

分冊

プラスチックシンチレーションファイバーガスモニタの開発

1996年9月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-chō, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1996

プラスティックシンチレーションファイバーガスモニタの開発

野崎達夫、鳥居建男*、高田千恵、
飛田和則、安藤秀樹

要 旨

動力炉・核燃料開発事業団 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に用いる大電力電子線形加速器の開発のための基礎試験が行われている。

将来の消滅処理の実証段階では、加速器の運転に伴い放出される高エネルギーの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 に対する管理区域から放出される排気中の濃度限度 ($6 \times 10^{-4}\text{Bq}/\text{cm}^3$) まで検出することが不可能であった。そこで、プラスティックシンチレーション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てきた。

本検出器の開発にあたり、計算機によるシミュレーション応答解析（電子・光子輸送計算コードEGS4）を行い、検出器形状の最適化を図った上で検出器を製作し、 β 線チェックソースおよび実ガスを用いて感度特性等の試験を行った。

試験の結果、本研究で開発したU字管検出器の ^{85}Kr に対する検出限界濃度は、 $5.4 \times 10^{-4}\text{Bq}/\text{cm}^3$ であることがわかった。また、シミュレーション解析結果によれば、 ^{13}N に対する計数効率が ^{85}Kr に対する計数効率より40%高いことから、 ^{13}N に対する検出限界濃度は、 $3.9 \times 10^{-4}\text{Bq}/\text{cm}^3$ 程度と考えられる。さらに、 ^{15}O の β 線エネルギーが ^{13}N の β 線エネルギーよりも高いことから、 ^{15}O に対する検出限界濃度は、 ^{13}N に対する検出限界濃度より良いと判断される。

以上に示すように、U字管型プラスティックシンチレーションファイバーガスモニタの開発により、 ^{13}N および ^{15}O に対する排気中の濃度限度 ($6 \times 10^{-4}\text{Bq}/\text{cm}^3$) までの測定が可能となった。

Development of a Radioactive Gas Monitor using Plastic Scintillation Fibers

T. Nozaki*, T. Torii**, C. Takada*,
K. Tobita*, H. Ando *

Abstract

The basic research on large electron linear accelerator is under current investigation at Quantum Technology Development Facility in O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation. The result of this, the transmutation of fission products would be incorporated.

In the future demonstrative stage of the transmission of fission products, Nitrogen-13 and Oxygen-15 will be produced by the interaction between high energy bremsstrahlung and air during operation of the linac. The detection limits of conventional monitors are not sufficient for the limits of the concentration of Nitrogen-13 (6×10^{-4} Bq/cm³) and Oxygen-15 (6×10^{-4} Bq/cm³) 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 to detect the limits of concentration of Nitrogen-13 and Oxygen-15 in exhaust air.

On designing the gas monitor detectors, the sensitivities of the detectors were simulated to optimize the shape and the volume of detector by using EGS4, the Monte-Carlo code for electrons and photons. Based on the results of the simulations, the detectors were composed and the characteristic examinations of sensitivities were carried out by using beta-ray checking sources and Krypton-85 gas.

Main points are as follows :

- (1) The detection limit of the developed torus-type detector for Krypton-85 is 5.4×10^{-4} Bq/cm³ based on the results of the experiments.
- (2) The counting efficiency of a detector for Nitrogen-13 is 40 percent higher than the counting efficiency for Krypton-85 based on the results of simulations. This indicates that the detection limit of the detector for Nitrogen-13 is about 3.9×10^{-4} Bq/cm³.
- (3) The beta-ray energy of Oxygen-15 is higher than the beta-ray energy of Nitrogen-13. This theoretically reaches the conclusion that the detection limit of the detector for Oxygen-15 is lower than the detection limit for Nitrogen-13.

The developed torus-type gas monitor using plastic scintillation fibers is able to detect the limits of the concentration of Nitrogen-13 and Oxygen-15 in exhaust air.

*Radiation Control Section, Health and Safety Division, O-arai Engineering Center

** Radiation and Chemistry Management Section, Monju Construction Office

プラスティックシンチレーションファイバーガスモニタの開発

(目次)

1. はじめに	1
2. 開発の経過	2
3. プラスチックシンチレーションファイバー (PSF) の基礎特性	4
3.1 有機シンチレーター発光原理	4
3.2 ファイバー中の光の伝播	4
3.3 PSFの仕様	6
4. 計算機によるシミュレーション応答解析	11
4.1 EGS4コードシステムの概要	11
4.2 エネルギー応答解析	13
4.3 解析結果及び考察	16
5. 放射性ガスモニタの特性試験	42
5.1 試験の概要	42
5.2 砲状型検出器の特性試験	42
5.3 基礎試験用平板型検出器の特性試験	43
5.4 U字管型検出器 1号機の特性試験	45
5.5 U字管型検出器 2号機の特性試験	46
6. まとめ	76
7 謝辞	78
参考文献	79
付録 U字管型検出器の製作要領	80

表目次

表- 3 . 1	本試験に使用したPSFの仕様	7
表- 4 . 1	U字管型検出器（1号機，2号機）仕様	18
表- 4 . 2	シミュレーション計算に使用した物質データ	19
表- 4 . 3	シミュレーション計算対象核種の特性一覧	20
表- 4 . 4	包状型検出器のシミュレーション計算結果	21
表- 4 . 5 (a)	筒状検出器の形状、容積の最適化計算結果（内容積：7ℓの場合）	22
表- 4 . 5 (b)	筒状検出器の形状、容積の最適化計算結果（内容積：9ℓの場合）	23
表- 4 . 5 (c)	筒状検出器の形状、容積の最適化計算結果（内容積：11ℓの場合）	24
表- 4 . 5 (d)	筒状検出器の形状、容積の最適化計算結果（内容積：13ℓの場合）	25
表- 4 . 5 (e)	筒状検出器の形状、容積の最適化計算結果（内容積：15ℓの場合）	26
表- 4 . 5 (f)	筒状検出器の形状、容積の最適化計算結果（内容積：17ℓの場合）	27
表- 4 . 5 (g)	筒状検出器の形状、容積の最適化計算結果（内容積：19ℓの場合）	28
表- 4 . 5 (h)	筒状検出器の形状、容積の最適化計算結果（内容積：21ℓの場合）	29
表- 4 . 5 (i)	筒状検出器の形状、容積の最適化計算結果（内容積：23ℓの場合）	30
表- 4 . 6	U字管型検出器及び直管（半円周）型検出器の感度比較結果	31
表- 5 . 1	砲状型検出器のβ線チェックング線源および実ガス(⁸⁵ Kr)による感度特性試験結果	48
表- 5 . 2	平板型検出器のバックグラウンド低減効果試験結果	49
表- 5 . 3	平板型検出器(SCSF-62)の放射線入射位置感度比較試験結果	50
表- 5 . 4	平板型検出器(SCSF-62M)の放射線入射位置感度比較試験結果	51
表- 5 . 5 (a)	PSFの違いによる感度比較(BCF-10とSCSF-62)	52
表- 5 . 5 (b)	PSFの違いによる感度比較(SCSF-62とSCSF-62M)	53
表- 5 . 6	U字管型検出器1号機のSCA出力と同時計数回路出力の感度比較結果	54
表- 5 . 7	U字管型検出器1号機(BCF-10)の放射線入射位置感度比較試験結果	55
表- 5 . 8	U字管型検出器1号機(SCSF-62)の放射線入射位置感度比較試験結果	56
表- 5 . 9	U字管型検出器1号機の実ガス(⁸⁵ Kr)による感度試験結果	57
表- 5 . 10	U字管型検出器2号機のβ線感度試験結果	58
表- 5 . 11	U字管型検出器2号機の実ガス(⁸⁵ Kr)による感度試験結果	59
表- 5 . 12	U字管型検出器2号機の遮へい効果試験結果	60
表- 5 . 13	プラスティックシンチレーション型ガスモニタ実ガス(⁸⁵ Kr)による感度試験結果	61

図目次

図-3.1	有機分子のエネルギー準位	8
図-3.2 (a)	PSFの断面とシンチレーション光の反射	9
図-3.2 (b)	中心軸上の発光の伝播	9
図-3.2 (c)	斜め光線の反射	10
図-3.2 (d)	界面のごく近傍での発光	10
図-3.2 (e)	荷電粒子が中心軸に垂直に入射した場合	10
図-4.1	砲状型検出器の概略図	32
図-4.2	砲状型検出器の計算モデル化体系	33
図-4.3	筒状型検出器の形状、容積の最適化計算モデル体系	34
図-4.4	U字管型検出器1号機の概略図	35
図-4.5	U字管型検出器2号機の概略図	36
図-4.6	U字管型検出器の計算モデル体系	37
図-4.7	直管型検出器の計算モデル体系（U字管型検出器との感度比較計算）	38
図-4.8	筒状型検出器の形状、容積の最適化計算結果	39
図-4.9	U字管型検出器と直管型検出器の幾何学効率の比較	40
図-4.10	U字管型検出器での β 線および光子の飛跡シミュレーション 〔核種： ^{13}N 、入射粒子数：1000個〕	41
図-5.1	ガスモニタ校正ループ系統図	62
図-5.2	砲状型検出器の正味波高分布	63
図-5.3	平板型検出器の計測器接続及び放射線入射位置図	64
図-5.4 (a)	平板型検出器(SCSF-62)の放射線入射位置感度比較試験結果(軸方向)	65
図-5.4 (b)	平板型検出器(SCSF-62)の放射線入射位置感度比較試験結果(垂直方向)	65
図-5.5 (a)	平板型検出器(SCSF-62M)の放射線入射位置感度比較試験結果(軸方向)	66
図-5.5 (b)	平板型検出器(SCSF-62M)の放射線入射位置感度比較試験結果(垂直方向)	66
図-5.6	U字管型検出器の試験時計測器接続図	67
図-5.7	U字管型検出器1号機の線源位置図	68
図-5.8 (a)	U字管型検出器1号機(BCF-10)の放射線入射位置感度比較試験結果 (軸方向)	69
図-5.8 (b)	U字管型検出器1号機(BCF-10)の放射線入射位置感度比較試験結果 (垂直方向)	69
図-5.9 (a)	U字管型検出器1号機(SCSF-62)の放射線入射位置感度比較試験結果 (軸方向)	70
図-5.9 (b)	U字管型検出器1号機(SCSF-62)の放射線入射位置感度比較試験結果 (垂直方向)	70
図-5.10	U字管型検出器2号機の線源位置図	71

写真目次

写真- 5.1	砲状型検出器の全景	72
写真- 5.2	平板型検出器の全景	73
写真- 5.3	U字管型検出器 1号機の全景	74
写真- 5.4	U字管型検出器 2号機の全景	75

1. はじめに

動力炉・核燃料開発事業団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力電子線形加速器（以下、「加速器」と言う。）の開発が進められている。

将来の消滅処理を行う段階では、従来の原子力施設の放射線源とは異なるいくつかの特徴を有している。その一つに、あるしきい値以上のエネルギーを有する加速器の場合、加速器の運転に伴い放出される多量の制動放射線の光核反応により空気等の放射化が生じるということがあげられる。この空気の放射化によって¹³N, ¹⁵O等の放射性ガスがターゲットやビームダンプ等の高エネルギーかつ高線量率の場で生成される。¹⁾

しかし、従来のガスマニタでは、この放射性ガスに対する空気中の濃度限度 (¹³N : $1 \times 10^1 \text{Bq/cm}^3$) の測定は可能であっても排気中の濃度限度 (¹³N : $6 \times 10^4 \text{Bq/cm}^3$) までは検出することが不可能であった。そこで、プラスチックシンチレーションファイバー（以下、「PSF」と言う）を検出材として用いて、ガスのサンプリング容積を大きくし幾何的効率を高めることによりモニタの高感度化を図ることとした。

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いる。²⁾近年、保健物理分野においても作業環境測定に適用されるようになり、数社のファイバーメーカーからも市販されている。³⁾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言った特徴のほか、バンドルすることにより各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。

本開発は、PSFを用いたガスマニタの定量的な感度特性の評価を目的として試験を行った。また、検出器及びガスタンクの形状、容量の最適化を図るために、計算機によるシミュレーション応答解析（電子・光子輸送計算コードEGS4）を行い、ガスマニタの感度特性（エネルギー応答特性）を計算したので以下にその手法と結果について報告する。

2. 開発の経過

プラスティックシンチレーションファイバーガスモニタの開発の主な内容は、以下の通りである。

- 平成 3 年度 : (1)従来型ガスモニタのエネルギー特性試験
 (2)EGS4による従来型ガスモニタのシミュレーション
 解析 (^{13}N に対して感度評価)⁴⁾

- 平成 4 年度 : (1)砲状型検出器の試作
 (2)特性試験
 ・エネルギー特性
 ・感度評価
 (3)EGS4による砲状型検出器のシミュレーション解析
 (計算値と実験値の比較)

- 平成 5 年度 : (1)基礎試験用平板型検出器の製作
 (2)基礎試験
 ・同時計測法を用いたバックグラウンド
 低減効果試験
 ・PSFの位置特性試験
 (放射線入射位置による感度評価)
 (3)EGS4による検出器の最適化評価のシミュレーション
 解析

- 平成 6 年度 : (1)EGS4による検出器の形状比較のシミュレーション解
 析
 (2)U字管型検出器1号機の試作
 (3)特性試験
 ・エネルギー特性
 ・感度試験 他

- 平成 7 年度 : (1)U字管型検出器2号機の試作
 (2)特性試験
 ・感度試験 他

本開発は、平成 3 年度より行った。その内容は、従来から大洗工学センター内にて使用しているガスモニタ（プラスティックシンチレーション型ガスモニタ）が加速器で生成される ^{13}N に対する感度をどの程度有しているかのシミュレーション解析である。その結果、検出器の形状（検出有効面積）を変えない場合タンク容

積を増やしても高感度化が望めないことが分かった。⁴⁾

そこで、平成4年度よりPSFを用いた検出器について試験及びシミュレーション解析を行った。

まず、検出有効面積とタンク容積を増やすことによる高感度化及びPSFのガスモニタ検出材としての適用性の有無を確認を目的に、高エネルギー物理学において、素粒子の飛跡測定に使用されていた検出器を利用し、砲状型検出器を作製した。また、併せてシミュレーション解析の計算結果との比較も行った。

次に、検出器を設計するための基礎データの取得を目的として同時計測法を用いた平板型検出器を作製し、各エネルギーに対する感度および放射線入射位置の違いによる感度試験を実施した。また、この平板型検出器で得られた基礎データをもとに筒状型検出器の最適な形状の評価を行った。

しかし、PSFを筒の円周すべてに巻くことは、PSF加工方法、検出器のメンテナンス性（検出器の取り付け取り外し易さ）、測定対象ガスの出し入れ口の設置を考慮した場合困難である。そのため、筒の半周分のみにPSFをバンドルすることとした。

平成6年度において、半周のみのPSFにより幾何効率を向上させるためガスタンク形状を変えた時の計数効率をシミュレーションした。その結果、ガスタンク形状をU字状にしたU字管型検出器の方が直管形状の検出器より効率が良いことが分かった。

そこで、平成6・7年にかけて、U字管型検出器を作製し、その特性試験結果を行った。

3. プラスチックシンチレーションファイバー（P S F）の基礎特性^{5) ~7)}

3.1 有機シンチレーターの発光原理

P S Fのコア材はプラスチックシンチレータであり、発光原理は他の有機シンチレータと同じである。プラスチックシンチレータを始めとした有機シンチレータでは、吸収された放射線のエネルギーが有機分子中の炭素間のπ結合電子を励起させ、励起された電子が再び基底状態に戻るときにシンチレーション光が発生する。

π結合電子の励起準位を図-3.1に示す。励起準位のうち、Sと書かれたものはスピニ0のシングレット状態と呼ばれる準位で、Tと書かれたものはスピニ1のトリプレット状態と呼ばれる準位である。添字の第一の数字は、π電子の励起準位を表しており、基底準位は0である。添字の第二の数字は、分子の振動状態によるエネルギーの差を表している。振動状態間のエネルギー間隔（普通約0.15eV）は、平均熱エネルギー（0.025eV）に比べると大きいので、室温ではほとんどすべての分子はS₀₀状態にある。

直接に入射した荷電粒子、または放射線の入射で間接的に発生した荷電粒子が分子の近くを通過するときに、π結合電子はエネルギーを吸収して、図-3.1に示した準位のうちどれかひとつの励起状態になる。S₂以上に励起された電子はps程度で非放射性過程によりS₁準位に遷移する。さらに、S₁₁以上の振動エネルギーも近傍の電子にそのエネルギーを奪われ、短時間（約0.5ns）にS₁₀状態へ遷移する。従って、励起されたπ結合電子はほとんど瞬時にS₁₀状態になるといえる。S₁₀状態から基底状態へは普通約2～3nsの寿命で遷移し、その際に即発蛍光を発するので、光パルスの強度I（発生するフォトン数）の時間変化は、

$$I=I_0 \left\{ \exp \left(-\frac{t}{\tau} \right) - \exp \left(-\frac{t}{\tau_1} \right) \right\} \quad \dots \quad (3.1)$$

と表され、τ1はS₁₀状態へ遷移する平均時間でありこれを立ち上がり時間といい、τはS₁₀状態から蛍光を発して基底状態へ遷移する平均時間でありこれを減衰時間という。シングレットの励起状態から、系間遷移と呼ばれる遷移を経て、トリプレット状態へと転換される場合がある。T₁の寿命は約1nsであり、T₁からS₀への遷移での発光は燐光と呼ばれ、波長は蛍光スペクトルよりも長い。また、T₁状態から熱等で励起されて再びS₁状態に戻され、蛍光として遷移する遅発蛍光もある。時間測定の場合、即発蛍光成分のみが有効になる。

3.2 ファイバー中の光の伝播

P S Fで発した光は、P S F自身を一般の光ファイバーと同様な「光パイプ

(ライトガイド)」として、伝播していく。PSFは直径が約1mm前後と一般的な光ファイバー(5~60μm)と比較して非常に太いので、光の伝播に関して波動の量子効果はほとんど表れず古典的な幾何光学が適用できる。PSF(一般的な光ファイバーも同様)の断面を図-3.2(a)に示す。コアの屈折率をn₁、クラッドの屈折率をn₂とすると、スネルの法則より全反射の臨界角θcは

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (3.2)$$

である。

したがって、ファイバーの中心軸上で発生した光のうち、臨界角で囲まれた円錐内のもののみ全反射を繰り返してファイバーの端に到達する(図-3.2(b))。この円錐の張る立体角Ωは片側で、

$$\Omega = 2\pi \left\{ 1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (3.3)$$

であるので、中心軸上に発生した光のうち、

$$\frac{1}{2} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (3.4)$$

の割合がそれぞれ両側に伝播する。

中心軸からはずれた場所での発光の場合、中心軸を横切る面の方向に発した光(子午光線)については中心軸で発する場合と全く同様な挙動をする。その他の方向の光(斜め光線)については、クラッドとの界面に対して中心軸方向の成分と円周方向の成分を合成した角度で入射するので、全反射する割合は増加する(図-3.2(c))。そのことを、極端な例である界面のごく近傍で発光した場合で考えると、図-3.2(d)より中心軸と平行な面の方向に発した光はほとんど全て全反射することがわかる。しかし、この様な光の大部分は中心軸方向の成分をほとんど持っていないため、軸方向の伝播距離あたりの減衰、散乱等の影響が大きく、ファイバーの端までほとんど到達しない。以上のことまとめると、荷電粒子がファイバーの中心軸に垂直に入射し、ファイバーの断面を均一に電離した場合(図-3.2(e))シンチレーション光の収率は(3.4)式で得られる量よりも10~30%増となる。

発光をしてからファイバーの端に到達するまでの時間Tは、ファイバーの曲げや反射角の揺らぎ等の影響を無視すれば、

$$T = \left(\frac{L}{\cos \theta} \right) \cdot \left(\frac{n_1}{c} \right) \quad \dots \quad (3.5)$$

ここで、 L ：発光位置からファイバー端までの距離

θ : ファイバーの中心軸と光線のなす角

n1:コアの屈折率

c : 真空中の光速度

となる。 n_1, c は定数であり、一定の場所での発光の場合は L も定数であるので、 T は θ のみの関数となり、最短時間 $T_0(\theta = 0)$ を基準にすると、

$$T = \left(\frac{T_0}{\cos \beta} \right) \quad \text{---} \quad (3.6)$$

となる。したがって、PSFを用いた時間測定の場合、光線の角度 θ による誤差が生じる。

3.3 PSFの仕様

本試験に使用したBICRON社のBCF-10及びクラレ社製のSCSF-62,SCSF-62MのPSF3種類の仕様を表-3.1に示す。

表-3.1 本試験に使用したPSFの仕様

	項目	BCF-10	SCSF-62	SCSF-62M
一般仕様	コア材質	ポリステレン	ポリステレン	ポリステレン
	クラッド材質	PMMA	PMMA	PMMA
	コア屈折率	1.6	1.59	1.42
	クラッド屈折率	1.49	1.49	1.42
	クラッド厚	コア径の3%	コア径の3%	コア径の6%
	開口数	0.58	0.55	0.72
	捕獲効率	3.44%	3.15%	5.35%
	最高放出波長	431nm	425 nm	425nm
	減衰長	2m	4.2m	4.2m
	シンチレーション減衰時間	2.4ns	2.3ns	2.3ns
本研究で使用したPSFの仕様	真空中使用	可	可	可
	使用温度	-20℃～+50℃	-20℃～+50℃	-20℃～+50℃
	断面	丸	丸	丸
	コア径	1mm	1mm	1mm
	クラッド厚	0.03mm	0.03mm	0.06mm

