

JAERI-Tech
2000-056



JP0050821



建家表面汚染分布測定技術の開発
(受託研究)

2000年9月

畠山 睦夫・伊藤 博邦・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, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

建家表面汚染分布測定技術の開発
(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

畠山 睦夫⁺・伊藤 博邦・柳原 敏

(2000年8月4日受理)

原子力施設の廃止措置において、作業の最終段階で必要となる建家床面の放射能汚染を測定する移動型放射能測定装置を開発した。本装置による汚染分布の測定は、 ^{60}Co 等から放出される放射線のうち、 β 線のみを弁別して定量するものである。また、検出器は、10cm×10cm単位のプラスチックシンチレーション検出素子を12体集合した構成とし、局所的な汚染も検出できるよう考案した。本装置による性能試験の結果より、検出限界値は、60秒の測定時間で約 $0.1\text{Bq}/\text{cm}^2$ であり、埋設配管等からの外部放射線の影響の有無を把握できることが分かった。また、装置の測定能力は、測定モードにより異なるが、約 $4\sim 5\text{m}^2/\text{h}$ であり、手動による全面測定の数倍以上の測定作業効率が得られた。

本研究は、特別会計による科学技術庁からの受託研究（平成8年度～平成10年度）として実施したものである。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

+ 保安管理室

Development of Building Surfaces Contamination Measurement Technique
(Contract Research)

Mutsuo HATAKEYAMA⁺, Hirokuni ITOH, Satoshi YANAGIHARA

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

(Received August 4,2000)

The movable radioactivity measurement device was developed to evaluate a low-level radioactivity contamination distribution at the final stage of dismantling activities in decommissioning nuclear facilities. The detection system was designed to quantify only β - rays by separating from γ and β -rays emitted from ^{60}Co and others. The detector was structured in the form of collecting twelve unit plastic scintillation counters, to identify relatively small partial contaminations. It was found from the performance tests that the detection limit for Co-60 was about 0.1 Bq/cm² with 60 seconds of the measurement time, and that an external radiation such as from embedded pipes can be discriminated. The measurement device has capability to measure contamination distribution with 4-5m²/h in efficiency, which was three times faster than hands-on work using conventional detectors.

Keywords : Movable Radioactivity Measurement Device, Low-level Radioactivity Contamination Distribution, Decommissioning, β - rays, Detection Limit, Plastic Scintillation Counters

This study was contracted during 1997 through 1999 under contract with Science and Technology Agency of Japan.

+ Office of Operational Safety Administration

目 次

1.はじめに	1
2.低レベル放射能測定のおえ方	2
3.検出部	4
4.移動機構	5
4.1 移動機構の構成	5
4.2 移動位置の把握	6
4.3 データ処理装置	6
5.機能試験	7
5.1 試験体系	7
5.1.1 検出器の特性試験	8
5.1.2 装置の検出特性試験	8
5.1.3 装置の移動特性試験	9
5.2 試験結果	9
5.2.1 検出器の特性	9
5.2.2 装置の検出特性	10
5.2.3 装置の移動特性	11
6.考察	12
6.1 移動型放射能測定装置の評価	12
6.2 作業効率の検討	13
6.3 測定対象核種の検討	13
7.まとめ	14
謝 辞	15
参考文献	15
付録—I 検出器に関する基本要件	36
付録—II 移動機構の構成	37
付録—III 装置の運転パターン	38

Contents

1. Introduction	1
2. Methodology for Measurement of Low Level Radioactivity	2
3. Detector	4
4. Detector Transfer System	5
4.1 Structures	5
4.2 Self Positioning System	6
4.3 Data Processing Device	6
5. Performance Tests	7
5.1 Method	7
5.1.1 Detector Characterization Tests	8
5.1.2 Device Characterization Tests	8
5.1.3 Device Movement Characterization Tests	9
5.2 Results	9
5.2.1 Characteristics of the Detector	9
5.2.2 Characteristics of the Device	10
5.2.3 Moving Performance of the Device	11
6. Discussion	12
6.1 Movable Measurement Device	12
6.2 Measurement Efficiency	13
6.3 Target Nuclide	13
7. Conclusion	14
Acknowledgment	15
References	15
Appendix - I Requirement for Detector in Low Level Radioactivity Measurement	36
Appendix - II Structure of the Detector Transfer System	37
Appendix - III Operational Pattern of the Device	38

図、表及び写真のリスト

- 表 1 原子力発電施設に存在する主な汚染核種
- 図 1 遮へい板を用いた β 線と γ 線の弁別測定方法の概念
- 図 2 プラスチック型検出器の構造
- 図 3 集合検出器の構造
- 図 4 計測系のブロック図
- 図 5 移動機構部の計算機制御の概要
- 図 6 自己位置同定システムの構成
- 図 7 装置の位置及び姿勢の計測方法
- 図 8 デジタル標識
- 図 9 装置のデータ処理の概要
- 図 10 実測試験の体系
- 図 11 集合検出器の計数プラトー特性
- 図 12 コンクリート試験体の BG 計数率
- 図 13 核種毎の機器効率
- 図 14 集合検出器の感度分布
- 図 15 集合検出器の面線源に対する計数率
- 図 16 集合検出器を用いた面線源に対する計数率
- 図 17 外部線源による β 線計数率の影響
- 図 18 管理区域の放射能面密度の測定結果
- 図 19 外部線源存在下における実測データ (1)
- 図 20 外部線源存在下における実測データ (2)
- 図 21 外部線源存在下における実測データ (3)
- 図 22 外部線源存在下における実測データ (4)
- 図 23 外部線源存在下における実測データ (5)
- 図 24 平坦な床面に対する移動誤差
- 図 25 傾斜面に対する移動誤差 (床ドレンカップ周辺)
- 図 26 自律測定 of 動作時間の例
- 写真 1 集合検出器 (検出面)
- 写真 2 デジタル標識の外観
- 写真 3 自己位置同定システムを搭載した移動型放射能測定装置
- 写真 4 自動測定の様子

