

2023年9月23日(土)

## A会場

特別講演

PL3

座長:小林 義男(電気通信大学大学院情報理工学研究所)

09:00 ~ 09:50 A会場 (サタケメモリアルホール)

[3S01] 佐野博敏先生を偲ぶ

\*片田 元己<sup>1</sup> (1. 東京都立大学)

09:00 ~ 09:50

## B会場

セッションB 原子核プローブ

3B1

座長:佐藤 涉(金沢大学)

10:00 ~ 11:00 B会場 (学生会館)

[3B01] Ta/Nb原子ドーピングによるヘマタイトのモーリン  
転移温度の除去\*Habibur Rahman<sup>1</sup>、中島 覚<sup>1,2</sup> (1. 広島大学、2. 2) 自然科学基礎研究開発センター)

10:00 ~ 10:20

[3B02] シアノ架橋高分子錯体中の金属サイト周辺の局所構造  
分析プローブとしてのメスバウアー分光法\*北清 航輔<sup>1</sup>、北澤 孝史<sup>1</sup>、小林 康浩<sup>2</sup>、北尾 真司<sup>2</sup>、瀬戸 誠<sup>2</sup> (1. 東邦大学、2. 京都大学)

10:20 ~ 10:40

[3B03] <sup>61</sup>Niメスバウアー分光法によるホフマン型配位高分子  
錯体化合物の研究\*北澤 孝史<sup>1</sup>、北清 航輔<sup>1</sup>、小林 康浩<sup>2</sup>、北尾 真司<sup>2</sup>、窪田 卓見<sup>2</sup>、瀬戸 誠<sup>2</sup> (1. 東邦大学、2. 京都大学)

10:40 ~ 11:00

セッションB 原子核プローブ

3B2

座長:北澤 孝史(東邦大学)

11:10 ~ 12:10 B会場 (学生会館)

[3B04] 水熱合成法によるオキシ水酸化鉄ナノ粒子の合成と  
光触媒反応バスキ トリヨノ<sup>2</sup>、ラフマン ハビブル<sup>1</sup>、ウィジャヤント  
ヘリ<sup>3</sup>、\*中島 覚<sup>1</sup> (1. 広島大学、2. インドネシア国家研究  
イノベーション庁、3. スラバヤ州立大学)

11:10 ~ 11:30

[3B05] Cd<sub>x</sub>Fe<sub>3-x</sub>O<sub>4</sub>の磁性の時間変動と温度履歴\*佐藤 涉<sup>1</sup>、伊東 泰佑<sup>1</sup>、平原 響<sup>1</sup> (1. 金沢大学)

11:30 ~ 11:50

[3B06] 負ミュオン寿命法による鉄中微量炭素の非破壊深度

分布分析法の日本刀への適用

\*久保 謙哉<sup>1</sup>、二宮 和彦<sup>2</sup>、稲垣 誠<sup>3</sup>、吉田 剛<sup>4</sup>、竹下 聡史<sup>4</sup>、  
河村 成肇<sup>4</sup>、ストラッサー パトリック<sup>4</sup>、三宅 康博<sup>4</sup>、伊  
藤 孝<sup>5</sup>、髭本 亘<sup>5</sup>、齋藤 努<sup>6</sup> (1. ICU、2. 阪大、3. 京大、4.  
高エネ研、5. 原研、6. 歴博)

11:50 ~ 12:10

## A会場

セッションC 環境放射能

3C1

座長:栗原 雄一(長岡技術科学大学)

14:50 ~ 16:10 A会場 (サタケメモリアルホール)

[3A10] アクチノイドの土壌間分配係数: 日本の土壌における  
<sup>237</sup>Np と <sup>239</sup>Pu の異なる環境移動性\*鄭 建<sup>1</sup>、田上 恵子<sup>1</sup>、内田 滋夫<sup>1</sup> (1. 国立研究開発法人  
子科学技術研究開発機構)

14:50 ~ 15:10

[3A11] 粘土鉱物における Eu吸着についての顕微的手法によ  
る直接解析\*向井 広樹<sup>1</sup>、Mei Huiyang<sup>2</sup>、青柳 登<sup>2</sup>、高橋 嘉夫<sup>1</sup> (1.  
東京大学大学院、2. 原子力機構)

15:10 ~ 15:30

[3A12] 千葉市で採取した大気浮遊じん中 Cs-137の高感度分  
析による実効半減期評価及び季節変動解析\*杉山 翠<sup>1</sup>、岡山 杏菜<sup>1</sup>、飯田 素代<sup>1</sup>、宮田 賢<sup>1</sup>、田中 博幸<sup>1</sup>、  
新田 済<sup>1</sup>、磯貝 啓介<sup>1</sup> (1. 公益財団法人 日本分析セン  
ター)

15:30 ~ 15:50

[2A07] 福島県富岡川のアユに含まれる Cs-137濃度について

\*森田 貴己<sup>1</sup>、和田 敏裕<sup>2</sup>、高田 兵衛<sup>2</sup>、金指 努<sup>2</sup>、難波 謙二<sup>2</sup>  
(1. 水産研究・教育機構 水産資源研究所、2. 福島大  
学)

15:50 ~ 16:10

セッションE 原子力・アクチノイド化学及び関連分野

3E1

座長:金子 政志(大阪大学)

11:10 ~ 12:10 A会場 (サタケメモリアルホール)

[3A04] ジグリコールアミド酸型配位子保持リポソーム系に  
おける Eu吸着挙動と化学量論の解明\*清水 壮太<sup>1</sup>、山崎 信哉<sup>2</sup>、坂口 綾<sup>2</sup>、高久 雄一<sup>2</sup>、末木 啓介<sup>2</sup>  
(1. 筑波大学大学院 理工情報生命学術院 数理工学科学研  
究群、2. 筑波大学 数理工学系)

11:10 ~ 11:30

[3A05] マイナーアクチノイド抽出配位子の迅速設計に向けた  
電子状態データベースの構築

\*住吉 剛<sup>1</sup>、黒木 菜保子<sup>1,2</sup>、森 寛敏<sup>1</sup> (1. 中央大学、2. JST ACT-X)

11:30 ~ 11:50

[3A06] <sup>228</sup>Acを用いた Ac溶媒抽出の検討～ pH条件下での抽出挙動～

\*白崎 謙次<sup>1</sup>、宮脇 琢斗<sup>1</sup>、中瀬 正彦<sup>2</sup> (1. 東北大学、2. 東京工業大学)

11:50 ~ 12:10

セッションE 原子力・アクチノイド化学及び関連分野

### 3E2

座長:鈴木 達也(長岡技術科学大学)

13:40 ~ 14:40 A会場 (サタケメモリアルホール)

[3A07] ジオポリマーに封じ込められた Srと Csの固定化メカニズム

\*木下 哲一<sup>1</sup>、中島 均<sup>1</sup>、鳥居 和敬<sup>1</sup>、佐々木 勇気<sup>1</sup>、半沢 守<sup>1</sup> (1. 清水建設(株))

13:40 ~ 14:00

[3A08] EDTA滴定によるウラン溶液の高精度値付け法の開発

\*三浦 勉<sup>1</sup>、高宮 幸一<sup>2</sup>、福谷 哲<sup>2</sup> (1. 国立研究開発法人産業技術総合研究所、2. 京都大学複合原子力科学研究所)

14:00 ~ 14:20

[3A09] 陽イオン交換クロマトグラフィー法を用いたリチウム同位体交換機構に関する平衡論的研究

\*立花 優<sup>1</sup>、Kalak Tomasz<sup>2</sup>、田中 将裕<sup>3</sup> (1. 長岡技術科学大学、2. Poznan University of Economics and Business、3. 核融合科学研究所)

14:20 ~ 14:40

## B会場

セッションG 教育関連

### 3G1

座長:大浦 泰嗣(東京都立大学)、横山 明彦(金沢大学)

13:40 ~ 14:40 B会場 (学生会館)

[3B07] 広島大学における平和科目としての放射線教育

\*高橋 徹<sup>1</sup> (1. 広島大学先進理工系科学研究科)

13:40 ~ 14:00

[3B08] STEAM教育手法を活用し、エネルギー・環境問題を基盤とした原子力人材育成の現状と課題

\*大矢 恭久<sup>1</sup>、栢野 彰秀<sup>2</sup>、濱田 栄作<sup>3</sup>、熊野 善介<sup>1</sup> (1. 静岡大学、2. 鳥根大学、3. 琉球大学)

14:00 ~ 14:20

[3B09] 国際化学オリンピックでの放射化学関連テーマの話題

\*薬袋 佳孝<sup>1</sup> (1. 武蔵大学)

14:20 ~ 14:40

セッションG 教育関連

### 3G2

座長:末木 啓介(筑波大学)、篠原 厚(大阪青山大学)

14:50 ~ 15:55 B会場 (学生会館)

[3B10] 日本大学文理学部化学科学生実験での放射化学教育

\*小林 貴之<sup>1</sup>、山形 武靖<sup>2,1</sup> (1. 日本大学、2. 東京大学MALT)

14:50 ~ 15:10

[3B11] 臨床検査技師国家試験問題を用いた放射化学教育

\*北澤 孝史<sup>1</sup> (1. 東邦大学)

15:10 ~ 15:30

[3B12] 広島大学「放射線災害復興を推進するフェニックスリーダー育成プログラム」について

\*林田 耕臣<sup>1</sup> (1. 広島大学)

15:30 ~ 15:55

## A会場

セッションH その他 (境界分野への放射化学の新展開など)

### 3H1

座長:秋山 和彦(東京都立大学)

10:00 ~ 11:00 A会場 (サタケメモリアルホール)

[3A01] CdTe検出器を用いた負ミュオンによる考古学試料の3D元素イメージングの開発

\*邱 奕寰<sup>1</sup>、大澤 崇人<sup>1</sup>、武田 伸一郎<sup>3</sup>、桂川 美穂<sup>3</sup>、高橋 忠幸<sup>3</sup>、渡辺 伸<sup>4</sup>、水本 和美<sup>5</sup>、齋藤 努<sup>6</sup>、久保 謙哉<sup>7</sup>、梅垣 いづみ<sup>8</sup>、下村 浩一郎<sup>8</sup>、二宮 和彦<sup>2</sup> (1. 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、2. 大阪大学、3. 東京大学、4. 宇宙航空研究開発機構、5. 東京芸術大学、6. 国立歴史民俗博物館、7. 国際基督教大学、8. 高エネルギー加速器研究機構)

10:00 ~ 10:20

[3A02] 3D-CAD/CG及びメッシングを用いた放射線輸送計算空間への複雑なトポロジーの体系設計

\*阪間 稔<sup>1</sup>、佐瀬 卓也<sup>2</sup>、矢野 隼輝<sup>1</sup>、横田 健斗<sup>3</sup> (1. 徳島大学、2. 核融合科学研究所、3. 国立がん研究センター東病院)

10:20 ~ 10:40

[3A03] 鉄鉱物の化学状態の変化に伴う環境中でのヒ素及びウランの移行・濃集挙動の解明

\*徳永 紘平<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)

10:40 ~ 11:00

部会

原子核プローブ部会総会

12:40 ~ 13:40 A会場 (サタケメモリアルホール)

---

**B会場**

---

部会

教育部会総会

12:40 ~ 13:40 B会場 (学生会館)

---

**A会場**

---

閉会式・若手表彰式

閉会式

16:10 ~ 16:30 A会場 (サタケメモリアルホール)

---

---

特別講演

## PL3

座長:小林 義男(電気通信大学大学院情報理工学研究科)

2023年9月23日(土) 09:00 ~ 09:50 A会場 (サタケメモリアルホール)

---

### [3S01] 佐野博敏先生を偲ぶ

\*片田 元己<sup>1</sup> (1. 東京都立大学)

09:00 ~ 09:50

## 3S01

## 佐野博敏先生を偲ぶ

(都立大理)片田元己

【はじめに】佐野博敏東京都立大学名誉教授は2022年6月30日急逝されました。謹んでご冥福をお祈りいたします。先生は1950年12月に東京・学士会館で開催された第1回放射化学討論会で発表(トロンの放射性沈殿物の捕集について(単名))され、討論会の立ち上げにも関わられている。1988年に昭和62年度「日本化学会賞」、2001年に第一回「日本放射化学会木村賞」(核壊変に伴う化学的後遺効果(ホットアトム効果)の発光メスバウアー分光学的研究)を受賞。

本講演では、研究業績とともに先生の「人となり」について紹介し、先生を偲びたい。

【経歴】先生は、1928年3月に下関市に生まれ、1956年3月東京大学大学院(旧制)満期退学後、東京大学助手、お茶の水女子大学助教授を経て、1972年4月に東京都立大学教授として着任。1987年4月に教養部長、1989年4月に総長に就任され、1993年3月に総長を退職されるまで、東京都立大学の教育・研究の推進に尽くされると共に大学の管理・運営に尽力されました。

その後、1995年4月から大妻女子大学教授として2000年3月まで務められ、2000年4月に大妻女子大学学長・大妻女子短期大学部学長に選任され、2008年3月退任。2009年1月に名誉学長の称号が授与されました。

その他、文部省学術審議会専門委員、多数の大学・大学院の非常勤講師、国立機関での評議員、大学セミナーハウスの理事長・館長、IUPAC分析部門委員、メスバウアー効果の応用国際会議常任委員などを数多くの要職を歴任。

## 【研究業績】

研究領域は、無機・物理化学、放射化学、錯体化学、有機金属化学にわたっており、わが国ではもちろん、世界的にもメスバウアー分光法を化学研究に応用した先駆者として知られている。特にスズ化合物の分子内・分子間結合性の系統的解明に重点がおかれ、(1)原子核壊変に伴う化学的後遺効果の研究、(2)固相内での分子間相互作用と分子運動の研究、(3)分子内化学状態の変動の研究で顕著な功績が挙げられる。

【人となり】先生は学科内の野球の試合で、打たれたあと3塁に向かって走られたとの話が研究室で伝わっているぐらい運動はされていなかったが、スキーはお得意で居室にスキー板が置かれていた。

一方、手先は器用で、日曜大工、俳画、挿絵などはお上手でした。俳句も「鉄錫子」(メスバウアー元素である鉄やスズに因む)としてたしなまれていた。(あさかぜに震えて咲けり梅一輪、いただいた年賀状より)

大妻女子大学を退かれ後は、自然や趣味等に親しみ、ホームページで作品や回想・提言など随時ご披露したいとされていましたが、2004年に大妻女子短期大学家政科で話された「極限状態-私の原爆体験」が女子学生に伝わり、素直に感動されたことから、以後弟子にも話されたことのなかった「広島での原爆体験」を講演会などで話される機会が多くなった。さらに、原爆被爆者の会である地元三鷹市の「三友会」や東京都の「東友会」でも役員としても活躍されていました。

Remembering Professor Hirotoshi Sano  
KATADA, M.

