

# 放射化学

## 第34号

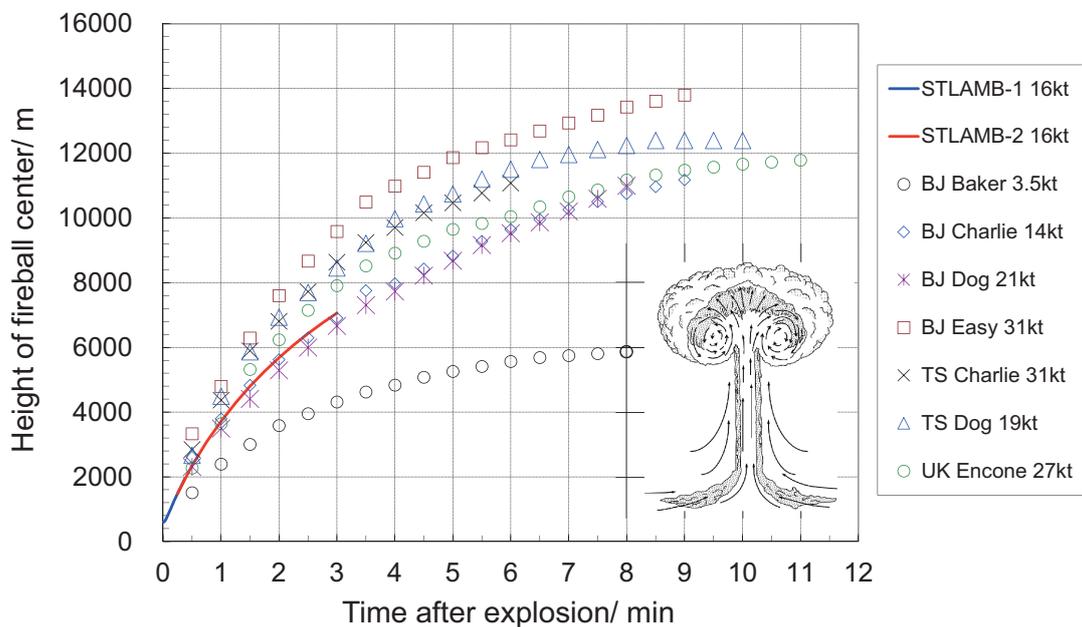
### 原著

福島県の一般廃棄物焼却施設で生じた焼却飛灰中放射性セシウムの化学形態分析

### 解説

気体充填型反跳イオン分離装置GARIS-II

広島原爆炸裂の初期プロセスについての考察—リトルボーイノートより—  
 $\alpha$ 放射体 Ra-223が前立腺がん骨転移治療薬として国内承認



---

# 放射化学

## 第 34 号

平成 28 年 (2016 年) 9 月 2 日

---

### 目次

#### 原著

- 福島県の一般廃棄物焼却施設で生じた焼却飛灰中放射性セシウムの化学形態分析  
(藤井健悟)..... 1

#### 解説

- 気体充填型反跳イオン分離装置 GARIS-II (加治大哉) ..... 12  
広島原爆炸裂の初期プロセスについての考察 - リトルボーイノートより - (今中哲二)  
..... 24  
 $\alpha$  放射体 Ra-223 が前立腺がん骨転移治療薬として国内承認 (鷺山幸信) ..... 38

#### ニュース

- 中西友子 日本放射化学会現会長 (東京大学特任教授) の栄えある 2016 年 Hevesy 賞  
受賞を祝す (中西 孝) ..... 43  
科研費新学術領域研究「短寿命 RI 供給プラットフォーム」がスタート (中野貴志)  
..... 44  
量子科学技術研究開発機構が発足 (橋本和幸) ..... 46

#### 会議報告

- 放射性同位元素 (RI) 製造計画と多分野における RI 利用 (東北大学電子光理学  
研究センター研究会) (菊永英寿) ..... 47  
第 17 回「環境放射能」研究会 (別所光太郎) ..... 49  
第 1 回 RANC (International Conference on Radioanalytical and Nuclear Chemistry)  
(中西友子) ..... 51  
Nobel Symposium NS160 "Chemistry and Physics of Heavy and Superheavy Elements"  
(佐藤哲也) ..... 52

<b>時過ぎて</b>	
村松康行教授を偲んで (内田滋夫) .....	54
<b>情報プラザ (国際国内会議) .....</b>	56
<b>本だな</b>	
放射能の発見が世界を変えた—さまざまな謎が未知の地平線へと導いた 馬場 宏 著 (酒井陽一) .....	57
<b>学位論文要録</b>	
Study of relationship between deposition of radioactive materials and radioactive particles in the difficult-to-return zone caused by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident (佐藤志彦) .....	59
Benchmark study of density functional theory by using Mössbauer spectroscopic parameters and its application to d-, f-block coordination chemistry (金子政志) .....	62
<b>学会だより .....</b>	65
<b>2016 日本放射化学会年会・第 60 回放射化学討論会プログラム .....</b>	68
<b>「放射化学」規定など .....</b>	78
・「放射化学」論文編集委員会規定	
・「放射化学」発行規定	
・「放射化学」論文投稿規則	
・「放射化学」論文投稿の手引き	
・学位論文要録執筆候補者の推薦について	
・「会員の声」欄へのご寄稿のお願い	
・会員の異動に伴う連絡のお願い	
<b>賛助会員リスト</b>	
<b>広告</b>	

## 表紙の説明

広島原爆による原爆雲上昇のシミュレーション (STLAMB: 実線) と米国ネバダ核実験場での観察結果。広島原爆のキノコ雲は 4 分後に高さ約 8km、12 分後に高さ約 12km に達したと推定される。

# 原 著

## 福島県の一般廃棄物焼却施設で生じた焼却飛灰中放射性セシウムの化学形態分析 Chemical State Analysis of Radiocesium in Fly Ash Exhausted from Municipal Waste Incinerator in Fukushima

藤井健悟<sup>1</sup>、越智康太郎<sup>1,2</sup>、萩原健太<sup>3</sup>、大淵敦司<sup>4</sup>、野村貴美<sup>5</sup>、中村利廣<sup>5</sup>、小池裕也<sup>5,\*</sup>

<sup>1</sup> 明治大学大学院理工学研究科応用化学専攻：〒 214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1

<sup>2</sup> 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構福島研究開発部門福島環境安全センター：  
〒 975-0036 福島県南相馬市原町区萱浜字巢掛場 45-169

<sup>3</sup> 明治大学研究・知財戦略機構：〒 214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1

<sup>4</sup> 株式会社リガク：〒 569-1146 大阪府高槻市赤大路町 14-8

<sup>5</sup> 明治大学工学部応用化学科：〒 214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1

Kengo FUJII<sup>1</sup>, Kotaro OCHI<sup>1,2</sup>, Kenta HAGIWARA<sup>3</sup>, Atsushi OHBUCHI<sup>4</sup>,  
Kiyoshi NOMURA<sup>5</sup>, Toshihiro NAKAMURA<sup>5</sup>, Yuya KOIKE<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Applied Chemistry Course, Graduate School of Science and Technology, Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa, 214-8571, Japan

<sup>2</sup> Fukushima Environmental Safety Center, Sector of Fukushima Research and Development, Japan Atomic Energy Agency, 45-169 Sukakeba, Kaibama, Haramachi-ku, Minamisoma, Fukushima, 975-0036, Japan

<sup>3</sup> Organization for the Strategic Coordination of Research and Intellectual Properties, Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa, 214-8571, Japan

<sup>4</sup> X-ray Instrumental Division, Rigaku Corporation, 14-8 Akaoji, Takatsuki, Osaka, 569-1146, Japan

<sup>5</sup> Department of Applied Chemistry, School of Science and Technology, Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa, 214-8571, Japan

(2016 年 7 月 6 日受理)

### 要旨

一般廃棄物を燃やすことで生じる都市ごみ焼却飛灰には、福島第一原子力発電所の事故に伴い、環境中に放出された放射性セシウムを含むものがある。その都市ごみ焼却飛灰を処分するためには放射性セシウムの溶出特性を知ることが必要である。そこで福島県内の一般廃棄物処分施設で採取した焼却飛灰を具体的な試料とし、環境省告示第 13 号試験と逐次抽出試験の二つの方法を用いて各抽出試験液と残渣の  $\gamma$  線測定と元素分析、X 線回折分析による化学形態分析を行った。焼却飛灰中の放射性セシウムの多く (約 65%) は水溶性であり、塩化カリウムの溶出特性と似た挙動を示したことから、放射性セシウムは塩化物の形態として含まれていることが示唆される。また、抽出試験後の残留物質にはアルミノシリケートの結晶または非晶質相が主成分で存在するため、水溶性以外の残りの放射性セシウムはアルミノシリケートとの結合または非晶質に取り込まれた形態で存在していると推察された。

### キーワード

放射性セシウム、焼却飛灰、化学形態別分析、環境省告示第 13 号試験、逐次抽出試験

### Key words

Radiocesium, Fly Ash, Chemical State Analysis, Notice No. 13 Test of Ministry of Environment, Japan, Sequential Extraction Test

\* Corresponding author, e-mail: koi@meiji.ac.jp

## 1. 緒言

東日本大震災に伴う東京電力株式会社福島第一原子力発電所 (FDNPP) 事故により、原子炉内から放射性核種が環境中に放出され、5年を経過した今も放射性セシウム ( $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) の汚染が一般廃棄物にも認められる。環境省が定めた「東日本大震災に係る災害廃棄物の処理指針 (マスタープラン)」では、災害廃棄物の適切かつ効率的な処理の推進を図っていくことが示されており<sup>1)</sup>、廃棄物を燃やすことで生じる都市ごみ焼却灰の処分は重要な課題とされた。環境省は、廃棄物に含まれる放射性セシウム濃度が  $8000 \text{ Bq kg}^{-1}$  を超える焼却灰はセメント固化後、管理施設内で保管することとし、 $8000 \text{ Bq kg}^{-1}$  以下の焼却灰は管理型処分施設で処分することを定めている<sup>2,3)</sup>。そのため、放射性セシウム濃度が基準値より低い廃棄物は、通常の廃棄物と同様に焼却し埋立処分することができ、焼却施設や埋立処分場では排ガス処理、排水処理や覆土によって環境中に放射性物質が拡散しないように管理されている。処分方針に基づいた災害廃棄物の適切かつ効率的な処理及び処分を行うには、一般廃棄物焼却施設で発生する焼却灰の放射性セシウム濃度とその性状を把握することが不可欠である。

2011年8月に環境省が報告した「16都県の一般廃棄物焼却施設における焼却灰の放射性セシウム濃度測定結果一覧」<sup>4)</sup>によれば、放射性セシウム濃度は、焼却主灰で  $10 \sim 50000 \text{ Bq kg}^{-1}$ 、焼却飛灰で  $10 \sim 100000 \text{ Bq kg}^{-1}$  であった。都市ごみ焼却灰は焼却残渣である焼却主灰と、集塵装置で捕集される焼却飛灰に分類され、これまでにいくつかの分析例がある。FDNPP事故以前に採取された都市ごみ焼却灰については、粉末ブリケット / 蛍光 X 線法を用いた成分分析<sup>5,6)</sup> や、放射性核種解析を行った研究<sup>7)</sup> が報告されている。FDNPP事故以降では、島岡ら<sup>8)</sup> が、X線回折法を用いて放射性セシウムを含有する焼却残渣について分析を行い、効率的かつ安全な処分に関する技術を提言している。廃棄物の処分法に関する技術のほかに、長期保管や再利用に関する検討も進められており、都市ごみ焼却灰の固化に関する研究も報告されている<sup>9-12)</sup>。

焼却飛灰中放射性セシウムの化学形態を把握す

ることで、埋め立て後の長期的な放射性セシウムの放り出リスクを評価することが可能である。これまでにシミュレーション<sup>13,14)</sup> や、安定セシウムを添加した模擬試料<sup>15-19)</sup> を用いた焼却飛灰中放射性セシウムの化学形態に関する研究が行われてきた。大迫ら<sup>20)</sup> は、「放射能汚染廃棄物処理施設の長期管理手法に関する研究」において、埋立最終処分場の廃止の判断には、処分場内の放射性セシウムの長期的なモニタリングによる挙動の把握が必須であるとしているが、焼却飛灰を実試料として放射性セシウムの化学形態分析を行った研究は数例しか報告されていない<sup>21,22)</sup>。焼却飛灰の長期保管や再利用を検討するために、また埋め立ててからの長期的な放射性セシウムの放り出リスクを評価するためにも、放射性セシウムの化学形態に関する調査は重要である。

本研究では、管理処分場で処分対象となる  $8000 \text{ Bq kg}^{-1}$  以下の焼却飛灰について、環境省告示第13号 (環告13号) 試験<sup>23)</sup> と Tessier らが考案した逐次抽出法<sup>24)</sup> の二つの方法を適用することにより、焼却飛灰中放射性セシウムのより詳細な化学形態を推定した。

## 2. 実験

### 2.1. 都市ごみ焼却飛灰試料

試料は、福島県中部の一般廃棄物焼却場で2013年1月に採取された都市ごみを焼却することにより得られる焼却飛灰を用いた。この試料は都市ごみの焼却時に発生した排ガスを消石灰との反応生成物としてバグフィルターで捕集したものである。都市ごみ焼却飛灰を、乾燥機  $105^\circ\text{C}$ 、24時間乾燥したものを各抽出試験の試料とした。未処理の都市ごみ焼却飛灰及び焼却飛灰をねじ口式ポリスチレン製容器 U-8 (U-8 容器; 高さ: 68 mm、内径: 56 mm、関谷理化) に充填した  $\gamma$  線測定用試料の写真を Fig. 1 に示す。

### 2.2. 装置

都市ごみ焼却飛灰中の  $\gamma$  線放出核種は、高純度 Ge 半導体検出器 (HPGe; PGT, Inc. 製 IGC-10200 NPR 型) により定量した。HPGe の試料室は、鉛: 100 mm、無酸素銅: 5 mm、アクリル板: 5 mm によって遮へいして外部からのバックグラウンド

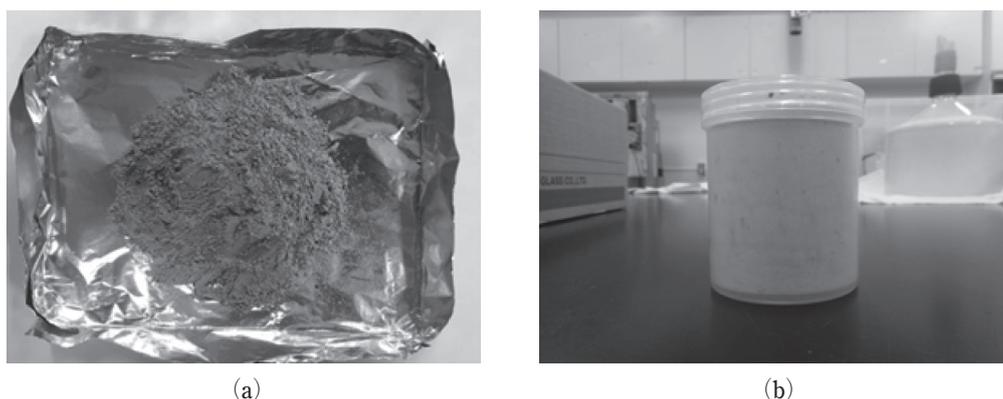


Fig. 1 Photos of raw fly ash sampled at a municipal waste incinerator in Fukushima (a) and fly ash packed in a U-8 container for gamma-ray spectrometry (b).

の放射線を低減している。検出効率曲線は、日本アイソトープ協会製 401 タイプ  $^{152}\text{Eu}$  標準線源と、塩化カリウム試薬(純度 99.9%、和光純薬)中の  $^{40}\text{K}$  の  $\gamma$  線により作成した。元素分析には誘導結合プラズマ発光分光分析装置 (ICP-AES; Thermo Fisher Scientific 製 iCAP 6500 Duo) を用いた。ICP-AES の測定条件を Table 1 に示す。測定波長には Na: 589.5 nm, Al: 308.2 nm, Si: 288.1 nm, S: 180.2 nm, K: 769.8 nm, Ca: 422.6 nm を用いた。結晶相の分析には、高速次元 X 線検出器 D/teX Ultra250 を備えた X 線回折装置 (XRD; リガク製 SmartLab) を用いた。X 線管球には Cu (40 kV, 50 mA)、測定範囲 ( $2\theta$ ) は  $5 \sim 90^\circ$ 、サンプリング幅は  $0.01^\circ$ 、スキャンスピードは  $0.5^\circ \text{ min}^{-1}$  とし、試料は 120 rpm で回転させ測定をした。抽出試験には、恒温振とう槽 (アドバンテック製 TBK602DA) 及び遠心分離機 (日立製 Himac CT 4i) を用いた。抽出処理後の残渣試料は、乾燥機 (ヤマト科学製 Drying Oven DVS402) で乾燥した。溶媒としての純水はメルクミリポア製 Milli-Q integral 5 により調製したイオン交換水を用いた。

Table 1 Instrumental conditions of ICP-AES

Apparatus Thermo Fisher Scientific iCAP 6500 Duo	
RF Power / W	1150
Coolant Ar flow / $\text{L min}^{-1}$	12
Auxiliary Ar flow / $\text{L min}^{-1}$	0.5
Nebulizer Ar flow / $\text{L min}^{-1}$	0.7
Substituted flow quantity / rpm	100
Analysis flow quantity / rpm	50

### 2.3. 試薬

塩化マグネシウム (一級、純正化学)、硝酸 (特級、純正化学)、塩化ヒドロキシルアンモニウム (特級、和光純薬)、酢酸アンモニウム (特級、和光純薬) をそれぞれ純水で溶解し  $1 \text{ mol L}^{-1}$ 、 $0.02 \text{ mol L}^{-1}$ 、 $0.04 \text{ mol L}^{-1}$ 、 $3.2 \text{ mol L}^{-1}$  に調製した。 $1 \text{ mol L}^{-1}$  酢酸緩衝液 (pH 5) は酢酸ナトリウム (特級、純正化学) と酢酸 (特級、純正化学) を純水に溶解し調製した。過酸化水素水は濃度 30% の試薬 (特級、純正化学) を使用した。

### 2.4. 環境省告示第 13 号試験

産業廃棄物に含まれる重金属等の検定方法の一つである環告 13 号試験<sup>23)</sup> を都市ごみ焼却飛灰に適用した。その概略を Fig. 2 に示す。焼却飛灰 5 g に純水 50 mL を加え、6 時間水平振とう (ふり幅 4 ~ 5 cm、毎分 200 回) した。溶出液と残渣は遠心分離機で 3000 rpm、20 分で遠心分離した。溶出液はガラス繊維フィルター (Whatman 製 GF/F、保持粒子径  $0.7 \mu\text{m}$ 、47 mm 径) でろ過し、U-8 容器に充填した。試料は、HPGe で 6 時間  $\gamma$  線測定し、 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  及び  $^{40}\text{K}$  を定量した。

### 2.5. 逐次抽出試験

Tessier らが考案した逐次抽出法<sup>24)</sup> を都市ごみ焼却飛灰に適用した。この逐次抽出法は、試料中の微量金属元素を、イオン交換態 (IE)、炭酸塩態 (CB)、Fe, Mn 酸化物態 (OX)、有機物・硫化物態 (OB)、残留物態 (Res.) の五つの区分に分画する抽出試験である。IE は金属元素が水溶

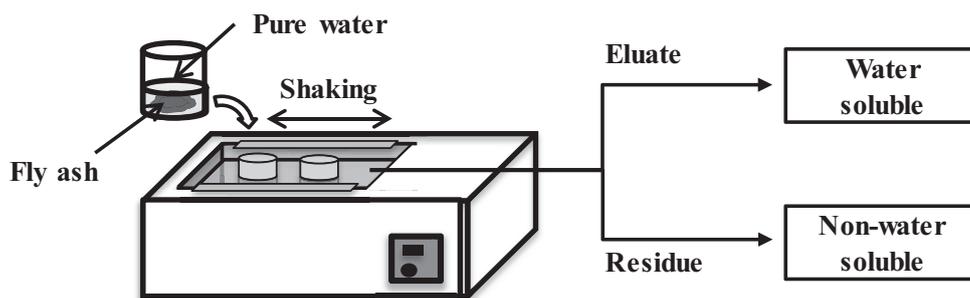


Fig. 2 Extraction procedure for the fly ash sampled at a municipal waste incinerator in Fukushima with the notice No. 13 test of Ministry of the Environment, Japan.

性化合物として存在する区分であり、この区分の金属元素は試料中から水中に容易に遊離する。また、CBは炭酸イオンと結合している金属化合物で弱酸に溶解する区分であり、雨水などで環境中に放出する可能性がある。OXはFe, Mn酸化物に取り込まれる形で存在し、Fe, Mn酸化物の構造が壊れる還元的雰囲気中で溶出する。OBは硫黄などと結合している区分であり、化学的に安定だが酸化雰囲気中で徐々に溶出する化合物である。

Res. は環境中に放出・拡散される可能性が最も低い化学的に安定なものである。

逐次抽出法の概略を Fig. 3 に示す。乾燥した焼却飛灰 5 g に  $1 \text{ mol L}^{-1}$  の塩化マグネシウム水溶液 40 mL を加え、マグネチックスターラーで 1 時間室温で攪拌した (IE)。IE 抽出操作をした残渣の焼却飛灰に pH 5 に調整した  $1 \text{ mol L}^{-1}$  の酢酸緩衝液 40 mL を加え、マグネチックスターラーで 6 時間室温で攪拌した (CB)。その後、残渣の焼

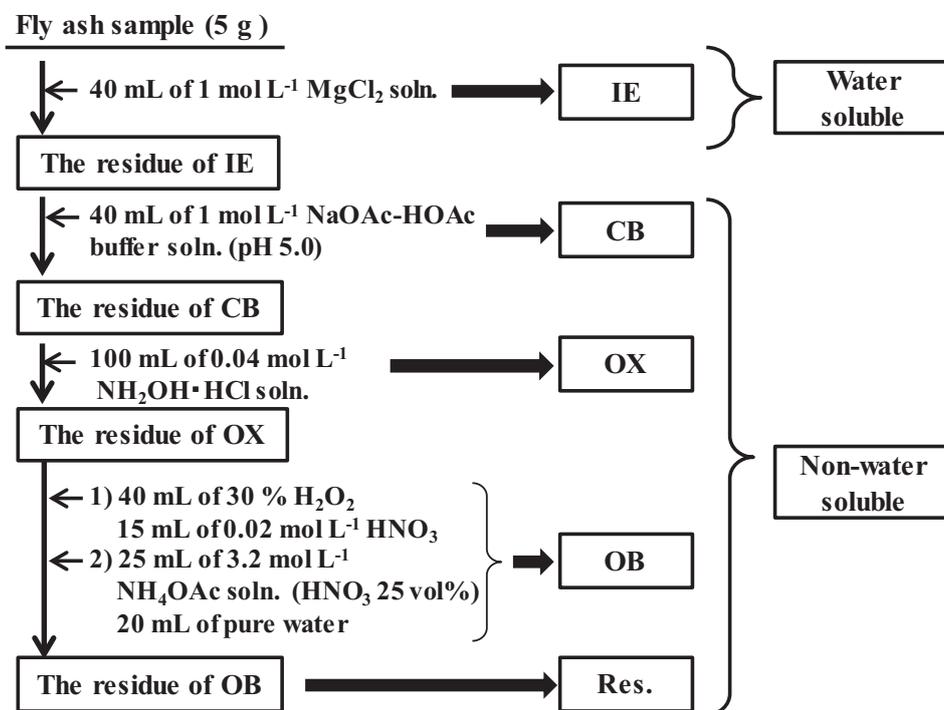


Fig. 3 Extraction procedure for the fly ash sampled at a municipal waste incinerator in Fukushima with the sequential extraction test of the Tessier method.

IE: Exchangeable, CB: Bound to carbonates, OX: Bound to Fe-Mn oxides  
OB: Bound to organic or sulfide compound and Res.: Residue.

却飛灰に  $0.04 \text{ mol L}^{-1}$  の塩化ヒドロキシルアンモニウム溶液を  $100 \text{ mL}$  を加え、約  $96^\circ\text{C}$  で 6 時間加熱攪拌した (OX)。OX 抽出操作をした残渣の焼却飛灰に  $0.02 \text{ mol L}^{-1}$  の硝酸  $15 \text{ mL}$  と 30% 過酸化水素水  $25 \text{ mL}$  を加え、約  $85^\circ\text{C}$  で 3 時間加熱攪拌し、その後  $3.2 \text{ mol L}^{-1}$  の酢酸アンモニウム溶液  $25 \text{ mL}$ 、純水  $20 \text{ mL}$ 、 $0.02 \text{ mol L}^{-1}$  の硝酸  $15 \text{ mL}$  を加え常温で 3 時間攪拌した (OB)。最終的に残った残渣を Res. 試料とし、 $85^\circ\text{C}$  で 24 時間乾燥した。各抽出液は攪拌後、溶出液と残渣を遠心分離機で  $3000 \text{ rpm}$ 、20 分で遠心分離した。水溶液及び固体試料は、それぞれ U-8 容器に充填し HPGe で 6 時間  $\gamma$  線測定を行った。また各区分の溶出液は ICP-AES により元素分析も行った。

### 3. 結果と考察

#### 3.1. 都市ごみ焼却飛灰中の放射性核種分析

都市ごみ焼却飛灰の  $\gamma$  線スペクトルを Fig. 4 に示す。2011 年 3 月に発生した FDNPP 事故由来と考えられる放射性セシウムと天然放射性核種である  $^{40}\text{K}$  が検出された。測定日を基準に減衰補正を行った  $^{134}\text{Cs}$  濃度は  $882 \pm 17 \text{ Bq kg}^{-1}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  濃度は  $4470 \pm 43 \text{ Bq kg}^{-1}$  であった。測定日の放射性セシウムの合計放射能濃度 ( $^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$ ) は  $5352 \pm 46 \text{ Bq kg}^{-1}$  となり、採取した焼却飛灰は、管理

型最終処分場に埋立処分できるものであった<sup>2,3)</sup>。FDNPP 事故時の 2011 年 3 月 11 日を基準に減衰補正すると、 $^{134}\text{Cs}$  濃度は  $4741 \pm 92 \text{ Bq kg}^{-1}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  濃度は  $5015 \pm 48 \text{ Bq kg}^{-1}$  である。焼却飛灰中の  $^{40}\text{K}$  濃度は  $(2.54 \pm 0.13) \times 10^3 \text{ Bq kg}^{-1}$  であった。九州北部の焼却処分施設の焼却飛灰中の  $^{40}\text{K}$  濃度は、 $445 \sim 2600 \text{ Bq kg}^{-1}$  であり、天然放射性核種である  $^{40}\text{K}$  の放射能濃度レベルは FDNPP 事故前後である 2006 ~ 2011 年と事故後の 2012 年で同程度であったことが報告されている<sup>25)</sup>。今回の試料である福島県焼却飛灰中の  $^{40}\text{K}$  濃度は九州で採取されたものと同程度であった。

#### 3.2. 環境省告示第 13 号試験による水溶性セシウムの定量

環告 13 号による抽出試験の結果を Table 2 に示す。 $^{134}\text{Cs}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  の溶出率はそれぞれ 64.3% と 65.2% であり、焼却飛灰に含まれる放射性セシウムの 6 割以上が水溶性化合物に付着、または水溶性化合物として存在していると考えられる。JIS K0058-1 有姿攪拌試験による一般廃棄物焼却飛灰の溶出試験の結果でも 60 ~ 70% 程度の放射性セシウムが純水で溶出したとの報告がある<sup>13)</sup>。また、雨水などの自然環境水を想定し、pH を弱酸性 (pH = 5.2) に調整した水で抽出試験を行っ

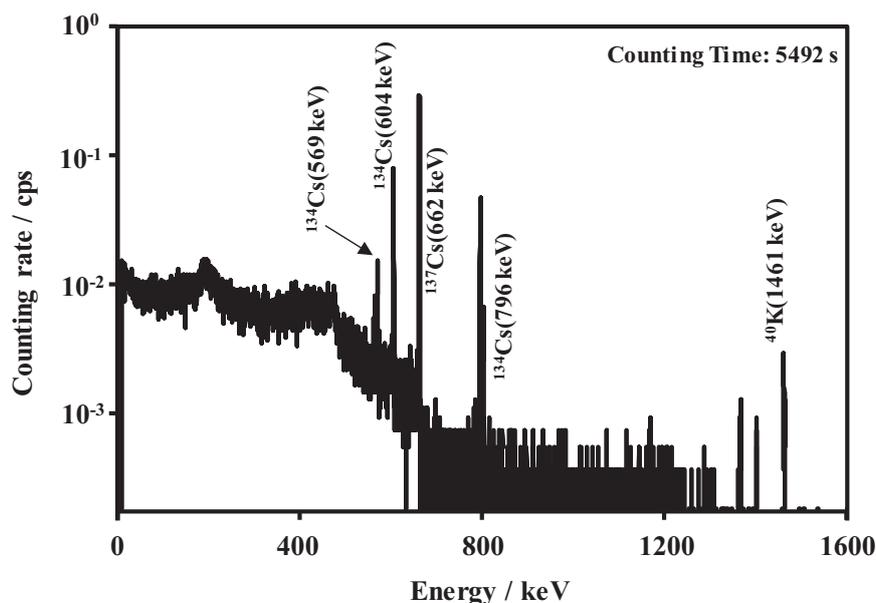


Fig. 4 Gamma-ray spectrum of the raw fly ash sampled at a municipal waste incinerator in Fukushima in Jan., 2013.

Table 2 Elution rate of radiocesium in fly ash by Notice No. 13 test of Ministry of the Environment, Japan

	Activity / Bq		Elution rate, %
	Before test	After test	
$^{134}\text{Cs}$	4.31 ± 0.06	2.77 ± 0.13	64.3 ± 3.2
$^{137}\text{Cs}$	23.0 ± 0.2	15.0 ± 0.3	65.2 ± 1.4

た例<sup>23)</sup>でも、今回の環告13号試験とほぼ同様の結果であった。焼却飛灰中の放射性セシウムは、そのまま放置すれば、雨水や地下水といった環境水中に溶出・拡散する可能性が示唆される。

環告13号試験前後の焼却飛灰を結晶相分析及び元素分析したところ、溶出試験により、塩化物イオンを含む化合物（塩化水酸化カルシウム（ $\text{CaClOH}$ ）、シルバイト（ $\text{KCl}$ ）、ハライト（ $\text{NaCl}$ ）の大部分が溶出された。

### 3.3. 逐次抽出試験による放射性セシウムの化学形態分析

逐次抽出試験における分画毎の抽出液の $\gamma$ 線スペクトルをFig. 5に示す。逐次抽出試験による各形態の抽出液の $\gamma$ 線スペクトルから、放射性セシウムと $^{40}\text{K}$ のピークが検出された。放射性セシウムの溶出率をFig. 6に示す。水溶性の形態であるIEでの溶出率が高く、環告13号試験とほぼ同等の結果が得られた。Csは同じアルカリ金属であるKと同じ挙動をとると考えられており、渡邊ら<sup>17)</sup>は焼却飛灰中の放射性セシウムは塩化セシウムのような塩化物態として存在していることを示唆している。抽出液及び残渣中から塩化セシウムは確認できなかったが、3.2.節の結晶相分析及び環告13号試験とIEでの放射性セシウムの溶出率が同等であった点から、焼却飛灰中には塩化カリウムが存在し、カリウムと同じ挙動をとる放射性セシウムも塩化セシウムとして存在することが推察できる。

水溶性の形態であるIE以外の分画は、雨水や地下水等の環境水と接触しても溶出する可能性はほとんどないと考えている。焼却灰等の熱処理物には、有機物または硫化物がほとんど存在しない<sup>13)</sup>ため、CB、OX及びOBで存在する放射性セシウムの化合物を推定するにはさらなる解

析が必要である。逐次抽出試験のRes.からも放射性セシウムが確認された。Res.のXRDスペクトルをFig. 7に示す。Res.は石英、アルバイト（ $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ）、ゲーレンナイト（ $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ ）などのケイ酸化合物のピークが検出された。さらに、非晶質由来のハローが確認された。木下ら<sup>22)</sup>は焼却飛灰中のAl、Si及びCsの挙動を解析し、難溶性態で存在するCsはアルミノシリケートと結合している、あるいはガラス状非晶質のマトリックス内に取り込まれている可能性を示唆した。今回のXRDスペクトル及び放射性セシウムの溶出率の結果から、焼却飛灰中の放射性セシウムはアルミノシリケートと結合している、あるいは非晶質のマトリックスに取り込まれていると考えられる。

試料とした都市ごみ焼却飛灰に対して7回の逐次抽出試験を行った結果、分析値にばらつきは少なく、各分画における放射性セシウムの溶出率の相対標準偏差は6.4～14.3%であり、再現性は良好であった。

### 3.4. 焼却飛灰中の放射性セシウムの挙動

逐次抽出試験の各分画及び、環告13号試験の溶出液中の $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ の放射能濃度の関係をFig. 8に示す。各溶出液中の $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ の放射能濃度は2011年3月11日に減衰補正を行っている。図中の点線は $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ の放射能比が1となる直線である。 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比は、FDNPP事故によって放出された $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ の放出量を指標とし、その放射能比はおよそ1となる<sup>26)</sup>。それぞれの化学形態の $^{134}\text{Cs}$ 及び $^{137}\text{Cs}$ の比は約1であり、FDNPP事故由来の放射性セシウムが存在形態によらず検出された。焼却灰中の含有成分は、焼却している都市ごみの種類、焼却温度、さらに排ガスの処理条件により異なること

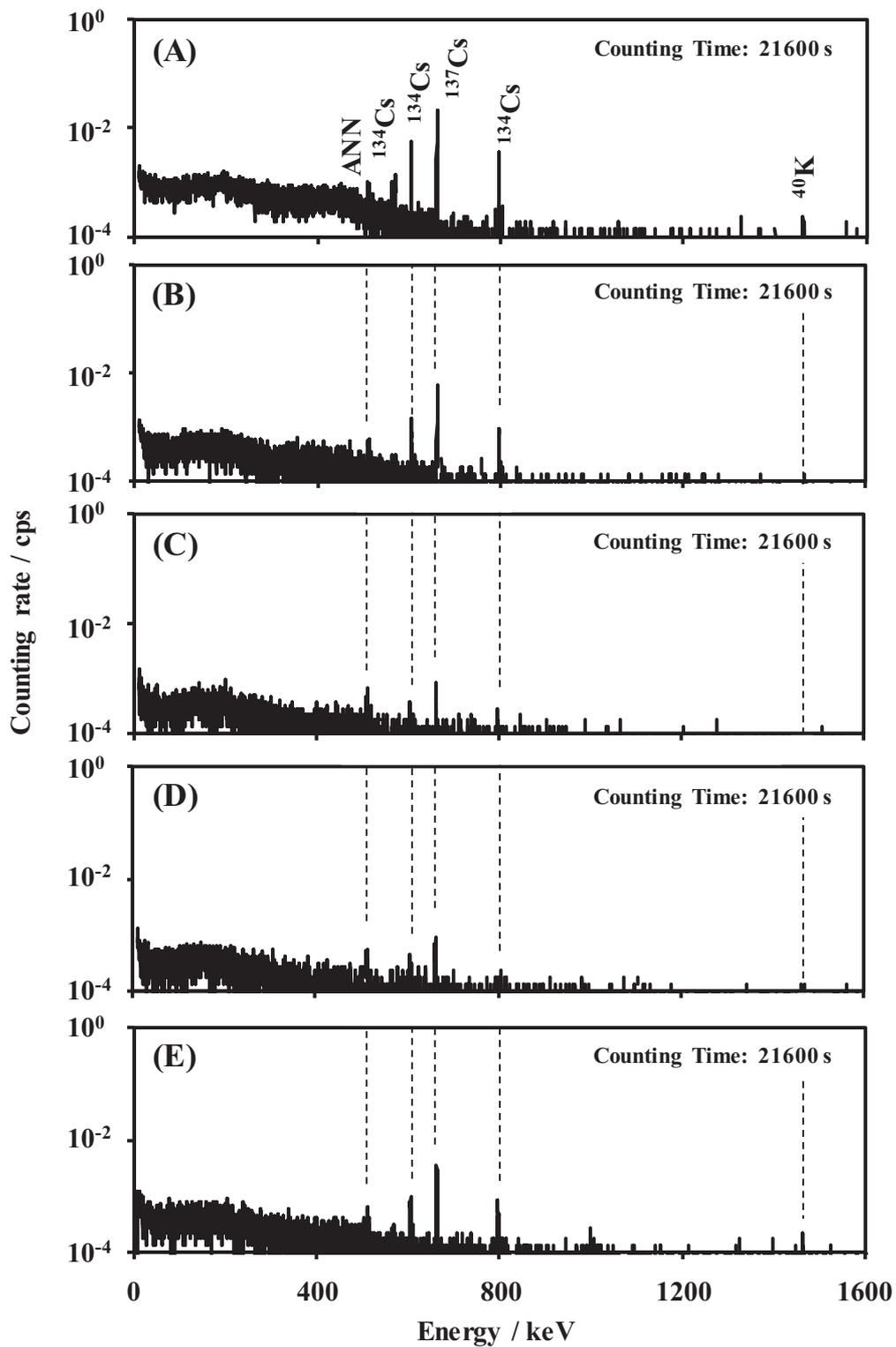


Fig. 5 Gamma-ray spectra of the extracted fraction with a sequential extraction procedure from the fly ash sampled at a municipal waste incinerator in Fukushima in Jan., 2013. ANN: Annihilation gamma-ray. (A): IE fraction; (B): CB fraction; (C): OX fraction; (D): OB fraction; (E): Res.

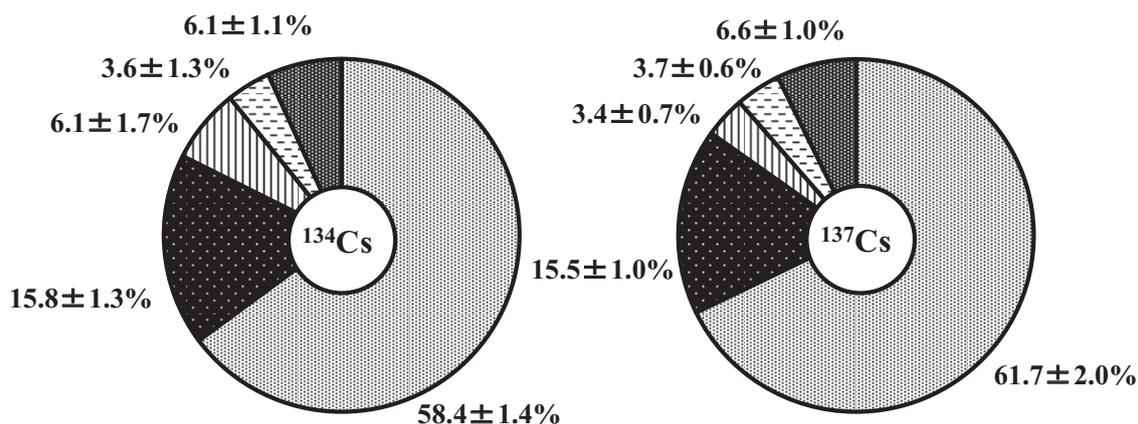


Fig. 6 Activity distributions of  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the extracted fraction with a sequential extraction procedure from the fly ash sampled at a municipal waste incinerator in Fukushima in Jan., 2013.  
 ■: IE fraction; ■: CB fraction; ▨: OX fraction; ▩: OB fraction; ■: Res.

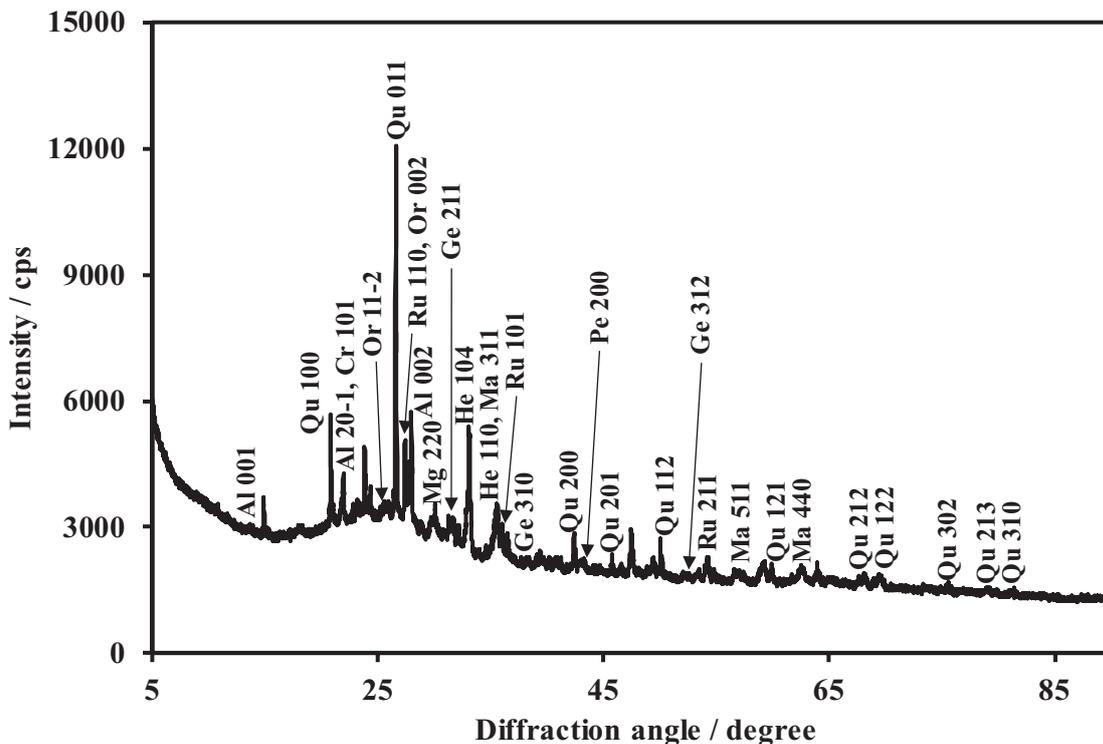


Fig. 7 X-ray diffraction pattern of Res. obtained from a sequential extraction procedure of the Tessier method for the fly ash sampled at a municipal waste incinerator in Fukushima in Jan., 2013.  
 Al: Albite ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), Cr: Cristobalite ( $\text{SiO}_2$ ), Ge: Gehlenite ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ ), He: Hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Ma: Magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), Or: Orthoclase ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ), Pe: Periclase ( $\text{MgO}$ ), Qu: Quartz ( $\alpha\text{-SiO}_2$ ) and Ru: Rutile ( $\text{TiO}_2$ )

が予想される<sup>23)</sup>。それにも関わらず、FDNPP 事故由来の放射性セシウムが存在状態によらず一定の割合で検出されている。FDNPP 事故由来の放

射性セシウムの挙動を解析するには、焼却灰中の放射性核種以外の組成分析も重要と考えられる。福島県内で採取された都市ごみ焼却飛灰を蛍光

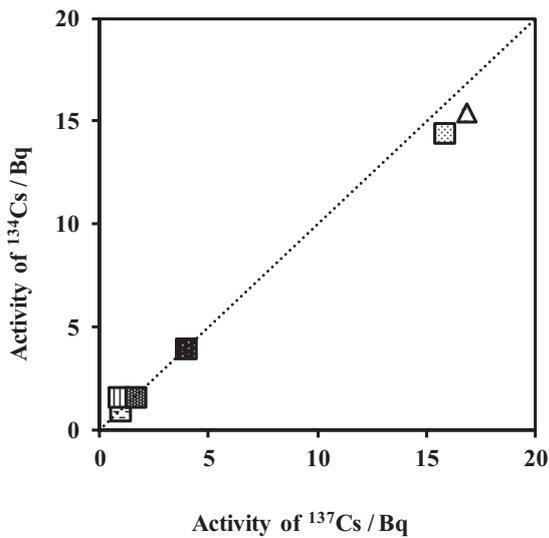


Fig. 8 Relationships between activities\* of  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in the extracted fraction with extraction tests for the fly ash sampled at a municipal waste incinerator in Fukushima in Jan., 2013.

