

# 廃炉の迅速化を可能にする高線量環境の炉内線量計測を開発

- 革新的な発光体材料の開発と高線量下での放射線計測への応用 -

## 【発表のポイント】

- ・福島第一原発の炉内と同等以上と思われる高線量(空間線量 1 kSv/h 程度)でも動作するリアルタイム線量計測の実証に成功した。
- ・既存の青色発光ではなく、光ファイバーを通りやすい赤色発光で、高い発光量を示す新しい材料開発が今回の実証を可能にし、信頼性の向上にも寄与できた。
- ・これにより、炉内の線量分布の様子を、外側からロボットの遠隔操作などによりリアルタイムに判断可能となる。
- ・燃料デブリなどの分布がより正確にわかり、迅速な廃炉のサポートが期待される。

## 【概要】

福島第一原発の廃炉作業を迅速に進めるには、空間線量が非常に高い炉内での線量測定が不可欠ですが、従来の放射線検出器は動作しません。東北大学未来科学技術共同研究センターの黒澤俊介 准教授(兼山形大学 客員准教授)および金属材料研究所の小玉翔平(博士課程 3 年)らのグループは、三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 センサ情報処理システム技術部光電磁センサグループ 林真照 グループマネージャー、東哲史 主席 研究員、笹野理 研究員、および、京都大学複合原子力科学研究所の田中浩基 准教授らとともに、20mの光ファイバーと新規発光体を用いて、空間線量 1 kSv/h 程度までの超高線量の幅広い線量領域で、リアルタイムに線量の測定が可能であることを初めて示しました。これにより廃炉作業の加速化が期待できます。本研究成果は、2020 年 3 月 16 日に「Applied Physics Express」に発表されました。本研究は、日本原子力研究開発機構「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業－課題解決型廃炉研究プログラム－」により実施した平成 30 年度及び令和元年度「アルファダストの検出を目指した超高位置分解能イメージング装置の開発」(研究代表者:黒澤俊介 准教授、参画団体:東北大学、三菱電機株式会社、日本原子力研究開発機構)、JSPS 科学研究費助成事業 19H02422, 19H04684, 18J21316 および京都大学複合原子力科学研究所 共同利用研究(P5-13) の成果の一部です。

## 【論文情報】

タイトル: Fiber-read radiation monitoring system using an optical fiber and red-emitting scintillator for ultra-high-dose conditions

著 者: Shohei Kodama, Shunsuke Kurosawa, Maki Ohno, Yuki Morishita, Hiroshi Usami, Masateru Hayashi, Makoto Sasano, Tetsushi Azuma, Hiroki Tanaka, Vladimir Kochurikhin

掲載誌: Applied Physics Express, Volume 13, Number 4

D O I: <https://doi.org/10.35848/1882-0786/ab77f7>

## 【詳細な説明】

2011年3月の東日本大震災に端を発する東京電力 福島第一原子力発電所の事故では、廃炉を安全かつ着実に、かつ迅速に行うことが求められています。1-3号機では、廃炉手順の一つとして燃料デブリなど高線量放射性“ごみ”の取り出しが、要求されています。これらの取り出しには、はじめに、「どのように“ごみ”が分布するか」を確認する必要があります。しかしながら、炉内の環境は非常に高い空間線量(1 Sv/h以上、注1)を示すことから、数分以内などの比較的短期間で、その場の線量を知ることができるリアルタイムの線量計、サーベイメータといった放射線計測機器の利用は不可能です。これは、人が立ち入れないという理由のほかにも、放射線検出器が動作しないという問題があるからです。

放射線は目では直接見えないので、放射線を「変換素子」で電子や光に変換し、さらに電気信号として読み出す方法が一般的です(図1、①参照)。「変換素子」としては、ガス、シンチレータ(液体、固体、注2)、半導体(固体)があります。なかでも、固体のシンチレータ結晶は、取り扱いが簡便なため、よく利用されています。

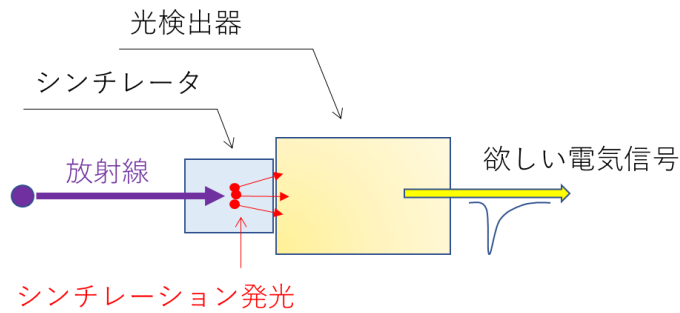
シンチレータとは放射線が入射することによって発光する材料のことです。シンチレータ自身も一定量以上の大強度の放射線を浴びると発光量の低下といった性能の劣化が起きますが、それ以上に発光した光を電気信号に変換する光検出器や回路が、高い線量の環境下ではノイズまみれになり、正常に動作しなくなります(図1、②参照)。つまり、シンチレータ(特に無機結晶)自身は、比較的放射線への耐性が、半導体などに比べて強いという特徴があります。

