全技術センター

放射線障害防止法に基づく登録機関業務

登録検査機関

問い合わせ先: 03-3814-7301

使用施設、貯蔵施設、廃棄施設等の施設検査・定期検査及び定期確認

登録定期確認機関

登録運搬物確認機関

問い合わせ先: 03-3814-7483

承認容器による輸送の運搬物確認

登録運搬方法確認機関

承認された積載方法による輸送の運搬方法確認

登録認証機関

問い合わせ先: 03-3814-7301

放射性同位元素装備機器の設計認証



登録資格講習機関

問い合わせ先: 03-3814-7100

第2種及び第3種の放射線取扱主任者免状取得のための講習

登録試験機関

問い合わせ先: 03-3814-7480

第1種及び第2種の放射線取扱主任者試験

登録定期講習機関

問い合わせ先: 03-3814-5746

放射線取扱主任者の資質向上のための講習

私たちは放射線障害防止法に基づく登録を受け、国に代わり、法令で定められた資格要件を備えた検査員、確認員、講師等によって業務等を行っています。

〒112-8604

東京都文京区白山5丁目1番3-101号 東京富山会館ビル4階

ホームページ <http://www.nustec.or.jp/>

原子力機構の目指すもの

長期的エネルギー安全保障
地球環境問題の解決

国際競争力のある科学技術を
生み出す基盤

高速増殖炉サイクル技術
(国家基幹技術)

核融合研究開発

高レベル放射性廃棄物処分技術

量子ビームテクノロジー

原子力の安全と平和利用を
確保するための活動

安全研究

デコミッショニング
廃棄物処分

自らの施設の廃止措置

核不拡散技術開発

廃棄物の処理処分

共通的科学技術基盤

先端基礎研究

外部との連携
情報の提供

産学官との連携

国際協力

原子力基礎工学研究

人材育成

原子力情報



独立行政法人 日本原子力研究開発機構

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49 TEL029-282-1122(代表)

環境放射能、安定同位体比等、ドーピング禁止物質等、分析の専門機関

(1) 環境放射能に関する分析

ガンマ線放出核種(ガンマ線スペクトロメトリーによる)、トリチウム、炭素 14、クリプトン 85、ストロンチウム 90、セシウム 137、トリウム、ウラン、プルトニウム など、あらゆる放射能を分析します。

(2) 安定同位体比等の分析

食品の炭素、窒素等の安定同位体比分析、中性子放射化分析等による微量元素分析、シックハウスの原因物質に関する分析、温泉分析、輸入食品に対する放射線照射の検知などを行います。

(3) ドーピング禁止物質・規制薬物の分析

東京都荒川区にアンチ・ドーピング研究所を設置し、ドーピング禁止物質・規制薬物の分析や、サプリメント等の規制薬物の分析などを行います。



ISO9001 認証取得(2000年)
ISO/IEC17025 認定取得(2002年)
ISO/IEC27001 認証取得(2009年)
ISO14001 認証取得(2010年)
JCSS(放射線、放射能、中性子)登録
(2010年)

【問合せ先】

〒263-0002
千葉県千葉市稲毛区山王町 295 番地 3
財団法人 日本分析センター 企画・総務部
電話 043-424-8661 FAX 043-423-5326
e-mail webman@jacac.or.jp <http://www.jcac.or.jp>

財団法人
 日本分析センター

放射線影響に係る 社会的要請にこたえて

～主な業務～

- 放射線影響に関する知識の普及啓発
- 放射線業務従事者の放射線被ばく線量等の登録・管理
- 放射線影響に関する調査研究
- 放射線業務従事者に係る疫学調査
- 放射線影響等の研究に対する助成・顕彰
- ICRP の基本勧告等に関する調査研究



