利用技術

$\beta\gamma$ 弁別型ファイバ検出器を用いた水モニタ



1 はじめに

東京電力福島第一原子力発電所(1F)の廃炉現 場にある汚染水には、γ線放出核種である¹³⁴Csや ¹³⁷Cs(放射性セシウム)だけでなくβ線放出核種で ある⁹⁰Srが含まれる。放射性セシウムは、原子炉の 冷却水にだけでなく水素爆発時に飛散した構内の周 辺環境に存在するのに対し、⁹⁰Srの周辺環境中の飛 散量は比較的小さい。すなわち、周辺環境での⁹⁰Sr の検知は原子炉建屋か保管されているタンクからの 漏えいが疑われる。空気中や水中での飛程が比較的 長いγ線は、直接測定することが簡単だが、飛程の 短いβ線は直接測定することが簡単だが、飛程の 短いβ線は直接測定することが難しく、早期の異常 検知や環境影響の評価のためリアルタイムのモニタ リング技術の確立が求められていた。モニタとして 求められる性能を以下に示す。

- 1) ⁹⁰Sr のみ検知(放射性セシウムとの弁別)
- 2) リアルタイムに測定(測定時間10分程度)
- ^{so}Srの検出下限値(放射性セシウムの混在 1,000 Bq/L:バックグラウンド線量率10µSv/h を想定)
- 4) 排水に含まれる周辺土壌の付着や蓄積等の影響を低減
- 5) 低コスト(複数個所への簡易設置可能)

当初,1F構内の排水路の海側出口には,排水路の水をくみ上げてダイレクトに水中のγ線及びβ線を測定するタイプの「側溝放射線モニタ」が設置さ

れていたものの,設備が大規模であることや 1F構 内に沈着した降雨等の影響で流れ込む放射性セシウ ムが妨害となる課題があった」。そこで、原子力機 構では、環境中における放射性セシウムの測定等に 利用されていた、比較的安価なプラスチックシンチ レーションファイバ (PSF) を応用した. β線及び γ線の両者に感度のある βγ 合算型排水溝モニタを 開発した²⁾。本モニタは、複数の排水溝にダイレク トに設置することにより、排水のくみ上げ等による 排水に含まれる周辺土壌の付着や蓄積等の影響を低 減する措置を必要とせず. β線及びγ線の両者に感 度を有するスクリーニング用として現場設置を行っ た。しかしながら、周辺土壌由来の放射性セシウム の妨害により、精度の高い⁹⁰Srの監視ができなかっ たため、運用としては、モニタで一定の警報レベル を超えた場合に、現場で排水路内の水をサンプリン グ・分析を行い、汚染水の漏えいがないことを確認 できるまで、排水路をせき止める方法をとっていた。 この運用では、最終的な判断は分析結果を待つ必要 があることから(数時間), "Srの漏えい有無の判 断の迅速化が望まれていた。また,詳細なβ線放出 核種の定量には、現場で水をサンプリングし実験室 で液体シンチレーション検出器等の専用機器で測定 する必要があり、人手、時間及びコストが課題であっ た。

このような課題を解決するため,前述した 1) ~5)の性能を満たす βγ 弁別型ファイバ検出器を用いた



図1 βγ弁別型ファイバ検出器測定部

水モニタの開発(図1)を行った。ここでは、モニ タの性能及び開発経緯についてまとめる。

2 プラスチックシンチレーションファイバ (PSF)

水中や環境での放射線測定技術として,事故直後 から PSF を用いた技術が 1F 周辺環境で用いられて いる。PSF は 1980 年代に高エネルギー物理の分野で 高速荷電粒子の飛跡測定を目的として開発された³⁾。 1F 事故後,放射線の位置を特定できる特徴や測定 対象に応じて検出部をフレキシブルに変形できる特 徴に着目し,除染前後の陸上での測定⁴⁾や農業用た め池底の分布測定等に利用されてきた⁵⁾。

PSFは、放射線に感度のあるプラスチックシンチ レータをコア材とした光ファイバ検出部に放射線が 入射することによって発生する光が、両端の光電子 増倍管に到達する時間差から放射線の入射位置を特 定できる(図2)。ひも型であるため、水中では対 象との接触面積が多くなり、比較的高い効率での測 定が可能となる。ファイバ型検出器は、検出部は比 較的安価に製作できる他、測定対象となる水と接触 面積が大きくなるため、高い効率で水中の放射性物 質の計測が可能である。なお、日本放射線エンジニ アリング(株)と原子力機構が共同で開発した製品で ある。



