

2022年9月17日(土)

A会場

基調講演 | プレナリートーク

基調講演

座長:久保 謙哉

09:00 ~ 09:40 A会場 (小柴ホール)

[3S01] リュウグウ試料のミュオン特性 X線分析

\*大澤 崇人<sup>1</sup>、二宮 和彦<sup>2</sup>、中村 智樹<sup>4</sup>、高橋 忠幸<sup>3</sup>、寺田 健太郎<sup>2</sup>、坂本 尚義<sup>5</sup>、野口 高明<sup>6</sup>、岡崎 隆司<sup>7</sup>、藪田 ひかる<sup>8</sup>、奈良岡 浩<sup>7</sup>、坂本 佳奈子<sup>9</sup>、橘 省吾<sup>4</sup>、渡邊 誠一郎<sup>10</sup>、津田 雄一<sup>9</sup> (1. 日本原子力研究開発機構、2. 大阪大学、3. 東北大学、4. 東京大学、5. 北海道大学、6. 京都大学、7. 九州大学、8. 広島大学、9. JAXA/ISAS、10. 名古屋大学)

09:00 ~ 09:40

特別セッション 福島第一原発事故関連研究の最前線 | 特別セッション 1 福島第一原発事故関連研究の最前線

特別セッション 1 福島第一原発事故関連研究の最前線

座長:田中 万也(日本原子力研究開発機構)

09:40 ~ 10:50 A会場 (小柴ホール)

[3A01-04-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3A01] 草地土壌における放射性セシウム蓄積への有機物の役割

\*山口 紀子<sup>1</sup>、塚田 祥文<sup>2</sup>、山田 大吾<sup>1</sup> (1. 農研機構、2. 福島大学)

09:40 ~ 10:05

[3A02] 福島第一原発事故に由来する<sup>137</sup>Csと<sup>90</sup>Srの深度分布と移流拡散モデルによる解析

\*山本 康平<sup>1</sup>、吉村 崇<sup>1</sup>、二宮 和彦<sup>1</sup> (1. 大阪大学大学院)

10:05 ~ 10:20

[3A03] セシウムの粘土及び粘土鉱物への吸着と界面活性剤を用いたその除染の基礎的研究

Wijayanto Herry<sup>1</sup>、\*中島 覚<sup>1</sup> (1. 広島大学)

10:20 ~ 10:35

[3A04] 地衣類の生体組織中における放射性セシウム蓄積メカニズム

\*土肥 輝美<sup>1</sup>、飯島 和毅<sup>1</sup>、町田 昌彦<sup>1</sup>、数納 広哉<sup>1,2</sup>、大村 嘉人<sup>3</sup>、藤原 健壯<sup>1</sup>、木村 茂<sup>4</sup>、菅野 太志<sup>5</sup> (1. 日本原子力研究開発機構、2. 法政大学、3. 国立科学博物館、4. 原子力エンジニアリング(株)、5. (株) ペスコ)

10:35 ~ 10:50

基盤セッション 教育関連 | 基盤セッション E: 教育関連

基盤セッション E: 教育関連

座長:篠原 厚(大阪青山大学)

10:55 ~ 11:55 A会場 (小柴ホール)

[3A05-06-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3A05] 高専から大学院までの原子力・放射線教育体制構築事業の紹介

\*鈴木 達也<sup>1</sup> (1. 長岡技術科学大学)

10:55 ~ 11:25

[3A06] 浜通り地域環境放射線研修会~放射線を中心に据えた総合教育~

\*高橋 賢臣<sup>1</sup>、大原 理彩子<sup>1</sup> (1. 大阪大学)

11:25 ~ 11:55

高校生ポスター | 高校生ポスター

高校生ポスター

12:00 ~ 12:30 A会場 (小柴ホール)

[3A-1200-1add] 高校生ポスター

12:00 ~ 12:30

部会 | 部会

教育部会

座長:篠原 厚(大阪青山大学)

12:55 ~ 13:25 A会場 (小柴ホール)

基盤セッション 教育関連 | 基盤セッション E: 教育関連

基盤セッション E: 教育関連

座長:松尾 基之(東京大学)

13:25 ~ 14:50 A会場 (小柴ホール)

[3A07-10-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3A07] 放射線教育の拡がり と課題、そして SNS時代のリスクコミュニケーション

\*鳥居 寛之<sup>1</sup> (1. 東京大学 大学院理学系研究科)

13:25 ~ 14:00

[3A08] 原子力規制庁原子力工学系職員採用試験過去問題の放射化学教育への応用

\*北澤 孝史<sup>1</sup> (1. 東邦大学理学部)

14:00 ~ 14:15

[3A09] 東京大学での放射線教育に関する e-learningの現状とこれから

\*桧垣 正吾<sup>1</sup> (1. 東京大学アイソトープ総合センター)

14:15 ~ 14:35

[3A10] RI施設における法令報告に至らない事故トラブル情報の収集と情報共有

\*桧垣 正吾<sup>1</sup>、鈴木 智和<sup>2</sup>、高橋 賢臣<sup>2</sup> (1. 東京大学、2. 大阪大学)

14:35 ~ 14:50

基盤セッション 教育関連 | 基盤セッション E: 教育関連

基盤セッション E: 教育関連

座長:薬袋 佳孝(武蔵大学)

15:00 ~ 16:30 A会場 (小柴ホール)

[3A11-14-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3A11] 学校で求められる放射線教育;

安価で安全な放射化学実験法

\*鎌田 正裕<sup>1</sup> (1. 東京学芸大学)

15:00 ~ 15:30

[3A12] 小学生の放射線教育の経験からみえてくるもの

\*岡田 往子<sup>1</sup> (1. 東京都立大学)

15:30 ~ 15:45

[3A13] 放射能・放射線教育のためのランタンマントルを利用したデモ実験の工夫

\*横山 明彦<sup>1</sup> (1. 金沢大学理工研究域)

15:45 ~ 16:00

[3A14] 博物館関係者を対象としての放射能汚染対策マニュアルの作成と情報の国際発信の試み

\*佐野 千絵<sup>1</sup> (1. 東京文化財研究所)

16:00 ~ 16:30

閉会式・若手表彰式 | 閉会式

閉会式・若手優秀発表表彰式

座長:松垣 正吾(東京大学)

16:35 ~ 16:55 A会場 (小柴ホール)

## B会場

基盤セッション 計測・検出器 | 基盤セッションI: 検出器・計測・イメージング

基盤セッションI: 検出器・計測・イメージング

座長:高橋 嘉夫、浅井 雅人(日本原子力研究開発機構 (JAEA))

09:40 ~ 11:05 B会場 (206室)

[3B01-05-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3B01] 二光子ガンマ線イメージングの新たな展開に向けて

\*高橋 浩之<sup>1</sup> (1. 東京大学)

09:40 ~ 10:05

[3B02] CdTe検出器によるミュオン X線の三次元元素イメージングシステムの開発

\*邱 奕寰<sup>1</sup>、大澤 崇人<sup>2</sup>、武田 伸一郎<sup>3</sup>、桂川 美穂<sup>3</sup>、長澤 俊作<sup>3</sup>、南 喬博<sup>3</sup>、高橋 忠幸<sup>3</sup>、渡辺 伸<sup>4</sup>、久保 謙哉<sup>5</sup>、水本 和美<sup>6</sup>、齋藤 努<sup>7</sup>、谷口 秋洋<sup>8</sup>、浅利 駿介<sup>1</sup>、梅垣 いづみ<sup>9</sup>、下村 浩一郎<sup>9</sup>、二宮 和彦<sup>1</sup> (1. 大阪大学、2. 日本原子力研究開発機構、3. 東京大学、4. 宇宙航空研究開発機構、5. 国際基督教大学、6. 東京藝術大学、7. 国立歴史民俗博物館、8. 京都大学複合原子力科学研究所、9. 高エネルギー加速器研究機構)

10:05 ~ 10:20

[3B03] スペクトル定量法のガンマ線スペクトルへの適用性

\*大島 真澄<sup>1</sup>、後藤 淳<sup>2</sup>、早川 岳人<sup>3</sup>、金 政浩<sup>4</sup>、鈴木 勝行<sup>1</sup>、沈 海峰<sup>1</sup>、佐野 友一<sup>1</sup>、篠原 宏文<sup>1</sup> (1. 日本分析センター、2. 新潟大学、3. 量子科学技術研究開発機構、4. 九州大学)

10:20 ~ 10:35

[3B04] シリコン半導体検出器の重イオン測定における波高欠損の研究

\*石橋 優一<sup>1</sup>、松永 壮太郎<sup>1</sup>、浅井 雅人<sup>2</sup>、森田 浩介<sup>1</sup>、坂口 聡志<sup>1</sup>、塚田 和明<sup>2</sup>、佐藤 哲也<sup>2</sup>、伊藤 由太<sup>2</sup> (1. 九州大学、2. 原子力機構)

10:35 ~ 10:50

[3B05] 太陽電池の重イオン検出器としての応答

\*浅井 雅人<sup>1,2</sup>、石橋 優一<sup>2</sup>、庭瀬 暁隆<sup>3</sup>、牧井 宏之<sup>1</sup>、伊藤 由太<sup>1</sup>、佐藤 哲也<sup>1</sup>、塚田 和明<sup>1</sup>、坂口 聡志<sup>2</sup>、森田 浩介<sup>2</sup>、渡辺 裕<sup>3</sup>、鄭 淳讀<sup>3</sup> (1. 原子力機構、2. 九州大学、3. 高エネ研)

10:50 ~ 11:05

基盤セッション 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識 | 基盤セッションD: 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識

基盤セッションD: 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識

座長:宮本 ユタカ(日本原子力研究開発機構)

11:10 ~ 12:10 B会場 (206室)

[3B06-08-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3B06] 原子力災害対応における水中の低濃度の放射性セシウム迅速測定法の開発および標準化

\*保高 徹生<sup>1</sup> (1. 産業技術総合研究所)

11:10 ~ 11:40

[3B07] 加速器中性子による<sup>64,67</sup>Cuの大量製造に向けた分離精製法の開発\*本村 新<sup>1,2</sup>、川端 方子<sup>1,2</sup>、太田 朗生<sup>1,2</sup>、廣瀬 耀<sup>1,2</sup>、本石 章司<sup>1,2</sup>、佐伯 秀也<sup>1,2</sup>、塚田 和明<sup>3</sup>、永井 泰樹<sup>1,2</sup>、橋本 和幸<sup>2,3</sup> (1. (株) 千代田テクノロ、2. (国研) 量研、3. (国研) 原子力機構)

11:40 ~ 11:55

[3B08] 量研機構におけるバイオアッセイの最新の進捗状況

\*楊 国勝<sup>1</sup>、金 ウンジュ<sup>1</sup>、鄭 建<sup>1</sup>、古渡 意彦<sup>1</sup>、栗原 治<sup>1</sup> (1. 量子科学技術研究開発機構)

11:55 ~ 12:10

部会 | 部会

放射化分析部会

座長:三浦 勉(国立研究開発法人 産業技術総合研究所)

12:10 ~ 12:55 B会場 (206室)

基盤セッション 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識 | 基盤セッションD: 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識

基盤セッションD: 放射性核種の分析化学・放射化分

## 析・核鑑識

座長:三浦 勉(国立研究開発法人 産業技術総合研究所)  
13:15 ~ 14:15 B会場 (206室)

## [3B09-10-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3B09] 難測定核種分析の負担軽減を目的としたレーザーア  
ブレーション ICP-MSの利用法

\*浅井 志保<sup>1</sup> (1. 産業技術総合研究所)  
13:15 ~ 13:45

[3B10] Sr-90の質量分析のフロンティア ~微小・微量・イ  
メージング~

\*高貝 慶隆<sup>1</sup>、柳澤 華代<sup>1</sup>、青木 譲<sup>1</sup>、古川 真<sup>2,1</sup> (1. 福島大  
学、2. パーキンエルマージャパン)  
13:45 ~ 14:15

基盤セッション 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識 | 基盤セッションD: 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識

基盤セッション D: 放射性核種の分析化学・放射化分  
析・核鑑識

座長:浅井 志保(国立研究開発法人 産業技術総合研究所)  
14:20 ~ 15:20 B会場 (206室)

## [3B11-14-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3B11] SK-Gd によるニュートリノ検出に向けた硫酸ガドリ  
ニウム中の<sup>226</sup>Ra質量分析法の確立

\*榊枝 優真<sup>1</sup>、坂口 綾<sup>2</sup>、高久 雄一<sup>2</sup>、細川 佳志<sup>3</sup>、関谷 洋之<sup>3</sup>、伊藤 慎太郎<sup>4</sup>、池田 一得<sup>3</sup>、市村 晃一<sup>5</sup>、山崎 信哉<sup>2</sup>、末  
木 啓介<sup>2</sup> (1. 筑波大学 理工情報生命学術院 数理解物質科学研究群 化学学位プログラム、2. 筑波大学 数理解物質系、3.  
東京大学 宇宙線研究所、4. 高エネルギー加速器研究機構  
素粒子原子核研究所、5. 東北大学 ニュートリノ科学研究セ  
ンター)

14:20 ~ 14:35

[3B12] ウラン標準粒子の作成と二次イオン質量分析法によ  
る同位体比分析

\*富田 涼平<sup>1</sup>、富田 純平<sup>1</sup>、安田 健一郎<sup>1</sup>、鈴木 大輔<sup>1</sup>、江坂  
文孝<sup>1</sup>、宮本 ユタカ<sup>1</sup> (1. 原子力機構)  
14:35 ~ 14:50

[3B13] MC-ICP-MSによる高感度ウラン同位体比測定

\*富田 純平<sup>1</sup>、富田 涼平<sup>1</sup>、鈴木 大輔<sup>1</sup>、安田 健一郎<sup>1</sup>、宮本  
ユタカ<sup>1</sup> (1. 原子力機構)  
14:50 ~ 15:05

[3B14] 飛跡検出法を利用した保障措置環境試料の粒子スク  
リーニング法の開発

\*安田 健一郎<sup>1</sup>、鈴木 大輔<sup>1</sup>、宮本 ユタカ<sup>1</sup>、宇佐美 秀彦<sup>2</sup>  
(1. 日本原子力研究開発機構、2. 理工科学株式会社)  
15:05 ~ 15:20

基盤セッション 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識 | 基盤セッションD: 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識

セッションD: 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識

基盤セッション D: 放射性核種の分析化学・放射化分  
析・核鑑識

座長:松江 秀明(日本原子力研究開発機構)  
15:25 ~ 16:25 B会場 (206室)

## [3B15-18-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3B15] ミュオン捕獲即発 $\gamma$ 線測定による鉛試料の非破壊同  
位体分析法の開発

\*浅利 駿介<sup>1</sup>、梶野 芽都<sup>1</sup>、邱 奕寰<sup>1</sup>、佐藤 朗<sup>1</sup>、Amato  
Alex<sup>2</sup>、Knecht Andreas<sup>2</sup>、Thomas Prokshca<sup>2</sup>、Luetkins  
Hubertus<sup>2</sup>、Vogiatzi Maria<sup>2</sup>、Wang Channan<sup>2</sup>、篠原  
厚<sup>3</sup>、二宮 和彦<sup>1</sup> (1. 大阪大学、2. ポールシェラー研究  
所、3. 大阪青山大学)  
15:25 ~ 15:40

[3B16] 即発 $\gamma$ 線分析における試料密度の影響と補正法

\*前田 亮<sup>1</sup>、藤 暢輔<sup>1</sup>、瀬川 麻里子<sup>1</sup>、遠藤 駿典<sup>1</sup>、中村 詔司<sup>1</sup>、木村 敦<sup>1</sup> (1. 日本原子力研究開発機構)  
15:40 ~ 15:55

[3B17] 焼却方法の異なる家庭ごみ焼却灰から製造された溶  
融スラグに含まれる磁性成分の分析

\*秋山 和彦<sup>1</sup>、斎藤 涼太<sup>1</sup>、菊永 英寿<sup>2</sup>、久富木 志郎<sup>1</sup> (1.  
都立大院理、2. 東北大ELPH)  
15:55 ~ 16:10

[3B18] JRR-3 Pn3を用いたふっ素の迅速放射化分析

\*三浦 勉<sup>1</sup>、石本 光憲<sup>2</sup> (1. 国立研究開発法人産業技術総合  
研究所、2. 東京大学工学系研究科原子力専攻)  
16:10 ~ 16:25

## C会場

特別セッション 考古学・文化財・人類学への展開 | 特別セッション4 考古学・文化財・人類学への展開

特別セッション4 考古学・文化財・人類学への展  
開-文理融合領域へのチャレンジ

座長:薬袋 佳孝(武蔵大学)  
09:40 ~ 10:45 C会場 (207室)

## [3C01-03-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3C01] 岐阜県瑞浪市大湫町神明神社御神木を用いた炭素1  
4年代 較正曲線の整備: 御神木の年代調査

\*國分 陽子<sup>1</sup>、箱崎 真隆<sup>2</sup>、坂本 稔<sup>2</sup>、李 貞<sup>3</sup>、中塚 武<sup>3</sup>、藤  
田 奈津子<sup>1</sup> (1. 日本原子力研究開発機構、2. 国立歴史民俗  
博物館、3. 名古屋大学)  
09:40 ~ 09:55

[3C02] 鉛同位体比からみた文化財

\*齋藤 努<sup>1</sup> (1. 国立歴史民俗博物館)  
09:55 ~ 10:20

[3C03] 放射光 X線を用いて古代ガラスの製法に迫る~銅赤

## ガラスを事例に～

\*阿部 善也<sup>1</sup> (1. 東京電機大学)

10:20～ 10:45

特別セッション 考古学・文化財・人類学への展開 | 特別セッション4 考古学・文化財・人類学への展開

## 特別セッション4 考古学・文化財・人類学への展開-文理融合領域へのチャレンジ

座長:国分 陽子

10:50～ 11:40 C会場 (207室)

[3C04-05-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3C04] PGAによる鉄鋼文化財の非破壊分析

\*田中 真奈子<sup>1</sup> (1. 昭和女子大学)

10:50～ 11:15

[3C05] 負ミュオンによる非破壊3次元多元素同時分析

\*久保 謙哉<sup>1</sup> (1. 国際基督教大学)

11:15～ 11:40

部会 | 部会

## 若手の会

座長:稲垣 誠

11:45～ 12:30 C会場 (207室)

特別セッション 放射化学と地球化学との接点 | 特別セッション3 放射化学と地球化学との接点

## 特別セッション3 放射化学と地球化学との接点

座長:高橋 嘉夫、板井 啓明(東京大学大学院理学系研究科)

12:45～ 14:20 C会場 (207室)

[3C06-10-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3C06] 高速多点レーザー質量分析計による超高感度同位体分析

\*平田 岳史<sup>1</sup> (1. 東京大学大学院理学系研究科)

12:45～ 13:10

[3C07] 量子ビーム照射によるアミノ酸およびそのエナンチオ過剰の創成と生命の起源

\*小林 憲正<sup>1</sup> (1. 横浜国立大学)

13:10～ 13:35

[3C08] 分子レベルの情報に基づいたラジウムの環境挙動解明

\*山口 瑛子<sup>1,2</sup>、永田 光知郎<sup>3</sup>、小林 恵太<sup>1</sup>、田中 万也<sup>1</sup>、小林 徹<sup>1</sup>、谷田 肇<sup>1</sup>、矢板 毅<sup>1</sup>、吉村 崇<sup>3</sup>、奥村 雅彦<sup>1</sup>、高橋 嘉夫<sup>2</sup> (1. 日本原子力研究開発機構、2. 東京大学大学院理学系研究科、3. 大阪大学放射線科学基盤機構)

13:35～ 13:50

[3C09] 超伝導転移端検出器-マイクロ XRF-XAFSによる

Cs濃集粒子中のCsの分布・化学状態

三浦 輝<sup>1</sup>、\*高橋 嘉夫<sup>2</sup>、山田 真也<sup>3</sup>、一戸 悠人<sup>3</sup>、佐藤 寿紀<sup>3</sup>、早川 亮大<sup>3</sup>、岡田 信二<sup>4</sup>、外山 裕一<sup>4</sup>、橋本 直<sup>5</sup>、野田博文<sup>6</sup>、磯部 忠昭<sup>7</sup>、奥村 拓馬<sup>8</sup>、高取 沙悠理<sup>9</sup>、平木 貴宏<sup>10</sup>、竜野 秀行<sup>8</sup>、関澤 央輝<sup>10</sup>、新田 清文<sup>10</sup>、宇留賀 朋哉<sup>10</sup>、栗原 雄一<sup>11</sup>、山本 政儀<sup>12</sup> (1. 電中研、2. 東京大学、3. 立教大学、4. 中部大学、5. JAEA、6. 大阪大学、7. 理化学研究所、8. 東京都立大学、9. 岡山大学、10. 高輝度光科学研究センター、11. 京都大学、12. 金沢大学)

13:50～ 14:05

[3C10] リン酸イオン吸着処理によるバライト中のヨウ素酸、亜セレン酸、セレン酸の安定性の向上の効果

\*徳永 紘平<sup>1</sup>、田中 万也<sup>1</sup>、高橋 嘉夫<sup>2</sup>、香西 直文<sup>1</sup> (1. 日本原子力研究開発機構、2. 東京大学大学院)

14:05～ 14:20

基盤セッション その他(境界分野への放射化学の新展開など) | 基盤セッションJ: その他

## 基盤セッションJ: その他

座長:北澤 孝史(東邦大学)、高橋 嘉夫

14:25～ 15:40 C会場 (207室)

[3C11-13-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3C11] 分離化学研究と放射化学との関わり

\*平山 直紀<sup>1</sup> (1. 東邦大理)

14:25～ 14:50

[3C12] 錯体化学・材料化学と放射化学との複合領域研究

\*速水 真也<sup>1</sup> (1. 熊本大学)

14:50～ 15:15

[3C13] 温泉科学と放射化学との関わりについて

\*齊藤 敬<sup>1</sup> (1. 尚絅学院大学)

15:15～ 15:40

基盤セッション その他(境界分野への放射化学の新展開など) | 基盤セッションJ: その他

## 基盤セッションJ: その他

座長:北澤 孝史(東邦大学)、高橋 嘉夫

15:50～ 16:20 C会場 (207室)

[3C14-15-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3C14] ポジトロニウム寿命測定法を用いたMOFsの空孔評価に関する研究

\*上田 大生<sup>1,2</sup> (1. 東京学芸大学、2. 東邦大学)

15:50～ 16:05

[3C15] INIS/IAEAデータベースに抄録された自分の放射化学的文献についての考察

\*北澤 孝史<sup>1</sup> (1. 東邦大学理学部)

16:05～ 16:20

---

基調講演 | プレナリートーク

## 基調講演

座長:久保 謙哉

2022年9月17日(土) 09:00 ~ 09:40 A会場 (小柴ホール)

Zoomはこちら

---

### [3S01] リュウグウ試料のミュオン特性 X線分析

\*大澤 崇人<sup>1</sup>、二宮 和彦<sup>2</sup>、中村 智樹<sup>4</sup>、高橋 忠幸<sup>3</sup>、寺田 健太郎<sup>2</sup>、塚本 尚義<sup>5</sup>、野口 高明<sup>6</sup>、岡崎 隆司<sup>7</sup>、  
藪田 ひかる<sup>8</sup>、奈良岡 浩<sup>7</sup>、坂本 佳奈子<sup>9</sup>、橘 省吾<sup>4</sup>、渡邊 誠一郎<sup>10</sup>、津田 雄一<sup>9</sup> (1. 日本原子力研究  
開発機構、2. 大阪大学、3. 東北大学、4. 東京大学、5. 北海道大学、6. 京都大学、7. 九州大学、8. 広島  
大学、9. JAXA/ISAS、10. 名古屋大学)

09:00 ~ 09:40

## 3S01

## リュウグウ試料のミュオン特性 X 線分析

(原子力機構<sup>1</sup>、大阪大学<sup>2</sup>、東北大学<sup>3</sup>、東京大学<sup>4</sup>、北海道大学<sup>5</sup>、京都大学<sup>6</sup>、九州大学<sup>7</sup>、広島大学<sup>8</sup>、JAXA/ISAS<sup>9</sup>、名古屋大学<sup>10</sup>)

○大澤崇人<sup>1</sup>、二宮和彦<sup>2</sup>、中村智樹<sup>3</sup>、高橋忠幸<sup>4</sup>、寺田健太郎<sup>2</sup>、塚本尚義<sup>5</sup>、野口高明<sup>6</sup>、岡崎隆司<sup>7</sup>、藪田ひかる<sup>8</sup>、奈良岡浩<sup>7</sup>、坂本佳奈子<sup>9</sup>、橘省吾<sup>4</sup>、渡邊 誠一郎<sup>10</sup>、津田雄一<sup>9</sup>

**【緒言】** 負の電荷を持つミュオンはレプトンの一種であり、電子の 207 倍の質量を持つ。ミュオンビームを試料に照射した場合、ミュオンは原子に捕獲されてミュオン原子を形成する。ミュオンは徐々に内殻軌道へと遷移するが、その際に捕獲特性 X 線を放射する。この X 線を Ge 検出器で検出することで元素分析を行う手法がミュオン特性 X 線分析である。ミュオン由来の X 線は電子由来の通常の X 線と比較して約 200 倍という高いエネルギーを持つため、物質の内部を直接観測することができる利点がある。この分析手法は炭素を含む軽元素を非破壊で検出できることから、はやぶさ 2 が採取する小惑星リュウグウ試料の分析に応用できるのではないかと期待されていた。はやぶさ 2 計画では C タイプ小惑星をターゲットとしており、生命の起源物質を探るといった目標があったため、有機物を構成する炭素は最も重要な分析対象元素とされていた。

**【実験】** 実験は大強度陽子加速器施設 J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) のミュオンビームライン (D2) にて行った。リュウグウ試料を分析するまでに 4 段階で予備実験と装置開発を行い、その後リュウグウ試料の分析を行った。

**【実験 1】** ミュオンビームの条件出しと、ビームコリメータの有効性を検証する実験を行った。その結果、コリメータを使用すべきでないことが判明した。

**【実験 2】** 金属製チェンバーを使用し、内部をヘリウム充填する形で実験を行った。バックグラウンド測定と Murray 隕石 (CM2) の分析を行った。その結果、チェンバーの内壁や窓材に多数のミュオンが当たってしまうことが判明した。

**【実験 3】** 実験 2 の情報を基に新たにグローブボックス付き分析チェンバーを開発した。分析チェンバー内は銅で内張りし、グローブボックス内で小惑星試料をヘリウム雰囲気下で操作できるようにした。サンプルホルダーは銅で作成し、グローブボックスから分析チェンバー内は LM ガイドによって導入可能とした。その結果、バックグラウンドは大幅に低下したが、C や Fe のピークは完全に消えていなかった。

**【実験 4】** 実験 3 の後にグローブボックスと分析チェンバーの内壁をほぼ全て銅板で蔽い尽くす大規模な改造を施して実験を行った。その結果さらにバックグラウンドが低下し、C や Fe のピークはほぼ完全に消滅した。

**【リュウグウ試料分析】** 実験 4 で確立した手法で小惑星試料の分析を行った。その結果、リュウグウの元素組成は CI コンドライトに近く、C の濃度も CI に近かったが、O は大幅に少ないことが判明した。また Na の濃度は CI より有意に高かった。これは地球に落下した CI コンドライトが地球大気により風化しているためと考えられ、太陽系を代表する物質としてのリュウグウ試料の重要性が浮き彫りとなった。

Muonic X-ray analysis for Ryugu sample collected by Hayanusa2

OSAWA T., NINOMIYA K., NAKAMURA T., TAKAHASHI T., TERADA K., YURIMOTO H., NOGUUCHI T., OKAZAKI R., YABUTA H., NARAOKA H., SAKAMOTO K., TACHIBANA S., WATANABE S., TSUDA Y.