(財)放射線影響協会 <http://www.rea.or.jp/>

〒101-0044 東京都千代田区鍛冶町1-9-1 6丸石第二ビル5階

TEL (03)5295-1481 FAX (03)5295-1486

- | | | |
|-------------------|-------------------|-------------------|
| ◆ 放射線従事者中央登録センター | ◆ 放射線疫学調査センター | ◆ 国際情報調査室 |
| TEL (03)5295-1788 | TEL (03)5295-1494 | TEL (03)5295-1484 |
| FAX (03)5295-1486 | FAX (03)5295-1485 | FAX (03)5295-1485 |

放射線利用事業の振興と原子力技術交流推進のために

◆ 放射線・原子力利用の普及事業

- ・技術誌「放射線と産業」、専門書等の刊行
- ・「放射線プロセスシンポジウム」の開催

◆ 照射サービス事業

- ・ガンマ線・電子線照射: 材料の特性試験、材料改質、照射食品の検知試験
- ・中性子照射: シリコンの半導体化

◆ 放射線利用技術の地域移転の推進

- ・中性子ビーム利用技術支援

◆ 原子力研修事業

- ・原子力・放射線に関する研修会の企画・開催支援
- ・教員免許状更新講座

財団法人 放射線利用振興協会

<http://www.rada.or.jp>

本部・東海事業所：〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4 TEL 029(282)9533
高崎事業所：〒370-1207 群馬県高崎市綿貫町1233 TEL 027(346)1639

株式会社 アトックス

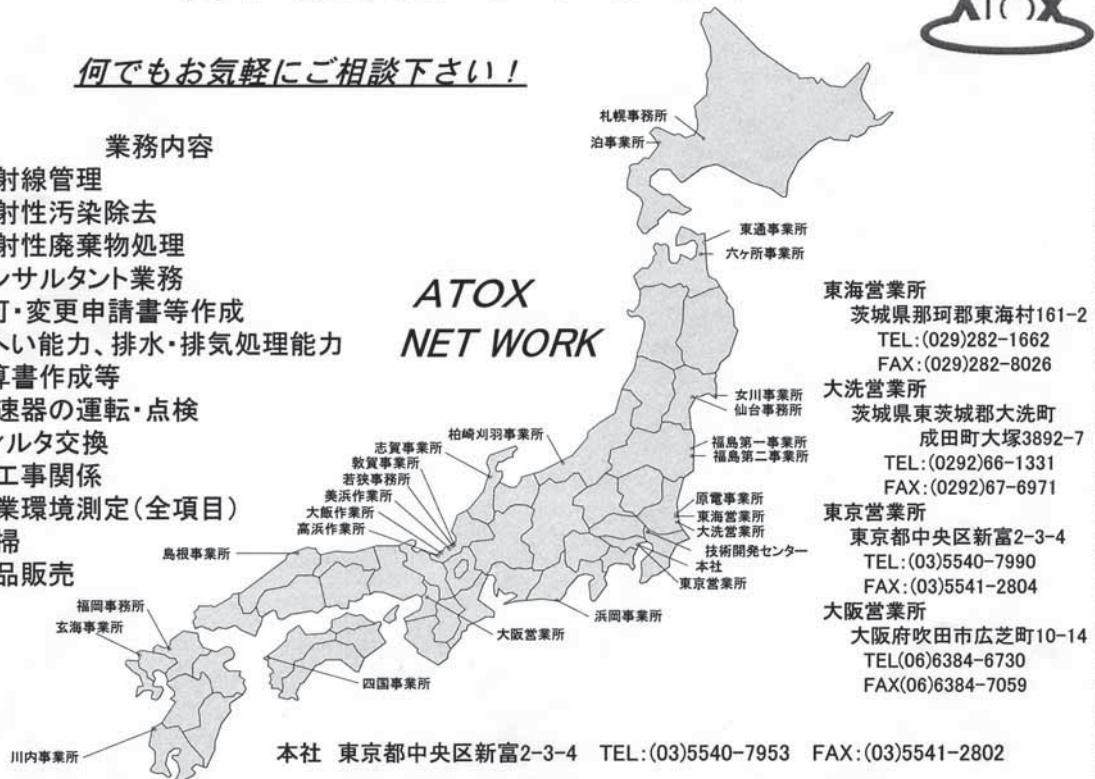


何でもお気軽にご相談下さい!!