Table, Figures and Photos Captions

- Table 1 Main Nuclide in Nuclear Power Plant
- Figure 1 Concept of Measuring Low Level Radioactivity by Separating β and γ -rays
- Figure 2 Structure of Plastic Scintillation Detector
- Figure 3 Structure of Multiple Detector
- Figure 4 Block Diagram of Measurement System
- Figure 5 Outline of Computer Control in Detector Transfer System
- Figure 6 Position Identification System
- Figure 7 Principle of Position Identification System
- Figure 8 Digital Marker
- Figure 9 Outline of Data Processing in the Device
- Figure 10 Method of Measurement Tests
- Figure 11 Counting Plateau of Multiple Detectors
- Figure 12 Background Counting Rate for Concrete Block
- Figure 13 Efficiency in Detecting Nuclides
- Figure 14 Sensitivity Distribution of Multiple Detectors
- Figure 15 Counting Rate of Multiple Detectors
- Figure 16 β -rays Counting Rate in Difference Position of Plate Source
- Figure 17 Effect of External Source to β -rays Counting Rate
- Figure 18 Measurement of Radioactivity Density in Controlled Area
- Figure 19 Measurement of Radioactivity in Controlled Area Under External Source (1)
- Figure 20 Measurement of Radioactivity in Controlled Area Under External Source (2)
- Figure 21 Measurement of Radioactivity in Controlled Area Under External Source (3)
- Figure 22 Measurement of Radioactivity in Controlled Area Under External Source (4)
- Figure 23 Measurement of Radioactivity in Controlled Area Under External Source (5)
- Figure 24 Movement Error for Smooth Floor
- Figure 25 Movement Error for Rough Floor
- Figure 26 Operation Time of Automatic Measurement
- Photo 1 Multiple Detectors (Entrance Window)
- Photo 2 Digital Marker
- Photo 3 Detector Transfer System
- Photo 4 Appearance of Automatic Measurement Device

1. はじめに

原子力施設を廃止措置して、跡地を別目的に使用する場合には、施設内の機器等を撤去し、その作業の最終段階で、建家を解体撤去することになる。この場合、機器等を取り除いた後に建家表面の放射能汚染を除去し、施設に放射能汚染のないことを確認するための測定（確認測定）が必要になる。我が国では、確認測定の実施やその手順が必ずしも決められている訳ではないが、一般的には、管理区域内の床、壁及び天井の全面にわたって有意な汚染の無いことを確認しておくべきであり、既存の表面汚染計を用いた直接測定では、施設の規模にもよるが、多くの労力と期間がかかることが予想される。

日本原子力研究所（原研）の動力試験炉（JPDR：Japan Power Demonstration Reactor）の解体作業（解体実地試験）は、昭和 61 年から始められ平成 8 年 3 月までにすべての機器・構造物の撤去作業を終了したが¹⁾、解体実地試験においても、建家内の機器を撤去して建家表面を除染した後、建家の全表面を対象とした放射能の測定が行われた。この確認測定の作業では、約 23,800m²の測定面積に対して、延べ 4,800 人の作業員と約 240 日の期間を要した²⁾。これらの殆どが表面汚染計を用いた直接測定によるものであったが、コンクリート中に埋設された配管等からの放射線の影響や測定場所によって自然計数率が安定しないことなどにより建家表面の汚染の有無を判別できない場合があった。このような場合には、当該測定部位から試料を採取して放射能を測定するなどの方法により汚染の有無を確認することが必要であったため、さらに多くの労力と期間を要する結果となった。

原子力施設の廃止措置における低レベル放射能汚染の測定に関しては、我が国では原子力発電機構等でその開発が進められているし³⁾、また、米国では ANL（Argonne National Laboratory）で可動型の測定装置 MAX や SRA（Surface contamination monitor）の開発が行われている⁴⁾。しかし、これらは必ずしも実用レベルに達しているものではない。

そこで、原研では、解体実地試験の知見に基づいて、解体技術の高度化計画⁵⁾の中で、低レベル放射能の測定に関する技術開発を進めた。本技術開発では、埋設配管等からの比較的レベルの低い外部放射線が存在する環境において、建家表面の低レベル放射能汚染分布を効率的に直接測定できる移動型放射能測定装置を開発した。特に、測定に必要な開発項目として、労力の削減、データ処理の迅速性、測定の効率化を図ることとし、バッテリーを搭載して一定時間連続して計画した測定対象領域を自律走行するための移動機構、低レベル放射能汚染分布を高感度で測定できる検出器、測定データを計数率や放射能面密度等に連続的に処理するためのデータ処理装置に関して、各々要素技術の開発を行い、それらの統合を図った。検出器に関しては、従来型の表面密度の測定法に改良を加え、計測した放射線からβ線を弁別するため、β線とγ線を測定した後、さらにβ線遮へい板を用いてγ線のみを測定し、双方の差からβ線を定量する方法を考案した。この測定方法により、外部放射線による影響の有無や低レベルの放射能汚染を効率的に測定することが可能となった。

本報告書は、建家表面の汚染分布測定を自動測定するための、測定の基本的考え方、検出器、移動機構部、走行制御方法、測定データの処理、これらを統合した移動型放射能測定装置の性能についてまとめたものである。

2. 低レベル放射能測定の実考

我が国では、放射性と放射性でない廃棄物を区分するための基準値（クリアランスレベル）が確立されていないため、管理区域を解除する場合は、汚染核種が存在しないことを証明する上で、極めて低いレベルの放射能汚染まで測定することが要求されることになる。

建家表面の汚染分布を測定する場合、汚染核種による計数率（β線及びγ線）に⁴⁰K等を主体とするコンクリート中のバックグラウンド（以下「BG」という。）計数率（β線及びγ線）が加算された値として、測定計数率が求められる。求めようとする汚染計数率が小さい場合には、BG計数率が大きいと、汚染による計数率がBG計数率の変動内に含まれてしまう可能性があるため、真の汚染計数率を求めることが困難となる。

運転を停止した原子炉施設の汚染は、腐食生成物や核分裂生成物が付着したものであり、β線とγ線を放出する⁶⁰Co、¹³⁷Csが最も代表的な核種である。これらの核種から放出されるγ線を測定しようとする場合には、その透過力が大きいことや、BG計数率の大部分が環境中の放射性核種からのγ線によること等の理由から、コリメータを具備した検出器を用いて測定しない限り放射能汚染分布を正確に評価することが困難である。他方、β線を測定する場合には、そのエネルギーにも依存するが、一般的には飛程が極めて小さいため、外部のβ線を計測する可能性が小さく、測定対象の位置情報を正確に把握することができ、さらに、β線によるBG計数率は極めて低いため、低いレベルの汚染まで測定できる可能性がある。しかし、β線に高感度な検出器は存在するものの、一般的にはγ線を完全に遮断して、β線のみを測定することは困難である。これに対して、β線の飛程が小さいことを利用すれば、γ線のみを測定する検出器を製作することは容易である。例えば、測定対象部位から放出されるγ線とβ線を同時に測定し、続いてγ線のみを測定し、前者から後者を差し引くことにより、β線のみを計数率を得ることが可能である。このβ線計数率には測定対象面を除く環境からのβ線によるBGが含まれていないので、対象とする部位のみの汚染量を知ることができる。このような観点から、測定対象面から放出されるβ線とγ線、測定対象面以外から放出されるγ線を簡便に弁別し、測定対象面からのβ線を定量して放射能汚染分布を測定する方法を考案した。