\*: Activities of  $^{134}\text{Cs}$  and  $^{137}\text{Cs}$  were calculated after decay correction on 11 March 2011

Broken line: orthogonal-regression line ( $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs} = 1$ ), inclination ( $a=1$ ), intercept ( $b=0$ )

▨: IE fraction; ■: CB fraction; ▨: OX fraction

▩: OB fraction; ▩: Res.

△: No. 13 test of Ministry of the Environment, Japan

X線分析法により元素分析を行ったところ、Ca含有量が51.2%と一番高く、次いでSiが13.0%、Alが7.70%、Naが3.74%、Sが3.62%、Kが3.40%であった<sup>23)</sup>。逐次抽出試験の各抽出液中の主成分元素をICP-AESで測定し、抽出により減少した都市ごみ焼却飛灰からの減少率を算出した結果をFig. 9に示す。図中の減少率は、抽出試験前の元素量を1とし、各抽出試験後の残渣に残存する元素量を規格化した値である。抽出試験による放射性セシウムは、同族のアルカリ金属であるNaやKと似た挙動を示した。これまでに行われてきた焼却飛灰中放射性セシウムの化学形態分析ではKの挙動解析により放射性セシウムの化学形態を推定するものが多い。しかし、抽出液中のNaなどの主成分元素の測定により、放射性セシウムのより詳細な化学形態分析が行えると考えられる。Al, Si, S及びCaは、逐次抽出試験による溶出は確認できなかったため、放射性セシウムと異なる化学状態で存在していると考えられる。

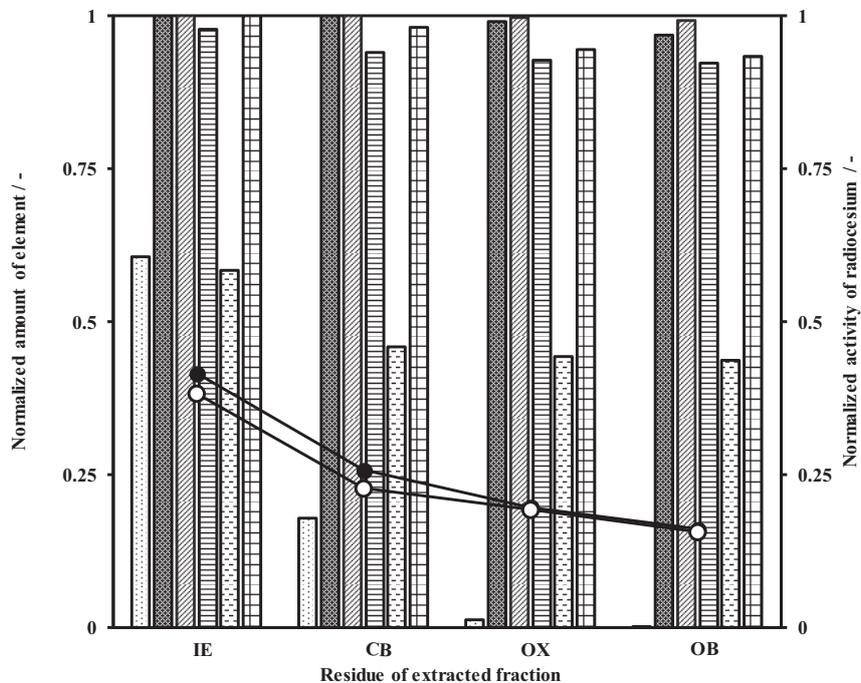


Fig. 9 Amount of major elements (Na: ▨, Al: ▨, Si: ▨, S: ▨, K: ▨, Ca: ▨) and of  $^{134}\text{Cs}$  (●) and  $^{137}\text{Cs}$  (○) normalized by the raw fly ash at municipal waste incinerators fraction with sequential extraction procedure.

#### 4. 結言

管理処分場で処分対象となる  $8000 \text{ Bq kg}^{-1}$  以下の焼却飛灰について、環告 13 号試験と逐次抽出試験を適用し、逐次抽出試験それぞれの分画について元素分析を行った。環告 13 号試験の結果から、都市ごみ焼却飛灰中の  $^{134}\text{Cs}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  は水でそれぞれ  $64.3 \pm 3.2\%$  と  $65.2 \pm 1.4\%$  溶出し、環境水で放射性セシウムは溶出する可能性が示唆された。逐次抽出試験による各分画の抽出液の  $\gamma$  線測定から、放射性セシウムと  $^{40}\text{K}$  の大部分がイオン交換態 (IE) 及び炭酸塩態 (CB) で溶出された。イオン交換態での  $^{134}\text{Cs}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  の溶出率は  $58.4 \pm 1.4\%$  と  $61.7 \pm 2.0\%$  であり、環告 13 号試験と同様の結果が得られた。一種類の都市ごみ焼却飛灰に対して 7 回の逐次抽出試験を行った結果、分析値にばらつきは少なく、各分画における放射性セシウムの溶出率の相対標準偏差は  $6.4 \sim 14.3\%$  であり、再現性は良好であった。

逐次抽出試験と結晶相及び元素分析の結果より、焼却飛灰中の放射性セシウムは同族元素である Na や K と同様な挙動をとることが確認できた。XRD 測定の結果もあわせ、都市ごみ焼却飛灰中の放射性セシウムは、塩化セシウムのような水溶性の塩化物形態で存在していると推測できる。現在行われている焼却飛灰中の放射性セシウムの化学形態に関する研究では、K の挙動解析により放射性セシウムの化学形態を推定するものが多い。しかし本研究の結果から、Na などの主成分元素分析と  $\gamma$  線測定を組み合わせることで、実試料である都市ごみ焼却飛灰に溶出試験が適用できることを確認でき、放射性セシウムのより詳細な化学形態分析が可能となった。

#### 謝辞

本論文の作成に際しては、明治大学研究・知財戦略機構の岩鼻雄基博士、明治大学理工学部の久米冬馬氏の焼却飛灰の取り扱いに関するご指導およびご協力に対して心からの謝意を表す。都市ごみ焼却飛灰をご提供頂きました福島県内一般廃棄物焼却処分施設の関係者の皆様にも御礼申し上げます。

#### 引用文献

- 1) 環境省一東日本大震災に係る災害廃棄物の処理指針 (マスタープラン) **2011**, [https://www.env.go.jp/jishin/attach/haiki\\_masterplan.pdf](https://www.env.go.jp/jishin/attach/haiki_masterplan.pdf) (accessed May 5, 2016).
- 2) 環境省一福島県内の災害廃棄物の処理の方針 **2011**, [https://www.env.go.jp/jishin/attach/fukushima\\_hoshin110623.pdf](https://www.env.go.jp/jishin/attach/fukushima_hoshin110623.pdf) (accessed May 5, 2016).
- 3) 環境省廃棄物・リサイクル対策部—100 Bq/kg と 8000Bq/kg の二つの基準の違いについて **2011**, [https://www.env.go.jp/jishin/attach/waste\\_100-8000.pdf](https://www.env.go.jp/jishin/attach/waste_100-8000.pdf) (accessed May 5, 2016).
- 4) 環境省—16 都県の一般廃棄物焼却施設における焼却灰の放射性セシウム濃度測定結果一覧 **2011**, <https://www.env.go.jp/jishin/attach/waste-radioCs-16pref-result20110829.pdf> (accessed May 5, 2016).
- 5) Ohbuchi, A.; Kitano, M.; Nakamura, T. *X-ray Spectrometry* **2008**, *37*, 544-550.
- 6) 大淵敦司; 北野大; 中村利廣 分析化学 **2009**, *58*, 249-256.
- 7) 永井幸太; 岩鼻雄基; 栗原雄一; 高橋賢巨; 大淵敦司; 小池裕也; 佐藤純; 中村利廣 *Proceedings of the Ninth Workshop on Environmental Radioactivity 2008*, KEK Proceedings 2008-9, 97-101.
- 8) 島岡隆行ら “放射性セシウムを含有する焼却残渣の状把握と効率的かつ安全な処分技術”, 平成 25 年度環境研究総合推進費補助金研究事業総合研究報告, 3K122102 (2014).
- 9) 鈴木和将; 藤井隆史; 綾野克紀; 小野芳朗 廃棄物資源循環学会論文誌 **2009**, *20*(5), 320-331.
- 10) 塩田憲司; 中村尊郁; 藤森崇; 大下和徹; 高岡昌輝 *Photon Factory Activity Report 2013 2014*, #31 Part B, BL-12C/2013G217
- 11) 中山卓也; 川戸喜実; 大杉武史; 嶋崎竹二郎; 花田圭司; 鈴木真司; 榊原哲朗; 中澤修; 目黒義弘 “焼却灰のセメント固化試験手引書”, JAEA-Technology 2014-046 (2015).
- 12) 杉橋直行; 馬場勇介; 遠藤和人 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造) **2015**, *71* (1),

- 14-28.
- 13) 国立環境研究所資源循環・廃棄物研究センター“放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分(技術試料)”第四版, pp. 32-47, 62-100 (2014).
- 14) 小原義之 東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に係る廃炉措置及び環境回復への原子力機構の取り組み **2015**, 2014 年版, 100-101.
- 15) 岡本芳浩; 大杉武史; 赤堀光雄 *Photon Factory Activity Report 2012* **2013**, #30 Part B, BL-27B/2012G086.
- 16) 藤森崇; 土井妙子; 滝上英孝; 大迫政浩 第 22 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演集 **2011**, 371-372.
- 17) 渡邊優香; Saffarzadeh, A.; 東條安匡; 島岡隆行 *Spring-8 利用研究成果集 Section B* **2014**, 2 (1)89-93.
- 18) 土手裕; 関戸知雄; 諸岡龍; 島岡隆行; 東條安匡; 吉田英樹, 河野孝志 土木学会論文集 G(環境) **2014**, 70(7), III\_217-III\_223(2014).
- 19) Saffarzadeh, A.; Shimaoka, T.; Kakuta, Y.; Kawano, T. *J. Environ. Radioactiv.* **2014**, 136, 76-84.
- 20) 大迫政浩ら“放射能汚染廃棄物処理施設の長期管理手法に関する研究”, 平成 25 年度環境研究総合推進費補助金研究事業総合研究報告, 3K122103 (2014).
- 21) Iwahana, Y.; Ohbuchi, A.; Koike, Y.; Kitano, M.; Nakamura, T. : *J. Mater. Cycles Waste Manag.* **2015**, DOI 10.1007/s10163-015-0408-5.
- 22) 木下亮; 東條安匡; 松尾孝之; 黄仁姫; 松藤敏彦; 島岡隆行 第 24 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集 **2013**, 575-576.
- 23) 大淵敦司; 越智康太郎; 小池裕也; 野村貴美; 紺野貴之; 山田康治郎; 藤縄剛; 中村利廣 X 線分析の進歩 **2016**, 47, 225-232.
- 24) Tessier, A.; Campbell, P. G. C.; Bisson, M. *Anal. Chem.* **1979**, 51(7), 844-851.
- 25) 岩鼻雄基; 小池裕也; 中村利廣 *分析化学* **2014**, 63(12), 933-938.
- 26) 小森昌史; 小豆川勝見; 野川憲夫; 松尾基之 *分析化学* **2013**, 62(6), 475-483.

### Abstract

Fly ash produced from Municipal Waste Incinerators often contains radiocesium originating from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. It is important to estimate speciation of radiocesium in the incinerator fly ash because of the appropriate and efficient management of fly ash generated from the disaster-related waste. Fly ash collected at a waste incineration facility in Fukushima prefecture was treated with two extraction tests; Notice No. 13 test of Ministry of the Environment, Japan and the sequential extraction test. From each extraction test, it was found that the solubility behavior of radiocesium is similar to that of potassium chloride, and about 65% of radiocesium is included as water-soluble chloride compounds in the raw fly ash sample. Aluminosilicate and amorphous phases were detected as main components in the residue after sequential extraction tests. This result suggests that radiocesium contained in the residue would be bonded to aluminosilicate or captured with amorphous phase.

# 解 説

## 気体充填型反跳イオン分離装置 GARIS-II Gas-filled Recoil Ion Separator GARIS-II

加治大哉\*、森本幸司

国立研究開発法人 理化学研究所 仁科加速器研究センター

〒 351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

Daiya Kaji, Kouji Morimoto

Nishina Center for Accelerator-Based Science, RIKEN

2-1, Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

### 要旨

2008年にアクチノイドを標的とした重イオン核融合反応に特化した新しい気体充填型反跳イオン分離装置 GARIS-II の開発を開始し、2009年に理研重イオン線形加速器施設の e2 ビームラインに設置した。GARIS-II は、Q1-D1-Q2-Q3-D2 という配置からなる 5 台の電磁石から構成される。GARIS と比較して大きな立体角 (18.2 msr)、短縮された全長 (5.06 m)、高い磁気剛性の反跳イオンに対応 (2.43 Tm)、バックグラウンド抑制対策などを施した分析装置に仕上がった。今後、超重核の合成・精密核分光、超重元素の化学研究などに幅広く活用していく。

### キーワード

気体充填型反跳イオン分離装置、GARIS-II、加速器、超重元素、新元素

### Key words

Gas-filled Recoil Ion Separator, GARIS-II, Accelerator, Superheavy element, New element

### 1. 開発背景

理化学研究所には、世界的に活躍している超重元素分析システムの一つである気体充填型反跳イオン分離装置 GARIS が設置されている [1]。2001年、仁科記念棟地下加速器施設から理研重イオン線形加速器施設 RILAC への移設を契機に、 $^{208}\text{Pb}$  や  $^{209}\text{Bi}$  を標的とした重イオン核融合反応 (コールドフュージョン) を用いた超重元素探索への取り組みをはじめた。入射粒子と標的の組合せを変えて原子番号  $Z=108, 110, 111, 112$  へとステップアップしながら、超重核  $^{265}\text{Hs}$ ,  $^{271}\text{Ds}$ ,  $^{272}\text{Rg}$ ,  $^{277}\text{Cn}$  の合成に成功した [2-5]。原子番号の増加にともない生成断面積は pb ( $1 \text{ pb} = 10^{-36} \text{ cm}^2$ ) オーダーまで低下していき困難をともなったが、核反応生成物に起因する崩壊連鎖が既知核へと到達す

る核種同定の確かさを重視する戦略をとった。その際、系統的な励起関数測定から超重核合成時における最適入射エネルギー条件を得ることのみならず、大強度重イオン照射に耐えうる標的・標的の健全性確認モニター・GARIS の最適動作法・原子一個で原子核を同定するための検出器・検出器からの信号処理法・崩壊チェーンの解析法といった超重元素分析技術の確立も合わせて行った。

$^{209}\text{Bi}(^{70}\text{Zn},n)^{278}113$  反応による原子番号 113 番の新元素探索は、これらの基盤技術に基づいて 2003 年から 2012 年までの 10 年間にわたって取り組まれた。結果として、正味の照射日数 576 日で 3 原子の  $^{278}113$  に起因する崩壊連鎖を観測した [6-8]。それら一連の成果が認められ、2015 年 12

\* Corresponding author, e-mail: daiya@riken.jp

月31日付で国際純正・応用化学連合 (IUPAC) と国際純粋・応用物理学連合 (IUPAP) による合同作業部会 (JWP) によってアジア初・日本発となる原子番号113番である新元素の命名権の認定が発表され、日本の科学史における偉業となった [9]。113番元素認定の際に重視された基準は「既知核への到達」であり、アクチノイドを標的とした重イオン核融合反応 (ホットフュージョン) によって合成される  $^{266}\text{Bh}$  の崩壊特性の調査がカギを握っていた [10]。113番元素の命名権獲得についての詳細は、本誌第33号掲載の森本氏ならびに工藤氏による解説 [11,12] を参照していただきたい。

ホットフュージョン反応で合成される中性子過剰な超重核には、秒オーダーの半減期をもつ化学研究対象核種 (例えば、 $^{261}\text{Rf}$ ,  $^{262}\text{Db}$ ,  $^{265}\text{Sg}$ ,  $^{266,267}\text{Bh}$ ,  $^{269}\text{Hs}$ ,  $^{283}\text{Cn}$  等 ...) がある [13]。日本国内の超重元素化学の黎明期は2000年代初頭であり、日本原子力研究開発機構を中心とする核化学研究グループによって104番元素 Rf の液相・気相化学および105番元素 Db の液相化学が展開された [14,15]。これらの進展により、2005年頃からにわかに原子番号106番以上を対象とした超重元素化学研究に対する機運が高まってきた。それらを成し得るためには、大強度重イオンビームによる超重元素生成率の向上・化学分析装置までの搬送効率の向上・核種同定上妨害となる副反応生成物に起因するバックグラウンドの抑制を兼ね備える必要性があった。これらの問題点に対し、欧米を中心とする核化学研究グループは反跳分離装置を前段分離とした新しい超重元素化学の展開を模索し、基礎実験と議論を始めていた [16-18]。このような背景の中、GARIS を用いたホットフュージョン反応に関する研究は2005年頃から始められた。焦点面に設置したガスジェット搬送システムに結合した回転式連続  $\alpha$ /SF 測定装置 MANON (Measurement system for Alpha-particle and spontaneous fission events ON line) や Si 半導体検出器アレイを利用し、 $^{238}\text{U}$  ( $^{22}\text{Ne}, 5\text{n}$ )  $^{255}\text{No}$  [19],  $^{248}\text{Cm}$  ( $^{18}\text{O}, 5\text{n}$ )  $^{261}\text{Rf}$  [20,21],  $^{248}\text{Cm}$  ( $^{19}\text{F}, 5\text{n}$ )  $^{262}\text{Db}$  [22],  $^{248}\text{Cm}$  ( $^{22}\text{Ne}, 5\text{n}$ )  $^{265}\text{Sg}$  [23] 反応に関する基礎研究を行った。これらの詳細は、本誌第30号掲載の羽場氏による総説 [24] を参

照していただきたい。ホットフュージョンのような非対称系の核反応では反跳により標的から飛び出す際の運動エネルギーが小さいため、複合核からの粒子放出による角度分散・標的中での多重散乱・充填ガス中における気体原子との多重散乱といった角度広がりの影響が大きく収集効率が悪くなることがわかった [25]。ヘリウムガス中を運動する反跳イオンの平均平衡電荷測定から、ビームや標的の0度反跳等のバックグラウンド粒子との分離が悪くなっていることもわかった [25]。そのため、1  $\mu\text{A}$  を越えるような大強度重イオンビーム照射実験における焦点面検出器での計数率は kcps オーダーとなり、寿命の長い崩壊チェーンの蒸発残留核を含めた相関解析は困難を極める。得られた平均平衡電荷から、ホットフュージョン反応による原子番号108番以降の探索には反跳イオンを収集するための磁場が不足する可能性が示唆され、最適条件での実験が困難になることが予想された。

今後、大強度重イオンビームを用いたホットフュージョン反応に関する研究を展開していくためには、これらの問題を解決できるような新たな分離装置の開発が望まれた。そのような状況の中、理研の森田氏によって獲得された文部科学省科学研究費補助金 (特別推進研究) により、ホットフュージョン反応に特化した新しい反跳分離装置を開発する機会を得た。それは、GARIS が誕生した1989年以来の一大プロジェクトであり、今後10-20年の超重元素研究を支える基盤装置の開発といえる。

## 2. GARIS-II の構成

新しい気体充填型反跳イオン分離装置 GARIS-II (GAs-filled Recoil Ion Separator-II) は、RILAC 施設大照射室内 e2 ビームラインコースに設置された [26]。隣の e3 ビームラインコースには、GARIS が設置されている。RILAC 施設のレイアウト図を Fig. 1 に示す。18 GHz ECR イオン源 [27] でイオン化された重イオンは、RFQ-LINAC [28]、upgrade-RILAC [29] により核反応に最適なエネルギーまで加速された後、90度偏向電磁石により曲げられて e2 ビームラインコースに導かれる。核子あたり最大 6.0 MeV/u までの入射エネ

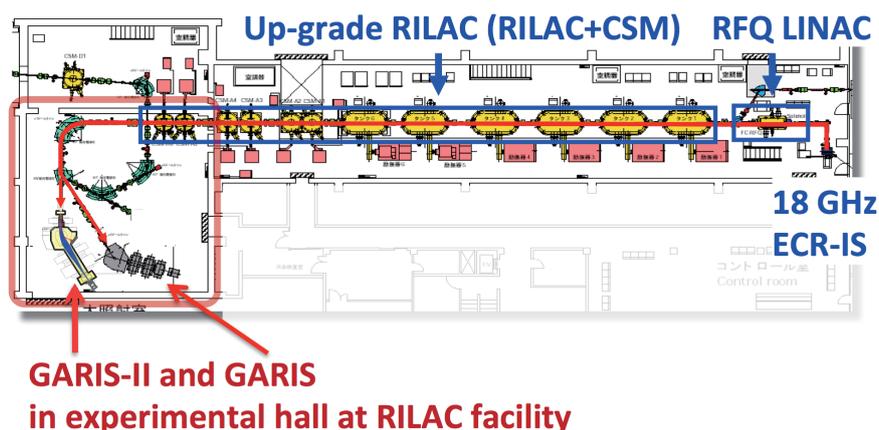


Fig. 1 Layout of the RIKEN heavy-ion linear accelerator (RILAC) facility. The GARIS-II was installed in e2-beam line at the RILAC experimental hall.

ルギー、最大  $10 \mu\text{A}$  ( $6.2 \times 10^{13}$  ions/s) までの大強度重イオンビームが利用可能である。e2 ビームラインには、e3 ビームラインに設置されている非接触式入射エネルギー測定装置（フェーズプローブによるピックアップ型飛行時間検出器）は設置されていない。そのため、加速エネルギーは加速電圧パラメータおよび磁気剛性 ( $B\rho$ ) から相互確認することで与えられる。

Fig. 2 は上部から撮影した GARIS-II の全体写真であり、その構成図を Fig. 3 に示す。GARIS-II は5つの電磁石から構成され、Q1-D1-Q2-Q3-D2 という電磁石配置をとる。ここで、DとQは双極子電磁石および四重極電磁石を意味する。この電磁石配置は、超重元素研究用反跳分離装置として

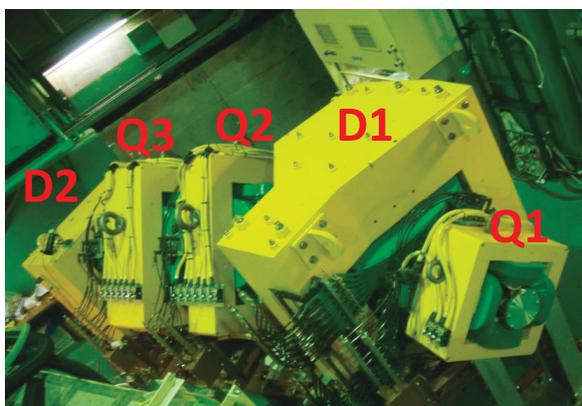


Fig. 2 Photograph of GARIS-II. The GARIS-II consists of five magnets in Q1-D1-Q2-Q3-D2 configuration.

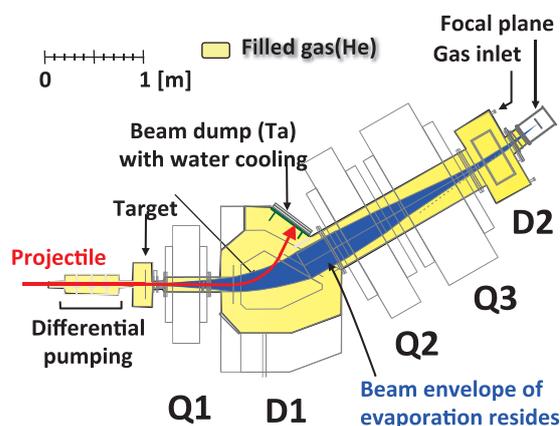


Fig. 3 Schematic of a new gas-filled recoil ion separator GARIS-II [26]. A gas-cooled rotating target system with differential pumping system was installed at an upstream of GARIS-II. Projectiles from accelerator is stopped at water cooled Ta-beam dump. Filled gas is inlet from downstream of the separator.

は初めてのものである。加速器から供給される重イオンビームは、差動排気システムを通過し、標的に照射される。入射粒子の大部分は最初の四重極電磁石を通過し、双極子電磁石内で偏向し冷却水で冷やされたビームダンプにおいて停止する。ビーム強度は、標的物質による入射粒子のラザフォード散乱を左右斜め45度方向 ( $L=200 \text{ mm}$ ) に設置されたシリコンフォトダイオードで計測することで得られる。右側の検出器の前には通過粒子数を1/100に落とす金属メッシュを挿入し、大

強度ビーム実験に対応する。核反応によって生成された蒸発残留核 (ER: Evaporation Residue) は、ローレンツ力を受けながら磁場中を移動し、焦点面へと運ばれる。標的から焦点面までの beam envelope は、Fig. 3 中の青色部で与える。イオン光学特性は Transport [30] を、各電磁石の機械設計ならびに磁場計算は OEPRA-3D/TOSCA [31] を用いて評価した。Transport によって解析した結果の一例として、 $^{248}\text{Cm}(^{22}\text{Ne}, 5n)$  反応で生成する  $^{265}\text{Sg}$  に対する beam envelope を Fig. 4 に示す。図中の実線は、水平方向に  $\pm 47$  mrad、垂直方向に  $\pm 110$  mrad の角度アクセプタンスを与える。各々の双極子電磁石ならびに四重極電磁石の基本特性は、Table 1 と 2 に与える。GARIS と比較するための主要パラメータは、Table 3 に与える。

従来の気体充填型反跳分離装置 GARIS との違いは、立体角をかせぐために初段に垂直方向収束

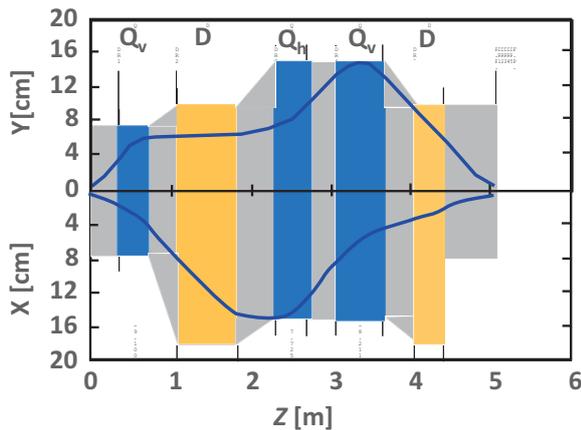


Fig. 4 Beam envelope of  $^{265}\text{Sg}$  ion calculated by TRANSPORT [26]. Maximum horizontal and vertical angular acceptances are 47 and 110 mrad, respectively.

Table 1 Characteristics of dipole magnets [26].

	D1	D2
Deflecting angle [deg]	30	7
Maximum field [T]	1.74	0.86
Pole gap	150	200
Radius of central ray [mm]	1440	2850
Entrance angle [deg]	0	7
Exit angle [deg]	30	-7
Max. AT/pole [AT]	285600	146160
Number of turns/pole	476	336
Max. current [A]	600	435

Table 2 Characteristics of quadrupole magnets [26].

	Q1	Q2	Q3
Max field gradient [T/m]	12.2	4.70	5.27
Pole length [mm]	330	250	450
Bore radius [mm]	75	150	150
Max. AT/pole [AT]	35640	59070	59070
Number of turns/pole	108	179	179
Max. current [A]	330	330	330

Table 3 Ion optical characteristics of GARIS-II [26].

	GARIS	GARIS-II
Configuration	DQ <sub>v</sub> Q <sub>h</sub> D	Q <sub>v</sub> DQ <sub>h</sub> Q <sub>v</sub> D
Ang. Acceptance (X) [mrad]	$\pm 61$	$\pm 47$
Ang. Acceptance (Y) [mrad]	$\pm 57$	$\pm 110$
Solid angle [msr]	12.2	18.5
Total path length [m]	5.76	5.06
Maximum Br [Tm]	2.16	2.43
Dispersion [mm/%]	9.7	19.3

作用四重極電磁石を配置したこと、電磁石構成を一つ増やして5つにしたにも関わらず全長を 5.06 m と全長を短縮したことにある。電磁石 Q1 の強い垂直方向収束作用により、ビーム入射軸に対して平行となるよう収束させ、ひきつづく電磁石 D1 へのアクセプタンスに適合させている。ボア径 75 mm は、電磁石 D1 のポールギャップ 150 mm に合わせて設計されている。Q1 は、立体角向上の要となる電磁石といえる。電磁石 D1 は加速器から供給される大強度重イオンビームを即座に曲げてビームダンプへと導き、蒸発残留核との分離の役割を果たす。偏向角は 30 度と 45 度ある GARIS と比較して浅いが、ポールギャップを 150 mm と大きくとることで通過効率をかせいでいる。ポールギャップが 150 mm と大きいにもかかわらず、最大磁場が 1.74 T だせるような磁極設計となっている。ポールの出口角を 30 度とすることで、若干の垂直収束作用を与える。D1 は H 型構造の双極子電磁石であるが、ビームダンプ部分に創意工夫ができるような真空ポートを備えている。電磁石 Q2 と Q3 の垂直および水平方向収束作用により、焦点面へと広がったイオンの像はフォーカスされる。ボア径 150 mm と大口徑

な仕様で、通過効率を上げる役割を果たしている。偏向角7度の電磁石D2は、軽い荷電粒子などを除去する役割を果たす。

GARIS-IIを構成する全ての電磁石は、これらの基本設計に基づいて(株)住友重機械工業によって製作をしていただいた。電磁石設置時に、NMRプローブで校正したホールプローブを用いて、コイルに流す電流(I)を変えながら磁場(B)の強度分布を測定した。各電磁石の励磁曲線をFig. 5に示す。双極子電磁石においては磁極中心での値、四重極電磁石においてはボア径での値を与える。実線はOEPR3D/TOSCAを用いて求めた設計値であり、全ての電磁石において測定値は設計値をよく再現していることがわかる。漏れ磁場の影響も5.2%以内の精度で再現していることを確認した。

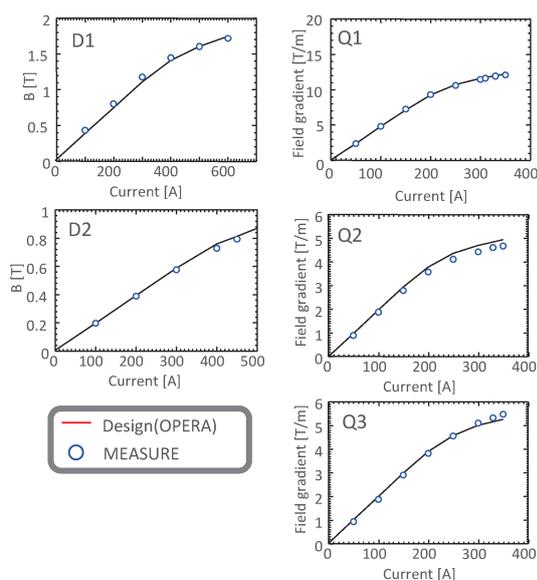


Fig. 5  $I(\text{Current})-B(\text{magnetic field})$  curves for all magnets [26]. The solid line indicates the design values calculated by the code OPERA-3D/TOSCA, and the circles indicate the measured values.

### 3. GARIS-II 周辺装置の開発

#### 3.1 回転標的システム

GARISで用いられている回転標的システム[32]と同様に、GARIS-IIにおいてもガス冷却式回転標的システムを採用した(Fig. 6)。GARIS-

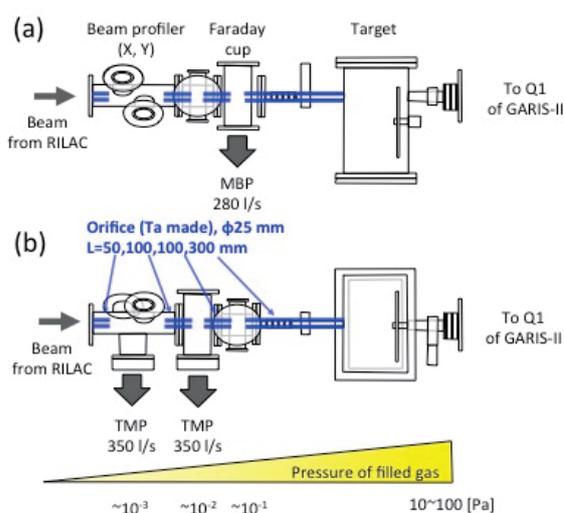


Fig. 6 Gas-cooled rotating target system for GARIS-II. (a) Top view, (b) side view.

IIの焦点面付近(最下流)から導入された充填ガスはGARIS-IIチェンバー内を満たし、標的チェンバーへと拡散していく。GARIS-II下流側では、双極子磁石の出口直後に設置された $0.5\ \mu\text{m}$ のマイラー薄膜により高真空度での動作が要求される飛行時間検出器側へガスが漏れないように対応している。その充填ガスが、大強度重イオンビーム照射で温度上昇した標的材との熱対流(熱交換)により冷却効果として作用する。差動排気システムは標的チェンバー上流に設置され、内径25 mmのオリフィスで接続された仕切りのある排気ダクト(4箇所)から構成される。各排気部は、下流から1台のメカニカルブースターポンプ(280 l/s)と2台のターボ分子ポンプ(350 l/s)で排気される。これにより、GARIS-II側から加速器ビームライン側へ、段階的に真空度の改善を行うことができる。通常、GARIS-IIチェンバー内は10-100 Pa程度で使用するが、 $10^{-3}$  Pa以下の真空度で加速器側と接続が可能になる。

GARIS-II用の標的ホイールには、直径300 mmの大型ホイールと直径100 mmと小型ホイールの二種類が利用できる。それは、GARISで用いている標的ホイールと同じ仕様である。前者は標的材が豊富に取りあつかえる場合に、後者はアクチノイドの一つである $^{248}\text{Cm}$ 標的のように取扱量に制限のある場合に使い分けて使用する。ビーム調整に必要なビーム形状診断装置、ファラデーカッ

プ、およびスポット診断用のアルミナ蛍光板の全てが標的より上流に設置されているため、円盤の取りはずし作業なしで効率的なビームの調整ができる仕様になっている。小型ホイールは、標的チェンバー内に設置可能なアルミ製ハウジングケース内取り付けられ、真空モータを用いて回転制御する。小型チェンバーには冷却水配管が設置されており、輻射や熱伝導による効果的な標的冷却をするための仕組みがある。標的チェンバーの上流・下流にはゲート弁（ベローズ付）が設置されており、標的チェンバーを密閉した状態で取りはずして移動交換できるような仕様となっている。

標的ホイールも二層構造のホイールを新規に開発し、標的識別 (Target-ID) システムを導入した [33]。円盤の上流下流各々に、標的セクターをサンドイッチ構造で取り付けられる構造である。標的を上流下流に分割することで、標的内でのエネルギー減衰を半減させ、表面積が二倍になることで輻射や熱対流の効果の増加が期待される。また、標的識別タグ (ID-tag) の導入により、焦点面検出器で観測した事象がどの標的から来たモノなのかどうかを判別することが可能。ID-tag の応用は幅広く、破れた標的保護用に照射防止のマスキング、複数の標的をセットした複合実験、加速器からのビームエネルギー変更なしで励起関数を測定する等、実験の質を向上させることが可能である。

### 3.2 焦点面検出器

GARIS-II の焦点面検出器は、1 台の飛行時間検出器 (TOF : Time-Of-Flight) と Si-Ge 検出器アレイから構成される (Fig. 7)。

TOF 検出器の基本設計は、GARIS で使用されている検出器をスケールアップしたものである。検出器を通過する荷電粒子に対応して信号が出力され、蒸発残留核の (粗い) 質量測定とビームオン時の崩壊事象を区別するのに用いる。入射粒子が入射窓 (金と CsI が蒸着されたマイラーフィルム) を通過すると、二次電子が叩き出される。電極として作用する金と加速グリッド間の正電場により、叩き出された二次電子は加速しながら効率よく引き出される。加速グリッドを通過した二次電子は、電場のない三角形の領域をまっすぐに

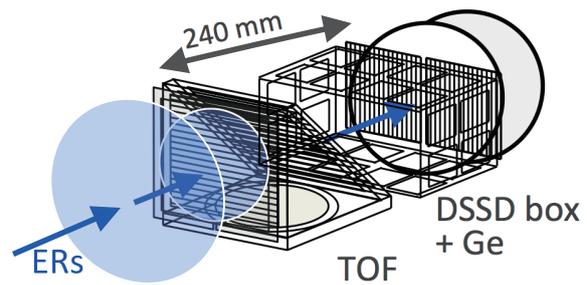


Fig. 7 Focal plane detector of GARIS-II.

進んだ後、45 度に傾いた負の電場領域に入射する。斥力的な電場によって電子は突き抜ける前に進行方向を変えて 90 度曲げられ、下方に設置された直径 120 mm のマイクロチャンネルプレート (MCP, PHOTONIS 120-D-40:1-NR) に向かっていき、信号を生じる。一方、電子を叩き出した入射荷電粒子は、加速間隙を通過して DSSD へと向かう。検出器の大型化にともない、入射窓外縁部における検出効率と時間分解能の低下がみられたが、側面に補正電場をかけることで、問題を解決した。

Si-Ge 検出器アレイは、箱状に配置された Si 検出器ボックス (Si-box) とその 6 mm 背後に設置した大容量プレーナー型 Ge 検出器 (CANBERRA BE6530) から構成される。Si-box は、焦点面に設置された 2 台の両面ストリップシリコン検出器 (DSSD : Double-side Strip Silicon Detector, Micron W1-1000, 有感領域 = 50 mm × 50 mm, 表 16 strip × 裏 16 strip) とそれを箱状に取り囲むシリコンフォトダイオード (HAMAMATSU PIN-diode S3584, 有感領域 = 28 mm × 28 mm, 合計 24 枚 = 6 × 4) の検出器アレイからなる。

## 4. 超重元素分析システム GARIS-II の性能評価

### 4.1 標準 $\alpha$ 線源による立体角測定

$^{241}\text{Am}$  標準線源を用いて、GARIS-II のイオン光学特性を評価した [26]。約 21 kBq の  $^{241}\text{Am}$  標準線源を標的位置に設置し、充填ガスなしの条件で GARIS-II の Q1-D1-Q2-Q3-D2 励磁バランスを調整しながら焦点面に設置した 1 台の両面ストリップシリコン検出器 (Micron DSSD, W1-1000) を用いてイメージを観測した。焦点面における  $\alpha$  線の二次元プロットを Fig. 8 に示す。立体角 18.2 msr

が実測され、イオン光学特性から予測される値 18.5 msr を再現していることを確認した。結果、GARIS-II が設計仕様を満たす大立体角を有することが示された。

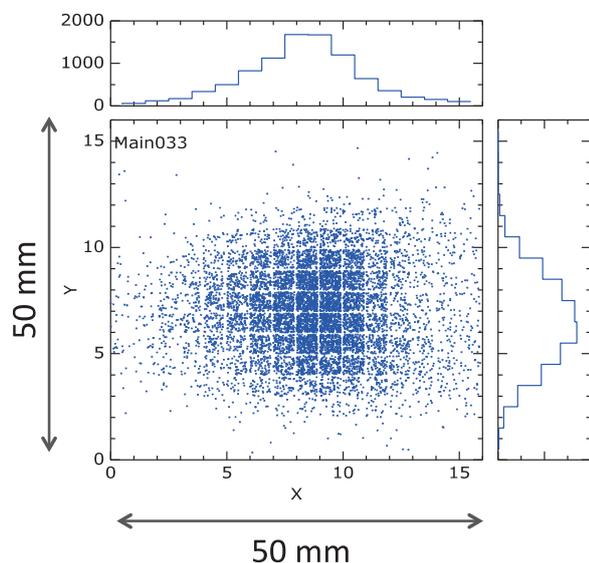


Fig. 8 X-Y scattered plot of  $\alpha$ -particles from the  $^{241}\text{Am}$  source measured at the focal plane of GARIS-II [26].

#### 4.2 GARIS-II のオンライン初動試験

$^{40}\text{Ar}$  イオンによる  $^{208}\text{Pb}$  標的の 0 度反跳核 ( $v/v_0 = 1.95, 3.36$ ) を用いて、GARIS-II の励磁バランスの調整を行った [34]。ここで、 $v$  は反跳速度、 $v_0$  はボーア速度を表す。ガス圧の増加とともにイメージサイズが鋭くなる様子（電荷交換反応）や広がる様子（充填ガスとの多重散乱）を確認し、気体充填型反跳イオン分離装置としての基本動作の確認ができた。

$^{40}\text{Ar}$  イオンを用いて、 $^{169}\text{Tm}$  ( $^{40}\text{Ar}, 4n$ ) による核反応生成物の初捕集を試みた [35]。主要な実験条件を以下に与える。

Target	: 250 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ $^{169}\text{Tm}_2\text{O}_3$ on 3 $\mu\text{m}$ Ti
Projectile	: 197 MeV $^{40}\text{Ar}^{11+}$
Filled gas	: 70 Pa 100% He
Magnetic rigidity	: 1.64 Tm

Fig.9 は、TOF 検出器と両面ストリップシリコン検出器で測定した飛行時間と運動エネルギーの

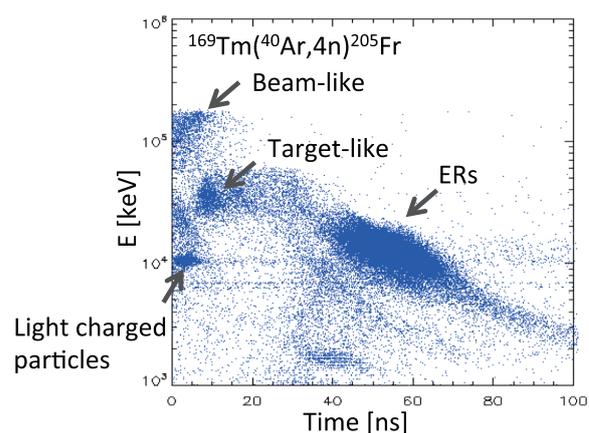


Fig.9 Two-dimensional of energy measured by DSSD vs. TOF measured using timing counter [35].