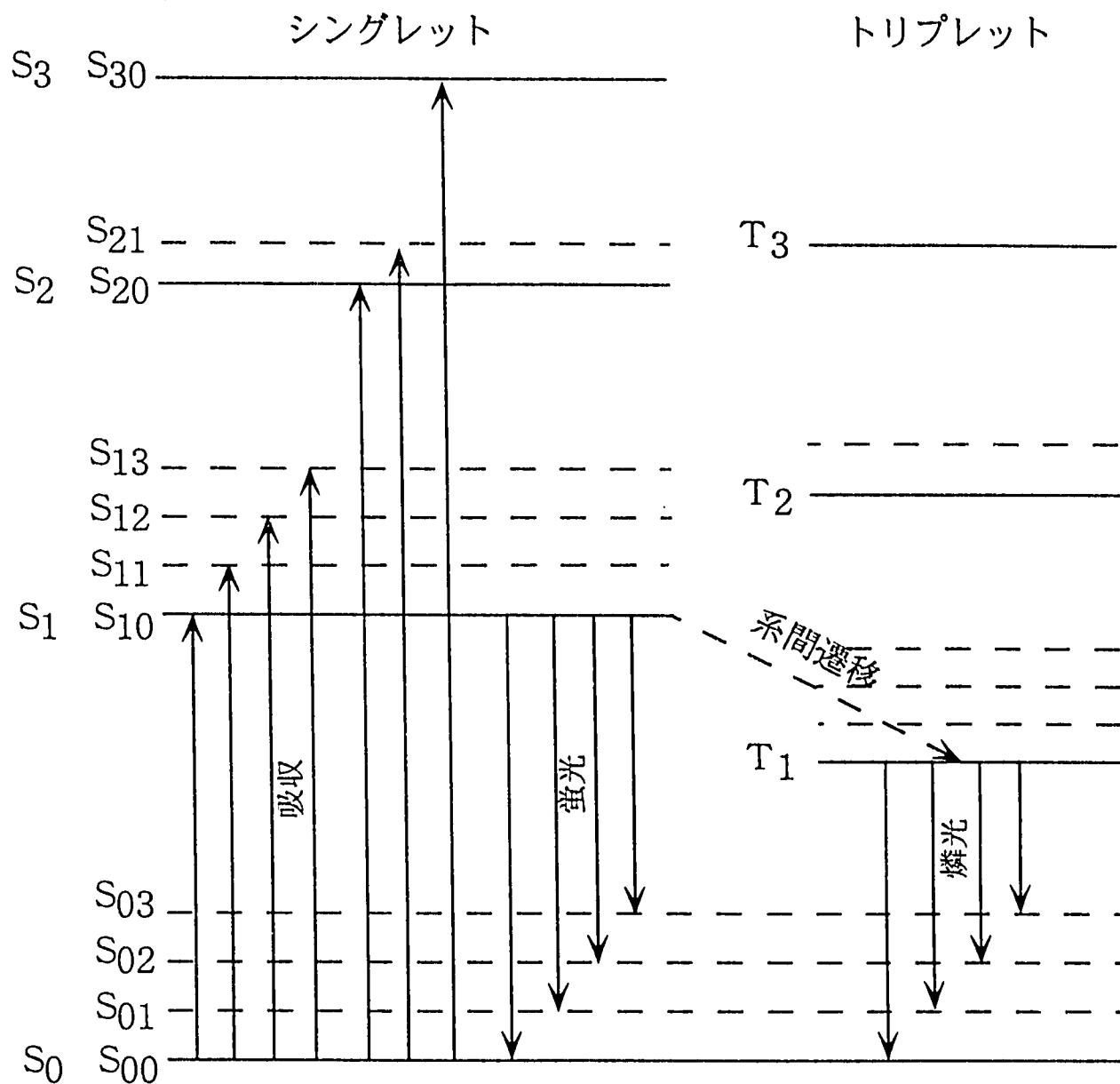


図-3.1 有機分子のエネルギー準位

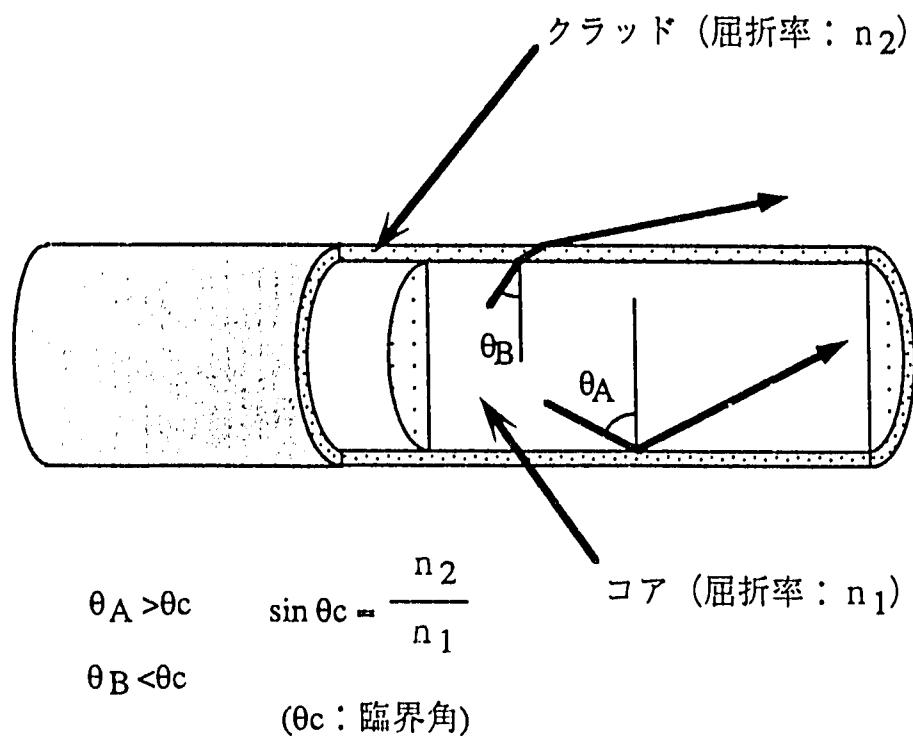


図-3.2(a) P S F の断面とシンチレーション光の反射

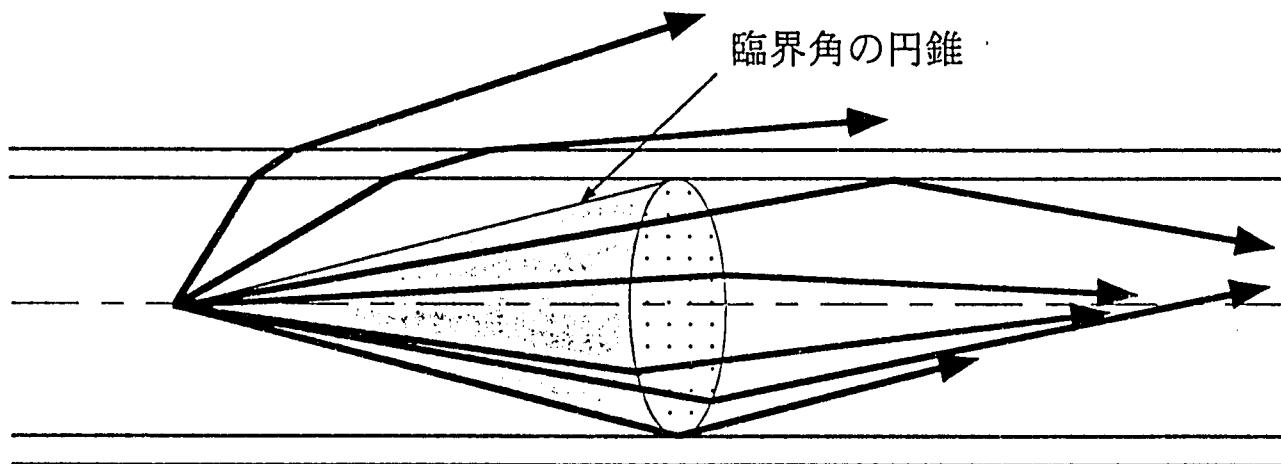


図-3.2(b) 中心軸上の発光の伝播

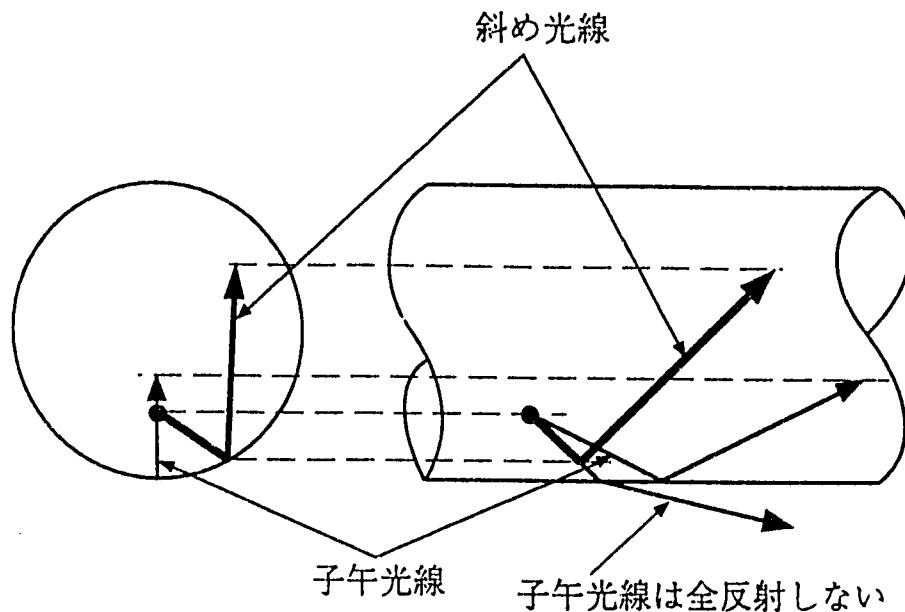


図-3.2(c) 斜め光線の反射

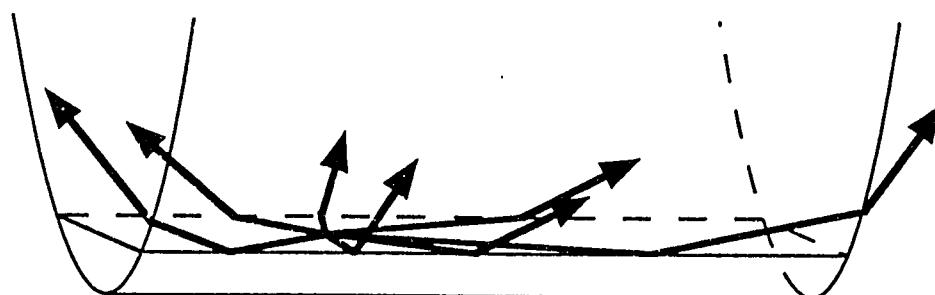


図-3.2(d) 界面のごく近傍での発光
中心軸に平行な面の方向の光は全て全反射する。

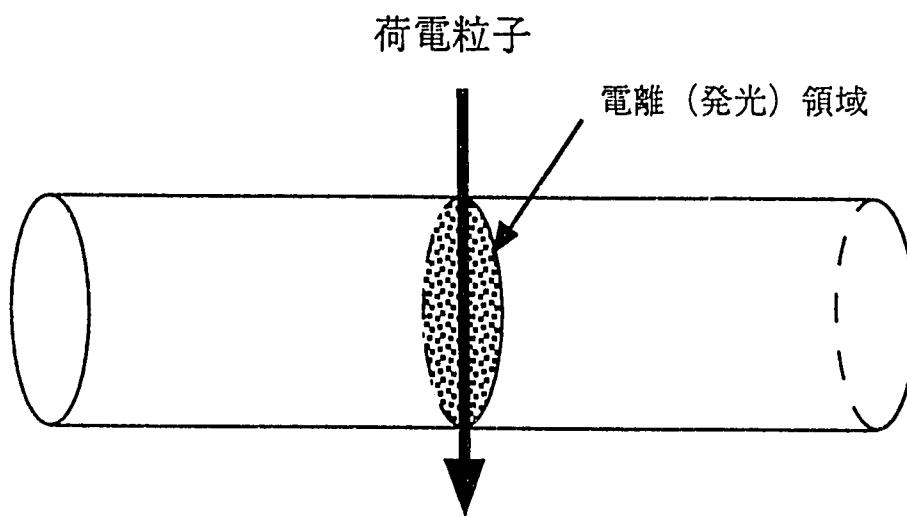


図-3.2(e) 荷電粒子が中心軸に垂直に入射した場合

4. 計算機によるシミュレーション応答解析

4.1 EGS4コードシステムの概要^{4),8)}

本研究におけるシミュレーション応答解析には、EGS4と呼ばれるコードを使用した。以下にその概要を述べる。

EGS(Electron Gamma Shower)コードは、1960年代から米国のSLAC(Stanford Linear Accelerator Center)において開発されてきた光子と電子による「電磁カスケード」のシミュレーションを行うモンテカルロ計算コードである。当初SLACでは高エネルギー物理学実験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を行っていたが、1978年にEGS3として一般に公開されてからは、核医学など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などの要求が高まっていた。EGS4コードは、それらの要求を踏まえ、より多くの分野で活用できるよう改良されたものである。⁹⁾

EGS4コードは3次元モンテカルロ計算コードであり、以下のようないくつかの特徴及び機能がある。

- (1) 電子、陽電子及び光子の輸送を原子番号が1から100までの元素、化合物及び混合物についてシミュレーションできる。
- (2) 適用エネルギー範囲は、荷電粒子（電子及び陽電子）では10keV程度から数TeV、光子（X・γ線）では数keVから数TeVである。
- (3) 取り扱う物理現象は、以下の9種類である。
 - a) 制動放射線の生成
 - b) 陽電子消滅
 - c) Molié re多重散乱
 - d) Møller ($e^- e^-$)散乱及びBhabha($e^- e^+$)散乱
 - e) 荷電粒子の飛程に沿った連続エネルギー損失
 - f) 電子・陽電子対生成
 - g) Compton散乱
 - h) Rayleigh散乱
 - i) 光電効果
- (4) EGS4コードは、MORTTRAN3と呼ばれるFORTRANのプリプロセサで書かれている。よく使用される汎用のサブルーチンについては、Mortranマクロとして提供されている。
- (5) EGS4コードは、ユーザーが作成するHOWFAR（幾何学的形状を指定するルーチン）、AUSGAB（粒子の重みをスコアして出力するルーチン）及びMAIN（線源形状の指定や全体をコントロールするプログラム）とEGS4コード本体、さらにEGS4で使用する物質の断面積等を計算するPEGS4コードからなっている。

電子（陽電子も含む）は、物質中で非常に多くの散乱を行うので全ての散乱をシミュレートすることは現実的ではない。このため、EGS4コードを含めて、一般にモンテカルロ計算コードでは、あるエネルギー以上の散乱のみを散乱として扱い、それ以下のエネルギーの散乱は連続エネルギー損失として扱っている。そして、電子の飛程を細かく分け（Step）、それぞれのStepで多くの散乱による角度の変化を多重散乱モデルに基づいて決めている。

実際には電子は周りの原子により多数の散乱を受け曲線に沿って距離 t だけ飛行しても計算上は直線距離 s (Step Size)だけ輸送されるとし、その間は連続的にエネルギーを失うとするわけである。EGS4では電子の多重散乱を解析するためにMoliéreの多重散乱モデルを採用しているが、1MeV以下の低エネルギー領域では、そこで用いられる電子輸送のStep Sizeが計算に大きく影響するため、EGS4のデフォルト値そのままを用いることは好ましくないとされている¹⁰⁾。

この解決策として、1Step当たりの最大エネルギーの損失の定数ESTEPEを変えてStep Sizeを小さくする方法（ESTEPEオプション）とカナダのNRCC（National Research Council of Canada）のA.F.Bielajewらが低エネルギー領域での電子輸送を改良するために開発した手法PRESTA（Parameter Reduced Electron-Step Transport Algorithm）を用いる方法がある¹¹⁾。ESTEPEオプションは、CG（Combinatorial Geometry）法による計算形状の記述も可能である。今回の計算についても、放射線管理課で以前、SUN SPARC station 2 (CPU : 40MHzSPARC、主メモリ: 32MB)上で動作できるように整備したEGS4のユーザーコードに若干の修正を加えることで計算することが可能となる。

しかし、電子輸送が行われる媒体により適切なStep Sizeが異なることから（理論的基礎となるMoliéreの多重散乱モデルが適用できないStep Sizeを選ぶ可能性がある）本計算では新しい電子輸送のアルゴリズムPRESTAを用いることとした。PRESTAを用いるためには、EGS4固有のFortranマクロを使用した計算形状の記述が必要となるため、従来のCG法の使用が不可能となる。そこで円筒平板モデルに限定したユーザーコードを作成し、解析することとした。

PRESTAは、3つのアルゴリズムから構成される。まず、第1に新しい飛程長補正(PLC)を取り入れる（4次まで展開した近似式を採用）。また、Step Sizeが長いと電子の入射方向からの側方へのズレが無視できないため側方変移(LCA)を新しく計算に取り入れている。さらに、2つの異なる物質の境界近傍では、実際の飛程では境界を横切っていても直線飛程が横切らない場合が生じるが、境界近傍ではStep Sizeを小さくし、常に「実際の飛程が境界を横切らないか」を判断するアルゴリズム(BCA)を取り入れている。

PRESTAを用いたEGS4コードは、egs4.mortran等の標準版のプログラムやマクロの他にNRCCで作成されたマクロとサブルーチンをPRESTA用に書き替えた（nrcc4.mortran → nrcc4macp.mortran、nrccaux.mortran → nrccauxp.mortran）ものである。以下、特に断わらない限りEGS4 / PRESTAを

EGS4と記す。

4.2 エネルギー応答解析

4.2.1 計算体系

Motranマクロを用いて直方体、円筒、円環体の組み合わせにより検出器を模擬して以下の計算評価を行った。

- (1) 砲状型検出器の計数効率
- (2) 筒状の検出器の形状及び容積を変えた時の計数効率の変化
- (3) U字管型検出器の計数効率
- (4) U字管型検出器の有効性を確認するための同じ内容積を有する直管型検出器との計数効率の比較。

砲状型検出器の概略図及び計算モデル体系を図-4.1～図-4.2に、筒状の検出器の形状及び容積の最適化の計算モデル体系を図-4.3に、U字管型検出器1号機および2号機の仕様を表-4.1に、U字管型検出器1号機の概略図を図-4.4に、U字管型検出器2号機の概略図を図-4.5に、U字管型検出器の計算モデル体系を図-4.6に、直管型検出器の計算モデル体系を図-4.7に示す。

なお、計算実行時に必要となるファイルは以下の通りである。

ソースコード	:	cylpland / cylpland.mortoran	
入力データ	:	cylpland / cylpland.egs4inp	
断面積データ	:	pegs4 / data / cylpland.pegs4dat	
計算結果	:	cylpland / cylpland.egs4log	
起動コマンド	:	cylpland_run	
核種データ	:	cylpland / nucgamma.dat cylpland / nucbeta.dat	
	→ β線発生ルーチン	:	cylpland / betaspcl.f

ここで、断面積データは電離箱検出器を構成する物質及びその物質の密度について、あらかじめPEGS4コードで作成した。作成した物質とそのデータを表-4.2に示す。

4.2.2 線源項

評価対象核種として、大洗工学センターにて所有するチェックングソースの

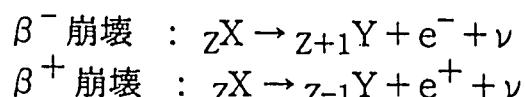
(^{14}C , ^{147}Pr , ^{36}Cl , ^{204}Tl , ^{22}Na , $^{90}\text{Sr-Y}$) 6核種の他 ^{85}Kr 及び ^{13}N を選定し、計 8 核種（表-4.3 参照）から放出される β 線について、後述するスペクトルの式を用いて重みづけを行い各放出モードごとに計算した。なお、 β 線のエネルギー、放出率等のデータについては、アイソトープ手帳および Table of Isotopes をもとにした。^{12), 13)}

線源モデルとしては、タンク内の任意の位置、方向から放射線を放出するよう乱数を用いたもの (betasp.f) を作成し、これを EGS4 のユーザーコードに組み込んだ。計算ヒストリー数は、統計誤差を少なくするため、各 10 万ヒストリーとした。また、電子及び光子の下限エネルギー (cut off energy) を 100 keV とし、計算体系内においてそれ以上のエネルギーを持つ粒子について追跡して、それ以下になった場合は全てそこで吸収されたものとした。

以下に、 β 線及び γ 線それぞれのエネルギースペクトルとそのモデル化についてまとめる。

(1) β 線スペクトル

β 崩壊は、下記に示す 3 体崩壊であるため、放出される β 線のエネルギースペクトルは連続分布を示す。



計算するにあたって、線源となる核種の β 線スペクトル分布を考慮しておく必要がある。そこで、下記の Fermi 関数を用いた β 線スペクトルの理論式を用いて " β 線" を発生させた。

すなわち、運動エネルギー T を持った β 線が放出される確率（分布）は、

$$P(T)dT = \kappa_0 C(T) F(\pm Z, W) pW (T_0 - T)^2 dT \quad \dots \quad (4-1)$$

で表わされる。ここで、 W は、 β 線の全エネルギー ($= T/mc^2 + 1$) であり、 $C(T)$ は禁止遷移に対する補正項（許容遷移に対しては 1、第 1 禁止遷移（単一）に対しては $p^2 + (T_0 - T)^2$ ）である。また、 $F(\pm Z, W)$ は β 線に対する娘核のクーロン場の影響を補正する Fermi 関数であり、

$$F(\pm Z, W) = 2(1 + \gamma)(2pR)^2 r^{-2} \exp(\pm \pi \nu) \frac{[\Gamma(\gamma + i\nu)]^2}{[\Gamma(2\gamma + 1)]^2} \quad (4-2)$$

である。ここで、

$$\gamma = (1 - \alpha^2 Z^2)^{1/2} , \quad \nu = \alpha ZW/p \quad \text{----- (4-2a)}$$

である。また、(4-2)式の Γ はガンマ関数、Rは原子核の半径、 α は微細構造定数、Zは崩壊後の原子核の電荷、上の符号が電子、下は陽電子崩壊に相当する。

なお、許容遷移、禁止遷移は、次のように分類される。

	スピン変化	パリティ変化
許容遷移	$0, \pm 1$	なし
第 1 禁止遷移	$0, \pm 1$	あり
	± 2	あり
第 2 禁止遷移	± 2	なし
	± 3	なし

4.3 解析結果及び考察

4.3.1 砲状型検出器のシミュレーション

砲状型検出器(図-4.1)の有効検出領域を図-4.2に示すようなモデル体系を組み、 ^{14}C , ^{147}Pm , ^{36}Cl , ^{204}Tl , ^{22}Na , ^{90}Sr , ^{85}Kr , ^{13}N の8核種について感度計算を行った。

計算結果を表-4.4に示す。

このシミュレーション計算から以下のことが得られた。

- (1) エネルギーの低い ^{14}C , ^{147}Pm については、ほとんど感度を有していないが、 β 線最大エネルギーが500keV以上の核種については、30%以上の効率を有していることがシミュレーション計算で得られた。
- (2) ^{85}Kr , ^{13}N のガス状線源では、それぞれ41.7%、66.4%の計数効率を有し、濃度換算係数で $1.1 \times 10^{-3}\text{Bq}/\text{cm}^3/\text{cps}$ 、 $4.2 \times 10^{-4}\text{Bq}/\text{cm}^3/\text{cps}$ であることが得られた。この値は、現在使用されているプラスティックシンチレーション型ガスマニタの ^{85}Kr に対する換算係数である $5 \times 10^{-3}\text{Bq}/\text{cm}^3/\text{cps}$ （実測値）に比べ約5倍向上していることが確認できた。

4.3.2 筒状の検出器形状、容積の最適化のためのシミュレーション

筒状検出器の半径と長さを変化させ、 ^{13}N に対しての計数効率及び検出感度を求め、最適な形状をシミュレーション計算した。

本計算に使用したバックグラウンド計数率及び光の減衰率（補正）は、平板検出器の基礎特性試験にて得られたデータを用いた。

計算結果を表-4.5及び図-4.8に示す。

このシミュレーション計算から以下のことが得られた。

- (1) 同じ半径で容積を変化させた場合、容積が7ℓから約15ℓ程度まで急激に検出限界濃度が良くなり感度が向上する。しかし、15ℓ以上になると感度の向上が緩やかになる。
- (2) 同じ容積で半径を大きくしていった場合、半径が6cmから10cm程度まで間、急激に検出限界濃度が良くなり感度が向上する。しかし、それ以上半径を大きくしてもあまり感度の向上が望めないことがわかった。
- (3) 本開発の目的である ^{13}N に対する排気濃度限度は、 $6 \times 10^{-4}\text{Bq}/\text{cm}^3$ であるが、警報設定管理等のため目標検出限界濃度を $1 \sim 2 \times 10^{-4}\text{Bq}/\text{cm}^3$ とした場合、その値を満足する形状は、半径14cm、容積21ℓ（長さ34cm）であることが確認できた。

4.3.3 U字管型検出器のシミュレーション

筒状の検出器でPSF両端に光電子増倍管を取り付け、両端からの信号を同時計測し、また、空気の出し入れ口を設置するとメンテナンス時のPSF交換を容易に行うことができない形状となってしまう。そこで、メンテナンス性および加工性を考慮してPSFをタンクの半周にのみ巻きつけることとした。また、その半周に巻きつけた検出器の幾何効率を向上させるため検出部の軸方向に放射される粒子についてもPSFに吸収されるようにタンク形状をU字型にすることとした。

図-4.9に示すようにU字管型検出器と直管型検出器それぞれの中心に放射線源があると仮定したときに荷電粒子がPSFに到達する範囲（角度）は、直管型検出器の場合は 180° より小さく、U字管型検出器の場合は 180° 以上となり、幾何学効率が上がる。

このU字管型の有効性を定量的に評価するため、U字管型検出器1号機および2号機それぞれの検出面積を有する直管型（半円周）検出器についても計数効率を計算した。また、U字管型検出器の ^{85}Kr 及び ^{13}N について計数効率及び検出限界濃度を求めた。

U字管型検出器および直管型検出器の計算結果を表-4.6に、U字管型検出器での飛跡シミュレーションを図-4.10に示す。

このシミュレーション計算から以下のことが得られた。

- (1) 同じ検出有効面積を有する直管型検出器との計数効率の比較の結果、U字管型検出器1号機で40%、2号機でも15%程度感度が良いことが確認できた。
- (2) U字管型検出器1号機の計数効率は、 ^{85}Kr に対して約50%、 ^{13}N に対して約70%の効率が得られた。また、U字管型検出器2号機においては、 ^{85}Kr に対して約40%、 ^{13}N に対して約60%の効率であったが、濃度換算係数では、U字管検出器2号器のタンクの容積を大きくしたことでU字管型検出器1号機に比べ約1/2程度、向上していることがわかった。
- (3) U字管型検出器1号機、2号機および直管型検出器において、 ^{13}N に対する計数効率の方が ^{85}Kr に対する計数効率に比べ約40%高感度であることがわかった。

また、 ^{15}O の β 線エネルギーが ^{13}N の β 線エネルギーよりも高いことから ^{15}O に対する計数効率についても ^{85}Kr に対する計数効率に比べ高感度であると言える。

表-4.1 U字管型検出器（1号機、2号機）仕様

項目	U字管型検出器1号機	U字管型検出器2号機
PSF	SCSF-62,BCF-10	SCSF-62M
PSF本数	251本	331本
PSF長さ（検出有効長）	785mm	969mm
検出有効面積	1971cm ²	3209cm ²
管直径	160mm φ	210mm φ
軸半径	170mm	203.2mm
タンク容量	10700cm ³	22300cm ³

表-4.2 シミュレーション計算に使用した物質データ

物質名	種類	組成元素 (比*)	密度** (g/cm ³)
空気	混合物	N (0.7803), O (0.2103), Ar (0.0094)	0.001205
空気 (22°C)	混合物	N (0.7803), O (0.2103), Ar (0.0094)	0.0011964
NE102A	化合物	H (1), C (1)	1.032
アルミニウム	単体	Al	2.69
SUS	混合物	Fe(0.74), Cr (0.18), Ni(0.08)	7.93

* 化合物 …… 組成比、混合物 …… 元素の質量比

** 気体の場合、標準状態 (0°C、1気圧) での密度

表-4.3 シミュレーション計算対象核種の特性一覧

核種	形状	電荷	スピン (パリティ)	β 線最大エネルギー (MeV)	放出率 (%)	遷移
^{14}C	点線源	-	$0^+ \rightarrow 1^+$	0.156	100	許容遷移
^{147}Pm	点線源	-	$0^+ \rightarrow 7/2^-$	0.225	100	許容遷移
^{22}Na	点線源	+	$3^+ \rightarrow 0^+$	0.546	100	禁止遷移
^{36}Cl	点線源	-	$2^+ \rightarrow 0^+$	0.704	98.1	禁止遷移
		+			1.9	
^{204}Tl	点線源	-	$2^- \rightarrow 0^+$	0.763	97.9	禁止遷移
		+			2.1	
^{90}Sr	点線源	-	$0^+ \rightarrow 2^-$	0.546	100	禁止遷移
^{90}Y			$2^- \rightarrow 0^+$	2.28	100	
^{85}Kr	気体	-	$9/2^+ \rightarrow 5/2^-$	0.687	100	禁止遷移
^{13}N	気体	+	$1/2^- \rightarrow 1/2^-$	1.2	100	許容遷移

表-4.4 砲状型検出器のシミュレーション計算結果

核種	β 線最大エネルギー (MeV)	電荷	放出率 (%)	計数効率 (%)	換算係数 Bq/cm ³ /cps
¹⁴ C	0.156	-	100	0.007	—
¹⁴⁷ Pm	0.225	-	100	2.9	—
²² Na	0.546	+	100	34.0	—
³⁶ Cl	0.704	-,+	100	42.5	—
²⁰⁴ Tl	0.763	-,+	100	43.2	—
⁹⁰ Sr	0.546	-	100	56.8	—
⁹⁰ Y	2.28	-	100		
⁸⁵ Kr	0.687	-	100	41.7	1.1×10^{-3}
¹³ N	1.20	+	100	66.4	4.2×10^{-4}

表-4.5(a) 筒状検出器の形状、容積の最適化計算結果 (^{13}N に対して)
 (内容積 : 7 ℥ の場合)

容積 (ℓ)	半径 (cm)	長さ (cm)	パックゲート 計數率 (cps)	検出限界 計數率 (cps)	光減衰率	計数効率		濃度換算係数 (Bq/cm ³ /cps)	検出限界濃度 (Bq/cm ³)
						計算結果 (%)	減衰補正後 (%)		
7	6	61.9	65.4	2.23	0.856	78.2	66.9	2.13E-04	4.77E-04
	8	34.8	49.2	1.94	0.916	72.2	66.1	2.16E-04	4.19E-04
	10	22.3	39.2	1.73	0.946	62.8	59.4	2.40E-04	4.17E-04
	12	15.5	32.7	1.58	0.962	53.3	51.3	2.79E-04	4.42E-04
	14	11.4	28.1	1.47	0.972	45.1	43.8	3.26E-04	4.79E-04
	16	8.7	24.8	1.38	0.978	37.3	36.5	3.92E-04	5.41E-04
	18	6.9	21.8	1.30	0.983	30.7	30.2	4.73E-04	6.14E-04

部がシミュレーション計算の結果

表-4.5(b) 筒状検出器の形状、容積の最適化計算結果 (^{13}N に対して)
 (内容積 : 9 ℥の場合)

容積 (ℓ)	半径 (cm)	長さ (cm)	パック・カウト 計數率 (cps)	検出限界 計數率 (cps)	光減衰率	計数効率		濃度換算係数 (Bq/cm ³ /cps)	検出限界濃度 (Bq/cm ³)
						計算結果 (%)	減衰補正後 (%)		
9	6	79.6	84.4	2.53	0.819	80.9	66.3	1.68E-04	4.25E-04
	8	44.8	63.3	2.20	0.894	74.3	66.4	1.67E-04	3.68E-04
	10	28.7	50.5	1.96	0.931	65.7	61.2	1.82E-04	3.57E-04
	12	19.9	42.2	1.80	0.951	57.3	54.5	2.04E-04	3.67E-04
	14	14.6	36.2	1.67	0.964	49.4	47.6	2.33E-04	3.89E-04
	16	11.2	31.5	1.56	0.972	42.2	41.0	2.71E-04	4.21E-04
	18	8.9	28.2	1.47	0.978	36.0	35.2	3.16E-04	4.65E-04



部がシミュレーション計算の結果

表-4.5(c) 筒状検出器の形状、容積の最適化計算結果 (^{13}N に対して)
(内容積：11 ℥ の場合)