そこで、シンチレータは高い線量の炉内に入れるものの、光ファイバーを使ってシンチレータからの光を比較的線量の低いエリアまで取り出して、そこで光検出器で読み出すという方法が考えられています(図1、③を参照、以下「分離型」)。この分離型の長所は、高線量場でも測定可能である点に加えて、光ファイバーを取り付けたシンチレータのみを、ロボット(台車)に載せて高線量場に運び、測定することができるため、システムとしては単純になる点です。

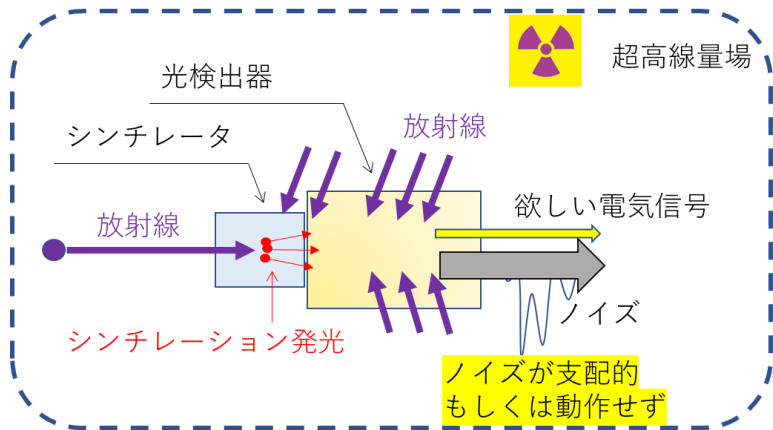
ただし、炉の外側の線量の低いエリアまでシンチレータの光を伝搬させる必要があるため、光ファイバーの長さは100 m程度、もしくは、それ以上の長さになる可能性があります。つまり、非常に明るいシンチレータである必要があります。また、光ファイバーは、青色・緑色よりも短い波長(おおよそ600 nm以下の波長)や赤外線よりも長い波長(おおよそ1300 nm以上の波長)では、ファイバー内の伝送効率が悪くなり、十分に光を遠方まで伝えられません(図2)。

一方で、既存のシンチレータの発光波長はおおむね550 nm以下の緑、青、紫、および紫外線発光のものが大半であり、分離型での測定は、実現が難しいと考えられています。そこで、高い発光量を持ち、なおかつ、600から800 nm程度に発光波長をもつ新しい材料の開発を、東北大学の小玉翔平・黒澤俊介を中心としたチームで行いました。

