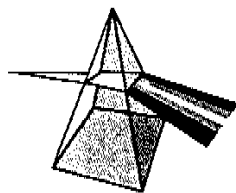


【技術報告】



シンチレーション光ファイバーを用いた高感度ガスモニタの開発

野崎 達夫 鳥居 達男* 高田 千恵

大洗工学センター 安全管理部
*もんじゅ建設所

資料番号: 101-6

Development of a High-Sensitivity Radioactive Gas Monitor
Using Scintillation FibersTatsuo NOZAKI Tatsuo TORII* Chie Takada
Health and Safety Division, O-arai Engineering Center
* Monju Construction Office

大洗工学センターの量子工学試験施設において、核変換技術開発の一環として大電流電子直線加速器の要素開発が行われている。

実証化段階において大電流電子直線加速器を高エネルギーで運転した場合、制動放射線による光核反応で空気等が放射化し、 ^{13}N 、 ^{15}O が生成することが予想される。

しかし、従来のガスモニタでは、この ^{13}N 、 ^{15}O に対する排気中濃度限度 ($6 \times 10^{-4} \text{ Bq/cm}^3$) まで直接、検出することは困難であった。そこで、シンチレーション光ファイバーを検出素子として用い、 ^{13}N 、 ^{15}O に対する排気中の濃度限度まで測定可能なガスモニタ検出器の開発を行った。

The basic research on a high power electron linac is under current investigation for the transmutation of fission products at Quantum Technology Development Facility in O-arai Engineering Center.

Nitrogen-13 and Oxygen-15 will be produced by the interaction between bremsstrahlung and air during operation of the high energy linac in the demonstrative stage. The detection limits of conventional monitors are not sufficient for the concentration limits of Nitrogen-13 ($6 \times 10^{-4} \text{ Bq/cm}^3$) and Oxygen-15 ($6 \times 10^{-4} \text{ Bq/cm}^3$) in exhaust air. Therefore, we have developed a new type of gas monitor detector that is packed with plastic scintillation fibers as the detection elements in order to be detectable to the concentration limits of Nitrogen-13 and Oxygen-15 in exhaust air.

キーワード

シンチレーションファイバー、 β 線用ガスモニタ、大電流電子加速器、窒素-13、酸素-15、クリプトン-85、量子工学試験施設、排気中濃度限度、同時計数、検出器

Scintillation Fibers, Gas Monitor, High Power Electron Linac, Nitrogen-13, Oxygen-15, Krypton-85, EGSA, QTF (Quantum Technology Development Facility), Detection Limit.

1. はじめに

大洗工学センターの量子工学試験施設において、核分裂生成物の消滅処理を目的とした大電流電子直線加速器（以下、「加速器」という）の要素開発が進められている。

加速器からあるしきい値以上のエネルギーの電子を発生させた場合、高エネルギーの制動放射線による光核反応でターゲットやビームダンプ周辺の空気が放射化する。 ^{13}N 、 ^{15}O の核種データを表1に示す¹⁾。

表1 ^{13}N および ^{15}O の核種データ

核種	半減期	β 線最大エネルギー (MeV)	親核種			断面積 ($\mu\text{b/MeV}$)	
			存在率*	核種	核反応		
^{13}N	9.96m	1.19	1.562	^{14}N	(γ, n)	10.55	310
^{15}O	123s	1.73	0.424	^{16}O	(γ, n)	15.67	32

* : 空気中の体積存在率 $\times$ atoms/molecule

従来より原子力施設において一般的に使用されているガスモニタ（プラスチックシンチレーション型）では、その ^{13}N 、 ^{15}O に対する作業環境

の空気中の濃度限度 ($1 \times 10^{-1} \text{ Bq/cm}^3$) までの検出は可能であっても、排気中の濃度限度 ($6 \times 10^{-4} \text{ Bq/cm}^3$) まで直接、検出することは困難であった。

そこで、実証化段階での加速器の高エネルギー運転に備え、プラスチックシンチレーション光ファイバー (以下、「PSF」という) を検出素材として、検出器の内容積を大きくするとともに、幾何学的効率を高め、モニタの高感度化を図った。

