

巻頭言

第50回放射化学討論会・記念大会について

近藤健次郎（日本放射化学会会長）

既にご案内のように、第50回放射化学討論会・記念大会（2006日本放射化学会年会）が本年10月24日～27日に水戸市及び東海村において開催されます（実行委員長：日本原子力研究開発機構吉田善行）。昭和32年に斎藤信房先生を世話人として第1回放射化学討論会（於東京）が開催されて以来、放射化学討論会は研究者の集まりである放射化学研究連絡委員会の下で、毎年定期的に開催され、今年が記念すべき50周年に当たります。この半世紀に亘る放射化学討論会の歴史は我が国における放射化学とその関連分野の研究の発展と正に同期しており、放射化学討論会が果たしてきた役割の重要性は、皆様ご承知の通りです。

この放射化学討論会の長い歴史を礎に、放射化学とその関連分野の研究の一層の発展を期し、平成11年に日本放射化学会が設立されました。現在500名を超える会員及び賛助会員を擁し、放射化学討論会の開催をはじめとして、学会誌・論文誌の出版等、シンポジウムの開催、学会賞の授賞など、放射化学とその関連分野の研究の活性化のために様々な取り組みを進めております。

この度、歴史ある放射化学討論会が記念すべき50周年を迎えるにあたり、学会内に中原弘道初代会長を委員長とする第50回放射化学討論会・記念大会の組織委員会を発足させ、記念大会実行委員会と緊密な連携を図りながら、放射化学討論会50周年の記念事業等について検討してきました。記念事業では、これまでの先達による放射化学研究分野の数多くの輝かしい成果を振り返り、その足跡を纏めると共に、これを温故知新とし、これからの放射化学とその関連分野の研究を展望・考察したいと考えております。既にご案内のように以下のような事業が行われる予定です。

「記念事業」

1. 記念講演・式典（平成18年10月24、25日）

先達によるこれまでの50年間に亘る業績、貢献を顕彰すると共に、放射化学とその関連分野の研究の現状、これから取り組むべき研究課題や展望について、海外からの招待者も交えて討論します。

2. 「日本の放射化学研究50年のあゆみ」の刊行

放射化学討論会で発表された研究内容を中心に、我が国における放射化学とその関連分野の研究の歴史を冊子にまとめ、放射化学研究の学術発展への貢献や人材育成、社会からの要請への対応などについて紹介します。

3. 「放射化学用語辞典」の刊行

放射化学とその関連分野の分野で使用されている学術用語をわかりやすく解説した用語集を刊行します。

4. 「放射化学討論会要旨集全巻」のpdf化とDVDの作成

第1回から第50回の放射化学討論会の講演要旨の全てを収録した電子媒体を作成します。

5. 放射化学教科書（小冊子シリーズ）の企画・編集

大学の理工系学部3年生以上、あるいは理工系職員を対象読者とする放射化学教科書（小冊子シリーズを予定）の出版を企画し、一部について編集を行います。

上記事業の内幾つかの刊行物については、記念大会に間に合うよう鋭意準備を進めており、「放射化学用語辞典」及び「放射化学討論会要旨集全巻のpdf化とDVD」については、大会当日に配布することを予定しています。また、放射化学教科書（小冊子）は放射化学とその関連学際領域分野の最新のフロンティア研究を紹介するもので、この記念大会を契機に企画・編集するものです。この小冊子は準備が出来た分野から、順次刊行していく予定です。

今回の記念大会のプログラム等については本誌

でも紹介されていますが、会期は従来より1日長い、4日に亘り、従来の放射化学討論会の研究発表の他に、50周年を記念して幾つかの記念講演等が企画されています。討論会会場が従来と異なり、2ヶ所になります。会期の第1、2日の会場は水戸市（水戸常陽藝文センター）ですが、第3、4日は会場が東海村に移動し、日本原子力開発研究機構の原子力科学研究所になります。主なプログラムの概略を紹介すると、初日に行われる公開講演では放射化学とその関連分野の研究について分かりやすく紹介すると共に、これらの学問分野の社会における有用性や将来の展望について意見交換が行われる予定です。2日目に行われる記念講演では海外からの招待者等による放射化学とその関連分野の現状、将来展望等について討論が行われます。また、2日目の午後には、この放射化学討論会50周年を記念し、放射化学討論会の開催や放射化学とその関連分野の研究にご功績のあった先達の方を顕彰する感謝状の贈呈や特別講演が行われます。

第3、4日目は本学会が共催する「核・放射化学のフロンティア」をテーマとした第6回先端基礎研究国際シンポジウム（組織委員長 永目諭一郎）が平行して同時開催されます。このシンポジウムでは超重元素の化学、核的手法を用いた元素分析、核をプローブとする化学物性、環境放射能科学、さらにアクチノイド科学などの放射化学に

関連する最先端分野の研究について、海外からの多くの第一線の研究者を交えた討論が行われます。シンポジウムは学会会場と同じ場所で行われ、学会へ参加登録された方はシンポジウムの方にも参加出来るよう便宜が図られています。

また、大会4日目には日本原子力研究開発機構と高エネルギー加速器研究機構が共同で建設を進めている大強度陽子加速器施設（J-PARC）の見学が計画されており、主要土木工事が完了したライナック、シンクロトロン（3GeV、50GeV）等の地下トンネル部等を含めた見学を企画しています。

今回の放射化学討論会の50周年を記念する大会では、先達の業績、貢献を顕彰する式典及び記念祝賀会が行われますが、諸先輩をはじめ関連学協会の方にもご出席頂き、大会が盛会裡に行われればと期待しております。また、この記念事業が、放射化学とその関連分野の研究の一層の理解と、これからのさらなる発展に繋がることを期待しております。

最後に、記念事業の大部分は、事業の趣旨にご理解を頂き、会員、賛助会員並びに企業等からの募金をもとに、進められています。ここに、ご協力頂いた皆様には改めて御礼と、感謝を申し上げますと共に、今後とも一層のご支援の程宜しくお願い申し上げます。

以上

解説

ITER トリチウムプラントに向けた日本原子力研究開発機構での研究開発

山西敏彦（日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 トリチウム工学研究グループ）

1. はじめに

ITER（国際熱核融合実験炉）の本格的工学設計活動が開始されたのは1992年のことであり、建設地が仏カダラッシュに決定され、建設・製作に向けた具体的な活動が開始されたところである。ITER等核融合炉の最大の特徴は、燃料として放射性物質である大量のトリチウム(T)を保有し取り扱うことにある。トリチウムそのものは、理工学基礎研究、医療、産業に微量ながら用いられてきた。また重水型原子炉施設では、濃度は低いものの大量のTが水の形で重水中に存在する。一方ITERでは、重水炉以上の大量のTを（数kg）、水素、水、有機形と多様な化学形で取り扱う。しかも、燃料として注入されるTと環境に排出される不純物中のTでは濃度差が12桁あり、トリチウムプラントはこの濃度差のダイナミックレンジを取り扱わなければならない（図1）[1]。ここでは、上記課題を抱えたITERのトリチウムプラントに関する研究開発に関し、日本原子力研究開発機構（以下原子力機構。研究開発当時は日本原子力研究所であったが、原子力機構で代表する。）でのこれまでの活動の概要、ITER建設期におけるトリチウム研究の今後の課題を記述する。

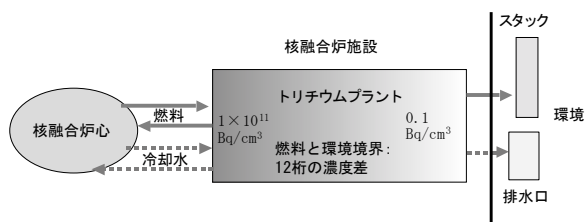


図1 核融合炉におけるトリチウム取り扱い

2. ITER トリチウムプラントの構成と研究開発の経緯

ITERは重水素(D)とTによる核融合燃焼反応

を起こし、エネルギーを取り出すことを目的とした実験装置であり、トリチウムプラントは次の2つの機能を持つ

課題1：上記燃焼反応で生成するHe等を排出し新しい燃料を注入する。排出操作では未反応のT（95%以上）も一緒に抜き出されてしまうので、Tを分離回収・再利用する。この機能を持つシステムがトリチウムプラントの中の燃料循環系である。

課題2：Tは水素の放射性同位元素であり、物理化学的に同様の性質を持つ。高分子や高温の金属中を容易に透過し、機器や配管から外部への漏洩を完全になくすことは難しい。外部に漏洩したTは、従事者被曝及び環境への排出を防ぐために、負圧維持管理された2次容器、あるいは建屋内に閉じこめ、その雰囲気をトリチウム除去系により処理し、Tは最終的に燃料として再利用すると共に、Tの計量管理を行う。この機能を持つシステムがトリチウムプラントの安全取り扱い系である。

2.1 燃料循環系の構成と研究開発の経緯

2.1.1 精製システム

ITERトリチウムプラントにおける燃料循環系と安全取り扱い系の概略構成を図2に示した。

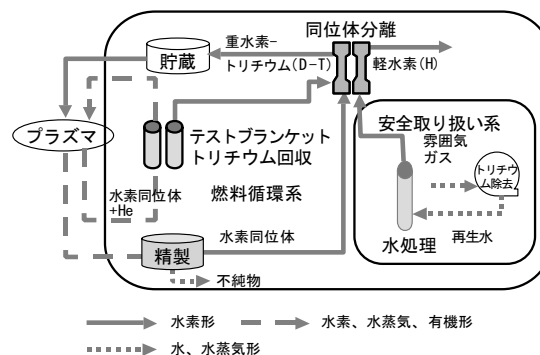


図2 ITERトリチウムプラント

ITERの炉心からは、クライオポンプにより、未燃焼のDとT、燃焼灰のHe、炉壁とプラズマの相互作用等で生じた不純物（メタン、水蒸気、軽水素(H)等）が排出される。これらのガスから、水素同位体のみを取り出して後段の水素同位体分離に送るとともに、メタン、水蒸気等水素を含む不純物に含まれるTを回収するのが、精製システムである。まずHe等不純物を取り除き水素同位体のみとするには、パラジウム拡散器が用いられる。高温下（400℃）ではパラジウムを水素のみが透過する性質を利用したものであり、厚さ0.1mm以下に加工したパラジウム金属管構造を持つ。原子力機構では、銀を加えることでT崩壊によるHeの蓄積による悪影響、水素脆性の影響を緩和できることを見だし、米国ロスアラモス研究所との共同実験により、高濃度Tを用いた長期実証試験に成功し、ITERでの採用に至った。ITERでは、常圧でパラジウム拡散器に導いた水素を、もう一方を極低圧として透過させる方式を採用し、Tが通る配管が高圧となることを避けている。