測定手法

β線を遮断してγ線のみを計測するために、遮へい板を用いることとした。図1に測定の実考を示す。検出器の前面にβ線を遮断する遮へい板を設け、これを閉じた状態と開いた状態の2回の測定を行うことによってβ線のみを計数率を求める。この測定方法は、測定面及び測定環境のγ線や埋設配管等からの放射線による影響を排除できるため、低レベルのβ線による放射能汚染分布を正確に評価できる特徴がある。すなわち、ある測定面のβ線の計数率は、以下の式により定量することができる。

$$N(\beta) = N(\beta + \gamma) - N(\gamma) \quad \cdots(1)$$

$$BG(\beta) = BG(\beta + \gamma) - BG(\gamma) \quad \cdots(2)$$

$${}^{Net}N(\beta) = N(\beta) - BG(\beta) \quad \cdots(3)$$

ここで、

- $N(\beta+\gamma)$: 測定面における β 線と γ 線の計数率(測定面以外からの放射線を含む)
 $N(\gamma)$: 測定面における γ 線の計数率(測定面以外からの放射線を含む)
 $N(\beta)$: 測定面における β 線の計数率
 $BG(\beta+\gamma)$: β 線と γ 線によるBG計数率
 $BG(\gamma)$: γ 線によるBG計数率
 $BG(\beta)$: β 線によるBG計数率
 ${}^{*}N(\beta)$: 測定面における汚染核種からの β 線の計数率
- } 非汚染領域における計数率

対象核種

原子力発電所において、施設の解体作業が終了し、建家表面の放射能測定を必要とする時期において構造物の表面に存在して有意なレベルにある核種としては、 ${}^{55}\text{Fe}$ 、 ${}^{60}\text{Co}$ 、 ${}^{63}\text{Ni}$ 、 ${}^{90}\text{Sr}$ 、 ${}^{90}\text{Y}$ 、 ${}^{134}\text{Cs}$ 、 ${}^{137}\text{Cs}$ が考えられる⁶⁾。このうち、 β 線を放出する核種は、 ${}^{63}\text{Ni}$ 、 ${}^{60}\text{Co}$ 、 ${}^{90}\text{Sr}$ 、 ${}^{90}\text{Y}$ 、 ${}^{137}\text{Cs}$ であるが、 β 線の計数効率を良くするためには、上述したグループの中から適当な核種を選択して、その特性と合致する計測システムを設計する必要がある。JPDRの解体実地試験においては、大部分の汚染が ${}^{60}\text{Co}$ によるものであったため、 ${}^{60}\text{Co}$ (β 線最大エネルギー：318keV)を対象として、装置の開発を進めた。

検出限界表面密度

検出器の検出限界表面密度は、次式により求められる。

$$Nd = K/2 [K/Ts + \{(K/Ts)^2 + 4Nb(1/Ts + 1/Tb)\}^{1/2}] \quad \cdots(4)$$

ここで、

- Nd : 検出限界計数率(cps)
 Ts : 測定時間(秒)
 Tb : 自然計数率の測定時間(秒)
 Nb : 自然計数率(cps)
 K : 3(検出限界計数率を自然計数率の標準偏差の3倍に相当する値と定義するため)

また、上式で得られた検出限界計数率から検出限界表面密度に換算するときは次式を用いる。

$$Ad = Nd / (\epsilon_i \times W \times \epsilon_s) \quad \cdots(5)$$

ここで、

- Ad : 検出限界表面密度(Bq/cm²)
 ϵ_i : 機器効率(%)
 ϵ_s : 線源効率(%)
 W : 検出窓面積(cm²)

上式から、検出限界表面密度を低くするには、検出限界計数率を低くすること、機器効率、検出窓面積を大きくすることが必要である。また、式(4)より、検出限界計数率を低くするには、

測定時間を長くする必要があるが、作業の効率を考えると、測定時間を長くすることは有効ではない。また、検出窓面積を広くすることもスポット状の汚染を精度良く測定する観点から有効ではない。したがって、検出限界表面密度を低くするためには、機器効率を上げることが最も有効な方法であることが分かる。

3. 検出部

図2に単体検出器の内部構造を示す。検出器の検出素子には、薄型プラスチックシンチレータを採用した。このプラスチックシンチレータ検出素子の型式は、NE102A (Nuclear Enterprises 社製) であり、厚さを 0.80mm (密度は、1.0mg/cm²) とした。検出窓面積は、局所的な汚染分布も検出できるよう 100cm² (縦 10cm × 横 10cm) とし、アルミニウム蒸着マイラーでカバーした。また、S/N 比の改善のために、光電子増倍管 2 本による同時計数方式とし、軽量化のためにライトガイドを省いた。

本装置の検出部は、広い面積を効率的に測定するため、上述した単体検出器を 3 × 4 の形に集合させた構造とした (図3参照)。集合検出器の外寸法は縦約 45cm × 横約 35cm、重量は約 25kg である。集合検出器の外観を写真1に示す。

他方、前章で示した原理に基づいて、β線 + γ線とγ線を独立した2回の測定により計測することが可能となるように、β線遮へい板の開閉機構を検出部に取り付けた。また、検出器を障害物による損傷から防止するため、走行時には一定の高さに保持し、測定時には検出感度を上げるため測定対象面から 2cm の位置に下降して測定を行う構造とした。このため、集合検出器を検出部の上下移動機構、β線遮へい板の開閉機構とともに突起物検知センサ付検出枠に収納した。検出枠の外寸法は、幅 51cm、長さ 41cm、高さ 40cm であり、この内部に幅 32cm、長さ 43cm、高さ 25cm の集合型検出器を収納した。検出部の上下移動機構の構造は、検出部を 1 本のラック軸で吊り、このラック軸をピニオン歯車で上下する (ラックピニオン) 方式とし、検出器上下移動時の振れを防止するための昇降ガイドレールを設けた。β線遮へい板には、縦 37cm、横 53cm、厚さ 1mm のアルミニウム板を用い、検出面より一回り大きくした。また、検出器は、移動時や段差乗り越え時の振動等、外部からの衝撃に弱いため、検出器への振動伝搬を防止するため、検出器と検出部との取り付け部には防振材を施した。さらに、検出面の破損を防止するためにβ線遮へい板開閉機構と測定対象面の間に存在する突起物を検出するためのセンサを配置した。