① 低線量下でのシンチレータを用いた線量測定（一般的な測定）



② 超高線量下での測定の問題点



③ 光ファイバーを用いてシンチレータと光検出器を分離した方法（分離型）

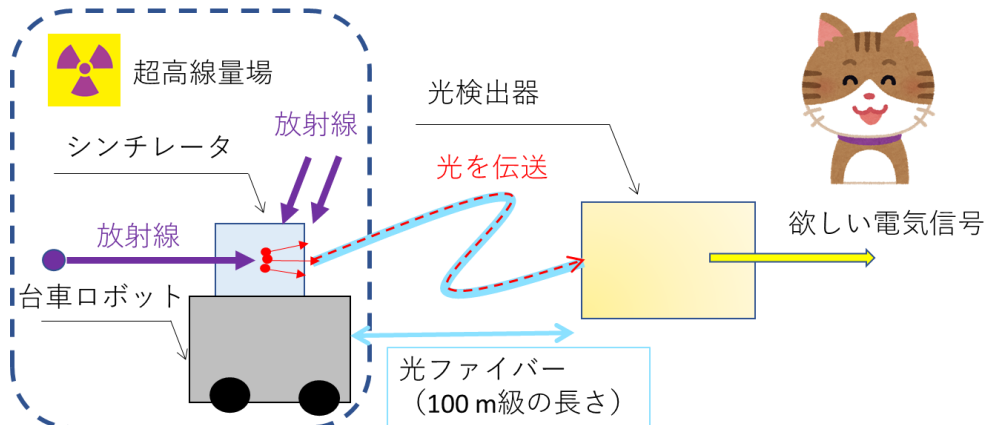


図 1 通常(低線量下)での線量測定方法(①)とその方法での超高線量場測定の問題点(②)、および、超高線量環境での線量測定(分離型、③)の概念図

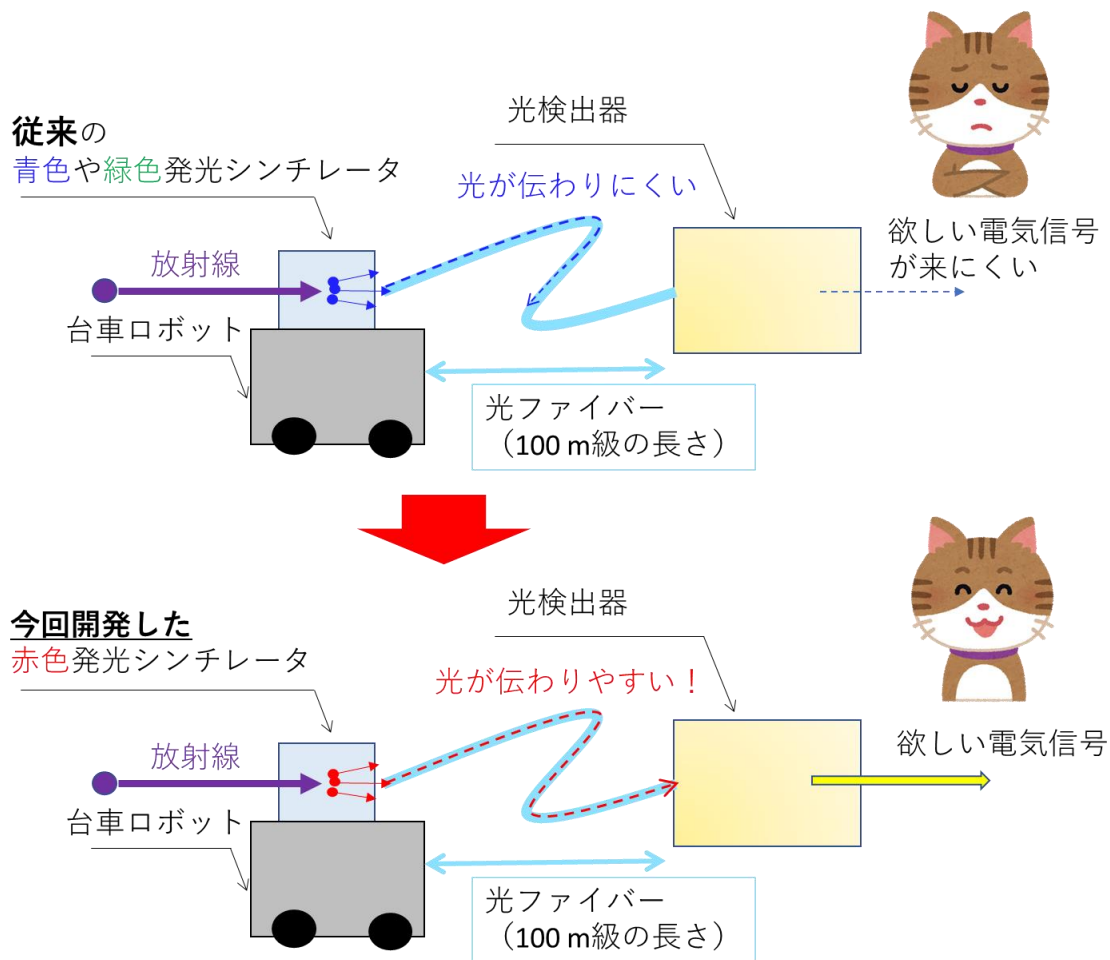


図2 分離型での赤色発光シンチレータを利用するメリットの概念図

そして、図3のように、 $\text{Cs}_2\text{HfI}_6$  と表記される黄から橙色の新規シンチレータを透明な樹脂でパッケージした素子を開発しました。この素子は、発光波長がおおむね 600 から 800 nm にわたり、かつ、発光量も既存の青色発光シンチレータで最高発光量と肩を並べる 50,000 光子/MeV という発光量(注3)を示しました。さらに、蛍光寿命がおおよそ 2 マイクロ秒(0.000002 秒)と既存の赤色発光体であるルビー(注4)よりもオーダーで 100 分の 1 程度以上の短い蛍光寿命を示しました。これらの特性から、分離型への応用が非常に期待できます。