2. PSF の特徴

PSFは、プラスチックファイバーのコア材に放射線に有感なシンチレーション物質を用いたもので、高エネルギー物理学の分野で主に高速荷電粒子や中性子等の飛程測定で用いられてきた。また、PSFの材料は、プラスチックシンチレータであり、シンチレーション発光の減衰時間が短く、高速、高計数率測定が可能である等の特徴を有している。しかも、光ファイバーは、電磁的、化学的な耐環境性に優れ、細径、長尺といった特異な形状が適用可能であるといった特徴のほか、シンチレータ内で発した光を伝播し、直接両端に集光させることができる。

3. 実施内容

3.1 砲状型検出器

PSFの β 線用ガスモニタ検出器への適用の可否を確認するため、PSFを砲状に束ねた検出器を用いて、 β 線感度試験を行った。砲状型検出器の形状を図1に示す。

(1) 試験方法

砲状型検出器の β 線に対する感度のエネルギー依存性を評価するため、点線源による感度特性試験

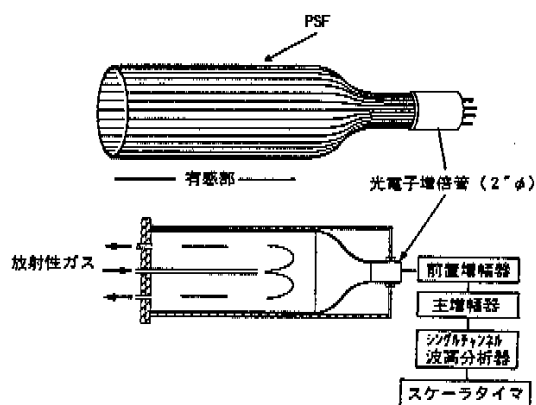


図1 砲状型検出器

および実ガスによる感度特性試験を行った。点線源による感度特性試験では、検出器の中央部に ^{14}C 、 ^{22}Na 、 ^{36}Cl 、 ^{90}Sr 、 ^{147}Pm 、 ^{204}Tl の6核種の線源（仏LMRI製 β 標準線源）を置き、計数効率をもとめた。また、実ガス校正試験では、検出器内に ^{85}Kr ガスを通気し、計数効率および濃度換算係数をもとめた。

(2) 試験結果

砲状型検出器の点線源による感度特性試験結果および実ガス線源（ ^{85}Kr ）による感度特性試験結果を表2に示す。これらの試験から以下の結果が得られた。

① ^{14}C 、 ^{147}Pm の低エネルギー β 線に対してほとんど感度を有しないものの、 β 線最大エネルギーが500keV以上の核種に対しては30%以上の計数効率を有する。

② ^{85}Kr 実ガスに対する濃度換算係数は、従来型のガスモニタ（約 $5 \times 10^{-3} \text{ Bq/cm}^3/\text{cps}$ ）よりも約6倍程度向上した。

③ 一方、バックグラウンド計数率が従来型のガスモニタよりも高くなり、高感度化のためには、バックグラウンドの低減が必要である。

3.2 基礎試験用平板型検出器

3.1の試験の結果から、検出限界濃度を向上させるためには、バックグラウンド計数率の低減が必要となった。

バックグラウンドの要因としては、宇宙線等の自然放射線および光電子増倍管からのサーマルノイズが考えられる。これらのうち光電子増倍管からのサーマルノイズの低減を目的に同時計数法を用いた検出器を製作した。この同時計数回路を便

表2 砲状型検出器の感度特性試験結果

(a) 点線源による感度特性試験

核種	β 線 最大エネルギー (MeV)	計数効率 (%)
^{14}C	0.156	0.08
^{147}Pm	0.225	2.11
^{22}Na	0.546	33.0
^{36}Cl	0.704	42.1
^{204}Tl	0.763	33.3
^{90}Sr	0.546 (2.268)	51.9