特別セッション 福島第一原発事故関連研究の最前線 | 特別セッション 1 福島第一原発事故関連研究の最前線

## 特別セッション 1 福島第一原発事故関連研究の最前線

座長:田中 万也(日本原子力研究開発機構)

2022年9月17日(土) 09:40 ~ 10:50 A会場 (小柴ホール)

Zoomはこちら

[3A01-04-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3A01] 草地土壌における放射性セシウム蓄積への有機物の役割

\*山口 紀子<sup>1</sup>、塚田 祥文<sup>2</sup>、山田 大吾<sup>1</sup> (1. 農研機構、2. 福島大学)

09:40 ~ 10:05

[3A02] 福島第一原発事故に由来する<sup>137</sup>Csと<sup>90</sup>Srの深度分布と移流拡散モデルによる解析

\*山本 康平<sup>1</sup>、吉村 崇<sup>1</sup>、二宮 和彦<sup>1</sup> (1. 大阪大学大学院)

10:05 ~ 10:20

[3A03] セシウムの粘土及び粘土鉱物への吸着と界面活性剤を用いたその除染の基礎的研究

Wijayanto Herry<sup>1</sup>、\*中島 覚<sup>1</sup> (1. 広島大学)

10:20 ~ 10:35

[3A04] 地衣類の生体組織中における放射性セシウム蓄積メカニズム

\*土肥 輝美<sup>1</sup>、飯島 和毅<sup>1</sup>、町田 昌彦<sup>1</sup>、数納 広哉<sup>1,2</sup>、大村 嘉人<sup>3</sup>、藤原 健壮<sup>1</sup>、木村 茂<sup>4</sup>、菅野 太志<sup>5</sup> (1. 日本原子力研究開発機構、2. 法政大学、3. 国立科学博物館、4. 原子力エンジニアリング(株)、5. (株) ペスコ)

10:35 ~ 10:50

(2022年9月17日(土) 09:40 ~ 10:50 A会場)

## [3A01-04-Zoom] セッションのオンライン参加 ( Zoom)

Zoomはこちら



## 3A01

## 草地土壌における放射性セシウム蓄積への有機物の役割

(農研機構<sup>1</sup>、福島大<sup>2</sup>)○山口紀子<sup>1</sup>、山田大吾<sup>1</sup>、塚田祥文<sup>2</sup>

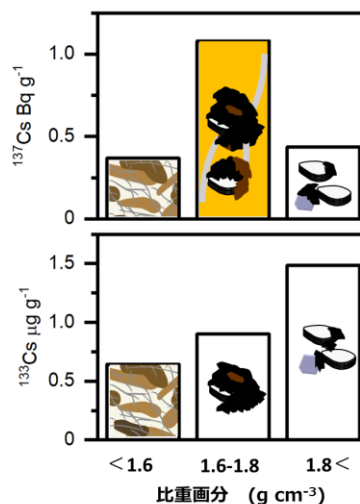
**【緒言】** 2011年3月の東京電力福島第一原子力発電所事故(原発事故)により放出され、地表に沈着した放射性セシウムの大部分は、風化雲母などの鉱物に固定され、動きにくい形態で土壌中に存在している。一方、植物の葉面などに直接沈着し、植物体内に取り込まれた放射性セシウムは、植物の枯死後に植物由来の有機物の構成成分として土壌に供給される。枯死した植物に由来する有機物は、土壌生物や微生物により細断・分解される。さらに植物根や微生物が分泌する代謝産物がバインダーとなり、有機物と鉱物が複合体を形成した団粒が形成される。畑地等と異なり、草地では耕起をおこなわないため、十分に分解のすすんでいない有機物が団粒内に蓄積しやすい傾向にある。草地のように有機物が蓄積しやすい環境下において、植物由来の有機物として土壌に供給された放射性セシウムの動態は、有機物の動態によっても支配されている可能性がある。そこで本研究では原発事故から8年後に採取した草地土壌中における有機物の存在画分と放射性セシウムの蓄積の関係を明らかにすることを目的とした。

**【実験】** 黒ボク土草地から表層土壌を採取した。ポリタングステン酸ナトリウム溶液を用いて土壌を軽画分(1.6 g cm<sup>-3</sup>以下、植物残渣など易分解性有機物を含む)、中画分(1.6-1.8 g cm<sup>-3</sup>、分解過程の有機物と鉱物の複合体を含む)、重画分(1.8 g cm<sup>-3</sup>以上、有機物は鉱物と結合した腐植物質が主体)に分画した。各画分の<sup>137</sup>Cs、安定セシウム(<sup>133</sup>Cs)濃度を測定した。

**【結果と考察】** <sup>133</sup>Cs濃度は、重画分で最も高く、土壌に長期間存在し続けている安定セシウムは、鉱物に固定された形態が主体であることが示された。これに対し<sup>137</sup>Cs濃度は、中画分で顕著に高かった(右図)。すなわち原発事故時に牧草に沈着した放射性セシウムが、有機物と鉱物からなる団粒内に8年間残留していたことが明らかになった。この結果は団粒内に隔離されることで有機物が微生物分解を受けにくくなり、比較的長期間保存されることと整合性がある。一方、<sup>137</sup>Csを濃縮した中画分の重量は土壌全体からみるとごく一部である。重画分において鉱物に固定された形態で大部分が存在している点は原発事故由来の放射性セシウムも安定セシウムと同様であった。しかし草地のように有機物が蓄積しやすい環境下では、中長期的な放射性セシウムの動態が団粒への物理的な隔離によっても支配されていることも考慮する必要がある。

**【謝辞】** 本研究は、放射能調査研究委託事業のうち「農林生産環境中における放射性核種の濃度変動の要因と動態の解明」により実施した。

Role of organic matter on radiocesium accumulation in pasture soils.  
YAMAGUCHI, N., YAMADA, D., TSUKADA, H.



図：各比重画分の<sup>133</sup>Cs,<sup>137</sup>Cs濃度

## 3A02

福島第一原発事故に由来する  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{90}\text{Sr}$  の深度分布と移流拡散モデルによる解析(大阪大院理<sup>1)</sup>○山本康平<sup>1</sup>、吉村崇<sup>1</sup>、二宮和彦<sup>1</sup>

【緒言】2011年3月11日に起こった東日本大震災により福島第一原発事故が発生した。原発から放出された様々な放射性核種のうち  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{90}\text{Sr}$  は、半減期が長く事故から10年以上が経過した現在でも環境中に残存しており、これらの環境動態が注目されている。 $^{137}\text{Cs}$  と  $^{90}\text{Sr}$  はその化学的性質が異なるため、土壌中の移行挙動に違いが見られることが分かっている。一方で、有機物の多い日本の土壌における環境動態はほとんどわかっていない。土壌中の移行挙動を議論するうえで、移流拡散モデルによる解析は有効な手段の一つである[1]。本研究では、福島県内の原発事故による汚染があった地域の土壌の  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{90}\text{Sr}$  の放射能を測定し、これら2核種の深度分布を調査した。そして得られた深度分布に移流拡散モデルを適用し、 $^{137}\text{Cs}$  と  $^{90}\text{Sr}$  の移動度と拡散係数を求めた。

【実験】2016年6~8月に福島県内7地点で表層から深さ20 cmまでサンプリングを行い、2.5 cm 間隔で切り分けた。まず試料を13~45 g 分取し Ge 検出器で  $^{137}\text{Cs}$  放射能を定量した。その後、電気炉にて110°Cで水分を飛ばし、次に400°Cで一晩加熱し有機物を分解した。濃硝酸50 ml とキャリアーとして  $^{88}\text{Sr}$  を5 mg 加え、ヒーターでこの土壌を8時間加熱した。自然ろ過した溶液から Sr レジンを用いて Sr を分離し、液体シンチレーションカウンターを用いたチェレンコフ光測定をすることで  $^{90}\text{Sr}$  の放射能を定量した。最後に ICP-MS で  $^{88}\text{Sr}$  を測定することで化学収率を決定した。

【結果・考察】各サンプルの濃度比  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$  を計算したところ、 $10^{-4}$ ~ $10^{-5}$  であり、これまで報告されている原発事故による汚染があった土壌での  $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$  比と概ね一致した[2]。得られた  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{90}\text{Sr}$  の深度分布の例を図1に示す。

$^{137}\text{Cs}$  より  $^{90}\text{Sr}$  の方が土壌深部への移行が速い傾向にあることが分かった。移流拡散モデルによる解析を行い、移動度と拡散係数を算出したところ、移動度は  $^{90}\text{Sr}$  より  $^{137}\text{Cs}$  の方が高く、一方で拡散係数は  $^{90}\text{Sr}$  の方が高いことが分かった。欧州の土壌から得られた移動度と拡散係数と今回得られた値を比較すると[3]、移動度は  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{90}\text{Sr}$  とともに欧州の有機質土と同程度の値であった。拡散係数は  $^{137}\text{Cs}$  では欧州の有機質土と同様の値であったが、 $^{90}\text{Sr}$  では本研究の値がかなり高いことが分かった。

[1]M. Herranz et al. Inventory and vertical migration of  $^{90}\text{Sr}$  fallout and  $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$  ratio in Spanish mainland soils *Journal of Environmental Radioactivity* 102, (2011), 987-994

[2]IAEA, “土壌モニタリングの測定結果“ (2011-2017)

[3]IAEA, “Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environment”, 2010

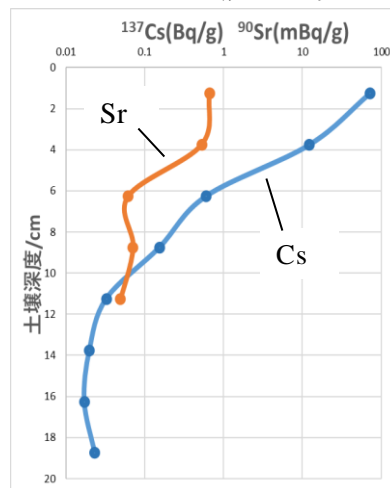


図1 富岡町で採取した土壌の  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{90}\text{Sr}$  の深度分布

Vertical profiles of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident and analysis by convective-diffusive model  
YAMAMOTO, K. YOSHIMURA, T. NINOMIYA, K.

## 3A03

## セシウムの粘土及び粘土鉱物への吸着と界面活性剤を用いたその除染の基礎的研究

(広島大学) Wijayanto Herry、○中島 覚

【緒言】長鎖アルキル基を有するカチオン性界面活性剤がセシウム(Cs)で汚染された土壌からの除染剤として着目されている。長鎖アルキル基が長くなるとカオリナイトから Cs を多く除染することが報告されている。しかしながら四級アミンのかさ高さの効果はこれまで報告されていない。本研究では、界面活性剤として図 1 に示す BDAB (benzyl dodecyl dimethyl ammonium bromide) と DTAB (dodecyl trimethyl ammonium bromide) を用いて粘土 (Na-及び Ca-ベントナイト) 及び粘土鉱物 (カオリナイト及びイライト) からの Cs の除染を行った。

【実験、結果と考察】粘土及び粘土鉱物へ Cs を吸着させた後、BDAB、DTAB 及び塩酸を用いて除染実験を行った。バッチ実験の結果、界面活性剤濃度を上昇させると、除染効率が上昇することが分かった。

モンモリロナイトを多く含む膨潤性のベントナイトでは、層間距離の増加を伴って Cs の除染が行われた。Na-ベントナイトでは、BDAB は DTAB よりも高い除染効率を示した。これは、よりかさ高い BDAB において層間距離がより増加したためである。これに対して、Ca-ベントナイトからの Cs 除染は BDAB 及び DTAB で大きな違いは見られなかった。界面活性剤を用いた除染後の層間距離の増加は両者で同程度であったことと一致する。これは二価の  $Ca^{2+}$  が負に帯電した上下の粘土層を引き付けているためであり、層間距離の増加に制限を加えている。

カオリナイトからの Cs 除染を図 2 に示す。BDAB、DTAB の除染効率は塩酸よりも高いことが分かる。BDAB は低濃度で除染効率が上がるのに対し、DTAB では低濃度で除染効率が上がった後プラトーとなり、さらに濃度が上昇するとミセルを形成して除染効率が上昇することが分かった。界面活性剤のイオンと比較して、ミセルを形成すると粘土表面とより強く相互作用するためであると考えられた。

イライトからの Cs 除染については、BDAB、DTAB とも塩酸と同程度の除染効率であった。イライトにはフレイドエッジサイトが存在し、Cs を強く吸着しているためであると考えられる。

Cs 除染の動力学を検討した。結果は偽二次でよくフィットでき、BDAB と DTAB による除染はイオン交換型で進むことが分かった。

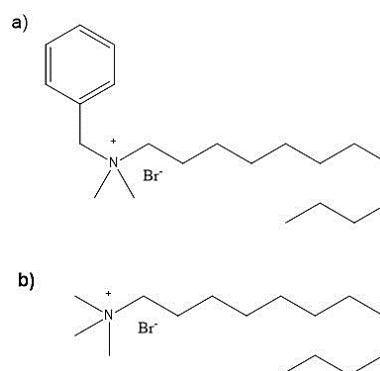


Fig. 1. Structure of (a) BDAB and (b) DTAB.

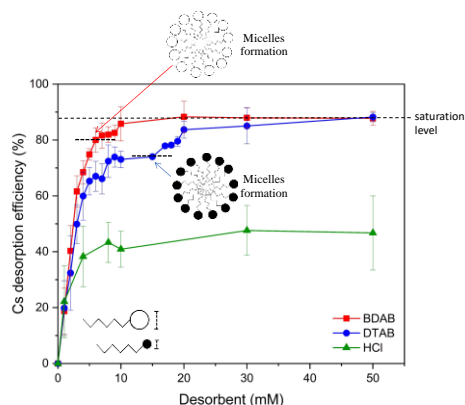


Fig. 2. Cs desorption from kaolinite.

Basic study on the adsorption of cesium to clays clay minerals and its desorption using cationic surfactant

WIJAYANTO H., NAKASHIMA, S.

## 3A04

## 地衣類の生体組織中における放射性セシウム蓄積メカニズム

(原子力機構<sup>1</sup>, 法政大<sup>2</sup>, 科博<sup>3</sup>, NECO<sup>4</sup>, PESCO<sup>5</sup>)○土肥輝美<sup>1</sup>, 飯島和毅<sup>1</sup>, 町田昌彦<sup>1</sup>, 数納広哉<sup>1,2</sup>, 大村嘉人<sup>3</sup>,  
藤原健壮<sup>1</sup>, 木村茂<sup>4</sup>, 菅野太志<sup>5</sup>

## 【はじめに】

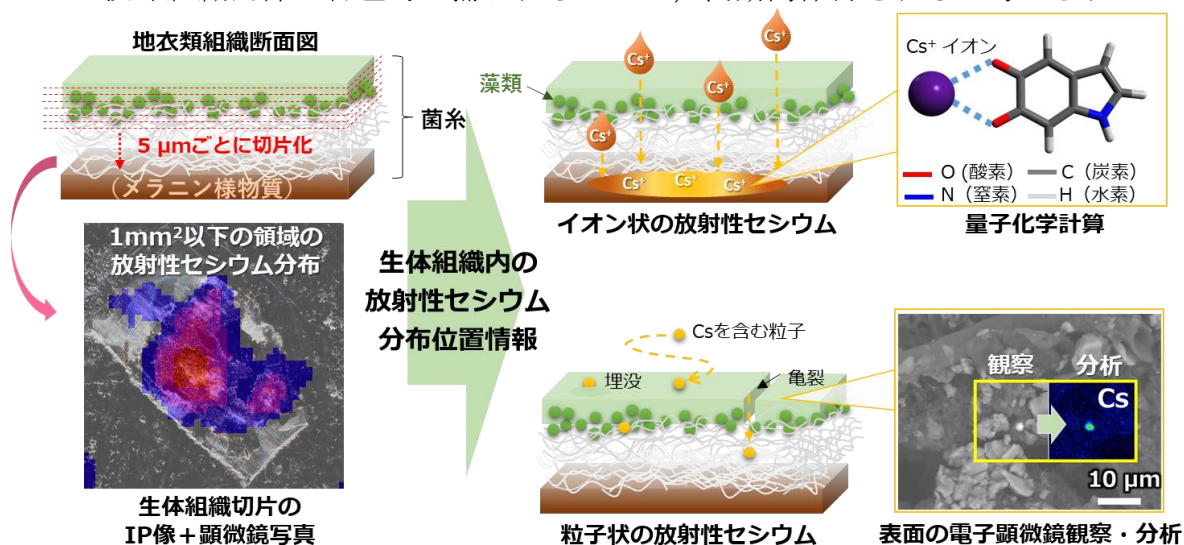
福島第一原子力発電所事故後、演者らは地衣類（藻類と共生する菌類の総称）が大気中から降下する粒子状物質を体内に蓄積する性質に着目し、地衣類を用いて放射性Csを含む降下物の空間的な分布や化学形態を推定する手法開発を進めてきた。しかし、地衣類が放射性Csを「どの部位」で「どのような化学形態」で保持するかは不明であったため、本研究ではそれらを明らかにすることを目的とした。

## 【方法】

試料には、福島県内で採取した葉状地衣類・ウメノキゴケ類を用いた。そのIP像と先行研究から、イオン状と考えられる「拡がりを持つCs分布」と、粒子状と考えられる「点状のCs分布」を持つ断片に分けた。それぞれの小片試料を水平方向に厚さ5μmにスライスした切片に対してIP像を取得し、デジタルマイクロスコープ像を組み合わせ、生体組織内の放射性Cs分布位置を特定した。さらに、その位置情報を基に量子化学計算、電子顕微鏡分析を行い、放射性Csが長期間保持される仕組みを考察した。

## 【結果・考察】

イオン状の放射性Csは下部組織中のメラニン様物質（黒褐色色素）の分布位置に、粒子状の放射性Csは上部組織や組織内部に存在することが確認された。量子化学計算によりイオン状のCsはメラニン様物質と錯形成すること、Naとメラニン多量体が構造的に安定な錯形成をとるとの先行研究の報告から、Csも同様にメラニン様物質の多量体との錯形成で安定的に保持されることが示唆された。一方、上部組織表面では、電子顕微鏡による元素分析等から、約2μm径の粒子状の放射性Csを検出した。組織表面の詳細観察より、類似の大きさを持つ粒子の一部が組織に埋没する状態で捕らわれている様子が観察されたことから、粒子状の放射性Csは、菌糸の成長による組織表面への埋没や組織内部で物理的に捕われることで、長期間保持されると考えられた。



Dohi et al. (2022) PLoS ONE 17(7): e0271035

Accumulation mechanisms of radiocaesium within lichen thallus tissues

DOHI T., IJIMA K., MACHIDA M., SUNO H., OHMURA Y., FUJIWARA K., KIMURA S., KANNO F.

---

基盤セッション 教育関連 | 基盤セッション E: 教育関連

## 基盤セッション E: 教育関連

座長:篠原 厚(大阪青山大学)

2022年9月17日(土) 10:55 ~ 11:55 A会場 (小柴ホール)

Zoomはこちら

---

[3A05-06-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3A05] 高専から大学院までの原子力・放射線教育体制構築事業の紹介

\*鈴木 達也<sup>1</sup> (1. 長岡技術科学大学)

10:55 ~ 11:25

[3A06] 浜通り地域環境放射線研修会～放射線を中心に据えた総合教育～

\*高橋 賢臣<sup>1</sup>、大原 理彩子<sup>1</sup> (1. 大阪大学)

11:25 ~ 11:55

(2022年9月17日(土) 10:55 ~ 11:55 A会場)

## [3A05-06-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

Zoomはこちら

## 3A05

## 高専から大学院までの原子力・放射線教育体制構築事業の紹介

(長岡技科大)○鈴木達也

**【緒言】** 長岡技術科学大学(長岡技大)は、高等専門学校(高専)の卒業生を受け入れることを目的に設立された大学であり、3年次への編入生が全体の8割を占めるなど、他の大学とは異なる特徴を持っている。長岡技大は、設立目的により、高専との間で特別な関係があり、とりわけ、国立高専機構とは多くの連携事業を行っている。我々の部門である量子原子力系は、2012年に修士課程に原子力システム安全工学専攻として設立されたことにより始まったものであり、設立当初から高専との連携による原子力や放射線に係る技術者や研究者の育成事業を行ってきた。ここでは、現在行っている規制人材育成事業及び、今までの行ってきた教育も含めて紹介する。

**【人材育成プログラム】** 長岡技大では、文部科学省の国際原子力人材育成イニシアティブ事業を実施機関として3件行っており、また、国立高専機構の同事業も4件連携している。そのうち、平成24～26年度に実施した「原子力発電リスク認識のための中学-高専-大学院高度連携教育」と平成25～27年度にほぼ並行して実施した「放射線利用施設を用いた実践的原子力技術者育成の高専・大学一貫教育」が高専から長岡技大の大学院までの連続的な一貫教育を試みたものである。前者は、高専への入学が中学からであることを意識し、長岡高専の教員と共に教育活動を行ったものであり、中学だけではなく、小学校にまで広げている。この教育プログラムが始まったのは、東日本大震災による1F事故の翌年であるので、原子力事故のリスク管理を中心とし、小中学校の児童・生徒には、放射線の特性を中心として説明しつつ、原子力事故が起きた場合(原子力発電所の立地地域の学校で教育を行っている)にどのようにすべきかなどのお話をした。本事業終了後も小中学校の教育は、長岡高専と共に続けている。後者は、長岡技大の放射線施設(加速器施設、非密封RI施設)を高専に共同利用のために開放すると共に長岡技大の施設を利用し、高専本科、専攻科を経て、長岡技大大学院までの間で段階的な教育を行うプログラムを作成した。本プログラムでは、高専の教員及び高専生に長岡技大に来て長岡技大の施設を使っていただく体制を築くと共に修士課程に非密封RIを用いた実験と加速器を用いた実験を授業の一部として取り入れた。

長岡技大では、原子力規制委員会の原子力規制人材育成事業を第1期として、平成28年～令和2年「システム安全と地域連携新潟モデルに基づく原子力規制人材育成」を行い、第2期として平成3年から平成7年(予定)「“新潟モデル”による高専から大学院までの教育体制構築」を行っている。ここで言う“長岡モデル”とは、「原子力および他分野の知見を含めたシステム安全の総合的な理解に立ち、本学がこれまで地域教育機関、地域防災行政当局、発電所および地元検査官と連携して構築してきた重層的な原子力安全人材育成モデル」とする長岡技大での名称である。1期では、長岡技大の大学院生を中心に試行を行い、リスク管理や大学内での教育カリキュラムの充実を図った。2期では、教育を全国の高専に広げ、前述の文科省のプログラムで培ってきた教育スタイルを持ち込んで、高専生に実習に参加してもらい、高専生が長岡技大の学部に編入した後に、大学院工学専攻量子・原子力統合工学分野での教育にスムーズに接続できるよう学部でのコースの充実を図ると共に大学院教育の改良を行っている。

Development of continuous education system from KOSEN to NUT for pragmatical nuclear and radiation engineer  
SUZUKI, T.

締め切り 8月1日

3A06

浜通り地域環境放射線研修会～放射線を中心に据えた総合教育～

(大阪大学)○高橋賢臣、○大原理彩子

【背景と目的】 本研修では、単なる情報や知識の提供ではなく、科学的に整理された系統的な学習と実際に放射線を意識する現場での体験を通して、学生一人一人が自ら考え、想像力を持って行動できるようになることを目指している。大規模災害等に対応するためには、現状や未来の自然科学的な分析が基本となるが、それだけでは十分ではない。現実にはどのような自然災害が起こり得て、そこで人がどのように振る舞うかを考える想像力と、未曾有の災害に対するこれまでにない新しい対応の手段を考え出す創造力を働かせる必要がある。さらに、さまざまな利害や価値観の入り混じった社会で解決策を見つけていく、いわば「市民性」が必要な場面も多い。

本研修会では自然科学と人文社会科学にわたる実体験に裏打ちされた知識と思考力、想像力と創造力を育み、福島県浜通りの発展的復興に資する市民性を持った人材育成を推し進めることを目的としている。

【研修会の内容】 本研修会では大阪大学を中心とした全国の大学の学生が福島県浜通り地区を訪れ、環境放射線を自分たちで測定することで福島の環境放射線の実情を自身の体験を通じて理解する。また、廃炉作業が進行中の福島第一原発、いまだに大部分が帰還困難区域である大熊町、居住地のほとんどが除染を完了し住民の帰還が進んでいる飯舘村、以前に近い生活を取り戻している福島市街地などを視察し、地元の方と意見交換することで、震災時の様子やそこからの復興の過程を知り、放射線による直接の影響やそれから派生した人文社会的問題を見聞する。さらに、講義で修得する放射線の自然科学的な知識や、大規模事故にかかわる人文社会的な問題に関する知識とあわせ、学生間の議論を通じて復興に対して自分たちや国にできることを考える。

【受講生の言葉】 大学1年生の時に初めて研修会に参加し、系統的に放射線についての学びを得ました。文系出身で放射線の予備知識もほとんどありませんでしたが、徐々に理解できることが増え、全く関わったことのない分野でも順を追えば理解できるようになるという学びの楽しさを知りました。またその過程で、当初は研修会に参加することさえ反対であった母親を説得できたことや、様々な分野・背景を持った学生と毎晩議論をして意見交換を行なったことは、学んだことを自らの言葉で発信する良い経験となりました。

2年目以降は学生と教職員の間を取り持つ「チューター」として研修会に参加し、1年目に学んだ経験から、知識をただ伝えるだけでなく、興味を持って取り組んでもらうためにはどのように話せば良いかを考えるなど、知識を受け取る側から伝える側へと意識が変化していきました。福島県復興のためには、現状を正しく知る人を増やし、風化させないことが重要であり、私にできることは、見聞きしたことや学んだことをまずは身近な人から自分の言葉で伝えていくことだと考えています。そのためにこれからも福島県を訪れ学びを続けていきたいです。

Environmental Radiation studies in Hamadohri Area, Fukushima pref.  
TAKAHASHI M., OHARA R.



---

高校生ポスター | 高校生ポスター

## 高校生ポスター

2022年9月17日(土) 12:00 ~ 12:30 A会場 (小柴ホール)

[Zoomはこちら](#)

---

[3A-1200-1add] 高校生ポスター

12:00 ~ 12:30

12:00 ~ 12:30 (2022年9月17日(土) 12:00 ~ 12:30 A会場)

[3A-1200-1add] 高校生ポスター

Zoomはこちら

部会 | 部会

## 教育部会

座長:篠原 厚(大阪青山大学)

2022年9月17日(土) 12:55 ~ 13:25 A会場 (小柴ホール)

[Zoomはこちら](#)

---

---

基盤セッション 教育関連 | 基盤セッション E: 教育関連

## 基盤セッション E: 教育関連

座長:松尾 基之(東京大学)

2022年9月17日(土) 13:25 ~ 14:50 A会場 (小柴ホール)

Zoomはこちら

---

[3A07-10-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3A07] 放射線教育の拡がり と 課題、そして SNS時代のリスクコミュニケーション

\*鳥居 寛之<sup>1</sup> (1. 東京大学 大学院理学系研究科)

13:25 ~ 14:00

[3A08] 原子力規制庁原子力工学系職員採用試験過去問題の放射化学教育への応用

\*北澤 孝史<sup>1</sup> (1. 東邦大学理学部)

14:00 ~ 14:15

[3A09] 東京大学での放射線教育に関する e-learningの現状とこれから

\*桧垣 正吾<sup>1</sup> (1. 東京大学アイソトープ総合センター)

14:15 ~ 14:35

[3A10] RI施設における法令報告に至らない事故トラブル情報の収集と情報共有

\*桧垣 正吾<sup>1</sup>、鈴木 智和<sup>2</sup>、高橋 賢臣<sup>2</sup> (1. 東京大学、2. 大阪大学)

14:35 ~ 14:50

(2022年9月17日(土) 13:25 ~ 14:50 A会場)

## [3A07-10-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

Zoomはこちら

## 3A07 放射線教育の拡がりと課題、そして SNS 時代のリスクコミュニケーション (東京大理) ○鳥居寛之

原発事故を契機としてこの 11 年間の間に、大学・学会・一般向けも含め放射線に関する数々の講義や講演活動に参加してきた教育経験から感じた、放射線教育の展開や課題を述べる。また、学振の委員会や環境省研究事業、大学院副専攻「科学技術インタープリター養成プログラム」において取り組んでいるリスクコミュニケーションの研究、特に放射線に関する Twitter のビッグデータ解析を紹介し、SNS 時代において科学的情報を効果的に正しく伝える方策を考える。

講演者は 2011 年より、東京大学教養学部にて大学 1・2 年生を相手に放射線について多角的に学ぶ講義シリーズを立ち上げ、これまで 11 年に渡って継続した。原子力や放射線の基礎知識から事故による環境汚染や生物学的影響まで、原子核物理・放射線物理・放射線計測・環境放射化学・放射線生物学・放射線医療・放射線防護学・農学・さらには科学技術社会論や社会学まで、幅広い学問分野の専門家と連携して発展的に理解できるよう工夫した。理系も文系学生もみな頗る熱心に受講し評判も良かったが、年々受講者が減少し、事故の記憶の風化を感じざるを得ない。

このほか、教養課程の放射線実験教育、専門の放射化学教育、他大学等におけるエネルギー科学や放射線講義、また放射線取扱主任者として全学の取扱者向け講習教材に携わった経験などをまとめて述べるとともに、放射線管理者として、大学での研究における RI 利用の現状を報告する。

一般向けの講演活動も積極的に行った。専門家として何をどう伝えるべきか、悩みながら現場で学ぶことも多かった。原発事故後の数年間は、様々な分野の「専門家」がそれぞれの立場や思惑から発言したことにより、リスクコミュニケーションは混乱を極めた。特に SNS においては意見の対立は激しく、フェイクやデマを含めて、危険を煽る情報が大勢を占めた。放射線科学・情報・医学・社会・心理・リスク学・行政など様々な専門分野の構成員からなる我々の研究班では、当時の Twitter ビッグデータを解析することで、情報拡散とコミュニティーの分断を明らかにし、また科学的情報に基づいて発信し影響力のあったインフルエンサーへのインタビューを通して、SNS 時代に対応した科学者による効果的な情報発信法を研究し、提言としてまとめた。従来言われてきたユニークボイス(統一見解)による発信は信用されず、正しいことが伝わるという幻想は捨てて、早くて声の大きい勢力が勝るというネットワークの特性を熟知した上で戦略的に迅速に発信することが必要なこと、また、放射線教育の拡充はもちろんのこと、普段から幅広い分野の科学者や学会間の連携体制を構築しておくことの重要性、などが浮かび上がってきた。講演では、研究成果を踏まえ、トランスサイエンスとしての放射線科学の社会への伝え方を議論する。

なお、放射線に関する Twitter の研究は、環境省委託事業である平成 28~29、令和元~3 年度「放射線健康管理・健康不安対策事業(放射線の健康影響に係る研究調査事業)」により実施した。

### 参考文献

- 鳥居寛之「放射線を科学的に理解するための教育」日本物理学会誌 **68**, 390-393 (2013).  
鳥居寛之, 小豆川勝見, 渡辺雄一郎 著「放射線を科学的に理解する」丸善出版 (2012).  
鳥居寛之, 講義スライド <http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/>  
鳥居寛之 他「塩化カリウムを用いた放射線計測実習」大学の物理教育 **23**, 147-152 (2017).  
Tsubokura M., Onoue Y., Torii H. A. et al., "Twitter use ...", PLOS ONE **13**(9): e0203594 (2018).  
河野恭彦, 下道國 他「福島第一原子力発電所事故後のウェブサイト…」保健物理, **55**(4), 226-238 (2020).  
Sano Y., Torii H. A., "Simulation of information ...", Frontiers in Physics **9**, 640733 (2021).

