

# 掃除用ロボットを用いた管理区域内床表面の汚染監視手法について

○栗田紗緒里<sup>#,A)</sup>、小淵隆<sup>A)</sup>、中田実希<sup>A)</sup>、岩田智恵<sup>A)</sup>、三宅均<sup>A)</sup>、加藤明己<sup>A)</sup>、林浩<sup>A)</sup>、  
田中将裕<sup>B)</sup>、磯部光孝<sup>B,C)</sup>、長壁正樹<sup>B,C)</sup>

<sup>A)</sup>核融合科学研究所 技術部

<sup>B)</sup>核融合科学研究所 研究部

<sup>C)</sup>総合研究大学院大学

## 概要

核融合科学研究所（NIFS）では2017年3月の重水素実験の開始に伴い、管理区域が新たに設定された。同時期より、管理区域内の清掃を目的に管理区域内の9つのエリアで掃除用ロボットの運用を開始した。NIFSでは月例の作業環境測定により、管理区域内の各作業場所に汚染がないことを確認している。本研究では、管理区域内床表面の汚染状況を確認するため、掃除用ロボットが回収した粉塵を試料として取り扱い、汚染監視を試みた。本稿では掃除用ロボットが回収した粉塵を用いた測定手法及び結果について報告する。

## 1. はじめに

NIFSでは1998年3月より大型ヘリカル装置（LHD）を用いた軽水素プラズマ実験を実施している。プラズマ実験に重水素（D<sub>2</sub>）ガスを用いるとプラズマの高性能化が期待されることから、NIFSでは2017年3月から2022年12月まで、D<sub>2</sub>を用いた重水素プラズマ実験（D実験）を実施した（表1）。D実験の開始に伴い、大型ヘリカル実験棟内に新たに管理区域が設定された。また、同時期より管理区域内の自動清掃を目的として掃除用ロボットの運用を開始した。

D実験ではD<sub>2</sub>の一部が核融合反応を起こすことにより、微量のトリチウム（T）と中性子を含む放射線、そして中性子により僅かではあるが放射化物が生成する[1]。なお、D実験により放射化された大気及び実験材料中に含まれる主な放射性核種として、Ar-41やBe-7、Mn-56、Co-60などが挙げられる[2]。生成したTはトリチウム除去装置により水（HTO）として除去され、中性子を含む放射線は施設の2m厚のコンクリート壁により十分に遮蔽され、生成した放射化物は安全管理計画に基づき保管管理している。その結果、これまでにNIFSで実施している放射線監視項目の結果は、全て研究所管理値未満となっている。また、NIFSでは作業環境測定として、月例のスミア採取、空气中放射性物質濃度測定等を実施し、各作業場所に汚染がないことを確認している。

本稿では管理区域床表面の汚染監視を目的として、掃除用ロボットが回収した粉塵を試料として測定を行った。また、得られた測定結果を用いて、表面汚染密度の評価を試みた。

表1. D実験実施期間

年度	実施期間
FY2016 - FY2017	2017/3/7 - 2017/7/7
FY2018	2018/10/23 - 2019/1/25
FY2019	2019/10/3 - 2020/1/10
FY2020	2020/10/15 - 2021/1/22
FY2021	2021/10/14 - 2022/1/21
FY2022	2022/9/29 - 2022/12/2

## 2. 試料採取及び測定、解析方法

### 2.1 試料採取

管理区域内の自動清掃には、iRobot 876、960の掃除用ロボットを10台使用した。清掃エリアについては、各掃除用ロボットに1から10の番号を割り振り、各掃除用ロボットの番号に対応するエリア（表2）において運用した。以降では、各掃除用ロボットを“LHD-〇〇（対応する番号）”と記述する。

清掃条件は、掃除用ロボットが毎日0時以降の夜間に稼働するように設定し、1か月間運用した。毎月末に各掃除用ロボットが回収した粉塵を20 mLポリエチレンバイアルへ全量採取し、これを試料として測定に使用した（図1）。