(b) ガス状線源（ ^{85}Kr ）による感度特性試験

核種	β 線 最大エネルギー (MeV)	計数効率 (%)	濃度換算係数 ($\text{Bq/cm}^3/\text{cps}$)	検出限界濃度 (Bq/cm^3)
^{85}Kr	0.687	29.0 (47)	8.27×10^{-4} (5×10^{-3})	1.59×10^{-3} (3×10^{-2})

() 内は、従来型ガスモニタの値

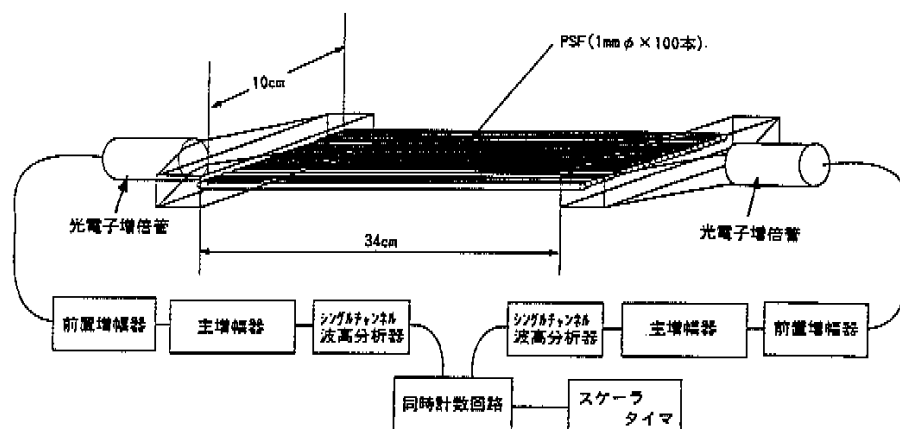


図2 基礎試験用平板型検出器

用した検出器のバックグラウンド計数率の低減効果の確認を目的に β 線源を使用して試験を行った。また、あわせてPSFのタイプの違いによる感度比較試験を行った。

そこで、同時計数法を用いた検出器のバックグラウンド計数率の低減効果の確認を目的に基礎試験用平板型検出器を製作し、 β 線源を使用して試験を行った。また、あわせてPSFのタイプの違いによる感度比較試験を行った。

検出器は、1mm ϕ $\times$ 34cmのPFS100本を平面に束ね、両端にそれぞれ光電子増倍管を接続し、両端からの信号を同時計数する方式とした。基礎試験用平板型検出器の形状を図2に示す。

(1) 試験方法

バックグラウンドの低減効果を確認するため、同時計数回路使用時、不使用時および鉛遮蔽を施した時のバックグラウンド計数率を測定した。

また、タイプの異なる2種類のPSFを使用した検出器を製作し、その中央部に ^{14}C 、 ^{22}Na 、 ^{36}Cl 、 ^{90}Sr 、 ^{90}Y 、 ^{147}Pm の5核種の点線源を置き、それぞれ感度を比較した。

使用したPSFは、屈折率の異なる二つのクラッドを2重にしたもの（タイプA）とクラッドが1重のもの（タイプB）である。

(2) 試験結果

基礎試験用平板型検出器のバックグラウンド計数率低減効果試験の結果を表3に、PSFの種類の違いによる感度試験の結果を表4に示す。これらの試験結果は以下のとおりであった。

① 同時計数回路を使用した場合、使用しないときに比べバックグラウンド計数率が1/2に、さら

に、検出器を垂直にし、鉛遮蔽を施した場合は1/4に低減する。

② クラッドを2重にしたPSFの方がクラッドが1重のPSFに比べ最大で20%感度が良い。

表3 平板型検出器のバックグラウンド低減効果試験結果

検出器状態	バックグラウンド計数率 (cps)
・検出器の片端だけの計数率（同時計数回路なし） ・検出器を水平に設置	21.1
・同時計数回路使用 ・検出器を水平に設置	10.2
・同時計数回路使用 ・検出器を垂直に設置 ・鉛ブロック（5$\times$3$\times$20）を上・下部横1列に4個および左右に各4個設置	5.20

