

JAERI-Tech
2003-012



配管内部汚染分布測定装置の開発
(受託研究)

2003年3月

伊藤 博邦*・畠山 睦夫*・立花 光夫・柳原 敏

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越し下さい。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布を行っております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

配管内部汚染分布測定装置の開発
(受託研究)

日本原子力研究所東海研究所バックエンド技術部
伊藤 博邦*・畠山 睦夫**・立花 光夫・柳原 敏

(2003年1月28日受理)

配管内面の低レベル放射能汚染の分布を測定するため、配管内部を検出器が移動する配管内部汚染分布測定装置 (Measuring Device for Inner Surfaces of Embedded Piping: MISE) を開発した。MISE は、円筒型 2 層構造の検出器と配管移動ロボットから構成され、各々独立した装置として製作したものである。

放射能汚染の測定においては、配管表面に近い外側の円筒状検出器で β 線と γ 線を測定し、内側の円筒状検出器では 2 つの検出器間に配置した遮へい板により β 線を遮蔽し γ 線のみを測定する。 β 線計数率は、外側の円筒状検出器での β 線と γ 線計数率の和から内側の円筒状検出器での γ 線計数率を差し引くことにより導き出される。

配管移動ロボットは、配管内部を観察しながら円筒型 2 層構造の検出器を運ぶことができる。 ^{60}Co に対する検出限界値は、30 秒の測定時間で約 $0.17\text{Bq}/\text{cm}^2$ であることが分かった。 ^{60}Co のクリアランスレベル ($0.4\text{Bq}/\text{g}$) に相当する $0.2\text{Bq}/\text{cm}^2$ の場合、2 秒の測定時間で配管内面の放射能汚染を $54\text{m}/\text{h}$ の測定効率で評価可能である。

本報告は、電源開発促進対策特別会計法に基づく科学技術庁（現、文部科学省）からの受託研究として平成 8 年度から平成 12 年度までに実施した原子炉解体技術開発の成果である。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

*：応用光研工業㈱

**：(財)原子力研究バックエンド推進センター

Development of Measuring Device for Inner Surfaces of Embedded Piping
(Contract Research)

Hirokuni ITOH*, Mutsuo HATAKEYAMA**, Mitsuo TACHIBANA and Satoshi YANAGIHARA

Department of Decommissioning and Waste Management
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 28, 2003)

The measuring device for inner surfaces of embedded piping (MISE) was developed to evaluate low-level radiological contaminations of inner surfaces of piping. The MISE consists of a cylindrically-formed double layered type detector and a piping crawling robot, which were designed and manufactured separately.

In measurements of the contaminations, an outer cylindrical detector close to the surface of piping measures β -rays and γ -rays and an inner cylindrical detector set after a shielding plate for shield of β -rays measures γ -rays. The β -ray counting rates are derived by subtracting γ -ray counts measured by the inner detector from γ - and β -ray counts measured by the outer detector. The piping crawling robot transports the cylindrically-formed double layered type detector with observing inner surfaces of piping. The detection limit for the contamination of ^{60}Co was found to be about 0.17Bq/cm^2 with measurement time of 30 seconds. It is expected that 0.2Bq/cm^2 corresponding to clearance level of ^{60}Co (0.4Bq/g) can be evaluated with measurement time of 2 seconds, which is equal to measurement speed of 54m/h .

Keywords: MISE, Embedded Piping, Low-level Radiological Contamination, Decommissioning, β -rays, Detection Limit, Double Layered Type Detector, Flexible Micro Actuator, Piping Crawling Robot

This study was conducted during 1997 through 2000 under contract with Science and Technology Agency of Japan (the former body of Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology).

*: Ohyo Koken Kogyo Co., LTD.

** : Radioactive Waste Management and Nuclear Facility Decommissioning Technology Center

目 次

1. はじめに	1
2. 基本的考え方	2
2.1 基本要件	2
2.2 測定方法	2
2.3 測定装置	3
3. MISE	4
3.1 装置の構成	4
3.2 検出器	4
3.3 配管移動ロボット	4
3.4 制御装置	5
3.5 測定の方法	6
4. 機能試験	6
4.1 試験方法	6
4.2 試験結果	8
5. 検討	11
5.1 性能評価	11
5.2 適用範囲	11
5.3 実用性の検討	12
6. まとめ	13
謝 辞	14
参考文献	14
付 録 1 検出限界値の基本式	33
付 録 2 計数率の補正方法	34

Contents

1. Introduction	1
2. Basic Idea for Radioactivity Measurement	2
2.1 Basic Requirement	2
2.2 Method for Radioactivity Measurement	2
2.3 Measurement Device	3
3. MISE	4
3.1 Composition of Measurement Device	4
3.2 Detector	4
3.3 Piping Crawling Robot	4
3.4 Control System	5
3.5 Procedure of Radioactivity Measurement	6
4. Performance Tests	6
4.1 Method	6
4.2 Results	8
5. Discussion	11
5.1 Evaluation of Performance	11
5.2 Application Range	11
5.3 Applicability for Actual Measurement	12
6. Conclusion	13
Acknowledgment	14
References	14
Appendix 1 Equation for Detection Limit	33
Appendix 2 Correction of Counting Rate	34

図、表及び写真のリスト

- 表 1 2層型検出器の基本仕様
- 表 2 配管移動ロボットの基本仕様
- 表 3 模擬配管の基本仕様
- 図 1 2層型検出器の検出原理
- 図 2 MISE の構成
- 図 3 2層型検出器の構造
- 図 4 配管移動ロボットの構造
- 図 5 駆動機構の原理
- 図 6 FMA の構造
- 図 7 制御系のシステム構成
- 図 8 データの出力例
- 図 9 汚染分布測定の流れ
- 図 10 管状面線源の特性
- 図 11 軸方向特性に関する試験体系
- 図 12 円周方向特性に関する試験体系
- 図 13 模擬配管の形状
- 図 14 軸方向特性に関する試験体系
- 図 15 円周方向特性に関する試験体系
- 図 16 外部線源の影響に関する試験体系
- 図 17 位置分解能に関する試験体系
- 図 18 2層型検出器のプラトー特性
- 図 19 2層型検出器のバックグラウンド検出特性
- 図 20 2層型検出器の軸方向の検出特性
- 図 21 2層型検出器の円周方向の検出特性
- 図 22 線源からの距離に対する機器効率の評価結果
- 図 23 配管内径に対する機器効率の評価結果
- 図 24 外部線源の影響下における β 線計数率の測定結果
- 図 25 2層型検出器と GM 型表面汚染検査計の外部線源に対する計数率
- 図 26 汚染分布測定の結果
- 図 27 2層型検出器と GM 型表面汚染検査計による汚染分布測定結果の比較
- 写真 1 MISE の外観
- 写真 2 走行試験用の模擬配管
- 写真 3 模擬配管における線源位置

Tables, Figures and Photos Captions

- Table 1 Specifications of Double Layered Type Detector
- Table 2 Specifications of Piping Crawling Robot
- Table 3 Specifications of Mock-up Piping
- Fig. 1 Principle of Double Layered Type Detector
- Fig. 2 Composition of MISE
- Fig. 3 Structure of Double Layered Type Detector
- Fig. 4 Structure of Piping Crawling Robot
- Fig. 5 Principle of Driving Wheels
- Fig. 6 Structure of FMA
- Fig. 7 Block Diagram of Control System
- Fig. 8 Example of Output Data
- Fig. 9 Flow of Contamination Distribution Measurement
- Fig. 10 Characteristics of Piping Type Radiation Sources
- Fig. 11 Examination System for Characterization in Axis Direction of Double Layered Type Detector
- Fig. 12 Examination System for Characterization in Circumference Direction of Double Layered Type Detector
- Fig. 13 Shape of Mock-up Piping
- Fig. 14 Examination System for Characterization in Axis Direction of Double Layered Type Detector
- Fig. 15 Examination System for Characterization in Circumference Direction of Double Layered Type Detector
- Fig. 16 Examination System for Influence of External Radiation Source
- Fig. 17 Examination System for Position Resolution
- Fig. 18 Plateau of Double Layered Type Detector
- Fig. 19 Background Characteristic of Double Layered Type Detector
- Fig. 20 Detection Characteristic in Axis Direction of Double Layered Type Detector
- Fig. 21 Detection Characteristic in Circumference Direction of Double Layered Type Detector
- Fig. 22 Estimation Results of Instrument Efficiency to Distance from Radiation Source
- Fig. 23 Estimation Results of Instrument Efficiency to Inside Diameter of Piping
- Fig. 24 Measurement Results of β -ray Counting Rate under Influence of External Radiation Sources
- Fig. 25 Counting Rate of Double Layered Type Detector and GM Survey Meter under Influence of External Radiation Sources
- Fig. 26 Measurement Result of Contamination Distribution
- Fig. 27 Comparison with Measurement Results of Contamination Distribution by Double Layered Type Detector and GM Survey Meter
- Photo 1 Appearance of MISE
- Photo 2 Mock-up Piping for Moving Test
- Photo 3 Position of Radiation Source on Mock-up Piping

1. はじめに

我が国では、原子力技術の開発が開始されてから半世紀を過ぎ、原子力の研究に用いた試験用施設を始めとして、既に役割を終えた幾つかの原子力施設が存在し、それらの廃止措置が重要な課題となっている。廃止措置の実施に当たり、原子力施設内に残存する放射能の特性を評価することは、作業計画の策定、作業従事者の被ばく線量評価、解体廃棄物の処理・処分計画の策定、環境影響評価等にとって極めて重要である。原子炉施設に残存する放射性物質は、中性子により構造材が放射化して生じる放射化放射能と放射性物質が冷却系配管を循環する過程で系統機器に沈着及び漏洩等により建屋表面等に付着して生じる汚染放射能とに分類することができる。このうち、中性子により構造材が放射化して生じた放射化放射能は、計算プログラムにより評価することが可能であるが、汚染放射能を計算で求めることは困難であるため、測定により評価することが不可欠である。しかし、施設内に複雑に敷設された配管や建屋構造物中に埋設された配管内面の汚染については、既存の検出器により直接測定することが難しく、一般には、建屋構造物を解体して配管を撤去してから評価する方法等がとられている。

日本原子力研究所では、平成 8 年 3 月までに動力試験炉 (JPDR : Japan Power Demonstration Reactor) のすべての機器・構造物を撤去しその廃止措置を終了した¹⁾。本施設に存在した埋設配管の多くは、小口径 (主に 3~4inch) であり、既存の検出器を用いて配管深部の汚染分布を測定することは困難であった。このため、配管出入り口付近の内表面の付着物を採取し、Ge 半導体検出器や NaI(Tl) 検出器等を用いて汚染特性を評価した。放射能汚染の有無が確認できなかった埋設配管は、配管の両端を封じた後、建屋のコンクリート躯体毎に解体撤去し、その後で、コンクリートと配管を分離するという手順が採られた。このため、埋設配管の撤去作業は、通常の配管の撤去作業に比べて 5 倍もの労力を要した²⁾。また、建屋の全表面を対象とした確認測定においても、コンクリート中に埋設された配管からの放射線の影響によって自然計数率が変動し、建屋表面の汚染の有無を判別できない場所があり、建屋表面から試料を採取して放射能測定を行うことにより、汚染の有無を確認した。

他方、撤去した配管内面を除染する場合、汚染特性が把握できれば、配管内面の汚染レベル毎に最小限の汚染部分を取り除くことが可能となり、放射性廃棄物の低減や除染作業の効率化が図れる。

そこで、配管内部を検出器が移動することにより、汚染分布を効率的に直接測定する技術の開発を行った。検出器は、曲管部を含む配管内部を移動可能な寸法とし、かつ外部線源の影響を補正して低レベルの汚染を測定できるよう考慮した。また、配管移動ロボットは、検出器を連結して 3inch 径配管 (全長 15m) の曲管部及び直管部を検出器とともに走行できるように設計した。この結果、T 型管継ぎ手や直角エルボの曲管部を有する配管内部を自動走行しながら汚染分布を測定することが可能となった。

本報告は、埋設配管の汚染特性を評価する配管内部汚染分布測定装置の開発について記述したものである。

2. 基本的考え方

2.1 基本要件

廃止措置の最終段階において、建屋を「放射性廃棄物でない廃棄物」として解体するためには、建屋構造物に埋め込まれている配管（埋設配管）について、放射能汚染した核種^{注)}の存在量を把握する必要がある。しかし、全長が長い配管では、汚染した部分とそうでない部分、あるいは汚染レベルの高い部分と低い部分とが混在する可能性がある。このような配管内面の汚染分布を精度良く測定するためには、配管内部に検出器を直接挿入し測定することが有効であるが、配管内部に挿入できる検出器は一般に市販されていない。このため、小型で移動性を考慮した新たな検出器を開発する必要がある。

一般に、 γ 線を対象として汚染分布を測定する場合、Ge 半導体検出器や NaI(Tl)検出器が用いられるが、検出器に必要な増幅回路を装備し、かつ周囲からの γ 線による影響を防ぐために遮へい材を取り付ける必要がある。このため、 γ 線を対象として配管内面の汚染分布を測定する場合、装置が大型になり配管内部での円滑な移動が困難になる恐れがある。一方、 β 線の測定には、プラスチックシンチレータやガス型検出器（表面汚染検査計）が用いられる。このうち、ガス型検出器は、軽量化が可能で検出有効面積（入射窓）を広くとれる等の特徴を有し、また、 γ 線に対する感度が低く、低いレベルまで β 線を測定することが可能である。

他方、検出器と配管移動ロボットを一体化することは、装置の小型・軽量化の観点から不利であり、検出器を牽引して配管内部を移動するための装置（配管移動ロボット）を別途製作する方が有利である。配管移動ロボットには、検出器やケーブルを牽引しながら、曲管部を含む配管内部を走行するため、十分な牽引力、移動方向の判断や内部状況を確認するための観察機能、曲管部を走行するための駆動機能等が要求される。

以上を考慮して、検出器の開発及び検出器を牽引して配管内部を走行可能な配管移動ロボットの開発を行うこととした。

2.2 測定方法

ガス型検出器により低いレベルの汚染を測定するためには、 β 線の検出感度を上げる必要がある。しかし、一般に β 線のみを検出感度を上げることは困難であり、 β 線に対する検出感度とともに γ 線に対する検出感度も上がることになる。 γ 線に対する検出感度が上がると測定場所以外からの γ 線（外部線源）も計数されるため、測定場所の汚染を正確に把握することが困難になる。そこで、 γ 線の影響を排除し、 β 線を高感度に検出できる2層型検出器を開発した。

図1に2層型検出器の検出原理を示す。検出器の形状は円筒型2層構造とし、外側の検出器（以下「第1検出器」とする）と内側の検出器（以下「第2検出器」とする）の間に β 線遮へい板を配置することによって、第1検出器では β 線と γ 線を、第2検出器では γ 線を計数する。適用した検出器は、主に β 線を測定対象としたガス型検出器であるため γ 線に対する検出感度は低く、 γ 線を精度良く検出することは困難である。すなわち、本測定方法では、 γ 線の計数率を β 線の

注) 原子力発電所の廃止措置において、配管内面の汚染核種は、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs (β 線と γ 線を放出) が代表的である。また、JPDR 解体実地試験では、大部分の汚染が ^{60}Co によるものであった³⁾。