メタン、水蒸気等に含まれるTを回収する方法として、ITERでは触媒塔とパラジウム膜反応器のシステムが採用された[1]。触媒塔は、白金を担持したアルミナ等を充填したものであり、メタンクラッキング及び水性ガス反応により、メタン及び水蒸気を水素に還元する（ $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{C} + \text{H}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O} + \text{CO} = \text{H}_2 + \text{CO}_2$ ）。パラジウム膜反応器では、パラジウムが水素のみを透過する機能を利用し、トリチウムを含むメタン及び水蒸気とHを向流接触させて、図3に示す触媒反応により、トリチウムを水素側に移して回収するものである。これらの方式は、EU、独カールスルーエ研究所にて開発されたものであり、Tを回収後の不純物は環境放出されるため、ITERでは燃料精製システム

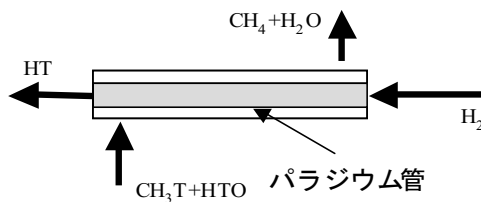


図3 パラジウム膜反応器の原理

に6桁の除染係数が求められている[1]。

2.1.2 同位体分離システム

ITER等核融合炉燃料循環系で要求される大流量処理、高純度分離を満たす水素同位体分離方法は、現在のところ深冷蒸留法のみである[1]。深冷蒸留法は、水素同位体を冷媒Heガスにより約20Kまで冷却し液化させ、同位体間の揮発度の差（沸点の差：大気圧における H_2 の沸点は約20K、 T_2 は約25Kである。）を利用して蒸留によって分離を行うものである。塔高さは5m近くに達するものの（要求する分離性能が高いため）、塔径は5-10cm程度となり（水素を液化するので、処理量は小さい）、充填塔形式が用いられ、下から順に、液体水素が貯留しているリボイラー、充填塔、冷媒Heで冷却される凝縮器から構成され、塔内を上昇する蒸気と下降する液の向流接触により、低沸点成分は凝縮器に、高沸点成分はリボイラーに濃縮される。

分離原理そのものは、石油化学プラント等で確立した蒸留技術であり、カナダダーリントン施設では、重水からのトリチウム回収設備で実規模深冷蒸留塔が運転されている実績を持つ。一方、核融合炉燃料処理では以下の2つの大きな特徴を有する。第一は、精製する同位体純度の要求のダイナミックレンジが極めて大きく、燃料として戻されるT純度は90%であるが、不純物として環境放出されるH中のトリチウムモル分率は-10剩であり、同位体分離システムの中だけで10桁のダイナミックレンジを持つ。このダイナミックレンジの広さに対し、原子力機構では、安定して解を得られるシミュレーションコードを開発した。第二の特徴は、水素同位体は6分子種（ H_2 , HD , HT , D_2 , DT , T_2 ）であるが、核融合炉では、その6分子種の混合体を、燃料の高純度D及びT、不純物のH（HT含有は極低濃度でしか許されない。）3つの流れに分離することが要求されることにある。蒸留操作は分子種による分離方法である。この要求を満たすためには、障害となる分子種、DT及びHTの処理が必要となる。原子力機構では、上記シミュレーションコードにより、同位体平衡反応（白金を担持したアルミナ等触媒を充填した反応器で、 $2\text{DT} = \text{D}_2 + \text{T}_2$ 、 $\text{HT} + \text{D}_2 = \text{HD} + \text{DT}$

の反応を生じさせる。)を利用することで、不要な分子種を消滅させられることを見出した。さらに、米国ロスアラモス研究所との共同研究により、この同位体平衡反応を利用した深冷蒸留塔の実証試験に世界で最初に成功した[2]。ITERでは、同位体平衡反応付き深冷蒸留塔を複数組み合わせた図4に示すシステム(実規模深冷蒸留塔の運転経験を持つカナダが設計を担当)が現在採用されている[1]。

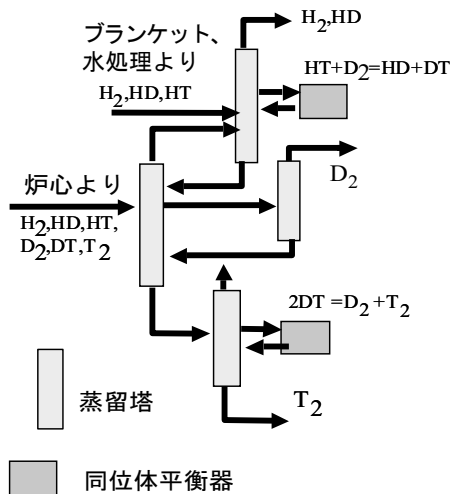


図4 深冷蒸留塔による同位体分離システム

2.1.3 燃料貯蔵システム

核融合炉燃料のD及びTは、水素を吸蔵する金属中に、水素化物の形で貯蔵される。またITERでは、プラズマの運転が断続的に行われるため、深冷蒸留塔による同位体分離システムで精製されたD及びTは、水素吸蔵金属を充填した貯蔵ベッドに一次保管され、適時燃料として炉心に供給される。水素を吸蔵する金属としては、世界のT取り扱い施設でウランが従来用いられてきたが、ウランは核燃料物質であり法規制上取扱が難しい。そこで、原子力機構では代替金属の開発を目指し、水素貯蔵合金に対する基礎研究成果に着目し、Zr-Co合金を用いる貯蔵ベッドを開発した。このZr-Co合金の貯蔵ベッドは、原子力機構において20年近く安定した使用実績を挙げている。合金の平衡圧は、室温において $1\text{E}-3\text{Pa}$ 、 350°C において $1\text{E}+5\text{Pa}$ 程度であり、 100g で約 1mol の水素を吸蔵する。

貯蔵ベッド中には大量にトリチウムが存在するため、その計量も重要となる。ベッドを昇温して、水素を吐き出させ、温度、圧力、体積、組成を測定することでベッド中のトリチウム量が求められるが、作業の困難性、ベッドに残留する水素による誤差等問題も多い。そこで原子力機構では、図5に示すトリチウム計量機能付き貯蔵ベッドを開発した。ベッド内にある温度に保ったHeガスを循環させ、トリチウムの崩壊熱(トリチウム 1g あたり 0.32W)によるガスの温度上昇を測定することで、ベッド内トリチウム量を測定しようというものである。ITERから要求された1%の誤差でトリチウム量が計量できる性能を満たすことに成功し、この計量機能付き貯蔵ベッドの採用が決定した[3]。

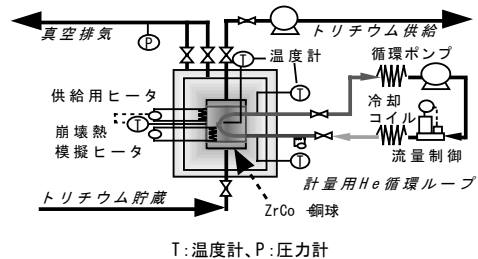


図5 トリチウム計量機能付き貯蔵ベッドの構造

2.1.4 テストブランケットトリチウム回収システム

ブランケットは、真空容器内でプラズマを包むように設置され、核融合反応で生じた中性子エネルギーを熱変換すると共に、天然には存在しない燃料のTを、リチウムと中性子の反応によって生産するものである。ITERではブランケットによる本格的なT生産は行わないが、ITER以降の核融合原型炉に向けて、各国がテストブランケットを取り付け、熱変換及びT増殖試験を行うことが、ITERを用いた実験の最も重要な課題の一つとなっている。T増殖に関しては、Tを同位体交換反応により放出させるため、リチウム中に水素ガスを添加したHeパージガスを流し、Tを回収する。このHeガス中のTを回収するために、日本では、原子力機構が設計した低温吸着塔とパラジウム拡散器を組み合わせたシステムを現在採用している。液体窒素温度に冷却したモレキュラシーブが、相当量の水素を吸着し、かつHeは吸

着しない原理を用いたものである。He スイープガスの温度は 300 度以上に達するため、これを一度液体窒素温度まで冷却し、再び昇温する必要がある、ITER テストブランケットのトリチウム回収システムよりも処理量が 2 桁以上大きくなると予想される原型炉以降では、熱効率の良い、新たなシステム開発が必要となろう。

2.2 安全取扱いシステムの構成と研究開発経緯

2.2.1 分析・計量管理システム

(1) 分析技術

ITER の燃料循環系では、12 桁のトリチウム濃度を取り扱う。作業環境モニタも考慮すれば、分析すべき T の濃度範囲は更に拡大する。一般に個々の測定器のダイナミックレンジは 4 桁程度であり、複数の手段を組み合わせてこの濃度範囲に対応しなければならない。ガス中の T の全量を分析には β 線を計測する電離箱や比例計数管が多くの実績を持ち、ITER でも採用されている。燃料循環系の運転制御のためにオンラインでの化学形弁別や同位体弁別が必要であり、ITER に向けて、原子力機構ではマイクロガスクロマトグラフ法の開発を行った。液体中の T 分析には、実績のある液体シンチレーション計数器が ITER でも採用されている。基本的にバッチでの分析手段であるが、ITER では水中 T の連続分析は運転上は必要ない。固体中のトリチウム分析に関しては、ITER に向けて開発されたものではなく、従来実績のある拭き取り（スミア）法や薄窓比例計数管が採用される。

(2) 計量管理技術 [4]

ITER における T の計量管理には、保有量や排出量等の許認可に係る法的な要請、効率的な安全・運転管理に係る自主的な要請から、静的（バッチ）容量法と動的（時間積算）容量法が採用されている。静的容量法は、一旦計量タンクに移送して容積を測定し、種々の濃度測定結果とあわせて定量する手法及び T の崩壊熱を測定する熱量法である。搬入時のトリチウム輸送ベッド等を専用の断熱容器に入れるカロリーメトリー方式と、上記計量機能付き貯蔵ベッドが採用されている。動的容量法は、濃度と流量の計測結果を時間積算するもの

