

放射化学ニュース

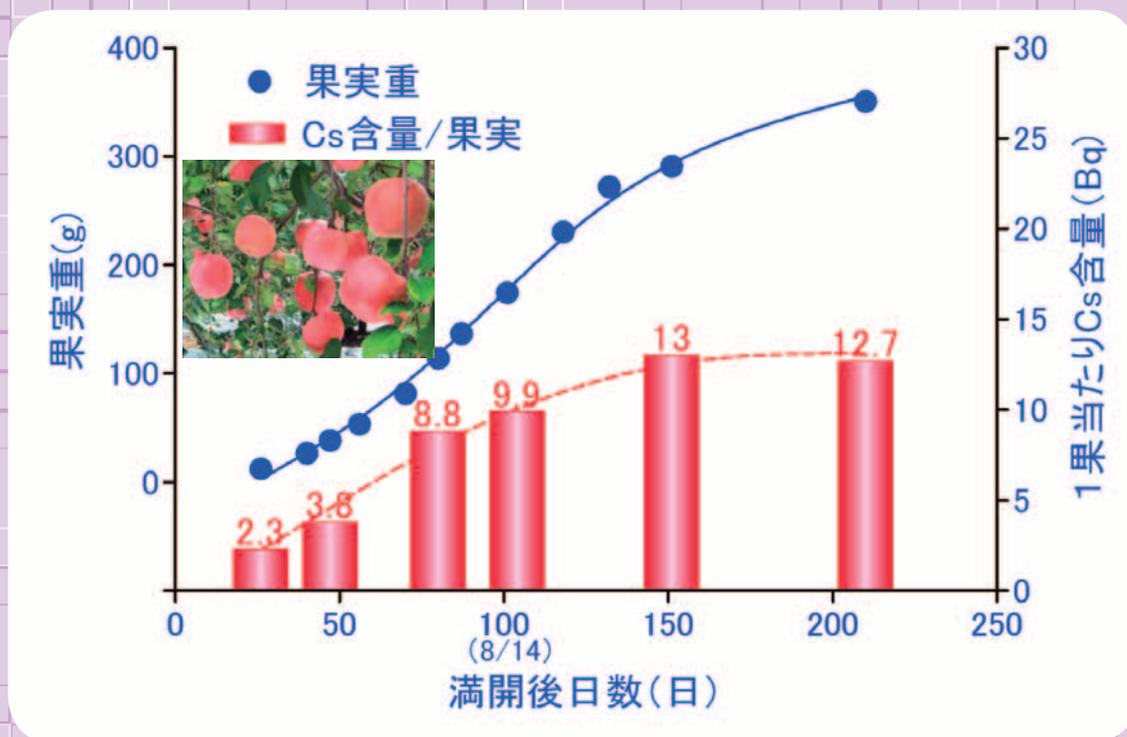
第26号

解説

従来よりも短い ^{146}Sm 半減期の測定結果と ^{146}Sm - ^{142}Nd を用いた太陽系年代に及ぼす影響／陽子過剰原子核で観測された様式の核分裂／ TiCl_4 ルイス酸による金属内包フラレンの迅速分離法

特集

福島問題 福島の果樹、この1年／原子力機構の環境修復の取り組みに参加して／環境放射線分布測定用ガンマカメラの開発



日本放射化学会

The Japan Society of Nuclear and Radiochemical Sciences

放射化学ニュース

第 26 号

平成 24 年 (2012 年) 10 月 22 日

目次

解説

1. 従来よりも短い ^{146}Sm 半減期の測定結果と ^{146}Sm - ^{142}Nd を用いた
太陽系年代に及ぼす影響 (木下哲一・中西 孝・横山明彦) 1
2. 陽子過剰原子核で観測された様式の核分裂 (西尾勝久) 9
3. TiCl_4 レイス酸による金属内包フラーレンの迅速分離法 (秋山和彦) 17

特集

福島問題

1. 福島の果樹、この 1 年 (佐藤 守) 21
2. 原子力機構の環境修復の取り組みに参加して (吉川英樹) 32
3. 環境放射線分布測定用ガンマカメラの開発 (田所孝広) 36

学位論文要録

1. 加速器施設において生成する放射性エアロゾルの生成機構と挙動 (長田直之) 43

トピックス

1. IAEA Japan Proficiency Test (大浦泰嗣) 45

追悼文

1. ローランド先生を偲んで (富永 健) 47
2. Attila Vértes 先生を偲んで 50

施設だより

1. 理研 RI ビームファクトリーの被害状況と震災対応 (羽場宏光) 52
2. 東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターの被災状況と現状 (涌井崇志) 56

学会だより	63
-------	----

研究集会だより

国内

第 51 回 核化学夏の学校（箕輪はるか）	65
-----------------------	----

海外

1. ICRS-12 に参加して（関本 俊）	68
2. IRPA-13 に参加して（関本 俊）	70
3. MARC-IX に参加して（大槻 勤）	73
4. NRC-8 に参加して（二宮和彦）	75

情報プラザ（国際国内会議）	76
---------------	----

APSORC 準備状況（永目諭一郎）	77
--------------------	----

賛助会員リスト

広告

表紙の説明

放射能汚染初年度のリンゴ“ふじ”の生育期における果実中の放射性 Cs の挙動を検証した。果実中 Cs 濃度は幼果では高濃度を示したが、以後完熟期まで経時的減衰傾向を示した。果実当たり Cs 含有量は着色開始期までは果実肥大に伴って高まったが、着色開始後の成熟期では果実肥大に係わらず一定量で推移した。このことから、リンゴ“ふじ”では成熟期の放射性 Cs の果実への移行は限定的と推察された。これは、10 月以降の果樹では、貯蔵養分蓄積期に入るため、放射性 Cs も主として枝などの貯蔵器官へ移行したためと推察される。

解 説

従来よりも短い ^{146}Sm 半減期の測定結果と ^{146}Sm - ^{142}Nd を用いた 太陽系年代に及ぼす影響

木下 哲一 (清水建設(株)技術研究所)
中西 孝 (金沢大学学際科学実験センター)
横山 明彦 (金沢大学理工研究域)

1. はじめに

サマリウム-146は、元素の成り立ちにおいて中性子捕獲では作られないp核の一つで、その半減期が太陽系形成や惑星の分化における“時計”として利用されている。 ^{146}Sm はその寿命ゆえ、現在の太陽系には存在しないが、 ^{142}Nd 同位体存在量とSm存在量の相関関係が隕石中に発見され、消滅核種の ^{146}Sm が過去に存在していた証拠となっている。SmとNdはわずかに岩石との相性が異なり、岩石の溶解や固化により分化が起こる。 ^{146}Sm が存在していた間に分化が起こると、 ^{146}Sm は ^{142}Nd に壊変するのでネオジムに同位体異常が見られる。ネオジムの同位体異常は地球や月の岩石、様々な隕石などの中に見つかっている。同位体異常の測定によりこれらの固化年代が得られ、現在までに多数の研究が行われている。

^{146}Sm の半減期はこれまで1953年から1987年の間に4回の測定が行われ、現在ではFriedman *et al.*とMeissner *et al.*による 103 ± 5 Myが採用されている。しかしながら、 ^{146}Sm の半減期は ~ 50 My、 74 ± 15 My、 103 ± 5 Myと変遷してきており、過去の半減期の経緯が及ぼす ^{142}Nd - ^{146}Sm 年代への影響ははかり知れない。一般的に長寿命核の半減期 $T_{1/2}$ は、放射能 A と原子数 N の関係 $A = \lambda N = \ln 2 / T_{1/2} \times N$ (λ は壊変定数)より計算を行う。実際は放射能と原子数の絶対値の測定には標準試料が必要で、核種によっては入手困難な場合もある。 ^{146}Sm の場合は ^{147}Sm が ^{146}Sm と同様に α 壊変する天然放射性長寿命核種なので、 ^{147}Sm と比較することで $A_{146}/A_{147} = \lambda_{146}/\lambda_{147} \times N_{146}/N_{147}$ に基づいて、放射能比 A_{146}/A_{147} と原子数比 N_{146}/N_{147} の測定を行

えば、 ^{146}Sm の半減期が ^{147}Sm の半減期と相対的に算出可能になる。しかしながら、放射能の測定に関してはそれほど困難なことはないが、原子数を質量分析により測定すると同重体の干渉を受ける。我々のグループは α 線測定による $^{146}\text{Sm}/^{147}\text{Sm}$ 放射能比と加速器質量分析による原子数比の測定を行い、 ^{146}Sm 半減期が現在採用されている値よりも34%短い値を決定し、Science誌に投稿して2012年3月30日号に掲載された。半減期が短くなることは、年代学上の物差しの長さが変わることを意味し、新たな地球・月・火星の ^{142}Nd - ^{146}Sm 年代を与える結果となったのでそれについて紹介する。また、この研究は ^{146}Sm の製造と放射能測定は日本、加速器質量分析(AMS)はアメリカ、解析はイスラエルで行われたが、 $^{146}\text{Sm}/^{147}\text{Sm}$ 原子数比をAMSで測定することになった経緯、本稿著者の一人(木下)が実験と解析であちこちに飛び回っていたことについても紹介する[1~7]。

2. ^{146}Sm 原子核の製造から放射能測定

^{146}Sm の半減期測定を行うに先立ち、以下の施設にて制動放射線、高速中性子、プロトンビームをそれぞれ ^{147}Sm 濃縮同位体ターゲットに照射し、3つの核反応を用いて製造を行った。

1. $^{147}\text{Sm}(\gamma, n)^{146}\text{Sm}$ 反応

東北大核理研 電子ライナック

2. $^{147}\text{Sm}(n, 2n)^{146}\text{Sm}$ 反応

原研大洗 材料試験炉JMTR

3. $^{147}\text{Sm}(p, 2n\epsilon)^{146}\text{Sm}$ 反応

阪大RCNP AVFサイクロトロン

それぞれの照射を行うにあたり東北大核理研・大槻氏、東北大金属材料研・三頭氏、阪大

院理・高橋氏にお世話になった。制動放射線の照射では (γ, n) 反応に競合して (γ, p) 反応で ^{146}Pm が生成する。中性子照射ではターゲットに ^{147}Sm の濃縮同位体を使っていると雖も、微量に含まれる他の同位体への中性子捕獲によりおびただしい量の ^{154}Eu や ^{155}Eu などが生成する。これらは β 放射性核種であるが、 α 線測定においてバックグラウンドとなるので、化学的に Sm の精製を行った。また、 $(p, 2n\epsilon)$ 反応ではプロトン照射により生成する ^{146}Eu を照射後に分離し、 ^{146}Sm への壊変を待つことで $^{146}\text{Sm}/^{147}\text{Sm}$ 比を他の2つの核反応よりも大きくすることが可能である。

これらの手法で製造した $^{146}\text{Sm}/^{147}\text{Sm}$ 混合試料より 20-100 μg 相当の Sm を取り分け、アンモニア水を加えて $\text{Sm}(\text{OH})_3$ として沈殿させ、メンブランフィルター上にろ過することにより、薄膜線源を調製した (Kikunaga *et al.*, 2010)。この薄膜線源をシリコン半導体検出器を用いて α 線測定を行い、図1に示した ^{146}Sm と ^{147}Sm のピーク面積より $^{146}\text{Sm}/^{147}\text{Sm}$ 放射能比が得られた。

3. 質量分析—TIMS から AMS へ

$^{146}\text{Sm}/^{147}\text{Sm}$ 放射能比の測定を行った薄膜試料を塩酸に溶解し、タングステンのダブルフィラメントにマウントし、旧東大海洋研の表面電離型質量分析計 (TIMS) を用いて $^{146}\text{Sm}/^{147}\text{Sm}$ 原子数比の測定を行った。しかしながら、Nd が検出された。フィラメントに流す電流を増やして Nd のイオン化の抑制、超高純度試薬と Ln レジンを使って Nd 除去の化学分離など、Nd の干渉を抑えるためにあらゆる手段を試したが、何をどうやってもやはり Nd が検出された。146/147 原子数比をとりあえず測定し、 ^{146}Sm 半減期 1.4 Gy の上限値は得たが、この半減期では現在の太陽系の年齢 4.5 Gy では消滅せず天然に存在する核種となり、矛盾が生じる。TIMS による測定はこれで断念せざるを得ず、関係者は共に落胆した。

そんな中、かつて Pu-244 の AMS で共同研究を行ったことのあるイスラエル・ヘブライ大学の Paul 教授に $^{146}\text{Sm}/^{147}\text{Sm}$ 比の AMS による測定を打診した。一般的に AMS はタンデム型静

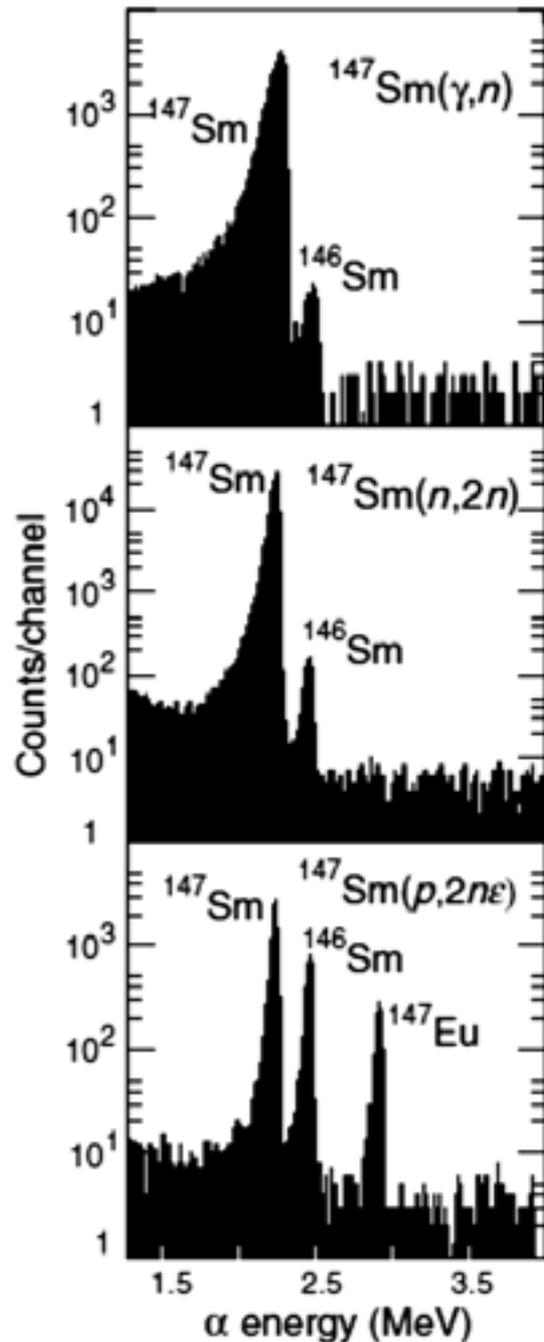


図1 $^{147}\text{Sm}(\gamma, n)$ ^{146}Sm 、 $^{147}\text{Sm}(n, 2n)$ ^{146}Sm 、 $^{147}\text{Sm}(p, 2n\epsilon)$ ^{146}Sm 反応で製造した $^{146}\text{Sm}/^{147}\text{Sm}$ 試料の α スペクトル

電加速器を利用し、負イオンの形成、加速、多価の正イオンに荷電変換、再加速、分光のステップを踏み、目的としないイオンは磁場や電場で分離する。Cs スパッタにより単原子の負イオンが作られない場合は、フッ化物や水素化物、酸化物などの分子イオンを利用する。Sm

の場合は負イオンを作れないことはないが、その強度は弱い。仮に加速できたとしても、原子番号が大きくなるにつれて同重イオンとの阻止能の差が相対的に小さくなるので、静電加速器ではエネルギーが足らず分光が困難になる。これらの打開策として検討されたのが、アメリカ・アルゴンヌ国立研究所にて ECR (Electron Cyclotron Resonance) イオン源、超伝導ライナック (ATLAS)、ガス充填電磁石 (GFM)、位置検出器 (PGAC)、電離箱 (IC) を使った AMS である。アルゴンヌで加速器実験を行う場合でも、1 回の実験を行うごとに課題申請に採択されなければならない。宇宙科学と元素合成の観点での背景と研究の意義、大まかな実験手法、コンピューターシミュレーションを用いた ^{146}Nd と ^{146}Sm の分離の見積もり、得られた半減期で何を考えようとしているのかを記述し、課題申請を行った。関係者の協力の甲斐あって複数回課題採択され、2007 年から 5 カ年計画で実験がスタートした。

4. 加速器質量分析—測定とひとときの休憩

加速器質量分析ではいかなるイオン源を利用する場合でも、ビームを強く出すために、イオン化に適した化学状態に試料調製を行わなければならない。本研究では ECR イオン源を利用するので、金属状態に還元した Sm をイオン源に装填した。

$^{146}\text{Sm}/^{147}\text{Sm}$ 原子数比の測定においては、加速器の立ち上げからすべてを我々のグループで計画する。ECR イオン源を用いて得られる Sm の電荷分布は図 2 に示すように 20-30 価の生成率が高い。AMS において目的イオンは加速器の調整に十分な強度がないために、磁場内

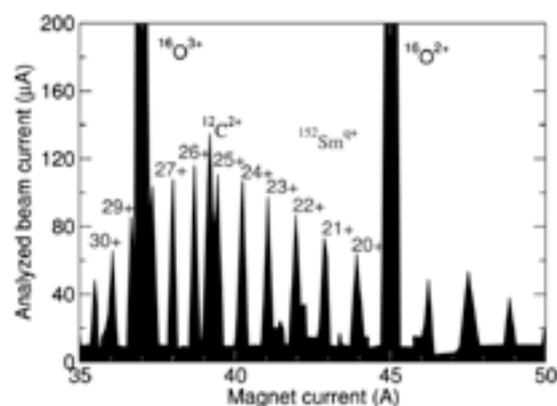


図2 ECR イオン源で生成される $^{152}\text{Sm}^{9+}$ の電荷分布

で同じ軌道半径のある代替ビーム (パイロットビーム) を使って加速器の調整を行う。本試料の測定でパイロットビームに使う元素がイオン源内にメモリー効果として残っていたとしても GFM で軌道が大きく異なるので、Sm よりもできる限り原子番号が離れた気体の元素を利用することが好ましい。本研究で用いたイオンを表 1 にまとめた。22 価のイオンである $^{146}\text{Sm}^{22+}$ には $^{80}\text{Kr}^{12+}$ がパイロットビームとして利用可能であり、 $^{80}\text{Kr}^{12+}$ を使った加速器の立ち上げから始まった。ビームラインを図 3 に示す。引き出されたイオンはマグネットにより目的とする質量電荷比 m/q を持つイオンが選別され、プリバンチャーとバンチャーでバンチ圧縮された後に超伝導ライナックにより 22 価のイオンは 1 GeV にまで加速される。

一方、 ^{146}Sm -AMS では $^{146}\text{Sm}/\text{Sm}$ 比が既知の標準試料が入手不可能である。例えば ^{36}Cl -AMS では $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ 比が既知の標準が販売されており、 ^{36}Cl 計数率/ ^{35}Cl 電流値比を標準と比較することで試料中の目的核種の割合を測定するが、

表 1 ^{146}Sm -AMS で利用したイオン一覧

イオン	利用目的
$^{80}\text{Kr}^{12+}$	$^{146}\text{Sm}^{22+}$ のパイロットビーム (加速器調整用)
$^{146}\text{Sm}^{22+}$	$^{146}\text{Sm}^{22+}/^{147}\text{Sm}^{22+}$ 比測定の目的イオン
$^{146}\text{Nd}^{22+}$	$^{146}\text{Sm}^{22+}$ の同重イオン
$^{147}\text{Sm}^{22+}$	$^{146}\text{Sm}^{22+}/^{147}\text{Sm}^{22+}$ 比測定の目的イオン
$^{152}\text{Sm}^{23+}$	$^{146}\text{Sm}^{22+}$ のパイロットビーム ($^{146}\text{Sm}^{22+}/^{147}\text{Sm}^{22+}$ 輸送効率測定用)

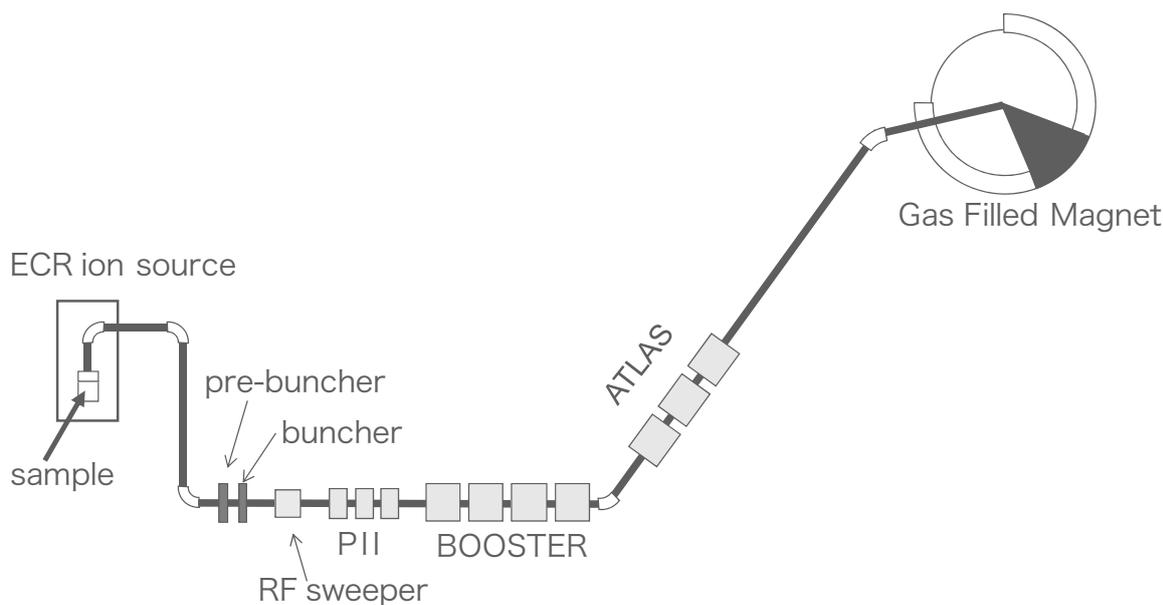


図3 アルゴンヌ ATLAS (Argonne-Tandem-Lineac-Accelerator-System) のビームライン

^{146}Sm -AMS の場合は標準との相対比較が不可能である (Sasa et al., 2010)。また目的イオンを磁場で選別しているため、同じ m/q を持つイオンしか加速されない。また加速器は $^{80}\text{Kr}^{12+}$ で調整されているので m/q が $^{80}\text{Kr}^{12+}$ から大きく離れるとライナックでのビームの通りが悪くなる。本研究では、 $^{146}\text{Sm}^{22+}$ 、 $^{147}\text{Sm}^{22+}$ 、 $^{152}\text{Sm}^{23+}$ を順次切り替え、ビームラインの様々な場所で $^{147}\text{Sm}^{22+}/^{152}\text{Sm}^{23+}$ 比に変化がないことを確認した上で、 $^{146}\text{Sm}^{22+}$ を PGAC-IC でイオンカウンティング、 $^{147}\text{Sm}^{22+}$ はファラデーカップで測定を行った。

特に $^{146}\text{Sm}^{22+}$ の測定については同重体の ^{146}Nd との分離が重要な鍵となる。 $^{146}\text{Sm}^{22+}$ と $^{146}\text{Nd}^{22+}$ の分光は GFM を用いて行った。GFM 中では、荷電粒子がガス中を通過するとイオンはガスとの衝突により一定の平均電荷を取り、阻止能に従って減速しながら、磁場で軌道が曲げられる (図4)。そして最終的に PGAC で位置の測定、その後方の IC で dE/dx 測定を行い、 ^{146}Sm と ^{146}Nd の分光を行った (図5)。 ^{146}Sm と ^{146}Nd は原子番号が2つ離れていることが幸いし、際どい分光が成功したのだろう。先に述べた GFM 手前のファラデーカップによる $^{147}\text{Sm}^{22+}$ の測定と GFM 後方の PGAC-IC による $^{146}\text{Sm}^{22+}$ の測定

から $^{146}\text{Sm}/^{147}\text{Sm}$ 原子数比が得られた (Kinoshita et al., 2007; Kinoshita et al., 2008; Kinoshita et al., (in press))。

その結果、放射能比とこれまで採用された半減期から予想される $^{146}\text{Sm}/^{147}\text{Sm}$ 原子数比よりも測定値が30%ほど小さくなった。 $^{152}\text{Sm}^{23+}/^{147}\text{Sm}^{22+}$ 比よりもビームの輸送効率を比べても致命的な問題は見られなかった。ファラデーカップの位置に Si 検出器を置いてエネルギー測定による $^{147}\text{Sm}^{22+}$ ビームに含まれる不純

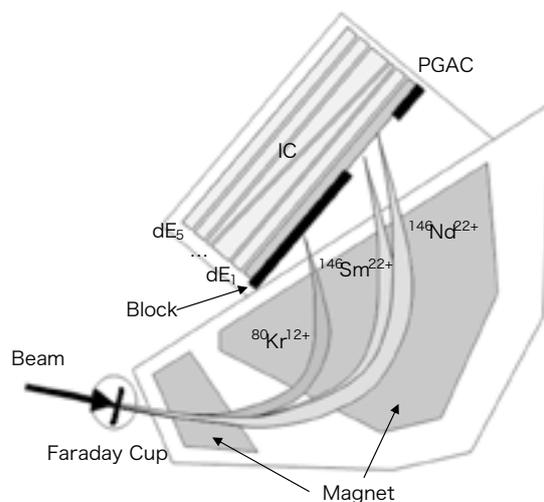


図4 ガス充填電磁石 (GFM) の模式図

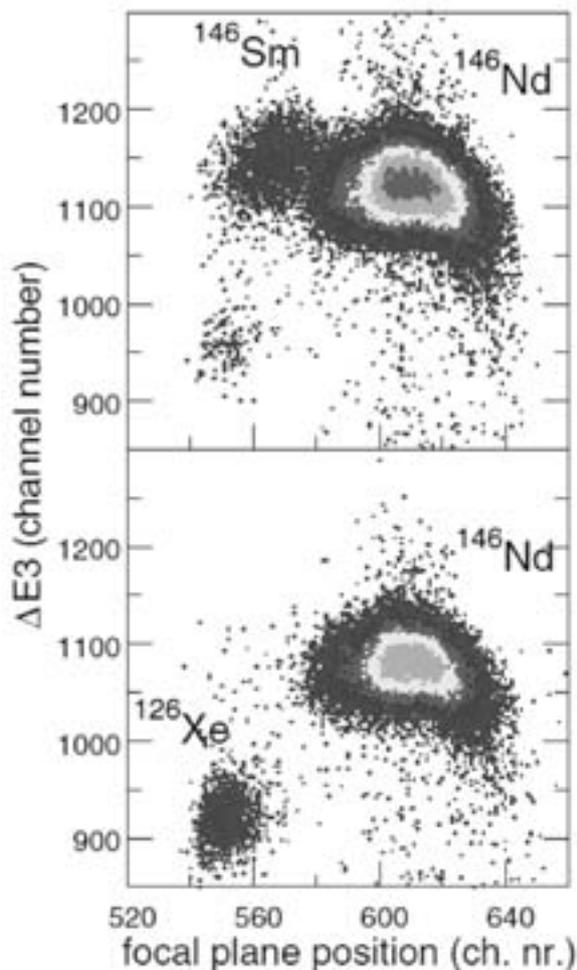


図5 (n,2n) 反応で製造した ^{146}Sm 試料の検出位置 $\cdot dE_3$ スペクトル (上) と未照射の ^{146}Sm を含まない天然 Sm 未照射試料 (下)

物と $^{146}\text{Sm}^{22+}/^{146}\text{Nd}^{22+}$ のフラットトップのチェック、測定器のデットタイム、GFMの入り口から検出器までの輸送効率のチェックを行っても、何一つ問題は見られなかった。 $^{147}\text{Sm}^{22+}$ をRFスイーパーで定量的にビーム量を落として、 $^{146}\text{Sm}^{22+}$ と同様にPGAC-ICでイオンカウンティングを行っても、同じ結果が得られた。

アルゴンヌでのAMSは1週間の試料調製と7-10日間のビームタイムで計3週間弱の実験で、ビームタイム中はシフトを組んで24時間体制で対応するが、実際は、予定通りに順調に進んだことがなく、前の週の実験中の火事によるビームタイムの短縮、加速器の表面汚染による停止と液体ヘリウム不足によるオーバーヒート、ECRイオン源へのSmサンプルの挿入位置が深

すぎて試料がメルトダウンなど、いつ測定が強制終了することになってもおかしくないトラブルばかりであった。また、初めて ^{146}Sm の検出に成功した瞬間は、著者を含め測定室内のすべての研究者が大騒ぎし、今となるとまるで新粒子を発見したかのような光景だった。アメリカ・アルゴンヌ国立研究所、アメリカ・ノートルダム大学、イスラエル・ヘブライ大学などからの約20名の協力者とAMSを行ったが、協力者のすべてはICRイオン源と加速器の開発者、および原子核物理の研究者で、化学に知見のある人は誰一人としていない。その一方で、アメリカでAMSを行っているにも関わらず、アメリカ人は少ない。実験中はヘブライ語、ドイツ語、スペイン語、中国語とあらゆる言語が飛び交っている。はじめの2回だけは日本人がいたが、基本的に日本人は著者の木下一人。会話のストレスはなくなりつつあったが、はじめはゆっくりと話してもらっても聞き返しても理解できなかった。これまで習ってきた英語、日本人の乱れた発音、輪読して和訳するだけの研究室ゼミ、自分の会話力の低さ、すべてを恨んだ。また、北京大学と書かれたTシャツを着ていると中国語で話しかけられ、「ニーハオ」しか理解できなかった。ビームタイム直前の週末はシカゴで日本料理を食べることもあった。前菜としてわさびを食べながらビールを飲む、味噌汁はレンゲで飲む、味は日本と同じであったがカルチャーショックも受けた。

無事すべての実験が終わった後も、測定データはアルゴンヌ、AMS実験ノートはイスラエル、放射能測定データは日本とあちこちにデータが分散している。メールでのやりとりで解析をしていたが、時間がかかりラチがあかない。データの見直しと論文の方向性を議論するためにイスラエル・ヘブライ大学にも10日間ほど滞在した。 ^{146}Sm の半減期は年代測定にも使われているので、値が変わることは物差しの長さが変わることに匹敵し、年代学への影響が大きい。すべてのデータの再チェックを行ったがやはり結果は同じで、我々は ^{146}Sm の半減期は現在使われている値よりも34%短い値の 68 ± 7 Myと結論づけ、誤差はそれぞれの測定より得

られる標準偏差によった (図6) (Kinoshita et al., 2012)。

5. 新たな ^{146}Sm 半減期と ^{142}Nd - ^{146}Sm 年代

^{146}Sm の半減期が 103 ± 5 My から 68 ± 7 My になると、太陽系誕生時 (4.567 Ga) の ^{146}Sm 存在量が変わり、それと共に ^{146}Sm - ^{142}Nd 年代も考え直さなければならない。 ^{147}Sm - ^{143}Nd 年代と ^{146}Sm - ^{142}Nd 年代が同一試料より得られ、信頼性の高いデータが、Boyet らにより選ばれている。個々の試料の ^{147}Sm - ^{143}Nd 年代を横軸に、 $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}$ 比を縦軸にプロットし、 $y = a \times e^{-\lambda t}$ でフィッティングすることにより、図7に示す $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}$ 比の時間変化が得られる。太陽系誕生は 4.567 Ga であり、このときの $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}$ 比は 2σ の誤差を含めると $0.0094^{+0.0018}_{-0.0015}$ と見積もられる。その一方で、図7においてこれらのデータと半減期を仮定した関数 (点線・破線、実線で示した) との一致は地球化学的手法によ

る ^{146}Sm 半減期の妥当性の検証となる。しかし ^{146}Sm の半減期を 68 My と 103 My とした場合に共に許容範囲内で一致しているように見られ、この検証で明確な良否の鮮明な判断はできない。

その一方で、 ^{146}Sm - ^{142}Nd 年代では凝縮が始まった太陽系誕生 (4.567 Ga) から目的物が固化するまでの時間を見積もることができ、惑星誕生の年代がその一例である。 ^{146}Sm - ^{142}Nd 年代は ^{146}Sm の寿命 τ を用いて、以下の式により見積もることができる。

$$\left(\frac{^{146}\text{Sm}}{^{144}\text{Sm}} \right)_0 = \left(\frac{^{146}\text{Sm}}{^{144}\text{Sm}} \right)_{\text{ISM}} \exp(-\Delta/\tau)$$

星間物質 (ISM) 中の $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}$ 比が時間 Δ の間に減衰することにより分化後の $(^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm})_0$ が得られ、 Δ は ^{146}Sm の半減期に依存する。これまで地球と月の岩石と火星由来の隕石より ^{146}Sm - ^{142}Nd 年代が知られている。地球、月、火

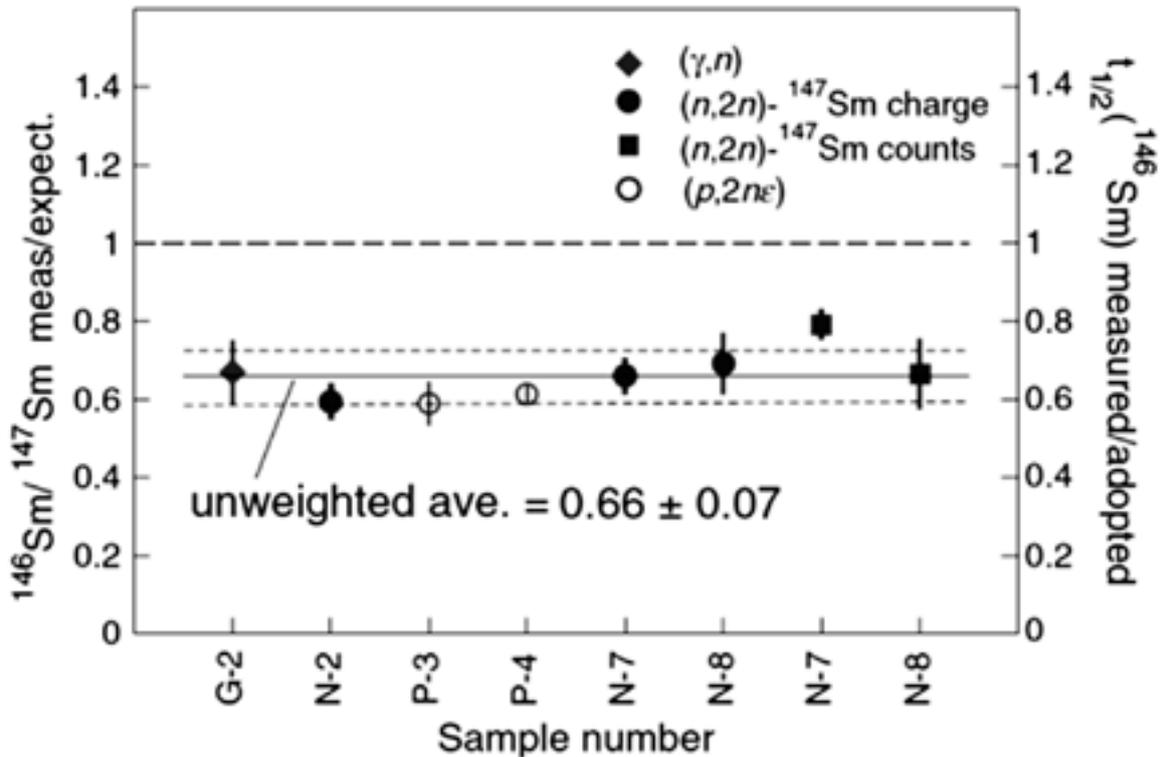


図6 個々の試料における $^{146}\text{Sm}/^{147}\text{Sm}$ 原子数比および対応する半減期の値。いずれも従来の半減期の場合に対する相対値で示した。(γ,n)、(n,2n)- ^{147}Sm charge、(p,2nε) は $^{146}\text{Sm}^{22+}$ と $^{147}\text{Sm}^{22+}$ はそれぞれ PGAC-IC とファラデーカップで測定し、(n,2n)- ^{147}Sm counts は $^{146}\text{Sm}^{22+}$ と $^{147}\text{Sm}^{22+}$ は共に PGAC-IC で測定した。なお PGAC-IC での $^{147}\text{Sm}^{22+}$ の測定にあたり、RF スーパーを用いて $^{147}\text{Sm}^{22+}$ ビームを定量的に落とした。