---

セッションB 原子核プローブ

## 3B1

座長:佐藤 渉(金沢大学)

2023年9月23日(土) 10:00 ~ 11:00 B会場 (学士会館)

---

### [3B01] Ta/Nb原子ドーピングによるヘマタイトのモーリン転移温度の除去

\*Habibur Rahman<sup>1</sup>、中島 覚<sup>1,2</sup> (1. 広島大学、2. 2) 自然科学基礎研究開発センター)

10:00 ~ 10:20

### [3B02] シアノ架橋高分子錯体中の金属サイト周辺の局所構造分析プローブとしてのメスバウアー分光法

\*北清 航輔<sup>1</sup>、北澤 孝史<sup>1</sup>、小林 康浩<sup>2</sup>、北尾 真司<sup>2</sup>、瀬戸 誠<sup>2</sup> (1. 東邦大学、2. 京都大学)

10:20 ~ 10:40

### [3B03] <sup>61</sup>Niメスバウアー分光法によるホフマン型配位高分子錯体化合物の研究

\*北澤 孝史<sup>1</sup>、北清 航輔<sup>1</sup>、小林 康浩<sup>2</sup>、北尾 真司<sup>2</sup>、窪田 卓見<sup>2</sup>、瀬戸 誠<sup>2</sup> (1. 東邦大学、2. 京都大学)

10:40 ~ 11:00

## 3B01 Ta/Nb 原子ドーピングによるヘマタイトのモーリン転移温度の除去

(広島大院先進理工<sup>1</sup>、広島大 N-BARD<sup>2</sup>)○Habibur Rahman<sup>1</sup>、中島 覚<sup>2</sup>

Among all type of iron oxides, hematite is most common, and has distinct characteristic and huge potential application. Hematite goes on three types of magnetism (weak ferromagnetic, super paramagnetic and antiferromagnetic) depending on particle size, temperature, and structure. One of the distinct properties of hematite is Morin transition temperature ( $T_M$ ) at 260 K, where weak ferromagnetic hematite at room temperature changes to antiferromagnetic structure below 260 K. Modification of hematite structure with other metal doping such as  $Al^{3+}$ ,  $Co^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Sn^{4+}$ , and particle size control are known to change  $T_M$ . Below 20 nm size hematite shows superparamagnetic character and  $T_M$  is vanished. In the present study, we synthesized bulk hematite with zero  $T_M$  by modifying it with 5+ charged cation from group 5 elements ( $Nb^{5+}$  and  $Ta^{5+}$ ) using sol-gel method followed by calcination at various temperature from 350 to 700 °C.

Various amounts of dopant from 2 to 7.1 atomic percent were used for PXRD and TEM EDS measurement was used to characterize morphology, composition, and particle size of the sample. Furthermore, Mössbauer spectroscopy was used to analyze magnetic properties and  $T_M$  of the sample.

PXRD and TEM EDS results showed the formation mechanism of doped hematite, where at low calcination temperature all Ta/Nb were included in  $\gamma$ - $Fe_2O_3$  structure, and when  $\gamma$ - $Fe_2O_3$  is transformed to  $\alpha$ - $Fe_2O_3$  phase, Ta/Nb were excluded to the surface to form  $FeTaO_4$  and  $FeNbO_4$ . The key difference in this mechanism is that Nb has stronger effect than Ta in suppressing  $\gamma$  to  $\alpha$  transformation. 9.1Nb700 sample showed incomplete Morin Transition [1]. Fig. 1 shows the Mössbauer spectra of 2Ta700. One sextet is observed at 298 K, and its  $\Delta E_Q$  is -0.21 mm/s, showing a weak ferromagnetic hematite. On the other hand, there are two sextets at 78 K. One has  $\Delta E_Q$  value of +0.35 mm/s, showing antiferromagnetic hematite. The other has  $\Delta E_Q$  value of -0.13 mm/s, showing weak ferromagnetic hematite. This is the incomplete Morin transition. 3.8Ta700 sample did not show Morin transition. Mössbauer measurement also showed the decrease in internal magnetic field ( $B_{hf}$ ) indicating the presence of Ta/Nb doping in the hematite structure.

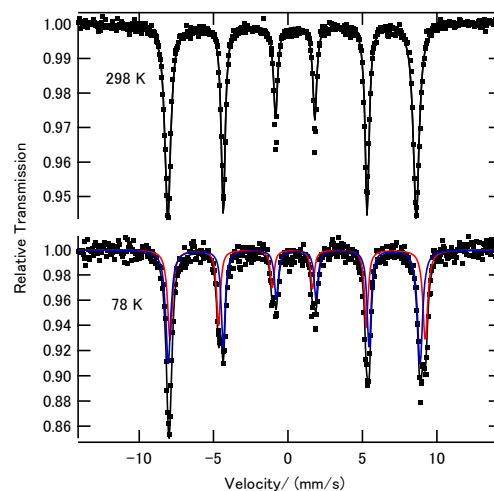


Fig. 1 Mössbauer spectra of 2Ta700.

### References

[1] H.Rahman, S.Nakashima, *Applied Physics A*, 128 (2022) 564.

Elimination of Morin Transition temperature of Hematite by Ta/Nb atom doping  
RAHMAN H., NAKSHIMA S.

## 3B02

## シアノ架橋高分子錯体中の金属サイト周辺の局所構造分析プローブとしてのメスバウアー分光法

(東邦大理<sup>1</sup>、京都大学複合原子力研究所<sup>2</sup>)○北清航輔<sup>1</sup>、小林 康浩<sup>2</sup>、窪田 卓見<sup>2</sup>、北尾 真司<sup>2</sup>、瀬戸 誠<sup>2</sup>、北澤孝史<sup>1</sup>

**【緒言】** Hofmann 型構造とは、中心金属を金属シアニド錯体で架橋した 2D シート構造とそれと垂直に配位した別の配位子からなる Fig.1 のような構造を持つシアノ架橋配位高分子の一種である。

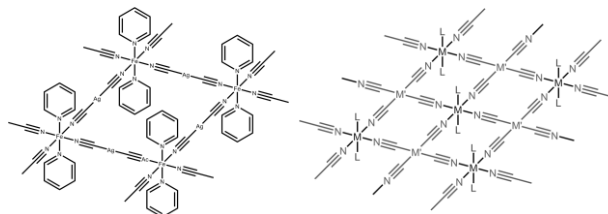


Fig. 1. Hofmann 型構造

(左:[M(CN)<sub>2</sub>]架橋、左:[M(CN)<sub>4</sub>]架橋)

また、スピנקロスオーバー(SCO)現象とは、温度や圧力・光などの要因によって中心金属の電子配置が可逆的に変化する現象のことを指す。SCO 現象によって中心金属の未対電子の数が変化し磁化率が変化し、特に八面体鉄(II)化合物のような d<sup>6</sup> 金属イオンでは常磁性と反磁性という明確な磁気挙動の変化があるため盛んに研究が行われている。

[1, 2]<sup>57</sup>Fe Mössbauer 分光法はそのスペクトルの異性体シフト・四極子分裂の幅・分裂数が鉄の価数、スピン状態、鉄周辺の環境に依存するため、SCO 現象による中心鉄の環境変化を分析することが可能であるためこれを用いた Fe 系 SCO 錯体の研究が多数の研究室で行われている。その他にも、Hofmann 型錯体の架橋配位子である金属シアニドの中心金属には Ni、Pt、Au という Mössbauer 活性な元素が含まれている。そこで、Ni を含む錯体については Ni 原子に着目した <sup>61</sup>Ni Mössbauer 分光法による測定も行った。

**【実験】** 錯体は直接法により合成した。まず、Fe(II)源である Mohr 塩を容器中で水に溶解し、そこに配位子と金属シアニドの水溶液を滴下し、生じた沈澱を濾過した。生成物については、元素分析により目的の組成であることを確認した。得られた錯体について、磁化率測定・結晶構造解析及び <sup>57</sup>Fe および金属シアニドに K<sub>2</sub>[Ni(CN)<sub>4</sub>]を用いた錯体については <sup>61</sup>Ni Mössbauer 測定も行った。

は磁化率測定により 2 段階の SCO 現象を示し二層一組のシアノ基で架橋した高分子構造をとっており、この錯体が SCO 現象を示す配位高分子であることが分かった。また、<sup>57</sup>Fe Mössbauer 測定では通常の Hofmann 型錯体とは異なり室温で二種類以上の Fe サイトが存在することを示すスペクトルが得られた。このスペクトルは Doublet のピーク 2 つが重なったものとみられ、S=2 の高スピン状態と S=1 または S=0 のスピン状態が混在していることを示唆していると考えられる。

Fe(3-methylpyridine)<sub>2</sub>[Ni(CN)<sub>4</sub>]および Fe(Ethyl Isonicotinate)<sub>2</sub>[Ni(CN)<sub>4</sub>]については <sup>61</sup>Ni Mössbauer 測定によりごく僅かに負の異性体シフトを持つ Singlet ピークが観測された。<sup>61</sup>Ni Mössbauer 分光法はごく低温でしか行えず、異性体シフトの幅も数十 μm s<sup>-1</sup> オーダーと狭いので得られる情報は少ないが、今後はこの結果をごく低温での <sup>57</sup>Fe Mössbauer 測定と関連付けたい。

[1] J. A. Rodríguez-Velamazán, K. Kitase, E. Palacios, M. Castro, Á. Fernández-Blanco, R. Burriel, T. Kitazawa, *Crystals.*, 9, 433 (2019)

[2] K. Kitase, D. Akahoshi and T. Kitazawa, *Dalton Trans.*, 52, 2571-2579 (2023) (Back Cover).

Mössbauer spectroscopy to probe for analysis of local structure of cyano-bridged coordination polymer  
KITASE, K., KITAZAWA, T., KOBAYASHI, Y., SETO, M., KITAO, S.,



## 3B03

<sup>61</sup>Ni メスバウアー分光法によるホフマン型配位高分子錯体化合物の研究

(1. 東邦大学、2. 京都大学)北澤 孝史<sup>1</sup>、北清 航輔<sup>1</sup>、小林 康浩<sup>2</sup>、北尾 真司<sup>2</sup>、窪田 卓見<sup>2</sup>、瀬戸 誠<sup>2</sup>

金属錯体は、金属イオンと有機配位子からなり、金属イオンの d または f 電子に由来する磁性や光物性、伝導性など様々な固体物性を発現し新しい材料として注目されている。金属錯体化合物について固体物性研究においては、各種メスバウアー分光が有力な研究手法になることが期待され、その中でも、<sup>61</sup>Ni メスバウアー分光は、金属錯体化学において魅力ある研究手法と考えられる。特に、磁性が発現するニッケル錯体においては有用な情報を与えると考えられる。

Ni<sup>2+</sup>錯体化合物の配位構造は、多様であり、主に正四面体 4 配位構造、平面 4 配位構造および正八面体 6 配位構造をとることが知られている。たとえば、[NiCl<sub>4</sub>]<sup>2-</sup>は正四面体 4 配位構造を、[Ni(CN)<sub>4</sub>]<sup>2-</sup>は平面 4 配位構造を、[Ni(OH<sub>2</sub>)<sub>6</sub>]<sup>2+</sup>は正八面体 6 配位構造をとっている。Ni<sup>2+</sup>イオンは、8 個の 3d 電子を持ち、正四面体 4 配位構造と正八面体 6 配位構造では、不対電子を 2 個持つ常磁性となり、平面 4 配位構造では不対電子を持たない反磁性となる。ホフマン型高分子錯体において、スピントロニクスオーバー二次元錯体である Fe(pyridine)<sub>2</sub>[Ni(CN)<sub>4</sub>]が、報告されて以来、盛ん研究されているが、今回は八面体 6 配位部分に水分子が配位している Fe(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>Ni(CN)<sub>4</sub> と Ni(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>Ni(CN)<sub>4</sub> をホスト骨格にする系について <sup>61</sup>Ni メスバウアー分光を行ったので報告する(Fig.1)。

<sup>61</sup>Ni メスバウアー分光の測定は、京都大学複合原子力科学研究所内のライナックにて以下のような操作手順で行った。準備した <sup>62</sup>Ni-14at%V 合金をライナックによる (γ, p) 反応で <sup>61</sup>Co を生成し、メスバウアー線源を作成した。すなわち、電子線加速器ライナックにおいて 31 MeV にて加速された電子を X 線コンバータである Pt ターゲットに照射し、そこから発生する制動 X 線を照射し (γ, p) 反応にて合金内で生成する <sup>61</sup>Co をメスバウアー線源として作成した。メスバウアー線源は、半減期 100 分なので試料の約 3 時間の測定を繰り返し行ない、積算することにより良好なスペクトルを得た。キャリブレーションは Fe 箔の <sup>57</sup>Fe メスバウアー分光測定を行った後 Ni-14at%V 合金の <sup>61</sup>Ni メスバウアー測定を行い、そのピーク位置を速度ゼロとした。メスバウアー分光は線源及び試料ともに 16 K で、測定した

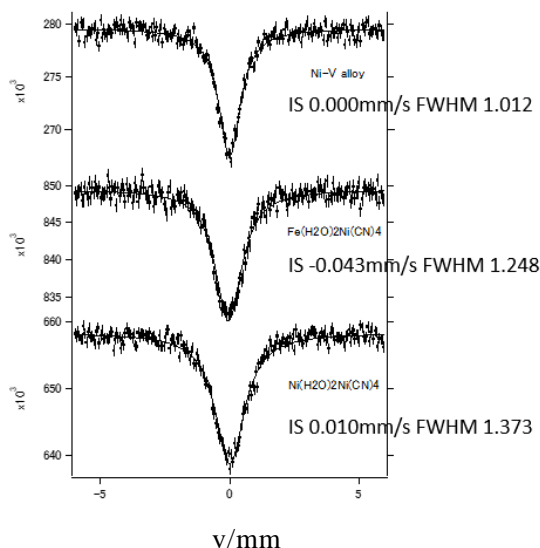


Fig.1 <sup>61</sup>Ni Mössbauer Spectroscopy for Hofmann-type Coordination Polymer Compounds

<sup>61</sup>Ni Mössbauer Spectroscopy for Hofmann-type Coordination Polymer Complexes  
KITAZAWA, T., KITASE, K., KOBAYASHI, Y., KITAO, S., KUBOTA, T., SETO, M.