計測系のブロック図を図4に示す。計測回路系は、プリアンプ、高圧電源、同時計数回路を一体化したモジュールを集合ユニットとして検出枠に取り付け、プリアンプ、同時計数回路及び高圧電源に供給する電源には、ノイズの混入防止のため専用の低圧電源モジュールを用いた。測定データは、装置に搭載した計算機に保存するとともに、計算機により放射能面密度等を計算し、汚染の有無を移動機構部上面のパネルに表示できるようにした。また、検出部の上面に高電圧モニタチェック、グラウンドチェック及び信号チェック用の端子を設け、移動機構部から検出部を切り離すことなしに、検出器の健全性を確認できるようにした。

4. 移動機構

4.1 移動機構の構成

移動機構は、前述の検出部を搭載して自律走行するための装置である。内部には、検出部の他、統括用計算機、走行制御用計算機、センサー及びバッテリー等が搭載されている。本体の外寸法は幅 80cm、長さ 110cm、高さ 80cm で、その重量は約 290kg である。主要装備を以下に示す。

駆動系

駆動輪には、本体フレームの 4 隅に 4 輪独立駆動型の車輪ユニットを配置し、駆動方式は、オフセット駆動輪による全方向移動方式とした。車輪径は、約 20mm の段差が乗り越えられるよう 130mm とした。走行速度は、測定時には 100mm/sec、通常走行時の最高速度は 500mm/sec とした。また、50Ah で 12V の密閉型鉛蓄電池（外形寸法：260mm × 173mm × 224mm）を 2 個搭載し、1 回の充電で約 10m² を自動測定できるようにした。

操作パネル

装置の運転は、手動走行か自動走行のいずれかを選択できるものとした。手動走行については、ジョイスティック付きワイヤー式操作ペンダントを用いた。自動走行については、測定条件（時間、座標、縦横方向のピッチ等）及び BG 計数率等を計算機で入力した上で、設定した領域を自動で測定できるようにした。また、操作スイッチは、操作性を考慮して本体上面に配置した。本体上面には、電源、測定モードの選択、スタート、一時停止等の移動機構の動作に関するスイッチ及び検出部の上下移動、β線遮へい板の開閉機構等に関するスイッチを配備するとともに、表示機能として、現在位置、測定総数等の表示を行う 7 桁表示器、検出器の動作状態を示す表示灯、バッテリー電圧計、障害物検知の表示灯類を装備した。

センサー

移動機構の上部には、デジタル標識パターンによる測定器位置の把握と補正のための CCD カメラを取り付けた。また、障害物対策として衝突検知用のバンパ型センサーを本体の全側面部に配置し、検出面の保護のために、β線遮へい板に突起物センサーを装備した。

制御系

図 5 に移動機構内部の計算機による制御の概要を示す。制御系は、装置全体を制御する統括用計算機 (MPU-1)、移動型放射能測定装置の走行及び操舵を制御する走行制御用計算機 (MPU-3)、測定データの保存及び処理を行う測定用計算機 (MPU-2) 及び各々の制御プログラムにより構成した。

装置の基本的な運転パターンは、BG 測定、手動測定、自動測定とし、測定に関するパラメータの設定及び結果の読み出しは、現場側データ処理装置（ノート型 PC）を移動機構部に接続して行うものとした。また、緊急時の安全性を考慮し、障害物や検出器の異常を検知した場合には、移動機構を非常停止させる機能を設けた。

4.2 移動位置の把握

自動走行による運転パターンでは、測定対象領域を計画した移動経路に沿って、移動型放射能測定装置が一定時間連続的に自律走行する。計画した移動経路に沿った自律走行を実施するためには、自己位置の把握と補正が必要であるため、自己位置同定システムには、デジタル標識パターン方式を採用した⁷⁾。

自己位置同定システムの構成を図 6 に示す。本システムは、画像を取込む CCD カメラ、カメラの方向を変える雲台、可動雲台の制御系、画像信号の処理及び位置同定のための画像処理装置で構成した。画像処理装置は、CCD カメラで捕らえた映像中のデジタル標識（グレイコード）を認識し、その中心及び放射状に配置されたパターンを割り出し、かつ水平マーカとデジタル標識との仰角を読み取る。また、カメラ雲台は、水平旋回軸と垂直旋回軸を有しており、CCD カメラを標識の方向に向けるとともに、その時のカメラの仰角、水平旋回角を出力する。

本システムは、認識したデジタル標識の処理結果を基に、標識からの距離と装置の方向角を決定することにより、装置の位置を同定する。図 7 に移動型放射能測定装置の位置と姿勢の計測方法を示す。本図の a に示すように、測定点に移動した直後に、装置に搭載した CCD カメラでデジタル標識を撮影し、標識を映像の中心で捕らえた時のカメラの仰角(ϕ)を求める。このカメラの仰角と標識の高さ(H)から装置と標識との距離(L)を求める。次に、デジタル標識(写真 2)の装置に一番近いところにある放射状パターンを、読み取ることによって、図 7 の b に示すように、装置の方向角(θ)を求める。このようにして、以下の式(6)、(7)により、標識の位置(X_m 、 Y_m)、車両と標識の距離(L)、車両の方向角(θ)を用いて、基準座標系での車両の位置(X_v 、 Y_v)を求めることができる。

$$X_v = X_m - L \cos \theta \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$Y_v = Y_m - L \sin \theta \quad \dots\dots\dots (7)$$

また、カメラの水平旋回角(θ_c)と車両の方向角(θ)から基準座標系での車両の姿勢(θ_v)を次式により求める。

$$\theta_v = \theta - \theta_c \quad \dots\dots\dots (8)$$

以上のように、式(6)、(7)によって、移動型放射能測定装置の座標を、式(8)によって姿勢を認識し測定位置の補正を行う。なお、デジタル標識には、360 度異なった放射状のパターンを持つ直径 80cm のグレイコードを、また、水平方向の認識用には、白黒 2 色の水平マーカを採用した。(図 8 参照)