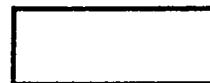
容積 (ℓ)	半径 (cm)	長さ (cm)	パック・ラウト 計数率 (cps)	検出限界 計数率 (cps)	光減衰率	計数効率		濃度換算係数 (Bq/cm ³ /cps)	検出限界濃度 (Bq/cm ³)
						計算結果 (%)	減衰補正後 (%)		
11	6	97.3	103.4	2.80	0.783	81.9	64.1	1.42E-04	3.97E-04
	8	54.7	77.4	2.43	0.872	76.4	66.6	1.36E-04	3.31E-04
	10	35.0	61.5	2.17	0.916	69.2	63.4	1.43E-04	3.11E-04
	12	24.3	52.8	2.01	0.939	61.1	57.4	1.58E-04	3.18E-04
	14	17.9	44.1	1.84	0.956	52.8	50.5	1.80E-04	3.31E-04
	16	13.7	38.5	1.72	0.966	46.2	44.6	2.04E-04	3.50E-04
	18	10.8	34.2	1.62	0.973	39.0	37.9	2.40E-04	3.88E-04



部がシミュレーション計算の結果

表-4.5(d) 筒状検出器の形状、容積の最適化計算結果 (^{13}N に対して)
 (内容積：13 l の場合)

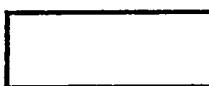
容積 (l)	半径 (cm)	長さ (cm)	パックゲート 計數率 (cps)	検出限界 計數率 (cps)	光減衰率	計数効率		濃度換算係数 (Bq/cm ³ /cps)	検出限界濃度 (Bq/cm ³)
						計算結果 (%)	減衰補正後 (%)		
13	6	115	121.3	3.04	0.750	82.3	61.7	1.25E-04	3.78E-04
	8	65	91.4	2.64	0.850	76.8	65.3	1.18E-04	3.11E-04
	10	41.4	72.8	2.36	0.902	71.3	64.3	1.20E-04	2.82E-04
	12	28.8	60.8	2.15	0.931	64.0	59.6	1.29E-04	2.78E-04
	14	21.2	52.2	2.00	0.948	55.0	52.1	1.48E-04	2.95E-04
	16	16.2	45.6	1.87	0.960	48.6	46.7	1.65E-04	3.08E-04
	18	12.8	40.5	1.76	0.969	42.7	41.4	1.86E-04	3.28E-04



部がシミュレーション計算の結果

表-4.5(e) 筒状検出器の形状、容積の最適化計算結果 (^{13}N に対して)
 (内容積：15 l の場合)

容積 (l)	半径 (cm)	長さ (cm)	パックガウンド 計数率 (cps)	検出限界 計数率 (cps)	光減衰率	計数効率		濃度換算係数 (Bq/cm ³ /cps)	検出限界濃度 (Bq/cm ³)
						計算結果 (%)	減衰補正後 (%)		
15	6	133	140.3	3.26	0.717	82.4	59.1	1.13E-04	3.68E-04
	8	75	105.5	2.83	0.829	77.8	64.5	1.03E-04	2.93E-04
	10	48	84.4	2.53	0.887	72.8	64.6	1.03E-04	2.62E-04
	12	33.2	70.1	2.31	0.920	65.7	60.4	1.10E-04	2.55E-04
	14	24.4	60.1	2.14	0.941	57.9	54.5	1.22E-04	2.62E-04
	16	18.7	52.6	2.01	0.954	50.8	48.5	1.38E-04	2.76E-04
	18	14.8	46.8	1.89	0.964	44.5	42.9	1.55E-04	2.94E-04



部がシミュレーション計算の結果

表-4.5(f) 筒状検出器の形状、容積の最適化計算結果 (^{13}N に対して)
 (内容積：17 l の場合)

容積 (l)	半径 (cm)	長さ (cm)	パック・カウント 計数率 (cps)	検出限界 計数率 (cps)	光減衰率	計数効率		濃度換算係数 (Bq/cm ³ /cps)	検出限界濃度 (Bq/cm ³)
						計算結果 (%)	減衰補正後 (%)		
17	6	150	158.3	3.46	0.687	82.9	57.0	1.03E-04	3.58E-04
	8	85	119.6	3.01	0.809	79.1	64.0	9.19E-05	2.77E-04
	10	54	95.5	2.70	0.874	73.2	64.0	9.19E-05	2.48E-04
	12	37.6	79.3	2.46	0.910	67.2	61.2	9.62E-05	2.36E-04
	14	27.7	68.2	2.28	0.933	60.6	56.5	1.04E-04	2.37E-04
	16	21.2	59.6	2.13	0.948	52.7	50.0	1.18E-04	2.51E-04
	18	16.7	52.9	2.01	0.959	45.6	43.7	1.35E-04	2.70E-04



部がシミュレーション計算の結果

表-4.5(g) 筒状検出器の形状、容積の最適化計算結果 (^{13}N に対して)
 (内容積：19 ℥ の場合)

容積 (ℓ)	半径 (cm)	長さ (cm)	パックゲート 計數率 (cps)	検出限界 計數率 (cps)	光減衰率	計数効率		濃度換算係数 (Bq/cm ³ /cps)	検出限界濃度 (Bq/cm ³)
						計算結果 (%)	減衰補正後 (%)		
19	6	168	177.2	3.66	0.657	83.9	55.1	9.55E-05	3.50E-04
	8	95	133.6	3.18	0.789	79.6	62.8	8.38E-05	2.67E-04
	10	60.6	106.6	2.85	0.859	74.3	63.8	8.25E-05	2.35E-04
	12	42	88.6	2.60	0.900	68.0	61.2	8.60E-05	2.23E-04
	14	31	76.3	2.41	0.925	61.4	56.8	9.27E-05	2.23E-04
	16	23.7	66.7	2.26	0.942	55.6	52.4	1.00E-04	2.27E-04
	18	18.7	59.2	2.13	0.954	48.7	46.5	1.13E-04	2.41E-04

[] 部がシミュレーション計算の結果

表-4.5(h) 筒状検出器の形状、容積の最適化計算結果 (^{13}N に対して)
 (内容積：21 ℥ の場合)

容積 (ℓ)	半径 (cm)	長さ (cm)	パッケージ 計数率 (cps)	検出限界 計数率 (cps)	光減衰率	計数効率		濃度換算係数 (Bq/cm ³ /cps)	検出限界濃度 (Bq/cm ³)
						計算結果 (%)	減衰補正後 (%)		
21	6	186	196.2	3.85	0.628	83.3	52.3	9.10E-05	3.51E-04
	8	104.5	147	3.34	0.770	79.1	60.9	7.82E-05	2.61E-04
	10	67	117.8	2.99	0.846	74.2	62.8	7.59E-05	2.27E-04
	12	46.5	98.1	2.73	0.890	68.7	61.1	7.79E-05	2.13E-04
	14	34.2	84.2	2.53	0.918	63.0	57.8	8.23E-05	2.08E-04
	16	26.2	73.7	2.37	0.937	56.9	53.3	8.93E-05	2.12E-04
	18	20.7	65.5	2.24	0.950	50.2	47.7	9.99E-05	2.23E-04



部がシミュレーション計算の結果

表-4.5(i) 筒状検出器の形状、容積の最適化計算結果 (^{13}N に対して)
 (内容積：23 l の場合)

容積 (l)	半径 (cm)	長さ (cm)	パック・カウント 計數率 (cps)	検出限界 計數率 (cps)	光減衰率	計数効率		濃度換算係数 (Bq/cm ³ /cps)	検出限界濃度 (Bq/cm ³)
						計算結果 (%)	減衰補正後 (%)		
23	6	204	215.2	4.04	0.600	83.1	49.9	8.72E-05	3.52E-04
	8	114.5	161.1	3.49	0.751	80.6	60.5	7.18E-05	2.51E-04
	10	73.3	128.9	3.13	0.833	75.8	63.1	6.89E-05	2.15E-04
	12	51	107.6	2.86	0.880	71.1	62.6	6.95E-05	1.99E-04
	14	37.4	92.1	2.65	0.911	64.6	58.9	7.39E-05	1.96E-04
	16	28.6	80.5	2.48	0.931	57.7	53.7	8.09E-05	2.00E-04
	18	22.6	71.5	2.33	0.945	51.4	48.6	8.95E-05	2.09E-04



部がシミュレーション計算の結果

表-4.6 U字管型検出器及び直管（半円周）型検出器の感度比較結果

U字管型検出器1号機

評価対象核種	U字管型検出器		直管型検出器		比 (A/B)
	計数効率(A) (%)	濃度換算係数 (Bq/cm ³ /cps)	計数効率(B) (%)	濃度換算係数 (Bq/cm ³ /cps)	
⁸⁵ Kr	50.1	1.9E-04	36.1	2.6E-04	1.39
¹³ N	68.0	1.4E-04	49.1	1.9E-04	1.38
¹³ N/ ⁸⁵ Kr	1.36	-	1.36	-	-

U字管型検出器2号機

評価対象核種	U字管型検出器		直管型検出器		比 (A/B)
	計数効率 (%)	濃度換算係数 (Bq/cm ³ /cps)	計数効率 (%)	濃度換算係数 (Bq/cm ³ /cps)	
⁸⁵ Kr	41.8	1.1E-04	36.0	1.2E-04	1.16
¹³ N	58.8	7.6E-05	49.5	9.1E-05	1.19
¹³ N/ ⁸⁵ Kr	1.41	-	1.38	-	-