セッションB 原子核プローブ

## 3B2

座長:北澤 孝史(東邦大学)

2023年9月23日(土) 11:10 ~ 12:10 B会場 (学生会館)

### [3B04] 水熱合成法によるオキシ水酸化鉄ナノ粒子の合成と光触媒反応

バスキトリヨノ<sup>2</sup>、ラフマンハビブル<sup>1</sup>、ウィジャヤントヘリ<sup>3</sup>、\*中島 覚<sup>1</sup> (1. 広島大学、2. インドネシア国家研究イノベーション庁、3. スラバヤ州立大学)

11:10 ~ 11:30

### [3B05] $\text{Cd}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ の磁性の時間変動と温度履歴

\*佐藤 渉<sup>1</sup>、伊東 泰佑<sup>1</sup>、平原 響<sup>1</sup> (1. 金沢大学)

11:30 ~ 11:50

### [3B06] 負ミュオン寿命法による鉄中微量炭素の非破壊深度分布分析法の日本刀への適用

\*久保 謙哉<sup>1</sup>、二宮 和彦<sup>2</sup>、稲垣 誠<sup>3</sup>、吉田 剛<sup>4</sup>、竹下 聡史<sup>4</sup>、河村 成肇<sup>4</sup>、ストラッサー パトリック<sup>4</sup>、三宅 康博<sup>4</sup>、伊藤 孝<sup>5</sup>、髭本 亘<sup>5</sup>、齋藤 努<sup>6</sup> (1. ICU、2. 阪大、3. 京大、4. 高エネ研、5. 原研、6. 歴博)

11:50 ~ 12:10

## 3B04

## 水熱合成法によるオキシ水酸化鉄ナノ粒子の合成と光触媒反応

(広島大学<sup>1</sup>、インドネシア BRIN<sup>2</sup>、スラバヤ州立大学<sup>3</sup>) バスキ トリヨノ<sup>2</sup>、  
ラフマン ハビブル<sup>1</sup>、ウィジャヤント ヘリ<sup>3</sup>、○中島 寛<sup>1</sup>

**【緒言】** 有害な有機物の分解は環境保全の観点から重要である。可視光を用いた光フェントン反応は高い反応性を有する・OH ラジカルを生じる。ヘマタイトは可視光を用いた有用な光フェントン触媒となる。このヘマタイトに Nb をドーピングすると光フェントン反応が促進される。また、オキシ水酸化鉄であるゲータイトも光触媒能が知られている。本研究では、水熱合成法により様々なオキシ水酸化鉄を合成し、その相をメスバウアー分光法により明らかにし、そして光触媒能の評価を行った。

**【実験】** 塩化鉄(III)を水に溶かし、核形成剤として  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  を加え、さらに酢酸、EDTA、またはクエン酸を加えて水熱合成を行った。構造は粉末 X 線回折を用いて同定した。粒径は TEM 観察により評価した。メスバウアー測定は通常の方法を用いて行い、光触媒活性の測定ではメチレンブルー (MB) 分解試験を行った。

**【結果と考察】** 粉末 X 線回折測定により、酢酸を加えるとアカガナイト ( $\beta\text{-FeOOH}$ ) が得られた。また、EDTA を加えるとゲータイト ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ) が、クエン酸を加えるとレピドクロサイト ( $\gamma\text{-FeOOH}$ ) が得られた。

図 1 に 78 K で測定したメスバウアースペクトルを示す。酢酸または EDTA を加えた試料は 2 組のセクステットが観測された。その内部磁場は酢酸を加えたものの方が EDTA を加えたものより少し小さかった。室温で測定すると前者はダブルットのみを示し、後者はダブルットと内部磁場が小さくなったセクステットが観測された。前者がアカガナイトで後者がゲータイトであることと矛盾しない。クエン酸を加えた場合ダブルットが観測され、レピドクロサイトであることと矛盾しない。

みかけの MB 分解速度定数  $k$  を求めた。アカガナイトでは  $0.008 \text{ m}^{-1}$  であるのに対し、ゲータイトでは  $0.0268 \text{ m}^{-1}$  と大きくなった。市販のゲータイトでは  $0.006 \text{ m}^{-1}$  であるので、ナノ粒子となったためであると考えられる。さらに、レピドクロサイトを用いると  $0.222 \text{ m}^{-1}$  まで上昇した。TEM 観察より粒径は、アカガナイトで 50~100 nm、ゲータイトでは 50 nm より小さく、またレピドクロサイトでは 5 nm より小さかった。粒径と見かけの分解速度定数には相関があった。さらに、反応前後で触媒のメスバウアースペクトルに変化は認められなかった。

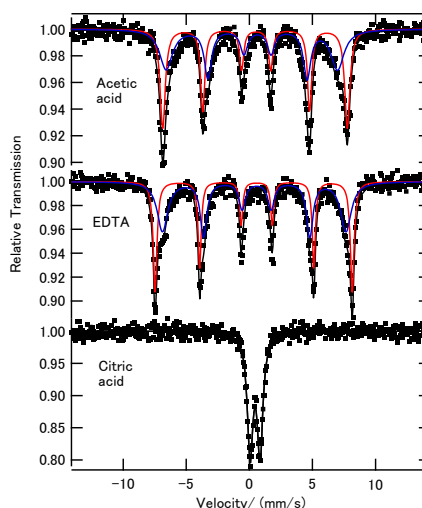


Fig. 1. Mössbauer spectra at 78 K.

Formation of Iron Oxyhydroxide Nanoparticles Using Hydrothermal Synthesis and Their Photocatalytic Reaction  
BASUKI T., RAHMAN H., WIJAYANTO H., NAKASHIMA S.

## 3B05

Cd<sub>x</sub>Fe<sub>3-x</sub>O<sub>4</sub> の磁性の時間変動と温度履歴(金沢大理工<sup>1</sup>、金沢大院自然<sup>2</sup>)○佐藤 渉<sup>1</sup>、伊東泰佑<sup>2</sup>、平原 響<sup>1</sup>

**【緒言】**スピネル型金属酸化物は、構成金属元素の種類や組成、およびそれらの占有サイトによって多様な物理的性質を発現するため、機能性材料への応用が期待されている物質である。特に鉄を主成分とするフェライトは、その磁氣的性質が大いに注目されており、物性制御のためには基礎理学的な性質の理解が不可欠である。我々は、Aサイトに非磁性金属元素であるCdを導入することで生じるスピングラスに着目し、その磁気特性を解き明かすことを目的として実験を行っている。スピングラスについては、磁氣的なフラストレーションやエイジング現象が観測されているが、これまで巨視的な情報によってのみ議論されることが多かったため、スピングラスの発現機構に関して不明な点が多い。本研究では、主に Cd<sub>0.75</sub>Fe<sub>2.25</sub>O<sub>4</sub> について、<sup>57</sup>Fe メスバウアー分光法と磁化測定によって、Fe 原子核位置における超微細場および磁化の時間変動と熱履歴依存性を調べ、微視的な観点から熱平衡に向かうスピンの挙動を追跡したので報告する。

**【実験】**Fe と Cd の原子数比が目的の試料の化学量論比となるよう、α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> および CdO を混合した。混合粉末を錠剤成型し、石英管に真空封入して 1373 K で 45 分間焼成した。焼成後、粉末 X 線回折測定によって、目的とする Cd<sub>0.75</sub>Fe<sub>2.25</sub>O<sub>4</sub> が合成されていることを確認した。超伝導量子干渉計を用いて 100 Oe の磁場下で合成試料の磁化測定を行い、次いで 10 K から室温で <sup>57</sup>Fe メスバウアー分光測定を行った。低温測定における試料の温度設定には様々な熱履歴を与え、磁化やメスバウアースペクトルへの影響を調べた。

**【結果】**Fig. 1 は、ゼロ磁場で室温から 10 K に急冷した試料について得られた磁化の経過時間依存性である。熱平衡状態に向かう現象を観測した結果であるが、数十時間の間に磁化が不規則に変化している様子が観測された。同一試料について、10 K まで急冷した後、経過時間毎に得られたメスバウアースペクトルを Fig. 2 に示す。やはり熱平衡に向かう数十時間という緩和時間の中でスピンの徐々に配向する現象が観測された。このような長時間にわたるスピン配向は本研究において初めて観測された事象である。本発表では、これら二つの観測結果に加え、ゆっくりと冷却した場合のメスバウアースペクトルを示し、スピングラス状態の Cd<sub>0.75</sub>Fe<sub>2.25</sub>O<sub>4</sub> における磁性を議論する。

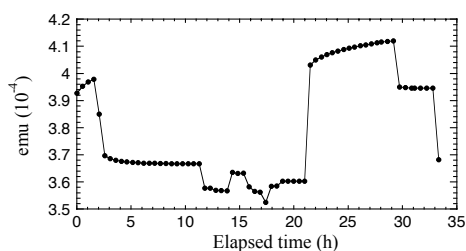


Fig. 1 Elapsed time dependence of magnetization of Cd<sub>0.75</sub>Fe<sub>2.25</sub>O<sub>4</sub> at 10 K.

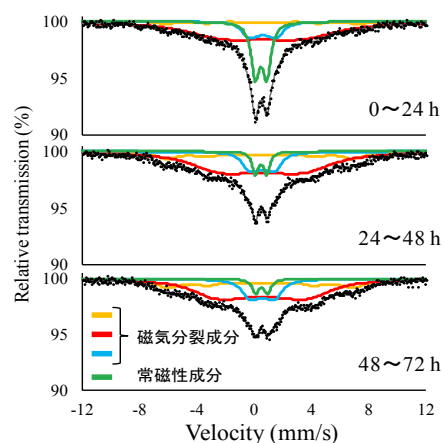


Fig. 2 Elapsed time dependence of <sup>57</sup>Fe Mössbauer spectra of Cd<sub>0.75</sub>Fe<sub>2.25</sub>O<sub>4</sub> at 10 K.

Time variation and temperature hysteresis of magnetism in Cd<sub>x</sub>Fe<sub>3-x</sub>O<sub>4</sub>  
SATO, W., ITO, T., HIRAHARA, H.

## 3B06

## 負ミュオン寿命法による鉄中微量炭素の非破壊深度分布分析法の日本刀への適用

(ICU<sup>1</sup>、阪大<sup>2</sup>、京大<sup>3</sup>、高エネ研<sup>4</sup>、原研<sup>5</sup>、歴博<sup>6</sup>)○久保謙哉<sup>1</sup>、二宮和彦<sup>2</sup>、稲垣誠<sup>3</sup>、吉田剛<sup>4</sup>、竹下聡史<sup>4</sup>、河村成肇<sup>4</sup>、ストラッサー パトリック<sup>4</sup>、三宅康博<sup>4</sup>、伊藤孝<sup>5</sup>、髭本亘<sup>5</sup>、齋藤努<sup>6</sup>

**【緒言】**物質に停止した負ミュオンは、近傍の原子に捕獲されてミュオン原子を形成する。ミュオン原子中の負ミュオンは、平均寿命 2.2  $\mu\text{s}$  で自然崩壊して電子になるか、原子核に吸収されて消滅していく。原子核吸収の速度は原子核の原子番号に従って速くなるため、壊変電子の測定で負ミュオンの寿命を測定すると、負ミュオンを捕獲した原子の原子番号が大きいほど寿命が短く観測される。複数の元素からなる物質に適用すると、崩壊電子の時間スペクトルの寿命解析によって、物質を構成する元素の定量分析ができる。負ミュオンは入射エネルギーの調整により試料の任意深さに停止できるので、非破壊深度選択的なプローブとして元素分析が可能となる。この方法の原理は知られていたが、これまで実際の研究例はなかった。我々は世界最大強度の負ミュオンビームが利用可能な J-PARC MLF ミュオン施設で本分析法の開発を始めた。特にパルスミュオンビームを用いると、重元素中の微量軽元素の分析が可能であることから、鉄鋼中の炭素の分析を最初の目標とした。炭素原子中の負ミュオンの寿命は 2.0  $\mu\text{s}$ 、鉄原子中では 0.20  $\mu\text{s}$  と 10 倍の違いがある。多くの日本刀は炭素含有量の違いによって機械的性質が異なる鉄素材が層状に重なる構造になっている。負ミュオン寿命法の日本刀への適用を試みたので結果を報告する。

**【実験】**J-PARC MLF MUSE D1 エリアで負ミュオンビームを日本刀(九州肥後同田貫兵部)の長さ方向の中心付近(middle point)に照射した。ビームエネルギーを 35 MeV/c, 40 MeV/c, 45 MeV/c と変化させ、刀(鉄)の厚み方向での炭素濃度の変化を測定した。また握り部分(なかご, handle)は刃の中心部分の素材が表面に現れていると考えられているので、なかごを 40 MeV/c で測定した。標準試料の測定から検量線を作成した。炭素分析の妨害となる空気に停止した負ミュオンからの寄与は、軽元素を含まない銅板の測定値を用いた。

**【結果】**負ミュオンの壊変電子の時間スペクトルを寿命の異なる成分とバックグラウンドの和として解析した。寿命が 2.0  $\mu\text{s}$  の成分を炭素由来、0.20  $\mu\text{s}$  のものを鉄由来として分離した。検量線との比較から求めた刀の中心付近の深度ごと、およびなかごの炭素含有量を Fig. 1 に示す。BWD と FWD は試料に対する検出器の配置の違いである。刀中の炭素は深さによって濃度が異なることがわかる。今回用いた最大運動量 45 MeV/c では、なかごと同じ素材と思われる刀の厚さ中心には届いていないので、さらに高い運動量のビームを用いた測定を計画している。

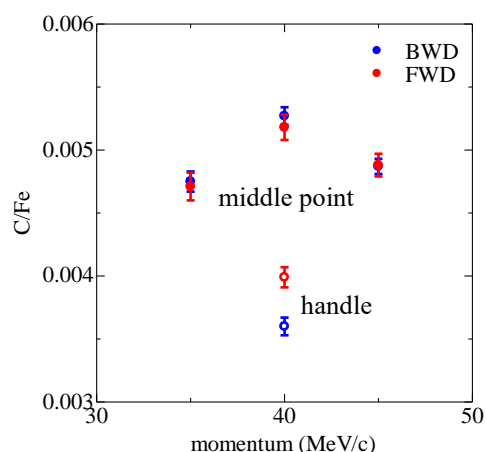


Figure 1. Carbon depth profile in a Japanese sword.

Non-destructive Depth Profiling of Trace Carbon in Iron by Negative Muon Lifetime Method Applied to Japanese Sword.

KUBO, M. K., NINOMIYA K., INAGAKI, M., YOSHIDA, G., TAKESHITA, S., KAWAMURA, N., STRASSER, P., MIYAKE, Y., ITO, T. U., HIGEMOTO, W., SAITO, T.

---

セッションC 環境放射能

## 3C1

座長:栗原 雄一(長岡技術科学大学)

2023年9月23日(土) 14:50 ~ 16:10 A会場 (サタケメモリアルホール)

---

[3A10] アクチノイドの土壌間分配係数: 日本の土壌における  $^{237}\text{Np}$  と  $^{239}\text{Pu}$  の異なる環境移動性

\*鄭 建<sup>1</sup>、田上 恵子<sup>1</sup>、内田 滋夫<sup>1</sup> (1. 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構)

14:50 ~ 15:10

[3A11] 粘土鉱物における Eu収着についての顕微的手法による直接解析

\*向井 広樹<sup>1</sup>、Mei Huiyang<sup>2</sup>、青柳 登<sup>2</sup>、高橋 嘉夫<sup>1</sup> (1. 東京大学大学院、2. 原子力機構)

15:10 ~ 15:30

[3A12] 千葉市で採取した大気浮遊じん中 Cs-137の高感度分析による実効半減期評価及び季節変動解析

\*杉山 翠<sup>1</sup>、岡山 杏菜<sup>1</sup>、飯田 素代<sup>1</sup>、宮田 賢<sup>1</sup>、田中 博幸<sup>1</sup>、新田 済<sup>1</sup>、磯貝 啓介<sup>1</sup> (1. 公益財団法人 日本分析センター)

15:30 ~ 15:50

[2A07] 福島県富岡川のアユに含まれる Cs-137濃度について

\*森田 貴己<sup>1</sup>、和田 敏裕<sup>2</sup>、高田 兵衛<sup>2</sup>、金指 努<sup>2</sup>、難波 謙二<sup>2</sup> (1. 水産研究・教育機構 水産資源研究所、2. 福島大学)

15:50 ~ 16:10

## 3A10 アクチノイドの土壌間分配係数：日本の土壌における $^{237}\text{Np}$ と $^{239}\text{Pu}$ の異なる環境移動性

(量子科学技術研究開発機構、千葉、日本)○鄭建、田上恵子、内田滋夫

Neptunium-237 and  $^{239}\text{Pu}$  are important radionuclides in the safety assessment related to geological disposal of radioactive waste because of the possibility of long-term exposure to humans. Soil-soil solution distribution coefficient ( $K_d$ ) of radionuclides is used for quantification of the degree of sorption of radionuclides on the solid phase which has been used in estimation of overall mobility of radionuclides and subsequent radiological dose assessment.  $K_d$  is calculated by the ratio of the activity concentration of a radionuclide on a solid phase (mineral, soil or sediment) divided by the radionuclide activity concentration in a specified liquid phase with a unit of L/kg.