二次元分布である。蒸発残留核 (ER)、ビームおよび標的起源の荷電粒子、軽粒子といった各々の荷電粒子の識別ができていことがわかる。

$^{205}\text{Fr}$  (6.916 MeV) およびその娘核  $^{201}\text{At}$  (6.344 MeV) 起源のピークを観測し、その時の収集効率は 47% と得られた。

引きつづいて、 $^{208}\text{Pb}$  ( $^{40}\text{Ar}, 3n$ ) による超ウラン元素の初捕集を試みた [35]。主要な実験条件を以下に与える。

Target	: 280 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ $^{208}\text{Pb}$ on 60 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ C
Projectile	: 197 MeV $^{40}\text{Ar}^{11+}$
Filled gas	: 70 Pa 100% He
Magnetic rigidity	: 2.01 Tm

Fig. 10-(a) はシングルス、(c) は beam off gate 付きのスペクトル、(a) と (b) には同様な実験を GARIS で行った時のデータも比較のために示した。全トリガー数は、GARIS と比較して 1/5 低い状況であった。そのため、GARIS-II で行った実験では Fig. 10-(a) のシングルスで  $^{245}\text{Fm}$  に起因する  $\alpha$  ピークを観測することができた。ビームオフ時のスペクトルには、核子移行反応で生成する副反応生成物起源のピークが観測されているが、後に述べる He- $\text{H}_2$  混合ガスを使用すれば、さらに良い性能が期待できる。一方、収集効率は 63% と GARIS と比較して約 1.7 倍大きな値を得た。GARIS-II の大立体角の効果が現れている。

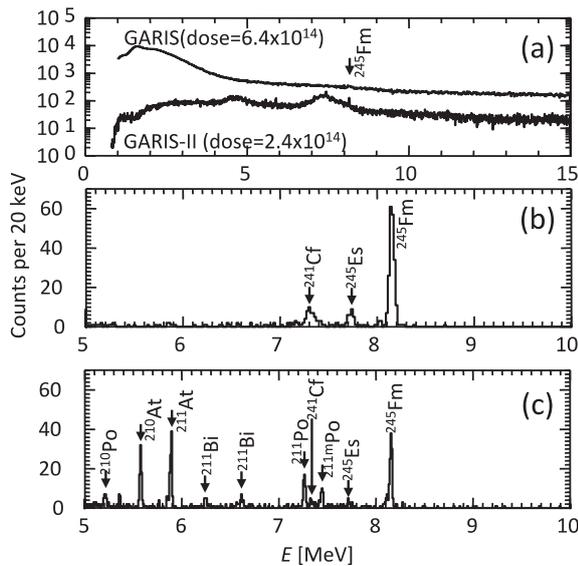


Fig.10 Energy spectra measured in the  $^{245}\text{Fm}$  experiment conducted using GARIS and GARIS-II [35]. (a) Beam-on condition for both separators, (b) beam-off for GARIS, (c) beam-off for GARIS-II.

### 4.3 バックグラウンド抑制のための工夫

GARIS-II では、設計当初から非対称系反応に対するバックグラウンド低減対策として  $\text{He-H}_2$  混合ガスの使用を検討してきた。純ヘリウムガスに微量の水素ガスを混合することで、充填ガス中を運動する反跳イオンの平均平衡電を変化させ、入射粒子やその他の計測妨害荷電粒子からの分離をよくする働きがある事が知られている。例えば、ロシア Dubna の JINR に設置されている気体充填型反跳分離装置 DGFRS では、100% 水素を充填ガスとしてオペレーションがなされている。希薄な純水素中を運動する重イオンの平均平衡電荷に関して、以下の経験式を得ている [36]。

$$\bar{q} = 3.26 \times \left(\frac{v}{v_0}\right) - 1.39 \quad (1)$$

我々は GARIS を用いて、希薄な純ヘリウム中を運動する重イオンの平均平衡電荷に関して、以下の経験式が成立することを見いだした [25]。

$$\bar{q} = 0.625 \times \left(\frac{v}{v_0}\right) \times Z^{1/3} : 9.1 \leq \left(\frac{v}{v_0}\right) \times Z^{1/3} \leq 19.1, Z \geq 82 \quad (2)$$

$$\bar{q} = 0.242 \times \left(\frac{v}{v_0}\right) \times Z^{1/3} + 2.19 : 4.6 \leq \left(\frac{v}{v_0}\right) \times Z^{1/3} \leq 6.0, Z \geq 102 \quad (3)$$

ホットフュージョン反応による反跳イオンの速

度領域では、純水素中を運動する重イオンの平均平衡電荷が純ヘリウムよりも小さな値をとることがわかる。一方で、ビーム、標的物質の標的物質の0度方向散乱粒子、核子移行反応生成物のような反跳速度の早い領域では逆転現象がおこる。このことは、計測上妨害となるビームや標的、(核子移行反応のような) その他の副反応生成物との分離の改善が期待できることを意味する。

一例として、非対称系反応  $^{197}\text{Au}(^{22}\text{Ne}, 5n)^{214}\text{Ac}$  に対して行った  $\text{He-H}_2$  混合ガスを充填ガスとした試験結果を示す。主要な実験条件を以下に示す。

Target : 300  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$   $^{197}\text{Au}$  on 60  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  C

Projectile : 114 MeV  $^{22}\text{Ne}^{6+}$

Filled gas : pure He or  $\text{He-H}_2$  ( $\text{H}_2$  36%)

その際に得られた結果を Fig. 11 に示す。はじめに、充填ガスとして純ヘリウムを用いて焦点面での  $^{214}\text{Ac}$  の強度が最高となる  $B\rho$  値を探した後、充填ガスを変えて同様の測定を行った。強度分布のピーク位置は 11% 高い方へシフトし、 $^{214}\text{Ac}$  の強度自体も 20% 上昇した。前者は充填ガス中を運動する反跳イオンの平均平衡電荷が小さくなった事に由来し、後者は  $\text{He-H}_2$  混合ガスとの

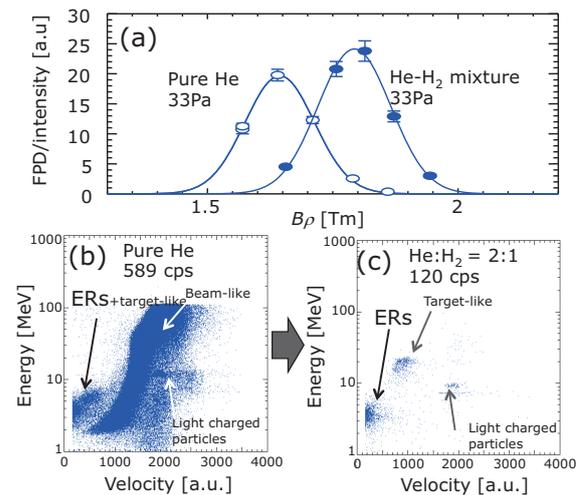


Fig.11 (a) Intensity distribution of  $^{214}\text{Ac}$  at FPD, (b, c) Two-dimensional views of energy measured by Si detector vs. recoil velocity measured using the timing counter.

多重散乱の影響が小さくなっていることを意味する。強度分布の最確値でのバックグラウンド計数率は 589 cps (pure He) から 120 cps (He-H<sub>2</sub> 混合ガス) へと激減し、He-H<sub>2</sub> 混合ガスの有用性を実験的に検証することができた。

### 4.3 収集効率曲線

加速器から供給される入射イオンとして、<sup>22</sup>Ne, <sup>24</sup>Mg, <sup>40</sup>Ar, <sup>48</sup>Ca ビームを用いて生成する核反応生成物を捕集し、既知の生成反応断面積と比較することで Fig. 12 のような収集効率曲線を得た。比較のために、GARIS における収集効率曲線も与えてある。反跳速度の減少とともに充填ガスとの多重散乱の影響で効率が下がっているのがわかる。GARIS と比較すると、どの速度領域においても約 1.7 倍効率が高い事が確認できた。<sup>208</sup>Pb (<sup>48</sup>Ca, 3n) <sup>254</sup>No 系において 72% の値が得られており、今後、展開していいくであろう <sup>248</sup>Cm を標的とした重イオン (<sup>48</sup>Ca, <sup>50</sup>Ti, <sup>51</sup>V, <sup>54</sup>Cr, <sup>58</sup>Fe 等 ...) 誘起反応による超重元素探索においても、同程度以上の収集効率が期待される。

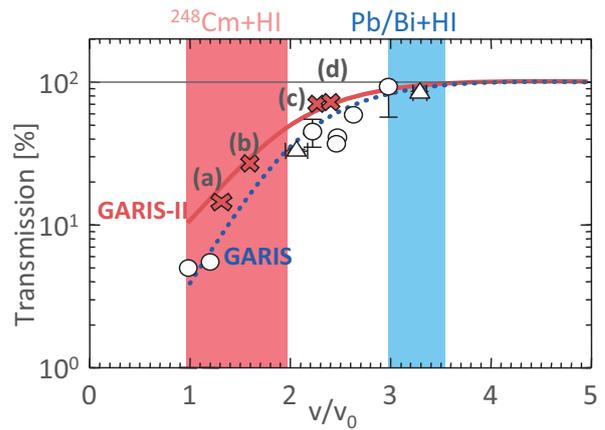


Fig.12 Transmission curve. Velocity regions of interest for the reactions of both cold fusion and hot fusion are given by the blue and red stripes, respectively. ○, △ : GARIS, × : GARIS-II. Solid and dashed curves are estimated considering multiple scattering with the filled gas for GARIS and GARIS-II, respectively.

### 5. おわりに

今回、新しく開発した GARIS-II は Fig. 13 に示すように、新しい超重核の探索、超重核の核分光

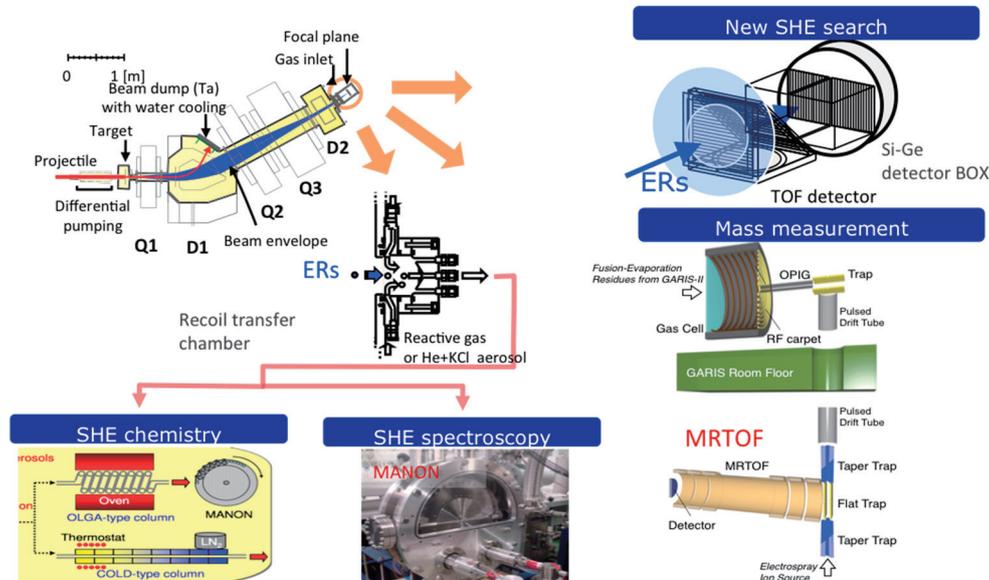


Fig. 13 Application using a gas-filled recoil ion separator GARIS-II. These applications directly connect with criteria that must be satisfied for the discovery of a new chemical element to be recognized.

研究、精密質量測定、超重元素化学に適用されていく。これらは、いずれも新元素認定基準の際、最も重要となる **assignment properties** に関わるものである。超重元素の幅広い研究を展開できる世界最先端の環境は整備されつつある。これらの装置を駆使し、新元素サイエンスのフロンティアを開拓するような研究が展開されることを切に願う。

### 謝辞

本稿で紹介した GARIS-II の基礎開発実験は、理研仁科加速器センターと東京大学原子核科学研究センターによって共同運営される理研 RIBF において行われたものです。GARIS-II の製作は文部科学省化学研究費補助金 19002005 (特別推進研究)、GARIS-II 用の標的開発は 15K05116 (基盤研究 C) の助成によって行われました。

GARIS-II の設計・製作は、園田 (佐藤) 望氏 (東北大)、米田晃氏 (理研)、森田浩介氏 (理研) とともに行いました。電磁石の製作にあたり、(株)住友重機械工業、(株)中村機材の皆様にご協力いただきました。設計製作・RILAC への設置に対し、理研の矢野安重氏、加瀬昌之氏、藤縄雅氏、久保敏幸氏、奥野広樹氏、福西暢尚氏、池沢英二氏、上菘義朋氏、坂本久雄氏らによる適切なアドバイスをいただきました。標的開発・磁場測定・ガス導入系・焦点面検出器・データ収集系といった基盤開発には、羽場宏光氏 (理研)、大関和孝氏 (理研)、住田貴之 (東京理科大)、後藤真一氏 (新潟大)、田中謙伍氏 (東京理科大)、門叶冬樹氏 (山形大)、武山美麗氏 (山形大)、眞山圭太氏 (山形大)、馬場秀忠氏 (理研)、山木さやか氏 (埼玉大) らの協力をいただきました。この場をかりて、あらためて感謝申し上げます。

### 引用文献

- [1] K. Morita, A. Yoshida, T.T. Inamura, M. Koizumi, T. Nomura, M. Fujioka, T. Shinozuka, H. Miyatake, K. Sueki, H. Kudo, Y. Nagai, T. Toriyama, K. Yoshimura, and Y. Hatsukawa, *Nucl. Instr. and Meth.*, **B70**, 220 (1992).
- [2] D. Kaji, Doctoral dissertation, Niigata University (2003).
- [3] K. Morita, K. Morimoto, D. Kaji, H. Haba, E. Ideguchi, R. Kanungo, K. Katori, H. Koura, H. Kudo, T. Ohnishi, A. Ozawa, T. Suda, K. Sueki, I. Tanihata, H. Xu, A. V. Yeremin, A. Yoneda, A. Yoshida, Y.-L. Zhao, and T. Zheng, *Eur. Phys. J. A***48**, 62 (2004).
- [4] K. Morita, K. Morimoto, D. Kaji, H. Haba, E. Ideguchi, J. C. Peter, R. Kanungo, K. Katori, H. Koura, H. Kudo, T. Ohnishi, A. Ozawa, T. Suda, K. Sueki, I. Tanihata, H. Xu, A.V. Yeremin, A. Yoneda, A. Yoshida, Y.-L. Zhao, T. Zheng, S. Goto, and F. Tokanai, *J. Phys. Soc. Jpn. Vol.***73**, 1738 (2004).
- [5] K. Morita, K. Morimoto, D. Kaji, T. Akiyama, S. Goto, H. Haba, E. Ideguchi, K. Katori, H. Koura, H. Kudo, T. Ohnishi, A. Ozawa, T. Suda, K. Sueki, T. Yamaguchi, A. Yoneda, and A. Yoshida, *J. Phys. Soc. Jpn. Vol.***76**, 043201 (2007).
- [6] K. Morita, K. Morimoto, D. Kaji, T. Akiyama, S. Goto, H. Haba, E. Ideguchi, R. Kanungo, K. Katori, H. Koura, H. Kudo, T. Ohnishi, A. Ozawa, T. Suda, K. Sueki, H. Xu, T. Yamaguchi, A. Yoneda, A. Yoshida, and Y.-L. Zhao, *J. Phys. Soc. Jpn. Vol.***73**, 2593 (2004).
- [7] K. Morita, K. Morimoto, D. Kaji, T. Akiyama, S. Goto, H. Haba, E. Ideguchi, K. Katori, H. Koura, H. Kikunaga, H. Kudo, T. Ohnishi, A. Ozawa, N. Sato, T. Suda, K. Sueki, T. Yamaguchi, A. Yoneda, and A. Yoshida, *J. Phys. Soc. Jpn. Vol.***76**, 045001 (2007).
- [8] K. Morita, K. Morimoto, D. Kaji, H. Haba, K. Ozeki, Y. Kudou, T. Sumita, Y. Wakabayashi, A. Yoneda, K. Tanaka, S. Yamaki, R. Sakai, T. Akiyama, S. Goto, H. Hasebe, M. Huang, T. Huang, E. Ideguchi, Y. Kasamatsu, K. Katori, Y. Kariya, H. Kikunaga, H. Koura, H. Kudo, A. Mashiko, K. Mayama, S. Mitsuoka, T. Moriya, M. Murakami, H. Murayama, S. Namai, A. Ozawa, N. Sato, K. Sueki, M. Takeyama, F. Tokanai, T. Yamaguchi, and A. Yoshida, *J. Phys. Soc. Jpn. Vol.***81**, 103201 (2012).

- [9] P. J. Karol, R. C. Barber, B. M. Sherrill, E. Vardaci, T. Yamazaki, *Pure Appl. Chem.* **88**, 139 (2016).
- [10] K. Morita, K. Morimoto, D. Kaji, H. Haba, K. Ozeki, Y. Kudou, N. Sato, T. Sumita, A. Yoneda, T. Ichikawa, Y. Fujimori, S. Goto, E. Ideguchi, Y. Kasamatsu, K. Katori, Y. Komori, H. Koura, H. Kudo, K. Ooe, A. Ozawa, F. Tokanai, K. Tsukada, T. Yamaguchi, and A. Yoshida, *J. Phys. Soc. Jpn.* Vol. **78**, 064201 (2009).
- [11] 森本幸司、放射化学 第 33 号, 10 (2016).
- [12] 工藤久昭、放射化学 第 33 号, 17 (2016).
- [13] National Nuclear Data Center, <http://www.nndc.bnl.gov/>
- [14] 永目諭一郎、ぶんせき No.5, 234 (2009).
- [15] 工藤久昭、ぶんせき No.12, 678 (2009).
- [16] U.W.Kirbach, C.M.Folden III, T.N.Ginter, K.E.Gregorich, D.M.Lee, V.Ninov, J.P.Omtvedt, J.B.Patin, N.K.Seward, D.A.Strellis, R.Sudowe, A.Turler, P.A.Wilk, P.M.Zielinski, D.C.Hoffman, and H.Nitsche, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **484**, 587 (2002).
- [17] J. P. Omtvedt, J. Alstad, H. Breivik, J. E. Dyve, K. Eberhardt, C. M. Folden III, T. Ginter, K. E. Gregorich, E. A. Hult, M. Johansson, U. W. Kirbach, D. M. Lee, M. Mendel, A. Nähler, V. Ninov, L. A. Omtvedt, J. B. Patin, G. Skarnemark, L. Stavsetra, R. Sudowe, N. Wiehl, B. Wierczinski, P. A. Wilk, P. M. Zielinski, J. V. Kratz, N. Trautmann, H. Nitsche, and D. C. Hoffman, *J. Nucl. Radiochem. Sci.* **3**, 121 (2002).
- [18] International Cooperation on the TASCA Recoil Separator for Transactinide Chemistry and Physics, <https://www-win.gsi.de/tasca/Default.htm>
- [19] H. Haba, H. Kikunaga, D. Kaji, T. Akiyama, K. Morimoto, K. Morita, T. Nanri, K. Ooe, N. Sato, A. Shinohara, D. Suzuki, T. Takabe, I. Yamazaki, A. Yokoyama, and A. Yoneda, *J. Nucl. and Radiochem. Sci.*, Vol. **9**, 27 (2008).
- [20] H. Haba, D. Kaji, Y. Komori, Y. Kudou, K. Morimoto, K. Morita, K. Ooe, K. Ozeki, N. Sato, A. Shinohara, and A. Yoneda, *Chem. Lett.* **38**, 426 (2009).
- [21] H. Haba, D. Kaji, H. Kikunaga, Y. Kudou, K. Morimoto, K. Morita, K. Ozeki, T. Sumita, A. Yoneda, Y. Kasamatsu, Y. Komori, K. Ooe, and A. Shinohara, *Phys. Rev. C* **83**, 034602 (2011).
- [22] H. Haba, M. Huang, D. Kaji, J. Kanaya, Y. Kudou, K. Morimoto, K. Morita, M. Murakami, K. Ozeki, R. Sakai, T. Sumita, Y. Wakabayashi, A. Yoneda, Y. Kasamatsu, Y. Kikutani, Y. Komori, K. Nakamura, A. Shinohara, H. Kikunaga, H. Kudo, K. Nishio, A. Toyoshima, and K. Tsukada, *Phys. Rev. C* **89**, 024618 (2014).
- [23] H. Haba, D. Kaji, Y. Kudou, K. Morimoto, K. Morita, K. Ozeki, R. Sakai, T. Sumita, A. Yoneda, Y. Kasamatsu, Y. Komori, A. Shinohara, H. Kikunaga, H. Kudo, K. Nishio, K. Ooe, N. Sato, and K. Tsukada, *Phys. Rev. C* **85**, 024611 (2012).
- [24] 羽場宏光、放射化学 第 30 号, 7 (2014).
- [25] D. Kaji, K. Morita, K. Morimoto, H. Haba, and H. Kudo, *Proc. Radiochim. Acta* **1**, 105 (2011).
- [26] D. Kaji, K. Morimoto, N. Sato, A. Yoneda, K. Morita, *Nucl. Instr. and Meth. B* **317**, 311 (2013).
- [27] T. Nakagawa, J. Ärje, Y. Miyazawa, M. Hemmi, T. Chiba, N. Inabe, M. Kase, T. Kageyama, O. Kamigaito, A. Goto, M.G. Niimura, Y. Yano, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **396**, 9 (1997).
- [28] O. Kamigaito, A. Goto, Y. Miyazawa, T. Chiba, M. Hemmi, M. Kase, S. Kohara, Y. Batygin, E. Ikezawa, T. Nakagawa and Y. Yano, *Rev. Sci. Instrum.* **70**, 4523 (1999).
- [29] O. Kamigaito, M. Kase, N. Sakamoto, Y. Miyazawa, E. Ikezawa, N. Fukunishi, S. Kohara, M. Fujimaki, M. Hemmi, T. Chiba, Y. Chiba, H. Ryuto, A. Goto and Y. Yano, *Rev.*

- Sci. Instrum. **76**, 013306 (2005).
- [30] K. L. Brown et al.: SLAC Report 91 Rev. 1, 1974.
- [31] <http://http://www.cobham.com/about-cobham/aerospace-and-security/about-us/antenna-systems/aurora/products/opera-3d.aspx>
- [32] D. Kaji, K. Morimoto, K. Morita, H. Hasebe, A. Yoshida, H. Haba, A. Yoneda, S. Goto, and H. Kudo, Nucl. Instr. and Meth. **A590**, 198 (2007).
- [33] D. Kaji and K. Morimoto, Nucl. Instr. and Meth. **A792**, p.11 (2015).
- [34] D. Kaji, K. Morimoto, H. Haba, Y. Kudou, K. Ozeki, T. Sumita, A. Yoneda, N. Sato, Y. Wakabayashi, M. Murakami, F. Tokanai, S. Namai, and K. Morita, RIKEN Accel. Prog. Rep. **44**, 226 (2011).
- [35] D. Kaji, K. Morimoto, H. Haba, Y. Wakabayashi, Y. Kudou, M. Huang, S. Goto, M. Murakami, N. Goto, T. Koyama, N. Tamura, S. Tsuto, T. Sumita, K. Tanaka, M. Takeyama, S. Yamaki, and K. Morita, JPS Conf. Proc. **1**, 013051 (2014).
- [36] Yu. Ts. Oganessian : J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **34**, s357 (1991).

**Abstract:**

We designed a new gas-filled recoil ion separator GARIS-II, which consists of five magnets arranged in a Q1-D1-Q2-Q3-D2 configuration. The construction of GARIS-II started in 2008, and the spectrometer was installed in the RIKEN linear accelerator facility in 2009. This separator has been developed for carrying out studies on actinide-based fusion reactions. It will be used as a powerful tool for nuclear decay spectroscopy of superheavy element (SHE) nuclides and SHE chemistry, and precise mass measurement of SHE nuclides. The new separator was calibrated using the standard  $\alpha$ -source and evaporation residues produced via various nuclear reactions. The performance of GARIS-II well matched the design value, and are higher than that of GARIS.

# 解 説

## 広島原爆炸裂の初期プロセスについての考察 —リトルボーイノートより—

今中哲二\*

京都大学原子炉実験所

大阪府泉南郡熊取町朝代西2丁目

### はじめに

広島原爆の炸裂直後に、いわゆる“黒い雨”が広島市内外で広汎に降ったことはよく知られている。しかし、黒い雨に含まれていた放射能量やそれにもなう被曝量となると、よく分からない部分が多い。太田川デルタ地域の旧市内については、理化学研グループなどによる原爆直後の測定データがあり、ある程度の評価は可能であるが、原爆キノコ雲が流されて大雨が観察されている北西方向の山間部については評価に使える測定データがなかった。私たちのグループは、黒い雨地域での被爆者対策の拡充を検討していた広島市当局の協力を得て、2008年頃からセシウム137、ウラン235、ウラン236といった核種の測定により広島原爆の痕跡をつかもうとしたがうまく行かなかった[1]。一方、気象研の青山道夫さん（現福島大）から、原爆当時の気象データを基に黒い雨の気象シミュレーションをやってみようという提案が出てきて、HiSOF(Hiroshima Study Group on Re-construction of Local Fallout from A-bomb in 1945)が立ち上がり、筆者は、原爆炸裂プロセスのモデル化と放射能量計算を担当することになった[2]。文献を調べたり、簡単な計算を行ったりした作業結果を「リトルボーイノート」という内部資料にまとめておいた。HiSOFの活動は、気象データ再現の問題により頓挫中で、筆者の作業も2011年3月の福島原発事故で中断したままである。このたび、放射化学の編集部より原稿依頼があった機会に、2010年末までにまとめてあった「リトルボーイノートその8」までを、ほぼそのままの“読み物”として紹介させて頂く。

### ☆ノートその1：構造

広島・長崎原爆の構造・組成は、今でも非公開であるが、さまざまな“想定図”が出回っている。その中で、もっとも詳しく“確かそうな”リトルボーイがFig 1-1である[3]。

Hがターゲット側ウラン（円柱ディスク外径10.16cm、25.62kg）で、Tが射出側ウラン（円筒リング外径15.9cm、38.53kg）である。Xが火薬で、Tは、V（炭化タングステンでできたプラグ）、W（バックスチール）と一体で“発射”されてターゲットウランと合体する。E、I（外径33.0cm）、Vが炭化タングステン（比重15.6）のタンパーで、頭部全体は外径71.1cmの円柱形スチールに埋め込みになっている。

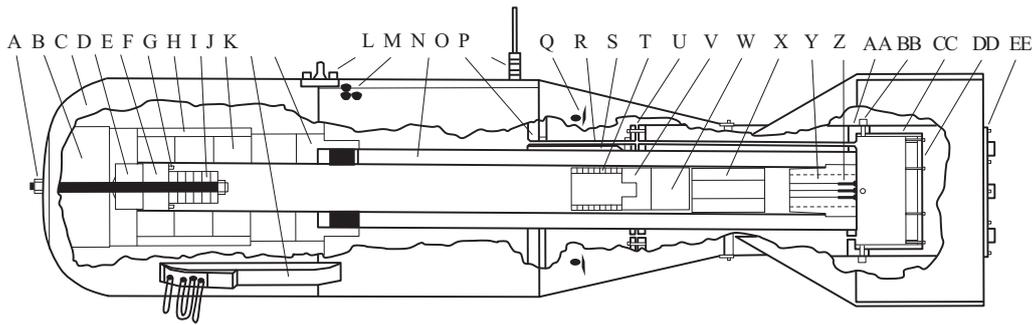
装荷ウラン量は64.15kgになるが、その濃縮度は、オークリッジの電磁分離器（Calutron）の性能が安定せず、均一ではなかった。本メモでは、文献3を参考に、濃縮度89%が50kg、50%が14kgで『平均80%』としておく。

### ☆ノートその2：臨界量と臨界終了時のふくれ具合

リトルボーイ（以下LB）に装荷されていたウラン量は64.15kgであったとする。その体積は3.43リットル（密度18.7g/cm<sup>3</sup>）となり、球にすると半径は9.36cmでバレーボール程度である。（長崎ファットマンの場合は、プルトニウム6.2kg半径4.2cmで、テニスボールよりちょっと大きい。）

ここで見積もりたいのは、ウラン球が膨れ反応度が低下して超臨界から臨界ちょうどに戻ったときのウランの大きさ（膨脹の程度）である。（こ

\* Corresponding author, e-mail: imanaka@rri.kyoto-u.ac.jp



- A. Front nose elastic locknut attached to 1.0" diameter cadmium-plated draw bolt
  - B. 15.125" diameter forged steel nose nut
  - C. 28.0" diameter forged steel target case
  - D. Impact absorbing anvil with shim
  - E. WC tamper insert base
  - F. Polonium-Beryllium initiators (4)
  - G. 15" diameter K-46 steel WC tamper liner sleeve
  - H. 4.0" diameter U-235 target insert discs (6)
  - I. 13" diameter 3-piece WC tamper linear assembly
  - J. Yagi antenna assembly
  - K. Target-case to gun-tube adapter
  - L. Lift lug
  - M. Safing/arming plugs (3)
  - N. 6.5" bore gun tube
  - O. 28" diameter bulkhead plate
  - P. Electrical plugs (3)
  - Q. Baro ports (8)
  - R. 0.75" diameter armored tube containing primer wiring (3)
  - S. 1.0" diameter rear alignment rod (3)
  - T. 6.25" diameter U-235 projectile rings (9)
  - U. Tail tube forward plate
  - V. Projectile WC filler plug
  - W. Projectile steel back
  - X. 2-pound WM slotted-tube Cordite powder bags (4)
  - Y. Gun breech with removable inner breech plug and stationary outer bushing
  - Z. Mark 15 Mod 1 electric gun primers (3)
  - AA. Trail tube aft plate
  - BB. 2.25" long 5/8-18 socket-head tail tube bolts (4)
  - CC. 15" diameter armored inner tail tube
  - DD. Inner armor plate bolted to 15" diameter armored tube
  - EE. Rear plate (w/smoke puff tubes) bolted to 17" diameter tail tube
- Numbers in () indicate quantity of identical components.

Fig. 1-1. Cross-section drawing of Little Boy [3].

の時の核分裂がもっとも盛んなはずなのでその大きさの形状モデルで、いずれ MCNP モンテカルロコードを使って中性子スペクトルを計算してみようという魂胆もある。)

まずは、40年以上前に使った、Glasstone と Edlund による炉物理の教科書 [4] (以下、G&E 本) をひっぱり出してきて、『一群エネルギー・球形近似』の解析的手法でウラン臨界量を計算してみた。裸の場合の臨界量や、タングステンや炭化タングステン反射体付きの場合の臨界量を計算して、文献値・実験値と比較してみると案外とうまく行った。その計算手法を応用して、LB 臨界

終了時の半径を求めると 10.8cm という値が得られた。

### 2-1. 裸のウラン球の臨界量

真空中に置かれている、裸の球形ウラン塊の臨界量を考える。中性子エネルギーは核分裂生成エネルギー 1 群 (約 2MeV) とする。G&E 本の (5-35-1) 式にならって、中性子の挙動を 1 群の拡散方程式で表すと

$$D\Delta\phi(r) + (\eta - 1)\Sigma_a\phi(r) = \frac{\partial n(r)}{\partial t} \quad (2-1)$$

ここで、D: 中性子束に対する拡散定数 [LT<sup>-1</sup>]、 $\phi$ : 中性子束 [L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>]、 $\Sigma_a$ : マクロ吸収断面積 [L<sup>-1</sup>]、 $\eta$ :

吸収中性子当りの中性子発生数、 $\eta$ ：中性子密度  
[L<sup>-3</sup>].

(2-1) 式左辺の第1項は『中性子束の“沸きだし”』  
で、第2項は『中性子の発生』である。

定常状態（つまり臨界ちょうど）では、右辺の時  
間変化はゼロなので

$$D\Delta\phi + (\eta - 1)\Sigma_a\phi = 0 \quad (2-2)$$

となる。ここで、

$$B^2 = \frac{(\eta - 1)\Sigma_a}{D} \quad (2-3)$$

とおくと、

$$\Delta\phi(r) + B^2\phi(r) = 0 \quad (2-4)$$

が得られる。(2-4) 式の解を球座標系で求めると  
(G&E 本 p179)、

$$\phi(r) = A \frac{\sin Br}{r} \quad (A \text{ は定数}) \quad (2-5)$$

さらに、境界条件、『ウラン球表面での  $\phi(r)$   
値は、その勾配で  $0.71 \times \lambda_t$  の距離ほど外挿した  
ら  $\phi(r) = 0$  となる』という輸送理論の知見 (G&E  
本 p167) を用いる。 $\lambda_t (=3D)$  は中性子輸送の平  
均自由行程で、

$$R_L = R_C + 0.71 \cdot \lambda_t \quad (2-6)$$

$$\text{として} \quad \phi(R_L) = A \frac{\sin BR_L}{R_L} = 0 \quad (2-7)$$

が得られる。(2-7) 式が成立するためには、 $BR_L$   
 $= a\pi$  ( $a$  は任意の整数) となり、 $B^2 = \left(\frac{a\pi}{R_L}\right)^2$  が (2-4)

式の固有値となる。そして  $a=1$  として、

$$R_L = \frac{\pi}{B} \quad (2-8)$$

となり、(2-3) と (2-6) を代入・整理すると

$$R_C = \pi \left( \frac{D}{(\eta - 1)\Sigma_a} \right)^{1/2} - 0.71 \cdot \lambda_t \quad (2-9)$$

中性子の輸送理論近似より、

$$D = \frac{1}{3\Sigma_t(1 - 4\Sigma_a/5\Sigma_t)} \quad (2-10)$$

なので、ウランに対する必要な特性値が分かれば、  
(2-9) 式より臨界半径  $R_C$  を計算することができる。

Table 2-1 に U-235、U-238 の主な特性値 [5]、  
Table 2-2 に裸の場合の臨界半径と重量の計算値  
を示す。Table 2-2 の右端は文献値 [6] で、計算  
値とまずまず一致している。LB の濃縮度 80% の  
臨界量は約 70kg なので、反射体がなければ LB

Table 2-1 Cross sections of U-235, U-238 and Pu-239 for neutrons of fission energy spectrum, barn [5]  
and  $\nu$  value [6].

	$\sigma_t$	$\sigma_s$	$\sigma_a$	$\sigma_f$	$\sigma_{cap}$	$\nu$
<sup>235</sup> U	7.71	6.36	1.34	1.238	1.34	2.6055
<sup>238</sup> U	7.79	7.39	0.391	0.3085	0.391	2.601
<sup>239</sup> Pu	7.71	5.85	1.86	1.801	0.053	3.01

Table 2-2 Critical radius and critical mass for enriched uranium of 100, 93.7 and 80 % and Pu-239.

	Density g cm <sup>-3</sup>	$\Sigma_t$ cm <sup>-1</sup>	$\Sigma_a$ cm <sup>-1</sup>	$\Sigma_f$ cm <sup>-1</sup>	$\eta$	$\lambda_t$ cm	Cal by Imanaka		Literature
							$R_c$ , cm	$M_c$ , kg	$M_c$ , kg
<sup>235</sup> U 100%	18.7	0.364	0.063	0.059	2.41	3.19	8.58	49.4	49
<sup>235</sup> U 93.7%	18.7	0.365	0.061	0.056	2.38	3.16	8.89	55.0	52.25
<sup>235</sup> U 80 %	18.7	0.365	0.054	0.050	2.34	3.11	9.65	70.4	68
<sup>239</sup> Pu	19.8	0.385	0.093	0.090	2.92	3.22	5.43	13.3	10.5

のウランは臨界に至らない。

## 2-2. 反射体がある場合の臨界量

半径  $R_{cm}$  の中心ウランのまわりに厚さ  $T_{cm}$  の反射体がある場合の臨界量を考える。

中心部の中性子束に対しては、(2-4) 式と同様に (G&E 本 p200)、

$$\Delta\phi_c(r) + B_c^2\phi(r) = 0, \quad \Delta\phi_r(r) - k_r^2\phi(r) = 0 \quad (2-11)$$

添字の  $c$  と  $r$  は、中心部 (core) と反射体 (reflector) を示し、

$$B_c^2 = \frac{(\eta-1)\Sigma_{ac}}{D_c}, \quad k_r^2 = \frac{\Sigma_{ar}}{D_{cr}} \text{ である。}$$

$$(2-11) \text{ 式を解くと、} \phi_c(r) = A \frac{\sin B_c r}{r},$$

$$\phi_r(r) = A' \frac{\sinh k_r (R+T-r)}{r} \quad (2-12)$$

が得られる。(2-12) 式に対し、中心部と反射体の『境界面での中性子束の連続』、『反射体表面から外挿距離での  $\phi r = 0$ 』という境界条件を与えると、 $R$  と  $T$  の関係式が得られる。

$$\cot B_c R = \frac{1}{B R} \left( 1 - \frac{D_r}{D_c} \right) - \frac{D_r}{D_c B_c L_r} \coth \frac{T}{L_r} \quad (2-13) \quad (\text{ただし } L_r = 1/k_r)$$

(2-13) 式を使って、 $T$  (反射体厚さ) が与えられたときの臨界量 ( $R$ ) を計算できる。93.5%濃縮のウラン球に  $W$  (タングステン) や  $WC$  (炭化タングステン) の反射体をつけたときの臨界量文献値 [6] があったので、対応する計算をして比較してみた。Table 2-3 から、反射体付きの場合でも、うまく計算できていると考えてよい。

最後に、濃縮度 80% で超臨界のリトルボーイ球形コアが膨れながら『臨界ちょうど』になったときの半径を、 $WC$  反射体 12cm の反射体付きで計算してみると、10.8cm となった。元の半径は 9.34cm なので、『わずかに約 1.5cm ふくれたところで臨界終了』ということになる。

ついでに、コア半径 9.34cm、 $WC$  反射体 12cm という形状で臨界となるウランの  $\eta$  値を決めると 1.72 となった。つまりこの形状では、系から外部へ漏洩しない中性子の割合は  $1/1.72 = 0.58$  である。濃縮度 80% のウランの  $\eta$  値は 2.34 なので、『リトルボーイの実効増倍係数は  $2.34 \times 0.58 = 1.36$  であった』と見積もることができる。

## ☆ノートその3：核分裂の時間スケール

「ノートその2」では、リトルボーイは『臨界終了までに 1.5cm ほどしか膨れなかった』、また、核分裂がはじまったときの『実効増倍係数  $K_{eff}$  は 1.36 であった』と見積もった。このメモでは、核分裂の時間スケールと中心部温度についてまとめておきたい。

### 3-1. 核分裂の時間スケール

‘実効増倍係数’は原子炉理論で用いられる概念で、『ある世代』で生まれた中性子の数が原子炉内での吸収分裂の結果、『次の世代』で何倍になっているかを表している。つまり、実効増倍係数は、『世代増倍係数』であるが、ここではまず、それを『時間増倍係数』に変換する。

『世代の長さ』は、(中性子速度)  $\div$  (中性子吸収の平均自由行程) と考えてよい。2MeV の中性子の速度は  $2 \times 10^9$  cm/sec で、80%濃縮ウランの吸収平均自由行程 ( $1/\Sigma_a$ ) は 18.4cm なので、世代時間  $\tau = 9.2 \times 10^{-9}$  sec (約 10 nsec) となる。t=0

Table 2-3 Critical radius and critical mass for 93.7 % enriched uranium with W/WC reflector

Reflector thickness	W reflector			WC reflector		
	Cal by Imanaka		Literature	Cal by Imanaka		Literature
	$R_c$ cm	$M_c$ kg	$M_c$ kg	$R_c$ cm	$M_c$ kg	$M_c$ kg
2.54 cm	7.42	32.0	31.2	7.24	29.7	—
5.08 cm	6.78	24.4	24.1	6.52	21.7	21.3
10.16 cm	6.36	20.1	19.4	6.00	16.9	16.5

で1個の核分裂が起きたとすると、1世代時間後には中性子束は  $K_{eff}$  倍となり、核分裂数も  $K_{eff}$  倍となる。つまり、時間  $t$  での（毎秒当り）核分裂速度  $f(t)$  は、

$$f(t) = k_{eff}^{t/\tau_f} = e^{\alpha t}, \quad \alpha = \frac{\ln k_{eff}}{\tau} \quad (3-1)$$

LBの場合、 $\alpha = 33.3 \mu\text{sec}^{-1}$  となる。この  $\alpha$  値は、原爆としてはかなり小さい（遅い）値のようで、ガンタイプ原爆の不効率を示しているようだ。時間  $t$  での積算の核分裂数  $F(t)$  は、(3-1) 式を積分して、

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = \frac{1}{\alpha} (e^{\alpha t} - 1) \approx \frac{1}{\alpha} e^{\alpha t} \quad (3-2)$$

核分裂当りの放出エネルギーは  $200\text{MeV}$  であるが、コア部分に蓄積するエネルギーは2個の核分裂片の運動エネルギー  $170\text{MeV}$  とし、( $\alpha$  値一定として) 核分裂開始後の放出エネルギー量を計算してプロットしてみた (Fig. 3-1)。Fig 3-1 (a) の放出エネルギーは対数表示（ひと目盛り  $10^5$ ）で、Fig 3-1 (b) はリニア表示。1 kton 当りの核分裂数を  $1.45 \times 10^{23}$  個 [7] とすると、16kton で  $2.32 \times 10^{24}$  個となる。1 MeV =  $1.6 \times 10^{-12}$  Joule として、LB コアの内部エネルギーは  $6.31 \times 10^{13}$  Joule となる。Fig.3-1 の Melting point (1405 K) と Evaporation point (4018 K) は、64kg のウラ

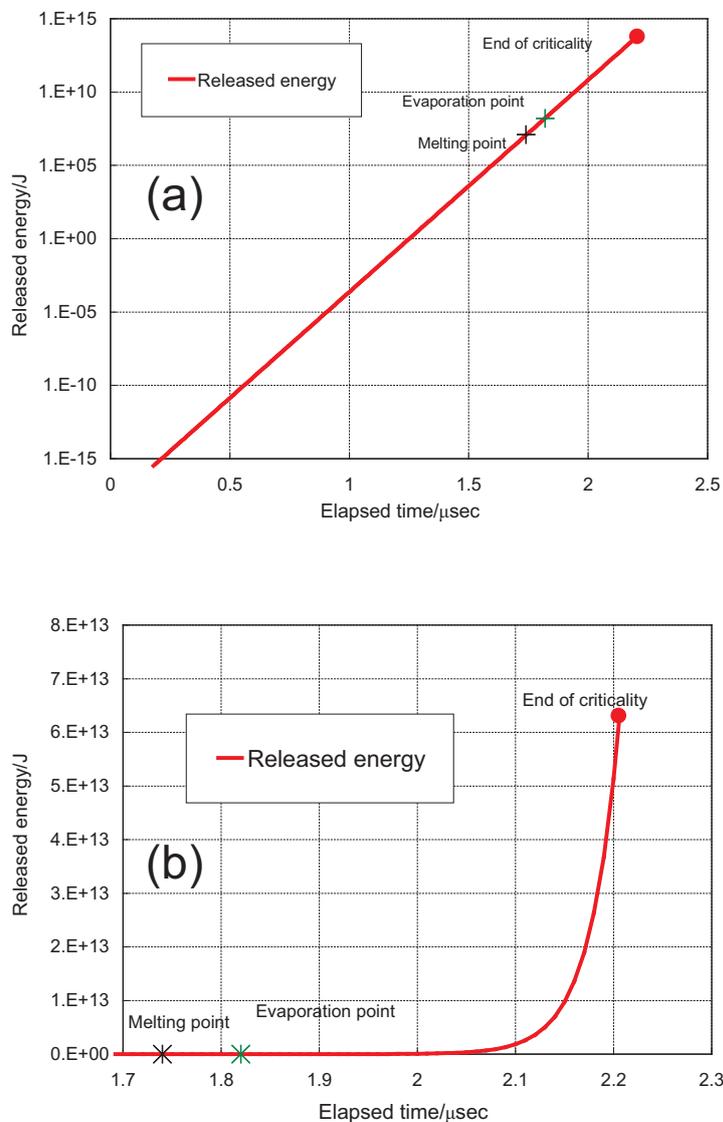


Fig. 3-1. Total energy release after criticality: (a) log-scale and (b) linear-scale.