表2 ^{146}Sm の半減期 103 My で見積もられた ^{146}Sm - ^{142}Nd 年代と 68 My で再計算した年代

天体	太陽系形成からの時間 (My) ($T_{146}=103$ My)	太陽系形成からの時間 (My) ($T_{146}=68$ My)
地球	≤ 30	変化なし
	170	120
	287^{+81}_{-53}	205^{+54}_{-35}
月	242 ± 22	170 ± 15
	250^{+38}_{-30}	170^{+25}_{-20}
火星	8-25	~ 4
	~ 110	~ 90

星の年代に関して ^{146}Sm の半減期を 103 My とした場合と、本研究により得られた 68 My で再計算した年代を表2にまとめた。 ^{146}Sm の半減期に 68 My を用いて 175^{+25}_{-20} Ma が得られている試料については、Pb-Pb 法により 208.8 ± 2.4

Ma、 ^{147}Sm - ^{143}Nd 法により 201 ± 11 Ma が得られている。 ^{146}Sm の半減期に 103 My を用いると Pb-Pb 年代と ^{147}Sm - ^{143}Nd 年代と誤差内で一致しなかったものが、68 My を用いると誤差内で一致するようになり、 ^{146}Sm の半減期も真の値に

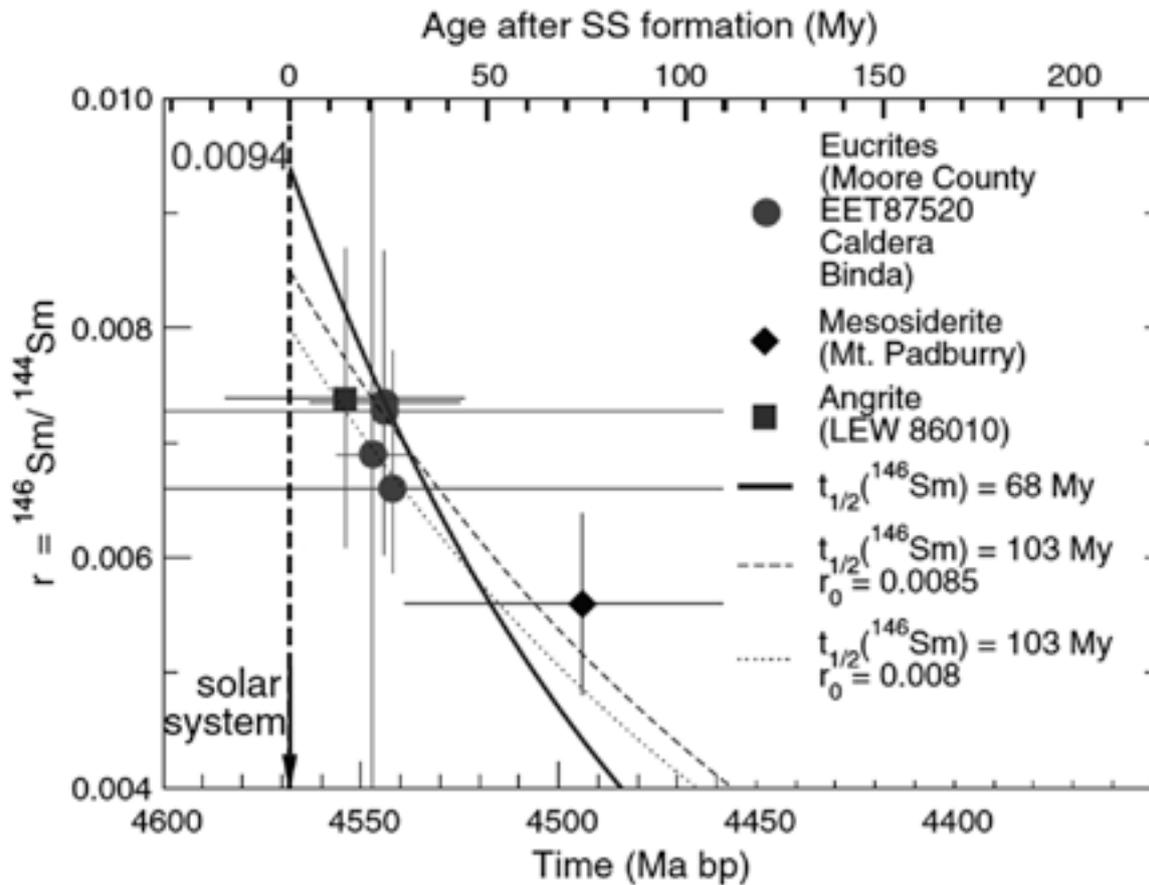


図7 いくつかの隕石試料について、 ^{147}Sm - ^{143}Nd 年代に対して得られている $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}$ 比 (プロット) と、 ^{146}Sm の半減期を仮定したときの計算値。(実線: 68 My、破線・点線: 103 My)。太陽系誕生時の $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm}$ 初期値が垂直な太破線との交点から読み取れる。

近づいたものと考えられる。その一方で、ほとんどの年代のデータについて ^{146}Sm - ^{142}Nd 年代が数千万年のずれが生じ、惑星進化の歴史を再構築しなければならない非常にインパクトのある成果になった。

6. おわりに

この研究は化学分離分析、天体核物理、原子核物理、宇宙・地球化学、加速器物理における多岐にわたる知見がなければ完成しなかった国際共同研究である。日本国内の施設でも RI 製造と放射能測定は可能であるが、ECR イオン源、重イオンを 1 GeV にまで加速できる加速器、GFM、PGAC と IC が備わった加速器施設は世界でアルゴンヌ国立研究所の ATLAS と GSI の UNILAC しか考えられない。日本は世界的にも加速器や ICP-MS などの測定機器に恵まれており、特に、放射化学は加速器施設や測定器を一段と利用しやすい環境にいる。アルゴンヌの実験では、測定の制御には Root というシステムを使い、C++ で記述された自作のプログラムで制御するので、実験のみならず測定システムの制御に関しても研究者の助けが必要であった。これらを利用する分野を越えたつながりがあったからこそ完成した研究で、約 40 名の ^{146}Sm 実験関係者には深く謝意を示したい。2011 年 3 月の東日本大震災と福島原発事故により、放射性同位体については暗い話題ばかりであるが、この話題が幾分かの明るい兆しになることを願っている。

代表的な関連論文

- [1] Kikunaga, Y. Kasamatsu, K. Takamiya, T. Ohtsuki, H. Yuki, A. Yokoyama, T. Nakanishi, T. Mitsugashira, *App. Rad. Isot.* **67**, 539 (2009).
- [2] Kinoshita, T. Hashimoto, T. Nakanishi, A. Yokoyama, H. Amakawa, T. Mitsugashira, T. Ohtsuki, N. Takahashi, I. Ahmad, J. P. Greene, D. J. Henderson, C. L. Jiang, M. Notani, R. C. Pardo, N. Patel, K. E. Rehm, R. Scott, R. Vondrasek, L. Jisonna, P. Collon, D. Robertson, C. Schmitt, X. D. Tang, Y. Kashiv, M. Paul, *J. Nucl. Radiochem. Sci.* **8**, 109 (2007).
- [3] Kinoshita, T. Hashimoto, T. Nakanishi, A. Yokoyama, H. Amakawa, T. Mitsugashira, T. Ohtsuki, N. Takahashi, I. Ahmad, J. P. Greene, D. J. Henderson, C. L. Jiang, M. Notani, R. C. Pardo, N. Patel, K. E. Rehm, R. Scott, R. Vondrasek, L. Jisonna, P. Collon, D. Robertson, C. Schmitt, X. D. Tang, Y. Kashiv, H. Nassar, M. Paul, *J. Phys. G* **35**, 014033 (2008).
- [4] Kinoshita, M. Paul, Y. Kashiv, P. Collon, C. M. Deibel, B. DiGiovine, J. P. Greene, D. J. Henderson, C. L. Jiang, S. T. Marley, T. Nakanishi, R. C. Pardo, K. E. Rehm, D. Robertson, R. Scott, X. D. Tang, R. Vondrasek, A. Yokoyama, *Science* **335**, 1614 (2012).
- [5] Kinoshita, M. Paul, M. Alcorta, M. Bowers, P. Collon, C.M. Deibel, B. DiGiovine, S. Goriely, J.P. Greene, D.J. Henderson, C.L. Jiang, Y. Kashiv, B.P. Kay, H.Y. Lee, S.T. Marley, T. Nakanishi, R.C. Pardo, N. Patel, K.E. Rehm, D. Robertson, R. Scott, C. Schmitt, X.D. Tang, C. Ugalde, R. Vondrasek, *Nucl. Instrum. Meth. B* (in press)
- [6] Sasa, T. Takahashi, Y. Tosaki, Y. Matsushi,
- [7] Sueki, M. Tamari, T. Amano, T. Oki, S. Mihara, Y. Yamato, Y. Nagashima, K. Bessho, N. Kinoshita, H. Matsumura, *Nucl. Instrum. Meth. B* **268**, 871 (2010).

解 説

陽子過剰原子核で観測された様式の核分裂

西尾勝久 (日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター・
重原子核反応フロンティア研究グループ)

1. はじめに

Hahn と Strassmann によって核分裂が発見されて以来 [1]、70 年以上にわたってこのエキゾチックな原子核の崩壊過程が調べられてきた。理論では、発見されてすぐに Bhor と Wheeler が液滴モデルで原子核の核分裂を記述し [2]、Meitner と Frisch は質量の差から大きなエネルギーが解放されることを予測した [3]。また、Strutinsky は [4]、原子核を構成する中性子と陽子のエネルギー準位構造に由来する結合エネルギーの補正を提案し、この結果、核分裂障壁は 2 重の構造を示すことを示唆した。これは、原子核の形状異性体 [5] や、しきい値より低いエネルギー領域に現れる核分裂断面積の共鳴構造 [6] を説明するなど、画期的な概念であった。また、変形した原子核における核子の微視的な構造を理解するために、核分裂の観測が有用であることを示している。

アクチノイド原子核の核分裂を考えると、原子核を構成する中性子の数が比較的多いことから、生成される核分裂片は中性子過剰な原子核であり、このため、例えば 2 重魔法数核 ^{132}Sn の近傍核が生成される。 ^{132}Sn の閉殻性は、核分裂のしかたに大きく影響を与えていることは数々の実験事実から明らかになっている。液滴モデルでは、サドル点が質量対称な形状位置に存在することから、質量対称に核分裂すると予測するが、実際には非対称に核分裂する。説明の一つとして、閉殻性の強い核分裂片を優先的に生成するように分裂の仕方が決まる、というモデルがある。実際のアクチノイド原子核の核分裂では、核分裂収率のピークは 132 からずれているが、これは相手の原子核の結合エネルギーと、切断直後にとりうる原子核の変形度を考慮することでほぼ説明できる。いずれにしる、

切断点でのエネルギー極小値を計算すれば、質量非対称度がほぼ予測でき、これには核分裂片の殻補正エネルギーが影響している、というのが主たる考え方である。

生成される原子核の閉殻性が核分裂の仕方に影響を与える、という考え方はすべての原子核に適用できるか？これを調べるためには、 ^{132}Sn が関与せず、これと異なる閉殻の原子核が関与する核分裂を調べるのが手である。その結果を紹介するのが本解説の目的である。

我々は、 ^{132}Sn が関与しない核分裂として、陽子数が過剰 (= 中性子数が欠損) な原子核である水銀 ^{180}Hg に着目した。この原子核の陽子数 Z と N の比は、 $Z/N = 80/100 = 0.800$ であり、存在比の多い水銀の安定同位体比べて約 20 個も中性子が少ない。陽子数が過剰なことは ^{238}U の $Z/N = 92/146 = 0.630$ と比べると明らかである。ここで、 ^{180}Hg と ^{238}U の核分裂で生成される核分裂片の領域を図 1 に示す。これは、原子核の殻補正エネルギーを示したものである。 ^{180}Hg や ^{238}U が核分裂すると、これら原子核と原点を結ぶ破線に近い領域の核分裂片が生成される。 ^{238}U の核分裂片では、 ^{132}Sn に接近した原子核があり、おもに楕円で示す領域の収率が多い。 ^{180}Hg では、 ^{132}Sn は関与せず、むしろ中性子閉殻である ^{90}Zr ($Z=40, N=50$) が重要になると考えられる。この場合、 $^{90}\text{Zr} + ^{90}\text{Zr}$ のように質量対称な収率の分布になる、と考えるのがふつうである。簡単な計算を行ったのが図 2 である。これは、2 つの接触した原子核が持つエネルギーを、質量非対称度に対してプロットしたもので、 ^{180}Hg 、 ^{238}U 、 ^{258}Fm について示してある。破線は液滴モデルによるもの、実線は核分裂片の殻補正エネルギーを施した結果である。核分裂を考える際には、BG (Businaro-

Gallone) ポイント (液滴モデルのエネルギー最大値) より質量対称側にあり、エネルギーの極小値が望まれる分裂の仕方である。 ^{238}U では非対称に分裂することはこの簡単な計算からも推測できる。 ^{258}Fm は、質量対称な場所に深いエネルギー極小値を示しているが、実際に実験でもこの原子核はシャープな質量対称核分裂を示すことがわかっている。 ^{180}Hg は、 $^{90}\text{Zr}+^{90}\text{Zr}$ のように質量対称に分裂すると期待できる。実際に実験をする前は、 ^{180}Hg はこのように質量対称に分裂するだろうと、ほとんどの実験参加者は考えていた。この場合、これまでの核分裂の概念を広く適用できることが示されるはずであった。どの程度シャープな分布が現れるか、も関心事であった。

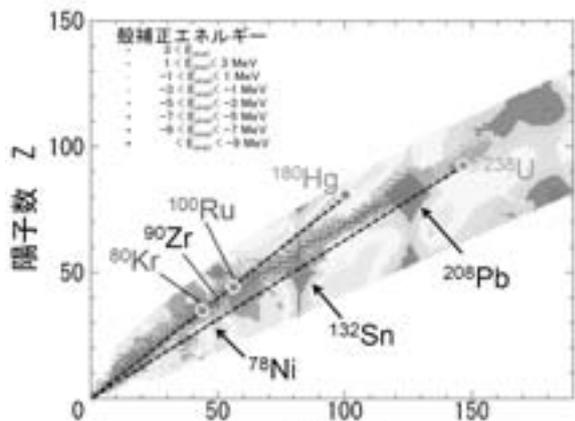


図1 原子核の殻補正エネルギー

陽子過剰原子核の低励起状態からの核分裂を観測するまでには、我々は1つの大きなブレークスルーを踏んでいた。それは、陽子過剰な鉛領域原子核において β^+ /EC崩壊遅延核分裂の決定的な証拠をつかんだことである。図3に示すように、 ^{180}Tl が β^+ /ECすると、励起状態の娘核 ^{180}Hg が生成される。この場合のQ値 (Q_{EC})は10.4MeVであり、この値は ^{180}Hg がとりうる最大の励起エネルギーである。一方、 ^{180}Hg の核分裂障壁の高さは9.81MeVである。したがって、高い状態に励起された場合、核分裂障壁を超えるかトンネリングによって核分裂が起こりうる。これを利用すれば、低励起状態からの ^{180}Hg の核分裂特性を測定できると考えた。 β^+ /

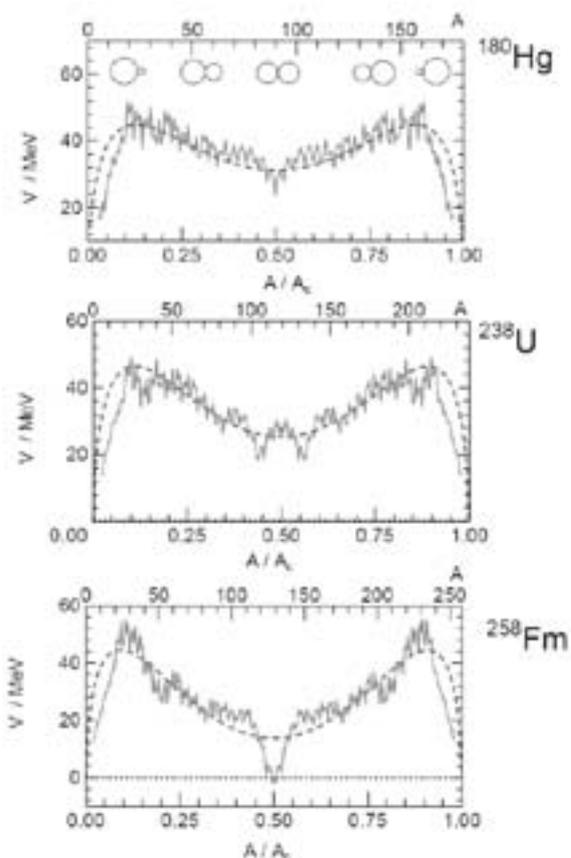


図2 分離点での全エネルギー

EC崩壊遅延核分裂は、アクチノイド原子核において10核種ほど知られている。図4に観測された核種を示す。この図は、 β^+ /EC崩壊した数に対し、いくつの核分裂が観測されるかを確率 (P_{ECDF}) で示したものである。ただし、 Q_{EC} と B_f との差を横軸にとってある。Q値が B_f と

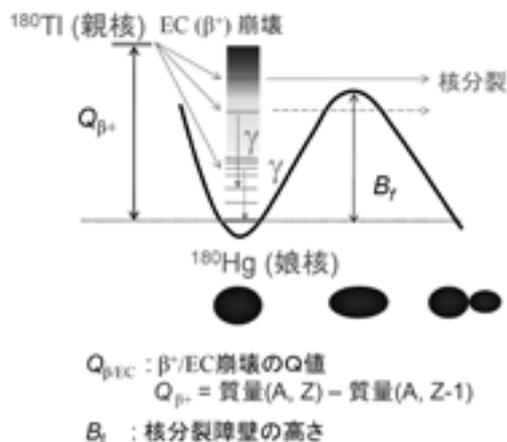
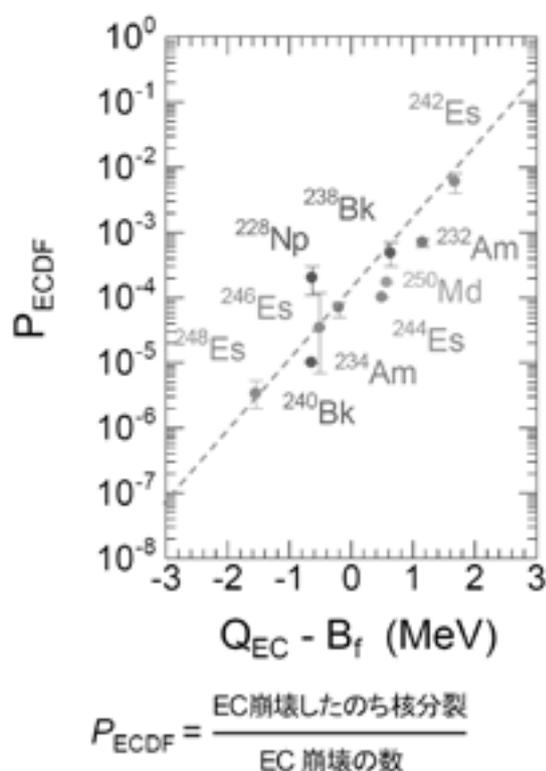


図3 β^+ /EC崩壊遅延核分裂の原理

図4 β^+ /EC崩壊遅延核分裂の原理

等しい場合であっても P_{ECDF} は 1.0×10^{-4} (0.01%) の割合でしか起こらない、極めて稀なイベントである。 Q_{EC} に対して B_f が 1MeV 低くなると、 β^+ /EC崩壊遅延核分裂を観測する確率はひと桁小さくなる。

2. 陽子過剰鉛領域原子核における β^+ /EC崩壊遅延核分裂の発見

2004年から、筆者らはドイツ・ダルムシュタットにある重イオン研究所 (GSI) の超重元素合成研究グループ (SHIPグループ) と協力してきた。これは、2004年11月から1年間、筆者が原子力留学する機会を得たことから始まる。当時、GSIは ^{238}U を標的とする反応で元素合成を開始しており、 $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ が当時の目標であった。これを機に、筆者らは ^{30}Si , $^{34}\text{S} + ^{238}\text{U}$ による合成実験を進めており、留学の後も準備と実験のためGSIで過ごすことがあった。

そのころ、当時、ルーバン・カトリック大学のAndreyevらは、陽子過剰な鉛領域原子核

の構造研究をしており、超元素合成で使うのと同じセットアップ、すなわちSHIPと呼ばれる反跳生成核分離装置を使った実験を行うためにGSIに来所していた。Andreyevらは、蒸発残留核として陽子過剰な鉛原子核を合成し、これらの α 崩壊・ γ 崩壊を観測することで異なる変形状に現れる準安定状態を調べるなどの研究を行っていた。核図表を見てもわかるように、この領域の原子核の基底状態からの崩壊チャンネルは、 β^+ /EC崩壊、と α 崩壊が主である。2007年当時、Andreyevらは $^{56}\text{Fe} + ^{141}\text{Pr}$ の核融合・蒸発反応で ^{194}At (3n蒸発チャンネル)を合成していた。スロバキア出身の共同研究者がデータ解析をしていたところ、わずかであるが大きなパルスが観測された。その頻度は、86,000の α 崩壊事象を観測した中で66個程度であった。GSIのUNILAC加速器からのビーム構造は、5msのBeam-ONと15msのBeam-OFFが繰り返されるバンチ構造を有している。これら大きなパルス波高信号は、Beam-OFFでも観測されたことから、ビームを起源とするバックグラウンド散乱粒子ではなく、原子核崩壊が関与したことは明らかであった。しかし、この領域の原子核が自発核分裂することはない。疑問を問われた筆者は、すぐに答えを思いついた。これこそ β^+ /EC崩壊遅延核分裂であり、陽子過剰な鉛領域の原子核としては決定的な証拠となるもので、重要な発見であると伝えた。すぐに答えられたのは、この時、候補となりうる核種を簡単な計算から導いていたためである。質問を受けてすぐ、自分のノートパソコンから打ち出した絵が図5である (このファイルがセーブされたのは2004年1月27日となっている。)この図は、 β^+ /EC崩壊のQ値と、娘核の核分裂障壁の高さを比べたものである。Q値のギザギザの構造は、偶奇効果によるものである。奇-奇核の値が大きいため、 β^+ /EC崩壊遅延核分裂を観測するチャンスは大きい。実際に、アクチノイド原子核で観測されているEC崩壊遅延核分裂は奇-奇核に限られる。図5の点線は液滴モデルによる核分裂障壁の高さ (B_f) を表し、破線と一転鎖線は、基底状態での殻補正エネルギーを補正して得られる核分裂障壁の高さである。Q値と B_f

が近いと β^+ /EC 崩壊遅延核分裂が観測できるため、 ^{180}Tl 、 $^{186,188}\text{Bi}$ 、 $^{194,196}\text{At}$ 、 $^{200,202}\text{Fr}$ 、 ^{208}Ac が候補と考えていた。SHIP で生成された核種 ^{196}At は、このうちの一つであった。また、この領域における β^+ /EC 崩壊遅延核分裂について、2004年6月15～17日に理研で行われた RIBF 研究会において「不安定重元素の核分裂」とするタイトルで発表していた。偶然の発見に出くわしたことは、いまでも印象に残っている。なお、現在まで我々は、上にあげた同位体のうち ^{208}Ac を除くすべての核種の β^+ /EC 崩壊遅延核分裂事象を確認している。

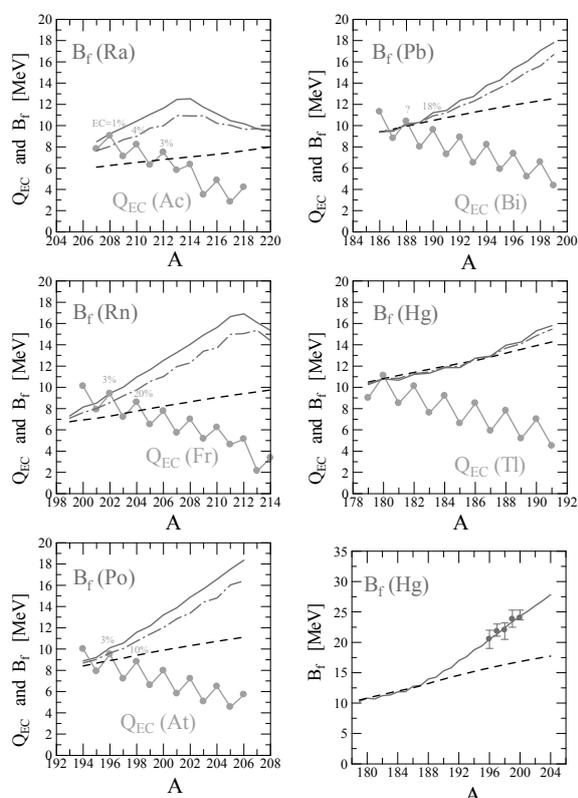


図5 β^+ /EC 崩壊のQ値と、核分裂障壁の高さの関係

なお、この領域で β^+ /EC 崩壊遅延核分裂を最初に実験的に指摘したのは Lazarev である [7]。ここでは、 ^{180}Tl の β^+ /EC 崩壊につづく核分裂の割合が報告されたが、飛跡検出器が使われたために核分裂イベントの同定に不確かさがある。一方、本研究はシリコン検出器を用い、パルス信号として運動エネルギーをとらえた点で信頼性が高い。また、Lazarev が指摘した

核種そのものも実験上は、不確かさがある。これに対し、SHIP における蒸発残留核の励起関数の測定や、後に説明する欧州原子核研究機構 (CERN) の不安定核実験施設 (ISOLDE) での実験は、対象とする核種の同定を決定的なものとした。

SHIP における β^+ /EC 崩壊遅延核分裂の発見は、先に述べたとおり、陽子過剰原子核の核分裂、すなわち新しい領域の核分裂の開拓につながった。幸運であったのは、この SHIP の実験責任者であった Andreyev がルーバン・カトリック大学の Visiting Professor であったこと、ルーバン・カトリック大学原子核研究所 (IKS) は、CERN - ISOLDE と長く研究協力を行っており、協力体制がすでに整っていた点にある。このことから、 ^{180}Tl ビームを引き出し、実際に2つの核分裂片を同時計測して質量数分布を決定するプログラムがスムーズに進んだ。実際の ISOLDE での測定は2008年からスタートした。

3. CERN-ISOLDE における ^{180}Hg の核分裂実験

ISOLDE では、1.4 GeV の陽子を ^{238}U や ^{232}Th のカーバイド標的に照射し ($50\text{g}/\text{cm}^2$)、スパレーション、フラグメンテーション、核分裂などで60元素600核種におよぶ原子核を生成し、特定の同位体を引き出して原子核や物性研究に利用している。施設の概要を図6に示す。図の GSP Target と HRS Target と示したように、2つのターゲットラインを設けてある。ターゲットは、イオン源を兼ねたものであり、ここから +1 価のイオンを最大 60 kV の電圧で引きだし、それぞれ General Purpose Separator (GPS) と High Resolution Separator (HRS) と呼ばれる磁場質量分離 (ISOL) を通じて特定の質量の原子核を引き出す。特に、元素を同定するため、レーザーをイオン源に入射し、特定の元素だけをイオン化することで同位体分離を成功させている。

^{180}Tl の β^+ /EC 崩壊遅延核分裂の実験は、図6に示したコースで行った。セットアップの模式図を図7に示す。 ^{180}Tl ビームは、ビームライン下流の実験装置に毎秒150個の割合で運ばれてきた [8]。これらを $20\mu\text{g}/\text{cm}^2$ のカーボン箔で

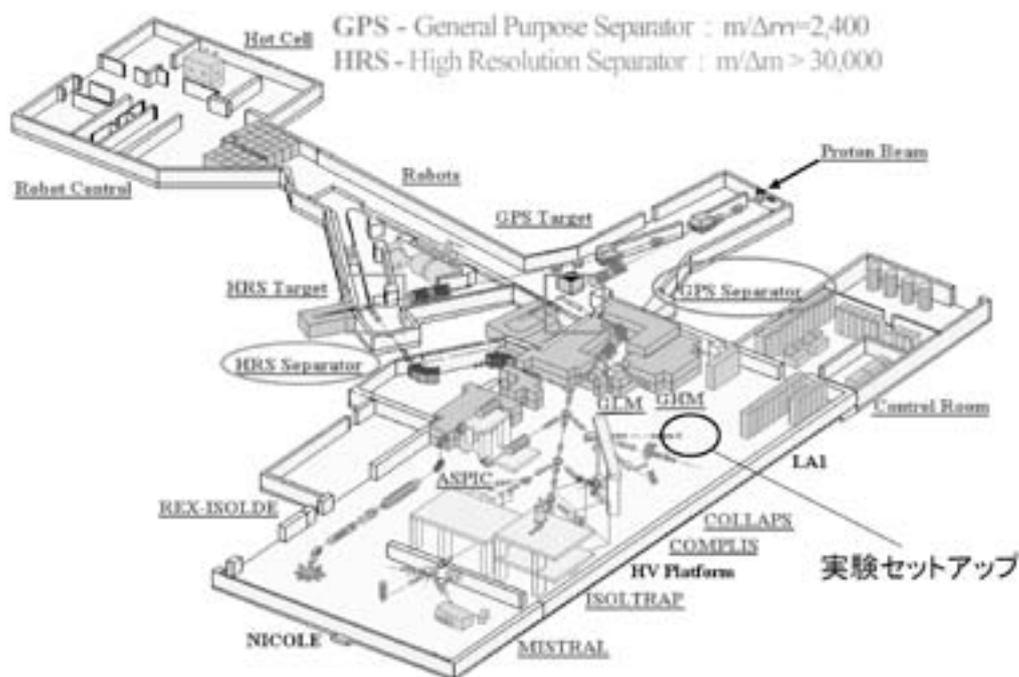


図6 CERN-ISOLDEの見取り図

止めた。 ^{180}Tl の α 崩壊や β^+ /EC崩壊遅延核分裂で生成される核分裂片をシリコン検出器(厚さ $300\mu\text{g}/\text{cm}^2$)で検出し、エネルギー分析を行った。ビーム入射側のシリコン検出器として、穴あき型を使用した。2つの核分裂片を検出し、それぞれの運動エネルギーを決定することで、運動学的に質量分割を決定した。カーボン箔は、回転円盤の周囲上に設置しており、特定の時間間隔で回転させて計測した。また、図7に示すように、真空容器の外側にはMINIBALLと呼ばれるセグメント化されたGe検出器を設置し、核分裂に伴って放出されるX線や γ 線を測定した。

図8(上)のスペクトルは、 α 粒子のエネルギースペクトルを示す。これを見ると、 ^{180}Tl 自身の α 崩壊や娘核 ^{176}Au が観測されている。 ^{180}Tl は、94%が β^+ /EC崩壊することがわかったが、実際にこの娘核 ^{180}Hg や孫核 ^{176}Pt の α 崩壊が観測されている。図では ^{180}Tl の α 崩壊を 1.4×10^6 観測した。レーザーをOFFにすると計測される α 粒子の頻度はファクター70で小さくなった。また、 ^{180}Hg は、直接飛んでこない。これは、表面イオン化が起こりえないこと、レーザーがTlだけを励起するように設定したため

である。詳細は省略するが、高純度のビームを得ることで原子核の崩壊様式を高い精度で決定することができる。 ^{180}Tl の半減期も $1.09(1)\text{s}$ とより高い精度の値を得た。

図8(下)のスペクトルは、コインシデンスした2つの核分裂片の運動エネルギーをプロットしたものである。346個のコインシデンスイベントを得た。シングルスとしてのイベント数は1,111であった。

核分裂片を検出した事象において、75%が後方のGe検出器に γ 線信号を与えた。また、HgのK x線と核分裂片のコインシデンスに成功し

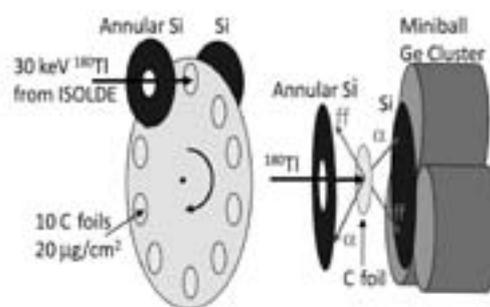


図7 イトカワ微粒子 RA-QD02-0049 を含むいくつかの地球外物質と地球物質中の鉄とスカンジウムの含有値の比較

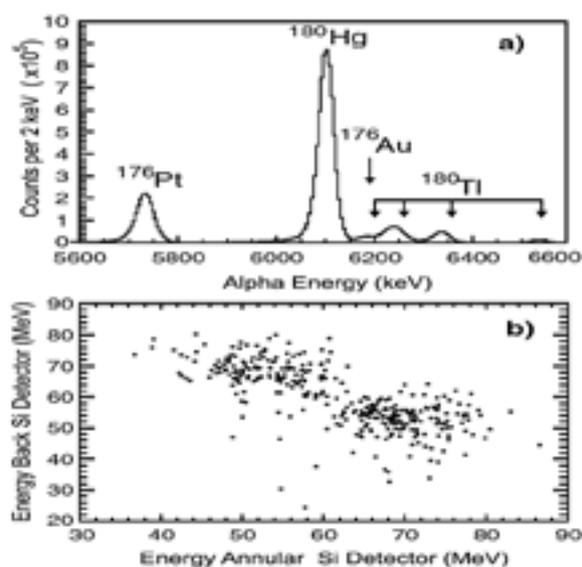


図8 (上) アルファ線スペクトル、(下) 2つの核分裂片のエネルギー相関

た。これは、 ^{180}Tl の β^+/EC 崩壊遅延核分裂の証拠となる。ちなみに、アクチノイド原子核のEC崩壊遅延核分裂において、このようなx線と核分裂片とのコインシデンスが確認されているものは、 ^{228}Np だけである。図8を見ると、運動エネルギーが大・小に分かれた領域にイベントが集中している。ここから ^{180}Hg が質量非対称に分裂することが分かる。 ^{180}Tl の β^+/EC 崩壊イベントと、核分裂したものの数から P_{ECDF} を決定し、 $3.6(7) \times 10^{-3} \%$ を得た。Lazarevは、 $3 \times 10^{-5} \pm 1\%$ とかなり小さい値を報告しているが[5]、実験の不確かさに問題があったと考えられる。

運動学的に核分裂片の質量数と全運動エネルギーを決定し、その分布を示したのが図9である。図から、 ^{180}Hg は質量数100(1)と80(1)に非対称に分裂する収率が多かった。核分裂片のZ/N比が ^{180}Hg の値と等しいと考えれば、 ^{80}Kr と ^{100}Ru が最も生成されたことになる。当初考えたような $^{90}\text{Zr} + ^{90}\text{Zr}$ に分かれる核分裂は重要ではなかった。核分裂片の閉殻性が質量分割に影響を与えないことから、従来のアクチノイド原子核と異なる新しい様式の核分裂となった。この結果は、”New Type of Asymmetric Fission in Proton-rich Nuclei”というタイトルで論文にまとめた[8]。