Regarding  $K_d$ , there are adsorption  $K_d$  obtained from the adsorption process and desorption  $K_d$  obtained from the desorption process. Since the desorption  $K_d$  reflects the solid-liquid distribution of inherent elements that are believed to have reached equilibrium over a long period of time, the desorption  $K_d$  is required for very long-

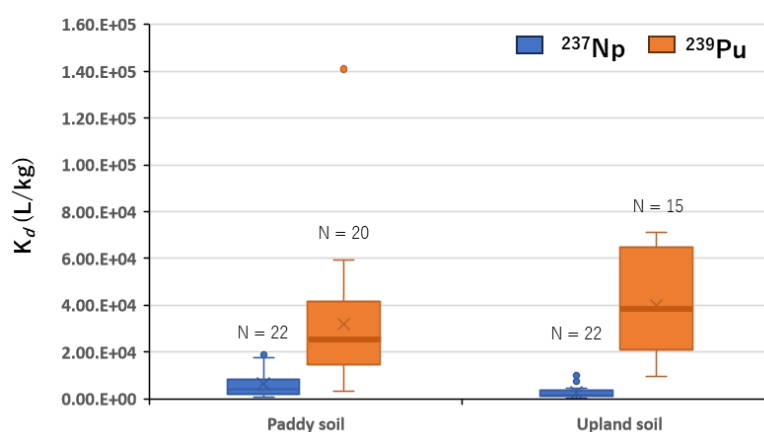


Fig. 1 Comparison of  $K_d$  values of  $^{237}\text{Np}$  and  $^{239}\text{Pu}$  in Paddy field soil and Upland soil.

term safety evaluations related to radioactive waste disposal. Using a laboratory batch method, we investigated the desorption  $K_d$  values of  $^{237}\text{Np}$  and  $^{239}\text{Pu}$  originating from global fallout, which is considered as “native actinides” in the environment because they have been presented in the soil for a long period of time (ca. six decades). It was found that in Japanese agricultural soils (paddy and upland field soils) the desorption  $K_d$  value of  $^{239}\text{Pu}$  was one order of magnitude higher than that of  $^{237}\text{Np}$ , indicating higher mobility of  $^{237}\text{Np}$  than Pu (Fig. 1). The activity ratios (AR) of  $^{237}\text{Np}/^{239+240}\text{Pu}$  in paddy soil and upland soil were 0.0024 and 0.0021, respectively. These values were lower than the  $^{237}\text{Np}/^{239+240}\text{Pu}$  AR value of 0.0036, indicating a preferential loss of  $^{237}\text{Np}$  from the surface layer of investigated agricultural soils in the past six decades.

In this study, we investigate the concentrations of  $^{237}\text{Np}$  and Pu isotopes in stored soils (collected in the 1970s) to understand the mechanism of environmental mobility of  $^{237}\text{Np}$  and Pu isotopes.

Soil-soil distribution coefficients of actinides: indication of different environmental mobility of  $^{237}\text{Np}$  and  $^{239}\text{Pu}$  in Japanese soils  
ZHENG, J., TAGAMI, K., UCHIDA, S.

## 3A11

## 粘土鉱物における Eu 吸着についての顕微的手法による直接解析

(東大院理<sup>1</sup>、原子力機構<sup>2</sup>)○向井広樹<sup>1</sup>、Huiyang Mei<sup>2</sup>、青柳登<sup>2</sup>、高橋嘉夫<sup>1</sup>

**【緒言】** 放射性廃棄物処分事業において、種々の放射性核種の環境中における挙動について理解することは重要となる。処分対象とされている高レベル放射性廃棄物は多重の人工バリアによって覆われるが、数千年以上の時間スケールではこれらのバリア機能は徐々に喪失し、ガラス固化体中の種々の放射性核種は地下水へ溶出することが懸念される。こうしたことを考慮すると天然バリア中での放射性核種、特に半減期の長いアクチノイド系列放射性核種の挙動について理解することが必要とされる。また環境中において、粘土鉱物は優れた吸着能を持ち放射性核種を含む陽イオンの挙動に大きな影響を与えている。ただ陽イオンの吸着・脱離についての性質は、粘土鉱物種によって異なることが知られている。本研究では、アクチノイド系列放射性核種の挙動について理解するため、Amのアナログとして考えられている Eu を用いて種々の粘土鉱物について吸着・脱離実験を行い、さらに Eu を吸着した粘土鉱物について電子顕微鏡を中心とした手法によって直接的に観察・分析を行った。

**【実験】** 黒雲母、ヒドロバイオタイト、カオリナイト、モンモリロナイトといった粘土鉱物について、pH や濃度を変化させて Eu を吸着させ、特に pH: ~6.5 で Eu を吸着させた試料については 0.1 mol/L NaClO<sub>4</sub>, 0.1 mol/L KCl, 0.1 mol/L シュウ酸によって逐次脱離実験を行った。吸着・脱離実験で回収したそれぞれの溶液は誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) によって測定し、Eu の吸着率や脱離率を導出した。そして Eu を吸着した粘土試料について、電子線プローブマイクロアナライザ (EPMA) や透過型電子顕微鏡 (TEM)、時間分解レーザー誘起蛍光法 (TRLFS) を用いて観察・分析を行った。

**【結果】** 吸着実験の結果、各粘土鉱物において pH の上昇とともに Eu 吸着率が上昇する傾向が見られた。低 pH (3-5 程度) においてはヒドロバイオタイト、モンモリロナイトが比較的高い吸着率を示していたが、高 pH (6.5-9 程度) では、全ての粘土鉱物が高い吸着率を示していた。一方、脱離実験の結果、カオリナイトからは Eu が比較的良好に脱離しており、それ以外の粘土鉱物の中では特にヒドロバイオタイトからの脱離率が低くなっていた。またモンモリロナイトについては、Na によって Eu はほとんど脱離しなかったが K によってよく脱離していた。

次に pH: ~6.5 で Eu を吸着した各粘土試料について直接的に解析を行った。EPMA によって元素マッピングを測定した結果、黒雲母では断面試料の端の方に Eu が濃集しており、ヒドロバイオタイトでは端の方からさらに層間に Eu が侵入している様子が見られた。そして走査型透過電子顕微鏡 (STEM) /エネルギー分散型 X 線分光法 (EDS) による観察・分析によって、カオリナイトでは主に粒子の表層に Eu が分布しており、モンモリロナイトでは層間にも Eu が侵入しおよそ均質に吸着されていることが明らかとなった。また TRLFS による測定において、モンモリロナイトでは外圏錯体が形成されており、それ以外の粘土鉱物では内圏錯体に近い様子となっていることが示唆された。

**【謝辞】** 本研究は、「平成 31 年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 (放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務)」の成果の一部である。

Direct analyses of Eu sorption on clay minerals by microscopic techniques  
MUKAI, H. Mei, H. Aoyagi, N. Takahashi, Y.



## 3A12 千葉市で採取した大気浮遊じん中 Cs-137 の高感度分析による実効半減期評価及び季節変動解析

(日本分析センター)○杉山翠、岡山杏菜、飯田素代、宮田賢、田中博幸、新田済、磯貝啓介

### 【緒言】

原子力規制庁委託事業である環境放射能水準調査の一環として、日本分析センター(千葉市)敷地内において大気浮遊じんを連続採取し放射性核種分析を行っている。2011年3月の東京電力福島第一原子力発電所事故時に放射性Cs濃度の上昇が見られ、その後は年々低下傾向を示したが、捕集期間1ヶ月のロウボリウムエアサンプラ(LV)では2014年以降不検出となりつつあった。2016年度に導入した大容量エアサンプラ(SNOW WHITE)はLVと比較すると大気導入量が約40倍増加し、捕集期間が3.5~7日と時間分解能に優れているため、年々不検出となりつつあった放射性Csを検出し、短期的な変動を把握することが可能となった。Cs-137の実効半減期及び季節変動の周期性を評価することが可能となったため、その成果について報告する。

### 【調査方法】

大容量エアサンプラ(SNOW WHITE)にガラス繊維ろ紙(570 mm×460 mm)を装着して、680 m<sup>3</sup>/hの流量で約3.5日間の大気を連続吸引した。捕集後のろ紙は専用のプレス機で成型して、プラスチック製の測定容器に入れ測定試料とした。なお、Cs-134(半減期2.065年)の減衰により徐々に不検出となる試料が増えたため、2017年4月採取分より7日間分を1試料とし、さらに2019年4月採取分より測定時間を2倍とした。試料をGe半導体検出器で測定し、Cs-137濃度の経年変化から実効半減期及び季節変動の周期性を評価した。

### 【結果】

2016~2022年度の大容量エアサンプラによる大気浮遊じん中のCs-134濃度は不検出~5.7 μBq/m<sup>3</sup>、Cs-137濃度は0.93~40 μBq/m<sup>3</sup>であり、冬季に高く夏季に低い放射性Cs濃度が観測された。この原因として、地表からの土壌粒子の舞い上がりの他、浮遊じん量や大気の輸送経路が影響していることが考えられた。

大気浮遊じん中のCs-137濃度の年度平均値を用いて評価した実効半減期は4.5年であり、物理半減期である約30年と比較して加速度的に減少していることを確認した。今回評価した実効半減期(4.5年)は他の評価例と比較して若干長かったが、2016年(事故から約2000日)以後からの評価であり、事故直後のウェザリング効果による減衰の速い成分を含んでいないことが影響していると考えられた。

Cs-137濃度には冬季及び夏季に季節変動が見られることから、その変動の周期性を確認するための検討を行った。放射能の減衰による影響を除外し、季節変動のみに着目するため、Cs-137濃度の実測値から、実効半減期から評価した計算値を差し引き、季節変動評価用濃度を算出した。三角関数でフィッティングして評価した季節変動の周期は約366日であり、約1年の周期性があることを確認することができた。これは冬季は大陸性気団の影響に伴いCs-137濃度が高く、夏季は海洋性気団の影響に伴いCs-137濃度が低くなることが一因であると考えられた。

The evaluation of effective half-lives and analysis of seasonal variation by high sensitivity analysis of Cs-137 in airborne particulates sampled in Chiba City  
SUGIYAMA M., OKAYAMA A., IIDA M., MIYATA S., TANAKA H., NITTA W., ISOGAI, K.

## 2A07 福島県富岡川のアユの Cs-137 濃度について

(水産機構・資源研<sup>1</sup>、福島大<sup>2</sup>)○森田貴己<sup>1</sup>、和田敏裕<sup>2</sup>、  
高田兵衛<sup>2</sup>、金指努<sup>2</sup>、難波謙二<sup>2</sup>

### 【緒言】

福島県海域では、2021年4月1日より「本格的な操業へ向けての移行期間」に入ったが、内水面漁業においては、福島県中東部の複数の水域で未だ自粛が続いており、続いており漁業再開への見通しが立っていない。アユ (*Plecoglossus altivelis*) は、内水面漁業及び遊漁において非常に重要な種であることから、多くの漁協でその漁業及び遊漁の再開が望まれている。アユにおける放射性セシウム (Cs) のモニタリングは、内臓を含む全体試料 (ホールボディ) で行われている。このモニタリング方法は、アユを食する際に内臓を含む全体を食することがあるためである。しかし、アユを食するとその内臓にシルト等の鉍物を含んでいることが多く、実際にアユ全体を食することは稀である。また、内臓に含まれるこの鉍物の影響により、アユ全体試料の Cs-137 濃度はアユ筋肉試料の濃度よりも高いことが報告されている (Tsuboi et al., 2015, Morishita et al., 2019)。そこで、本研究では、アユ内臓に含まれる鉍物によるアユの Cs-137 濃度に対する影響を調べ、鉍物を除いた場合のアユ全体の濃度の算出をした。

### 【実験】

2022年5月 (n=22) 及び10月 (n=20) に福島県富岡川において採取されたアユ筋肉 (ドレス部測定) 及び内臓、また同時に採取した川床石付着物 (両月とも n=3) の Cs-137 濃度を測定した。内臓試料及び川床石付着物試料中の有機物を過酸化水素水で分解し、その残渣の Cs-137 濃度を測定した。この処理において分解されるものは、内臓及び胃内容物中の餌生物や付着物中の有機物であり、残渣はアユに消化・吸収されない鉍物であると仮定している。得られた測定値から、それぞれの有機物の Cs-137 濃度を計算し、鉍物を含まない場合のアユ全体の濃度を算出した。

### 【結果と考察】

筋肉試料及び全体試料とも5月より10月のほうが有意に Cs-137 濃度が高く (t-test, 筋肉試料  $p < 0.0001$ 、全体試料  $p < 0.05$ )、両月とも筋肉試料より全体試料のほうが濃度が高かった (共に  $p < 0.0001$ )。内臓試料及び川床石付着物試料の重量に占める鉍物量 (湿重量) の平均割合は、それぞれ5月が 25.1%、30.9%、10月が 27.4%、36.8%であった。また、それぞれの試料中の Cs-137 総量に占める鉍物の Cs-137 の平均割合は、5月が 39.5%、30.3%、10月が 71.9% (10.1%の1検体を除く)、90.2%であった。これらの結果から、川床石付着物中の鉍物の量と Cs-137 の割合が内臓中のそれらの割合に影響していることが示唆された。筋肉試料では基準値 (100 Bq/kg-wet) を超過する検体はなかったが、全体試料では5月では4検体、10月では10検体存在していた。鉍物を除いた場合のアユ全体濃度を算出すると、両月とも超過する検体はなくなった。

### 【謝辞】

本研究は、水産庁復興交付金事業「海洋生態系の放射性物質挙動調査事業」の一環として行われた。試料採取にご協力いただいた富岡川漁業協同組合に感謝いたします。

Concentrations of Cs-137 in an algae grazing annual fish, ayu *Plecoglossus altivelis* collected from Tomioka River in Fukushima Prefecture.

MORITA, T., WADA, T., TAKATA, H., KANASASHI, T., NANBA, K.

セッションE 原子力・アクチノイド化学及び関連分野

## 3E1

座長:金子 政志(大阪大学)

2023年9月23日(土) 11:10 ~ 12:10 A会場 (サタケメモリアルホール)

### [3A04] ジグリコールアミド酸型配位子保持リポソーム系における Eu吸着挙動と化学量論の解明

\*清水 壮太<sup>1</sup>、山崎 信哉<sup>2</sup>、坂口 綾<sup>2</sup>、高久 雄一<sup>2</sup>、末木 啓介<sup>2</sup> (1. 筑波大学大学院 理工情報生命学術院 数理物質科学研究群、2. 筑波大学 数理物質系)

11:10 ~ 11:30

### [3A05] マイナーアクチノイド抽出配位子の迅速設計に向けた電子状態データベースの構築

\*住吉 剛<sup>1</sup>、黒木 菜保子<sup>1,2</sup>、森 寛敏<sup>1</sup> (1. 中央大学、2. JST ACT-X)

11:30 ~ 11:50

### [3A06] <sup>228</sup>Acを用いた Ac溶媒抽出の検討～ pH条件下での抽出挙動～

\*白崎 謙次<sup>1</sup>、宮脇 琢斗<sup>1</sup>、中瀬 正彦<sup>2</sup> (1. 東北大学、2. 東京工業大学)

11:50 ~ 12:10

## 3A04

## ジグリコールアミド酸型配位子保持リポソーム系における Eu 吸着挙動と化学量論の解明

(筑波大院数理物質<sup>1</sup>、筑波大数理物質系<sup>2</sup>)○清水壮太<sup>1</sup>、山崎信哉<sup>2</sup>、坂口綾<sup>2</sup>、高久雄一<sup>2</sup>、末木啓介<sup>2</sup>

**【緒言】** ランタノイド(Ln)元素は、電子機器等に多く用いられ工業的に需要が高く、供給量が限られているため、高レベル放射性廃液から回収・相互分離し再利用する技術の開発が行われている。本研究では Ln の新たな分離方法として、ジグリコールアミド酸(DGA)型配位子を保持させた球状リン脂質二重膜(リポソーム)を吸着媒体として用いる分離法に着目し、その吸着挙動の理解を目的として実験を行った。DGA 配位子を封入したリポソームを Ln 元素の吸着媒体とし、このリポソームに対するユウロピウム(Eu)の吸着挙動を検討した。また、リポソームの二重膜中の配位子の分布量をもとに、Eu 吸着反応の化学量論並びに吸着挙動の解明を試みた。