4.3 データ処理装置

データ処理装置は、移動機構内部に搭載した統括用計算機、走行制御計算機、測定用計算機と外付けの現場側データ処理装置で構成した。それぞれの主な機能を以下に記す。

統括用計算機：運転管理、現場側データ処理装置との通信、位置の検出等を行い、走行制御用計算機及び測定制御用計算機に動作司令を送る。

走行制御用計算機：走行、操舵、バンパ型センサーの検知及びジョイスティック制御等を行う。

測定用計算機：測定データの保存及び処理を行う。

統括用計算機は、走行制御用計算機に対し、移動型放射能測定装置の移動する方向及び角度の指令を送る。走行制御用計算機は、この指令に従い移動型放射能測定装置を移動させる。移動後、統括用計算機は、位置の検出を行い、予め設定された計画値と一致していない場合は、補正の動作指令を再び走行制御用計算機に送る。位置が確定した場合、統括用計算機は測定用計算機に測定の指令を送る。測定用計算機は、この指令に従い、測定を開始するとともに、そのデータを用いて正味計数率等の計算処理、装置上面パネルへの表示及びデータの保存等を行う。また、測定データは、現場側データ処理装置（ノート型 PC）からの転送要求を受けた場合のみ、統括計算機から現場側データ処理装置に転送される。現場側データ処理装置に転送されたデータは、 β 線 + γ 線、 γ 線、 β 線の各々の正味計数率、放射能面密度、検出限界値等に分類され、測定位置とともに出力される。なお、現場側データ処理装置から出力されるデータは、CSV 形式（カンマで区切られたテキスト形式）とし、汎用表計算ソフトウェアで容易に取り扱えるものとした。

現場側データ処理装置には、測定データを効率良く処理するためにデータ処理プログラムを格納した。本プログラムは、データの処理、測定経路計画の作成、測定パラメータの設定、測定データの保存、出力、放射能面密度の計算等の機能を有する。また、測定パラメータの入力及び移動機構への送信については、データ処理プログラムのメインメニューから各項目を選択して行うものとした。選択項目は、測定パラメータ設定、自動測定モード設定・送信、手動測定モード設定・送信、測定結果出力・設定に関する数値形式表示、通信環境設定で構成した。装置の全体構成を図 9 に示す。また、自律走行に必要な自己位置同定システムを搭載した移動型放射能測定装置の外観を写真 3 に示す。

5. 機能試験

5.1 試験体系

開発した装置の性能を把握するために機能試験を行った。本試験は、検出器の特性試験、装置の検出特性試験、装置の移動特性試験に分類される。このうち、検出器の特性試験には、表面汚染を模擬するため、縦 50cm、横 50cm、厚さ 10cm のコンクリート試験体を用いた。この中央部に縦 10cm × 横 10cm の基準面線源 (^{14}C 、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{36}Cl 、 ^{40}K) を各々設置した。次に、検出器を測定距離 2cm の高さにセットし、各試験を実施した。また、装置の検出特性試験及び移動特性試験では、検出器を移動機構に搭載した場合の検出特性及びデジタル標識を用いた移動位置の把握と補正に関する試験を行った。試験の内容と方法について以下に記す。

5.1.1 検出器の特性試験

開発した検出器単体（又は、集合検出器）を用いて、計数プラトー特性、BG 計数率、機器効率、感度分布、検出特性、外部線源の影響に関する測定試験を以下のように実施した。

計数プラトー特性

基準面線源毎に印加電圧を変えて計数値を測定し、印加電圧と計数率との関係を求めた。

BG 計数率

線源の無い状態で計数プラトー特性と同様の試験を行った。

機器効率

計数プラトー特性の試験結果から得られた最適使用電圧において、基準面線源毎に計数を測定し、検出器の機器効率を求めた。

感度分布

1つの検出面（縦 10cm × 横 10cm 角）を 25 分割し、各区画毎に線源（12Bq（4cm²））を置いてその計数率を求めた。測定時間は 300 秒とした。

集合検出器の検出特性

約 40Bq の β 線強度を持つ縦 10cm × 横 10cm の ⁶⁰Co 基準面線源を特定検出器の真下に設置し、隣接する検出器の β 線計数率を求めた。また、線源を移動し、検出器毎の計数を測定し、計数率の変化を調べた。

外部線源の影響

特定検出器の真下に面線源（放射能強度：約 70Bq、核種：⁶⁰Co、形状：10cm × 10cm）を置き、次に、点線源（放射能強度：約 200kBq、核種：⁶⁰Co）をその検出器の入射窓側面から水平方向に約 5 ～ 90cm 移動し、 β 線計数率の変化を調べた。

5.1.2 装置の検出特性試験

移動機構に検出器を搭載して自動測定し、装置の連続稼働時間と測定効率を求めた。なお、自動測定は、以下の基本動作で構成され、②～④の操作を繰り返し、特定領域の測定を行った。自動測定の様子を写真 4 に示す。

- ① BG 測定、測定条件の入力。
- ② 装置の移動と位置の補正。
- ③ 測定（ γ 線の測定、次に、 β 線と γ 線の測定）。
- ④ 検出部の格納と移動機構部の移動。

また、検出効率、自動測定、外部線源の影響に関する試験方法を以下に示す。

検出効率

自動測定の基本動作に従って、測定対象領域のコンクリート床面における β 線 + γ 線、 γ 線及

び β 線のBG計数率を測定した。また、 ^{60}Co の標準面線源を用いた場合の β 線による機器効率、検出限界表面密度を求めた。

自動測定による測定

自動測定による測定試験の体系を図10に示す。約 4m^2 ($3.08\text{m} \times 1.32\text{m}$)の測定対象領域の4箇所に、 ^{60}Co 基準面線源(縦 $10\text{cm} \times$ 横 10cm 、線源強度約 70Bq)を設置し、自動測定を行った。測定時間は、60秒(β 線+ γ 線:30秒及び γ 線:30秒)とした。約 4m^2 の測定対象領域における移動回数は、28回になった(検出面のオーバーラップ量は 0mm)。このため、測定データ数は672個(28回 \times 12検出器 \times 2)となった。

外部線源の影響

自動測定による測定と同条件で、外部線源(^{60}Co 点線源、線源強度:200kBq、表面線量当量率:約 $90\mu\text{Sv/hr}$)を水平位置や高さを変えて測定対象領域の外周部に設置し、自動測定を行った。