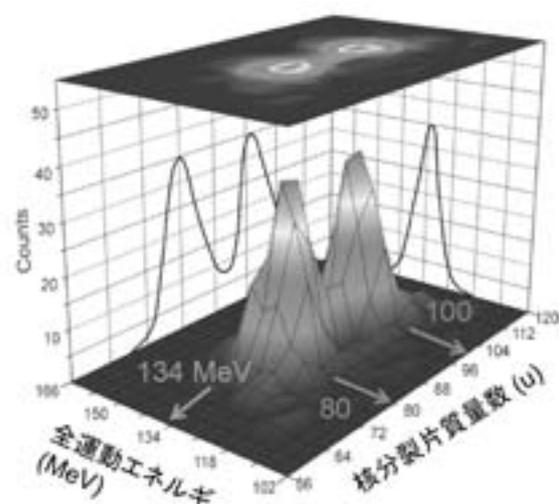


図9 ^{180}Hg の核分裂片質量数と全運動エネルギーに対するイベント数

全運動エネルギー(TKE)の平均値は134.6(7) MeVであった。 ^{180}Hg の核分裂で ^{80}Kr と ^{100}Ru に分かれた場合に解放されるエネルギーは157.8 MeVである。全運動エネルギーとの間に現れる差の23.2 MeVは、核分裂した直後の2つの核分裂片の変形エネルギーに相当する。このエネルギーは、核分裂片が加速して離れた後には、核分裂片の励起エネルギーとなる。核分裂片の脱励起過程の最終段階において γ 線が放出されることを考えると、核分裂に伴って放出される即発中性子の数は高々1つであると考えられる。これは、例えば $n + ^{235}\text{U}$ の核分裂の平均即発中性子数 $\nu_{\text{tot}} = 2.43$ 個と比べるとかなり少ない。

^{180}Hg の核分裂過程を、ポテンシャルエネルギー曲面から考察した。図10に結果を示す。これは、5つのパラメータを用いて原子核の形状を表して計算したものである[9]。図は、ポテンシャルエネルギーを原子核の質量非対称度と伸びの関数として示している。原子核が伸びた領域において、 ^{90}Zr 原子核の閉殻性による深いエネルギーの谷が現れている。しかし、質量対称度を維持して変形しようとしても、高いポテンシャルが立っている。一方、サドル点は、質量非対称な場所 $A_L / A_H = 72/108$ に位置している(障壁の高さは9.81 MeV)。 β^+/EC 崩壊に伴っ

て与えられる最大の励起エネルギー 10.44MeV を考えると、質量非対称なサドルを通過してのみ変形が進むと考えられる。その後、原子核の質量非対称度が保持されたまま変形が進み、質量対称な谷に落ち込むことなく原子核は切断すると考えられる。図10から読める ^{180}Hg 原子核の特徴は、サドル点では質量非対称に、大きく伸びた形状では質量対称にエネルギーの極小値が現れていることである。これに対し、通常のアクチノイド原子核では、サドル点でも伸びた先でも、エネルギー極小値は同じ質量非対称の位置に現れる。

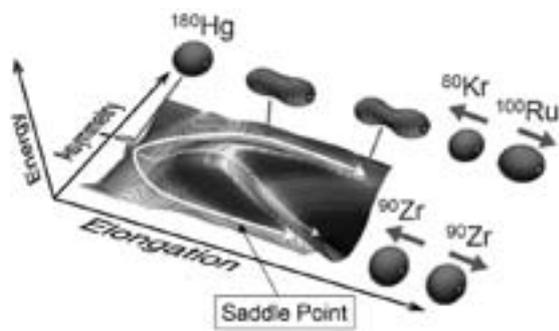


図10 ^{180}Hg のポテンシャルエネルギー構造

5. まとめと今後の展開

^{180}Hg の低励起核分裂は質量非対称な核分裂を示し、アクチノイド原子核の核分裂から得られる描像と異なる様式の核分裂と言える。 ^{180}Hg では、サドル点で質量非対称度が決まることがわかった。現在、 ^{202}Fr の β^+ /EC 崩壊遅延核分裂 (^{202}Rn の核分裂) のプレリミナリーなデータを取得しており、質量対称に近い分布を示している。この場合、 ^{101}Tc が最も多く生成される核種となる。 ^{180}Hg の結果と合わせると、陽子過剰原子核でも特定の領域にだけ質量非対称な分布を示す島 (半島) が現れることが分かった。

一方、原子力機構・タンデム加速器施設では、重イオン核融合反応によって高励起状態の複合核を生成し、これらの核分裂を系統的に測定するプログラムを進めている。励起エネルギーがある程度高くなるので、殻効果が薄れる点は避けられない。一方、ビーム種と標的原子核の組み合わせにより、例えば多くの Hg 同位

体の核分裂を系統的に調べることができる。また、 $^{180}\text{Hg}^*$ の複合核を生成する場合であっても、 $^{36}\text{Ar}+^{144}\text{Sm}$ や $^{90}\text{Zr}+^{90}\text{Zr}$ など、様々な組み合わせで生成が可能である。衝突エネルギーを調整すれば複合核の励起エネルギーを揃えることができるが、これら反応の違いは、原子核の回転エネルギーの違いとなって現れる。そこで、回転が陽子過剰原子核に与える影響を調べることができる。 $^{36}\text{Ar}+^{144}\text{Sm}$ 等で得た興味深いデータとして、複合核の励起エネルギーが 40MeV から 66MeV に増加しても、核分裂の質量非対称度に変化はなかった。これも、通常のアクチノイド原子核の核分裂と異なる。アクチノイド原子核では、励起エネルギーを増大させると、質量非対称から対称核分裂に遷移していくことが分かっている。

^{180}Hg の実験研究成果は、多くの理論研究者の興味を引くこととなり、さらなる理論検討が進んでいる [10,11,12]。

今後の興味ある実験として、例えば核分裂片から放出される即発中性子の数、3体核分裂としての α 粒子の放出などが挙げられる。個々の核分裂片から放出される平均の中性子数は、分離した直後の核分裂片の変形度を表しており、大小核分裂片 (^{80}Kr , ^{100}Ru) のどちらが変形しているか、といった情報が得られる。3体核分裂では、大きく伸びたネックの部分で α 粒子が形成される必要がある。通常のアクチノイド原子核に比べ、陽子過剰核はこの α 粒子を形成する確率が高いと考えられ、3体核分裂の起こる確率が大きくなると推測している。

参考文献

- [1] O. Hahn and F. Strassmann, *Naturwissenschaften* **27** 1, 11 (1939).
- [2] N. Bohr and J. A. Wheeler, *Phys. Rev.* **56**, 426 (1939).
- [3] L. Meitner and O. R. Frisch, *Nature (London)* **143**, 239 (1939).
- [4] V.M. Strutinsky, *Nucl. Phys.* **A95**, 420, (1967).
- [5] S.M. Polikanov *et al.*, *Zh. Eksp. Theor. Fiz.*, **42**, 1464 (1962).

- [6] S. Bjornholm and J.E. Lynn, Rev. Mod. Phys. **52**, 725 (1980).
- [7] Yu.A. Lazarev *et al.*, Europhys. Lett. **4**, 893 (1987).
- [8] A.N. Andreyev, J. Elseviers, M. Huyse, P. Van Duppen, S. Antalic, A. Barzakh, N. Bree, T. E. Cocolios, V. F. Comas, J. Diriken, D. Fedorov, V. Fedosseev, S. Franchoo, J. A. Heredia, O. Ivanov, U. Koester, B.A. Marsh, K. Nishio, R. D. Page, N. Patronis, M. Seliverstov, I. Tsekhanovich, P. Van den Bergh, J. Van De Walle, M. Venhart, S. Vermote, M. Veselsky, C. Wagemans, T. Ichikawa, A. Iwamoto, P. Moeller, and A. J. Sierk, Phys. Rev. Lett., **105**, 252502 (2010).
- [9] P. Moller *et al.*, Nature (London) , **409** , 785 (2001).
- [10] P. Moller, J. Randrup, and A. J. Sierk, Phys. Rev. C, **85**, 024306 (2012).
- [11] M. Warda, A. Staszczak, and W. Nazarewicz, Phys. Rev. C, **86**, 024601 (2012).
- [12] T. Ichikawa, A. Iwamoto, P. Moller, A.J. Sirk, arXiv:1203.2011v1

解説

TiCl₄ ルイス酸による金属内包フラーレンの迅速分離法

秋山和彦 (首都大学東京)

1. はじめに

金属内包フラーレン (Endohedral Metallofullerene: EMF) は炭素原子の五員環及び六員環からなるケージ構造の内部に金属原子またはクラスター等を内包した非常に興味深い構造を持った分子である。金属内包フラーレンの最も注目すべき性質の一つは内包金属原子からフラーレンケージへの電荷移動 (チャージトランスファー) であろう。この性質によって金属内包フラーレンのバンドギャップは空フラーレンに比べて大きく減少され、この様な興味深い特性を利用して新規な分子スイッチングデバイスとしての応用が期待されている。しかしながら、現在まで金属内包フラーレンの応用研究は完全になされてきたとは言えない。この理由の一つは、金属内包フラーレンの生成量が非常に少なく、また分離・精製に非常に時間のかかる多段階の高速液体クロマトグラフィー (HPLC) を用いる必要があるところにある。金属内包フラーレンの合成は一般的にアーク放電法を用いて行われる [1]。アーク放電法ではグラファイトの陰極と金属酸化物を混合した炭素電極を陽極とし、金属内包フラーレンを含むススを精製する。このスス中には C₆₀ 等のフラーレン成分は約 10% しか含まれておらず、さらにこの有機溶媒で抽出されたフラーレン成分のうち 1-10% 程度しか金属内包フラーレンは存在していない。すなわち、有機溶媒に抽出された大部分の C₆₀ や C₇₀ 等の空フラーレンから金属内包フラーレンを分離・精製する事となるため、この作業は相当骨の折れるものとなる。この様な理由から、数 mg 程度の精製された金属内包フラーレンしか得ることができず、過去 20 年に渡って金属内包フラーレンの研究は構造研究や電子/磁気特性研究などの基礎的なものしか行われてこず、水溶性 Gd@C₈₂ の MRI 造影剤など [2] 金属内

包フラーレンを用いた実際の応用や商品化を阻害してきた。

この様な困難を克服するため、金属内包フラーレンの分離・精製に関するいくつかの異なる技術が提案されてきた。これらの技術の中で最も有用なものの一つは金属内包フラーレンの酸化還元特性を組み合わせたものである。筑波大学の赤阪らは金属内包フラーレンの抽出溶媒として N,N-ジメチルホルムアミド (DMF) を用いて選択的に金属内包フラーレンを抽出、続けて 1 段階の HPLC 分離でこれを精製する方法を報告している [3]。この手法では、金属内包フラーレンは DMF による抽出過程において還元され、ジクロロ酢酸による化学的酸化を施して他の空フラーレンから分離を行い、最終的に 1 段階の HPLC 分離により精製している。また近年、Raebiger と Bolsker らは AlCl₃ のような強力な酸化剤を用いて効果的に Gd 金属内包フラーレンの分離が出来ることを報告している [4]。さらに、Stevenson らは Sc₃N 等の金属窒化物を内包したフラーレン (Metal Nitrate Fullerene: MNF) や Sc₄O₂ などの金属酸素クラスターを内包したフラーレン (Oxometallic fullerene: OMF) について無水 AlCl₃ などのルイス酸によって選択的に酸化され、金属内包フラーレン-AlCl₃ 錯体を形成する事を報告している [5]。この手法では形成した錯体を水で洗浄する事で加水分解による AlCl₃ 除去をおこない、その後 MNF や OMF を 1 段階の HPLC 展開によって分離するものである。この Sc₃N や Sc₄O₂ を内包した金属内包フラーレンはその多くが C₆₀ と同様の非常に高い対称性を持った I_h 対称の C₈₀ ケージを持つ。このため、Sc₃N@C₈₀ や Sc₄O₂@C₈₀ は従来型の M_m@C_{2n} (m ≥ 1, 2n ≥ 72) や M_mC₂@C_{2n} (m ≥ 2, 2n ≥ 72) に比べ非常に大きな HOMO-LUMO ギャップを持つことから反

応性が異なる可能性があり、従来型の金属内包フラーレンに対して同様の分離法が適用できるかどうかは明らかとはなっていない。

我々は、 ^{140}La をトレーサとして AlCl_3 等の金属ハライドを用いた金属内包フラーレンの分離について定量的に調べ、新たにルイス酸として作用する金属ハライド： TiCl_4 が非常に効率的に金属内包フラーレンを分離する事を見出した。

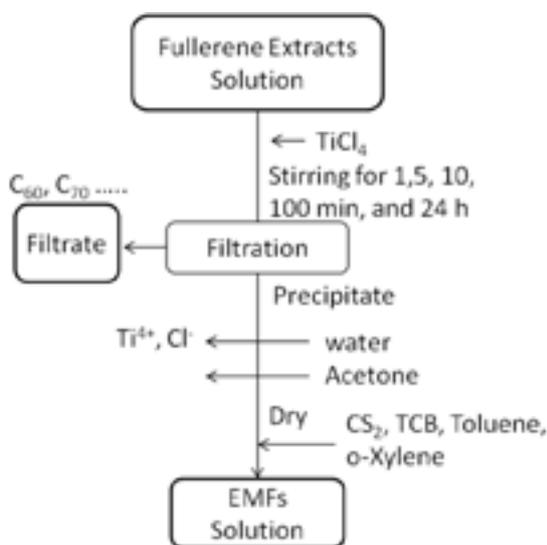
2. 分離操作

ここで、我々が実際に行った分離操作を説明する前に、一般的に用いられる金属内包フラーレンの合成・分離方法について述べる。金属内包フラーレンの合成は一般的にアーク放電法が用いられる。アーク放電法では陰極にグラファイト、陽極には金属や金属酸化物を練りこんだ炭素棒を用い、これらを He 雰囲気下のチェンバー内で正対させ直流電流を通ずる事で陰極から放出された電子が陽極を衝撃し、この表面を気化させる。ここで気化した炭素原子や金属原子は He によって冷却され凝集してゆき不定形の炭素やグラファイト等が形成されいわゆるススとしてチェンバーの壁面に付着する。フラーレンや金属内包フラーレンはこのスス中に含まれており、これを回収し、1,2,4 トリクロロベンゼン (TCB) や二硫化炭素 (CS_2) といった有機溶媒を用いて抽出する。この有機溶媒に抽出されたフラーレン成分 (フラーレン粗抽出物) 中に C_{60} がおよそ 80 ~ 90%、 C_{70} が約 5 ~ 10%、その他炭素数 76 以上の高次フラーレン及び金属内包フラーレンが 1 ~ 10% 程度含まれている。このフラーレン粗抽出物から金属内包フラーレンだけを取り出す作業には多段階のクロマトグラフィーが用いられる。この多段階クロマトグラフィーでは、一般的にフラーレン分取用のパッドカラム (固定相) として市販されている 5PBB (pentabromobenzyl 系固定相) や Buckyprep (pyrenyl 系固定相) が用いられる。さらに分離が必要な場合には Buckyclutcher (nitrobenzyl 系固定相: 現在入手不可) や Buckyprep-M (phenothiazine 系固定相) を用いて精製する。これらパッドカラムのサイズは最大のもので 20 ϕ mm \times 250 mm であり、金

属内包フラーレン 100 mg を得るために要する時間をざっと計算すると約 1200 時間を要する事になる。著者が学生のころは金属内包フラーレンの 1 つである $\text{La}@\text{C}_{82}$ の試薬価格は 45 万円 / 1mg で納期半年という恐ろしく高価な試薬であったが、現在もそれほど価格は下がっておらず、ダイヤモンドの価格が 1 カラット (0.2 g) 10 万円から 100 万円 (高価なダイヤモンドで 5 万円 / mg) とすると金属内包フラーレンがどれだけ高価なものであるか分かる。

話を元に戻す。著者らはランタン (La) を金属 : 炭素 = 1:150 の原子数比で混合させた炭素棒を陽極とし、He 雰囲気、圧力 500 Torr、直流電流 50 A の条件でアーク放電を行い、金属内包フラーレンを含むススを合成した。このススより 1,2,4 トリクロロベンゼンを用い 8 時間還流を行い、フラーレン成分の抽出を行った。この抽出溶液からメンブレンフィルターを用いて不溶成分を除去し、溶液を乾固したものをフラーレン粗抽出物とし、この一部を分取して熱中性子照射用の試料とした。この試料を日本原子力研究開発機構の JRR-3M 水力照射設備 HR-1 孔 (flux: 9.6×10^{13} n/cm²·sec) 及び気送管照射設備 PN-1 (flux: 5.2×10^{13} n/cm²·sec) において熱中性子照射をそれぞれ 6 時間及び 20 分間行い、試料を放射化した。放射化した試料は開封後、すみやかに CS_2 に溶解し、メンブレンフィルターで熱中性子照射中に生じた不溶成分を除去した。この試料を乾固し、二硫化炭素 (CS_2)、1,2,4 トリクロロベンゼン (TCB)、*o*-キシレン、トルエンなどのフラーレンの良溶媒に溶解した未照射のフラーレン粗抽出物と混合した。これらの溶液に金属ハライドとして、 AlF_3 、 AlCl_3 、 AlBr_3 、 FeCl_3 、 TiCl_4 、 SnCl_4 をそれぞれ数 mg (TiCl_4 及び SnCl_4 は液体であるため、数滴) 加え、攪拌した。これらの溶液は Scheme 1 に示された通り、メンブレンフィルター (孔径 0.25 μm) により濾過を行い、残渣を水及びアセトンで洗浄後、 CS_2 を用いて再溶解させた。この CS_2 に再溶解させた試料、金属ハライドを加える前の試料、メンブレンフィルター上の各放射能をそれぞれ Ge 半導体検出器で測定し、各溶媒系での金属ハライドによる金属内包フラーレンの抽出率の違いを

調べた。



Scheme 1. 金属内包フラーレン分離のスキーム

3. 各種金属ハライドとの反応性及び最適な反応時間

図1はCS₂を溶媒とした、各金属ハライドによる金属内包フラーレンの抽出率を示している。図中黒で示したものはCS₂に再溶解させた試料中の放射能 (EMFs Solution) を、灰色で

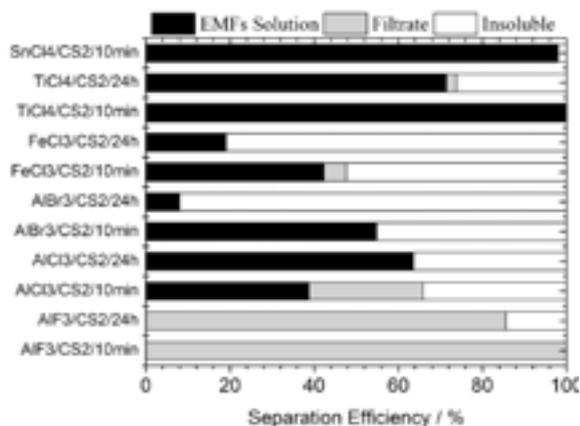


図1 各金属ハライドと金属内包フラーレンの反応性：黒で示したものはCS₂に再溶解させた試料中の放射能 (EMFs Solution) を、灰色で示したものは沈殿として分離されずにろ液中に確認された放射能 (Filtrate) を、白で示したものは再溶解に用いたCS₂にて回収されず不溶成分となっているもの (Insoluble) をそれぞれ示している。

示したものは沈殿として分離されずにろ液中に確認された放射能 (Filtrate) を示している。図中で Insoluble (白) としたものは再溶解に用いたCS₂にて回収されず不溶成分となっているものを示している。ここで注目すべきは、1) Bolskar らが用いた AlCl₃ を用いた場合、金属内包フラーレンの分離効率は最大で60%程度にとどまり、残りの約40%は Insoluble となっている事、また、2) AlF₃ を用いた場合には金属内包フラーレンは全く分離されず、ほぼ全量が液中に存在しており、これに対して3) TiCl₄ や SnCl₄ ではほぼ全量が沈殿物として中空のフラーレンと分離されているという事である。Bolskar らは金属内包フラーレンの抽出率などに関しては報告しておらず、未回収となる金属内包フラーレンがおよそ半数近くにも上る事は今回金属内包フラーレンの追跡に放射能を用いることで初めて明らかとなった事実である。また、AlF₃ は今回用いた金属ハライドのうち唯一、酸化剤 (ルイス酸) としての能力を持ち合わせていない物質である。このことは金属ハライドを用いた金属内包フラーレンの分離にはルイス酸としての性質が重要であることを示しており、中でも TiCl₄ や SnCl₄ といった液体状のルイス酸は溶液中で均一に分散するため、金属内包フラーレンとの相互作用が効果的になされている事が示唆される。

この最も分離効率の良い TiCl₄ について、各溶媒系で反応 (stirring) 時間を変化させた場合の抽出率の違いを図2に示した。CS₂を溶媒として、反応時間を1 min、5 min、10 min、100 min、24 h と変化させたところ、反応時間の増加に伴い、insoluble 成分が増加している。この傾向は TCB を溶媒として用いた場合にも確認でき、TiCl₄ を用いた金属内包フラーレンの分離では反応時間を長く取るほど不利に働くことが分かる。また、o-xylene や toluene といったフラーレンの良溶媒についても1 minの反応時間で定量的に金属内包フラーレンを分離できることが分かった。

4. 空フラーレンの除去率

次に、C₆₀、C₇₀ など中空のフラーレンが TiCl₄

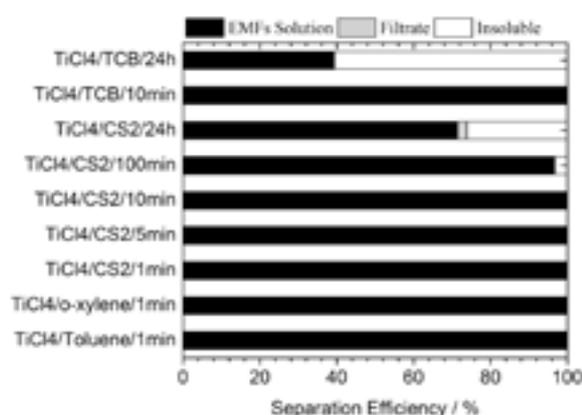


図2 各溶媒系での反応時間に対する抽出率の変化：反応時間を1 min、5 min、10 min、100 min、24 h と変化させたところ、反応時間の増加に伴い、insoluble 成分が増加しており、TiCl₄ を用いた金属内包フラーレンの分離では反応時間を長く取るほど不利に働くことが分かる。

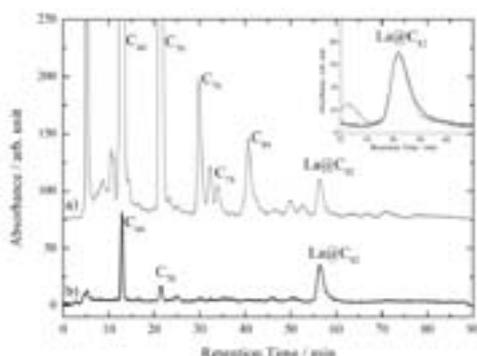


図3 TiCl₄ による空フラーレンの除去効果：分離前 a) 及び分離後 b) の HPLC クロマトグラムから C₆₀ や C₇₀ は多少残存するものの非常に効果的に空のフラーレンを除去できている事が分かる。TiCl₄ による分離条件は溶媒として CS₂ を用い反応時間は 1 min とした。HPLC の展開条件は展開溶媒：トルエン、流速 3.2 mL/min、カラムサイズ：10 φmm × 250 mm であった。

を用いることによりどれだけ除去されているのかを確認するため、分離後の試料を展開溶媒としてトルエンを用いて Buckyrep カラムに展開した。(図3参照) 分離後(図3b)のクロマトグラムを見ると、分離前(図3a)に比べ試料中の大半を占める C₆₀ や C₇₀ は若干残るもののその他の高次フラーレンはほぼ取り除かれていることが分かる。また、分離前後の La@C₈₂ について溶出ピーク強度を比較すると、その強度は

全くと言っていいほど変わっていない事が分かる。これは放射能の測定から得られた金属内包フラーレンの抽出率の結果とも非常に良く一致しており、TiCl₄ 等のルイス酸が中空のフラーレンと金属内包フラーレンとの分離に非常に有効であることを示すものである。先に述べたとおり、多段階の HPLC 分離においてはカラムへの導入量が限られているため分離を目的とする金属内包フラーレンの量が増加するほど、その分離コストは多段階 HPLC 分離に比べ指数関数的に減少する事が見込まれる。従って、この手法は工業的に金属内包フラーレンを分離する手段として非常に有効であると言える。

5. 結論

本研究では金属内包フラーレンの分離効率を上げるため、ルイス酸として作用する金属ハライドを用いて金属内包フラーレンの分離効率を調べた。TiCl₄ や SnCl₄ 等の液体のルイス酸を用いた場合、短時間でかつ効率的に金属内包フラーレンの分離を行う事が可能であることが明らかとなり、また、フラーレンの良溶媒とされる TCB、CS₂、o-xylene、toluene 等の溶媒でも効果的に分離を行えることが示された。

References

- [1] W. Krätschmer, L. D. Lamb, K. Fostiropoulos, D. R. Huffman, *NATURE*, **347**, 1990, 354.
- [2] M. Mikawa, H. Kato, M. Okumura, M. Narazaki, Y. Kanazawa, N. Miwa, H. Shinohara, *Bioconjugate Chem.* **2001**, **12**, 510-514.
- [3] T. Tsuchiya, T. Wakahara, Y. Lian, Y. Maeda, T. Akasaka, T. Kato, N. Mizorogi, S. Nagase, *J. Phys. Chem. B* **110**, 22517-22520 (2006).
- [4] J. W. Raebiger, R. D. Bolsker, *J. Phys. Chem. C* **112**, 6605-6612 (2008).
- [5] S. Stevenson, M. A. Mackey, J. E. Picken, M. A. Stuart, B. S. Confait, J. P. Phillips, *Inorg. Chem.* **48**, 11685-11690 (2009).

特集 (福島問題)

福島の果樹、この1年—原発事故初年の放射能汚染対策試験から—

佐藤 守 (福島県農業総合センター果樹研究所)

事故発生から対策試験開始まで

2011年3月11日の大地震発生時には、私は、ほ場にてモモの剪定をしていました。地震により、水やガソリンなどのインフラに支障がでて、降雨が予想される3月15日は剪定作業ができないことから休暇をとりました。通勤によるガソリンの消耗を避けるためでした。翌日、出勤し予定通り剪定作業で1日を過ごしました。

福島第1原発の爆発事故により福島市も放射性物質の汚染を受けた恐れがあることをその日知りました。それから数日後に果樹に対する放射能汚染の影響について検討するよう指示を受けました。手掛かりは農研機構・果樹研究所より送られたIAEAの報告書2編 (Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments および Modelling the transfer of radionuclides to fruit) と農研機構・果樹研究所内の検討資料のみでした。その後、国内では果樹の放射能汚染についてはほとんど研究されていないことも知りました。取り急ぎIAEAの報告書に基づき、果樹の放射能対策検討資料を作成し、所内で検討会を3回にわたって開催しました。

IAEAの報告書では原発事故により放出された放射性核種の中で農作物に対する主たる汚染物質はセシウム (以下Cs) とストロンチウム (同、Sr) であり、これらの放射性核種は葉と土壤から植物体内への移行することが記載されていました。今回の事故が発生した3月12日～15日の時期はウメを除けば落葉果樹は発芽前であり、葉は展葉していなかったことから、土壤からの放射性Csの移行抑制が検討の主眼となりました。IAEAの報告書に基づき作成した最初の検討資料の内容は以下の通りでした。

1. ^{137}Cs の土壤から植物への移行に関連するパラメーターの定義

- 分配係数 (Kd) : 土壤中の固相中のCsと液相中のCsの濃度比 (L/kg)
- 移行係数の定義は複数ある。
- Fv : 土壤中Csと植物へ移動したCsの濃度比 (乾燥重ベース)
- TF (the soil to plant transfer factor) : 土壤中から可食部または植物へ移動したCsの濃度比 (果実は生重ベース、土壤は乾物重ベース)
- Tag (凝集移行係数) : 感染土壤面積当たりの可食部へ移動したCsの濃度比 (乾燥重ベース)、森林およびキイチゴ類で使用
- Fr : 加工、貯蔵後の果実のCs濃度と生の果実のCs濃度の比
- Bp : 土壤液相中Csと植物へ移動したCsの濃度比 (L/kg)
- 移行係数と土壤の分配係数および土壤液相から植物への移行係数の間で以下の関係が成立する。Fv = Bp / Kd

2. 土壤中Csの動態に関する知見

- Csの土壤および植物体中の移動特性はKと近似 (相同的) している。
- Csは土壤中ではK、Ca、Na、 NH_4 等の交換性カチオンと競合的關係にある。
- Csはモンモリナイトやベントナイトなどの粘土鉱物に吸着される。吸着されたCsは植物に吸収されにくい。CsはベントナイトとはNaより吸着されやすいがK、Caとは競合し、その挙動は平衡定数に依存する。
- フォールアウト (放射性沈降物) したCsの垂直方向の移動は時間に依存し、初年は1cm以下、5年で5cm以下である。
- ミミズの活動はCsの土壤吸収・沈積に影響する。

- Kd 値が大きいほど Fv 値は小さくなる（植物への Cs 移行は抑制される）。
- Kd 値は土壌の鉱物と有機物の構成比の影響を受ける。粘土鉱物の多い土壌では高く、有機物の多い土壌では低い。
- Kd 値は年数の経過とともに風化と土壌での固定が進行するため高くなる。
- ベントナイトなど特定の土壌鉱物の Kd 値は pH の影響を受け、アルカリ側で固相中 Cs が高くなる。
- Kd 値は粘土で高く、砂土、有機物で低い。

3. 土壌から植物への移行に影響する要因と知見

- TF 値算出の土壌の深さとして、牧草は 10cm を標準としているが、果樹を含む他の作物は 20cm が標準。
- Cs の植物への移行は根の分布、品種、施肥、灌水、土壌管理、土壌粒子の大きさ、粘土鉱物の種類、有機物組成等の影響を受ける。
- 菌根は Cs の植物体吸収を促進する。
- ピートモスの多い土壌や栄養分の乏しい湿地で植物体への Cs の移行が多い。
- 置換性カリウムの少ない石灰質土壌で Cs の移行が高い。
- 植物に移行する放射性核種は土壌液相に溶解している形態のものであり、酸化物、炭酸化合物は溶解度が極めて低く、植物には吸収されない。
- TF 値は同一植物でも放射性核種の化学的特性、植物吸収の代謝生化学的作用の差異、解毒作用、土壌中の水分動態、根圏土壌における可吸態イオン濃度、土壌中の根の分布状態、植物の栄養生長期の影響を受ける。
- 一般的に放射能核種の濃度は茎や葉で高く繁殖器官では少ない。
- 果樹のセシウムの年間収支では落葉や果実の収穫による減少は少なく、大半は再転流し、木部に蓄積される。また木部に貯蔵された Cs は翌年の新成長部にほとんど移行しない。
- 農業生態系では果樹の種類を問わず汚染から 4 年で取り込まれた Cs は半減する（Cs の果樹の生物学的半減期は 4 年である）。
- チェルノブイリ事故（1986 年 4 月 26 日）においてアンズでは 1987 から 1988 年の間で新器官の Cs 濃度が 3 分の 1 までに減少が認められた。しかし自然の生態系では泥炭（ピートモス）土壌を好むホロムイイチゴの果実中の Cs 濃度は逆にフォールアウト翌年で高まった。
- チェルノブイリ事故による汚染調査によると、リンゴ、モモ、サクランボ、スモモでは長期的には土壌からの Cs の吸収は無視してよく、汚染から 2、3 年は貯蔵性 Cs の再利用が多かった。
- ブドウやオレンジでは果実が Cs のシンクとなるが、オリーブとスモモではシンクとならない。
- 野生果実の移行データは（生育環境要因による）ばらつきが大きいので適用に当たっては注意が必要。
- 果実は核種選択性がある。果実へは Cs が Sr より優先して葉から転流する。
- 果実への Cs の移行は果実の直接汚染または葉からの転流によるものである。
- 1 年性植物では、激しい汚染があった場合は、土壌を経由して翌年の汚染が認められるが、永年性植物の果樹の場合は、ほとんど認められない。特に Cs の場合は可能性が低い。
- 汚染翌年の果実への汚染は植物と土壌に貯蔵された放射性核種間のメカニズムに依存する。これは時間による比較的重要な転換である。土壌と樹体間の放射性核種の平衡が維持される。
- ブドウでの試験でも汚染翌年の果実への Cs 移行は極めて少ない。
- ココナッツでは土壌から汚染された Cs は塩化カリウム施肥により果実の TF 値は低下した。
- 葉から汚染されたブドウの Cs は塩化カリウムを土壌に施肥しても Cs を放出する効果はなかった。
- セシウムは汚染後 24 時間以内に吸収される。Sr も同様である。吸収期間の延長は Sr の方が少ない。

4. 果実へのCs移行特性

- 汚染土壌からのCsは直接果実へ移行することではなく、葉からの転流による。
- 土壌から吸収されたCsは茎と葉に移行する。
- 茎と葉への移行は果実成長期に活発となる。果実中のCsは成熟期から高まる。

果樹研究所内の検討会でまとめられた当面の方針としては、現地での定点調査を行うこと、果樹の吸収根の分布域は表層15cm以下であり放射性Csは表層に沈積しているので耕起はしないこと、樹園地土壌は草生栽培によりカリウム過剰となっているのでカリウム肥料の施肥はひかえることの3点でした。これは、水田および野菜等の畑作で出された方針とは逆の方向でした。

果樹研究所の放射能汚染対策試験は、所内および現地ほ場の土壌と樹園地内外の環境放射能の測定、果実および葉中放射性Csの経時的推移の検証、そして土壌からの吸収を抑制する技術対策の検証を柱として開始されました。その後、調査が進む中で、樹皮上の汚染が明らかになり、その汚染実態調査および樹皮の除染技術の開発や作業時の外部被曝の実態調査が追加されました。ここでは、汚染初年度に得られた試験研究成果の中から果樹特有と考えられる知見を中心に紹介します。

樹園地における土壌汚染の実態解明

1. 土壌中放射性物質の垂直分布

(1) 調査目的および方法

4/15～5/25（フォールアウト後31～71日）から10/25（同225日）の期間の樹園地における土壌中放射性核種の表層下30cmまでの放射性核種濃度の垂直分布とその経時的推移を検証しました。調査ほ場は、果樹研究所内、リンゴ「紅玉」（採取日：4/15、5/25、10/25、以下同）、「三島ふじ」、モモ「あかつき」、ナシ「幸水」（4/26、10/25）ほ場および桑折町モモ園（5/11、10/26、砂質埴壤土）および福島市リンゴ園（5/11、10/26、重埴土）としました。所内調査ほ場の土性は、「三島ふじ」が花崗岩系砂質土、他は褐色森林土・埴壤土です。また、10/25は信夫山ユ

ズ園（凝灰岩系シルト質壤土）を加えました。

(2) 結果

フォールアウト31～70日間の放射性核種の土壌中垂直分布の経時的推移では¹³¹Iは時間とともに減少し、フォールアウトから71日が経過した5/25ではほぼ消失しました。放射性Csは通常の土壌ではフォールアウト後225日が経過した10/25でも砂質壤土～重埴土では表層0～3cmに90%以上が沈積していましたが、せん定枝チップを経年施用した埴壤土および花崗岩系砂質土では30cmまでの放射性Csのうち表層0～3cmに留まっている割合は80%以下でした。なお、10/26の信夫山の凝灰岩系シルト質壤土の表層3cmの沈積率は56%に留まり、40%以上が深さ3～18cmまで沈降していました。