表2. 各掃除用ロボットの清掃エリア

掃除用ロボット番号	エリア名	清掃面積 [m <sup>2</sup> ]
LHD-01	分析エリア通路	79
LHD-02	汚染検査室	20
LHD-03	保守作業室への通路	167
LHD-04	機器保管室	23
LHD-05	本体室地下入口前	89
LHD-06	地下2階搬出入室	42
LHD-07	保管廃棄室（2）前の通路	38
LHD-08	空調機械室（南）	343
LHD-09	空調機械室（北）	343
LHD-10	地下1階搬出入室	184



図1. 試料採取手順

## 2.2 測定方法

表面汚染密度の評価期間は2017年4月から2023年6月までとした。この期間に掃除用ロボットが回収した粉塵試料を測定して、表面汚染密度の評価を行った。なお、LHD-10に関しては2017年9月から運用を開始したため、2017年9月から2023年6月までに回収された粉塵試料を対象に、測定及び表面汚染密度の評価を試みた。20 mL ポリエチレンバイアルへ採取した試料は質量を測定した後、オートウェルガンマシステム（アロカ（株）、AccuFLEX  $\gamma$  7001）を使用して1200秒、3リピートの条件で $\gamma$ 線エネルギー測定を行った（図2）。また、バックグラウンド試料には空の20 mL ポリエチレンバイアルを使用し、前述した測定条件で測定を実施した。

また、エリア毎に採取された試料を数本選定して、高純度ゲルマニウム半導体検出器（HPGe 検出器、ミリオンテクノロジーズキャンベラ（株）、GX3018、相対効率35%）を用いて3600秒の測定を行い、 $\gamma$ 線放射核種の定性分析を実施した（図3）。



図2. オートウェルガンマシステム



図3. HPGe 検出器

## 2.3 表面汚染密度の評価方法

$\gamma$ 線エネルギー測定で得られた試料の計数率が全て人工放射性核種由来と仮定して、正味計数率を  $n$  [cps]、計数効率を  $\varepsilon$ 、拭取り効率を  $F$ 、清掃面積を  $S$  [cm<sup>2</sup>]（表1参照）として、(i) 式を用いて、各エリアで採取された試料の表面汚染密度  $A_{SR}$  [mBq/cm<sup>2</sup>] の評価を試みた。

$$A_{SR} = \frac{n}{\varepsilon \times F \times S} \quad \dots (i)$$

ここで、計数効率 $\varepsilon$ の値は、オートウェルガンマシステムの測定エネルギー範囲内において、<sup>51</sup>Cr に対する計数効率 0.04 が最低値であるため、安全側の評価のためにこの値を採用した。また、拭取り効率  $F$  については JIS4504[3]に基づき、安全側の評価として 0.1 の値を採用した。

表面汚染密度の評価は、正味計数率が検出下限値以上となった試料を対象に行った。検出下限値  $n_{DL}$  は  $3\sigma$  法に基づき (ii) 式を用いて算出した。

$$n_{DL} = \frac{K}{2} \left( \frac{K}{t_s} + \sqrt{\left( \frac{K}{t_s} \right)^2 + 4n_b \left( \frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b} \right)} \right) \quad \dots (ii)$$

ここで、 $K$  は包含係数、 $t_s$  は試料の測定時間 [s]、 $t_b$  はバックグラウンドの測定時間 [s]、 $n_b$  はバックグラウンドの計数率 [cps] である。本稿では  $K=3$ 、 $t_s = t_b = 1200$  s として計算を行った。

## 2.4 入退人数の計数方法

大型ヘリカル実験棟管理区域内の各エリアのゲートや扉には SQRC 認証による入退管理システムが導入されており、入退人数が記録されている。各エリアで採取された試料の正味計数率及び試料量と、各エリアの入退人数の相関関係を調査するために、入退管理システムを導入しているエリア(LHD-01、02、03、04、05、10) について、入退履歴から入退人数のデータを抽出して比較を行った。なお、入退人数の計数条件について、各エリア共通して入室後の入室者の往来回数、滞在時間は加味せずに、入退人数のみを計数した。