業務内容

- ①放射線管理
- ②放射性汚染除去
- ③放射性廃棄物処理
- ④コンサルタント業務
許可・変更申請書等作成
遮へい能力、排水・排気処理能力
計算書作成等
- ④加速器の運転・点検
- ⑤フィルタ交換
- ⑥諸工事関係
- ⑦作業環境測定(全項目)
- ⑧清掃
- ⑨物品販売

ATOX
NET WORK



東海営業所
茨城県那珂郡東海村161-2
TEL:(029)282-1662
FAX:(029)282-8026

大洗営業所
茨城県東茨城郡大洗町
成田町大塚3892-7
TEL:(0292)66-1331
FAX:(0292)67-6971

東京営業所
東京都中央区新富2-3-4
TEL:(03)5540-7990
FAX:(03)5541-2804

大阪営業所
大阪府吹田市広芝町10-14
TEL(06)6384-6730
FAX(06)6384-7059

本社 東京都中央区新富2-3-4 TEL:(03)5540-7953 FAX:(03)5541-2802



HITACHI
Inspire the Next

AccuFLEX Lsc
7400
LIQUID SCINTILLATION SYSTEM

液体シンチレーションシステム LSC-7400

Accuracy & Flexibility

AccuFLEXシリーズに
新型液体シンチレーション
システムをラインアップ
その卓越した性能と使いやすさは、
ハイパフォーマンスマシンそのものです
信頼のAccuFLEXブランドは
進化を続けます

ALOKA
illuminate the change

日立アロカメディカル株式会社 www.hitachi-aloka.co.jp

〒181-8622 東京都三鷹市牟礼6-22-1 計測システム営業部 (0422)45-5131

放射線計測の基礎から応用まで
広範で卓越した製品を提供しています。



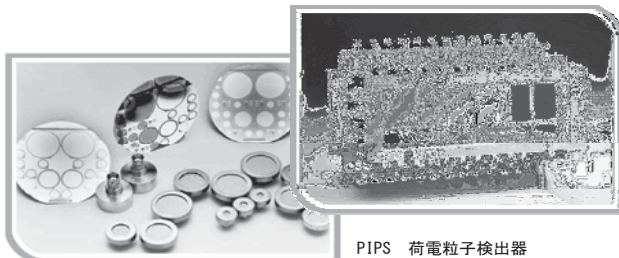
ゲルマニウム半導体検出器



電気冷却型 クライオパルス 5



液体窒素循環型 (Ge検出器用)
クライオサイクル



PIPS 荷電粒子検出器



LYNX デジタルシグナルアナライザ
LISTモード搭載

キャンベラジャパン株式会社 本社 〒111-0053 東京都台東区浅草橋4-19-8 浅草橋ビル
東京本社 TEL:03-5835-5402 FAX:03-5835-5403
大阪営業所 TEL:06-4806-5662 FAX:06-4806-5663
テクニカルセンター TEL:03-5835-5404 FAX:03-5835-5405
E-Mail: jp-sales@canberra.com
E-Mail: jp-support@canberra.com