図2 PSFの原理と標準的なシステム構成

表1 核種の放出する主な β線エネルギーと水中での飛程

核種	最大エネルギー (MeV)	放出割合 (%)	水中での飛程 (cm)
⁹⁰ Y	2.28	100	1.103
90Sr	0.546	100	0.177
¹³⁴ Cs	0.658	70.2	0.228
¹³⁷ Cs	0.514	94.4	0.162

3 モニタの設計及び基本原理

β線とγ線を区別するため、 90 Sr- 90 Yの放出する β線の飛程を考慮し、10 mのファイバ(2 mmφPSF, SCSF-3HF:10本,(株)クラレ製)の片側のみβ線 を遮蔽するステンレス管(厚さ:0.025 cm)で覆う ことでγ線のみを測定できる部位を作り、樹脂製の 部分(厚さ:0.62 cm)との差分でβ線を検出する 検出器を考案した。図1に作製した検出部の概観を 示す。表1に示すように、放射性セシウムのβ線と比 較すると 90 Srの子孫核種である 90 Yが放出するβ線 は比較的エネルギーが高く水中での飛程が長い。こ の飛程を考慮し、βγ測定部は 90 Yのβ線のみを通 過させ、妨害となる放射線セシウムのβ線を遮蔽す ることを目的とし、6.2 mmの樹脂管を選定した。γ線





図4 キャリブレーション結果 (近似曲線の傾きがレスポンスを表す (55.0[Bq/L]/ [cps/m])

測定部については、⁹⁹Yの β 線を遮蔽するため、樹脂管に加えて、0.25 mm厚のステンレス管を選定した図3に⁹⁰Sr線源を樹脂管部分($\beta\gamma$ 測定部)及びステンレス管部分(γ 線測定部)の中心部で測定した結果を示す。このように、ステンレス管部位は樹脂管部位と比較して β 線に起因する計数率が小さいことが分かる。実際の機器には、アルミ製の芯の外側を γ 線測定部、内側を $\beta\gamma$ 測定部として配置した(図1)。

4 キャリブレーション

実際に 1Fの現場において,開発した機器を使用して ⁹⁰Sr を,定量できるように,既知の標準溶液を用いて校正を実施した。標準溶液には,実際に 1Fの原子炉建屋内で取得した放射性セシウム及び ⁹⁰Sr が含まれる水サンプルを,Ge検出器や ⁹⁰Sr を分離測定して値付けを行った溶液を希釈することで5種類の異なった ⁹⁰Sr の濃度(約1,000 Bq/L~10,000 Bq/L)を準備した。校正の条件とし,実際の設置現場(排水溝)を模擬することは難しかったので,簡易的な水槽内に機器を配置し,検出部を標準溶液で満たし,検出器の計数率を記録した。排水溝に比べ水槽の容積は異なるが,⁹⁰Sr-⁹⁰Y から放出されるβ線の飛程を考えると検出器のレスポンスに大きな違いはないと考えられる。ただし,バックグラウンド扱いとなる放射性セシウムのγ線については,容積の違いが大きく

影響するので注意が必要である。事前のモンテカル ロ計算コード(EGS4)を用いた検証では、水槽で求 めた検出器のレスポンス((Bg/L)/cps)は排水溝に 比べて-50%程度となることが分かっている。

校正の結果について図4に示す。ここで β 線由来 の計数率は、 $\beta\gamma$ 測定部の計数率と γ 測定部との計 数率の差分を検出部の長さで割り、単位長さ当たり の計数率として求めている。図に示すように、 100 Bq/L~10,000 Bq/Lの⁹⁰Sr 濃度まで計数率はよ い直線関係にあり、定量可能であることが確認でき る。近似曲線の傾きは、PSF1m当たりのレスポン スとして使用できる。また、同時に取得される放射 性セシウムの γ 線に対する感度としては、⁹⁰Sr のお よそ 2.5 倍であることが分かった。

上記で求めた検出器のレスポンスをもとに,下記の条件で⁹⁰Srの下限値を評価した。

 ・検出器周辺のバックグラウンド空間線量率: 10 µSv/h

・水中の放射性セシウム濃度: 1,000 Bq/L

評価式には、一般的な Currie の式を用いてバッ クグラウンド計数率(周辺からの γ 線+水中の放射 性セシウム)から 99.73%(3σ)で識別できる濃度 を求めた。評価結果を図5に示す。このように、測 定時間 150 秒を越えると目標値である 1,000 Bq/L を下回ることが分かる。現状の運用としては、この 評価結果や現場のニーズも踏まえ、600 秒ごとの測 定結果を用いることとしている。