計数率に対する「バックグラウンド」として捉えることにより、第1検出器で測定される γ 線の寄与分を第2検出器で測定される γ 線による計数率を使って補正するものである。両検出器の計数率の差から β 線の計数率のみを求め、測定対象面の表面密度を精度良く評価することができる。この2層型検出器を用いた場合、汚染核種からの β 線計数率 $^{Net}N_{\beta}$ [cps]は次式により求められる。

$$^{Net}N_{\beta} = (^{Net}N_{\beta\gamma} - ^{Net}N_{\gamma}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$^{Net}N_{\beta\gamma} = N_{\beta\gamma} - BG_{\beta\gamma} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$^{Net}N_{\gamma} = N_{\gamma} - BG_{\gamma} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

$^{Net}N_{\beta}$: 汚染核種からの β 線による計数率[cps]

$N_{\beta\gamma}$: 第1検出器の計数率[cps]

N_{γ} : 第2検出器の計数率[cps]

$BG_{\beta\gamma}$: 非汚染領域における第1検出器のバックグラウンド計数率[cps]

BG_{γ} : 非汚染領域における第2検出器のバックグラウンド計数率[cps]

なお、 β 線の検出限界計数率及び検出限界表面密度の求め方を付録1に示す。

2.3 測定装置

ガス型検出器としては、GM計数管や比例計数管^{注)}が一般的に使用されているが、GM計数管は出力パルス信号が大きいので、プリアンプを設置する必要がなく信号ケーブルを長くすることが可能である。このため、GM計数管は小型・軽量化が可能であることから、2層構造の検出器に適用することとした。

検出器の製作に当たっては、検出効率を上げるため、検出器を測定対象面の曲面に合った形状(円筒)に加工し、測定対象面と検出器との距離を短くして、入射窓面積をできるだけ広くとることとした。このため、測定対象とする配管の寸法を設定した上で検出器の設計を行った。また、曲管部において滑らかに移動することを可能とするため、検出器と配管移動ロボットの接続位置や配管移動ロボット用のケーブル類(電源、カメラ用)の配置を検討した結果、検出器の形状は中空円筒とした。なお、検出器を円筒型2層構造にしたことにより、第1検出器と第2検出器の容積及び配管内面に対する幾何学条件が異なるため、両者の計数率を補正することが必要となった。付録2に計数率の補正方法を示す。

配管移動ロボットには、検出部やケーブルを十分に牽引できる能力、また、T型管継ぎ手等の曲管部で任意に方向を変更できる能力が必要となる。さらに、配管移動ロボットには、曲管部を含む配管内部における走行の安定性、走行進路を確認するための観察能力等が求められる。そこで、配管移動ロボットは、牽引力を高めるために前後に駆動機構、進路調整用ステアリング機構(流体小型アクチュエータ)を設け、小型で高感度のカメラ及び照明を取り付けることとした。

注) 比例計数管の出力パルス信号は微弱であるため、長さ10mを超えるケーブルを用いて十分な強さの信号を取り出すには、検出器にプリアンプを取り付ける必要がある。

3. MISE

3.1 装置の構成

配管内部汚染分布測定装置（以下「MISE」^{注)}とする）は、3inch 径配管に適用することを前提に製作した^{4),5)}。MISEは、検出器、配管移動ロボット、制御装置、ケーブル巻き取り装置等から構成される。このうち、検出器は、配管移動ロボット及び中継ボックスに連結し、保守や運搬時には各々を分離することが可能である。また、ガス配管や信号ケーブル等は、ケーブル巻き取り装置を介して、ガスボンベや制御装置等へ接続されている。MISEは、Sch40の3inch径配管に適用可能であるが、直管のみではなくT型管継ぎ手及び2つ以上の直角エルボ部（ショート及びロング）の走行が可能であり、全長15mまでの配管に適用できる。図2にMISEの構成を、また、写真1に外観を示す。各構成機器の詳細を以下に記す。

3.2 検出器

第2章で述べた基本的考え方に基づいて、円筒型2層構造の検出器（GM計数管）を製作した。検出器は、配管内部で本体を配管の中心軸に沿って対象位置を保つために、放射状に配置された車輪で支持するとともに、検出器の保守等が可能となるように、中継ボックスで切り離しができる構造とした。また、円周方向の検出特性が一定に保てるように、第1検出器に14本、第2検出器に8本の陽極線を各々等間隔で配置した。検出器の寸法は、直径60mm、長さ60mmであり、陰極ケース及び第1検出器と第2検出器の隔壁（β線遮へい板）には厚さ1mmのアルミニウムを、入射窓には密度0.96mg/cm²のアルミニウム蒸着マイラーを使用した。検出器の重量は約250gである。充填ガスには、Qガス（He98%+*ε*-C₄H₁₀2%）を用い、封じ切り型及びガスフロー型のどちらかを選択できる構造とした。表1に2層型検出器の基本仕様を、図3に構造を示す。

3.3 配管移動ロボット

配管移動ロボットは、駆動機構（前後各4輪）、ステアリング機構、観察機構から構成される。検出器は、配管移動ロボットの後方に連結した。図4に配管移動ロボットの構造を示す。配管移動ロボットの寸法は、外径71mm、長さ270mmであり、重量は約320g（本体のみ）、ケーブル重量は約1.2kg（長さ15m）である。車輪は配管移動ロボットの前後に取り付け、また、中央にはゴム製のステアリング機構として流体小型アクチュエータを取り付け、移動方向を任意に決めることができる。駆動機構は、遊星歯車と太陽歯車等から構成される。配管移動ロボットの先端には、観察機構として1台の超小型カラーCCDカメラと2台の照明を搭載した。なお、配管移動ロボットは制御装置とケーブルで接続し、配管移動ロボットの走行性を考慮して、ケーブル巻き取り装置を設けた。表2に配管移動ロボットの基本仕様を示す。以下に各部の概要を記す。

駆動機構

駆動機構は、駆動モータ、ウォームギヤ、太陽歯車、遊星歯車等から構成される。図5に駆動機構の原理を示す。図中で矢印の示す進行方向に移動する場合、駆動モータの回転力はウォーム

注) MISE: Measuring Device for Inner Surfaces of Embedded Piping

ギヤ、太陽歯車、遊星歯車の順に伝達され、遊星歯車と軸を共有する車輪を駆動できる。遊星歯車は太陽歯車の中心を軸に回転する L 形リンクによって支えられ、太陽歯車が回転すると、遊星歯車に駆動力が伝達され、車輪が管壁に触れるまで公転する。車輪が管壁に触れるとその公転が止められ、管壁への押付力になると同時に、車輪が自転して推進力を発生する。駆動モータには直流ギヤードモータを採用し、後輪には移動量を検出するためのエンコーダを取り付けた。

ステアリング機構

ステアリング機構にはゴム製の流体小型アクチュエータ (FMA : Flexible Micro Actuator) を採用した。FMA の寸法は外径 24mm、長さ 130mm である。図 6 に FMA の構造を示す。流体アクチュエータは内部が 3 つの圧力室に分かれ、その外壁には周方向に繊維強化ゴムが埋め込まれている。各圧力室に加える圧力を制御することで FMA が任意の方向へ湾曲し、配管移動ロボットの進行方向を変えることが可能である。

観察機構

観察機構は、CCD カメラ (前後 1 台ずつ) と照明から構成され、配管移動ロボットの先端及び中継ボックスの後端に装備した。配管内面の目視点検に必要な高画質を得るために、CCD カメラの撮像素子は 1/4 inch、カラー、総画素数 41 万画素とし、照明を前後 2 台ずつ取り付けた。なお、CCD カメラの寸法は直径 7mm、長さ 47mm である。

ケーブル巻き取り装置

ケーブル巻き取り装置は、ケーブル巻き取り部、ケーブル収納容器及び制御機器から構成される。ケーブル巻き取り部は搬送ローラとモータより構成され、1 対のローラ間にケーブルを挟み込み、ローラの回転でケーブルを巻き取ることができる。ケーブルには、カメラ用、駆動電源用、エアチューブ用があり、これらは各々ケーブル巻き取り装置内で、映像出力コネクタ、コントローラ接続コネクタ、電磁弁接続コネクタに接続した。

3.4 制御装置

制御装置は、放射線カウンター、観察用モニタ、記録用ビデオ、コントローラ、コンプレッサ、制御用コンピュータ及び操作ペンダント (手動操作用) から構成されている。図 7 に制御系のシステム構成を示す。第 1 検出器及び第 2 検出器で測定された放射線の計数は、インターフェース (RS-232C) を介して制御用コンピュータに送られる。また、位置情報は、エンコーダによって検出され、コントローラを介して制御用コンピュータに転送される。これらの情報は、測定箇所毎に制御用コンピュータの表計算ソフト (マイクロソフト社製 Excel) により保存されるとともに、画面上に逐次表示される。制御装置におけるデータの出力例を図 8 に示す。画面左側に測定条件等が、右側に測定結果のグラフが表示される。なお、CCD カメラによって観察した配管内部の映像は、記録用ビデオに録画できる。

3.5 測定の方法

開発した MISE は、配管移動ロボットを任意の場所に移動した後に測定を行う手動測定、測定時間及び移動距離を予め設定して自動で測定を行う自動測定（ステップ及び連続）が可能である。以下に各測定モードの内容を示す。

- ①バックグラウンド測定：バックグラウンド測定（測定時間等の入力が必要、手動で移動）
- ②手動測定：手動測定
- ③ステップ測定：自動測定（測定時間、移動間隔等の入力が必要、一定間隔で移動）
- ④連続測定：自動測定（駆動モータ電流値等の入力が必要、一定速度で移動）

汚染分布の測定は図 9 に示す手順で実施する。まず、非汚染領域において、第 1 検出器の β 線+ γ 線、第 2 検出器の γ 線に対するバックグラウンド測定（上記の①）を行う。次に、上記の測定モード（②、③、④）から適用するものを選択し、制御用コンピュータに表示された初期パラメータ（基準となるバックグラウンド計数率、機器効率、線源効率）と測定条件（測定範囲、測定時間、測定間隔等）を入力することにより、自動測定が開始される。すなわち、予め設定されたシーケンスに従って配管移動ロボットが動作し、配管内部の映像を観察用モニタに表示するとともに、第 1 検出器によって β 線と γ 線、第 2 検出器によって γ 線を測定し、その測定結果が画面に表示される。

4. 機能試験

4.1 試験方法

MISE の性能を確認するため、検出器及び配管移動ロボットの機能試験、また、装置の総合的な性能を評価する試験を実施した。試験の方法を以下に記す。なお、試験に使用した管状面線源の特性を図 10 に示す。

(1) 検出器の特性

プラトー特性

第 1 検出器及び第 2 検出器の最適使用電圧（プラトー領域）を求めるために、管状面線源（ ^{60}Co ：約 $6\text{Bq}/\text{cm}^2$ 、面積： 123cm^2 ）の中心に 2 層型検出器を設置し、検出器の印加電圧を 996V から 1,118V まで 12V ずつ上昇させ、各電圧において計数率を測定した。測定時間は 100 秒とした。

バックグラウンド検出特性

コンクリート試験体（寸法： $300\times 300\times 300\text{mm}$ ）内にステンレス配管（3inch、Sch40、長さ 300mm）を設置し、その中心に 2 層型検出器を置いてバックグラウンド計数率を測定した。次に、コンクリート試験体からステンレス配管を取り除き、コンクリートのバックグラウンド計数率を測定した。各試験におけるバックグラウンド計数率の測定時間は、20、30、60、100、300 秒とした。

軸方向及び円周方向の検出特性

管状面線源 (^{60}Co : 約 $6\text{Bq}/\text{cm}^2$ 、面積: 123cm^2) をコンクリート試験体 (寸法: $300\times 300\times 300\text{mm}$) に設置し、2層型検出器を配管の軸方向に 10 から 300mm まで 10mm 毎に移動し、計数率を測定した。測定時間は 60 秒とした。図 11 に検出器の軸方向特性に関する試験体系を示す。

他方、ステンレス配管 (3inch、Sch40、長さ: 300mm) の下部に面線源 (^{60}Co : 約 70Bq 、 $10\times 10\text{mm}$) を軸方向に 3 個並べ、それをコンクリート試験体 (寸法: $300\times 300\times 300\text{mm}$) に設置した。面線源を置いた状態で 2 層型検出器を 10° 毎に回転して計数率を測定した。測定時間は 60 秒とした。図 12 に検出器の円周方向特性に関する試験体系を示す。

(2) 配管移動ロボットの特性

走行試験用模擬配管 (以下「模擬配管」とする) を用いて配管移動ロボットの走行特性を評価した。模擬配管の全長は 15m であり、アクリル及びステンレス製の直管、T 型管継ぎ手、ショートエルボ、ロングエルボの各配管を図 13 に示すように L 型、矩型、かぎ型に組み合わせた。模擬配管の基本仕様及び外観を表 3 及び写真 2 に示す。試験内容を以下に記す。

移動速度

配管移動ロボットを無負荷状態でアクリル (3inch、Sch40) 及びステンレス (3inch、Sch40) 製の直管内部を自動走行させた。なお、測定モードは、連続測定モード (駆動モータの最大電流値) とし、直管を水平又は垂直に設置し、配管移動ロボットの前進及び後進の走行時間、上昇及び下降の走行時間を各々計測した。

スリップ量

配管移動ロボットを無負荷状態でアクリル (3inch、Sch40) 及びステンレス (3inch、Sch40) 製の直管内部を自動走行させた。この条件での走行中にエンコーダの出力と実際の走行距離を計測し、配管移動ロボットのスリップ量を評価した。なお、測定モードは、連続測定モード (駆動モータの最大電流値) とし、各直管を水平又は垂直に設置し、配管移動ロボットの前進及び後進時のスリップ量、上昇及び下降時のスリップ量を測定した。

最大牽引力

配管移動ロボットにバネばかりを取り付け、アクリル (3inch、Sch40) 及びステンレス (3inch、Sch40) 製の直管内部において一定距離 (1m) 自動走行させ、最大牽引力を計測した。なお、測定モードは、連続測定モード (駆動モータの最大電流値) とし、各直管を水平又は垂直に設置し、配管移動ロボットの前進及び後進時の最大牽引力、上昇及び下降時の最大牽引力を測定した。

観察能力

配管内部に入る光を遮断して、CCD カメラと照明のみで走行し、観察能力及び操作性に関する試験を行った。

(3) 装置の総合性能

検出特性

4種類の配管(3、4、6、8inch)を対象として、配管の円周方向に面線源(^{60}Co :70Bq、 $10\times 10\text{mm}$)を設置し(3個 \times 2列)、検出器を配管の軸方向に-100から100mmまで10mm毎に移動して計数率を測定した。図14に軸方向特性に関する試験体系を示す。

また、各々の配管に対して、軸方向に面線源(^{60}Co :70Bq、 $10\times 10\text{mm}$)を3個(約200Bq)設置し、検出器を円周方向に 10° 毎に回転して放射能の測定を行った。図15に円周方向特性に関する試験体系を示す。

外部線源の影響

管状面線源(^{60}Co :約 $6\text{Bq}/\text{cm}^2$ 、面積: 123cm^2)を設置したコンクリート試験体(寸法: $300\times 300\times 300\text{mm}$)に2層型検出器を置き、検出器と外部線源(^{152}Eu :130kBq)の距離を、0から400mmまで約50mm毎に変えて計数率の測定を行った。図16に外部線源の影響に関する試験体系を示す。