で、それぞれの変動の時定数と計測時間を考慮した最適な計測手法の組合せの選択が重要であり、ITER の実際の運転において、総合的な精度の実証が行われる。

2.2.2 トリチウム除去システム

上記のように、建屋等閉じ込め空間に透過・漏洩したトリチウムは、一般に触媒で酸化し、生成した水蒸気（HTO、DTO 等）を吸着塔で捕集して除去する。これを触媒酸化-水分吸着方式と呼び、殆どの核融合研究に関する大量トリチウム取り扱い施設でこの方式のトリチウム除去設備が稼働しており、ITER でも採用された。メタン状等有機形のトリチウムの除去を必要とする場合は、500℃の貴金属触媒酸化反応器（Pt/Rh 等）を追加すれば良い。捕集した水は吸着塔の定期的再生（高温乾燥ガスパージ）により廃液として回収され、後述する水処理システムでトリチウムを回収し再利用する。建屋のトリチウム除去設備は、万一の事故を想定したときの影響緩和設備の要であり高い信頼性が必要であることから、火災時など異常時に発生するガスにより性能劣化がないことを確認する（除染効率：99%以上）試験を、ITER から要請され原子力機構で行った [5]。また、本設備は、事故時以外の保守作業時などにおいても、トリチウム除去機能をもつ局所排気系として従事者被ばくの低減や汚染の拡大防止に有効利用することになる。

2.2.3 水処理システム

上記トリチウム除去システムの水分吸着塔の定期的な再生水の処理のために、ITER では、重水炉ふげんで重水濃縮のために開発され実績のある CECE（Combined Electrolysis Catalytic Exchange）システムを採用した。CECE は、水素ガスと水（液体）を向流接触させ、水素-水蒸気の化学交換（ $\text{HT} + \text{H}_2\text{O} = \text{HTO} + \text{H}_2$ ）と水蒸気-水の気液平衡を利用する液相化学交換塔と、水電解セルを組み合わせる環流機構を設けた設備である（図 6）。電解セルを伴うため基本的に大量処理には適さないが、ITER では冷却水処理が必要ではなく処理流量が小さいため、分離係数が大きく装置が小型化できる CECE システムが採用さ

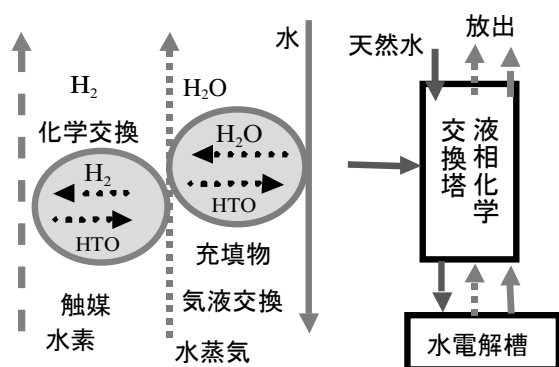


図6 CECE 設備の概要

れた。先に記述したように、Tを扱う装置は負圧維持管理された建屋等に設置される必要があり、装置を小型化することは実は本質的な要求である。核融合炉に向けた水処理装置としてはITERが最初の実用実績となり、ふげんでのシステムと異なりトリチウム濃度が高いため、通常のアルカリ電解槽ではなく高分子膜型電解セルを採用している。水処理システムによりトリチウム濃縮水を電気分解し、燃料循環系の水素同位体分離設備に移送・供給することにより、トリチウムを回収し最終的に再利用する。高分子膜はトリチウム水の放射線により劣化することが知られており、電解セルに用いられる高分子膜の耐放射線耐久性について、ITERの要請により原子力機構で研究を行った[6]。

3. 今後の研究開発課題

ITERが建設段階に入った今強調しておきたいことは、Tに関する研究開発が決着したのではなく、本格的な研究開発が始まったということにある。トリチウムプラントとして、統合されたシステムが運転されるのはITERが初めてであり、ITERの運転を通じて、システム統合の実証試験を行うことが、今後の最も重要な課題の一つである。加えて、核融合炉におけるトリチウム挙動を学術的にも正確に把握し、新たなシステムの開発、既存システムの改良に努め、ITERでそのシステムを実証することで、原型炉を目指した研究開発を進めることができる。この一環として、青森県六ヶ所村において、BA (Broader Approach) 計画により、Tを取り扱える施設を建設し、Tの基礎研究を行う計画も進められている。

ITERトリチウムプラントは、原型炉までを見通した場合抱えた問題点も多い。燃料循環系においては、ITERで採用されている精製システムの触媒塔で、メタンクラッキングによる炭素の蓄積が問題となり、新技術の開発が必要である。また同位体分離を担う深冷蒸留塔は、トリチウムのインベントリーをできるだけ小さくするために、塔内の液量をできるだけ小さくしている特徴があり、蒸留操作が不安定になりやすい宿命を持つ。よって、連続安定運転が必要な原型炉以降では、運転・制御システムの開発が重要な課題である。ブランケットトリチウム回収については、現在ITERで採用されているシステムが原型炉以降にもそのまま適用できるものではないことは既に記述した。安全取り扱い系では、装置の小型化が上記のように本質的課題であり、気体分離膜による減容前処理による小型効率化の研究が必要である。また原型炉以降では、本格的なブランケット運転に伴い大規模な冷却水処理装置が必要となり、ITERで現在採用されている水処理システムの処理流量増大が難しいことから、前段の水処理システムが必須となる。分析技術の観点からは、高温ブランケット系などへの適用のためのさらなる高温条件での分析技術、冷却水中Tの連続分析技術、廃棄物処理を念頭に固廃棄物中T分析技術が原型炉では必要であり、最近研究が進んでいる β 線誘起X線分光法、固体シンチレーター、イメージングプレート等が有望であろう。ITERの最終的な廃止措置時においては、トリチウム汚染した建屋コンクリートの低減と適切な処理処分が重要であり、コンクリート中のトリチウムの挙動に関する研究も今後重要度を増す。

ITERの運転が開始されれば、日本からも多くの科学者、技術者が参加していくことになることは言うまでもない。核融合炉の安全に直結するトリチウムプラントでは、T燃料循環及び安全取り扱い技術そのものに加えて、運転・保守に係わる知見(ノウハウ)を蓄積することも重要である。この知見は、日本におけるT取り扱い施設での経験を元にITERに参加することではじめて実感し身に付くものであり、そのためにも、日本におけるT研究が今後も活発に続けられていかねばならないことを最後に述べておきたい。

参考文献

- [1] 特集・ITER工学設計, J. Plasma Fus. Res., 78 sup. (2002).
- [2] T. Yamanishi, K. Okuno, M. Enoda, J. Nucl. Sci. and Technol., 31, 937 (1994).
- [3] T. Hayashi, T. Suzuki, S. Konishi, et al., Fusion Sci. Technol., 41, 801 (2002).
- [4] M. Nishi, T. Yamanishi, T. Hayashi, Fusion Eng. Des., 81, 745 (2006).
- [5] K. Kobayashi, O. Terada, T. Hayashi, et al., Fusion Sci. Technol., 48, 476 (2005).
- [6] Y. Iwai, Y. Misaki, T. Hayashi, et al., Fusion Sci. Technol., 41, 1126 (2002).



施設だより

仁科加速器研究センターの設立と RI ビームファクトリー

羽場宏光 (理化学研究所)

平成18年4月1日、理化学研究所に、仁科芳雄博士(1890～1951)の名を冠した仁科加速器研究センター(Nishina Center for Accelerator Based Science)が設立された。仁科センターは、加速器施設の高度化や運転管理を行う「加速器部門」、加速器施設を利用して原子核研究を進める「原子核研究部門」、外部ユーザーによる施設共用や国内外研究機関との研究協力を担当する「共用促進部門」、素粒子や理論物理の研究を行う「素粒子物性研究部門」、RI製造・生物照射などの応用研究を行う「応用研究部門」、安全管理を担当する「安全業務グループ」、さらに、海外に研究拠点をおく「理研ブルックヘブン国立研究所(BNL)研究センター」(米国)、「理研ラザフォードアップルトン研究所(RAL)支所」(英国)から構成される。

前身である理研加速器研究施設(RIKEN Accelerator Research Facility, RARF)では、高エネルギー重イオン加速器K540理研リングサイクロトロン(RRC)、K70 AVFサイクロトロンならびにリニアックを利用し、国内外の研究者によって、原子核、放射化学、放射線生物学、核医学など様々な分野における研究が行われてきた。とくに、RRCとRIビーム発生装置(RIKEN Projectile fragment Separator, RIPS)を用いて発生させる“RIビーム”を用いた研究に重点を置き、これまで世界をリードしてきた。このRIビームの種類と強度を飛躍的に向上させるため、仁科センターではRIビームファクトリー(RI Beam Factory, RIBF)が建設中である。平成18年度は、第1期計画(平成9から18年度)の最終年度に当たり、いよいよファーストビームに向けてのカウントダウンが始まっている。

図1に、RIBFの全体図を示す。RIBF計画では、現在稼働中のRRCに加えて3台のリングサイク

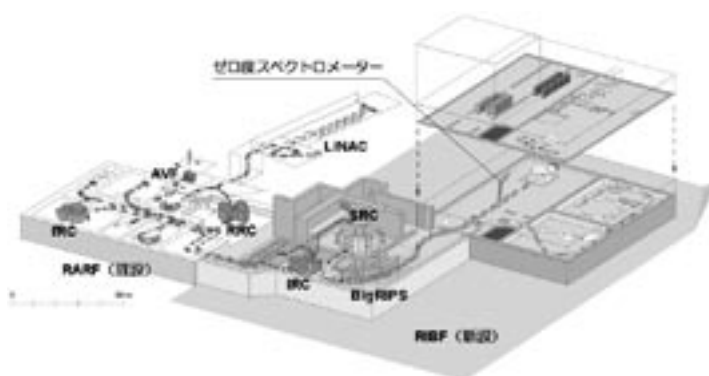


図1 RIビームファクトリーの全体図

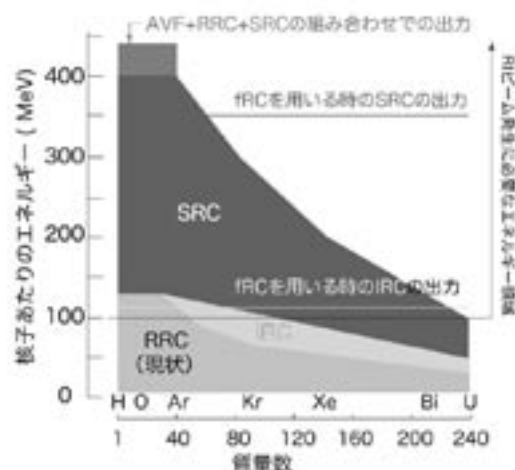


図2. RIビームファクトリーにおける重イオンビームのビームエネルギー

ロトロン (K570 fixed frequency Ring Cyclotron, fRC ; K980 Intermediate stage Ring Cyclotron, IRC ; K2500 Superconducting Ring Cyclotron, SRC) を新たに設置し、ビームエネルギーを大幅に増大させ(図2)、ヘリウムなどの軽いイオンで核子当たり440MeV、ウランなどの重いイオンで核子当たり350MeVまで加速する。このSRCで加速された高エネルギービームと標的原子核との衝突で得られる核破砕核種をBigRIPSによっ