ンの比熱、融解熱、気化熱を使って計算した。

今中の計算が合っていれば、LBの fission プロセスの継続時間は2  $\mu\text{sec}$  余りということになり、『100万分の1秒以下』というこれまでの定説と違っている。

コアの膨張にともなって  $\alpha$  値も小さくなるので、Fig. 3-1の最終端は傾きが小さくなるはずである。また、反応度が臨界以下となっても直ちに核分裂がなくなるわけではない。実際のところはダラダラと減少するであろう。爆発の総出力は、最終段階での『コアの膨張』との関係で決まってくるが、ここでは臨界以下になると核分裂もゼロになるとして計算してある。

おおざっぱながら、最終段階の0.1  $\mu\text{sec}$  で1.5cm膨張したとすると、その『膨張速度は150km/sec』となる。といっても、最終段階での核分裂増加を考えると、この値は『最小値』とみておいた方がよいだろう。

#### ☆ノートその4：コア温度

1回の核分裂で放出されるエネルギーは約200MeVである。U-235核分裂による放出エネルギーの内訳は以下のようにになっている（英文Wikipedia [8]）。

- 核分裂片の運動エネルギー 169 MeV
- 放出中性子の運動エネルギー 4.8 MeV
- 即発ガンマ線（平均1 MeV程度）7 MeV
- FPからの  $\beta$  線エネルギー 6.5 MeV
- FPからのガンマ線 6.3 MeV
- $\beta$  崩壊にともなうニュートリノ 8.8 MeV

#### 4-1. コアの温度上昇

U-235の核分裂により質量数142と92の分裂片ができて170MeVのエネルギーが付与されたとすると、それぞれのエネルギーは約70MeVと約100MeVで、その速度は $1 \times 10^9$ と $1.5 \times 10^9 \text{cm/sec}$ となる。ウラン中での核分裂片の飛程はたぶん10  $\mu\text{cm}$ 程度なので、FPが直接コア外部へ飛び出ることはない。FPのエネルギーは（ほとんど外に出ずに）周囲のウランに与えられてコアは超高温・超高压のプラズマ状態に至るであろう。（プラズマの物理には不案内だが）エネルギーがコア内に留まったとして温度と圧力を見積もってみた。

核分裂片のエネルギーは、『FP原子核と自由電子の運動エネルギー』と『黒体輻射の photon エネルギー』としてコア内に蓄積される、と仮定しておく。コア温度Tのときの運動エネルギー  $U_{kinetic}$  は、

$$U_{kinetic} = \frac{3}{2} NkT \quad (4-1)$$

ここで、N：運動している粒子の総数

k：ボルツマン定数 ( $1.38 \times 10^{-16} \text{erg/deg}$ ) である。Nには、プラズマ中の電子も勘定に入れる。ウラン原子のイオン化状態については、+80～+85という話が出ていた [6] ので、とりあえず80としておく。

photon エネルギー  $U_{photon}$  は、黒体輻射の式を用いて、

$$U_{photon} = \frac{4\sigma V}{c} T^4 \quad (4-2)$$

ここで、 $\sigma$ ：Stephan-Boltzmann 定数 ( $5.669 \times 10^{-5} \text{erg/sec/cm}^2/\text{K}^4$ )

c：光速 ( $3 \times 10^{10} \text{cm/sec}$ )

V：コア体積（ここでは半径10.76cmの球、 $5216 \text{cm}^3$ ）

考える順序が逆のような気もするが、コア温度  $T^\circ \text{K}$  と蓄積エネルギーの関係をプロットしたものが Fig.4-1 である。時間と蓄積エネルギーの関係を示した「ノートその3」の図と Fig.4-1 を使って、Fig.4-2 にはコア温度の時間変化を示した。2000万度を越えるあたりから Photon エネルギーが有意になって、4000万度ではほぼ同じ、最終段

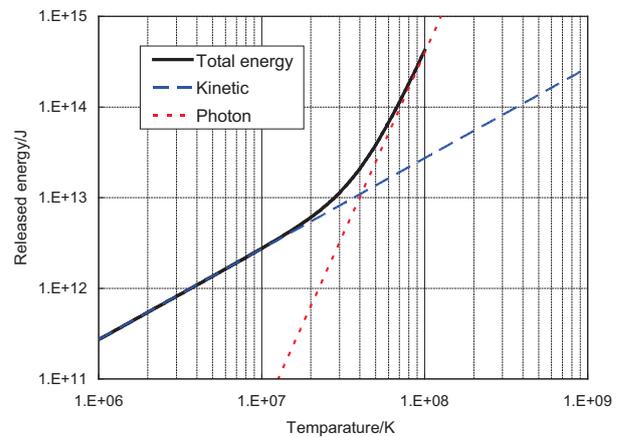


Fig. 4-1. Relation between core temperature and internal energy.

階では約 6000 万度であるが、その時の蓄積エネルギーの 75%が Photon である。

Fig.4-3 に、温度 T 度 K での黒体輻射 photon のエネルギースペクトルを示す。6000 万度でのピークは 16keV であるが、このエネルギーの photon のウラン中での半価層は 0.05cm 程度なので、黒体輻 photon のほとんどがコア内で吸収される。

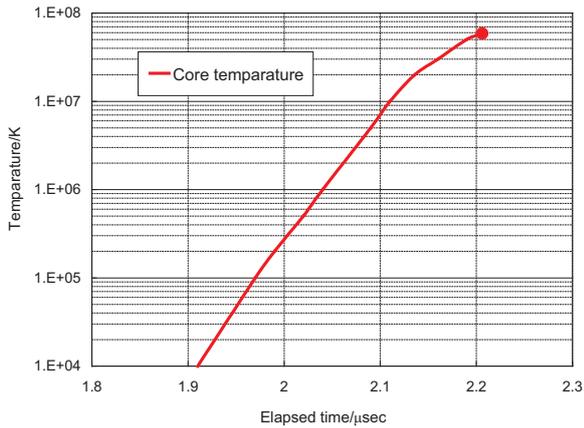


Fig. 4-2. Core temperature increase after criticality.

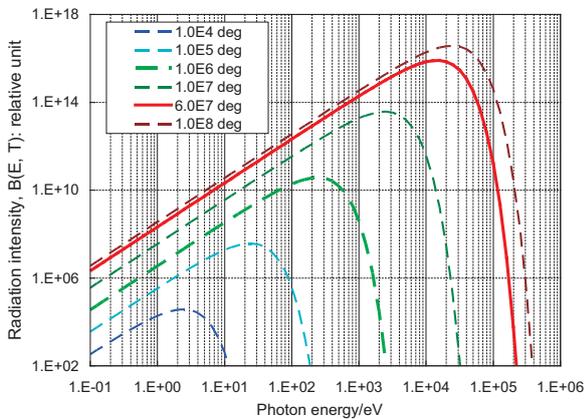


Fig. 4-3. Photon energy spectrum of black body radiation.

☆ノートその 5：コアの圧力と膨張速度

5-1. コア中心圧力

高温プラズマで急速膨張する原爆コアのことを考えながら、そもそも『圧力とはいったいなんぞや』と、教科書などを眺めて首をひねってみた。その結果とりあえず、『圧力』とは、コア空間内で『微小面を垂直に通過する運動量束』ということで納得した。そうすると、コアでの [運動量密度] × [速度] × 1/3 が圧力となる。最後の 1/3 は、

x y z 次元の 3 である。(4-1)、(4-2)式を参考に、

$$P_{kinetic} = \frac{N}{V} mv \times v \times \frac{1}{3} = \frac{2}{3} nE_{kinetic} = nkT \quad (5-1)$$

$$P_{photon} = \left( \frac{4\sigma V}{c} T^4 \right) \frac{1}{cV} \times c \times \frac{1}{3} = \frac{4\sigma}{3} T^4 \quad (5-2)$$

$$P_{total} = P_{kinetic} + P_{photon} \quad (5-3)$$

が得られるので、計算してプロットしてみた (Fig.5-1)。Fig.5-2 は、Fig.4-2 に示した温度変化に対応する、コア内圧力の時間変化である。

これまで、参考書 [9] などを頼りに、リトルボーイの爆発により『数百万度・数十万気圧』という超高温・超高压のコアができた、などと言ったり書いたりしてきたが、今回の見積もりでは『6000 万度で 500 億気圧のコア』となってしまった。ちょっと違いすぎるので、ネット情報などを

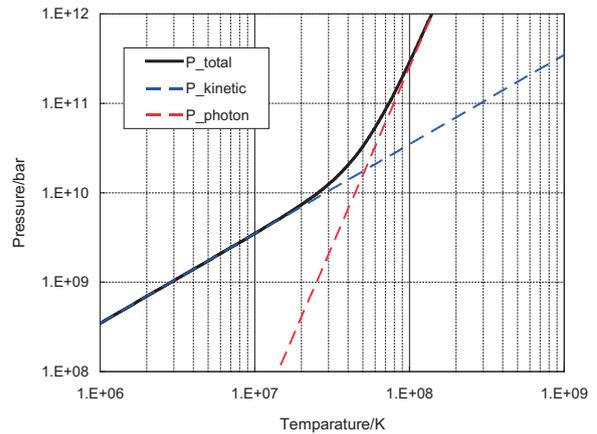


Fig. 5-1. Relation between core temperature and pressure.

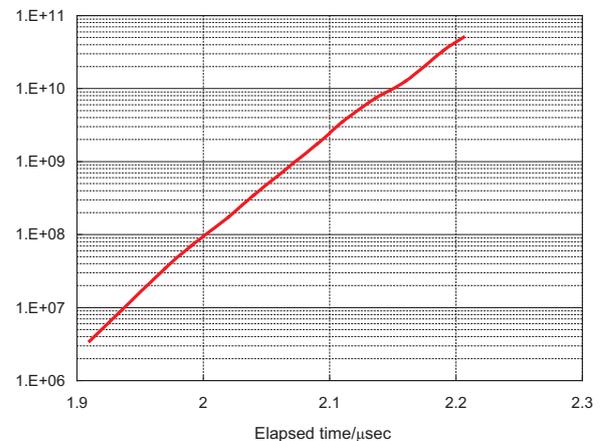


Fig. 5-2. Core pressure increase after criticality.

調べてみると、温度は数千万度でいいようだが、圧力についてははっきりした記述は「一般向けサイト」では見あたらなかった。

原爆炸裂プロセスについて、ただひとつ見つけた学術論文 [10] では、球形 U-235 の爆縮 simulation 計算が報告されている。その結果 ( $\alpha$  値 Max:  $47.3 \mu s^{-1}$ 、Total released energy:  $9.1 \times 10^{13} J$ ) では、最高中心圧力が  $10^{15} Pa$  (約 100 億気圧) を越えているので、本ノートの見積もりも案外と正しいかもしれない。

## 5-2. コアの膨張速度

「ノートその3」で、核分裂の進行時間と臨界終了時半径から、コアの膨張速度は『150km/sec 以上』と見積もった。ここでは、コアの圧力値が得られたのでそこから膨張速度を考えてみる。

コアの周りにタンパーが存在しなければ、photon は光速 ( $3 \times 10^{10} cm/sec$ ) で、コア物質はその粒子速度 (U-235 で 80 km/sec、5800 万度 K) で飛散するであろう。しかし、タンパーが存在すると全く様相が異なるはずである。力学の基本に基づくなら、

[加速度] = [質量] × [力 = 圧力勾配]

[速度] = [加速度] の時間積分

[移動量] = [速度] の時間積分

であるが、ここで対象とすべき“圧力勾配”や“質量”がよく分からない。

ということで、参考文献 [6] をそのまま“信用”する。

参考文献 [6] の Section-2 “Introduction to Nuclear Weapon Physics and Design”によると Photon radiation が支配的な高温高压での衝撃波 (Marshak Wave) の伝搬速度  $D$  は

$$D = \left( \frac{(\gamma + 1) P_{total}}{2\rho} \right)^{1/2} \quad (5-4)$$

$\gamma$ : 定圧比熱 / 定容比熱、photon に対しては 4/3

$\rho$ : 物質密度、臨界終了時で  $12.3 g/cm^3$

で与えられ、温度の関数としてプロットしたものが Fig.5-3 である。Fig.5-4 の実線 (青) は、Fig.5-3 とコア温度の時間変化を使って、膨張速度の時間変化をプロットしたものである。その曲線を  $2.1 \mu sec$  まで時間積分してみると積算変位量は + 4.5cm となった。この値は、「ノート

その2」で見積もった、臨界終了時の半径増加 + 1.5 cm の3倍となる。そこで、Fig. 5-4 の破線 (赤) は、実線を3分の1にして、臨界終了時の膨張が + 1.5 cm となるように調整 (Adjust) したプロットである。臨界終了時の膨張速度は、(5-4) 式に基づく『680km/sec』で、Adjust 曲線を使うと『240km/sec』となった。

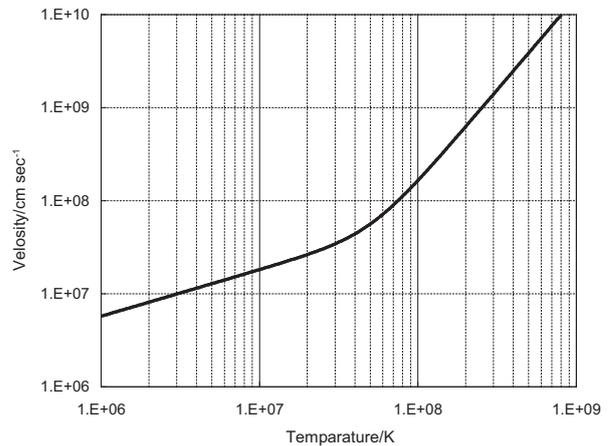


Fig. 5-3. Shock wave velocity as a function of vore temperature.

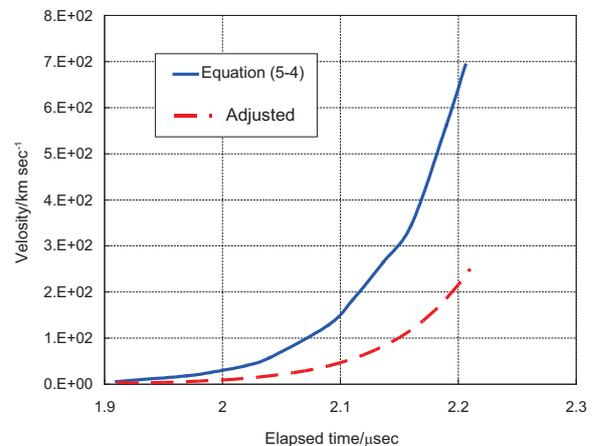


Fig. 5-4. Shock wave velocity after criticality (see text).

## ☆ノートその6: 0.1 ~ 20 秒の火球の高さ、大きさ、温度

原爆炸裂後 0.1 秒から 30 秒くらいにかけての fireball (火球) の挙動について、DS86/DS02 報告書、米国側 WG メンバーとの private communication などの資料から、『ある程度のこと』を言えそうなのでまとめておく。

### 6-1. DS86 報告書のシミュレーション

DS86 [11] の策定プロセスでは、上昇する火球中の Delayed source の位置を決めるため、STLAMB コードを用いて原爆 Hydrodynamics のシミュレーションが行われた。Little Boy の爆発高さ (HOB) は 580 m で、爆発力は 15kton。STLAMB は、爆発高さと爆発力を input として、空気塊の hydrodynamics シミュレーションを行うが、爆弾の材料・構造は考慮しないようだ。DS86 では、爆発から 30 秒後までの 18 個の時間分点 (0.0625 ~ 22.624sec) について火球上昇プロセスのシミュレーション計算が行われている。

Fig. 6-1 は、DS86 報告書に出ている計算結果 (空気の等密度線) である。

① 0.354sec は、火球が膨脹しその内圧が周辺大気圧と平衡に達した (0.35sec) 直後である。火球中心高さは 580m で、中心位置はほとんど動いていない。このとき、火球半径 260m、中心密度は  $2.26 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^3$  となっている (大気密度は  $1.11 \times 10^{-3}$ )。この段階で衝撃波面は、すでに火球膨脹に先行しており火球表面の 120m 前方にある (Fig.6-1 ではわからない)。③ 2.028sec では衝撃波の地表反射の影響が認められ、④ 3.067sec は反射波が火球を通過した後である。2秒後くらい

から、火球は毎秒 50 ~ 60m の速度で上昇し、10 秒後で高さ約 1100m、20 秒後で約 1600m である。⑤、⑥では火球の形状は、球からトーラスに形が変化している。

### 6-2. DS02 の STLAMB シミュレーション

DS02[12] で米国側 WG との共同作業をやっているときに、STLAB シミュレーションの計算結果の一部を提供してもらった。そのデータを使って DS02 での火球中心高度 (Fig.6-2) と火球半径 (Fig. 6-3) をプロットしてみた。

Fig. 6-2 に示されるように、2 秒後以降の火球中心は 61m/sec の速度で上昇している。Fig. 6-3 の最初の立ち上がりは、火球の圧力膨脹で、0.354sec に火球と大気とが圧力平衡に至っている。また『5sec 後に Y 方向速度 6.5m/sec で TORUS した』とされている。

Fig.6-4 は、火球中心での空気密度である。大気密度は、 $1.1 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$  程度なので、はじめの火球中心の密度 ( $2.26 \times 10^{-5}$ ) はかなり小さい。STLAMB の打ち出しには『温度』はないが、Fig.6-4 の密度から『火球中心温度』を推定できそうである。0.35sec で大気と『圧力平衡』となったそうなので、理想気体の状態方程式  $PV=nRT$  を考えると、温度は密度に反比例することになる。

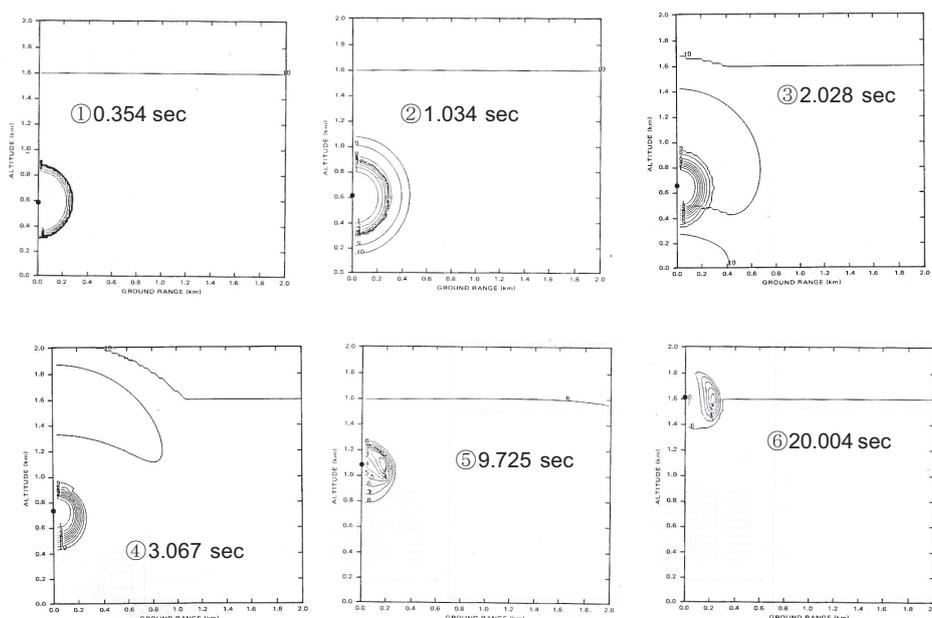


Fig. 6-1. Air density contour after the explosion of Little Boy shown in DS86 report [11].

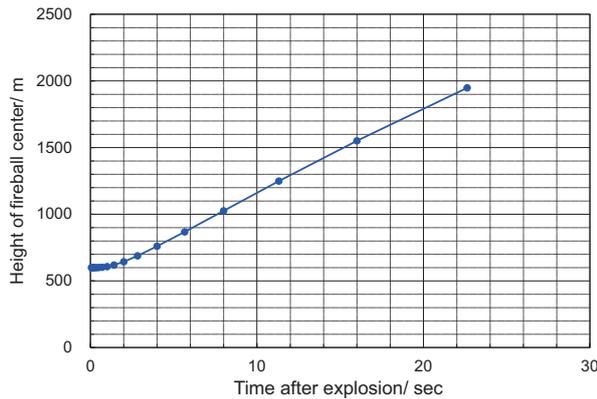


Fig. 6-2. Fireball center height after the explosion of Little Boy by STLAMB simulation.

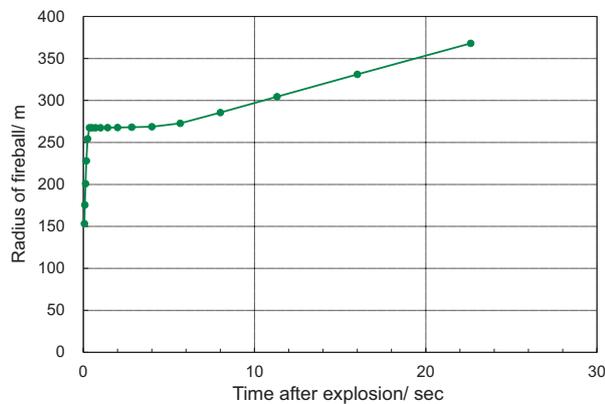


Fig. 6-3. Fireball radius after the explosion of Little Boy by STLAMB simulation.

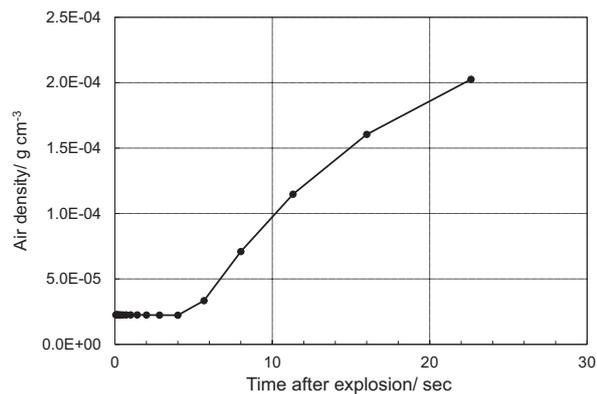


Fig. 6-4. Air density at the fireball center after the explosion of Little Boy by STLAMB simulation.

そこで、大気温度を 300 度 K として、火球中心温度をプロットしてみた (Fig.6-5)。

Fig.6-5 の Krasilov とは、旧ソ連での核実験観測の専門家である。2009 年 9 月の彼との private

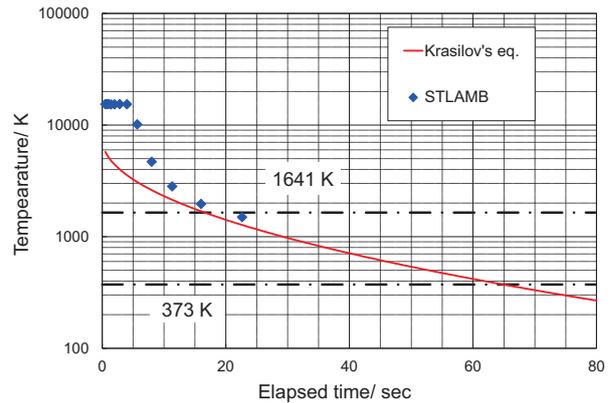


Fig. 6-5. Temperature at the fireball center height after the explosion of Little Boy: STLAMB simulation and equation from Krasilov. 1641 K indicates the melting point of FeO.

communication によると、fireball 温度は

$$T(t) = 7500^{\circ}\text{K} \exp\left(-\frac{1}{3}\sqrt{\frac{20}{q}t}\right)$$

だそうである (出典、適用条件など不明)。Fig.6-5 にある 1641 度 K の水平線は酸化第 1 鉄 (FeO) の融点である。Krasilov と STLAMB を比べると、出だしは違っているが、10 ~ 20 秒にかけてはますます合っている、といったところか。酸化鉄の融点が出てきているのは、揮発性 (volatile) FP と難融性 (refractory) FP の沈着挙動に関係してくるからである。つまり、いったんすべて蒸発していた物質 (ウラン、FP、構造物) が、温度低下とともに凝縮して、まず液体 (droplet) となり、さらに固体となる。酸化鉄より沸点の大きな難融性 FP は、酸化鉄より先に凝縮しており、酸化鉄 droplet の内部に取り込まれるであろう。一方、揮発性 FP は酸化鉄内部にはほとんど取り込まれずに、凝固後の表面に吸着されることになる。この挙動の違いが、refractory と volatile の fractionation 効果として、沈着放射能の組成に影響する。

#### ❖とりあえずのまとめ

- 爆発後約 20 秒での火球の高さは約 2000m で、上昇速度は約 60m/sec.
- そのときの火球の形はトーラス状で半径約 350m (半径の定義は不明)。
- そのときの火球最高温度は約 1500 度 K (火球内で密度分布、温度分布)。

### ❖ちょっとした計算

高さ 2000m において、半径 100m で温度 1500 度の空気塊が 60m/sec で上昇していたとして、そのときの温度低下速度を、黒体放射と断熱膨脹で計算してみた。

#### <黒体輻射>

Stefan-Boltzmann の式から、温度 T の物質表面からの単位面積当りの放射エネルギーは  $I = \sigma T^4$  となる。ここで、 $\sigma = 5.669 \times 10^{-5} \text{ erg/sec/cm}^2/\text{K}^4$ 。したがって、半径 100m の球表面からのエネルギー放射量は、 $8.6 \times 10^9 \text{ cal/sec}$  となる。

一方、空気の密度は STLAMB 計算より、 $2.203 \times 10^4 \text{ g/cm}^3$  なので、100m 球では  $8.5 \times 10^8 \text{ g}$ 。空気の分子量を 28.8 として、 $2.9 \times 10^7 \text{ mole}$  となる。空気の定圧比熱を  $7 \text{ cal/deg/mole}$  とすると、『表面からの放射にともなう温度低下は  $42 \text{ deg/sec}$ 』となった。

#### <断熱膨脹>

理想気体が、 $V_1, P_1, T_1$  の状態から  $V_2, P_2, T_2$  に断熱膨脹したとする。物理化学の教科書より、

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{R C_p / C_v^2}$$

ここで、 $C_p$  ( $7 \text{ cal/deg/mole}$ )、 $C_v$  ( $5 \text{ cal/deg/mole}$ ) は定圧比熱と定容比熱で、 $R$  は気体定数 ( $2 \text{ cal/deg/mole}$ )。

一方、高さ 2000m の気圧は約 800hPa で、10m 当りに 1hPa 低減する。したがって、2000m から 1 秒後に 2060m に達したとすると、 $P_2/P_1 = 794/800$ 。 $T_1 = 1500$  として、これらの値を上式の式に入れると、 $T_2 = 1494 \text{ 度 K}$  となった。つまり、『空気塊の断熱膨脹にともなう温度低下は  $6 \text{ deg/sec}$  となった』。

『ちょっとした計算』が確かかどうかは確信がないが、『高温輻射』については気象屋さんのモデルでは扱わないだろうから、気象屋さんの土俵に入るまではこんな考察も何かの役に立つような気がしている。

### ☆ノート その7：放射能雲の高さ、大きさ

DS02 策定作業を一緒に行った米国側 WG メンバーに、“ノートその6”で紹介した STLAMB シミュレーションについて問い合わせたら、すぐに返事もらった。DS02 報告書 [12] で触れら

れているシミュレーションは 30 秒後までだが、180 秒までの計算を以前にやってあったようで、そのデータの一部を送ってくれた。そのデータを、Nevada の核実験観測データと比較しながら、Little Boy の放射能雲の高さと大きさなどを考えてみた。

#### 7-1. STLAMB 計算結果：雲の高さ

STLAMB の主な input は、Yield = 16 kton と Height of burst = 600 m。Fig.7-1 に、雲の中心高さ (HFB) をプロットした。STLABM-1 は 30sec までの計算で、STLAMB-2 は 180sec まで。

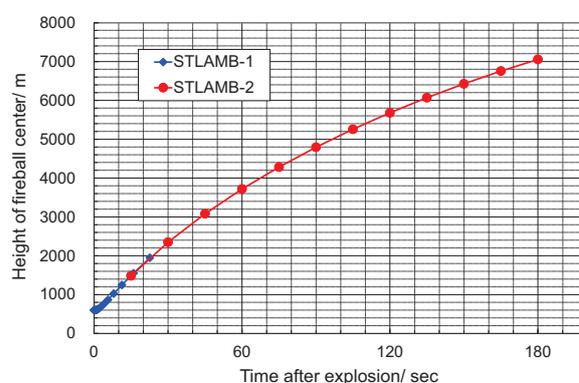


Fig. 7-1. Height of A-bomb cloud center after the explosion of Little Boy by STLAMB simulation.

Nevada で行われたすべての核実験の観察結果をまとめたレポートが WEB に出ていた [13]。その中から、fireball が地表に touchdown していないと思われる“空中爆発”の実験結果 7 件をひっぱり出して、STLAMB 計算と比較したものが Fig.7-2 である。実験の爆発高度は、Little Boy に合わせて HOB=600m として補正してある。Fig.7-2 を眺めると、Little Boy に関する STLAMB 計算は、BJ Charlie (14kt) や BJ Dog (21kt) によく似た経過を示している。(計算は雲の中心で、観察は cloud top だが、その差はとりあえず無視。) Little Boy の雲高さは『4 分後に約 8000 m、12 分後に約 12000 m』と外挿しておいても問題なさそうである。

#### 7-2. STLAMB 計算結果：雲のサイズ

Fig.7-3 は、STLAMB の計算結果から RFB (雲の水平方向半径) と RFBM (B (雲の形を回転楕円体と考えたときの垂直方向半径)) をプロットし

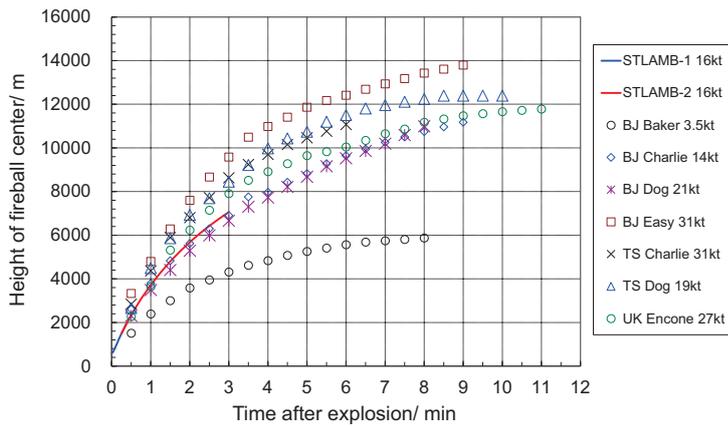


Fig. 7-2. A-bomb cloud rising after the explosion: STLAMB simulation for Little Boy and various observations at the Nevada test site.

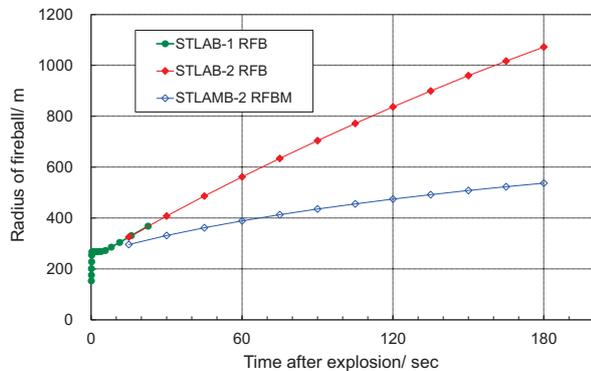


Fig. 7-3. Horizontal radius (RFB) and vertical radius (RFBM) of A-bomb cloud after the explosion of Little Boy by STLAMB simulation.

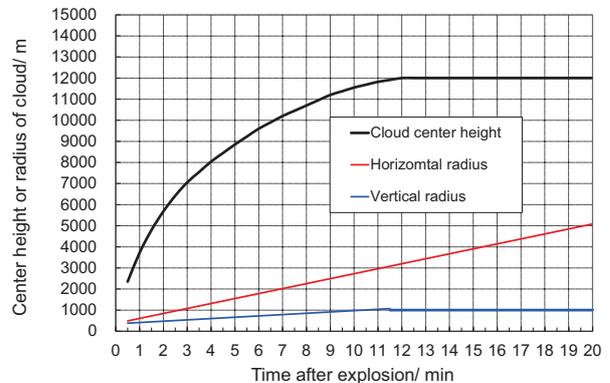


Fig. 7-4. Proposal of height, horizontal radius and vertical radius of A-bomb cloud after the explosion of Little Boy that will be applied for the meteorological simulation of black rain.

たものである。ネバダの核実験観測データ [13] においても、原爆雲は、水平方向には時間とともにほぼ一定の速度で広がり、垂直方向の大きさは雲の上昇が収まるとほぼ一定となっている。

❖ Little Boy simulation のための雲の高さと大きさ  
以上を考慮し、“リトルボーイ黒い雨シミュレーションプロジェクト”での初期条件設定に用いる“原爆雲”の高度と大きさ(回転楕円体または円柱)について、STLAMB 計算と Nevada 観測結果に基づいて Fig. 7-4 を提案しておく。

#### ☆ノート その8：原爆雲の温度

原爆火球の温度・表面温度については、観測データに基づく記述や図 [7,9] を見受けるが、原爆雲 (A-bomb cloud) の温度については、調べた限

りではデータらしきものはほとんどなかった。広島原爆の local fallout である黒い雨は wet deposition である。wet deposition には rain-out (原爆雲そのものが雨を降らす) と wash-out (雨が原爆雲の粒子を洗い落とす) が考えられるが、rain-out の方が重要だろう。Rain-out では原爆雲の温度や湿度が肝心である。STLAMB シミュレーションの計算結果には temperature は入っていないが、density があったので“頭をひねって”温度と関係づけてみた。

#### 8-1. STLAMB 計算結果：密度変化

STLAMB の打ち出しによると、爆発 0.4 秒後に fireball は (周辺大気と) 『圧力平衡』に達している。つまりそれ以降は、原爆雲と周辺大気とは、圧力は同じで密度と温度が異なるという状態と考えて良い。STLAMB による原爆雲の密度変化 (たぶん最高温度部分) とその中心高さでの大気密度 standard air (理科年表標準大気) を比べたものが Fig. 8-1 である。

ちなみに、STLAMB シミュレーションでは、爆弾本体の質量は考慮せず、大気のみを考えているようだ。そこで、爆発 1 秒後の fireball の半径 (267 m) と密度 ( $2.26 \times 10^{-5} \text{g/cm}^3$ ) から、fireball の空気質量を計算すると 1800ton となった。空気

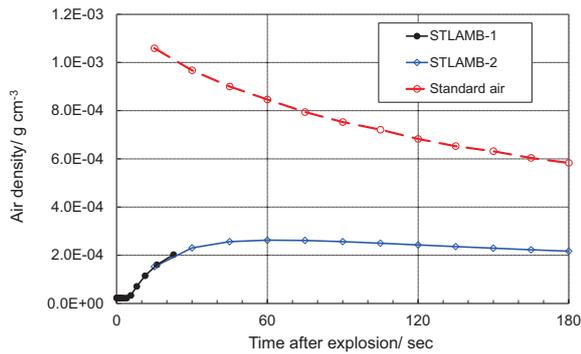


Fig. 8-1. Comparison of air density of the hottest point in the A-bomb cloud with that of the reference atmosphere at the cloud center height.

質量に比べ、ここでは Little Boy の質量 4 ton は無視していただろう。

“ノートその6”でも述べたように、筆者の理解では、理想気体の状態方程式  $PV = nRT$  を考えると、温度は密度に反比例することになり、周辺温度が分かれば原爆雲の最高温度も推定できることになる。

### 8-2. STLAMB 計算結果に基づく温度変化

試しに計算してみた原爆雲の温度変化を Fig. 8-2 に示す（ノートその6の Fig. 6-5 も参照されたし）。1641 度 K は FeO の凝固点、373 度 K は水蒸気の凝集点（気圧で変わるが無視）。一番下の緑の破線は、原爆雲高さでの標準大気温度（理化学年表より）である。

赤の実線は、モスクワの Krasilov さんの式  $T(t) = 7500^{\circ}K \exp\left(-\frac{1}{3}\sqrt{\frac{20}{t}}\right)$  である。赤の点線は、

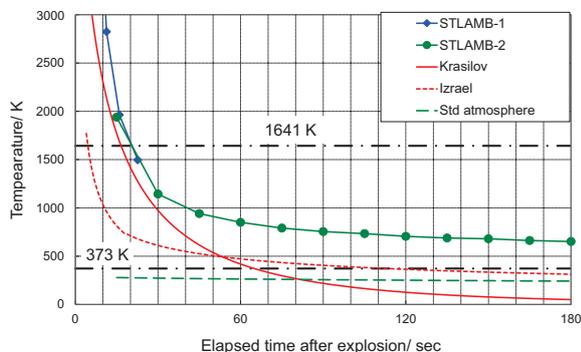


Fig. 8-2. Temperature change of the A-bomb cloud: STLAMB simulation, Krasilov's equation and Izrael's equation, together with standard air.

旧ソ連時代からの核実験 fallout 大家の Izrael 氏の本 [14] の中の式で、20kt の空中爆発に対し、 $T(t) = 4000t^{-0.588}$  ( $t < 40\text{sec}$ ) or  $2183t^{-0.374}$  ( $t > 40\text{sec}$ ) である。

Krasilov の式では、80 秒後に大気温度と等しくなり、それ以降は原爆雲の上昇が止まることになるので、この式は原爆雲というより fireball に適用される式であろう。Izrael の式の由来ははっきりしないが、STLAMB 計算を低温側に平行移動した感じの曲線になっている。STLAMB は原爆雲の最高温度で、Izrael の式は平均的な温度を示している、ということかも知れない。

STLAMB の 120sec から 180sec の間の温度降下は、706 度 K から 652 度 K へと 54 度 K である。一方、その間の気圧変化にともなう断熱膨張による温度変化を、理想気体として計算（ノートその6参照）してみると 72 度 K となった。STLAMB の温度降下が断熱膨張より小さいのは不可解で、理由不明である。Izrael の式で、同じく 120sec から 180sec の間の温度降下を計算すると 51 度 K だった。

### 8-3. 気象シミュレーション初期条件設定のための温度変化

原爆雲の温度については、そもそもの定義も曖昧で（“雲”の内部でかなりの温度分布があるはずで）uncertainty も大きいであろう。それでも、これまでの議論からある程度の推測は可能であると思われる。いささか“力仕事”となるのを承知で原爆雲温度の外挿を試みたのが Fig. 8-3 である。

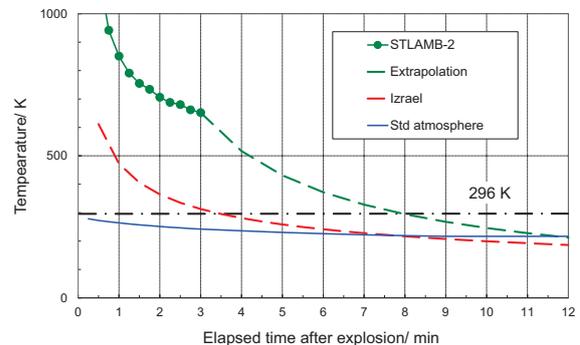


Fig. 8-3. Extrapolation of the A-bomb cloud temperature up to 12 min after the explosion. 296 K indicates dew-point temperature of the air with 70% relative humidity at 300 K. (see text)

緑の破線の Extrapolation は、3min 後の 652 度 K から、『12 分後に 12km の高度で原爆雲の上昇が止まる、つまり原爆温度は周辺温度と同じになる』と考えて、Izrael の式と同じ “ $T(t) = a \cdot t^b$ ” を使って STLAMB-2 を外挿したものである。

296 度 K の水平線は、気温 27 度 C 相対湿度 80% の空気の露点温度。(仮に相対湿度 50% としても露点は 289 度 K で大した違いはない。)

Fig. 8-3 を眺めて、『そんなに間違っていないだろう』という気はしているが、気象シミュレーションに『どれだけ役に立つか』は分からない。大胆な間違いがあるかも知れないが、『こんなデータでこうやったらこうなった』ということで何かの参考になれば幸いである。

### おわりに

2011 年 3 月の福島第 1 原発事故に関連して、『3 月 14 日に起きた 3 号機の爆発は、使用済み燃料プールで起きた核爆発だ』という説が今でも残っているし、講演会などでも質問を受ける。言い出しっぺと思われる米国の専門家 Arnie Gunderson に会う機会があったので、『あんな、キチンと計算したの?』と聞いたら『していない』とのことだった。

いわゆる核爆発とは、“速中性子による即発臨界” である。そのミソは、核分裂エネルギーで核分裂性物質が飛び散る前に如何に多くの核分裂を起こすことができるかにある。軽水炉で使われているような 3 ~ 5% 濃縮燃料では、減速材を用いた熱中性子による臨界は可能であるが、核爆発の要件である速中性子即発臨界は発生しない。筆者のシンプルな一群計算によると、速中性子即発臨界となる最低濃縮度は 35% となった。

1999 年 9 月 30 日に起きた JCO 臨界事故は、熱中性子即発臨界だった。JCO 事故で臨界が発生した沈殿槽が堅牢な圧力容器であったなら、沈殿槽が破壊されるまでエネルギーが蓄積して爆発的な破壊現象に至ったであろう。実際には、放射線分解による気体発生にともなう体積膨張との兼ね合いで、初めに出力振動が起きて、それからほぼ一定の出力で臨界が継続したというのが JCO 臨界事故であった。

本稿では、広島原爆の炸裂プロセスについて、自分がよく知らない分野も含めて大胆なストーリーを展開させてもらった。間違いや問題点など指摘して頂ければ幸いである。

### 引用文献

- (1) 広島“黒い雨”放射能研究会、「広島原爆“黒い雨”にともなう放射性降下物に関する研究の現状」2010.  
<http://www.hisof.jp/01publication/0301BlackRain2010.pdf>
- (2) HiSoF ホームページ <http://www.hisof.jp/index.html>
- (3) Coster-Mullen J “ATOM BOMBS: The top secret inside story of Little Boy and Fat Man” 2008.
- (4) グラストン、エドランド、「原子炉の理論」みすず書房 1955.
- (5) 核データ研究グループホームページ [http://www.ndc.jaea.go.jp/NuC/index\\_J.html](http://www.ndc.jaea.go.jp/NuC/index_J.html)
- (6) Nuclear Weapons Frequently Asked Questions.  
<http://nuclearweaponarchive.org/Nwfaq/Nfaq0.html>
- (7) S. Glasstone, P.J. Dolan “The effects of nuclear weapons”, USDD and ERDA, 1977.
- (8) 英文 Wkipadia <https://en.wikipedia.org/wiki/Uranium-235>
- (9) 原爆災害誌編集委員会「広島・長崎の原爆災害」岩波書店 1979.
- (10) A Pritzker, W Halg, J Applied Math Physics, 32, 1-11 (1981).
- (11) DS86 報告書 <http://www.rerf.jp/library/archives/scids.html>
- (12) DS02 報告書 <http://www.rerf.jp/library/archives/scids.html>
- (13) H. A. Hawthorne ed. Defense Nuclear Agency, DNA 1251-1-EX, 1979.
- (14) Yu. A. Izrael, “Radioactive fallout after nuclear explosions and accidents” Progress-Pogoda, 1996 (in Russian).