また、同様の試験体系において、検出器と外部線源との距離を1,050mmまで約100mm毎に変え2層型検出器又はGM型表面汚染検査計により、計数率を測定した。

位置分解能

3種類の ^{60}Co 管状面線源(A:約 $0.7\text{Bq}/\text{cm}^2$ 、B:約 $6\text{Bq}/\text{cm}^2$ 、C:約 $75\text{Bq}/\text{cm}^2$ 、面積: 123cm^2)を50mmの間隔で設置し、管状面線源の設置されている内部(測定範囲: 600mm)を30mmの間隔で測定した。なお、測定時間は30秒とした。図17及び写真3に試験体系を示す。

また、同様の試験体系でGM型表面汚染検査計を用いて、30mm間隔で測定を行い両者の検出特性を比較した。なお、測定時間は30秒とした。

測定効率と検出限界

模擬配管を用いて、自動測定を行い測定効率及び検出限界値を求めた。なお、測定間隔は15及び30mmとし、測定時間は10、20、30、60、100及び300秒とした。

4.2 試験結果

(1) 検出器の特性

プラトー特性

図18に検出器のプラトー特性を示す。第1検出器及び第2検出器ともに計数率の変化の少ないプラトー領域があり、2層型検出器が安定に動作していることを確認した。この結果から、最適使用電圧を1,092Vに決定した。

バックグラウンド検出特性

図19に2層型検出器のバックグラウンド検出特性を示す。ステンレス配管の β 線と γ 線のバックグラウンド計数率は、各々約0.5cpsと0.63cpsであった。また、コンクリートの β 線と γ 線のバックグラウンド計数率は、各々約0.82cpsと0.70cpsであった。

軸方向及び円周方向の検出特性

図 20 に 2 層型検出器を配管軸方向に移動して測定した計数率 (3inch 配管) を示す。図に示すように β 線計数率は、管状面線源の設定位置で上昇し、線源の存在を明らかに識別できることが分かった。この位置における機器効率は約 25% であった。 γ 線計数率は、 β 線と比較してやや悪くなるものの、線源の存在は識別できた。この検出効率は 0.14% であった。

図 21 に 2 層型検出器を円周方向に回転させて測定した計数率 (3inch 配管) を示す。図に示すように面線源 (^{60}Co : 約 200Bq、 $10 \times 10\text{mm} \times 3$ 個) に対して β 線及び γ 線ともに円周方向で計数率の変動は認められず安定した検出特性が得られた。 β 線の機器効率が 10%、 γ 線の検出効率が 0.53% であった。

(2) 配管移動ロボットの性能

移動速度

水平に設置した配管における最大の移動速度は前進時に 22.2mm/sec、後進時に 23.6mm/sec であった。また、垂直に設置した配管における最大の移動速度は上昇時に 15.4mm/sec、下降時に 26.7mm/sec であった。移動速度の配管材質 (アクリル又はステンレス) による違いは見られなかった。

スリップ量

水平に設置した配管における前進及び後進時のスリップ量を評価した結果、1m の移動に対して移動誤差は $\pm 1\%$ 以下であった。また、垂直に設置した配管における上昇及び下降時のスリップ量の評価結果は、1m の移動に対して各々 9.2% 及び -17.4% であった。配管材質 (アクリル又はステンレス) によるスリップ量の違いはほとんどなかった。

最大牽引力

水平に設置した配管における最大牽引力は 35N であった。また、垂直に設置した配管における最大牽引力は 20~28N であった。

観察能力

配管内部に入る光を遮断した環境においても、配管移動ロボットに装備した照明により配管内面の状態を観察用モニターで十分に監視できることを確認した。また、運転が困難と考えられる曲管部においても観察用モニターの映像のみで操作を行い、その移動方向を容易に変更することが可能であった。なお、移動中、FMA にねじれが発生し、配管移動ロボットの姿勢を把握することが困難であり、曲管部の走行時における FMA の操作に時間を要した。

(3) 装置の総合性能

軸方向及び円周方向の検出特性

図 22 に 4 種類の配管径 (3、4、6、8inch) に対する 2 層型検出器の機器特性を評価した結果を示す。図に示すように β 線に対する機器効率は配管径が小さいほど高くなった。また、機器効率

のピーク幅は配管径が小さくなると狭くなる傾向を示した。

図 23 に 4 種類の配管径 (3、4、6、8inch) に対する円周方向の機器効率を評価した結果を示す。β線に対する機器効率は、3inch 径配管で約 10%、4inch 径配管で約 6%、6inch 径配管で約 3%、8inch 径配管で約 1.7%であった。なお、γ線に対する検出効率は 1%以下であり、配管径に関係なくほぼ一定の値を示した。

外部線源の影響

図 24 に外部線源の影響下における β線計数率の測定結果を示す。β線のバックグラウンド計数率は、外部線源から遠くなるほど小さくなるのに対して、β線の正味計数率は、外部線源の距離が検出器から 100mm 程度までは変動するが、それ以上の距離ではほぼ一定の値を示した。本結果から、検出器の近傍に線量率約 $2\mu\text{Gy/h}$ の線源が存在する場合でも、配管内面の汚染 (約 6Bq/cm^2) を識別できることが分かった。

図 25 に 2 層型検出器と GM 型表面汚染検査計の外部線源に対する計数率を示す。本図に示すように GM 型表面汚染検査計の計数率は、外部線源からの距離が 1m を超えてもバックグラウンドレベル (外部線源がない条件でのバックグラウンドレベル) まで下がらないのに対して、2 層型検出器の計数率は、外部線源からの距離が約 600mm の位置でバックグラウンドレベルまで下がり安定した。

位置分解能

図 26 に 3 種類の線源を近接して配置した場合の汚染分布の測定結果を示す。30mm 間隔のステップ運転 (30 秒の測定時間) に対して、約 0.7Bq/cm^2 と約 75Bq/cm^2 の線源を 50mm の間隔で識別できることが分かった。

図 27 に 2 層型検出器と GM 型表面汚染検査計を用いて同様の条件で汚染分布を測定した結果を示す。2 層型検出器では、配置された管状面線源とほぼ同じ箇所にピークを示したのに対して、GM 型表面汚染検査計では、大小 2 つの緩やかなピークを持つ分布となり、そのピーク位置は、検出器の挿入方向にずれていた。また、計数率は 2 層型検出器の方が高い値を示した。

以上の結果、位置分解能及び計数率 (検出効率) については、2 層型検出器が GM 型表面汚染検査計より優れていることが確認できた。

測定効率と検出限界

測定時間を 30 秒とした時の検出限界値は約 0.17Bq/cm^2 であった。また、その時の測定効率は、測定間隔 15 と 30mm の場合、各々約 1.8 と 3.6m/h であった。

一方、測定時間を 10 秒とした時の検出限界値は約 0.36Bq/cm^2 であった。その時の測定効率は、測定間隔 15 と 30mm の場合、各々約 5.4、 10.8m/h であった。

5. 検 討

5.1 性能評価

開発した MISE 及び既存検出器 (GM 型表面汚染検査計) により、模擬線源を配置した配管の軸方向放射能分布を測定した結果は、次の通りであった。すなわち、MISE では、管状面線源とほぼ同じ位置に明らかな計数率のピークを検出できたのに対して、GM 型表面汚染検査計では、ピークは緩やかでありその位置が管状面線源とずれており、明らかに MISE の検出性能が優れていた。また、MISE は、既存の検出器に比べて低レベルの放射能測定に有効であり、しかも、放射能汚染の高い部分と低い部分あるいは汚染した部分としていない部分の相違を明らかに区分して測定できることがわかった。

埋設配管内部の汚染測定は、市販の NaI (Tl) や Ge 半導体検出器等では困難である。そのため、JPDR 解体実地試験では、埋設配管入り口付近から試料を採取し、その放射能測定結果から埋設配管内部の汚染を判断した。このため、埋設配管の汚染の有無に関する評価は、通常の機器や配管の汚染の有無に関する評価に比べて非常に時間を要すとともに評価精度の面で問題があった。

一方、MISE を用いることにより、十分小さい検出限界値 (約 0.17Bq/cm^2) で高い測定効率 (約 3.6m/h) により埋設配管の汚染分布を測定することが可能となった。また、測定データの処理が自動で行われるため、埋設配管の汚染評価を効率的に進めることが期待できる。

5.2 適用範囲

原子力施設を解体撤去する作業では、施設解体の前に放射能の事前評価を行うことが求められる。この作業に MISE を適用し、配管内面の汚染の有無、特に配管の深部の汚染を容易に確認することができると考えられる。MISE には、汚染分布の測定結果に基づいて、配管内面に汚染がある場合には、解体作業による汚染拡大を防止するために、配管開口部の密封措置の必要性や配管の撤去方法等について検討することが可能となる。また、配管内面に汚染がない場合には、建屋の解体とともに撤去でき、作業の効率化が図れる。

撤去した配管の汚染の有無を判断する場合、既存の表面汚染検査計では配管の内部に検出器を挿入することができないので、配管を縦に切断して内表面を測定等、解体物を再度加工する作業が必要となる。また、切断した配管は、半円形であるため、表面汚染検査計本来の検出効率を得ることが困難となることが考えられる。これに対して、MISE では、配管内部に直接検出器を挿入できるため、撤去した配管の汚染の有無を容易に確認できる。

また、撤去した配管内面を除染する場合には、配管を適当な大きさに切断することが必要となる。このような場合、配管内面の汚染分布が把握できれば、汚染レベル毎に最小限の汚染部分を取り除くことが可能となり、放射性廃棄物の低減や除染作業の効率化が図れるものと考えられる。

他方、現在我が国では、原子力施設の解体作業で発生する廃棄物に対してクリアランスレベルの適用を考えている。クリアランスレベル検認では、対象となる廃棄物の放射能濃度 (Bq/g) を評価することが必要となる⁶⁾。ここで、溶接部や継ぎ手部分を除いて、配管内面の汚染は、表面に付着あるいは付着して酸化した汚染物によるものであり、この汚染密度を放射能濃度に換算することが必要となる。Sch40 のステンレス配管 1m (約 11kg) を溶融処理し、放射能汚染が均質化

すると仮定すれば、 0.4Bq/g (^{60}Co に対するクリアランスレベル) の放射能濃度は、配管内表面が約 2.0Bq/cm^2 で均一に汚染した状態に相当する。従って、この値を測定の基準値として MISE をクリアランスレベル検認に用いた場合、測定時間 2 秒 (約 54m/h の測定効率) 以下での測定が可能となる。なお、1 日の実働時間を 6h と考えると、1 日で長さ約 300m の配管についてクリアランスレベル検認が可能である。

5.3 実用性の検討

一般的に、埋設配管は床ドレンとして使用されている場合が多く、その内部には配管の腐食生成物、水分、塵、ゴミ等が存在する。このため、MISE を埋設配管の汚染分布測定に適用するにあたっては、防塵や防水等を考慮した措置を施すこととなる。例えば、検出器のカバーには、 β 線の測定に影響の少ないマイラー膜のような素材を使用するとともに、できるだけ薄いものを選択する。配管移動ロボットには、駆動機構に異物が進入しないようなカバーを、また、ケーブルには、配管との摩擦が少ない素材 (テフロン系) のカバーを選定する。このようなカバーを施すことによって、十分に実用化が可能であると考えられる。

なお、MISE の移動誤差は、前進及び後進時に $\pm 1\%/m$ 以下、上昇時が $9.2\%/m$ 、下降時が $-17.4\%/m$ であり、配管の材質 (アクリル、ステンレス) による違いはほとんどなかったものの、曲管部では、配管移動ロボットに負荷がかかり速度を一定に保てないため、正確な位置の把握が困難であった。また、曲管部の手動走行では、曲がるタイミングや配管移動ロボット自身の姿勢等を正確に把握することが必要であった。このため、曲管部の移動は、自動ではなく手動の方が適していると思われる。

6. まとめ

埋設配管の放射能汚染分布測定を効率良く行うことを目的として、円筒型 2 層構造の検出器 (GM 計数管) を開発した。また、配管内部を走行可能な配管移動ロボットを製作し、検出器と連結して MISE として完成した。本装置を用いた性能試験の結果、以下のような性能が確認できた。

—管状面線源に対する β 線の機器効率が約 25%、 γ 線の検出効率が約 0.14% であり、 β 線に高感度な検出特性を有すること、また、約 75Bq/cm^2 と約 0.7Bq/cm^2 の管状面線源を両者の距離が 50mm まで識別して測定できることを確認した。

—検出限界値は、 ^{60}Co に対して約 0.17Bq/cm^2 (測定時間 30 秒) であり、既存の検出器 (コンタマツト : 測定時間 30sec で約 0.3Bq/cm^2) と比較して、2 倍近い性能が得られた。

—約 $2\mu\text{Gy/h}$ の外部線源の影響下において、約 6Bq/cm^2 の管状面線源 (^{60}Co) を識別して測定できた。

—検出限界値 0.4Bq/g (^{60}Co) に対して 1 日当たり約 300m (30mm ステップ測定、実働時間 6h) の測定効率を得られることが分かった。

以上の結果、開発した MISE は、これまで既存の検出器では測定が困難であった原子炉施設の埋設配管内面、特に深部の放射能汚染分布測定に有効であると考えられる。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、バックエンド技術部の関係者の方々から貴重な御助言、御指導をいただいた。また、川上一弘氏（日本アドバンステクノロジー（株））から、開発した測定装置の運転、性能試験等に関して多大な協力を得た。ここに深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 宮坂靖彦、他：JPDR 解体実地試験の概要と成果、日本原子力学会誌、38[7]、553(1996)。
- 2) 白石邦生、他：動力試験炉(JPDR)の解体における作業データの分析、JAERI-Data/Code98-010、(1998)。
- 3) 畠山睦夫、他：動力試験炉(JPDR)の解体における建屋表面の除染と放射能測定、JAERI-Tech97-064、(1997)。
- 4) 柳原敏、他：配管内部汚染分布測定ロボットの開発、－第1報：システム構成と管内移動装置の開発－、第18回日本ロボット学会学術講演会、1D31、(2000)
- 5) 柳原敏、他：配管内部汚染分布測定ロボットの開発、－第2報：管内移動と管内面の汚染分布測定の実施－、第18回日本ロボット学会学術講演会、1D32、(2000)
- 6) 原子力安全委員会（原子力安全基準専門部会）：原子炉施設におけるクリアランスレベル検認のあり方について、2001年3月14日

表1 2層型検出器の基本仕様

項 目	仕 様
検出器タイプ	GM型 (ガスフロー式)
形 状	円筒型二層構造
寸 法	外径：60mm、長さ：60mm
重 量	約250g (センタリング用の車輪含む)
陽極線*)	外径：0.1mm、材質：タングステン金メッキワイヤー
陰極ケース	アルミニウム
充填ガス	Qガス (He 98% + ϵ -C ₄ H ₁₀ 2%)
ガス圧	0.3kgf/cm ²
ガス流量	30cm ³ /min (ガスフロー時)
入射窓	アルミニウム蒸着マイラー (密度：0.96mg/cm ²)
検出面の開口率	約93%