Development and problems of radiation education, as well as risk communication in the age of social networking  
TORII H. A. (The Univ. of Tokyo)

# 3A08 原子力規制庁原子力工学系職員採用試験過去問題の放射化学教育への応用

(東邦大理)○北澤 孝史

公表されている原子力規制庁原子力工学系職員採用試験の過去問題の中には放射化学に関連する問題がかなりある。東邦大学理学部化学科3年の選択授業講義科目放射化学(化学科および生命圏環境科学科の臨床検査技師課程の学生も含む)における使用例について述べる。本講義では従来、教科書として 富永健、佐野博敏：放射化学概論[第4版]、東京大学出版会(2018)を使用し、演習書として 竹田満洲雄、高橋正、棚瀬知明、北澤孝史：無機・分析化学演習 大学院入試問題を中心に、東京化学同人(1998)を使用し第5章の放射化学の例題を用いて講義を行ってきた。

このごろ原子力規制庁原子力工学系職員採用試験の選択制問題が講義の演習問題に適当なものが多いことからそれを各単元での学生の到達度をチェックする意味で活用している。下図は放射化学の講義での使用例で基礎的事項や計算問題も含まれている。講演では、他の計算問題例についても紹介したい。

原子力規制庁 原子力工学系採用試験 2019年度 No.36

### トリチウム

トリチウムに関する次の記述のA~Eに当てはまるものの組合せとして最も妥当なのはどれか。  
トリチウムは半減期 A、E最大エネルギー18.6 keVの純 E放出各種である。放出される Eのエネルギーが非常に Cことから測定を行う際には、Eが主に用いられる。

A	E	C	E
1. 12.32年	$\beta$ 線	低い	液体シンチレーションカウンター
2. 14.26日	$\alpha$ 線	高い	液体シンチレーションカウンター
3. 12.32年	$\alpha$ 線	低い	液体シンチレーションカウンター
4. 12.32年	$\beta$ 線	低い	ゲルマニウム半導体検出器
5. 14.26日	$\beta$ 線	高い	ゲルマニウム半導体検出器

原子力規制庁 原子力工学系採用試験 平成29年度 No.30

### 核原料物質・核燃料物質

プルトニウムの性質に関する次の記述のA~ウに当てはまるものの組合せとして最も妥当なのはどれか。  
プルトニウムは、原子番号 Aで、複数の放射性同位体が知られている。そのうち、プルトニウム239は、物理的半減期が E年で、ウ崩壊する核種である。

A	E	ウ
1. 92	約2万4千	$\beta$
2. 93	約2万4千	$\alpha$
3. 93	約24万	$\beta$
4. 94	約2万4千	$\alpha$
5. 94	約24万	$\beta$

原子力規制庁 原子力工学系採用試験 平成26年度 No.10

### 放射平衡

$^{238}\text{U}$ を10 g含む鉱石中のウラン系列核種が永続平衡にある場合、この鉱石中の $^{222}\text{Rn}$ の放射能[Bq]として最も近い値はどれか。ただし、 $^{238}\text{U}$ の比放射能は $1.2 \times 10^4$  Bq/gとする。

ウラン系列において、 $^{222}\text{Rn}$ に至るまでには4回の $\alpha$ 崩壊と2回の $\beta$ 崩壊をするが、最初の $^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th}$ の半減期 $4.46 \times 10^4$ 年が最も長く、その先は永続平衡となる。

永続平衡では  $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots$  が成り立つ。

$10 \text{ g} \times 1.2 \times 10^4 \text{ Bq/g} = 1.2 \times 10^5 \text{ Bq}$

1. $1.2 \times 10^4$ Bq
2. $2.4 \times 10^4$ Bq
3. $1.2 \times 10^5$ Bq
4. $2.4 \times 10^5$ Bq
5. $6.0 \times 10^5$ Bq

原子力規制庁 原子力工学系採用試験 2020年度 No.4

### 質量とエネルギー

静止エネルギーが511 keVである電子の質量として最も妥当なのはどれか。ただし、真空中での光速は $3.0 \times 10^8$  m/s、1 eVは $1.6 \times 10^{-19}$  Jとする。

エネルギーの単位をeVからJに変換すると  $5.11 \times 10^5 \text{ eV} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} = 8.18 \times 10^{-14} \text{ J}$   
質量とエネルギーに関するEinsteinの相対論的関係式  $E = mc^2$   
を用いて静止している電子のエネルギーを考えると  $8.18 \times 10^{-14} \text{ J} = m_e \times (3.0 \times 10^8 \text{ m/s})^2$   
 $m_e \approx 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$

1. $9.5 \times 10^{-31} \text{ kg}$
2. $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$
3. $8.0 \times 10^{-28} \text{ kg}$
4. $7.4 \times 10^{-28} \text{ kg}$
5. $2.8 \times 10^{-28} \text{ kg}$

原子力規制庁 原子力工学系採用試験 平成26年度 No.11

### 放射能

半減期が約 $1.5 \times 10^{18}$ 秒の放射性同位体725 mgの放射能を調べたところ、2310 Bqであった。この同位体の核種は次のうちではどれか。ただし、 $\ln 2 = 0.693$ 、アボガドロ数を $6.0 \times 10^{23}$ とする。

放射能(A)は以下のように表せる。(単位はベクレル：Bq)

$$A = \lambda N \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

$$2310 \times \frac{1.5 \times 10^{18}}{0.693} \times \frac{1}{6.0 \times 10^{23}} = \frac{1}{120}$$

1.  $^3\text{H}$

2.  $^{14}\text{C}$

3.  $^{87}\text{Rb}$

4.  $^{137}\text{Cs}$

5.  $^{238}\text{U}$

$120 \times 0.725 = 87$  ← 求める放射性同位体の原子量

原子力規制庁 原子力工学系採用試験 2019年度 No.13

### 放射能

1グラムのカリウムに含まれるカリウム40( $^{40}\text{K}$ )はおおよそ何ベクレルか。ただし、カリウム中の $^{40}\text{K}$ 質量割合を0.012%、 $^{40}\text{K}$ の半減期を $4.0 \times 10^{16}$ 秒、アボガドロ数を $6.0 \times 10^{23}$ 、 $\ln 2 = 0.693$ とする。

放射能(A)は以下のように表せる。(単位はベクレル：Bq)

$$A = \lambda N \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

$$1 \times \frac{0.012}{100} \times \frac{1}{40} \times 6.0 \times 10^{23} \times \frac{0.693}{4.0 \times 10^{16}} = 31.1$$

1. 0.31

2. 1.5

3. 31

4. 150

5. 3100

Radiochemical education using employment examination for nuclear engineering in NRA KITAZAWA, T.

## 3A09 東京大学での放射線教育に関する e-learning の現状とこれから (東京大学アイソトープ総合センター) ○桧垣 正吾

東京大学では、新規放射線取扱者（X線や核燃料の取扱者を含む）に対する教育訓練として、改正前の法令に定められている各科目について、全学一括で6時間の講習会を行い、さらに使用する各部局での放射線障害予防規程を30分以上受講することを全学の規則として定めている。この時間は、改正前のRI法で定められていた時間数よりも「放射線の人体影響に関する科目」が30分長い。以前は、全学一括の講習会をアイソトープ総合センターが主催し、対面で開催していた。開催回数は年間10回程度と多いものの丸1日を費やす一括講習会の受講を、オンデマンドに行えるよう新規放射線取扱者教育 e-learning システムを開発し、2018年度から運用してきた。この背景には、放射線取扱者の全学管理システムのオンライン化によって、登録申請から教育訓練、健康診断の受講申し込みまでを各自でオンライン申請することにより、部局の放射線管理担当者の業務負担軽減を図ることにもあった。

対面型講習会も移行期間には開催していたが、新型コロナウイルス感染症による初めての緊急事態宣言が発出された2020年春に、e-learningによる教育への移行が図らずも完了した。また、この時には、各大学での対面型教育訓練の中止に伴う対応として、この e-learning システムを期間限定で学外に無償で開放し、約200名に受講してもらうことができた。

現在の e-learning による新規教育は、講義動画（長さは対面型講習会と殆ど同じ時間）および正誤二択式確認テストから構成される。講義には、対面型講習会に使用するため作成した全学統一の講義資料 PPT を用いており、動画は新規に収録したものである。動画は早送り不可で、動画の最後に表示されるキーワードを入力することで再生完了を確認している（システムからは滞在時間も分かる）。確認テストは講義のセクションごとにストックされている問題からランダムに3問が出題され、全て正解することによって講義の受講を認定している。（従来の対面型講習会では、各講義で出席を取り、全講義終了後に三択式の確認テストを行い、6割以上の正解率で受講を認定していた。）システムおよび確認テストは英語化も行っており、留学生への教育にも対応している。ただし、動画は英語字幕のみの対応である。

e-learning による教育訓練では、内容の定期的なブラッシュアップが不可欠である。修正頻度が高い科目として、不定期に改正される法令がある。現在の動画のベースは2016年に収録されたもののため、その後現在までに行われた改正は字幕で対応しており、今後の再収録が必要である。また、法令改正により可能になった新規教育訓練時間数の減少や、科目の細分化による学外の大規模加速器施設等のみで実験を行う者への対応など、より実情に即した教育訓練内容にするための検討を、今年度から全学 WG で行い始めたところである。

Present and future of e-learning on education and training for new radiation users at the University of Tokyo  
HIGAKI, S.



## 3A10

RI 施設における法令報告に至らない事故トラブル情報の収集と  
情報共有(東京大学<sup>1</sup>、大阪大学<sup>2</sup>) ○ 桧垣 正吾<sup>1</sup>、鈴木 智和<sup>2</sup>、高橋 賢臣<sup>2</sup>

【背景】ハインリッヒの法則によると、1つの重大事故の背後には29の軽微な事故災害と300の無傷害事故があり、さらにその背後には数千の潜在的なトラブルがあるとされている。軽微な事故災害や潜在的なトラブルをひとつひとつ潰していくことで重大事故に至らないようにする考え方から、大学など多くの組織でヒヤリハット事象の報告と共有が行われるようになった。放射線施設における重大事故を、法令により原子力規制委員会に報告しなければならない事故等と定義すると、それに至らなかった事故やトラブルが、軽微な事故災害や無傷害事故に当たると考えることができる。法令報告となった重大事故の情報は、原子力規制委員会によりwebで公開されており、誰でも閲覧可能である。しかし、それに至らなかった数多くの事象を知るのは難しい。軽微な事故からヒヤリハットまでの法令報告に至らない事象の情報を全国的にとりまとめ、その中から各施設が効果的と考えられる事象を選んで教育訓練の際に使いえば、教育効果が高く、本質的な安全の向上に繋がる。本講演では、2つの取り組みについて紹介する。

【取り組み1】科研費に今年度採択された研究課題「ヒヤリハット事例を生かした放射線利用における安全文化醸成のための教材開発」では、大学や研究所のRI施設に対して、アンケート調査とヒアリング調査を行い、全国の放射線施設で起きたヒヤリハット情報を収集・分析し、潜在的リスクを明らかにした上で、その結果に基づいた放射線安全教育資料の作成を行う。今年度実施するアンケート調査では、放射線の使用方法が多岐にわたる教育研究機関の放射線施設でのヒヤリハット事象を収集することで、よく起きる事象や起きた事象の潜在的リスクを明らかにする計画である。ヒアリング調査では、アンケート調査の結果を基に、重要なヒヤリハット事象や、その対応が良好なものについて、当該施設に出向いて聞き取りを行う計画である。トラブルの情報だけでなくその対応やその後の対策、現在の体制などもヒアリングする予定である。

【取り組み2】日本放射線安全管理学会では、RI施設における法令報告に至らない事故トラブル情報の収集と共有に向けた取り組みを行っている。本講演では、発表者の施設で最近起きた事象を実例として紹介するので、放射線事故防止の参考にさせていただきたい。

また、ヒヤリハット事例をお持ちの方は、QRコードを読み取ってアクセスしていただき、情報収集にご協力いただきたい。



【謝辞】本研究はJSPS 科研費 22K02944 の助成を受けた。

Actions on collecting and sharing information of minor accidents and incidents at radiation facilities  
HIGAKI, S., SUZUKI, T., TAKAHASHI, M.

---

基盤セッション 教育関連 | 基盤セッション E: 教育関連

## 基盤セッション E: 教育関連

座長:薬袋 佳孝(武蔵大学)

2022年9月17日(土) 15:00 ~ 16:30 A会場 (小柴ホール)

Zoomはこちら

---

[3A11-14-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3A11] 学校で求められる放射線教育;  
安価で安全な放射化学実験法

\*鎌田 正裕<sup>1</sup> (1. 東京学芸大学)

15:00 ~ 15:30

[3A12] 小学生の放射線教育の経験からみえてくるもの

\*岡田 往子<sup>1</sup> (1. 東京都市大学)

15:30 ~ 15:45

[3A13] 放射能・放射線教育ためのランタンマントルを利用したデモ実験の工夫

\*横山 明彦<sup>1</sup> (1. 金沢大学理工研究域)

15:45 ~ 16:00

[3A14] 博物館関係者を対象としての放射能汚染対策マニュアルの作成と情報の国際発信の試み

\*佐野 千絵<sup>1</sup> (1. 東京文化財研究所)

16:00 ~ 16:30

(2022年9月17日(土) 15:00 ~ 16:30 A会場)

## [3A11-14-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

Zoomはこちら

## 3A11

## 学校で求められる放射線教育：安価で安全な放射化学実験法

(東京学芸大学) ○鎌田正裕

【緒言】放射能や放射線等を利用した生徒実験は、「測定器が高価である」、「放射線・放射能の利用に対する法的規制が厳しい」、「生徒や保護者が放射線等の利用に不安を感じる」等の理由から、中・高等学校で行うことは困難と考えられがちで、あまり実施されていないのが現状である。この状況を改善するために、筆者は安価な測定器と放射化学的手法を用いて、温泉水中のごく微量の自然放射能を測定する安価で安全な教育用実験を開発した。方法の詳細について、学校理科における放射線教育の現状と共に当日報告する予定であり、以下に代表的な実験法を2つ紹介する。

【実験】1) 温泉水中に含まれる $^{222}\text{Rn}$ の子孫核種の分離とその測定

たとえば、三朝温泉（鳥取県）や増富温泉（山梨県）のように $^{222}\text{Rn}$ を多く含む温泉水約100mLを硝酸で酸性にし、硝酸ビスマス（ $\text{Bi(NO}_3)_3$ ）を約100mg加えてよく攪拌したのち、アンモニア水で水酸化ビスマスの沈殿を作り、沈殿に含まれる $^{214}\text{Pb}$ 、 $^{214}\text{Bi}$ から放出されるベータ線をGM式の測定器などで測定する。結果の一例を図1に示す。

上記の実験で、硝酸ビスマスを加える際に硝酸鉛も同程度加え、水酸化ナトリウムで沈殿を作ると、 $^{214}\text{Pb}$ は液中に保持され、 $^{214}\text{Bi}$ のみが沈殿に取り込まれるため、その減衰を測定することもできる。

2) 温泉水から分離された $^{222}\text{Rn}$ より生成されるその子孫核種の測定

$^{222}\text{Rn}$ を含む地下水を2Lのペットボトルに1.75L入れてキャップをしたのち、激しく振ることで $^{222}\text{Rn}$ をボトル内の気相中に追い出す。その後、キャップを活性炭カートリッジを取り付けたものに交換し、 $^{222}\text{Rn}$ を含む空気をゆっくりカートリッジ内に流し、同核種を活性炭上に吸着させる。この活性炭から放出されるベータ線をGM式の測定器で測定すると、はじめはベータ線を放出する各種（ $^{214}\text{Pb}$ 、 $^{214}\text{Bi}$ ）がないので、カウント数は低いが時間とともに $^{214}\text{Pb}$ や $^{214}\text{Bi}$ が生成し、カウント数も上昇し、やがて一定に落ち着く。装置と結果の一例を図2と図3に示す。

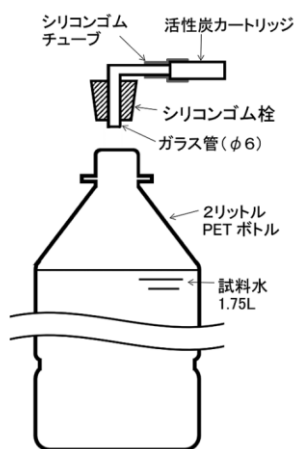


図2 実験装置

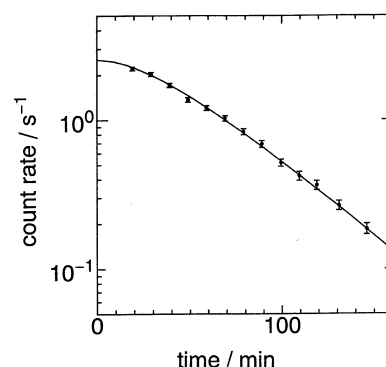


図1 沈殿物から放出されるβ線

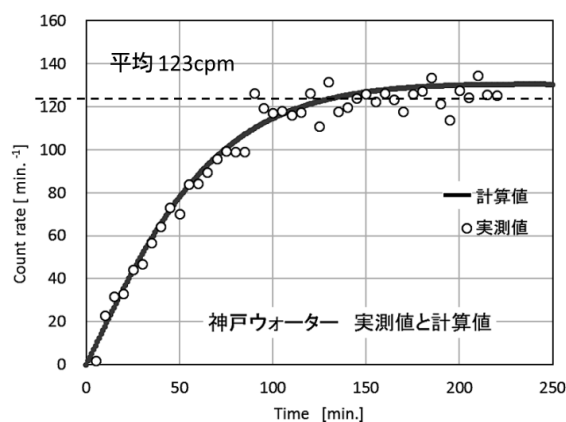


図3 活性炭から放出されるβ線

Radiation education to be conducted at school; Safe and inexpensive experiments for radiochemistry  
KAMATA, M.

## 3A12 小学生の放射線教育の経験からみえてくるもの (東京都市大)○岡田往子

**【緒言】**一般向けの放射線教育をどのように進めていくかについては、いろいろな経験から、多くの方々がそのノウハウを持っていると思う。一般向けと表現しても、放射線教育を受けていない方々向け、初等教育、中等教育向けなどの属性によって情報や情報量などが変わってくる。本発表は初等教育の経験を示し、今後の一般向けの放射線教育につながるヒントを見出したいと考える。

### 【事例】

#### (1) 3.11 前の活動

##### ・手作り霧箱とはかるくん計測を使った授業

小学生(5・6年生対象)には「放射線という言葉」「放射線はどこにでもある」「たくさんあると怖いけど、すこしなら大丈夫」の3つを覚えてもらうこととした。実験では霧箱の観察をし、絵をかいてもらい、飛んでいる飛程を数えさせたりした。

##### ・宇宙誕生・元素誕生の話

「女子高校生夏の学校」で、日本物理学会の方々と実験考案の経験から、小学生にもストーリーのある放射線授業として、宇宙・元素誕生の話から、放射線の話をすることにした。さらに、元素の話から、放射線を知るには、原子の構造を知ることが、早道ではないかと考えるようになり、実践を繰り返した。ほぼ完成形に近づいていた。

#### (2) 3.11 後の活動

当初は原子力文化財団の依頼で福島県内の小学校で実施することになった。小学生の対象も1年生から6年生の全学年になった。

##### ・小学1・2年生対象の難しさ

小学1・2年生は非常に難しいことが、現場に行ってみて実感した。数も言葉もほぼ通じない子供たちに、どう教えるか。紙芝居のようにゆっくり、スケッチブックに書いた絵で放射線という言葉に知ってもらうだけに終始した。小学生の低学年にはパワーポイント使用は向いていないことも実感した。

##### ・素晴らしい授業との出会いと教諭の翻訳の重要性

田村市立芦沢小学校の教諭による事例を紹介する。1年を通した総合学習で放射線をテーマとして、まず、調べ学習し、模造紙にわかったことわからないことを書き出し、わからないことを大人に聞く。その学習でわかったことを劇仕立てにして、学芸会で親や周辺の大人たちに披露する。並行して稲を育て、収穫して、JAにもって行き測定をし、食べられるかを判断する。この中で、私は子供たちの疑問に答える大人の一人となった。その時に、私は気をつけていても小学生が知らない言葉を使ってしまう。その場で担任は私の言葉を翻訳して子供たちに伝えた。この橋渡しの翻訳が重要であると実感した。

##### ・インフォグラフィックスによる情報の可視化

3.11前は、小学生には3つのことを覚えてもらうことで実施してきたが、F1事故後は複雑になり、放射線基礎を追加することになった。そこで、本学の文理融合学科のインフォグラフィックスを学ぶ学生の協力を得て放射線情報を可視化した。

Radiation education for primary school children  
OKADA Y.

## 3A13 放射能・放射線教育のためのランタンマンテルを利用したデモ実験の工夫

(金沢大理工) ○横山明彦

**【緒言】** ランタンマンテルは、キャンプでランタンの光を明るくするために使用するもので、金属塩等を染み込ませた繊維が網目状になっており、トリウムが少量含まれていることがある。ここから放射線やラドンが放出されるため、管理区域外でも実験可能な放射能/放射線実験のデモによく使われてきた。発表者は北陸地区の小中学生向けの化学教室や大学主催の高校生向けのセミナーの講師を担当することがあり、このマンテルを利用して $\alpha$ 線測定による Rn-220 の半減期測定、霧箱による $\alpha$ 線の飛跡観測を実施してきた。また文献【1】から、湿式の化学分離実験を伴う $\beta$ 線測定も可能であることがわかった。本発表では、これらの実践の過程や情報収集によって考案したデモのプログラムを提案する。

**【デモ実験の提案】** トリウムを含むランタンマンテルからはいくつものトリウム系列核種が利用可能であり、実施可能なデモ実験として以下の3つを提案する。

### 案1. Rn-220 の半減期 (55.6 秒) 測定と指数関数

$\alpha$ 線核種使用施設が常備する ZnS(Ag)検出器を利用して $\alpha$ 線測定を行う。バックグラウンドがほぼ無視できるので、強い放射能を使わなくても4半減期以上の減衰を容易に追うことができる。25 mLのプラスチックシリンジにマンテル1-2枚を入れて密閉した空気中にラドンをため、検出器の窓保護用のプラスチックカバー内にガスを注入するだけで計測できる。半減期測定以外にも、トリウム系列核種からなぜラドンだけが放出されるのかを解説すれば、元素転換の原理についても理解を促すことができ、また高校生向けには数学で習う指数関数を測定値から体験できる。

### 案2. 霧箱を利用した $\alpha$ 線の飛程測定

霧箱で $\alpha$ 線を観測すれば、ほぼ一直線に飛ぶので、飛跡の長さ(飛程)を容易に測定でき、また空気中の阻止能の近似式を使えば、 $\alpha$ 線のエネルギーを推定することができる。なお Rn-220 は、短い時間に続けて $\alpha$ 線を2個(6.3 MeV, 6.8 MeV)放出して壊変するので、一か所から2つの飛跡が見られる特徴から事象が判別できる。これを標準にすれば、Po-212 (8.8 MeV)の長い飛跡も同定定量できる。なお Po-212 は Rn-220 の事象がほぼ見えなくなってから、祖先核種 Pb-212 の壊変(半減期 10.64 時間)に伴い見えてくることが期待される。

### 案3. 放射性核種の化学分離と Pb-212-Bi-212 放射平衡の観測

参考文献【1】に従ってシャーレに活性炭を入れた上にマンテルを数枚重ねて置き、数日間放置した後に、活性炭に吸着した Rn-220 とその子孫核種から Bi-212 と Pb-212 を硝酸ビスマス硝酸水溶液に溶解することができる。これらを水酸化物として共沈させて $\beta$ 線源とし、GM 計数管で $\beta$ 線測定ができる。この時、化学収率が元素によって違うので、壊変曲線が Pb-212 (祖先核種)の半減期 10.64 時間からずれる。時間が経過すると Pb-212 の壊変曲線に合ってくるので、放射平衡に至る過程を観測できる。

参考文献【1】鎌田正裕ら、化学と教育 44 巻 1 号 (1996) 51.

Demonstration Experiment Using Lantern Mantle for Radioactivity/Radiation Education  
YOKOYAMA, A.

## 3A14 博物館関係者を対象としての放射能汚染対策マニュアルの作成と情報の国際発信の試み

((独)国立文化財機構東京文化財研究所<sup>1)</sup> ○佐野千絵<sup>1)</sup>

【緒言】 2011年福島第一原子力発電所事故当時、警戒区域内に3つの町立博物館があった。文化財の維持管理のため福島県内で管理可能な場所まで、移動可能な文化財を搬出する『福島被災文化財レスキュー』が2012～2013年に実施された。搬出方針、ガイドライン作成の経緯と学芸員に向けた教育について報告する。

【経緯】 津波被災後、3月29日に宮城県から国に救援要請があり、文化庁は「東北地方太平洋沖地震被災文化財等救援委員会」の設置を3月30日に固め、4月15日に当所を事務局に活動を開始した。5月2日岩手県、7月11日茨城県、7月27日福島県から救援要請があり、この活動は2013年3月末に終了した。福島県への対応は、2011年度は既存法令や基準等に準拠した搬出ガイドライン策定と、レスキュー参加団体（国内11組織、県内7組織）の職員派遣手続き決定に終始した。2012年度に搬出作業が始まり、2013年度には国立文化財機構・国・県の三者で活動を継続し、3町立博物館の98%の資料を搬出した。放射性物質汚損文化財の取り扱いについて、ウクライナの原子力発電所の占拠に驚き、情報提供のため、英訳して2022年3月に国際発信した。

### 【さまざまな悩み】

(現地の博物館職員) 誰に相談したら良いのか。汚染された文化財はもう展示できないのか。絵画にどのような影響があるのか。除染はどうしたら良いのか。

(県職員) 誰も手伝ってくれなさそうなので、県職員と町担当職員で可能な範囲で搬出しようと思うが、安全に作業を実施できるか不安。

(全国の博物館美術館関係者) 海外からの美術品輸入はいつ再開できるのか。

(救援委員会責任者) 専門家と称する人がメディアも含めて多数現れて、異なることを言うので、誰の言っていることを信じたら良いのか。

(保存科学研究センター職員) 誰も自分たちを頼ってくれずショック。

(救援委員会の活動に参加希望の職員) 早くレスキューに行きたいからルールを決めて。

### 【搬出ガイドラインと手続きの決定】

2011年8月22日に基本方針案をまとめ、11月7日に関係団体を集めて了承された。

イ. 放射線防護の観点からの作業管理 放射線取扱作業者に準じた教育訓練と健康診断を実施する；作業者の被ばく量低減のため事前調査を行う；労災認定要件に該当する取扱いを各派遣元で準備する；平常時の一般公衆線量限度1mSv/年を保証されない場合は活動しない；被ばく量を計測する；自主的に参加する人に限る

ロ. 放射性物質汚染文化財搬出による汚染拡散防止 輸出入の基準値、表面汚染密度限度を超えない資料のみ搬出。警戒区域内の活動は延べ21回/226名(2012年度)。

【ふりかえり】 日本の博物館の約8割が歴史系である((公財)日本博物館協会)。参加者は事前の教育訓練と機器操作実習に真摯に取り組み、管理者に従い現地で安全に活動した。「文化財を救いたい」という社会的意識が高く、放射線を怖がるのではなく、リスクを理解して自分を守る方法を身に付け活動に臨んだ成果であろう。

Creation of a radioactive contamination countermeasure manual for museum personnel and an attempt to disseminate information internationally (Tokyo National Research Institute of Cultural Properties)  
SANO, C.