## 3. 結果と考察

### 3.1 各エリアで回収された試料の内容物の傾向

各エリアで共通して回収された試料の主な内容物として、表3(a)より、埃や粉塵、木屑などが確認された。

特定のエリアで回収された試料の内容物として、表3(b)より、LHD-05の清掃エリアでは、ビニール被覆や比重の大きい金属ゴミが確認された。この理由として、LHD-05は本体室地下の入口近辺に設置されているため、本体室地下内の作業で生じたゴミを回収していることが推察される。また、LHD-05、06、08、09、10の清掃エリアでは、比重の大きいコンクリート片が高頻度で回収された。この理由として、これらのエリアは管理区域外と隣接しているエリア、または物品の搬出入やクレーンの利用があるエリアのため、コンクリート片が混入しやすい環境であることが推察される。

表3. 回収された試料の内容物

(a) 各エリア共通して回収された内容物	(b) 特定のエリアでのみ確認された内容物
<ul style="list-style-type: none"><li>・埃、粉塵</li><li>・木屑</li><li>・ラミクロス、紙片</li><li>・虫</li></ul>	<b>[LHD-05]</b> <ul style="list-style-type: none"><li>・ビニール被覆</li><li>・プラスチック片</li><li>・金属ゴミ（銅線、ばね、シールドなど）</li></ul> <b>[LHD-05、06、08、09、10]</b> <ul style="list-style-type: none"><li>・コンクリート片</li></ul>

### 3.2 表面汚染密度の評価

オートウェルガンマシステムの測定で得られた試料の正味計数率が、全て D 実験で生成した人工放射性核種由来のものと仮定して、(i) 式を用いて各エリアで採取された試料の表面汚染密度を算出した。算出した表面汚染密度の頻度分布を図4へ示した。また、頻度分布の図中の赤枠内に、各エリアで採取された試料の表面汚染密度の最大値を表記した。管理区域外への物品搬出基準値は、 $\alpha$ 線を放出しない核種については表面汚染密度が 4 Bq/cm<sup>2</sup>以下とされている。図4の結果より、各エリアにおいて検出下限値以上の試料が多数確認された。一方で、各エリアで採取された試料のうち、表面汚染密度の最大値は、LHD-04の清掃エリアで採取された 2.8 mBq/cm<sup>2</sup>

の試料であった。この結果より、これまでに各エリアで採取された全ての試料の表面汚染密度が、管理区域外への物品搬出基準値 (4 Bq/cm<sup>2</sup>) を大きく下回ることが確認された。

一方で、(i) 式を用いた表面汚染密度の算出方法では、清掃面積で正味計数率を除いているため、過小評価している可能性を考慮する必要がある。対して、拭取り効率、計数効率については安全側の評価を行うために最小値を設定しているため、過大評価する可能性が懸念される。また、本手法による汚染評価を異なる作業環境や施設に適用する際には、作業場所の床材、取り扱う放射性核種の種類等に応じて最適な効率値を選択することが、より適切な汚染評価を行う上で重要と考える。本稿では、清掃面積、拭取り効率と計数効率の条件等を加味しても表面汚染密度が物品搬出基準値の1000分の1未満であることから、各エリアの床表面に汚染は無いと評価した。