*) : 陽極線数は第1検出器が14本、第2検出器が8本である。

表2 配管移動ロボットの基本仕様

項 目	仕 様
本 体	
重 量	約320g (本体のみ、ケーブル：約1.2kg/15m)
寸 法	外径：71mm、長さ：270mm
移動速度	最大 約25mm/sec (牽引時)
最大牽引力	約3.5kgf
走行能力	4mmの凸部、8mmの凹部を走行可能
移動誤差	約3%/20mm (自動測定時)
観 察 機 構	
寸 法	外径：7mm、長さ：47mm (CCDカメラ)
撮像素子	1/4inch、41万画素カラーCCD
照 明	クリプトンランプ (2機)

表3 模擬配管の基本仕様

項目	仕様
配管の規格	3inch、Sch40
材質	アクリル、ステンレス
配管の長さ	最大15m（曲管と直管の組み合わせ長さ）
配管形状	T字管継ぎ手及び2つ以上の90度エルボ
使用環境	温度：常温、湿度：80%以下
傾斜	5%（こう配）

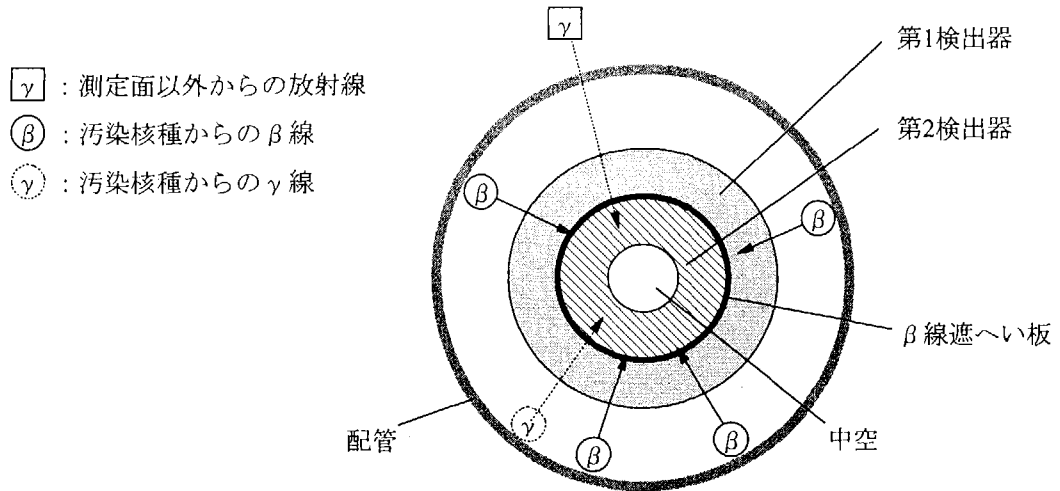


図1 2層型検出器の検出原理

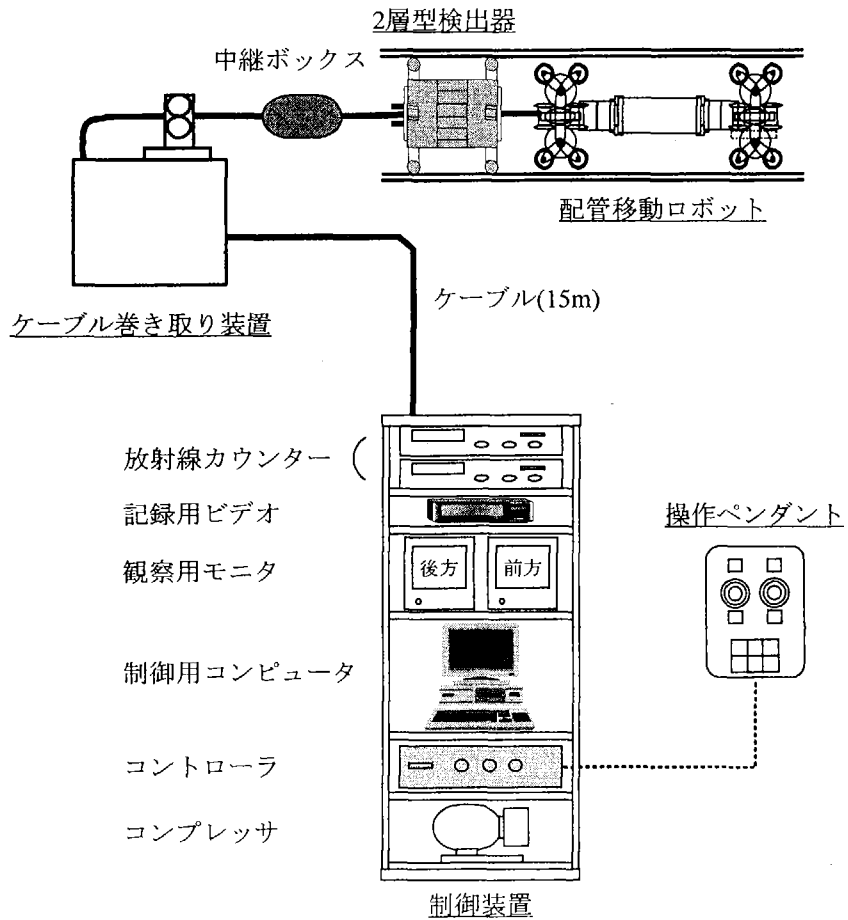


図2 MISEの構成