---

閉会式・若手表彰式 | 閉会式

## 閉会式・若手優秀発表表彰式

座長: 松垣 正吾(東京大学)

2022年9月17日(土) 16:35 ~ 16:55 A会場 (小柴ホール)

[Zoomはこちら](#)

---



---

基盤セッション 計測・検出器 | 基盤セッションI: 検出器・計測・イメージング

## 基盤セッションI: 検出器・計測・イメージング

座長:高橋 嘉夫、浅井 雅人(日本原子力研究開発機構 (JAEA))

2022年9月17日(土) 09:40 ~ 11:05 B会場 (206室)

Zoomはこちら

---

### [3B01-05-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

#### [3B01] 二光子ガンマ線イメージングの新たな展開に向けて

\*高橋 浩之<sup>1</sup> (1. 東京大学)

09:40 ~ 10:05

#### [3B02] CdTe検出器によるミュオン X線の三次元元素イメージングシステムの開発

\*邱 奕寰<sup>1</sup>、大澤 崇人<sup>2</sup>、武田 伸一郎<sup>3</sup>、桂川 美穂<sup>3</sup>、長澤 俊作<sup>3</sup>、南 喬博<sup>3</sup>、高橋 忠幸<sup>3</sup>、渡辺 伸<sup>4</sup>、久保 謙哉<sup>5</sup>、水本 和美<sup>6</sup>、齋藤 努<sup>7</sup>、谷口 秋洋<sup>8</sup>、浅利 駿介<sup>1</sup>、梅垣 いづみ<sup>9</sup>、下村 浩一郎<sup>9</sup>、二宮 和彦<sup>1</sup> (1. 大阪大学、2. 日本原子力研究開発機構、3. 東京大学、4. 宇宙航空研究開発機構、5. 国際基督教大学、6. 東京藝術大学、7. 国立歴史民俗博物館、8. 京都大学複合原子力科学研究所、9. 高エネルギー加速器研究機構)

10:05 ~ 10:20

#### [3B03] スペクトル定量法のガンマ線スペクトルへの適用性

\*大島 真澄<sup>1</sup>、後藤 淳<sup>2</sup>、早川 岳人<sup>3</sup>、金 政浩<sup>4</sup>、鈴木 勝行<sup>1</sup>、沈 海峰<sup>1</sup>、佐野 友一<sup>1</sup>、篠原 宏文<sup>1</sup> (1. 日本分析センター、2. 新潟大学、3. 量子科学技術研究開発機構、4. 九州大学)

10:20 ~ 10:35

#### [3B04] シリコン半導体検出器の重イオン測定における波高欠損の研究

\*石橋 優一<sup>1</sup>、松永 壮太郎<sup>1</sup>、浅井 雅人<sup>2</sup>、森田 浩介<sup>1</sup>、坂口 聡志<sup>1</sup>、塚田 和明<sup>2</sup>、佐藤 哲也<sup>2</sup>、伊藤 由太<sup>2</sup> (1. 九州大学、2. 原子力機構)

10:35 ~ 10:50

#### [3B05] 太陽電池の重イオン検出器としての応答

\*浅井 雅人<sup>1,2</sup>、石橋 優一<sup>2</sup>、庭瀬 暁隆<sup>3</sup>、牧井 宏之<sup>1</sup>、伊藤 由太<sup>1</sup>、佐藤 哲也<sup>1</sup>、塚田 和明<sup>1</sup>、坂口 聡志<sup>2</sup>、森田 浩介<sup>2</sup>、渡辺 裕<sup>3</sup>、鄭 淳讚<sup>3</sup> (1. 原子力機構、2. 九州大学、3. 高エネ研)

10:50 ~ 11:05

(2022年9月17日(土) 09:40 ~ 11:05 B会場)

## [3B01-05-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

Zoomはこちら

## 3B01 二光子ガンマ線イメージングの新たな展開に向けて (東大) ○高橋浩之

2本のガンマ線を用いた計測手法としては陽電子消滅ガンマ線を利用したPET (Positron Emission Tomography) が知られているが、2本のガンマ線を連続して放出する核種を利用すれば同様のことが実現できる。この場合、PETとは異なり2本のガンマ線は任意の角度で放出されるため、それらの交点を求めれば、画像再構成不要で直接局所的な情報を得ることができる。この考え方に基づき、これまでに我々は、多光子ガンマ線時間・空間相関型イメージング法の研究を進めてきた。本手法は表1に示されているように壊変の際に2本あるいは3本のガンマ線を連続して放出する核種を対象として、これらの間の時間的・空間的な相関を用いてガンマ線放出核種のイメージングを行うものである。適当な半減期を有し、応用可能性のある核種は壊変図式から見出すことができる。この場合、複数のガンマ線はほぼ同時に放出されるため、同時計数技術を適用することで、バックグラウンドを低減させることができ、S/N比に優れた高感度の計測が可能になると考えられる。このような2本のガンマ線を用いて emission 型のCTを構成する手法を従来のSPECT(Single Photon Emission CT)と対比させてDPECT(Double Photon Emission CT)と呼ぶこととした。また、原子核から放出される複数のガンマ線はPETとは異なり、任意の角度方向に出るので、角度情報を与える検出器あるいは放出源を特定することの可能な適切なコリメータやジオメトリを用いれば、画像再構成を特に適用しなくても、イメージングを行うことが可能になると期待される。本研究では、このような多光子ガンマ線放出核種の探索と合成、エネルギー分解能に優れたシンチレータを用いたコンプトンカメラの開発、複数のコンプトンカメラを用いた同時計測法によるイメージング、DPECT計測システムの構築、また、画像再構成を不要とするコリメータを用いたイメージング手法の実証、までを行った。さらに、本年度からは2光子放出過程における遷移状態における外場との相互作用を介して情報を取り出すことを積極的に用いることを試み、外場として磁場を組み合わせたイメージング法の開発を開始したところである。本講演では、研究全体の構成と、さまざまな展開の可能性について示す。

表1 2光子放出核種の例

核種	半減期	1 <sup>st</sup> $\gamma$ energy	2 <sup>nd</sup> $\gamma$ energy	寿命	放出割合	備考
In-111	2.38 d	171 keV	245 keV	85 ns	90.7 %	
Cr-48	21.56 h	112 keV	308 keV	7.09 ns	96%	
K-43	22.3 h	617 keV	372 keV	33 ps	79%	
		397 keV	593 keV	81 ps	11.3 %	
Ca-47	4.54 d	489 keV	808 keV	5 ps	8.8 %	
Lu-177	6.65 d	208 keV	113 keV	0.663 ns	11 %	治療核種
Cu-67	61.83 h	91.4 keV	99.4 keV	9.37 us	7 %	
Yb-169	32.0 d	63.1 keV	198 keV 177 keV	660 ns	82%	3光子核種 118 keV, 130.5 keV

Towards the new frontier of the double photon gamma-ray imaging, H. Takahashi

## 3B02

## CdTe 検出器によるミュオン X 線の三次元元素イメージングシステムの開発

(阪大<sup>1</sup>、JAEA<sup>2</sup>、東大<sup>3</sup>、JAXA<sup>4</sup>、ICU<sup>5</sup>、東芸大<sup>6</sup>、歴博<sup>7</sup>、KURNS<sup>8</sup>、KEK<sup>9</sup>)○邱奕寰<sup>1</sup>、大澤崇人<sup>2</sup>、武田伸一郎<sup>3</sup>、桂川美穂<sup>3</sup>、長澤俊作<sup>3</sup>、南喬博<sup>3</sup>、高橋忠幸<sup>3</sup>、渡辺伸<sup>4</sup>、久保謙哉<sup>5</sup>、水本和美<sup>6</sup>、齋藤努<sup>7</sup>、谷口秋洋<sup>8</sup>、浅利駿介<sup>1</sup>、梅垣いづみ<sup>9</sup>、下村浩一郎<sup>9</sup>、二宮和彦<sup>1</sup>

**【緒言】** 負ミュオンビームを用いたミュオン特性 X 線測定による非破壊元素分析法は、考古資料や地球外物質を扱う分野において有用である[1,2]。本研究グループでは、イメージング検出器を適用することで、三次元的な元素分析が可能[3]であるので、高いエネルギーでも高い感度をもつ 2mm 厚の CdTe DSD[4]を適用するイメージングシステムの開発を行った。本発表では、新たに開発したイメージングシステムを利用して、J-PARC におけるミュオン実験専用の三次元多元素イメージング実験を行ったので報告する。

**【実験】** 図 1 示す実験セットアップで、J-PARC においてミュオン実験を行った。イメージングの分解能と統計の最適な実験条件を探索するため、三台 CdTe-DSD にそれぞれに 1 mm、2 mm と 3 mm のピンホールコリメータを設置した。この実験配置で得られる位置分解能は、それぞれ 2 mm、4 mm、6 mm と見積もられた。多元素のイメージングを実現するため、本研究では PTFE、Al、Ti と Cu からなる球を鉄のるつぼに入れたものをサンプルとして使用した。

**【結果】** 図 2 に三台 CdTe-DSD(1,2,3 mm のコリメータ)のエネルギースペクトルを示す。ピンホールコリメータ(タングステン製)と Pb 遮蔽由来の蛍光 X 線が検出されたが、サンプルの Cu 由来のミュオン X 線(115 keV)についても観測できた。今回の実験セットアップでは、散乱由来の連続部分バックグラウンド成分が多いが、これらのバックグラウンド成分は適切な遮蔽を追加することで減少することを確認した。本実験結果により、検出器と遮蔽の配置について重要な情報が得られ、これを基に現在三次元のイメージングシステムの開発を進めており、その進捗については講演で報告する。

[1] T. Nakamura, et al.「Formation and evolution of Cb-type asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples」, Science (under review)

[2] K. Ninomiya, et al.「Nondestructive Elemental Depth-Profiling Analysis by Muonic X-ray Measurement」, Anal. Chem., 87, 9 (2015)

[3] I. Chiu, et al.「Non-destructive 3D imaging method using muonic X-rays and a CdTe double-sided strip detector」Sci. Rep. 12, 5261 (2022)

[4] 南 喬博「宇宙ガンマ線観測用厚型 CdTe 両面ストリップ検出器の性能評価及び応答の研究」東京大学大学院 修士論文(2022).

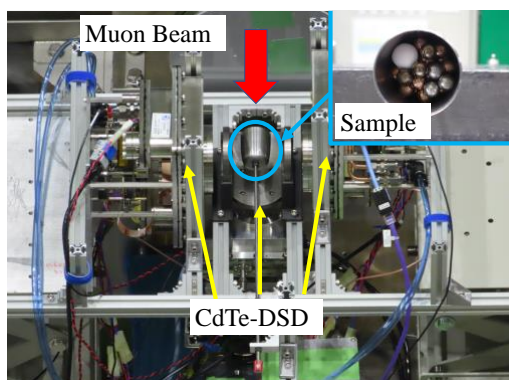


図 1 : J-PARC での実験の写真

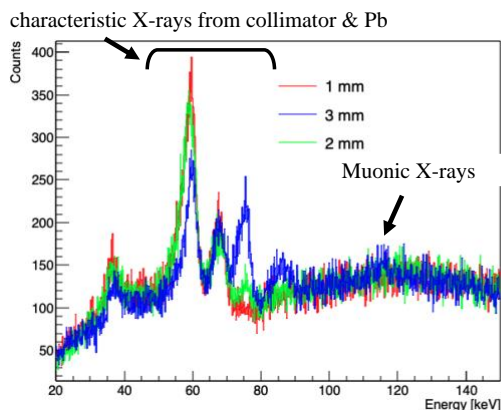


図 2 : エネルギースペクトル

Development of a 3D elemental imaging system with muonic X-ray measurement using the CdTe detectors.

Chiu I., Osawa T., Takeda S., Katsuragawa M., Nagasawa S., Minami T., Takahashi T., Watanabe S., Kubo K., Mizumoto K., Saito T., Taniguchi A., Asari S., Umegaki I., Shinomura K., Ninomiya K.

**3B02 Development of a 3D elemental imaging system with muonic X-ray measurement using the CdTe detectors.**

○I-Huan Chiu<sup>1</sup>, Takahito Osawa<sup>2</sup>, Shinichiro Takeda<sup>3</sup>, Miho Katsuragawa<sup>3</sup>, Shunsaku Nagasawa<sup>3</sup>, Takahiro Minami<sup>3</sup>, Tadayuki Takahashi<sup>3</sup>, Shin Watanabe<sup>4</sup>, Kenya Kubo<sup>5</sup>, Kazumi Mizumoto<sup>6</sup>, Tsutomu Saito<sup>7</sup>, Akihiro Taniguchi<sup>8</sup>, Shunsuke Asari<sup>1</sup>, Izumi Umegaki<sup>9</sup>, Koichiro Shinomura<sup>9</sup>, Kazuhiko Ninomiya<sup>1</sup> (Osaka Univ.<sup>1</sup>, JAEA<sup>2</sup>, Univ. Tokyo<sup>3</sup>, JAXA<sup>4</sup>, ICU<sup>5</sup>, Tokyo University of the Arts<sup>6</sup>, National Museum of Japanese History<sup>7</sup>, KURNS<sup>8</sup>, KEK<sup>9</sup>)

Non-destructive elemental analysis method by muon characteristics X-ray (muonic X-rays) measurement using a negative muon beam is useful in the fields of archaeological artifacts and extraterrestrial materials. Using two-dimensional imaging detector, this method can be expanded to non-destructive three-dimensional elemental analysis. For this purpose, we have developed the imaging system using the three 2 mm CdTe-DSDs. The 2 mm CdTe-DSD provides high sensitivity in a high-energy region up to 300 keV. In this work, we performed muon experiment using three 2 mm CdTe-DSD for elemental imaging. The muon experiment was conducted at MUSE of J-PARC. Three pinhole collimators having 1 mm, 2 mm, and 3 mm in diameter were equipped for the three CdTe-DSDs. The position resolutions were estimated to be 2 mm, 4 mm, and 6 mm, respectively. We prepared the sample made of PTFE, Al, Ti, and Cu balls for muon irradiation. The 3D elemental distribution of the sample can be reconstructed based on the measured images from the muonic X-rays of the different materials. The muonic X-rays with energy of 115 keV from Cu of the sample were measured in the energy spectrum. On the other hand, there are large continuous background components from the scattering muon. We added the Pb shields around the detectors to suppress those background signals, and successfully improved the signal-to-noise ratio. A new three-dimensional elemental imaging system using muon are now preparing and, in the presentation, we will talk the latest progress for developing the system.

Development of a 3D elemental imaging system with muonic X-ray measurement using the CdTe detectors.

Chiu I., Osawa T., Takeda S., Katsuragawa M., Nagasawa S., Minami T., Takahashi T., Watanabe S., Kubo K., Mizumoto K., Saito T., Taniguchi A., Asari S., Umegaki I., Shinomura K., Ninomiya K.

## 3B03

## スペクトル定量法のガンマ線スペクトルへの適用性

(日本分析セ<sup>1</sup>、新潟大<sup>2</sup>、量研機構<sup>3</sup>、九州大学<sup>4</sup>)○大島真澄<sup>1</sup>、後藤淳<sup>2</sup>、早川岳人<sup>3</sup>、金政浩<sup>4</sup>、鈴木勝行<sup>1</sup>、沈海峰<sup>1</sup>、佐野友一<sup>1</sup>、篠原宏文<sup>1</sup>

【緒言】原子力、環境分析などの分野で広く応用されているガンマ線による核種定量法は、現在全吸収ピークを解析する法が一般的である。しかし、ガンマ線検出器のピーク生成効率は小さく、定量精度は統計により大きく制限される。我々は、連続成分を含むスペクトル全体を解析するスペクトル定量法を開発した。前回の液体シンチレーションスペクトルに続き[1]、ガンマ線スペクトルの定量性検証の結果を報告する。

【実験と解析】試料に含まれる放射性核種の数に限定され、各々の核種のスペクトルが測定済みであることを仮定すると、測定されたガンマ線スペクトルは、これらの複数核種スペクトルの線形和で表わせ、その係数は放射能値に比例する。よって、測定スペクトルと全核種のスペクトルから、最適の係数値を求めることで定量が可能になる。線形最小二乗法を基に定式化を行い、MS Excel のソフトウェアを開発した。[2]

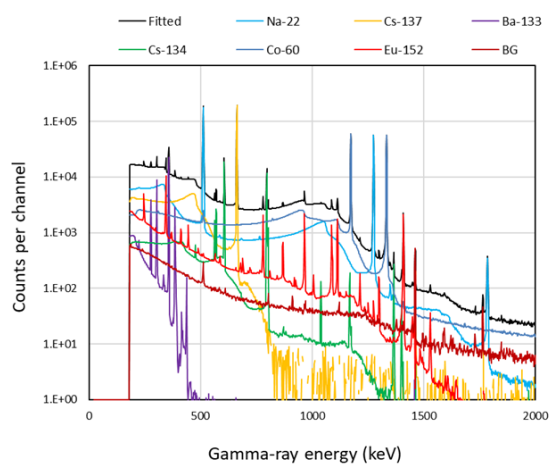


図1 Ge スペクトルの SDM による 7 成分分解

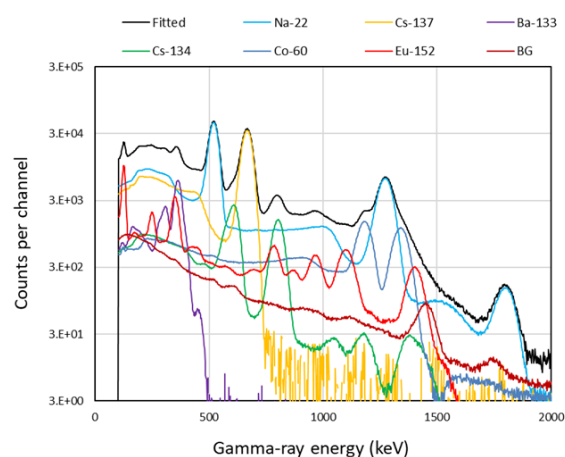


図2 NaI スペクトルの SDM による 7 成分分解

【結果と結論】AMETEK 社製 GMX40P4-70-A-S 型 Ge 検出器および応用光研工業(株)製 SP-30S-KF 型 NaI 検出器を用い、ガンマ線標準線源 6 種 ( $^{22}\text{Na}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ) を各々の検出器から 10cm の位置に置き、10 秒から 10,000 秒までの異なる測定時間で得られたスペクトルを得た。これらを足し合わせることで、10 Bq から  $10^4$  Bq に相当する混合スペクトルを生成し、上記ソフトウェアで定量を行った。その結果の例を図 1, 2 に示す。約  $10^4$  Bq の  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  が存在する中で、測定時間 2.8 時間で、1/100 強度の他の核種を約 20% 以下の定量精度で決められることがわかった。

## 参考文献

[1] 日本原子力学会 2020 年春の年会 2N-02, 2020 年 3 月; 同 2021 年春の年会 2D-14, 2021 年 3 月

[2] M. Oshima et al., J. Nucl. Sci. Tech. Vol.59, No.4 (2022) 472-483

本件は JAEA 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業 JPJA20P20333366 の助成を受けたものです。

Application of spectral determination method to  $\gamma$ -ray spectra

○Masumi Oshima<sup>1</sup>, Jun Goto<sup>2</sup>, Takehito Hayakawa<sup>3</sup>, Tadahiro Kin<sup>4</sup>, Katsuyuki Suzuki<sup>1</sup>, Haifeng Shen<sup>1</sup>, Yuichi Sano<sup>1</sup>, and Hirofumi Shinohara<sup>1</sup>

## 3B04

## シリコン半導体検出器の重イオン測定における波高欠損の研究

(九州大学<sup>1</sup>、原子力機構<sup>2</sup>) ○石橋 優一<sup>1</sup>、松永 壮太郎<sup>1</sup>、浅井 雅人<sup>1,2</sup>、森田 浩介<sup>1</sup>、坂口 聡志<sup>1</sup>、塚田 和明<sup>2</sup>、佐藤 哲也<sup>2</sup>、伊藤 由太<sup>2</sup>

シリコン検出器を用いた核分裂片等の重イオン測定においては、イオンの付加したエネルギーと測定電荷量との比例関係が崩れ、エネルギーが実際の値より低く観測される現象が見られる。この現象を波高欠損と呼ぶ。要因としては、重イオンの飛跡に沿って高密度に生成した電子正孔対が電極に収集される前に再結合を起こすことが挙げられるが、そのメカニズムは必ずしも明らかではない。

現在、我々は中性子過剰 Fm 領域での核分裂のメカニズムを解明するための研究を行っている。この研究では、核分裂片の運動エネルギーをシリコン検出器により精度良く測定する必要があるが、そのためには核分裂片に対する波高欠損の量を正確に見積もることが不可欠である。波高欠損の大きさを表す式として 1970 年代に Kaufman 等[1]により考案された経験式が知られているが、この式のパラメータはエネルギー 80 MeV 以下のイオンに対する測定データを用いて決定されており、特にこれより高いエネルギー領域では実験データの再現性が不十分である。そこで、200 MeV までの高エネルギー領域に適用できる波高欠損量の経験式の導出を目的とした実験を行った。

実験は、原子力機構タンデム加速器を用いて 50~210 MeV の単色 <sup>81</sup>Br、<sup>127</sup>I ビームを Au, Co, Rh, Ho 薄膜に照射し、前方 30 度に設置したシリコン検出器で散乱ビーム及び散乱された標的粒子のエネルギースペクトルを測定した。得られた実験データから波高欠損量を導出し、Kaufman 等の経験式でフィットした結果を図 1 に示す。本講演では、これらの結果と新しい経験式の作成に向けた検討結果について報告する。

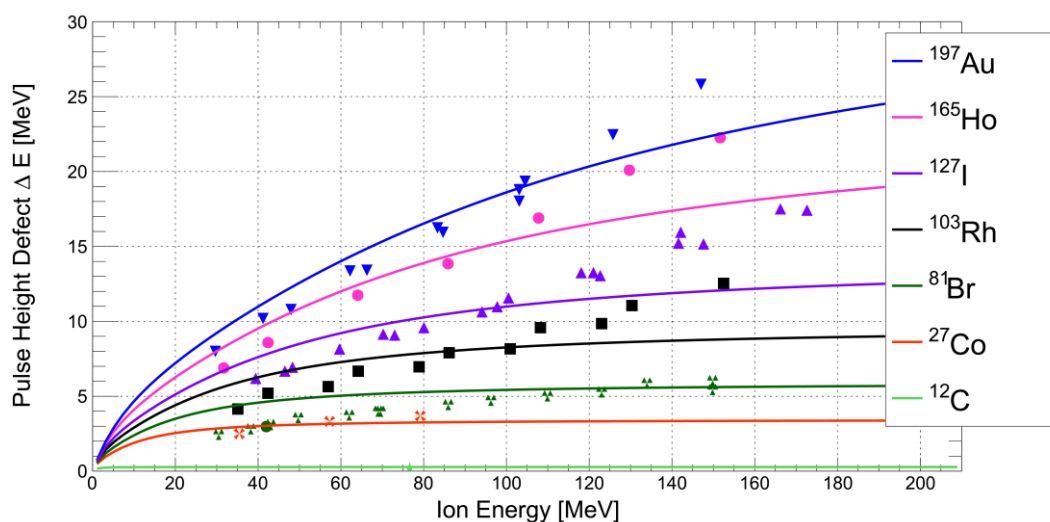


図 1 : C, Co, Br, Rh, I, Ho, Au の各粒子に対する波高欠損の値と、Kaufman 等の経験式でフィットして得られた曲線。

参考文献

[1] S. B. Kaufman et al., Nucl. Instrum. Methods 115 (1974) 47.

Pulse-height defects of silicon semiconductor detectors for heavy-ion measurements

ISHIBASHI, Y., MATSUNAGA, S., ASAI, M., MORITA, K., SAKAGUCHI, S., TSUKADA, K., SATO, T. K., ITO, Y.

## 3B05

## 太陽電池の重イオン検出器としての応答

(原子力機構<sup>1</sup>、九州大学<sup>2</sup>、高エネ研<sup>3</sup>)○浅井雅人<sup>1,2</sup>、石橋優一<sup>2</sup>、庭瀬暁隆<sup>3</sup>、牧井宏之<sup>1</sup>、伊藤由太<sup>1</sup>、佐藤哲也<sup>1</sup>、塚田和明<sup>1</sup>、坂口聡志<sup>2</sup>、森田浩介<sup>2</sup>、渡辺 裕<sup>3</sup>、鄭 淳讚<sup>3</sup>

**【緒言】** 太陽光発電に使用される太陽電池はSiやGaAsなどを基板とした半導体ダイオードであり、その構造は一般的なSi半導体検出器とほとんど変わらず、放射線検出器として利用可能である。太陽電池は一般的なSi検出器と比較して極めて安価（～100円/cm<sup>2</sup>）であり、比較的自由的な大きさ・形状に切断可能、空乏層が薄く軽イオンに対して感度が低い、照射損傷に強い、などの特徴を持つ。一方で、リーク電流が大きくノイズレベルが高い、逆バイアス電圧を印加できないため空乏層が薄く、検出器の静電容量が大きくなり、エネルギー分解能及び時間分解能が悪い、などの欠点がある。しかし核分裂片などの高エネルギー重イオンの測定ではそれらの欠点の影響は相対的に低下し、むしろ利点を生かして多数の太陽電池を標的周りに配置し、高計数率・高立体角・高空間分解能で核分裂片や散乱重粒子を測定する実験に活用されている[1]。本研究では、太陽電池を核分裂片測定に使用することを想定し、様々な種類・エネルギーの単色重イオンを太陽電池に入射して、検出器としての応答（エネルギー分解能、波高欠損等）を調べ、その性能を評価することを目的に実験を行った。

**【実験及び結果】** 原子力機構タンデム加速器で加速された50～210 MeVの<sup>12</sup>C, <sup>81</sup>Br, <sup>127</sup>IビームをCo, Rh, Ho, Au薄膜に照射し、前方30°に散乱された粒子を10×10 mm<sup>2</sup>の太陽電池と表面障壁型Si検出器(SSD)で測定した。図1に<sup>81</sup>BrビームをAu薄膜に照射して太陽電池で測定した散乱粒子のエネルギースペクトルを示す。70～150 MeVの<sup>81</sup>Brに対して約3%のエネルギー分解能（半値幅）が得られた。SSDの約1%と比べると悪いものの、十分実用になることが判った。また空乏層の厚さが足りず全エネルギー測定ができなかったが、α線や<sup>12</sup>Cなどの軽イオンに対しても感度があることが判った。更に波高欠損の値をSSDと比較したところ、CからAuまでの粒子で同程度の値を示し、太陽電池が特別に重イオンに対して感度が高い訳でも波高欠損が大きい訳でもないことが明らかになった。

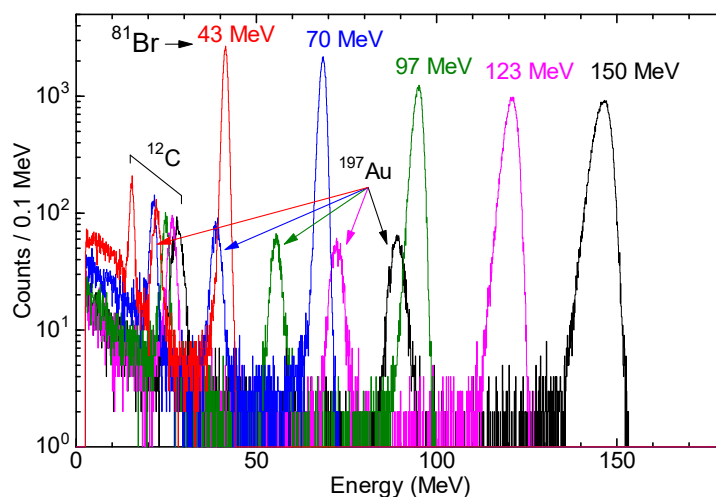


図1: 50～170 MeVの単色<sup>81</sup>BrビームをAu薄膜に照射して太陽電池で測定した散乱粒子のエネルギースペクトル。

## 【参考文献】

[1] R. Pérez Sánchez et al., Nucl. Instrum. Methods A 933 (2019) 63; and references therein.

Response of solar cell as a heavy-ion detector

ASAI, M., ISHIBASHI, Y., NIWASE, T., MAKII, H., ITO, Y., SATO, T.K., TSUKADA, K., SAKAGUCHI, S., MORITA, K., WATANABE, Y., JEONG, S.C.