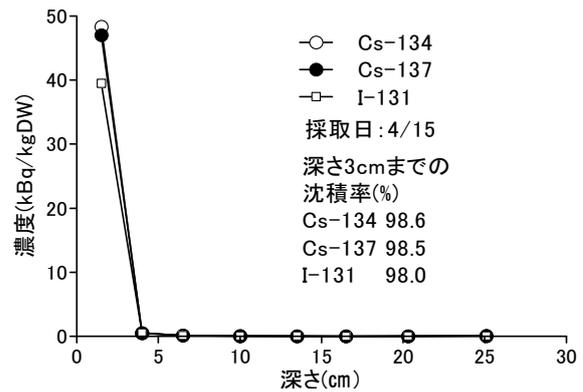


図1 土壌中放射性核種濃度の垂直分布（4/15）
（果樹研「紅玉」ほ場：埴壤土）

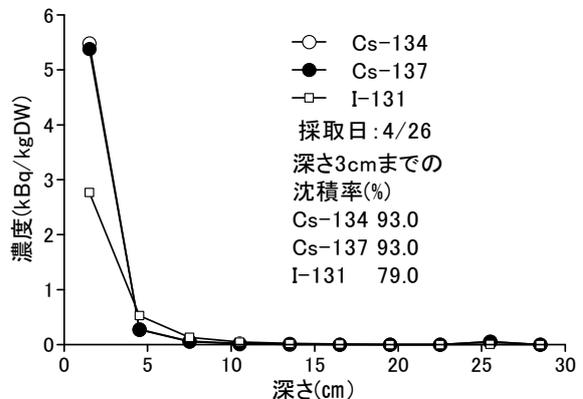


図2 土壌中放射性核種濃度の垂直分布（4/26）
（果樹研「あかつき」ほ場：埴壤土）

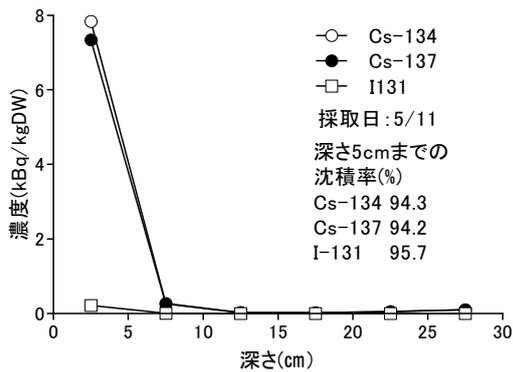


図3 土壤中放射性核種濃度の垂直分布(5/11)
(福島市渡利リング園: 重埴土)

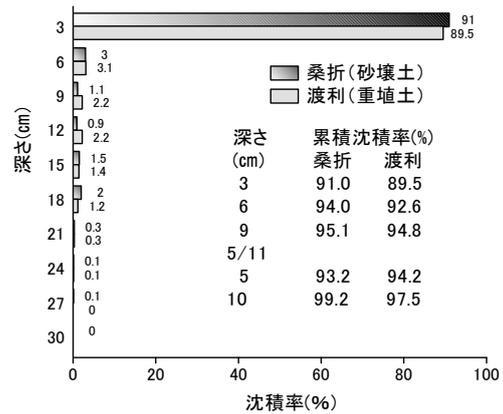


図6 10/26の¹³⁷Csの垂直分布
(桑折・砂質壤土と渡利・重埴土)

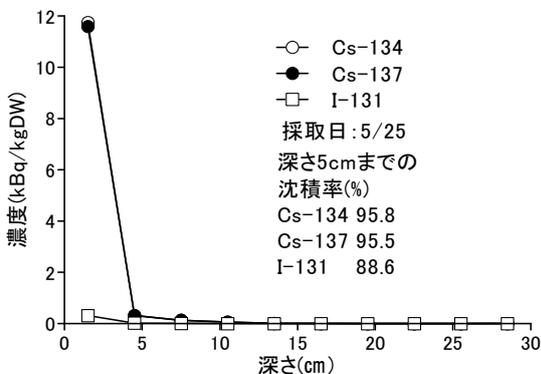


図4 土壤中放射性核種濃度の垂直分布(5/25)
(果樹研「紅玉」ほ場: 埴壤土)

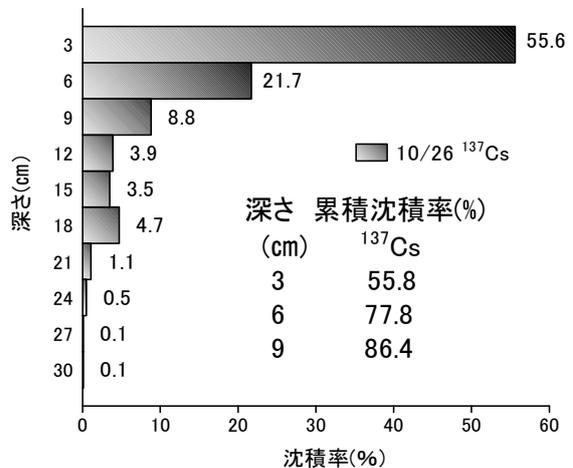


図7 10/26の¹³⁷Csの垂直分布
(信夫山・凝灰岩系シルト質壤土)

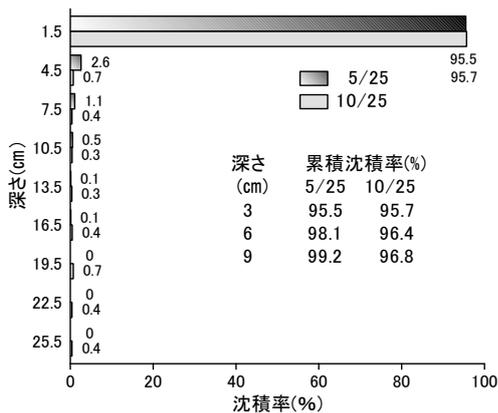


図5 10/25の¹³⁷Csの垂直分布
(「紅玉」ほ場・埴壤土)

2. 土壤中放射性物質の水平分布

(1) 調査目的および方法

果樹研究所内ほ場7か所および福島市・伊達

市・桑折町の樹園地9カ所の樹園地において、4/26と10/25に1ほ場当たり5か所の深さ5cmまでの土壌を採取混合し、時系列間差を比較しました。下草は地際まで刈り込み除去しました。また6/16に所内「あかつき」ほ場(面積6a)の12樹から、1樹当たり4か所を採取混合、9/30に所内「三島ふじ」ほ場(面積3a)の16樹から1樹につき、幹から同一の距離2か所を採取混合し樹間差を検証しました。10/26に採取した土壌の分析値は10/25に減衰補正しました。

(2) 結果

4/26の果樹研究所内の7ほ場(面積5ha)の放射性Cs濃度は6.4~14.0kBq/kgで2倍程度のバラツキが認められました。またフォールアウト後225日間の減衰率は所内7か所平均で96%に留まりました。これに対し、現地ほ場の

減衰率は65%で所内と比較して大きな減衰率を示しました。物理的半減期から試算した10/25までの放射性Csの減衰率は85%でした。所内と現地の減衰率が大きく異なった要因としては管理密度が推定されますが、今後、更に検証が必要と考えられます。

「あかつき」ほ場の樹単位の放射性Cs濃度は2.6～11.1kBq/kgで4倍程度のバラツキが認められました。同様に、「三島ふじ」ほ場の放射性Cs濃度は2.3～11.2kBq/kgで5倍程度のバラツキが認められました。

以上から、樹園地内の土壤中放射性Cs濃度の水平分布は、ほ場および樹によるばらつきが大きいことから土壤中放射性物質濃度の分析値のみでの樹園地の汚染実態の判定は限界があるもの考えられました。

サーベーターによる測定により樹園地内のホットスポットを検出し、汚染マップを作成することが実用的ではないかと考えられますが、この測定方法では効率性に欠けることから、今後、樹園地内の除染を進める上で、新たな面的測定方法の開発が望まれます。

3. 土壤表面1cmの放射線量の経時的推移

(1) 調査目的および方法

樹園地の汚染状況を把握する方法としては

表1 土壤表層5cm放射性Csの時系列比較

調査ほ場	$^{134+137}\text{Cs}$ 濃度 (kBq/kgDW)		
	4/26 (A)	10/25 (B)	比 (B/A)
所内ブドウ	6.4	6.5	1.02
所内梨(幸水)	9.9	8.2	0.82
所内桜桃	7.8	10.5	1.36
所内桃(はつひめ)	6.4	7.2	1.13
所内桃(あかつき)	14.0	7.8	0.55
所内りんご(三島ふじ)	6.9	5.9	0.86
所内りんご(紅玉)	7.7	7.2	0.94
福島市湯野(日川白鳳)	3.2	1.3	0.40
桑折町(はつひめ)	10.2	4.3	0.42
伊達市柱沢(蜂屋)	18.9	14.0	0.74
福島市宮代(ふじ)	9.1	6.4	0.70
福島市北沢又(紅さやか)	20.9	11.1	0.53
福島市笹木野(幸水)	2.7	3.3	1.21
福島市渡利(ふじ)	23.5	13.2	0.56
所内平均	8.4	7.6	0.96
現地平均	12.7	7.7	0.65
平均	10.5	7.6	0.80

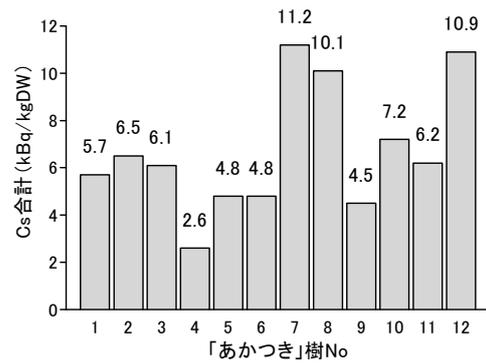


図8 土壤中(5cm)放射性核種濃度の水平分布(樹間:あかつき)

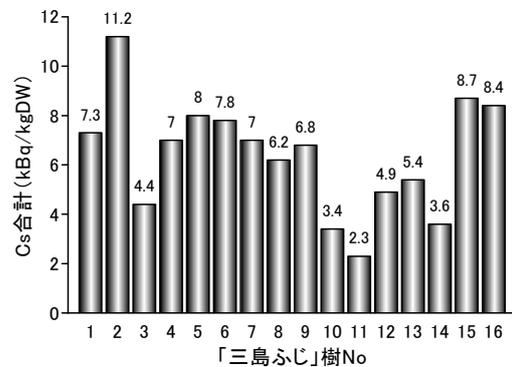


図9 土壤中(5cm)放射性核種濃度の水平分布(樹間:三島ふじ)

NaIサーベーターによる測定が一般的です。そこで土壤表面の放射線量の経時的推移を検証するため、果樹研究所内の6ほ場で4/11から定期的に測定された1cm高の放射線量の各ほ場のデータを併せて平滑化スプライン法により減衰曲線を求めました。また4/15から5/25までの現地(桑折および渡利)での調査を含めた ^{134}Cs 、 ^{137}Cs および ^{131}I の垂直分布データにより土壤表層の放射性核種の経時的推移を検証しました。

(2) 結果

地表から1cm高の放射線量は調査開始から5/25までの44日間で約30%低下しました。土壤表面1cmの放射線量と5月下旬までの土壤中表層3cmまたは5cmの $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 濃度比の減衰消長は近似した推移を示しました。回帰分析の結果、放射線量と $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 濃度比の減衰消長との間で高度に有意な相関が認められ、この期間の放射線量の急激な減衰は ^{131}I の低下(3/15の

1/512) によることが検証されました。このことから未耕起の樹園地では、土壌表面の放射線量の測定により土壌表層の放射性物質の動態が推定可能と考えられました。なお、¹³¹Iが消失した5/25日以降の200日間では約20%低下しました。

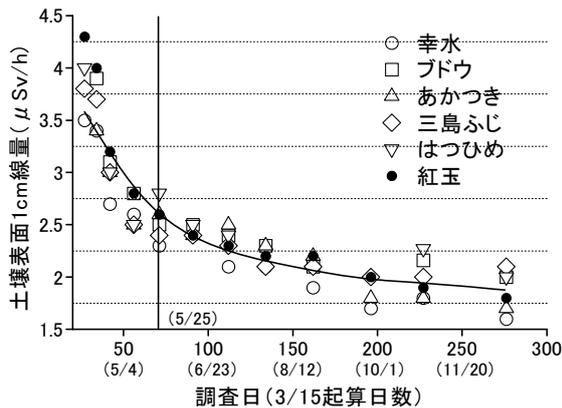


図10 土壌表面(1cm)の空間線量の経時的推移

表2 土壌表層3cmまたは5cmの¹³¹I/¹³⁷Cs比

土壌採取日	3/15起算日数	ほ場	¹³¹ I/ ¹³⁷ Cs比	減衰比
4/15	31	紅玉	0.84	1
4/26	42	三島ふじ	0.4	
		あかつき	0.51	
		平均	0.46	0.55
5/11	57	桑折	0.11	
		渡利	0.03	
		平均	0.07	0.08
5/25	71	紅玉	0.03	0.03

表3 土壌表面1cm高の放射線量

放射線測定日	3/15起算日数	放射線量 (μS/h)	5月29日との差	減衰比
4/15	31	3.7	1.21	1
4/26	42	3.08	0.59	0.49
5/11	57	2.58	0.09	0.07
5/25	71	2.5	0.009	0.007
5/29	75	2.49	0	

注: 減衰曲線より算出

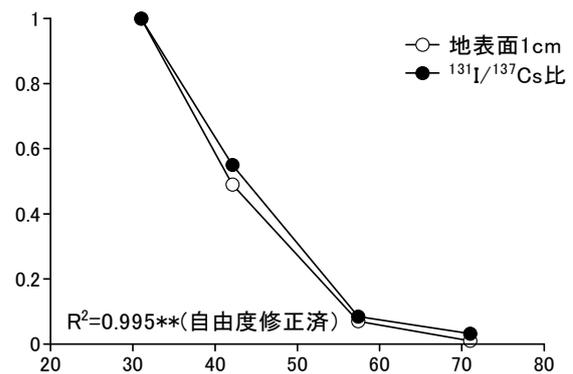


図11 土壌表面線量と¹³¹I/¹³⁷Cs比の減衰比

4. 樹園地内外の空間線量と地表面線量の関係

(1) 調査目的および方法

果樹園における作業者の外部被ばく状況を把握するため果樹研究所内8ほ場および現地9ほ場において4/11から対象果樹の収穫時まで定期的に、樹園地の地表面1cm高と地上部1mの放射線空間線量および園外1mの空間線量を測定しました。測定か所数は、地表面は1ほ場当たり5か所、園内空間線量は樹園地の中央部1か所、園外は園の入り口1か所としました。また、5/11から5回の測定値を平均し樹園地内外の空間放射線量を比較した。併せて地表面線量と樹園地内空間線量との相関関係を検証しました。

(2) 結果

樹園地の放射線量は土壌表面>園内(地上1m)>園外(地上1m)の順に高くなりました。樹園地の地上1mの空气中放射線量は、いずれの樹園地も園内の方が舗装道路、草地などの園外より4~54%高く、樹園地内外比は対数正規

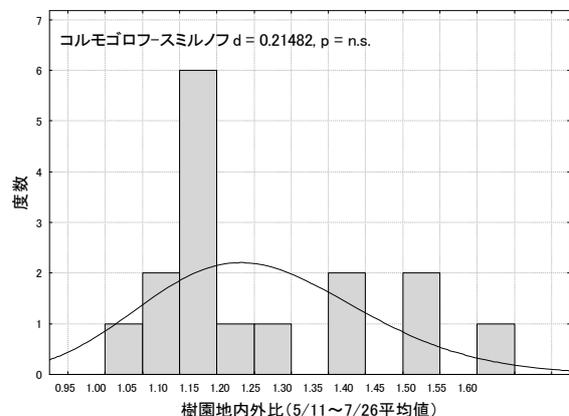


図12 樹園地内外の空間放射線量の比較

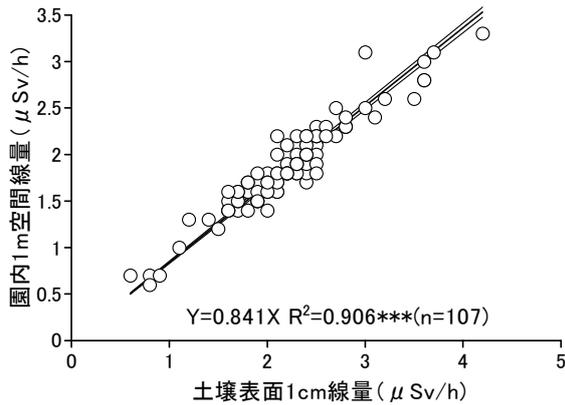


図13 地表面放射線量と樹園地内空間線量間の相関関係

分布に適合しました。樹園地内の地上部1mの放射線空間線量は地表から高さ1cmの放射線量と高い相関が認められ、樹園地内1mの空間線量は地表面の約85%まで減衰しました。

樹園地における樹皮汚染の実態解明

1. 樹皮表面の部位別放射線量の測定

(1) 調査目的および方法

フォールアウトによる樹皮上の汚染状況を検証するため、5/10に、モモ6樹およびオウトウ、ナシ、リンゴ、ブドウ各3樹の主枝分岐部から30cmの部位の円周方向で上部（天空側）、側部、下部に区分し各部位の表面から1cmの放射線量をGMサーベーター（TGS136）で測定しました。併せて各ほ場の1mの空間線量を測定し、樹皮の測定値から引いた値を樹皮表面の放射線計数率としました。ブドウ「あづましずく」「ふくしずく」「高尾」の主枝上部15～20cm長を剥皮し、剥皮前後の放射線量をGMサーベーターで測定しました。

(2) 結果

モモ、オウトウ、リンゴ、ナシ、ブドウの主幹や主枝などの骨格枝および1、2年生枝に放射性核種が沈積していることが確認されました。骨格枝の沈積量は円周方向で上部（天空側）で地面側に比べ明らかに高い放射線量が計測されました。

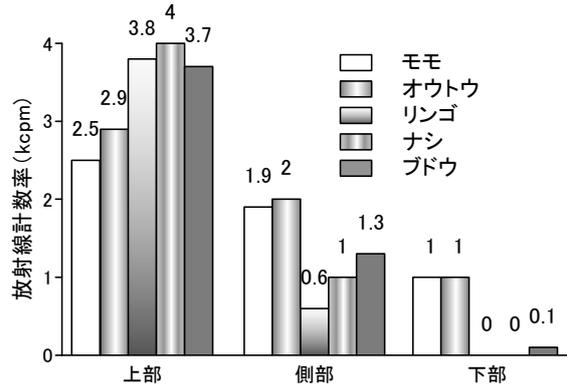


図14 主枝表面の部位別（円周方向）放射線量

2. ブドウおよびナシの粗皮削りおよび粗皮剥ぎによる放射性Cs除去効果の検証

(1) 調査目的および方法

5/25にブドウ「あづましずく」およびナシ「幸水」の主枝上の3カ所について、円周方向で上部（天空側）、側部、下部に区分し剥皮処理をし、放射線量をGMサーベーターで測定しました。また、剥皮した各部位の樹皮中の放射性核種濃度を測定しました。

(2) 結果

ナシおよびブドウで粗皮剥皮処理をしたとこ

表4 ブドウ「あづましずく」の剥皮粗皮の放射線計数率とCs濃度

部位	はく皮前		はく皮後	
	GM値 (kcpm)	Cs濃度 (kBq/kg)	GM値 (kcpm)	
上部	3.4	c	48.7	0.5 b
側部	1.0	b	26.4	0.0 a
下部	0.4	a	6.2	0.1 a
分散分析	396.2		10.6	
分散比	***		*	

注:測定日は平成23年5月25日

表5 ナシ「幸水」の剥皮粗皮の放射線計数率とCs濃度

部位	はく皮前		はく皮後	
	GM値 (kcpm)	Cs濃度 (kBq/kg)	GM値 (kcpm)	
上部	4.2	c	26.1	0.6 c
側部	1.3	b	7.4	0.2 b
下部	0.1	a	1.2	0.0 a
分散分析	75.5		337.8	
分散比	***		***	

注:測定日は平成23年5月25日

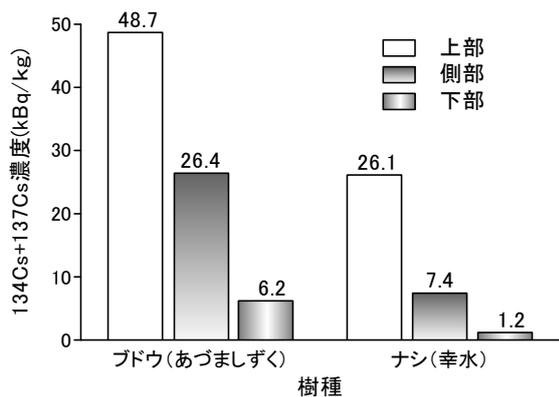


図15 主枝表面の部位別 (円周方向) 放射性Cs濃度 (5/25採取)

ろ、GM サーベーター測定値は剥皮前に比べて有意に低下し、粗皮剥ぎ、粗皮削りにより樹体表面の放射性物質が効果的に除去できることが実証されました。なお、主枝上部の沈積量はブドウで48.7 kBq/kg、ナシで26.1kBq/kgでした。

3. モモの主枝および側枝の皮部の放射性Cs濃度の測定

(1) 調査目的および方法

樹皮上の放射性Csの内部への移行を検証するため、6/16に18年生「あかつき」の主枝および12年生「78-12」の主枝および側枝(2、3年生枝)の形成層で剥皮し、表皮とその内側の内皮(周皮および韌皮)に分けて放射性Cs濃度を測定しました。

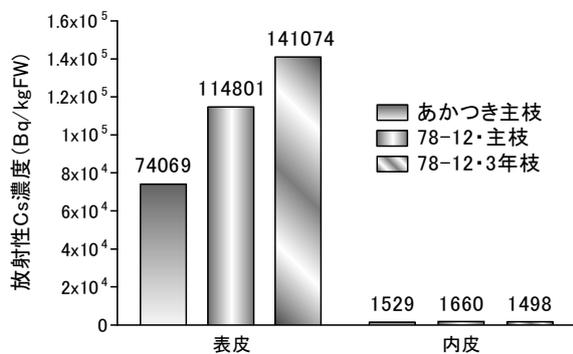


図16 モモ主枝および側枝表面の放射性Cs濃度 (6/16採取)

(2) 結果

表皮に7~14万Bq/kgFWを超える放射性Csが沈積し、内皮でもその100分の1程度の放射性Csが検出されました。なお、表皮を剥いだ緑色の周皮部には韌皮内部へ通ずる皮目が多数、分布していました。

土壌表面および樹皮表面の放射線量の経時的推移の比較

(1) 調査目的および方法

樹園地における土壌表面および樹皮表面の放射線量の経時的推移を比較するため、果樹研究所内の土壌表面線量および樹皮表面線量を経時的に測定し、土壌表面は5/9、樹皮表面は5/10の測定値を100として以後の測定値の比率を算出しました。土壌表面線量は「あかつき」「幸水」「紅玉」ほ場5か所の土壌表面1cmの放射線量の測定データ、樹皮表面線量は「あかつき」他5品種、「幸水」「ふじ」の主枝分岐部から30cmの天空側の樹皮表面1cmの放射線量の測定データを供試しました。

(2) 結果

土壌表面の放射線量は5/9から175日の期間で約70%程度までに減衰しました。樹皮表面の放射線量は5/10から176日の期間で45~50%までに減衰しましたが、棚栽培のナシ「幸水」ではモモ、リンゴと比較して減衰率はやや劣りました。またモモ、リンゴの減衰傾向は2つのパターンに分かれる傾向を示し、フォールアウト後約120日までは急激に減衰し、以後は緩慢

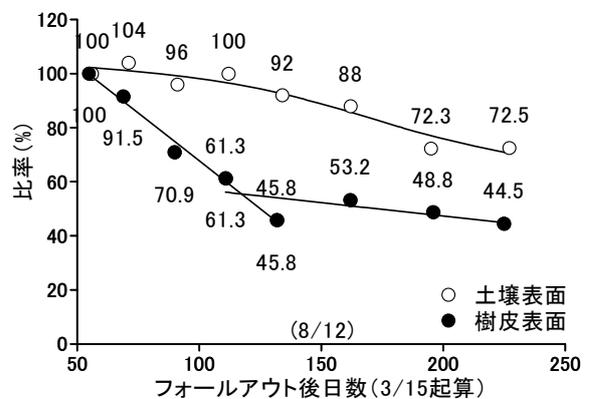


図17 土壌表面および樹皮表面の放射線量の経時的推移 (モモ)

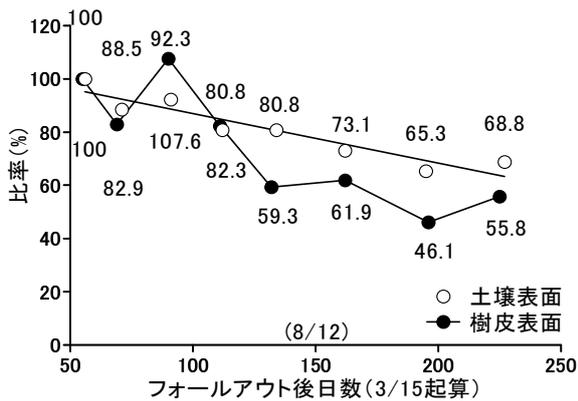


図18 土壌表面および樹皮表面の放射線量の経時的推移 (ナシ)

な減衰傾向を示しました。これは生態学的半減期として報告されている減衰パターンに類似していました。このことから、土壌と比較して樹皮上の放射性Csの動態は樹皮周囲の環境の影響を受け拡散しやすいものと推察されました。

落葉果樹の葉および果実内放射性Csの経時的推移

(1) 調査目的および方法

落葉果樹の葉および果実への放射性Csの移行動態を検証するため、果樹研究所内のモモ、ブドウ、ナシ、リンゴおよび伊達市のカキについて葉および果実を定期的に採取し、放射性Cs濃度を測定しました。ここで、成葉は、ブドウは第4、5節、ナシでは不定芽新梢中央葉および最大果叢葉、他は側枝先端新梢中央部の葉を採取しました。

(2) 結果

果実中放射性Cs濃度はモモ、ナシ、リンゴでは満開後40日以内(6/1)の幼果期で高く、成熟果の5~7倍の高濃度でした。しかし、満開後50日頃には幼果期の少なくとも3分の1以下まで激減しました。これに対し、成熟期の濃度の低下は緩やかでした。果実当たりの放射性Cs含量はブドウ、ナシ、リンゴ、カキでは果実肥大に係わらず完熟期の30日前からほぼ一定量で推移しましたが、モモでは完熟期まで果実肥大とともに増加しました。葉中放射性Cs濃度は、モモ、ナシ、リンゴでは果実同様、幼葉で高濃度を示しました。ブドウでは発芽後29日から増

加し、ベレゾーン期直前(7/12)で最高値を示しました。同様に、カキでも着色開始期前の成葉(8/23)で高濃度を示しました。成熟期ではいずれの樹種も減衰傾向を示しましたが、伊達市のカキでは他の樹種に比較し、成熟期の葉中放射性Cs濃度は高濃度でした。また、生育期間の長いリンゴ、カキでは果実肥大期から成熟

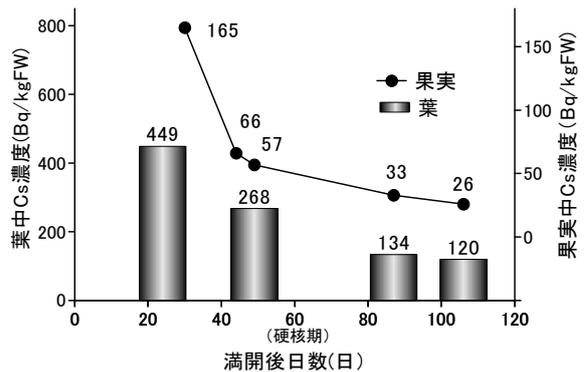


図19 葉および果実中Cs濃度の推移

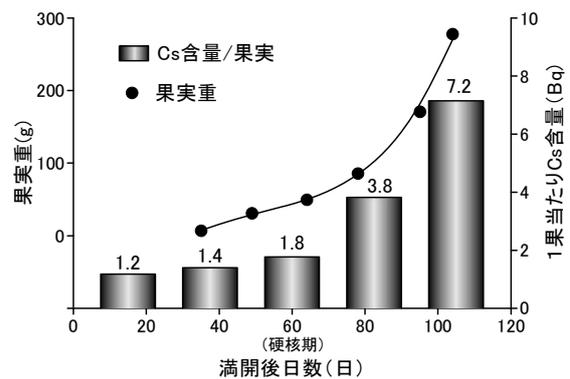


図20 果実当たりCs量の推移

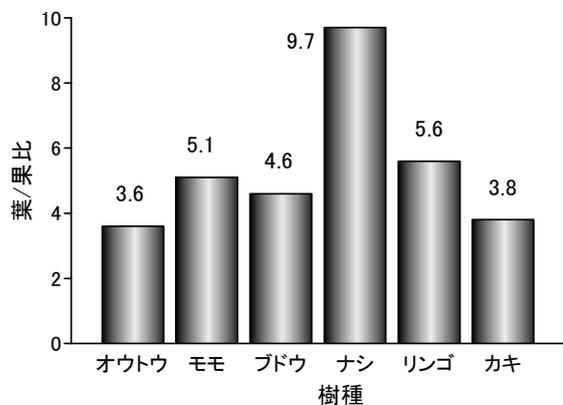


図21 成熟期のCs濃度の葉/果実比の比較

期まで一定濃度で推移しました。成熟期の放射性Cs濃度の葉/果実比はナシ「幸水」以外は3～6の範囲でした。なお、「幸水」も含め有意な樹種間差は認められませんでした。また、「幸水」では不定芽新梢葉と最大果叢葉の放射性Cs濃度は2～3倍の差が認められました。

樹齢の異なるモモにおける果実中放射性Cs濃度の比較

(1) 調査目的および方法

フォールアウト後、数カ月の調査から果樹では土壌よりも樹皮上に沈積した放射性Csの影響が高い可能性が疑われました。樹皮上の沈積量と関連性が高い樹容積は樹齢に依存します。そこで果樹研究所内モモ12年生および18年生「あかつき」、6年生および18年生「ゆうぞら」各3樹を供試し、樹齢の異なるモモにおける果実中放射性Cs濃度を比較し、果実への放射性Cs移行に対する樹齢の影響を検証しました。

(2) 結果

果実中放射性Cs濃度は「あかつき」「ゆうぞら」とともに樹齢の進んだ樹で有意に高くなりました。特に樹齢差の大きい「ゆうぞら」で濃度差が大きくなりました。このことからモモの果実中放射性Cs濃度は樹皮上の放射性Csの沈積量の影響が高いものと推察されました。

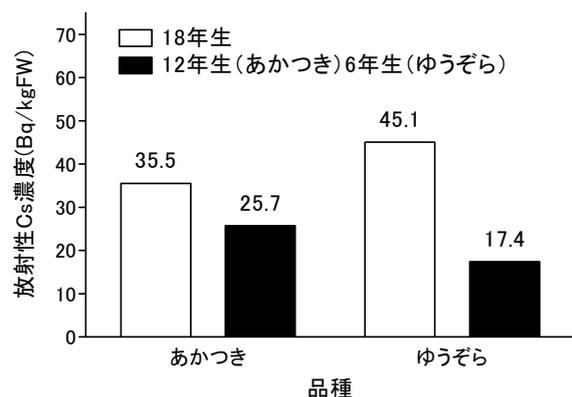


図22 樹齢を異にするモモの果実中Cs濃度比較

リンゴ、モモ、カキの樹体解体調査およびモモの促成栽培による果実への放射性Csの移行源の検証

フォールアウト初年度の調査から果樹では土

壤からの放射性Csの吸収移行は無い可能性が高いと推察されましたが、これを検証するためにリンゴ、モモ、カキの解体調査をしました。モモは東京大学、カキは学習院大学との共同研究として実施しました。その結果、いずれの樹種においても根部への放射性Csの分配率は3%以下でした。果樹では、根から放射性Csが吸収された場合の根部の分配率は30%程度となりますので、根からの吸収は無かったことが明らかになりました。なお、根で測定された放射性Csは秋根の伸長に伴う貯蔵性Csによるものと考えております。

更に、東京大学との共同研究として果樹研究所の3倍程度の土壌汚染が認められた伊達市モモ園で育成された4年生「あかつき」を非汚染土壌に移植後、促成栽培を行い解体調査をしました。その結果、新生組織への分配率は3%以下にとどまりました。この試験においては新生組織の放射性Csは全て貯蔵性Csの再転流によるものと解釈できます。このことからフォールアウト2年目の果実中放射性Cs濃度は2次汚染および土壌からの吸収移行がなければ大きく減衰するものと推察されました。

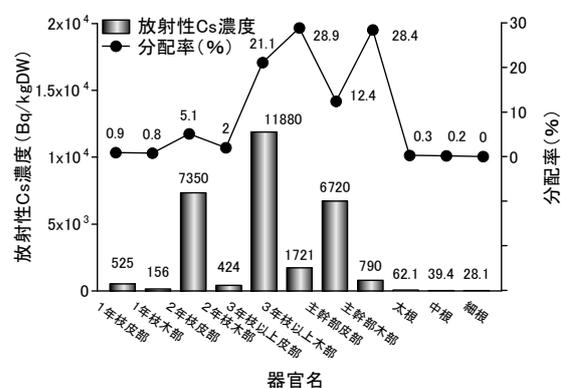


図23 リンゴの部位別放射性Cs濃度と分配率

2012年産果実中放射性Csの経年減衰効果

汚染2年目の2012年産のウメ、オウトウの成熟果における¹³⁷Cs濃度は2011年と比較して1/3～1/8まで減衰しました。またモモ「あかつき」についても1/3～1/5までに減衰する見通しとなっており、本年のモモ以降の落葉果樹の放射性Cs濃度はNDに近いレベルまで低下

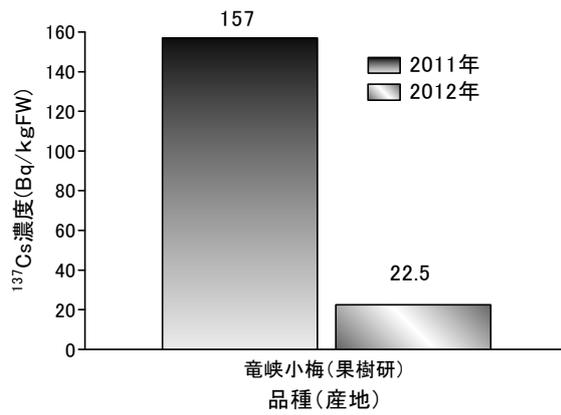


図24 ウメ果実中¹³⁷Cs濃度の年次比較

する可能性が高いと思料しているところです。

最後に

果樹研究所での放射能汚染対策試験は、東北大学電子光物理学研究センター、学習院大学、東京大学および福島大学による継続的な御指導のもとに実施されました。この紙面をお借りして、多大なる御支援をいただきました各大学の方々に感謝を申し上げます。

特集（福島問題）

原子力機構の環境修復の取り組みに参加して

吉川英樹（日本原子力研究開発機構）

平成23年の3月21日の春分の日明けに連絡が入った。職員数名が福島県庁に出張し、住民への電話相談窓口の応援をするという内容であった。平成23年3月11日の東日本大震災に伴い東京電力（株）福島第一原子力発電所（以下「第一発電所」と記す）において、 ^{131}I 、 ^{137}Cs 等の放射性物質が環境中へ放出されたことに対する住民の不安に答える目的である。（独）日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」と記す）では、災害対策基本法および原子力災害対策特別措置法に基づき、事故対策本部（本部長：理事長）が設置され、国を初め地方自治体等に職員を専門家として派遣し、モニタリング車等の設備を提供した。その後も、福島県、文部科学省、内閣府等の活動に関連し、健康相談窓口の設置、学校の放射線計測、除染モデル事業の実施など、平成23年度で約4万人以上の職員が動員された。現在は福島市内に福島環境安全センターを設置し、筆者も一部業務を兼務担当している。原子力機構は、原子力研究の中核的機関として、環境放射線の測定と放射線防護の観点から、原子力対策本部等の国の関係部署と一体化した業務を進めてきた。福島県のみならず、関東地区など、各自治体からの要請をうけ、放射線測定と環境修復の実務、除染計画作成等への提言、各町内会や教育機関における説明会への講師としての参加など、種々の役割を実施している。本稿では筆者の体験談を交え原子力機構の環境修復活動についての一部を紹介する。