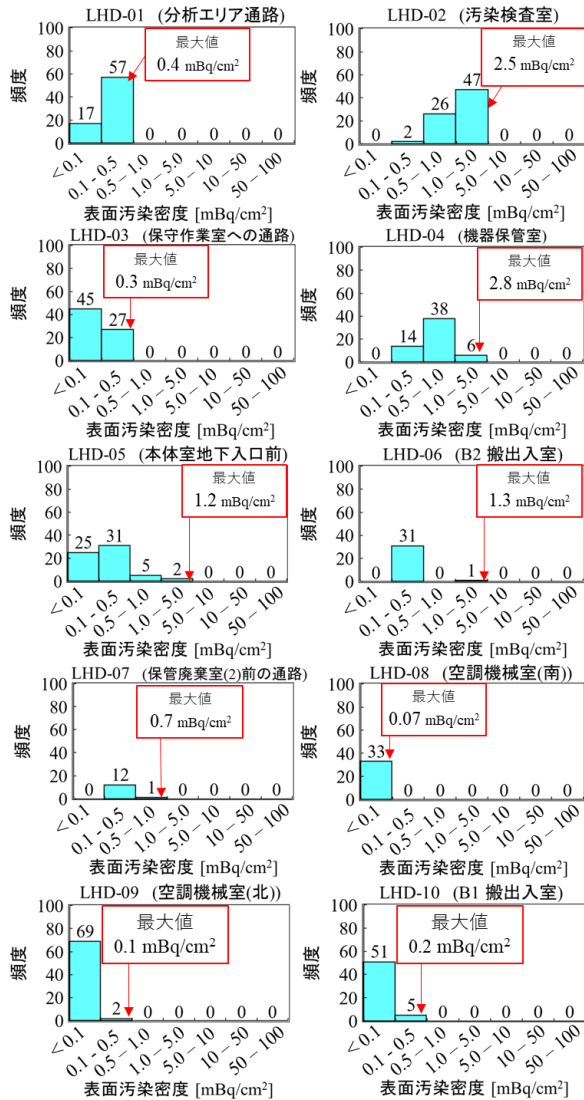


図4. 各エリアで採取された試料の表面汚染密度の頻度分布

### 3.3 試料の正味計数率と試料量、各エリアの入退人数の相関関係

採取された全ての試料の表面汚染密度は、管理区域外への物品搬出基準値未満であることが3.2節で確認された。本節では、採取された試料の正味計数率が何に起因しているかを調査するため、試料量及び入退人数との比較から考察を試みた。

採取された試料の正味計数率と試料量の経年変化を図5へ示した。なお、バイアル複数本分の試料が採取された月は、正味計数率と試料量をそれぞれ積算して結果をプロットした。図5より、正味計数率及び試料量は、いずれもD実験期間外の実験準備期間中に増加する傾向を示し、概ね同じ挙動を示すことが確認された。また、3.2節で仮定したように、試料の正味計数率がD実験で生成した人工放射性核種由来だと仮定すると、D実験期間中もしくは直後に試料の正味計数率が高くなることが予想される。しかし、図5から、D実験期間外(実験準備期間中)に試料量とともに正味計数率の値が増加することが確認された。実験準備期間中に試料量が増加する理由として、この期間に実験準備に係る作業者の管理区域への立ち入りが増え、人の出入りに伴い各作業場所に粉塵や埃、衣類の繊維等が蓄積しやすいことが挙げられる。また、採取された粉塵や埃等が含有する放射性核種からの放射線が、計数率として検出されていることが推察される。以上から試料の正味計数率は試料量、そして各エリアへの入退人数と相関があることが推測される。

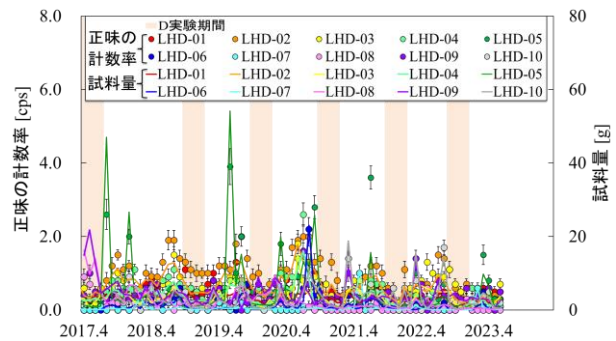


図5. 試料の正味計数率及び試料量の経年変化

そこで、各エリアで採取された試料の正味計数率と試料量の相関関係を図6に示す。図5と同様に、バイアル複数本分の試料が採取された月は、正味計数率と試料量をそれぞれ積算した結果を図中に黄塗でプロットした。図6より、いずれのエリアも試料の正味計数率と試料量の相関係数Rが0.8以上と、強い正の相関を示していることが確認された。一方で、回帰直線の傾きはエリア毎に差異が確認された。入退人数と試料の正味計数率及び試料量の相関関係を確認するため、入退管理システムが導入されているエリア(LHD-01、02、03、04、05、10)を対象に、入退人数と回帰直線の傾きを比較した。比較結果を表4に示す。表4より、LHD-01、02、03、04のように、1か月平均入退人数が1000人を超えるエリアで採取された試料の場合、回帰直線の傾きは0.14-0.16となる傾向が確認された。この要因として、