基盤セッション 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識 | 基盤セッション D: 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識

## 基盤セッション D: 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識

座長:宮本 ユタカ(日本原子力研究開発機構)

2022年9月17日(土) 11:10 ~ 12:10 B会場 (206室)

Zoomはこちら

[3B06-08-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3B06] 原子力災害対応における水中の低濃度の放射性セシウム迅速測定法の開発および標準化

\*保高 徹生<sup>1</sup> (1. 産業技術総合研究所)

11:10 ~ 11:40

[3B07] 加速器中性子による<sup>64,67</sup>Cuの大量製造に向けた分離精製法の開発

\*本村 新<sup>1,2</sup>、川端 方子<sup>1,2</sup>、太田 朗生<sup>1,2</sup>、廣瀬 耀<sup>1,2</sup>、本石 章司<sup>1,2</sup>、佐伯 秀也<sup>1,2</sup>、塚田 和明<sup>3</sup>、永井 泰樹<sup>1,2</sup>、橋本 和幸<sup>2,3</sup> (1. (株)千代田テクノル、2. (国研)量研、3. (国研)原子力機構)

11:40 ~ 11:55

[3B08] 量研機構におけるバイオアッセイの最新の進捗状況

\*楊 国勝<sup>1</sup>、金 ウンジュ<sup>1</sup>、鄭 建<sup>1</sup>、古渡 意彦<sup>1</sup>、栗原 治<sup>1</sup> (1. 量子科学技術研究開発機構)

11:55 ~ 12:10

(2022年9月17日(土) 11:10 ~ 12:10 B会場)

## [3B06-08-Zoom] セッションのオンライン参加 ( Zoom)

Zoomはこちら

## 3B06

## 原子力災害対応における水中の低濃度の放射性セシウム迅速測定法の開発および標準化

(産業技術総合研究所<sup>1)</sup> ○保高徹生<sup>1</sup>

東京電力福島第一原子力発電所の事故で放出されたセシウム（以下、Cs）の一部は陸域に沈着し、その一部は、河川などに流出して移動した。原子力災害においては、長期的な環境への影響や安全性を考える上で、環境水中の放射性物質の濃度を把握することは重要である。事故から時間が経過し、福島県内の河川水中の放射性 Cs 濃度は、多くの地点で 1 mBq/L～50 mBq/L と低濃度になっている。また、水中の放射性 Cs には、懸濁態放射性 Cs と溶存態放射性 Cs が存在し、挙動が大きく異なり、長期的な環境動態評価や植物への移行を評価するためには、懸濁態と溶存態の放射性 Cs を分離して評価する必要がある。

1 mBq/L～50 mBq/L の低濃度の水中の放射性 Cs を測定するためには、ゲルマニウム半導体検出器の測定時間にもよるが、一般的に 20L～100L 程度の水を濃縮する必要がある。また、懸濁態と溶存態の放射性 Cs の分けて測定する場合、固液分離をする必要があるが、20L の水を固液分離・濃縮をするためには、メンブレンフィルター等で濾過をした後に、蒸発濃縮法や AMP 法、固相ディスク抽出法等で溶存態を濃縮する必要があり、6 時間から 1 週間程度時間が必要という課題があった。

これらの課題を解決するために、本研究では、懸濁態放射性 Cs と溶存態放射性 Cs をそれぞれ回収・吸着できる 2 種類の不織布カートリッジを使ったモニタリングシステムを開発・実用化した。水中の溶存態 Cs を吸着するプルシアンプルー（以下 PB）を改良した亜鉛置換体 PB を担持させた不織布をカートリッジ上に加工し、20L 水中の放射性 Cs を溶存態・懸濁態に分離・濃縮を約 8 分と大幅に短縮が可能となった<sup>1)</sup>。また、銅置換体 PB を用いることで、海水でも濃縮時間な短縮が可能となった<sup>2)</sup>。

また、本技術を含めた固液分離や溶存態放射性 Cs の濃縮方法に関して標準化を進め、2014 年度より「水中の放射性 Cs モニタリング手法の技術資料検討会（委員長 筑波大学・恩田裕一教授）」を立ち上げ、国内外の 17 機関が参加する精度評価試験<sup>3)</sup>を実施するとともに、環境水中の低濃度の放射性 Cs 濃度測定方法について最新の知見を盛り込んだ技術資料を作成・公開した。さらに、2016 年に、産総研コンソーシアムとして、産学官が参画する環境水等の放射性セシウムモニタリングコンソーシアムを設立し、継続した精度評価試験を実施するとともに、2021 年 2 月に「環境水中の放射性セシウムの前処理手法・分析法（第 2 版）」を公開した<sup>4)</sup>。

- 1) YASUTAKA, Tetsuo, et al.,(2013) *Journal of Nuclear Science and Technology*, 50.7: 674-681.
- 2) YASUTAKA, Tetsuo, et al.,(2016) Development of a copper-substituted, Prussian blue-impregnated, nonwoven cartridge filter to rapidly measure radiocesium concentration in seawater. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 53.9: 1243-1250.
- 3) 保高 徹生ら（2017）陸水中における微量溶存態放射性セシウムの濃縮法の比較，分析化学，66 巻，4 号，p. 299-307
- 4) 環境水中の放射性セシウムの前処理手法・分析法．（第 2 版）．令和 3 年 2 月．環境水等の放射性セシウムモニタリングコンソーシアム．技術資料改定 WG

Development and Standardization of Rapid Pre-concentration Methods for Low level Radioactive Cesium in Water for Nuclear Disaster Response

YASUTAKA.T

## 3B07

加速器中性子による  $^{64,67}\text{Cu}$  の大量製造に向けた分離精製法の開発

(株)千代田テクノル<sup>1</sup>、(国研)量研<sup>2</sup>、(国研)原子力機構<sup>3</sup>) ○本村新<sup>1,2</sup>、川端 方子<sup>1,2</sup>、太田 朗生<sup>1,2</sup>、廣瀬 耀<sup>1,2</sup>、本石 章司<sup>1,2</sup>、佐伯 秀也<sup>1,2</sup>、塚田 和明<sup>2,3</sup>、永井 泰樹<sup>1,2</sup>、橋本 和幸<sup>2,3</sup>

【緒言】ポジトロン放出核種である  $^{64}\text{Cu}$  と  $\beta$  線放出核種である  $^{67}\text{Cu}$  は、同一の薬剤を用いた診断と治療を可能にする有望な組み合わせである。しかしながら、 $^{64}\text{Cu}$  および  $^{67}\text{Cu}$  は標識薬の研究の進展が期待される一方で、大量製造法が確立されていない。当グループは加速器で発生させた高速中性子（加速器中性子）の金属亜鉛への照射による  $^{64,67}\text{Cu}$  の大量製造を目指し、熱分離法と固相抽出クロマトグラフ法による  $^{64,67}\text{Cu}$  分離精製に取り組んでいる。本講演では、遠隔操作型の亜鉛-銅熱分離装置および化学精製装置の新規製作と、それらを東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターに設置して行った  $^{64,67}\text{Cu}$  分離精製試験について報告する。

【実験】東北大学サイクロトロン加速器でベリリウム標的への重陽子照射により発生させた加速器中性子を天然金属亜鉛（15-17 g）に照射した後、新規製作装置を用いて  $^{64,67}\text{Cu}$  分離精製を行った。天然亜鉛中の  $^{68}\text{Zn}$ 、 $^{64}\text{Zn}$  及び  $^{70}\text{Zn}$  等と中性子との核反応により  $^{67}\text{Cu}$ 、 $^{64}\text{Cu}$  及び  $^{69\text{m}}\text{Zn}$  等が生成する。まず、照射済亜鉛を熱分離装置内に設置し、減圧下（ $10^{-5}$  hPa）で  $600^\circ\text{C}$  に加熱して亜鉛を昇華させた。このとき、試料設置部と昇華亜鉛析出部付近にそれぞれ CZT $\gamma$  線検出器を設置し、 $^{64}\text{Cu}$  および  $^{69\text{m}}\text{Zn}$  由来の  $\gamma$  線を測定して銅と亜鉛の挙動を調べた。次に、昇華せず残存した  $^{64,67}\text{Cu}$  を 8 M 塩酸で溶解し、pH2-3 に調整後、CU Resin (TrisKem) に通液した。さらに、10 mM 塩酸で CU Resin を洗浄した後、下流に TK201 Resin (TrisKem) を接続して 8 M 塩酸を通液した。TK201 Resin から 50 mM 塩酸で  $^{64,67}\text{Cu}$  を溶出した後、蒸発乾固により塩酸を除去して回収した。

【結果】新規製作装置を使用し、一連の  $^{64,67}\text{Cu}$  分離精製を一部遠隔化して行った。照射済金属亜鉛 17 g の熱分離では  $600^\circ\text{C}$  到達後 60 分前後で亜鉛の昇華が概ね完了した（図 1）。また、中性子照射により生成した目的外 RI を熱分離及び化学精製により除去できた（図 2）。全工程の分離収率は 73% 以上で、従来のフード設置型装置使用時と同等であった。その他詳細については発表にて議論する。

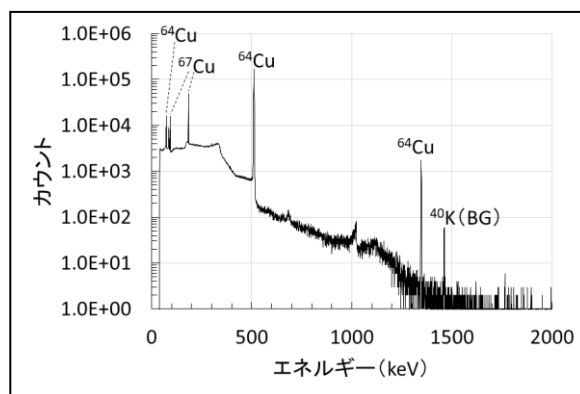
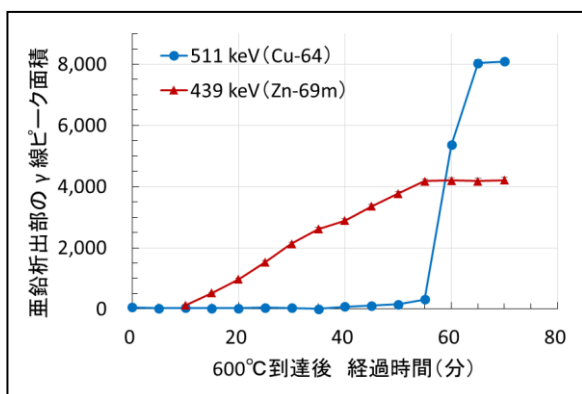


図 1. 熱分離中の亜鉛析出部の  $\gamma$  線ピーク面積

図 2. 精製後  $^{64,67}\text{Cu}$  溶液の  $\gamma$  線スペクトル

Development of a separation and purification method for the mass production of  $^{64,67}\text{Cu}$  by accelerator based neutrons

MOTOMURA A., KAWABATA M., OHTA A., HIROSE H., MOTOISHI S., SAEKI H., TSUKADA K., NAGAI Y., HASHIMOTO K.

## 3B08 Recent advancement in bioassay at QST

(QST) ○楊国勝、金ウンジュ、鄭建、妹尾初穂、古渡意彦、栗原治

**【緒言】** Internal contamination with alpha-particle emitting actinides, such as  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ , is likely to bring a large radiation exposure dose to the patient even if the intake amount is small. In order to provide timely information for prompting decision making in radiation emergency medicine, it is critical to use simple and rapid analytical methods to obtain the valuable contamination level as soon as possible. Especially, in case of a large scaled radiological disaster, a simple and low-cost standard method is critical to allow more related laboratories to be involved in the activities of triage of mass-causalities. The National Institutes for Quantum Science and Technology (QST) was designated as the core radiation emergency medical support center by the Nuclear Regulation Authority (NRA) in 2019. One of the main missions of the QST is to maintain and improve its dose assessment capability for radiation-exposed individuals.

**【実験】** To provide timely information for prompt decision-making in emergency radiation therapy, simple and rapid urinary and fecal bioassays has been developed to determine ultra-trace actinide isotopes and  $^{90}\text{Sr}$ , by with combining mass and alpha/beta spectrometric methods. U, Pu, Np, and Am isotopes were measured in a 20-mL urine sample and a 150-g synthetic fecal sample by SF-ICP-MS and ICP-MS/MS. Prior to analysis, organic matter decomposition,  $\text{LaF}_3/\text{CaF}_2$  coprecipitation, and chromatographic purification using 2 mL of AG MP-1M anion exchange resin column and 2 mL DGA extraction resin cartridge were performed. Pu, U, and Am/Cm isotopes were also measured in a 500-mL urine sample and a 150-g synthetic fecal sample by alpha spectrometry. Prior to analysis, organic matter decomposition, iron hydroxide coprecipitation, and chromatographic purification using 2 mL of TEVA and 2 mL of DGA resin cartridges were performed. Sr-90 was measured by beta counting and ICP-MS/MS with  $\text{CO}_2$  as the collision/reaction gas. Prior to analysis, organic matter decomposition and chromatographic purification using 2 mL of DGA resin cartridge were performed.

**【結果】** These radiometric and mass spectrometric methods were applied for participation in the annual intercomparison organized by the Association for the PROMotion of Quality Control in RADiotoxicological Analysis (PROCORAD), France, for method validations. Especially, the results that we submitted in the year 2022 intercomparisons was qualified as TOP LABO for the measurements of: Actinides in urine with DTPA. The bioassay capability of the new laboratory is currently expected to screen 5–10 persons simultaneously assuming internal contamination with actinides such as Pu, Am/Cm, and U, although this is dependent on the specific contamination circumstances.

Recent advancement in bioassay at QST

Yang, G., Kim, E., Zheng, J., Seno, H., Kowatari, M., Kurihara, O.

---

部会 | 部会

## 放射化分析部会

座長:三浦 勉(国立研究開発法人 産業技術総合研究所)

2022年9月17日(土) 12:10 ~ 12:55 B会場 (206室)

[Zoomはこちら](#)

---

---

基盤セッション 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識 | 基盤セッション D: 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識

## 基盤セッション D: 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識

座長:三浦 勉(国立研究開発法人 産業技術総合研究所)

2022年9月17日(土) 13:15 ~ 14:15 B会場 (206室)

Zoomはこちら

---

[3B09-10-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3B09] 難測定核種分析の負担軽減を目的としたレーザーアブレーション ICP-MSの利用法

\*浅井 志保<sup>1</sup> (1. 産業技術総合研究所)

13:15 ~ 13:45

[3B10] Sr-90の質量分析のフロンティア ~微小・微量・イメージング~

\*高貝 慶隆<sup>1</sup>、柳澤 華代<sup>1</sup>、青木 譲<sup>1</sup>、古川 真<sup>2,1</sup> (1. 福島大学、2. パーキンエルマージャパン)

13:45 ~ 14:15

(2022年9月17日(土) 13:15 ~ 14:15 B会場)

## [3B09-10-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

Zoomはこちら



## 3B09

難測定核種分析の負担軽減を目的としたレーザーアブレーション  
ICP-MS の利用法

(産業技術総合研究所 計量標準総合センター) ○浅井志保

**【はじめに】** 使用済み燃料の再処理によって発生する高レベル放射性廃棄物 (HLW) 中には、多種多様な長寿命核種が存在している。また、福島第一原子力発電所で発生した事故関連廃棄物は、使用済み燃料が汚染源であり、HLW と同様に長寿命核種を含んでいる。これらの廃棄物を処分するには、長寿命核種の実測値に基づく長期安全性評価が不可欠である。

長寿命核種の多くは $\gamma$ 線を放出しないため非破壊測定が適用できず、試料を溶液化し測定する。こうした前処理操作の煩雑さに加え、比放射能が低く放射線計測が困難であることから難測定核種と呼ばれる。本講演では、溶液化処理が不要なレーザーアブレーション (LA) と、長寿命核種を高感度に測定できる誘導結合プラズマ質量分析計 (ICP-MS) を組み合わせて実試料分析に適用し、負担軽減を実現した例を紹介する。

**【LA の原理と特徴】** LA の原理を図 1 に示す。LA では、固体試料にパルスレーザーを照射してエアロゾル化し ICP に導入する。エアロゾルの粒径及び粒径分布が小さいほど安定したシグナルが得られる傾向があり、照射エネルギーが均質に伝わる凹凸が少ない試料で粒径分布幅が狭く小さいエアロゾルが生成されるため、測定に適する。

**【LA の利用と定量法】** LA-ICP-MS では、さまざまな粒径の粒子が直接 ICP へ導入される。したがって、溶液測定に比べてシグナル強度の変動が大きくなる。この問題を回避するため、長寿命核種の場合には、目的核種と同位体関係にある核種 (放射性・安定のどちらも可) との同位体比を測定する。

例えば長寿命核種  $^{135}\text{Cs}$  を定量する際は、共存する  $^{137}\text{Cs}$  の $\gamma$ 線測定結果を質量分率に変換し、LA-ICP-MS 測定で得られる  $^{135}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  原子数比から  $^{135}\text{Cs}$  を定量する (図 2)。しかし、測定目的の核種ごとに同位体比測定に適した組み合わせを選定する必要がある。講演では、 $^{135}\text{Cs}$  の他、 $^{107}\text{Pd}$  及び  $^{129}\text{I}$  の測定上の特徴について解説する。

**【今後の展開】** LA-ICP-MS で得られる計数率比は原子数比に一致しない (質量差別効果)。この補正には、原子数比 (同位体比) が既知の標準物質を用いるが、長寿命核種分析に使用できる物質は入手・取扱いが困難である。今後は、複数の同位体の質量分率を値付けした標準物質の開発を進めるとともに、同位体比既知の固体標準物質を試料に混合して LA-ICP-MS で測定する同位体希釈質量分析法の実現を目指す。

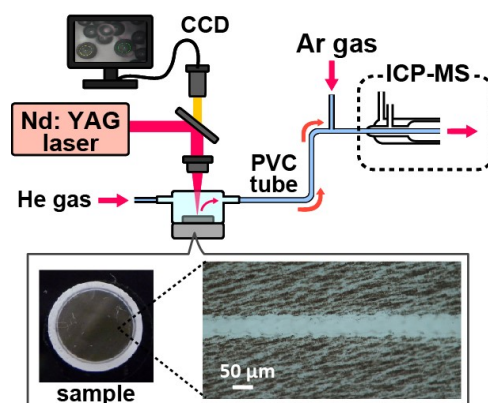


図 1 LA-ICP-MS の概略図

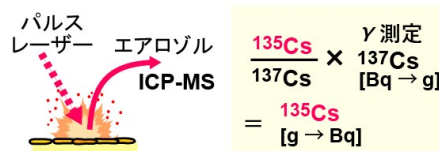


図 2 LA による同位体比測定と定量

Practical usages of laser ablation ICP-MS for reducing workload in measuring difficult-to-measure radionuclides, Shiho ASAI

## 3B10 Sr-90の質量分析のフロンティア ～微小・微量・イメージング～ (福島大理工<sup>1</sup>、福島大 IER<sup>2</sup>、パーキンエルマー・ジャパン) ○高貝慶隆<sup>1,2</sup>、 柳澤華代<sup>1</sup>、青木譲<sup>1</sup>、古川真<sup>1,3</sup>

【緒言】 ウランの代表的な核分裂生成物として知られているストロンチウム 90 (Sr-90: 純β線放出核種, 半減期 28.8年) は, 骨や歯へ特異的に蓄積することで骨肉腫を生じさせる懸念から測定モニタリングの最重要項目にあげられる核種である。福島第一原子力発電所(1F)事故以前は, 放射能を分析するという観点において, 半減期と物質の関係から原理的に半減期 1 万年以下の核種は, 放射線計測による定量分析が質量分析よりも有利になるため, 化学分離で単離して Sr-90 もしくは娘核種のイットリウム (Y-90) を計測することが一般的であった。しかし, β線放出核種の放射線計測では, β線スペクトルが重なり合うため, 多くの場合, 化学分離などの前処理に時間がかかっていた。このような背景から, 1F 事故以前より, 分析時間が短い質量分析で Sr-90 を分析する事例がわずかに報告されてきたが, 前述のように現実的な環境放射能レベルの放射能濃度を計測することができずにいた。しかし, 1F 事故直後の緊迫した現状を回避するため, Sr-90 の迅速分析法の開発は国家的急務として位置づけられ, 迅速性に勝る質量分析に期待が集まった。

そのような中, 我々は, 誘導結合プラズマ質量分析装置 (ICP-MS) を用いた Sr-90 迅速法を開発した。この方法は, Sr 選択樹脂による固相抽出と ICP-MS に内蔵されたリアクションセルで干渉除去をフロー系で行う自動分析装置である。この開発を発端として, 新しい導入系であるハイブリッドチャンバーやガスの自動切替バルブ, Sr-90 分析だけでなくこれまで実現できなかった β線放出核種の多核種同時分析を実現することができた。レーザーアブレーションを取り入れることで Sr-90 と安定同位体との同時マッピング技術を開発し, さらに, 固体標準を使用せず定量分析とマッピングを同時に行うオンライン同位体希釈法を開発した。

また, 微量の試料を直接分析する手法として表面電離型質量分析装置 (TIMS) が知られているが, TIMS は同位体比を精密に測定する分析装置であり, 定量分析には不向きであった。特に, Sr-90 のような人工単核種は同位体希釈法が適応できないため, 様々な工夫を行い, TIMS による Sr-90 の直接定量法を開発した。この TIMS 法は, 最近, 四重極エネルギーフィルター (RPQ) を搭載することで 1 mg の少量の試料から検出下限値 1 μBq, つまり, 放射能濃度で 1Bq/kg を下回ることに成功した。同一試料を 2 分割して Sr-90 の公定分析法 (文部科学省法: シュウ酸沈殿-ミルキング-低バックグラウンドガスフローカウンター) と定量値を比較した結果, 良好な一致を確認した。現在, 様々な環境・生体・生態試料について適応している。その事例の一旦を紹介したい。

The frontier of Mass-Spectrometric Analysis for Sr-90: Small, Trace and Imaging  
TAKAGAI Y., YANAGISAWA K., AOKI J., FURUKAWA M.

基盤セッション 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識 | 基盤セッション D: 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識

## 基盤セッション D: 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識

座長:浅井 志保(国立研究開発法人 産業技術総合研究所)

2022年9月17日(土) 14:20 ~ 15:20 B会場 (206室)

Zoomはこちら

### [3B11-14-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

- [3B11] SK-Gd によるニュートリノ検出に向けた硫酸ガドリニウム中の<sup>226</sup>Ra質量分析法の確立  
\*榊枝 優真<sup>1</sup>、坂口 綾<sup>2</sup>、高久 雄一<sup>2</sup>、細川 佳志<sup>3</sup>、関谷 洋之<sup>3</sup>、伊藤 慎太郎<sup>4</sup>、池田 一得<sup>3</sup>、市村 晃一<sup>5</sup>、山崎 信哉<sup>2</sup>、末木 啓介<sup>2</sup> (1. 筑波大学 理工情報生命学術院 数理物質科学研究群 化学学位プログラム、2. 筑波大学 数理物質系、3. 東京大学 宇宙線研究所、4. 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所、5. 東北大学 ニュートリノ科学研究センター)  
14:20 ~ 14:35
- [3B12] ウラン標準粒子の作成と二次イオン質量分析法による同位体比分析  
\*富田 涼平<sup>1</sup>、富田 純平<sup>1</sup>、安田 健一郎<sup>1</sup>、鈴木 大輔<sup>1</sup>、江坂 文孝<sup>1</sup>、宮本 ユタカ<sup>1</sup> (1. 原子力機構)  
14:35 ~ 14:50
- [3B13] MC-ICP-MSによる高感度ウラン同位体比測定  
\*富田 純平<sup>1</sup>、富田 涼平<sup>1</sup>、鈴木 大輔<sup>1</sup>、安田 健一郎<sup>1</sup>、宮本 ユタカ<sup>1</sup> (1. 原子力機構)  
14:50 ~ 15:05
- [3B14] 飛跡検出法を利用した保障措置環境試料の粒子スクリーニング法の開発  
\*安田 健一郎<sup>1</sup>、鈴木 大輔<sup>1</sup>、宮本 ユタカ<sup>1</sup>、宇佐美 秀彦<sup>2</sup> (1. 日本原子力研究開発機構、2. 理工科学株式会社)  
15:05 ~ 15:20

(2022年9月17日(土) 14:20 ~ 15:20 B会場)

## [3B11-14-Zoom] セッションのオンライン参加 ( Zoom)

Zoomはこちら

## 3B11

SK-Gd によるニュートリノ検出に向けた硫酸ガドリニウム中の  $^{226}\text{Ra}$  質量分析法の確立

(筑波大 数理物質科学<sup>1</sup>、筑波大 数理<sup>2</sup>、東大 ICRR<sup>3</sup>、KEK<sup>4</sup>、東北大 RCNS<sup>5</sup>)○榊枝優真<sup>1</sup>、坂口綾<sup>2</sup>、高久雄一<sup>2</sup>、細川佳志<sup>3</sup>、関谷洋之<sup>3</sup>、伊藤慎太郎<sup>4</sup>、池田一得<sup>3</sup>、市村晃一<sup>5</sup>、山崎信哉<sup>2</sup>、末木啓介<sup>2</sup>

【緒言】宇宙素粒子観測装置であるスーパーカミオカンデ(SK)タンク内の超純水に硫酸ガドリニウム( $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ )を溶解させることで、超新星背景ニュートリノの世界初観測を目指す SK-Gd プロジェクトが進行している。硫酸ガドリニウム中には天然の放射性核種が含まれており、背景事象の要因となることから特定の核種の含有量に対する要請値が定められている。それら核種のうち、ラジウム-226( $^{226}\text{Ra}$ )は半減期も長く( $T_{1/2}=1600$ 年)影響が大きい為、要請値は  $0.5 \text{ mBq/kg- Gd}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  と厳しく設定されている。そこで本研究では、硫酸ガドリニウム中の  $^{226}\text{Ra}$  を ICP-MS で迅速に測定・評価することを目的として、ICP-MS の高感度化と硫酸ガドリニウムからの  $^{226}\text{Ra}$  の抽出・濃縮法について検討した。

【実験】<ICP-MS 高感度化> プラズマへの試料導入効率向上およびプラズマ中における元素のイオン化効率向上による高感度化を目指し、①脱溶媒によってドライエアロゾル試料をプラズマに導入、②プラズマを発生させるトーチの内径を変更、③差動排気部の高真空化を行った。また、単位時間当たりの試料導入量に対する感度の向上を目指し、ネブライザーの種類についても検討した。それぞれの条件において装置の最適化を行い、最終的な ICP-MS の感度による  $^{226}\text{Ra}$  の定量下限から必要な硫酸ガドリニウムの量を見積もった。< $^{226}\text{Ra}$  抽出・濃縮> 硝酸系溶液中で  $^{226}\text{Ra}$  吸着選択性の高い樹脂(AnaLig Ra-01)の利用のため、濃度の異なる硝酸に対する硫酸ガドリニウム溶解度を求め、 $^{226}\text{Ra}$  測定に必要な最小試料溶液量を見積もった。吸着過程で利用する樹脂量と通液速度の最適条件や、ICP-MS 導入時に  $^{226}\text{Ra}$  の強度低下を引き起こす残存  $\text{Gd}^{3+}$  除去法についても検討した。吸着、脱離等の実験操作における  $^{226}\text{Ra}$  の収率トレーサーとして化学的性質が似た  $^{133}\text{Ba}$  を利用した。

【結果】導入試料の脱溶媒化や試料導入速度の検討、トーチのインジェクター径の決定、高真空化により、最終的な感度は一般的な ICP-MS の約 32 倍に上昇した。この時の  $^{226}\text{Ra}$  の定量下限値は  $4.8 \times 10^{-16} \text{ g/g}$  であった。硫酸ガドリニウムは 2 M 硝酸に対して最も溶解性が高く(約 10 wt%)、高感度化した ICP-MS の感度から、要求されるレベルでの  $^{226}\text{Ra}$  測定に必要な溶液量は約 500 mL と計算された。この溶液量に対して、吸着実験に要する時間、吸着率、回収率を考慮した結果、0.75 mL の AnaLig Ra-01 樹脂に、流速約 5 mL/min での通液を最適条件とした。Gd<sup>3+</sup>除去には Ln レジンをを用いることで、高感度化した ICP-MS の測定に影響しないレベルまで低減できた。この手法を実試料に適用し評価した結果、SK へ導入可能であることを確認した。そして実際に 7 月に評価した硫酸ガドリニウムと同じロットの約 1 トンが導入され、観測が開始されている。

Establishment of the mass spectrometric technique of  $^{226}\text{Ra}$  in gadolinium sulfate for detection of Neutrinos by SK-Gd

SAKAKIEDA Y., SAKAGUCHI A., TAKAKU Y., HOSOKAWA K., SEKIYA H., ITO S., IKEDA M., ICHIMURA K., YAMASAKI S., SUEKI K.

## 3B12

## ウラン標準粒子の作成と二次イオン質量分析法による同位体比分析

(原子力機構<sup>1</sup>)○富田涼平<sup>1</sup>、富田純平<sup>1</sup>、鈴木大輔<sup>1</sup>、  
安田健一郎<sup>1</sup>、江坂文孝<sup>1</sup>、宮本ユタカ<sup>1</sup>

【緒言】 環境試料中に存在する微小ウラン粒子に対する同位体比をマルチコレクター型大型二次イオン質量分析装置(LG-SIMS)で正確に分析するためには、ウラン同位体組成が既知のウラン標準粒子を用いて、感度やマスバイアスの違いなどを補正することが必要である。ウランを含む標準粒子の製造は同位体組成が既知のウラン標準溶液のエアロゾルを乾燥させて得る手法を主として用いている。しかし、霧状のウラン標準溶液から粒子を製造するには特殊な設備が必要であり、容易に製造することができないため、入手可能な標準粒子の同位体組成は限定されてしまう。そこで、ウラン同位体標準溶液を多孔質の微細シリカ粒子に浸透させることで同位体標準粒子と同等の試料を作成する簡便な方法を発案するとともに、LG-SIMSにおける同位体標準粒子として利用することを目指した。

【実験および結果】 2.21 ppm の U 同位体比標準溶液( $^{233}\text{U}/^{238}\text{U}=0.694$ 、 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}=0.992$ )1.80 g を PFA 容器内で加熱濃縮した後、1000 ppm の Lu 標準溶液 0.5 mL を加えて蒸発乾固し、10  $\mu\text{L}$  の 2%  $\text{HNO}_3$  へと濃縮した。そこに同重量の微細シリカ粒子(粒径 1~3  $\mu\text{m}$ )を加えた後、一晩静置することで溶液を浸透させた。PFA 容器内の U 同位体比標準溶液の含侵粒

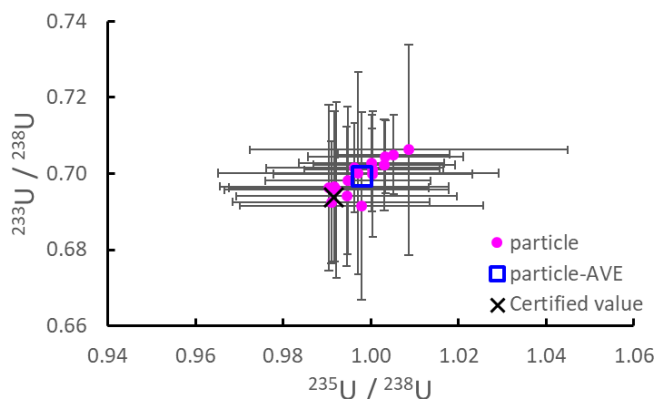


図 1: U 含侵粒子のウラン同位体比測定結果

子を加熱乾燥させた後に綿製の布で拭き取り、布に付着した U 含侵粒子を吸引してガラス状炭素試料台上に回収した。この試料台を LG-SIMS(CAMECA 製 IMS-1300HR<sup>3</sup>)に導入し、U 同位体比を測定した。U 含侵粒子を識別するために U 同位体比標準溶液に添加してあった Lu の二次イオンイメージを観察することで U 含侵粒子の位置を特定し、U 含侵粒子 1 個に対して  $^{233}\text{U}$ 、 $^{234}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、 $^{238}\text{U}$  の二次イオンとウラン水素化物の補正計算に必要な  $^{238}\text{U}^1\text{H}$  を測定した。1 回の同位体比測定は 1 サイクル 8 秒で計 40 サイクルとした。図 1 に 16 個の U 含侵粒子に対する個々のウラン同位体比の測定結果(●)、全粒子の平均値(□)および U 同位体比標準溶液の保証値(×)を示した。不確かさは測定値の標準偏差( $1\sigma$ ) (約 2%)を示す。個々の U 含侵粒子の測定値は  $^{233}\text{U}/^{238}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  とともに U 同位体比標準溶液の保証値に対して不確かさの範囲内で一致した。本実験の結果から、この多孔質シリカ粒子と既存の標準溶液を利用することでウラン同位体の測定標準粒子を簡便に作成することが可能となった。今後、この開発技術を用いることで、ウラン同位体組成が既知の微細ウラン粒子を作成し、存在度が低い  $^{236}\text{U}$  同位体に対しても高い精度で分析できる測定技術の開発に取り組む。

本発表には、原子力規制庁から委託を受けて実施した「保障措置環境分析調査」の成果の一部が含まれる。

Preparation of uranium standard particles and isotope ratio analysis by secondary ion mass spectrometry

Tomita, R., Tomita, J., Suzuki, D. Yasuda, K. Esaka, F., Miyamoto, Y.