て分離し、RI ビームとして引き出す。国内では初めてとなるウランイオンの加速により、軽い元素に限られていた RI ビームをウランまでの全元素にわたって世界最大強度で発生させる。SRC は、6 基の超伝導セクター電磁石をもつ世界初のセクター分離型リングサイクロトロンで、全体が鉄シールドで覆われ、総重量は 8300 トンである (図 3)。因みに、1937 年に仁科博士が作った我が国初 (世界 2 番目) のサイクロトロンから数えて、SRC は理研で 9 台目のサイクロトロンとなる。

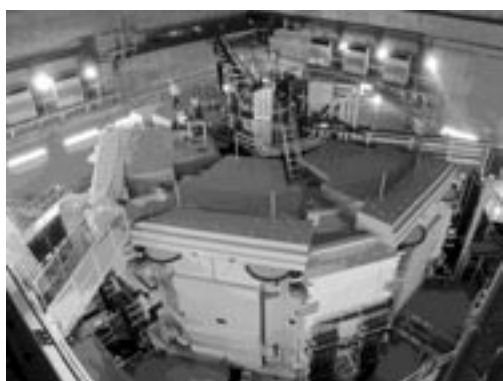


図 3. 超伝導リングサイクロトロン SRC の写真

図 4 に示したように、RIBF によって核図表が大幅に拡大される。これまでの研究によって、中性子や陽子が極端に多い RI は、ハローやスキン構造、新魔法数などユニークな核構造を示すことが分かってきた。RIBF では、未知の RI を発見しその性質を系統的に調べることから、ウランまでの元素合成過程の解明や原子核モデルを再構築していくことを重要な目的としている。第 1 期計画では、図 1 に示したゼロ度スペクトロメーターが完成予定で、BigRIPS によって生成される新 RI の質量、寿命、励起準位などを高効率で測定し、核図表の拡大を進めていく予定である。第 2 期計画では、生成された短寿命 RI の質量、寿命、崩壊様式、殻構造、核子分布などを精度良く測定していくため、大立体角多重粒子磁気分析装置 SAMURAI (Superconducting analyzer for multi-particle from radioactive isotope beam)、超低速 RI ビーム生成装置 SLOWRI (RF ion-guide for slow and trapped RI-beam)、高分解能 RI ビームスペクトロメーター SHARAQ (Spectroscopy of hadronic systems with radioactive quantum beam、東大 CNS)、自己閉じ込め RI 標的 SCRIT

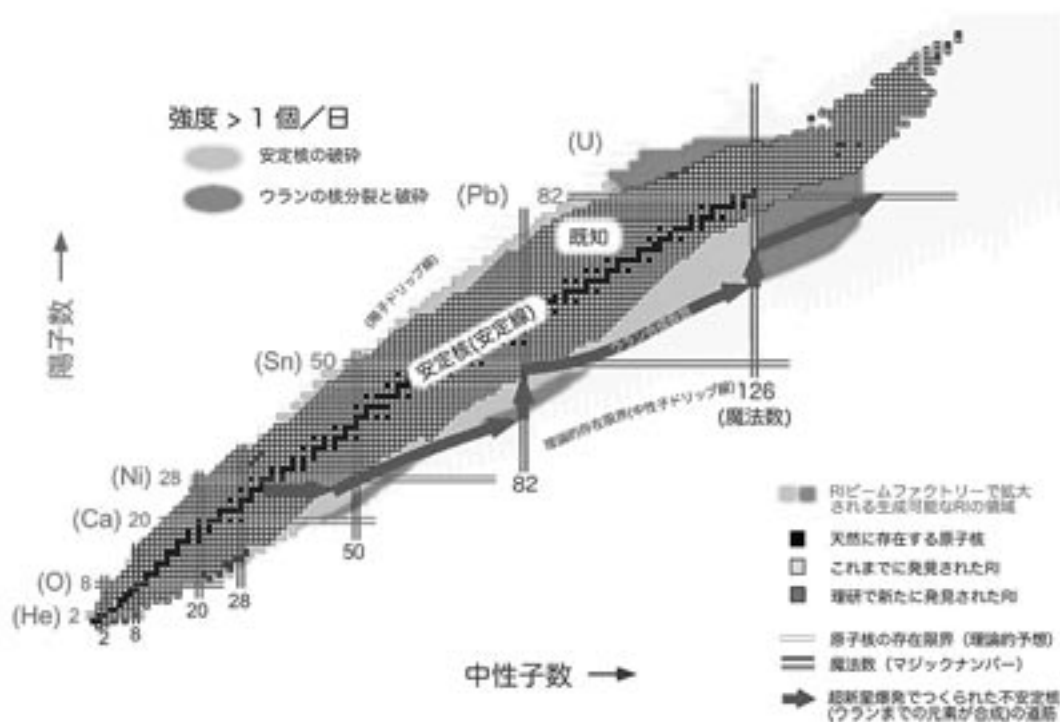


図 4. RI ビームファクトリーによって拡大される核図表

(Self-confining radioactive ion target)などのユニークな基幹実験設備の開発が計画されている。

さて、RIBFの研究課題は非常に多岐にわたるが、放射化学分野の研究としては、RIBFの自由自在にRIを生産できる能力を生かしたRI製造と応用研究であろう。RIBFでは、全元素領域にわたる多彩なトレーサーの安定供給を図るため、BigRIPSのビームダンプに廃棄される一次ビームを有効利用してRIを常時製造することを計画している。また、RIビームを溶液などに直接打ち込み、そのままトレーサーや放射性医薬品として利用することも考えられている。この手法では、BigRIPSによるRIの物理的分離によって、RIの化学的精製が不要となり、利用目的に最適な寿命や壊変特性を有する同位体を選択することができる。さらに ^{238}U ビームの実現により、これまで製造が困難であったPoより重い元素のトレーサーや、核分裂反応によって生成するRIも容易に供給できるようになる。RIをトレーサーとして用いた研究以外にも、多種類かつ大強度のRIビームは、メスバウアー分光法や γ 線摂動角相関法の対象RIを増大し、様々な化合物の物性研究に利用される予定である。

仁科センターの設立と同時に、森田浩介博士が率いる「森田超重元素研究室」が誕生した。原子番号103を超える超重元素を対象とした原子核・

化学研究もRIBFの重要な研究課題である。近年、未知の超重元素の化学的性質や重い元素領域における電子構造を明らかにすることを目的として、“超重元素の化学”が放射化学分野の重要な研究課題となっている。RIBFは、大強度のRIビームの発生を目指すため、1次ビームの入射器であるK70 AVFサイクロトロンやリニアックからの重イオンビームは世界最大強度に到達している。これらの大強度ビームは、生成率が極めて低い超重元素の合成に適している。AVFサイクロトロンのビームラインには、最近、ガスジェット結合型超重元素合成装置が整備され、合成された超重元素を化学実験室へオンライン搬送するシステムが完成した。一方、リニアックには、113番元素などの超重核合成に威力を発揮してきた気体充填型反跳分離装置(RIKEN Gas-filled Recoil Ion Separator, GARIS)がある。GARISで物理的に前段分離された超重元素を化学分析装置に導く次世代の化学分析システムの開発も着々と進んでいる。

おわりに、仁科センターには、共用促進部門が設置され、今後、ユーザーによる施設共用の効率的な運営と適切な支援、国内外研究機関との研究協力の推進やユーザーの開拓を行っていく予定である。放射化学分野から、仁科センターを利用したユニークな研究課題が次々生まれ、成果が上がることを期待したい。

研究集会だより

1. 第44回核化学夏の学校

大浦泰嗣 (首都大学東京)

平成17年度の核化学夏の学校は8月22日から3泊4日の日程で、群馬県高山村国民宿舎わらび荘にて行なわれました。ここ数年は7月下旬から8月上旬に行なわれていましたが、今年は世話人(筆者)の都合で8月下旬に行わざるを得ませんでした。大学院入試や放射線取扱主任者試験と重なってしまい、参加者の数が当初より気になっておりましたが、29名(半数が学生)の参加があり、盛大とはいえませんがこじんまりと落ち着いた雰囲気の中で開催することができました。ちなみにこの参加者数は、記録が残っている第21回からの過去最低数でありました。参加しやすい日程とできなかったことをこの場を借りてお詫び申し上げます。

さて、本学校の生徒さんは次の3先生方の講義を受けるとともに、4人の生徒さんから話題提供をいただきました。また、若手の方による研究紹介も行いました。

講義Ⅰ：群馬大・飯田靖彦先生 新しい放射性核種を用いたがんのPET診断と内用放射線治療の可能性

講義Ⅱ：東京天文台・梶野敏貴先生 ビッグバン、超新星での元素合成と宇宙の化学進化

講義Ⅲ：東工大・井頭政之先生 中性子捕獲反応とJ-PARCでの研究計画

話題提供1：首都大・大浦泰嗣 k_0 -INAAのすすめ

話題提供2：金沢大・木下哲一氏 ^{146}Sm と ^{147}Sm の半減期測定

話題提供3：古川路明氏 人形峠のウラン残土の問題

話題提供4：新潟大・工藤久昭氏 113番元素の合成

研究紹介：学生全員 + 若手有志

り、講義は宇宙での元素合成を中心に構成しました。梶野先生は第27回につづき2度目の御登壇で、最近の元素合成理論を熱っぽく解説していただきました。井頭先生は精密な断面積値を得るための苦労話もまじえ、中性子による元素合成の基礎から、J-PARCでの研究計画まで伺いました。2日目の夜は天文台での天体観望を予定していましたが、残念ながら天候に恵まれず、天文台の見学となってしまいました。この時期は、昼間は晴れていても観測できないことが多いとのことでした。冬季が観測できる日数が多いそうです。接眼式反射望遠鏡としては世界最大規模の150cm望遠鏡はなかなか迫力がありました。

群馬大学は現在21世紀COEプログラム「加速器テクノロジーによる医学・生物学研究」が実施されています。その中で新規な放射性核種を製造し、臨床医学に応用しようとされている飯田先生に講義をお願いいたしました。放射性核種を用いた診断・治療の基礎から、PET用の比較的半減期の長い新核種製造計画まで、興味深い話を聞くことができました。