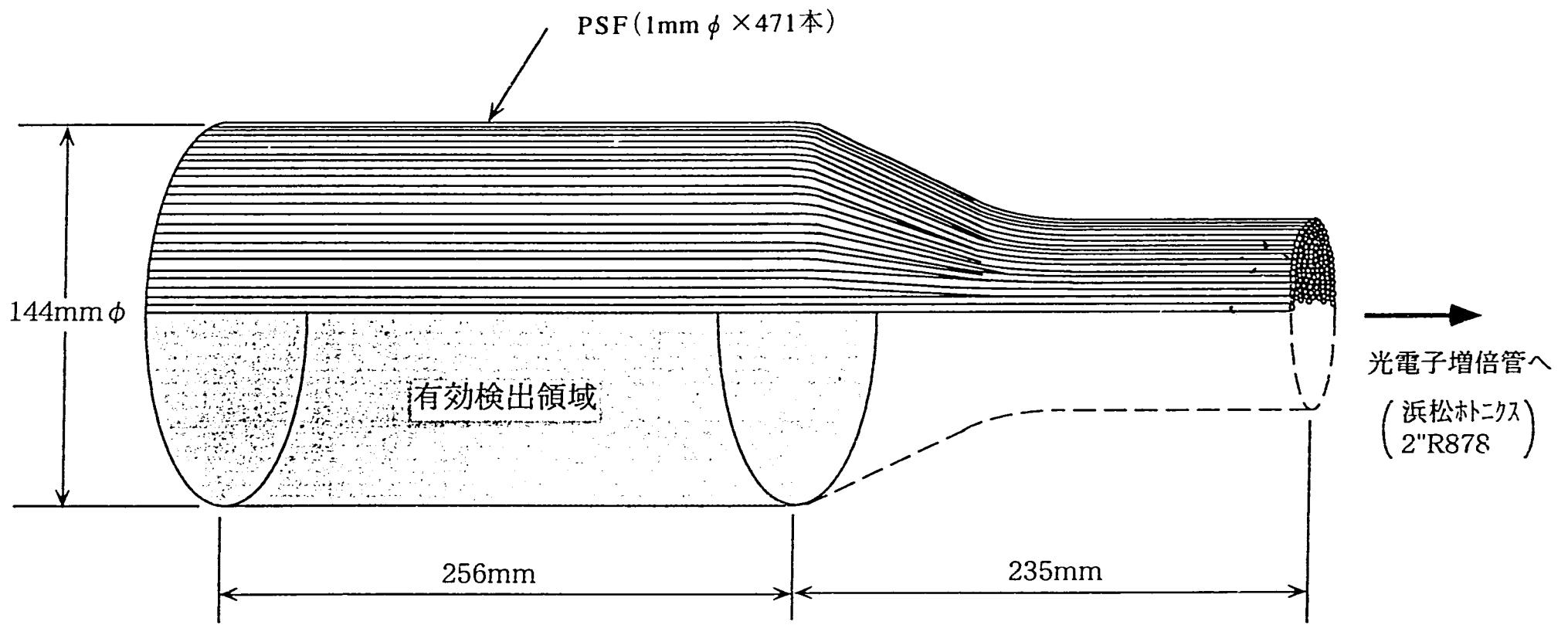


図-4.1 砲状型検出器の概略図

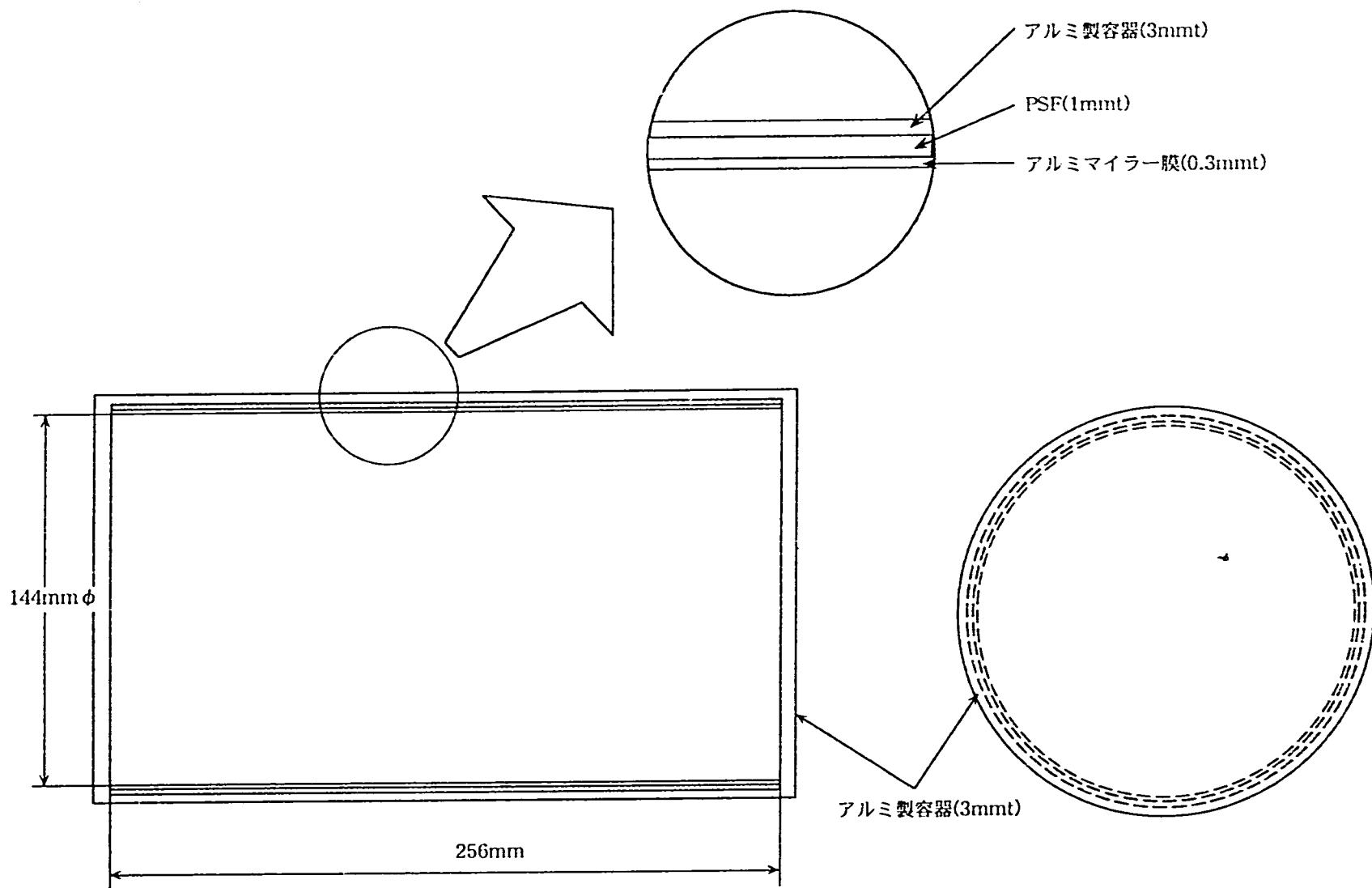


図-4.2 砲状型検出器の計算モデル化体系

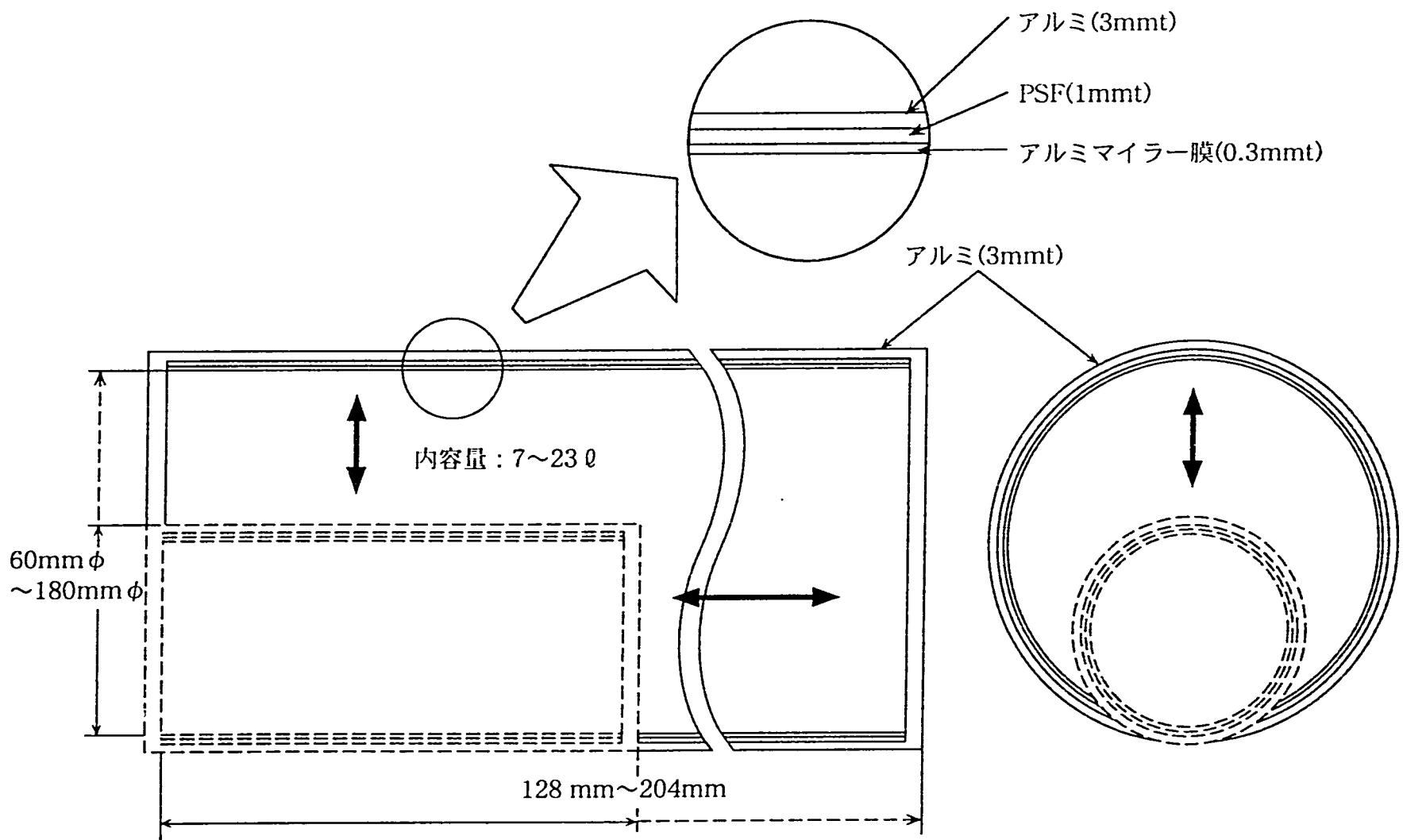


図-4.3 筒状検出器の形状、容積の最適化計算モデル体系

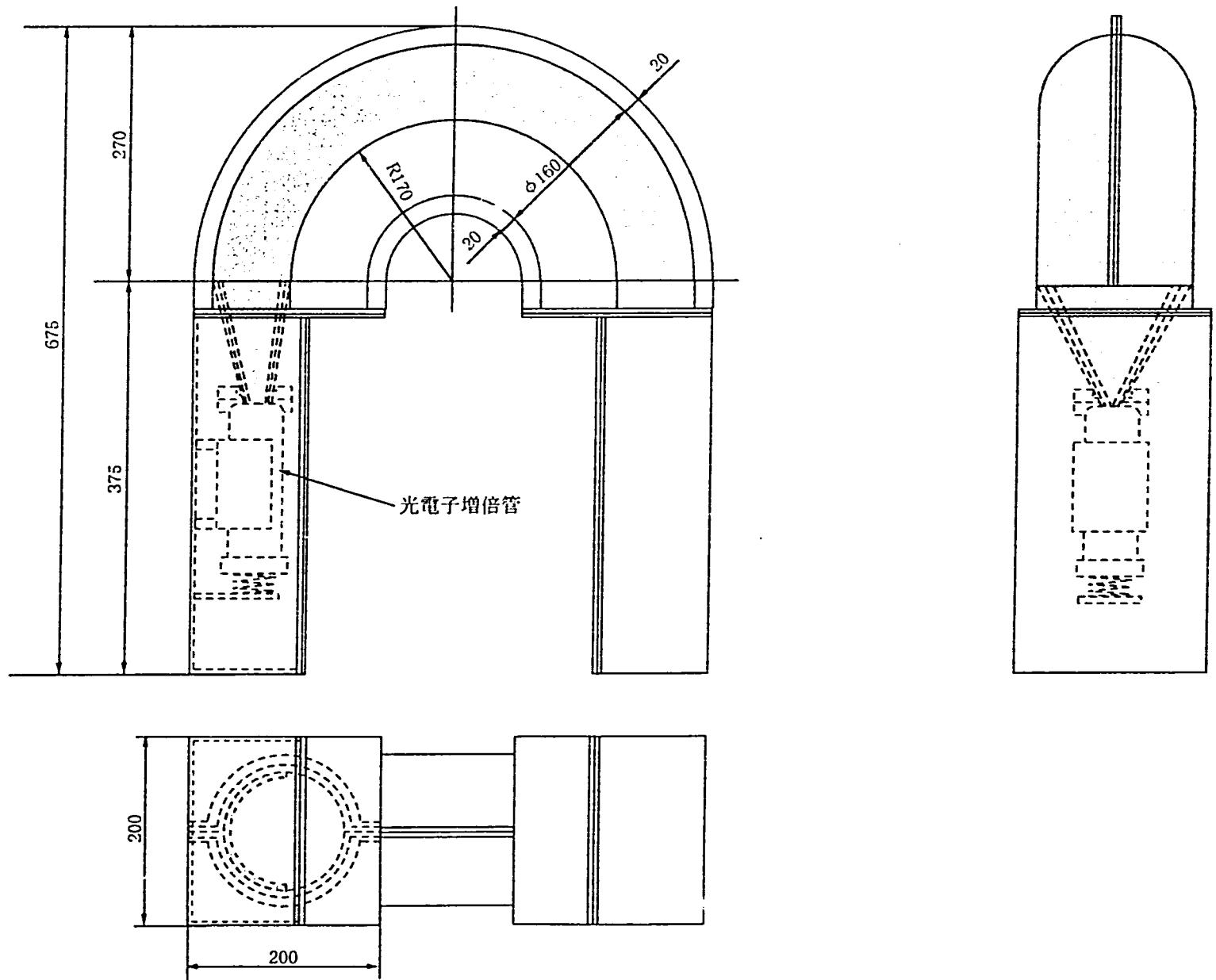


図-4.4 U字管型検出器1号機の概略図

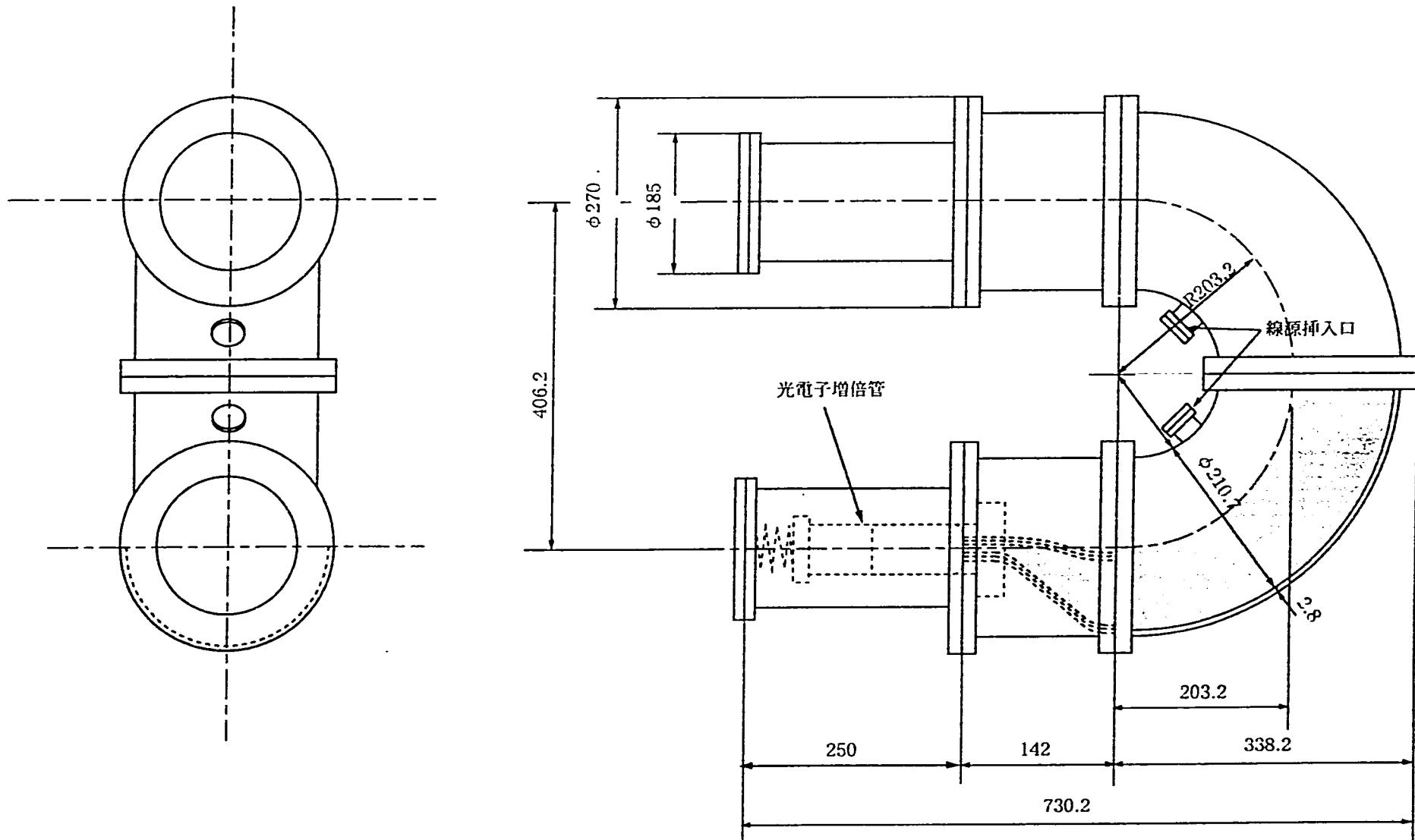


図-4.5 U字管型検出器2号機の概略図

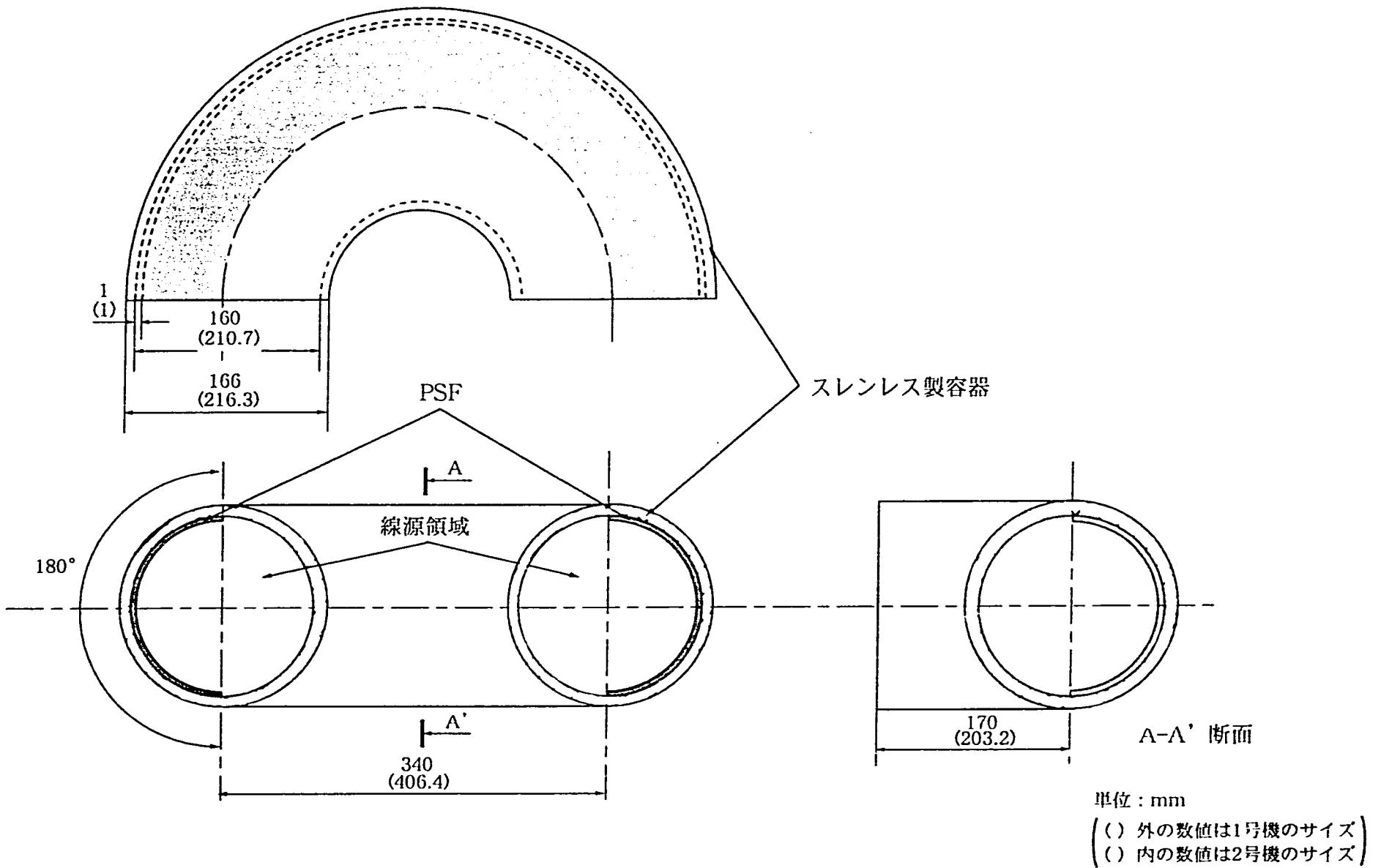
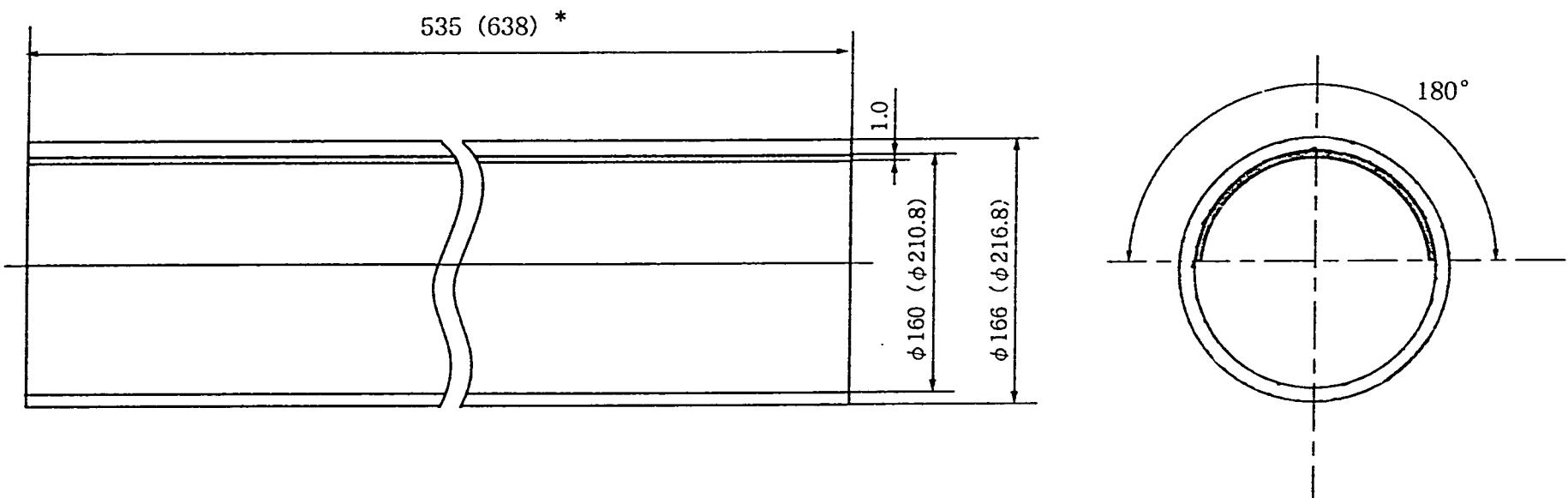


図-4.6 U字管型検出器の計算モデル体系



* : () 外はU字管型検出器1号機の半円周長
() 内はU字管型検出器2号機の半円周長

図-4.7 直管型検出器の計算モデル体系 (U字管型検出器との感度比較計算)

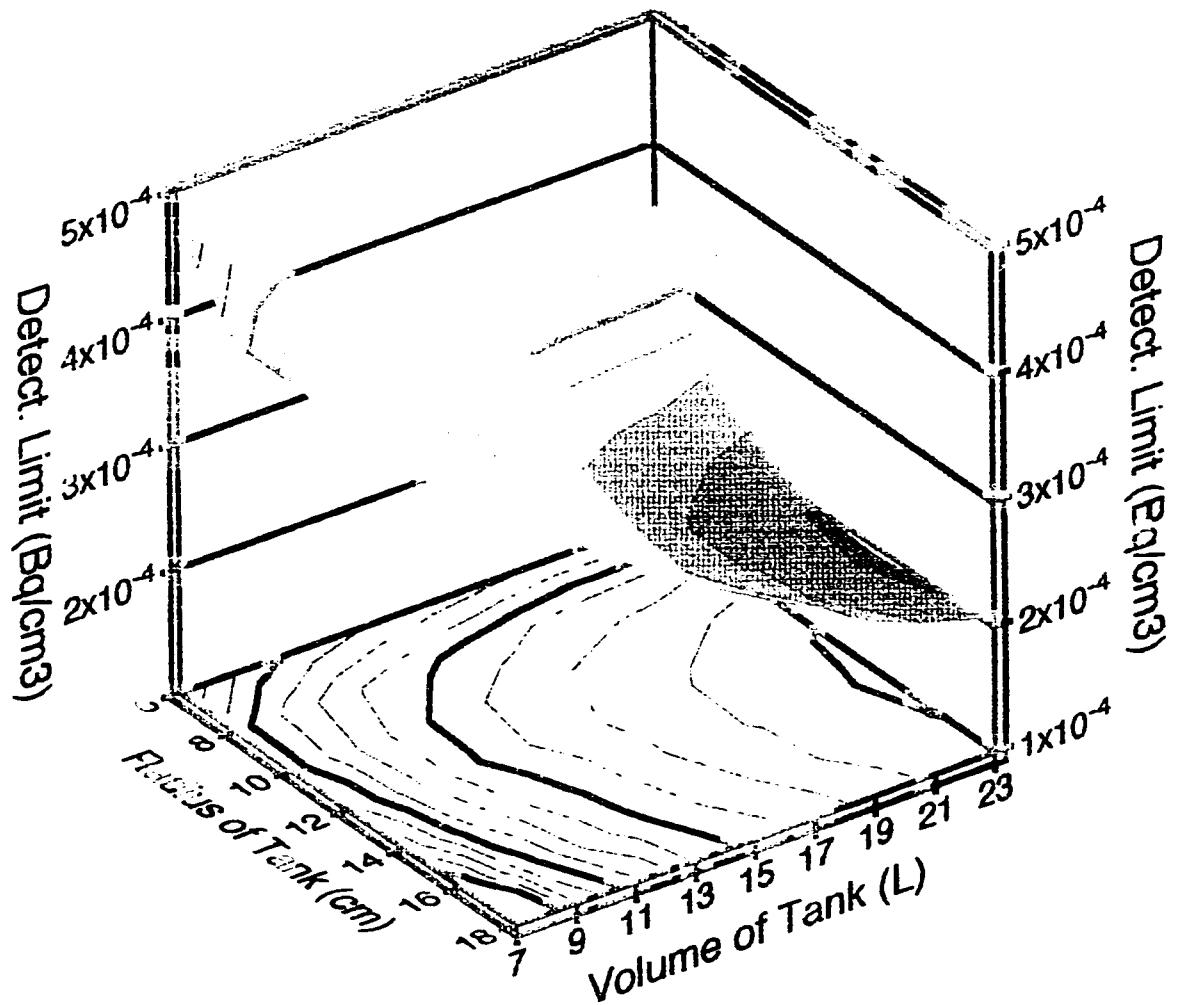
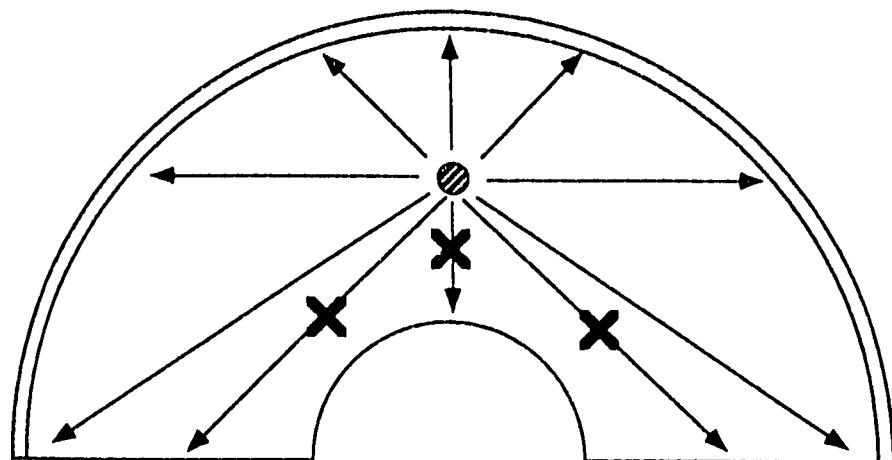
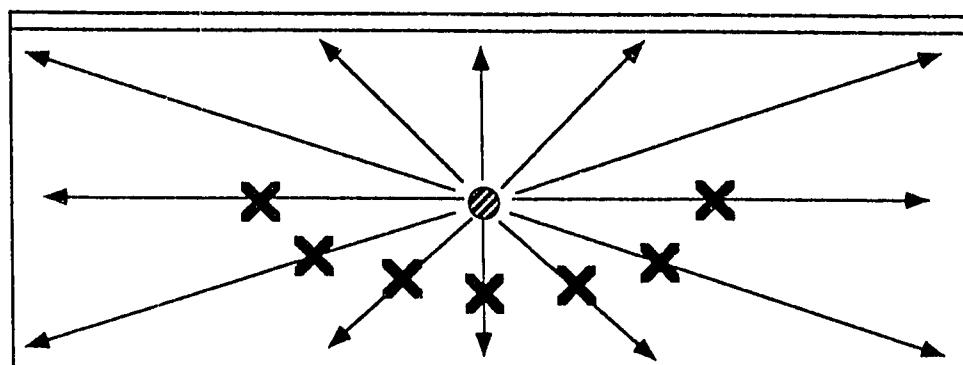


図-4.8 筒状型検出器の形状、容積の最適化計算結果



U字管型検出器の場合



直管型検出器の場合

→ : 荷電粒子の軌跡

✖ : 検出器に直接吸収されない荷電粒子

● : 放射線源

□ : PSF

図-4.9 U字管型検出器と直管型検出器の幾何学効率の比較

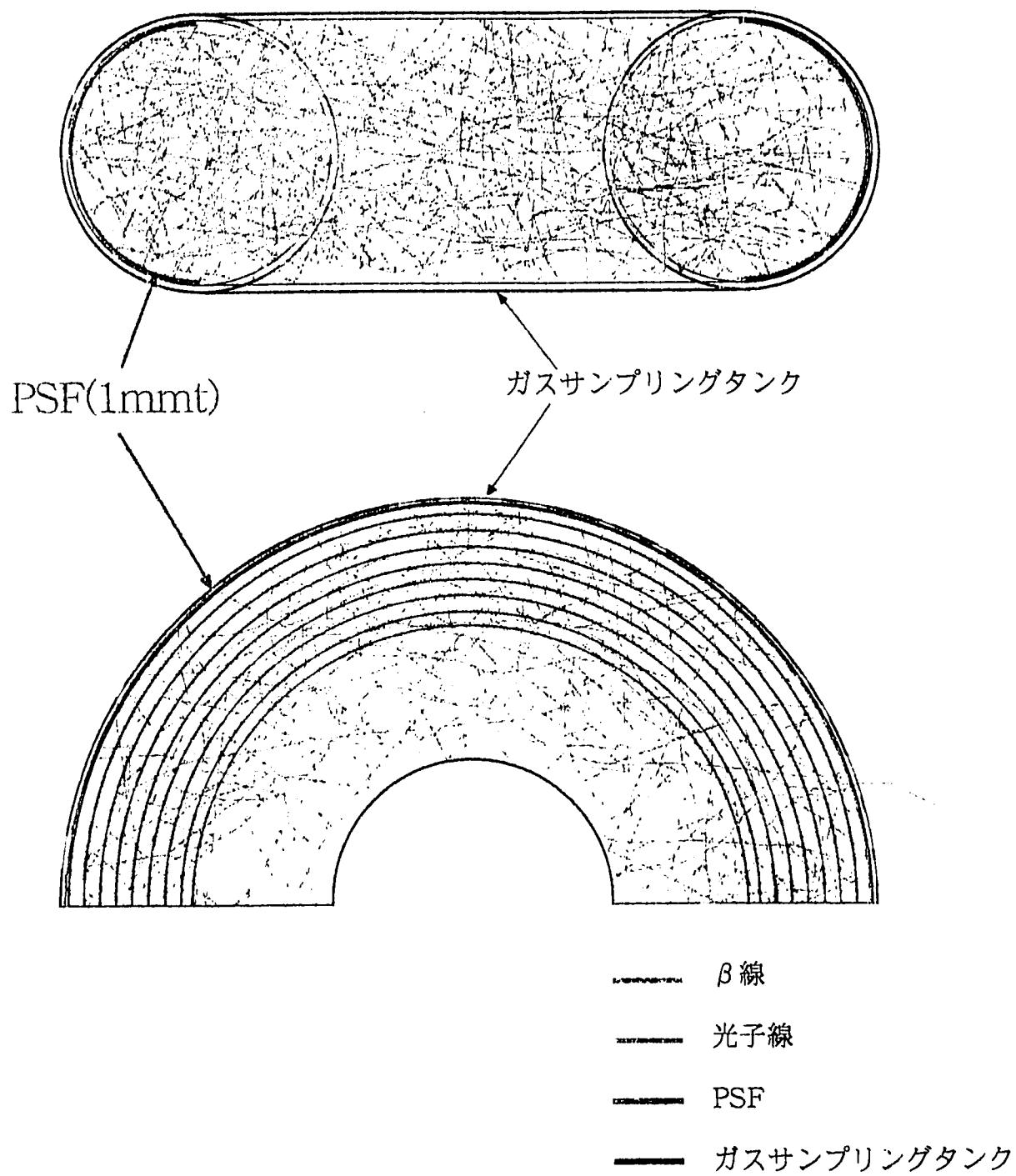


図-4.10 U字管型検出器での β 線および光子の飛跡シミュレーション
〔核種： ^{13}N , 入射粒子数：1000個〕

5. 放射性ガスモニタの特性試験

5.1 試験の概要

4つのファイバー検出器を製作し、以下の特性試験を実施した。

(1)砲状型検出器（写真-5.1）の特性試験

- ・エネルギー及び感度特性試験

(2)基礎試験用平板型検出器（写真-5.2）の特性試験

- ・同時計測法を用いたバックグラウンド低減効果試験
- ・PSFの位置特性試験（放射線入射位置による感度評価）
- ・ファイバーの種類の違いによる感度比較

(3)U字管型ガスモニタ 1号機（写真-5.3）の特性試験

- ・エネルギー特性
- ・感度試験

(4)U字管型ガスモニタ 2号機（写真-5.4）の特性試験

- ・感度試験

5.2 砲状型検出器の特性試験

5.2.1 試験内容

PSFの β 線用ガスモニタ検出器への適用の可否について確認するための基礎データ取得を目的として、バイクロン社製の砲状に束ねた検出器(BCF-10)を用いて、特性試験を行った。

β 線に対するエネルギー及び感度特性を評価するため点線源（チェックング線源）による感度特性試験及び実ガス校正試験を行った。点線源による試験では、ガスタンクの中央部に ^{14}C , ^{22}Na , ^{36}Cl , ^{90}Sr - ^{90}Y , ^{147}Pm , ^{204}Tl の6核種（仮LMRI製 β 標準線源）をそれぞれ置き、各核種に対する計数効率を測定した。また、検出器内に ^{85}Kr ガスを通気させて基準電離箱（1.5 l 円筒型電離箱）の指示値との比較から計数効率及び濃度換算係数を算出した。校正ループ(図-5.1参照) を用いた実ガス(^{85}Kr)による校正手順を以下に示す。

- ①基準となる電離箱と被校正ガスモニタを校正ループに接続し、アンプルパンチャー（もしくは電離箱）から放射性ガスを循環系に流し込む。
- ②乾燥空気供給バルブを開け、ポンベより乾燥空気をループ内に流し、系内を約1気圧にする。
- ③循環ポンプを作動させ、系内のガス濃度を一定にする。
- ④電離箱と被校正ガスモニタの指示値が安定したら、循環ポンプを停止させ、

- その後、電離箱と被校正ガスモニタの指示値を読む。
- ⑤循環系内の放射性ガスを含んだ空気を真空ポンプにて一定量排気する。
 - ⑥②～⑤の操作を繰り返し、循環系の放射能濃度を変え測定する。
 - ⑦電離箱の電流値からループ内の放射能濃度を求め、ガスモニタの指示値との比率から比較ガスモニタの濃度換算係数を算出する。

5.2.2 試験結果及び考察

砲状型検出器の点線源（チェックキング線源）による感度特性試験結果および実ガス（ ^{85}Kr ガス）校正試験結果を表-5.1に示す。また、バックグラウンドを差し引いた正味の波高分布を図-5.2に示す。

これらの試験結果から以下のことが得られた。

- (1)本検出器は、 ^{14}C , ^{147}Pm 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十分な感度を示すことが分かった。
- (2) ^{85}Kr ガスに対する濃度換算係数では、従来のプラスチックシンチレータ型ガスモニタ（約 $5 \times 10^{-3}\text{Bq}/\text{cm}^3/\text{cps}$ ）に対して約6倍感度が向上していることが分かった。
- (3)その一方でバックグラウンドが従来型のガスモニタと比べ高く、 ^{13}N の排気中濃度限度（ $6 \times 10^{-4}\text{Bq}/\text{cm}^3$ ）まで測定できないことが分かった。
- (4)低エネルギーの核種に対してほとんど感度を有しなかった原因としてガスサンプリングタンクとして使用したアルミ箔による低エネルギー β 線の遮へいが考えられる。

5.3 基礎試験用平板型検出器の特性試験

5.3.1 試験内容

砲状型検出器の特性試験結果より、検出限界濃度を向上するためには、バックグラウンドの低減を図る必要があることが分かった。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及び光電子増倍管からのサーマルノイズが考えられる。本試験においては、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するため同時計測法を用いた装置の基礎特性試験を行った。

さらに、本試験では、バックグラウンド低減効果試験のほかに、放射線入射位置による感度評価及びファイバーの種類の違いによる感度比較試験を行った。

使用した検出器は、 $1\text{mm}\phi \times 34\text{cm}$ のPFS100本を平面に束ね、両端にそれぞれ1インチの光電子増倍管を接続したものを用いた。

基礎試験用平板型検出器の外観図を図-5.3に示す。

以下に各々の試験内容について示す。

(1) バックグラウンド低減効果試験

同時計測法を用いた装置でのバックグラウンド低減効果を確認するため、同時計数時のバックグラウンド計数率（PSF両端の光電子増倍管に到達した光のみを計数）と両端それぞれのバックグラウンド計数率を比較してバックグラウンド低減効果を確認した。

また、宇宙線等の自然放射線に対する低減策として、鉛ブロック（厚さ5cm）による遮へい効果及び平板検出器を床に対して垂直に置いた場合と水平に置いた場合でのバックグラウンド計数率の変化を確認した。

(2) 放射線入射位置感度比較試験

放射線入射位置による感度の違いを確認するため、点線源（チェックング線源）にてPSFの軸方向に9箇所、垂直方向5箇所についてそれぞれの感度比較を行った（図-5.3）。

使用した点線源は、 ^{14}C , ^{22}Na , ^{36}Cl , ^{90}Sr - ^{90}Y , ^{147}Pm の5核種（仏LMRI製β標準線源）である。

(3) PSFの種類の違いによる感度比較試験

2社3種類のPSFを使用した同形状の検出器を作成し、その中央部に ^{14}C , ^{22}Na , ^{36}Cl , ^{90}Sr - ^{90}Y , ^{147}Pm の5核種の点線源をそれぞれ置き、各々の計数効率を求めた。使用したPSFは、バイクロソーラー社製BCF-10、クラレ社製SCSF-62、SCSF-62（マルチクラッド）である。

5.3.2 試験結果及び考察

基礎試験用平板検出器のバックグラウンド低減効果試験の結果を表-5.2に、放射線入射位置による感度試験の結果を表-5.3～5.4及び図-5.4～5.5に、PSFの種類の違いによる感度比較試験を表-5.5に示す。

これらの試験結果から以下のことが得られた。

(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に低減することが分かった。また、検出器を床に対して垂直に置くことでバックグラウンド計数率が約2割低減され、さらに厚さ5cmの鉛遮へいを施すことで約4割低減されることが分かった。

(2) 放射線入射位置の違いによる感度比較の結果、PSFに対して軸方向では、低エネルギーの核種(^{14}C , ^{147}Pm)を除いて感度は、ほぼ均衡していることが分かった。また、垂直方向の場合、SCSF-62では低エネルギーの核種(^{14}C , ^{147}Pm)で相対感度が50%を下まわっているが、SCSF-62Mでは全核種に

対して60%以上の相対感度を有していることが分かった。

- (3) メーカーの異なるほぼ同じ仕様のPSF(BCF-10とSCSF-62)では、低エネルギーの核種(^{14}C , ^{147}Pm)を除き、感度の違いが最大で約10%以下であった。

仕様の異なるPSFの場合では、SCSF-62に対してSCSF-62マルチクラッドの方が低エネルギーの核種(^{14}C , ^{147}Pm)を除き、最大で約20%感度が良いことが分かった。

5.4 U字管型検出器1号機の特性試験

5.4.1 試験内容

検出器のメンテナンス性、PSFの加工性を向上させるため、筒の半周分のみをPSFを巻くこととした。また、半周のみのPSFを巻いたタンク形状をU字状にしたU字管型検出器の方が直管形状のガスタンクより効率が良いことが分かった(4.3参照)。

そこでU字状のガスタンクを作成し、特性試験(β 線による感度試験(チェック線源)、実ガスによる感度試験)を行った(製作方法については、「付録」参照のこと)。

試験に使用した計測機器等を図-5.6に示す。

以下の各々の試験内容について示す。

(1) β 線による感度試験

β 線源(^{137}Cs , ^{60}Co , ^{90}Sr - ^{90}Y , ^{22}Na , ^{14}C , ^{147}Pm の点線源)用いて、各エネルギーに対する感度を求めた。線源は、ガスタンク中央部のチェック線源差し入れ口に設置した。

また、各核種に対して、同時計数回路出力の計数率とSingle Channel Analyzer(SCA)出力の計数率をそれぞれ測定し、同時計数回路を使用した時の計数効率への影響を確認した。

(2) 放射線入射位置感度比較試験

放射線入射位置による感度の違いを確認するため、点線源(チェック線源)にてPSFの軸方向に5箇所、垂直方向3箇所についてそれぞれの感度比較を行った。放射線源の設置位置は、図-5.7に示す。

使用した点線源は、 ^{22}Na , ^{36}Cl , ^{90}Sr - ^{90}Y , ^{60}Co , ^{204}Tl の5核種(仏LMRI製 β 標準線源)である。

(3) 実ガスによる特性試験

検出器内に ^{85}Kr ガスを通気させて基準電離箱(1.5 l円筒型電離箱)の指示

値との比較から計数効率及び濃度換算係数を算出した。

5.4.2 試験結果及び考察

β 線による感度試験及びSCA出力と同時計数回路出力との比較結果を表-5.6に、放射線入射位置感度比較試験結果を表-5.7～5.8および図-5.8～5.9に、実ガス(^{85}Kr)による感度試験結果を表-5.9に示す。

これらの試験結果から以下のことが得られた。

- (1) SCA出力と同時計数回路出力計数率を比較した結果、エネルギーの低い ^{147}Pm を除いて、同時計数回路を使用することで、しないときに比べて計数率 $1/3$ から $2/3$ 程度感度が低くなることが分かった。また、 ^{147}Pm については、 β 線最大エネルギーが低くため光の発生量が少なく、その光が両端の光電子倍増管に同時に到達する量が他の核種と比べ少なくなる。このことにより、同時計数回路を使用した方が $1/16$ と大きく感度が低下したものと思われる。
- (2) チェッキング線源による線源位置特性試験の結果、最大エネルギー300KeV 以上の β 線核種については、PSF の軸方向及び垂直方向においてほぼ同程度の感度を有していることが確認できた。
- (3) 実ガスによる感度試験の結果、本検出器の ^{85}Kr に対する検出限界濃度（スケーラ100sec測定）は、 $9.25 \times 10^{-4}\text{Bq/cm}^3$ (遮へいなし) であることが確認できた。
- (4) 本ガスタンクは、アルミ板2枚をプレス加工にて製作したため、試験中に気密性を満足できないことが判明し、製作方法の改善が必要であることが分かった。