## 3B13 MC-ICP-MSによる高感度ウラン同位体比測定

(原子力機構)○富田純平、富田涼平、鈴木大輔、安田健一郎、

宮本ユタカ

【緒言】 保障措置環境試料中のウラン(U)粒子の同位体比を測定することによって同位体濃縮や再処理の有無等の保障措置上重要な情報を読み取ることができる。 $^{233}\text{U}$ 、 $^{234}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$  及び  $^{236}\text{U}$  の同位体組成を同時に測定することが可能なマルチコレクタ型 ICP-MS (MC-ICP-MS) では、主たる組成の  $^{238}\text{U}$  をファラデーカップで測定している。しかしながら、ピコグラム量の U 同位体測定では、ファラデーカップからの出力電圧が低く (S/N 比が悪く) なることにより、測定精度はイオン検出器を使った場合よりも劣る。本研究では、高い出力電圧を得る方法の1つとして、U 溶液をより高濃度に調製し、ICP-MS に導入する方法を検討した。この場合、少量の溶液全量を MC-ICP-MS に導入するため、得られた同位体のシグナル強度のうち空気混入の影響を除いて同位体比を算出する方法について考察した。

【実験】 測定試料として、同位体標準溶液 CRM U015 及び IRMM184 を用いた。溶液中の U 濃度を高くするために、通常 2 mL の溶液量に調製する測定試料を 0.2 mL に調製することとした。U 同位体比測定は Thermofisher Scientific 社製 MC-ICP-MS (Neptune-XT) で行い、感度を上げるために試料導入部には ESI 社製脱溶媒装置 APEX- $\Omega$  を装着した。試料吸入開始直後から溶液が無くなるまでデータを取得した。試料吸入開始時と試料消耗時後に空気を吸うため、シグナル強度が乱れることから、試料吸入開始時及び試料消耗時の空気による影響をブランク試料 (2%  $\text{HNO}_3$ ) 及び試料のシグナル強度の変化から見極め、空気混入の影響のない部分のシグナル強度のみを積算して同位体比を求めた。不確かさは、積算値の計数誤差により算出した。その結果を従来法の結果と比較し、本法の有効性について評価した。

【結果と考察】 CRM U015 について 5 ppt (U: 1 pg 相当)、10 ppt (2 pg)、40 ppt (8 pg)、IRMM184 について 10 ppt (2 pg)、100 ppt (20 pg) を測定したところ、いずれの溶液についても保証値と相対標準偏差の 2 倍以内で一致した。本研究で得られた  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  及び  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  比の相対標準偏差は、従来法よりも小さかった (右図)。この結果は、本研究で得られた相対標準偏差が計数誤差に由来するため、高い U 濃度及び計数値の積算により、計数値が大きくなったためと考えられる。以上のことから、1-20 pg 量の U 同位体比測定では、少量の測定溶液に調製して溶液中 U 濃度を高くし、全量試料導入、シグナル強度を積算する方法の方が、通常の方法よりも高感度で、より小さい相対標準偏差で測定できることがわかった。

本発表には、原子力規制庁から委託を受けて実施した

「保障措置環境分析調査」の成果の一部が含まれる。

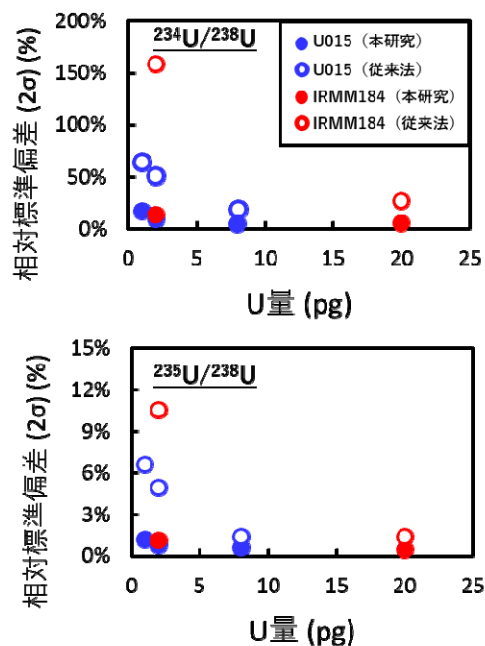


図 本研究と従来法による相対標準偏差の比較

Sensitive measurement of uranium isotope ratios by MC-ICP-MS  
TOMITA, J., TOMITA, R., SUZUKI, D., YASUDA, K., MIYAMOTO, Y.

## 3B14

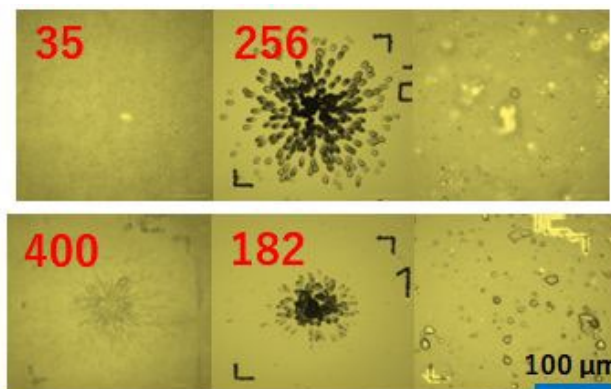
## 飛跡検出法を利用した保障措置環境試料の粒子スクリーニング法の開発

(原子力機構<sup>1</sup>、理工科学<sup>2</sup>)○安田健一郎<sup>1</sup>、鈴木大輔<sup>1</sup>、宮本ユタカ<sup>1</sup>、宇佐美秀彦<sup>2</sup>

【緒言】保障措置環境試料分析手法で用いられるプルトニウムやウラン粒子の同位体組成分析は、原子力施設等における未申告の原子力活動を検知する手段として重要である。プルトニウムおよびウラン粒子の検出には、それぞれ  $\alpha$  トラック ( $\alpha$ T) 法やフィッショントラック (FT) 法が用いられている。しかし、この両方の検出方法からそれぞれの核物質を含む粒子の位置情報を得ることは難しい。トラック検出材がエッチング時に変形して、正確な位置情報を把握することが困難なため、プルトニウムおよびウラン用それぞれに試料を作成し、どちらか一方を選択するのが一般的であった。本発表では、両トラック検出材にマーキングし、変形による位置ずれの補正を施すことで、同じ試料に対して  $\alpha$ T 法と FT 法の両方を適用することが可能とした。また、特定できた個々の核物質粒子に由来する各トラック数のデータを組み合わせることで、同位体組成分析に適した粒子を高効率かつ選択的に検出する手法を開発したので報告する。

【実験】綿布製の拭き取り試料上に付着している粒子を吸引回収後、ポリカーボネイト製フィルムに閉じ込めた試料を作成し、 $\alpha$ T 検出材(長瀬ランダウア製ハーツラス TNF-1、厚さ 0.9 mm)を重ね約 10 日間暴露した。次いで、同じ範囲に FT 検出材(Goodfellow 製 CT30-FM-000110、厚さ 0.175 mm)を重ね、JRR-3(JAEA、日本)、LVR-15(CVR、チェコ)により熱中性子照射(照射量:  $4 \times 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>)した。各トラック検出材のエッチングに先立ち、試料処理中の変形収縮に因る位置のずれを補正するため、レーザーでトラック検出材にマーキングした。エッチング条件は、 $\alpha$ T 検出材が 7M NaOH、70°C、3 時間、FT 検出材が 6M NaOH、55°C、20 分とした。各検出材を、ライカ製 LMD 付属の顕微鏡で観察し、目視でトラック数を数えた。

【結果と考察】トラック検出材の収縮率からエッチングによるトラックの位置ずれを補正した。図に、回収された粒子と各粒子に対応するトラック像の例を示す。粒子位置を特定するだけでなく、同一粒子に対し  $\alpha$ T と FT を可能とした。また、各トラック検出材を観察することで、 $\alpha$  放射能と核分裂性物質の割合の違いを視覚的にも確認でき、粒子に含まれる核物質のおよその量や組成の違いを峻別できた。また、副次的にこれらトラック数の相関を観察することにより、粒子中に含まれる組成の異なる核物質のグループ分けも可能となった。発表では、標準物質を測定した際の  $\alpha$ T と FT の各トラック数の相関から推定される粒子の組成と同位体組成分析結果との比較についても述べる。



図：試料中粒子に起因する  $\alpha$  トラック及びフィッショントラック (左：FT、中： $\alpha$ T、右：粒子、図内の数字はトラック数)

本発表には、原子力規制庁から委託を受けて実施した「保障措置環境分析調査」の成果の一部が含まれる。

Development of particle screening technique on the safeguards environmental sample by using a combination of alpha-track and fission-track techniques  
YASUDA, K., SUZUKI, D., MIYAMOTO, Y., USAMI, H.



基盤セッション 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識 | 基盤セッション D: 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識

## 基盤セッション D: 放射性核種の分析化学・放射化分析・核鑑識

座長: 松江 秀明(日本原子力研究開発機構)

2022年9月17日(土) 15:25 ~ 16:25 B会場 (206室)

Zoomはこちら

### [3B15-18-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

- [3B15] ミュオン捕獲即発 $\gamma$ 線測定による鉛試料の非破壊同位体分析法の開発  
\*浅利 駿介<sup>1</sup>、梶野 芽都<sup>1</sup>、邱 奕寰<sup>1</sup>、佐藤 朗<sup>1</sup>、Amato Alex<sup>2</sup>、Knecht Andreas<sup>2</sup>  
、Thomas Prokshca<sup>2</sup>、Luetkins Hubertus<sup>2</sup>、Vogiatzi Maria<sup>2</sup>、Wang Channan<sup>2</sup>、篠原 厚<sup>3</sup>、二宮 和彦<sup>1</sup> (1. 大阪大学、2. ポールシェラー研究所、3. 大阪青山大学)  
15:25 ~ 15:40
- [3B16] 即発 $\gamma$ 線分析における試料密度の影響と補正法  
\*前田 亮<sup>1</sup>、藤 暢輔<sup>1</sup>、瀬川 麻里子<sup>1</sup>、遠藤 駿典<sup>1</sup>、中村 詔司<sup>1</sup>、木村 敦<sup>1</sup> (1. 日本原子力研究開発機構)  
15:40 ~ 15:55
- [3B17] 焼却方法の異なる家庭ごみ焼却灰から製造された熔融スラグに含まれる磁性成分の分析  
\*秋山 和彦<sup>1</sup>、斎藤 涼太<sup>1</sup>、菊永 英寿<sup>2</sup>、久富木 志郎<sup>1</sup> (1. 都立大院理、2. 東北大ELPH)  
15:55 ~ 16:10
- [3B18] JRR-3 Pn3を用いたふっ素の迅速放射化分析  
\*三浦 勉<sup>1</sup>、石本 光憲<sup>2</sup> (1. 国立研究開発法人産業技術総合研究所、2. 東京大学工学系研究科原子力専攻)  
16:10 ~ 16:25

(2022年9月17日(土) 15:25 ~ 16:25 B会場)

## [3B15-18-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

Zoomはこちら

## 3B15

ミュオン捕獲即発 $\gamma$ 線測定による鉛試料の非破壊同位体分析法の開発

(大阪大<sup>1</sup>、PSI<sup>2</sup>、大阪青山大<sup>3</sup>)○浅利駿介<sup>1</sup>、梶野芽都<sup>1</sup>、I-Huan Chiu<sup>1</sup>、佐藤朗<sup>1</sup>、Alex Amato<sup>2</sup>、Andreas Knecht<sup>2</sup>、Prokscha Thomas<sup>2</sup>、Hubertus、Luetkens<sup>2</sup>、Maria Stergiani Vogiatzi<sup>2</sup>、Chennan Wang<sup>2</sup>、篠原厚<sup>3</sup>、二宮和彦<sup>1</sup>

**【緒言】**元素分析と同様に、同位体分析は多くの分野で有用な情報をもたらし、これによる年代測定や由来、産地の同定などが行われている。一方で同位体分析は、質量分析による破壊的な方法が適用されているため、貴重な試料への適用が難しい。我々は、素粒子ミュオンを用いた同位体分析の可能性に注目した。ミュオンは電子のおよそ200倍の質量をもち、電子と同じように原子核の周りに原子軌道を形成しミュオン原子を作る。ミュオンは最終的に原子核中の陽子と反応して励起した原子核をつくり、中性子の放出や透過力の高い $\gamma$ 線の放出が起こる。この核反応による生成核収率、すなわち $\gamma$ 線強度はミュオンを捕獲した同位体ごとに異なるために、 $\gamma$ 線測定をすることにより物質中の同位体存在度を分析することが可能であると期待される。本研究では、この新しい非破壊の同位体分析法の最初のターゲットとして、考古物の産地同定で重要視される鉛の同位体[1]に着目し、基礎的な研究を行ったので報告する。

**【実験】**実験は、大強度の連続ミュオンビームが利用可能であるスイスのPSIにて行なった。 $\pi E1$ ビームラインに $\gamma$ 線測定用のセットアップを構築し、 $^{208}, ^{207}, ^{206}\text{Pb}$ の濃縮同位体試料と、天然同位体比試料 $^{nat}\text{Pb}$ それぞれにミュオン(運動量: $35\pm 0.7\text{ MeV}$ )を各試料1時間程度照射した。放出される即発 $\gamma$ 線をゲルマニウム半導体検出器で測定した。

**【結果】**原子核にミュオンが捕獲され中性子が0-3個放出されたのちに生成する、 $^{207}, ^{206}, ^{205}\text{Tl}$ の励起準位からの $\gamma$ 線が観測された。濃縮同位体試料ごとにこれらの $\gamma$ 線強度を解析し、 $\gamma$ 線放出パターンを明らかにした。これを $^{nat}\text{Pb}$ 試料から得られた $\gamma$ 線強度を再現するように適用することで、 $^{nat}\text{Pb}$ に含まれている各同位体の濃度を決定した。同位体の推定結果を表1に示す。なお、 $^{204}\text{Pb}$ へのミュオン捕獲に由来する $\gamma$ 線は観測されなかったため解析ではその寄与を無視した。今回の実験において推定した同位体比は天然の鉛同位体比として知られている値とよく一致しており、相対誤差16%で同位体を決定することができた。誤差の由来として最も寄与が大きいのは、ミュオンが捕獲されたのちに中性子を放出しない反応による $\gamma$ 線の放出確率が低いことであり、精度向上のためにはこの $\gamma$ 線の統計を向上させる必要があることが分かった。本討論会では実際の考古学資料への適用可能性についても議論する。

**【参考文献】**

[1] 山崎一雄ら, 日本化学会誌, (1978) 8:1112-1117

表1: 鉛同位体比の分析値と文献値

	$^{208}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}$
本実験	54.6(70)	19.0(35)	26.5(46)
天然比	52.4	22.1	24.1

Development of non-destructive isotope analysis method of lead samples measuring prompt gamma rays emitted after muon capturing

ASARI S., KAJINO M., CHIU I., SATO A., AMATO A., KNECHT A., THOMAS P., LUETKENS H., VOGIATZI M. S., WANG C., SHINOHARA A., NINOMIYA K.

## 3B16

即発 $\gamma$ 線分析における試料密度の影響と補正法(原子力機構<sup>1</sup>)○前田 亮<sup>1</sup>、藤 暢輔<sup>1</sup>、瀬川 麻里子<sup>1</sup>、遠藤 駿典<sup>1</sup>中村 詔司<sup>1</sup>、木村 敦<sup>1</sup>

**【緒言】**即発 $\gamma$ 線分析(PGA)では中性子を試料に照射し測定対象核種を励起させ、脱励起の際に発生する $\gamma$ 線を測定することで試料中の核種を定量する。J-PARC BL04 ANNRIでは入射中性子として冷中性子から熱外中性子までのエネルギーを用いたPGAが可能で、さらに飛行時間法(TOF)を利用して入射中性子エネルギーを測定しながらPGAを行うTOF-PGAが実施することができる。その特長として、熱中性子以外の中性子も利用することで、高い検出効率や難測定核種に対する優れた弁別性能を実現している。PGAは正確度の高い非破壊分析手法だが、散乱断面積の大きな核種を含む試料に対して熱中性子以外の中性子を利用すると不確かさが増加する。これは散乱での中性子エネルギーの変化により、測定感度( $\gamma$ 線計数/標的核種量)が変わるためである。試料中の散乱回数に応じて中性子のエネルギーが変化するため、散乱物質の量によって測定感度がばらつき、同じ標的核種量であっても得られる $\gamma$ 線計数が異なってしまい、不確かさが増加する。我々のグループでは、この測定感度が散乱物質の含有量だけでなく密度にも依存して変化する事を発見した<sup>1)</sup>。本研究では、この密度の影響の補正法を開発し、シミュレーションとANNRIを利用した実験により、その有効性を評価した。

**【シミュレーションと補正結果】**シミュレーションではモンテカルロコードPHITSと核データJENDL4.0を利用してポリスチレン(発泡スチロール)単体の密度から、その1/50倍までの異なる密度の試料へ冷中性子、熱外中性子を照射した際に発生する水素の2.2 MeV捕獲 $\gamma$ 線の発生数を計数した。図1(a)は冷中性子照射時のシミュレーション結果を、図1(b)はそれに補正法を適用した結果を示している。図1(a)は同じ水素量であっても密度によって $\gamma$ 線発生数が大きく異なり、その結果として直線の傾き(感度に相当)が30%以上ばらついているのに対して、補正後の図1(b)は傾きが3%以内で一致しており、補正が有効であることを確認できた。本発表では、実験による補正法の評価や、ANNRIにおける最新の成果についても報告する。

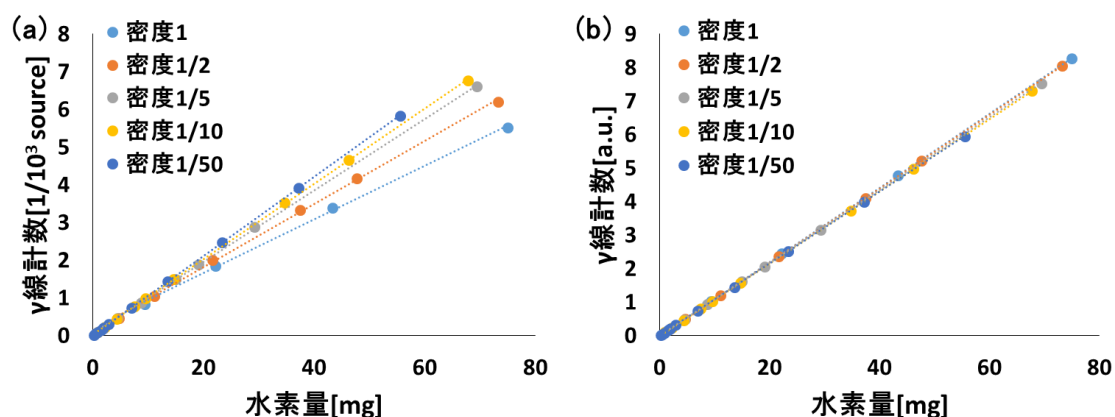


図1 密度の異なる試料のPGAシミュレーション結果(補正前(a)補正後(b))

**【参考文献】**1) M. Maeda *et al.*, *sci. rep.* **12**, 6287 (2022).Effect of sample density on prompt  $\gamma$ -ray activation analysis and correction method  
MAEDA M., SEGAWA M., TOH Y., ENDO S., NAKAMURA S., KIMURA A.

## 3B17

## 焼却方法の異なる家庭ごみ焼却灰から製造された溶融スラグに含まれる磁性成分の分析

(都立大理<sup>1</sup>、東北大 ELPH<sup>2</sup>)○秋山和彦<sup>1</sup>、斎藤涼太<sup>1</sup>、菊永英寿<sup>2</sup>、久富木志郎<sup>1</sup>

【はじめに】家庭ごみを焼却して得られる焼却灰から溶融固化して製造される溶融スラグには磁石と作用する銅と鉄を主成分とした金属成分(以後”磁性成分”とする)が存在する。この成分には Ni、Co や金などの有価金属成分が含まれており、廃棄物からの資源回収という視点から注目に値するものと言える。スラグの原料となる焼却灰を得るための家庭ごみ焼却方式には、ごみを火格子(ストーカ)上に徐々に移動させ乾燥/焼却/後燃焼に段階を経て焼却灰とするストーカ式や砂を満たした焼却炉中に下部から空気を送り込み熱した砂を用いて焼却灰とする流動床式等がある。この様な燃焼方式の違いは得られる溶融スラグの元素組成にも反映するものと考えられ、先に述べた有価金属成分を多く含む磁性成分の組成にも影響を与えることが予想される。本研究ではストーカ式(多摩川清掃工場産)及び流動床式(相模原市の清掃工場より提供)の焼却炉から得られた焼却灰を原料として製造された溶融スラグに含まれる磁性成分について蛍光 X 線分析及び光量子放射化分析による元素分析結果を報告する。

【実験】多摩川清掃工場及び相模原市の清掃工場より提供された溶融スラグからネオジム磁石を用いて磁性成分を分離した。それぞれの磁性成分についてはさらに 500 及び 100 メッシュのふるいを用いてサイズ選別を行い、蛍光 X 線分析(堀場製作所 MESA50)による元素分析を行った。これらの試料について 10 mg~50 mg を分取し、東北大学電子光物理学研究センター(ELPH)電子線形加速器にて 20 MeV の電子線から発生する制動放射線を照射し、試料の放射化を行った。放射化した試料より放出されるγ線を Ge 半導体検出器で測定し、各磁性成分に含まれる微量元素成分の定量を行った。

【結果及び考察】昨年度の討論会にて多摩川清掃工場より提供されたスラグ中に含まれる磁性成分(TAMAGAWA)の組成が銅及び鉄を主体とした金属相を形成していることを報告した。[1]今回定量を試みた相模原市の清掃工場より提供されたスラグより得られた磁性成分(SAGAMIHARA)の粒径 500 メッシュ以上の分画についても銅及び鉄が主成分となっていることが明らかとなった。図は 500 メッシュ以上の粒径分画の TAMAGAWA 及び SAGAMIHARA の平均元素組成について相関を取ったものである。この図から TAMAGAWA 及び SAGAMIHARA に含まれる各元素の平均組成は概ね良い相関があり、焼却方法の異なる溶融スラグであっても磁性成分の組成は互いに類似していることが予想される。[1] 斎藤ら, 第 65 回放射化学討論会 3K01.

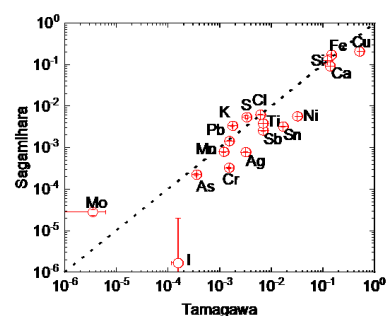


図. TAMAGAWA 及び SAGAMIHARA の平均元素組成の相関

Analysis of magnetic components in melting slag produced from the ash of the domestic waste with the different incineration methods  
AKIYAMA K., SUZUKI, T. AKIYAMA K., SAITO R., KIKUNAGA H., KUBUKI S.

## 3B18 JRR-3 Pn3 を用いたふっ素の迅速放射化分析

(産総研物質計測<sup>1</sup>、東大原子力専攻<sup>2</sup>)○三浦勉<sup>1</sup>、石本光憲<sup>2</sup>

**【緒言】**固体試料中のふっ素は、アルカリ融解法、酸素フラスコ燃焼法、熱加水分解法等により試料を分解し、溶液化もしくは溶液に捕集した後、ふっ化物イオンとしてイオンクロマトグラフィーやイオン電極で測定されている。溶液化に必要な、これらの融解・加熱分解法では定量的にふっ素が回収できる条件を設定すること、融解・分解操作に使用する試薬・装置からの汚染の有無の確認が必要となる。一方、ふっ素は熱中性子照射による(n,  $\gamma$ )反応によって生成する<sup>20</sup>F ( $T_{1/2}$ : 11.163 秒)が壊変に伴って放出する $\gamma$ 線(1633 keV)を測定する中性子放射化分析法によっても測定できる。非破壊分析法のひとつである中性子放射化分析法によって、損失・汚染の可能性が少ない固体試料中のふっ素の信頼性の高い測定が実現できる可能性がある。2021年度に再起動し利用運転が再開された日本原子力研究開発機構 JRR-3 の放射化分析用気送照射設備 Pn3 を利用すると、<sup>20</sup>F のような秒単位の半減期の放射性核種を測定する迅速放射化分析が実施<sup>1)</sup>できる。ここでは JRR-3 Pn3 気送照射設備で半減期 11 秒の短寿命放射性核種を測定するふっ素の分析を試行したのでその結果を報告する。

**【照射設備】**JRR-3 Pn3 気送照射設備は窒素ガスを搬送に使用する気送照射装置、フード、フード内に設置した Ge 半導体検出器を装備している。照射試料をポリエチレン製照射容器(外径 1.7 cm、長さ 3 cm)に充填し、5 秒から 120 秒間中性子を照射することができる。Pn3 の照射位置は JRR-3 の重水反射タンク内であり、熱中性子束は  $1.9 \times 10^{13}$  n  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、Cd 比は 300 と高い比を示す。この高い Cd 比を示す中性子場の照射によって、高速中性子反応に起因する(n, p)や(n,  $\alpha$ )等の副反応を低減した放射化分析が実施できる。Pn3 で照射後、照射容器は 7 秒以内にフード内の Ge 半導体検出器(Canberra GC1819)まで移送され、照射容器ごと $\gamma$ 線スペクトルを測定する。Ge 半導体検出器と照射容器間の距離は 110 mm から 260 mm に設定できる。Ge 半導体検出器のチャンネルと $\gamma$ 線エネルギーの関係は Eu-152 線源を測定し、校正した。

**【実験と結果】**約 20 mg のフジフィルム和光純薬製 JCSS ふっ化物イオン標準液(F<sup>-</sup>: 1003 mg/L)をポリエチレン製袋中のろ紙(2 cm $\times$ 2 cm、ADVANTEC 製 No.5C)に滴下した後、シーラーで熱溶封して照射試料を作成した。また、ふっ化物イオン標準液を添加しないブランク試料も調製した。上記の照射試料を 1 試料ずつ照射容器に入れ、JRR-3 Pn3 で 5 秒間照射、10 秒間冷却、10 秒間の $\gamma$ 線スペクトル測定を 5 サイクル繰り返した。試料と Ge 半導体検出器間の距離は 210 mm とし、<sup>20</sup>F が放出する 1633 keV  $\gamma$ 線のピーク面積を求め、照射終了時に減衰補正した。測定結果を集計したところ、ブランク試料からは有意な 1633 keV  $\gamma$ 線のピークは得られなかった。ブランク試料における 1633 keV  $\gamma$ 線のピーク領域のベースライン計数値の標準偏差の 3 倍を検出限界とすると 0.7  $\mu\text{g}$  が得られた。

参考文献：1)米沢ら(1998) JAERI-TEC 98-046.

Rapid Instrumental Neutron Activation Analysis of Fluorine using by JRR-3 Pn3 irradiation system  
MIURA T., ISHIMOTO M.