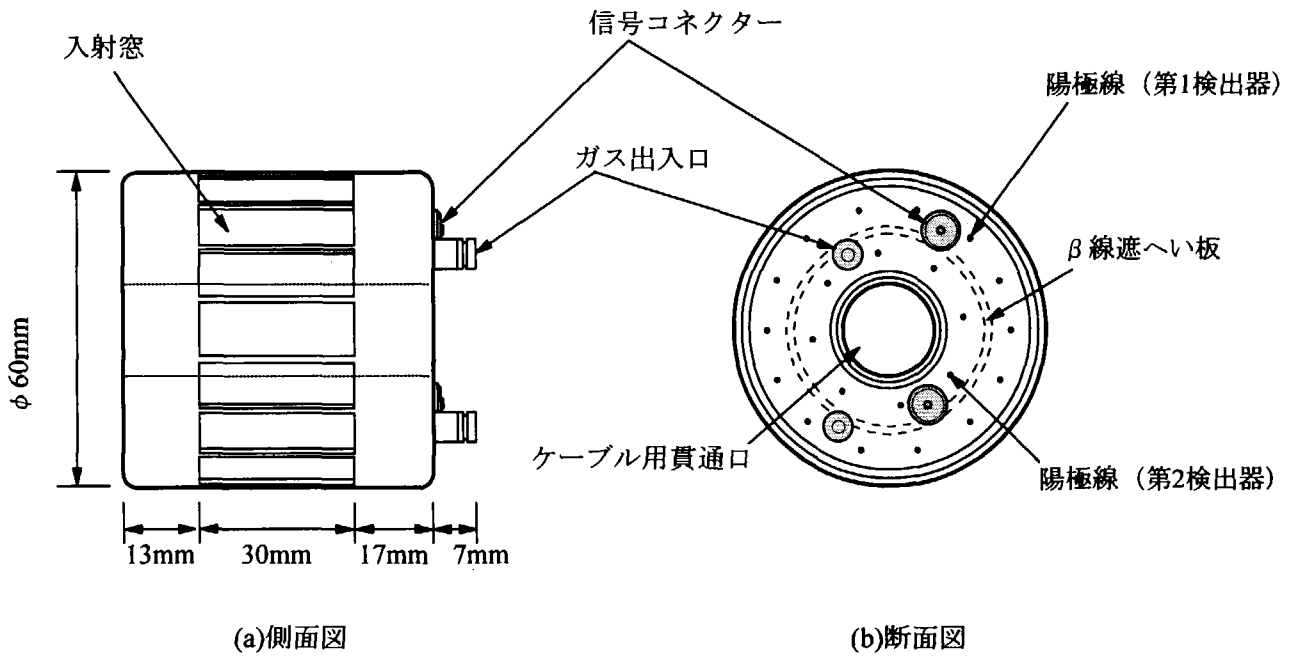


図3 2層型検出器の構造

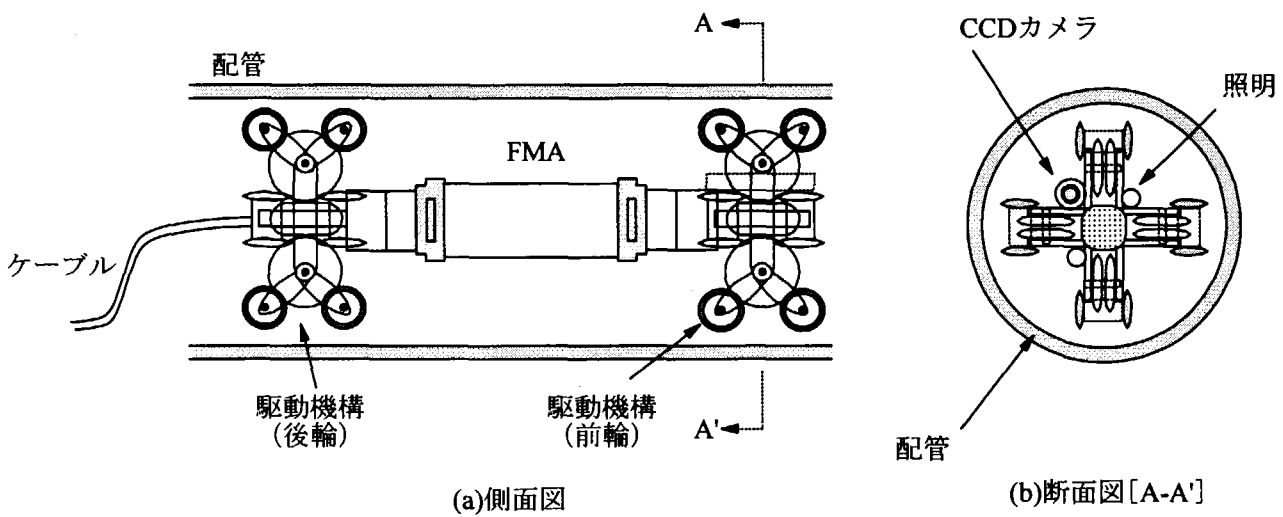


図4 配管移動ロボットの構造

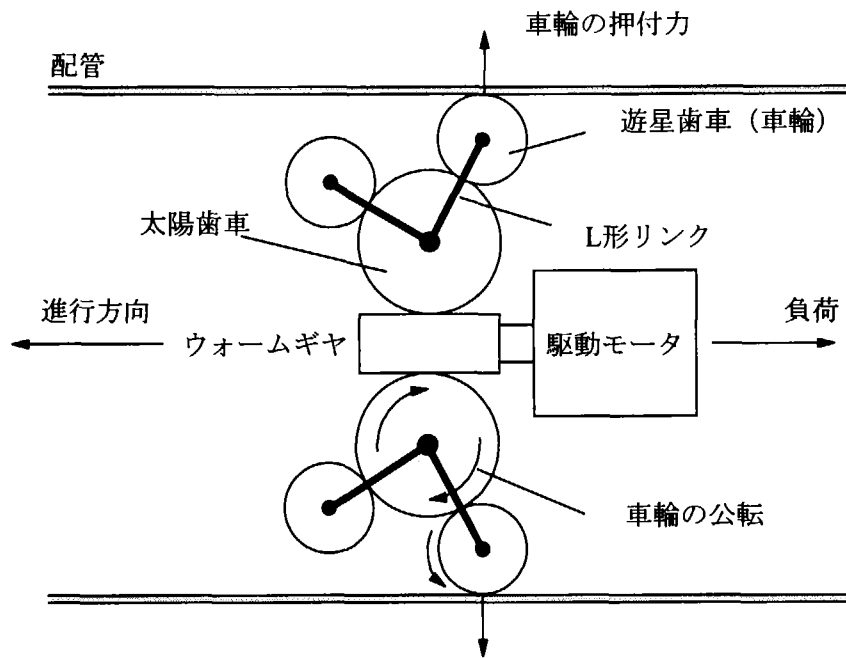


図5 駆動機構の原理

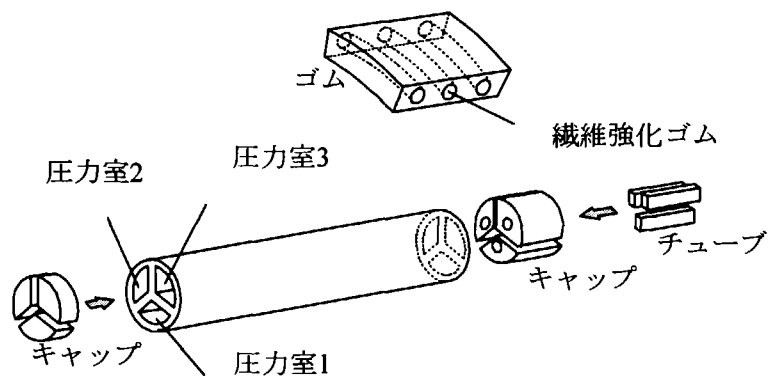


図6 FMAの構造

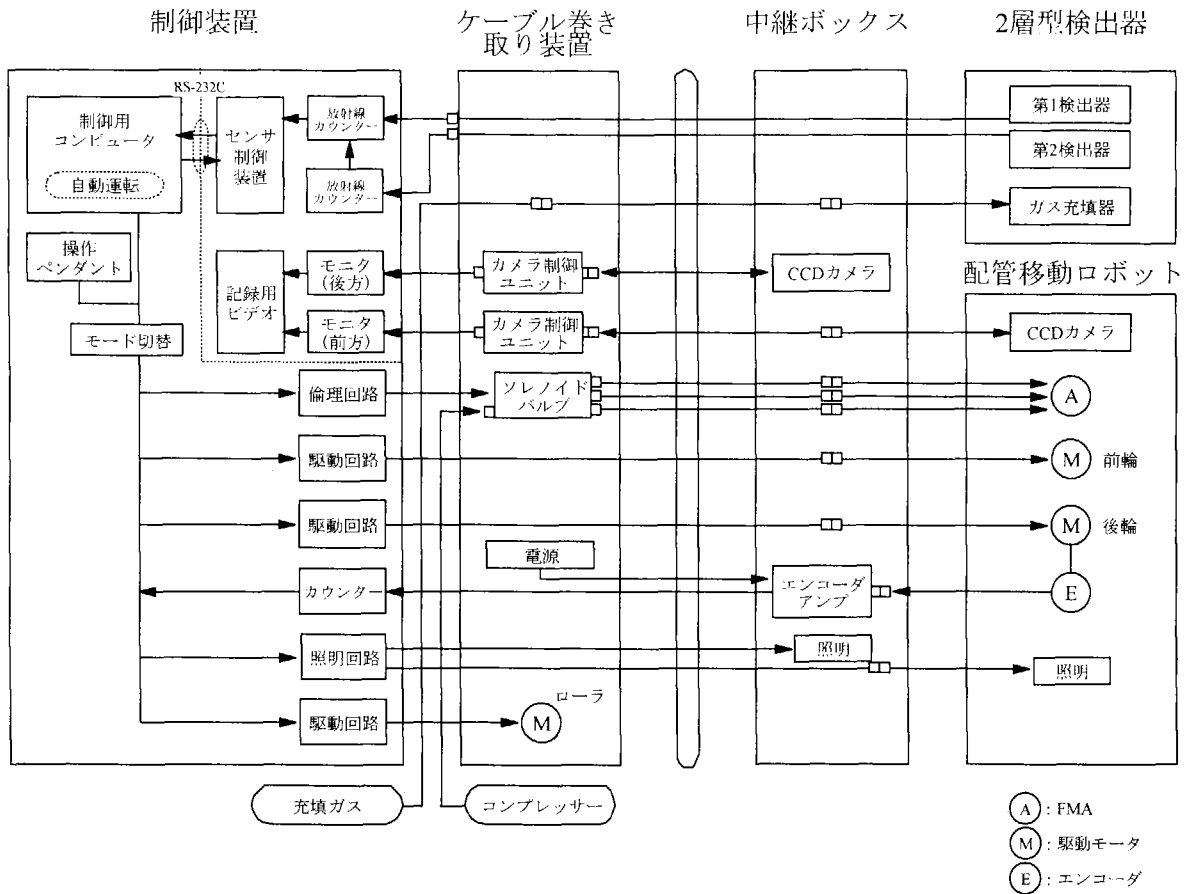


図7 制御系のシステム構成

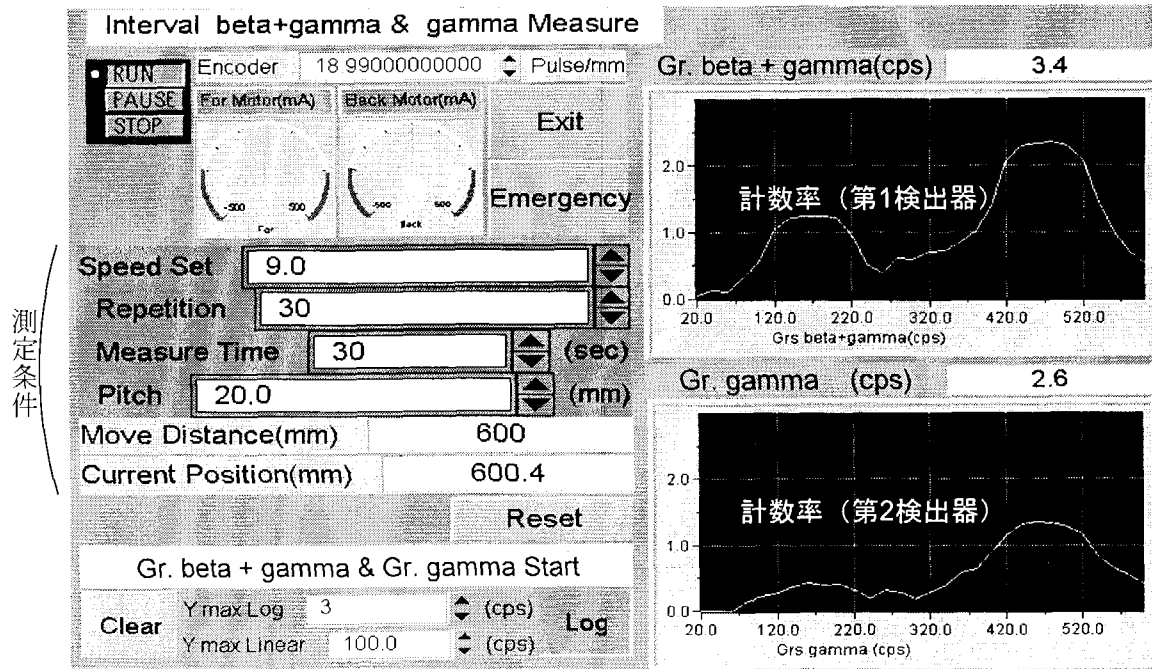


図8 データの出力例

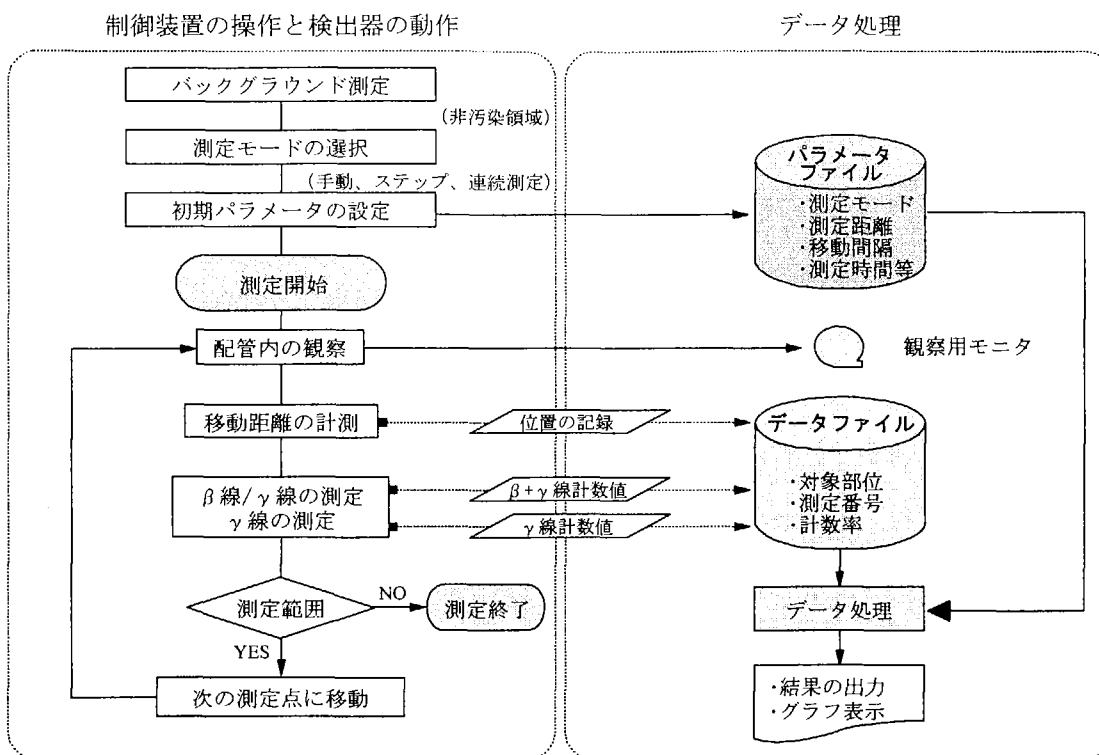
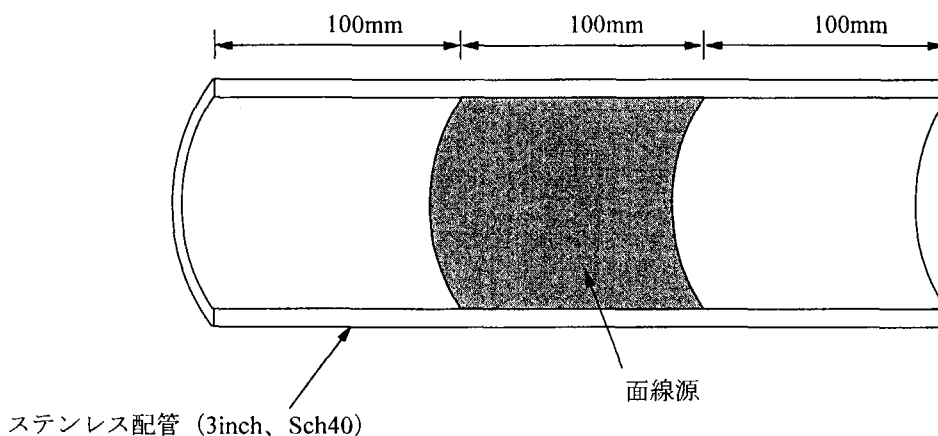


図9 汚染分布測定の流れ



管状面線源	核種	放射能濃度	面積
A	⁶⁰ Co	約0.7Bq/cm ²	123cm ²
B	⁶⁰ Co	約 6Bq/cm ²	123cm ²
C	⁶⁰ Co	約 75Bq/cm ²	123cm ²