参加者が少なく、例年のように十分な話題提供を用意できなかったため、苦肉の策として参加した学生さん全員 + 若手の方に短い研究紹介発表をお願いしました。どれくらいの方が準備して来てくれるかなあ、は入らぬ心配で、全員が準備して来てくれ、時間がたりない状況でした。少ない参加者ならではといえるこの企画は予想以上に好評で、世話人としましてはホットいたしました。発表していただいた学生の皆様に感謝します。

次回は金沢大学が世話人です。例年どおり多くの方々に参加されることを期待します。最後になりましたが、日本放射化学会より多額の補助をいただきましたことをここに記して感謝申し上げます。

会場のわらび荘は県立ぐんま天文台の隣にあ

**2. 2005 環太平洋国際化学会議シンポジウム
PACIFICHEM2005
Nuclear Hyperfine and Quantum Beam-
Technique for Studying Chemical States
(#34)**

前田米藏 (九州大学理学研究院化学部門)

上記国際会議は2005年12月16日(金)午前・午後(口頭)、12月17日(土)夕(ポスター)がシェラトンプリンセスカイウラニ(口頭)と、ワイキキビーチマリOTT(ポスター)で開催された。この国際会議は環太平洋諸国の化学会が開催主体となり、これに各種のシンポジウムをつけて開催するもので、5年ごとに開催されている。今回は#34のシンポジウムを前田が主コーディネーターとなり、日本から竹田満洲雄、オーストラリアから Anita Hill、台湾から Ho-Hsaing Wei、中国から Guilin Zhang、アメリカから、Amar Nath が副コーディネーターとして、シンポジウムが組織されたものです。招待講演者は Dr. Yan Ching Jean (米国、ミズリーカンサス市大学) 佐藤 渉 (日本、大阪大学)、Attila Vertes (ハンガリー、エトボシュウ大学)、速水真也 (九州大学)、片田元己 (首都大学東京)、野村 貴美 (東京大学) であった。ポスター発表を含んで、全体で26件の講演がなされた。口頭講演のシンポジウム参加者は常時30人以下であった。この人数は少ないように思えるが、今年ほどの会場も少ないとのことだった。これは数多くのシンポジウムが連日開催されていることと、アメリカを含めメスバウアー人口が少ないことに原因があるように思われる。今回は初期の招待講演者が2人も辞退したが、彼らはスピントロニクスオーバーのほうで発表していた。このことは我々の#34のシンポジウムが測定機器でグルーピングしていることによると考えられる。研究は目的によるべきであるが、そろそろメスバウアー分光も測定手段でグルーピングしては将来性が無いことを暗示している。メスバウアーのグループは他のシンポジウムでも発表し、測定手法を広くアピールすることも大切であるが、パラメータの細かい議論も必要で広く深く研究する必要がある。講演内容は、このシンポジウムの特徴でもあるが、全般的にパラメータの細かい議論が

多い。メスバウアー分光をいろいろな方面に応用しているの、その方面の知識がないと内容を理解できないことも多かった。

若い日本の化学者が英語で堂々と発表している姿を見ていると、私たちの若かった時代とは随分変わってきたという感慨に耽るとともに、経済環境、交通システムの便利さの進展に目を見張るものがある。ポスター発表は、翌日の夕刻別のホテルで開催された。金属酵素モデルによる酸素活性化化学(#162)と隣り合わせの会場であった。会場内には最終時間まで議論しているグループが多く見られたが、日本人同士がハワイで議論している風景であった。しかし、ハワイまで来て、議論している会場から多くの知己が得られることがこの Pacificchem の有益な点かも知れない。親しい同胞は同じ釜の飯を食って生まれる現実を見る思いであった。講演会場は写真1, 2に示すように立派な部屋で、窓からはワイキキビーチが見下ろ



写真1 講演会場入口

せるところであった。念のため、写真2に聴衆が見られないのは、講演会終了後の写真であるからであって、こんなに少ない聴衆であったわけではない。写真3の左側は Amar Nath 教授、中央は Ho-Hsaing Wei 教授である。Amar Nath, Anita Hill, Ho-Hsaing Wei 教授に御礼を申し上げる。特に Ho-Hsaing Wei 教授は現在学部長で多忙を極めており、参加する予定はなかったが、少し日程の都合がつくようになったため急遽駆けつけたとのことであった。Amar Nath 教授は現役からは退いているが、いまだに非常勤として研究を続けているとのこと、ご両人とも非常にお元気で



写真2 講演会場

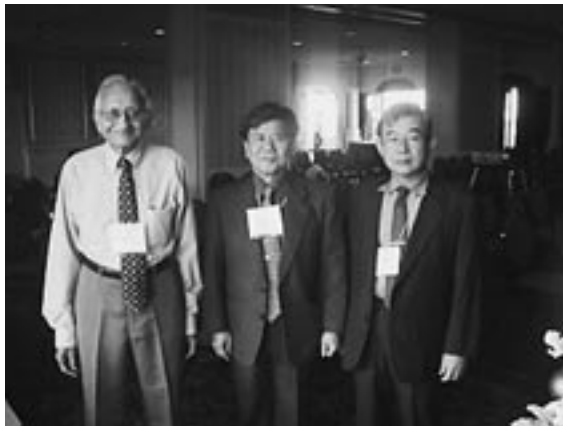


写真3 参加者写真

あった。Pacifichemの全体の印象としては大会が非常に大きくなりすぎていて、旅行の手配に最後まで振り回された。いっぽうではこんなに大きな大会でもきちんと運営されているシステムには感心した。

Science with Rare Isotope Beams (#238)

工藤久昭 (新潟大学理学部化学科)

上記RIビームに関するシンポジウムが2005年12月19、20日に3 half-day session + 1 evening session にわたって開催された。演者は30名で、内訳は、米国:10、カナダ:6、日本:5、中国:4、欧州:5であった。

施設及び加速器関係の現状および将来計画について、本林氏による理研のRIビームファクトリー (Xe, Kr, Ca projectile fragmentation + 350 MeV/A U in flight fission) の紹介に始まり、ミシガン州立大のNSCL超伝導サイクロト

ロンのup-grade (K500+K1200+ A1900(fragment separator))であるCoupled Cyclotron Facilityの紹介があった。この施設は、米国の次期計画であるRare Isotope Accelerator (RIA)が動き出すまでは、米国では第一優先順位とのことである。カナダのTRIUMFでは、500 MeV陽子による破碎生成物をISOL方式によって分離、加速するISAC (Isotope Separation and ACceleration)が稼動しているが、現在1.5 MeV/Aのビームエネルギーを少なくとも6.5 MeV/Aまで加速し、RIビームを用いて核反応が行えるよう計画中である。中国LanzhouのIMP (Institute of Modern Physics)では、K69 + K450サイクロトロンによる核反応で生成する短寿命核を電子冷却、蓄積するための重イオン蓄積リング (CSR:cooler storage ring)が建設中である。原研の市川氏より、原研タンデム加速器からの陽子ビームによる ^{238}U の核分裂生成物をISOLで分離、加速するKEK-JAERI TRIACの現状について紹介があった。

今回のシンポジウムでは、RIビームの応用面に関しては、偏極 ^8Li ビームを物質中に数nm~200nmの深さに打ち込み、 β -NMRを行うことにより、物質のナノ構造や超薄膜の物性を調べるというTRIUMFで行われている研究のみであった。

次にいくつかのトピックスを紹介する。

β 安定線から離れた原子核の質量の直接測定に関して、フランスのGANILでは、高分解能の飛行時間測定 (TOF) とSPEG (Spectrometre a Perte d'Energie du Ganil) による運動量測定を組み合わせによりr-processで重要なN=16, 20, 28, 34, 40近傍の原子核の質量測定を行っている。また、A=70-100 (N=Z近傍)の原子核を一つ目のサイクロトロン (CSS1) で融合反応によって合成し、2段目のCSS2サイクロトロンを高分解能のスペクトロメータとして用い、この領域の質量測定を行っている。さらに広い質量範囲の測定が可能となるCIMEサイクロトロンを用いる方法もほぼ実施可能な状態になっているとのことである。一方、TRIUMFではペニングイオントラップ法を用いた短寿命核の質量の精密測定が開始されている。

RIビームとして強度が得られるようになり、核反応を用いての研究が多くなされるよう

になってきている。例えば、ハロー核である ${}^6\text{He}$ がビームとして使用可能な程度に強度が得られるようになり、核反応を用いてこの核の構造の研究やクーロン障壁近傍での核子移行反応(${}^{209}\text{Bi}({}^6\text{He}, \alpha){}^{211}\text{Bi}$)などが調べられるようになってきている。また、原子核の単一粒子性の研究には、1核子移行反応が非常に有効であるが、そのような手法が、不安定核にも適用されてきている。GANILのSPIRAL (Système de Production d'Ions Radioactifs en ligne)では、 ${}^{24}\text{Ne}$ ビームを用いて(p, 2p)と(e, e'p)反応を行っており、米国Oak RidgeのHRIBF (Holifield Radioactive Ion Beam Facility)では、r-processで重要な核である ${}^{83}\text{Ge}$ の励起準位を ${}^{82}\text{Ge}(d, p){}^{83}\text{Ge}$ 反応により研究している。核構造に関しては、理研での研究が進んでおり、中性子が著しく過剰な軽核(N=20近傍)では、shell構造がベータ安定線近傍とは異なることが報告されているが、そのような研究が、クーロン励起や陽子との非弾性散乱を利用したガンマ線分光法により、中重核の領域まで拡張されつつある。

ガンマ線分光が非常に重要な手段となっているが、それに伴い、ガンマ線検出システムの開発、製作も様々な研究所で行われている。名前がついているものだけでも挙げてみると、TIGERESS (TRIUMF)、EXOAM (GANIL)、SeGe (Michigan)、ORRUBA (Oak Ridge)等である。

Frontiers of Nuclear Chemistry in the Heaviest Elements (#244)

永目論一郎 (日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター)

本セッション(超重元素の核化学的研究の最前線)では、1) 超重元素の合成、2) 超重核の壊変・核構造、3) 超重元素の化学的研究、そして4) 超重元素研究のための装置開発を討論主題として活発な議論が行われた。ヨーロッパやアメリカ、日本を中心に約50名が出席し、発表論文は招待講演16件、ポスター発表8件であった。

超重元素の合成では、理化学研究所(理研)におけるガス充填型反跳分離装置を用いた超重元素合成のこれまでの成果が報告された。2個目の113番元素が確認されたということであった。新