CANBERRA

クリアパルス（株）が提供する主要製品

自社開発のハイブリッドICを用いた低雑音プリアンプ
 低雑音スペクトロスコープアンプファイア
 高性能パルスハイトアナライザ

多チャンネルプリアンプ、多チャンネルアンプファイア、多入力PHA

CdTe検出器プローブ、CsI(Tl)検出器プローブ、NaI(Tl)検出器プローブ、プラスチック検出器プローブ

電離箱、環境モニタ、高圧バイアス電源、NIMビン電源、ミニビン電源

電流電圧変換器、マルチワイヤビーム位置モニタ回路

加速器制御機器、信号変換器、アナログ/デジタル制御器

データ計測・収集・転送システム

その他物理計測器、特注機器



8630型ハンドポーン



8868A型IVC



580型プリアンプ



4066型アンプ



1216型PHA



6671型バイアス電源



E6660ミニビン電源



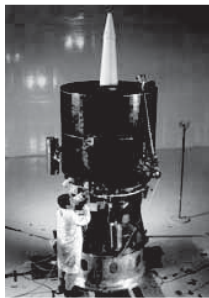
80110型プリアンプ



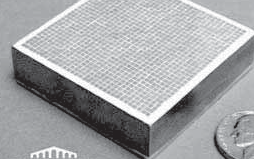
80112型MPX



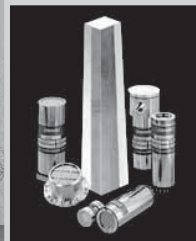
LYSO、LaCl₃、LaBr₃、NaI、CsI、BGO、CdWO₄、ZnS、YAG ...
 プラスチック、ファイバー、液体シンチレータ、アレイ状シンチレータ、
 ライトガイド、GM管、比例計数管、³He検出器等
 サンゴバンは、素材からプローブ・特殊用途まで、
 グローバル・スタンダードな最高品質のシンチレータを提供いたします。



イメージング用アレイ



SAINT-GOBAIN CRYSTALS



プラスチックシンチレータ



シンチレーションファイバー



サンゴバン株式会社

〒102-0083 東京都千代田区麹町 3-7

Tel 03-3263-0559 Fax 03-5212-2196

URL <http://www.detectors.saint-gobain.com/>

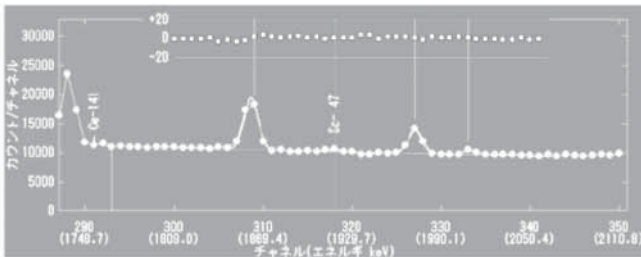
お問合せ yasuo.watanabe@saint-gobain.com

(担当 渡辺)

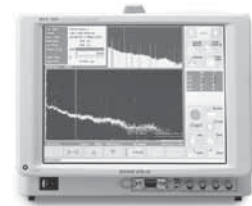
比較法による放射化分析プログラム

比較法による放射化分析とは、分析対象元素の量（濃度等）が既知の「標準試料」のピーク分析結果と、未知の「サンプル」のピーク分析結果を比較することで、未知の「サンプル」中の分析対象元素の量を計算するものです。

- ◇ 当社標準プログラム「γスタジオ」に比較法による放射化分析の機能をプラス
- ◇ 武蔵工業大学エネルギー基礎工学科・原子力研究所鈴木博士のご協力を得て、最も汎用性の高い仕様を実現
- ◇ 「核種データの編集」→「標準試料データの編集」→「標準試料スペクトルの解析」→「未知試料の解析」と従来の手続き同様に作業可能
- ◇ 複雑なスペクトル解析に威力を発揮…γスタジオの基本機能であるインタラクティブピーク分析結果を「標準試料スペクトルの解析」「未知試料の解析」にフィードバック可能
- ◇ 添付核種データ（核反応テーブル）は鈴木博士作成による「GAMA98」から引用
- ◇ Windows Xp pro(SP2以上) / 2000 (SP4以上) / Vista business環境で動作