試験時には、縦に2分割された管状面線源を組み合わせ使用した。

図10 管状面線源の特性

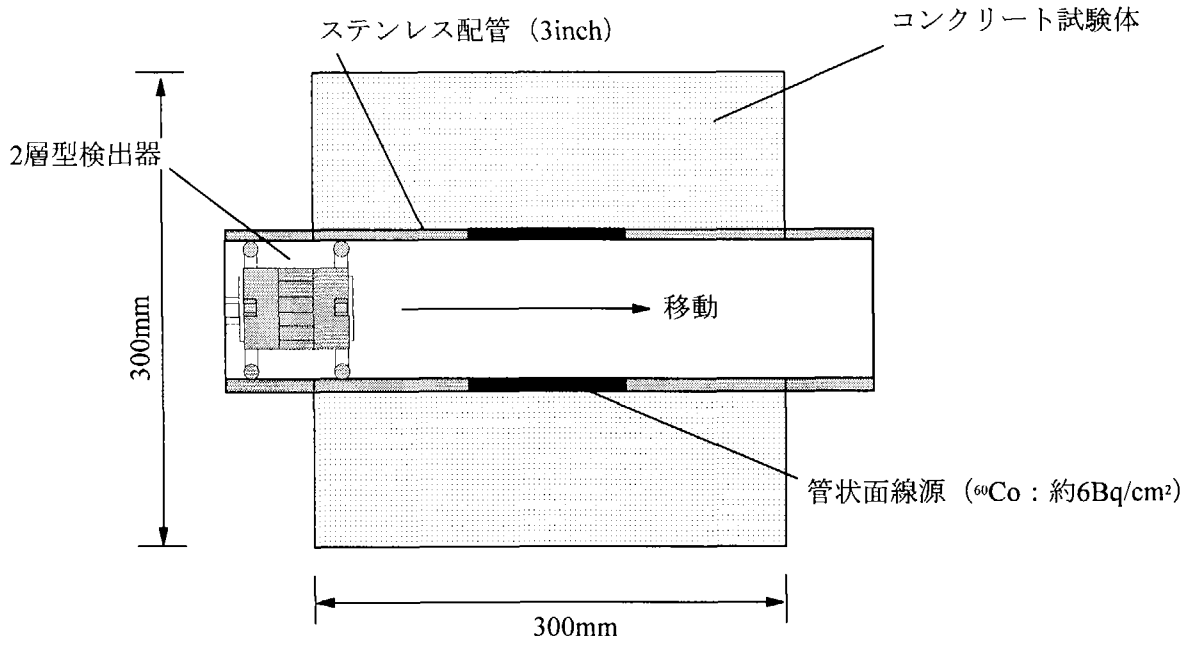


図11 軸方向特性に関する試験体系

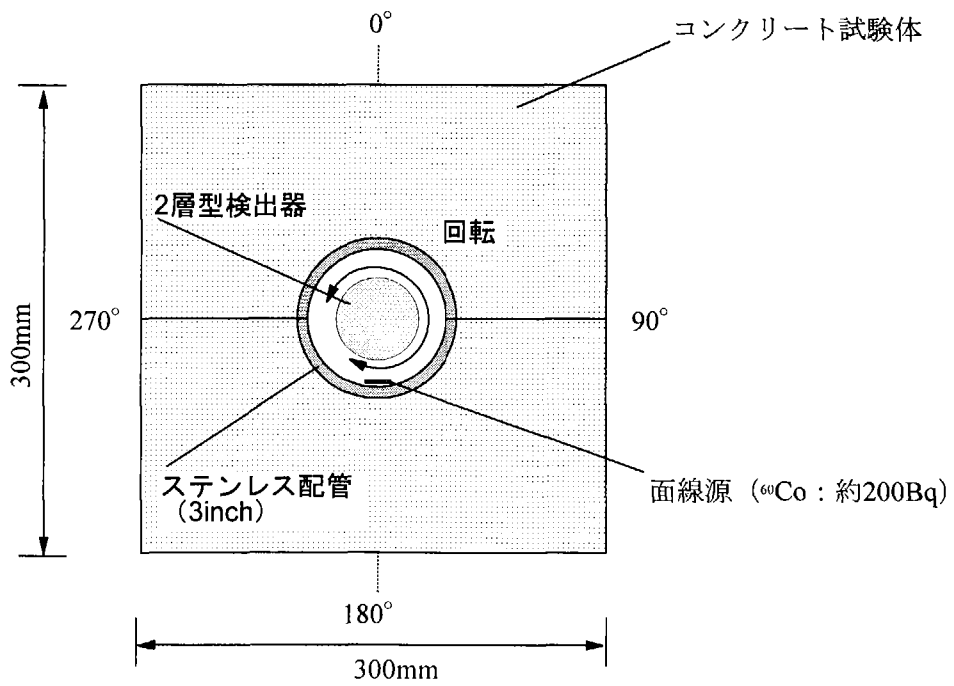


図12 円周方向特性に関する試験体系

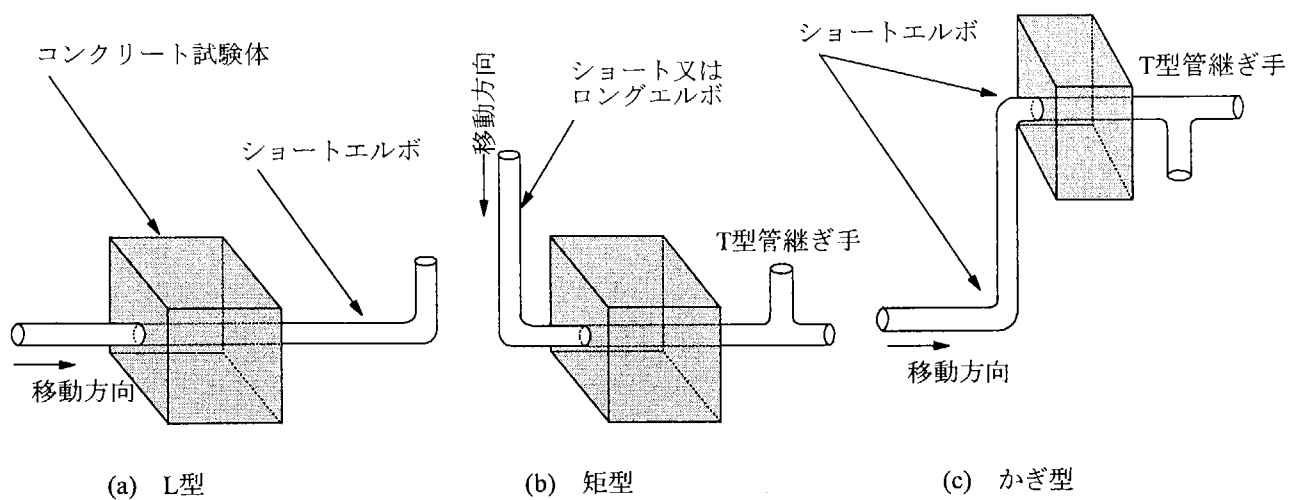


図13 模擬配管の形状

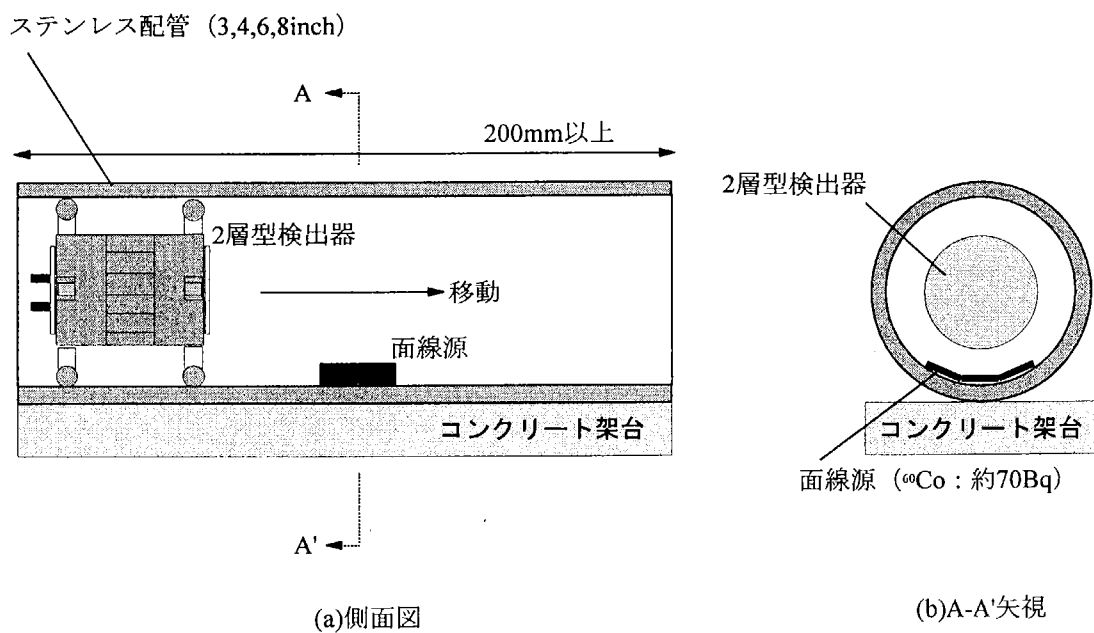


図14 軸方向特性に関する試験体系

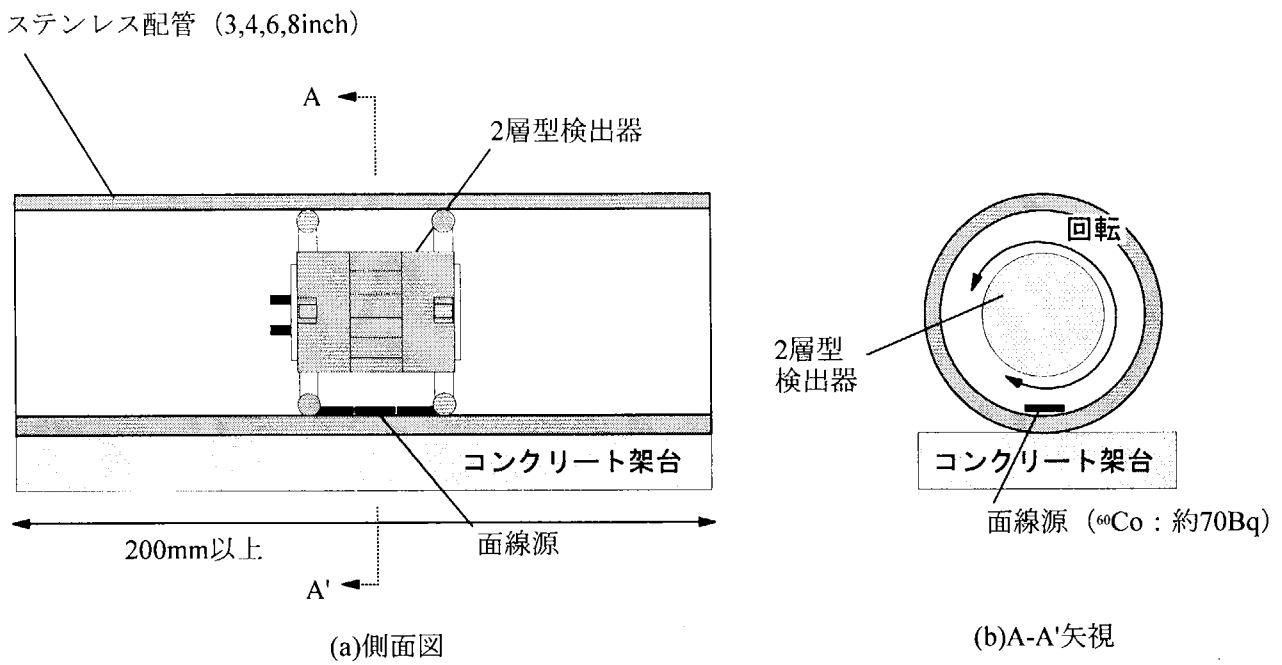


図15 円周方向特性に関する試験体系

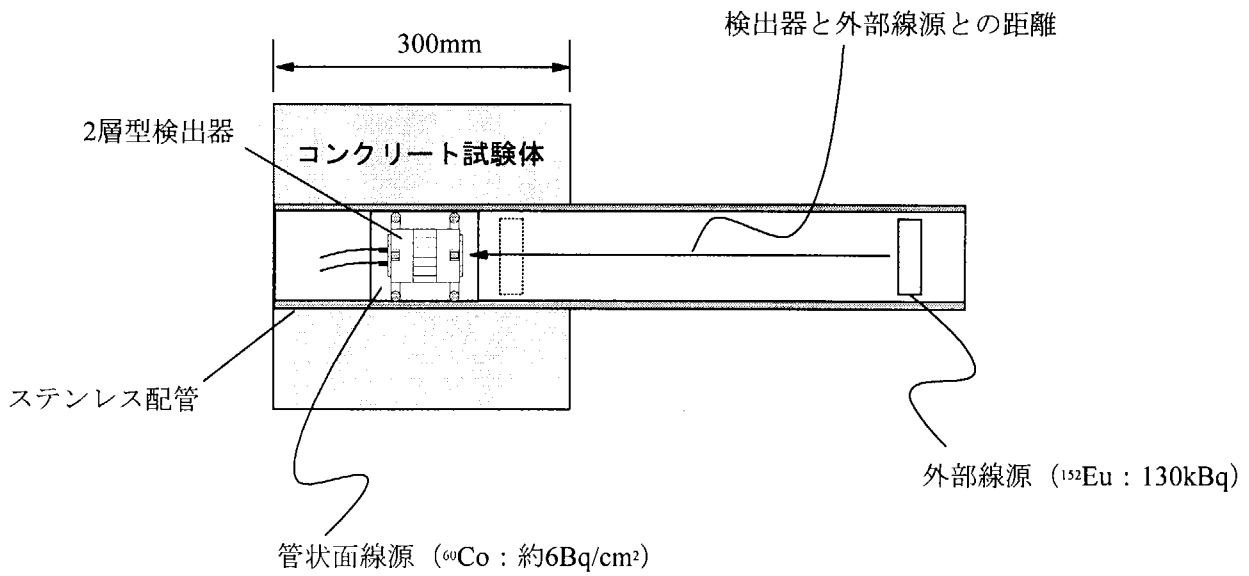


図16 外部線源の影響に関する試験体系

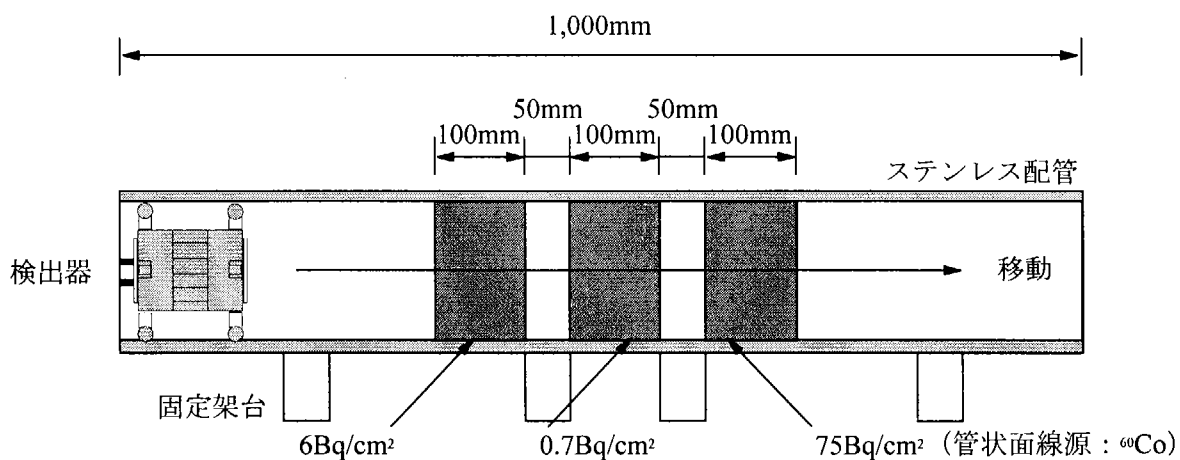


図17 位置分解能に関する試験体系

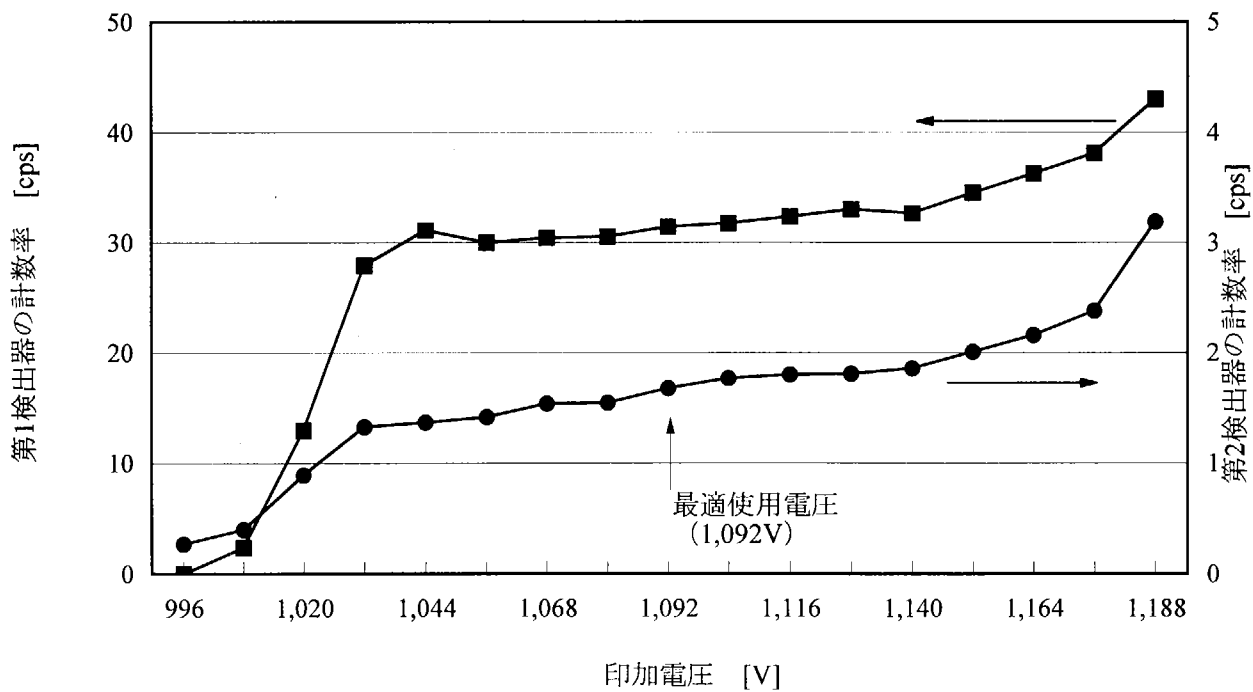


図18 2層型検出器のプラトー特性

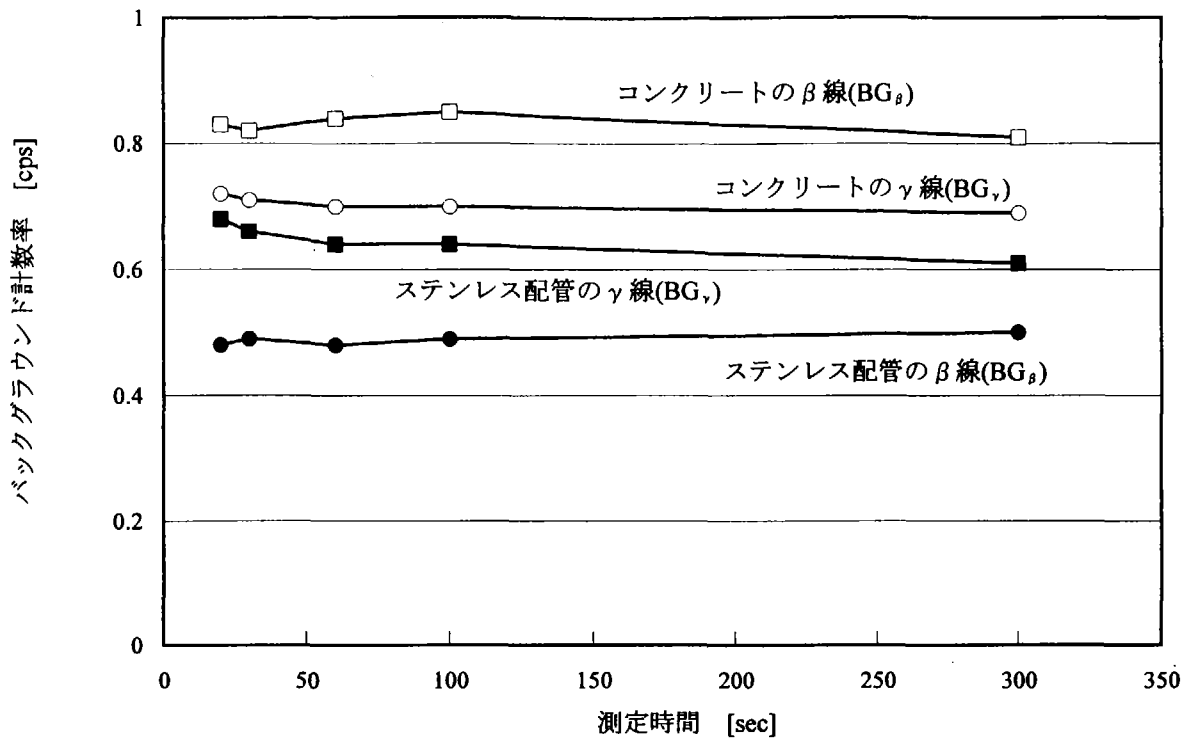


図19 2層型検出器のバックグラウンド検出特性

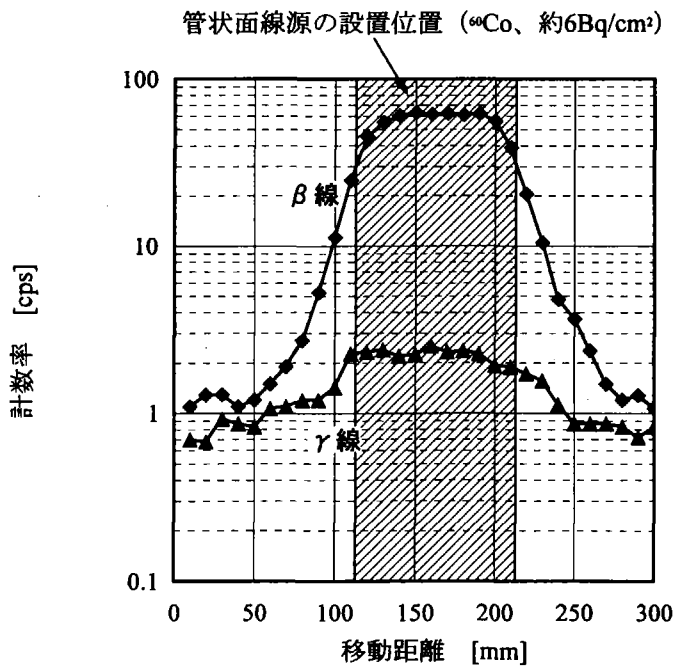


図20 2層型検出器の軸方向の検出特性

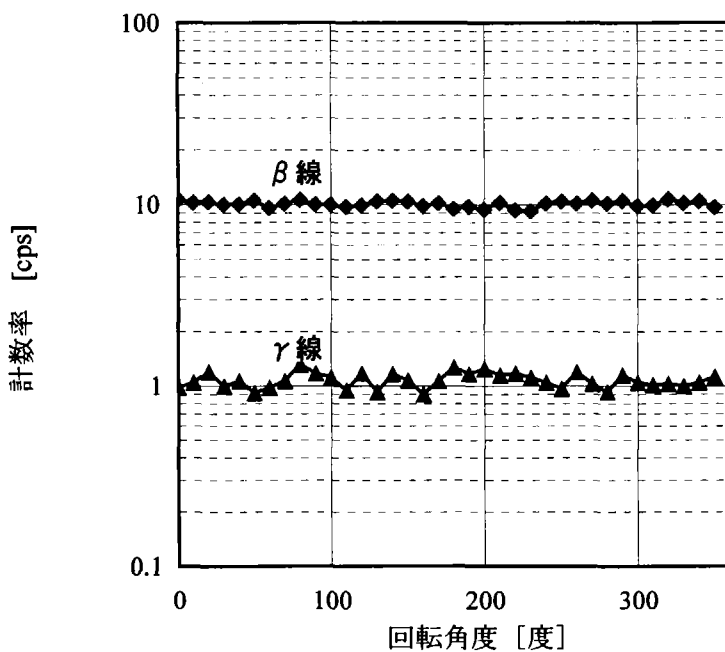


図21 2層型検出器の円周方向の検出特性

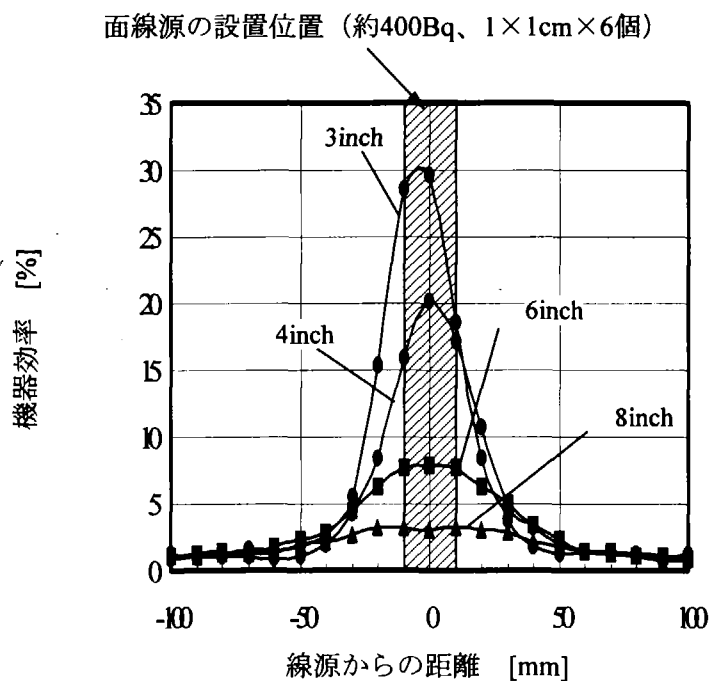


図22 線源からの距離に対する機器効率の評価結果

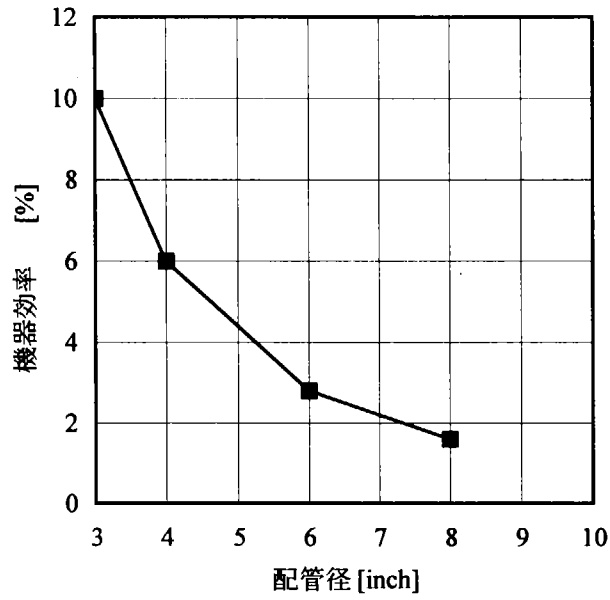


図23 配管内径に対する機器効率の評価結果

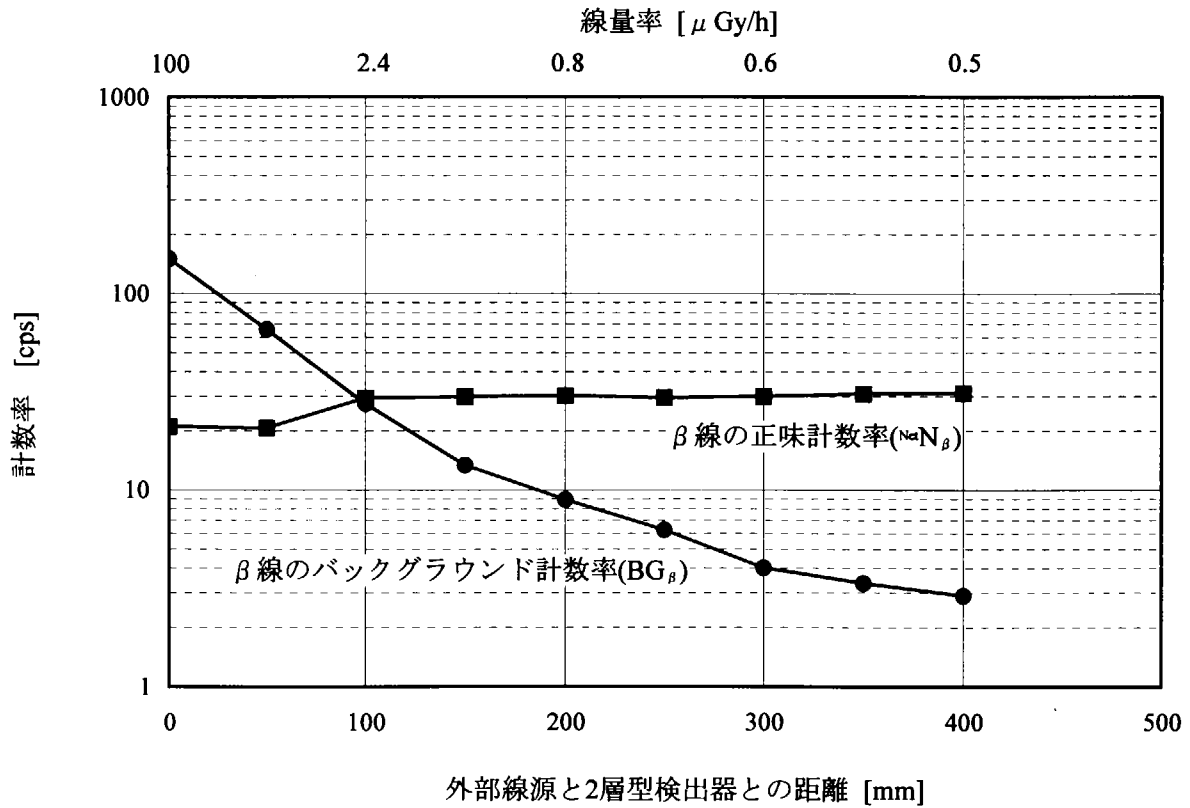


図24 外部線源の影響下における β 線計数率の測定結果

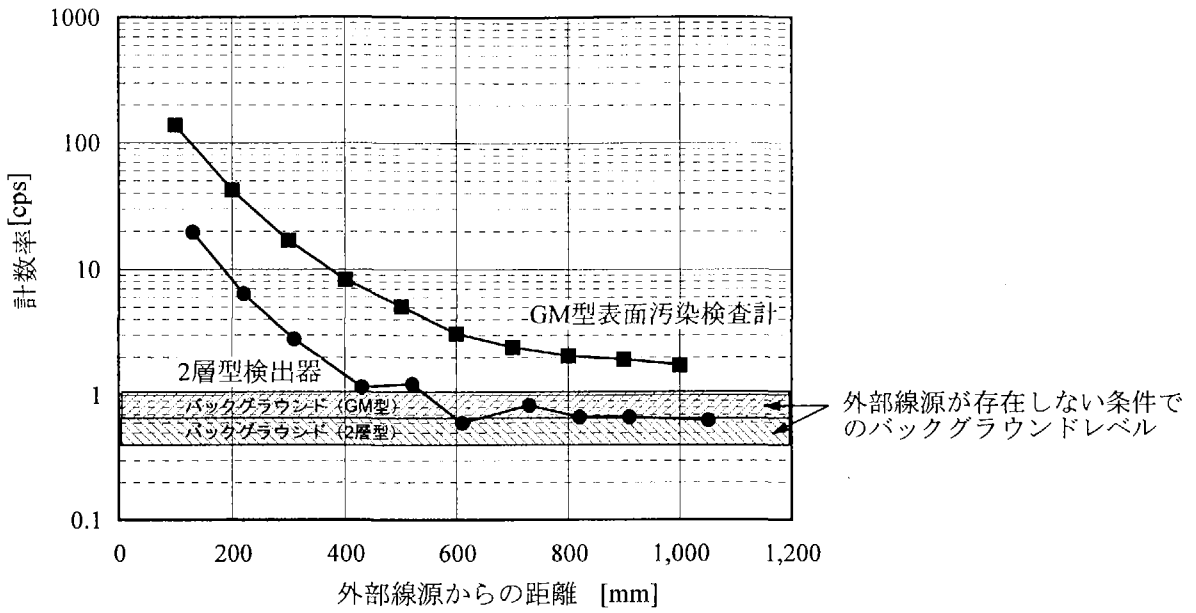


図25 2層型検出器とGM型表面汚染検査計の外部線源に対する計数率

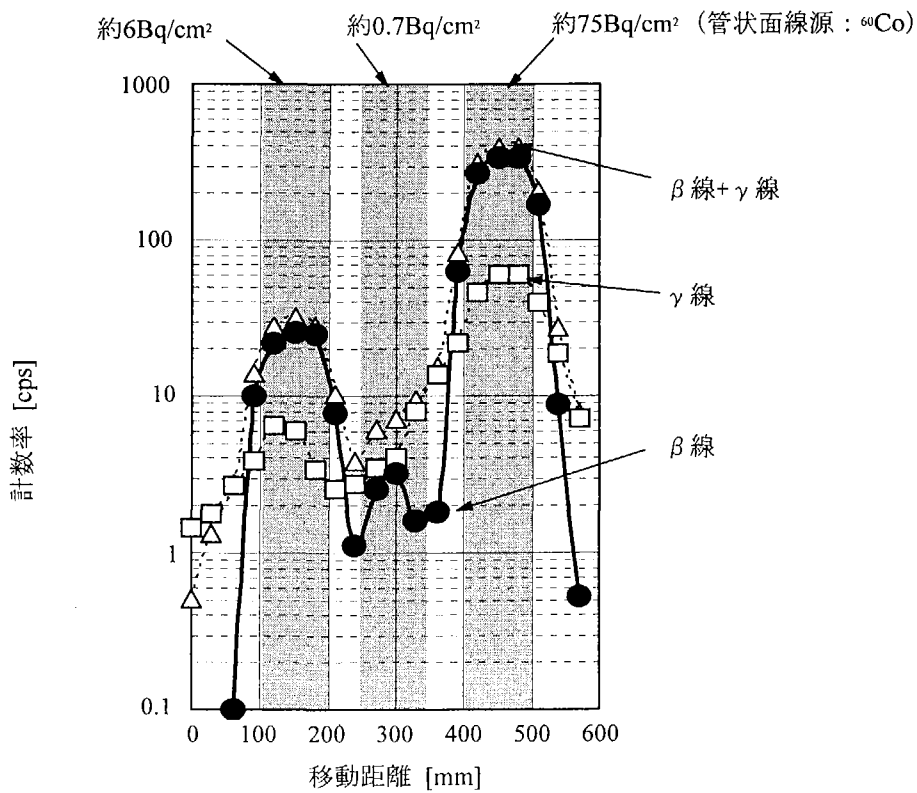


図26 汚染分布測定の結果

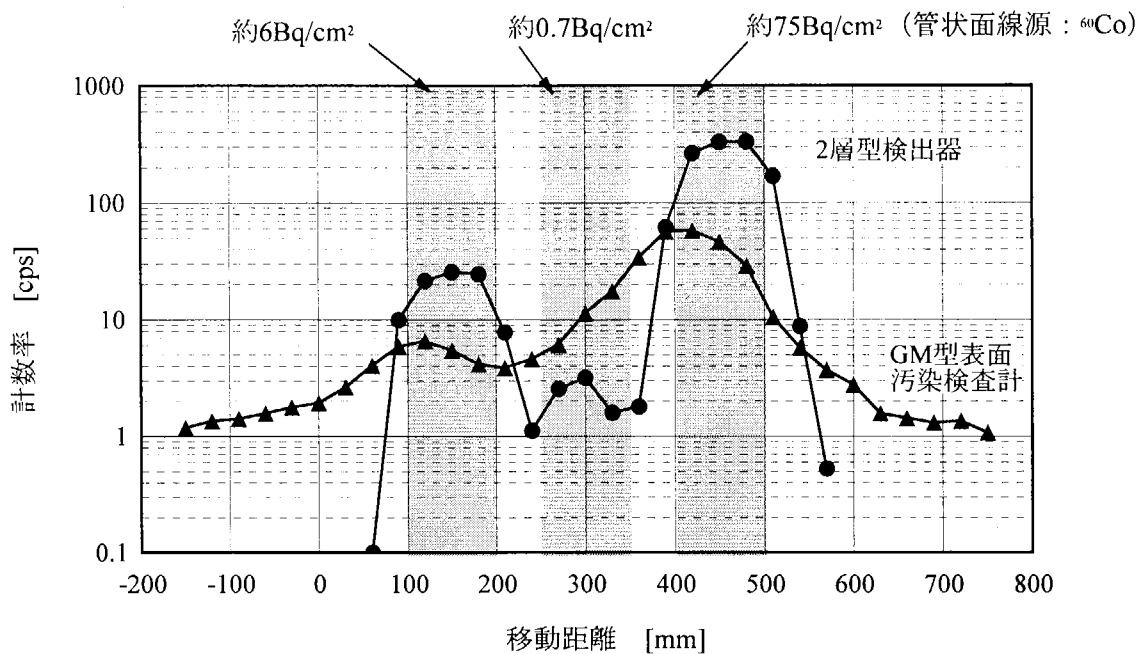
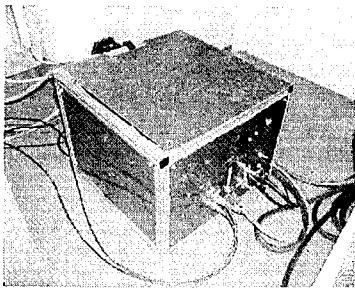
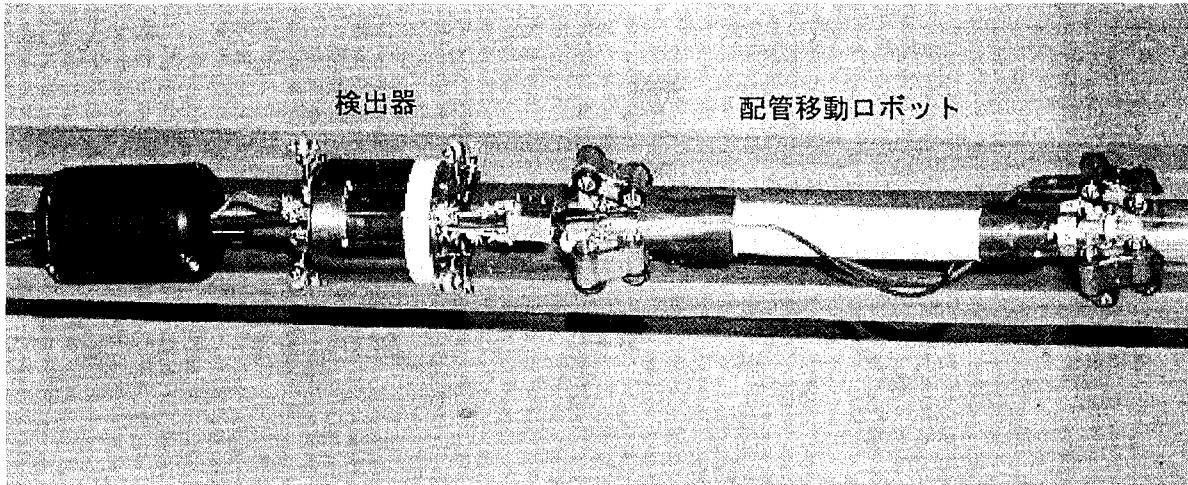
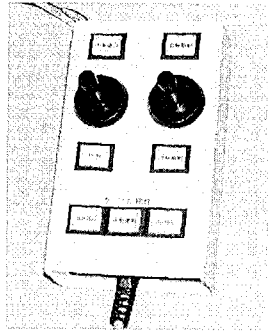


図27 2層型検出器とGM型表面汚染検査計による汚染分布測定結果の比較