表4 PSFの種類の違いによる感度比較試験結果

核種	β 線最大エネルギー (MeV)	計数効率(%)		比 (A/B)
		タイプA (A)	タイプB (B)	
^{22}Na	0.546	31.1	26.2	1.19
^{36}Cl	0.704	36.2	31.5	1.15
^{204}Tl	0.763	31.5	27.2	1.16
$^{90}\text{Sr}(\text{Y})$	0.546 (2,268)	37.3	32.4	1.15

3.3 EGS 4 を用いた感度解析

PSF の交換を可能にするためには、PSF の円筒状容器への取り付けを半周以内に制限する必要がある。PSF を半周に取り付けた円筒状容器を U 字管状にすることによって幾何学的効率を高めることができる。

そこで、幾何学的効率の向上を定量的に評価するため、電子・光子輸送計算コード EGS 4 を使用してシミュレーション解析した^{2),3)}。

EGS (Electron Gamma Shower) コードは、米国の SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) において開発された「電磁カスケード」をシミュレーションするモンテカルロ計算コードである。当初、EGS コードは、高エネルギー物理学で使用される検出器の設計等に使用することを目的に開発されたが、1978年に EGS 3 として一般に公開され、核医学等の分野にも適用されるようになり、計算対象とするエネルギー領域の下限を下げることを要求が高まっていた。EGS 4 は、それらの要求を踏まえ、多くの分野で活用されるようにしたものである。なお、本ガスモニタの特性評価に EGS 4 を適用するにあたり、放射線検出器用のユーザーコード等を整備した。

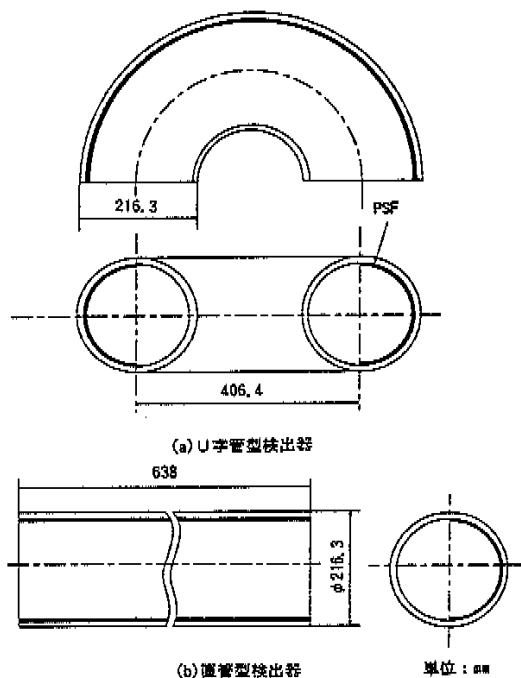


図3 U字管型検出器および直管型検出器の計算モデル体系

表5 検出器形状の違いによる感度比較計算結果 (U字管型検出器と直管型検出器)

評価対象核種	U字管型検出器 計数効率(A) (%)	直管型検出器 計数効率(B) (%)	比 (A/B)
^{85}Kr	41.8	36.0	1.16
^{13}N	58.8	49.5	1.19
($^{13}\text{N}/^{85}\text{Kr}$)	1.41	1.38	—
^{15}O	63.1	52.8	1.20
($^{15}\text{O}/^{85}\text{Kr}$)	1.51	1.47	—

(1) 検出器形状の違いによる感度解析

PSF を円筒状容器の半周に取り付けた時の直管型検出器と U 字管型検出器の計数効率をシミュレーション解析した。また、それぞれの検出器の ^{85}Kr 、 ^{13}N および ^{15}O に対する計数効率についても評価した。

U 字管型検出器および直管型検出器の計算モデル体系を図3に示す。

(2) 検出器形状の違いによる感度比較結果

直管型検出器および U 字管型検出器のシミュレーション計算結果を表5に示す。

解析結果は、以下のとおりである。

- ① ^{85}Kr 、 ^{13}N および ^{15}O それぞれについて計数効率をもとめた結果、U 字管検出器が直管型検出器に比べ ^{85}Kr で16%、 ^{13}N で19%、 ^{15}O で20%計数効率が高くなる。
- ② ^{85}Kr と ^{13}N 、 ^{15}O の感度比較では、U 字管型、直管型両者とも ^{13}N で約40%、 ^{15}O で約50% ^{85}Kr より計数効率が高くなる。

