

この度、2024年日本放射化学会学会賞・木村賞を授与される榮譽に浴し、恐縮すると同時に望外の喜びです。放射化学は放射線・放射能を扱うことを共通軸として、多岐にわたる研究分野の基礎的な領域をカバーする複合的な基礎科学分野と考えています。特に最近では、原子力社会が抱える人類的課題や医療分野においては、直接放射性物質を扱える研究人材のニーズも高まっており、我が国には、研究に加え教育人材育成への注力が期待されています。このような中で、私の40年余りの大学教員生活を振り返って、どこまで貢献できたか不安でしたが、今回、受賞という形で評価されたことで、少しホッとしています。ただ、これらすべては、多くの学生、スタッフ、そして学会運営については理事・監事の先生方のご尽力に加え学会員のみなさんのご理解によって進めることが出来たものです。紙面をお借りして感謝申し上げます。

私は、1974年に大阪大学理学部化学科に入学し、4年次に音在清輝先生の門をたたきこの世界に入りました。1982年(D2時)の時に馬場宏先生が音在先生の後任として来られ、先生から学位を頂きました。1987年から名古屋大学で教員としての活動が始まりますが、その時の直接の上司は古川路明先生で、このお三方が私にとっての恩師です。名古屋大学で11年間、1998年から1年半を京都大学原子炉実験所で過ごし、1999年に教授として大阪大学の古巣に戻り、音在先生、馬場先生に続く3代目として放射化学研究室を引き継ぐことになりました。そこで22年間にわたり放射化学の教育研究を進めつつ、種々の組織の運営等にもかかわり、2021年に定年退職を迎えました。

研究テーマは一部変遷しますが、私の退職時には、ミュオン化学、核壊変、超重元素化学、核医学、環境放射能のテーマを進めていました。ミュオン化学は表題にあるエキゾチック原子の研究の流れで、音在先生が進められたNEET(電子遷移による核励起)と私的にはつながっています。NEETは核と電子系が絡む現象で、同様の現象を期待しパイ中間子原子の原子カスケードの研究をはじめ、それに続くパイ中間子核捕獲による核分裂現象が私の学位論文です。その後、パイ中間子捕獲過程における化学影響が中心となり、特にパイ中間子水素原子の挙動で面白い研究が出来たと思っています。現在は、ミュオン原子に着目し新しい元素分析法として展開されています。超重元素は核化学の大テーマと考え、私が阪大で研究室をスタートするにあたり、柱のテーマとして、JAEAや理研と連携しつつ進めました。理念はしっかりした化学を行い周期表の重元素領域の化学を放射化学のものとする事です。まだまだこれからですが、日本は世界的にもいい位置にあると思っています。これらはいずれもこれからの若い人に期待したく、人材育成も含めたメッセージになればと思っています。

会長時代に進めた施策については、皆さんご存じの通りです。学会の法人化、部会制度の設置、学会ロードマップの作製などが主なものです。特に法人化は当時の理事会メンバーが苦勞して実現したもので、私は丸投げをしたのみです。これらへの思いは「放射化学」Vol.46に記載させて頂いています。現在まだ教育部会長としての責任はありますが、これらが学会の発展と若手の活性化に繋がることを祈念しております。

宇宙地球化学・環境化学において、元素の化学種解析によりその挙動の素過程を知ることは(=分子地球化学)、宇宙・地球・生命の進化をより正しく理解したり、将来の環境・資源・気候などを予測することに貢献する。一方、放射性核種に関わる化学を扱う放射化学には様々な側面があるが、分子地球化学的視点から考えると、放射性核種を扱うことの意義は2つある。1つは、放射化学的手法で従来の周期表の枠を超えた知見を得ることで、全元素の挙動をより系統的に扱えられることである。もう1つは、これら元素の天然存在度は必然的に低いので、これらを含めた分子地球化学を展開するにはより高感度な化学種分析が重要になる点である。特にこの分野では、社会的要請によりこうした高感度な手法を発展させる意義があるため、しばしば放射化学分野で発展したツールが分子地球化学にブレイクスルーをもたらし、元素挙動の系統性の理解に貢献してきた。私自身はこのような両分野の境界で研究をしてきたので、その経過をご紹介することで、若手研究者の参考になるような講演ができればと思う。

院生時代に取り組む機会を頂いたマルチトレーサー法(MT法; 理研・安部文敏先生らとの共同研究)とレーザー誘起蛍光法(LIF法; 原研・木村貴海先生との共同研究)にそのことがみてとれる。MT法はキャリアフリーの多種のRIトレーサー法であり、溶解度の制限が小さい条件で白金族元素やREEを含む多元素の吸着(=水圏での元素濃度を支配する化学素過程)を調べ、これらの研究から元素の挙動を熱力学的に系統的に扱うことを学んだ。LIF法は、 Eu^{3+} や Cm^{3+} の第一配位圏(内圏)に存在する水の数が決定できる。この方法は、より広く利用されているX線吸収微細構造(XAFS; XANESとEXAFSからなる)法に比べると利用可能な元素が少ないが、f-f遷移に由来する蛍光を発する元素には多彩な情報を与え、分子地球化学的に有用な手法である。このLIF法を初めて固液界面に存在するイオンに適用したが(Takahashi et al., 1998)、これら研究を通じXAFS法導入の必須性を強く認識し、1999年以降XAFS法の環境試料・環境模擬試料・惑星試料への適用を進めた(関連論文350報以上、総被引用数12,100件以上)。ここでもXAFS法の高感度化(蛍光分光XAF法)、顕微分析(Scanning Transmission X-ray Microscopy: STXMの日本初導入)、幅広いエネルギー領域の利用、新しいXAFS法(高エネルギー分解能蛍光検出(HERFD)-XANES法)の応用、などを進めてきた。

