

## PS-25 福島第一原子力発電所廃炉に向けた燃料デブリ探査技術の開発

海洋リスク評価系 \* 鎌田 創, 西村 和哉, 加藤 道男

### 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災によって発生した東京電力ホールディングス福島第一原子力発電所(以下1F)事故は、大量の放射性物質を外部に放出させ、人体への健康被害への懸念がいまだに残っている。現在も事故炉が一般公衆、環境に対するリスクは大きく、「事故によって発生した放射性物質に起因するリスクを継続的に下げること」を基本方針として、東京電力、国内外の原子力メーカー、研究機関が一丸となって1Fの廃止措置に取り組んでいる。原子炉格納容器(以下PCV)内に残存する燃料デブリは重大なリスク源であり、その取り出しは喫緊の課題である。原子炉格納容器内の燃料デブリは、冷却水の注入等の暫定措置によって極めて安定な状況にあることがPCV内のXe-153ガス濃度監視結果からわかっている。しかし、PCV内が大量の放射性物質で汚染されており、作業員が容易に近づけないため、内部状況を知ることが非常に困難である。そのため、地震や津波による構造材の損傷具合がわからないこともあり、不確定要素が非常に大きいことから、中長期的な観点から早急に取り出し作業に取り掛かるべきものとなっている。取り出し作業において、作業員が安全に取り出すためには、PCV内の燃料デブリの分布状況と炉内線量率分布を把握し、それを踏まえた工程を策定することが最も重要である。そこで、本研究では、燃料デブリの分布状況を把握するために、放射線計測技術、水中音響技術、遠隔操作技術を駆使した探査システムを開発することが目的である。海技研では放射線検出器を用いたデブリ定量技術とFBGセンサを用いたセンサを適用した炉内測位プローブを開発中である。本稿では、その開発状況の進捗を報告する。

### 2. 水中デブリ探査手法

本研究では、PCV内で冠水した燃料デブリを探査する方法として、放射線検出器と音響探査装置とを搭載した燃料デブリ探査装置を開発中である。これらは(1)シンチレータを適用したデブリ特性放射線測定システムの開発と、(2)FBGを用いたROV自己測位プローブの構築である。これらが達成されると、廃炉加速化のみならず、放射線治療場等高計数率場における放射線のエネルギースペクトル測定が実施でき、照射線量測定の高精度化にも貢献できる。また、原子炉格納容器(Primary Containment Vessel; PCV)内のデブリの分布を正確に把握することができる。

#### 2.1 シンチレータを適用した、デブリ放射線測定システム

シンチレータを適用したデブリ特性ガンマ線測定システムの完成を目指し、今回は、粒子弁別能とガンマ線検出エネ

ルギー分解能が良好であるCLYC( $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6(\text{Ce})$ )シンチレータ<sup>1)</sup>を適用することとした。シンチレータのテストとして、海技研にある校正用ガンマ線源を用いて応答を評価した。また、日本原子力研究開発機構で整備された中性子標準場を用いて中性子に対する応答も評価した。

シンチレータのデータ収集には、シンチレータからの光は光電子増倍管を接続することで電気信号に変換させて電荷積分型ADCを利用した。シンチレータを用いた粒子弁別測定として、波形識別法を使用した。これは、シンチレータに入射する放射線に対して異なる波形応答を示す性質を利用したものである。今回は、波形の立ち上がり成分として(発光の起点から125ナノ秒)、波形全体(1.5マイクロ秒)を同時に取り込んだ。

#### 2.2 音響探査装置による燃料デブリ探査手法

自己測位プローブとしてFiber Bragg Grating(FBG)の適用を考えた。FBGは、光ファイバに微小の回折格子を施したもので、比較的広い帯域の光を入射させて、FBGにて歪みがある場合に特定の波長の光が返ってくる現象を利用するセンサである。そこで音圧が印加されると振動によって歪が発生する機構をFBGに適用し受波器として利用できるかを実験で確認した。今回は、FBGを水槽に入れて、水中スピーカーから発する音に対する応答を観測した。FBGは薄いアルミ箔に張り付け浸水防止のシールを施した容器に入れた。

ファンクションジェネレータで矩形波のパルス信号を発生させ、水中スピーカー用アンプで増幅する。増幅されたパルス信号が水中スピーカーより発信されると、FBGプローブに音圧が加わり、FBGプローブ内に設置したダイヤフラムに歪を生じさせる。FBGセンサを使用して歪みを測定した。