ケーブル巻き取り装置



ジョイスティック
コントローラ



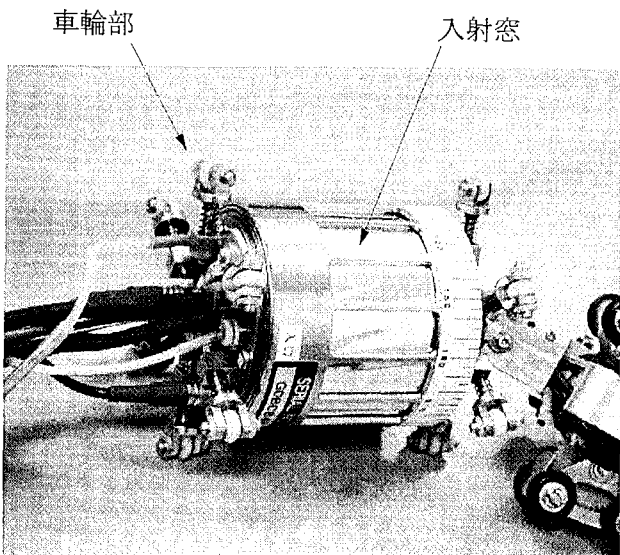
放射線カウンター

記録用ビデオ

観察用モニタ

制御用
コンピュータ

コントローラ



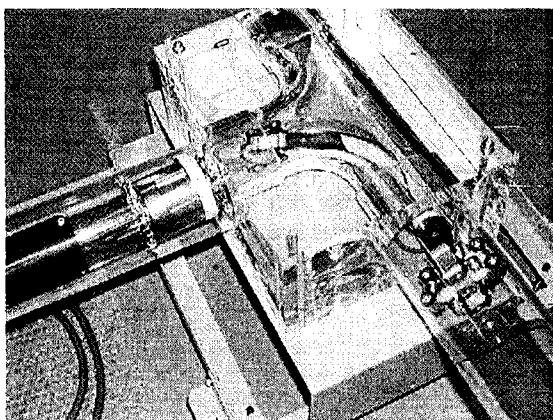
車輪部

入射窓

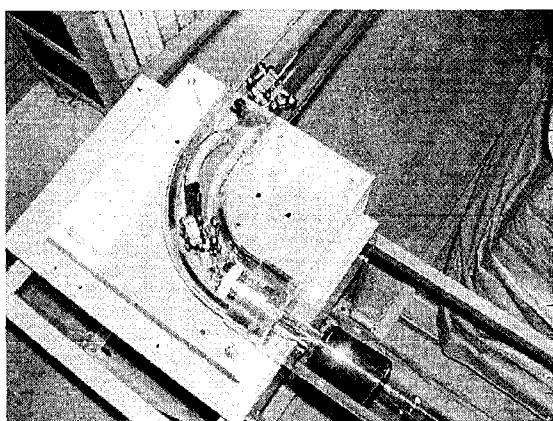
2層型検出器

制御装置

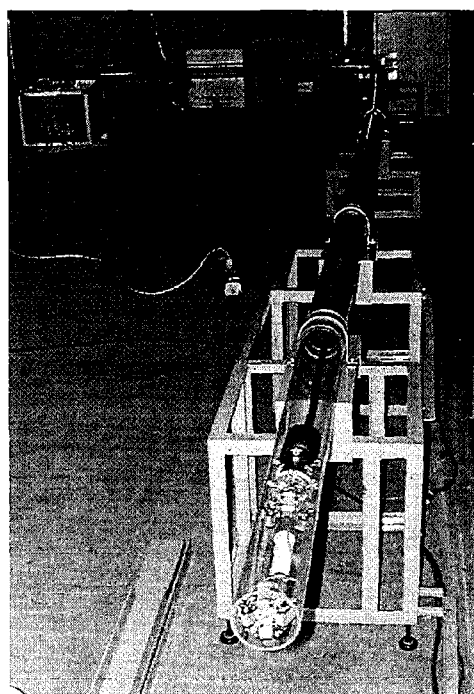
写真1 MISEの外観



T型管継ぎ手の走行



ショートエルボの走行



模擬配管の走行試験

写真2 走行試験用の模擬配管

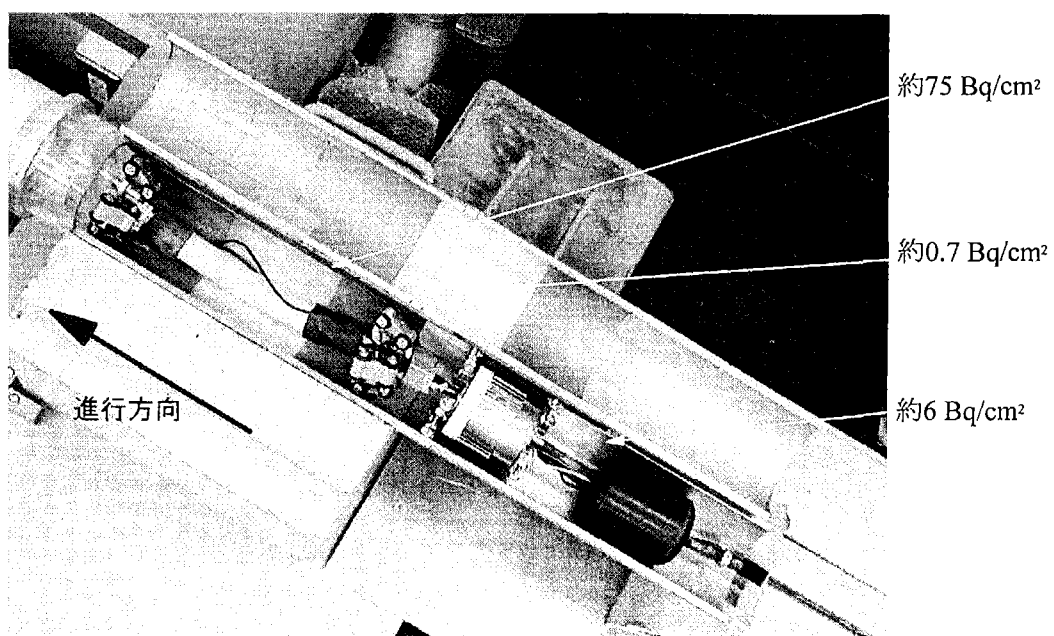


写真3 模擬配管における線源位置

付録1 検出限界値の基本式

β 線の検出限界計数率及び検出限界表面密度の求め方を各々式 (a) 及び (b) に示す。

1. β 線の検出限界計数率

β 線の検出限界計数率 N_n [cps]は、(a)式より求める。

$$N_n = (k/2) \times \{k/T_s + [(k/T_s)^2 + 4 \times BG_\beta \times (1/T_s + 1/T_b)]^{1/2}\} \quad \dots\dots\dots (a)$$

ただし、

T_s : 測定時間[sec]

T_b : バックグラウンドの測定時間[sec]

BG_β : 非汚染領域における β 線のバックグラウンド計数率[cps]

$k=3$: 固定値であり、標準偏差の3倍 (3σ) を示す。

2. β 線の検出限界表面密度

β 線の検出限界表面密度 N_d [Bq/cm²]は、(b)式より求める。なお、本測定では汚染核種を⁶⁰Coとして評価した。

$$N_d = N_n / (W \times \varepsilon_1 \times \varepsilon_2) \quad \dots\dots\dots (b)$$

ただし、

N_d : β 線の検出限界表面密度[Bq/cm²]

N_n : β 線の検出限界計数率[cps]

W : 検出面積[cm²]

ε_1 : 機器効率[%]

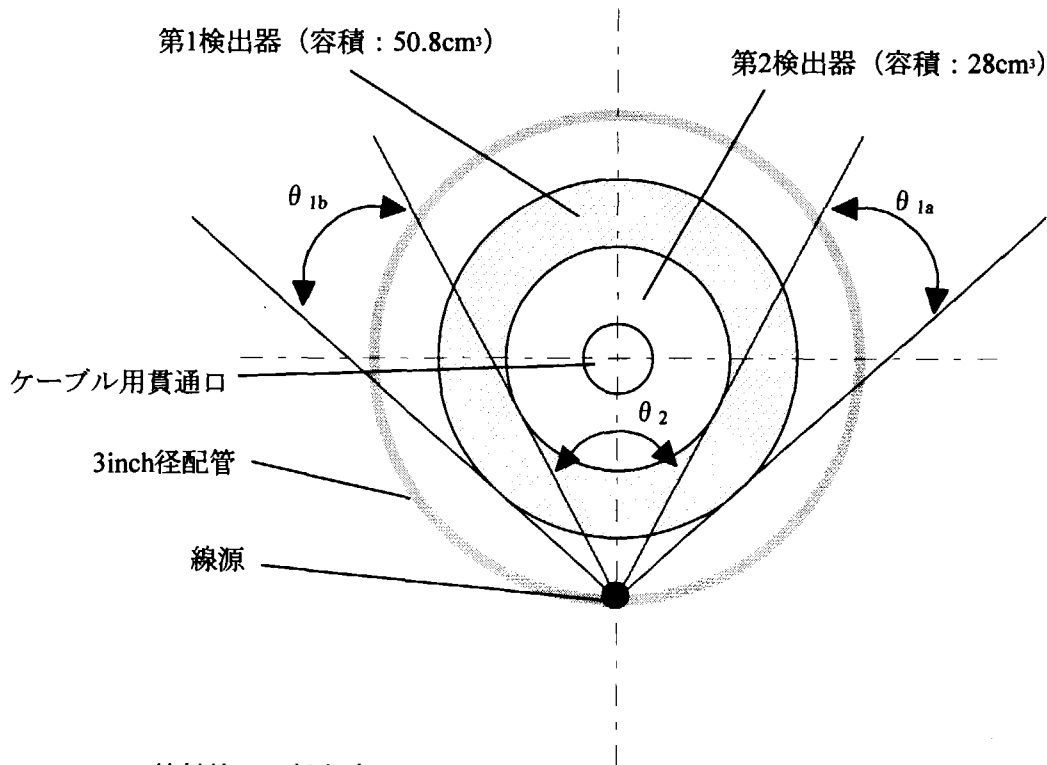
ε_2 : 線源効率 (0.25 : 初期設定デフォルト値)

付録2 計数率の補正方法

2層型検出器は、曲管部を含む3inch配管内部を移動でき、かつ配管内面の放射能を精度良く検出できるように、中空円筒にするとともに、円周方向に均一に測定できるように、第1及び第2検出器ともマルチアノードを採用した。一般的に、単純な構造の積層型検出器であれば、第1検出器と第2検出器の容積を等しくし、容易に両者の計数率を比較できる。しかし、本検出器は、複雑な形状であるため、正常に動作するための陽極線の空間を確保できる最大の容積を採れるように設計した場合でも、第1検出器の容積が約50cm³、第2検出器の容積が約28cm³となり、両者の容積比は1.8倍となった。