## 解 説

### $\alpha$ 放射体 Ra-223 が前立腺がん骨転移治療薬として国内承認

An approval of Ra-223 as an alpha particle-emitting radiopharmaceutical for the treatment of patients with castration-resistant prostate cancer and metastases.

鷲山幸信\*

金沢大学医薬保健研究域保健学系

〒 920-0942 石川県金沢市小立野 5-11-80

Kohshin Washiyama

Faculty of Health Sciences, Institute of Medical, Pharmaceutical and Health Sciences, Kanazawa University

Kodatsuno 5-11-80, Kanazawa-city, Ishikawa, 920-0942 JAPAN

#### 要旨

バイエル薬品(株)が2016年3月28日に「ゾーフィゴ® 静注」(一般名:塩化ラジウム-223,  $^{223}\text{RaCl}_2$ )の製造販売承認を取得した。これにより6月1日から正式に放射性医薬品として $\alpha$ 放射体のRa-223の発売が国内で開始され、各地の病院で患者に対する治療が始まった。Ra-223は周期表上でCaと同族であるため、骨転移巣での活発な骨代謝においてCa同様に骨形成材料として腫瘍近辺に集積する。これまで海外で進められてきた国際共同第III相試験ALSYPCCAの結果および国内での臨床試験の結果から、Ra-223が骨転移のある去勢抵抗性前立腺がん患者に対して有効かつ安全であると評価されている。本稿では、Ra-223が放射性医薬品として承認されるまでの経緯とRa-223が持つ治療効果について解説する。

#### キーワード

アイソトープ治療、 $\alpha$ 放射体、ラジウム-223、転移性骨腫瘍、去勢抵抗性前立腺癌

#### Key words

Radionuclide Therapy, Alpha emitter, radium-223, bone metastasis, CRPC (castration-resistant prostate cancer)

医療に使用されるRIではTc-99mなど診断用のものがよく知られているが、 $\beta^-$ 線を放出するRIも数種類が利用されており、これまでにI-131やSr-89, Y-90などの $\beta$ 放射体がアイソトープ治療として甲状腺がんや骨転移の疼痛緩和、あるいは非ホジキンリンパ腫の治療用に用いられてきた。そして今回、 $\alpha$ 線を放出するRIであるRa-223の国内使用が承認された。正確には、2015年4月24日にバイエル薬品(株)が「ゾーフィゴ® 静注」(一般名:塩化ラジウム-223, 海外名:Xofigo®)

の製造販売承認申請を行ったものに対して、2016年2月26日に開催された厚生労働省薬事・食品衛生審議会医薬品第二部会にてその可否を審議され、その結果として3月28日に製造販売が承認された[1]のである。この承認に基づいて、6月1日からは販売が開始[2]され、同14日より各地の病院で去勢抵抗性前立腺がんの骨転移患者に対する治療が開始された。

前立腺がんに限らず、乳がんや肺がん、甲状腺がん等は、骨に転移しやすいがんとして知られて

\* Corresponding author, e-mail: kwashi@mhs.mp.kanazawa-u, ac.jp

いる [3]。骨はその中に骨髓を含み、骨髓にはがんが成長する際に必要とする様々な栄養因子が豊富に存在する。このため、がん細胞は骨髓中で様々なサイトカインを放出し、骨を作る細胞（骨芽細胞）や壊す細胞（破骨細胞）に働きかけ、微小環境中で骨をランダムに作り且つ壊す活動（骨代謝）を活性化させ、自身が住みやすい環境を作り出している。この異常な骨代謝によって、脊椎や骨盤その他の全身の骨では、がんの成長に伴い激しい痛み（疼痛）を生じ、病的骨折や脊髄の圧迫、高カルシウム血症を併発する。その結果、骨転移が直接の死の原因にはならないまでも、患者のQOL(Quality of Life)を著しく低下させる。したがって骨転移の制御は、治療対象として重要である。

骨転移の一般的な治療法には、外科手術、外部からの放射線治療、化学療法などがある。骨転移部位が1~2ヶ所くらいであれば外科手術や放射線治療は有効であるが、何ヶ所にも転移が認められる場合には、化学療法やビスフォスフォネート製剤、そして放射性医薬品が有効である。放射性医薬品ではSr-89が日本で、さらにSm-153が海外で疼痛緩和剤として利用されてきた [表1]。β線そのものは、線質として十分に細胞傷害性を持つため、がん細胞に照射できれば治療が可能であ

る。しかしβ線の飛程は数mmもあるため、骨表面に集積したSm-153やSr-89から照射されたβ線は腫瘍細胞だけでなく骨髓細胞にも照射される。骨髓は血球や免疫細胞を産生する器官でもあり、治療が可能であってもこれらの骨髓が破壊されては生命活動を維持するのが困難であるため、結果として、線量（投与放射能）を減らして疼痛緩和に留まらざるを得ない。また、これまでに用いられてきた化学療法やビスフォスフォネート製剤も骨関連事象（病的骨折や骨髓圧迫の発現、緩和治療のための放射線治療や腫瘍に関連した外科的手術の再開）を有意に延長することはできたが、延命効果は示したものは皆無であった。

今回のゾーフイゴ® (Ra-223) は骨転移があり且つ多臓器転移のない去勢抵抗性前立腺がんに対して延命効果を示した初の放射性医薬品である。1バイアル (5.6mL) 中に塩化ラジウムとしてRa-223を6.16 MBq含み、その他の添加物には塩化ナトリウム35.3mg、クエン酸ナトリウム水和物46.5mgとpH調製剤が含まれる。本体であるRa-223は物理的半減期が11.43日のα放射体であり、アクチニウム系列核種の一つとして、 $^{223}\text{Ra} \rightarrow ^{219}\text{Rn} \rightarrow ^{215}\text{Po} \rightarrow ^{211}\text{Pb} \rightarrow ^{211}\text{Bi} \rightarrow ^{207}\text{Tl} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$  (安定) と複数壊変を行い、その過程で4本のα線と2本のβ<sup>-</sup>線を放出する [図1]。

表1 前立腺がん関連の骨転移治療に利用される主な放射性医薬品の種類

	サマリウム -153 ( <sup>153</sup> Sm)	ストロンチウム -89 ( <sup>89</sup> Sr)	ラジウム -223 ( <sup>223</sup> Ra)
物理学的半減期	1.9 日	50.5 日	11.435 日
壊変様式	β <sup>-</sup> 壊変	β <sup>-</sup> 壊変	α壊変 + β <sup>-</sup> 壊変
放出放射線	β <sup>-</sup> 線	β <sup>-</sup> 線	α線4本 + β <sup>-</sup> 線2本
(最大) 飛程	4 mm	7 mm	100 μm 未満 (α線のみ)
投与薬剤形	<sup>153</sup> Sm-EDTMP	<sup>89</sup> SrCl <sub>2</sub> (無担体)	<sup>223</sup> RaCl <sub>2</sub> (無担体)
販売名	Quadramet	メタストロン (Metastron)	ゾーフイゴ (Xofigo)
販売承認	国内未承認	2007年7月	2016年3月
適応対象	造骨性骨転移	骨転移の疼痛緩和	去勢抵抗性前立腺がん 骨転移の抗悪性腫瘍剤
薬価		141MBq (1バイアル) あたり 328,911 円	6.16MBq (1バイアル) あたり 684,930 円
販売会社		日本メジフィジックス (株)	バイエル薬品 (株)

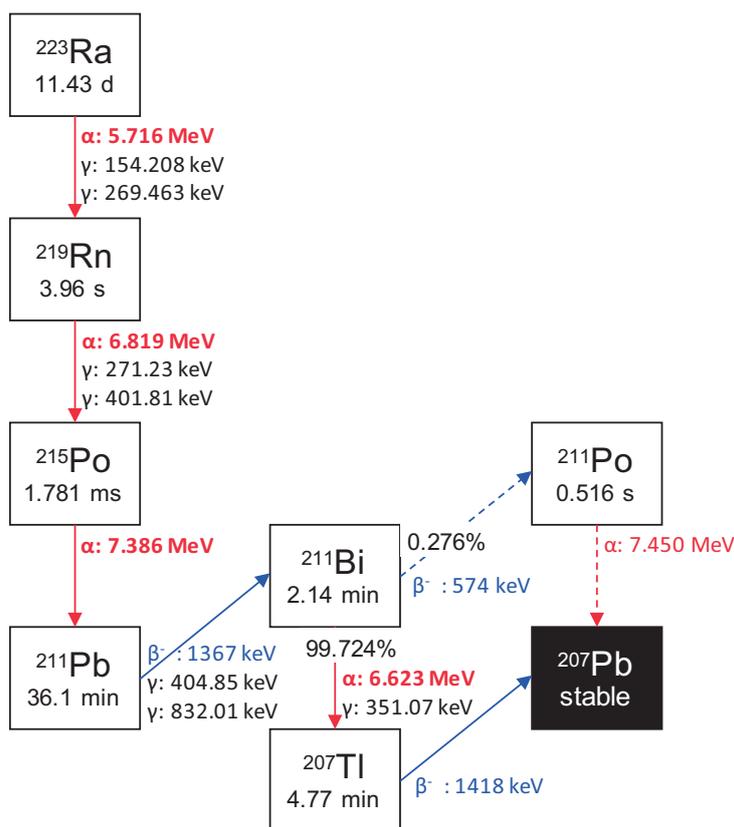


図1 ラジウム-223の壊変系列

Sr-89 同様 Ra-223 は周期表上で Ca と同族であるため、骨代謝が活性化している骨転移部位に於いて Ca 同様に骨形成材料として腫瘍近辺に特異的に集積する。Ra-223 とその娘核種から放出される  $\alpha$  線は 5~8MeV と高いエネルギーを持ち、その飛程は 100  $\mu\text{m}$  未満（細胞 10 個未満）と非常に短いため、近隣の正常組織（骨髄）に影響を及ぼすよりもはるかに高い頻度で、標的とした腫瘍細胞に対して DNA の二本鎖切断を誘発し細胞死へと導くことができる。モンテカルロシミュレーションを用いたモデル計算では、Sr-89 に比べてごく短い距離でほとんどのエネルギーが失われていることも示されている [4,5]。

骨転移部位に集積し  $\alpha$  線を放出することが骨転移治療に有効なのであれば、Ra-223 の他にも、歴史上有名なウラン系列核種の Ra-226（半減期  $T_{1/2}$ =1600 年）や、トリウム系列核種の Ra-224（ $T_{1/2}$ =3.66 日）もまたその候補となり得る。しかし Ra を治療に用いる際に重要なことは、娘核

種の体内制御である。表 2 に Ra-226 や Ra-224, Ra-223 の娘核種とそれぞれの元素としての主な集積組織を示す。いずれの Ra 同位体も複数壊変の後に比較的半減期の長い Pb 同位体になるが、途中で娘核種は  $\alpha$  壊変による反跳作用を受ける。さらに娘核種の一つである Rn は希ガス元素であり化学的不活性である。したがって Rn 同位体は、その半減期に応じて骨転移部位から血流を介して遊離することが懸念される [6]。Ra-223 の娘核種 Rn-219 の半減期は 3.96 秒であり、Ra-226 や Ra-224 の娘核種に比べて短いため、骨表面で Ra-223 が壊変して生じたとしても、そのほとんどが骨表面から遊離するより先に次の娘核種に壊変して標的部位に留まると考えられる。マウスを用いた実験では骨表面からの娘核種の遊離が 2% 以下であることが報告 [4] され、Ra-223 とその娘核種が Ra 同位体の中でも最適な化学的性質や半減期の組合せを持つことが示された。

Ra-223 が疼痛緩和だけではなく、延命効果を

表2 主な Ra 同位体とその娘核種の半減期および各元素の人体中での集積組織

	ラジウム		ラドン		ポロニウム		鉛
ウラン系列 (4n+2 系列)	$^{226}\text{Ra}$ (1600 y)	→	$^{222}\text{Rn}$ (3.8235 d)	→	$^{218}\text{Po}$ (3.098 m)	→	$^{214}\text{Pb}$ (27.06 m)
トリウム系列 (4n 系列)	$^{224}\text{Ra}$ (3.86 d)	→	$^{220}\text{Rn}$ (55.6 s)	→	$^{216}\text{Po}$ (0.145 s)	→	$^{212}\text{Pb}$ (10.64 h)
アクチニウム系列 (4n+3 系列)	$^{223}\text{Ra}$ (11.43 d)	→	$^{219}\text{Rn}$ (3.96 s)	→	$^{215}\text{Po}$ (1.781 ms)	→	$^{211}\text{Pb}$ (36.1 m)
各元素の主な集積組織	骨		血液→肺→呼気		肝臓、腎臓、骨髓		血球、肝臓、骨

持つことは2004年から開始された臨床第II相試験 [7] によって明らかとなった。スウェーデンのカロリンスカ研究所の Nilsson らは、骨転移のある去勢抵抗性前立腺癌患者 64 人の患者を無作為に二群に分け、それぞれに外部放射線治療を施しつつ、Ra-223 を 33 名に、プラセボ（偽薬）を 31 名に処方した。その後の生存率を評価した結果、処方した患者の半数が生存している期間（全生存期間中央値）は、プラセボ群が 46.4 週であったのに対して Ra-223 投与群は 65.3 週と有意に延命効果を示した。

次いで2008年から進められてきた国際共同第III相試験 ALSYMPCA (ALpharadin in SYMptomatic Prostate Cancer) [8] では、骨転移のある去勢抵抗性前立腺癌患者 921 名を無作為に 2:1 に分け、614 名の Ra-223 を投与された患者と 307 名のプラセボの患者を対象として、1) 全生存期間と 2) 骨関連事象が発現するまでの期間を評価した。（なお、Alpharadin<sup>®</sup>とは Xofigo<sup>®</sup>の前に用いられた Ra-223 の薬剤名である。）その結果、全生存期間の中央値は、プラセボ群が 11.3 ヶ月であったのに対して Ra-223 投与群は 14.9 ヶ月と、900 名以上の臨床試験でも Ra-223 が持つ延命効果が確かめられたのである。さらに骨関連事象の初回発現の中央値についても、プラセボ群が 9.8 ヶ月であったのに対して Ra-223 投与群は 15.6 ヶ月と、有意な延長が認められた。ちなみにこの臨床試験は、試験途中の中間解析結果から既に Ra-223 の有効性が確認されたため、この試験の独立データモニタリング委員会 (IDMC)

による試験中止の勧告を受けて中断され、その時点（2011年6月）で生存していたプラセボ群の患者に対しても Ra-223 が処方されている [9]。

この臨床試験結果を受けて2013年5月15日に米国FDA、次いで11月15日に欧州委員会で初の $\alpha$ 線放出放射性医薬品として認可された。発売に際して Alpharadin<sup>®</sup>は Xofigo<sup>®</sup>と名を新たに、現在では世界40カ国以上で使用されている。

Ra-223 が持つ治療効果は、学会発表や文献等から国内でも比較的早期に認識されており、臨床試験も2012年には開始されている。去勢抵抗性前立腺がん骨転移の6名の患者を対象にした第I相試験 [10] では、日本人における Ra-223 の体内分布や薬物動態を調べ、被ばく線量評価も行った。その結果、Ra-223 の薬物動態およびそこから算出される被ばく線量は非日本人のものと同様であった。さらに、2013年から開始した第II相臨床試験では、腫瘍マーカーの一つであるアルカリ性フォスファターゼ (ALP) の値を Ra-223 投与後12週まで測定し、Ra-223 投与前のベースラインからの変化率を評価した [11]。その結果、ALP 値は平均19.3%の減少を認め、ALSYMPCA 試験の解析結果と同様であった。西洋人とは異なる人種・遺伝的要素を持つ日本人は、Ra-223 の臨床試験の結果も異なるのではないかという疑念が持たれていたが、一連の臨床試験結果は人種による違いを否定した。したがって西洋人を主体とした ALSYMPCA 試験の結果は、日本人に対しても適用可能で、仮に同じようなデザインの臨床試験を行ったとしても同様な結果が期待されると言

えよう。

Ra-223はXofigo<sup>®</sup>として現在40カ国以上の国で使用されている。ALSYMPCAおよび国内での安全性と有効性を評価した臨床試験結果に加え、多くの国での使用経験の結果を踏まえ、今回日本での使用が認められた。ちなみに海外ではXofigo<sup>®</sup>（“ゾフィーゴ”と読む）であるのに対し、国内での商品名は“ゾーフィゴ<sup>®</sup>”と若干読み方が異なる。これは国内で販売されている医薬品の中に類似した名前のあるものがあるためと考えられる。

Ra-223を用いた治療を開始するためには、使用施設（病院）がRa-223を適正に使用するために安全取扱講習会を受講することがガイドラインでも求められている。安全取扱講習会はアイソトープ協会等が開催しており、この講習を受けて多くの病院でRa-223の使用が開始されている。ゾーフィゴ<sup>®</sup>に関する情報は、バイエル薬品株式会社のホームページ [12] で入手可能であり、この薬剤に関する適正使用マニュアルも既にホームページ上で公開 [13] されている。

余談であるがRa-223の薬剤承認と時を同じくして、放射性廃棄物の処理に関しても進展がみられている。RIの廃棄業者の一つであるアイソトープ協会では、これまで $\alpha$ 放射体の引き取りを原則受け入れてこなかったが、今回のこの承認に伴い、RI廃棄物の廃棄委託規約が変更され、RI廃棄物の収納基準において、Ra-223以外の $\alpha$ 線を放出する核種を含むものは引き受けない、としている [14]。つまり、Ra-223は廃棄可能な $\alpha$ 放射体となったのである。

## 引用文献

- [1] バイエル薬品(株)プレスリリース [http://byl.bayer.co.jp/html/press\\_release/2016/news2016-03-28b.pdf](http://byl.bayer.co.jp/html/press_release/2016/news2016-03-28b.pdf)
- [2] バイエル薬品(株)プレスリリース [http://byl.bayer.co.jp/html/press\\_release/2016/news2016-06-01.pdf](http://byl.bayer.co.jp/html/press_release/2016/news2016-06-01.pdf)
- [3] 松本俊夫、他編集、「癌と骨病変」(2004), メディカルレビュー社
- [4] G. Henriksen et al., J Nucl Med (2003)44, 252-259.
- [5] R. F. Hobbs et al., Phys Med Biol (2012)57, 3207-3222.
- [6] R. M. De Kruijff et al., Pharmaceuticals (2015)8, 321-336.
- [7] S. Nillsson et al., Lancet Oncol (2007)8, 587-594.
- [8] C. Parker et al., N Eng J Med (2013)369, 213-223.
- [9] O. Sartor and S. Halabi, Urol Oncol (2015) 33, 143-148.
- [10] K. Yoshida et al., Ann Nucl Med (2016)30, 453-460.
- [11] Anonymous, Clin Adv Hematol Oncol (2016) 14(4 Suppl5), 15-16.
- [12] 放射性医薬品・抗悪性腫瘍剤ゾーフィゴ静注の情報サイト <http://www.xofigo.jp/>
- [13] 日本アイソトープ協会 RI廃棄物の廃棄委託規約 <http://www.jrias.or.jp/waste/cat1/202-02.html>
- [14] 日本医学放射線学会、他、塩化ラジウム (Ra-223) 注射液を用いる内用療法の適正使用マニュアル 第一版 (2016).

## ニュース

### 中西友子 日本放射化学会現会長（東京大学特任教授）の 栄えある 2016 年 Hevesy 賞受賞を祝す

中西 孝（金沢大学名誉教授）

JNRS メールニュース第7号（2016/6/1）で既報のとおり、日本放射化学会現会長 中西友子 東京大学特任教授が2016年 Hevesy 賞を受賞されました。栄えあるご受賞を、本会会員の皆様とともにお祝い申し上げます。

授賞式は、2016年4月10日にハンガリー、ブダペストにおいて開催された国際会議 International Conference on Radioanalytical and Nuclear Chemistry の中で行われました。

中西特任教授が長年にわたって研究を続けてこられた放射線や放射性同位元素を駆使したイメージング法により、生きた植物における水と元素の動態の解析に成功したこと、ならびに、福島事故（2011年）の調査研究が高く評価された

ものであり、中西特任教授の Hevesy 賞受賞は日本人としては2人目になります。

**George de Hevesy:** (ゲオルク・ド・ヘヴェシー、1885年8月1日～1966年7月5日) ハンガリー生まれの化学者、1923年にハフニウム ( $_{72}\text{Hf}$ ) を発見。化学反応研究におけるトレーサーとしての放射性同位体の応用研究でノーベル化学賞を受賞（1943年）。

**Hevesy 賞:** 1943年に放射性同元素を用いた化学反応プロセスの研究によりノーベル化学賞を受賞した G. Hevesy を記念して、放射科学や核科学の分野で秀でた業績をあげた研究者に与えられています。

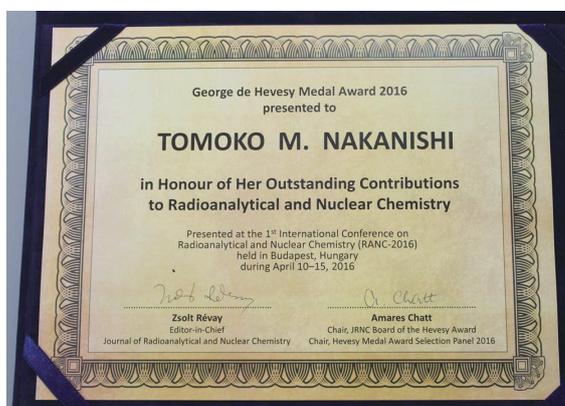


図 1. Hevesy 表彰状



図 2. Hevesy メダル 1



図 3. Hevesy メダル 2



図 4. Hevesy のご子息（左）と中西友子特任教授（右）

## ニュース

### 科研費新学術領域研究「短寿命 RI 供給プラットフォーム」がスタート

中野貴志<sup>1</sup>、福田光宏<sup>1</sup>、羽場宏光<sup>2,\*</sup>、酒見泰寛<sup>3</sup>、菊永英寿<sup>4</sup>

<sup>1</sup>大阪大学核物理研究センター、<sup>2</sup>理化学研究所仁科加速器研究センター、

<sup>3</sup>東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター、

<sup>4</sup>東北大学電子光物理学研究センター

平成 28 年度より 3 年間のプロジェクトとして、文部科学省 科学研究費助成事業 新学術領域研究（研究領域提案型）学術研究支援基盤形成「短寿命 RI 供給プラットフォーム」（領域代表者：大阪大学核物理研究センター・中野貴志）が採択されました。本事業は、市販されていない貴重な短寿命研究用 RI の安定供給とその安全取り扱いのための技術支援を行うことにより、物理、化学、生物学の基礎研究から、工学、農学、医学、薬学、環境科学に至る幅広い研究分野において、RI を用いた先進的な研究や学際的な研究が発展するための研究支援基盤を形成することを目的としています。本事業は、大阪大学核物理研究センター（阪大 RCNP）を中核機関とし、理化学研究所仁科加

速器研究センター RI ビームファクトリー（理研 RIBF）、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター（東北大 CYRIC）、東北大学電子光物理学研究センター（東北大 ELPH）の 4 つの連携機関が密接に協力し、利用者が必要とする研究用 RI を円滑に製造・供給します。本事業の実施体制を図 1 に示します。

利用希望者は、年に 2 回の実験課題募集の機会に利用申請書を作成して窓口機関である阪大 RCNP に提出します。すべての実験課題は、中核・連携機関の代表者と過半数以上の外部審査委員から構成される合議制の課題選択委員会において、申請課題の学術的な重要性和実行可能性をもとにして審査されます。採択された実験課題につ

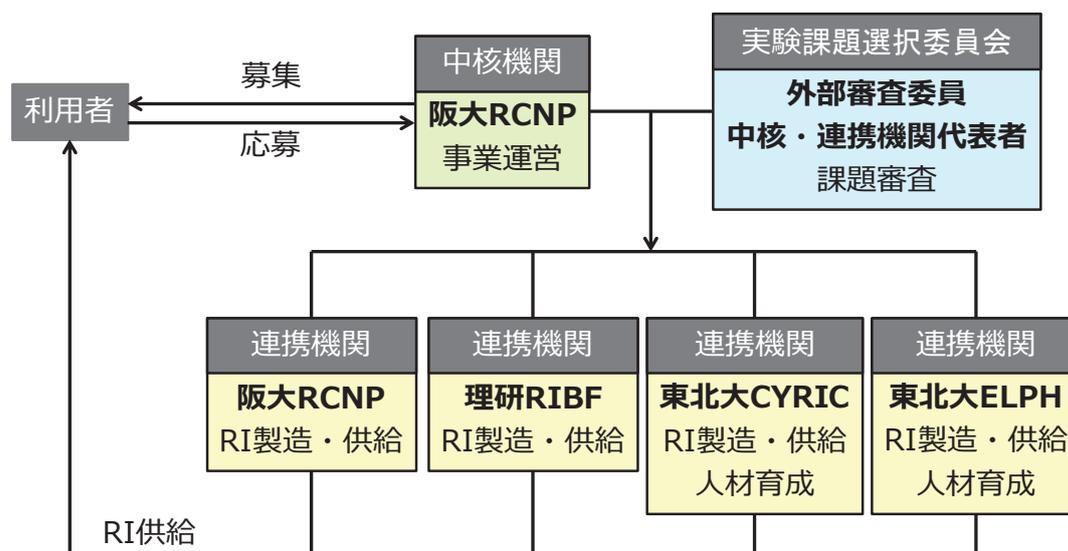


図 1. 短寿命 RI プラットフォーム実施体制

\* Corresponding author, e-mail: haba@riken.jp

いては、RIの種類、数量、利用時期、利用方法などを考慮し、連携機関である4つの加速器施設が手分けして利用者にRIを製造・供給します。また、東北大CYRICとELPHは、大学附置の加速器施設という特性を生かして、非密封RIの安全取り扱いや管理を行う人材育成のための講習会を開催します。

阪大RCNPは、AVFサイクロトロン（最大加速エネルギー：陽子80 MeV、重陽子70 MeV、 $\alpha$ 粒子140 MeVなど）とリングサイクロトロン（最大加速エネルギー：陽子420 MeV、重陽子200 MeV、 $\alpha$ 粒子400 MeVなど）を用いて、原子核物理学、放射化学、核医学をはじめとした様々な研究分野で必要とされるRIの製造・供給を行います。特に、 $^{99m}\text{Tc}$ などのSPECT核種や $^{211}\text{At}$ などのRI内用療法で期待される $\alpha$ 線放出核種の供給に重点を置いています。理研RIBFは、AVFサイクロトロンによって加速される最大エネルギー24 MeVの重陽子や50 MeVの $\alpha$ 粒子など用いて、 $^7\text{Be}$ から $^{211}\text{At}$ までの様々なRIを製造し、

利用者に提供します。特に、 $^{89m}\text{Zr}$ や $^{141m}\text{Nd}$ などの半減期が数分程度の短寿命RIを施設内のホットラボにて利用者に提供するという特徴があります。東北大CYRICは、PETイメージングで利用できる $^{11}\text{C}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{18}\text{F}$ などの短寿命陽電子放出核種を製造・供給します。これらの陽電子放出核種は、CYRICのサイクロトロンで製造し、自動合成装置により放射性薬剤に標識合成されます。さらにCYRICは、集積・代謝に比較的時間がかかるプローブへの標識に適した半減期の長い $^{125}\text{I}$ の製造・供給も行います。東北大ELPHは、電子線形加速器を利用し、サイクロトロンでは製造が困難な中性子過剰核のRIを光核反応を用いて製造し、利用者に提供するという特徴があります。

本事業により、短寿命RIを用いた革新的な研究が萌芽し、発展していくことを願っています。日本放射化学会の会員からの積極的なご応募をお願いいたします。本事業の詳細は、短寿命RIプラットフォームの公式ホームページ (<https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~ripf/>) をご参照下さい。

## ニュース

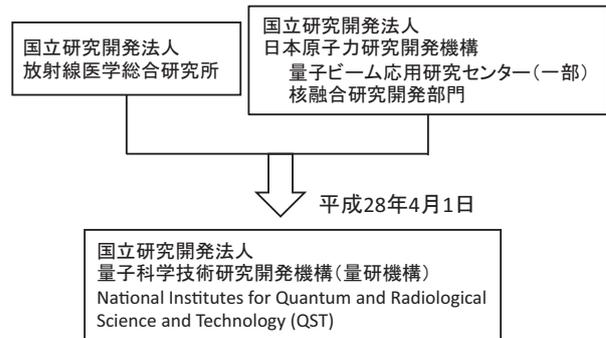
### 量子科学技術研究開発機構が発足

橋本和幸（量子科学研究開発機構 量子ビーム科学研究部門）

放射線医学総合研究所と日本原子力研究開発機構の量子ビーム（一部）・核融合部門を統合した新法人「国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（量研機構）, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)」が平成28年4月1日に発足した（理事長：平野俊夫、職員：約1,200名）。量研機構は、量子科学技術による「調和ある多様性の創造」により、平和で心豊かな人類社会の発展に貢献することを基本理念とする。組織図（管理組織を除く）に示すように、放射線医学総合研究開発部門、量子ビーム科学研究部門及び核融合エネルギー研究開発部門の3つの研究部門からなり、量子科学技術と放射線医学に関する科学技術の水準向上を図るため、放射線の医学利用・人体への影響・放射線防護に関する研究開発、荷電粒子・放射性同位元素、中性子、光量子、放射光などの量子ビームの発生・制御・利用に関する技術開発及び核融合エネルギーの研究開発等を推進する。

本部を千葉県千葉市稲毛に置き、放射線医学総合研究所（千葉県千葉市）、高崎量子応用研究所（群馬県高崎市、茨城県東海村（駐在））、関西光科学研究所（京都府木津川市、兵庫県佐用町）、那珂核融合研究所（茨城県那珂市）及び六ヶ所核融合研究所（青森県六ヶ所村）を研究拠点として有する。詳細は、ホームページ（<http://www.qst.go.jp/>）をご覧ください。

統合してからまだ日が浅いため、事務手続き等が滞ったりしており、関係各位にはご迷惑をおかけしておりますが、温かい目で見守っていただければと思います。最後になりましたが、量研機構紹介の場を与えていただき、感謝いたします。今後とも、量研機構をよろしく願いいたします。



#### 放射線医学総合研究所(放射線医学研究開発部門) 臨床研究クラスター

病院(放射線医学総合研究所病院)  
重粒子線治療研究部  
分子イメージング診断治療研究部  
脳機能イメージング研究部

加速器工学部  
標識薬剤開発部  
計測・線量評価部  
放射線影響研究部  
放射線障害治療研究部  
福島再生支援本部  
人材育成センター  
被ばく医療センター  
放射線防護情報統合センター

#### 量子ビーム科学研究部門

高崎量子応用研究所  
放射線高度利用施設部  
先端機能材料研究部  
放射線生物応用研究部  
東海量子ビーム応用研究センター  
関西光科学研究所  
光量子科学研究部  
量子生命科学研究部  
放射光科学研究センター

#### 核融合エネルギー研究開発部門

那珂核融合研究所  
ITERプロジェクト部  
トカマクシステム技術開発部  
先進プラズマ研究部  
六ヶ所核融合研究所  
核融合炉システム研究開発部  
核融合炉材料研究開発部  
ブランケット研究開発部

図1. 量子科学技術研究開発機構の組織図。

## 会議報告

### 放射性同位元素 (RI) 製造計画と多分野における RI 利用

(東北大学電子光理学研究センター研究会)

菊永英寿、柏木 茂 (東北大学電子光理学研究センター)

2016年2月8日から9日にかけて東北大学電子光理学研究センター三神峯ホールにおいて「放射性同位元素 (RI) 製造計画と多分野における RI 利用の現状」研究会が開催されました。本研究会は放射性同位元素 (RI) 製造、加速器、分子イメージング、核医薬研究、動植物研究、基礎科学研究などの分野から RI や加速器の利用についての話題を集め、情報を共有しながら今後の展開について探ることを目的に開催しています。昨年度は、大強度電子加速器をテーマの中心として加速器技術、RI 製造、放射化学など関連する話題を集めましたが、今年度は国内の研究機関で進められている RI 製造計画や RI 応用研究などに焦点を合わせ、RI 製造の現状や各施設の特徴、RI 利用の動向や課題・問題点などについて議論しました。

研究会には約 80 名の参加登録(大学関係 45 名、研究所 12 名、企業 22 名)があり、放射化学以外にも医学、工学、生物学など様々な分野の方が参加されていました。プログラムは表 1 に示すとおりで、主に 1 日目に各施設における RI 製造の話題、2 日目に RI 利用についての話題となっています。研究会に関する情報は研究会ホームページ (<http://denpa.lns.tohoku.ac.jp/abpd/ws2016/>) にまとめられていますので、興味をお持ちの方は是非ともご覧ください。

表 1. 研究会プログラム

2月8日(月)

13:00 本研究会の目的について  
渡部浩司 (東北大 CYRIC)

< RI 流通と動向 >

13:10 放射性医薬品の現状と将来  
柴田徳思 (日本アイソトープ協会)

13:50 RI 製造に関する欧米の動向～医用 RI を中心に～  
鷺山幸信 (金沢大保健学系)

14:10 …………… 休憩 (10分) ……………

< RI の医学利用 >

14:20 放射性アイソトープの医学応用: 皆さんに考えて頂きたいこと  
絹谷清剛 (金沢大医学系)

15:00 RI 内用療法におけるイメージング技術と応用について  
花岡宏平 (近畿大院医)

15:25 …………… 休憩 (10分) ……………

< 国内の RI 製造 (国立研究施設が果たす RI 製造の役目: 捉え方や製造能力について) >

15:35 原子力機構における加速器中性子を用いた RI 製造  
永井泰樹 (原子力機構)

16:00 理研における RI 製造  
羽場宏光 (理研仁科セ)

16:25 放医研における RI 製造と関連共同研究の紹介  
永津弘太郎 (放医研)

16:50 …………… 休憩 (15分) ……………

< 国内の RI 製造 (大学施設が果たす RI 製造の役目: 捉え方や製造能力について) >

17:05 医理核連携プロジェクトが目指す阪大および日本の RI 供給体制  
篠原厚 (大阪大院理)

17:30 東北大 ELPH での電子加速器を用いた RI 製造  
菊永英寿 (東北大 ELPH)

17:50 CYRIC が作ってきた RI とこれらかの方向性  
渡部浩司 (東北大 CYRIC)

18:10 …………… 全体討論準備 (5分) ……………

< 加速器保有施設は RI 製造をどのようにすすめるべきか? >

18:15 オープンディスカッション

18:45 事務連絡 (懇親会案内等)

18:50 懇親会 @ 東北大学電子光理学研究センター

2月9日(火)

8:55 挨拶 (2日目のトピックでは何を論ずるか?)  
渡部浩司 (東北大 CYRIC)

< 特別講演 >

9:00 RI を用いた植物生理の研究  
中西友子 (東京大院農)

9:40 …………… 休憩 (15分) ……………

< RI を用いたライフサイエンス研究と放射化学 >

9:50 植物の RI イメージング研究から『核農学』の確立へ

藤巻秀 (原子力機構)

10:15 放射性元素を用いた植物 Na・K 輸送体の生理的役割の解明

魚住信之 (東北大院工)

10:40 がん治療を目指したアルファ線放出核種、アスタチン-211 の薬剤化に向けた取組み

石岡典子 (原子力機構)

11:05 サイクロトロンによる I-124 合成と生物応用

船木善仁 (東北大 CYRIC)

11:30 …………… 休憩 (10分) ……………

< RI の工学・工業応用 >

11:40 アルファ放射体の IOT への利用とがん治療への可能性

露崎典平 ((株)クェンタリオン)

12:05 原子力機構タンデム加速器施設での Rn-211/At-211 ジェネレータ開発

西中一朗 (原子力機構)

12:30 材料科学応用における RI・アクチノイドの利用

山村朝雄 (東北大金研)

< Closing >

12:55 総括

13:15 解散

研究会は柴田先生 (RI 協会) および鷲山先生 (金沢大) が国内外の RI 製造の現状を紹介するセッションで始まりました。ここでは国内の RI 流通、利用や製造計画の現状、および国外のプログラム例として DOE の IDPRA (Isotope Development & Production for Research and Applications) が紹介されました。一連の講演を聴いたところ、国内に比べて海外ではかなり戦略的に RI 製造を行っているような印象を受けました。

国内の RI 製造では研究所が中心となって精力的に研究がおこなわれているようです。特に原子力機構の先生方の講演では製造からライフサイエンス研究まで幅広く紹介されていました。今回の研究会ではがん治療薬剤として期待される  $\alpha$  放出核種アスタチン-211 を含む講演が多く、国内製造 RI として開発にかなり力を入れていると感じます。ただ、RI 製造に関しては現在どのような RI が必要なのか研究の視点だけではなく医療

の視点からも考えて欲しい、各施設がバラバラの方向を向いているように見える、という意見もあり、各コミュニティにわかりやすく活動する重要性も感じました。

2日目の RI 利用に関しては中西先生 (東大院農) の講演から始まりました。RI や放射線を「代替不可能な優れた研究ツール」と紹介されており、RI を使わなければ実現できない植物を対象とした研究例が多数紹介されていました。藤巻先生 (原子力機構) の講演でも植物のイメージング研究について紹介されていました。RI 製造技術、イメージング技術、解析技術を連携させて進めていく植物イメージング、および核農学という用語が印象に残っています。

他にも研究会では乱数発生器や金属材料研究所での研究など、自分の専門と異なる講演が多数あり良い経験となりました。その中でも  $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$  ジェネレータの教育利用は興味深い話題でした。下限数量以下の RI を製造して教育に利用することは、我々が所属するセンターでも何かできないか模索しているところであり大変参考になりました。

国内では大型サイクロトロン、大強度電子線形加速器、核燃料使用施設など様々な RI を身近に利用できる環境があり、RI を利用する研究ポテンシャルは非常に高いものがあります。このポテンシャルを活かすためにも、現在どのような RI が研究に用いられているのか、今後どのような RI が必要とされてくるのか、他の加速器施設ではどのような RI 製造・供給を行っているのか等の情報共有は重要となります。これらの (市販されていない) RI のニーズを知ることで、各施設における RI 製造や研究に対するサポート体制を充実させることができ、研究を活性化させることにつながるのではないかと思います。今回の研究会では RI 製造とライフサイエンス研究が主な講演となりましたが、今後も化学・物理・地球化学・教育など様々な分野を含めて RI 製造/利用の可能性、課題、活用法などについての情報を共有しながら議論していけるように研究会を開催していきたいと思っております。皆様からのご意見やご協力をよろしくお願いいたします。

## 会議報告

## 第17回「環境放射能」研究会

別所光太郎（高エネルギー加速器研究機構）

第17回「環境放射能」研究会が、平成28年3月8日から10日までの3日間、茨城県つくば市の高エネルギー加速器研究機構において開催された（主催：高エネルギー加速器研究機構放射線科学センター、日本放射化学会  $\alpha$  放射体・環境放射能分科会、共催：日本原子力学会保健物理・環境科学部会、日本放射線影響学会、日本放射線安全管理学会）。

本研究会はJCO臨界事故を契機として平成12年にスタートし、自然環境放射能、放射線・原子力施設環境放射能を中心とする研究発表と情報交換を目的に、毎年2月末から3月の時期に開催されてきた。平成23年3月の東京電力福島第一原子力発電所事故（福島原発事故）の後、平成24年3月（第13回）以降は、同事故に関連する環境放射能・放射線測定等に関わる研究発表が多数行われるようになり、同分野に関連する多くの研究者・技術者が集まる研究会となっている。以上の状況を踏まえ、第17回研究会は、1) 自然環境放射能、2) 放射線・原子力施設環境放射能、3) 東京電力福島第一原子力発電所事故を討論主題として開催され、依頼講演2件、特別講演2件、一般口頭発表19件、ポスター発表45件、計68件の発表が行われた。研究会の参加者は約180名であった。発表件数、参加者とも、第14回（発表75、参加210）、第15回（発表84、参加183）、第16回（発表80、参加190）に比べると若干減少しているものの、事故から5年を経た現在も多くの研究者・技術者が同事故後の取り組みに関わっている状況が示唆される。なお、今回報告された一般講演64件のうち、福島原発事故に何らかの形で関連する発表は53件であり、8割以上が同事故関連の取り組みに関するものであった。一方、同事故以外の環境放射能研究に関わる報告件数も少しずつ増加しているのが、最近3年ほどの傾向である。環境放射能研究分野全体の継続的