5.1.3 装置の移動特性試験

装置の移動特性(移動位置の精度、連続稼働時間、自動測定時間)に関して以下に示すように試験を行った。

移動位置の精度

移動機構とデジタル標識を適当な位置に配置し、建家床面の汚染分布自動測定を行い、移動位置の精度を確認した。測定領域は、X軸方向(検出器の前後方向)については検出器の縦方向の長さ(440mm)毎に 5m とし、Y軸方向(検出器の左右方向)については検出器の奥行き(330mm)分の範囲とした。移動誤差は、それぞれの測定点における移動位置をマーキングし、始点と終点の位置を直線で結ぶことによって、直線性及び移動間隔を計測して求めた。

連続稼働時間

操作パネルで電源を起動し一連の自動測定を行い、電圧低下の警報が鳴るまでの時間を測定した。電圧の最低基準値は 21V とし、電圧モニターが30秒以上継続して最低値を検出した時点で電圧低下の警報が鳴るように設定した。

自動測定時間

自動測定を行ったときの、測定、移動、位置補正及びデータ処理等に要した時間を測定した。

5.2 試験結果

5.2.1 検出器の特性

計数プラトー特性

図11に ^{14}C 、 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{36}Cl 、 ^{40}K からの β 線を測定して評価した計数プラトー特性を示す。 β 線計数率の安定測定領域(プラトー)は、 $1,100\text{V}$ から $1,500\text{V}$ で、かつ、プラトー傾斜が $5\%/400\text{V}$ 以下であった。このように、上述した線源から放出される低エネルギーから高エネルギーまで比

較的安定した計数プラトー特性を示した。この結果から使用電圧を 1,350V に設定した。

BG 計数率

図 12 にコンクリート試験体の BG 計数率を示す。BG の平均計数率は、 β 線 + γ 線が $7.98 \pm 0.17\text{cps}$ (平均値 $\pm 3\sigma$)、 γ 線が $7.23 \pm 0.17\text{cps}$ であり、これらの計数率の差から求めた β 線の BG 計数率は、 $0.75 \pm 0.02\text{cps}$ であった。この結果から、コンクリート試験体では、 γ 線が BG 計数率の 90% 強を占めることが分かった。

機器効率

図 13 に検出器毎の各核種に対する β 線の機器効率を示す。機器効率の平均値は、 ^{14}C : 10.85%、 ^{60}Co : 25.76%、 ^{137}Cs : 37.41%、 ^{36}Cl : 42.41%、 ^{40}K : 63.63%、 ^{90}Sr - ^{90}Y : 41.76% であった。集合検出器を用いた試験では、12 個の検出器ともほぼ一定の値を示しており、十分に安定した計数性能が得られることを確認した。なお、 γ 線に対する検出効率は、 ^{60}Co : 0.7%、 ^{137}Cs : 0.6%、 ^{40}K : 3.4% であった。

感度分布

図 14 に線源位置を変えて β 線と γ 線の計数率を測定した結果を示す。平均の計数率は、 β 線が $1.56 \pm 0.21\text{cps}$ であり、 γ 線が $7.82 \pm 0.14\text{cps}$ であった。 γ 線に対する感度は入射窓全域で殆ど差がなかった。また、 β 線に対する感度は、入射窓の中心領域では計数が高く、周辺部では中心領域に比べて 80% 程度まで減少した。

集合検出器特性

図 15 に集合検出器により計数率を測定した結果を示す。本試験では、検出器 (No.6) の真下に面線源を置き、各検出器の計数率を測定した。隣接する検出器 (No.2, No.5, No.7, No.10) の β 線計数率は、検出器 (No.6) の約 6% であった。また、対角線で隣接する検出器 (No.1, No.3, No.9, No.11) の β 線計数率は、約 1% であった。基準面線源に隣接しない検出器 (No.4, No.8, No.12) では、計数されなかった。さらに、集合検出器 (4 個) を用いて線源位置を移動させて各検出器の計数率を測定した結果 (図 16)、各検出器の計数率は、基準面線源の移動に伴って増減するが、合計した計数値には殆ど変化はなかった。

外部線源の影響

図 17 に β 線計数率に及ぼす外部線源の影響に関する試験結果を示す。外部線源の影響により、 β 線の計数率は、検出器の入射窓の線量当量率が約 $1\mu\text{Sv/h}$ を超えた場合に上昇する結果となった。

5.2.2 装置の検出特性

検出器特性

検出部を移動機構に搭載した場合、BG 計数率は、 β 線 + γ 線で約 7.0cps 、 γ 線で 6.1cps であり、 β 線の BG 計数率は約 0.9cps であった。また、 ^{60}Co の標準面線源を用いた場合、 β 線の機器効率は約 30% であった。BG の測定時間を 600 秒、汚染面の測定時間を 60 秒とした場合、検出

限界表面密度は、約 $0.07\text{Bq}/\text{cm}^2$ となった。

自動測定

図 18 に原研施設の管理区域（領域： $3.08\text{m} \times 1.32\text{m}$ ）において自動測定した例を示す。図に示すように、4 箇所 の線源設置場所が正確に特定できた。

外部線源の影響

図 19 に測定領域の外周部に外部線源を置いて自動測定した結果を示す。本図に示すように、 β 線 + γ 線の測定データ（図 19 の (a)）及び γ 線の測定データ（図 19 の (b)）からは、外部線源近傍において測定領域に存在する面線源を特定することは困難であるのに対し、 β 線のみ のデータ（図 19 の (c)）からは、外部線源近傍においても約 70Bq の面線源が特定できることが分かる。外部線源の位置を変更して、同様な測定を行った結果（図 20、21、22、23）、装置の前進移動に対して左側面部（図 10 の A）で最も影響を受け易いことが分かった。また、高さを変えた場合では、床面に外部線源が存在する場合に、その影響を受け易いことが分かった。例えば、 200kBq （表面線量当量率約 $90\mu\text{Sv}/\text{hr}$ ）の外部線源を A（図 10）の床面に設置した場合、外部線源の影響を取り除くことができなかつた。この時の検出窓面における線量当量率は、約 $1\mu\text{Sv}/\text{hr}$ であり、集合検出器の検出特性試験と同様の結果となった。なお、図 20～図 23 に示すように、左側面以外に外部線源が存在する場合には、その影響を受けずに面線源を特定できた。