また、本検出器は、幾何学条件においても、補正が必要である。下図に示すように、線源から2π方向に放出される放射線のうち、第1及び第2検出器の両方に入射する放射線の角度θ₂は、約56度であり、この領域では2層型検出器が原理通りに動作する。これに対して、第1検出器に入射する放射線のうち、角度θ_{1a}及びθ_{1b}（約41度）の領域では、第1検出器のみに放射線が入射する。従って、第1検出器（β線とγ線）に入射する放射線の割合は、第2検出器（γ線）に比べて約1.7倍になる。

これらのことから、本検出器のγ線に対する計数率は、容積及び幾何学条件により、3.5倍程度の補正が必要である。



放射線の入射角度：

θ_{1a} + θ_{1b} = 40.6度：第1及び第2検出器に入射する放射線の角度

θ₂ = 55.8度：第1検出器にのみ入射する放射線の角度

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J

1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m

1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²

1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa

1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²

1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq

1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg

1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy

1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (=N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))
 動粘度 1 m²/s = 10⁶ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
 = 4.184 J (熱化学)
 = 4.1855 J (15 °C)
 = 4.1868 J (国際蒸気表)
 仕事率 1 PS (仏馬力)
 = 75 kgf·m/s
 = 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

配管内部汚染分布測定装置の開発（受託研究）