1. 空間線量率測定と電話相談

事故発生直後から環境モニタリングが実施された。住民への放射線防護の観点から、日々の空間線量率を測定し、数値を更新するとともに地域の土壌中の放射性物質濃度について計測し、マップを作成して関係機関に情報を伝え

るためである。全国の事業所から駆けつけた職員は杉妻会館という結婚式場を本部として、夜は広間に一人一畳のスペースに雑魚寝し、朝のミーティングの終了とともに福島県内各地に散らばってゆく。十数名の班が交代時期をずらせ4日間滞在する。測定チームや医療支援班だけではなく、震災後で物資補給のままならない中、食事から必要な機材まで調達をする支援要員など、50名近くは駐在していた。当初はトイレ、シャワーが不自由であり、昼食は持ち込ん



杉妻会館の雑魚寝の様子



電話相談の様子

机上のパソコンで質問に関連した記事や情報の検索、最新の線量データを調べる。

だパンとカップめんであったが、筆者の行った頃にはカレーライスが食べられるようになっていた。

筆者は12時間交代勤務で1週間滞在し県職員や他機関からの応援者とともに、住民からの放射線に関する電話相談に従事した。内容は質問、要望、怒り、激励等で、呼び出し音が途切れることはほとんどなかった。深夜、明け方に関係なく受話器を置くと2秒で次の人に繋がる。それでも、住民の方を長時間お待たせしていたようでお叱りを受ける。洗濯物を乾してよいかとか、自作の野菜を食べてよいか等、生活に関する質問をはじめ「健康相談窓口」というもののあらゆる分野の問い合わせに対応した。

2. 教育現場の環境修復

昨年(2011年)の5月に、子供の生活環境の被ばく線量が問題となり、多くの時間を過ごす教育現場の環境修復が求められた。筆者は5月上旬の福島県庁での健康相談の際、昼休みに県庁前の小学校を通ったときの静かさには複雑な思いがした。桜も満開なのに、誰も校庭で遊んでいないのである。同世代の子供を持つ親として、外で遊ばせられない環境は早急に改善すべきテーマに感じた。ちょうど、文部科学省から原子力機構に福島県内の学校・幼稚園の校庭・園庭を対象とした実地調査を行うよう指示され、福島大学の協力のもと、福島市内の福島大学附属中学校および幼稚園を対象にした実地調査と、環境修復効果を調べた活動に参加した。炎天下の中、少し風のある日だった。周囲からの汚染土壌の巻き込みを注意しながら、50cm四方の範囲を50cmまで掘削し表面土壌の線量率変化を求めた。表面で $2.0\mu\text{Sv/h}$ であった線量が、5cmで $0.4\mu\text{Sv/h}$ 、21cmで $0.1\mu\text{Sv/h}$ に低減した。このことから、約5cm程度の表層土の剥離を行えば土壌の表面線量率が大幅に低減可能であることがわかった。さらに、そこで下層土と交換する試験(天地返しと言う)を実施し1/10の線量率低減を実証した。環境修復としては学校側の判断で、表層土を削除し新たに客土する方法が最終的に採用された。



校庭における浸透深さ調査



校庭のモニタリング箇所の一部

幼稚園、中学校内で数百箇所の測定点があり、当時は20名で2日間かかっていたが、現在ではGPSの利用で数人で2日間で終了できるように改善されている。

	線量率($\mu\text{Sv/h}$)		減少割合 (%)
	対策後	対策前	
中学校グラウンド			
100 cm	0.15 ± 0.07	2.5 ± 0.3	94
50 cm	0.16 ± 0.06	2.9 ± 0.3	94
1 cm	0.16 ± 0.06	3.1 ± 0.5	95
コート			
100 cm	0.11 ± 0.05	2.4 ± 0.2	95
50 cm	0.11 ± 0.06	2.7 ± 0.2	96
1 cm	0.12 ± 0.07	3.0 ± 0.3	96
中学校全体	0.15 ± 0.07		
幼稚園グラウンド			
100 cm	0.21 ± 0.06	1.9 ± 0.2	89
50 cm	0.22 ± 0.08	2.8 ± 0.2	92
1 cm	0.19 ± 0.09	3.1 ± 0.4	94
幼稚園全体	0.20 ± 0.08		

空間線量率は約1/10～1/20と大幅に減少。
(中学校グラウンド(1m)の平均 $2.5 \rightarrow 0.15\mu\text{Sv/h}$ 、
幼稚園の園庭(50cm)の平均 $2.8 \rightarrow 0.22\mu\text{Sv/h}$)

3. 除染技術等調査事業

内閣府から受託し原子力機構が直接の事業として実施した活動として除染技術等調査事業を行った。南相馬市の森林に囲まれたレクリエーション施設と、伊達市の特定避難勧奨地点を含む居住地区内の環境修復活動を行った。先の教育現場の環境修復経験を基に、修復対象を広範囲に広げた事業であった。南相馬市では、バンガローでの宿泊者の被ばくを想定し、周辺森林の除染効果を確認すべく、除草、落ち葉かき、枝打ち、腐葉土層（リター層）など段階的な除去、また、10 m～30 m奥に向かい除去効果の実験的データ等を取得した。10 m奥部までの除去で空間線量率が40%程度低下したが、それ以上除去を進めても森林外縁部において測定される空間線量率はほとんど低下しなかった。地形や木々の高さによるが、森林近隣の生活圏の線量率を下げるうえで、除草と落葉除去とリター層の除去の効果が確認できた。



腐葉土層（リター層）など段階的な除去

斜面の除草効果においては、土木の専門家の意見を聞きつつ、大雨による倒壊防止等の斜面の保護を考えながら進めるので、思うように除去が出来ない箇所があることも分かった。一方、伊達市では、家屋の屋根、雨どい、庭、畑、果樹園、道路など多様な対象について種々の除染方法の検証を行った。本事業の実施時期は、夏に始まったが想定より遅れ年を越した。地元説明や仮置き場の設置がスケジュール通りに進まず、担当者は苦労していたが、本格的環境修復

の時期としては落葉の終わった頃で活動しやすい環境であったと筆者は思っている。いずれの場所も夏は炎天下の上、親指大のスズメバチやマムシが出現し、冬は凍土となりスコップも入らない状況となるので作業員の被ばくだけでなく作業安全の確保も重要であると感じた。なお、これらの成果は環境省の「除染環境ガイドライン」に反映されている。



野田総理大臣の伊達市の現場ご視察

4. 他の原子力機構の主な活動

筆者は参加しなかったが、原子力機構の線量測定については事故後、梅雨が本格化する前の集計として、多くの大学・研究機関とともに、第一発電所から概ね100km圏内の約2000箇所の土壌採取と空間線量率の測定、京大のKURAMAシステムを用いた主要道路の車両によるサーベイを実施した。その結果は昨年8月に「線量測定マップ」「放射性セシウムの土壌濃度マップ」として文部科学省から公表されている。
(<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryu2011/siryu35/siryu2-1.pdf#search='線量測定マップ'>)

(http://radioactivity.mext.go.jp/ja/contents/6000/5043/24/11555_0830.pdf#search='放射性セシウムの土壌濃度マップ')

また、原子力機構は文部科学省が主体となった航空機モニタリングによる空間線量率測定調査として広域環境モニタリングを実施した。大型NaI γ 線検出器を搭載したヘリコプター等により

高度150～300 mでの測定値から地表から1メートル高さおよび表面での空間線量率濃度を求めた。

原子力機構が参加・実施している活動の一部を紹介する。詳細は、ホームページを参照。

(<http://www.jaea.go.jp/fukushima/index.html>)

- ・原子力機構の取り組みの経緯（H23・24年度）
 - 3.11 「原子力機構対策本部」設置。指定公共機関として緊急事態への支援活動（環境モニタリング等開始）
 - 5.6 「福島支援本部」設置。福島市内で校庭・園庭の放射線低減対策効果の実証開始
 - 6.6 放射性核種分布の詳細調査開始
 - 6.30 福島事務所開設
 - 7.11 福島県民を対象に内部被ばく調査開始
 - 8.5 除染実証事業開始（伊達市、南相馬市）
 - 8.31 福島環境支援事務所等設置
 - 9.30 避難区域等での除染モデル実証事業開始
 - 11.21 福島環境安全センターに組織変更
 - H24.3.28 高専機構・福島高専と連携協力協定等締結
- ・災害対策基本法、原子力災害対策特別措置法等に基づく対応
 - 環境放射線測定・放射能分析、身体サーベイ
 - 文部科学省、原子力安全委員会、自治体への専門家等派遣
 - 健康相談電話窓口
 - 政府・東電統合対策室特別プロジェクトチーム
 - 住民の一時帰宅のための安全管理者派遣
 - 学校の放射線測定・プール水分析
 - 東電従業員、福島県民の全身放射線測定
 - 遠隔操作ロボット、支援車等の提供
- ・環境修復に向けた取組
 - 除染技術実証試験の実施
 - 企業等から除染活動に活用できる技術を募集

し、その効果、経済性等を確認・評価した。

-除染モデル実証事業

警戒区域、計画的避難区域等に指定されている12市町村（実施は11市町村だった）において民家、道路、農地などの広域の環境修復作業を実施した。除染結果の評価をはじめ、費用や人員数、所要時間、作業員被ばく線量などの労働環境評価も合わせ実施した。

-コミュニケーション活動

福島県内の児童保護者、教職員を対象に「放射線に関するご質問に答える会」を開催した。参加者が日頃、放射線について疑問に思っていること（基礎的情報や被ばく低減方法、線量測定など）について専門の職員が直接回答している。また、福島県からの要請により、ホールボディカウンタによる県民の内部被ばく測定を実施中で、平成24年8月末までに約2万5千人が測定した。

5. おわりに

最後に原子力機構の今後の取組みについて紹介する。福島環境安全センターでは、今後も国および自治体と連携し、本格除染への計画策定から現場での技術指導も含めた専門家派遣、各種講演会への講師派遣など継続する予定である。また、居住地、森林、河川などにおけるCs濃度・化学形態の分析、航空機モニタリングなどによる線量測定などのデータをもとに、Csの環境中分布、移動形態について将来予測を目指した研究開発を進める。原子力機構内関連箇所と連携し、例えばSpring-8等の最新の分析手法を用いた分析、分子動力学法による解析を通じたCsの収着機構を研究する。

謝辞：本稿作成に当たり福島環境安全センター小林純一参事、中山真一副センター長にご協力頂きましたので感謝いたします。

特集（福島問題）

環境放射線分布測定用ガンマカメラの開発

—福島第一原子力発電所内外での適用—

田所孝広（日立研究所 原子カシステム部）

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災により、福島第一原子力発電所において全電力喪失から炉心露出、炉心溶融、RPV損傷、さらにはPCV損傷となり、原子炉建屋の水素爆発に至った。これに伴い放射性のセシウム、ヨウ素等が大量に環境中に放出され、発電所内外に高濃度の汚染が発生した。発電所内の復旧作業においては、作業員の被曝低減のための除染が必須であり、発電所から20km圏内の立入制限区域においても、住民の早期帰還のための除染が必要である。除染作業は、汚染場所の特定、洗浄・取除きや掘出し等による汚染物質の除去、除染状況・効果の確認により行われている。除染作業中の被曝低減、及び、作業により発生する汚染物低減のためにも、汚染場所の特定、除染状況・効果の確認を効率的に行う必要がある。そのため、短時間に広範囲のガンマ線強度分布を測定可能な装置（ガンマカメラ）が必要とされており、海外メーカ及び東芝から数種類の装置が製品化されている [1～4]。日立では医療用ガンマカメラの技術を応用した核種分析が可能な装置を開発し、福島第一原子力発電所内外での適用を進めている。

2. 環境放射線分布測定用ガンマカメラ

2.1 ガンマカメラの構成及び仕様

開発したガンマカメラの構成を図1に、仕様を表1に示す。検出器部分には、医療用に開発したCdTe半導体素子を用いた16×16ピクセルの検出器モジュールを適用した。CdTe半導体素子は、バンドギャップが1.4eVと高いことから室温での測定が可能であり、素子の微細化が容易であることから高位置分解能の測定が可能である。また、密度が5.85g/cm³、実効原子番

号が50と高いことから、高感度での測定が可能である。

測定領域を光学カメラで同時に撮像し、ガンマカメラの測定結果と重ね合わせて表示することで、16×16画素のガンマ線強度分布を可視化している。また、装置内蔵のレーザ距離計で検出器と測定位置間の距離を計測することで、測定対象を点線源と仮定した場合の線量率の評価が可能である。各画素毎のエネルギースペクトルも収集しており、核種分析も可能である。可搬性を考慮し小型軽量化を図っているが、周囲のガンマ線バックグラウンド環境に応じて、簡易に遮蔽が追加可能な構造としている。データ転送はUSBを用いており、PCでのデータ処理後の結果を、1秒毎に画像表示可能である。ガンマカメラケースは、前方、後方及び上部が開く構造となっており、コリメータ交換や遮蔽の追加が容易である。測定時はカメラを三脚上に固定し、カメラをバッテリーと制御用PCにそれぞれ接続する。バッテリーは、軽量化を優先して電池ボックスとしているが、充電電池タイプの二次電池も接続可能である。

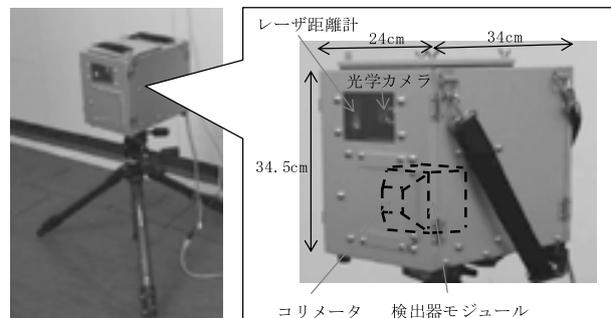


図1 ガンマカメラの構成図

表1 ガンマカメラ仕様

光学カメラ	640×480画素、視野角50°
レーザ距離計	測定距離0.05～約50m、精度±1.5mm
ピンホールコリメータ	タングステン製：ピンホール径φ0mm、2mm、4mm
遮蔽体	鉛製：標準厚2cm、追加遮蔽厚2cm
制御用PC	Windows7, タッチパネル方式
電池ボックス	16.5V,15W（単1電池11本使用）
重量	15.9kg（追加遮蔽時約45kg）
大きさ	幅24cm×奥行34cm×高さ34.5cm
データ転送方式	USB2.0
性能	
位置分解能	0.4m（5m先、φ2mmコリメータ使用時）
測定可能エネルギー範囲	350～1500keV（核種分析可能）

2.2 基礎性能評価試験

2.2.1 エネルギー分解能

汚染核種に応じた適切な除染を実施するために、核種の情報は重要である。核種同定は、ガンマ線エネルギースペクトルを測定し、核種毎に異なる全吸収ピークのエネルギーを同定することで実施する。開発したガンマカメラは、核種分析が可能なが大きな特徴である。核種同定の精度は、エネルギー分解能の精度に依存する。ピンホールコリメータを取り外した状態で、コリメータの焦点位置にCs-137及びCo-60の点線源を設置し、そのエネルギースペクトルを測定することで、エネルギー分解能を測定した。図2にエネルギースペクトルの測定結果を示す。Cs-137の662keVの全エネルギー吸収ピークの半値幅は2.3%、Co-60の1332keVの半値幅

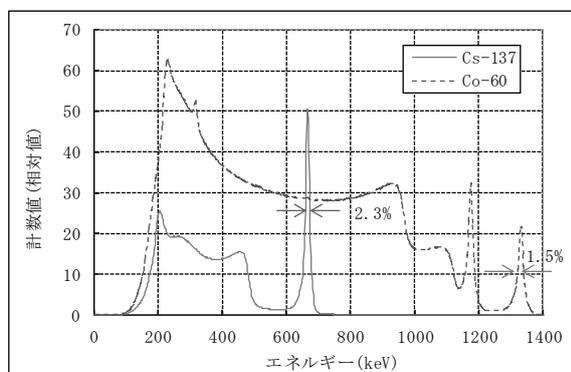


図2 エネルギースペクトル

は1.5%であり、今回の原子力発電所の事故により多量に環境中に放出されたI-131、Cs-134、Cs-137に加えて、Mn-54、Co-60等の金属の放射化により生成する核種、及び、K-40等の自然界に天然に存在する核種の同定が可能である。

2.2.2 空間分解能

ガンマカメラは、ガンマ線強度分布の測定領域を光学カメラで同時に撮像し、両方の測定結果を重ね合わせることでガンマ線強度分布を可視化している。表示密封線源（Cs-137:370MBq）を用いて、光学カメラの画像とガンマカメラの画像を重ね合わせた画像を図3に示す。線源とガンマカメラ間距離は5mである。光学カメラの画像とガンマカメラの画像における線源位置が良く一致しており、線源の空間上の位置が一目でわかるようになっている。

ガンマ線強度分布を測定する上で、空間分解能は重要である。図4に、空間分解の測定結果を示す。ガンマカメラの画素中心とコリメータ穴の中心を結ぶ延長線上5mの位置に、ガンマ線源を設置した時のガンマカメラの各画素のカウント数を測定し、画素番号に対するカウントを示すグラフのピークの半値幅を空間分解能とした。半値幅は1.6画素となっており、ガンマカメラから5mの位置における空間分解能は0.4mである。

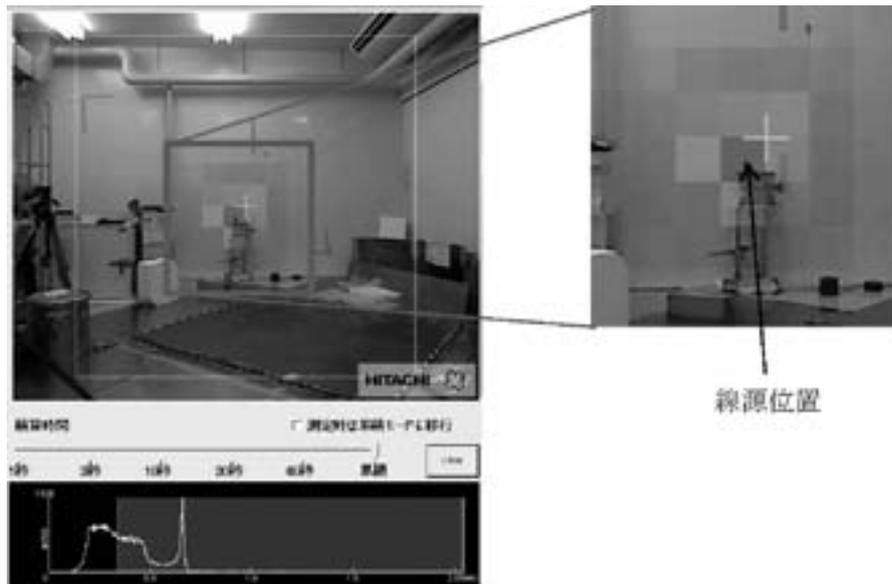


図3 光学カメラ画像とガンマカメラ画像の重ね合せ画像

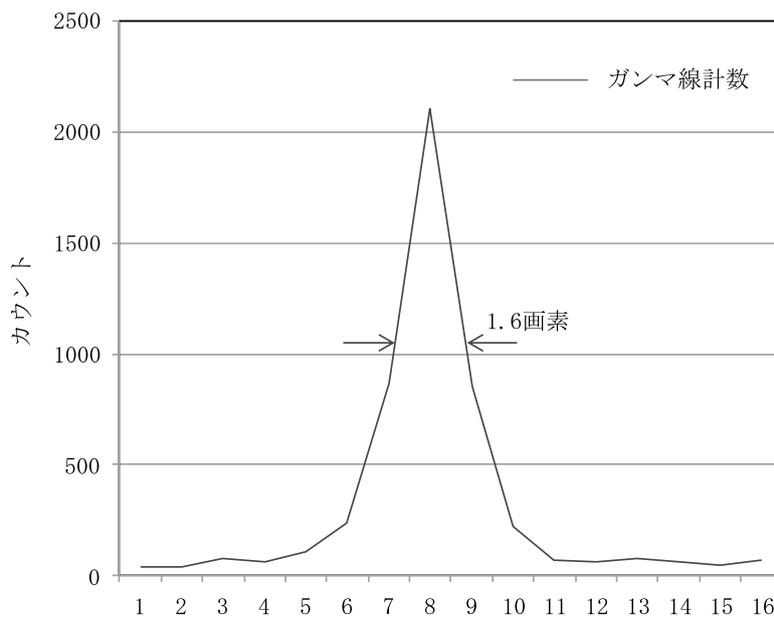


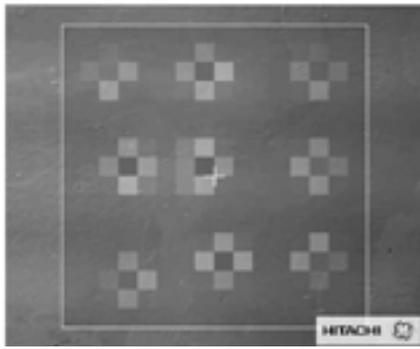
図4 ガンマカメラの各画素におけるカウント数の測定結果

2.2.3 均一性

ピンホールコリメータを使用した場合、視野内での感度が変わる可能性がある。線源を移動させ、視野内9点での感度の測定結果を図5に示す。視野内9点での感度は±5%以内であり、ほぼ均一となっている。

ガンマカメラの測定環境は高温になる可能性があるため、高温での動作確認が必要である。

装置を恒温槽に設置し、線源にはCs-137を用い、検出器部分の温度を変えてエネルギー分解能を測定することで動作確認をしている。結果を図6に示す。検出器温度が40℃を超えても、エネルギー分解能がほとんど劣化することなく2.5%以内であり、通常の温度環境下では動作に問題が無い。



視野内9点で測定

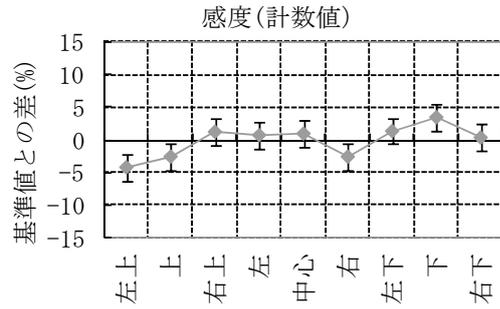


図5 感度の測定試験結果

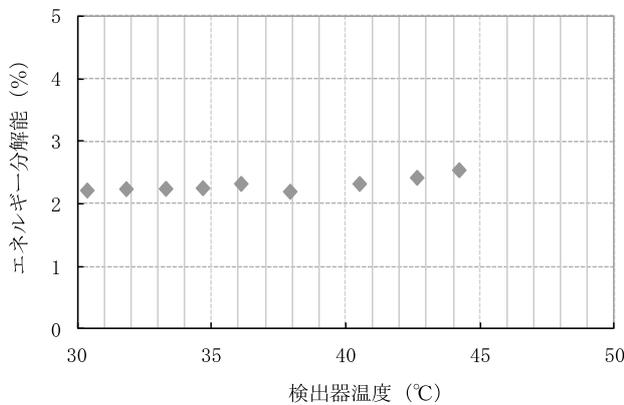


図6 検出器温度に対するエネルギー分解能の測定結果

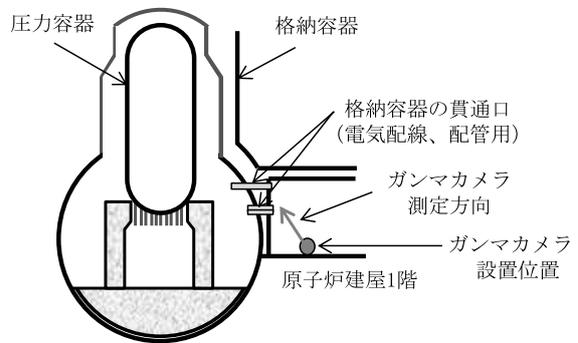


図7 ガンマカメラの測定場所及び方向

3. 福島第一原子力発電所内外での適用例

3.1 発電所内での適用例

ガンマカメラの高線量場での適用評価のために、福島第一原子力発電所の原子炉建屋内1階において測定を実施した。ガンマカメラ設置位置の雰囲気線量率は、7mSv/h程度である。測定場所及び方向を図7に、測定結果を図8に示す。格納容器の貫通口(ペネ)がホットスポットとなっていることが明確に測定できており、高線量場においてもガンマ線強度分布が測定可能であることを示している。

図9に、福島第一原子力発電所の原子炉建屋内1階の他の設置場所における測定結果を示す。

図9には、ホットスポット部分のエネルギースペクトルも示している。貫通口先端部分に線量が集積している場合は、散乱成分に対するピーク成分が大きくなると考えられ、ピーク計

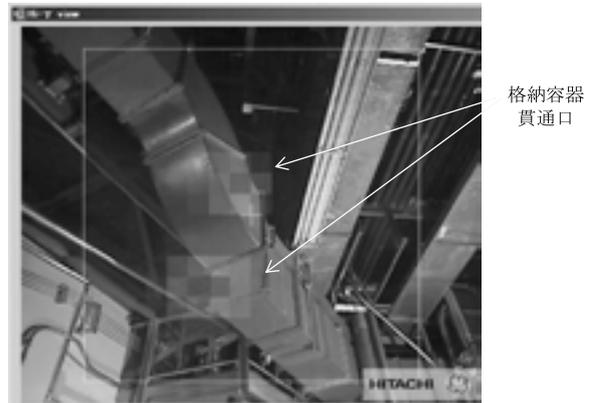


図8 ガンマカメラでの測定結果

数値をコンプトン計数値で除した値が大きくなると考えられる。また、貫通口の内部(従って、格納容器内部)に線量が集積している場合は、散乱成分に対するピーク成分が小さくなると考えられ、ピーク計数値をコンプトン計数値で除

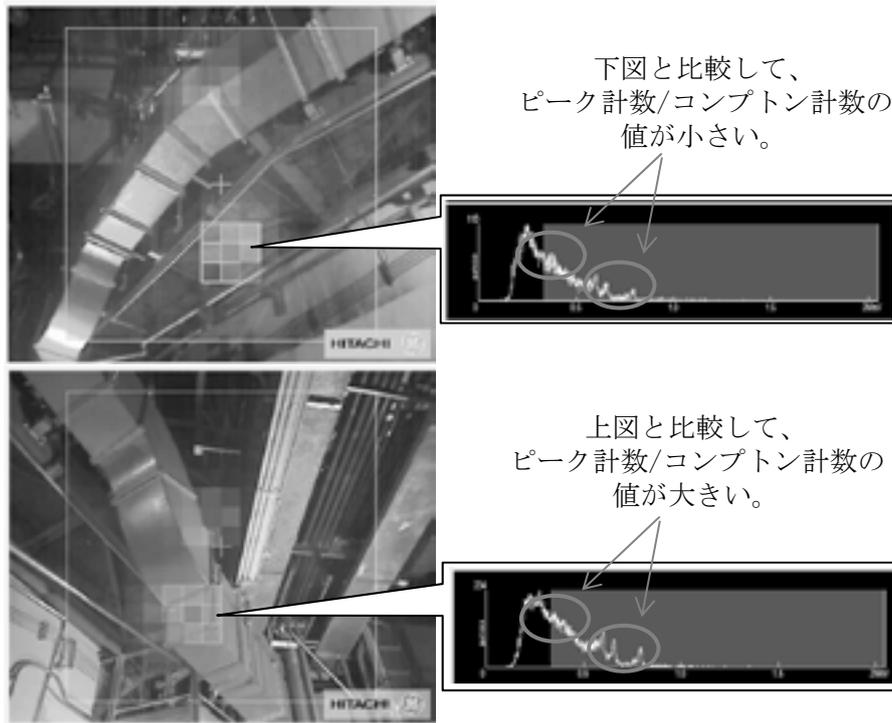


図9 他の設置場所でのガンマカメラでの測定結果

した値が小さくなると考えられる。上図の貫通口は、格納容器側が塞いでいることから、格納容器内部に線源があると考えられ、下図の貫通口は、格納容器外部側が塞いでいることから貫通口先端部分に線源が集積していると考えられる。上図のピーク計数値をコンプトン計数値で除した値は、下図と比較して小さい値になっており、ピーク計数値をコンプトン計数値で除した値で、線源位置を推定できる可能性を示している。

3.2 発電所外での適用例

発電所外の線量率が低い一般環境においては、一般的に測定時間を長く要する。日立のガンマカメラは、コリメータの大口径化、エネルギー測定範囲のワイドレンジ化、及び、統計ノイズフィルタリング技術の適用等により、測定時間の短縮を図っている。その結果、1mSv/年(0.23 μ Sv/h)の設置環境下で、2 μ Sv/h程度の線量集積範囲を30分程度で測定可能となっている。また、さらなる測定時間短縮のための高感度化も推進中である。図10に、茨城県北部の一

般環境の測定場所及び測定方向を、表2にサーベイメータでの測定値を示す。サーベイメータでの測定値から、木の根元部分に線量集積があることはわかるが、その範囲の調査には時間を要する。ガンマカメラによって、その集積範囲の可視化ができています。

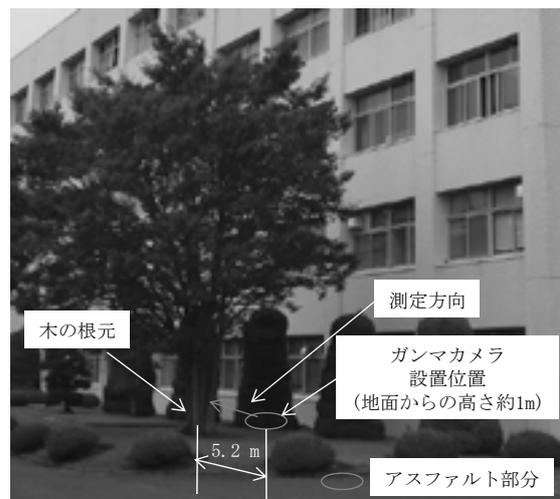


図10 一般環境の測定場所及び測定方向

表2 サーベイメータでの測定値

場 所	地表からの高さ		
	10cm	50cm	100cm
木の根元	1.92	0.85	0.58
アスファルト	0.21	0.19	0.19
ガンマカメラの設置位置	0.36	0.29	0.27

線量率 [$\mu\text{Sv/h}$]

図11に除染前後でのガンマカメラでの測定結果を示す。除染は、線量集積範囲の土壌を深さ5cm除去することで実施した。線量集積範囲における除染前後の計数率の比（除染係数）は1.96であり、ガンマカメラでの測定により除染効果の確認が可能である。



図11 除染前と除染後の測定結果

4. 車搭載型ガンマカメラ

作業者が入域困難な高線量場における測定には、ガンマカメラを車に搭載し、遠隔操作による測定が必要である。図12に開発を進めている車搭載型ガンマカメラを示す。原子炉建屋内は、電波が届く範囲が限られている。そこで、ガンマカメラを搭載した調査機と中継器の2台のロボットを使用し、調査機と中継機の間を無線通信し、中継機と制御・データ収集解析用PCと



図12 車搭載型ガンマカメラ

の間を有線通信することで遠隔操作を実現している。また、ガンマカメラのコリメータ前面にシャッター機構を設け、シャッターの有無による測定結果の差分を取ることで、S/Nの高い測定を実現している。既に、福島第一原子力発電所の1号機から3号機までの測定に適用しており、雰囲気線量率80mSv/hと非常に高い線量場におけるガンマ線強度分布を測定している。また、さらなる高線量場（～300mSv/h）での測定可能とするための開発を進めている。

5. まとめ

除染作業中の被曝低減、及び、作業により発生する汚染物低減のために、短時間で広範囲のガンマ線強度分布を測定可能なガンマカメラを開発した。開発したガンマカメラは、数10mSv/hの高線量場、及び、1 μ Sv/h以下の低

線量場においてもガンマ線強度分布の測定が可能であり、福島第一原子力発電所内外での適用を進めている。

今後は、より高線量場で測定可能な装置とすること、及び、より高感度化を図ることで低線量場における測定時間をさらに短縮することで、福島復旧・復興に貢献していく予定である。

参考文献

- [1] Cartgam ホームページ http://www.canberra.com/jp/products/wm_cart.asp
- [2] Gammacam ホームページ <http://gammacamnow.com/index.html>
- [3] Radcam ホームページ <http://www.rmdinc.com/products/p004.html>
- [4] 東芝ガンマカメラ <http://www.toshiba.co.jp/csr/jp/highlight/2011/revival04.htm>

学位論文要録

Behavior and formation mechanism of radioactive aerosol in accelerator facilities (加速器施設において生成する放射性エアロゾルの生成機構と挙動)

長田直之 (東北大学大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻 生活環境早期復旧技術研究センター)

学位授与：博士(工学) 京都大学大学院工学研究科 物質エネルギー化学専攻

主 査：柴田 誠一

平成24年5月23日

加速器室内では運転中に放出される高エネルギー放射線により空気中で核反応が起こり、放射性核種が生成している。また同時に化学反応が起こり、エアロゾルが生成しその一部は放射性核種を取り込み放射性エアロゾルとなっている。運転後に作業者が入室する際、放射性エアロゾルを吸入すると内部被曝を引き起こす可能性がある。放射性エアロゾルの個数濃度や粒径分布から呼吸器へ付着する量を見積もることが出来、それらは内部被曝・放射線防護のため重要な情報である。本研究では放射性エアロゾルの性状の見積もりの基礎資料となる、加速器室内で生成する放射性エアロゾルの生成機構・成長過程の解明を目的とした。

本研究で利用した京都大学原子炉実験所電子線型加速器施設内で生成する放射性エアロゾル粒子に含まれる放射性核種は、主に ^{13}N であった。加速器由来放射性 ^{13}N エアロゾル粒子は、これまで放射性エアロゾル粒子の粒径分布測定に広く用いられてきた拡散バッテリー法などにより粒径分布測定が試みられてきたが、粒径分布は得られていなかった。このため、まず放

射性 ^{13}N エアロゾル粒子に適した測定法を検討した。本研究では従来法では測定が困難な原因を、放射性エアロゾル粒子と同時に生成する放射性ガスによる妨害と明らかにし、その影響の程度と除去方法を検討し、改善した測定方法で得られた結果の妥当性を示した。また照射時間の経過による粒径分布の変化を捉えるために、少量の試料かつ短時間で測定が可能な Graded Screen Array 法を新たに適用し従来方法の約10分の1の時間で測定を行い、従来方法と同様の結果が得られることを示した。

改善した測定法を用い、エアロゾルを含まない清浄空気を電子線照射し生成した放射性 ^{13}N エアロゾル粒子の粒径分布を測定し、その生成機構を検討した結果を示した。測定した、放射性エアロゾル粒子とエアロゾル粒子全体の粒径分布の関係から、数十ナノメートル程度以下の粒径範囲では生成した粒子に放射性 ^{13}N を含む放射線化学反応生成物(主に硝酸と考えられる)が凝縮によって取り込まれ、放射性エアロゾル粒子となることを初めて示した。空気中にエアロゾル粒子が既に存在する場合は、既存のエアロゾル粒子表面に放射性核種が拡散運動によって付着し放射性エアロゾル粒子が生成すると考えられる。また、粒子生成の最初期にはイオン核生成により凝縮が起こり粒子を生成し、そのイオンの電荷は核反応の結果生成した放射性核種やそれらから放出される放射線由来であることを示した。そのエアロゾル粒子生成に重要な役割を果たすと考えられる、放射線化学反応によって生成する硝酸量を測定した。