**【実験】**

## (1)配位子の封入率変化に対する Eu 吸着量の変化

卵黄ホスファチジルコリン(PC)を主成分とするリポソームに配位子として *N,N*-Dioctyldiglycolamic acid (D8DGA)を封入した。D8DGA 封入率は PC に対し 0-5.0 wt%で変化させた。このリポソーム懸濁液に超音波処理を行いリポソームの粒径を約 100 nm に均一化した後、Eu(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 水溶液と混合し、pH を 3.0 に調整した。この溶液を 25°C で 15 分間攪拌して反応させた後、孔径 25 nm のフィルターでろ過を行い、リポソーム及び吸着した Eu を取り除いた。ろ液中の Eu 濃度を誘導結合プラズマ質量分析(ICP-MS)により定量し、D8DGA の封入率に対する Eu 吸着量の変化を調べた。

## (2)リポソームに対する D8DGA の封入比率の決定

上記の実験と同様にリポソーム溶液と Eu(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 水溶液を混合し、蛍光測定を行った(励起光波長:394 nm、蛍光波長:592 nm)。蛍光測定を行った溶液に超音波処理を行なった後、再度蛍光測定を行った。超音波処理前後の蛍光強度を比較することで、リポソームの外膜と内膜に対する D8DGA の封入比率を決定した。

**【結果・考察】**

## (1)D8DGA の封入率変化に対する Eu 吸着量の変化

D8DGA の封入率増加に伴い Eu 吸着量が増大し、封入率約 4.5 wt%で Eu の吸着量はほぼ一定となった。これはリポソームが保持できる D8DGA 量が飽和したためと考えられる。また、D8DGA を飽和量(~18 μM)用いた時の Eu 吸着量は 6 μM であったことから、Eu 1 分子を吸着するために D8DGA は約 3 分子必要であることが示唆された。

## (2)リポソームに対する D8DGA の封入比率

Eu を吸着させたリポソーム溶液に対し超音波処理する前後で、Eu 由来の蛍光強度は約 1.3 倍になった。これは超音波処理によりリポソームの二重膜構造が崩壊し、内膜に保持されていた D8DGA が新たに反応したためと考えられる。この蛍光強度の変化からリポソーム内の D8DGA の分布は内膜:外膜=3:7 であることが示唆された。さらに(1)の結果を考慮すると、Eu と D8DGA の化学量論は 1:2 であることが明らかとなった。

Elucidation of Eu adsorption behavior and stoichiometry in diglycolamide-type ligand-retaining liposome systems (2023)

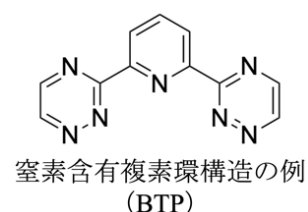
SHIMIZU.S, YAMASAKI.S, SAKAGUCHI.A, TAKAKU.Y, SUEKI.K

## 3A05

マイナーアクチニド抽出配位子の迅速設計に向けた  
電子状態データベースの構築(中央大学<sup>1</sup>、JST ACT-X<sup>2</sup>) ○住吉剛<sup>1</sup>、黒木菜保子<sup>1,2</sup>、森寛敏<sup>1</sup>

【緒言】 放射性廃液処理のため、抽出配位子によるマイナーアクチニド (An) とランタニド (Ln) の錯形成分離は重要である。例えば 2,6-di(1,2,4-triazin-3-yl)pyridine (BTP) などの複素環骨格がベースの抽出配位子が使われており、置換基導入により、分離能の向上が試みられている。しかし、リスクとコストの観点から抽出配位子の構造を網羅的に実験検討することは難しい。本研究の目的は、{Ln/An} 抽出配位子の迅速設計に向け、理論的観点から電子状態データベースを構築することである。

【方法】 網羅的に発生させた {Ln/An}={Eu,Gd/Am,Cm} と窒素を含む複素環錯体 336 構造の錯形成ギブスエネルギー ( $\Delta G$ ) とその {Ln/An} 間の差分 ( $\Delta\Delta G_{Ln/An} = \Delta G_{An} - \Delta G_{Ln}$ ) を相対論的密度汎関数計算 (B2PLYP//BP86) によって評価した。また、配位結合状態の定量評価のため、配位結合に関わる孤立電子対の軌道エネルギーを求めデータベース化した。



【結果と考察】  $\Delta\Delta G_{Ln/An}$  の計算結果の一部を表 1 に示す。例えば、配位子 b,c では、{Eu,Gd/Cm} において、 $\Delta\Delta G < 0$  であることから、Cm に高い結合親和性を持つ。すなわち、複素環構造の N 原子数と位置を適切に変えることで、選択的に An を Ln から錯形成分離可能であることを意味した。

表1. 錯形成ギブスエネルギーの差分  $\Delta\Delta G_{Ln/An}$  ( $=\Delta G_{An} - \Delta G_{Ln}$ ) [kJ/mol]

分離金属種 Ln/An	a	b	c	d	e
Eu/Am	-3.5	10.5	7.7	-3.4	-4.3
Gd/Am	-2.8	9.2	7.6	7.5	14.7
Eu/Cm	-6.7	-3.8	-2.9	-9.4	-17.3
Gd/Cm	-6.1	-5.2	-3.0	1.4	1.6

配位結合状態の系統的理解のため、孤立電子対の軌道エネルギーについて、まとめたものの一部を示す (表 2)。N 原子数の減少により軌道エネルギーの単調な不安定化が見られた。つまり、複素環中の N 原子数は、金属との配位結合強度における重要な要素の一つである。{Ln/An} の分離を志向した、錯体と配位孤立電子対の電子状態データベースの活用法を当日は議論したい。

表2. 配位孤立電子対の軌道エネルギー

	1	2	3	4	5
N原子数	1	2	3	4	5
軌道エネルギー[eV]	-7.05	-7.90	-8.34	-8.99	-9.50

Computational and informatics assessment to the speedy design of minor actinide extractive ligands  
SUMIYOSHI T., KUROKI N., MORI H.

## 3A06

 $^{228}\text{Ac}$  を用いた Ac 溶媒抽出の検討～pH 条件下での抽出挙動～

(東北大学金属材料研究所)○白崎 謙次、宮脇 琢斗

(東京工業大学)中瀬 正彦

【緒言】アクチニウム (Ac) の同位体である  $^{225}\text{Ac}$  を用いた標的アルファ線療法が高い関心を集めている。一方で、Ac の錯体化学研究は取り扱いの難しさから、他の元素と比べて明らかに遅れている。トリウム (Th) 系列に属する  $^{228}\text{Ac}$  は 911 keV に放出率 25.8% の  $\gamma$  線ピークがあり、放射線計測による定量が可能な同位体である。 $^{232}\text{Th}$  から分離精製した  $^{228}\text{Ra}/^{228}\text{Ac}$  ジェネレータ[1]は、約 30 時間で放射平衡に至るため  $^{228}\text{Ac}$  の再採取が 1 日間隔で実験可能になる。従って、Ac の基本的な錯体化学や熱力学に関する基礎研究の対象核種として  $^{228}\text{Ac}$  が有望である。本研究では、pH 緩衝溶液により pH を制御した水相から有機相に Ac を抽出する際の抽出挙動について  $^{228}\text{Ac}$  を用いて評価した。

【実験】東北大学金属材料研究所に貯蔵されていた酸化トリウムを塩酸に溶解し、Th 溶液を調製し、ここに水酸化ナトリウムを添加して Th 水酸化物沈殿により大凡の Th を除去した (図 1)。微量の溶存 Th、ナトリウム等を陽イオン交換樹脂に通すことにより分離し、BDGA 樹脂を用いたカラムクロマトグラフィーによる精製を行った。精製後の  $^{228}\text{Ra}$  溶液を 2 日程度静置して  $^{228}\text{Ac}$  が生成するのを待ち、再度 BDGA 樹脂を通して  $^{228}\text{Ac}$  を分離し、減容乾固して液性を調整した後、溶媒抽出を行った。水相の一部を分取し、Ge 半導体検出器による  $^{228}\text{Ac}$  の定量により分配比を評価した (図 2)。

【結果】予備実験として酸性水溶液から TODGA を用いて溶媒抽出実験を行った (図 3)。抽出剤濃度と Ac の分配比に相関があることがわかる。直線領域の傾きから TODGA の Ac への配位数を見積もると 3 配位となる。pH 緩衝剤として TES 等いくつかのグット緩衝剤の使用を検討したので、その結果を報告する。

[1] Aldrich K.E., et al., Inorganic Chemistry, 59 (2020) 3200-3206.

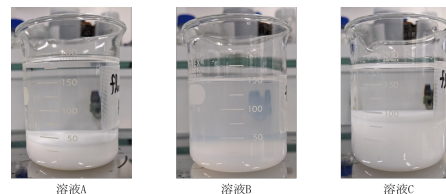


図 1. Th 水酸化物沈殿の生成によるバルクトリウム除去の様子 (溶液 A: pH10 まで NaOH 添加後、塩酸で pH8 まで戻す、溶液 B: pH4 で止める、溶液 C: pH8 で止める)

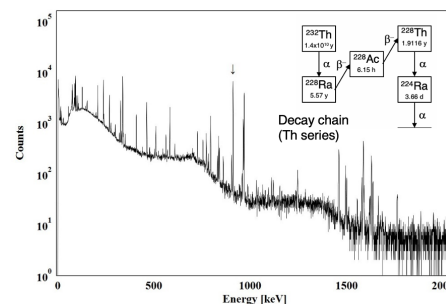
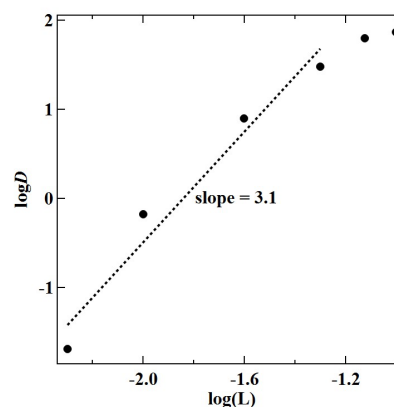
図 2.  $^{228}\text{Ac}$  の  $\gamma$  線スペクトル

図 3. TODGA による  $^{228}\text{Ac}$  の溶媒抽出 (水相: 3 M  $\text{HNO}_3$ 、有機相: nDD)

Investigation of Ac solvent extraction using  $^{228}\text{Ac}$  ~extraction behavior in pH condition~  
SHIRASAKI, K.

---

セッションE 原子力・アクチノイド化学及び関連分野

## 3E2

座長:鈴木 達也(長岡技術科学大学)

2023年9月23日(土) 13:40 ~ 14:40 A会場 (サタケメモリアルホール)

---

### [3A07] ジオポリマーに封じ込められた Srと Csの固定化メカニズム

\*木下 哲一<sup>1</sup>、中島 均<sup>1</sup>、鳥居 和敬<sup>1</sup>、佐々木 勇氣<sup>1</sup>、半沢 守<sup>1</sup> (1. 清水建設(株))

13:40 ~ 14:00

### [3A08] EDTA滴定によるウラン溶液の高精度値付け法の開発

\*三浦 勉<sup>1</sup>、高宮 幸一<sup>2</sup>、福谷 哲<sup>2</sup> (1. 国立研究開発法人産業技術総合研究所、2. 京都大学複合原子力科学研究所)

14:00 ~ 14:20

### [3A09] 陽イオン交換クロマトグラフィー法を用いたリチウム同位体交換機構に関する平衡論的研究

\*立花 優<sup>1</sup>、Kalak Tomasz<sup>2</sup>、田中 将裕<sup>3</sup> (1. 長岡技術科学大学、2. Poznan University of Economics and Business、3. 核融合科学研究所)

14:20 ~ 14:40

## 3A07 ジオポリマーに封じ込められた Sr と Cs の固定化メカニズム

(清水建設<sup>1</sup>)○木下 哲一<sup>1</sup>、中島 均<sup>1</sup>、鳥居 和敬<sup>1</sup>、佐々木 勇氣<sup>1</sup>、  
半沢 守<sup>1</sup>

ジオポリマーはアルカリ溶液とフライアッシュ等を練り混ぜて作製した硬化体で、セメントに代わる材料として、放射性廃棄物の固化への利用が期待されている。放射性廃棄物の固化への利用を目指す場合は、一定基準の圧縮強度を超えるだけでなく放射性核種の高い封じ込め性能があることが好ましい。我々のグループではフライアッシュと高炉スラグに様々な濃度の NaOH 溶液を混ぜて作製したジオポリマーの圧縮強度と吸着性能について研究した<sup>1)</sup>。Sr と Cs の吸着性能は高濃度の NaOH 溶液を用いると大きくなることを報告した。本研究ではこの先行研究を踏まえ、Sr と Cs の固定化メカニズムを解明することを目的とした。

1~5M の各濃度の NaOH 溶液を用いて、フライアッシュ : 高炉スラグ : NaOH 溶液を 7 : 3 : 5 の重量比で混ぜ合わせてジオポリマー試料を作製した。このジオポリマーを粉砕し、<sup>29</sup>Si-NMR (核磁気共鳴) と PALS (陽電子消滅寿命法) の測定を行った。また、同じ配合で SrCl<sub>2</sub> と CsCl をそれぞれ 2wt% 程度含むジオポリマーを作製し、その粉砕試料を用いて EXAFS (広域 X 線吸収微細構造) の測定を行った。

<sup>29</sup>Si-NMR より、使用するアルカリ濃度が高くなるほど四面体構造の SiO<sub>4</sub> の 4 つの O が O を介して AlO<sub>4</sub> と繋がっている構造体が多くなることが明らかになった (図 1)。また

EXAFS により、使用したアルカリ濃度によらず、Sr と Cs は違い異なる部位に存在していることが示された (図 2, 3)。PALS の測定により、使用したアルカリ濃度が大きくなると、直径 3.3 Å サイズの空孔 (3~4 員環) が多くなり、直径 9.5 Å サイズの空孔 (6~8 員環) は少なくなることが明らかになった (図 4)。これらを踏まえると図 5 に示すように、Sr は 3~4 員環の構造体の中に、Cs は 4~8 員環の構造体の中に存在していれば NMR、PALS、EXAFS の結果の整合性が合う。また高濃度の NaOH 溶液を用いると、図 5 とは異なり 6~8 員環の数が減り、3~4 員環が増え、更に、多くの AlO<sub>4</sub> を含むシリケート鎖の構造体から構成される。各サイズの環状構造物の量や AlO<sub>4</sub> の量の差が使用した各アルカリ濃度における吸着性能に影響したものと考えられる。

参考文献 1) Kinoshita et al., J. Nucl. Radiochem. Sci. 22, 7-13 (2022).

Immobilization mechanism of Sr and Cs encapsulated in geopolymer

KINOSHITA, N., NAKASHIMA, H., TORII, K., SASAKI, Y., HANZAWA, M.