3.4 U 字管型検出器

3.3のシミュレーション解析結果をもとに、施設に設置するプロトタイプとしての U 字管型検出器を製作し、実ガスを用いて感度試験を行った。U 字管型検出器は、直角のエルボをフランジで接続し U 字管とした。U 字管型検出器の形状を図4に示す。

(1) 試験方法

ガス状線源 (^{85}Kr) による感度試験を実施した。基準電離箱と U 字管型検出器を同じループに直列に接続し、それぞれの検出器に ^{85}Kr を流して、その濃度を変え、そのときの基準電離箱の指示値から U 字管検出器の計数効率および濃度換算係数をもとめた。

(2) 試験結果

実ガス (^{85}Kr) による感度試験結果を表6に示す。

実ガス感度試験の結果、本検出器の ^{85}Kr に対する検出限界濃度は、 $5.4 \times 10^{-4} \text{ Bq/cm}^3$ (遮蔽

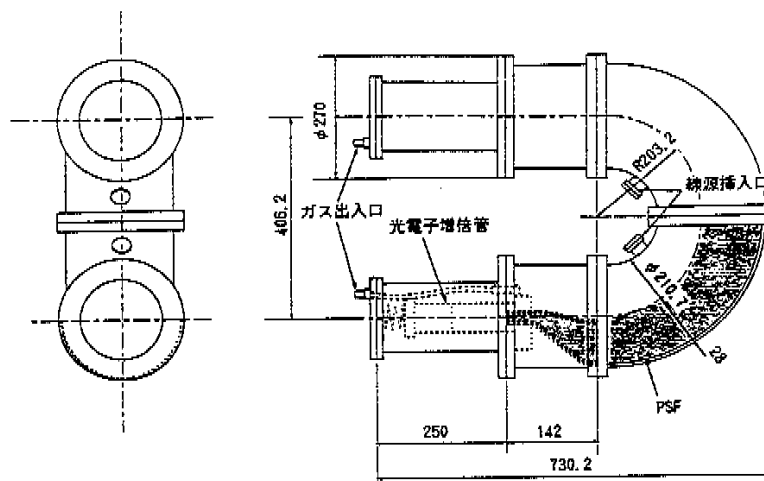


図4 U字管型検出器の概略図

なし)であった。

4. まとめ

高感度ガスモニタの開発過程において、検出素子にPSFを用い、検出器の内容積を大きくすることにより幾何学的効率を高め、さらに、同時計数回路の採用によるバックグラウンドの低減ならびにU字形状を採用したことにより、以下の成果が得られた。

- ① U字管型検出器の計数効率、直管型検出器の計数効率に比べ ^{13}N に対して19%、 ^{15}O に対して20%高い。
- ② U字管型検出器の ^{85}Kr に対する検出限界濃度は、 $5.4 \times 10^{-4} \text{ Bq/cm}^3$ である。
- ③ U字管型検出器の ^{13}N に対する計数効率は、 ^{85}Kr に対する計数効率よりも約40%高い、また、 ^{15}O に対する計数効率は、約40%高い。

表6 ガス状線源(^{85}Kr)によるU字管型検出器の感度試験結果

平均計数効率 (%)	平均濃度換算係数 ($\text{Bq/cm}^3/\text{cps}$)	検出限界計数率 (cps)	検出限界濃度 (Bq/cm^3)
46.2	9.82×10^{-5}	5.51	5.41×10^{-4}

以上の結果、本開発の目標である ^{13}N 、 ^{15}O の排気中の濃度限度($6 \times 10^{-4} \text{ Bq/cm}^3$)まで検出することが可能となった。

参考文献

- 1) 中村尚司：放射線物理と加速器安全の工学、他人書館。
- 2) W.R. Nelson et al.: "The EGS4 Code System" SLAC - Report 265 (1985).
- 3) D.W.O. Rogers: "Low Energy Electron Transport with EGS 4" Nucl. Instr. Meth. B18, 165 (1984).