な発展のためにも、幅広い研究成果を本研究会で発表いただけるよう、放射化学会会員の皆様にもご協力をお願いしたい。

今回の研究会は、福島原発事故の後5回目の研究会になることを踏まえ、同事故に関する研究活動の現状を総括することを意識して、世話人会で企画準備を進めた。この観点から、依頼講演としては、IAEA発行の「The Fukushima Daiichi Accident」の執筆にも関わられた、英国 Centre for Ecology and Hydrology の B.J. Howard 博士、および、同事故に関わる取り組みにおいて広い知見から多くの重要な研究活動を精力的に進めている金沢大学・環日本海域環境研究センター低レベル放射能実験施設の長尾誠也教授の2名の先生から、ご講演をいただくこととなった。B.J. Howard 博士は、原子力施設に関わる環境放射能研究、特に人や家畜等の線量評価に見識が深く、チェルノブイリ原発事故に関わる環境放射能研究の取りまとめにも携わられた研究者である。3月9日の講演では、“A comparison of remediation after the Chernobyl and Fukushima Daiichi accidents” との演題で、チェルノブイリ原発事故と福島原発事故の相違点と共通点を、放射能汚染のシナリオ、汚染された土地の性状・利用法、空間線量、除染措置などいくつかの観点で比較をしながらご説明いただいた。研究会参加者にとって、両事故の特徴の理解が進んだものと思われる。長尾先生からは、研究会最後の講演として「福島原発事故により放出された放射性セシウムの大気・陸域・沿岸域海洋での移行動態」との演題で、事故後の放射性セシウムの移行に関わる多くの研究報告や、先生が直接かかわられた研究の具体的実験データなどをもとに、明らかになっている知見を科学的な見地から総合的に深く解釈・説明される形で総括いただいた。同問題に関わっている多くの研究者・技術者にとって、5年

の間に実施された多くの取り組みから明らかにされたこと、現在の研究分野の状況、残された課題など、多くのことを学ぶことができ、貴重な知識を得たものと思われる。

特別講演としては、京都大学・今中哲司先生、九州大学・百島則幸先生に、退官にあたってのご講演をお願いした。今中先生も百島先生も、多くの優れた研究成果で環境放射能研究分野をリードされてきたことは、皆様もご存じのとおりである。今中先生には、当研究会において数回の特別講演/依頼講演を含めて多くの重要なご発表をいただいたことに加えて、他の発表に対しても忌憚のない本質的かつ有用なコメントやアドバイスがあり、研究会での議論の内容や質の向上、後進の育成に大変なご助力をいただいた。また、百島先生には、当研究会の設立と初期の研究会活動において中心メンバーとしてもご尽力をいただいた。今中先生のご講演(3月8日)「広島に生まれて65年、原爆放射線量問題に関わって35年」では、先生が長年にわたって取り組んでこられた、広島・長崎原爆に関わる放射線量評価、残留放射能評価などの歴史と知見についてご講演をいただいた。ご講演内容からは、実験事実を客観的に解釈・説明することを目指す「研究者」としてのお考え・姿勢が強く感じられた。百島先生のご講演(3月9日)「卒論から始まった環境放射能研究」では、先生が学生時代から長年取り組んでこられた、トリチウムの測定装置の開発や測定について当時の研究環境や思い出なども含めお話しいただくと共に、環境中におけるトリチウムの分布と振る舞いなどについて、多くの研究成果をもとにご講演をいただいた。トリチウムは福島原発事故の後、多量に発生した汚染水の取扱いの観点から現在も懸案となっている核種の一つであり、リスクや濃度などの科学的な知見や視点からも議論・検討がなされることで、社会的にもより現実的な解決策が望まれるものである。

研究会の最後には、研究会奨励賞が以下の4講演に与えられ、表彰された。

「福島原発事故後の多摩川集水域における放射性セシウム濃度」(明治大院理工) 越智康太郎; 「福島原発事故由来の不溶性粒子の生成模擬実験」(阪大理) 藤田将史; 「福島第一原発事故被災ウシの歯と骨に含まれるSr-90の測定」(東北大理) 西山純平; 「栽培きのこへの放射性セシウム及びアルカリ金属元素の移行」(東北大理) 村野井友。4講演とも、質の高い発表内容と共に、質疑への対応が優れていた点で、多くの世話人から高い評価を受けたものであり、今後も、優れた研究発表をいただけることが期待される。

当研究会では毎回、査読付 Proceedings 論文集を発行しており、今回も9-10月頃に出版の予定である。第14回(H25年)以降の研究会 Proceedings については、Web ページから PDF ファイルとしてご覧いただくことも可能である。閲覧を希望される方は、[envconf@ml.post.kek.jp](mailto:envconf@ml.post.kek.jp) までご連絡いただきたい。

当研究会世話人会では、本研究会の後、福島原発事故後5年間に当研究会で発表された報告内容を中心に、同事故に関わる環境放射能研究の現状と課題を分野ごとに取りまとめた刊行物を発行することを目指して活動を進めている。同刊行物が完成したあかつきには、放射化学会会員の皆様にもご案内する予定なので、ご興味をお持ちの方は是非ご覧いただけると幸いである。



百島則幸先生(九州大学)の特別講演の様子

## 会議報告

### 第1回 RANC (International Conference on Radioanalytical and Nuclear Chemistry)

中西友子 (東京大学 大学院農学生命科学研究科)

2016年4月10日～15日、ハンガリーのブダペストで第1回目のRANC会議が開催された。放射化学や核化学をターゲットとした国際会議で、1968年から発行されている雑誌JRNC (Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry) がサポートしてできた会議である。本会議の主催者でありかつJRNCの編集長である、Z. Révayの言によると、Radioanalytical and Nuclear Chemistryの分野での新しい国際会議が、これほど多くの世界中の研究者の関心を惹きつけるとは思わなかったとのことである。今回の参加者は50か国、5大陸から412人が参加した。

会議は毎朝、将来を見据えた3つのPlenary lectureが3人ずつ、合計15人が講演し、その後4つのsessionに分かれて行われた。午前、昼、午後のそれぞれのsessionの最初にはinvited talkがあった。全体では220件以上の口頭発表、140件以上のポスター発表が行われた。4つのsessionの中で、毎日確実に確保されていたsessionは核鑑識 (Nuclear forensic) である。米国のS. LaMontが全体像を話したが、核鑑識とは核セキュリティの面から最近着目されてきた分野である。放射化学が中心であるものの、あらゆる分野との連携が必要な分野で、放射性物質の計測からだけでなく化学分離による詳細な分析、同位体分析からの年代測定などによりその物質の履歴を求める科学である。かつてソ連が崩壊した際に様々な放射性核種が紛失することがあり、それらのRIを辿ることが欧州における関心事のひとつも伺った。

もうひとつの主要分野は環境中の放射能について、つまりRadioecologyの分野である。福島原発事故のみならず、チェルノブイリ原発事故による放射性物質の環境汚染にも依然として高い関心が持たれており、今回は、低レベル放射能測定

である海洋放射能測定の第一人者で、かつ膨大なデータベースを纏め上げているスロバキアのP. Povinec、放射性物質やナノ物質をはじめとする環境中における金属物質の生体への影響を精力的に調べているイタリアのE. Sabbioniなど、放射化学が支える分野がこれほど広いかと思うほど、幅広い分野からの研究者が集まっていた。

数年前、U.C. Berkeleyにおられた故H. Nitsche教授が昼食会の会場で放射化学者数の推移について、米国ではその数の減少は止まったと言われていたことを思い出した。当時詳しくは説明されなかったものの、多分、将来の核鑑識や環境放射能の重要性を踏まえた発言ではなかったかと推測された。

今回は1943年に放射化学者でノーベル賞を受賞したG. Hevesy 没後50年にあたる年であることから、高齢ではあるが、特別にHevesyの子息が招待され、Hevesyの伝記を書いた分析化学者のS. NisseがHevesyの生涯を紹介した。Nisse博士は、もう80歳は過ぎていたものの、半世紀に渡る科学および社会状況の変遷を詳細に紹介した。Hevesyは、E. Rutherford、N. Bohr、M. Laueなど、名だたる科学者と一緒に研究を行っており、インターネットの無かった時代にも関わらず、彼らはお互いの研究について良く議論をし理解しあっていたことには驚かされる。

Hevesyは、ジルコニウムからの化学分離に成功しハフニウム元素を発見したことが有名であるが、放射性同位元素を用いたトレーサー研究の開拓者でもあり、植物にも興味を持っていた。ユダヤ系だったHevesyは場所を転々として研究をしなければならなかったが、最後に科学には国境が無い (ohne Grenzen) と述べたとされている。そのドイツ語の伝記は近々英訳されるとのことである。

## 会議報告

### Nobel Symposium NS160 “Chemistry and Physics of Heavy and Superheavy Elements”

佐藤哲也（日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター）

2016年5月29日から6月3日にかけて、スウェーデン第3の都市 Malmö から東北東に100kmほど離れた小さな町、Kristianstadにあるフィヨルドの湖 Ivö 湖のほとりで、スウェーデン Lund 大学を世話人として、ノーベルシンポジウム “Chemistry and Physics of Heavy and Superheavy Elements” (NS160) が開催されました。

ノーベルシンポジウムは、ノーベル賞の対象分野（物理学、化学、生理学・医学、文学、平和および経済学）あるいはそれらを横断的に、大きく躍進しつつある、あるいは文化の基本を担うまたは社会的に重要なトピックを取り扱う国際シンポジウムです。その他の通りノーベル賞で知られるノーベル財団が、1965年に始まって以来主催しています。年に数回のペースで開催され、今回で160回を数えます。講演はすべて “leading scientists” として招待された招待講演者によってなされます。タイトルの通り、今回は、重元素・超重元素の化学および物理がテーマとなりました。シンポジウムの性格上、同じトピックが再び取り上げられることはなかなかなく、1974年にNS27で超重元素が主題とされてから、実に40年以上ぶりのこととなります。

今回招待されたのは51名です。日本からは、理研・九州大の森田浩介教授、理研仁科加速器研究センターから酒井英行博士、羽場宏光博士、そして原子力機構 先端基礎研究センターから永目諭一郎副センター長と著者の5名が出席しました。国別にみると、ドイツから11名、アメリカから8名、スウェーデンから7名、ロシアから4名、スイス、イギリス、オランダ、フィンランド、ポーランドからそれぞれ2名ずつ、そしてオーストラリア、ベルギー、フランス、イスラエル、ニュージーランド、ノルウェーから各1名の参加となっています。

初日は、大学の町 Lund にある、Lund 大の所有する歴史的建造物のひとつである Gamla Biskopshuset（旧 Lund 司教邸）でレセプションが行われた後、1時間半ほどバスに揺られて、メイン会場となったスウェーデンの古城 Bäckaskog Castle に移りました。Bäckaskog Castle は、もともとは13世紀に修道院としてつくられ、その後16世紀にその地方の貴族によって城として再建されたものが、現在はホテルとして使われているもので、周囲が湖と緑に囲まれ、自然にあふれたすばらしい環境にありました。

講演は、以下のようなセッションで進められました。

- Nuclear structure ..... 7件
- Fission barriers ..... 3件
- Production and reactions ..... 5件
- Atomic structure ..... 3件
- Interfaces ..... 3件
- Discovery aspects (public session) ... 5件
- Chemistry ..... 8件
- Prerequisites ..... 3件
- Status and perspectives ..... 3件
- Future of heavy elements research ..... 1件

前述したとおり、出席者の数としてはさほど多くなく、むしろ少ないくらいとあって、発表に対する質疑応答は和気藹々でありつつも活発に行われ、時折ジョークが混じるなかにも、今まで参加してきた国際学会とはまた違う熱気に溢れていました。

ところで、本シンポジウムはちょうど新元素（113、115、117 および 118 番元素）名候補の発表時期にあわせて開催されました。そのため、3日目の6月1日に設けられた公開セッショ

ンでは、IUPAC から J. Reedijk 教授、IUPAP から C. Jarlskog 教授の講演がありました。IUPAC/IUPAP の内部事情等々なかなか生々しい話もあり、大変印象に残ったことを覚えています。実は、このときの記者会見で新元素名が発表されるのではないかと期待していたのですが、発表日の発表に留まりました。日本ではこの日の夜8時半頃に、日本時間の9日午前0時に新元素名が公表される予定であることが報じられましたが、それが発表されたのはこの NS160 でのことでした。時差の7時間を考えると、記者会見直後には日本に伝わったようですね。

このシンポジウムの詳しい情報は、学会ウェブページ (<http://www.nuclear.lu.se/ns160/>) で得ることができます。プロシーディング集は査読の上、EPJ Web of Conferences (<http://www.epj-conferences.org>) から電子出版されることになっています。

夏至まであと3週間でしたので、北欧は昼がとて長い時期でした。夜は22時近くまで明るく(写真1)、4時半には日が昇ります。会期中は、まさに至れり尽くせり、毎晩コース料理で、食事ごとに料理に合ったワインが添えられていました。海に囲まれているせいもあって、スウェーデン料理には魚料理が多く、日本人としては馴染みやすいものでした。リコリス\*ソースの独特な風味も、異郷の地にあってはまた乙なものです。食事を大いに楽しみつつ、参加者との親交を深めることができました。

会議後、Geneva に向かう車中で113番元素をはじめとする新元素の候補名が発表されたことを知りました。元素周期表をみると、我々は、第7周期から第8周期へと踏み出していく歴史的な瞬間に立ち会っていることがわかります(写真2)。今回の NS160 には、その周期表をその手で拡張し、これまでの超重元素研究の歴史を作ってきたビッグネームとともに、まさに今超重元素研究の先頭に立ち、これから作っていくという気概に溢れた研究者たちが一堂に会しました。そんな中に、今回、幸運にも本シンポジウムに招待され

たことは、大変に荣誉あることと受け止めています。

さて、ノーベルシンポジウムにもう一度参加できる機会はあるでしょうか?わかりません。しかし、自分がこれからも超重元素分野で仕事を続けていけるかどうかはともかくとして、40年後も今回受け取った熱量を絶やさずに持ち続けたいものです。

ところで。

実を言うと、最初に招待講演の依頼メールが筆者に届いたとき、「ああ、また SPAM か」と捨ててしまっていました。ノーベル財団なんて、自分に関係あるなんて思いませんから。以後気をつけます。



写真1. デイナーを森田教授、米国ローレンス・リバモア国立研究所 Stoyer 夫妻、スイス PSI R.Eichler 博士、Lund 大 D.Rudolph 教授らと共に。20時半。

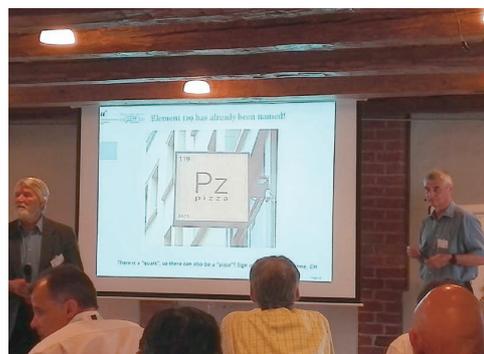


写真2. 第8周期最初の元素119番元素の名前は既に決まっている(スイス Bern 大/PSI Türler 教授より)。

\* “世界一まずい飴”サルミアッキの原料

## 時過ぎて

### 村松 康行 教授を偲んで

内田滋夫 (国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構)



国際ワークショップで質問する村松博士

村松博士(学習院大学理学部化学科教授)が2016年7月2日に逝去されたという知らせが届いた。突然の悲報でただ驚愕するばかりである。残念でならないが、本当に悔しい思いをされているのは博士ご自身であろう。実際に自分で手を動かしてデータを出し、論文に纏めたいという思いが強い研究者であった。実験室で白衣を着て実験している姿が思い出される。

村松博士は、1974年に学習院大学大学院修士課程(化学専攻)を修了された後、ドイツのゲッティンゲン大学理学部(地球化学専攻)で博士課程を修了後、学位を取得された。そして、同大学の地球化学研究所に研究員として残られたが、1978年に当時の科学技術庁放射線医学総合研究所(環境放射生態学研究部)に入所された。その後、2004年に学習院大学に移られるまで、同研究所において、チームリーダーやグループリーダーを務められ、さらに、国際原子力機関(IAEA)でも活躍された国際人であった。

1992年には科学技術庁長官表彰を、また、2004年には地球化学研究協会学術賞(三宅賞)を受賞されている。この間、一貫して地球環境微量元素やアイソトープ分析研究の第一人者として

活躍されてきた。ヨウ素の地球科学的挙動に関する研究やヨウ素-129の分析など沢山の論文を纏めてこられた。因みに、地球化学研究協会学術賞(三宅賞)の受賞タイトルは、「環境中における安定および放射性ヨウ素の地球化学的研究」である。

筆者が、村松博士に会ったのは1979年の4月、放射線医学総合研究所に入所して東京のオリンピックセンターで研修を受けていたときである。村松博士は、前年にドイツから放医研に移られていたが、研修は同じ時に受けることになったようであった。突然やってきて、「村松です。宜しく」と言われた事をはっきりと記憶している。

その時はあまり長い時間話をしていたわけではないが、「明るくて、相手に対して気配りがあり、人の話を良く聞く」という印象であった。それは、その時から始まった村松博士との約35年間の付き合いの中で変わることはなかった。

博士は、研究に関しても自分の信念というものを持っていたので、多くの人から信頼されていた。放医研では研究リーダー的存在になられたが、どのような立場になっても、自分がやりたい研究がはっきりしており、そのために必要な知識を吸収することはもちろんであるが、そのような知識を持った研究者と共同研究をすることにも積極的であった。この事は、博士が多くの共同研究者と連名で沢山の論文を発表している事からもわかると思う。

博士は、意外と言っては失礼であるが、人との交渉にたけてもいた。研究にしても研究部の運営にしても、本当に必要なものは手に入れる、というタイプである。そのようなタイプに見えないのは、一方的に要求するのではなく、じっくりと自分の意見を言い、相手の話を聞き、譲るところは

譲る、という側面があるからだと思う。

人間関係に関しては、非常に面倒見が良く、若い人の相談に乗るだけではなく、実際に一緒に実験や分析を行っていた。また、ミーティングなどでは、常に色々な人に配慮し、多くの人から意見を引き出すように努めていた。食事会などでも、あまり話をしない人に対して、少しユーモアを交えながら優しく話しかけていたことを思い出す。外国人が研究所を訪問した際には、親身になって世話をしていた。後に、国際会議などで放医研に来たことがある人に会うと必ず、「Yasuは参加していないのか」、「Yasuは元気か」、と聞かれたものである。

学習院大学に移ってからは、学会くらいでしか会う機会が無かったが、2011年の東京電力福島第一原子力発電所事故以降は、また良く連絡を取り合うようになっていた。筆者も村松博士も福島県のアドバイザーになっていたこともあり、年に何回か開催される検討会や原子力発電所事故関連の研究会などでお会いすることが多くなった。この事故をきっかけに、博士は果樹や畜産など、これまでの研究とは異なる課題についても、福島県の農業研究者と一緒にになって、積極的に現場に入って調査を行っていた。事故直後から、国の調査にも参加されていたが、福島県の農業現場における放射性セシウムの挙動研究に関しての、牽引者の一人であったと言えよう。

2015年1月21日に福島県放射性物質試験研究課題に関する検討会が開催され、それが村松博士とお会いした最期になってしまった。当日は朝の10時から4時過ぎまで慌ただしく研究報告が続いたが、研究者の発表に対して、コメントや質問をしながら、村松博士とは席が隣であったので、感想を交えつつ小さい声で情報交換した。そして、いつものように、休憩時間や昼食時には、お互いの近況報告をした。帰りは、郡山駅から一緒の新幹線であった。珍しく村松博士の方から「もう少し話をしよう」と言ったので、隣に座りながら上野駅で博士が降りるまで、話をしていた。結局、お互いに忙しいという事を確認し合うだけの会話であったが、いつもと全く変わらない博士の様子

であったので、それが最期になるとは、その時は予想もしなかった。

2016年6月28日～7月1日に横浜で国際会議「Goldschmidt 2016」が開催され、筆者も参加した。この会議には、国内外から村松博士の友人・知人が沢山参加しているのので、そういう人たちと会うと自然と村松博士の話になった。Goldschmidtで村松博士がいないのは想像できないとほとんどの人が口を揃えて言っていた。確かに、筆者もこの会議のことを村松博士から教えてもらった。

この会議で多くの人と村松博士の話をしたその直後、博士がご家族の方達に見守られながら永眠されたというメールが届いた。虫の知らせ、というのであろうか。「Goldschmidt 2016」で村松博士の話をした多くの人がそう思っているのではないだろうか。

今、この原稿を書くに当たり、村松博士の写真を探してみた。筆者自身は写真を撮らないが、20-30枚の写真が簡単に見つかった。研究室の誰かが取ったものを送ってくれたのであろうが、全ての写真が笑顔であった。不機嫌な表情をしている写真や怒ったようなものは1枚もなかった。村松博士の人柄が表れているようである。もう、あの笑顔を見ることが出来ない、と考えると非常に寂しくなる。

心からご冥福をお祈りしたい。

2016年8月1日



ポスター会場で参加者と談笑する村松博士

情報プラザ (国際国内会議)

国内会議

**2016 日本放射化学会年会・第60回放射化学討論会**

日時：2016年9月10日(土)～12日(月)  
場所：新潟大学五十嵐キャンパス

国際会議

**ND2016 - International Conference on Nuclear Data for Science and Technology**

日時：11-16 Sep, 2016  
場所：Bruges, Belgium

**Plutonium Futures - The Science 2016**

日時：18-22 Sep, 2016  
場所：Baden Baden, Germany

**13th International Conference on Radiation Shielding (ICRS-13) and 19th Topical Meeting of the Radiation Protection & Shielding Division (RPSD-2016)**

日時：3-6 Oct, 2016  
場所：Paris, France

**The 28th World Conference of the International Nuclear Target Development Society (INTDS 2016)**

日時：13-18 Nov, 2016  
場所：Cape Town, South Africa

**International Conference on Advances in Liquid Scintillation Spectrometry (LSC2017)**

日時：1-5 May, 2017  
場所：Copenhagen, Denmark

**International Conference on Radionuclide Metrology (ICRM 2017)**

日時：15-19, May, 2017  
場所：Buenos Aires, Argentina

**10<sup>th</sup> International Symposium on Targeted Alpha Therapy (TAT-10)**

日時：30 May - 1 June, 2017  
場所：Kanazawa, Japan

**Actinides2017**

日時：9-14, July, 2017  
場所：Sendai, Japan

**6<sup>th</sup> Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry (APSORC17)**

日時：17-22, Sep, 2017  
場所：Jeju Island, Korea

## 本だな

### 放射能の発見が世界を変えた—さまざまな謎が未知の 地平線へと導いた 馬場 宏 著

酒井陽一 (大同大学)

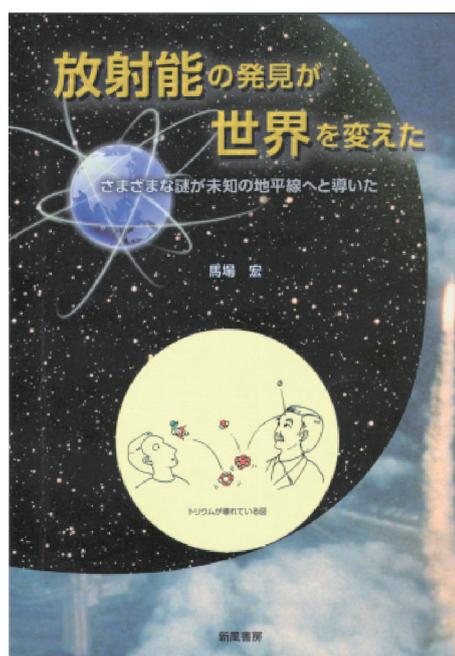
日本放射化学会・永年会員の馬場宏氏（大阪大学名誉教授）が、2016年2月、新風書房より「放射能の発見が世界を変えた—さまざまな謎が未知の地平線へと導いた」を上梓した。本学会会員にとって研究関連の読み物として大変おもしろく印象深いものだが、同時に、大学などで“自然科学概論”といった授業を担当している場合には有用な情報源となる資料本としての役割を果たしてくれるのではないかと期待されている。数式は一つも登場しない。冒頭「はじめに」で、文科系学生の大学新入生を対象にした自然科学の授業が、本書の基盤になったことを明らかにしている。昨今叫ばれている「理科ばなれ」についての著者の見解・対策案を、次に引用する。

決して自然科学が若者に嫌われている訳ではなく、自然科学の魅力を彼らに伝えられない教育者の側にこそ反省しなければならない原因があると言わざるを得ないことは明らかです。(中略) 化学が決して暗記一本鎗の科目ではなく、確立された原理、原則の上に構築されるべき演繹科学であることを若者たちに知らせることがわれわれに求められているのです。

2011年3月の原子力発電所の事故以来、中等教育、高等教育（短大・高専以上）における科学リテラシ教育、特に放射能／放射線教育の重要性が指摘されるようになった。元素、原子、原子核の科学の黎明において放射能の発見は大きな意味を持ったことは論を俟たない。本書はメンデレーエフの周期表から書き始められ、本質をついたわかりやすい説明を主軸とし、興味深いエピソードに彩られながら、放射能にかかわる自然科学の進展が繰り広げられる。2015年12月が脱稿で、113番元素ニホニウムの命名権獲得の前夜まで到達する。「前夜」を著者は以下のように語る。

113番元素発見の優先権は理研を中心とする日本のグループとロ米合同チームとの間で争われていますが、我が国に朗報が届けられる見込みが非常に高くなったと当時は思われました。しかし、それから2年以上経過した現在も期待した朗報は届けられていませんでしたが、2015年末になって・・・(以下略)。

ビッグバン宇宙、インフレーション、星の誕生と滅亡といった元素生成プロセスはもちろん、地球の誕生、生命の起源まで、本書の守備範囲は広がる。自然科学の魅力を、次世代を担う若い学徒・研究者に伝えたいとの意図は明らかである。同時に負の側面も自然科学はもつものであり、それに押し流されてはならぬ、という警告も発しているようである（第8章「原爆と原子力発電」）。8章は、これまでの原子力利用と核兵器／事故の歴史、現在に残された問題の概観を理工学の側面から理



解するために有用であるばかりでなく、社会とのかかわりの視点からの（トランスサイエンス的）記載もある。第三者的な記述のみではなく、著者自身の現実を踏まえた意見も明瞭に展開されている。

社会とのかかわりという観点から、終章で著者は次の主張をする。

*19世紀末から20世紀前半にかけて起こった、放射能の発見とそれに続く量子論と相対性理論の登場は、まさに人類科学史上の一大ブレークスルーでありました。（中略）原子爆弾の出現以来、科学者が己の興味の赴くままに、真理*

*の探究を無条件に続けることが許されるという状況ではなくなってきたのです。*

本学会会員に、一読を薦めたい一冊である。

目次； 序章 夜明けまえ／第1章 元素の周期律と放射能の発見／第2章 原子の素顔／第3章 元素が作られるまで／第4章 地球の誕生と生命の起源／第5章 電子の働き／第6章 新しい錬金術／第7章 周期表のフロンティア／第8章 原爆と原子力発電／終章 これからの科学と科学者

学位論文要録

**Study of relationship between deposition of radioactive materials and radioactive particles in the difficult-to-return zone caused by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident**

(福島第一原発事故で生じた帰還困難区域における放射性物質の沈着と放射性粒子の関係の研究)



佐藤志彦 (国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 福島技術開発部門 廃炉国際共同研究センター)

学位授与：博士 (理学) 筑波大学大学院数理物質科学研究科

主 査：末木啓介

平成 28 年 3 月 25 日

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震と地震に伴う津波によって、東京電力 (株) 福島第一原子力発電所は重大過酷事故へと至り、大量の放射性物質を環境中へ放出した。最も深刻な汚染は 15 日午後から 16 日未明にかけ、福島市方向の北西地域で、降雨に伴って発生したことが知られている。その一方、文科省の土壤調査において当該地域を北と西に分断するような銀-110m ( $^{110m}\text{Ag}$ ) とセシウム  $^{137}\text{Cs}$  の放射能比の分岐が確認された。この分岐は汚染発生時に発生したと考えられるが、その原因は明らかになっていなかった。またほぼ同時期に茨城県つくば市で採取した大気浮遊塵から福島事故由来の Cs を含む微粒子が見つかった。しかし福島第一原発事故では、炉心の爆発や火災の発生は無く、放射性粒子の存在そのものに、当初は疑問が呈されていた。本研究では帰還困難区域において採取した土壤に含まれる核種定量と、その土壤から取り出した放射性粒子の分析により、福島事故における北西地域の汚染形成と放射性粒子の実態解明を試みた。

また粒子生成過程に対する最も合理的な仮説を提案した。

**北西地域に沈着した放射性核種の放出源**

北西地域において土壤を計 25 地点採取し、試料中に含まれる Cs-134、 $^{137}\text{Cs}$  ( $^{134,137}\text{Cs}$ ) と Ag-110m ( $^{110m}\text{Ag}$ ) を定量した。得られた定量値から放射能比および同位体比を算出したところ、 $^{110m}\text{Ag}/^{137}\text{Cs}$  放射能比が 3 つの代表値に収束することを確認した。そして北西地域の汚染は明確に 3 つのグループに地域で分かれることが見出された。このとき得られた放射能比の代表値は、原発の北から西に移動すると共に、放射能比は小さくなっていった。最も北側に位置する 1 号機から 3 月 12 日に放出したプルームによる汚染は、 $^{110m}\text{Ag}/^{137}\text{Cs}$  放射能比も西原ら (2012) による ORIGEN2 の計算結果ともよく一致しており、銀の放出量と核燃料が燃料温度に依存する関係から (Pontillon 2010)、原子炉停止後の早い段階で放出した事実とも整合する。一方、残る 2 つの汚染は、3 月 15 日に 2 号機と 3 号機からそれぞれ放出されており、特に 2 号機からの放出には後述する放射性粒子も含まれていた。2 号機による放出は 15 日早朝から始まっていたが、15 日は午後までは南に向かっていった風の流れが、時間とともに時計回りをし、最終的に北西に向かっている。同じくしてこの時刻で降雨が見られ、湿性沈着を生じたと考えられる。また 3 号機からの放出は、

プラントパラメータや21時頃に正門の空間線量が上昇していることから、この時期に始まったと予想され、この時も風の流れは北西に向かっていた。したがって、北西地域における地表汚染は、異なる3つの炉から、放出時期が異なる汚染が、偶然にも同一方向で少しずつ向きを変えて沈着したため、方角によって $^{110m}\text{Ag}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比の変化が観測されたものと考えられる。

### 放射性粒子と放出源

本研究では2011年3月15日に茨城県つくば市で採取したエアダストフィルターから見つかったCs含有粒子(Adachi 2013)と同様な粒子が、原発周辺にも存在するかを検証するため、1-3号機に由来する汚染がある土壌試料を対象に放射性粒子を取り出し、粒子の実態解明を行った。粒子の形状は先行研究で報告された球体に加え、20km圏内では不定形の粒子も複数見られた。また粒子に含まれる $\gamma$ 線核種は、ほぼ $^{134}\text{Cs}$ と $^{137}\text{Cs}$ だった。 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 同位体比を用いると、分離したすべての粒子は2つのグループに集約され、それぞれが1号機と2号機由来のCs同位体比に一致し、3号機由来の粒子は見つからなかった。また1号機粒子は発見場所と粒子の大きさから、12日の水素爆発時に放出したと考えられる。すべての放射性粒子に共通する元素はSi、O、およびCaであり、特にSiとOはすべての粒子において全質量の80%を占めていた。2号機粒子の特徴は、つくば市で見つかったCs粒子と元素組成、および比放射能が一致しており、Zn、Fe、Csがエネルギー分散型X線分析(EDX)で検出された。一方、1号機粒子は1粒子あたりの放射能は強いものの、体積も大きく、比放射能は2桁程度2号機粒子よりも小さかった。そのためEDXでCsが検出できない粒子が大多数であり、それらの粒子のCsはシンクロトロン放射光を用いた $\mu$ ビーム分光分析で検出した。2号機由来の粒子はSi、O、Fe、ZnそしてCsがほぼ均一だが、1号機粒子ではSi、O以外の元素については分布にかなり大きなばらつきがあることも明らかになった。EDXで検出されるCsが事故由来かを判断するため、230万年の半減期を有する $^{135}\text{Cs}$ を二次イオン質量分析(SIMS)で検出した。概算で得られ

た $^{135}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 同位体比は0.055で、この結果から概算された粒子中に含まれる原子数を元にした濃度と、EDXで半定量的に検出したCsの濃度はほぼ一致した。したがってEDXで検出されるCsの蛍光X線は放射性Csによるものであることが確定した。加えて、2号機粒子の一部からUが検出されたが、全体に占める割合は0.5wt%未満で、粒子の主たる組成でないことが明確になった。また1号機粒子のいずれからUは認められなかった。このように福島事故で放出した放射性粒子は、1、2号機問わず、Csの放射性同位体を高濃度に濃縮した、ケイ酸で、過去の原子力事故では見られたことのない、新たな粒子であることが判明した。

### 放射性粒子の生成過程

福島事故で放出した放射性粒子は本研究によりケイ酸の塊であることが明らかになった。しかし炉心にケイ素を大量に含む材料は使用されておらず、さらに粒子に含まれる放射性核種はほとんどがCsの、いわゆる燃料パーティクルとは根本的に異なるものである。福島事故と放射性粒子を結びつけるためには、これらの合理的な説明が不可欠である。本研究で繊維状のケイ酸が付着した粒子が1号機由来の汚染を生じた場所から複数見つかった。これらの部材が使用されている場所として原子炉圧力容器(RPV)を取り囲む、格納容器(PCV)で使用されている保温材を見出した。とりわけケイ酸系保温材と放射性粒子の微量な安定元素、およびアルミニウムがほとんどないという特徴が酷似していた。次にセシウムの選択的吸着について、ケイ酸建材との親和性について発見した。建屋内に放置されていた保温材であるにもかかわらず、事故由来のCsが繊維に均一な付着をしていた。これまでロックウールのようなケイ酸建材にCsが吸着したという報告はなく、ガス状のCsに対し優れた吸着性を示すことが判明した。またかPCVのうちドライウェル(D/W)内部はケイ酸材料が溶融するに十分足りる1000℃程度にまで達した可能性が指摘されている。したがって福島事故で放出したCs含有の放射性粒子は、PCV内で使用されていたケイ酸系保温材にCsが吸着し、その後溶融・冷却過程を経て、粒子化し

た可能性が考案された。放射性粒子のさらなる実態解明が、事故進展解析などにおいても、重要な手掛かりとなることが多いに期待される。

#### 代表的な発表論文

1. N. Kinoshita, K. Sueki, K. Sasa, J. Kitagawa, S. Ikarashi, T. Nishimura, Y.-S. Wong, Y. Satou, K. Handa, T. Takahashi, M. Sato, T. Yamagata, Assessment of individual radionuclide distributions from the Fukushima nuclear accident covering central-east Japan, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS), 108, pp19526-19529, 2011.
2. T. Matsunaka, K. Sasa, K. Sueki, T. Takahashi, M. Matsumura, Y. Satou, J. Kitagawa, N. Kinoshita, H. Matsuzaki, Post-accident response of near-surface  $^{129}\text{I}$  levels and  $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$  ratios in areas close to the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, Japan. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 361 pp569-573, 2015.
3. K. Sasa, T. Takahashi, M. Matsumura, T. Matsunaka, Y. Satou, D. Izumi, K. Sueki, The new 6 MV multi-nuclide AMS facility at the University of Tsukuba, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 361, pp124-128, 2015.
4. T. Matsunaka, K. Sasa, K. Sueki, T. Takahashi, Y. Satou, M. Matsumura, N. Kinoshita, J. Kitagawa, H. Matsuzaki, Pre- and post-accident  $^{129}\text{I}$  and  $^{137}\text{Cs}$  levels, and  $^{129}\text{I}/^{137}\text{Cs}$  ratios in soil near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, Japan, Journal of Environmental Radioactivity, 151, pp209-217.
5. Y. Satou, K. Sueki, K. Sasa, T. Matsunaka, N. Shibayama, D. Izumi, T. Takahashi, N. Kinoshita, Hiroyuki Matsuzaki, Technological developments for Strontium-90 determination using AMS, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 361, pp233-236, 2015.
6. Y. Satou, K. Sueki, K. Sasa, J. Kitagawa, S. Ikarashi, N. Kinoshita, Vertical distribution and formation analysis of the  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{129\text{m}}\text{Te}$ , and  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant in the beach soil, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 303, pp1197-1200, 2015.
7. M. Ishizuka, M. Mikami, T. Y. Tanaka, Y. Igarashi, K. Kita, Y. Yamada, N. Yoshida, S. Toyoda, Y. Satou, T. Kinase, K. Ninomiya, A. Shinohara, Use of a size-resolved 1-D resuspension scheme to evaluate resuspended radioactive material associated with mineral dust particles from the ground surface, Journal of Environmental Radioactivity, in press.
8. Y. Satou, K. Sueki, K. Sasa, K. Adachi, Y. Igarashi, First successful isolation of radioactive particles from soil near the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, Anthropocene, in press.