5.5 U字管型検出器2号機の特性試験

5.5.1 試験内容

U字管型検出器1号機の特性試験結果より、検出限界濃度を向上させる必要があることが分かった。そのため、感度向上を目的としてタンク容積を大きくした。この検出器を用いて特性試験を行った。併せて、気密性を向上させるため直角エルボをつなぎ合わせる方法を採用した（図-4.5 参照）。

試験項目は、 β 線による感度試験（チェックング線源）、実ガスによる感度試験及びバックグラウンド低減効果試験である。

以下の各々の試験内容について示す。

(1) β 線による感度試験

^{22}Na , ^{14}C , ^{147}Pm , ^{90}Sr - ^{90}Y , ^{60}Co , ^{204}Tl の5核種（仮LMRI製 β 標準線源）を使用して感度比較を行った。線源位置を図-5.8に示す。

(2) 実ガスによる特性試験

ガスモニタ校正ループを用いて検出器の ^{85}Kr に対する計数効率を測定し、換算係数を求める。

(3) BGの遮へい効果試験

厚さ5cmの鉛ブロックを用いて検出器有感部を遮へいし、バックグラウンドの変化を比較する。

5.5.3 試験結果及び考察

β 線チェック線源による感度試験結果を表-5.10に、実ガス(^{85}Kr)による感度試験結果を表-5.11に、BGの遮へい効果試験結果を表-5.12に示す。これらの試験結果から以下のことが得られた。

- (1) チェッキング線源による線源位置特性試験の結果、高エネルギー（最大エネルギー：300 keV以上）の β 線核種については、検出器内の2カ所で同程度の計数効率である。
- (2) 低エネルギー核種(^{14}C , ^{147}Pm)に対しては、ほとんど感度を有しない。
- (3) 実ガス校正の結果、本検出器の ^{85}Kr に対する検出限界濃度（スケーラ100sec測定）は、 $5.4 \times 10^{-4} \text{Bq/cm}^3$ （遮へいなし）である。
従来型のプラスティックシンチレーション型ガスモニタをスケーラにて100sec測定しても $3.5 \times 10^{-3} \text{Bq/cm}^3$ （表-5.13参照のこと）であり、本検出器の有効性が確認できた。
- (4) 遮へい効果試験の結果、5cm厚さの鉛にて遮へいすることで約4割程度バックグラウンドが低減できた。
- (5) 本ガスモニタタンクの耐圧試験より、U字管型ガスモニタタンクの製作方法の妥当性を確認できた。

表-5.1 砲状型検出器の β 線チェックング線源
および実ガス (^{85}Kr) による感度特性試験結果

核種	β 線最大エネルギー (MeV)	放出率 (%)	線源強度 (cps/2π)	全計数率 (cps)	BG計数率 (cps)	正味計数率 (cps)	計数効率 (%)	換算係数 (Bq/cm ³ /cps)
^{14}C	0.156	100	2495.79	4.17	2.17	2.00E+00	0.08	-
^{147}Pm	0.225	100	1187.57	27.23	2.17	2.51E+01	2.11	-
^{22}Na	0.546	100	779.36	259.36	2.17	2.57E+02	33.0	-
^{36}Cl	0.704	100	3774.97	1591.43	2.17	1.59E+03	42.1	-
^{203}Tl	0.763	100	1108.64	371.35	2.17	3.69E+02	33.3	-
^{90}Sr	0.546	100	2879.64	1496.70	2.17	1.49E+03	51.9	-
^{90}Y	2.268							
^{85}Kr	0.687	100	1.9(Bq/cm ³)	2299.84	2.17	2.30E+03	29.0	8.27×10^{-1}

表5.2 平板型検出器のバックグラウンド低減効果試験結果

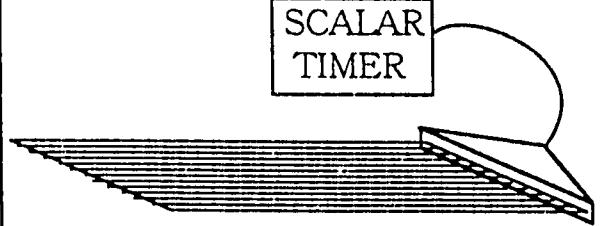
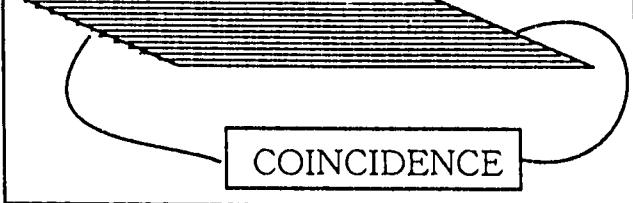
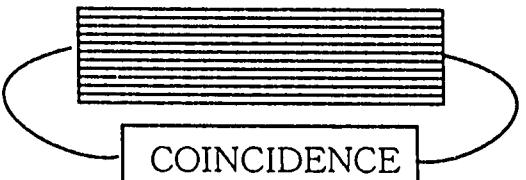
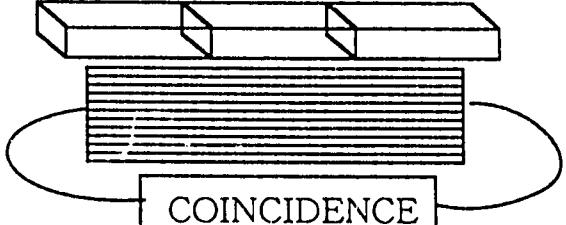
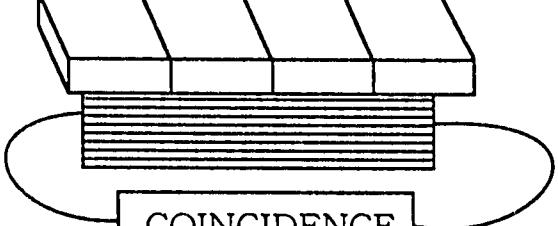
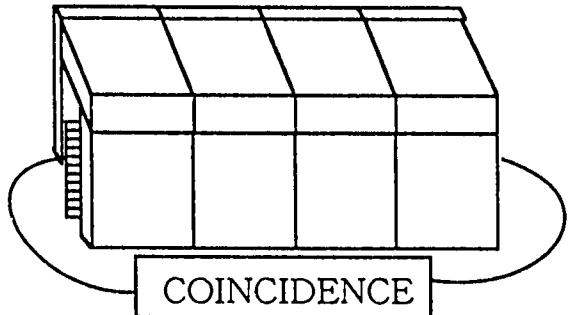
検出器状態	計数率 (cps)	
 <p>SCALAR TIMER</p>	<ul style="list-style-type: none"> 同時計数回路なし (検出器の片端だけの計数率) 	21.1
 <p>COINCIDENCE</p>	<ul style="list-style-type: none"> 同時計数回路使用 検出器を水平に設置 	10.2
 <p>COINCIDENCE</p>	<ul style="list-style-type: none"> 同時計数回路使用 検出器を垂直に設置 	8.46
 <p>COINCIDENCE</p>	<ul style="list-style-type: none"> 同時計数回路使用 検出器を垂直に設置 鉛ブロック (5×3×20) を上部 縦1列に3個設置 	7.42
 <p>COINCIDENCE</p>	<ul style="list-style-type: none"> 同時計数回路使用 検出器を垂直に設置 鉛ブロック (5×3×20) を上部 横1列に4個設置 	6.73
 <p>COINCIDENCE</p>	<ul style="list-style-type: none"> 同時計数回路使用 検出器を垂直に設置 鉛ブロック (5×3×20) を上部 横1列に4個および左右に各4個設置 	5.20

表-5.3 平板型検出器 (SCSF-62) の放射線入射位置感度比較試験結果

(X方向)	相対感度 (各核種のX-0の計数率を1.0とした時の感度)				
線源位置	¹⁴ C	¹⁴⁷ Pm	²² Na	³⁶ Cl	⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y
X-4	0.00	0.62	0.94	0.94	0.92
X-3	0.65	0.87	0.99	0.98	0.98
X-2	0.61	0.94	0.98	1.00	0.97
X-1	0.70	0.98	0.99	1.00	0.99
X-0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
X+1	0.78	0.99	1.02	0.99	1.01
X+2	0.72	0.98	1.01	0.98	1.01
X+3	0.08	1.00	0.97	0.98	0.99
X+4	0.00	0.80	0.91	0.92	0.94

(Y方向)	相対感度 (各核種のY-0の計数率を1.0とした時の感度)				
線源位置	¹⁴ C	¹⁴⁷ Pm	²² Na	³⁶ Cl	⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y
Y-2	0.00	0.52	0.79	0.93	0.76
Y-1	0.56	1.05	0.99	0.99	0.98
Y-0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Y+1	0.53	0.74	0.95	0.99	0.98
Y+2	0.02	0.43	0.65	0.94	0.83

表-5.4 平板型検出器 (SCSF-62M) の放射線入射位置感度比較試験結果

(X方向)	相対感度 (各核種のX-0の計数率を1.0とした時の感度)				
線源位置	¹⁴ C	¹⁴⁷ Pm	²² Na	³⁶ Cl	⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y
X-4	0.68	0.75	0.94	0.94	0.96
X-3	0.95	0.93	1.01	0.98	1.00
X-2	0.98	0.96	1.00	0.98	1.00
X-1	0.98	0.97	1.00	0.98	1.00
X-0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
X+1	0.91	0.91	0.99	0.98	1.00
X+2	0.90	0.88	0.97	0.98	0.99
X+3	0.89	0.80	0.96	0.97	0.98
X+4	0.56	0.56	0.89	0.94	0.92

(Y方向)	相対感度 (各核種のY-0の計数率を1.0とした時の感度)				
線源位置	¹⁴ C	¹⁴⁷ Pm	²² Na	³⁶ Cl	⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y
Y-2	0.62	0.63	0.83	0.88	0.92
Y-1	0.88	0.97	0.96	0.97	1.00
Y-0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Y+1	0.87	1.06	0.97	0.97	1.00
Y+2	0.67	0.83	0.89	0.91	0.94

表-5.5(a) P S F の違いによる感度比較
(BCF-10とSCSF-62)

核種	最大エネルギー (MeV)	線源強度 (cps/2π)	BCF-10 (A)		SCSF-62 (B)		B/A
			正味計數率 (cps)	効率 (%)	正味計數率 (cps)	効率 (%)	
¹⁴ C	0.156	2496.48	0.50	0.02	0.25	0.01	0.50
¹⁴⁷ Pm	0.69	2182.68	11.13	0.510	14.19	0.650	1.27
²² Na	1.82	3775.01	611.55	16.2	660.63	17.5	1.08
³⁶ Cl	0.714	3775.01	698.38	18.5	770.10	20.4	1.10
²⁰⁴ Tl	0.766	1684.70	392.54	23.3	419.49	24.9	1.07
⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y	0.546(2.268)	3042.21	705.79	23.2	739.26	24.3	1.05

表-5.5(b) P S F の違いによる感度比較
(SCSF-62とSCSF-62M)

核種	最 大 エネルギー (MeV)	線源強度 (cps/2π)	SCSF-62 (A)		SCSF-62M (B)		B/A
			正味計数率 (cps)	効率 (%)	正味計数率 (cps)	効率 (%)	
¹⁴ C	0.156	2495.8	22.4	0.90	11.2	0.45	0.50
¹⁴⁷ Pm	0.69	1253.2	69.3	5.53	72.3	5.77	1.04
²² Na	1.82	812.4	213.2	26.2	253.0	31.1	1.19
³⁶ Cl	0.714	3775.0	1187.3	31.5	1367.0	36.2	1.15
²⁰⁴ Tl	0.766	1140.8	310.5	27.2	359.0	31.5	1.16
⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y	0.546(2.268)	2890.5	935.5	32.4	1077.5	37.3	1.15

表-5.6 U字管型検出器1号機のSCA出力と同時計数回路出力の感度比較結果

測定条件 高圧 : 1500V

Discri : 50mV

Amp Gain : 1×200

Shaping Time : 0.04 μsec

Coin. Time : 110nsec

核種	最大エネルギー (MeV)	線源強度 (cps/4π)	ch	SCA出力				同時計数回路出力				感度比(A/B)
				全計数率 (cps)	BG計数率 (cps)	正味計数率 (cps)	計数効率 (%)	全計数率 (cps)	BG計数率 (cps)	正味計数率 (cps)	計数効率 (%)	
¹⁴⁷ Pm	0.69	1663.70	Ach	4537.10	4068	469	28.2	93.28	67.60	25.7	1.54	15.6
			Bch	3423.70	3093	331	19.9					
³⁶ Cl	0.71	3637.80	Ach	5272.80	4068	1205	33.1	935.00	67.60	867	23.8	1.35
			Bch	4233.20	3093	1140	31.3					
²⁰⁴ Tl	0.77	1405.20	Ach	4675.50	4068	608	43.2	352.80	67.60	285	20.3	2.02
			Bch	3637.90	3093	545	38.8					
⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y	0.55 2.268	2966.10	Ach	5277.00	4068	1209	40.8	797.10	67.60	730	24.6	1.60
			Bch	4214.30	3093	1121	37.8					
²² Na	1.82	1107.00	Ach	4690.10	4068	622	56.2	276.00	67.60	208	18.8	2.61
			Bch	3557.80	3093	465	42.0					

表-5.7 U字管型検出器1号機の放射線入射位置感度比較試験結果
(検出器:BCF-10)

(X方向)	⁶⁰ Co		¹³⁷ Cs		³⁶ Cl		²² Na		²⁰⁴ Tl		⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y	
	正味計数率	相対感度	正味計数率	相対感度	正味計数率	相対感度	正味計数率	相対感度	正味計数率	相対感度	正味計数率	相対感度
線源位置												
X-2	651.09	1.16	1093.74	1.12	1177.87	1.04	310.71	0.84	433.40	0.90	859.37	0.86
X-1	627.77	1.12	1034.86	1.06	1162.79	1.03	333.64	0.90	436.09	0.91	993.75	0.99
X-0	559.14	1.00	975.24	1.00	1132.20	1.00	371.90	1.00	480.98	1.00	1001.11	1.00
X+1	578.74	1.04	1072.08	1.10	1226.18	1.08	333.43	0.90	446.44	0.93	989.44	0.99
X+2	655.30	1.17	1120.39	1.15	1258.48	1.11	342.26	0.92	453.09	0.94	871.24	0.87

(Y方向)	⁶⁰ Co		¹³⁷ Cs		³⁶ Cl		²² Na		²⁰⁴ Tl		⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y	
	正味計数率	相対感度	正味計数率	相対感度	正味計数率	相対感度	正味計数率	相対感度	正味計数率	相対感度	正味計数率	相対感度
線源位置												
Y-1	649.16	1.16	1126.53	1.16	1214.97	1.07	309.86	0.83	508.69	1.06	977.22	0.98
Y-0	559.14	1.00	975.24	1.00	1132.20	1.00	371.90	1.00	480.98	1.00	1001.11	1.00
Y+1	539.88	0.97	994.27	1.02	1152.72	1.02	304.94	0.82	425.39	0.88	959.26	0.96

表-5.8 U字管型検出器1号機の放射線入射位置感度比較試験結果
(検出器:SCSF-62)

(X方向)	⁶⁰ Co		¹³⁷ Cs		³⁶ Cl		²² Na		²⁰ Tl		⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y	
線源位置	正味計数率	相対感度	正味計数率	相対感度	正味計数率	相対感度	正味計数率	相対感度	正味計数率	相対感度	正味計数率	相対感度
X-2	653.90	1.11	963.24	0.91	1078.98	0.89	310.71	0.84	377.13	0.99	847.69	0.83
X-1	582.66	0.99	1034.26	0.98	1244.83	1.03	333.64	0.90	420.89	1.10	887.94	0.87
X-0	589.65	1.00	1057.79	1.00	1213.95	1.00	371.90	1.00	382.05	1.00	1025.03	1.00
X+1	578.44	0.98	1028.74	0.97	1268.27	1.04	333.43	0.90	408.14	1.07	1000.75	0.98
X+2	648.66	1.10	1129.42	1.07	1225.35	1.01	342.26	0.92	390.87	1.02	856.64	0.84

(Y方向)	⁶⁰ Co		¹³⁷ Cs		³⁶ Cl		²² Na		²⁰ Tl		⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y	
線源位置	正味計数率	相対感度	正味計数率	相対感度	正味計数率	相対感度	正味計数率	相対感度	正味計数率	相対感度	正味計数率	相対感度
Y-1	487.66	0.83	962.74	0.91	991.80	0.82	309.86	0.83	370.54	0.97	929.01	0.91
Y-0	589.65	1.00	1057.79	1.00	1213.95	1.00	371.90	1.00	382.05	1.00	1025.03	1.00
Y+1	507.68	0.86	989.95	0.94	906.82	0.75	304.94	0.82	377.79	0.99	955.23	0.93

表-5.9 U字管型検出器1号機の実ガス (^{85}Kr) による感度試験結果

基準電離箱						ファイバーガスモニタ				
電圧(mV) Vg	B.G(mV) Vb	正味電圧(mV) Vn=Vg-Vt	電流値(A) I=Vn * 1.0E-15	濃度(Bq/cm ³) Ci= I * Ki	放射能量(Bq) Q=Ci * Vm	全計数(cps) Ng	BG(cps) Nb	正味計数(cps) Nn=Ng-Nb	換算係数(Bq/cm ³ /cps) Kfg=Ci/Nn	計数効率(%) E=Nn/Q
186	2	184	1.84E-13	8.83E-01	9.45E+03	3359	67.6	3291.4	2.68E-04	34.8
21	2	19	1.90E-14	9.12E-02	9.76E+02	425.2	67.6	357.6	2.55E-04	36.6
基準電離箱換算係数(Bq/cm ³) Ki			4.80E+12			平均換算係数(Bq/cm ³ /cps)	2.62E-04	平均計数効率(%)	3.57E+01	
						検出限界計数率(cps)	3.53	検出限界濃度(Bq/cm ³)	9.25E-04	

表-5.10 U字管型検出器2号機の β 線感度試験結果

核種	β 線最大エネルギー (MeV)	線源強度 (cps/ 2π)	BG計数率 (cps)	線源位置A			線源位置B			比 (A/B)
				全計数率 (cps)	正味計数率 (cps)	効率(A) (%)	全計数率 (cps)	正味計数率 (cps)	効率(B) (%)	
^{60}Co	0.318	2144.29	89.53	239.03	149.50	6.97	238.81	149.28	6.96	1.00
^{137}Cs	0.512	3502.95	89.53	681.21	591.68	16.9	673.05	583.52	16.7	1.01
^{22}Na	0.546	917.45	89.53	238.51	148.98	16.2	239.79	150.26	16.4	0.99
^{201}Tl	0.763	1240.39	89.53	322.11	232.58	18.8	320.95	231.42	18.7	1.01
^{90}Sr	0.546	2922.39	89.53	784.62	695.09	23.8	788.79	699.26	23.9	0.99
^{90}Y	2.268									

表-5.11 U字管型検出器2号機実ガス(^{85}Kr)による感度試験結果

基準電離箱						ファイバーガスモニタ				
電圧(mV) Vg	B.G(mV) Vb	正味電圧(mV) Vn=Vg-Vb	電流値(A) I=Vn * 1.0E-15	濃度(Bq/cm3) Ci= I * Ki	放射能量(Bq) Q=Ci * Vm	全計数(cps) Ng	BG(cps) Nb	正味計数(cps) Nn=Ng-Nb	換算係数(Bq/cm3/cps) Kfg=Ci/Nn	計数効率(%) E=Nn/Q
597	2	595	5.95E-13	2.86	6.36E+04	33561.2	165.8	33395.4	8.55E-05	52.5
304	2	302	3.02E-13	1.45	3.23E+04	16528.9	165.8	16363.1	8.86E-05	50.7
200	2	198	1.98E-13	0.950	2.12E+04	8986.6	165.8	8820.8	1.08E-04	41.7
基準電離箱換算係数(Bq/cm3) Ki			4.80E+12		平均換算係数(Bq/cm3/cps)	9.82E-05	平均計数効率(%)	46.2		
						検出限界計数率(cps)	5.51	検出限界濃度(Bq/cm3)	5.41E-04	

表-5.12 U字管型検出器2号機の遮へい効果試験結果

測定結果

鉛遮へい無状態のBG計数率 (A)	166 (cps)
鉛遮へい有状態のBG計数率 (B)	96.7 (cps)
遮へい効果比 (A/B)	0.58

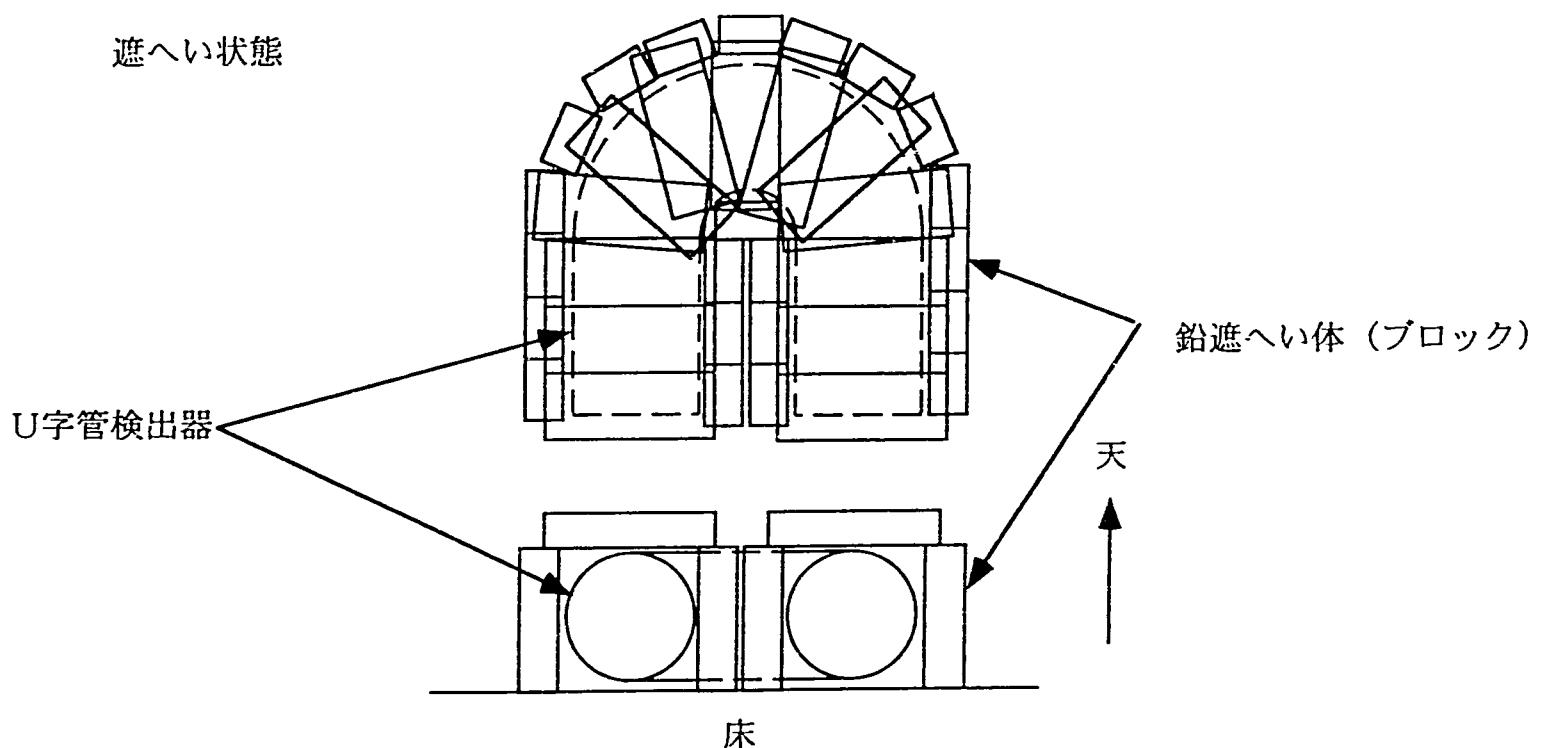


表-5.13 プラスティックシンチレーション型ガスマニタ
実ガス (^{85}Kr) による感度試験結果

検出器：プラスティックシンチレーション型ガスマニタ（検出器容積（Vm）：0.420）

基準電離箱						プラスティックシンチレーション型ガスマニタ					
電圧(mV) Vg	B.G(mV) Vb	正味電圧(mV) Vn=Vg-Vb	電流値(A) I=Vn * 1.0E-15	濃度(Bq/cm3) Ci= I * Ki	放射能量(Bq) Q=Ci * Vn	全計数(cps) Ng	BG(cps) Nb	正味計数(cps) Nn=Ng-Nb	換算係数(Bq/cm3/cps) Kfg=Ci/Nn	計数効率(%) E=Nn/Q	
390	2.0	388	3.88E-13	1.86	784	372.15	2.42	369.73	5.04E-03	47.2	
210	2.0	208	2.08E-13	1.00	420	208.37	2.42	205.95	4.85E-03	49.0	
97.0	2.0	95.0	9.50E-14	0.456	192	91.1	2.42	88.68	5.14E-03	46.2	
基準電離箱換算係数(Bq/cm3) Ki						平均換算係数(Bq/cm3/cps)	5.01E-03	平均計数効率(%)	47.4		
						検出限界計数率(cps)	0.707	検出限界濃度(Bq/cm3)	3.54E-03		