5 mm

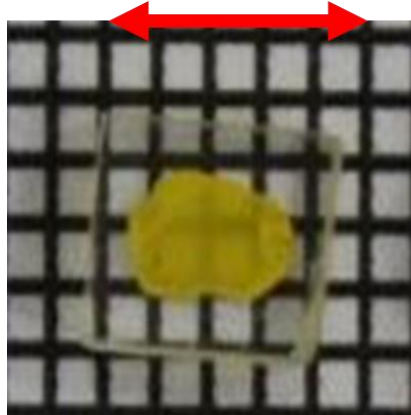


図3 開発した  $\text{Cs}_2\text{HfF}_6$  シンチレータ素子（放射線を見える化する素子）  
黄色い部分が  $\text{Cs}_2\text{HfF}_6$  結晶、透明な部分がパッケージ部分

そこで、京都大学複合原子力科学研究所のコバルト60照射施設にて、光ファイバーを用いた分離型の実証試験を行いました。コバルト60は 1 MeV 程度(1.33 および 1.17 MeV)のエネルギーを持つガンマ線を出し、当該施設のコバルト60線源を使えば、局所的ではあるものの、空間線量が最大で数 kSv/h という非常に強い線量空間も作ることができます。この環境は、廃炉の環境より高い線量と考えられるため、実証試験には最適な試験場です。

このコバルト60照射施設にて、分離型の実証装置で、あらかじめ線量の位置が分かっている場所にシンチレータ素子を置くことで、空間線量と発光量(信号強度)の関係性を求めました。光ファイバーとしては、まずはすぐに入手できる 20 m 長さのものを利用し、片方に図3のシンチレータ素子をつけて高線量の環境へ、もう一方は、分光器付き CCD カメラに取り付けて低い線量の環境で読み出しました。

その結果、図4のように、1 kSv/h までの幅広い線量の領域で測定でき、線量に応じて発光強度が大きくなっていることが分かりました。そこで、あらかじめ線量と発光強度の関係を調べておけば、分かっている線量を発光強度から推定できます。また、既存の赤色発光体であるルビーでも、同じように幅広い線量の領域で測定を行うことができましたが、ルビーに比べて  $\text{Cs}_2\text{HfF}_6$  は 10 倍程度の発光強度があることも分かりました。発光強度が大きい点は、100 m 級の長い光ファイバーを用いた時に懸念される光の伝送量低下の観点からも、大変有利です。さらに、光ファイバー自体が放射線によって光ってしまう現象(チェレンコフ発光やシンチレーション発光)が、高線量場ではノイズとして無視できなくなる恐れがありますが、本来欲しいシグナルが高い発光強度を持つことで、より信頼性の高いデータを取得することが期待できます。