## Benchmark study of density functional theory by using Mössbauer spectroscopic parameters and its application to d-, f-block coordination chemistry

(メスバウアー分光パラメータを用いた密度汎関数法のベンチマーク研究と d, f ブロック錯体化学への応用)

金子政志 (日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究センター 原子力化学ディビジョン 放射化学研究グループ)

学位授与：博士(理学) 広島大学大学院理学研究科化学専攻

主 査：中島 覚

平成 28 年 3 月 23 日

メスバウアー分光によって得られるパラメータは、特定の原子・イオンの化学状態を精緻に記述する。パラメータの一つであるメスバウアー異性体シフト ( $\delta$ ) は、原子核と電子間の単極子相互作用によって増減し、基準値との差を比較することで着目する元素の結合状態を定量的に表す。

代表的なメスバウアー核である  $^{57}\text{Fe}$  のメスバウアー分光は、錯体化学分野に大きく貢献してきた。特に、鉄二価正八面体錯体の高スピン状態-低スピン状態間のスイッチング現象であるスピントクロスオーバー (SCO) 現象に対する貢献は顕著であり、 $^{57}\text{Fe}$  の  $\delta$  値の観測によってスピンスイッチングの on/off を見分けることが可能である。f ブロック元素では、 $^{151}\text{Eu}$ ,  $^{237}\text{Np}$  メスバウアー分光が報告されており、錯体中の f ブロック元素の結合状態に対する理解を助けてきた。

本学位論文では、上述したようなメスバウアー分光が貢献する d, f ブロック錯体化学研究について、密度汎関数法 (DFT) を用いてアプローチする。具体的には、(i) 鉄二価集積型錯体のスピンスイッチング挙動の起源に迫る研究、(ii) f ブロック錯体の結合状態に対するベンチマーク研究、(iii) マイナーアクチノイド分離挙動と結合特性の相関に対する研究の主に 3 つから構成される。



### 第一部 $\text{trans-}[\text{Fe}(\text{NCS})_2(\text{pyridine})_4]$ ユニットを持つ鉄二価集積型錯体の SCO スイッチングの起源

DFT 計算を用いた SCO 錯体についての多くの理論研究が報告されているが、SCO 現象が起こる起源を明らかにした研究はほとんどない。そこで、 $\text{trans-}[\text{Fe}(\text{NCS})_2(\text{pyridine})_4]$  をユニットとして周期的な構造を持つ集積型錯体に着目した。この錯体は、ゲスト吸脱着や集積構造の違いで SCO が起こるか否かがスイッチし、SCO を起こすものは低温で低スピン状態 (SCO-on)、起こさないものは低温で高スピン状態 (SCO-off) となる。

SCO-on/off のスイッチング挙動は、高スピン状態 (HS) と低スピン状態 (LS) のゼロ点エネルギー ( $E_0$ ) を比較することによって判断できる。ゼロ点エネルギー差を  $\Delta E_0 = E_0^{\text{HS}} - E_0^{\text{LS}}$  と定義すると、 $\Delta E_0$  が正なら SCO-on、 $\Delta E_0$  が負なら SCO-off となる。 $\text{trans-}[\text{Fe}(\text{NCS})_2(\text{pyridine})_4]$  ユニットを持つ 11 個の SCO-on モデル、7 個の SCO-off モデルを計算対象とした。モデル錯体は、単結晶構造から切り出した単核錯体とし、集積構造を考慮するため Fe 原子とピリジンからなる二面角を固定して計算を行った。

まず、様々な汎関数を用いて  $\Delta E_0$  の計算を行った。その結果、 $\Delta E_0$  の再現性は汎関数に含まれる Hartree-Fock 交換エネルギーの割合によって変化し、20% の割合を持つ B3LYP 汎関数は HS 状態を過剰に安定化し、0% の割合を持つ BP86 汎関数は LS 状態を過剰に安定化した。10% の割合を持つ TPSSh 汎関数は、11 個中 10 個の SCO-on 挙動、7 個中 6 個の SCO-off 挙動を再現し、SCO スイッチング挙動を正確に予測可能であることを明らかにした。さらに、分子軌道解析によって鉄の 3d 軌道に基づく配位子場分裂を計算し、配位

子場分裂の大きさと SCO-on/off 挙動を相関づけた。これは、Tanabe-Sugano ダイアグラムでよく知られている事実であるが、分子軌道計算に基づいた計算で、SCO スイッチングと配位子場を初めて関連付けた。

## 第二部 $^{151}\text{Eu}$ , $^{237}\text{Np}$ メスバウアー異性体シフトを用いた f ブロック錯体の結合状態に対する DFT のベンチマーク研究

メスバウアー異性体シフト ( $\delta$ ) 値は、メスバウアー元素の結合状態を敏感に表し、メスバウアー原子核位置での電子密度 ( $\rho_0$ ) に比例する。この関係性を利用して、これまでに報告されている実験値の  $\delta(\delta^{\text{exp}})$  と DFT 計算によって求めた計算値の  $\rho_0(\rho_0^{\text{calc}})$  をプロットし、線形性を比較することによって用いる計算手法の妥当性を評価できる。f ブロック化合物の結合状態を正確に再現するための計算手法は未だ確立されていない。そこで、 $^{151}\text{Eu}$ ,  $^{237}\text{Np}$  メスバウアー異性体シフト実験値を指標として、DFT による f ブロック錯体の結合状態に対するベンチマーク研究を行った。Eu, Np 錯体それぞれ 10 個のモデル錯体について計算を行い、相対論効果はゼロ次正規近似によって考慮した。

三種類の汎関数 (BP86, B3LYP, B2PLYP) を用いて  $\rho_0^{\text{calc}}$  を求め、 $\delta^{\text{exp}}$  vs  $\rho_0^{\text{calc}}$  プロットを行った。Eu における  $\delta^{\text{exp}}$  vs  $\rho_0^{\text{calc}}$  プロットの結果、一次の相関係数  $R^2$  が、BP86, B3LYP, B2PLYP でそれぞれ 0.907, 0.937, 0.999 であり、Np においてそれぞれ 0.782, 0.825, 0.901 であった。この結果から、Eu, Np 化合物どちらに対しても、BP86, B3LYP, B2PLYP の順にメスバウアー異性体シフトの再現性が増加し、B2PLYP 汎関数が最も良いパフォーマンスを示した。これは、f ブロック元素の結合性の評価が、汎関数に含まれる Hartree-Fock エネルギーの割合に依存し、53% の割合を持つ B2PLYP 汎関数が f ブロック化合物の結合状態を正確に記述することを明らかにした。

## 第三部 S, N, O ドナー抽出剤による Am/Eu 分離挙動に対する DFT アプローチ

Eu, Am は溶液中で三価が安定であり、配位子との錯形成反応において類似した配位幾何学を

示す。溶媒抽出による Am/Eu 分離実験は、用いる抽出剤によって Am/Eu 分離選択性が異なることを示してきた。例えば、S ドナーである Cyanex-301 や N ドナーである TPEN は Am を選択し、O ドナーである Cyanex-272 は Eu を選択する。抽出剤のドナー元素による分離挙動の違いを分子レベルで明らかにすることは、高レベル放射性廃棄物からのマイナーアクチノイド分離プロセスの構築に重要である。そこで、前述の S, N, O ドナー配位子による錯形成安定化エネルギーを求めることによって、抽出剤による Am/Eu 選択性の原因を調べた。

第二部のベンチマーク研究によって開発した計算手法を用いて、錯形成による安定化エネルギーを見積もった。その結果、BP86, B3LYP, B2PLYP のうち、B2PLYP 汎関数のみが、S, N, O ドナー配位子の Am/Eu 選択性を再現した。錯体分子中における  $\text{Am}^{\text{III}}$ ,  $\text{Eu}^{\text{III}}$  イオンのスピン密度を比較すると、BP86, B3LYP 汎関数は Eu の共有結合性を過大評価する傾向があり、その結果 Am/Eu 分離挙動を再現しなかったと考えられる。さらに、B2PLYP 汎関数によって得られた分子軌道を解析することにより、Am と Eu の f 軌道電子の結合性に大きな違いが見られた。Eu の 4f 電子は、S, N, O ドナー原子とほとんどイオン結合的であるのに対し、Am の 5f 電子は、S, N ドナー原子とは共有結合的、O ドナー原子とは反結合的であった。この結果は、抽出剤による Am/Eu 選択性が f 電子の共有結合性によって相関づけられることを示唆している。

## 代表的な発表論文

1. Computational study on Mössbauer isomer shifts of some organic-neptunium (IV) complexes, M. Kaneko, S. Miyashita, and S. Nakashima, *Croat. Chem. Acta* **88**, 347 (2016)
2. Bonding study on the chemical separation of Am(III) from Eu(III) by S-, N- and O-donor ligands by means of all-electron ZORA-DFT calculation, M. Kaneko, S. Miyashita, and S. Nakashima, *Inorg. Chem.* **54**, 7103 (2015)
3. Benchmark study of the Mössbauer isomer

- shifts of Eu and Np complexes by relativistic DFT calculations for understanding the bonding nature of f-block compounds, M. Kaneko, S. Miyashita, and S. Nakashima, Dalton Trans. **44**, 8080 (2015)
4. Computational study on thermal spin-crossover behavior for coordination polymers possessing *trans*-Fe(NCS)<sub>2</sub>(pyridine)<sub>4</sub> unit, M. Kaneko, and S. Nakashima, Bull. Chem. Soc. Jpn. **88**, 1164 (2015)
  5. Solvent effect on reaction rate of ruthenium-fulvalene complexes intramolecularly bridged by alkyl disulfides and the effect of chalcogen, H. Yasuhara, M. Kaneko, K. Koga, T. Tahara, and S. Nakashima, Bull. Chem. Soc. Jpn. **87**, 498 (2014)
  6. Density functional study on spin-crossover phenomena of assembled complexes, [Fe(NCX)<sub>2</sub>(bpa)<sub>2</sub>]<sub>n</sub> (X = S, Se, and BH<sub>3</sub>; bpa: 1,2-bis(4-pyridyl)ethane), M. Kaneko, S. Tokinobu, and S. Nakashima, Chem. Lett. **42**, 1432 (2013)

## 学会だより

### 1. 日本放射化学会第73回理事会 [2015学会 年度第2回理事会] 議事要録抜粋

日時：2015年12月12日(土) 13:20-16:20

場所：東大農学部2号館1階講義準備室

出席者：[会長]中西、[副会長]工藤、[理事]高橋、  
鈴木、佐々木、羽場、酒井、坂口、大槻、  
長尾、間柄、[監事]永井、末木

欠席者：[理事]橋本

オブザーバ：なし

\*委任状提出：なし

#### 報告

- 事務局報告として、前回議事録の確認、会員の  
動向・会費納入状況、会計の報告ならびにメー  
ル回議の報告がなされた。前回 APSORC への  
出資金の戻りと、余剰金の寄付の提案があり、  
扱いについては、今後検討することになった。  
また、学会には基金があり、今後の活用につい  
ても今後議論することになった。
- ネット広報委員会の活動について：JNRS-メー  
ルニュースの現状について、説明があった。ま  
た、学会ホームページの改定については、本学  
会年度中に行う旨報告があった。

#### 審議

- 2015学会年度役員選挙について、役員推薦委  
員会を設置し、規定により会長が委員長を務め  
ることになった。委員は、前回同様再任可能な  
役員を除く現役員とした。役員選挙委員会を設  
置し、佐々木理事に依頼した。
- 学会賞について、学会賞受賞候補者選考委員  
委員長に高橋理事を、学会賞事務局理事に橋本  
理事を選出した。
- APSORC 小委員会について、小委員会につい  
てその詳細を知る者が殆どおらず、また会則に  
も記述が無いため、合意が得られなかった。次

回の理事会に、百島先生をお呼びし、詳細を伺  
うことになった。

- JNRS 編集委員会規定に関して、「日本放射化  
学会誌」の記述の削除、第2条編集長および編  
集委員の推薦方法の変更、任期を3年から2年  
に、論文の区分のうち“Accounts”を削除する。  
JNRS 投稿規定に関して、「日本放射化学会誌」  
の記述の削除、論文の区分のうち“Accounts”  
を削除、別刷りを作成する場合は著者負担とす  
る旨明記する。以上承認された。JNRS 誌の編  
集委員として豊嶋厚史氏（原子力機構、核化学  
分野）、鄭建氏（放医研、環境放射能分野）の  
推薦があり、承認された。
- 学術著作権協会が、学会著作物複製使用料を預  
かっているが受け取るかどうか、著作物複製に  
対する著作権使用料徴取を学術著作権協会に  
委託するかどうか、について審議した。現在、  
日本放射化学会は法人格を持たず、料金を受け  
取れる体制にないため、複製使用料は受け取ら  
ず、学術著作権協会へ委託もしないことになっ  
た。
- 福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会」  
に報告する学会の取り組みについて議論し、学  
会として重要なことであるので、出版事業とし  
てとして取り組むべきとの提案があった。
- 環境放射能研究会に対する主催及び補助の依  
頼があった旨報告があり、承認された。

以上

### 2. 日本放射化学会第74回理事会 [2015学会 年度第3回理事会] 議事要録抜粋

日時：2016年3月5日(土) 13:20-16:30

場所：東大農学部2号館1階講義準備室

出席者：[会長]中西、[副会長]工藤、[理事]橋本、  
高橋、鈴木、佐々木、羽場、酒井、坂口、  
大槻、長尾、間柄、[監事]永井、末木

欠席者：なし

オブザーバ：百鳥

\* 委任状提出：なし

## 報告

1. 事務局報告として、前回議事録の確認、会員の動向・会費納入状況、会計、ならびにメール回議の報告がなされた。引き続き、長期未納者には、適時声掛けを行うことを確認した。
2. ネット広報委員会の活動について、メールニュースは始めてから一年たつ。ネット・広報委員会で点検し、理事会に報告することになった。
3. 日本放射化学会が主催及び補助している環境放射能研究会が、日本放射線安全管理学会第14回学術大会の余剰金を、寄付金として受け入れた旨報告があった。

## 審議

1. 百鳥先生（オブザーバ）より、APSORC開催の経緯、日本放射化学会との関係について、また理事会に設置されたことがあるAPSORC小委員会について、説明があった。しかし、APSORCに関する明確な規定が会則の事業内容に記載されておらず、APSORC小委員会に関する規定や内規はない。そこで議論の結果、小委員会のあり方、日本放射化学会のAPSORCへのサポートの仕方、会則や規定について、議論していくことになった。
2. 選挙管理委員会候補者の推薦があり、承認された。また、選挙スケジュールについて説明があり了承された。投票用紙について提案があり、問い合わせ先を変更のうえ、承認された。推薦委員会より、選挙公示に向け会長候補者の公募を行う旨、報告があった。
3. 学会賞二件及び奨励賞四件の推薦があったとの報告があった。受賞候補者選考委員会の設置について報告があり、両賞共通としたとして承認された。なお、候補者の中に長期会費滞納者があり、選考の対象外とすることとし、学会賞事務局より、推薦者に通知することになった。
4. 永年会員として、5名の申請があり、承認された。

5. 第61回年会・討論会の開催場所について議論した。渉外担当理事が、交渉にあたることとなった。
6. 「福島復興・廃炉推進に貢献する学協会連絡会」に関する報告があり、議論の結果今後とも関与していくことになった。また、福島事故に関連する学会の取り組みについてまとめていく旨報告があり、出版事業として進めていくことが了承された。

以上

3. 日本放射化学会第75回理事会 [2015学年度第4回理事会]は、2016年6月11日(土)に開催されましたが、議事要録未承認のため、次号にて報告します。

## 4. 会員動向 (平成28年2月～平成28年6月)

### 新規入会 (正会員)

氏名	所属
該当者なし	

### 新規入会 (学生会員)

氏名	所属
金子 栞由	新潟大学理学部化学科核・放射化学研究室
土谷 翔太	新潟大学理学部化学科核・放射化学研究室
大橋 美奈子	新潟大学理学部化学科核・放射化学研究室
富塚 知博	新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程数理物質科学専攻化学コース核化学研究室

### 所属変更 (個人会員)

氏名	所属
緒方 良至	名古屋大学アイソトープ総合センター分館
小田 寛貴	名古屋大学宇宙地球環境研究所
橋本 和幸	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究

		究部門放射線生物応用研究部東海（原子力研）駐在
鈴木 達也		長岡技術科学大学原子力システム安全工学専攻
天野 光		認定 NPO いわき放射能市民測定室
須郷 由美		量子科学技術研究開発機構
松村 達郎		日本原子力研究開発機構原子力科学研究部門原子力基礎工学研究センター分離変換技術開発ディビジョン分離変換サイクル開発グループ
宮本 ユタカ		日本原子力研究開発機構安全研究センター保障措置分析化学研究グループ
百島 則幸		九州環境管理協会
石井 康雄		（独）日本原子力研究開発機構福島研究開発部門福島環境安全センター環境動態研究グループ
橋本 雅史		量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所
日高 洋		名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻
宮崎 淳		北陸大学薬学部
西中 一郎		量子科学技術研究開発機構量子ビーム応用研究部門高崎量子応用研究所放射線生物応用研究部東海（原子力研）駐在
目黒 義弘		日本原子力研究開発機構バックエンド研究開発部門廃棄物対策・埋設事業統括部
白橋 浩一		日本原子力研究開発機構原子力緊急時支援・研修センター原子力防災研修課
青野 竜士		国立研究開発法人日本原子力研究開発機構バックエンド技術部放射性廃棄物管理技術課
中山 真一		日本原子力研究開発機構
佐藤 志彦		日本原子力研究開発機構廃炉国際共同研究センター
金子 政志		日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究センター

## 所属変更（学生会員）

氏名	所属
山田 記大	金沢大学大学院自然科学研究科物質科学専攻
藤田 将史	大阪大学大学院理学研究科化学専攻放射化学研究室

## 退会（正会員）

氏名	氏名
藤原 健壯	北川 潤一
金井 豊	池田 泰久
深澤 哲生	

## 退会（学生会員）

氏名	氏名
鈴木 開登	藤澤 照功
大江 崇太	谷津 由香里
金谷 佑亮	清家 萌
添盛 晃久	

## 逝去退会（正会員）

氏名	氏名
中村 彰夫	尾崎 卓郎

## 会費未納退会（学生会員）

氏名	氏名
福田 芳樹	刈屋 佳樹
角田 之尚	北崎 隆悟
林 和憲	千葉 和喜
押見 吉成	只井 智浩

## 退会（賛助会員）

社名・団体名
富士フィルム RI ファーマ株式会社研究部

## 2016 日本放射化学会年会・第60回放射化学討論会プログラム

口頭発表 発表時間 15 分以内、討論含め 20 分以内  
 ポスター発表 ショートプレゼンテーション 1 分以内  
 ポスターサイズ 90 cm (横) × 120 cm (縦) 以内  
 会場 新潟大学五十嵐キャンパス 総合教育研究棟  
 S会場 大講義室 E260  
 A会場 講義室 B255  
 B会場 講義室 B251

(\*は若手優秀発表賞対象講演)

## 第1日 9月10日(土)

## A 会場

## B 会場

9:00

受付

10:00

## 福島事故関連 1

座長: 田上恵子

- 1A01\*** 放射性セシウムの河川から海水への移行に伴う懸濁粒子からの溶脱に関する GAM モデルからの考察  
 (東大院理<sup>1</sup>、中国科学院<sup>2</sup>、筑波大<sup>3</sup>、東大 RIC<sup>4</sup>、東京海洋大<sup>5</sup>) ○三浦 輝<sup>1</sup>、Fan Qiaohui<sup>2</sup>、栗原雄一<sup>1</sup>、坂口 綾<sup>3</sup>、桧垣 正吾<sup>4</sup>、石丸 隆<sup>5</sup>、神田穰太<sup>5</sup>、高橋嘉夫<sup>1</sup>
- 1A02** セシウムやヨウ素の移行挙動に及ぼす天然有機物の影響  
 (東大院理<sup>1</sup>、中国科学院<sup>2</sup>、JAEA<sup>3</sup>) ○高橋嘉夫<sup>1</sup>、三浦 輝<sup>1</sup>、Fan Qiaohui<sup>2</sup>、田中万也<sup>3</sup>
- 1A03** コシアブラの放射性セシウム蓄積経過  
 (東大院農<sup>1</sup>、京大院情報<sup>2</sup>、放射線安全フォーラム<sup>3</sup>、伊達市役所<sup>4</sup>) ○二瓶直登<sup>1</sup>、大手信人<sup>2</sup>、多田順一郎<sup>3</sup>、黒沢 崇<sup>4</sup>、根本圭介<sup>1</sup>

## 核化学 1

座長: 初川雄一

- 1B01** <sup>48</sup>Cr の半減期精密測定  
 (東北大電子光セ<sup>1</sup>、京大炉<sup>2</sup>、理研仁科セ<sup>3</sup>) ○菊永英寿<sup>1</sup>、高宮幸一<sup>2</sup>、大槻 勤<sup>2</sup>、羽場宏光<sup>3</sup>
- 1B02\*** 反跳核捕集し、化学調製した <sup>229m</sup>Th 試料の光子測定  
 (阪大院理<sup>1</sup>、京大炉<sup>2</sup>、東北大金研・大洗<sup>3</sup>) ○安田勇輝<sup>1</sup>、笠松良崇<sup>1</sup>、重河優大<sup>1</sup>、高宮幸一<sup>2</sup>、大槻 勤<sup>2</sup>、三頭聡明<sup>3</sup>、篠原 厚<sup>1</sup>
- 1B03\*** 80 MeV 単色中性子による隕石構成元素に対する核反応断面積の測定  
 (阪大院理<sup>1</sup>、京大炉<sup>2</sup>、阪大 RCNP<sup>3</sup>、KEK<sup>4</sup>、JAEA<sup>5</sup>、理研<sup>6</sup>、パデュー大<sup>7</sup>、カリフォルニア大<sup>8</sup>) ○南部明弘<sup>1</sup>、二宮和彦<sup>1</sup>、重河優大<sup>1</sup>、高橋成人<sup>1</sup>、篠原 厚<sup>1</sup>、関本 俊<sup>2</sup>、八島 浩<sup>2</sup>、嶋 達志<sup>3</sup>、萩原雅之<sup>4</sup>、岩元洋介<sup>5</sup>、柴田誠一<sup>6</sup>、Marc.W.Caffee<sup>7</sup>、西泉邦彦<sup>8</sup>

休憩

11:10

## 福島事故関連 2

座長: 箕輪はるか

- 1A04\*** シイタケ培地中でのセシウムの存在形態  
 (東北大院理<sup>1</sup>、株式会社キノックス<sup>2</sup>) ○村野井 友<sup>1</sup>、木野康志<sup>1</sup>、板橋康弘<sup>2</sup>、中島丈博<sup>2</sup>、郡山慎一<sup>2</sup>、木村栄一<sup>2</sup>、嶋原 隆<sup>2</sup>
- 1A05\*** ウシの歯の放射能測定によるウシ生息域での Sr-90、Cs-137 汚染の推定

## 核化学 2

座長: 浅井雅人

- 1B04\*** <sup>70</sup>Zn(*d, an*)<sup>67</sup>Cu 反応による頒布用精製 <sup>67</sup>Cu の製造  
 (理研仁科セ<sup>1</sup>、RI 協会<sup>2</sup>) ○矢納慎也<sup>1</sup>、羽場宏光<sup>1</sup>、柴田誠一<sup>1</sup>、小森有希子<sup>1</sup>、高橋和也<sup>1</sup>、渡邊慶子<sup>1</sup>、脇谷雄一郎<sup>2</sup>、山田崇裕<sup>2</sup>、松本幹雄<sup>2</sup>

- (東北大院理<sup>1</sup>、東北大病院<sup>2</sup>、東北大院歯<sup>3</sup>、東北大災害研<sup>4</sup>、岩手大理工<sup>5</sup>、東北大院農<sup>6</sup>、東北大高教機構<sup>7</sup>、東北大加齢研<sup>8</sup>) ○小荒井一真<sup>1</sup>、木野康志<sup>1</sup>、西山純平<sup>1</sup>、高橋 温<sup>2</sup>、鈴木敏彦<sup>3,4</sup>、清水良央<sup>3</sup>、千葉美麗<sup>3</sup>、小坂 健<sup>3,4</sup>、佐々木啓一<sup>3</sup>、福田智一<sup>5</sup>、磯貝恵美子<sup>6</sup>、岡壽崇<sup>1,7</sup>、関根 勉<sup>1,7</sup>、福本 学<sup>8</sup>、篠田 壽<sup>3</sup>
- 1A06\*** 福島第一原発事故被災ウシの硬組織中のSr-90濃度の経時変化  
(東北大院理<sup>1</sup>、東北大院歯<sup>2</sup>、東北大病院<sup>3</sup>、東北大災害研<sup>4</sup>、岩手大理工<sup>5</sup>、東北大院農<sup>6</sup>、東北大高教機構<sup>7</sup>、東北大加齢研<sup>8</sup>) ○西山純平<sup>1</sup>、小荒井一真<sup>1</sup>、木野康志<sup>1</sup>、清水良央<sup>2</sup>、高橋 温<sup>3</sup>、鈴木敏彦<sup>2,4</sup>、千葉美麗<sup>2</sup>、小坂 健<sup>2,4</sup>、佐々木啓一<sup>2</sup>、福田智一<sup>5</sup>、磯貝恵美子<sup>6</sup>、岡壽崇<sup>1,7</sup>、関根 勉<sup>1,7</sup>、福本 学<sup>8</sup>、篠田 壽<sup>2</sup>

- 1B05** 50MeV 重陽子照射で発生する高速中性子による医療用放射性核種の合成研究  
(原子力機構<sup>1</sup>、量研機構<sup>2</sup>、千代田テクノル<sup>3</sup>) ○塚田和明<sup>1</sup>、橋本和幸<sup>2</sup>、初川雄一<sup>2</sup>、川端方子<sup>2,3</sup>、佐伯秀也<sup>2,3</sup>、湊 太志<sup>1</sup>、岩本信之<sup>1</sup>、永井泰樹<sup>2</sup>、須郷由美<sup>2</sup>、渡辺 智<sup>2</sup>、石岡典子<sup>2</sup>
- 1B06** GARIS-IIを用いたホットフュージョン反応 $^{48}\text{Ca}+^{238}\text{U}\rightarrow^{286}\text{Cn}^*$ に関する研究  
(理研仁科セ<sup>1</sup>、山形大<sup>2</sup>、埼玉大<sup>3</sup>、新潟大院自<sup>4</sup>) ○加治大哉<sup>1</sup>、森本幸司<sup>1</sup>、羽場宏光<sup>1</sup>、若林泰生<sup>1</sup>、武山美麗<sup>1,2</sup>、山木さやか<sup>1,3</sup>、小森有希子<sup>1</sup>、矢納慎也<sup>1</sup>、後藤真一<sup>4</sup>

12:15

原子核プローブ  
分科会

核化学  
分科会

13:20

福島事故関連 3

座長: 末木啓介

- 1A07\*** 福島県川俣町で採取した土壌のSr-90の深度分布  
(阪大院理<sup>1</sup>、阪大RIセ<sup>2</sup>、筑波大<sup>3</sup>) ○鈴木杏菜<sup>1</sup>、張 子見<sup>1</sup>、二宮和彦<sup>1</sup>、山口喜朗<sup>2</sup>、高橋純子<sup>3</sup>、恩田裕一<sup>3</sup>、篠原 厚<sup>1</sup>
- 1A08** 東電福島原発事故直後に採取された大気浮遊塵試料中の $^{129}\text{I}/^{131}\text{I}$ 比  
(首都大院理工<sup>1</sup>、RESTEC<sup>2</sup>、東大院工<sup>3</sup>、都産技研セ<sup>4</sup>、理研仁科セ<sup>5</sup>、東大MALT<sup>6</sup>、日大文理<sup>7</sup>、京大原子炉<sup>8</sup>) ○海老原 充<sup>1</sup>、大浦泰嗣<sup>1</sup>、白井直樹<sup>1</sup>、鶴田治雄<sup>2</sup>、森口祐一<sup>3</sup>、永川栄泰<sup>4</sup>、櫻井 昇<sup>4</sup>、羽場宏光<sup>5</sup>、松崎浩之<sup>6</sup>、山形武靖<sup>7</sup>、永井尚生<sup>7</sup>、関本 俊<sup>8</sup>
- 1A09** 東電福島原発事故直後に採取された大気浮遊塵試料のオートラジオグラフと $^{129}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ 比  
(首都大院理工<sup>1</sup>、RESTEC<sup>2</sup>、JAXA<sup>3</sup>、東大院工<sup>4</sup>、国環研<sup>5</sup>、都産技研<sup>6</sup>、理研仁科セ<sup>7</sup>、東大博物館<sup>8</sup>) ○大浦泰嗣<sup>1</sup>、海老原 充<sup>1</sup>、白井直樹<sup>1</sup>、鶴田治雄<sup>2</sup>、中島映至<sup>3</sup>、森口祐一<sup>4</sup>、大原利真<sup>5</sup>、永川栄泰<sup>6</sup>、櫻井 昇<sup>6</sup>、羽場宏光<sup>7</sup>、松崎浩之<sup>8</sup>

核化学 3

座長: 羽場宏光

- 1B07\*** 103番元素ローレンシウム(Lr)のタンタル金属表面における吸着挙動  
(茨城大<sup>1</sup>、原子力機構<sup>2</sup>、新潟大<sup>3</sup>、広島大<sup>4</sup>、名古屋大<sup>5</sup>、大阪大<sup>6</sup>、徳島大<sup>7</sup>、マインツ大<sup>8</sup>、HIM<sup>9</sup>、GSI<sup>10</sup>、PSI<sup>11</sup>、ベルン大<sup>12</sup>、FLNR<sup>13</sup>) ○金谷佑亮<sup>1,2</sup>、佐藤哲也<sup>2</sup>、浅井雅人<sup>2</sup>、塚田和明<sup>2</sup>、豊嶋厚史<sup>2</sup>、水飼秋菜<sup>1,2</sup>、長 明彦<sup>2</sup>、牧井宏之<sup>2</sup>、西尾勝久<sup>2</sup>、廣瀬健太郎<sup>2</sup>、永目諭一郎<sup>1,2</sup>、冨塚知博<sup>3</sup>、白井香里<sup>3</sup>、佐藤大輔<sup>3</sup>、大江一弘<sup>3</sup>、後藤真一<sup>3</sup>、宮下直<sup>4</sup>、新宮一駿<sup>4</sup>、名桑 良<sup>4</sup>、柴田理尋<sup>5</sup>、鎌田裕生<sup>5</sup>、笠松良崇<sup>6</sup>、重河優大<sup>6</sup>、阪間 稔<sup>7</sup>、Ch. E. Düllmann<sup>8,9,10</sup>、K. Eberhardt<sup>8,9</sup>、J. Grund<sup>8</sup>、J. V. Kratz<sup>8</sup>、J. Runke<sup>8</sup>、P. Thörler-Pospiech<sup>8,9</sup>、N. Trautmann<sup>8</sup>、V. Pershina<sup>10</sup>、M. Schädel<sup>10</sup>、A. Yakushev<sup>9,10</sup>、R. Eichler<sup>11,12</sup>、P. Steinegger<sup>13</sup>
- 1B08** 重アクチノイド元素の第一イオン化エネルギー  
(原子力機構<sup>1</sup>、茨城大院<sup>2</sup>、徳島大<sup>3</sup>、新潟大<sup>4</sup>、大阪大<sup>5</sup>、理研<sup>6</sup>、フローニンゲン大<sup>7</sup>、GSI<sup>8</sup>、マインツ大<sup>9</sup>、CERN<sup>10</sup>) ○佐藤哲也<sup>1</sup>、浅井雅人<sup>1</sup>、金谷佑亮<sup>1,2</sup>、塚田和明<sup>1</sup>、豊嶋厚史<sup>1</sup>、水飼秋菜<sup>1,2</sup>、武田晋作<sup>3</sup>、阪間 稔<sup>3</sup>、佐藤大輔<sup>4</sup>、

大江一弘<sup>4</sup>、重河優大<sup>5</sup>、牧井宏之<sup>1</sup>、長 明彦<sup>1</sup>、市川進一<sup>6</sup>、永目諭一郎<sup>1</sup>、A. Borschevsky<sup>7</sup>、M. Schädel<sup>1,8</sup>、Ch. E. Düllmann<sup>8,9</sup>、J. V. Kratz<sup>9</sup>、T. Stora<sup>10</sup>

**1B09\*** 104番元素 Rf の同族元素 Zr、Hf の Aliquat 336/HCl 系での溶媒抽出挙動  
(阪大院理<sup>1</sup>、阪大理<sup>2</sup>、理研仁科セ<sup>3</sup>) ○近藤成美<sup>1</sup>、大内昂輝<sup>1</sup>、永瀬将浩<sup>2</sup>、重河優大<sup>1</sup>、安田勇輝<sup>1</sup>、笠松良崇<sup>1</sup>、篠原 厚<sup>1</sup>、工藤祐生<sup>3</sup>

休 憩

14:30

#### 福島事故関連 4

座長: 齊藤 敬

**1A10** 福島第一原発北西部における  $^{110m}\text{Ag}/^{137}\text{Cs}$  放射能比と放射性粒子の関係  
(原子力機構<sup>1</sup>、筑波大<sup>2</sup>) ○佐藤志彦<sup>1</sup>、末木啓介<sup>2</sup>、笹 公和<sup>2</sup>

**1A11\*** 原子力事故により放出される放射性物質の森林植生への沈着・溶離挙動の研究  
(阪大理<sup>1</sup>、阪大RIセ<sup>2</sup>、筑波大生命環境<sup>3</sup>) ○張子見<sup>1</sup>、二宮和彦<sup>1</sup>、吉村 崇<sup>2</sup>、古川 純<sup>3</sup>、篠原 厚<sup>1</sup>

#### 核化学 4

座長: 塚田和明

**1B10** 107番元素ボーリウムの溶液化学研究に向けた GARIS ガスジェット装置による Re 同位体の製造とフロー溶媒抽出器を用いた Re のオンライン抽出

(理研仁科セ<sup>1</sup>、新潟大院自然<sup>2</sup>、原子力機構<sup>3</sup>、筑波大数理<sup>4</sup>、東北大電子光セ<sup>5</sup>、阪大院理<sup>6</sup>、オスロ大<sup>7</sup>) ○小森有希子<sup>1</sup>、羽場宏光<sup>1</sup>、大江一弘<sup>2</sup>、豊嶋厚史<sup>3</sup>、水飼秋菜<sup>3</sup>、佐藤大輔<sup>2</sup>、本山李沙<sup>2</sup>、矢納慎也<sup>1</sup>、渡邊慶子<sup>1</sup>、佐藤 望<sup>1</sup>、山下さやか<sup>1</sup>、田中泰貴<sup>1</sup>、加治大哉<sup>1</sup>、森本幸司<sup>1</sup>、坂口 綾<sup>4</sup>、稲垣純平<sup>4</sup>、菊永英寿<sup>5</sup>、重河優大<sup>6</sup>、笠松良崇<sup>6</sup>、Jon Petter Omtvedt<sup>7</sup>

**1B11\*** Rf 同族元素 Zr、Hf の塩化物に対する等温ガスクロマトグラフィ  
(新潟大院自然<sup>1</sup>、新潟大理<sup>2</sup>) ○白井香里<sup>1</sup>、押見吉成<sup>1</sup>、後藤真一<sup>1</sup>、大江一弘<sup>1</sup>、工藤久昭<sup>2</sup>

S 会場

15:20

#### ポスター発表ショートプレゼンテーション

(座長: 後藤真一)

16:20

#### ポスターセッション

奇数番号 責任時間 (50分)

17:10

偶数番号 責任時間 (50分)

18:00

A 会場  
若手の会

B 会場  
放射化分析拡大幹事会

- P01\*** 谷津干潟底質における福島第一原子力発電所事故由来の放射性セシウムの動態  
(東大院総合) ○山本 駿、添盛晃久、小豆川勝見、松尾基之
- P02\*** 多摩川における放射性セシウムのキャラクタリゼーション  
(明大院理工<sup>1</sup>、明大研究・知財戦略機構<sup>2</sup>、明大理工<sup>3</sup>) ○奥村真吾<sup>1</sup>、越智康太郎<sup>1</sup>、萩原健太<sup>2</sup>、中村利廣<sup>3</sup>、小池裕也<sup>3</sup>
- P03** 東京湾における海洋放射能調査—海底土、海水中のセシウム 134、137 濃度の経年変化—  
(日本分析センター) ○豊岡慎介、新田 濟、金子健司、岸本武士、磯貝啓介
- P04** 赤城大沼周辺土壌の放射性セシウム濃度分布  
(東京都市大工<sup>1</sup>、群馬水試<sup>2</sup>、国環研<sup>3</sup>) ○長橋孝将<sup>1</sup>、松浦治明<sup>1</sup>、今川 峻<sup>1</sup>、内山孝文<sup>1</sup>、鈴木究真<sup>2</sup>、湯浅由美<sup>2</sup>、渡辺 峻<sup>2</sup>、新井 肇<sup>2</sup>、野原精一<sup>3</sup>、岡田往子<sup>1</sup>
- P05** 福島原発事故以降の河川における溶存態と底質土におけるセシウム同位体比変化  
(筑波大数理物<sup>1</sup>、筑波大応用加速器<sup>2</sup>、原子力機構<sup>3</sup>、筑波大数理物系<sup>4</sup>、東大 MALT<sup>5</sup>) ○富田涼平<sup>1</sup>、松中哲也<sup>2</sup>、本多真紀<sup>1</sup>、佐藤志彦<sup>3</sup>、松村万寿美<sup>2</sup>、高橋 努<sup>2</sup>、坂口 綾<sup>4</sup>、松崎浩之<sup>5</sup>、笹 公和<sup>2,4</sup>、末木啓介<sup>4</sup>
- P06** イネ中の微量元素及び放射性セシウムの分析  
(静岡大理<sup>1</sup>、徳島大 ARREMC<sup>2</sup>、東京大 RIC<sup>3</sup>、イング<sup>4</sup>、名古屋大名誉教授<sup>5</sup>、RI 協会滝沢研<sup>6</sup>、岩手医大サイクロ<sup>7</sup>) ○矢永誠人<sup>1</sup>、三好弘一<sup>2</sup>、桧垣正吾<sup>3</sup>、森 一幸<sup>4</sup>、西澤邦秀<sup>5</sup>、後藤祥子<sup>6</sup>、世良耕一郎<sup>7</sup>
- P07\*** 福島原発事故に由来する放射性セシウムを含む不溶性粒子の生成模擬実験  
(阪大院理<sup>1</sup>、阪大 RI セ<sup>2</sup>) ○藤田将史<sup>1</sup>、二宮和彦<sup>1</sup>、吉村 崇<sup>2</sup>、篠原 厚<sup>1</sup>
- P08\*** 都市ごみ焼却飛灰の撥水処理による放射性セシウムの溶出抑制  
(明大院理工<sup>1</sup>、明大研究・知財戦略機構<sup>2</sup>、明大理工<sup>3</sup>、リガク<sup>4</sup>) ○福田大輔<sup>1</sup>、岩鼻雄基<sup>2</sup>、久米冬馬<sup>3</sup>、藤井健悟<sup>1</sup>、萩原健太<sup>2</sup>、大淵敦司<sup>4</sup>、小池裕也<sup>3</sup>
- P09** 自動分析装置による食品試料中のストロンチウム 90 分析  
(日本分析センター<sup>1</sup>、柴崎製作所<sup>2</sup>) ○伴場 滋<sup>1</sup>、松江登久<sup>2</sup>、藤森 憲<sup>2</sup>、瀬戸博文<sup>2</sup>、児玉理恵<sup>2</sup>、森本隆夫<sup>1</sup>、柴崎昌彦<sup>2</sup>
- P10** イオン交換法を用いた海水中放射性ストロンチウムの化学分離  
(慈恵医大・アイソトープ<sup>1</sup>、(株) 日立製作所・ヘルスケア BU<sup>2</sup>、名大・RIC 分館<sup>3</sup>) ○箕輪はるか<sup>1</sup>、加藤結花<sup>2</sup>、緒方良至<sup>3</sup>
- P11\*** 固相抽出ディスクを用いた放射性ストロンチウム分析用線源の迅速作製法  
(明大院理工<sup>1</sup>、明大研究・知財戦略機構<sup>2</sup>、リガク<sup>3</sup>、明大理工<sup>4</sup>) ○藤井健悟<sup>1</sup>、栗原雄一<sup>2</sup>、大淵敦司<sup>3</sup>、中村利廣<sup>4</sup>、小池裕也<sup>4</sup>
- P12** 淡水系地下水中の Ra 同位体  
(JAEA<sup>1</sup>、金沢大 LLRL<sup>2</sup>、筑波大<sup>3</sup>) ○富田純平<sup>1</sup>、宮田佳樹<sup>2</sup>、濱 克宏<sup>1</sup>、坂口 綾<sup>3</sup>、長尾誠也<sup>2</sup>、山本政儀<sup>2</sup>
- P13\*** ケイ酸塩鉱物中トリウムおよびラジウムの同位体の存在形態  
(明大院理工<sup>1</sup>、明大研究・知財戦略機構<sup>2</sup>、明大理工<sup>3</sup>) ○塩原良建<sup>1</sup>、栗原雄一<sup>2</sup>、中村利廣<sup>3</sup>、小池裕也<sup>3</sup>
- P14** TEVA レジンディスクを用いた土壌中に含まれるプルトニウム迅速定量法の検討  
(金沢大院自然<sup>1</sup>、金沢大学際セ<sup>2</sup>、金沢大理工<sup>3</sup>) ○山守航平<sup>1</sup>、上杉正樹<sup>2</sup>、横山明彦<sup>3</sup>

- P15** 粒子状プルトニウムの精製時期推定のためのアメリカシウム $\alpha$ 線測定法の検討  
(原子力機構) ○安田健一郎、鈴木大輔、金澤和仁、宮本ユタカ、江坂文孝、間柄正明
- P16** アクチノイドを含む全自動極微量多元素逐次分離法の開発  
(原子力機構) ○宮本ユタカ、安田健一郎、間柄正明
- P17** 電子スピン共鳴法による小児の外部被ばく線量の推定  
(東北大高教機構<sup>1</sup>、東北大院理<sup>2</sup>、東北大学病院<sup>3</sup>、東北大院歯<sup>4</sup>) ○岡 壽崇<sup>1,2</sup>、高橋 温<sup>3</sup>、小荒井一真<sup>2</sup>、西山純平<sup>2</sup>、木野康志<sup>2</sup>、関根 勉<sup>1,2</sup>、清水良央<sup>4</sup>、千葉美麗<sup>4</sup>、鈴木敏彦<sup>4</sup>、小坂 健<sup>4</sup>、佐々木啓一<sup>4</sup>、篠田 壽<sup>4</sup>
- P18** 福島環境安全センターにおける環境回復への取り組み  
(原子力機構福島) ○阿部寛信、吉川英樹、時澤孝之、浅妻新一郎
- P19** 福島山地森林における地表流出物質と空間線量率の推移  
(原子力機構福島) ○石井康雄、三田地勝昭、阿部寛信、新里忠史
- P20** 放射性物質の大気中での輸送を担うエアロゾル粒子の平均粒径と化学形  
(信州大教育<sup>1</sup>、信州大院教育<sup>2</sup>) ○村松久和<sup>1</sup>、松原梨沙子<sup>1</sup>、樋渡瑞幹<sup>2</sup>、近藤 茜<sup>1</sup>
- P21** 日本国内全域における表層土壌中<sup>129</sup>I調査 – 福島第一原発事故の影響 –  
(日本分析センター) ○王 暁水、山道美和子、篠原宏文、伴場 滋、太田裕二、磯貝啓介
- P22\*** 北極海-北太平洋における海水中ヨウ素129の濃度分布  
(日大院総合基<sup>1</sup>、日大文理<sup>2</sup>、JAMSTEC<sup>3</sup>、東大博物館<sup>4</sup>) ○工藤 輝<sup>1</sup>、山形武靖<sup>2</sup>、永井尚生<sup>2</sup>、熊本雄一郎<sup>3</sup>、西野茂人<sup>3</sup>、松崎浩之<sup>4</sup>
- P23** 新潟県内の環境水中トリチウム濃度レベル  
(新潟県放射線監視センター) ○清野詩子、鴻巣祐也、山崎興樹、丸田文之
- P24\*** 光造形方式3Dプリンタと天然放射性核種を利用した模擬ガンマ線源の開発  
(尚絅学院大生活環境<sup>1</sup>、明治大理工<sup>2</sup>、大阪大安全衛生<sup>3</sup>) ○西間木史織<sup>1</sup>、小池裕也<sup>2</sup>、高橋賢臣<sup>3</sup>、齊藤 敬<sup>1</sup>
- P25** 青銅器の<sup>14</sup>C年代測定のための試料調製法の開発 – 塩基性炭酸銅・緑青・孔雀石の自己分解温度について –  
(名大ISEE<sup>1</sup>、元興寺文化財研<sup>2</sup>) ○小田寛貴<sup>1</sup>、山田哲也<sup>2</sup>、塚本敏夫<sup>2</sup>
- P26** CO<sub>2</sub> ガスイオン源を用いた迅速<sup>14</sup>C-AMSの開発  
(筑波大AMS) ○松中哲也、笹 公和、細谷青児、高橋 努、松村万寿美、末木啓介
- P27\*** フローインジェクション分析法を利用した4族元素Zr、Hfのキレート抽出  
(新潟大院自<sup>1</sup>、新潟大理<sup>2</sup>、理研仁科セ<sup>3</sup>) ○山田亮平<sup>1</sup>、大江一弘<sup>1</sup>、後藤真一<sup>1</sup>、工藤久昭<sup>2</sup>、羽場宏光<sup>3</sup>、小森有希子<sup>3</sup>
- P28** Rfの同族元素Zr、Hfの4-イソプロピルトロポロンを用いた溶媒抽出挙動  
(新潟大院自<sup>1</sup>、新潟大理<sup>2</sup>、理研仁科セ<sup>3</sup>) ○大江一弘<sup>1</sup>、山田亮平<sup>1</sup>、後藤真一<sup>1</sup>、工藤久昭<sup>2</sup>、羽場宏光<sup>3</sup>、小森有希子<sup>3</sup>
- P29\*** 5族元素Nb、Taのフッ化水素酸からのAliquat 336樹脂への抽出：分配係数の抽出剤濃度依存性の検討  
(新潟大院自<sup>1</sup>、理研仁科セ<sup>2</sup>、原子力機構<sup>3</sup>、東北大電子光セ<sup>4</sup>、新潟大理<sup>5</sup>) ○佐藤大輔<sup>1</sup>、村上昌史<sup>1</sup>、大江一弘<sup>1</sup>、本山李沙<sup>1</sup>、羽場宏光<sup>2</sup>、小森有希子<sup>2</sup>、豊嶋厚史<sup>3</sup>、水飼秋菜<sup>3</sup>、菊永英寿<sup>4</sup>、後藤真一<sup>1</sup>、工藤久昭<sup>5</sup>