入退人数に比例してエリアに蓄積する粉塵や埃が増加し、これらが含有する放射性核種に起因して回帰直線の傾きが高計数率側に大きくなることが推察される。一方で、LHD-05の清掃エリアでは、1か月平均入退人数が1000人を超えているにも関わらず、回帰直線の傾きが0.08 - 0.09と小さかった。この理由として、表3より、LHD-05の清掃エリアで採取される試料の内容物に、比重の大きい金属ゴミが多く含まれることが要因として推察される。また、採取された金属ゴミのみを20 mL ポリエチレンバイアルに

入れて、オートウェルガンマシステムを用いて計数測定したところ、金属ゴミの計数率は検出下限値(0.2 cps)未満であった。このように、比重の大きい金属ゴミの計数率が低いことも、傾きを小さくする要因となっていることが推察される。LHD-10の清掃エリアでは、他のエリアと比較して回帰直線の傾きが小さいことが確認された。この要因として、LHD-10の清掃エリアでは入退人数が1000人未満であること、表3で示したように、採取される試料の内容物に比重の大きいコンクリート片が含まれることなどが挙げられる。LHD-06、07、08、09の清掃エリアには入退管理システムが導入されているゲートや扉がないため、本稿では入退人数と回帰直線の傾きの比較ができなかった。しかし、これらのエリアの回帰直線の傾きが小さい理由として、LHD-10と同様に、試料中に比重の大きい物が含まれていることが要因の一つとして挙げられる。

以上の結果から、試料の正味計数率は試料量及び入退人数と相関があることが示唆された。また、計数率は人の出入りに伴い蓄積する粉塵や埃等に含まれている放射性核種に由来するものであることが推察される。試料の計数率と試料量の散布図の回帰直線の傾きはエリアで採取される試料の内容物と入退人数に依存することが示唆された。

表4. 回帰直線の傾きと1か月平均入退人数

	(a)回帰直線 傾き	(b)入退人数 [人]
LHD-01	0.16	1742
LHD-02	0.14	5691
LHD-03	0.15	1345
LHD-04	0.15	5691
LHD-05	0.08	1522
LHD-10	0.09	783