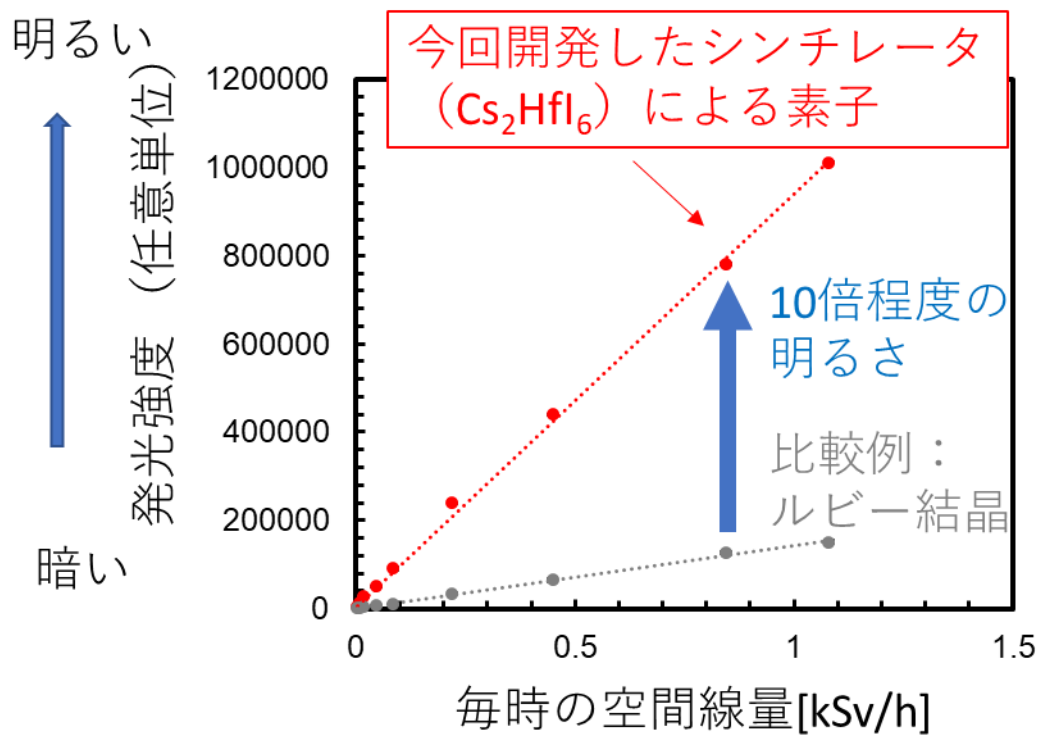


図4 超高線量場での、分離型による発光強度と空間線量との関係性

さらに、ルビー結晶は図5のように、同じ空間線量においても、明るさが一定になるのに30分以上かかることがわかりました。つまり、応答性が非常に遅く、リアルタイムに線量を測定することができませんでした。一方で、今回開発したCs<sub>2</sub>HfI<sub>6</sub>はすぐにタイムラグがなく発光するため、リアルタイムで正確な線量を測定することが可能とわかりました。

今後は、台車ロボットとより長い長さの光ファイバーを用いるなど、実際の現場での利用に向けた作業をすすめてまいります。

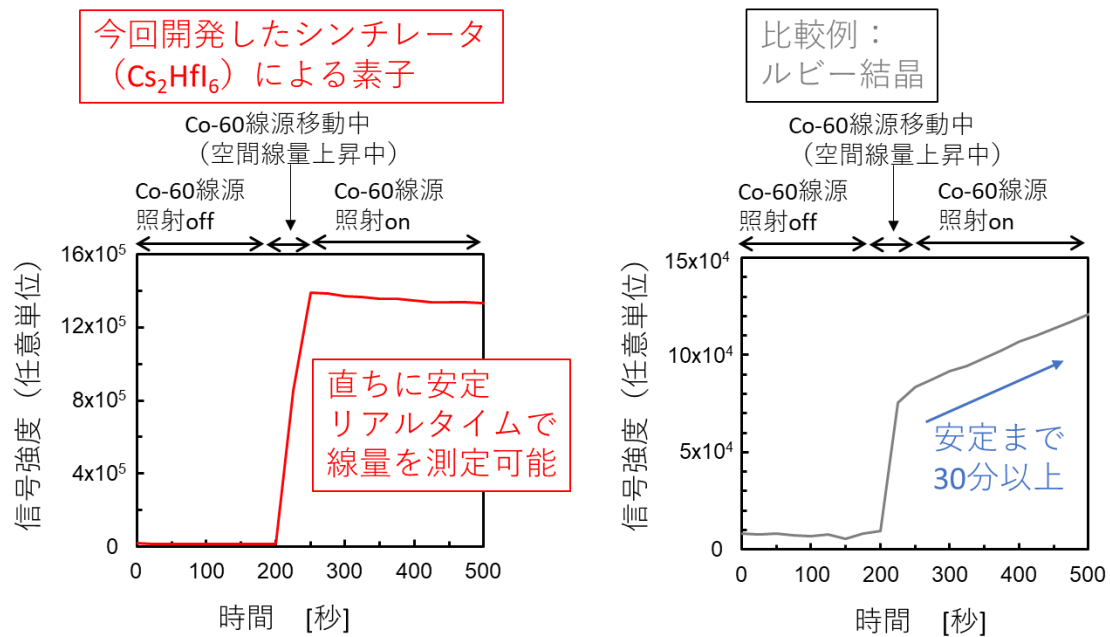


図5 コバルト60(Co-60)線源照射直後の Cs<sub>2</sub>HfI<sub>6</sub>とルビーでの応答の差

### 【用語説明】

- 注1. Sv/h : 1 時間あたりのシーベルト量。シーベルトは、放射線の被ばくが生体へ与える影響を表した単位。kSv/h = 1000 Sv/h。
- 注2. シンチレータ：ガンマ線などの放射線を光検出器で読み出し可能な紫外線や可視光に変換する素子で、光検出器と組み合わせることでガンマ線の検出ができます。
- 注3. 発光量：シンチレータの発光量は、ガンマ線（光子）1 個ないしはアルファ線などの放射線 1 個の入射で、どのくらいの光子が発生するかで表します。入射する放射線のエネルギーに比例して発光量が増大し、さらに放射線の種類によっても発光量が変わってきますので、ガンマ線 1 個のエネルギーが 100 万電子ボルト (MeV) の時の発光量を「光子/MeV」という単位で表します。
- 注4. ルビー： Cr (クロム) を添加した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (酸化アルミニウム) のこと。