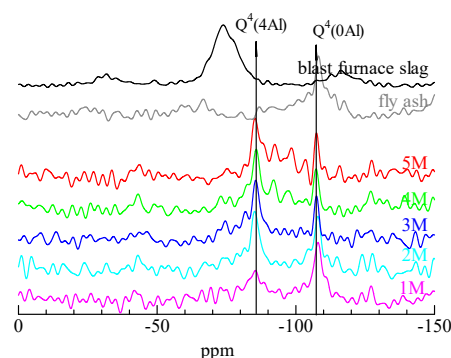


図 1 <sup>29</sup>Si-NMR スペクトル

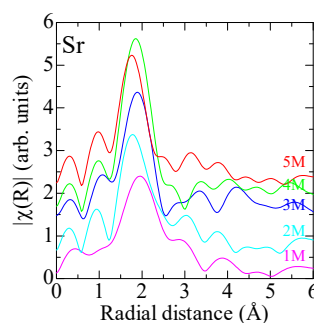


図 2 Sr の動径分布関数

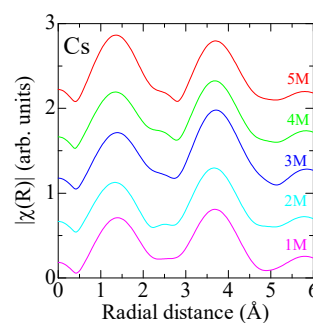


図 3 Cs の動径分布関数

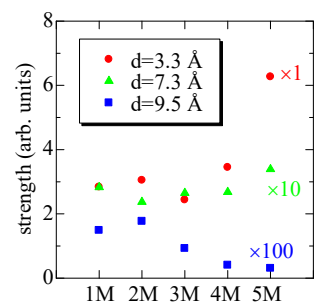


図 4 各空孔サイズの強度

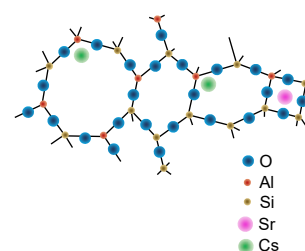


図 5 想定される Sr と Cs の吸着状態



## 3A08

## EDTA 滴定法によるウラン溶液の高精度値付け法の開発

(産総研物質計測<sup>1</sup>、京大複合研<sup>2</sup>)○三浦勉<sup>1</sup>、高宮幸一<sup>2</sup>、福谷哲<sup>2</sup>

**【緒言】** 無機標準液は無機分析の基準として、分析装置の出力信号を元素濃度（質量分率）と関係づける機器校正に用いられる重要な物質である。日本国内では、無機標準液は計量法トレーサビリティ制度（JCSS: Japan Calibration Service System）によって国家標準にトレーサブルな JCSS 標準液が認定事業者から社会に供給され、広く利用されている。しかしながら、ウラン標準液は JCSS 標準液として未整備であり、トレーサビリティが確保された標準液の供給が半導体産業、原子力産業、環境測定（水道法検査、種々の環境モニタリング）の広い分野の測定者から強く望まれている。この要請に対応するため、溶液中のウラン濃度を精確に値付けする分析法の開発を進めている。精確さの高い溶液中のウラン濃度測定法として、Davis-Gray 法と呼ばれる Fe(II)還元-K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>酸化滴定法<sup>1)</sup>が知られており、とりわけ精密な測定が必要な核燃料や保障措置の分析に用いられている。しかし、Davis-Gray 法は厳密な条件設定が必要な分析法であり、我々は比較的條件設定が容易な EDTA 滴定法<sup>2)</sup>によるウラン濃度値付け法の開発を進めている。ここでは開発中の EDTA 滴定法による溶液中のウランを値付けした結果について報告する。

**【実験】** 0.2 g 程度の三津和化学薬品製酸化ウランを 200 mL ビーカーに秤量した。秤量には島津製作所製分析天秤 ATX324 を用いた。秤量した酸化ウランに 69 %硝酸を添加し、加熱溶解した。室温まで放冷後、溶解液を 100 mL PFA ボトルに移し、1 %硝酸で 100g 程度に希釈し、ウラン溶液を調製した。調製したウラン溶液の 1 g 程度を 50 mL ビーカーに分取し、過剰量の EDTA 溶液を 50 mL ビーカーに添加し混合した。酢酸アンモニウム溶液により試料溶液の pH を弱酸性に調整後、0.1 g のアスコルビン酸を添加した。試料溶液を 10 分間程度加熱し沸騰させ、ウランを IV 価に還元した。室温まで試料溶液を放冷後、酢酸で試料溶液の pH を調製した。試料溶液に 0.01 % Xylenol Orange 指示薬溶液を加えた後、余剰分の EDTA を Bi 標準液で逆滴定し、試料溶液中のウラン量を測定した。酸化ウラン中の不純物量は、ウランを eichrom UTEVA resin カラムで分離除去<sup>3)</sup>した後、Analytik Jena PlasmaQuant ICP-MS で不純物元素を測定した。

**【結果】** 2 mg 程度のウランを含む 9 試料を EDTA 滴定した結果、0.2 %以下の相対標準偏差でウランを定量することができた。条件設定が容易な EDTA 滴定法によってウランの高精度な値付けが可能であることがわかった。なお、ICP-MS 測定結果から有意な量の不純物元素は検出されなかったため、EDTA 滴定値の補正は行っていない。

謝辞：本研究は京都大学大複合原子力科学研究所研共同利用制度を利用し、実施した。  
参考文献 1) K. J. Mathew *et al.*, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 282, 939, 2009., 2) A. Brück, K. F. Lauer, *Anal. Chim. Acta*, 37, 325, 1967., 3) T. Yokoyama, A. Makishima, E. Nakamura, *Anal. Chem.*, 71, 135, 1999.

Development of Precise Value Assignment Method of Uranium Solution by EDTA Titration  
MIURA T., TAKAMIYA, K., FUKUTANI S.

## 3A09

## 陽イオン交換クロマトグラフィー法を用いたリチウム同位体交換機構に関する平衡論的研究

(長岡技科大・量子原子力系<sup>1</sup>、Institute of Quality Science, Poznań University of Economics and Business<sup>2</sup>、核融合科学研究所・可知化センシングユニット<sup>3</sup>)○立花 優<sup>1</sup>、Tomasz Kalak<sup>2</sup>、田中 将裕<sup>3</sup>

【緒言】陽イオン交換クロマトグラフィー法を用いた同位体濃縮研究において、同位体分離挙動の程度を表す単位質量あたりの同位体分離係数( $\epsilon/\Delta m$ )は陽イオン交換樹脂の疎水性や表面粗さの違いにより大きく変化することがわかっている。<sup>1,2)</sup> しかしながら、用いられる溶離剤の価数の違いがこの係数にどのような影響を与えるのかについては明確でない。本研究では、3種類のリチウム溶離剤(酢酸カリウム、酢酸マグネシウム、酢酸カルシウム)を用いて陽イオン交換クロマトグラフィー法によるリチウム同位体濃縮実験を行い、リチウム同位体交換機構を考察した。

【実験】ウォータージャケット付きガラスカラム(長さ: 100 cm、内径: 9.0 mm)にスルホン酸基が修飾されたスチレン-ジビニルベンゼン共重合体(イオン形:  $H^+$ 、架橋度: 8 wt%、粒径: 74–140  $\mu m$ )を充填した。ウォータージャケット内に恒温水を流し、カラム内を 298 K に保った。高圧ポンプ(NP-KX-210, Nihon Seimitsu Kagaku)、ガラスカラムおよびフラクションコレクター(CHF100AA, Advantec)はテフロンチューブ(外径: 2.0, 3.0 mm, 内径: 1.0, 2.0 mm)を使ってそれぞれ接続した。3 M HCl を送液し、共重合体のイオン形を  $H^+$  とした。超純水を用いて流路内を洗浄した後、酢酸リチウム、リチウム溶離剤(酢酸カリウム、酢酸マグネシウムまたは酢酸カルシウム)の順で送液し、リチウム同位体の濃縮実験を行った。溶出液は一定量毎に回収した。溶出液に含まれる Li, K, Mg, Ca 濃度と Li-6 と Li-7 の同位体比は AAS(AA-6200, Shimadzu)と ICP-MS(7700x, Agilent)を用いてそれぞれ測定した。

【結果と考察】一例として、Fig. 1 に酢酸カルシウムを用いた場合における Li(I)同位体濃縮実験の結果を示した。溶出液量に対する Li(I)の同位体比変動曲線から各種溶離剤における  $\epsilon/\Delta m$  を算出した結果、酢酸カリウム系では  $1.93 \times 10^{-3}$  (前端部)、 $1.91 \times 10^{-3}$  (後端部)、酢酸マグネシウム系では  $8.46 \times 10^{-4}$  (前端部)、 $3.01 \times 10^{-3}$  (後端部)、酢酸カルシウム系では  $1.53 \times 10^{-3}$  (前端部)、 $1.42 \times 10^{-3}$  (後端部)が得られた。 $\epsilon/\Delta m$  値の差異は、 $K^+$ は  $Li^+$ と 1:1 でイオン交換するのに対して  $Mg^{2+}$ あるいは  $Ca^{2+}$ は  $Li^+$ と 1:2 でイオン交換したことや  $Ca^{2+}$ と比較して、スルホン基に対する  $Mg^{2+}$ の低い親和性により生じたものと考えられる。

【参考文献】 [1] Yu Tachibana et al., *J. ION EXCHANGE*, **29**(3), 41–47(2018); [2] Yu Tachibana et al., *Sep. Sci. Technol.*, **55**(12), 2183–2192(2020)

Equilibrium study on mechanisms of lithium isotope exchange reactions using cation exchange chromatography  
TACHIBANA Y., KALAK T., TANAKA M.

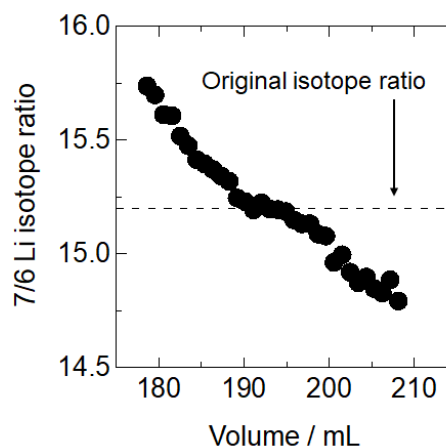


Fig. 1 Profile of Li isotope ratios in effluents in case of calcium acetate system.

---

セッションG 教育関連

## 3G1

座長:大浦 泰嗣(東京都立大学)、横山 明彦(金沢大学)

2023年9月23日(土) 13:40 ~ 14:40 B会場 (学士会館)

---

### [3B07] 広島大学における平和科目としての放射線教育

\*高橋 徹<sup>1</sup> (1. 広島大学先進理工系科学研究科)

13:40 ~ 14:00

### [3B08] STEAM教育手法を活用し、エネルギー・環境問題を基盤とした原子力人材育成の現状と課題

\*大矢 恭久<sup>1</sup>、栢野 彰秀<sup>2</sup>、濱田 栄作<sup>3</sup>、熊野 善介<sup>1</sup> (1. 静岡大学、2. 島根大学、3. 琉球大学)

14:00 ~ 14:20

### [3B09] 国際化学オリンピックでの放射化学関連テーマの出題

\*薬袋 佳孝<sup>1</sup> (1. 武蔵大学)

14:20 ~ 14:40

## 3B07 広島大学における平和科目としての放射線教育

(広島学進理工系科学研究科) ○高橋徹

広島大学では学部学生全員に対して教養的教育科目平和科目の履修を必須としている。本講演では、平和科目として開講している科目の一つである。放射線と自然科学について、開講することになった経緯、および実施状況について報告する。

広島大学では平和センターを設置し、平和学に関する研究・調査と資料の収集を行っている。2011年からは、教養的教育の4つの区分の一つとして「戦争・紛争、核廃絶、貧困、飢餓、人口増加、環境、教育、文化等の様々な観点から平和について自ら考え、理解を深めること」を目標とした、平和科目を開講し必須化し、全学部学生が履修している。受講生は2500名程度であり、約30科目を開講している。

本講演のテーマである「放射線と自然科学」は、この平和科目の発足以前の2002年から、教養科目として開講していた。開講当初より理学部、工学部、原爆医療研究所の教員が協力し、放射線に関する包括的な科学的知識を学んでもらうことを趣旨とし、筆者が全体のとりまとめを行ってきた。

その後本学において平和科目が設置され本科目も2017年より平和科目の一つとし開講されるに至った。現在受講生は150名程度であり、8名の教員によるオムニバス講義形式により、放射線の基礎、放射線を利用した科学研究、放射線の生物への影響、放射線の医療応用など、放射線に関する包括的な知識を教授する構成としている。特に2011年の東日本大震災における福島第1原子力発電所の事故が起こってからは、原子力発電の課題、福島第1原子力発電所事故直後の様子を取り入れるなど、この事故が忘れられないように伝えていくことや、原子力の利用についても取り入れている。

平和科目では受講生全員が平和に関するレポートを提出することを単位取得の条件として義務づけている。これについて昨年から話題となっている生成AI利用が大きな課題となっている。生成AIの利用やこれを利用したレポートの評価についてはその指針が完全に定まった状況とは言えない。特に平和科目のように多様な分野の多くの教員が担当する場合、生成AIに関する考え方以前に、知識や理解も教員によって大きく異なる。このような状況を踏まえ本年度は必要最低限と考えられる指針を策定して教員に配布し、授業の最初に受講生に提示してもらうこととした。これについては平和科目に限らず教育全般に関わる課題であり今後考察を重ねる必要があると考えている。



広島大学における教養教育の概念

## 3B08

## STEAM 教育手法を活用し、エネルギー・環境問題を基盤とした原子力人材育成の現状と課題

(静岡大<sup>1</sup>、島根大<sup>2</sup>、琉球大<sup>3</sup>)○大矢恭久<sup>1</sup>、栢野彰秀<sup>2</sup>、濱田栄作<sup>3</sup>、熊野善介<sup>1</sup>

【緒言】 エネルギー・環境問題を基盤とし、グローバルな視点で原子力のメリット・デメリットを理解し、かつ原子力・放射線に関するリテラシーの高い教育者を育成することが求められている。これまでに STEAM 教育を活用した問題解決型の実習プログラムを通して原子力のメリット・デメリットや役割を理解できる原子力人材プログラムを構築し、実践してきた。これまでの実践状況と今後の課題について報告する。

【人材育成手法】 本プログラムでは教員養成系大学 17 校が参加し、各大学での座学および実験を通じた基礎的な学習とともに、これらの学習を通してエネルギーや原子力について考える機会を提供した。座学は時間の有効活用のため、オンデマンド教材も用意した。思考力、判断力、表現力の育成を通して学びを生かすとともに、原子力・エネルギー関連施設見学・懇談を通じた体験的学習も取り入れ、エネルギー・環境問題や原子力・放射線に考える機会を提供した。これらの学習を基盤として、STEAM 教育手法を活用し教科にとらわれない領域横断型の学習指導案を作成し、放射線・原子力への興味やエネルギー問題の中での原子力の役割を考えることができる授業案を学生に提案してもらった。

【現状と課題】 2022 年度 9 月から始め、昨年度は 200 名をこえる学生が本プログラムに参加した。年度末に総合討論会を開催し、学生が作成した学習指導案をポスター発表形式で発表し、意見交換する機会を設けた。「様々な大学の教員や現職教員の方と自分の考えた授業について意見交換ができ、知見が深まった。」「実際に活用できる教育手法が多いことに驚いた。」などと好評であった。今回のプログラムでは学習指導案をポスター発表する形であったが、実際に学校で適用するにあたり、今後は模擬授業や作成された指導案の実践を通して、現状の学校教育でどの程度適用可能であるか評価していく予定である。

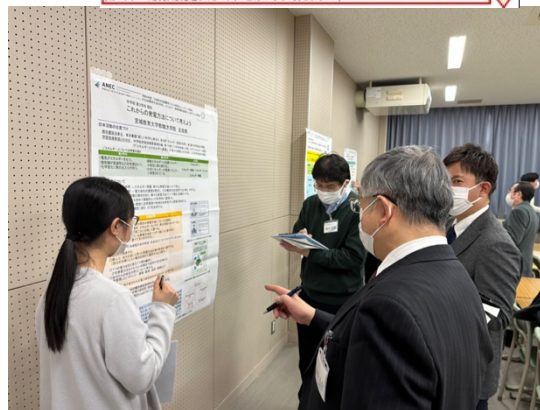


図 学習指導案ポスター例とポスター発表の様子

Present status of human resource development for energy & environment issues using STEAM education methods  
OYA, Y., KAYANO, A., HAMADA, E. KUMANO, Y.