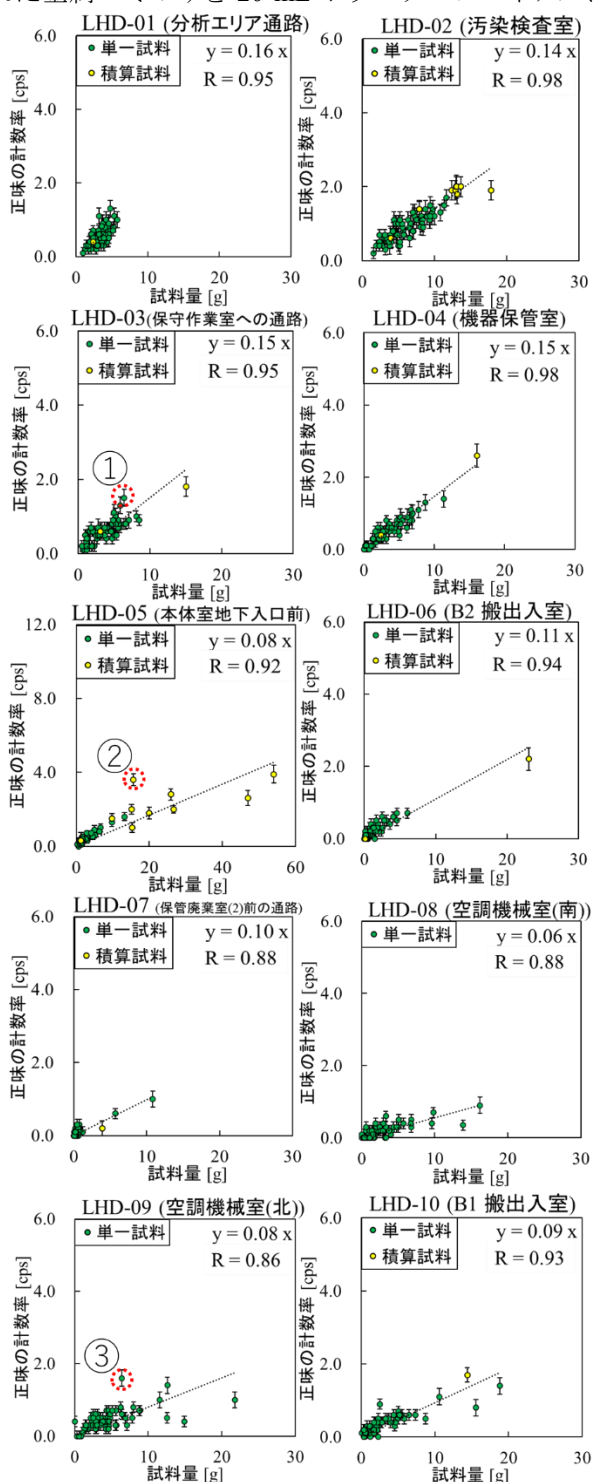


図6. 採取試料の正味計数率と試料量の相関関係

### 3.4 試料中に含まれるγ線放出核種定性分析結果

試料から検出された放射線が、粉塵や埃等に含まれる放射性核種に起因する可能性が3.3節で挙げられた。そこで本節では、試料中に含まれている放射性核種を同定するため、HPGe 検出器を用いてγ線放出核種の定性分析を行った。定性分析は、図6で示した回帰直線上の試料をエリア毎に一点選定して実施した。各エリアで採取された試料の定性分析結果を図7に示した。図7の結果より、いずれのエリアもPb-210やPb-212、Pb-214などの天然放射性核種のみが検出され、検出される放射性核種にエリア間で差異がないことが確認された。

また、回帰直線から高計数率側に外れた試料を3点選定し、HPGe 検出器を用いて定性分析を行った結果を図8に示した。なお、選定した試料は、図5中の①で示したLHD-03の清掃エリアで採取された試料、図5中の②で示したLHD-05の清掃エリアで採取された試料、図5中の③で示したLHD-09の清掃エリアで採取された試料の3つである。図8より、いずれの試料も天然放射性核種のみが検出され、人工放射性核種由来の計数ではないことが確認された。