5.2.3 装置の移動特性

移動の精度

移動の精度を測定した結果、平坦な床面の場合、移動位置の誤差は、X 及び Y 方向ともに、 $\pm 10\text{mm}$ 以内であった（図 24）。また、床面の特定箇所にドレンカップが存在する場合、それにより床が傾斜するため、誤差が増えるが、X 及び Y 方向ともに $\pm 20\text{mm}$ 以内であった（図 25）。

自動測定の測定効率

測定と移動を繰り返し行った結果、1 回の充電で約 3 時間の動作が可能であった。また、自動測定モードでは、5.1.2 節で示した動作手順のうち、項目毎の所要時間を測定した（図 26）。この結果、任意に設定できる「測定時間」を除いては、移動機構部を正確な測定経路へ導くための移動位置の測定と位置補正に多くの時間を要した。

一方、約 4m^2 の領域を自動測定した場合の時間は 55 分、この結果をグラフ表示するために要する処理時間は 10 分であることから、測定効率は、約 $4.0\text{m}^2/\text{h}$ となった。さらに、BG 測定や装置の移動等を考慮しても、1 回の充電で約 10m^2 の領域の測定が可能であることが分かった。

6. 考察

6.1 移動型放射能測定装置の評価

建家表面の比較的低レベルの汚染を対象とした放射能測定により、有意な放射能が存在しないことを示すためには、BG 計数率との相違を明らかにする必要があるが、このためには、高感度で放射能を測定できる検出器が必要となり、また、広い領域に渡る測定が必要と考えられるため、測定作業の効率化も重要な要件となる。上述した観点から、検出精度の向上（検出限界表面密度の低減化）と測定作業の効率化を実現するため移動型放射能測定装置を開発した。

この結果、検出精度の向上についてみると、できる限りβ線に高感度な検出器を製作するとともに、全放射能（β線+γ線）からγ線を差し引くことにより、β線のみを計数する方式を考案し、それを実現する検出器を開発した。開発した検出器の検出限界表面密度は、 0.1Bq/cm^2 （測定時間：60秒）であり、従来の測定器と比較した場合、検出限界表面密度は約3倍に向上した。また、入射窓の表面線量当量率が約 $1\mu\text{Sv/hr}$ 以下の外部放射線下（約 $90\mu\text{Sv/hr}$ の ^{60}Co 点線源を検出面から20cmの距離に置いた場合の線量当量率）では、外部放射線の影響を排除して、真の汚染を識別できることが分かった。原子力施設の建家構造部内には、汚染した埋設配管が存在することもあり、外部放射線として、汚染分布の測定に影響を及ぼす可能性があるが、本装置は、これらの影響を排除して汚染のみを特定できるという従来型にない特性を有している。

測定作業の自動化についてみると、自動測定では、入力したパラメータによって、測定時間や測定モードが決定され、指定された経路に沿って、逐次測定を行うよう移動機構及び制御系を開発した。また、緊急停止、非常停止、バッテリー低下等の作業を停止させるエラーが発生しない限り、設定した領域の測定を自動的に行うことを可能とした。本装置の1回の充電での測定効率は約 10m^2 であり、建家の全面測定において実用的である。また、測定位置を正しく把握することが重要であるが、移動の精度は、X及びY軸ともにほぼ同様の値であり、平坦な面で $\pm 10\text{mm}$ 以内、傾斜面でも $\pm 20\text{mm}$ 以内であり、実用上十分な精度であると考えられる。

なお、今回の試験は、いずれも平滑で清掃された比較きれいな床面を対象として行った。しかし、実際の測定では、その測定面は、除染のため多少の凹凸があり、また、表面にモルタルや砂が残った状態も考慮する必要がある。β線を対象とした測定では、測定対象面の表面状態が検出効率に与える影響は大きくなると考えられる。参考のために、基準面線源（形状： $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 、β線放出率： $356\text{cps}/2\pi$ ）の上にモルタル（密度：約 2g/cm^3 ）を約 $4.2\text{g} \sim 18.9\text{g}$ （約 $0.2 \sim 0.9\text{mm}$ ）の厚さに敷き詰めた状態では、β線計数率は、モルタルの厚さが 0.1mm 以下で約90%、 0.2mm で約40%、 0.9mm で10%以下まで遮へいされた。このことから、測定前には、砂やモルタルをできるだけ除去する必要がある。

6.2 作業効率の検討

JPDR の解体実地試験における除染後の確認測定では、測定単位区画を $0.8\text{m} \times 0.8\text{m}$ (0.64m^2) とし、市販の表面汚染測定器（コンタマット：FAG K.G.S 社製、型式：FHT111E/G）を使用し、建家全面の測定を行った⁹⁾。測定単位区画の全面を測定する場合の測定効率は、 $1.28\text{m}^2/\text{h}$ であったが、作業効率を上げるために、測定単位区画内を 2～3 分程度スキャンして、計数率の最大点を探した後、この点を代表点とし、30 秒間測定する方法を採用した。この方法による測定作業効率は、約 $0.2 \text{人} \cdot \text{日}/\text{m}^2$ であった。

一方、移動型放射能測定装置では、測定以外に装置の移動、位置補正、検出部の上下開閉の時間が必要であるが、測定時間を 60 秒（ β 線 + γ 線：30 秒及び γ 線：30 秒）に設定し、自動測定を行った場合、1 箇所での測定所要時間は約 105 秒であった。この結果、測定効率は、約 $4\text{m}^2/\text{h}$ であり、手作業による全面測定の約 3 倍の測定作業効率が得られた。また、手作業による作業効率では、測定者の他に記録者や補助要員が必要であり、さらに、データ処理に関しては、測定者が値を読み、記録者が手書きで記録し、この値をパソコン等に入力するといった作業が必要である。このため、測定者の違いによる測定ムラ（測定距離、表示値の読み方等）やデータ記録時の誤りも正確さを損なう要因に成り得る。これに対し、本装置を用いた場合、データ処理に関する手間はすべて省くことができるし、人の介在がほとんど無いので、人為的なデータの記録ミスが減らすことも期待できる。さらに、作業の実働時間及び人工数を考慮した場合、JPDR 解体実地試験の確認測定では、平均実働時間は、約 4 時間であったが²⁾、本装置による測定作業の実働時間を 6 時間、オペレータを 2 人と仮定した場合、作業効率は、約 $0.08 \text{人} \cdot \text{日}/\text{m}^2$ となる。