## 3B09 国際化学オリンピックでの放射化学関連テーマの出題 (武蔵大 LASEC, 根津化研)○薬袋佳孝

【はじめに】国際化学オリンピック International Chemistry Olympiad, IChO は各国(地域)から派遣された高校生を対象としての化学の国際イベントとして、1968 年以来参加国の持ち回りでほぼ毎年開催されて来た。演者は、1998 年の高校化学グランプリ(現在の化学グランプリ ChGp)の全国展開の頃から、IChO 代表の国内選抜/強化に 2020 年まで日本化学会を通じて関与して来た。IChO/ChGp の出題を改めて通覧すると、放射化学とその関連分野に題材をとった出題が相当数に登っている。IChO について、内容の分類と出題意図の分析を試みたので、これを報告する。

【方法】IChO-International Information Centre (IChO-IIC)公式 web 上の 2019 年までの出題と解答(いずれもホスト国が作成)に基づいて、内容/出題意図の分析に当たった。また、事前に配布される準備問題集についても、同様の分析を試みた。

【結果と考察】IChO で放射化学関連テーマとして放射能や放射性核種に関する問題が出題されたのは第 16 回(1984 年, フランクフルト, 西独)以降である。本稿では IChO の展開の中で重要とみられる放射化学に関する出題を数件例示するに留める。

[第 16 回筆記問題第 1 問] 全 8 大問の最初で基礎化学を扱う。この年は A, B の 2 パートに分割し、A には環境での炭素循環を中心に  $^{14}\text{C}$  年代測定法に関する 4 小問、B には  $^{87}\text{Rb}$ - $^{87}\text{Sr}$  年代測定法に関する 2 小問が出題された。両パートともに、小問群の前に、同位体存在度や半減期などの数値を含むかなり詳しい導入部が置かれている。

IChO では出題範囲をシラバスとして事前に公開して来た。最近のシラバスでも、第 16 回 IChO で登場した放射壊変、壊変則、壊変様式などの概念に関わる出題には、問題文中での説明や事前に配布される準備問題集に類題を含むなどの措置が求められている。当時のシラバスでも、同様の措置が、出題には求められたと推察される。

[第 21 回(1989 年, ハレ, 東独)筆記問題第 4 問] 全 6 大問の内、無機化学/分析化学系の出題であった。 $^{32}\text{P}$  標識化合物(五酸化リン)を利用した非水溶媒(四塩化炭素)中での反応機構(求電子反応)の解明に関する小問 6 題で構成されている。人工放射性核種の利用についての初期の出題例で、比放射能の測定データから反応機構の解明に至る筋書きなど、過去の研究例をモチーフとしての高度な内容を含む出題であった。

[その他の出題例] 以上の 2 例は、IChO が東欧を中心とした地域的な国際イベントから西欧/北米を含む世界的な国際イベントに発展した時期のものである。以降、第 25 回(1993 年, ペルー、イタリア)では核医学利用の盛んな  $^{131}\text{I}$  の放射性核種としての性質を問う出題、第 35 回(2003 年, アテネ, ギリシア)では核反応の放出粒子を問う出題など、放射化学についての基礎的な設問もしばしば見られるようになった。

その一方で、第 28 回大会(1996 年, モスクワ, ロシア)では、ラザフォードらによるアボガドロ数の精密測定を取り上げている。 $^{226}\text{Ra}$  からの  $\alpha$  線量やヘリウム生成量の測定、 $^{222}\text{Rn}$  以降の放射壊変系列核種の  $\alpha$  壊変の補正などの本格的な出題であった。

【まとめ】IChO の発展の経過は放射化学関係の出題頻度と傾向に強く影響している。また、出題に当たるホスト国の放射化学についての研究環境や社会的重要性も関係している。ホスト国の放射化学が化学界にどのように影響しているかの指標かもしれない。

**Quiz on radiochemistry and its applications in over 50 occasions in International Chemistry Olympiad for high school students**  
MINAI, Y.

---

セッションG 教育関連

## 3G2

座長:末木 啓介(筑波大学)、篠原 厚(大阪青山大学)

2023年9月23日(土) 14:50 ~ 15:55 B会場 (学士会館)

---

### [3B10] 日本大学文理学部化学科学生実験での放射化学教育

\*小林 貴之<sup>1</sup>、山形 武靖<sup>2,1</sup> (1. 日本大学、2. 東京大学MALT)

14:50 ~ 15:10

### [3B11] 臨床検査技師国家試験問題を用いた放射化学教育

\*北澤 孝史<sup>1</sup> (1. 東邦大学)

15:10 ~ 15:30

### [3B12] 広島大学「放射線災害復興を推進するフェニックスリーダー育成プログラム」について

\*林田 耕臣<sup>1</sup> (1. 広島大学)

15:30 ~ 15:55

## 3B10

## 日本大学文理学部化学科学生実験での放射化学教育

(日本大学<sup>1</sup>、東京大学 MALT<sup>2</sup>)○小林貴之<sup>1</sup>、山形武靖<sup>2,1</sup>

【はじめに】2023年度現在、日本大学文理学部化学科での放射化学教育は、4単位科目機器・物理化学実験(含演習)で取り扱う6テーマ中の1テーマのみである。2019年度のカリキュラム改定前は実験以外にも学科専門講義科目として、放射化学1,2(各2単位)があり、環境化学などでも関連する放射化学分野の教育を行っていた。放射化学関連講義科目減少に伴い、機器・物理化学実験科目の学修内容について改善するため、放射化学に関連した知識の確認を小テスト実施により試みた。

【実験および小テスト】実験は午後90分×3コマ×4日間行う。2~3人で1組とし、同時に8組までとした。初日は講義科目が減少したカリキュラム変更に対応するため、放射化学の入門講義を実施した。その後GM計数管の操作に習熟させるため、作動電圧決定、自然計数率測定を行う。次にGM計数管と線源の距離を変え、計数効率と幾何学的効率を求め、最後にAl吸収板を用い、外部吸収曲線を作成、半減厚みを求めベータ線の最大エネルギーを求めさせた。

後半では<sup>238</sup>Uの娘核種の<sup>214</sup>Pbと<sup>214</sup>Biの放射化学分離実験を行い、<sup>214</sup>Pbと<sup>214</sup>Biの半減期を求め、レポートを提出する。また必要に応じ適宜、追加講義を行った。

小テストは学部共通LMSのBlackboardにて、各自が利用する情報端末から実験開始前までと、レポート提出締め切り後の2回実施した。テストは10問とし、原子の基礎や壊変形式よび放射線の性質など放射化学の基礎知識や実験レポートに必要な知識、さらに福島第一原子力発電所事故から放出された放射性核種などについて、単一もしくは複数回答の選択式とした。

【結果と今後】表1に実験の前後で実施したテスト設問毎の得点率、識別力(Pearsonの相関係数)、および標準偏差を示す。得点率は実験前後で82.0%から90.1%へと、ほとんどの問題で得点率が上昇、標準偏差が低下し、実験・演習により、理解度が向上したと判断している。実験前後で得点率が最も上昇したのは問題10の片対数グラフに関する問題であった。これは片対数グラフの利用経験が少なかったことが影響していると考えられる。最も得点率が低いのは問題8の壊変定数を求める問題で、標準偏差も最も大きかった。また問題13,14の壊変前後の原子番号と質量数の変化に関する問題の識別力が高いことから、放射壊変に関して、さらなる教育が必要と考えている。福島第一原子力発電所事故から放出された放射性核種に関する問題1と2は8割以上の得点率を示した。今後は問題の見直しを行うとともに、大学入学前の放射化学に関する知識の入手経路についてのアンケートも行い、授業改善を進める予定である。

問題ID	得点率		識別力		標準偏差	
	実験前	実験後	実験前	実験後	実験前	実験後
1	80.5%	83.3%	0.599	0.807	0.793	0.745
2	81.0%	85.2%	0.388	0.479	0.785	0.710
3	86.7%	94.1%	0.258	0.385	0.678	0.471
4	91.8%	92.9%	0.485	0.433	0.368	0.295
5	91.0%	90.2%	0.518	0.417	0.443	0.444
6	90.4%	98.0%	0.370	0.415	0.590	0.277
7	83.1%	86.3%	0.462	0.582	0.521	0.527
8	42.9%	66.7%	0.508	0.720	0.990	0.943
9	82.9%	87.5%	0.714	0.709	0.753	0.661
10	73.5%	96.1%	0.334	0.373	0.883	0.388
11	81.0%	96.3%	0.400	0.313	0.785	0.378
12	80.5%	95.8%	0.638	0.028	0.793	0.400
13	90.2%	91.7%	0.687	0.260	0.593	0.553
14	69.0%	81.5%	0.633	0.590	0.925	0.777
合計	82.0%	90.1%			3.265	2.439

Education of radiochemistry in student experiments at the Department of Chemistry, College of Humanities and Science, Nihon University.  
KOBAYASHI, T., YAMAGATA, T.



## 3B11

## 臨床検査技師国家試験問題を用いた放射化学教育

(東邦大理)○北澤 孝史

公表されている臨床検査技師国家試験問題中には、このごろは出題は減少傾向にあるが 100 問について 2 題程度の放射化学に関連する問題がある。その中には、放射化学の基礎的問題も多い。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）における臨床検査技師国家試験問題の使用例について解説する。本講義科目では従来、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が（出版の 1998 年、理学系大学院化学専攻で放射化学の問題は結構出題されていたが今はかなり減少気味である）若干難しすぎるところもあり、臨床検査技師過程でない学生に対しても有効に臨床検査技師国家試験問題のかなり基礎的な問題を講義で利用している。

臨床検査技師国家試験問題の選択制問題が講義に適当なものが多いことから学生の到達度をチェックする意味で活用している。下記は放射化学の講義での使用問題例である。単位の接頭語に関する問題も出ており、テラベクトルの大きさは重要である。また、半減期の長さを知っていないと解けない問題もあるが、臨床検査関連で用いられる放射性核種の半減期はしっかり知っていることが重要である。また、核医学の用いられる  $^{99m}\text{Tc}$  についての出題も多い。詳細については、講演で紹介する。

<p>原子核の崩壊が従う式はどれか。 ただし、<math>N</math> = 原子核の数、<math>t</math> = 時間、<math>\lambda</math> = 崩壊定数とする。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li><math>\frac{dt}{dN} = \lambda N</math></li> <li><math>\frac{dN}{dt} = -\lambda N</math></li> <li><math>\frac{dN}{N} = \lambda dt</math></li> <li><math>\lambda \frac{dt}{dN} = -N</math></li> <li><math>\lambda \frac{dN}{dt} = N</math></li> </ol>	<p><math>^{13}\text{C}</math> で正しいのはどれか。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>原子番号：6</li> <li>電子数：13</li> <li>陽子数：13</li> <li>中性子数：7</li> <li>質量数：13</li> </ol> <ol style="list-style-type: none"> <li>a, b, c</li> <li>a, b, e</li> <li>a, d, e</li> <li>b, c, d</li> <li>c, d, e</li> </ol>	<p>原子番号が多くなるのはどれか。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li><math>\alpha</math> 崩壊</li> <li><math>\beta^-</math> 崩壊</li> <li><math>\beta^+</math> 崩壊</li> <li>電子捕獲 (EC)</li> <li>核異性体転位 (IT)</li> </ol>
<p><math>^{99m}\text{Tc}</math> について誤っているのはどれか。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>半減期は 6.03 時間である。</li> <li>測定される放射線は <math>\gamma</math> 線である。</li> <li>親核種は <math>^{99}\text{Tc}</math> である。</li> <li><math>^{99}\text{Tc}</math> の核異性体である。</li> <li>シンチグラフィに広く用いられる。</li> </ol>	<p>半減期の最も長いものはどれか。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li><math>^{125}\text{I}</math></li> <li><math>^{99m}\text{Tc}</math></li> <li><math>^{51}\text{Cr}</math></li> <li><math>^{59}\text{Fe}</math></li> <li><math>^{57}\text{Co}</math></li> </ol>	<p>34 電磁波はどれか。2 つ選べ。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li><math>\beta</math> 線</li> <li><math>\gamma</math> 線</li> <li>赤外線</li> <li>電子線</li> <li>陽子線</li> </ol>
	<p>44 放射性同位元素でないのはどれか。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li><math>^{13}\text{C}</math></li> <li><math>^3\text{H}</math></li> <li><math>^{125}\text{I}</math></li> <li><math>^{32}\text{P}</math></li> <li><math>^{201}\text{Tl}</math></li> </ol>	<p>95 <math>10^{12}</math> に相当する接頭語はどれか。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>ギガ</li> <li>テラ</li> <li>デカ</li> <li>ヘクト</li> <li>メガ</li> </ol>

Radiochemical education using National Examination for clinical laboratory technicians  
KITAZAWA, T.

Radiochemical education using National Examination for clinical laboratory technicians  
KITAZAWA, T.

## 3B12 広島大学「放射線災害復興を推進するフェニックスリーダー育成プログラム」について

(広島大学<sup>1</sup>)○林田 耕臣<sup>1</sup>

【緒言】世界的にも特徴的な大学院教育プログラムである広島大学「放射線災害復興を推進するフェニックスリーダー育成プログラム」を紹介します。

1895年のX線の発見以来、人類は放射線の恩恵とともに様々な被ばくによる被害を受けてきました。その被害の最たるものは広島・長崎の原爆被害といっても過言ではありません。その広島の地に根差した総合大学である広島大学は、医学、理学、化学、環境学、社会学、人文学などの様々な学問分野において叡智を集積するとともに社会に還元することで原爆被害からの復興・発展に寄与してきました。また、チェルノブイリ原発事故、セミパラチンスク核実験被害、東海村 JCO 臨界事故の際も支援などに取組んできました。そして、これらの叡智を次世代に継承するとともに、放射線災害からの復興をリード出来る人材を育成する教育プログラムの構築に着手しました。

その最中、2011年3月11日に東日本大震災、東京電力福島第一原子力発電所事故(以下、「1F 事故」)が発生しました。広島大学は DMAT (災害派遣医療チーム) を同日に、翌12日に広島大学「緊急被ばく対策委員会」を設置し「緊急被ばく医療チーム」を派遣するとともに、福島県内外の環境放射線測定、避難所支援などを行ってきました。これらの活動を通して「放射線災害時に対応できる人材の不足」、そして「放射線災害復興は1つの学術分野で対応することは不可能である」ことを痛感しました。

そこで、これらの原爆被害復興支援や1F事故後の支援活動や経験などを結集し、広島大学大学院「放射線災害復興を推進するフェニックスリーダー育成プログラム(以下、「フェニックス P」)(平成23年度文部科学省「博士課程教育リーディングプログラム」採択事業)」を構築し、平成24年10月から学生を受入れています。

フェニックス P の目的は「幅広い学際的な知識を基盤として放射線災害に適切に対応し、明確な理念のもとで復興を指導できる判断力と行動力を有した、国際的に活躍できるグローバルリーダー(フェニックスリーダー)を育成する」ことです。そのために、放射線災害復興のリーダーに求められる能力として「国際力」「学際力」「マネジメント力」の育成を重要項目と設定しました。

また、フェニックス P の特徴は、4年制博士課程の「放射線災害医療コース」、博士課程前期後期一貫5年制の「放射能環境保全コース」「放射能社会復興コース」の3コースを設けた点です。学生は自身の専門に基づき1コースを選択し、修学・研究を進めますが、プログラム修了には他コースの演習や授業科目単位修得も必要です。また、実践的能力習得のためのフィールドワーク/インターンシップの単位取得も必須です。このような真に分野横断的な放射線災害復興人材育成プログラムは世界でも稀有です。