以上の結果より、試料が含有する放射性核種にエ

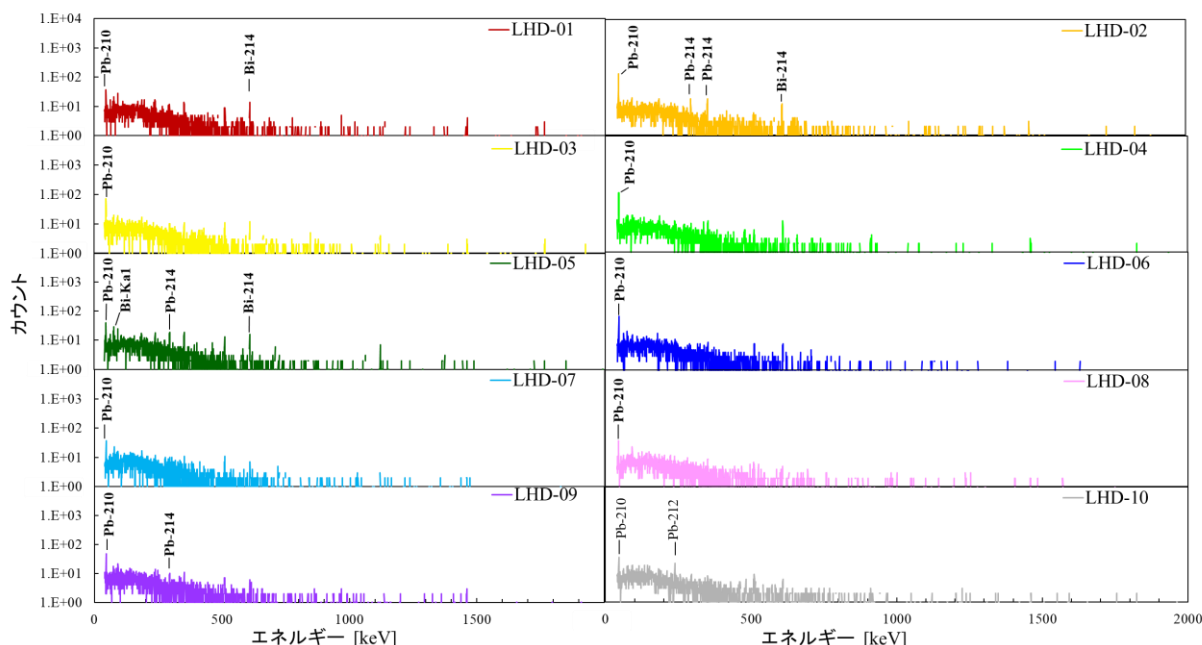


図7. 試料中に含まれる $\gamma$ 線放出核種定性分析結果  
 (回帰直線上の試料)

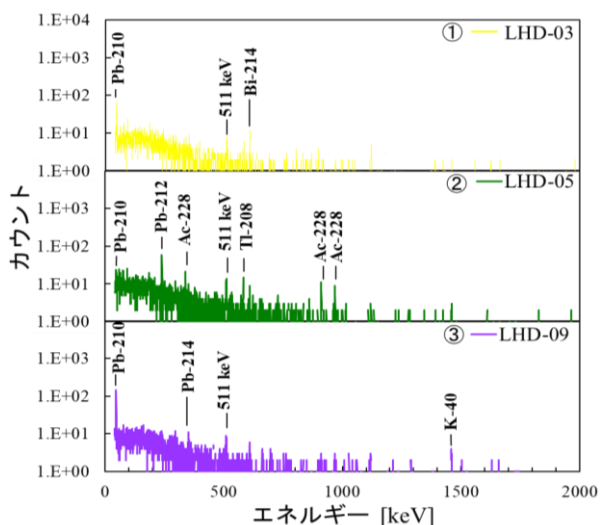


図8. 試料中に含まれる $\gamma$ 線放出核種定性分析結果  
 (回帰直線から高計数率側に外れた試料)

リア間による差異はなく、回帰直線上の試料と回帰直線から外れた試料が含有する放射性核種にも違いはないことが確認された。また、各エリアで採取された試料から検出された放射線は、D 実験で生成する人工放射性核種由来の放射線ではなく、埃や粉塵等に含まれる天然放射性核種に起因していることが確認された。

#### 4. まとめ

掃除用ロボットが回収した粉塵を測定試料として用いて、管理区域内床表面の汚染監視を試みた。本稿で提示した表面汚染密度の算出式を用いて表面汚染密度を評価した結果、これまでに採取された試料

は全て管理区域外物品搬出基準値 ( $4 \text{ Bq/cm}^2$ ) 未満であることが確認された。また、試料の正味計数率は試料量と入退人数に依存することが示唆された。 $\gamma$ 線放出核種の定性分析結果より、各エリアで採取された試料から検出された放射線は、天然放射性核種に由来することが確認された。また、各エリアで採取される試料が含有する放射性核種の種類に差異はなく、計数率の大小に関わらず、いずれの試料も天然放射性核種のみを含有することが確認された。

本稿で提示した汚染監視手法は、管理区域内の清掃と同時に試料採取をできる利点がある。また、スミア法と比較して、測定対象エリアの床全体に堆積している粉塵やそれに付着した遊離性汚染を概ね全量採取し、汚染評価できることも本手法の利点の一つである。一方で、本手法による汚染評価方法を異なる作業環境や施設に適用する際には、より適切な汚染評価を行う上で、各作業環境(床材、取り扱う放射性核種の種類)に応じた効率値の選択が重要と考える。

#### 参考文献

- [1] 大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所安全衛生推進センター、“LHD 重水素実験放射線管理年報 (2022年4月1日～2023年3月31日)”、2023年7月。
- [2] 自然科学研究機構核融合科学研究所ヘリカル研究部、“大型ヘリカル装置における重水素実験の安全管理計画<改訂版>”、2012年。
- [3] 一般財団法人日本規格協会、“JIS Z4504 放射性表目の線の測定方法— $\beta$ 線放出核種(最大エネルギー0.15 MeV以上)及び $\alpha$ 線放出核種”、2008年。