これらの応用として、放射性廃棄物に含まれる諸元素の化学種解析(REE、アクチノイド、Se、Sr、Mo、Te、I、Cs)、福島第一原発事故で重要な元素の素過程解明、より確かな年代測定に必須な子孫核種の存在状態解明、有害元素の除去法開発、などの放射化学と分子地球化学の境界領域の研究を行った。これらを通じて、(i) Fe酸化物へのオキソ酸陰イオン吸着、(ii) Mn酸化物への陽イオン吸着、(iii) 2:1型層状ケイ酸塩への陽イオン吸着、などの系統的理解を進め、そこにRaなどの放射性元素を加えることで系統性を堅固にした(Yamaguchi et al., 2024)。またHERFD-XANESの応用で、Uなどのより詳細な化学種解析が可能であることを示した。これらは、放射性核種を含む全元素の宇宙・地球・環境中での元素サイクルのよりよい理解に貢献すると期待される。

Chemical processes in the environmental behavior of radionuclides studied by molecular geochemistry approach; TAKAHASHI Y.

【緒言】 近年の世界的な原子力危機により、迅速かつ正確なバイオアッセイがますます重要視されている。α線を放出するアクチニド(例: ^{238}Pu 、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu)およびβ線を放出する ^{90}Sr による吸入・摂取は、少量であっても内部被ばくは著しく高くなる。そのため、内部被ばくが疑われる場合、キレート剤(DTPAなど)を用いた排出促進も含めた放射線/原子力事故後の緊急の治療を確実にを行うため、摂取量について迅速なデータ提供が求められる。例えば肺モニターを用いた ^{241}Am と ^{239}Pu の検出下限値は、30分間の測定でそれぞれ約10Bq、数千Bqであり、代謝に基づく微量な排出速度を追跡できない[1]。放射計測法を使ってより微量まで測定する従来型のバイオアッセイ法は、検出限界は低い(約1mBq/L)ものの、結果が得られるまでに数日必要であり、タイムリーな情報を提供は困難である[2]。そのため少量の試料による高感度かつ迅速な放射性核種定量技術の確立が求められるところである。

【結果と展望】 量研機構は日本唯一の「基幹高度被ばく医療支援センター」を指定されているため、我々バイオアッセイチームは5~10人の患者に対することを目標とし、新しいバイオアッセイ技術の開発、改良及び標準化に重要な役割を果たしている。放射線/原子力事故後の緊急対応に必要な放射性核種(アクチニド、 ^{90}Sr など)の測定のために、質量分析法・放射線計測法を用いた迅速なバイオアッセイ法を開発した[2-5]。開発したバイオアッセイ法の良好な適用実績により、バイオアッセイチームは2022年からのPROCORAD(Association for the PROMotion of Quality Control in RADiotoxicological Analysis)国際比較において毎年TOP LABOに認定されている。

また、原子力災害への備え及び若手専門家を中心とした人材育成のため、開発したα線スペクトロメトリー法を用いたアクチニドの測定方法をマニュアル化、日本全国の原子力災害対策に関わる医療・研究スタッフを対象とした3日間のバイオアッセイ研修を実施である。今後は、より多くの放射性核種(アクチニド、 ^{90}Sr 、 ^3H 、 ^{210}Po など)において、新しいバイオアッセイ(尿、便、血液)技術の開発、改良、標準化開発及び研修の一環として広げていく予定である。

参考文献

- [1] Tamakuma et al. Development of a new integrated in-vivo counting system at the QST. *Radiat. Protect. Dosimetry* 199, 1848–1852 (2023).
- [2] Yang et al. Rapid analysis of ^{237}Np and Pu isotopes in small volume urine by SF-ICP-MS and ICP-MS/MS. *Anal. Chim. Acta* 1158 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338431>
- [3] Yang et al. Rapid measurement of actinides in urine by mass and alpha spectrometric methods. *Radiat. Prot. Dosim.* 199, 1994–1999 (2023).
- [4] Yang et al. Urinary bioassay for the measurement of actinides by alpha spectrometry for rapid response after radiation emergency, *J. Nucl. Radiochem. Sci.* 24, 13–21 (2024).
- [5] Yang et al. ^{90}Sr bioassay in small-volume urine by ICP-MS/MS with CO_2 as the reaction gas. *J. Anal. At. Spectrom.* 38, 2562–2570 (2023).

Development of rapid and highly sensitive bioassay methods for emergency response to Pu and other radiation exposures
Yang, G.