水中スピーカーから発生した矩形パルスは、ハイドロフォンを併せて測定し、FBGプローブの応答と比較した。

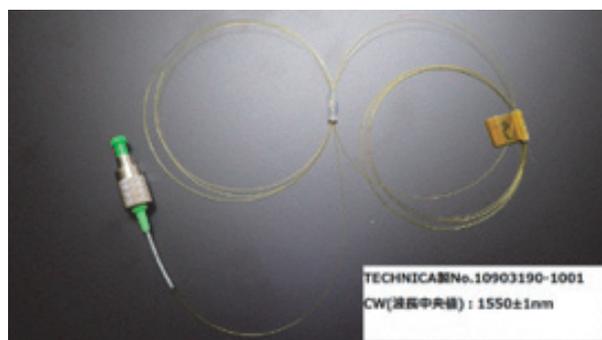


図1 FBG センサーの外観

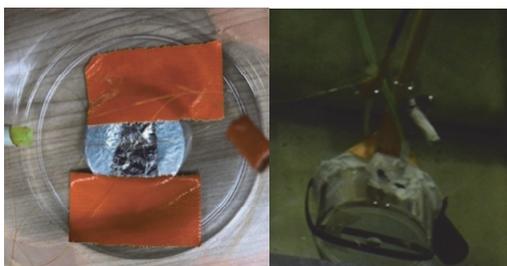


図2 上から見たFBG センサ（左），水密容器に入れたFBG センサ

### 3. 試験結果

#### 3.1 シンチレータを適用した，デブリ放射線測定システム

図1にCLYCシンチレータを用いた，中性子・ガンマ線弁別スペクトルを示す。縦軸は立ち上がり成分のシンチレータ発光量，横軸は，波形全体を積分したシンチレータ発光量である。図から，ガンマ線と中性子それぞれに対してクラスターが表示できていることがわかる。

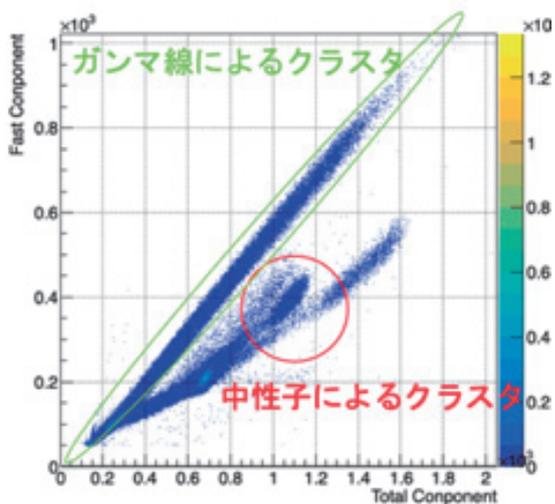


図3 シンチレータによる中性子・ガンマ線弁別スペクトル

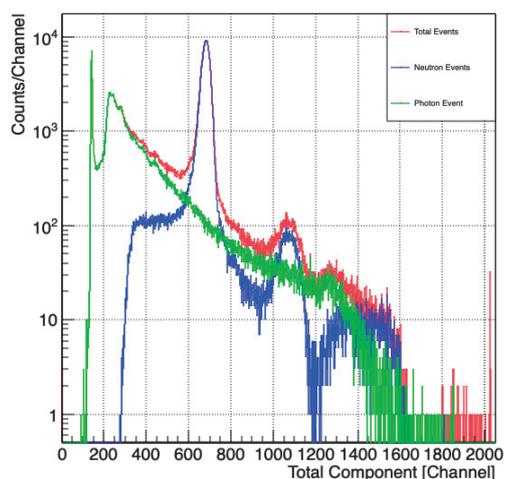


図4 CLYCシンチレータによる波高分布

また，図4に，シンチレータの波高分布を示す。ガンマ線と中性子それぞれに対するエネルギー測定まで可能であり，核種識別できることを確認した。福島第一原子力発電所炉心格納容器内は高線量の場合であることから非常にシビアな計測条件となるため，今後，効果的な遮蔽設計を行う必要がある。また，取り出された燃料デブリの計量管理には有効な測定手段であることが示せた。

#### 3.2 FBGを適用したデブリ探査

図5に，水中スピーカーから発信した音波を hidroホン（上）とFBG（下）で受信した時の波形を示す。これらより，音源を hidroホンと同様に観測できている。今後の課題として，自己測位システムにおける超音波発信器からの音波を受波する hidroフォンの代替としてFBGプローブを適用するためには，受波信号を取り出して超音波発振器からの距離を算出する定量的処理をするために，光ファイバー計測器のサンプリングレート 500 Hz よりも高いサンプリングレートのデバイスが必要である他，FBGプローブの受波感度を向上させるために周囲の音圧が適切にFBGセンサーの歪応答と Bragg 反射光による波長変化に反応するように，FBGプローブ設計の精緻化を計ることが重要である。また現在廃炉作業のデブリ探査で問題となっている燃料デブリと堆積物の識別測定に適用が考えられている Sub Bottom Profiler のアレイ受波器としての適用可能性を見いだせた。

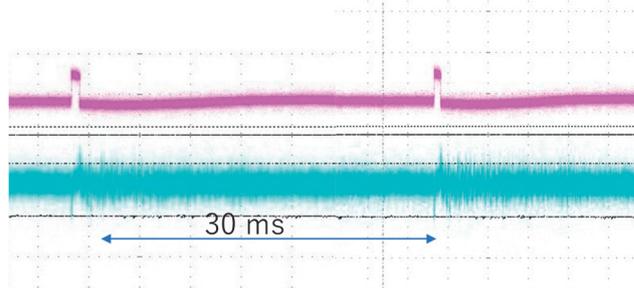


図5 上：hidroホンの受信波形と，下：FBG 応答波形

#### まとめ

波形弁別能が良好である新型シンチレータを適用した取り出し後の燃料デブリモニタへの開発妥当性を調べた。弁別能は良好であり，一定のエネルギー分解能でスペクトル測定できることがわかり，高精度で線量測定できることもわかった。また，FBGを自己測位システムに適用できる可能性を示し，定量的な評価への課題を抽出した。また，SBPを用いたデブリ堆積分布測定のアレイ検出器としての適用できる可能性も見いだすことができた。

#### 参考文献

1) N. D. Olympia et al., Nucl. Instrum. Meth. A810 (2019) pp. 132-139.