放射性エアロゾル粒子の粒径分布と深い関係を持つ非放射性エアロゾル粒子の粒径分布測定を行い、その生成機構を検討した。 ^{60}Co ガンマ線照射装置と陽子サイクロトロンにより空気を照射し、生成した粒子の粒径分布測定を行った。どちらの照射においても空気に付与するエネルギー

ギーと粒径には関係があり、付与エネルギーの増加に伴い粒径も増大した。数十分程度の短時間では、粒子の主な成長過程は粒子同士の衝突によるものではなく、気相中の放射線化学反応生成物の粒子上への凝縮によるものと示した。生成した粒子の安定度についても測定を行い、照射空気中の水分が粒子の安定に関係することを示した。水分の存在は粒子の安定に寄与するが、ある程度以上の水分はイオン核生成機構による粒子の生成を妨げるために照射して生成する個数濃度はむしろ減少することと示した。

これら加速器で生成する放射性エアロゾル粒子の粒径分布の変化をモンテカルロシミュレーションによって模擬し、上記の測定結果とあわせて生成機構の検討を行い、また含まれる核種の半減期の粒径分布への影響についても示している。放射性エアロゾル粒子の生成機構を、粒子上への放射性核種の拡散運動による付着、放射性核種を含む放射線化学反応生成物の粒子への凝縮、放射性核種をイオン核とする粒子生成と3通り仮定し、それぞれ放射性エアロゾルと同時に存在する非放射性エアロゾルについて粒子を成長させて粒径分布を計算し放射性核種の半減期との関係を示した。拡散運動による付着と粒子への凝縮を仮定した生成機構では、これまで知られていると同様の粒径分布が見られ半減期の違いによる影響はなかった。放射性核種がイオン核となり粒子生成を起こすとした仮定では半減期が長い核種を含む放射性エアロゾル粒子では大粒径の粒子が存在し、短半減期核種では小粒径の粒子の存在のみが計算によって示された。短半減期核種では、粒子が成長する間にその核種は壊変して放射性エアロゾルでは無くなるためであると考えられる。この結果は、

フェルミ国立加速器研究所の120GeVシンクロトロンで初めて得られた多くの核種を含む加速器放射性エアロゾルの測定結果と一致しており、その生成機構を説明できた。

以上の結果をまとめ、放射性¹³Nエアロゾルの生成機構およびその成長過程について明らかにすることができた。今後、その他の核種を含む放射性エアロゾルの生成機構に拡張し、放射線施設で生成するエアロゾルにとどまらず、自然環境中で生成するエアロゾルの生成機構の解明についての基礎的資料となることが期待できる。

代表的な関連論文

- [1] N. Osada, Y. Oki, H. Kanda, K. Yamasaki and S. Shibata, Application of a graded screen array for size measurements of radioactive aerosols in accelerator rooms, Proc. Radiochim. Acta 1, 2011, 251 – 255
- [2] N. Osada, Y. Oki, K. Yamasaki and S. Shibata, Influence of Radioactive Gas on Particle Size Measurement of Radioactive Aerosol with Diffusion Battery Method, Prog. Nucl. Sci. Technol. 1, 2011, 483 – 486
- [3] S. Yokoyama, K. Yamasaki, Y. Oki and N. Osada, Time Variation of Particle Size Distribution of Aerosols Generated at Accelerator Facilities, Jpn. J. Health Phys. 43 (4), 2008, 333 – 340
- [4] N. Osada, Y. Oki, K. Yamasaki and S. Shibata, Application of Aerosol Formation to Radiation Dosimetry in High-Dose Radiation Fields, Prog. Nucl. Sci. Technol. (in press)

トピックス

IAEA Japan Proficiency Test

大浦泰嗣 (首都大学東京)

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の非破壊ガンマ線測定が国、大学、民間企業、市民団体など様々な機関で行なわれている。これらの定量値の信頼性を確保するためには、含有量既知である標準物質の分析が欠かせない。しかし、当初、国内には環境中の放射性核種定量のための標準物質がなかった。(現在では、土壌 [JSAC 0471, JSAC 0472, JSAC 0473] と玄米 [CRM 7541-a] の認証標準物質が頒布されている。) そこで筑波大学の恩田裕一教授が国際原子力機関 (IAEA) と交渉し、IAEA より標準物質を提供してもらい、日本限定での放射性核種測定技能試験 (The IAEA-TEL-2011-08 National Japanese proficiency test on the determination of radionuclides in soil, grass, water and air filters) が行なわれることとなった。

この技能試験 (PT) には、筆者も含め、大学、国立研究所、民間企業など21機関が参加した。配布された試料は、水、土壌、草、ならびにエアフィルタの計10試料で、表1に示す α 放射体も含む放射性核種が含まれている。土壌と草は、チェルノブイリ事故により汚染した環境試料から調製されており、水とエアフィルタは既知量の放射性核種を添加した人工試料であった。各機関の分析結果は、4月までにIAEAに報告され、5月下旬には各参加機関にそれぞれの評価結果が届いているようである。10月にIAEAの担当者が来日し、報告会と技術指導が行なわれる予定となっている。このPTの詳細については、<http://fmwse.suiri.tsukuba.ac.jp/JapanPT.html> をご覧ください。

ここで、筆者の分析について簡単に紹介したいと思う。水、土壌、草はU-8容器に分取し、エアフィルタは受け取った状態のまま γ 線を測定した。Ge検出器の計数効率曲線作成のための標準線源

には、日本アイソトープ協会製のU-8型9核種混合アルミナ線源 [MX033U8PP] と $^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$ アルミナ線源 [MX035U8PP] をもちいた。また、9核種混合標準溶液 [Ecker&Ziegler社製7900] をもちいてU-8型の溶液標準線源を調製し、水溶液とアルミナでの計数効率を比較したところ、誤差内で一致した。そこで実際の定量にはすべてアルミナ線源から求めた計数効率を使用することとした。フィルタ用の標準線源は、同サイズの石英フィルタに既知量の標準溶液 [7900] を滴下・乾燥して作成した。この機会に院生時代にN88-basicで作成した計数効率曲線 (二次式+一次式) をフィットするソフトをEXCELのVBAによりやく移植した (筆者のHPからダウンロードできます)。ガンマ線測定でのサム効果は教科書の知識だけで、これまで実際に考慮したことはなかった。今回、 ^{60}Co と ^{88}Y よる計数効率は、サム効果によって明らかに低くなっていることがわかったので、 ^{109}Cd の88keVから ^{54}Mn の835keVまでの計数値から計数効率曲線を作成した。標準線源に含まれる核種の定量には、その計数効率をそのまま用いた。

まず、練習として土壌標準試料IAEA-444の定量をおこなった。この標準試料は、恩田教授により提供され、参加機関で回覧して使用された。このIAEA-444の定量では、59keVガンマ線を利用する ^{241}Am の定量値が全く合わなかった。88keVから59keVへの外挿により得た計数効率が正しくなかったと判断した。そこで、水試料の ^{241}Am の定量は、IAEA-444から求めた計数効率を使用することにした。

PT用の試料は、できる限り複数の検出器で定量した。エアフィルタの ^{134}Cs の定量では、#10試料を使って、検出器上に置いての測定と15cmほど離しての再測定を行い、サム効果の補正係数を得て、残り2枚の定量に適用した。複数の検出

器における定量値が一致することを確認した後、IAEAに結果を報告した。我々の定量値の評価は、 ^{241}Am を除いて満足のいくものであった。低エネルギーの γ 線の測定には注意を要する事を再認識したしだいである。

本PT実施にご尽力され、また、参加する機会を与えていただいた恩田教授に感謝致します。

表 試料と核種

水	500g	4種類	(01, 02, 03)
^3H , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{241}Am			
土	150g	1種類	(04)
^{40}K , ^{137}Cs , ^{234}U , ^{238}U , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$			
草	250g	3種類	(05, 06, 07)
^{137}Cs			
エアフィルター	34mm ϕ 3	3種類	(08, 09, 10)
^{57}Co , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{241}Am			



追悼文

ローランド先生を偲んで

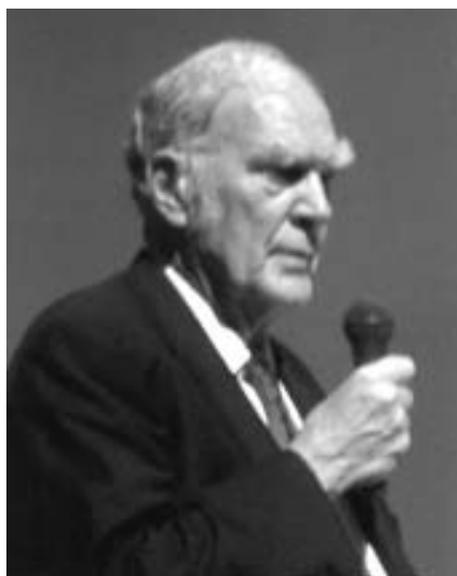
富永 健 (東京大学名誉教授)

本会外国人特別会員で米国カリフォルニア大学教授のシャーウッド・ローランド氏 (F. Sherwood Rowland、友人からは Sherry と呼ばれていた) は、2012年3月10日パーキンソン病の合併症のため、カリフォルニア州コ罗纳デルマーの自宅で84年の生涯を閉じた。

氏は、これまで度々招かれて来日し、とくに放射化学者とは戦後早くから交流があり、わが国の放射化学の発展にも寄与するところが大きかった。その後、クロロフルオロカーボン (CFC、日本ではフロンともいう) による成層圏のオゾン層破壊の発見によって、1995年ノーベル化学賞に輝いた (日本化学会の名誉会員でもある)。大気地球環境問題のパイオニアというべき氏の突然の訃報は、世界的に大きな損失であるばかりでなく、放射化学・大気化学の両面で長年緊密な協力・交流を続けて来た筆者らにとっても痛恨の極みである。ここでは、日本の放射化学とのかかわりを中心に氏の足跡を偲びたい。

ローランド氏は、1927年6月28日米国オハイオ州デラウェアの生まれで、オハイオウェスリアン大学を卒業後シカゴ大学の W. F. Libby 教授 (後に炭素14年代決定法の発見で1960年ノーベル化学賞受賞) に師事し、放射性臭素の有機ホットアトム反応の研究で1952年 Ph. D の学位を得た。そして、プリンストン大学、カンザス大学を経て1964年新設のカリフォルニア大学アーバイン校 (UCI: University of California, Irvine) の化学科主任教授となり、以来今日まで中心的な存在であり続けた。

カンザス大学でトリチウムによる水素置換などのホットアトム化学反応の研究を始めたころ、氏のグループに神原富尚博士 (静岡大学) が加わったのが日本とのかかわりのきっかけである。まもなく、1959年静岡で開催された第3回放射化学討論会で特別講演の予定であった G.



von Hevesy 教授が急病のため、代役としてローランド氏が初めて来日することになった (氏は1980年弘前での第24回放射化学討論会でも特別講演を行っている)。当時は、海外の著名な学者の来日はまだ稀で、討論会の後、氏は招かれて各地の核・放射化学研究室を訪れてリーダーや若い研究者達に接する機会を得た。東大の斎藤信房教授門下の大学院生 (修士2年) であった筆者も錯体のホットアトム反応についての研究をセミナーで披露したが、この出会いが半世紀を超える氏とのつきあいの始まりになるとは予想もしなかった。木村健二郎名誉教授の招きで訪れた日本原子力研究所では、氏は後にウィーンのIAEAで再会することとなる原礼之助博士にも会い、その後梅澤弘一博士、立川圓造博士をはじめ原研からカンザス大学やUCIのローランド研究室に次々に留学する流れが続いた。

東大からは、1967～68年筆者がまだ建設途上のUCIのローランド研究室に博士研究員として1年半ほど滞在した。当時すでに、氏はト

リチウムなどのホットアトム化学を中心に核放射化学分野で活躍する物理化学者として著名であり、反応メカニズムなどをめぐって R. Wolfgang エール大学教授と学会でいつも激しい論争を展開していた。その後、巻出義紘博士、佐藤春雄博士をはじめ4名が留学しているが、1970年代後半以降はローランド研究室では放射化学よりも大気化学の研究が主流になっていった。こうして、静岡大、原研、東大、京大などから氏のグループに参加した研究者は十数名にのぼり、これらの分野での交流・協力を果たした。

一方、このような個人的レベルでの協力に止まらずホットアトム化学をはじめ核放射化学全般にわたる組織的な研究協力の推進という意味では、1973年大磯で開催された第1回の日米セミナー「放射化学的手法およびその応用における最近の進歩」(NSF・日本学術振興会主催)の役割が大きい。このセミナーの日米の代表者は木村健二郎名誉教授とローランド教授であり、核放射化学と応用分野を代表する研究者達が合宿して重要な課題について熱心な討議を行なったもので、日米間の相互理解とその後の協力・交流の土台づくりに役立った。米国側の参加者には G. R. Choppin, R. H. Herber, A. P. Wolf, H. E. Suess らが含まれていた。このセミナーから9年後(1982年)には、第2回の日米セミナー「放射化学的手法のライフサイエンスにおける応用の最近の進歩」が筆者とローランド教授らを代表者として UCI で開催されている。

世界のホットアトム化学研究がピークに達した1970年頃には新たな展開が必要となって、ローランド教授も化学者の取組むべき新たな課題を求めて周辺分野にも関心を向けつつあった(師の Libby 教授からは、いつも「何か新しいこと」に挑戦するように教えられていた)。そして、大西洋上の大気中に極微量の人工物質 CFC を検出したという J. E. Lovelock の報告が、ローランド教授に大気化学への第一歩を踏み出させた。スプレーの噴射ガスとして大量に大気中に放出され、かつ化学的に極めて安定なこの物質は最後にどうなるのか? 1973年に氏のグループに新たに加わった博士研究員 Mario J. Molina

とともに大気中での CFC の挙動や寿命の研究に着手した(筆者はこの話を日米セミナーのコーヒブレイクに氏から聞いた記憶がある)。まもなく、CFC が対流圏ではほとんど分解せずに蓄積し、やがて成層圏に上昇すると強い紫外線によって初めて分解され、塩素原子が放出されるとの結論に達した。そして、塩素原子は成層圏オゾン層で連鎖反応により多数のオゾン分子を分解する結果、数十年後にはオゾンの1割近くが失われると予測した。この仮説が1974年に発表されると大きな反響をよんだが、氏にとっては主に業界からの強い反発や懐疑的な化学者たちからの批判という逆風の中であってその正当性を実証する長い苦難の日々の始まりであった。しかし、大気の観測・分析や実験室での研究によって仮説の正しさは次第に証明されてゆき、さらに1980年代に入って南極オゾンホール の出現や北半球でのオゾン減少傾向などの決定的な証拠が明らかとなって世界はオゾン層保護のためにフロン規制の画期的な取組み(ウィーン条約・モントリオール議定書)に踏み出すこととなったのである。今日では、オゾン層保護はこれまでの地球環境問題の中で唯一の成功例とも云われているが、これは発見の当初から全体像を的確に見通した氏の優れた科学者としての洞察力と科学者の社会的責任に対する強い信念と勇気の賜物と云っても過言ではあるまい。氏はまた科学者として極めて公正にふるまい、逆風の中でも決して問題を誇張したり、マスコミを都合よく利用したりすることはなかった。このような思慮深さと倫理観に、社会的影響の大きい問題にかかわる科学者達は範をとるべきであろう。

1995年氏らに贈られたノーベル化学賞の授賞理由は、「オゾン層の消長を支配するメカニズムを明らかにし、人類を地球環境問題の破局的な結末から救うことに貢献した」ことで、自然科学の賞にはやや異例の社会的貢献が評価されているが、氏にとってはむしろ本望であったかも知れない。また氏が手にした多くの栄誉の中でも特に縁の深い日本から贈られた日本国際賞(1989年)は感慨深いものであったようである。

その後の氏は、大気化学の巨星として学界の

信望を集める一方、NASのForeign Secretary (米国科学アカデミーの国際部長)として環境問題ばかりでなく各国が直面するさまざまな課題に対応する国際的な取組みの推進にも活躍していた。

若い頃にはセミプロの野球チームでプレーしたこともある氏は、2メートル近い堂々たる体躯と平生は厳しい風貌やや辛口の応待から、気難しい人と思われやすいが、実は細やかな気配りも豊かで温かな人柄であった。スポーツ好きであったが、またメトロポリタンオペラの後援会に名を連ねる大のオペラファンでもあった。一年の半ば以上を旅に過すほど超多忙

であった氏も、最近健康がすぐれない様子で気がかりであったが、去る3月12日深夜のニュースで以前東大で氏の来訪を受けた際の古い映像とともに突然訃報が伝えられ愕然とした。逆風下の苦難の時期に氏を最も支えてきたJoan夫人は、筆者の哀悼の電話に対して“*It is the passage of time, Ken*”と静かに答えた。遺骨は氏の遺志により自宅を望む太平洋に散骨された。半世紀近くにわたって筆者の敬愛するmentorであり、良き友人であったSherry Rowlandの冥福を心から祈りつつこの追悼文を捧げる。

追悼文

Attila Vértes 先生を偲んで

by Ernő Kuzmann

(竹田満州雄先生よりご紹介)

Springer 社の web ページに掲載 (Springer 社より転載許可)

Attila Vértes (1934–2011), famous Hungarian nuclear chemist and educator dies

Attila Vértes, renowned radiochemist, member of the Hungarian Academy of Sciences, distinguished professor of the Eötvös Loránd University, Budapest, author of over 500 original scientific papers, editor of numerous science monographs, outstanding science organizer, everyone's Attila died on 31 December, 2011.

Born in Túrje, Hungary, 1934 Attila Vértes received his M.S. degree in chemistry at the Technical University Budapest in 1958. He earned his second M.S. degree in Economy in 1962 from the University of Economics, Budapest. Having had joined the Department of Radiochemistry of the Lomonosov (Moscow State) University, he was awarded the Candidate of Sciences (PhD) degree by the Soviet Academy of Sciences in 1965. He received the Doctor of Science degree of the Hungarian Academy of Sciences in 1973 for his thesis entitled "Mössbauer studies of the chemical structures of solutions". Attila Vértes became a Corresponding, then an Ordinary Member of the Hungarian Academy of Sciences in 1993 and 1998 for his inaugural addresses on positronium chemistry and Mössbauer spectroscopy of coordination compounds, respectively. In 1974, he became professor in chemistry at Eötvös Loránd University, Budapest. He headed the Department of

Nuclear Chemistry of Eötvös Loránd University, Budapest from 1983, and the Research Group of Nuclear Methods in Structural Chemistry of the Academy from 1996 until his retirement in 2004. He continued his teaching and research activities as Professor Emeritus at the same university.

He had been a visiting scientist at the University of Newcastle, a Humboldt Fellow at the Technical University Munich (Germany) as well as a guest professor at Lehigh University, Bethlehem (USA), Tokyo University (Japan) and at Johannes Gutenberg University, Mainz (Germany).

Since the very beginning of his career, Professor Vértes was much interested in the interaction of nuclear radiation with matter, focusing his activities on Mössbauer spectroscopy and positron annihilation spectroscopy. In Mössbauer spectroscopy, he substantially contributed to obtain significant experimental data and to elucidate hyperfine interactions of iron, tin and europium in alloys, composite materials, biomolecules, inorganic salts, organometallic and coordination compounds, as well as high-temperature superconductors. Remarkable are his contributions to the understanding of the complex formation and equilibria in aqueous and non-aqueous solutions.

He was great in disseminating excellent scientific ideas. Besides being an outstanding scientist, Attila Vértes was an outstanding organizer. He established a large number of scientific collaborations.

His significance and position in the scientific community was recognized by the Hungarian Academy of Sciences by his becoming chair of the Division of Radiochemistry (1993–2002), and that of numerous domestic and international conferences. From 1980 to 1988, he was a member of IBAME, the International Board on the Applications of the Mössbauer Effect and held editorial spots on some of the international journals in the field.

He received the title of Honorary Doctor of Glasgow Caledonian University (U.K.) in 1996. He was awarded the

Széchenyi Prize in 2001 and the George Hevesy Medal Award in 2004.

Professor Vértes co-authored more than 500 scientific papers in international journals on topics of nuclear and radiochemistry, radiation chemistry and physics, chemical physics, inorganic chemistry, solid-state chemistry and physics, electroanalytical and materials chemistry. He also made over 280 presentations at international conferences. As a member of the Mössbauer Century Club, he had the distinct honor of having the highest number of publications (503) amongst the Mössbauer spectroscopists. He is author and editor-in-chief of 10 monographs and textbooks in the field of nuclear and radiochemistry, including the voluminous Handbook of Nuclear Chemistry (Springer, 2003 and 2011). His valuable Textbook on Nuclear and Radiochemistry (Elsevier, The Netherlands, 1987) is used

extensively in university courses.

Professor Vértes was a great educator and established a school in nuclear chemistry. He consistently promoted young scientists, starting their career by creating appropriate positions and funds and by helping them to attend schools, courses. Professor Vértes was a demanding but inspiring teacher. Many chemists and physicists considered him not only a valued colleague but also a dear friend and a mentor. His students and followers have spread all over the globe.

He had an open and charming personality free from formalities. Professor Vértes was addressed or mentioned by his first name Attila not only by his friends but by all colleagues and acquaintances around the entire world. Attila was an exceptionally warm and unpretentious person, with old-world grace and a good sense of humor. He was a loving husband to his wife Irén, a father to his sons Attila and Csaba, and a proud grandfather of Csaba Jr.

Dear Attila, your warm character and sincere attitude shall never be forgotten.

Ernö Kuzmann

Attila Vertes had friendships with Professors Hirotoshi Sano, Yoshimasa Takashima, late Eiji Fujita, late Yuuji Nakamura, Yonezo Maeda, Tetsuro Nishida, Kiyoshi Nomura and me.

Masuo Takeda

施設だより

理研 RI ビームファクトリーの被害状況と震災対応

羽場宏光 (理化学研究所仁科加速器研究センター)

1. はじめに

埼玉県和光市にある理化学研究所 RI ビームファクトリー (RIBF) は、重イオンリニアック (RIKEN Linear ACcelerator, RILAC) とサイクロトロン 5 基 (K70 AVF Cyclotron, AVF ; K540 RIKEN Ring Cyclotron, RRC ; K570 fixed frequency Ring Cyclotron, fRC ; K980 Intermediate stage Ring Cyclotron, IRC ; K2500 Superconducting Ring Cyclotron, SRC) から構成される重イオン加速器施設である。本施設では、RILAC と AVF を RRC の入射器とし、RRC + fRC + IRC + SRC と連結して、ヘリウムなどの軽いイオンで核子当たり 400 MeV ($400 \text{ MeV nucl.}^{-1}$)、ウランなどの重いイオンで $345 \text{ MeV nucl.}^{-1}$ まで加速することができる。この高エネルギー重イオンを標的原子核に衝突させて生じる入射核破砕反応生成核を、BigRIPS (Big RIKEN Projectile fragment Separator) によって分離し、U までの全元素領域にわたって

RI ビームを世界最大強度で発生させることができる。また、RRC、AVF、RRC からは、それぞれ最大 135、14.5、6 MeV nucl.^{-1} の重イオンビームを取り出すことができる (加速可能なイオン種、エネルギーや強度の詳細は、ウェブサイト [1] を参照)。RIBF は、2006 年から稼働を開始し、原子核、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いる。本稿では、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による RIBF の被害状況と理研仁科加速器研究センター (仁科センター) の震災対応について報告する。

2. 被害状況と復旧

東北地方太平洋沖地震において、和光市の震度は 5 弱であった。RIBF の主な地震被害は、リニアック棟と仁科記念棟の加速器ビームラインの破損であった。図 1 に破損した真空ダクトの写真を示す。仁科センターでは、全

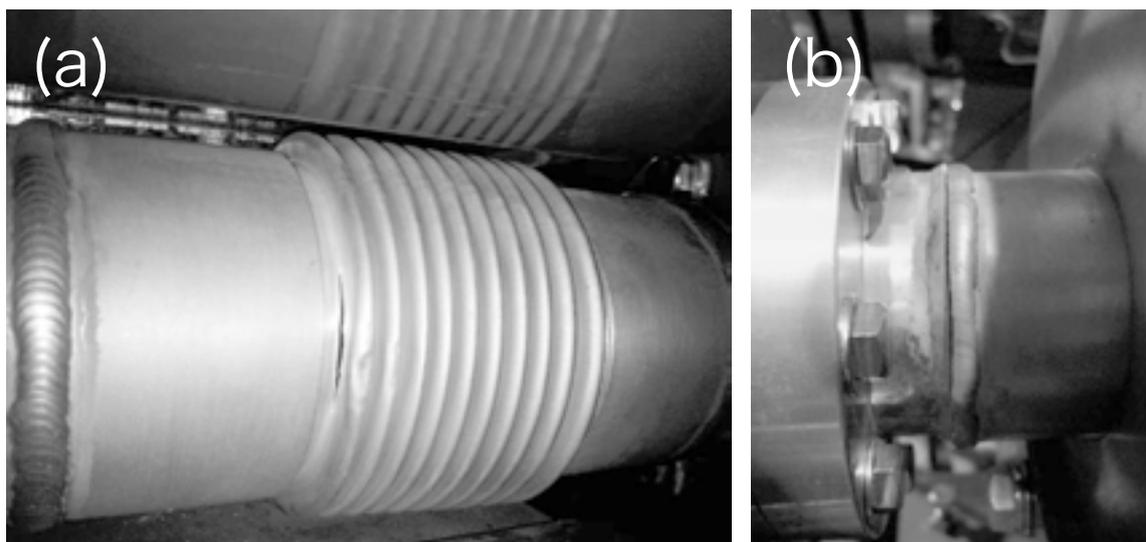


図 1 リニアック棟(a)と仁科記念棟(b)の加速器ビームラインの破損の様子。理研仁科加速器研究センター加速器基盤研究部上垣外修一氏提供。

力でRIBFの復旧作業を行い、地震から僅か約3週間でまずRILACを稼働させた。それから約2ヶ月間で、全ての加速器とBigRIPS、ZDS (Zero Degree Spectrometer)、SHARAQ (Spectroscopy with High-resolution Analyzer and RadioActive Quantum beams) などの大型基幹実験設備を稼働させた。半年後の7月15日には、国内外のRIBFユーザーに2011年度後期ビームタイムの募集を開始した。

3. 震災対応

東北地方太平洋沖地震から4日後、3月15日午前4時、理研和光研究所のモニタリングポストの実効線量率が、通常の $0.03 \mu\text{Sv h}^{-1}$ から上昇を開始し、午前10時に最大値 $1.15 \mu\text{Sv h}^{-1}$ を記録した。この異常な事態に、筆者らは、まず駐車していた自動車の窓ガラスをスミアし、ゲルマニウム検出器を用いて γ 線を測定してみた。図2に、その γ 線スペクトルを示す。福島第一原子力発電所の事故起源と推測される ^{131}I 、 ^{132}gI 、 ^{133}gI 、 $^{131\text{m}}\text{Te}$ 、 ^{132}Te 、 $^{134\text{g}}\text{Cs}$ 、 $^{136\text{g}}\text{Cs}$ 、 ^{137}Cs

などが明確に同定されている。筆者らは、定量的なデータを得るため、急いで仁科記念棟の2階テラスにローボリュームエアサンプラーを設置し、2011年3月15日から2012年3月16日までの1年間、継続して大気中放射能濃度を計測した。ここでは、 ^{140}La 、 ^{140}Ba 、 ^{137}Cs 、 $^{136\text{g}}\text{Cs}$ 、 $^{134\text{g}}\text{Cs}$ 、 ^{133}gI 、 ^{132}gI 、 ^{132}Te 、 ^{131}I 、 $^{131\text{m}}\text{Te}$ 、 $^{131\text{g}}\text{Te}$ 、 $^{129\text{m}}\text{Te}$ 、 $^{129\text{g}}\text{Te}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 、 ^{99}Mo 、 $^{95\text{g}}\text{Nb}$ などの核種が同定された。理研和光研究所における大気中放射能濃度の計測結果は、実効線量率と降雨量データとともに、日本放射化学会ウェブサイト「緊急時環境放射能モニタリングデータ」などで公開している [2]。

筆者らは、平成23年度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・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」において、日本原子力研究開発機構（原子力機構）の委託を受け、土壤汚染マップ作成に向けた土壌試料の放射線分析を行った。仁科センタ

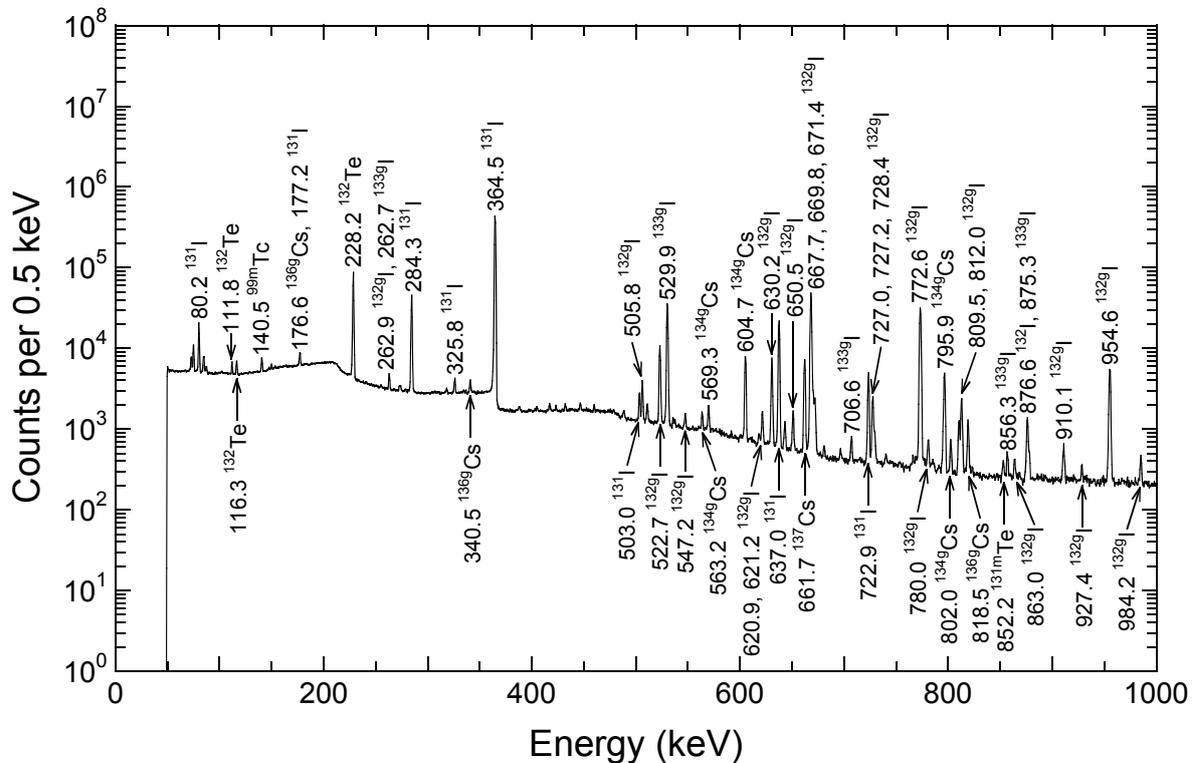


図2 2011年3月15日14時30分、理研和光研究所(35° 46' 44' N、139° 36' 54' E)にて採取された屋外スミア試料(1.75 m²)の γ 線スペクトル。試料採取後13分から7207秒間測定。

一職員30名の協力を得て、294の土壌試料をゲルマニウム検出器を用いて測定し、 ^{131}I 、 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 、 $^{129\text{m}}\text{Te}$ の5核種の放射能を決定、東京大学原子核科学研究センターにデータを提出した。この計測結果は、他の20機関による測定データと合わせて、文部科学省より8月30日(^{134}Cs 、 ^{137}Cs)、9月21日(^{131}I)、10月31日($^{129\text{m}}\text{Te}$ 、 $^{110\text{m}}\text{Ag}$)に公表された[3]。また、同推進費「農地土壌等における放射性物質除去技術の開発」において、水産総合研究センター、筑波大学、慶應義塾大学との共同研究「太陽光レーザーを用いた藻類成長プラントの開発」に協力した。筆者らは、ストロンチウムのトレーサー実

験に有用な ^{85}Sr をAVFサイクロトロンを用いて $^{85}\text{Rb}(p,n)^{85}\text{Sr}$ 反応によって製造し、化学精製、ゲルマニウム検出器とICP-MSを用いた製品検定を行った後、筑波大学に供給した。本プロジェクトでは、放射性物質除去に適した藻類の選定、大量培養技術の開発、太陽光を用いた藻類成長プラントの開発などが行われた[4]。

仁科センターの多数の職員が、被災地住民のスクリーニングや土壌試料採取のために東北地方に向かった。さらに、環境放射能測定や放射線検出技術の開発なども行われた。これらの取り組みは、仁科センターの年報「RIKEN Accelerator Progress Report」の福島セクション

表1 RIKEN Accelerator Progress Report Vol. 48に掲載予定の福島第一原子力発電所事故関連の論文。

Author	Title of the paper
N. Aoi <i>et al.</i>	Radiation screening of evacuated people in Fukushima
H. Haba <i>et al.</i>	Measurement of radioactivity concentrations of airborne radionuclides in Wako after the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident
Y. Kobayashi <i>et al.</i>	Measurement of ^{137}Cs and ^{90}Sr in a surface soil sample obtained from Namie, Fukushima
H. Matsumura <i>et al.</i>	Diffusion of radioactive materials from Fukushima Daiichi nuclear power plant detected by gamma-ray measurements on expressways
S. Moriya and H. Otsu	Gamma ray spectroscopic analysis of underwater environmental samples of nearby ocean from Fukushima Daiichi nuclear power plant
H. Mukai <i>et al.</i>	Gamma-ray dose resulting from the accident at Fukushima Daiichi nuclear power plant, as measured by the radiation monitoring posts in Wako campus
H. Otsu <i>et al.</i>	Environmental radioactivity at Wako from Fukushima Daiichi nuclear power plant
H. Otsu <i>et al.</i>	Radioactive Xe arriving in and passing through Wako area
F. Sakuma <i>et al.</i>	Measurement of β -ray emitting isotopes from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident
S. Shimoura	Analysis of gamma-ray emitters in soils for obtaining maps of deposited radioactive substances around Fukushima Daiichi nuclear power plant
A. Taketani <i>et al.</i>	Development of pulse height analyzer for education about radiation
M. Wada	Alternative method to evaluate internal dose using simple γ -ray spectrometer
M. Wada	NaI scintillation detectors for quantitative measurement of radioactive cesium in milk, blood urine, and soil
M. Wada <i>et al.</i>	Pilot survey of feral cattle in the vicinity of Fukushima Daiichi nuclear power plant
M. Wada and H. Haba	Simple screening method for radioactively contaminated food using ashing method with Geiger-Müller counter

ンに纏められ、近々出版される予定である [5]。表1に、論文の題目を示す。その他の仁科センターの震災対応として、被災した原子力機構タンデム加速器の実験課題「中性子魔法数126を有するアクチノイド原子核の合成」をRIBFで受け入れ、2011年10月2日～8日、RILACを用いて行った [6]。

4. おわりに

理研RIBFの震災被害は、前号で報告があった他の東日本の加速器施設（J-PARC [7]、筑波大学タンデム加速器施設 [8]、原子力機構タンデム加速器 [9]、東北大学電子光理学研究センター [10]）に比べて非常に小さな被害状況であった。RIBFの施設利用は、地震から半年後の2011年9月より再開されているが、昨今の電力事情は、大型加速器施設であるRIBFにとって重大な問題である。

RIBFでは、共用促進・産業連携部が窓口となり、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進めている。放射化学分野から、RIBFを利用したユニークな研究課題が次々生まれることを期待したい。RIBFの利用方法については、ウェブページ [1] を参照いただきたい。