- P30\*** 5族元素 Nb, Ta の塩酸溶液からのトリイソオクチルアミンによる溶媒抽出—Ta トレーサー調製法の影響—  
(新潟大院自<sup>1</sup>、原子力機構<sup>2</sup>、理研仁科セ<sup>3</sup>、新潟大理<sup>4</sup>) ○本山李沙<sup>1</sup>、大江一弘<sup>1</sup>、村上昌史<sup>2</sup>、羽場宏光<sup>3</sup>、後藤真一<sup>1</sup>、工藤久昭<sup>4</sup>
- P31\*** フロー抽出装置を用いたフッ化水素酸-Aliquat336系におけるタングステンの溶媒抽出  
(茨大院理工<sup>1</sup>、原子力機構<sup>2</sup>、理研仁科セ<sup>3</sup>) ○水飼秋菜<sup>1,2</sup>、豊嶋厚史<sup>2</sup>、小森有希子<sup>3</sup>、羽場宏光<sup>3</sup>、浅井雅人<sup>2</sup>、塚田和明<sup>2</sup>、佐藤哲也<sup>2</sup>、永目諭一郎<sup>1,2</sup>
- P32** アスタチンの酸化還元と溶媒抽出挙動  
(原子力機構先端研<sup>1</sup>、阪大院理<sup>2</sup>、理研仁科セ<sup>3</sup>、阪大理<sup>4</sup>、阪大 RI セ<sup>5</sup>) ○豊嶋厚史<sup>1,2,3</sup>、神田晃充<sup>2</sup>、池田卓海<sup>4</sup>、吉村 崇<sup>5</sup>、篠原 厚<sup>2</sup>、矢納慎也<sup>3</sup>、小森有希子<sup>3</sup>、羽場宏光<sup>3</sup>
- P33** 重陽子照射で発生する加速器中性子によって製造するがん治療用<sup>67</sup>Cuの高純度化に関する検討  
(量研機構<sup>1</sup>、千代田テクノ<sup>2</sup>、原子力機構<sup>3</sup>) ○橋本和幸<sup>1</sup>、川端方子<sup>2</sup>、佐伯秀也<sup>2</sup>、佐藤俊一<sup>2</sup>、塚田和明<sup>3</sup>、須郷由美<sup>1</sup>、永井泰樹<sup>1</sup>、初川雄一<sup>1</sup>、渡辺 智<sup>1</sup>、石岡典子<sup>1</sup>
- P34\*** <sup>211</sup>Rn-<sup>211</sup>At ジェネレーター開発を目的としたシリンジ密封抽出系の At/Rn 分離係数の研究  
(金沢大院自然<sup>1</sup>、金沢大理工<sup>2</sup>、量研機構量子ビーム<sup>3</sup>、金沢大医薬保健<sup>4</sup>) ○山田記大<sup>1</sup>、新裕喜<sup>2</sup>、大江崇太<sup>2</sup>、村上拳冬<sup>2</sup>、橋本和幸<sup>3</sup>、西中一朗<sup>3</sup>、鷲山幸信<sup>4</sup>、横山明彦<sup>2</sup>
- P35\*** 樹脂担持有機スズ試薬を用いた <sup>211</sup>At 分離/標識の試み  
(阪大院理<sup>1</sup>、原子力機構先端セ<sup>2</sup>、阪大理<sup>3</sup>、阪大 RI セ<sup>4</sup>) ○神田晃充<sup>1</sup>、豊嶋厚史<sup>2</sup>、池田卓海<sup>3</sup>、吉村 崇<sup>4</sup>、篠原 厚<sup>1</sup>
- P36** リアルタイム RI イメージングシステムを用いた植物体内元素動態の可視化技術の開発  
(東大院農<sup>1</sup>、JST PRESTO<sup>2</sup>) ○杉田亮平<sup>1</sup>、小林奈通子<sup>1</sup>、廣瀬 農<sup>1</sup>、田野井慶太郎<sup>1,2</sup>、中西友子<sup>1</sup>
- P37\*** J-PARC MUSE の大強度ミュオンビームを用いたミュオン原子取り出し実験  
(阪大院理<sup>1</sup>、高エネ研<sup>2</sup>) ○吉田 剛<sup>1</sup>、二宮和彦<sup>1</sup>、稲垣 誠<sup>1</sup>、豊田岐聡<sup>1</sup>、青木 順<sup>1</sup>、河村成肇<sup>2</sup>、三宅康博<sup>2</sup>、篠原 厚<sup>1</sup>
- P38\*** メスbauer分光法によるコンドライト隕石中の鉄含有鉱物組成の研究  
(金沢大院自然<sup>1</sup>、金沢大理工<sup>2</sup>、首都大院理工<sup>3</sup>) ○中川真結<sup>1</sup>、加納康大<sup>1</sup>、佐藤 渉<sup>1,2</sup>、海老原 充<sup>3</sup>
- P39** 鳥海山麓埋木及びその灰に含まれる鉄の化学状態  
(秋県大木研<sup>1</sup>、成蹊大理工<sup>2</sup>、大同大教養<sup>3</sup>) ○山内 繁<sup>1</sup>、栗本康司<sup>1</sup>、山峯崇之<sup>2</sup>、酒井陽一<sup>3</sup>
- P40\*** Sr(Sn<sub>1-x</sub>Fe<sub>x</sub>)O<sub>3</sub> の磁気特性に及ぼす Ca の置換効果  
(明大院理工<sup>1</sup>、理科大<sup>2</sup>、東大<sup>3</sup>) ○鈴木茂世<sup>1</sup>、水沼丈史<sup>1</sup>、野村貴美<sup>1,2</sup>、岡澤 厚<sup>3</sup>、小池裕也<sup>1</sup>
- P41** 高比放射能プロメチウム内包フラーレン合成に向けた、プロメチウムの分離精製  
(首都大院理工<sup>1</sup>、東北大電子光セ<sup>2</sup>) ○宮内翔哉<sup>1</sup>、秋山和彦<sup>1</sup>、菊永英寿<sup>2</sup>、久富木志郎<sup>1</sup>
- P42** モリブデンの同位体分離係数に対する価数依存性  
(長岡技科大理工<sup>1</sup>、東工大先導原子炉研<sup>2</sup>、近大理工<sup>3</sup>) ○立花 優<sup>1</sup>、金敷利隆<sup>2</sup>、野上雅伸<sup>3</sup>、鈴木達也<sup>1</sup>、野村雅夫<sup>2</sup>
- P43** 陽電子放出核種による回転体検査法の開発  
(理研仁科セ) ○神原 正、吉田 敦、羽場宏光

- P44** J-PARC ANNRI における放射性核種の非破壊分析  
(原子力機構<sup>1</sup>、首都大<sup>2</sup>) ○藤 暢輔<sup>1</sup>、海老原 充<sup>2</sup>、黄明輝<sup>1</sup>、木村 敦<sup>1</sup>、中村詔司<sup>1</sup>、瀬川麻里子<sup>1</sup>

第2日 9月11日(日)

A 会場

B 会場

9:00

医学等における RI 利用 1

座長: 菊永英寿

- 2A01** 原子力機構タンデム加速器での  $^7\text{Li}$  イオンビームを用いたアスタチンとヨウ素放射性同位体の製造と利用  
(量研機構量子ビーム<sup>1</sup>、金沢大医薬保健<sup>2</sup>、金沢大(原子力機構)<sup>3</sup>、金沢大理工<sup>4</sup>) ○西中一朗<sup>1</sup>、鷲山幸信<sup>2</sup>、前田英太<sup>3</sup>、谷口拓海<sup>3</sup>、横山明彦<sup>4</sup>、橋本和幸<sup>1</sup>
- 2A02** 理研における At-211 製造  
(理研仁科セ<sup>1</sup>、原子力機構<sup>2</sup>、阪大<sup>3</sup>、RI 協会<sup>4</sup>) ○佐藤 望<sup>1</sup>、矢納慎也<sup>1</sup>、羽場宏光<sup>1</sup>、小森有希子<sup>1</sup>、柴田誠一<sup>1</sup>、渡邊慶子<sup>1</sup>、加治大哉<sup>1</sup>、豊嶋厚史<sup>1,2,3</sup>、高橋和也<sup>1</sup>、松本幹雄<sup>4</sup>
- 2A03** コンプトンカメライメージング用 Tc-95m 及び Tc-96 の生成研究  
(量研機構<sup>1</sup>、原子力機構<sup>2</sup>、京大<sup>3</sup>、東海大<sup>4</sup>、京都薬大<sup>5</sup>) ○初川雄一<sup>1</sup>、塚田和明<sup>2</sup>、橋本和幸<sup>1</sup>、佐藤哲也<sup>2</sup>、浅井雅人<sup>2</sup>、豊嶋厚史<sup>2</sup>、永井泰樹<sup>1</sup>、谷森 達<sup>3</sup>、園田伸也<sup>3</sup>、株木重人<sup>4</sup>、木村寛之<sup>5</sup>、高田淳史<sup>3</sup>、水本哲也<sup>3</sup>、早川岳人<sup>1</sup>
- 2A04** 加速器中性子利用  $^{99}\text{Mo}$  製造における濃縮  $^{100}\text{MoO}_3$  試料の回収と再利用  
(千代田テクノ<sup>1</sup>、量研機構<sup>2</sup>) ○川端方子<sup>1</sup>、本石章司<sup>1</sup>、佐伯秀也<sup>1</sup>、竹内宣博<sup>1</sup>、橋本和幸<sup>2</sup>、初川雄一<sup>2</sup>、永井泰樹<sup>2</sup>

同位体化学/原子核プローブ 1

座長: 佐藤 渉

- 2B01** 高速中性子照射による核反跳効果を用いた放射性 Sr@C<sub>60</sub> の生成  
(首都大院理工<sup>1</sup>、量研機構<sup>2</sup>) ○秋山和彦<sup>1</sup>、宮下由香<sup>1</sup>、初川雄一<sup>2</sup>、久富木志郎<sup>1</sup>
- 2B02** 化学的還元反応を用いた金属内包フラーレン分離の条件検討  
(首都大院理工<sup>1</sup>、理研仁科セ<sup>2</sup>) ○田中康介<sup>1</sup>、秋山和彦<sup>1</sup>、羽場宏光<sup>2</sup>
- 2B03\*** 酸素、硫黄原子へのミュオン捕獲確率の分子による変化  
(阪大院理<sup>1</sup>、原子力機構<sup>2</sup>、高エネ研<sup>3</sup>、国際基督教大<sup>4</sup>) ○吉田 剛<sup>1</sup>、二宮和彦<sup>1</sup>、稲垣誠<sup>1</sup>、伊藤 孝<sup>2</sup>、髭本 亘<sup>2</sup>、ストラッサー・パトリック<sup>3</sup>、河村成肇<sup>3</sup>、下村浩一郎<sup>3</sup>、三宅康博<sup>3</sup>、三浦太一<sup>3</sup>、久保謙哉<sup>4</sup>、篠原 厚<sup>1</sup>
- 2B04** ミュオン原子衝突におけるミュオン触媒核融合反応率の計算  
(東北大理) ○木野康志

休 憩

10:30

医学等における RI 利用 2/その他

座長: 矢永誠人

- 2A05** ガンマカメラによる正常ラットのアスタチン-211 とヨウ素-123 の甲状腺および胃への集積評価  
(阪大院医<sup>1</sup>、森ノ宮クリニック<sup>2</sup>、京府医大<sup>3</sup>、阪大院理<sup>4</sup>) ○池田隼人<sup>1</sup>、渡辺晋一郎<sup>2</sup>、高橋

原子核プローブ 2

座長: 山田康洋

- 2B05\*** 摂動角相関法による不純物をドーブした四酸化三鉄の局所場観察  
(金沢大院自然<sup>1</sup>、金沢大理工<sup>2</sup>) ○竹中聡汰<sup>1</sup>、藤澤照功<sup>1</sup>、佐藤 渉<sup>2</sup>
- 2B06** ペロブスカイト型酸化物 La<sub>0.7</sub>Ca<sub>0.3</sub>MnO<sub>3</sub>

- 成人<sup>3</sup>、篠原 厚<sup>4</sup>、下瀬川恵久<sup>1</sup>、畑澤 順<sup>1</sup>  
**2A06** 広島・長崎原爆被爆者に関わる固形癌の数学モデル  
 (阪大名誉教授<sup>1</sup>、京大炉<sup>2</sup>) ○馬場 宏<sup>1</sup>、高宮 幸一<sup>2</sup>  
**2A07** ベータ線スペクトロメトリー  
 (お茶大理<sup>1</sup>、JRIA<sup>2</sup>、サンゴバン<sup>3</sup>) ○古田悦子<sup>1</sup>、星野萌生<sup>1</sup>、草間経二<sup>2</sup>、渡辺裕夫<sup>3</sup>  
**2A08** 液体ライトガイドを用いる新しい $\gamma$ 線検出器の開発(第一報)  
 (東理大<sup>1</sup>、産総研<sup>2</sup>、U-VIX<sup>3</sup>、東大総<sup>4</sup>) ○野村貴美<sup>1</sup>、柚木 彰<sup>2</sup>、細田和夫<sup>3</sup>、森戸祐幸<sup>3</sup>、寺井隆幸<sup>4</sup>、寺島千晶<sup>1</sup>

- 中の超微細場測定  
 (金沢大理工<sup>1</sup>、一関高専<sup>2</sup>、京大炉<sup>3</sup>) ○佐藤 渉<sup>1</sup>、小松田沙也加<sup>2</sup>、大久保嘉高<sup>3</sup>  
**2B07** ZnOの酸素空孔形成過程における雰囲気依存性  
 (一関高専<sup>1</sup>、金大理工<sup>2</sup>、京大炉<sup>3</sup>) ○小松田沙也加<sup>1</sup>、佐藤 渉<sup>2</sup>、大久保嘉高<sup>3</sup>  
**2B08\*** 酸化亜鉛単結晶中の空孔型欠陥に捕獲された不純物水素の熱的挙動  
 (金沢大院自然<sup>1</sup>、金沢大理工<sup>2</sup>、阪大院理<sup>3</sup>) ○清水弘通<sup>1</sup>、佐藤 渉<sup>2</sup>、三原基嗣<sup>3</sup>、藤澤照功<sup>1</sup>、福田光順<sup>3</sup>、松多健策<sup>3</sup>

## 昼 食

### S 会場

..... 13:00 .....

#### 放射化学討論会 60 回記念講演

(第一部) 座長: 工藤久昭

- 2S01** GARIS を用いた超重元素研究の最前線  
 —新元素認定までの道のり、周期表の拡張を目指した挑戦—  
 (理研仁科セ<sup>1</sup>、九大理<sup>2</sup>) 森田浩介<sup>1,2</sup>、森本幸司<sup>1</sup>、○加治大哉<sup>1</sup>、羽場宏光<sup>1</sup>

..... 14:00 .....

休 憩

..... 14:15 .....

(第二部) 座長: 永目諭一郎

- 2S02** Gas Phase Chemistry of Superheavy Elements  
 (GSI) Alexander Yakushev  
**2S03** 103 番元素でみつけた周期表のほころび ～元素周期表が書き変わる?～  
 (原子力機構) 佐藤哲也

..... 15:35 .....

### A 会場 総会・写真撮影

..... 17:15 .....

バス移動

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

### 懇親会

ANA クラウンプラザホテル新潟

## 第3日 9月12日(月)

## A 会場

## B 会場

9:00

## 環境放射能 1

座長: 高宮幸一

**3A01\*** トリチウム回収のための酸化銅の表面積依存性

(静大院総<sup>1</sup>、富山大水素研<sup>2</sup>、静大理学領域<sup>3</sup>)○植村有希<sup>1</sup>、桜田翔大<sup>1</sup>、藤田啓恵<sup>1</sup>、東 奎介<sup>1</sup>、原 正憲<sup>2</sup>、波多野雄治<sup>2</sup>、田口 明<sup>2</sup>、近田拓未<sup>3</sup>、大矢恭久<sup>3</sup>

**3A02** 燃焼法による有機結合型トリチウムの分析について

(九環協) ○島 長義、玉利俊哉

**3A03** 新潟県における長半減期放射性核種分布調査

(新潟県放射線監視センター) ○鈴木貴博、大野峻史、山崎興樹

## 原子核プローブ 3

座長: 酒井陽一

**3B01\*** 低温C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/Arマトリックス中の孤立<sup>57</sup>Fe原子の化学状態

(電通大院<sup>1</sup>、理研<sup>2</sup>、東理大理<sup>3</sup>、ICU<sup>4</sup>、阪大理<sup>5</sup>、金沢大理工<sup>6</sup>、北陸大薬<sup>7</sup>、量研機構放医研<sup>8</sup>) ○鈴木聖人<sup>1</sup>、谷川祥太郎<sup>1</sup>、佐藤祐貴子<sup>1</sup>、小林義男<sup>1,2</sup>、山田康洋<sup>3</sup>、久保謙哉<sup>4</sup>、三原基嗣<sup>5</sup>、長友 傑<sup>2</sup>、佐藤 渉<sup>6</sup>、宮崎 淳<sup>7</sup>、佐藤眞二<sup>8</sup>、北川敦志<sup>8</sup>

**3B02** 岩塩型窒化鉄のメスバウアースペクトル (東理大理<sup>1</sup>、電通大<sup>2</sup>) ○山田康洋<sup>1</sup>、佐藤美穂<sup>1</sup>、小林義男<sup>2</sup>

**3B03** 強磁性と光触媒の特性を示すズドープ酸化チタンの<sup>119</sup>Snメスバウアースペクトル (東理大<sup>1</sup>、中科院大連化物研<sup>2</sup>) ○野村貴美<sup>1</sup>、A. S. Ganeshraja<sup>2</sup>、王 軍虎<sup>2</sup>

休憩

## S 会場

## A 会場

10:10

## 奨励賞受賞講演

座長: 篠原 厚

**3S01** ラザホージウムの溶液化学研究のための新しい分析法の開発—共沈法と抽出平衡観測法— (阪大院理) 笠松良崇

## 奨励賞受賞講演

座長: 中島 覚

**3S02** メスバウアー分光パラメータと密度汎関数法を用いたd, fブロック錯体の結合状態研究 (日本原子力研究開発機構) 金子政志

## 奨励賞受賞講演

座長: 久保謙哉

**3S03** 負ミュオンを用いた非破壊三次元元素分析法の開発 (阪大院理) 二宮和彦

S 会場

11:20

## 日本放射化学会賞受賞講演

座長: 横山明彦

**3S04** 極微量 $\alpha$ 放射性核種の測定法開発および地球化学研究への応用 (金沢大学名誉教授) 山本政儀

## A 会場

## B 会場

..... 12:15 .....

放射化分析  
分科会 $\alpha$  放射体・環境放射能  
分科会

..... 13:20 .....

## 環境放射能 2/その他

座長: 安田健一郎

**3A04** トリウムの土壌-植物間移行係数の問題点:  
分析方法による違い(量研機構放医研<sup>1</sup>、東京ニュークリア<sup>2</sup>) ○田  
上恵子<sup>1</sup>、内田滋夫<sup>1</sup>、田部井 健<sup>2</sup>**3A05** ICP-MS/MSによる海水中 Np-237 測定  
の試み(筑波大数理<sup>1</sup>、広島大院理<sup>2</sup>、学習院大理<sup>3</sup>、  
Agilent<sup>4</sup>、(財)環境研<sup>5</sup>) ○坂口 綾<sup>1</sup>、Eigl  
Rosmarie<sup>2</sup>、本多真紀<sup>1</sup>、大野 剛<sup>3</sup>、角田紳一  
郎<sup>3</sup>、鹿籠康行<sup>4</sup>、高久雄一<sup>5</sup>、山崎信哉<sup>1</sup>、末  
木啓介<sup>1</sup>**3A06** ストロニウム-90 分析用自動化システム  
の環境試料分析への適用(原子力機構<sup>1</sup>、KEK<sup>2</sup>、関東技研<sup>3</sup>) ○藤田博  
喜<sup>1</sup>、野島健大<sup>2</sup>、永岡美佳<sup>1</sup>、大澤崇人<sup>1</sup>、小  
野洋伸<sup>3</sup>**3A07** 液体シンチレーションカウンタを用いた  
抽出シンチレータによる <sup>89</sup>Sr と <sup>90</sup>Sr の弁別測  
定法の検討(金沢大院自然<sup>1</sup>、金沢大学際セ<sup>2</sup>、金沢大理工<sup>3</sup>)  
○酒井浩章<sup>1</sup>、上杉正樹<sup>2</sup>、横山明彦<sup>3</sup>

..... 15:00 .....

## A 会場

若手優秀発表賞表彰式  
閉 会

## アクチノイド/その他

座長: 宮本ユタカ

**3B04** f軌道電子の結合特性とマイナーアクチノ  
イド分離挙動の相関(原子力機構<sup>1</sup>、広島大院理<sup>2</sup>、広島大N-BARD<sup>3</sup>)  
○金子政志<sup>1</sup>、渡邊雅之<sup>1</sup>、宮下 直<sup>2</sup>、中島  
覚<sup>2,3</sup>**3B05** 中性汚染水からのストロンチウムの選択  
的抽出における抽出構造(東北大金研) ○山村朝雄、高橋 晃、永井満家、  
白崎謙次**3B06** 5価ウラン還元における金属コロイドの触  
媒効果

(原子力機構) ○北辻章浩、大内和希、音部治幹

**3B07** Determination of chemical composition  
of nickel-based super alloy by TOF-PGA tech-  
nique(JAEA<sup>1</sup>、首都大学東京<sup>2</sup>) ○黄 明輝<sup>1</sup>、藤  
暢輔<sup>1</sup>、海老原 充<sup>2</sup>、木村 敦<sup>1</sup>、中村詔司<sup>1</sup>**3B08** 院政期に書写されたと考えられてきた仮  
名古筆切の <sup>14</sup>C 年代測定—伝藤原行成筆未詳散  
らし歌切および伝源俊頼筆民部切を例に一(名大 ISEE<sup>1</sup>、中央大文<sup>2</sup>) ○小田寛貴<sup>1</sup>、池田  
和臣<sup>2</sup>

## 「放射化学」規定など

### 「放射化学」論文編集委員会規定

(名称)

**第1条** この規定は、日本放射化学会（以下、本会という）会則第28条に基づき、日本放射化学会の和文誌「放射化学」の「放射化学」編集委員会を設置し、その運営に当たるために定める。

(編集委員会の構成)

**第2条** 編集委員会は、編集委員長1名、編集担当理事1名、並びに編集委員約5名で構成する。編集委員長は、前委員長の推薦により選任され、理事会の承認を得て、会長が任命する。編集委員は、編集委員長の推薦により選任され、理事会の承認を得て会長が委嘱する。

**第3条** 編集委員長および編集委員の任期は2年とし、重任を妨げない。

(編集委員会)

**第4条** 編集委員会は、次の事項について企画・審議し、「放射化学」の継続的な発行を行う。

- (1) 「放射化学」誌の編集および発行に関すること
- (2) 「放射化学」誌への投稿論文の審査に関すること
- (3) 「放射化学」誌の編集委員長候補者及び編集委員候補者の推薦に関すること

(「放射化学」誌の発行)

**第5条** 本会が発行する「放射化学」誌は、1年に2回発行し、それぞれ異なる巻数を割り振る。

(論文の審査)

**第6条** 編集委員会は、「放射化学」へ投稿された論文に対して、担当編集委員1名を決定する。審査を要する記事については、担当編集委員は審査員1名を選出し、審査を依頼する。

**第7条** 論文審査の手続きは、別に定める審査内規による。

**第8条** 本規定の改定は理事会の決議による。

付則 この規定は、2013年1月1日から施行する。

### 「放射化学」発行規定

(目的)

**第1条** 日本放射化学会和文誌「放射化学」は、日本放射化学会（以下、本会）の目的を達成するために、(i) 放射化学並びにその関連領域における重要な進歩を含む学術論文と (ii) 会員および関連分野の研究者にとって有益な最新トピックスをまとめた記事を掲載する。

(「放射化学ニュース」との関係)

**第2条**

「放射化学」は「放射化学ニュース」(2012年まで発行、第26号が最終号)の後継誌であり、創刊年は2013年、巻数は第27巻からの発行とする。

(掲載記事)

**第3条** 「放射化学」は審査付き論文とそれ以外の放射化学関連分野の最新トピックスを掲載する。前者には、原著論文、総説論文、短報の各欄を設け、後者はこれまでの「放射化学ニュース」を引き継ぎ、

様々な記事を積極的に掲載する。

1. 審査付き論文

1-1. 原著論文は、新規な内容にもとづき論理的に明瞭な結論を含む学術論文をいう。

1-2. 総説論文は、当該分野のこれまでの研究の進展を専門的な立場から解説する学術論文とする。

1-3. 短報は、重要な研究成果を含んだ短い学術論文で、編集委員会は特に迅速な公表を行う。(未完でも学術的価値が高い学術論文を含む。)

1-4. この他に、編集委員会が認めた場合、上記以外の学術情報を掲載することがある。

2. 審査付き論文以外の記事

上記審査付き論文以外は固定した枠にとられない内容とし、主に各種特集記事、解説、トピックス、学位論文要録、施設だより、学会だより、研究集会だより(国内・国外)、情報プラザなどを掲載する。

3. 審査付き論文(第3条第1項)の投稿規則を第4条以降に定めるが、審査付き論文以外の記事(第3条第2項)に関する投稿規則は特に定めず、編集委員会の編集方式に従う。また本会の英文の論文誌 *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences* の発行規則は別に定める。

## 「放射化学」論文投稿規則

(投稿論文と依頼論文)

第4条 論文は投稿によるものと編集委員会からの依頼によるものとする。

(著者)

第5条 著者は本会会員であることを要しない。

(原稿の作成)

第6条 使用言語は日本語とする。

第7条 投稿論文の作成は、別に定める「放射化学」投稿の手引き(以下、「投稿の手引き」)に従うものとする。

第8条 原著論文、総説論文、短報以外の記事については、第6条、第7条に依らない形で原稿を作成できる。

(論文の受け付け)

第9条 原稿が、「投稿の手引き」に定める「投稿先」に到着した日付けをもって、論文の受付日とする。

(審査)

第10条 編集委員会は、査読者を委嘱して論文の掲載に関する意見を求め、掲載の可否に関する審査を行う。掲載可となった日付けをもって受理日とする。投稿によるものと依頼によるものに関わらず、編集委員以外の査読者の意見を参考として、編集委員会が掲載の可否を決定する。

(論文の掲載)

第11条 掲載可となった論文は、速やかに論文誌上および論文誌 web サイトに掲載する。

(掲載料、別刷り)

第12条 論文および各種記事の掲載料は徴収しない。別刷りを作成する場合には実費を著者負担とする。

(原稿料)

(著作権)

第13条 論文誌に掲載された全ての論文等の著作権は本会に帰属する。原著論文、総説論文、短報については、著者は論文受理後速やかに「著作権譲渡同意書」を本会に提出しなければならない。

(本規則の改定)

第14条 本規則の改定には理事会の決定を要する。

付則 この規則は、2015年10月1日から施行する。

## 「放射化学」論文投稿の手引き

### 1. はじめに

この「投稿の手引き」は日本放射化学会（以下、本会）和文誌「放射化学」論文投稿規定に基づき、編集委員会にて原稿の作成の指針として制定されたものである。

### 2. 投稿に際しての注意事項

- 1) 採否が決定するまで同一趣旨の論文を他誌に投稿してはならない。
- 2) 他誌に投稿中の論文を投稿してはならない。
- 3) 投稿後の著者に関する変更は認めない。
- 4) 図版を転載する場合は、著者にて転載許可を著作権者より得ること。
- 5) 投稿原稿は以下の「3. 原稿作成時の注意事項」に従って作成し、その電子ファイル（PDF ファイル、MS-Word ファイルなどが望ましい）を編集委員会に電子メールにより送付する。到着次第、編集委員長より受付日が記載された受け取りの電子メールが送付される。

### 3. 原稿作成時の注意事項

- 1) (原稿の構成) 原稿は以下の順でそれぞれ改ページして編成する。(1) 表紙（論文題名、著者名、研究の行われた機関、同所在地などを記す）、(2) 要旨およびキーワード（5つ程度）、(3) 本文、(4) 引用文献、(5) 表、(6) 図、(7) 図の説明文。
- 2) (原稿の形式) A4 用紙を縦方向として、横書きに印字し、1 ページに 25 行程度とする。
- 3) (原稿の長さ) 短報以外は制限を設けない。短報は図表を含めて刷り上り 4 ページ以内を原則とする。なお刷り上がり 1 ページは約 2000 字であり、図・表は 1 枚につき 500 字とカウントする。
- 4) (要旨) 要旨として英文要旨（250 語以内）および和文要旨（400 字以内）の両方をつけること。
- 5) (引用の形式) 番号順とする。最初に引用された箇所の順で引用文献を並べる。引用文献の記載方法はアメリカ化学会発行の雑誌と同形式とする。なお本形式は本会の **Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences** 誌と同様である。
- 6) (表) 表は説明も含めて英文で作成する。本文中では **Table** として引用する。
- 7) (図) 図は説明も含めて英文で作成する。本文中では **Fig.** として引用する。なお投稿時のファイルサイズは 10 Mbyte を超えないこと。
- 8) (その他) 図表などの数値や軸の表記では物理量 / 単位の形式をとることとし、物理量（単位）の表記は用いない。（例：Time/min とし、Time (min) は用いない。）
- 9) (カラーの図表) カラーの図表を掲載する場合には、原則として実費を著者負担とする。なお、論文誌 web サイト公開用の PDF 版については無料でカラーとすることができる。
- 10) (注意事項) 上記に著しく逸脱した原稿については、受け付けずに返却することがある。

### 4. 校正および論文誌発行後の正誤訂正

- 1) 著者校正は 1 回行う。返送期日に著しく遅れた場合には編集委員会の校正のみで校了とする。
- 2) 発行後 6 ヶ月以内に著者から訂正の申し出があった場合には、正誤訂正に関する記事を掲載することがある。

### 5. 投稿先

〒 351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

理化学研究所 仁科加速器研究センター 羽場宏光 編集委員長

Fax: 048-461-5301

e-mail: houshakagaku@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、以下のweb ページを参照し、事務局（jnrs@ac-square.co.jp）までご連絡下さい。

会員情報変更等の手続き：<http://www.radiochem.org/nyukai/shubetsu.html>

## 放射化学

### 第34号

平成28年(2016年)9月2日発行

### 編集

日本放射化学会編集委員会

委員長：羽場宏光、委員：桐島 陽、齊藤 敬、佐藤 渉、関本 俊、鷺山幸信

連絡先：〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1 理化学研究所仁科加速器研究センター

羽場宏光 (e-mail: [houshakagaku@radiochem.org](mailto:houshakagaku@radiochem.org))

### 発行

日本放射化学会

出版・担当理事：高橋嘉夫

Web: <http://www.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。

## 賛助会員

株式会社アトックス

株式会社日立製作所

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

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

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

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

公益社団法人 日本アイソトープ協会

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

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

公益財団法人 日本分析センター

公益財団法人 放射線影響協会

一般財団法人 放射線利用振興協会

北海道電力株式会社

中部電力株式会社

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1種、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/>

## 原子力機構は、福島の実地環境回復(オフサイト)や原子炉廃止措置(オンサイト)に向けた技術開発等に取り組んでいます

### オフサイトでの取り組み

#### モニタリング・マッピング

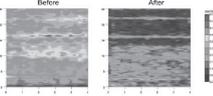


航空機モニタリング



PSFによる測定の様子

プラスチック・シンチレーション・ファイバ(PSF)による陸上モニタリング



測定結果

#### 福島長期環境動態研究プロジェクト(F-TRACE)



ダム調査



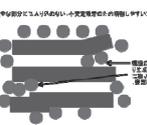
移動抑制等対策の検討



#### 放射性セシウムの特殊な吸着挙動を解明



汚染土壌中のセシウム吸着の図解



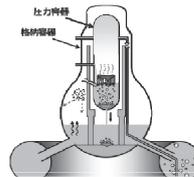
土壌中のセシウム吸着メカニズムの図解

放射性セシウムの吸着メカニズムを解明し、土壌中の放射性セシウムの効率的な除染活動に寄与する

### オンサイトでの取り組み

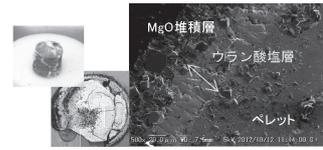
#### 廃止措置等に関する研究開発

原子炉内部の状況を把握するための研究



事後の原子炉のイメージ図

溶融固化した燃料(燃料デブリ)の取り出しに向けた研究

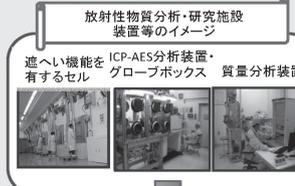


海水塩とともに加熱した模擬デブリペレット

福島県に、「遠隔操作機器・装置開発・実証施設」及び「放射性物質分析・研究拠点」を整備し、福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた研究開発を遂行します。



- 原子炉格納容器下部の漏洩箇所補修技術の実証試験
- 遠隔操作ロボット等の開発実証
- 作業員の訓練、人材育成



- 燃料デブリや放射性廃棄物の性状把握、処理・処分技術等の開発
- 中長期的視点での人材育成
- 国際共同研究、海外人材の受入



国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字舟石川765番地1

TEL: 029-282-1122 (代表)

ホームページ: <http://www.jaea.go.jp>



# 環境放射能、安定同位体比等の分析専門機関です

## ① 環境放射能に関する分析



セシウム137などのガンマ線放出核種、トリチウム、炭素14、クリプトン85、ストロンチウム90、キセノン133、トリウム、ウラン、プルトニウムなど、あらゆる放射能の分析を行います。

## 相互比較分析

放射性核種を添加し作製した標準試料等を、分析機関と日本分析センターが分析し、結果を比較検討しています。



## ② 精度管理

### 技能試験

玄米を微粉砕して調製した試料を用いて玄米中放射性セシウム分析の技能試験を定期的に実施しています。



## ③ 環境放射能分析研修

環境放射線モニタリングや食品の放射能分析の担当者を対象とした研修を行います。その他にご要望に応じた研修にも対応可能です。



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)

JCAC 公益財団法人  
Japan Chemical Analysis Center 日本分析センター

問合せ先

公益財団法人 日本分析センター 企画・総務部  
http://www.jcac.or.jp e-mail webman@jcac.or.jp

〒263-0002 千葉県千葉市稲毛区山王町295番地3  
電話：043-423-5325 FAX：043-423-5372

## 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～

- 放射線影響に関する知識の普及
- 放射線影響に関する研究活動への奨励助成、顕彰
  - 放射線影響に関する調査研究
  - ICRP調査・研究連絡会の運営
- 原子力施設及び除染等事業場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
  - RI施設で働く放射線業務従事者の被ばく線量の登録管理
  - 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 (原子力、除染、RI等)
- 原子力施設等で働く放射線業務従事者を対象にした低線量長期間被ばくによる健康影響の疫学調査

### 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

放射線利用事業の振興と  
原子力の利用に係る知識及び技術の普及を振興するために

◆ 放射線・原子力利用の普及事業

- ・ 技術誌「放射線と産業」の刊行
- ・ 「放射線プロセスシンポジウム」の支援

◆ 照射サービス事業

- ・ ガンマ線・電子線照射：材料の耐放射線性試験、材料改質などいろいろな照射ニーズに応えます
- ・ 中性子照射：シリコンの半導体化

◆ 技術移転事業

- ・ 産業界からの中性子利用のいろいろなニーズに応えます

◆ 原子力研修事業

- ・ 第3種放射線取扱主任者講習
- ・ 教員免許状更新講習
- ・ 放射線業務従事者のための教育訓練
- ・ 原子力・放射線に関する研修会の開催

一般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

敵し、

みやこ

メイトナング。



原子力発電所、原子燃料サイクル施設などの管理、保安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、RI関連施設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、RI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
- RI等使用施設のトータルメンテナンス
  - 作業環境測定
  - 放射性汚染除去
  - 廃棄物処理
  - 管理区域・域内清掃
  - 施設・設備運転・点検保守
  - 加温器運転
  - フィルター交換
  - 各種工事
  - 機器販売、同体販売、モニタ販売 など



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

● 本社：〒108-0014 東京都港区芝4-11-3 芝7コートビル TEL (03) 6758-9000 FAX (03) 3453-3821  
 ● 東京営業所：〒108-0014 東京都港区芝4-11-3 芝7コートビル TEL (03) 6758-9005 FAX (03) 3453-3822  
 ● 技術開発センター：〒277-0861 千葉県市川市高田1201 TEL (04) 7145-3330 FAX (04) 7145-3649  
 ● 放射線管理センター：〒1029-2822 東京都中央区新富1-13-1 TEL (029) 2822-1662 / 大洗営業所 TEL (04) 7141-1321  
 ● 放射線管理センター：〒106-6384 東京都港区新富1-13-1 TEL (078) 599-6851 / 沼津営業所 TEL (0955) 52-3241

# AccuFLEX LSC-8000

**HITACHI**  
Inspire the Next

## Accuracy and Flexibility

様々な場面で求められる測定結果を提供する  
スピーディーに、効率よく、正確に。  
その想いを込め AccuFLEX LSC-8000 が誕生しました。

1962年 国産初の  
液体シンチレーションシステム開発から約50年

従来製品より培われた性能・機能に、  
当社の英知と先進技術を合わせ充実した  
分析性能、メカニカル性能をここに実現しました。  
みなさまの研究のパートナーとして、  
先進技術のパフォーマンスを実感してください。



 株式会社 日立製作所

AccuFLEXは、株式会社日立製作所の登録商標です。

[www.hitachi.co.jp/healthcare](http://www.hitachi.co.jp/healthcare)

## キャンベラジャパンの放射能測定システム



放射線測定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



InSpector1000™ : 可搬型  
デジタルスペクトロサベイメータ



PIPS 荷電粒子検出器



ISOCSTM™ :  
ガンマ線分析システム



FASTSCAN™ :  
ホールボディカウンタ

  
**CANBERRA**  
キャンベラジャパン株式会社

放射線測定における世界的リーディングカンパニー

東京本社 東京都台東区浅草橋4-19-8 浅草橋ビル 〒111-0053 TEL: 03-5835-5402  
大阪営業所 大阪市淀川区西中島5-14-5 コッセイ新大阪南口ビル9F 〒532-0011 TEL: 06-4806-5662  
URL: <http://www.canberra.com/jp/> E-mail: [sales-jp@canberra.com](mailto:sales-jp@canberra.com)

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用プリアンプ  
 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、多チャンネルプリアンプ、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



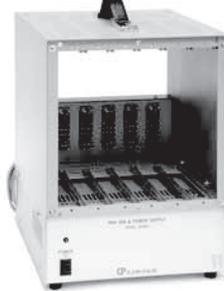
1216型PHA



6671型バイアス電源



E6660ミニビン電源



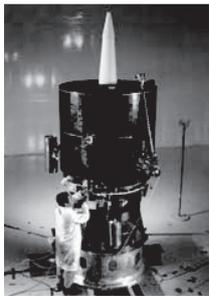
80110型プリアンプ



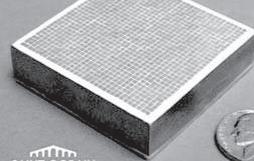
80112型MPX



LYSO、LaCl<sub>3</sub>、LaBr<sub>3</sub>、NaI、CsI、BGO、CdWO<sub>4</sub>、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、<sup>3</sup>He検出器等  
 サンゴバンは、素材からプローブ・特殊用途まで、  
 グローバル・スタンダードな最高品質のシンチレータを提供いたします。



イメージング用アレイ



SAINT-GOBAIN CRYSTALS



プラスチックシンチレータ



シンチレーションファイバー



サンゴバン株式会社

〒102-0083 東京都千代田区麹町 3-7

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

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

お問合せ [yasuo.watanabe@saint-gobain.com](mailto:yasuo.watanabe@saint-gobain.com)

(担当 渡辺)

# WISSO | 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】

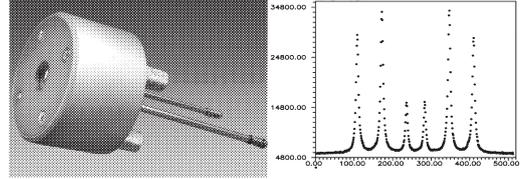
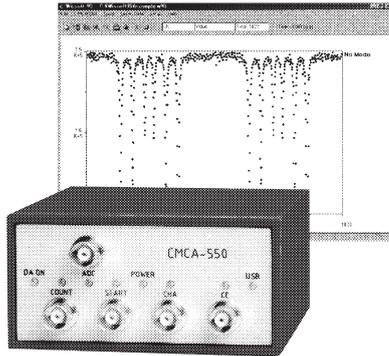
入力: COUNT, START, CHA, COUNT ENABLE, ADC (CMCA-550のみ)

## 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當
- 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證
- ガスフローを維持すれば、長期の測定に適當
- 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



## 個人線量測定サービス

お客様の安全と安心に貢献します

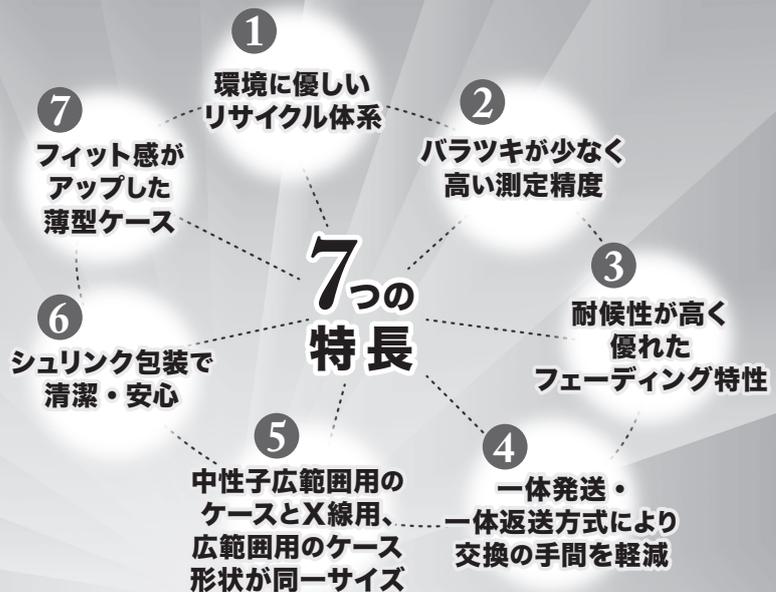
# ガラスバッジモニタリングサービス



ガラスバッジ



ガラスリング



株式会社 千代田テクノ

<http://www.c-technol.co.jp>

ctc-master@c-technol.co.jp

ガラスバッジ

検索

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



## 安全設計・評価

- 施設設計
- 遮蔽設計
- 安全評価
- RII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

 **東京ニュークリア株式会社**

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  
 つくば開発センター：茨城県つくば市緑ヶ原 4-19-2 〒300-2646 TEL.029 (847) 5521  
 大阪事業所：大阪府中央区内本町 1-2-5 (YSK ビル 5F) 〒540-0026 TEL.06 (4792) 3111  
 六ヶ所事業所：青森県上北郡六ヶ所村大字尾駮宇野附 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 大阪府西区新町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 6 丁目 24-1  
技術開発研究所：〒342-0008 埼玉県吉川市旭 8 番 3  
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.0244-26-5245 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.06-4963-2500

Tel.03-5322-2271 Fax.03-5322-2272  
Tel.048-991-9461 Fax.048-991-9460

作業環境測定機関11-4(放射性物質) ISO9001:2008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・土木工事業/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

 富士電機

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  
RI排水管理システム  
出入管理システム  
非密封RI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](mailto: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



**ADC500**

変換方式  
コンバージョンゲイン

逐次比較型 15 $\mu$ 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 $\mu$ 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](mailto:office@radiochem.org)