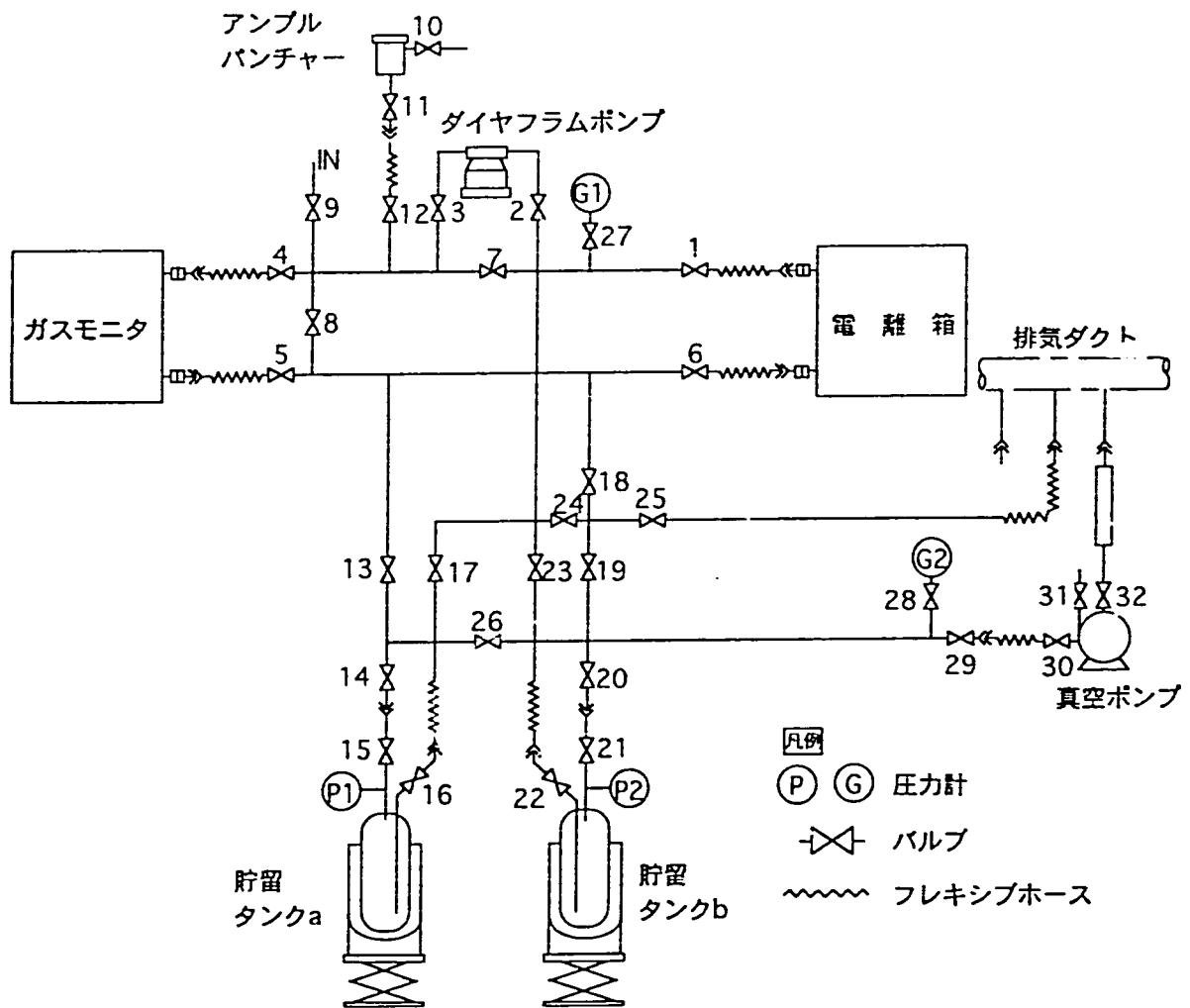


図-5.1 ガスモニタ校正ループ系統図

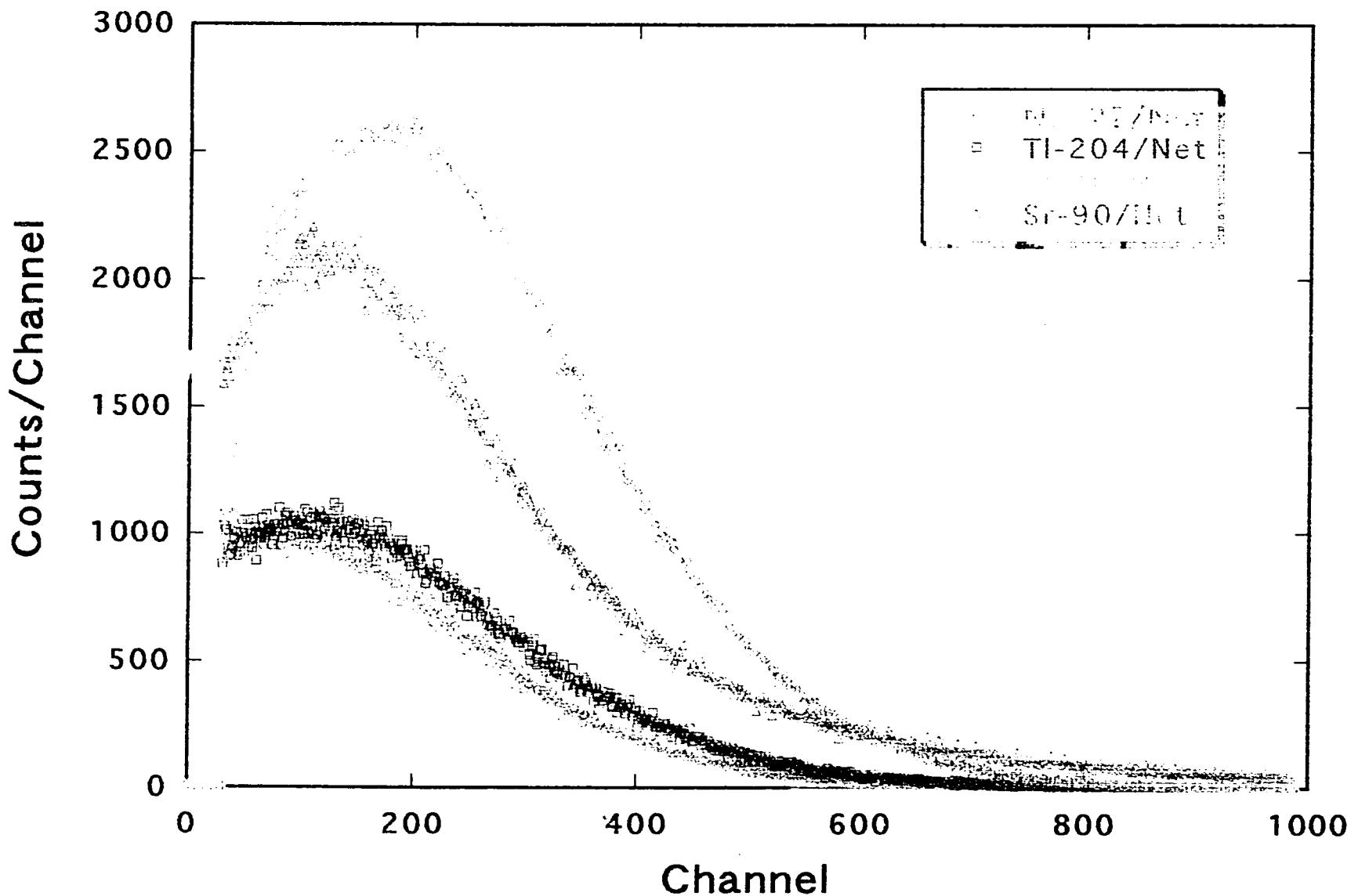


図-5.2 砲状型検出器の正味波高分布

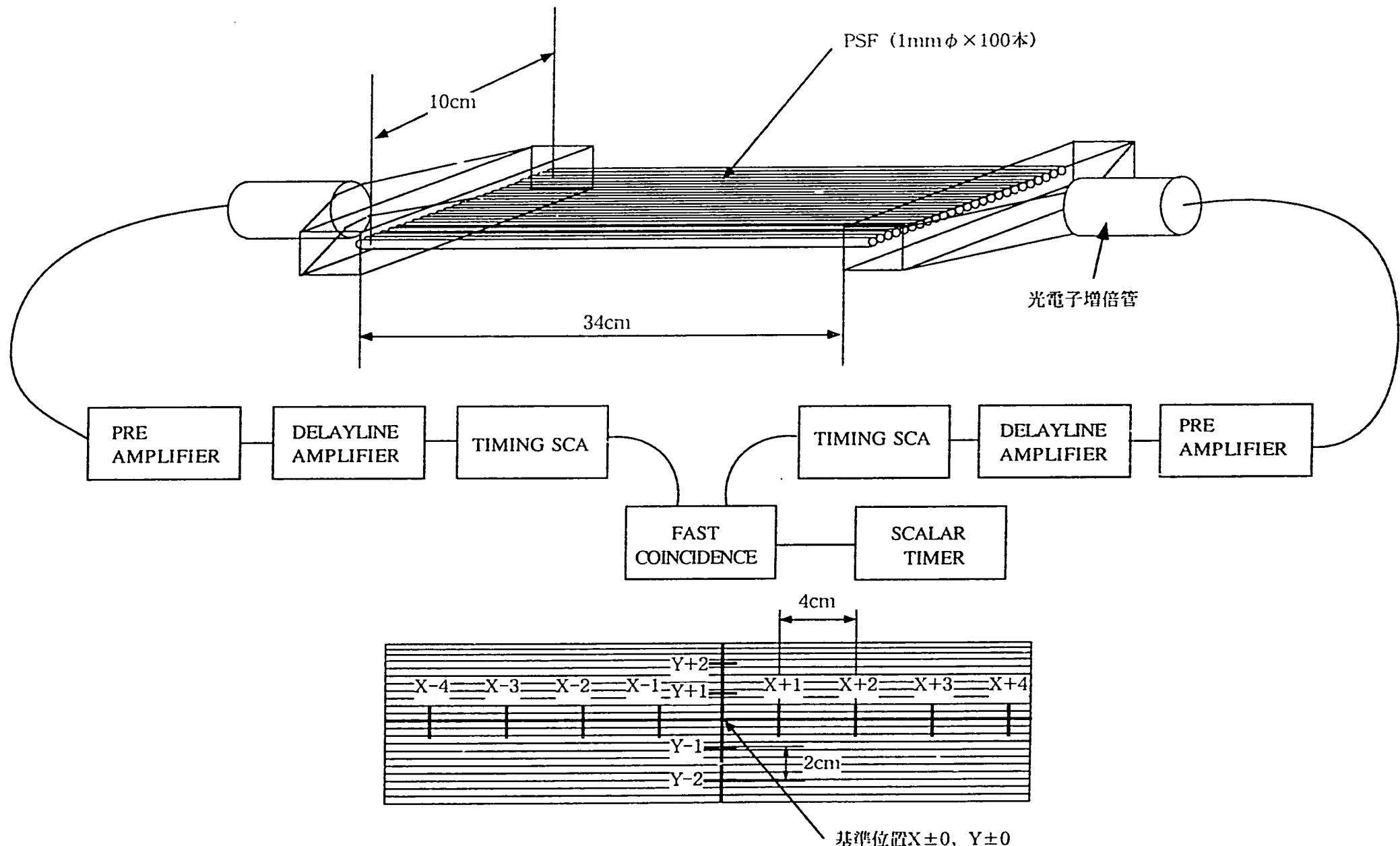


図-5.3 平板型検出器の計測器接続及び放射線入射位置図

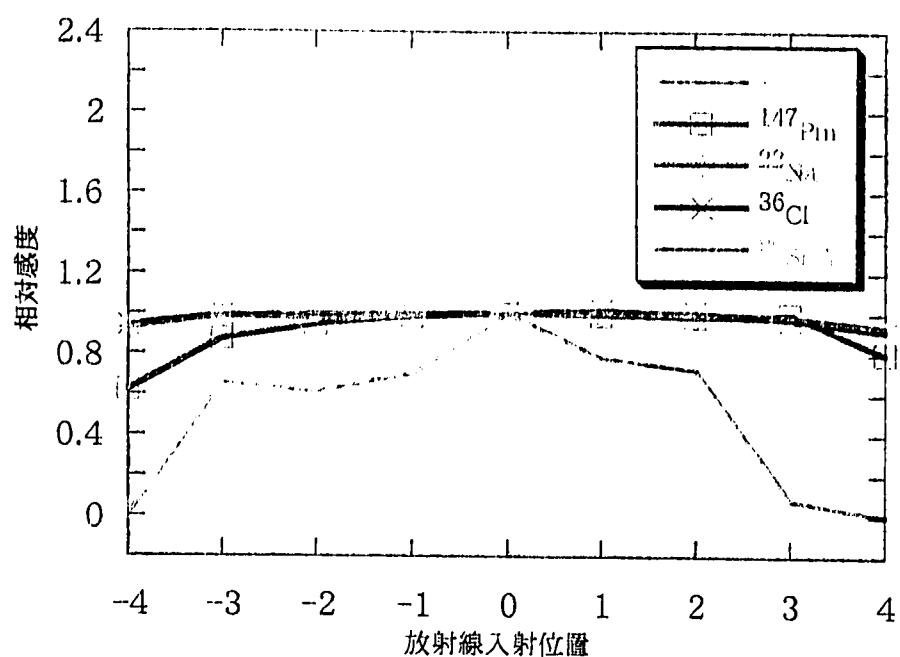


図-5.4(a) 平板型検出器 (SCSF-62) の放射線入射位置感度比較試験結果
(軸方向)

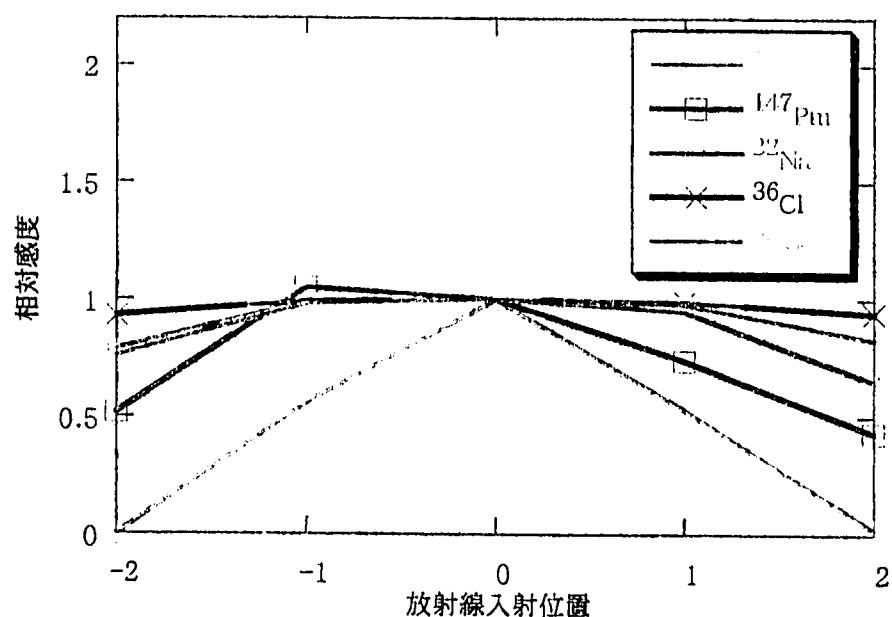


図-5.4(b) 平板型検出器(SCSF-62)の放射線入射位置感度比較試験結果
(垂直方向)

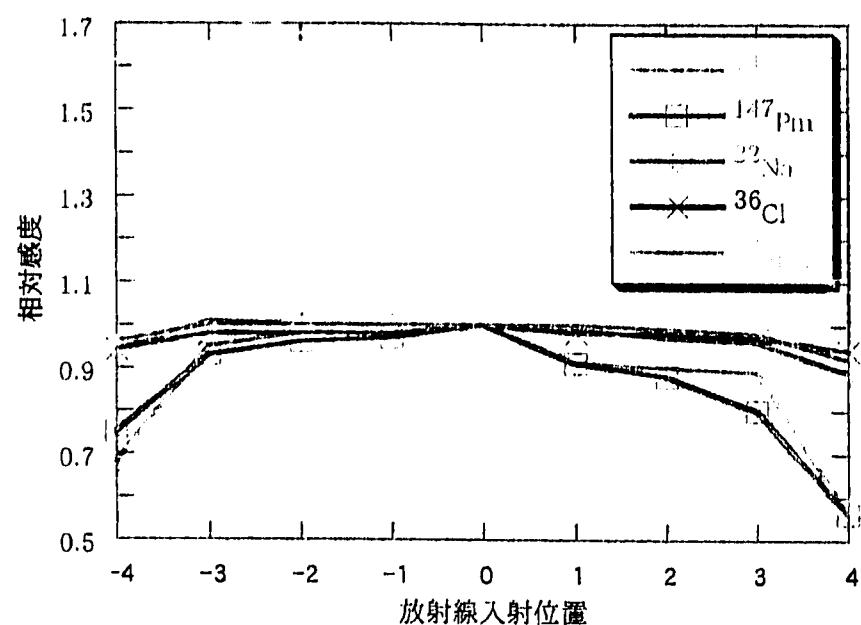


図-5.5(a) 平板型検出器(SCSF-62M)の放射線入射位置感度比較試験結果
(軸方向)

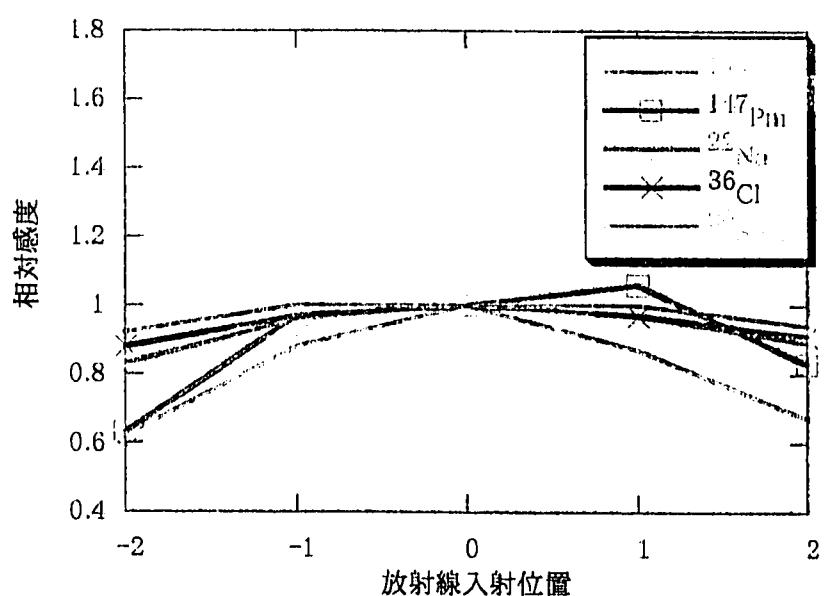


図-5.5(b) 平板型検出器(SCSF-62M)の放射線入射位置感度比較試験結果
(垂直方向)

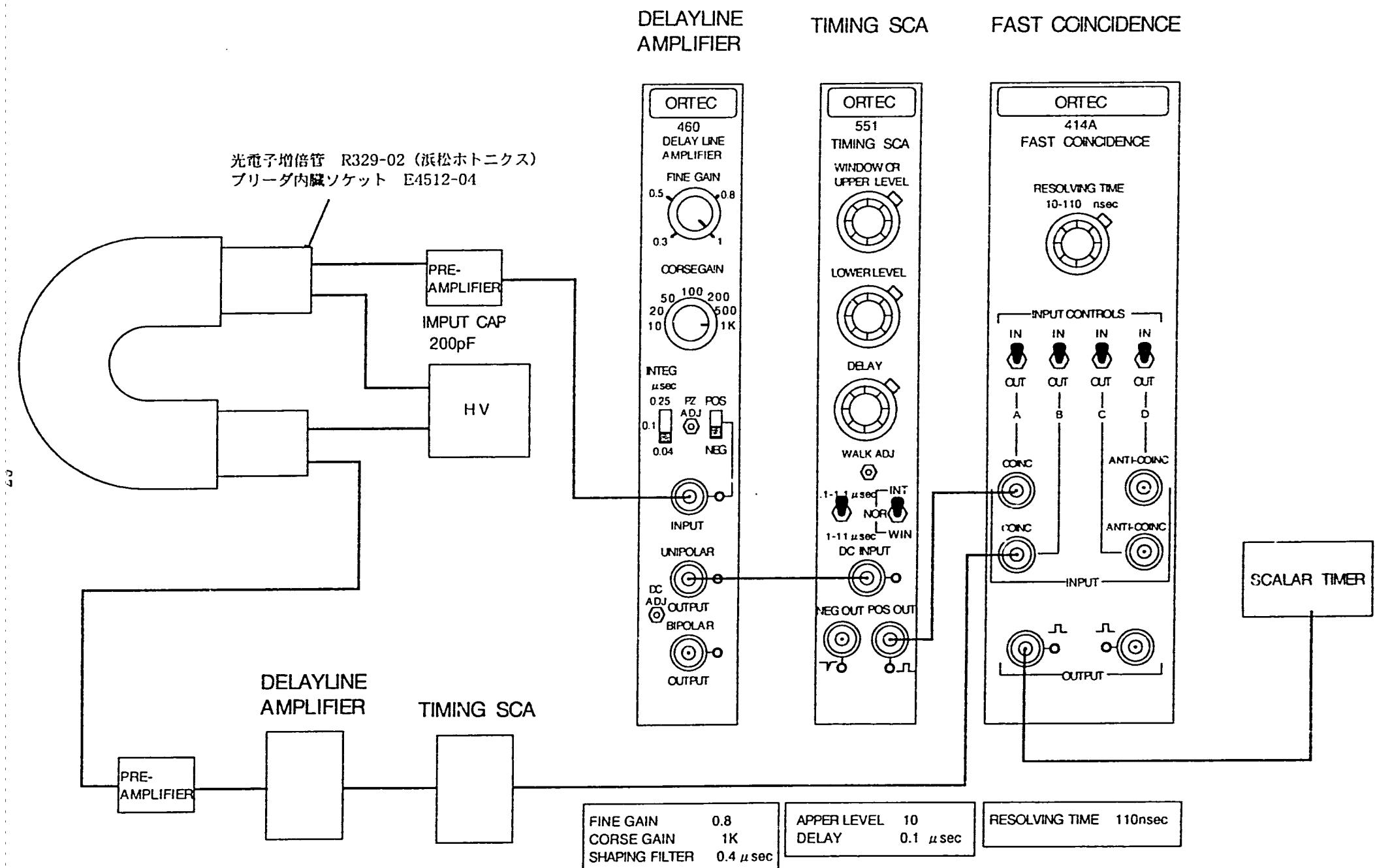


図-5.6 U字管型検出器の試験時計測器接続図

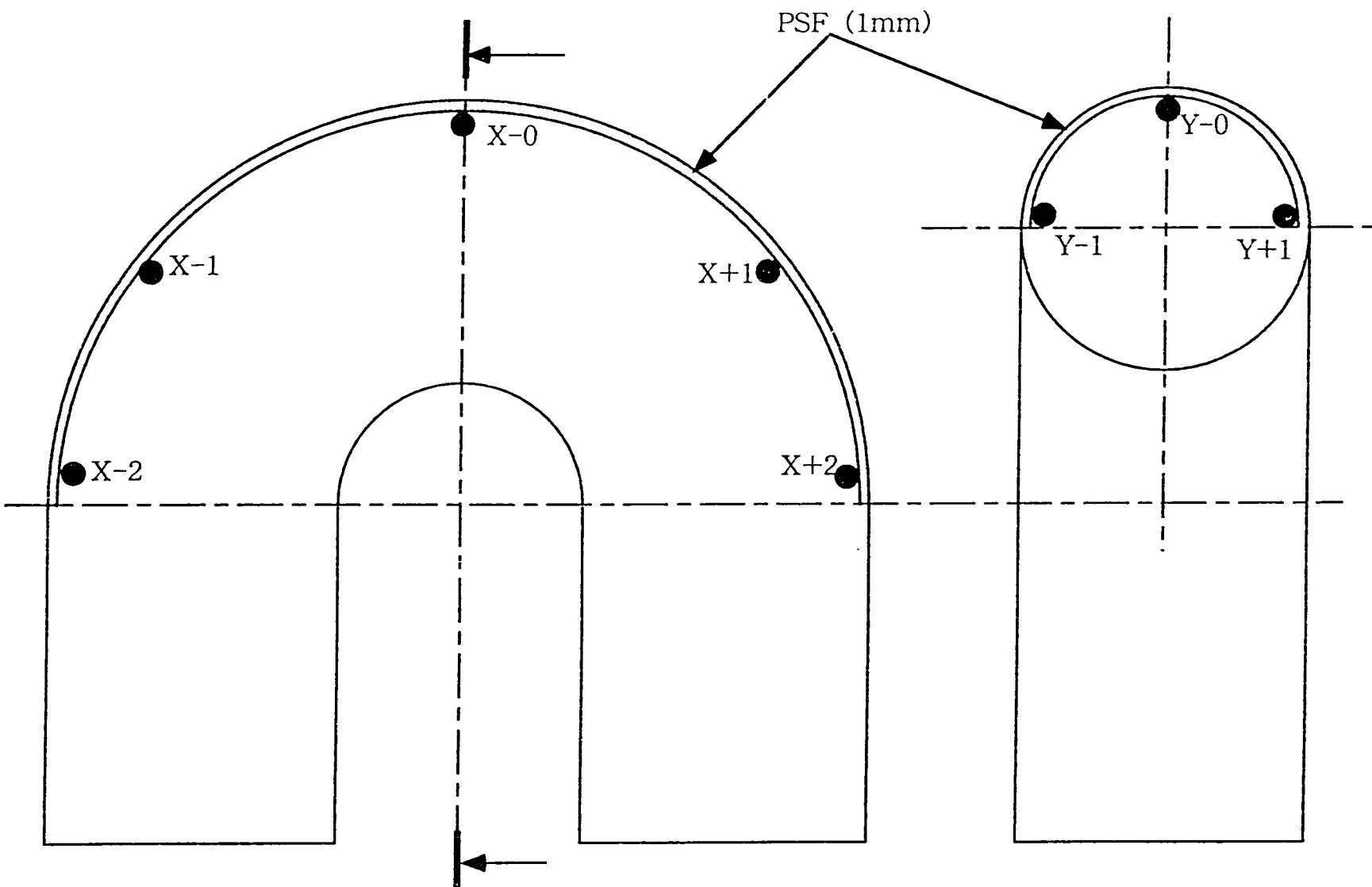


図-5.7 U字管型検出器 1号機の線源位置図

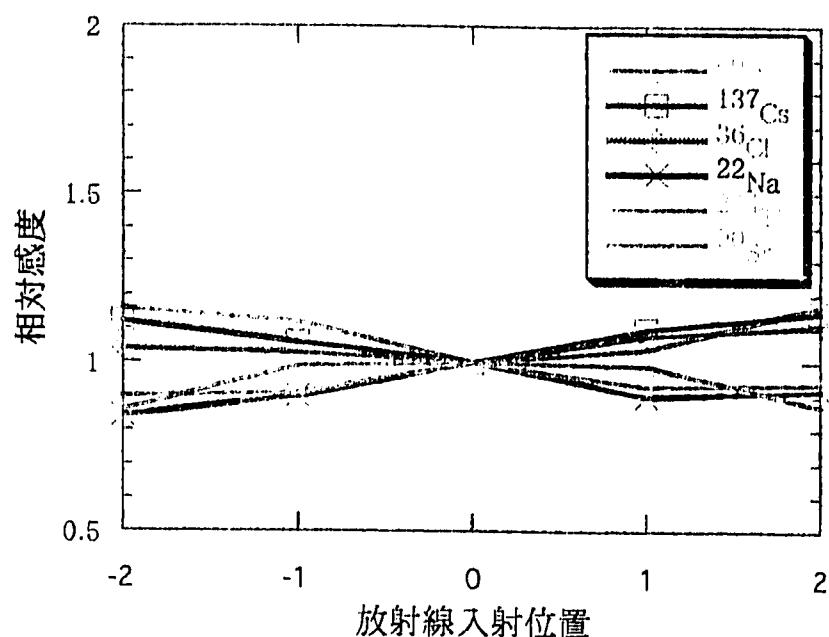


図-5.8(a) U字管型検出器1号機(BCF-10)の放射線入射位置感度比較試験結果
(軸方向)