DSP 技術採用▶
最新型 MCA
7600



◀ピーク分析画面例



セイコー・イージーアンドジー株式会社

東京都中央区八丁堀2-26-9 グランデビル6F 〒104-0032 電話番号: 03-5542-3104

http://www.sii.co.jp/segg/ e-mail: info.segg@sii.co.jp

大阪 (TEL) 06-6871-8494 水戸 (TEL) 029-227-4474 札幌 (TEL) 011-552-2558

WISSOFT | メスバウア用測定装置システム

低価格でPCとMCS/PHAモジュールでメスバウア簡単測定

CMCA-500/550

IBM PC/AT用メスバウア測定MCAモジュール

【特徴】

- MCSモード
- 外付ADCモジュールなしでPHA測定可能 (CMCA-550のみ)
- MCS [window] モードで外付SCAモジュールなしで、設定されたエネルギー範囲のパルスのみをメスバウアデータとして取得可能 (CMCA-550のみ)
- Windows用プログラムWISSOFT2003 (標準添付) で、パソコン制御
- バックグラウンドでデータ取得可能
- 外部電源なしでデータを保持
- インターフェース USB/RS-232C

【仕様】

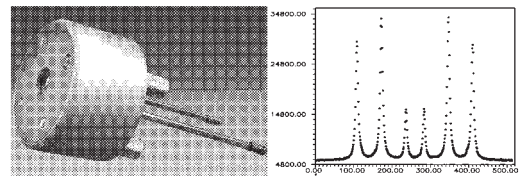
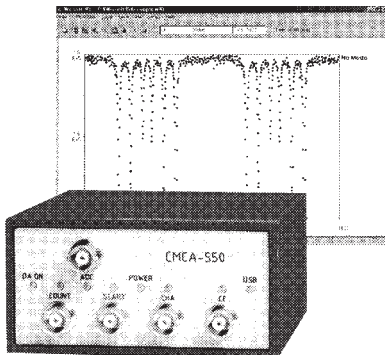
入力: COUNT, START, CHA, COUNT ENABLE, ADC (CMCA-550のみ)

MCS部:

- ・最大カウント周波数 > 100MHz
- ・チャンネル数 最大8192ch
- ・最大チャンネルアドバンス周波数 約500kHz

ADC部 (CMCA-550のみ):

- ・変換ゲイン 8kch
- ・完全デジタルピーク検出
- ・サンプリング周波数 48MHz



RiKon-5 CEMS Detector

【特徴】

- 測定温度範囲 100K~室温
- 入射γ線方向 0°~60°可能
- サンプルの交換が簡単
- 薄いフィルムや表面層の試験に相当
- 箔、粉末、結晶などのサンプルの測定が可能
- 優れたSN比、高いカウントレート
- 優れたエネルギー分解能
- 低温でもガスフローを保証
- ガスフローを維持すれば、長期の測定に相当
- X線測定も可能

NORMOSパッケージ:

メスバウアFittingプログラムSITE、DIST (SITE、DIST個々のご注文も承ります)

日本総代理店

DMD 大栄無線電機株式会社

〒101-0021 東京都千代田区外神田3-10-10

☎03-3255-0931(代) FAX03-3255-9869

E-mail sales@daiei-dmd.co.jp

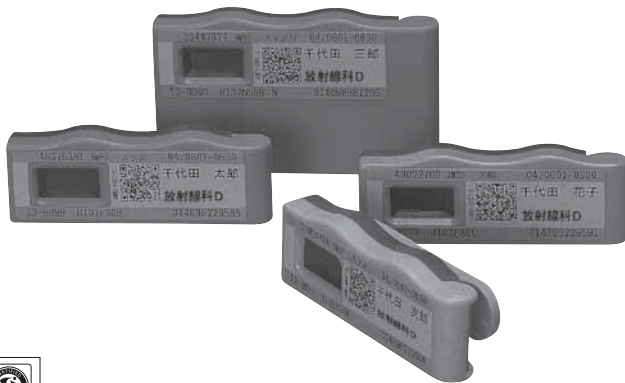


次世代の個人・環境用線量計

ガラスバッジ

ガラスバッジ。それは革新への転換。

ガラスバッジはフィルムバッジを上回る性能と機能を有し、「より正確」で「より早く」そして「より使い易い」モニタリングサービスを実現しました。



TECHNOL
CHIYODA TECHNOL CORPORATION

株式会社 **千代田テクノル** 営業部
〒113-8681 東京都文京区湯島1-7-12 千代田御茶の水ビル
TEL03(3816)1163
www.c-technol.co.jp