図 5 βア弁別型ファイバ検出器の検出下限値評価例

5 長期耐久性試験

校正した機器を実際に 1Fの排水路に設置し、機 器の耐久性を確認すると共に、測定結果の信頼性を 評価した。βγ 弁別型ファイバ検出器は,前述のと おり放射線の入射した位置を特定できるので、検出 部を巻いた位置により4エリアに分けて計数率の変 動を600秒ごとに記録した。4章で述べたレスポン スを用いて計数率から求めた濃度と、排水路の水を サンプリングすることにより実験室で⁹⁰Srの濃度を 実測した結果と比較した(図6)。まず、上部と下 部の濃度トレンドを見ると、下部の濃度は、3月1日 付近の降水後,有意に上昇傾向が見られた。ただし, 上昇後は指示値の変動が見られなかった。また、定 期的に採取したサンプリングの結果から[®]Srの有意 な上昇が見られなかったことを考え合わせると、検 出器下部の指示値の上昇は、排水溝を流れてきた周 辺土壌中に含まれる放射性セシウムが沈着したこと によるγ線が原因と思われる。本検出器は、内巻き した $\beta\gamma$ 測定部と外巻きにした γ 線測定部の γ 線計 数の割合が変わらないことがβ線測定の前提となっ ている。よって, βγ測定部だけに土壌が付着し, γ線部の放射性セシウム由来の計数との間に差が生 じると, 偽計数の原因となる。一方, 上部検出器に ついては土壌の付着が見られず、降水後の指示値も 安定していた。この結果から、水中の [®]Sr の検出に は排水中の懸濁物の付着等の影響を受けにくい上部 の検出器情報の信憑性が高いことが示唆される。ま た、下部検出器のトレンドから検出器周辺における 土壌等の堆積が分かり、それによる影響の評価も可 能である。



図 6 βγ 弁別型ファイバ検出器の長期試験結果

以上の検証結果から, βγ弁別型ファイバ型モニ タの有効性が確認され,実用機の現場への導入が進 められることとなった。

6 まとめ

現場のニーズをくみ取り,早期に[∞]Sr を検出でき るβγ弁別型ファイバ検出器を用いた水モニタの開 発に成功した。本モニタは,

- 1) 放射性セシウムと弁別した⁹⁰Srのみの検知が 可能,
- (1) 任意の測定時間でリアルタイムに⁹⁰Sr の定量 が可能,
- 1,000 Bq/Lの放射性セシウムが混在し 10 μSv/hのバックグラウンド線量率の条件に おいて、⁹⁰Srの検出下限値が300 Bq/L(10分 測定)、
- 4)検出器の設置位置別のモニタにより、排水に 含まれる周辺土壌の付着や蓄積等の影響を低 減できる、
- 5) 排水のくみ上げ等を必要とせず,目的の場所 をダイレクトに測定可能であるため,比較的 低コストで管理が可能,

である。本モニタは現場設置の実用機が東京電力 HD(株)により製作され,2020年2月より現場運用 が開始された。原子力機構として,廃炉作業の速や かな推進に資するため,運用後のフォローを引き続 き行っていく。

[備考]

本稿に掲載している調査結果の内容は、原子力機 構ホームページに掲載されている"水中のβ線リア ルタイムモニタリング技術の開発に成功一福島第一 原子力発電所構内の排水路用放射線モニタとして運 用開始—"⁶⁾をもとにしており、クリエイティブ・ コモンズの下でライセンスされている。

参考文献

1) 東京電力ホールディングス(株), 側溝放射線モニタ

- 2) 眞田幸尚他, JAEA-research 2016-011, pp52 (2016)
- Binns, W. R., et al., Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., 216, 475-480 (1983)
- 4) 眞田幸尚, 光学, 45, 300-305 (2016)
- Katengeza, E. W., et al., Environ. Sci. Process Impacts., 22, 1566-1576 (2020)
- 6) (国研)日本原子力研究開発機構,水中のβ線リア ルタイムモニタリング技術の開発に成功-福島第 一原子力発電所構内の排水路用放射線モニタとして運用開始-(2020) https://www.jaea.go.jp/02/ press2019/p20013002/

((国研)日本原子力研究開発機構)