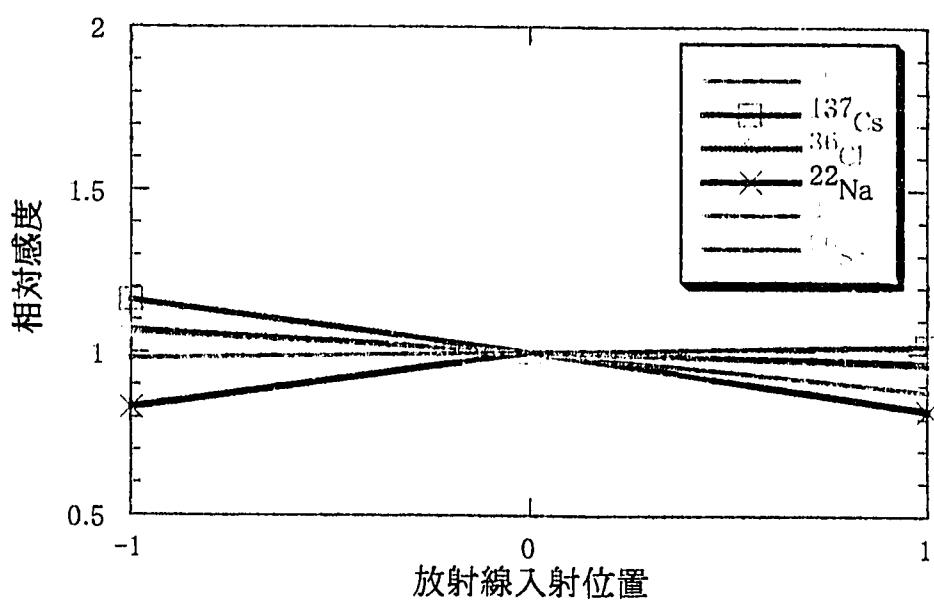


図-5.8(b) U字管型検出器1号機(BCF-10)の放射線入射位置感度比較試験結果
(垂直方向)

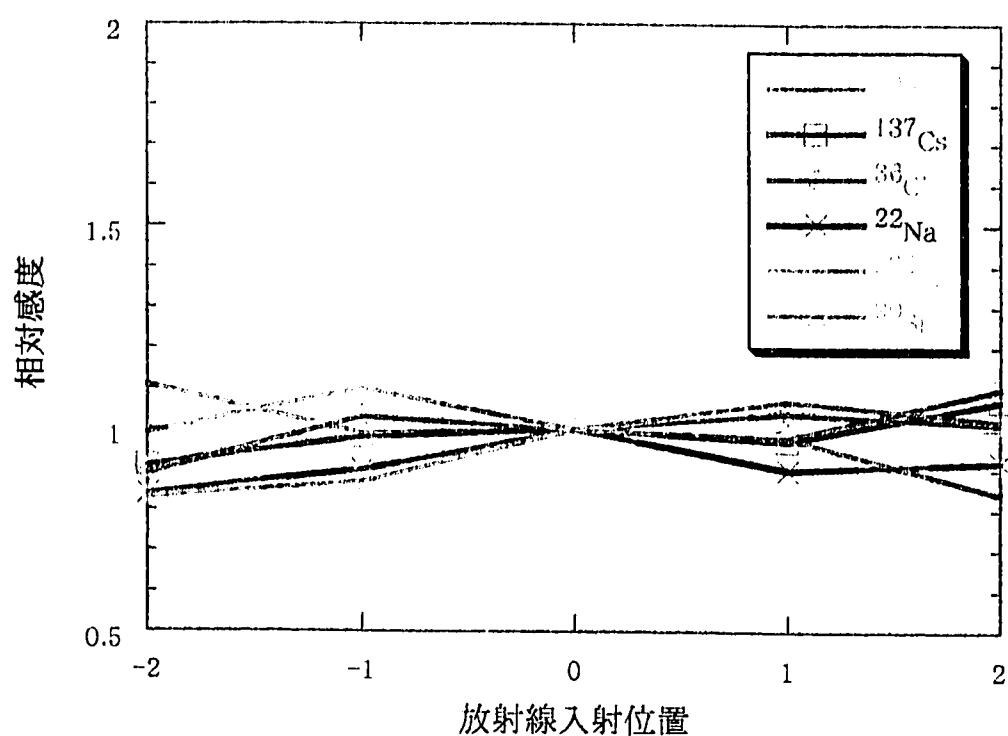


図-5.9(a) U字管型検出器1号器(SCSF-62)の放射線入射位置感度比較試験結果
(軸方向)

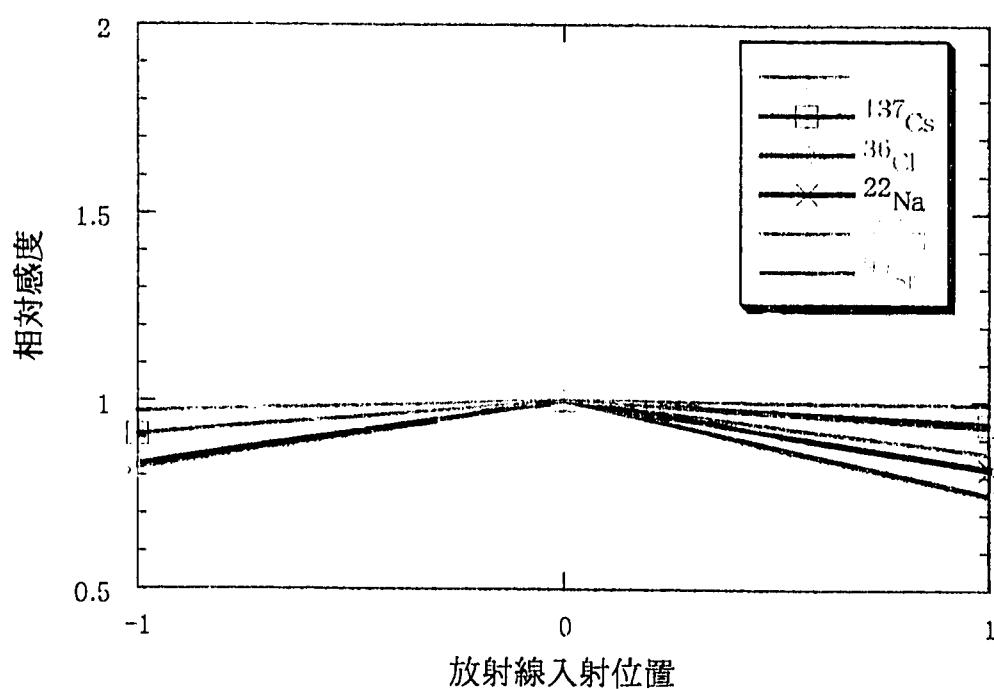


図-5.9(b) U字管型検出器1号機(SCSF-62)の放射線入射位置感度比較試験結果
(垂直方向)

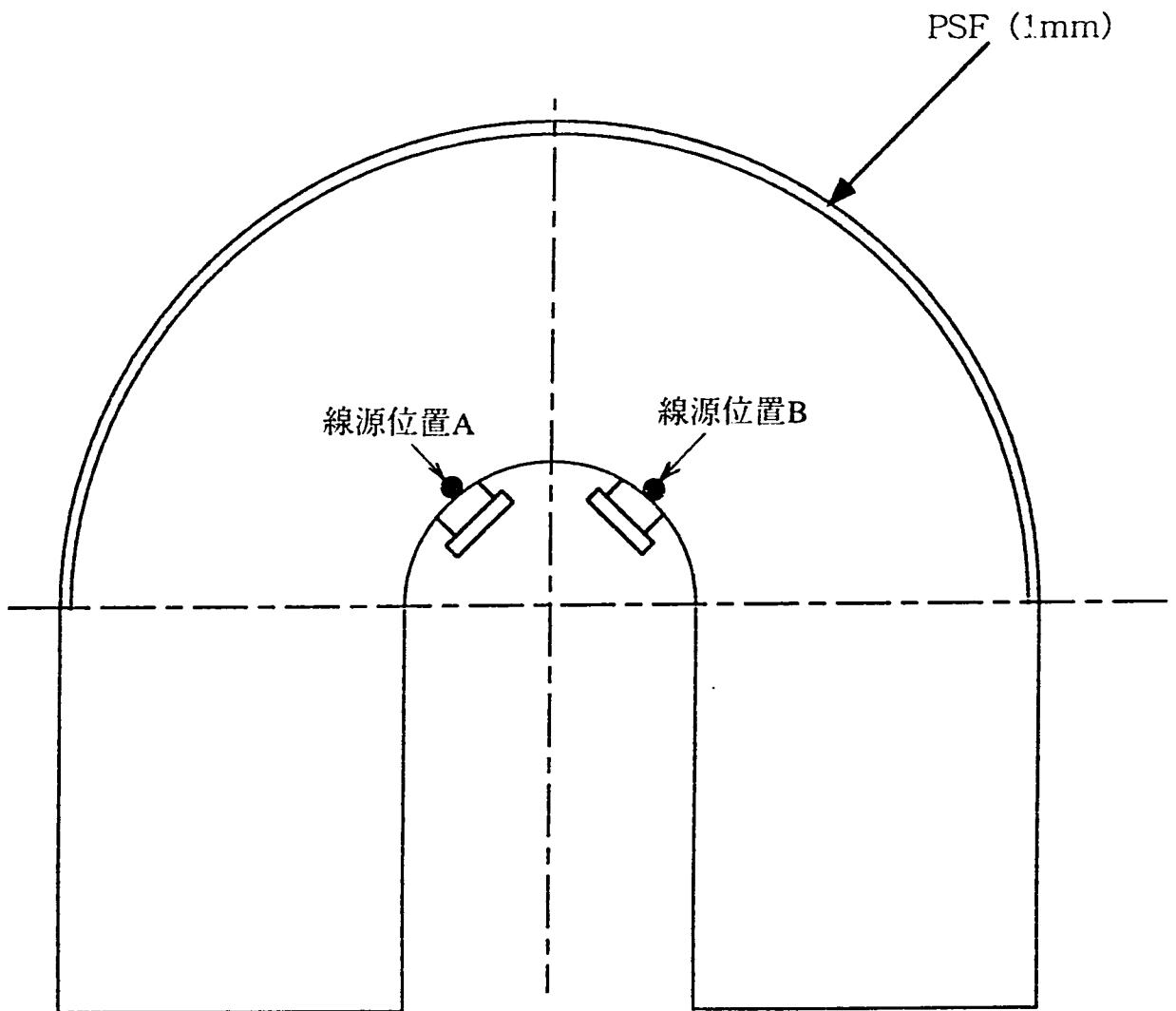


図-5.10 U字管型検出器2号機の線源位置図

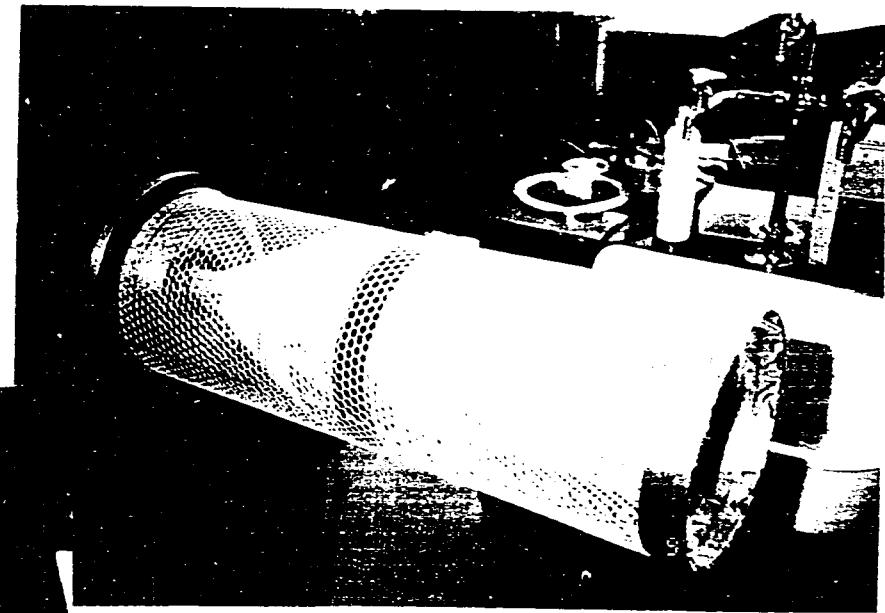
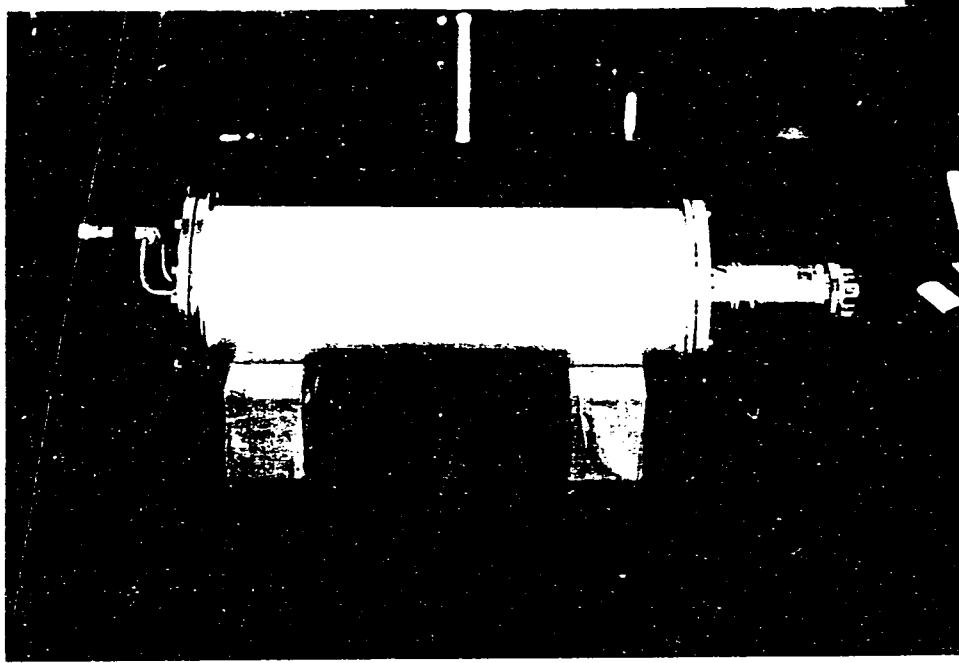


写真-5.1 砲状型検出器の全景

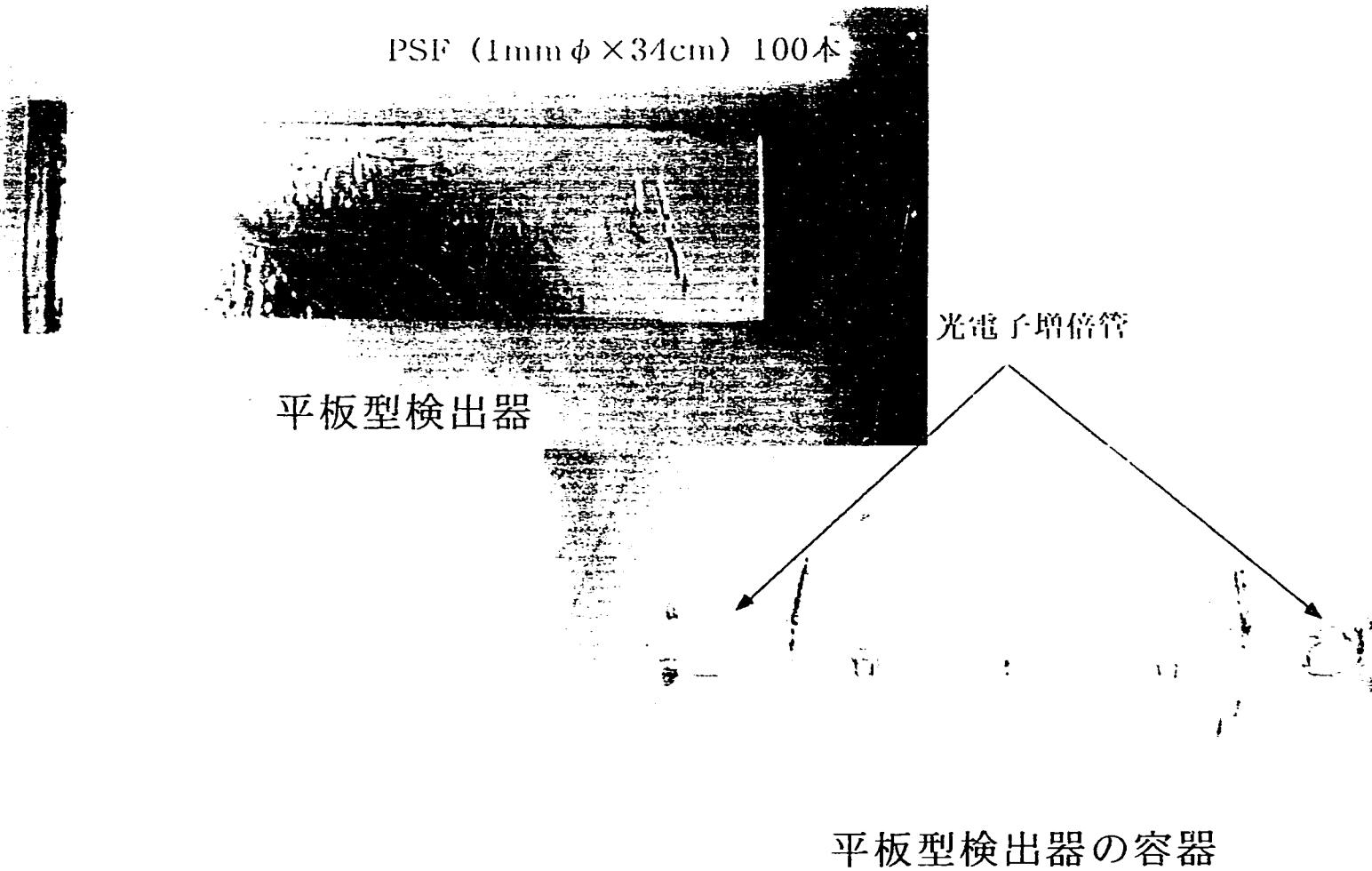


写真-5.2 平板型検出器の全景

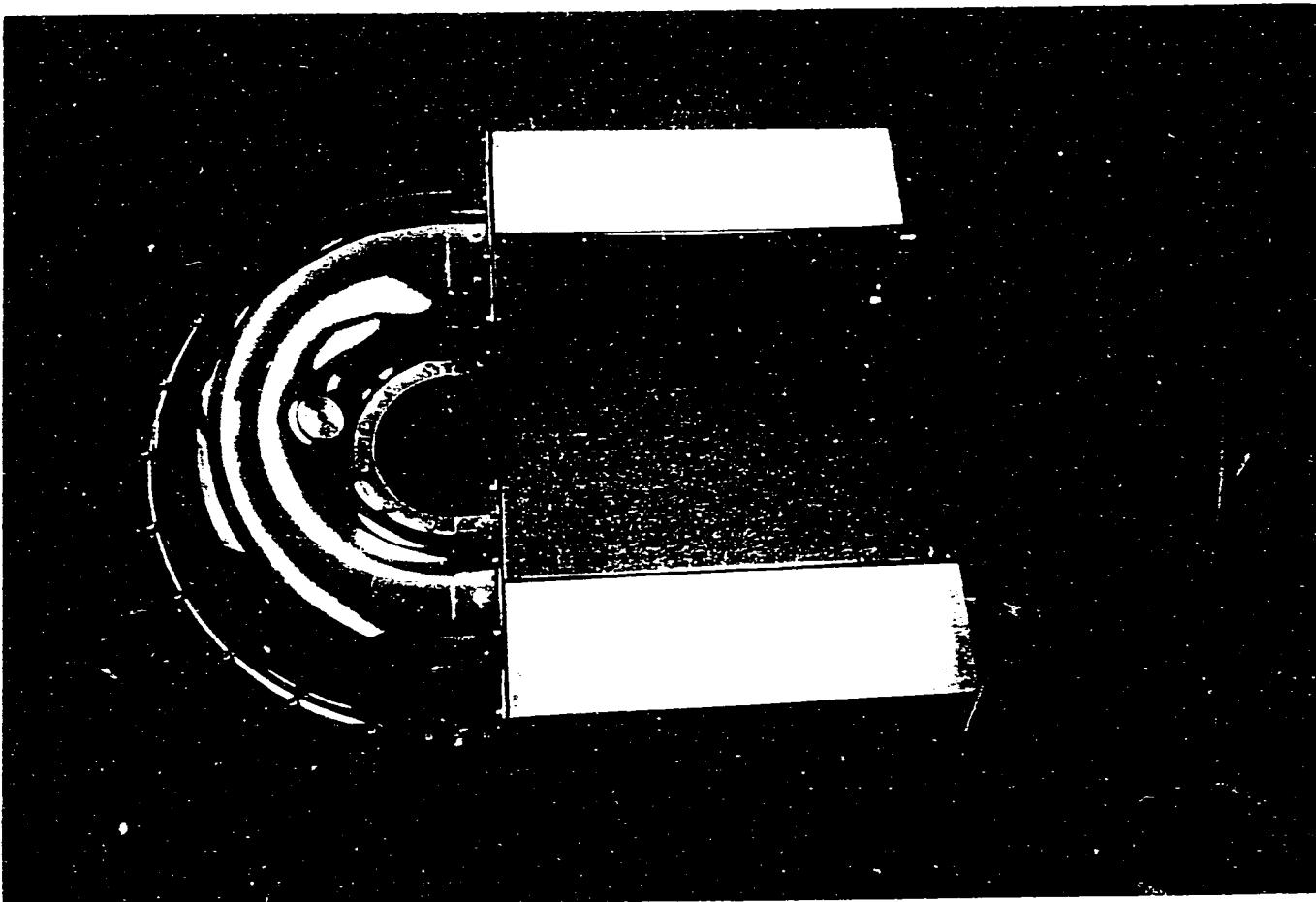


写真-5.3 U字管型検出器1号機の全景

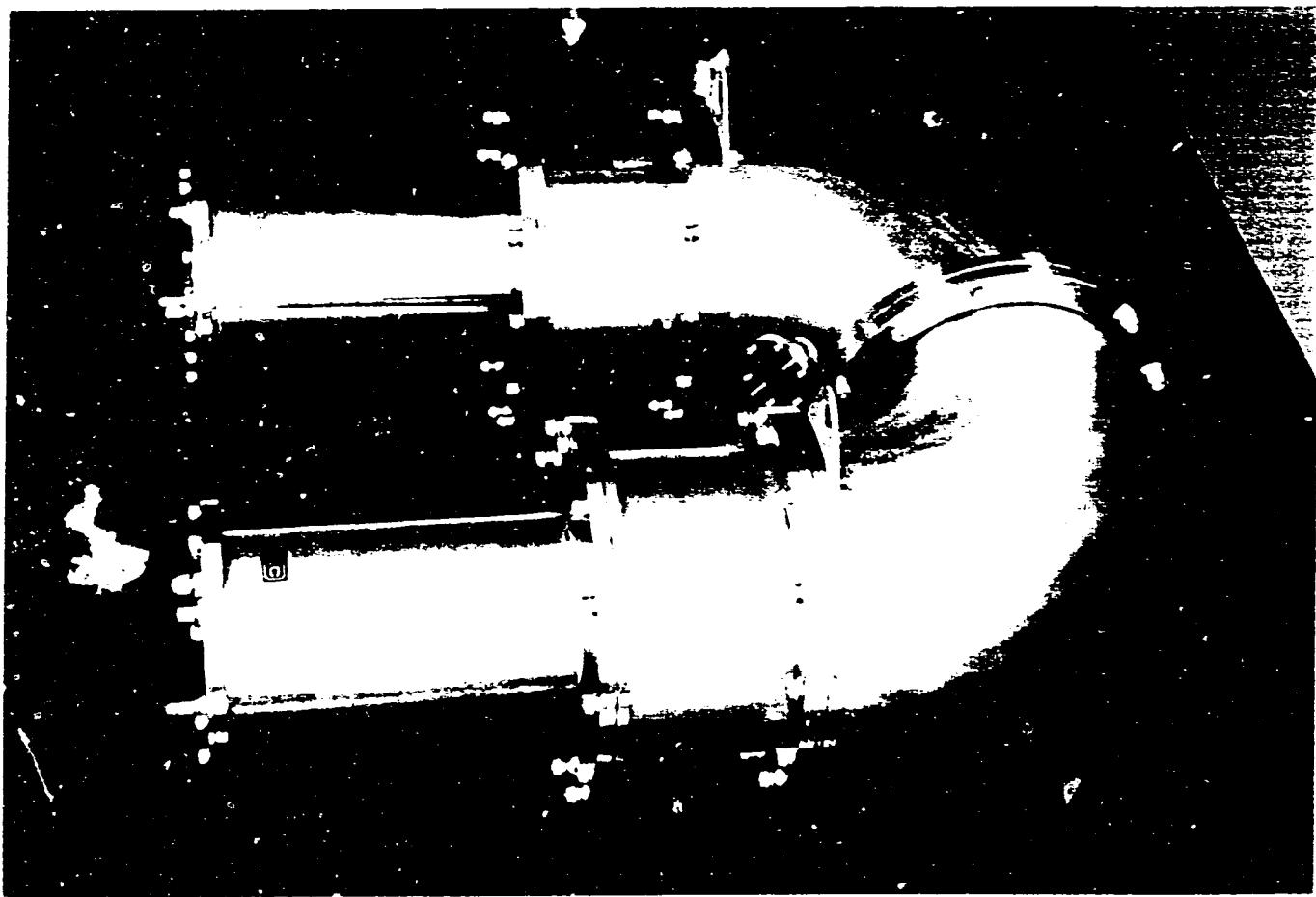


写真-5.4 U字管型検出器2号機の全景

6. まとめ

シミュレーション計算および特性試験により、以下のことが確認された。

シミュレーション計算結果より

- (1) 今回使用したPSFは、低エネルギーの β 線に対してほとんど感度をもっていないが、 β 線最大エネルギーが500keV以上の核種に対しては30%の効率を有していることがわかった。
- (2) シミュレーション計算により検出器の製作・試験を行うことなく、検出器形状の最適化シミュレートすることができた。結果としては、筒状検出器とした場合半径14cm、容積24 lで $1 \sim 2 \times 10^{-4}$ Bq/cm³程度になることがわかった。
- (3) U字管型検出器とそれと同じ検出有効面積で同じ容積の直管型（半円周）検出器の感度を比較した結果、U字管型検出器1号機で約40%、U字管型検出器2号機で約15%程度U字管型検出器の方が高感度であることがわかった。
- (4) ^{13}N に対する計数効率の方が ^{85}Kr に対する計数効率に比べ約40%高感度であることがわかった。

また、 ^{15}O の β 線エネルギーが ^{13}N のエネルギーよりも高いことから ^{15}O に対する計数効率についても ^{85}Kr に対する計数効率に比べ高感度であると言える。

また、特性試験より

- (1) 砲状型検出器の試験により、 β 線用ガスマニタとしてのPSFの有効性を確認することができた。しかし、この砲状型検出器では、バックグラウンド計数率が高くなることがわかった。
- (2) 平板型検出器の試験により、バックグラウンド計数率の低減に対して同時計数回路の有効性が確認できた。また、放射線入射位置による感度比較の結果、 β 線最大エネルギーが500keV以上の核種ではほぼ一定であることがわかった。
- (3) PSFの違いによる感度比較試験では、メーカーが異なっていてもほぼ同じ仕様の場合、有意な感度差を認められなかったが、マルチクラッドタイプのPSFとそうでないものとでは最大20%程度の違いがあることがわかった。
- (4) 実ガス(^{85}Kr)を用いた校正の結果、U字管検出器2号機の検出限界濃度は 5.4×10^{-4} Bq/cm³であることがわかった。

U字管検出器の ^{85}Kr に対する検出限界濃度が 5.4×10^{-4} Bq/cm³であること、また、 ^{13}N に対する計数効率の方が ^{85}Kr に対する計数効率よりも40%高いことから、 ^{13}N に対する検出限界濃度は、 3.9×10^{-4} Bq/cm³程度と考えられる。さらに、 ^{15}O の β 線エネルギーが ^{13}N の β 線エネルギーよりも高いことから、 ^{15}O に対する検出限界濃度は、

^{13}N に対する検出限界濃度より良いと言える。

以上のことから、U字管型検出器の開発により、本開発の目標である ^{13}N , ^{15}O の排気濃度限度 ($5.4 \times 10^{-4} \text{Bq/cm}^3$) まで測定可能となった。

今後の課題として、以下の点が考えられる。

- (1) シミュレーション計算による実ガスを用いない校正方法の確立
(^{13}N に対する校正方法の確立)
- (2) PSFの経年劣化（感度低下等）の調査
- (3) さらなるバックグラウンド計数率の低減策
(例：ANTI-COINCIDENCEの有効性検討)

7. 謝辞

P S F の仕様を始めとした様々な情報の提供をいただいた日本バイクロン社の
柚木幸夫氏並びにクラレ社新治修氏に感謝します。検出器の設計、製作、調整に
御尽力いただいた日本放射線エンジニアリング(株)の宮崎信之氏に感謝します。最
後に、貴重な通常業務の時間を割いて本研究に協力をしていただいた放管 1 係の
皆さんに感謝します。

参考文献

- 1) 南、吉田：ダストモニタ、ガスモニタの特性と使用法、RADIOISTOPES, 35, 158 (1986)
- 2) 中澤 正治 他, 「新しい放射線センシング原理を求めて」, 日本原子力学
会誌, Vol.32, No.3, 219(1990)
- 3) BICRON Co., "SCINTILLATION ROUNDTABLE UPDATE REPORT -
Plastic Scintillating Fibers" (Oct., 1990)
- 4) 鳥居 建男、川越 幸子 他、「EGS4による放射性ガスモニタの応答計算」
PNC TN9410 92-344(1992)
- 5) J.B.Birks, "The Theory and Practice of Scintillation Counting.",
Pergamon Press, Oxford (1964)
- 6) G.F.Nnoll, (訳 木村逸郎, 阪井英次), 「放射線計測ハンドブック (第2
版)」, 日刊工業新聞社, (1991)
- 7) T.O.White, Nucl.Instrum.Meth., A273, 820(1988)
- 8) 鳥居 建男 他、「ガス捕集用電離箱の電離効率の計算」 PNC TN9410
93-152(1993)
- 9) W.R.Nelson et al. : "The EGS4 Code System" SLAC-Report 265 (1985)
- 10) D.W.O.Rogers : "Low Energy Electron Transport with EGS4" Nucl.
Instr.Meth. B18, 165 (1984)
- 11) A.F.Bielajew et al. : "PRESTA;The Parameter Rediced Electron - Step
Transport Algprothm for Electron Monte Carlo Transport" Nucl.
Instr.Meth. B18, 165 (1987)
- 12) 日本アイソトープ協会：「アイソトープ手帳」 (1992)
- 13) C.M.Leader et al.(eds.) : "Table of Isotopes (7th ed.)"