元素としての命名権を得るには、さらなる追実験が必要であろう。アメリカのバークレー国立研究所(LBNL)からもガス充填型反跳分離装置を使った超重元素合成の試みが紹介された。まだ新元素の合成には至っていないが、ウラン標的をベースにした系統的断面積測定を計画しているとのことである。他にロシア・ドブナのフレロフ核反応研究所(FLNR)やドイツ重イオン研究所(GSI)から、それぞれの現状と今後の計画が報告された。世界的な流れとしては、超重核の安定性がより大きくなると予想される中性子過剰核の合成を ${}^{48}\text{Ca}$ ビームを用いて試みる実験が多くなりそうである。

超重核の壊変・核構造では、104番元素ラザホージウム(Rf)や102番元素ノーベリウム(No)の核分光研究に関して日本原子力研究開発機構(原子力機構)から新しいデータが報告された。とくに ${}^{261}\text{Rf}$ の基底状態や核異性体に関するこれまでの考察を実験的に覆す結果を示し注目を集めていた。またミュンヘン工科大学のグループからは、放射化学的分離手法を用いた108番元素ハッシウム(Hs)の核壊変特性に関する研究、またアメリカ・ローレンスリバモア国立研究所(LLNL)とFLNRとの共同で化学的分離手法を用いた超重元素の原子番号の同定に関する研究などが報告された。前者はユニークな迅速気相化学分離法を開発して、短寿命のHs核種を測定し、原子番号108、中性子数162の変形した殻構造の存在を実験的に検証しようという試みである。一方、後者は長い寿命を持った超重元素を同定する手段として、これまでの物理的な反跳型質量分離装置に代わる化学的分離手法の有効性を提案していた。

超重元素の化学的研究では、より短寿命の重い元素を調べるための気相化学的研究のアプローチがいくつか示された。なかでも112番元素の化学的研究は、相対論的効果の検証との関連で注目を集めているが、それへの取り組みがスイスのグループから紹介された。一方LBNLのグループからは、合成した目的の超重元素を反跳型質量分離装置で選択的に分離し、それを化学分離装置へと導く複合システムの開発について報告があった。GSIや理研でも同様な装置の開発を始めている。この複合システムを用いて超重元素の化学的

性質をより詳細に調べることができるようになれば、化学的研究に新たな展開が期待できる。原子力機構からは、わが国の核化学グループで進めている104番元素ラザホージウムの溶液化学に関する詳細な報告があった。

世界的に見ても限られた研究所でしか行えない貴重な実験で得られた最新の成果が多数報告され、充実したシンポジウムであった。

Actinides and the Environment: A Paradigm for Interdisciplinary Research (#306)

臼田重和（日本原子力研究開発機構）

本シンポジウムは、カリフォルニア大学の Prof. Heino Nitsche と原子力機構（日本原子力研究開発機構）の吉田善行氏が主に企画した無機化学分野（Area 6）のうちの一つ（#306）である。口頭発表は12月19日ハイアットリージェンシーで、ポスター発表は前日の18日シェラトンワイキキで行われた。ここでは、印象に残った口頭発表を中心に紹介する。

米国ワシントン州立大の S. B. Clark 女史は、アクチノイドの環境への汚染の源と汚染された土壌の効果的な修復を明らかにするために、化学の修得、土壌科学及び核科学を含む学際的なアプローチが必要であり、フォールアウトと兵器級のアクチノイドの同位体比を示しながら、米国の二つの核施設から陸域土壌へのアクチノイドの分配に関する研究を発表した。

独国の T. Fanghaenel 氏は、鉱物表面におけるアクチノイド化学種に関する最近の知見と題する発表で Cm(III) のサファイア単結晶への吸着を調べた。東北大の 枋山氏は、放射性廃棄物地層処分安全評価の観点から、金属イオンによる腐食物質との錯生成における多様性を理路整然と講演した。これらは環境における極微量アクチノイド化学種の研究に役立てることができる。

米国 PNNL の W. Um 氏は、堆積物への放射性核種の除去と題する講演で、ネバダ核実験サイトからの沸石（Zeolite）化した凝灰岩へのスロンチウム吸着はイオン半径に依存するが pH には依存しない、ハンフォードサイトの U(VI) は分離したウラン相及び非結晶性の共沈として存在していたと報告した。LANL の M. Neu 氏は、酸化物鉱石

によるプルトニウム酸化/還元及び表面錯形成を、またカリフォルニア大学の R. E. Wilson 氏は、鉄鉱石からの風化物である針鉄鉱（Goethite）とのプルトニウム、ウラン及びネプツニウムの反応を調べた。また、韓国 KAERI の Won-Ho Kim 氏は、ナチュラルアナログ研究に基づき、ウランの長期環境挙動を評価していた。

原子力機構の若手研究員尾崎氏は、時間分解レーザー蛍光スペクトロスコピーによる3価アクチノイドの微生物への会合を、また松永氏は表面水中のアクチノイドの移動におけるコロイド物質への会合の役割を発表し、今後の展開が期待される。

ポスターセッションでは、国立環境研の土井女史が東アジアにおける大気圏の ^{210}Po の分布や挙動を調べた発表や、明治大学の太田・佐藤氏が奥多摩地方の水中の $^{228}\text{Rn}/^{226}\text{Rn}$ 放射能比が1.0～2.9であることを突き止め、その相関から水の年代測定ができるとした発表が新鮮であった。

なお、筆者は“核不拡散のための日本の環境放射性核種分析”と題し、保障措置のための極微量環境試料分析の開発、CTBT 検証に係わる放射性核種監視の現状、極微量分析の応用例を紹介した。PACIFICHEM 2005 は、何がいつどこで発表されるか調べるだけでも大変な、参加者が一万人を超えたという巨大な国際会議であった。一方、懐かしい仲間と会う機会に恵まれ、親交を深めることができた。日本や米国で例年にない異常寒波に見舞われていると報じられている中で、改めてハワイはアロハシャツが礼服という常夏の美しい島と実感することができた。



映画“ジェラシックパーク”や“ゴジラの舞台となった、オアフ島北東部にあるクアロア牧場

3. 第15回放射化学国際会議 (15th Radiochemical Conference)

三頭聡明 (東北大学金属材料研究所 附属量子エネルギー材料科学国際研究センター)

標記の会議 (右図にロゴマークとセッション構成。ホームページより) は、チェコ共和国の北西ボヘミア地方にある温泉観光保養地 Mariánské Lázně で4年ごとに開催されるもので、2006年は4月23日(月)から4月28日(土)にかけて、観光中心の中央公園周囲約1 kmに会議場と参加者が滞在するホテルが並ぶ立地を利用して開催された。チェコをはじめ東欧諸国からの参加者が多く、ロシア、ドイツ、フランス、北米、南米、アジア・オセアニア、アフリカ等世界全域の39カ国から総計235人、日本からも7人(JAEA(小山、小澤)、電中研(塚本)、京大(高宮)、東京農工大(川端)、東北大(大槻、三頭))が参加した。

会場のカジノカンファレンスセンターは、1階のレセプション等に使用するメインホール(Marble Room)をはさんだ2室(Red RoomとMirror Room)で口頭発表、2階でポスター発表が行なわれ、いつも満席状態ながらもインターネットも利用できた。

研究発表のほかに、初日のレセプション、毎日の午前・午後のケーキ付きのコーヒブレイク、ビールが無料の毎日のランチ、夜の部ではクラシックコンサート、カンファレンスディナー(下の写真。小生撮影。右から大槻、高宮、小澤、小山、塚本の各氏)、社交ダンスパーティ、公園での交響詩モルダウに合わせた噴水ショー等のお楽



しみプログラムも盛り沢山であった。

研究発表は、プレナリーセッション(口頭6件)、核環境化学(口頭22件、ポスター24件)、放射化学分析(口頭22件、ポスター31件)、アクチニド・超アクチニドの化学(口頭8件、ポスター10件)、放射線化学(口頭9件、ポスター4件)、RIの製造・利用(口頭17件、ポスター5件)、分離化学(口頭21件、ポスター21件)、核燃料サイクル・放射性廃棄物(口頭20件、ポスター16件)、核医薬学(口頭7件、ポスター6件)の8つのセッションに放射化学教育(パネル討論)で、口頭とポスター発表はほぼ同数の構成であった。^{*1} 東欧諸国、ドイツ、ロシア等では、口頭発表は大学院生の訓練と考えている節もあり、放射性廃棄物と核医学・薬学のセッションでは、複数の「ここまで進めばPh. Dがとれる。」と宣言する微笑ましい発表もあった。

女性研究者の参加が多いのも特徴で、講演の8割を若手女性研究者が占めるセッションもあった。特に、核環境化学、放射化学分析、放射性医薬品用のRI製造・分離の分野への参画が顕著で、東欧の「化学」、「核・放射化学」の伝統に支えられた女性の貢献は大変印象に残った。ウクライナのキエフから両親と一緒に参加した女子大学院生(MC1。小澤氏撮影の右写真)は、列車で36時間かかると、屈託のない笑みを見せ、ポスターを抱えて元気に帰っていった。



私はアクチニド・超アクチニドと核燃料サイクル関連の発表を中心に聴講した。そのなかでは、ドゥブナのZvara(「One-atom-at-a-time chemistryとBulk property」と現バークレイのDullmann(「SISAKを利用するRfの化学」)の二人の最先端の研究発表を聞いたことは幸いであった。個人的には、Dullmannの発表がBest Presentation賞である。核燃料サイクル関連では、Ln(III)/An(III)群分離、廃棄物処理・処分に関連する発表が多く、米国のエネルギー政策転換を反映するUREX(未だ概念設計の段階にあるUranium Extraction Plus)を想定した発表(オレゴン州立大のPaulenova)、超臨界

抽出に関する発表 (KRI の Shafikov) も、先進燃料サイクルの動向を示すものとして印象的であった。

しかし、必ずしも主催者の責任とは言えないが、会議の運営面で口頭・ポスターともにキャンセルが多く (殆どがロシア人、特にアクチニドのポスターでは10件中9件)、プログラム変更が相次ぎ、聴講を期待していた講演で聞くことができなかったものもあり、少なからざるストレスとなった。

第3日目には朝から、火山・鉾山地帯の Karlovy Vary から Locket, Jachymov へのバス旅行を楽しんだ。キュリー夫妻によって、この地方の Joachimsthalers 産出のピッチブレンドからラジウムが分離されたことが、放射化学・原子力科学の嚆矢となったことはあまりにも有名である。残念ながら人数の関係で鉾山跡の見学はできなかったが、放射能泉を利用した大規模な温泉療養施設を見学した。帰りには Plsen のビール工場に立ち寄り、予想通り2時間遅れで Beer Party が行われた。ビールと料理 (夕食) は文句なしに旨かったが、予定時刻を大幅に超過してホテルに帰着したのは午後11時過ぎであった。