TNSは エネルギーエンジニアリングの あらゆるステージで あなたをサポートします。

TNSは原子力・アインストープに関する高度な知識と技術を駆使し、設計から施設の廃止にいたるまでのあらゆる段階でサポート業務を展開するとともに、先端技術分野における研究・開発においても、質の高いサポートを提供いたします。



安全設計・評価

- 施設設計
- 遮蔽設計
- 安全評価
- RI施設の申請業務代行

施設の管理・運営

- 大規模施設の運用管理
- 放射線管理

研究及び技術開発サポート

- 研究サポート
- 技術開発サポート

受託試験研究

- 環境物質の分析
- 環境物質の挙動解析
- トレーサ試験
- 解体廃棄物の物理特性試験

工 事

- 施設の保守・点検
- 施設の解体工事
- 施設の改造工事

機器販売

- 放射線管理区域の空調機器の販売
- 放射線管理区域用機器の製造・販売

TNS 東京 **テクノロジ** 株式会社

東京本社：東京都台東区台東 1-3-5 (反町ビル 7F) 〒110-0016 TEL.03 (3831) 7957
 東海営業所：茨城県那珂郡東海村村松字平原 3129-31 〒319-1112 TEL.029 (282) 3114
 つくばセンター：茨城県つくば市緑ヶ原 4-19-2 〒300-2646 TEL.029 (847) 5521
 大阪事業所：大阪府中央区内本町 1-2-5 (YSK ビル 5F) 〒540-0026 TEL.06 (4792) 3111
 六ヶ所事業所：青森県上北郡六ヶ所村大字尾駈宇野附 1-4 〒039-3212 TEL.0175 (71) 0710



個人被ばく線量測定 クイクセルバッジサービス

- ◆ラベルの表記がリニューアルされ、見やすくなりました。
- ◆バッジの形状の変更により、着用感がさらにUP。
- ◆測定原理は、ルクセルバッジと同じOSL線量計を用いています。
- ◆バッジ製造の国内化を実現し、安定供給を可能にしました。



本社 / 〒300-2686 茨城県つくば市諏訪C22街区1 Tel. 029-839-3322 Fax. 029-836-8441
 大阪営業所 / 〒550-8668 大阪市西区新町1-1-17 Tel. 06-6535-2675 Fax. 06-6541-0931
 ホームページアドレス / <http://www.nagase-landauer.co.jp>

ラジオアイソトープ(RI)取扱施設

RADIOISOTOPE(RI) HANDLING FACILITY

加速器取扱施設

ACCELERATOR HANDLING FACILITY

原子力施設

NUCLEAR POWER FACILITY

放射線モニタリング
 施設の総合管理
 施設・設備の設計・監理
 放射能分析・測定
 管理区域解除工事
 コンサルタント業務
 PET被験者管理システム

放射線管理
 除染工事
 放射能分析測定
 原子力・核燃施設 D&D技術開発・事前調査・工事
 コンサルタント業務

特殊施設管理技術の研究開発
 放射線防護用品と機器の開発
 除染関連技術の研究開発
 研究・開発・調査業務の受託

技術開発・研究

TECHNOLOGY STUDY AND DEVELOPMENT



As Low As Reasonably Achievable

JAPAN ENVIRONMENT RESEARCH CO., LTD.