参考文献

- [1] 理化学研究所仁科加速器研究センター RIBF ビームファクトリーウェブサイト (<http://www.nishina.riken.jp/RIBF/accelerator/overview.html>).
- [2] 日本放射化学会ウェブサイト (<http://www.radiochem.org/kinkyu/index.html>)。H. Haba, J. Kanaya, H. Mukai, T. Kambara, and M. Kase, *Geochem. J.* **46**, 271 (2012).
- [3] 文部科学省ウェブサイト (http://radioactivity.mext.go.jp/old/ja/distribution_map_around_FukushimaNPP/).
- [4] 読売新聞、2012年4月3日。朝日新聞、2012年4月26日。
- [5] Fukushima Section, RIKEN Accel. Prog. Rep. **45** (in press). RIKEN Accelerator Progress Report ウェブサイト (<http://www.nishina.riken.jp/researcher/APR/archive.html>).
- [6] Y. Wakabayashi et al., RIKEN Accel. Prog. Rep. **45** (in press).
- [7] 二宮和彦、三浦太一、放射化学ニュース **25**, 47 (2012)。
- [8] 笹 公和、放射化学ニュース **25**, 50 (2012)。
- [9] 長 明彦、放射化学ニュース **25**, 55 (2012)。
- [10] 菊永英寿、放射化学ニュース **25**, 58 (2012)。

施設だより

東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターの被災状況と現状

涌井崇志（東北大学 サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター）

1. はじめに

東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター（CYRIC）は、930型サイクロトロン（ $K=110$ MeV）と、小型のHM12型サイクロトロンを有する学内共同利用施設である。930型サイクロトロンでは、陽子や重陽子と、ヘリウムからアルゴンまでの重イオンが加速され、5つのターゲット室に設置された合計9本のビームライン（図1）に供給されている。これらのビームは、理工学からライフサイエンスにわたる広い分野において、研究や教育、民間企業の開発研究など多目的に利用されている。一方、HM12型サイクロトロンは、陽電子断層撮影（PET）用のポジトロン放出核種製造専用であり、12 MeVの陽子と6 MeVの重陽子が加速されている。HM12型サイクロトロンに付設されている短寿命RI製造装置で生成されたPET核種は、PET用薬剤の開発研究やPET装置を用いた臨床研究に利用されている。

2011年3月11日に発生した東日本大震災において、CYRICが位置する仙台市青葉区では震度6弱の強い揺れに見舞われた。幸いにも人的な被害は無かったが、加速器施設やPET診断装置、放射線管理システムなどが被害を受けた。本稿では、加速器施設を中心に、CYRICの被害状況や復旧作業の現状、そして共同利用再開の見通しについて紹介する。

2. 震災後の対応

地震発生時、930型サイクロトロンはメインコイルを通電しての電流安定度試験を実施していた。一方、HM12型サイクロトロンは平成22年度の共同利用をすでに終了しており、停止中であった。また、これらの他にECRイオン源単独での試験運転を実施していた。加速器オペレータなどの試験運転要員は、全て制御室に居

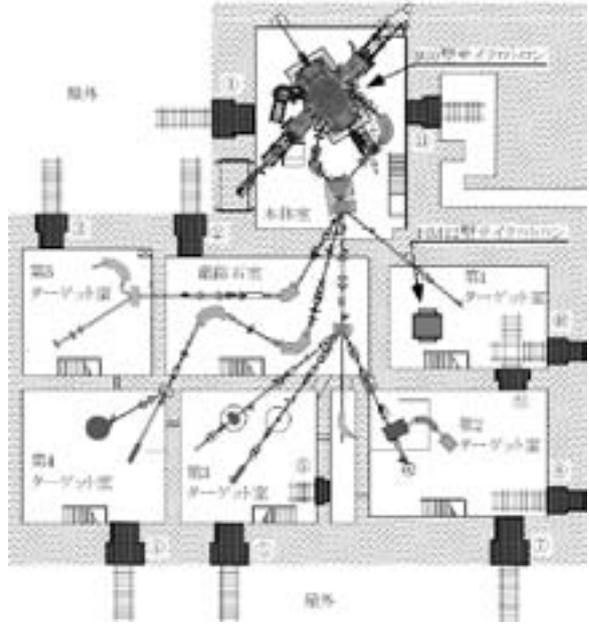


図1 加速器施設の概略図

た。地震の揺れが強くなってきた段階で、制御室の全員が制御机の下にもぐり、落下物に備えた。揺れが長く続く間に停電した。揺れが収まってから緊急時対応マニュアルに従って指定の避難場所に集合した。加速器施設が置かれているサイクロトロン実験棟は耐震補強を中心とした改修工事が2009年に行われており、建屋に大きな被害が無く、また、居室や管理区域についても柵固定等の耐震対策や避難路の幅の確保が徹底されており、スムーズに避難することができた。避難場所では、大きな余震が断続的に続く中、研究部ごとに点呼を取り、当日CYRICに居た全員の無事を確認した。その後、放射線管理の担当者は、放射性物質の漏えいにつながる建屋被害の確認のために、また、加速器グループは、火災等の二次災害を予防する措置を取るために管理区域内に入域した。作業を短時間で終えるために、分電盤の遮断器などはそのまま

とした。作業終了後、作業者の点呼を取り、施設全体を施錠・閉鎖し、解散した。

週が明けた3月14日には、施設部による建屋の状況調査が行われ、問題の無いことが確認された後に建屋への立ち入りが可能となった。そこで懐中電灯を片手に施設の被災状況の確認や、施設の受変電設備の主遮断器の開放などを実施した。受変電設備への特高の受電は、翌15日であった。施設内の復電作業では、まず各分電盤で遮断器を一旦開放し、その後系統ごとに絶縁試験を実施しながら慎重に復電することとした。この段階でCYRIC内に大学の「福島第一原子力発電所事故対策本部」が設置されることとなり、事務機能の回復と合わせてサイクロトロン実験棟の非管理区域を優先して復電作業を行った。続いてCYRIC周辺の空間線量データを自動取得するために、放射線モニタリングシステムを復電した。しかし、測定データの処理を行う主装置がラックから落下しており、再起動ができなかった。さらに各検出器からの信号も正常に送信されておらず、システムとしてほぼ全損という状況であった。

3月16日の時点でも断水が続いていたが、受水槽内に水が残っていたため、出勤者がトイレを使えるよう、受水槽のポンプを復旧した。水道の復旧は翌3月17日であった。この頃はまだ、公共交通機関がマヒし、ガソリンも極めて入手困難であったため、地震発生以降3月23日までは、出勤可能な職員を除いて原則自宅待機としていた。自宅待機中の3月22日には災害報告書を提出するよう連絡があり、目視点検の結果をまとめて提出した。

各機器の動作試験などの本格的な被害状況調査は、通勤事情が改善し、生活も落ち着きを取戻し始めた4月に入ってから開始した。また、被害状況調査や復旧工事の間には、大学総長や文部科学大臣をはじめとする文科省関係者、国会議員の視察が行われた。

3. 施設の被災状況

930型サイクロトロンは、重さが250トンあり、太さ1.7×0.8 m、高さ4 mの2本の鉄筋コンクリート製の支柱で支えられている。この支

柱上部には梁が渡されており、横揺れを抑制する構造となっている。今回の地震では、この梁よりも上部が損傷した(図2)。この損傷によりサイクロトロンが5 mm程度傾いた状態となった。サイクロトロン本体では、加速箱を位置決め・固定するプレートの溶接部分に大きな亀裂が生じ、位置決めピンも変形、また固定ブラケットが破損した。また、メインコイルの一部で焦げ跡が見つかった。RF共振器では、レールの固定部品が破損し、共振器後部の外筒台車の車軸が偏芯した。RFアンプの内部でもアンプの固定ビスが抜けて散乱したほか、コンデンサー取り付け部が変形し、破断寸前の状態となった。本体周辺では、図3に示すように、床に固定されている機器と本体との間で主な被害が生じた。

ビーム輸送系では、7か所でビームダクトの外れが見られたほか、これによる大気流入で一部の真空ポンプが破損した。また、主として四重極電磁石や偏向電磁石に±1 mm程度の位置のずれが生じ、レベルも1 mm程度の沈み込みが確認された。電磁石では、ビームダクトの接続用クランプがコイルに当たり破損しているものや、落下物が当たりコイルが部分的に破損しているものがあった。電磁石の電源は、一部がラックごと傾倒し破損した。電磁石室(図1)では、送風用ダクトの吊下支柱が脱落し、ダクトが落下したが、天井クレーンの桁に乗り、ビームコース上への落下は免れた。

各実験室では機器の搬出入用の遮蔽扉の被害が大きかった。全ての遮蔽扉はターゲット室の



図2 サイクロトロン本体の支柱

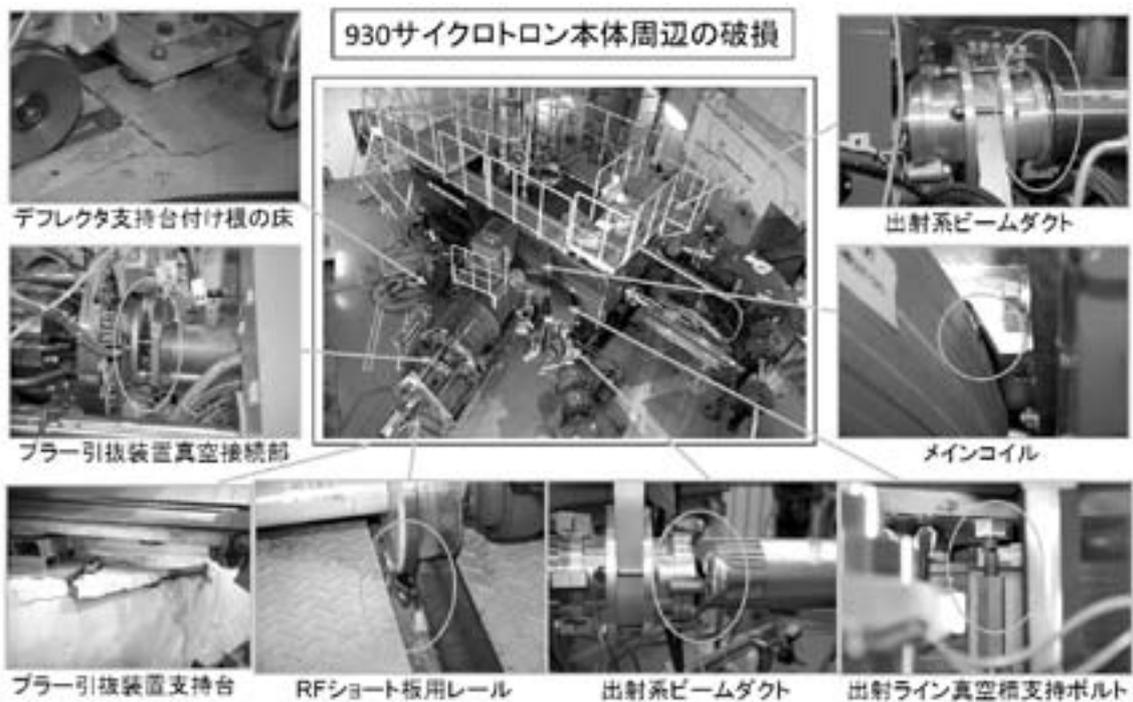


図3 930 サイクロトロン本体とその周辺の被害

開口部にたいして垂直に出し入れするタイプの
もので、開口部の壁と扉の間には5 mm 程度の
隙間しかない。また重さは場所にもよるが、10
～20 トンである。遮蔽扉のうち、特に図1に示
した⑧（第2ターゲット室）と⑩（第1ターゲッ
ト室）は、地震発生時に開けられていたため、

扉に対して横方向に揺さぶられ、駆動部分が耐
えられずに大破し、扉本体が台車から外れて床
に落ちた状態となった。これらの扉はターゲッ
ト室入り口の開口部をふさいだ状態になってお
り、入室路は狭い階段通路だけで、復旧工事用
の大型機材を搬入できない状況となった。屋外

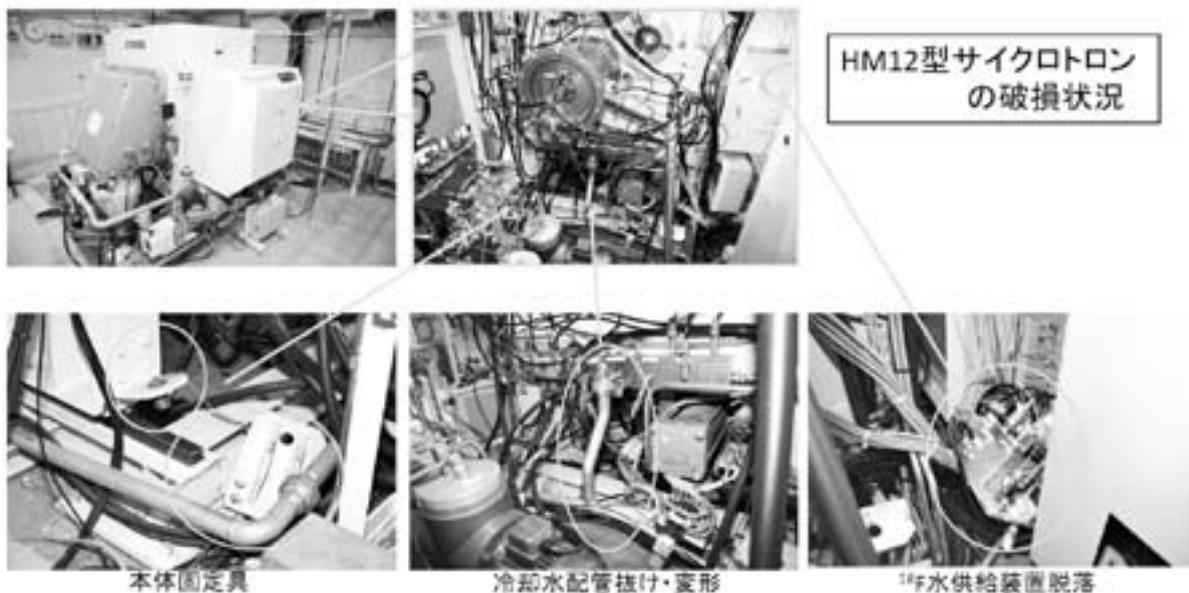


図4 HM12サイクロトロンの被害



図5 PET関連の被害。ホットセルの排気ダクト(左上)。ドーズキャリブレータ(右上)。オートガンマ装置(左下)。落下物が散乱した測定室(右下)。

へ通じる①～⑤と⑦の遮蔽扉では、レールの基礎が特に南側に向かって傾斜しており、扉を閉め切ることができない状態になった。これらの遮蔽扉ではレールの水平を調整し直す必要が生じた。さらにほとんどの遮蔽扉は駆動方向にたいして横にずれが生じ、開口部の壁と擦れる状態となった。特に⑩の遮蔽扉では、本震から数日後の開閉試験の際に、開けることは出来たものの、開口部の壁に当たり閉められない状態となった。この扉は4月7日の最大余震でずれが戻り、閉められるようになった。

HM12型サイクロトロンは、ヨークが縦置きとなっており、全体がレールに乗せられている。今回の震災では、地震の揺れに伴って、ヨーク全体がレール上を揺さぶられ、ヨークを固定しているロックピンとその取り付け部分が破損した。これによりヨーク全体がレール上を動き、

冷却水配管は変形して抜け、配管固定用のサポートが破断した。配管・配線用のケーブルベアも破損した。その他、 ^{18}F 用の水供給装置が架台から脱落し、駆動系や電磁弁が破損した。

PET用の薬剤合成装置関連では、ホットセルの排気ダクト(樹脂製)に大きな亀裂が生じ(図5左上)、余震のたびに成長した。ホットセルの内部では、オイルバスからオイルが溢れ出していたほか、鉛の遮蔽ブロックも一部が崩れていた。また、停電により冷蔵庫や冷凍庫に保存していた合成サンプルや合成試薬の一部が使用不能となった。試薬類については、棚が倒れることもなく、また、棚には落下防止のガードが付いているため、試薬瓶の飛び出しや落下等の被害は皆無であった。

PET診断装置については、従来からのPET装置に加えて、最近、PET/CT装置が導入され

た。これらのうち、PET装置では揺れによりガントリーとキャビネットとの間に50 cmのずれが生じたものの、被害は見られなかった。一方、PET/CT装置では、2本の光電子増倍管で割れや動作不良が見つかった。周辺機器では、PET薬剤の放射能を測定するドーズキャリブレーションの落下(図5右上)と転倒により各1台ずつが破損し、放射性水合成・投与装置で動作不良が確認された。また、オートガンマ装置(図5左下)などが落下した。

4. 施設の復旧作業と今後の予定

復旧計画を立案するにあたって最も心配だったのは、930型サイクロトロン支柱の強度であった。強度に問題がある場合、修繕方法によっては930型サイクロトロンを全て解体し、一度撤去する可能性が考えられたためである。本体室内の床面は建屋の構造上、耐荷重が低く、解体したヨークなどの重量物を置くことができない。一方で、本体室外への遮蔽扉は開口部に十分な大きさが無く、そのままでは搬出も出来ない。930型サイクロトロンを解体・撤去となると、930型サイクロトロンを搬入した際に利用した搬入口を再び開ける必要が生じる。この搬入口は現在、厚さ5 mのコンクリートで埋められており、これを開放する場合には放射線管理区域の一時的な変更も伴う。そこで復旧工事に先立ち、支柱強度の調査を行った。その結果、支柱の強度に問題は無く、支柱の修繕工事でも930型サイクロトロンを現状以上に大きく持ち上げる必要が無いことが判明した。

支柱の修繕工事に先立ち、2011年6月下旬から本体室内の入出射系ビームラインやイオン源、関連機器の撤去作業を開始した。これらを撤去し、支柱周辺にスペースを確保した段階で、200トンのジャッキ4台を使った山留を設置し、支柱に荷重がかからない程度に930型サイクロトロン本体を持ち上げた。その状態で、支柱上部の破損部分を囲うように鉄板を巻き、支柱と鉄板の間にグラウトを注入し、固定した。十分に乾燥・固化させた後に、930型サイクロトロンを支柱にかけたところ、支柱の最上部に設置されている基板がたわんで両端部が持ち

上がり、支柱との間に隙間が生じた。このたわみの程度は、上ヨークの上げ下げのたびに変化し、その影響で930型サイクロトロン本体の水平レベルが変わってしまう状態となった。このたわみを無くすために、930型サイクロトロン本体の荷重を抜いた状態で、支柱の基板周辺部に20 cm程度の間隔で5 mm程度の穴を開け、エポキシ樹脂を注入して基板と支柱を接着・固定する対策を取った。この対策により、基板のたわみ具合が変化しなくなり、水平レベルも変化しないことが確認された。また、支柱の修繕作業と並行して、プラー引抜装置固定部のモルタルや、デフレクタ取り付け部の床面などを補修した。

支柱の修繕作業と並行して、遮蔽扉の復旧工事を優先的に進めることにした。震災以来、多くの遮蔽扉で開閉に難があり、復旧作業用の機材搬入に支障があったためである。遮蔽扉の修繕工事は、2011年7月下旬に着手した。被害の大きかった扉⑧と⑩(図1)の修繕方法については、前述のように大型機材の搬入が不可能であったうえに室内のクレーンは2.8トンの能力しかなかったことから、現場で解体・撤去し、新規に製作する案が提示された。しかしこの方法では、管理区域内から大量の廃棄物が生じるほか、相当量の粉塵が発生する懸念があったため、現場でなんとか持ち上げ、大破した駆動部分を入れ換えたうえで、位置を調整する方法を試みた。遮蔽扉を持ち上げる際には、チェーンブロックやジャッキを駆使し、時にはクレーンの桁も利用した。最終的にはこの方法が成功し、扉の位置も1 mm単位で調整された。室外へ通じる遮蔽扉は全て、レールの水平を調整し直す必要があった。工事の際には、遮蔽扉をレール上に残したまま作業ができるように、実験室開口部と屋外側に分ける工程とした。工事は、レールが埋められているコンクリートの一部を削り、レールを一度取り外し、ベースプレートの高さを調整して水平を出し、再度レールを敷設してからコンクリートを打設する手順で実施した。開口部は放射線管理区域であるため、粉塵の飛散防止措置を講じたり、廃棄物の汚染検査体制を確立したりするなど、慎重に作業を

進めた。全ての遮蔽扉の修繕が完了したのは、2011年11月であった。

930型サイクロトロンは、支柱の修繕工事終了後、サイクロトロン本体の水平を仮に出し、RF共振器やデフレクタ、メインプローブなどの周辺機器を慎重に取り外した。本番の芯出し・水平出しの作業は、上ヨークを上架して実施する必要があるため、サイクロトロン本体に二つの地震対策を施した。一つは、サイクロトロン本体の横ぶれを抑制する50トンジャッキである。このジャッキをサイクロトロン本体と本体室床との間6か所に入れて突っ張ることで、サイクロトロン本体が建屋と一緒に揺れるようにし、支柱への負担を減らしている。このジャッキは、サイクロトロン本体の芯出し調整にも使用された。二つ目は、上ヨーク上架時に、ヨークの落下を防止するブラケットである。上ヨーク上架時に上下のヨークをブラケットで固定することで、上ヨークの横ぶれを抑制している。このブラケットもジャッキと同様に6か所に設けられた。サイクロトロン本体の位置や高さ、水平の調整は、加速箱を取り出して行った。目標精度はそれぞれ0.2 mmとし、ほぼその範囲で調整された。その後、アース板とポールとの間の低真空領域の真空漏れ調査と補修を行い、加速箱の再設置と芯出しを行った。次に、撤去していたRF共振器やデフレクタなど周辺機器の再組上げを実施した。この作業の間に、プラール電極のゆがみやディー電極先端のキズ、デフレクタ駆動系の動作不良などの不具合が新たに判明している。全体の組み上げが進み、圧空を利用して冷却水配管の漏れを調査したところ、グラディエント・コレクターやマグネチックチャンネルと呼ばれるサイクロトロン本体の真空内に置かれているビーム調整機器や、バルブスタンド、各コイルで漏れが次々と見つかり、最終的には500か所近くにおよんだ。当初の目標では、2012年3月中にはサイクロトロン本体単独での加速試験を実施する計画であったが、漏れ箇所の特定制や部品調達、交換作業に相当な時間を要することとなった。漏れの直接的な原因は、配管の微妙な変形や配管継手に使われているOリングの硬化であり、地震の大きな揺れが

長く続いたことで、漏れにつながったと思われる。漏れの補修の後、真空試験やコイルへの通電試験、駆動系の動作試験を順次実施した。この間にもクライオポンプに新たに不具合が見つかったほか、RF共振器内で機器の干渉があり、内筒にキズが付くといった事例があった。これらの不具合に対応した後、インフレクタやデフレクタへの高圧印加やRFの試験、そして枯らし運転を行った。そして、2012年7月2日より、930型サイクロトロン本体単独でのビーム加速試験を開始した。この加速試験では、高電圧系やRFの電圧設定が低めとなるビームエネルギー30 MeVの陽子ビームで実施した。翌7月3日の20時25分に震災以降初めてのビーム加速と取り出しに成功した。

ビーム輸送系では、前述のように、アライメントのずれや建屋そのものの水平レベルにずれが生じており、全てのビームラインについて調整し直しが必要であった。そのため、各室で床面にビーム軸をケガキ直す作業や、ベンチマークの再設置を行うことになった。これらの作業のために、ビームダクトや電磁石と、それらに付設されている冷却水や圧空の配管、ケーブル類を一旦全て撤去することにした。撤去作業に際しては、各電磁石の絶縁等の健全性を確認した。その結果、分析電磁石の一部で絶縁不良が発見された。930型サイクロトロンの位置が決まるまでの間に、絶縁不良箇所を補修したほか、当初から破損が判明していたビームダクトの製作と電磁石の補修作業も行った。930型サイクロトロン位置や水平レベルが確定した段階で、入出射系ビームラインから測量を開始し、完了したところからビームラインを再設置した。そして、冷却水や圧空の配管、ケーブル類の再構築を進め、ゲートバルブで仕切れる一定の範囲ごとに真空試験と信号系統の確認作業を順次行った。2012年8月下旬の段階では、一部のビームラインで真空度が震災前の真空度に到達しない箇所があるものの、ビームラインの再設置作業自体はほぼ終了している。今後は、震災で破損し更新となった電源の制御系を組み上げ、9月末までをめどに全てのコイルの通電試験を完了する予定である。そして、10月初めか

らビーム輸送試験を開始し、10月下旬には930型サイクロトロンのご共同利用を再開できるよう、準備を進めていく予定である。

HM12型サイクロトロンの復旧工事は、遮蔽扉の修繕が完了した後に開始した。当初から破損が判明していた部品については、現場での復旧工事までの間に修理や代替品の製作を終えており、これらの修理・交換後に稼働試験が可能となった。しかし、HM12型サイクロロンが設置されている第1ターゲット室には930型サイクロロンからのビームラインもあり、この時点では本体室(図1)との間に設置されている遮蔽用のロータリーシャッターが一時撤去されていたため、第1ターゲット室単独での放管条件を満たせていなかった。そこで加速試験は、他の復旧作業が行われていない夜間に、各室全てを閉鎖して実施した。この試験では加速が可能であることだけを確認し、ビーム量などは追求しなかった。本格的な加速試験は、ロータリーシャッターの設置後に実施した。この段階で、補正コイルの絶縁不良やビーム電流読み出し回路の不具合が新たに見つかった。補正コイルの絶縁不良は、ヨークの外側で生じており、容易に補修できたのは幸いであった。また、ビーム電流の読み出し回路は予備のポートを使うことで解決した。2012年5月下旬にPET用の薬剤合成試験のためにビーム供給を開始した。HM12型サイクロロンを用いた共同利用の再開は10月上旬を予定している。

PET用の薬剤合成装置は、前述のようにホッ

トセル内でオイルが溢れだしていたため、合成装置を全て一旦取り出して清掃するとともに、不具合箇所の修理を行い、再組上げを行った。HM12型サイクロトロンの復旧作業が終わった2012年5月より薬剤合成試験を開始し、調整した結果、現状では問題なく動作することが確認されている。一方、PET装置の復旧作業は2011年7月までに終了しており、2011年8月から市販のFDGを購入して調整を進め、9月下旬より市販薬を用いた臨床検査を再開している。臨床検査は月に1回程度の頻度で実施され、2012年7月まで続けられた。HM12型サイクロトロンの共同利用が再開する10月より本格的な臨床検査を再開する予定である。

5. おわりに

以上のように、930型サイクロロン、HM12型サイクロロンともに2012年10月より共同利用を再開できる見込みとなりました。共同利用の停止期間中は利用者の皆様にはご迷惑をおかけしましたことをお詫びします。また、復旧作業中に頂きました多大なご支援と励ましに深く感謝いたします。特に震災の直後にはCYRIC物理系のメンバーが大阪大学核物理研究センターにお世話になりましたことを記しつつ、感謝申し上げます。最後に、今回の東日本大震災で避難生活を余儀なくされている多数の方々にお見舞い申し上げるとともに、亡くなられた方々のご冥福をお祈りします。

学会だより

1. 日本放射化学会第56回理事会 [2011学会 年度第2回理事会] 議事要録

日時：2012年2月28日（火） 13:30～17:25
場所：高エネルギー加速器研究機構 4号館 127号室

出席者：[会長] 永目、[副会長] 篠原（厚）、沖、
[理事] 百島、村松（久）、永井、大槻、
横山、田上、野村、榎本、渡邊、[監事]
村松（康）

欠席者：[理事] 海老原、深澤、[監事] 篠原（伸）

報告

- 事務局より個人会員について、会員数（前回理事会から増減なし）と、会費納入状況の報告があり、了承された。賛助会員の新規獲得、口数の増加について意見交換を行った。事務局より2011学会年度の会計中間報告があり、了承された。
- 渡邊理事より以下のネット委員会報告があり了承された。前回理事会以降のメーリングリストへのメール配信数、学会HPの更新状況、また、メーリングリスト中のメールアドレスの修正を行ったことが報告された。
- 大槻理事より編集委員会報告として、JNRS誌の投稿数が減少しており定期発刊が困難な状況にあることが説明され、意見交換を行った。また、J-StageでのJNRS誌の公開状況について報告があり、了承された。放射化学ニュース25号の目次と刊行予定について報告があり了承された。

審議

- 2012年学会賞および奨励賞候補者の募集結果が学会賞事務局より報告され、了承された。
- 学会賞選考委員を選出した。
- 前回理事会において本年から会長選挙を実

施する方向で準備を行うこととなり、事務局において、必要な規定の制定と、関連する内規等の改正の案を作成して本理事会で審議することとなっていた。会長選挙の実施方法と、選挙関連の規定・内規の改正等について、事務局の原案に基づき、審議を行った。審議の結果今回は、会長についても現行の理事・監事選挙と同様に、推薦委員会が候補者を推薦し、その候補者を会員の選挙により承認する方式とすることとなった。また副会長については、理事当選者の中から会長当選者が選ぶこととなった。この方針に基づき、事務局が早急に規定・内規の改正案を作成することとなった。

- 役員候補者を理事会に推薦する役員等推薦委員会の人選について審議し、会長選挙の制度改正と並行して、早急に会長の下で人選をすすめることとなった。
- 実施することとなっているJNRS誌の今後のあり方などを尋ねるアンケートの内容について審議を行った。事務局の方で早急に実施することとなった。
- 2011学会年度より、事務局業務の一部（会費請求、会員管理など）を外部業者に委託することが決定している。事務局より委託業者としてアカデミック・スクエア株式会社（京都市伏見区）を選定したい旨提案があった。委託費用の見積書等資料を審議の後、本件は了承された。

2. 会員動向（平成24年3月～平成24年8月）

新規入会（正会員）

氏名	所属
宮澤 恵美	株式会社 環境技術センター
菅原誠之郎	株式会社 理研分析センター

新規入会（学生会員）

氏名	所属
吉田 剛	大阪大学大学院 理学研究科 化学専攻
柿谷 俊輔	同上
田村 信行	新潟大学 理学部 化学科
津藤 翔平	同上
後藤 尚也	同上
田中 彰	同上
小山 巧	同上
北崎 隆悟	同上
谷津由香里	同上
押見 吉成	同上

所属変更（個人会員）

氏名	所属
二宮 和彦	大阪大学大学院 理学研究科
齊藤 敬	尚絅学院大学 総合人間科学部 生活環境学科
佐藤 望	日本原子力研究開発機構 原子 力基礎工学研究部門
長田 直之	東北大学大学院 工学研究科 量 子エネルギー工学専攻 生活環 境早期復旧技術研究センター
池田 隼人	大阪大学大学院 医学系研究科
中山 真一	日本原子力研究開発機構 福島 技術本部福島環境安全センター

退会（個人会員）

氏名	氏名
中井 美希	柴田 徳思
武田 勇樹	田部井 健
飯沼 恒一	都築 達朗
南 大地	起 孝志
安部 静子	李 致圭
森田 泰治	佐藤 兼章
滑川 卓志	大橋 國雄

3. その他

- 昨年の総会において、会員管理や会費納付事務などを外部委託することが承認されました。事務局では業者の選定を終了し（委託先：アカデミック・スクエア株式会社）、事務は本年の会費納付から新体制に順次移行致します。業務委託に伴い、現在、持ち回りで大学等の機関に設置している事務局はなくなります。事務の窓口等が変わりますが、順次メーリングリストでご案内致します。

従来、年会費の請求は6月頃に、次学会年度（9月開始）分について行っておりましたが、今年から会計上の煩雑さをさけるため、新年度になってから（9月以降に）行うことに変更されました。

- 所属の変更、学生会員の退会等の情報は必ず事務局までお知らせ下さい。
- 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、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おります。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。

研究集会だより

国内

第51回 核化学夏の学校

箕輪はるか (慈恵医大・アイソトープ)

2012年8月30日より、仙台・秋保温泉^{あきう}で核化学夏の学校が開催された。秋保温泉は仙台駅から車で30分ほどの郊外に位置する、静かな山間の温泉地である。会場は温泉リゾートホテルで、講義よりむしろ結婚披露パーティにふさわしいシャンデリアの素敵な宴会場での夏の学校が始まった。

初日は原子核物理の講義、萩野浩一氏（東北大学）による「学生のための原子核物理学入門：原子核の殻構造と変形」があった。基礎から最新の研究成果まで盛り込まれた聞き応えのある内容であり、原子核が洋ナシやバナナの形に変形する話など実に興味深かった。同一質量数で安定核種が複数あるのはなぜか、という話は目から鱗であった。夕食の後、再び集まりそれぞれ自己紹介や近況報告があった。夏の学校でのこのような情報交換は毎回恒例らしく、しばらく御顔を拝見していない先生方の近況も伺うことができた。参加者には、修士課程の試験を終え合格発表を待っているという学生が多かった。開催日は彼らの参加しやすい時期を考慮して決められたのだろう。

さて、翌日は朝から福島原発事故関連の講義があった。「ガンマカメラによる原発内の放射能汚染度の測定」田所孝広氏（日立製作所）では、ガンマカメラ装置——ガンマ線を測定し、核種と強度の分布をリアルタイムで可視化する装置——について、福島第一原子力発電所の1・2・3号機で実際に使用された測定結果も含めて示

していただいた。必要に迫られて機器を開発しそれがすぐに使用されるという、研究と実用が隣り合わせの現場の雰囲気を知ることができた。聴衆の中には、将来、関連分野に進む学生もいることだろう。大学での研究という狭い枠にとらわれず、核化学の知識・経験が技術の分野でどのように役立っているのかを知る良い機会であったと思う。

次の講義、「福島の果樹：福島第一原発事故から1年を経て」佐藤守氏（福島果樹研究所）では、今、福島で放射性物質対策に取り組んでいらっしゃる様子をお話しいただいた。汚染された樹園地での果樹の詳細な実態調査から、放射性セシウムが根や葉からだけでなく樹皮からも吸収され実へ転流されるというこれまでにない知見を得たこと、また、樹皮の剥ぎ取りや洗浄を行い、今年の実中のセシウム濃度は低下していることなどが示された。移行メカニズムを解明しつつ、少しでもセシウム濃度の低い果実を作ろうとする試みは、これからまだまだ長い期間続けてゆく必要があるだろう。放射性物質による汚染は深刻な事態ではあったが、決してあきらめることなく、地道に粘り強い努力を続けている様子に深い感銘を受けた。

次は、白田重和氏（東北大学）による「福島第一原発事故一再臨界は起きたか、再臨界を監視できるか」と題して、原子炉における核分裂によって発生するキセノンの量と、それによって再臨界を監視する手法について講義があった。福島第一原発での放出量の見積もり、燃料の燃焼温度の推定など、事故の詳細が徐々に明らかになっていく様子は、核化学の知識を基に計算を駆使した研究の醍醐味であると感じた。

昼食後、および三日目の午前には、参加者より話題提供があり、活発な意見交換がなされた。文末に話題提供の題名と演者を記した。二日目



写真1 講義風景1



写真2 講義風景2

の午後にはエクスカージョンがあり、車数台に分乗してニッカウキスキー蒸留所「宮城峡」への見学ツアーに参加した。さわやかな天候に恵まれ澄んだ空気の中、レンガ造りの趣ある工場の蒸留装置や熟成樽などウキスキーの製造工程に興味深く見学した。試飲コーナーお土産コーナーもあり、「宮城峡」限定の原酒などを多くの参加者が楽しんだ。またその後、秋保大滝まで足をのばし、自然の中でリフレッシュすることができた。その時間には宿舎に隣接するスポーツパークで汗を流した参加者もいたそうである。各自思い思いに仙台の夏の終わりを楽しんだことだろう。夕食は自由討論・班会議とされていたが、おおいに食べ飲み話し楽しい時間を過ごした。夕食が終わった後も別の部屋で二次会、三次会と、その余韻は続いたようであった。最終日には、篠塚勉氏（東北大学）による最