2022年3月時点で、世界には運転中の発電用原子炉は439基、建設・計画中152基との報告があります。また、今後も産業・医療での放射線の利用拡大や、宇宙開発と関連した宇宙放射線被ばく防護など、放射線と人類の関係は継続するものと考えます。そのため、世界的にも稀有で真に分野横断的な放射線災害復興分野の人材育成プログラムであるフェニックス P の必要性・重要性は継続、拡大していくと考えています。

About the "Phoenix Leader Education Program (Hiroshima Initiative) for Renaissance from Radiation Disaster" at Hiroshima University  
Yasufumi Hayashida

セッションH その他（境界分野への放射化学の新展開など）

## 3H1

座長:秋山 和彦(東京都立大学)

2023年9月23日(土) 10:00 ~ 11:00 A会場 (サタケメモリアルホール)

### [3A01] CdTe検出器を用いた負ミュオンによる考古学試料の3D元素イメージングの開発

\*邱 奕寰<sup>1</sup>、大澤 崇人<sup>1</sup>、武田 伸一郎<sup>3</sup>、桂川 美穂<sup>3</sup>、高橋 忠幸<sup>3</sup>、渡辺 伸<sup>4</sup>、水本 和美<sup>5</sup>、齋藤 努<sup>6</sup>、久保謙哉<sup>7</sup>、梅垣 いづみ<sup>8</sup>、下村 浩一郎<sup>8</sup>、二宮 和彦<sup>2</sup> (1. 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、2. 大阪大学、3. 東京大学、4. 宇宙航空研究開発機構、5. 東京藝術大学、6. 国立歴史民俗博物館、7. 国際基督教大学、8. 高エネルギー加速器研究機構)

10:00 ~ 10:20

### [3A02] 3D-CAD/CG及びメッシングを用いた放射線輸送計算空間への複雑なトポロジーの体系設計

\*阪間 稔<sup>1</sup>、佐瀬 卓也<sup>2</sup>、矢野 隼輝<sup>1</sup>、横田 健斗<sup>3</sup> (1. 徳島大学、2. 核融合科学研究所、3. 国立がん研究センター東病院)

10:20 ~ 10:40

### [3A03] 鉄鉱物の化学状態の変化に伴う環境中でのヒ素及びウランの移行・濃集挙動の解明

\*徳永 紘平<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)

10:40 ~ 11:00

## 3A01

## CdTe 検出器を用いた負ミュオンによる考古学試料の 3D 元素イメージングの開発

(JAEA<sup>1</sup>、阪大<sup>2</sup>、東大<sup>3</sup>、JAXA<sup>4</sup>、ICU<sup>5</sup>、東京芸大<sup>6</sup>、歴博<sup>7</sup>、KEK<sup>8</sup>)○邱奕寰<sup>1,2</sup>、大澤崇人<sup>2</sup>、武田伸一郎<sup>3</sup>、桂川美穂<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>、梅垣いづみ<sup>8</sup>、下村浩一郎<sup>8</sup>、二宮和彦<sup>2</sup>

**【緒言】** 近年、ミュオンによる非破壊元素分析法が開発され、先端的な分析手法として、リュウグウ試料や希少な文化財への応用研究が行われている[1,2]。我々は CdTe イメージング検出器(CdTe-DSD)を適用することで、ミュオンによる三次元元素分析法を開発した[3]。本発表では、新たに開発したミュオン三次元(3D)元素イメージングシステムの性能とそれを利用した考古学資料への元素分析の結果について報告する。

**【実験】** 図1に開発したイメージングシステムと J-PRAC における実験の様子を示す。このシステムは、4台の CdTe-DSD をピンホールコリメーターと組み合わせ、回転機構で CdTe-DSD を 3 回回転させた。様々の角度でサンプルの投影図を得ることで三次元的な画像を再構成する。本実験では、サンプルとして四谷一丁目遺跡 (現東京都 新宿区)から出土したるつぼを選択した。このるつぼは、SiO<sub>2</sub>を主成分として内部底面に金属の溶融物が確認できた。

**【結果】** CdTe-DSD から得られたエネルギースペクトルでは、サンプル由来の $\mu\text{Si}$ (75 keV)と $\mu\text{O}$ (133 keV)の X 線が確認できた。 $\mu\text{Si}$ と $\mu\text{O}$ の信号に注目して、12 の角度で得られた二次元投影図を作成して、投影図から再構成した 3D 画像を図 3 に示す。再構成した 3D 画像はるつぼの内側の底面の SiO<sub>2</sub>の分布を示している。今回の実験では、散乱由来の連続部分バックグラウンド成分が多かったため、資料底面に残っていた金属元素(Cu、Ag など)の分布は再構成できなかったが、今後セットアップを改造することによりバックグラウンドを低減することで、これらの元素を検出可能であると考えている。本研究により、開発した 3D イメージングシステムは実試料への応用が可能ということが示された。また、さらなる高度なシステムの開発についても進めており、これまでの進捗について報告する。

[1] T. Nakamura, et al.「Formation and evolution of Cb-type asteroid Ryugu: Direct evidence from returned samples」, Science 379(6634) eabn8671 (2023)

[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)

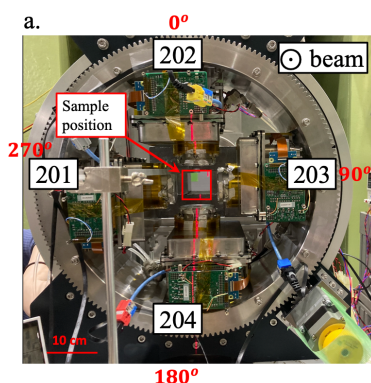


図 1 : 4 台の CdTe-DSD(201~204)を備えたイメージングシステム



図 2 : 分析に使用したるつぼ

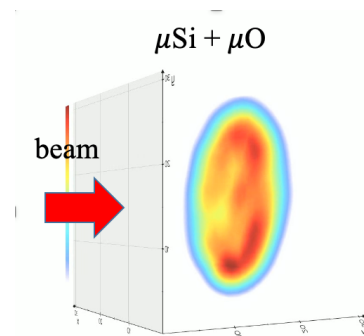


図 3 : 再構成した三次元画像

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

Chiu I., Osawa T., Takeda S., Katsuragawa M., Takahashi T., Watanabe S., Kubo K., Mizumoto K., Saito T., Umegaki I., Shinomura K., Ninomiya K.

## 3A02

## 3D-CAD/CG 及びメッシングを用いた放射線輸送計算空間への複雑なトポロジーの体系設計

(徳大院医歯薬<sup>1</sup>, 核融合研<sup>2</sup>, 国立がん研究センター東病院<sup>3</sup>)阪間稔<sup>1</sup>, 佐瀬卓也<sup>2</sup>, 矢野隼輝<sup>1</sup>, 横田健斗<sup>3</sup>

放射化学に留まらず放射線業界のモンテカルロ法に基づく放射線・粒子輸送シミュレーション計算は、様々な場面で有効活用されており、研究者・技術者にとっては、今では必要不可欠なツールとなっている。これまで世界中には数々のモンテカルロ・シミュレーション (MCS) 計算コードが開発されているが、本研究グループでは、国産コードの PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System, 日本原子力研究開発機構) を、主体的に医学応用・放射線防護から核融合発電開発の広範な研究活動に運用している。MCS 計算で最も重要な命題は、【実環境を実際に整備 (製作・建設) することなく、三次元の仮想空間内に実環境と同等の人体や構造体を高精度かつ精密な体系、いわゆる複雑なトポロジー群を設定すること】である。逆にいうと、今までは計算機ハードウェア性能 (CPU・GPU 性能やデータ転送のハード面での貧弱さ) や、三次元処理には欠かせない有限要素法を用いるプリポスト処理やソルバー処理、コードコンパイル処理が遅いアルゴリズム、3D-CAD 性能の不十分さなどのソフトウェア性能が非常に低かったために、そのような複雑なトポロジー群を 3 次元の仮想空間へ再現することは不可能であった。しかしながら、近年、計算機性能の飛躍的な向上と自動車・航空宇宙・船舶・クリエイター産業の汎用業界ニーズの高まりが相まって、プリポスト処理・ソルバー処理・3D-CAD (Computer Aided Design)/CAE (Computer Aided Engineering) の統合シミュレーション環境、3D-CG プロダクションの技術進展が著しい。PHITS 開発グループにおいても、同研究機構の燃料・材料工学 Dv のニーズを受けて 2020 年頃から原子炉燃料構造体の「PHITS を用いた核熱連成解析/熱流体解析コード Ansys Fluent との連成」を PHITS コードの機能に組み込んでいる。

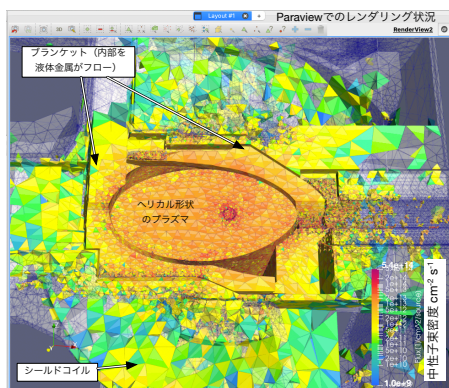


図2 Neutron flux tallied in tetrahedral discrete mesh bin on the next generation of nuclear fusion reactor.

Systematic design of complex topologies into a Monte Carlo simulation space for particle radiation transport using general-purpose 3D-CAD/CG and meshing solutions  
SAKAMA M., SAZA T., YANO S., YOKOTA K.

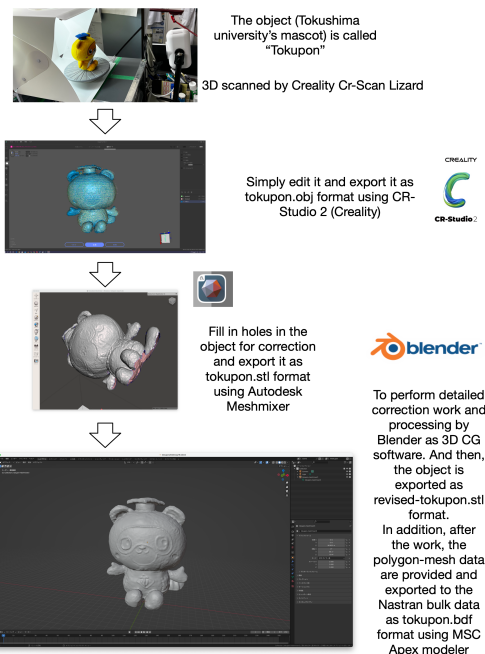


図1 複雑なトポロジーを 3D スキャナから読み込んで 3D-CG データ化までのワークフローの一例

放射化学分野を含む放射線業界において、放射線輸送挙動のソルバー処理の位置付けとなる PHITS では、複雑なトポロジー (人体や構造体など) のプリポスト処理の最新手法、すなわち汎用 3D-CAD/CG と設計開発プラットフォーム MSC Apex modeler を融合させることで、PHITS に対応する Nastran バルクデータをエクスポートすることが可能となったので、これらについて報告する。(HEXAGON 社のプレスリリース記事:「徳島大学と Helical Fusion 社、次世代ヘリカル核融合炉の三次元中性子輸送モンテカルロ・シミュレーション計算において MSC Apex の活用」、右下の QR コードをアクセス↓。)

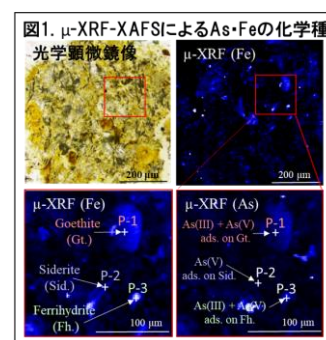


## 3A03 鉄鉱物の化学状態の変化に伴う環境中でのヒ素及びウランの移行・濃集挙動の解明

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

**【緒言】** 原子力機構人形峠環境技術センター（以下、人形峠センター）の鉱さいたい積場には、製錬で生じた鉱さいの他、坑水中の環境負荷元素を濃集した土壌堆積物が多量に存在する。これらの堆積物中の元素は現在の水質環境では安定に存在しているが、今後の人形峠センターの施設閉鎖に伴う水質環境の変化による二次的な溶出が懸念されている。つまり、溶存酸素濃度に応じて挙動が変化するヒ素(As)やウラン(U)は、現在の還元的な水質条件下では堆積物中に安定に存在するが、同たい積場閉鎖措置（脱水・覆土等）による酸化環境への変化に伴い堆積物から溶出する可能性がある。このような背景から、講演者等はこれまで主に吸着・脱離実験や放射光 XAFS 解析を用いて、環境試料中での元素の分子レベルの情報を引き出し、より本質的な化学的情報に基づいて人形峠センターにおける元素循環の素過程や環境影響を検討してきた。人形峠センターで採取した堆積物に対する酸化・嫌気的な水質を模擬した条件での溶出実験では、堆積物中に多く含まれる鉄(Fe)の化学状態の変化が As や U の挙動に大きな影響を与えることが示された。これは人形峠センターの堆積物において、Fe はシデライト( $\text{Fe}^{\text{II}}\text{CO}_3(\text{Sid.})$ 、嫌気下で安定)、フェリハイドライト( $\text{FeOOH}\cdot n\text{H}_2\text{O}(\text{Fh.})$ 、大気下で準安定)、ゲーサイト( $\alpha\text{-Fe}^{\text{III}}\text{OOH}(\text{Gt.})$ 、大気下で安定)の3つの化学種で存在し(図1)、水中の酸素濃度の上昇に伴い堆積物中の Fe の化学種が2価から3価の鉱物相へと変化し、その際に As を強く吸着したのではないかとということである。先行研究(Guo et al., 2013)より、Sid.から Gt.へと鉱物相が変化していく過程において As の吸着量が急増することが報告されている。しかし天然の環境にてこの現象を確認した研究は非常に少なく、またそのメカニズムは殆ど分かっていない。

**【結果・考察】** 本研究では、人形峠センター内で採取した堆積物への As の吸着・脱着の化学反応を、溶存酸素濃度を変えて調べた。放射光を用いた  $\mu\text{-XAFS}$  解析により、堆積物に確認される Sid.・Gt.・Fh.の Fe 鉱物相に、As は異なる価数・結合状態で存在することが分かった(図1)。また溶出実験前後の試料の比較より、Fe の化学種は嫌気下では変わらない一方、大気下では酸化的な価数に変化することが確認された。加えて室内実験より、大気下で Sid.から Gt.へと変化するときの As の吸着量と結合状態の変化を調べたところ、Fe 鉱物相の変化により



As の吸着構造も変化し、As の吸着量が上昇した。これらの結果は、人形峠センターにおいて深部の還元環境で生成した Sid.は大気下にて Gt.へと変化し、その際に生じる As 吸着量の増加が堆積物からの As 溶出を抑制することを示唆する。この天然の堆積環境における As の挙動を Sid.の化学反応から明らかにしたのは本研究が初めてであり、人形峠センターにおける放射性核種の環境汚染抑止技術の開発に資するだけでなく、その反応に潜む普遍的な物理化学原理の抽出が可能となり、放射性廃棄物処理や環境中での放射性核種の挙動の理解のための基礎情報となることが期待される。

**【謝辞】** 本研究の一部は、「廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金(固体廃棄物の処理・処分に関する研究開発)」(経済産業省)により実施した。

A study on the migration of arsenic and uranium in environments through iron minerals transformation  
Tokunaga, K., Takahashi, Y., Kozai, N.

---

部会

## 原子核プローブ部会総会

2023年9月23日(土) 12:40 ~ 13:40 A会場 (サタケメモリアルホール)

---



---

部会

## 教育部会総会

2023年9月23日(土) 12:40 ~ 13:40 B会場 (学士会館)

---

---

閉会式・若手表彰式

## 閉会式

2023年9月23日(土) 16:10 ~ 16:30 A会場 (サタケメモリアルホール)

---