## 特別セッション4 考古学・文化財・人類学への展開-文理融合領域への チャレンジ

座長:薬袋 佳孝(武蔵大学)

2022年9月17日(土) 09:40 ~ 10:45 C会場 (207室)

Zoomはこちら

文化財研究などの文理融合領域への展開は学術振興の新潮流の一つである。放射化学・核化学分野では、C-14法・熱ルミネセンス法などの絶対年代測定法の開発と応用、鉛同位体法による遺物の産地推定、放射化分析やPIXEなどの微量元素分析の応用、メスバウアー分光法などの非破壊法の活用など、放射線や放射能の性質を駆使しての先端研究が展開されて来た。SOR光利用や中間子科学などの新展開も含めて、最新の研究動向を紹介する。

### [3C01-03-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3C01] 岐阜県瑞浪市大湫町神明神社御神木を用いた炭素14年代 較正曲線の整備：御神木の年代調査

\*國分 陽子<sup>1</sup>、箱崎 真隆<sup>2</sup>、坂本 稔<sup>2</sup>、李 貞<sup>3</sup>、中塚 武<sup>3</sup>、藤田 奈津子<sup>1</sup> (1. 日本原子力研究開発機構、2. 国立歴史民俗博物館、3. 名古屋大学)

09:40 ~ 09:55

[3C02] 鉛同位体比からみた文化財

\*齋藤 努<sup>1</sup> (1. 国立歴史民俗博物館)

09:55 ~ 10:20

[3C03] 放射光 X線を用いて古代ガラスの製法に迫る～銅赤ガラスを事例に～

\*阿部 善也<sup>1</sup> (1. 東京電機大学)

10:20 ~ 10:45

(2022年9月17日(土) 09:40 ~ 10:45 C会場)

## [3C01-03-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

Zoomはこちら



## 3C01

岐阜県瑞浪市大湫町神明神社御神木を用いた炭素 14 年代  
較正曲線の整備：御神木の年代調査

(原子力機構東濃<sup>1</sup>、歴博<sup>2</sup>、名大環境<sup>3</sup>)○國分(齋藤)陽子<sup>1</sup>、箱崎真隆<sup>2</sup>、  
坂本稔<sup>2</sup>、李貞<sup>3</sup>、中塚武<sup>3</sup>、藤田奈津子<sup>1</sup>

## 【緒言】

2020年7月岐阜県瑞浪市大湫町神明神社の御神木が豪雨で倒れた。推定樹齢1300年の巨大現生木であり、貴重な学術資源となることから、地元地区から御神木の一部を譲り受け、炭素14年代較正曲線用のデータ取得や気候復元等の研究を開始することになった。本発表では、各研究に先立って行った御神木の年代測定結果を報告する。

## 【実験】

倒壊して露出した御神木の根中心部を採取した後、セルロースを板状に抽出したものを1年輪単位で切り出し、試料とした。年代測定は、酸素同位体比年輪年代法及び炭素-14年代法を用いた。酸素同位体比年輪年代法では、名古屋大学の熱分解元素分析計-同位体比質量分析計で酸素同位体比を測定し、酸素同位体比変動パターンを年代既知の標準年輪曲線と照合し、年輪年代を求めた。また、炭素14年代法は、酸素同位体比年輪年代法に用いたものと同じセルロース板から3点の単年輪セルロースを分取し、燃焼法にてグラファイトを作製した後、日本原子力研究開発機構東濃地科学センターの加速器質量分析装置(JAEA-AMS-TONO-5MV)で炭素14年代を測定した。OxCal4.4を使用して、得られた炭素14年代と年輪間隔に基づき、IntCal20とのウィグルマッチングで較正年代を求めた。

## 【結果】

採取した根中心部には54の年輪と定着年に近い年代を示すと言われている髄を確認した。54年輪のうち、状態の良かった43年輪分の酸素同位体比データを取得し、変動パターンを確認したところ、根中心部の髄の年代は西暦1351年であった。また、炭素14年代測定で3試料から得られた結果は、 $485 \pm 28 \sim 652 \pm 44$  BPであった。これらの結果から較正年代を求めた結果、髄の年代は $1352 +43/-42$  cal ADとなった。この結果は、やや誤差範囲が大きいものの、酸素同位体比年輪年代法の結果と整合した。以上の結果から、樹齢は約670年であるとわかった。目通り周囲から推定されていた樹齢1300年に比べると半分程度の年数であったが、これは御神木が近くにあった樹齢880年のスギに比べて良好な環境で生育し、成長が早かったことを示唆する。

今後、本御神木の主幹から切り出した415年輪の炭素14濃度を測定し、新たな炭素14年代較正曲線用データの整備等を行う予定である。

Data preparation for radiocarbon age calibration curve using the sacred tree of Zinmei shrine at Okute, Mizunami, Gifu: Dating of the sacred tree  
SAITO-KOKUBU Y., HAKOZAKI M., SAKAMOTO M., LI Z., NAKATSUKA T., FUJITA N.

## 3C02 鉛同位体比からみた文化財

(国立歴史民俗博物館) ○齋藤 努

### 【はじめに】

従来から、鉛同位体比分析法を応用して、さまざまな青銅製品などの原料の産地推定が行われてきた。近年は高精度分析ができるようになり、より精密な議論が可能になった。また、考古学などとの協業もさらに進んできている。ここでは、古代と中世の事例について紹介する。

### 【古代までさかのぼる山口県内鉱山について】

これまでの研究で、奈良の大仏(東大寺盧舎那仏坐像)や皇朝十二銭など、古代の青銅製品には山口県産の原料が使われていると推定されていたが、当時採掘されていた鉱山は4つ確認されており、鉛同位体比も近似しているため、以前の分析手法では見分けるのが容易ではなかった。現在は、精度が高くなったため識別可能になっている。

山口県山口市の周防鑄銭司跡(すおうのじゅぜんじあと)は、皇朝十二銭のうち4番目の富寿神宝(ふじゅしんぼう)から最後の乾元大宝(けんげんたいほう)にいたる8種の銭貨鑄造をほぼ独占していたという遺跡であり、2017年度から山口大学と山口市によって発掘調査が行われている。ここから出土した長年大宝(ちょうねんたいほう)の鑄損じ銭、羽口・るつぽ付着熔融物、炉内生成熔融ガラスなどを分析したところ、長登(ながのぼり)鉱山の鉱石に近似するものの、わずかに異なる数値を示していた。長年大宝については、中国の華中～華南地域や朝鮮半島の鉱山の原料が、スクラップなどとして一部混入したと考えれば説明できる。また、炉内生成熔融ガラスは、どちらかという和白水(しろずい)鉱山の数値に近いので、そちらが原料であった可能性もある。ただし、分析されている鉱石の試料がまだ一点だけなので、保留としたい。

### 【中世の青銅製品について】

国産青銅原料の採掘量は、10世紀半ばを過ぎると次第に衰退していく。中世には経済活動が発達するが、それに見合う銅銭をまかなうだけの原料が国内では得られなかったため、中国から大量に輸入した渡来銭、特に北宋銭をそのまま通用貨幣とするようになった。

これに関連し、中世日本の青銅製品はすべて北宋銭を鑄直して作っていたという説がある。一方、そのまま通貨になっていたものをわざわざ鑄つぶす必要があったのかという疑問の声も上がっている。これを検証するため、当時の日本では輸入されておらず、模鑄銭も作られなかったため、真贋を気にしなくてよい、良質な大銭(ややサイズを大きくして高い額面を付与した銭貨)を選び、鉛同位体比分析を行って、既報の青銅製経筒(12世紀前半～13世紀初頭、経典を入れて土中に埋納したもの)、鎌倉大仏(13世紀半ば)、雲版(うんぱん、鎌倉時代～江戸時代、禅宗寺院で用いられた梵音具)と比較した。後三者の数値は日本産と中国産の二つに大別され、またほぼ限られたデータ範囲内に収まっていた。これは、かなり長期にわたって、限られた鉱山あるいは地域から採取された原料が使われていたことを意味する。しかし、北宋銭の大銭のデータは大きなばらつきをみせた。北宋銭の鑄銭地は現在の安徽省、江西省、福建省にあたり、近隣から原料を採取したとすれば、数値にばらつきがあることと整合する。

以上からみると、それらの青銅製品の原料が北宋銭であるとは考えにくい。ただし、既報で分析対象としていたのはいずれも仏教関係の資料であることから、原料が特別なルートから得られていた可能性もあることには注意しておいた方がよい。日常使いの安価な青銅鏡などはほとんど調べられていないので、今後はそのような資料の分析事例を蓄積する必要があるだろう。

Studies on cultural properties from the viewpoints of lead isotopes  
SAITO T.

## 3C03 放射光 X 線を用いて古代ガラスの製法に迫る ～銅赤ガラスを事例に～

(東京電機大)○阿部 善也

**【緒言】** 人工的なガラスの生産は今から 4 千年以上前のメソポタミアに起源を發し、前 15 世紀に技術が古代エジプトに伝わった。古代のガラス製品に含まれる元素の組成や化学状態は原料や技法の違いを強く反映するため、生産地や製法の解明を目的に様々な理化学的分析が利用されている。その一方で、古代ガラスに限らず、貴重な文化財の研究においては非破壊的な手法の利用が求められ、放射光 X 線を用いた非破壊かつ複合的な分光分析が非常に有効である。本発表では、Cu によるガラスの赤色着色技術「銅赤(どうあか)」を事例として、放射光 X 線を用いて古代ガラスの製法解明を行った研究を紹介する。銅赤は前 15 世紀頃の時点で古代エジプトとメソポタミアの両地域で利用が見られるが、どちらの地域で生み出されたのか明らかではない。他のガラス着色と異なり、銅赤は焼成中の還元が不可欠であるため、その技術的発祥を解明することは重要である。本研究では古代エジプトおよびメソポタミアで作られた銅赤ガラス製品に対して放射光を利用した非破壊の X 線分析を実施し、製法を推定・比較した。

**【実験内容】** 分析試料は古代エジプト美術館(東京)より借用した古代銅赤ガラス製品 5 点である。古代エジプト製品として新王国時代(前 15～12 世紀)の 3 点、メソポタミア製品として同時代(前 15～13 世紀)の 2 点を分析した。蛍光 X 線分析(XRF)により化学組成を明らかにした後、高エネルギー加速器研究機構 フォトンファクトリーへと各試料を持ち込み、放射光 X 線分析を行った。まず BL-9C において Cu-K 吸収端 X 線吸収端近傍構造(XAENS)解析を行い、各試料中の Cu の化学状態を調べた。さらに BL-4A において縦横約 5  $\mu\text{m}$  に集光した単色 X 線を用い、 $\mu\text{-XRF}$  イメージングにより主要な元素の分布を、Cu-K 吸収端  $\mu\text{-XANES}$  解析により局所的な Cu の化学状態を分析した。測定は全て非破壊で実施した。

**【結果と考察】** XRF の結果、今回分析した 5 試料全てから著量の Cu が検出された。ただし、古代エジプト製品とメソポタミア製品では Cu 含有量に明らかな差があり、前者の Cu 含有量が酸化物濃度で 10 wt% 程度であったのに対し、後者にはその倍以上の Cu が含まれていた。また、メソポタミア製品には 10 wt% を超える Pb が含まれていたが、これは高温中で過剰量の Cu をガラスに融解させるための起分極剤として意図的に添加されたものと考えられる。他にも、焼成中に熱的還元剤として機能する Sn や Sb の含有量に地域差が見られた。放射光 Cu-K 吸収端 XANES 解析の結果、全試料で赤銅鉱(cuprite:  $\text{Cu}_2\text{O}$ )の存在が示され、これが主要な着色要因であることが明らかとなった。ただし、古代エジプト製品では可視光領域にほとんど吸収を持たない Cu<sup>+</sup>イオンが混在していたのに対し、メソポタミア製品では大部分の Cu が  $\text{Cu}_2\text{O}$  の形で存在していた。放射光  $\mu\text{-XRF}$  イメージングおよび Cu-K 吸収端  $\mu\text{-XANES}$  解析では、着色要因である  $\text{Cu}_2\text{O}$  の結晶の形や大きさに地域差が見られ、古代エジプト製品では長さ 1～10  $\mu\text{m}$  オーダーの柱状結晶が透明ガラス中に散在していたのに対し、後者では  $\text{Cu}_2\text{O}$  が 100  $\mu\text{m}$  以上の樹枝状結晶に成長していた。この違いは Cu の添加量や起分極剤である Pb の有無に起因すると考えられ、原料配合比や製法の違いを反映したものといえる。すなわち、古代エジプトとメソポタミアにおいて銅赤ガラスの「レシピ」に地域差が存在したことになり、あるいは銅赤という技術自体が両地域で別々に発明され、独自に発展したものであった可能性を示唆するものである。

Investigation of production technique of ancient glass using synchrotron radiation X-ray: a case of copper-red glass  
ABE, Y.

特別セッション 考古学・文化財・人類学への展開 | 特別セッション 4 考古学・文化財・人類学への展開

## 特別セッション4 考古学・文化財・人類学への展開-文理融合領域への チャレンジ

座長:国分 陽子

2022年9月17日(土) 10:50 ~ 11:40 C会場 (207室)

Zoomはこちら

文化財研究などの文理融合領域への展開は学術振興の新潮流の一つである。放射化学・核化学分野では、C-14法・熱ルミネセンス法などの絶対年代測定法の開発と応用、鉛同位体法による遺物の産地推定、放射化分析やPIXEなどの微量元素分析の応用、メスbauer分光法などの非破壊法の活用など、放射線や放射能の性質を駆使しての先端研究が展開されて来た。SOR光利用や中間子科学などの新展開も含めて、最新の研究動向を紹介する。

### [3C04-05-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

#### [3C04] PGAによる鉄鋼文化財の非破壊分析

\*田中 真奈子<sup>1</sup> (1. 昭和女子大学)

10:50 ~ 11:15

#### [3C05] 負ミュオンによる非破壊3次元多元素同時分析

\*久保 謙哉<sup>1</sup> (1. 国際基督教大学)

11:15 ~ 11:40

(2022年9月17日(土) 10:50 ~ 11:40 C会場)

## [3C04-05-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

Zoomはこちら

## 3C04 PGAによる鉄鋼文化財の非破壊分析

(昭和女子大学<sup>1)</sup>)○田中眞奈子<sup>1</sup>

**【緒言】**近年、様々な分野で量子ビームの応用が進んでいる。非破壊、非接触が求められる文化財分析分野も例外ではない。放射光、中性子、ミュオンは、それぞれ物質と特徴的な相互作用をするため、それらの特性を生かすことで物質から多くの有用な情報を得ることが出来る。また、複数の量子ビームを相補利用することで多角的な検証も可能となる。本報では、文化財の中でも鉄鋼文化財に焦点をあて、即発ガンマ線分析(PGA)を中心に、中性子と放射光を用いた最新の非破壊分析成果について報告する。

**【実験】**自在置物は、戦国期に活躍した鎧甲冑師達が江戸の太平の時代につくり始めた金属製の動物の置物で、細密であるだけでなく、それらの手足や関節を本物と同じように動かすことが出来るのが特徴である。しかし、可動性をもたせるための内部構造や用いられている材料については不明な点が多い。発表者らは鉄製自在海老置物(明珍宗長作、個人蔵、Fig.1)と鉄製自在蟹香合(制作者不明、東京藝術大学大学美術館所蔵)の放射光 X 線 CT 分析により、それぞれの内部構造や具体的な接合方法を明らかにした。その結果を踏まえ、鉄製自在海老置物内部にある2種類の接着剤(金属製ロウ材)を定性・定量することを目的にハンガリーの Budapest Neutron Center で PGAI(Prompt gamma activation imaging)を行った。一方、自在蟹香合は美術館所蔵品のため、海外に持ち出すことが出来なかった。日本国内であれば持ち出しの許可が得られる可能性があるため、美術館所蔵品の将来的な分析を視野に入れ、日本の研究用原子炉 JRR-3 でも同一資料(鉄製自在海老置物)の PGA を行い検証した。

**【結果と考察】** Budapest Neutron Centre での PGAI と JRR-3 での PGA のいずれも鉄製自在海老置物内部の2種類の接着剤(鉄製ロウ材)の定性・定量分析に成功した。また、用いられている2種類のロウ材の融点から、自在置物の制作時の手順(接着剤の使用順序)も考察することが出来た。2つの施設における実験条件の違いによる影響については、現在検証を行っている。PGA の最大の特徴は非破壊で主要元素について定量分析が出来る点である。一方、中性子線を用いる際には、放射化のリスクについて十分気を付ける必要がある。本実験においては、自在置物を構成する成分の $\gamma$ 線量を注意深くモニタリングし、測定方法・測定時間を調節することで放射化を回避することが出来た。今後は、ミュオン蛍光 X 線分析との比較・検証も行っていく予定である。



図 1 鉄製自在海老置物  
(明珍宗長作、長さ 230mm、高さ 35mm、個人蔵)

謝辞 本研究は科学研究費補助金 (No.26702004) ならびに昭和女子大学の研究助成金によるもので、ご支援に深謝いたします。

Nondestructive analysis of iron artifacts by PGA  
TANAKA M.

## 3C05

## 負ミュオンによる非破壊 3次元多元素同時分析

(国際基督教大学)○久保謙哉

負ミュオン(負 $\mu$ 粒子、負ミューオン)は、電子の207倍の質量をもつ平均寿命2.2 $\mu$ sの素粒子である。負ミュオンを物質に照射したときに発生するミュオン特性X線を用いる元素分析法(MXE)にはさまざまな有用な特徴がある。特に、資料を損傷しない非破壊分析法である、照射エネルギーを調整することによって資料表面からcm深さまでの特定の深さの分析ができる、空気中で測定できる、多元素を同時に分析できることなどは、文化財や考古資料などの貴重資料の分析に有用である。世界最高強度の負ミュオンビームが利用できるJ-PARCミュオン施設での研究結果を中心に、本方法を紹介する。

**小判の色揚げ**[1] 江戸時代に発行された金銀の合金である10種類の小判は、金の含有量が56%~87%と異なるにも関わらず外見は金色である。これは色揚げ(色つけ)と呼ばれる手法によって小判表面だけ金濃度が高くされていることによる。表面から内部数 $\mu$ mにかけて急激な金濃度勾配がつけられていることは、小判に微小な穴をあけながらオージェ電子分光法で測定されていたが、MXEで非破壊的に検証することができた。この手法の起源を探るためにさらに古い金製品の分析が行われている。

**青銅器の本体組成分析**[2] 日本には青銅製文化財が多く存在しているが、ほとんどすべては表面が鍍で覆われている。作成時の本体の元素組成と鍍の金属元素組成は異なる。鍍を透過して本体部分に停止するように負ミュオンビームエネルギーを調整することにより、非破壊的に本体部分の元素分析を行うことができる。

**3次元イメージング**[3] ストリップ集電電極をもつ半導体検出器は、高いエネルギー分解能をもちながら2次的にミュオンX線の面分布を測定することができる。フッ素やリチウムのような軽元素に対してもイメージングすることができ、負ミュオン停止深さを変化させれば3次元元素分析が可能である。

**貴重試料の非破壊分析**[4] Hayabus2が地球に持ち帰った小惑星Ryuguの試料を地球大気に晒すことなく非破壊的に分析することができた。特に軽元素の分析値を非破壊で得られる利益は大きい。

**ガラス瓶を開封せずに中の試薬を分析**[5] 緒方洪庵の遺した薬箱蓋がの中にある、蓋が固着して開けられないガラス瓶中の薬品について、ガラス瓶を透過して負ミュオンを照射することにより内部の薬品を特定することができた。

本法は非破壊多元素同時分析の新しい手法として鋭意開発が続けられている。

[1] K. Ninomiya *et al.*, *Anal. Chem.*, **87** (2015) 4567. [2] T. Saito *et al.*, *priv. comm.* [3] I-H. Chiu *et al.*, *Sci. Rep.*, **28** (2022) 5261 [4] T. Nakamura *et al.*, *Science*, in revision.[5] K. Shimada-Takaura *et al.*, *J. Nat. Med.*, **75** (2021) 532.

Non-destructive and three dimensional elemental analysis with negative muons  
KUBO, M. K.

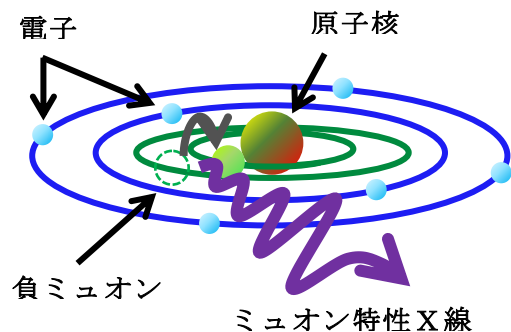


Fig. 1. MuonicX-ray emission from a muonic atom.

---

部会 | 部会

## 若手の会

座長:稲垣 誠

2022年9月17日(土) 11:45 ~ 12:30 C会場 (207室)

[Zoomはこちら](#)

---



特別セッション 放射化学と地球化学との接点 | 特別セッション 3 放射化学と地球化学との接点

## 特別セッション 3 放射化学と地球化学との接点

座長:高橋 嘉夫、板井 啓明(東京大学大学院理学系研究科)

2022年9月17日(土) 12:45 ~ 14:20 C会場 (207室)

Zoomはこちら

### [3C06-10-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

#### [3C06] 高速多点レーザー質量分析計による超高感度同位体分析

\*平田 岳史<sup>1</sup> (1. 東京大学大学院理学系研究科)

12:45 ~ 13:10

#### [3C07] 量子ビーム照射によるアミノ酸およびそのエナンチオ過剰の創成と生命の起源

\*小林 憲正<sup>1</sup> (1. 横浜国立大学)

13:10 ~ 13:35

#### [3C08] 分子レベルの情報に基づいたラジウムの環境挙動解明

\*山口 瑛子<sup>1,2</sup>、永田 光知郎<sup>3</sup>、小林 恵太<sup>1</sup>、田中 万也<sup>1</sup>、小林 徹<sup>1</sup>、谷田 肇<sup>1</sup>、矢板 毅<sup>1</sup>、吉村 崇<sup>3</sup>、奥村 雅彦<sup>1</sup>、高橋 嘉夫<sup>2</sup> (1. 日本原子力研究開発機構、2. 東京大学大学院理学系研究科、3. 大阪大学放射線科学基盤機構)

13:35 ~ 13:50

#### [3C09] 超伝導転移端検出器-マイクロ XRF-XAFSによる Cs濃集粒子中の Csの分布・化学状態

三浦 輝<sup>1</sup>、\*高橋 嘉夫<sup>2</sup>、山田 真也<sup>3</sup>、一戸 悠人<sup>3</sup>、佐藤 寿紀<sup>3</sup>、早川 亮大<sup>3</sup>、岡田 信二<sup>4</sup>、外山 裕一<sup>4</sup>、橋本 直<sup>5</sup>、野田 博文<sup>6</sup>、磯部 忠昭<sup>7</sup>、奥村 拓馬<sup>8</sup>、高取 沙悠理<sup>9</sup>、平木 貴宏<sup>10</sup>、竜野 秀行<sup>8</sup>、関澤 央輝<sup>10</sup>、新田 清文<sup>10</sup>、宇留賀 朋哉<sup>10</sup>、栗原 雄一<sup>11</sup>、山本 政儀<sup>12</sup> (1. 電中研、2. 東京大学、3. 立教大学、4. 中部大学、5. JAEA、6. 大阪大学、7. 理化学研究所、8. 東京都立大学、9. 岡山大学、10. 高輝度光科学研究センター、11. 京都大学、12. 金沢大学)

13:50 ~ 14:05

#### [3C10] リン酸イオン吸着処理によるバライト中のヨウ素酸、亜セレン酸、セレン酸の安定性の向上の効果

\*徳永 紘平<sup>1</sup>、田中 万也<sup>1</sup>、高橋 嘉夫<sup>2</sup>、香西 直文<sup>1</sup> (1. 日本原子力研究開発機構、2. 東京大学大学院)

14:05 ~ 14:20

(2022年9月17日(土) 12:45 ~ 14:20 C会場)

## [3C06-10-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

Zoomはこちら

## 3C06 高速多点レーザー質量分析計による超高感度同位体分

(東大院理<sup>1</sup>)○平田岳史<sup>1</sup>

**【緒言】**放射化学分野では分析対象試料のダウンサイジング化、対象成分の低濃度化、そして大規模データ時代に対応する分析の高速化に対する要請が加速している。くわえて微量成分の同位体分析では、他の応用研究とは一線を画す、桁違いに高い分析精度と信頼性が必要となる。こうした厳しい分析要請を通じて、放射化学と分析化学は相乗的に発展してきたといえる。私達の研究グループでは、分析の高感度化と高速化を目的に、新しい独自の光学系とレーザー装置を組み合わせた高速多点レーザーアブレーション法 (Multiple Spot Laser Ablation) を開発するとともに、ICP 質量分析計のイオン検出器の開発を通じて、分析可能濃度レンジ (ダイナミックレンジ) の拡大と同位体分析の高精度化を図ってきた。高速多点レーザーアブレーション法では、サンプリング時間を従来の 1000 分の 1 程度まで短縮することで、信号の SB 比 (Signal-to-baseline ratio) を大幅に改善でき、濃度換算で数 10ppt (pg/g) レベルの微量同位体の検出や、数万～数 10 万年程度の“若い”試料の年代分析が可能となった。さらに高速多点法では、複数の固体試料からほぼ同時にサンプリング (エアロゾル生成) が可能であり、これにより、例えば特定元素 (例えば内標準元素) の添加や、分析元素の希釈、標準添加法による定量分析など、これまで溶液試料分析でしかできなかった操作 (混合、希釈、添加等) が固体試料にも応用できる。また高速多点法を応用することで、固体試料中の元素・同位体の二次元イメージング解析や、分解能 100nm 程度での深度方向分析 (深さ分析) なども可能であり、様々な固体試料分析に広く活用され始めている。

さらに我々の研究グループでは、超微粒子 (ナノ粒子) の個別検出を目的に ICP 質量分析装置のイオン検出器の高時間分解能化を進めている。ナノ粒子を ICP 質量分析計に導入すると、その構成元素がイオン化され、パルス状の信号 (時間長 0.5ms 程度の過渡的信号) として観測される。この過渡的信号を高時間分解能で測定することで、ナノ粒子の高速個別検出が可能となる。我々はイオン検出器の時間分解能を従来の 100～10,000 倍に高めることで、5～400nm レンジのナノ粒子のサイズ分布分析や同位体分析が実現した。さらに従来の質量分析計 (四重極型あるいは磁場型) と比較して高速質量走査が可能な飛行時間型質量分析計 (TOF-MS) を応用するととて、1 秒間に 100 粒子以上のナノ粒子に対して、個別の元素・同位体分析を試みている。

私達は、分析手法の開発を通じてこれまで得られなかった情報を引き出すことが使命である。本講演では講演者らが取り組んできた最近 5 年間の分析技術開発を概説するとともに、放射化学研究の最先端の研究者から、次の挑戦 (分析学的な無理難題) の提示を受けたいと考えている。

Analytical Capability of Multiple-Spot Laser Ablation-ICP-Mass Spectrometry  
for Direct Detection of Trace Isotopes in Solid Materials  
HIRATA, T.

## 3C07

量子ビーム照射によるアミノ酸およびそのエナンチオ過剰の創成と  
生命の起源

(横浜国大)○小林憲正

【緒言】 原始地球上での生命の誕生に先立ち、アミノ酸などの有機物が生成され、供給されたはずである。生成の場としては原始大気中と地球外環境が候補となる。それぞれの環境でどのようにして有機物が生成したかを調べるため、種々の模擬実験が行われてきた。本講演では、陽子線等の量子ビームを用いた模擬実験によるアミノ酸の生成、およびそのエナンチオ過剰の創出を紹介し、今後の展望も述べる。

【原始大気模擬実験】 1950-70年代には原始大気が強還元型 ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$  を多く含む) という仮定の下で火花放電などを用いた模擬実験が行われ、種々のエネルギーによりアミノ酸が容易に生成することが報告された。この場合、エネルギー束の低い宇宙線の寄与は無視できるとされてきた[1]。1980年代以降、原始大気は弱還元型と考えられるようになったが、その場合、火花放電などでのアミノ酸生成は難しくなる。そこで、銀河宇宙線(GCR)の効果を模し、加速器を用いた粒子線照射実験を行ったところ、 $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$  型の混合気体からでもアミノ酸が高収率で生成することがわかった[2]。さらに、若い太陽が高フラックスの太陽エネルギー粒子(SEP)を放出していた可能性が指摘されており[3]、その場合、原始大気中でのアミノ酸生成はさらに増大することになる。

【宇宙環境模擬実験】 炭素質コンドライト中にアミノ酸を含む多様な有機物が存在することから、宇宙環境でのアミノ酸生成が注目されている。その生成の場としては、分子雲の星間塵や、太陽系小天体内部が考えられている。分子雲中は 10 K 程度と極めて低温のため、ダストに  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{NH}_3$  などが凍結している。これに宇宙線や紫外線の作用でより複雑な分子の生成が期待される。 $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ (または  $\text{CH}_3\text{OH}$ ),  $\text{NH}_3$  からなる氷に加速器からの陽子線[4]または重粒子線[5]を照射することにより、アミノ酸の生成が確認された。一方、初期太陽系的小天体内部では  $\text{HCHO}$ ,  $\text{NH}_3$  を含む液体の水溶液が生じたと考えられ、模擬実験によるアミノ酸などの生成が報告されている[6]。一般に  $^{26}\text{Al}$  などの放射壊変に伴う熱がエネルギー源とされるが、放射線の影響も考えられる。なお、地球外からの有機物供給の議論は現在の隕石等の有機物組成をもとに議論されている。しかし、それらは生成から 40 億年以上経っており、その間の放射線などによる変成を考慮する必要がある。そのような研究が今後望まれる。

【アミノ酸の不斉創出実験】 隕石中のアミノ酸の一部に L-アミノ酸のエナンチオ過剰が見つかったこと[7]は、地球生命が L-アミノ酸を選択的に使う理由のひとつに上げられている。宇宙におけるアミノ酸のエナンチオ過剰の創出は、宇宙の円偏光紫外線やスピン偏極粒子などの物理的不斉による可能性が議論されている[8]。その検証のための量子ビーム照射実験を紹介する。

【参考文献】 [1] S. L. Miller, H. C. Urey, *Science*, **130**, 245 (1959). [2] K. Kobayashi et al., *Orig. Life Evol. Biosph.*, **28**, 155 (1998). [3] V. Airapetian et al., *Nat. Geosci.*, **9**, 452 (2016). [4] T. Kasamatsu et al., *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **70**, 1021 (1997). [5] K. Kobayashi et al., *Electr. Commun. Jpn.*, **91**, 293 (2008). [6] Y. Kebukawa et al., *Sci. Adv.*, **3**, e1602093 (2017). [7] J. R. Cronin, S. Pizzarello, *Science*, **275**, 951 (1997). [8] J. Takahashi, K. Kobayashi, *Symmetry*, **11**, 919 (2019).

Formation of Amino Acids and Their Enantiomeric Excesses by Quantum Beam Irradiation  
KOBAYASHI K.