終講義「ベクレル博士から福島第一まで」があり、東北大学サイクロロン設置のエピソードから、福島原発事故の対応として三春町とともに行った「実生プロジェクト」の話まで、ラジオアイソトープセンターの歴史とともに振り返っていただいた。

内容の濃い講義・話題提供、エクスカージョン・夜の部と盛りだくさんなプログラムを、緑豊かで清涼な地で、おいしい料理とお酒と共に楽しむことができたのは幸せであった。魅力ある企画を御準備・御世話いただいたスタッフの皆様にお礼申し上げます。

話題提供（敬称略）：

「貝類に含まれる放射性核種」小島貞男（愛知医大）「放射能を使った金属内包フラーレン研究：金属内包フラーレンの迅速分離法」秋山和彦（首



写真3 ニッカウキスキー宮城峡蒸留所・ゲストホール



写真4 ニッカウキスキー宮城峡蒸留所・ゲストホール

都大学東京)「核医学に有用な放射性核種の製造技術」池田隼人(大阪大学)「科研費新学術領域(放射化学の仕事紹介)」篠原厚(大阪大学)「重元素研究:オスロ滞在記」大江一弘(原子力機構)「砂浜に沈み込んだセシウムの存在状態」佐藤志

彦(筑波大学)「放射能泉について」堀内公子(慈恵医大)「放射能標準体積線源の標準値の測定」浅井雅人(原子力機構)「福島第一原子力発電所から放出された放射性核種」工藤久昭(新潟大学)



写真5 二日目夜・集合写真

海外

ICRS-12に参加して

関本 俊 (京都大学原子炉実験所)

ICRS-12 (12th International Conference on Radiation Shielding「第12回放射線遮蔽国際会議」)が、2012年9月2-7日に、奈良市の奈良県新公会堂において開催された。この会議は、1958年に英国のケンブリッジで第1回が行われて以来、ヨーロッパ、アメリカ、日本で継続して行われている歴史ある会議であり、今回は、RPSD-2012 (17th Topical Meeting of the Radiation Protection and Shielding Division of ANS「第17回米国原子力学会放射線防護遮蔽部会合」)も同時に開催された。約400名の参加者があったこの会議のトピックスは、放射線管理やその安全評価、放射線計測やその遮蔽設計から放射線治療など、放射線遮蔽に関する研究全般及び、福島原発事故に関連した研究であり、会議の公式ホームページ (<http://www.icrs12.org/>)より、トピックス、プログラム、発表要旨等の閲覧が可能である。筆者は近年、“Radiation”と名の付く国際会議にいくつか出席した (ISORD-5, ISORD-6*, IRPA-13**)が、今回の会議も含めて、参加者の中には同様の顔ぶれを見ることができ、日本人、外国人問わず、新たな顔馴染みが出来たことは収穫である。

(*ISORD: International Symposium On Radiation Safety and Detection Technology, **IRPA: International Congress of the International Radiation Protection Association)

また東日本大震災以降、この分野の会議には“Fukushima” Sessionなるものが必ず存在し、それも比較的大きなトピックとして扱われているが、一方、震災以前に取り組まれていたと思われる、放射線遮蔽等に関する従来の研究は、どこへ消えてしまったのだろうか?と考えることもまた事実である。ICRS-12の福島セッションにおける、おそらく目玉の一つとして、田中俊一氏によるPlenary lecture “OUTLINE

OF THE ACCIDENT AT FUKUSHIMA DAI-ICHI NUCLEAR POWER STATION -ISSUES ON RADIATION SHIELDING & PROTECTION-”が予定されていたが、結局、中島宏氏 (JAEA) による代替講演になっていたことは仕方のないことであろうか。

ところで、従来の放射線遮蔽等に関する研究の一つに、米国フェルミ国立加速器研究所 (FNAL) 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)) がある。本プロジェクトは、FNAL, JAEA, KEK, 京都大学、九州大学、清水建設のグループによるコラボレーションの下で進められ、これまでに原子力学会や放射化学会等の国内の会議や、ICRS-11, ISORD-5, ND2010, ISORD-6, IRPA-13等の国際会議、その他学術論文として、多くの成果を発信してきた。中島代表の下で進められてきたJASMINプロジェクトは2011年度で一旦終了し、今回のICRS-12では、そのまとめの講演があった。筆者もこのプロジェクトの一員であるため、多少手前味噌ではあるが、ここで、それらの講演の紹介をしたい。

- ・RESEARCH ACTIVITIES ON JASMIN: JAPANESE AND AMERICAN STUDY OF MUON INTERACTION AND NEUTRON DETECTION (招待講演・JAEA・中島宏氏)
- ・MEASUREMENT AND ANALYSIS OF NEUTRON AND PHOTON DOSE RATE IN CONCRETE SHIELD OF 120-GEV PROTON ACCELERATOR FACILITY (清水建設・大石晃嗣氏)
- ・SYSTEMATICS OF THICK TARGET NEUTRON YIELD FOR REACTIONS OF HUNDRED GeV PROTON ON TARGET (招待講演・KEK・佐波俊哉氏)
- ・ACTIVATION DETECTOR MEASUREMENTS AT THE HADRON ABSORBER OF THE NUMI NEUTRINO BEAM LINE AT FERMILAB (JAEA・松田規宏氏)
- ・RADIONUCLIDES IN THE COOLING-WATER SYSTEMS FOR THE NUMI BEAMLIN AND THE ANTI-PROTON

PRODUCTION TARGET STATION AT FERMILAB (KEK・松村宏氏)

・ACTIVITY COMPARISON AMONG FLUORESCENT LAMPS AND LED LIGHT TUBES EXPOSED TO SECONDARY PARTICLES IN THE ACCELERATOR FACILITIES (KEK・豊田晃弘氏)

・MEASUREMENTS AND CALCULATIONS OF RADIONUCLIDE ACTIVITY LEVELS PRODUCED IN 120-GEV PROTON INDUCED SPALLATION REACTIONS (京大炉・八島浩氏)

・CHEMICAL FORMS OF SULFUR, CHLORINE, AND BROMINE RADIO-NUCLIDES PRODUCED IN AIR AT THE FERMILAB 120-GEV ANTI-PROTON TARGET STATION (京大炉・筆者)

上記の成果の一部は、プロシーディングスとして Progress in Nuclear Science and Technology 誌に出版される。

また JASMIN プロジェクトは、現在も継続し

ており、2013年度からはKEKの松村宏氏を代表として、新たな研究が行われる。今後これらの会議での成果の発表が期待される。

本国際会議の口頭発表は、奈良県新公会堂内の4会場で並行して行われたのだが、そのうちの1会場は、能舞台であり、登壇者は能舞台の上で講演するという大変にユニークなものであった(写真参照)。またバンケットでは、はじめに大会委員長の中村尚司 東北大学名誉教授より、本会議の運営に携わったスタッフの紹介があり、労いの言葉が述べられた。余興として、CERNのRadiation Protection GroupのChristian Theis博士により、「ハンガリー狂詩曲第二番(リスト)」と「エリーゼのために」のピアノ演奏が行われ、最後は、そのピアノ伴奏による、中村 大会委員長の「ローレライ」独唱で締めくくられた。

次回のICRS-13は、2016年にフランスで開催される予定である。



写真 能舞台の様子 (近畿大学 芳原新也氏より提供)

IRPA-13に参加して

関本 俊 (京都大学原子炉実験所)

RPA-13 (13th International Congress of the International Radiation Protection Association「国際放射線防護学会」)が、2012年5月13-18日に、英国、スコットランドのグラスゴーにおいて開催された。74カ国から約1500名もの参加者及び200社もの協賛を得たこの巨大な国際会議は、12のトピックスに分かれて講演(口頭・ポスター)が行われ、会議後の報告によると、過去最大の規模で行われたようである。以下に12のトピックスを記す。

1. Biological and Health Effects of Ionising Radiation
2. Measurements and Dosimetry
3. Radiation Protection System Development and Implementation
4. Stakeholder Engagement and Involvement
5. Non-Ionising Radiation
6. Planned Exposure Situations: Industry and Research
7. Planned Exposure Situations: Medicine
8. Planned Exposure Situations: Radioactive Waste Management
9. Emergency Exposure Situations
10. Existing Exposure Situations
11. Protection of the Environment
12. Fukushima

放射線防護に関するエンジニアリングからサイエンスすべてが対象となっているので、ただでさえ非常に幅広い分野をカバーした会議が、“Fukushima”をもトピックスの一つにすれば、参加者が増え、規模がより大きくなったことは、容易に想像できる。日本からも原子力機構、放医研、東京大学のグループなど多くの参加者があり、福島事故関連で多くのメディアや新聞で名前の挙がった、小佐古敏荘東京大学教授や高田純札幌医科大学教授の姿も見られた。筆者の所属する京大原子炉からは、谷垣実氏による“Development of KURAMA and the Carborne Survey in Fukushima”、福谷哲氏による

“Sorption Characteristics of Radionuclides in Environmental Aqueous Systems for Sorbents”及び筆者による“Measurement of Radio-nuclides in Radioactive Aerosols Produced in a 120-GeV Proton Target Station”の3件の講演があった。会議の詳細な様子は、公益財団法人放射線影響協会が発行する「放影協ニュース」のNo. 72(2012年7月号)のp. 10-に記されている(http://www.rea.or.jp/kikaku/rea_news/news/2012_72.pdfでも閲覧可)。従ってここでは、エクスカーションの様子(公式のもの、自主的なもの)や、筆者がグラスゴーにたどり着くまでに立ち寄ったマンチェスターの様子などを、小旅行記として記しておく。

1. “GLENGOYNE” ウィスキー蒸留所見学(会議の公式エクスカーションの一つ)

この巨大な国際会議においては、もちろん魅力的なエクスカーションも数多く存在する。それらは当然、セッションと並行して行われるため、自分の発表のスケジュールや興味のあるセッションと重なってしまえば参加できない。今回は、筆者にとって最も魅力的であった、「スコットランドにあるウィスキーの蒸留所を見学する」というツアーに、発表前日ではあったが、運良く参加することが出来た。

グラスゴーの中心部から車で約1時間程度のところにある“GLENGOYNE”蒸留所では、まず試飲→蒸留所そのもの及びその歴史の説明→製造工場の見学→お土産購入というオーソドックスなツアーが組まれており、それぞれに楽しむことが出来た。自分用のお土産に購入したウィスキー(驚くほど美味)の写真を以下に示す。スコットランドには素晴らしいウィスキーが多く存在することは有名であり、その中でも様々な種類のも



のを味わってきた自負があったが、今回尋ねた“GLENGOYNE”という銘柄を筆者は知らなかった。このエクスカージョンの当初の目的は、ウィスキーの本場で蒸留所の見学を愉しむ、ということであったが、この“GLENGOYNE”という素晴らしい銘柄に出会えたことが最大の収穫であったと思う。

2. “Hampden Park” 見学 (自主的なエクスカージョン)

筆者の発表が無事!? 終わり、一息ついたので、グラスゴーで行って見たかった場所の一つに行くことにした。それが“Hampden Park”である。ここは、サッカースコットランド代表のホームスタジアムであり、2002年5月に行われた、欧州チャンピオンズリーグ決勝(レアルマドリード対バイヤーレバークーゼン)の舞台にもなった、欧州のサッカー界において、由緒正しいスタジアムの一つである。IRPA-13学会会場から、公共交通機関を使って30分もかからずに到着できたHampden Parkでは、平日であったにも関わらず、幸運にもスタジアムツアーに参加することが出来た。そのツアー中に撮った写真を以下に示す。たった5名のツアー参加者に対して、1時間強、選手控室からピッチ、試合中、監督や選手が座るベンチにいたるまでスタジアム中を、英語圏外の筆者に対しても分かりやすい英語で、丁寧に説明してもらった。またHampden parkには、歴代スコットランドを代表する選手、監督にまつわる品々(トロフィー、ユニホームなど)が収集された博物館も併設されており、こちらも英国サッカー愛好家には大変に楽しめるものであった。帰りに博物館内のグッズショップにて、余計に出費してしまったことは言うまでも無い。

尚、筆者が訪問した約二カ月後に、ロンドンオリンピックのサッカーの初戦で、U-23日本代表が優勝候補と目されていたU-23スペイン代表を破ったのは、このHampden Parkでの出来事である。この後、U-23日本代表の快進撃は続いたが、最後になって、あろうことか韓国に敗れ、メダルを逃す結果になってしまったことは、残念でならない。



3. マンチェスター経由でグラスゴーへ (“Old Trafford” 見学)

今回、グラスゴーへの旅路は、マンチェスターを経由することにした。理由は二つ。一つは関空とマンチェスターの往復の航空券が、グラスゴー往復と比べ、大変リーズナブルであったこと。(マンチェスターからグラスゴーは電車で3時間の距離である。) もう一つは、筆者の職場の同僚である(同じ部屋でもある)上原章寛氏が、この四月からマンチェスター大学に留学しており、彼のところを表敬訪問するという目的があったことである。そして、彼に会う前にマ



ンチェスター市内を散策がてら、少し足を延ばした先が“Old Trafford”またの名を“Theatre of dreams”、言わずと知れた英国の名門サッカーチーム、マンチェスターユナイテッドのホームスタジアムである。さすが世界中にファンを持つ人気チームだけあって、スタジアムツアーは、ひっきりなしに行われていた（ちなみに、土曜日は10分ごとに、約20名のグループのツアーが次々と行われていた）。当然のことながら、筆者も迷うことなくそれに参加し、その際撮った写真の一部を以下に示す。このスタジアムツアーは、近年マンチェスターで行われる学術的な国際会議においても、エクスカッションに盛り込まれることが多らしく、サッカーに興味は無くとも、ツアーにだけは参加し、それなりに楽しまれた方もいるかもしれない。しかし、サッカーファンにとってのこのツアーは、普段テレビを通じてのみ見るOld Traffordを、マンチェスターユナイテッドの選手や監督と同じ

目線で見ることが出来るという点において、ツアーを楽しむ以上に、非常に貴重な体験になると思う。筆者がOld Traffordを訪れてからほどなくして、日本代表の香川真司選手のマンチェスターユナイテッドへの入団が決まった。8/25にはこのOld Traffordで公式リーグ戦初得点も決めた。今後、香川選手のこのチーム、このスタジアムでの活躍を祈るばかりである。そして個人的には、もし機会があれば、Old Traffordに再訪し、試合を見てみたいものである。

4. おわりに

上記は、IRPA-13に参加した結果、そのついでにウイスキーの蒸留所やサッカーのスタジアムを訪問した話を記したものである。次回のIRPA-14は、ケープタウン（南アフリカ）での開催が決定しており、その次のIRPA-15は、韓国での開催が予定されている。

MARC-IXに参加して

大槻 勤

(東北大学電子光物理学研究センター)

MARC IX は2012年3月25日～30日の日程でハワイ島のSheraton Keauhou Bay, Kailua-Konaで行われた。初日はregistrationの後、まずMorning & Afternoon workshopで、Radioanalytical chemistryの分野における最近のTopicsや測定技術のsessionがあり、またこれらにひきつづき、Hevesy Medal Award Ceremony及びReceptionが行われた。ちなみにHevesy Awardの受賞者はロシア科学アカデミーのProf. Boris F. Myasoedovで、受賞講演では、ロシアにおけるこれまでの核燃料再処理技術開発及び今後の進展についての話があった。2日目からは通常通りPlenary sessionと一般講演が始まった。Plenary sessionでは、近年この分野の国際会議において、その存在感が非常に大きくなってきた核鑑識技術や、核燃料サイクルにおける分離技術など、様々な分野の代表的な研究が報告された。またparallel sessionとなった午後の一般講演は、核鑑識技術のハイライトと放射化分析の講演から始まった。以下にそれぞれのsessionを示すが、すべてのsessionの要所を聞くことは、とても重労働であった。

Session 1: Plenary Session.

Session 2: Nuclear Forensics Highlights.

Session 3: Instrumental, Pre-Concentration, Radiochemical, and Speciation Activation Analysis.

Session 4: Applications of Radioanalytical Chemistry and Neutron

Session 5: Activation Analysis for Nuclear Medicine and Biological Systems.

Session 6: Application of Nuclear Techniques to National Security and Treaty Monitoring

Session 7: Instrumentation and Software for Nuclear Spectrometry.

Session 8: Fuel cycle and advances in separations.

Session 9: Fukushima Special Session

Session 10: Ultra-sensitive Mass Spectrometric and Other Methods Applied to Environmental Problems.

Session 11: Nuclear Forensics.

Session 12: Advances in Actinide Analytical and Radionuclear Chemistry.

Session 13: Speciation Studies on Radionuclides in the Environment.

Session 14: Quality Assurance Topics in Radioanalytical Chemistry

Session 15: Separation Chemistry and Target Preparation for Nuclear Chemistry Experiments.

Session 16: Actinide, Lanthanide, and Fission Product Separations

Session 17 ~ 19: Environmental Radioactivity and Reference Materials for Nuclear Mass Spectrometry.

Session 20: Novel Neutron Detectors, Neutron Beam Techniques, and Their Applications

Session 21: Actinide Mass Spectrometry Techniques and Applications. Measurements and Systems for.

Session 22: Radiation Detection in Nonproliferation and Homeland Security Application.

これらを見ると、特に核鑑識と環境の取り組みに関する発表が多かったように思う。日本人の講演ではActivation Analysisの分野で石巻専修大学のグループより銀の定量分析に関する発表が、首都大学東京のグループより希土類元素の定量分析に関する発表が行われていた。また、福島第一原子力発電所事故に関する特別セッションが設けられ、東大の中西氏の招待講演を含む欧米アジア各国の研究報告が行われた。いずれの発表においても事故の経緯が詳細に把握されており、早期から分析に取り組んでいることが分かった。また、地球規模での放射性物質の汚染が懸念され、事実を深く再認識するとともに、環境データの早期調査や今後の推移が重要であると感じた。今回の会議では会議のテーマであるMethods and Applications of Radioanalytical Chemistry (MARC) が示すよ

うに radionuclides のその他の分野への利用応用が多く取り上げられ、最近の Radioanalytical Chemistry の国際会議の変化が見てとれる。

また Poster session では、University of Texas のグループによる放射化分析を用いた発表が目立った。それ以外では、Texas A&M University のグループによる遺跡の出土品の放射化分析の結果をその鉱物分析結果と比べたものや、University of Norte Dame のグループによる “Trinitite” の分析結果に関する poster、またイギリスのグループによる LaBr_3 検出器に関する発表（これは八王子で行われた MTAA-12 でも同様の poster があり、その時からの進展の様子を示していたものと考えられる）及び、タイのグループによる、カスケードインパクターと CR-39 検出器を組み合わせ用いた環境中のラドン、トロンの研究など、興味深いものも見

られた。

小生は会議期間中 K 大学の S 氏の推薦もあり、会議の会場となったホテル “Sheraton Keauhou” のすぐ近くのコンドミニウムを借りて、自炊もしつつ過ごしたが、非常に優雅に会議期間を過ごすことができた。またレンタカーを使って、快適にドライブを楽しんだが、パワーウィンドウの付いていない安い車を借りたばかりに、車中に鍵をいれたままドアをロックしてしまうという、現代日本では考えられないへまもした（助手席にいた暑がりの S 氏が偶然にも少し窓を開けていたため、事無きを得た）。そのようなハプニングにも見舞われたが、三年後にまた行われるであろう 10 回目の会議には再び参加をしたいと思っている。以下の写真は、福島セッションの様子と、それを少し遠くから見守るカメハメハ大王である。



NRC-8に参加して

二宮和彦 (大阪大学大学院理学研究科)

4年毎にヨーロッパで開催される核・放射化学の国際会議NRC8 (8th International Conference on Nuclear and Radiochemistry) が、2012年9月16日から21日の日程で、イタリアのコモ (Como) で開催された。

講演数は245件で、その内訳は招待講演が70件、口頭発表が42件、残りがポスター発表であった。発表は2つのポスターセッションの他、口頭発表は全部で13セッション組まれていた。討論内容は放射化学に関連する広い分野であり、その内訳は核医学 (口頭発表2セッション、以下同様数字のみ)、超重元素化学 (1)、RI製造 (2)、RI利用 (1)、原子核プローブ (1)、原子力 (2)、放射化分析 (1)、教育 (1)、環境放射能 (2) であった。まず感じたことはヨーロッパにおける核医学分野の研究の盛り上がりであった。今回が初めて試みということではあったが、核医学のセッションが2つ組まれており、さらにRI製造やRI利用のセッションでも核医学と関連の深い内容の発表が多くあった。内容としては国内でも研究が進んでいる ^{99m}Tc の製造に関する発表もあったが、それに加えて ^{44}Sc や ^{68}Ga を始めとする他の核医学用放射性核種の製造や、これらを体内に入れるためのキレート錯体の合成法の報告もあり、核医学分野全体の研究が急速に進みつつある印象を受けた。その他のトピックスとしては、TASCAによる超重元素 $Z=112$ 、 $Z=114$ の気相化学実験の報告や、即発ガンマ線による分析 (PGA) に関連する報告も多くあった。

この他には2つの特別セッションがあり、オープニングとして「イタリアにおける18-19世紀の化学」と題して、電池の発明で有名なボルタ教授に焦点をあてたレクチャーがあった。筆者は恥ずかしながらこの時まで知らなかったが、ボルタ教授は開催地のコモ出身で、さらに教鞭もとって

たそうである。もう1つの特別セッションはRadiochimicaActa誌50周年を記念したもので、出版社の担当者を交えての簡単な式典が開催された。

参加者は事前登録者だけで227名とのことであった。やはりヨーロッパ各国からの参加者が多かったものの、アジア、北米、南米と世界中からも参加者が集まった。なお日本からの参加者は20名弱でありヨーロッパ圏外では最大の参加者数であったのではないかと思う。

コモはヨーロッパでも有名な保養地であり、筆者もリゾート気分になりたいところであったが、会場では連日活発な議論により時間超過の連続で休憩時間も短く、さらに興味深い研究発表も多くあったことからそんな気分は吹き飛んでしまった。ちなみに昼食休憩でも準備されていた昼食も立派だったので、とても1時間では食べ終わらずこれも時間超過の原因になった。せっかくイタリアで開催なのだから、昼食休憩をのんびり2時間の習慣ぐらひはプログラムに取り入れてほしいと思った次第である。20日の夕方はエクスカッションでコモ湖遊覧の船旅があり、コモ湖と湖畔に並んだ美しい別荘やホテルの風景をゆっくりと楽しむことができた。なお最後のクロージングセッションで次回のNRC-9は2016年、フィンランドのヘルシンキで開催される予定であることがアナウンスされた。



会場の様子。会場はさほど大きくはなかったが、席は常にほとんど埋まっていた。

.....

情報プラザ (国際国内会議)

.....

1. LACAME2012

XIII Latin American Conference on the Applications of the Mossbauer Effect (LACAME2012)

会期 Nov. 11-16, 2012

会場 Medellin, Colombia

会議ホームページ Web: <http://www.udea.edu.co/lacame2012>

2. ANUP2013

International Conference on Asian Nuclear Prospects

会期 Oct. 16-19, 2012

会場 Baijin, China

会議ホームページ <http://www.anup2012.org>

3. 5th International Conference on Fission and Properties of Neutron-Rich Nuclei (ICFN5)

会期 November 4 - November 10, 2012,

会場 Sundial Beach Resort, Sanibel Island, Florida

会議ホームページ <http://proton.phy.vanderbilt.edu/>

4. FR13

International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles

会期 Mar. 4-7, 2013

会場 Paris, France

会議ホームページ <http://www.sfen.fr/FR13>

5. APSORC-13

The fifth international conference in the series of Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry (APSORC-13)

会期 Sept. 22-27, 2013

会場 Kanazawa, Japan

会議ホームページ <http://www.radiochem.org/apsorc13/>

6. Global2013

会期 Sept. 29-Oct. 3, 2013

会場 SaltLakeCity, USA

会議ホームページ <http://www.global13.org>



5th Asia-Pacific Symposium On Radiochemistry '13



5th Asia-Pacific Symposium On Radiochemistry '13

September 22nd (Sun)- 27th (Fri)
Kanazawa, Japan

Scope of the Symposium

The fifth international symposium in the series of Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry (APSORC 13) will be held from 22 to 27 September 2013 at Kanazawa, Japan. The first symposium was held in Kumamoto, Japan (1997), and subsequently in Fukuoka, Japan (2001), Beijing, China (2005), and Napa Valley, USA (2009).

The symposium is dedicated to providing platform for discussion and information exchange for current and emerging research in all fields of nuclear and radiochemistry and related disciplines and technologies.

A special session on the Fukushima issues caused by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident in March, 2011 will be also organized. The APSORC 13 will be co-organized by The Japan Society of Nuclear and Radiochemical Sciences and Kanazawa University.

Scientific topics

The scientific topics to be covered at the symposium include:

1. Fukushima issues
2. Education in nuclear and radiochemistry
3. Nuclear forensics
4. Nuclear energy chemistry
5. Nuclear chemistry
6. Actinide chemistry
7. Environmental radiochemistry
8. Radiopharmaceutical chemistry, Nuclear medicine
9. Nuclear probes for material sciences
10. Activation analysis
11. Application of nuclear and radiochemical techniques

Symposium chairs

Yuichiro Nagame, Japan Atomic Energy Agency
Masayoshi Yamamoto, Kanazawa University

Scientific secretaries

Masayuki Watanabe, Japan Atomic Energy Agency
Akihiko Yokoyama, Kanazawa University

E-mail: apsorc13info@radiochem.org

Proceedings

The symposium proceedings will be published in J. Radioanal. Nucl. Chem.

Venue

The symposium will be held at Kanazawa Bunka Hall in Kanazawa, Japan from 22-27 September 2013. More information will be updated later.

Conference fee

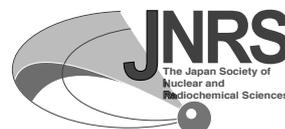
The conference fee will be approximately 50,000 JPY. A final figure will be announced later.

Accommodation

Accommodation information will be provided together with the 2nd Circular in October 2012.

Important dates

First circular: 30 June 2012
Second circular with call for abstracts: October 2012
Deadline for abstract submission: March 2013
Notification of speakers: June 2013
Final program: July 2013
Deadline for paper submission: September 2013
Symposium: 22-27 September 2013



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

富士電機株式会社

富士フイルム 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

公益財団法人 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

公益財団法人 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



公益財団法人 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/>



独立行政法人日本原子力研究開発機構

東京電力福島第一原子力発電所事故への対応

廃止措置・環境修復に向けた技術開発等

機構全体として人材・研究施設を最大限に活用し、総力をあげた取組

長期的エネルギー安全保障 地球環境問題の解決

高速増殖炉サイクル技術
(国家基幹技術)

高レベル放射性廃棄物
処分技術

国際競争力のある科学技術を 生み出す基盤

核融合研究開発

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



原子力施設の廃止措置 廃棄物処分

自らの施設の廃止措置

廃棄物の処理処分

共通的科学技術基盤

先端基礎研究

原子力基礎工学研究

外部との連携と情報の提供

産学官との連携

国際協力

人材育成

原子力情報

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
TEL: 029-282-1122(代表) ホームページ: <http://www.jaea.go.jp>

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

放射線分野における科学技術の進展に貢献しています



～主な業務～

- 放射線影響等に関する知識の普及
- 放射線影響等に関する調査研究
- 放射線影響等に関する調査研究に対する奨励助成、顕彰
 - ICRP調査・研究連絡会の運営
- 原子力施設等で働く放射線業務従事者の被ばく線量の一元的な登録管理
 - 放射線管理手帳制度の運用管理
 - 国の指定を受けた放射線管理記録等の保存業務
- 放射線業務従事者の登録データを用いた低線量長期間被ばくによる健康影響の調査

公益財団法人 放射線影響協会

〒101-0044 東京都千代田区鍛冶町 1-9-16 丸石第2ビル5階

TEL 03-5295-1481 FAX 03-5295-1486

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

放射線従事者中央登録センター

TEL 03-5295-1786 FAX 03-5295-1486

放射線疫学調査センター

TEL 03-5295-1494 FAX 03-5295-1485

放射線利用の振興のために

◆ 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

◆ 放射線利用技術の移転推進

- ・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

メンテナンス。



厳しく、

原子力発電所、原子燃料サイクル施設などの管理、
保全に携わってきたアトックス。
その高度な技術とノウハウの蓄積をもとに、R関連施設の分野でも
広く社会に貢献しています。
大学、研究機関や製薬メーカーなど、R等使用施設における放射性
汚染除去、廃棄物処理、放射線管理から施設・設備の運転、点検
保守まで、トータルメンテナンスを提供。
人と地球の未来のために、安全で快適な環境を守るアトックスです。

<業務内容>

- 原子力発電関連施設・原子燃料サイクル施設のトータルメンテナンス
 - 放射線管理 ●放射性汚染除去 ●廃棄物処理 ●ランドリー
 - 清掃・区域管理 ●設備/装置運転・点検保守 ●輸送
 - 分析 ●各種工事など
- R等使用施設のトータルメンテナンス
 - 放射線管理 ●作業環境測定 ●放射性汚染除去 ●廃棄物処理
 - 清掃・区域管理 ●施設/設備運転・点検保守 ●加速器運転
 - フィルター交換 ●各種工事
 - 機器販売、同位体販売、マニプレータ販売 など
- PET薬剤製造事業
 - PET治療薬製造、ホットラボ運営、
治験薬GMP支援 など

URL:<http://www.atox.co.jp/> <http://www.atox-isotope.jp/> (同位体販売)

- 本 社：〒104-0041 東京都中央区新富2-3-4 TEL.(03)5540-7950 FAX.(03)5541-2801
- R I 事 業 部：〒104-0041 東京都中央区新富2-3-4 TEL.(03)5540-7952 FAX.(03)5541-2802
- 技術開発センター：〒277-0861 千葉県柏市高田1201 TEL.(04)7145-3330 FAX.(04)7145-3649
- RI事業関連部署：札幌事務所 TEL.(011)205-5205/大洗営業所 TEL.(029)266-1331/大阪営業所 TEL.(06)6384-6730
東海営業所 TEL.(029)282-1662/東京営業所 TEL.(03)5540-7953/福岡事務所 TEL.(092)483-0240
神戸医療オフィス TEL.(078)599-6851



HITACHI
Inspire the Next



ALOKA
illuminate the change

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シリーズに上位機種の
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ブランドはさらに進化を続けます

 **日立アロカメディカル株式会社**

〒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 www.hitachi-alka.co.jp

**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。**



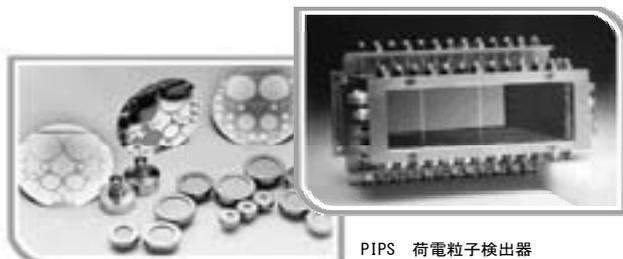
ゲルマニウム半導体検出器



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



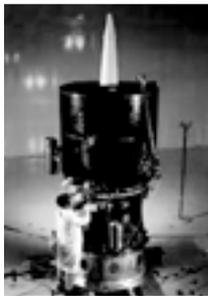
80110型プリアンプ



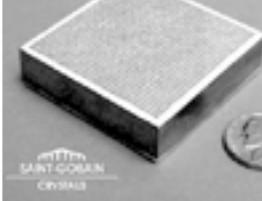
80112型MPX



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



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/>

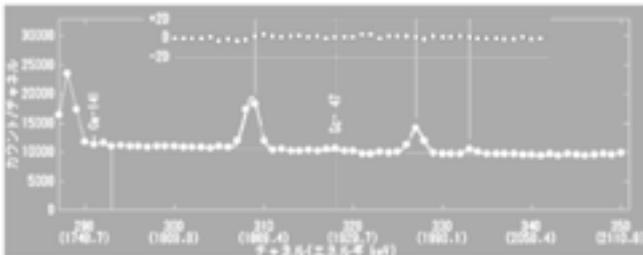
お問合せ yasuo.watanabe@saint-gobain.com

(担当 渡辺)

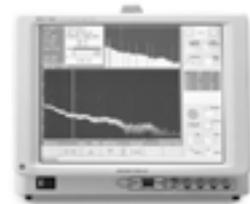
比較法による放射化分析プログラム

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】

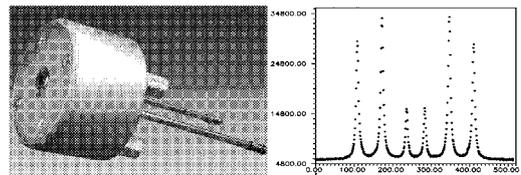
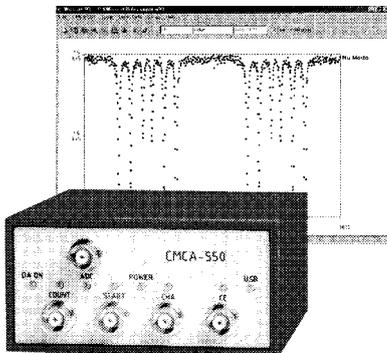
入力: COUNT, START, CHA, COUNT ENABLE, ADC (CMCA-550のみ)

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適合
- 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持
- ガスフローを維持すれば、長期の測定に適合
- 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

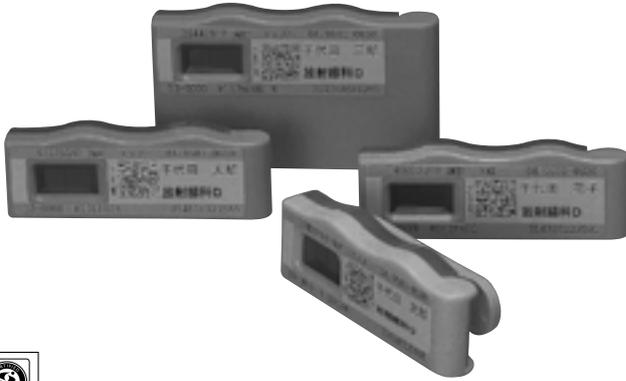


次世代の個人・環境用線量計

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
- 避難設計
- 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 千代田 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：大阪市中央区内本町 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。



長瀬ランドウア株式会社

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

ALARA
 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

富士電機の放射線測定器

より正確に より簡単に

富士電機では、放射線管理システムをはじめ、放射線管理における様々な用途に応じた測定器類を取り揃えています。

〔取扱製品〕

放射線モニタリングシステム
R I 排水管理システム
出入管理システム
非密封 R I 管理システム
従事者管理システム

各種サーベイメータ
個人線量計／環境線量計
モニタリングポスト
ホールボディカウンタ
体表面モニタ
食品放射能測定システム
その他



富士電機株式会社 放射線システム部

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

<http://www.fujielectric.co.jp/> mail fric-info@fujielectric.co.jp

営業所

北海道 TEL 011-221-5482

東京 TEL 042-585-6024

関西 TEL 06-6455-3891

東北 TEL 022-716-0203

中部 TEL 052-746-1032

九州 TEL 092-262-7844

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、

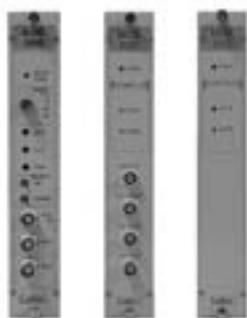
グループの総力を結集し、医療と健康に貢献してまいります。



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



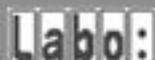
ADC 8kch
ウィルキンソン方式 150MHz
MCA / MCS メモリサイズ 8kch
Windows98 ~ XP 対応ソフトウェア

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下さい

連絡先: 日本放射化学会事務局

E-mail: office@radiochem.org

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26号

平成24年(2012年)10月22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

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

本誌掲載記事の著作権は日本放射化学会に帰属します。