時刻にルーズ等の日本人が苦手とする社会主義時代の慣習を随所に感じはしたが、古き良きヨーロッパの伝統も色濃く伺われ、東欧ペースで優雅にゆったりと運営された感慨深い会議であった。

*1. 発表件数は最終プログラムによる。キャンセルの総数は不明。

4. International Conference on Application of Radiotracers in Chemical, Environmental and Biological Sciences (ARCEBS06)

榎本秀一 ((独) 理化学研究所仁科加速器研究センター)

International Conference on Application of Radiotracers in Chemical, Environmental and Biological Sciences (ARCEBS06)は、2006年1月23～27日まで、インド・コルカタ Kolkata の Saha Institute of Nuclear Physics で行われた。

学会が行われた Kolkata は、インド東部のベンガル地方に属し、かつてはカルカッタ Calcutta と呼ばれ、イギリス統治時代は首都であった古都で、

2001年より、ベンガル語の Kolkata と呼ばれるようになった。

ARCEBS06 は、Saha Institute of Nuclear Physics の Prof. Susanta Lahiri を中心により開催された。世界16カ国から200名以上の参加があり、招待講演19件、一般93件の発表が行われた。わが国からの参加は、京都大学原子炉実験所の柴田誠一教授と (独) 理化学研究所の羽場宏光博士と著者の3名であった。

一般講演は、Oral と Poster を合わせて、化学50件、環境38件、生物25件の多岐にわたる分野について意欲的な発表と活発な討論が行われた。インドという地理的ファクターもあり、特に Poster および Oral とともに東南アジア系の参加国の若手研究者の講演が多く含まれ、若手研究者の評価の高い講演には奨励賞も用意された。招待講演と合わせて若手研究者をエンカレッジするプログラム構成であったといえる。

招待講演では、放射性医薬品、核医学、画像診断などの発表が比較的多く、F Roesch (Universitaet Mainz, Germany) の $^{68}\text{Ge}/\text{Ga}$ ジェネレーターの講演、Gerard Krijger (TU Delft, The Netherlands) の Ho-166 を DDS により、がん治療に用いる研究、M L Thakur (Thomas Jefferson University) の核医学画像診断における各種 RI 製剤の総説講演、Meera Venkatesh (BARC, India) のインドにおける放射性医薬品の総説講演、著者のマルチトレーサー法の応用研究と複数核種同時 γ 線イメージング装置に関する総説講演など8件、環境化学では、Juerg Beer (EAWAG, Switzerland) の南極氷による地球環境変化の研究、A Chatt (Dalhousie University, Canada) の海産物の含有元素分析、Heinz Gaeggeler (Bern University and PSI, Switzerland) の小型加速器質量分析による環境資料の分析、柴田誠一先生の Fission Multitracer の環境科学研究への応用など6件、化学では、羽場宏光博士の理研と原研における超重元素研究、A Goswami (BARC, India) の Nafion-117 膜の自己拡散係数の研究、Peter Bode (TU Delft, The Netherlands) の摂動角相関測定法に関する研究など5件があった。各講演後は会場から多数の質問、コメントが寄せられ、活発な議論のうちに会を終えた。

今回の学会に参加して、学問以外の点では、当初、恐れていたインドの生活環境も生水、生野菜を食せないこと、無数に乱舞する蚊の大群以外は、至って良好な環境での会議であった。本学会のホスピタリティーは、きわめて良好であり、食事はすべてカレーではあるが、会議に供された食事はいずれも美味であった。最も印象的なことは、学会に関わったインドの人々が非常に親切だったということである。学会スタッフや Saha Institute of Nuclear Physics のアルバイト学生はいうまでもなく、他人への思いやりにあふれたインドという国の素顔に触れることができたように思う。このような素晴らしい経験をさせていただき、また学会の大成功にご尽力くださった Saha Institute of Nuclear Physics の Prof. Susanta Lahiri をはじめ、スタッフの方々に深く感謝の意を表したい。

5. 第7回環境放射能研究会

國分陽子（日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門）

平成18年3月7日から9日までの3日間、つくばにある高エネルギー加速器研究機構つくばキャンパスにおいて第7回「環境放射能」研究会が開催された。この会は毎年3月上旬に同じ場所で開催され、自然環境放射能、放射線・原子力施設環境放射能を中心に、広い意味での環境放射能研究をテーマとしている。今回の討論課題は、「モデル研究の先端」と「産業活動と環境放射能研究」であった。近年モデルシミュレーションの高度化が飛躍的に進んでいるが、これまで本研究会で多く発表されている実際の観測結果とモデルの対応は不十分である。そこで、環境放射能・放射線に係わる様々なモデルシミュレーションが紹介され、モデル確認のためにはどのような観測結果が必要なのか、また観測結果からのどのようにモデルを構築するか等について議論された。またもう一つの討論課題である「産業活動と環境放射能

研究」では、放射性廃棄物や人為的に濃度が高められた天然放射性物質（NORM）に関する研究が紹介された。

討論課題に関する依頼講演を含め口頭発表が26件、ポスター発表が34件行われた。口頭発表は一会場で行われ、すべての発表が聞けるようになっていた。一般講演は、気象学、地球科学や生物学など環境科学に関する研究から分析手法の検討、原子力施設に関連する環境放射能の研究等幅広い内容の研究が報告された。その中で多かったのが、放射性核種を様々な環境変動のトレーサーにしようとする試みである。 ^{137}Cs や ^{210}Pb を森林の侵食プロセスに、 ^7Be や ^{10}Be を大気エアロゾルの動態に、またラジウムを温泉や海水の移行に使用した研究である。それぞれの研究はある特定地域に限定された結果が多く、今後他の地域の結果を合わせ、一般的な環境動態を解明するプロセスの構築や、今回の討論課題であるモデルとの対応等、今後の発展に関する議論が行われた。

2日目には研究会で初めての若手セッションが開催された。このセッションは新たな研究者間の“リンク”を作り、さらに環境放射能研究が利用され、発展し続けていくことのきっかけとなることを目的に行われた。大学、研究機関に所属する30代の8人のパネラーが研究及び業務内容を紹介し、その後それぞれの関連性や協力の可能性等について議論された。2時間のセッション時間はあっという間に終わったが、研究者間の新たな“リンク”ができたように思われた。

近年、環境放射能研究は転換期に来ているように思われる。核実験フォールアウトに関する研究が一段落し、今回の討論課題である放射性廃棄物やNORMの環境影響、また放射性核種を利用した環境科学に関する研究等が盛んになってきた。環境放射能研究の課題は、まだまだ発展途上であり、来年の研究会では今回芽生えた若手研究者間の“リンク”、さらに他分野との連携が深まり、さらに活発な研究会になっていることであろう。

本だな

現代放射化学

海老原 充 著

化学同人 (2005.12) B5版、234 ページ、ISBN 4-7598-1044-7 本体 ¥3,000-

かつて学部4年生時代に放射化学を履修したときには、教科書は指定されず、参考書として「核化学と放射化学」¹があった。しかし学部の学生には高度で大部すぎ、試験勉強は同タイトルの学部向け教科書²を使った記憶がある。試験終了後、放射化学の研究室に配属されたとき、修士1年の先輩たちが、アイソトープ手帳(日本アイソトープ協会編)をにらみながら、やがて出版される「放射化学概論」³の初版の付表を丹念に校正していたことを思い出す。データベースによると⁴、放射線技師等の資格試験の参考書として放射化学をうたう教科書を含むと、放射化学の教科書は毎年刊行されているようだが、学部向けの核化学を含む放射化学の新しい教科書は評者の知る限り久しぶりと思う。

本書は、第1章 元素・原子・同位体、第2章 原子核のいろいろな性質、第3章 放射壊変、第4章 天然放射性元素、第5章 核反応、第6章 放射線と物質の相互作用、第7章 放射線の測定、第8章 原子炉と核エネルギー、第9章 核反応を誘起するための粒子源、第10章 人工放射性元素、第11章 放射化学の分析化学への応用、第12章 放射化学の年代学への応用、第13章 放射化学の宇宙化学への応用、各章末問題付表索引、という具合で、見かけ上オーソドックスな放射化学の教科書である。学部の講義が半期で13回とすれば、計算上は一回一章でちょうど

終わることになる。しかし本書は版型もB5と大きめだが内容も後述のように濃密である。一回一章ペースでは、“大学では講義時間と同じだけの時間を自己学習する”ことを納得した学生が対象の場合を除いては、完全消化は容易でないかもしれない。将来放射化学を専門としない学生には、主要部分をピックアップするだけで十分であり、逆に放射化学を専門としようとする学生には本書を通読することで、いわゆる放射化学の専門の教科書⁵に匹敵する知識を得ることができると思う。それは以下に述べる傍注にどこまで踏み込むかによる。

このごろの日本の教科書は、スペースを大きく取り、読みやすさ、わかりやすさにたいへん気をつけている⁶。もともと大学専門科目の教科書たるもの、“正確無比を期し、文章は無味乾燥、簡潔で冗長を排し、学習者に極度の緊張を強い一字の看過をも許容すべからず”と思われていた評者の学生時代とは隔世の感がある。それは紙面の白黒比をみると明らかである。本書では、放射化学の教科書としてはおそらく初めて、ページ外側約30%を傍注スペースとして本文をいっさい記さない部分として確保し、見かけ上ゆったりとした配置をとっている。しかしこの傍注が本書の“とんでもない特徴”である。これまで放射化学の学部教育でよく使われてきた教科書では⁷、章末にコラムや休憩室のような部分をとって、本文の補

¹ G. フリードランダー、J. W. ケネディ、斎藤信房他訳「核化学と放射化学」、丸善、1962年

² 木越邦彦「核化学と放射化学」、裳華房(1981)。

³ 富永健・佐野博敏「放射化学概論」第2版、東京大学出版会(1999)。

⁴ たとえば <http://www.books.or.jp/>

⁵ C. ケラー著、岸川俊明 訳「放射化学の基礎」、現代工学社(1994)、シヨパン・リルゼンツィン・リュードベリ著、柴田誠一他訳、「放射化学」、丸善(2005)、脚注1など。いずれも訳書である。

⁶ いわゆる洋書の専門基礎教科書では、全ページカラー印刷 CD付という形式が定着しているが、日本の専門科目の教科書では、前田米蔵・大崎進「放射化学・放射線化学」改訂4版、南江堂(2002)のように2色刷りが限界のようである。高校の理科の教科書までが全ページカラーなのは大きなギャップがある。