株式会社 日本環境調査研究所

ホームページ <http://www.jer.co.jp/>

本社 / 〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-8-13(栗原ビル3F) Tel.03-3367-3281 Fax.03-3367-5934
 技術開発研究所 / 〒342-0008 埼玉県吉川市旭 8 番 3 Tel.048-991-9461 Fax.048-991-9460
 青森営業所 / Tel.0175-75-2130 東京営業所 / Tel.048-991-9461
 仙台営業所 / Tel.022-715-6081 静岡営業所 / Tel.0537-86-7176
 柏崎営業所 / Tel.0257-21-4868 掛川オフィス / Tel.0537-28-8181
 福島営業所 / Tel.0240-32-6017 名古屋営業所 / Tel.052-588-5875
 茨城営業所 / Tel.029-860-5073 大阪営業所 / Tel.06-6251-2099

作業環境測定機関11-4(放射性物質) ISO9001:2000認証
 非密封放射性同位元素取扱施設(技術開発研究所)
 管工事業/建具工事業/とび・土工事業/機械器具設置工事業
 一般労働者派遣事業 高度管理医療機器等販売業・賃貸業

8keV~1.5MeVのワイドエネルギーレンジ

X・γ線測定用シンチレーションサーベイメータ



今まで測定が困難とされてきた、病院の放射線科などで使用する診療用X線から1.5MeVのγ線の測定を目的としたサーベイメータです

特長

- ・低エネルギー(8keV~)X線の測定(エネルギー特性; 10keV~±25%以内)
- ・見やすい4桁デジタル表示+5デガード対数バーグラフ併用表示
- ・線量率測定に加え、積算機能により積算線量測定ができる

富士電機システムズ株式会社

<http://www.fesys.co.jp>

〒191-8502 東京都日野市富士町1番地
TEL.042-585-6024 FAX.042-583-6194

FUJIFILM

診断そして、治療へ。

やがて、笑顔につながる核医学。

生命の世紀とも言われる、21世紀。ライフサイエンスの医学への発展、

QOLを重視した医療に対する期待は、ますます大きくなっています。

早期診断。身体に負担の少ない治療。

核医学診療はより大きな役割を担っていくと、私たちは確信しています。

富士フイルム RI ファーマは、核医学診療には欠かせない、

放射性医薬品のエキスパートとして、医療の発展に寄与してまいりました。

今後も、この分野をより積極的に推し進めるとともに、

グループの総力を結集し、医療と健康に貢献してまいります。



富士フイルム RI ファーマ株式会社

〒104-0031 東京都中央区京橋2-14-1 兼松ビル TEL03(5250)2620
ホームページ: <http://fri.fujifilm.co.jp>



ADC500

変換方式
コンバージョンゲイン

逐次比較型 15 μ sec 固定
512,1024,2048,4096

MCA510

MCA メモリ
カウント容量
インターフェイス

4kch
32bit / ch
10/100 Mbps Ethernet

MCA520

MCA / MCS メモリサイズ
カウント容量
Dwell time
インターフェイス

4kch
32bit / ch
10sec ~ 90sec
10/100 Mbps Ethernet

2100C / MCA



ADC 8kch
ウィルキンソン方式 150MHz
MCA / MCS メモリサイズ 8kch
Windows98 ~ XP 対応ソフトウェア

NT24-DUAL

- マルチパラメータ MCA -
(陽電子消滅測定等に)



ADC 15 μ sec 固定
GAIN 4096ch
MCA 4096ch (最大 8 台)
2パラメータ表示 1024 \times 1024
時間情報を付加してのリストモード測定
WindowsXP 対応



(株)ラボラトリ・イクイップメント・コーポレーション

TEL 029-821-6051

FAX 029-821-6054

E-mail nonaka@labo-eq.co.jp

〒300-0034 茨城県土浦市港町 1-7-3

賛助会員はこのスペースに無料で広告を掲載することができます (年2回以上)

日本放射化学会 賛助会員募集

本会の学会活動にご参加頂ける賛助会員をご紹介します

連絡先: 日本放射化学会事務局

E-mail: office@radiochem.org