付録 U字管型検出器の製作要領

1. 製作概要

本章においては、本試験試験にて使用したU字管型検出器2号機の製作方法について述べる。

検出器の製作にあたりファイバーのバンドル用治具を製作し、その治具を用いてファイバーを束ねて、ファイバーの端面の研磨を行いガスモニタタンクへの組み込みを行った。

以下に、U字管型ガスモニタ検出器の製作要領を示す。

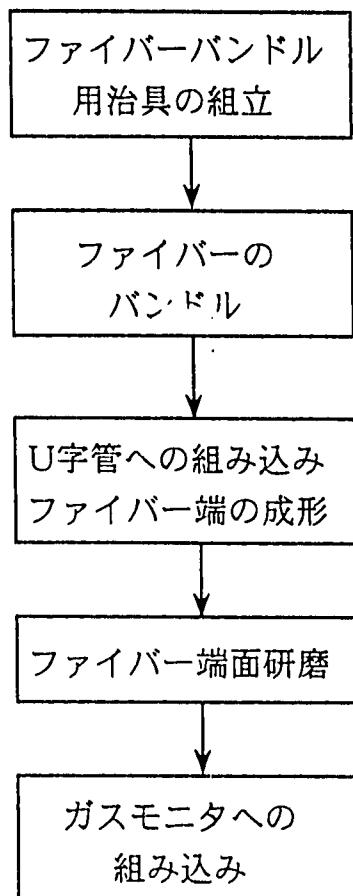


図-1 U字管型ガスモニタ検出器の製作工程

2. 組立要領

2.1 ファイバーバンドル用治具の組立

(1) 治具のセッティング

まず、ガスモニタタンクの形状、寸法にあわせたドーナツ型の木型を作製する。木型にファイバーの巻き付けがスムーズに行えるように木型を水平に回転用架台へ取り付ける。ファイバー（ロール巻き）と木型の配置を図-2に、巻き付け作業時の様子を写真-1に示す。

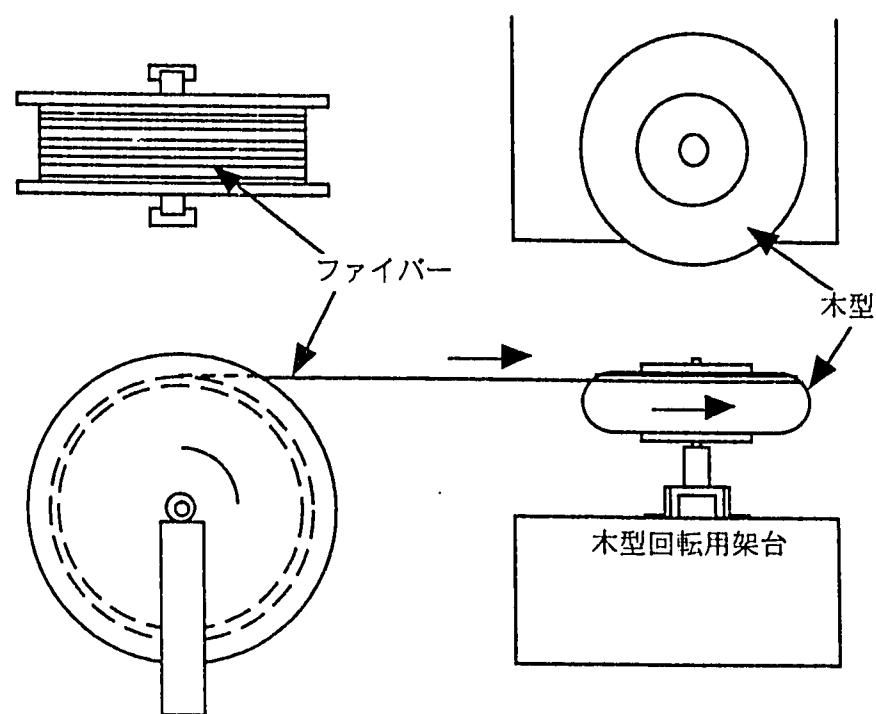


図-2 治具のセッティング

(2) 木型へのアルミマイラ膜及び両面テープの貼付

木型へのファイバー巻き付けを行う前に、木型へのファイバーの着脱を容易に行えるように木型にアルミマイラ膜及び両面テープの貼付を行う。

図-3にアルミマイラ膜及び両面テープの貼付を示す。

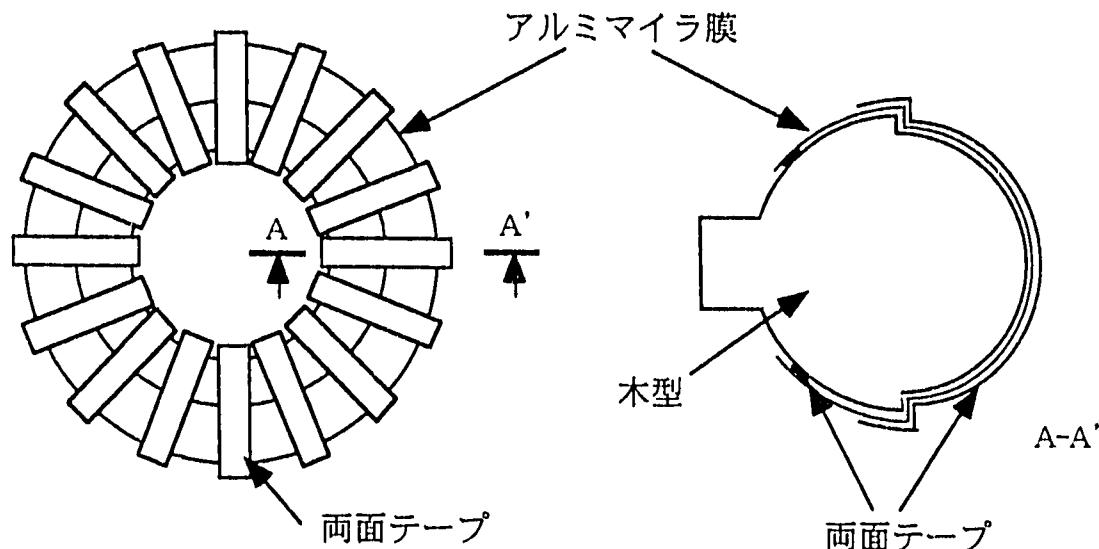


図-3 バンドル用木型の準備

2.2 ファイバーのバンドル

(1) 木型への巻き付け

セッティングした木型の上段からファイバーを隙間なく、中段まで巻き付け、ファイバーの端を切断する。その後、図-4(3)のように木型を上下逆にして再度木型の上段からファイバーを巻き付ける。

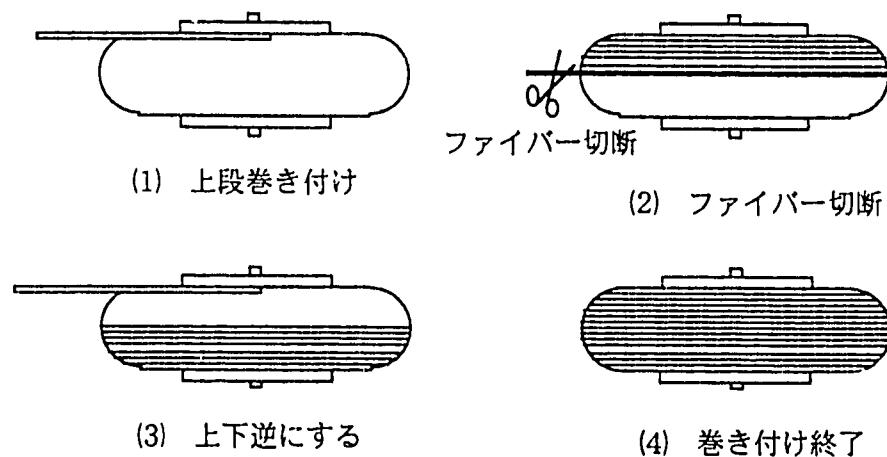


図-4 ファイバーの巻き付け

(2) 接着剤の塗布

木型に巻き付けたファイバーの外側（半周分）に接着剤（BC-600 バイクロン社製）を塗布する。図-5にファイバーの接着材塗布範囲を示す。

その後、24時間以上放置し硬化させる。

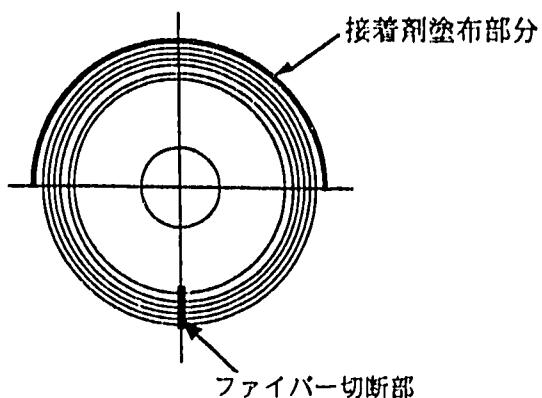


図-5 ファイバー接着剤塗布部及び切断部

(3) ファイバーの切断及び木枠の脱着

接着剤硬化後、接着剤を塗布しなかった部分の中央をカッターで切断し、変形しないように注意しながら木型よりファイバーを脱着させる。

バンドル形成されたファイバーの本数は、約330本である。

2.3 ファイバーのU字管への組み込み及びファイバー端の成形

(1) U字管への組み込み

木型から脱着したファイバーに1/4周の管を両端から通し、2つの1/4周管をつなぎ合わせる（図-6参照）。

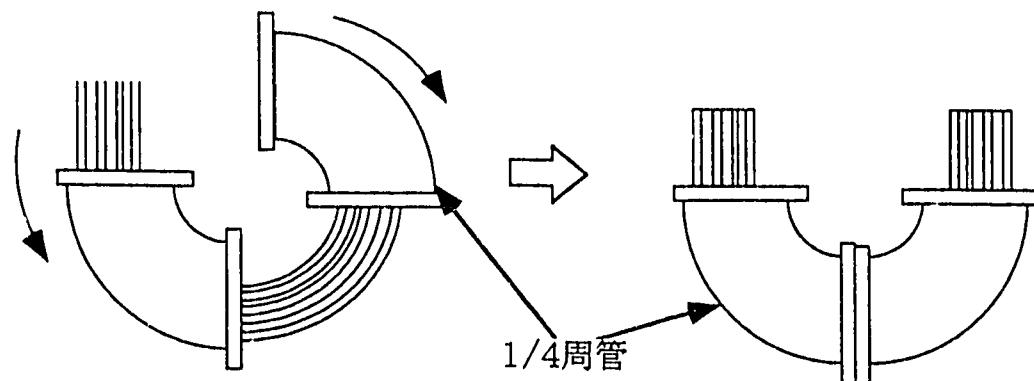


図-6 ファイバーの管への組み込み

管に組み込んだファイバーの両端にアクリルガイドに通し、アクリルガイドとファイバーを接着剤（BC-600）で接着して固定する（図-7参照）。

不感領域とするファイバー部にシリコンゴムコンパンド（KE-67信越シリコン社製）を充填する。

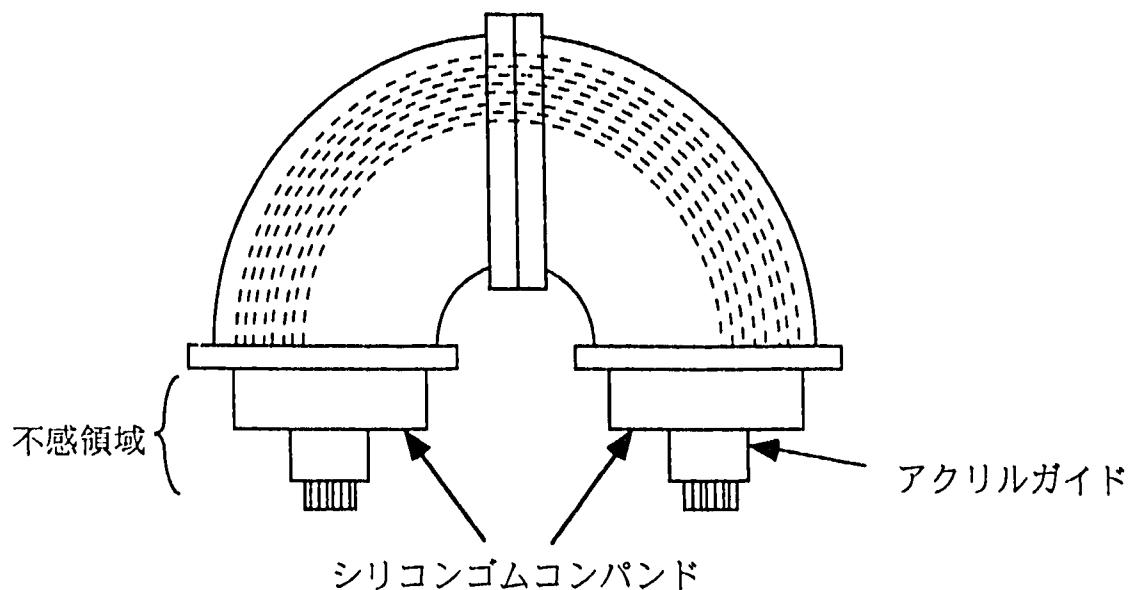


Fig.7 ファイバー端固定及びシリコンゴム充填

2.4 ファイバー端面の研磨

ファイバー端面（光電子増倍管接触面）の研磨は、以下の要領にて行う。

- (1) 研磨時のオイル等による汚れ防止するためテーピングを施したU字管をスライス盤にて機械加工によりファイバー端面を鏡面研磨する。写真-2に養生テープを、写真-3にU字管の固定を示す。
- (2) 研磨時の仕様を以下に示す。
 - ・荒仕上げ エンドミル（刃物）で切り出しを行い、寸法出しがする。
エンドミルは高速度鋼（SKH）18-4-1バイスを用いる。
切削回転速度約400RPM、送り速度約0.3M/MINで行う。
写真-4にファイバー端面研磨（荒仕上げ）を示す。
 - ・上仕上げ エンドミルにサンドペーパーを巻き付け研磨する。
サンドペーパーは、はじめ粒度#2000番を用い、最終段階に粒度#6000番のものを用いて仕上げる。
上仕上げ後のファイバー端面を写真-5に示す。

- ・精密仕上げ ポリシング材を用いて、手作業にて研磨し鏡面仕上げを行う。

2.5 ガスモニタの組立

- (1) 研磨終了後、ファイバーの導光試験（片方から光を当て、もう片方から全ファイバーが光っていることを確認する）を行い、ファイバーカットの無いことを行う。導光試験時の様子を写真-6に示す。
- (2) 被測定ガス導入用フレキシブルホースをガスタンクから導入口に引き回す。
- (3) U字管内部及びファイバー表面を中性洗剤を用いて洗浄する。
- (4) ファイバー端面を傷つけないように注意して、光学接合用シリコングリスを塗布し光電子増倍管を装着する。

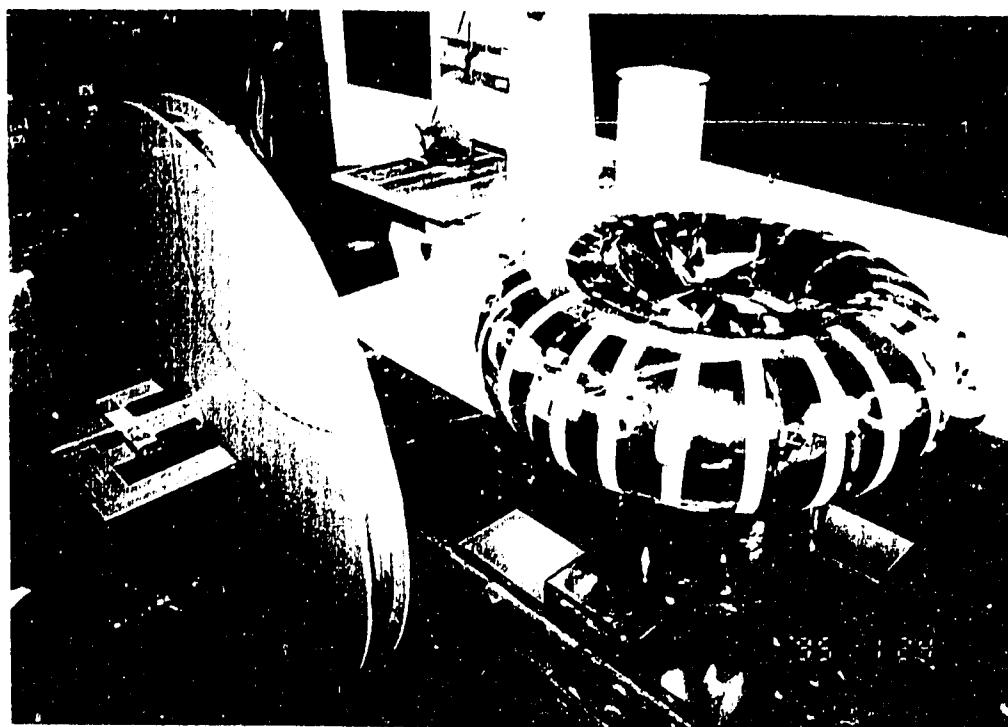


写真-1 ファイバーの木型への巻付け



写真-2 ファイバーの接着

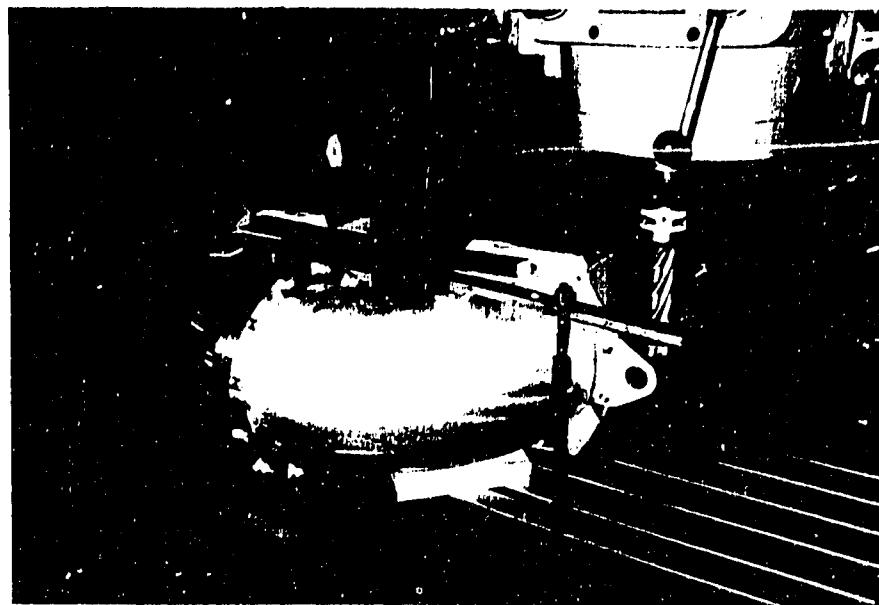


写真-3 フライス盤への検出器の固定

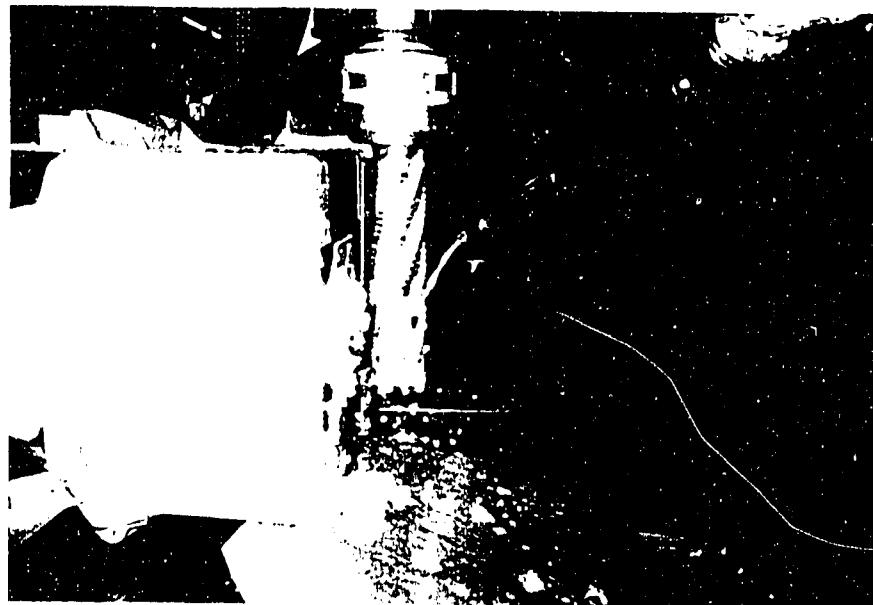


写真-4 ファイバー端面研磨 (荒仕上げ)

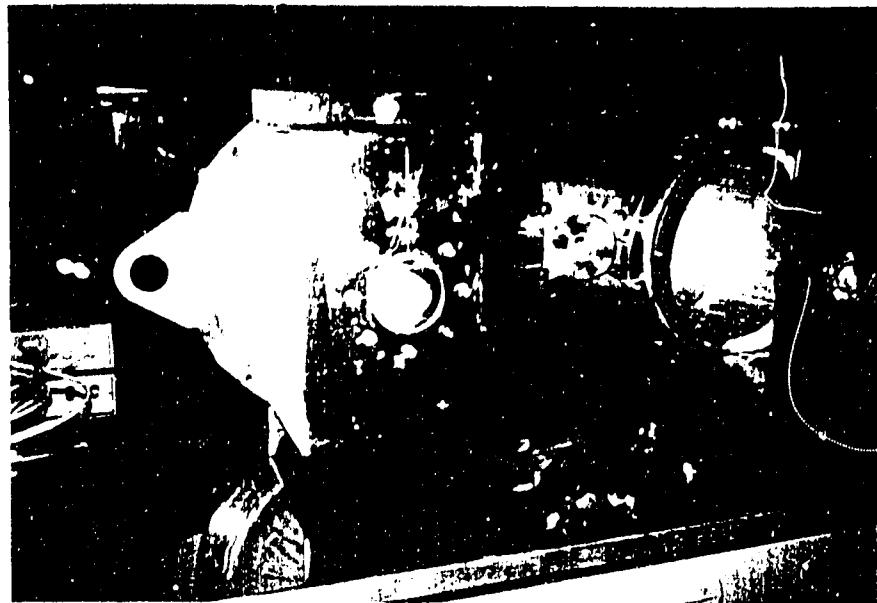


写真-5 研磨（精密仕上げ）後のファイバー端面

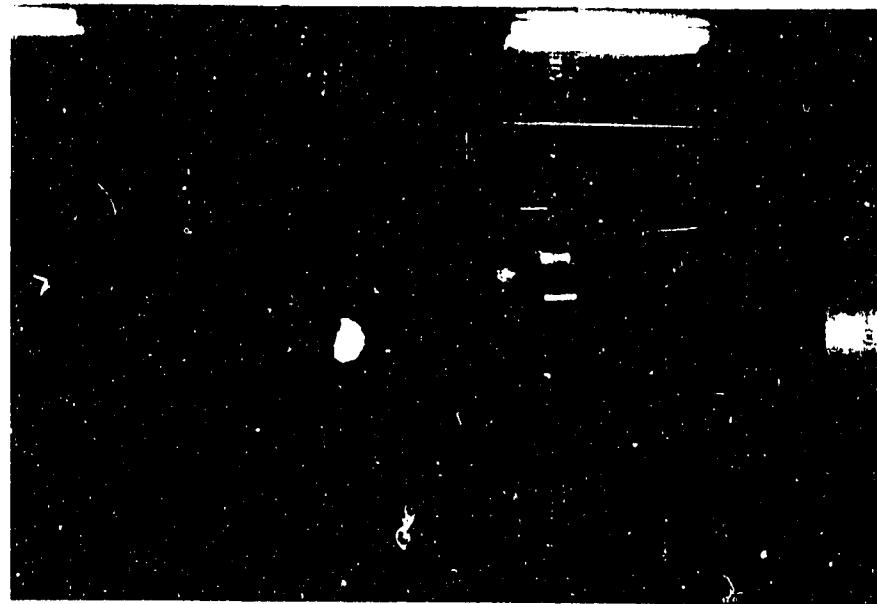


写真-6 ファイバー導光試験