## 3C08 分子レベルの情報に基づいたラジウムの環境挙動解明

(JAEA<sup>1</sup>、東大<sup>2</sup>、阪大<sup>3</sup>)○山口瑛子<sup>1,2</sup>、永田光知郎<sup>3</sup>、小林恵太<sup>1</sup>、田中万也<sup>1</sup>、小林徹<sup>1</sup>、谷田肇<sup>1</sup>、矢板毅<sup>1</sup>、吉村崇<sup>3</sup>、奥村雅彦<sup>1</sup>、高橋嘉夫<sup>2</sup>

**【緒言】**ラジウム (Ra) は放射性元素であり、最も半減期が長い核種は半減期 1600 年の <sup>226</sup>Ra である。<sup>226</sup>Ra はウラン系列に属するため、放射性廃棄物の処理やウラン鉱山周辺の環境汚染において主要な研究対象であり、さらに近年では、自然由来の Ra による飲料水中の基準値超過やシェールガス開発による環境汚染の懸念もあり、環境中 Ra の挙動解明は急務である。Ra の環境挙動については、分配係数の比較やオクロ天然原子炉周辺における鉛同位体比分析等から、粘土鉱物への吸着反応が重要であることが示唆されている。一般に粘土鉱物への吸着反応では、イオンが水和したまま吸着する外圏錯体と脱水して吸着する内圏錯体のどちらを形成するかにより環境挙動が大きく変わるため、Ra が外圏/内圏錯体のどちらを形成するかを明らかにする必要がある。しかし、Ra に安定同位体が存在しないことや  $\alpha$  壊変により希ガスのラドンを生成し内部被ばくの危険が高いことなどの取り扱いの困難さから、Ra への分光法の適用が難しく、分子レベルでの情報はほとんど得られていなかった。そこで本研究では、Ra の広域 X 線吸収微細構造 (EXAFS) を測定する環境整備を行い、世界初となる粘土鉱物吸着 Ra の構造解明を行った。そして、吸着反応が重要と考えられるウラン鉱床周辺の風化花崗岩 (粘土鉱物を含む) に着目した環境試料の分析も行い、分子レベルの情報に基づいて Ra の環境挙動を明らかにすることを目指した。

**【実験】**Ra の吸着媒として 2:1 型粘土鉱物である vermiculite 及び montmorillonite の二種類を用いた。EXAFS 測定は SPring-8 の RI 実験棟に位置する BL22XU で行った。さらに、vermiculite への Ra の分配係数を、異なるイオン強度や pH の条件下で調べ、EXAFS の結果と比較した。一方、環境試料には JAEA 人形峠センターにある旧ウラン鉱床周辺のコア試料を用い、 $\gamma$  線スペクトロメトリーにより U や Ra の濃度を求めた。Ra のホスト相を調べるため、鉱物組成分析や逐次抽出法による存在形態分析などを行った。

**【結果と考察】**Ra の EXAFS 測定の結果、Ra は montmorillonite に対して水和したまま吸着する外圏錯体を形成し、vermiculite に対して脱水して吸着する内圏錯体を形成することがわかった。両者の違いは層電荷の位置や量の違いによるものと考えられる。vermiculite への Ra の分配係数はイオン強度や pH への依存性が小さく、内圏錯体の形成が同様に示唆された。一方環境試料分析では、<sup>226</sup>Ra/<sup>238</sup>U 放射能比の結果から、Ra は風化花崗岩層上部に固定されることがわかった。ホスト相を調べるため逐次抽出法を行ったところ、Ra の 7 割程度が粘土鉱物に吸着していることが示唆された。この結果は、粘土鉱物を分離して <sup>226</sup>Ra/<sup>238</sup>U 放射能比を測定した結果や、バリウムをアナログとして分析した  $\mu$ -X-ray Fluorescence (XRF)-X-ray diffraction (XRD) 分析の結果と整合的だった。以上から、Ra は vermiculite や vermiculite の前駆体である風化黒雲母などの層状ケイ酸塩に内圏錯体を形成して吸着し固定されることが EXAFS により示唆され、この反応により環境中の Ra が風化花崗岩中で粘土鉱物に固定されることが明らかになった。Ra のホスト相としては、同族元素との共沈や(水)酸化鉄への吸着反応が注目されることが多いが、風化花崗岩層では粘土鉱物がより重要になることが示唆された。

Investigation of the environmental behavior of radium based on information at the molecular level  
YAMAGUCHI, A., NAGATA, K., KOBAYASHI, K., TANAKA, K., KOBAYASHI, T., TANIDA, H., YAITA, T., YOSHIMURA, T., OKUMURA M., TAKAHASHI, Y.

## 3C09

## 超伝導転移端検出器-マイクロ XRF-XAFS による Cs 濃集粒子中の Cs の分布・化学状態

(<sup>1</sup>電中研、<sup>2</sup>東大、<sup>3</sup>立大、<sup>4</sup>中部大、<sup>5</sup>JAEA、<sup>6</sup>阪大、<sup>7</sup>理研、  
<sup>8</sup>東京都立大、<sup>9</sup>岡山大、<sup>10</sup>JASRI、<sup>11</sup>京大、<sup>12</sup>金沢大)

三浦輝<sup>1</sup>、○高橋嘉夫<sup>2</sup>、山田真也<sup>3</sup>、一戸悠人<sup>3</sup>、佐藤寿紀<sup>3</sup>、早川亮大<sup>3</sup>、  
 岡田信二<sup>4</sup>、外山裕一<sup>4</sup>、橋本直<sup>5</sup>、野田博文<sup>6</sup>、磯部忠昭<sup>7</sup>、奥村拓馬<sup>8</sup>、  
 高取沙悠理<sup>9</sup>、平木貴宏<sup>10</sup>、竜野秀行<sup>8</sup>、関澤央輝<sup>10</sup>、新田清文<sup>10</sup>、宇留  
 賀朋哉<sup>10</sup>、栗原雄一<sup>11</sup>、山本政儀<sup>12</sup>

【背景】福島第一原発事故で原発から放出された放射性セシウム (Cs) を濃集した粒子 (CsMP) は、事故時の原子炉内の物理化学状態を反映する物質として、また環境中に沈着後の放射性 Cs のホストとなる物質として重要であり、多くの研究がなされている。特に放射能の大部分を担う放射性 Cs の CsMP 内部での化学状態や分布は、今後の CsMP 由来の放射性 Cs の環境挙動を探る上で重要である。CsMP は、それぞれ 2 号機および 1 号機由来の Type-A (大きさ数  $\mu\text{m}$  の球形粒子) と Type-B (50  $\mu\text{m}$  以上、様々な形状) に主に分けられる。このうち Type-B は、カルシウム (Ca) やチタン (Ti) などの難揮発性元素を多く含み、炉内で生じたケイ酸塩溶融体が冷却したものと考えられている。CsMP 中の Cs の分布や化学状態を知る上では、電子顕微鏡、 $\mu$ -XRF、蛍光 XAFS などの手法が有効である。しかし、半導体検出器 (SDD; エネルギー分解能: 130 eV 程度) などによるエネルギー分散型で特性 X 線・蛍光 X 線 (XRF) を検出する方法では、微量な Cs の L 線と主成分である Ca や Ti の K 線が干渉し、Cs を同定することが困難である。そこで本研究では、超伝導転移端センサー (TES) 検出器を用いた XAFS 法および  $\mu$ -XRF-XAFS 法により、Type-B 粒子中の Cs の化学状態や分布状態を調べた。

【実験】福島第一原発から北北西に約 4 km の地点の道路粉塵から分離した大きさ約 500  $\mu\text{m}$  の Type-B CsMP 粒子を分析に用いた (Miura et al., 2021)。 $\mu$ -XRF や蛍光 XAFS (主に XANES) の測定は、SPring-8 BL37XU で行った。

【結果と考察】 $\mu$ -X 線 CT 分析から、この粒子は内部に直径 100  $\mu\text{m}$  以上の空孔を複数持つことが分かった (Miura et al., 2021)。この空孔は、CsMP のメルトが冷却する過程で、メルトから気体が分離して形成されたと考えられる。次に TES を用いて XRF スペクトルを測定したところ、この粒子中の Cs の  $L_{\alpha}$  線を明瞭に検出できた。そこで、バルクの Cs  $L_{III}$  吸収端の蛍光 XANES スペクトルを取得し、参照試料と比較した結果、Cs は平均的にはケイ酸塩ガラスに溶解した状態で存在することが示唆された。次にこの粒子の薄片試料を作成し、 $\mu$ -XRF-XAFS 法による多元素の分布状態および局所化学状態を調べた。その結果、Cs は主に CsMP 内部の空孔の外周部に濃集していることが分かった。これは、メルトが高温の時に気体として存在していた Cs が、冷却と共に空隙円周部に沈着したためと考えられる。この濃集部の Cs  $L_{III}$  吸収端の TES- $\mu$ -XANES を参照試料と比較したところ、Cs はヨウ化セシウム (CsI) として存在すると推定された。これは炉内大気中の Cs の化学状態として、CsI が重要であることを示唆する。この円周部から離れたマトリクス中の TES- $\mu$ -XANES は、ガラス中の Cs と類似した特徴を示し、バルクの蛍光 XANES と整合的である。これらから、事故時の 1 号機中の Cs は、溶融したケイ酸塩中の Cs や気体の CsI として存在していたことが示唆される。また空孔表面に CsI があつた場合、粒子内部に水が浸透すると Cs が溶解する可能性があるため、二次的な移行を議論する上で重要になる可能性がある。

Application of transition edge sensor to micro-XRF-XAFS for the speciation of cesium in glassy material emitted by Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, H. Miura, Y. Takahashi, S. Yamada, Y. Ichinohe, T. Sato, R. Hayakawa, S. Okada, Y. Toyama, T. Hashimoto, H. Noda, T. Ishobe, T. Okumura, S. Takatori, T. Hiraki, H. Tatsuno, O. Sekizawa, K. Nitta, T. Uruga, Y. Kuribara, M. Yamamoto

## 3C10

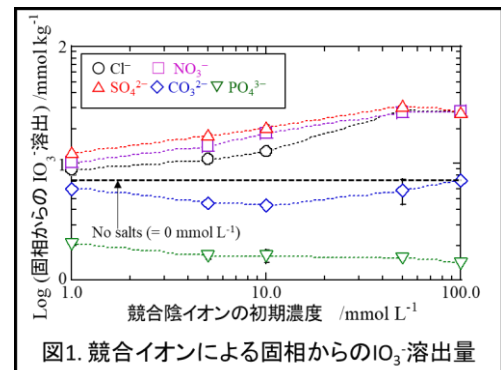
## リン酸イオン吸着処理によるバライト中のヨウ素酸、亜セレン酸、セレン酸の安定性の向上の効果

(JAEA<sup>1</sup>、東大院理<sup>2</sup>) ○徳永紘平<sup>1</sup>、田中万也<sup>1</sup>、高橋嘉夫<sup>2</sup>、香西直文<sup>1</sup>

【緒言】 核燃料の核分裂生成核種の中には半減期が極めて長いものが存在し、それらの適切な処理処分方法の開発は重要な課題である。特に福島第一原発での汚染水処理において問題となるセレン 79 (<sup>79</sup>Se) やヨウ素 129 (<sup>129</sup>I) は、核分裂生成核種の中でも半減期が特に長く、かつ水溶液中からの除去が困難な陰イオンとして存在する (ヨウ化物 (I<sup>-</sup>)、ヨウ素酸 (IO<sub>3</sub><sup>-</sup>)、亜セレン酸 (SeO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)、セレン酸 (SeO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)。これらの陰イオンのうち I<sup>-</sup>に対してはヨウ化銀 (AgI) の生成による処理が知られている一方、その他の陰イオン系核種に対する有効な処理処分法は未だ開発されていない。

【実験】 本研究では、これら長半減期の陰イオン系核種に対する新規の除去方法として、極めて安定な鉱物であるバライト (BaSO<sub>4</sub>) 中にこれらの陰イオンを水溶液中から効果的に取り除いた後に、鉱物の構造内で長期間安定に保持する技術の開発を行った。バライトは、塩化バリウムと硫酸ナトリウムの水溶液を混ぜるだけで生成し沈殿する。その時、水溶液中に含まれる元素がバライトの結晶中に取り込まれる (共沈反応)。本研究では、バライト中に取り込まれた IO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SeO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、SeO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の陰イオンに対する安定性の評価を行い、様々な競合イオンを含む溶液中での元素の溶出性を評価することで、長期間安定に元素を保持し続ける手法の開発を行った。

【結果・考察】 本研究の結果より、バライトへの IO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SeO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、SeO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の分配は競合イオンの存在下においても高い除去効率を示した一方、時間の経過に伴う固相からのイオンの溶出が問題として生じた。特に電荷の小さな IO<sub>3</sub><sup>-</sup>に対してその影響は顕著であり、純水条件においては約 20%、塩化物イオンや硝酸イオンの競合イオンをそれぞれ含む溶液中においては約 60 %と固相からの高い溶出率を示した。一方で、バ

図1. 競合イオンによる固相からのIO<sub>3</sub>溶出量

ライト共沈試料を希薄なリン酸イオン溶液に添加することで、純水のみでの溶出に比べて、IO<sub>3</sub><sup>-</sup>を含む陰イオンの溶出量が著しく減少する結果が得られた (図 1)。これはリン酸イオンがバライト全体を安定化させたことを示しており、他の鉱物では強い抽出剤として働くリン酸イオンが、バライトに対してはイオンの溶出を低減化させることを示唆する。これらの効果を系統的に明らかにするために、X線吸収端微細構造(XAFS)法による、バライト表面でのリン酸イオンの吸着メカニズムの解明を行った。その結果、リン酸イオンは時間の経過とともにバライト表面で異なる形態で存在し、短時間では表面吸着態、長時間ではバリウムのリン酸塩の表面沈殿の化学形態をとることが分かった。この時間経過によるバライト表層での二次的な沈殿相の形成により、固相からの元素の溶出が制限され、バライト全体が安定化されたことが示唆される。これらの効果は IO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SeO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、SeO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の陰イオンを含んだバライト共沈試料においても同様に確認されており、バライトへの共沈とリン酸イオン吸着の処理を合わせた I や Se の長寿命系陰イオン系核種の効果的な処理処分法を確立することができた。

Improved stability of IO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SeO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, and SeO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-coprecipitated barite after treated with phosphate ions  
Tokunaga, K., Tanaka, K., Takahashi, Y., Kozai, N.

---

基盤セッション その他（境界分野への放射化学の新展開など） | 基盤セッション J: その他

## 基盤セッション J: その他

座長:北澤 孝史(東邦大学)、高橋 嘉夫

2022年9月17日(土) 14:25 ~ 15:40 C会場 (207室)

Zoomはこちら

---

[3C11-13-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3C11] 分離化学研究と放射化学との関わり

\*平山 直紀<sup>1</sup> (1. 東邦大理)

14:25 ~ 14:50

[3C12] 錯体化学・材料化学と放射化学との複合領域研究

\*速水 真也<sup>1</sup> (1. 熊本大学)

14:50 ~ 15:15

[3C13] 温泉科学と放射化学との関わりについて

\*齊藤 敬<sup>1</sup> (1. 尚絅学院大学)

15:15 ~ 15:40



(2022年9月17日(土) 14:25 ~ 15:40 C会場)

## [3C11-13-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

Zoomはこちら

## 3C11

## 分離化学研究と放射化学との関わり

(東邦大理) ○平山直紀

演者は、分析化学分野の中で分離化学という研究領域を中心に活動を行っている。化学という大分野の中にはさまざまな分野があるが、分析化学は「はかるための方法論」を取り扱う分野であり、無機化学や有機化学のようなターゲットに基づく分類とは分類の考え方が異なっている。このような観点から放射化学という分野を見ると、「放射線を手段とする」側面と「放射性物質を対象にする」側面の両方を併せ持つユニークな分野と言うことができよう。

分析化学と放射化学との関わりを考えてみると、放射化学のうち「放射線を手段とする」側面では分析化学と直接重なり合う部分が多い。これに対し、「放射性物質を対象にする」側面については、そのための方法論の一つとして分析化学が協力していくことになる。分離化学はものを分ける研究領域なので、こちらに該当するものとなるであろう。(実際、放射線でものを分けるというのはやや考えにくい。) その一方で、分離化学には「使うために分ける」場合などのように「はかる」ことにあまり関係がない側面(分離工学)も存在しており、放射化学にとってはおそらくこちらの方が重要と思われる。

分離化学領域の中には、分離の手法ごとにさまざまな学協会が存在する。演者はその中でも日本溶媒抽出学会(Japan Association of Solvent Extraction, JASE)と日本イオン交換学会(Japan Society of Ion Exchange, JSIE)に活動の基盤を置いている。両学会とも分析化学・分離工学の双方の研究者・技術者が一緒に活動している組織である。本講演では分離化学研究における放射化学の位置づけについて、おもに両学会の活動という視点から紹介する。

Relationship between Separation Chemistry Study and Radiochemistry  
HIRAYAMA, N.

## 3C12 放射化学と錯体化学・材料化学との融合研究

(熊本大院先端)○速水真也

**【緒言】** 合成と状態解析を基軸とした多機能性分子の開発およびその物性と電子状態の研究において、その動的電子状態を有する金属錯体のメスバウアー分光法による電子状態解析の研究は非常に有益な情報を得ることができる。また放射光を用いた各種外場下における *in situ* メスバウアー分光測定や準安定状態の状態解析など新しい状態解析法も注目されており、数多くの研究成果が報告されるようになった。一方で、材料化学の分野では、金属酸化物や金属ナノ粒子などにおいても、放射化学を用いたそれらの状態解析は重要な情報を与えてくれる。本発表では、放射化学を用いた錯体化学、材料化学の融合研究について最近の研究成果を報告する。

### 【結果と考察】

多核鉄錯体は、その多電子酸化還元による触媒作用があり酸素還元反応、水素発生反応、水の酸化反応など今後のエネルギー問題などの観点からも非常に重要である。図1に示す鉄5核錯体は鉄(II)5核から鉄(III)5核まで6つの電子状態を有する。この錯体に水が作用することで酸素が発生することが分かったが、メスバウアースペクトルの電子状態解析により、それらの電子状態の観測に成功し、そのメカニズムについて明らかにすることができた。

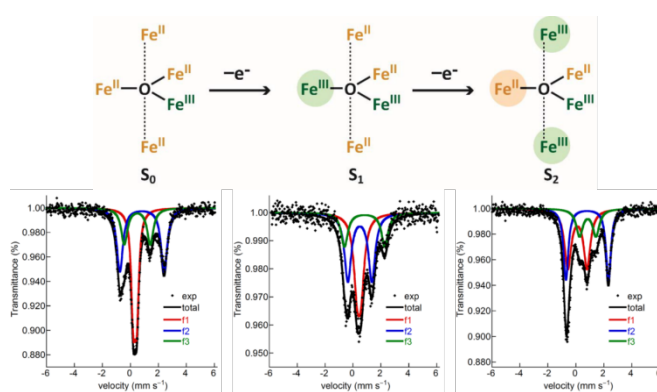


図1 鉄5核錯体の電子状態とメスバウアースペクトル。

一方で、酸化グラフェン(GO)ナノシートは、エポキシ基(C-O-C)、ヒドロキシ基(-OH)、カルボキシ基(-COOH)などの酸素官能基が多数含まれており、GOナノシートのCs<sup>+</sup>吸着特性についても研究を行った。2011年3月11日の福島第一原子力発電所事故以来、原子力発電所周辺や原子力事故後の汚染水から放射性セシウム(137Cs)を効率的に除去することが新たな課題となっている。ここでは、ゼオライト(ZL)、プルシアンブルー(PB)、酸化グラフェン(GO)の3種類の吸着剤を用いて、脱イオン水と模擬海水中の137Csと133Csの吸着性能を実証し比較検討した。原子力発電所の事故によって発生した137Csで汚染された飛灰の浄化ルートの実用的な検討、結果としてPBは大規模な実施のための吸着材として可能性があることが分かった。

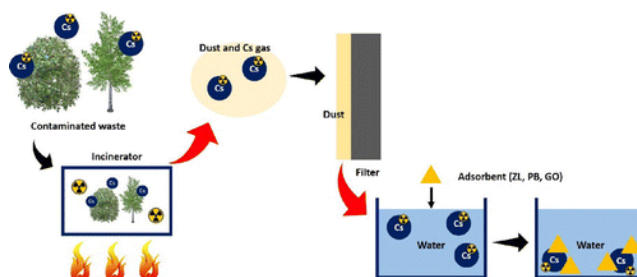


図2 137CsのZL、PBおよびGOにおける吸着実験。

Integrated research between radiochemistry and coordination/material chemistry  
HAYAMI S.

## 3C13

## 温泉科学と放射化学との関わりについて

(尚絅学院大)○齊藤敬

温泉にはラジウム温泉やラドン温泉などが存在し、放射化学とは深く関わってきている。また秋田県の玉川温泉と台湾の北投温泉で温泉水から生成する含鉛重晶石である北投石( $\text{Ba(Pb)SO}_4$ )は、日本の放射能研究の先駆けとして古くから研究が行われてきた<sup>1)</sup>。日本の放射化学に深く関わる研究者にも温泉の研究を行っていた方が多く、温泉科学会にも大きく貢献をしてきた<sup>2,3)</sup>。

近年の放射線測定器の発展や進化に伴い、放射能測定は以前に比較してかなり容易になってきているにもかかわらず、温泉科学の業界の中では放射能の研究を行うことは近年なかなか行われていない。これは、温泉に関わる放射性核種がラドンとラジウムと限られていること、ラジウムに関しては大量の水からラジウムを分離測定する手間が必要であること、放射能測定の技術に加えフィールドワークが必要になるため、なかなか研究の担い手がいないことなどが考えられる。

また、現在は温泉の科学的な研究自体も下火になってきており、会員の減少と高齢化も問題になってきている。

しかし、かつては測定が難しく研究が進んでこなかったトリウム系列の $^{228}\text{Ra}$  (半減期: 5.75 年) などは、ガンマ線スペクトロメトリにて容易に求められるようになってきており、 $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$  の放射能比を求めることで、地球化学的にも興味深い結果が得られており<sup>4)</sup>、まだまだ研究を進めていくべき分野でもある。

本発表では、これまでの温泉科学と放射化学の関わりと今後についてさらに詳しく述べていきたい。

## 【参考文献】

- 1) 菅沼市蔵, 天然記念物秋田北投石ノ成分成因ニ就テ, 東京物理学校雑誌, 469, 58-93 (1930).
- 2) 斎藤信房, 放射性温泉沈殿物について, 温泉科学, 27, 58-93 (1976).
- 3) 堀内, 石井, 村上, 伊豆半島温泉群のラドン, トロン, ラジウムの同時定量について, 温泉科学, 84-89 (1979).
- 4) 富田純平, 塩化物泉中のラジウム同位体, 温泉科学, 64, 252-266 (2014).

Relationship between hot spring science and radiochemistry  
SAITO, T.

---

基盤セッション その他（境界分野への放射化学の新展開など） | 基盤セッションJ: その他

## 基盤セッションJ: その他

座長:北澤 孝史(東邦大学)、高橋 嘉夫

2022年9月17日(土) 15:50 ~ 16:20 C会場 (207室)

Zoomはこちら

---

[3C14-15-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

[3C14] ポジトロニウム寿命測定法を用いた MOFsの空孔評価に関する研究

\*上田 大生<sup>1,2</sup> (1. 東京学芸大学、2. 東邦大学)

15:50 ~ 16:05

[3C15] INIS/IAEAデータベースに抄録された自分の放射化学的文献についての考察

\*北澤 孝史<sup>1</sup> (1. 東邦大学理学部)

16:05 ~ 16:20

(2022年9月17日(土) 15:50 ~ 16:20 C会場)

## [3C14-15-Zoom] セッションのオンライン参加 (Zoom)

Zoomはこちら

## 3C14

## ポジトロニウム寿命測定法を用いた MOFs の空孔評価に関する研究

(東邦大理<sup>1</sup>、東京学芸大<sup>2</sup>)○上田大生<sup>12</sup>、北澤孝史<sup>1</sup>、佐藤公法<sup>2</sup>

【緒言】 Metal Organic Frameworks (MOFs)は金属イオンと有機配位子から成るポリマー型錯体の総称であり、その多くは多孔質材料として知られている。多孔質材料として重要な点は構造内の空孔が統一な大きさで、単位質量あたりにより多く存在しているということである。このような場面においては、極所構造を評価することのできるポジトロニウム(Ps)寿命測定法を用いることが有用である。

本研究では構造が既知である3次元(3D)骨格を持つMOFsを合成し、同定した。合成したMOFsは構造中にオンゲストロームスケールの空孔を有しており、Ps寿命測定法によりその空孔サイズを評価できることを示した。また、接触法によって合成した試料の方で空孔量が増加していることがわかり、Ps生成量と空孔量が相関していることを確かめた。

【実験】 CPL-MOFsはCu<sup>2+</sup>と2,3-Pyrazinedicarboxylicacetateから成る2次元シート構造を柱状の配位子(pillar ligand)で繋いだ3次元構造である。pillar ligandにPyrazineを用いたものをCPL-1、4,4'-Bipyridineを用いたものをCPL-2、1,2-Di(4-pyridyl)ethyleneを用いたものをCPL-5と言う。この三種類を直接法、接触法でそれぞれ合成した。3D Hofmann型MOFsは八面体6配位中心と平面4配位中心の2つの金属サイトを持つMOFsであり、一般式[M(pillar ligand)[M'(CN)<sub>4</sub>]·xH<sub>2</sub>O]<sub>n</sub>で表される。本研究では、M- M'(pillar ligand) = Ni-Ni (pz), Ni-Pd (pz), Ni-Pt (pz), Fe-Ni (pz) (pz = Pyrazine)の4種類について直接法および接触法でそれぞれ合成し、Cd-Ni (pz)は接触法でのみ合成した。

陽電子線源としてβ<sup>+</sup>壊変するRIの<sup>22</sup>Naを用いた。測定はFig. 1に示す装置で行った。<sup>22</sup>Naはβ<sup>+</sup>壊変後<sup>22</sup>Ne\*から速やかに脱励起し、その際1.28 MeVのγ線を放出する。このγ線を陽電子が物質に入射したスタート信号として検出し、物質中の消滅サイトの電子と消滅したときに放出される511 keVの消滅γ線をストップ信号とした。デジタルオシロスコープを用いたデジタル計測システムにより、スタート信号とストップ信号の時間差から陽電子平均寿命を求めた。

【結果と考察】 合成した全ての化合物において、直接法より接触法で合成した試料のo-Ps生成量は増加していることを確かめた。また、CPL-2をサンプルにN<sub>2</sub>ガス吸着測定により、直接法によって合成した試料と接触法によって合成した試料の空孔量の差を調べたところ、接触法によって合成した試料の方が空孔量が多い事がわかった。これにより、接触法によって合成した試料の方で空孔量が増加していることがわかり、Ps生成量と空孔量が相関していることを確かめた。

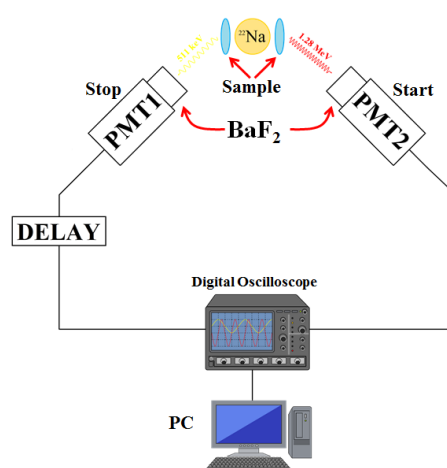


Fig. 1 ポジトロニウム寿命測定装置

Study on the evaluation of open spaces in MOFs using positronium lifetime spectroscopy  
UEDA, D., KITAZAWA, T., and SATO, K.

## 3C15

## INIS/IAEA データベースに抄録された自分の放射化学的文献についての考察

(東邦大理)○北澤 孝史

INIS/IAEA データベースに抄録されている自分の放射化学的文献について考察する。とくに化学工業の 2006 に出版された日本語で書かれた 北澤 孝史 (2006) : 次世代アクチノイド錯体化学, 化学工業, 57, 255-260 について抄録におけるデータベースとしての意義を考える。この文献の INIS の抄録の要旨は、CAS の抄録の要旨より情報量が豊富であり 2 次情報は抄録者と大きく関連していることがわかる。

CAS の抄録は以下はかなり情報量が少ないものである。

Future in actinoids coordination chemistry

By: Kitazawa, Takafumi

Kagaku Kogyo (2006), 57(4), 255-260 CODEN: KAKOAY; ISSN: 0451-2014

A review is presented on the coordination chem. of the actinides. Uranyl and neptunium complexes are emphasized.

一方、RN:37082465 の INIS の抄録は以下にあるように S. Ohno 氏が行っており、情報量が CAS より格段に多い、これは S. Ohno 氏がこの分野に造詣が深いためと考えられる。なお、この抄録は January 1987 - June 2014 まで運用されていた米国エネルギー省の ETDEWEB World Energy Base にも使われている。

Actinoids coordination chemistry is concerned with spent nuclear fuel reprocessing, specifically with solid-state chemistry of nuclear fuels, separation process with radioactive substances, and geological disposal of high-level radioactive substances. In the 21st century, accumulation of minor actinides, Np, Am, Cm, and others will be realized according with the present program of nuclear energy development. The present article briefly introduces general properties of actinide elements, followed by their coordination chemistry compared with rare earths coordination chemistry. Special facility needed to treat actinoids as well as their chemistry is briefly explained, together with the specific experimental apparatus such as X-ray Absorption Fine Structure (XAFS) and time-resolved laser-induced fluorescence spectrometry (TRLFS) with synchrotron radiation facilities. The effect of coordination with actinoids in the environment chemistry is important in underground disposal of high-level radioactive wastes. For theoretical analysis of the results with actinoids chemistry, relativistic calculation is needed. (S. Ohno)

また、RN:38049088 と RN:38057435 として 2006 年で水戸と東海で行われた放射化学討論会の要旨が抄録されていることは注目に値する。討論会事務局に著者らが提出した簡単な英文要旨が INIS/IAEA データベースの英文要旨に使用されている。さらに RN:52059581 として京都大学複合原子力科学研究所で行われた令和元年度「短寿命 RI を用いた核分光と核物性研究 VI」兼「第 11 回停止・低速 RI ビームを用いた核分光研究会専門研究会」の報告書 KURNS-EKR--8 が抄録されている。他の抄録されている文献についても講演にて解説する。

Our radiochemical research papers containing INIS/IAEA  
KITAZAWA T.