⁷ 古川路明「放射化学」、朝倉書店(1994)や脚注3など。

足部分や、最近の話題などの紹介部分を設けていて、この部分は時間があればお話ししましょうという姿勢だった。ところが本書は、数式を含む本文への補足や用語へのこだわり、歴史的経緯、本文のさらに正確を期したいもの、クロスリファレンスのなもの、最新の成果などが膨大に傍注に書き込まれている。連鎖反応 (p.123) やランタノイド (p.154) の註釈などは20行を越え、本文10行以上に匹敵する。傍注の全体は、本文の1/4～1/3の分量になるのではなからうか。著者の“これは書きたい、伝えたい、知ってほしい、誤解しないでほしい”という思い入れ、情熱がひしひしと伝わってくる。厚さは234ページの標準的な紙数の教科書だが、傍注をしっかりと追うと400ページ分ぐらいの読み応えがある。放射化学者は傍注で本書を読む悦楽を味わえよう。あるいは、“ここまで書くのならもう一步踏み込んでこれも書いてほしい”と欲求不満になるだろうか。

本書の11章以降は、著者の専門の宇宙地球化学に関する部分だが、他の教科書に比べて非常に充実している。特に元素合成や元素存在度の部分など、Anders-Ebihara⁸の著者の面目躍如たるものがある。ビッグバンや B^2FH モデルの解説は詳細で、「ヘリウムより重い元素はどのようにつくられるのか」と先週たまたま質問に来た数学の教授は、本書の該当箇所を納得していた。また様々な年代測定法や消滅核種にも詳しく、そのまま地球化学の教科書の一章に使いそうである。さらに表紙からわかるように、放射化分析についても類書より分析法の特徴から応用まで幅広く網羅している。

内容に関しては、放射性同位元素等を利用する物質科学について全然触れられていないことが大きな不満として残る。発光メスバウアー分光法や γ 線角相関、陽電子消滅、ミュオンスピン分光などはプローブ自体が放射性であり、それを生かした手法である。過去の学問ではなく将来的にも利用され続ける方法であることは疑いなく、改訂の

機会にはぜひ記述を補って頂きたい。また利用が減りつつあるとはいえ重要な手法であるラジオイムノアッセイ、昨今バブルを迎えつつあるといわれる陽電子消滅断層診断 (PET)⁹についての記述がないのは惜しい。

文章は誤解の余地のないように正確を期して書かれている。編集ミスとしては、陽子エネルギーを変えたときの $^{56}\text{Fe} + p$ 反応の質量収率についてのまったく同じグラフが図5.5と13.5にある(キャプションが少し違う)ぐらいである。誤植もないわけではないが、p.196のHubble程度で、理解を妨げるようなものはない。グラフの説明で、y軸の値が急に大きく変化するのを表す“不連続に変化する”という言い回しは¹⁰、学会等でもたびたび耳にするが、実数値の物理量の変化に対して、“不連続”という言葉を使うのに違和感を



⁸ E. Anders, M. Ebihara, "Solar-system abundances of the elements", *Geochimica et Cosmochimica Acta* (1982), 46 (11), 2363-80.

⁹ "PET 検査" は google で 62 万件がヒットした。

¹⁰ 質量数と Q_α の関係を示した本書図 3.2 の説明。

覚える評者は観念主義者だろうか。巻末の表 A.2 放射性同位元素の主要核種一覧を、Tc 以降に限らず、2 ページを 3 ページ増やしてぜひ ${}^3\text{H}$ から（できれば中性子から）にさせていただけると、参照文献としても価値が大いに増すと思う。

とにかく放射化学の教科書の種類が増えるのは非常に喜ばしい。ときどき学生から「……を勉強したいのですがよい教科書を教えてください」という質問を受ける。無機化学や有機化学、物理化学なら「ある程度の厚みがある本なら内容は、ど

れでも同じだから、見た印象と値段で決めればよい」と答えているが、放射化学ではまだそこまで選択肢は多くない。おそらく一冊を教科書にしつつ他の本を参考にとという形が続くと思われる。内容に比べて価格は抑えられており、本書はその中核になるのは確かである。教科書としてだけでなく、放射化学者には読み物としての一読をおすすめする。

久保謙哉（国際基督教大学理学科）



学位論文要録

Search for an Isomer State of ^{229m}Th with Extremely Low Energy using Alpha-Spectrometry (α 線スペクトロメトリーを用いた ^{229m}Th の極低エネルギー核異性体の探索)

菊永英寿 (金沢大学自然科学研究科物質構造科学専攻)

学位授与：金沢大学 (主査：横山明彦)
平成18年3月22日

原子核にはある程度の寿命を持つ励起状態、すなわち核異性体を持つものがある。この励起は何らかのメカニズムにより解消される。良く知られている過程は γ 線放出過程と内部転換過程であるが、さらに原子核の励起を解消する第3のメカニズムとして電子架橋過程が予言されている。この過程では電子が励起状態になり、残りのエネルギーが光子として放出される。 ^{93m}Nb (30.8 keV) 等いくつかの核異性体転移において実証が試みられたが、いずれも優勢な内部転換過程に妨害されて実験的に完全な証明は得られていない。

本研究の対象である ^{229m}Th は原子核の励起エネルギーが約3.5 eVと推定されており、一般的な原子核の準安定状態の 10^4 から 10^6 分の1程度と極端に低い励起エネルギーである。このエネルギーはトリウム原子の第一イオン化エネルギー(5.9 eV)より低いため内部転換過程が禁止され、非常に珍しい壊変過程である電子架橋過程の非常に良い実証の場として期待される。化学者の興味をひいているのは、化学状態によりこの過程の半減期が変化することが予想される点であり、電子状態の研究と関連して将来の化学的利用が期待できる。しかし、現在までに複数の研究グループによって試みられた核紫外線の検出および電子架橋過程に伴う光子の検出は α 線誘起発光等に妨



害されて成功しておらず、半減期についてはE. Browne *et al.* (2001) が実験条件から6時間以下又は20日以上と推定した報告があるだけである。そこで本研究ではこれまで誰も成功していない ^{229m}Th の崩壊信号の検出とその半減期の測定を目指した。

本研究では ^{229m}Th の崩壊信号として測定の困難な核紫外線ではなく、比較的測定が容易と考えられる α 壊変に着目した。 ^{229m}Th からの α 壊変のエネルギーは ^{229g}Th のそれに比べて大きく、半減期も短いので微弱な ^{229m}Th の α 線を分解能良く測定する技術があれば、その検出が可能であると考えられる。そこで著者は高いエネルギー分解能で α 線を測定するための線源を調製する方法を開発し、 ^{229}Ac の β^- 壊変や ^{233}U の α 壊変で製造した ^{229m}Th の探索を行なった。

(1) 高分解能 α 線源を迅速に調製する方法の開発

本研究では迅速に α 線源を調製する手法として共沈法を用いた。具体的にはアクチニド元素をサマリウムと共沈させ、アルミナ製フィルター上に薄く(数 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)マウントすることで線源調製した。その最適な共沈条件は ^{241}Am トレーサーを用いて調べた。その結果、現在よく用いられている電着線源作成法と同等以上の高収率(～95%)、高分解能(<20 keV)、均一性をもった線源を作成できる共沈 α 線源作成法を確立できた。

この方法の大きな特徴の一つは20 mL程度の溶液からでも5分程度で線源を調製できることである。これにより ^{229m}Th の α 線測定の実験は飛躍的に進展した。また、この手法は高圧電源など特別な装置を必要としないため核化学や環境放射能測定などの各分野で用いることができる。

(2) ^{229}Ac の β^- 壊変および ^{233}U の α 壊変で製造した ^{229m}Th の探索

以前、 $^{230}\text{Th}(\gamma, n)$ 反応により ^{229m}Th を製造しその α 線の検出を試みたが、ターゲットである ^{230}Th が非常に強い放射能を持ち、化学的手法では核反応生成物の $^{229m,g}\text{Th}$ と分離できないため、 ^{230}Th の α 線により $^{229m,g}\text{Th}$ の測定が妨害され ^{229m}Th からの α 線を同定できたとはいえない。そこで、反応系に ^{230}Th を含まない $^{232}\text{Th}(\gamma, p2n)$ 反応で ^{229}Ac を製造・精製して、そこから成長する $^{229m,g}\text{Th}$ を測定する実験を行った。

$^{232}\text{Th}(\gamma, p2n)$ 反応で生成する ^{229}Ac を迅速に精製するため、ターゲットである ^{232}Th や核分裂生成物を除染係数 $10^{6\sim 8}$ 程度で除去できる放射化学的手法を確立した。精製した ^{229}Ac の β^- 壊変で生成する $^{229m,g}\text{Th}$ の α 線を測定し、 ^{229m}Th を探索した。その結果、 ^{229m}Th の明確なピークは確認できなかったが、 α 線スペクトルの時間変化より ^{229m}Th の半減期は20日を越えるような長半減期では無く、数日より短いと推論された。しかし、核反応による ^{229m}Th の製造では十分な α 計数が得られず、これ以上詳しい半減期を求めることが出来なかった。

次に ^{233}U の α 壊変で ^{229m}Th を製造することを試みた。数十mgの ^{233}U を用いれば、核反応で製造できる量より多くの ^{229m}Th を製造できるので、93 mgの ^{233}U を用いて ^{229m}Th をミルクし、 α 線スペクトロメトリーを試みた。しかし、 ^{229m}Th の α 線が期待されるエネルギー領域には ^{229g}Th 由来の α 線しか確認できなかった。実験条件から、著者は ^{229m}Th の半減期を1時間以下(信頼限界 1σ)および3時間以下(同 2σ)と推定した。理論計算との比較は電子架橋過程または媒質効果が ^{229m}Th の壊変に寄与していることを示しており、核過程に対する化学状態の影響の可能性を強く示唆する成果が得られた。

代表的な発表論文

1. Search for α -decay of ^{229m}Th produced from ^{229}Ac β -decay following $^{232}\text{Th}(\gamma, p2n)$ reaction
H. Kikunaga, Y. Kasamatsu, K. Takamiya, T. Mitsugashira, M. Hara, T. Ohtsuki, H. Yuki, A. Shinohara, S. Shibata, N. Kinoshita, A. Yokoyama, and T. Nakanishi. *Radiochim. Acta* **93**, 507-510 (2005)
2. Search for the decay of Th-229m by photon detection
Y. Kasamatsu, H. Kikunaga, K. Takamiya, T. Mitsugashira, M. Hara, T. Nakanishi, T. Ohtsuki, H. Yuki, W. Sato, H. Yamana, Y. Ohkubo, S. Shibata, Y. Kawase, and A. Shinohara. *Radiochim. Acta* **93**, 511-514 (2005)