以上のことから、作業時間は手作業の約 $1/3$ 、また、人工数は手作業の約 $1/2.5$ であり、本装置により作業の効率化が期待できる。

6.3 測定対象核種の検討

第 2 章で述べたように、原子力発電所が停止し、冷却期間を経た後においても構造物の表面に存在して有意なレベルにある核種としては、 ^{55}Fe 、 ^{60}Co 、 ^{63}Ni 、 ^{90}Sr 、 ^{90}Y 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs が考えられている（表 1）。本研究で開発した測定方法を適用する場合は、測定対象に β 線と γ 線を放出する核種を選択する必要がある。上述した核種のうち、 β 線を放出する核種は、 ^{60}Co 、 ^{63}Ni 、 ^{90}Sr 、 ^{90}Y 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs である。

他方、本装置の測定対象物は、コンクリートであるため、BG の主要な成分は ^{40}K からの放射線である。 ^{40}K も β 線と γ 線を放出する核種であり、 β 線の最大エネルギーが $1,314\text{keV}$ と比較的高い。測定の対象となる ^{60}Co （ β 線最大エネルギー： 318keV ）と ^{137}Cs （ β 線最大エネルギー： 512keV ）は、 ^{40}K の約半分の β 線最大エネルギーを持つため、厚さ 0.6mm の Al 板で容易に両者の β 線を遮へいできる。しかし、同じ板を用いた場合、 ^{40}K の β 線を遮へいすることはできない。即ち、 ^{40}K の β 線は、 γ 線の測定時（ β 線遮へい板を閉じた場合の測定）には、これを透過して γ 線の成分と一緒に検出されるため、 ^{60}Co や ^{137}Cs の測定にほとんど影響を与えないことになる。また、 ^{90}Y からの β 線もエネルギーが高い（最大エネルギー： $2,279\text{keV}$ ）ので同様に ^{60}Co 、 ^{137}Cs を対象とした測定では β 線を透過させることとなる。さらに、 ^{63}Ni （ β 線最大エネルギー： 66keV ）

は、エネルギーが低いので、ディスクリミネータで低エネルギー側の電氣的なノイズとともに除去される。以上の観点から、本装置は、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs による汚染を測定することが適当であると考えられる。

本装置を用いた測定では、これらの核種が単独で存在する場合には、汚染量 (Bq/cm^2) を正確に評価することが可能であるが、核種が混在する場合には、全計数から汚染の有無を判断することは可能であるものの、汚染量 (Bq/cm^2) を求めることは困難である。従って、核種を弁別するためには、他の検出器 (Ge 、 $\text{NaI}(\text{Tl})$ 等) を用いて、予め測定対象核種の存在比から汚染量を推定することが必要となる。

7. まとめ

原子力施設の廃止措置において、建家の解体撤去前に行われる確認測定を効率良く行うことを目的として、測定対象面からの β 線により放射能汚染分布を測定する方法を考案するとともに、この測定方法に基づいた検出部及び移動機構を製作して、その性能を評価した。本技術開発に関する主な結果は、以下のとおりである。

- β 線に着目した測定を行うため、 β 線に感度が良く、 γ 線に低感度の極薄型プラスチックシンチレータ型の検出素子、2本の光電子増倍管による同時計数、アルミニウムの遮へい板の開閉機構等を開発した。この結果、 β 線に対する十分な機器効率及び低レベルの外部線源に対する影響を排除して汚染分布を同定できる検出器を製作することができた。
- 自己位置同定システムの採用により、 $\pm 20\text{mm}$ の移動誤差で自律走行して測定が可能であることを確認した。
- 開発した移動型放射能測定装置の処理能力は、測定モードにより異なるが、約 $4 \sim 5\text{m}^2/\text{h}$ であり、JPDR 解体実地試験における確認測定で行った手動による全面測定の約 3 倍の測定作業効率が得られた。
- 検出器の検出限界値は、60 秒の測定時間で約 $0.1\text{Bq}/\text{cm}^2$ であり、かつ放射能汚染を $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 単位で判別可能なことが確認できた。
- β 線と γ 線の混在する中から β 線のみに着目して、汚染を評価する測定手法は、低レベル放射能汚染分布の測定に有効であることが分かった。また、開発した移動型放射能測定装置が確認測定に適用できる見通しが得られた。

謝 辞

本報告をまとめるに当たり、バックエンド技術部の関係者の方々から貴重な御助言、御指導を頂いた。また、川上一弘氏（日本アドバンステクノロジー株）から、開発した移動型放射能測定装置の運転、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、Vol.38、No.7、pp.553～576（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 / Code 98-010, 1998 年 3 月
- 3) 吉村 幸雄、他：日本原子力学会「1998 年秋の大会」要旨集 K65, 1998 年 9 月
- 4) Deactivation and Decommissioning Focus Area ; Surface Contamination Monitor and Survey Information Management System, DOE/EM-0347, February 1998
- 5) S.Yanagihara, et al., : Decommissioning and decontamination programs in the Japan Atomic Energy Research Institute、International conference on of NUCLEAR DECOMMISSIONING 98, pp.98～102, 2-3 December 1998, Kensington Town Hall, London, UK (1998)
- 6) H.D Oak、 et al., : Technology Safety and Costs of Decommissioning a Reference Boiled Water Reactor Power Station、NUREG/CR-0672.Vol.2, June 1980
- 7) 春日 智恵：デジタル標識パターンを用いた自己位置同定法、日本ロボット学会誌 Vol 12. No.6、1994 年 9 月
- 8) 畠山 睦夫、他：動力試験炉（JPDR）の解体における建家表面の除染と放射能測定、JAERI - Tech 97-064, (1997)

表1 原子力発電施設に存在する主な汚染核種

核種	半減期	β 線最大エネルギー [keV]	γ 線のエネルギー [keV]
^{14}C	5730年	156	————
^{36}Cl	3×10^5 年	709	————
^{40}K	1.28×10^9 年	1,314	1,461
^{60}Co	5.27年	318	1,173、1,332
^{63}Ni	100.1年	65.9	————
^{90}Sr	29.12年	546	————
^{90}Y	64時間	2,279	————
^{134}Cs	2.062年	658	605、796
^{137}Cs	30年	511	661

遮へい板を開いた状態

遮へい板を閉じた状態

- 測定面の β 線と γ 線が計測される
- 測定環境の γ 線が計測される

- 測定面の γ 線が計測される
- 測定環境の γ 線が計測される

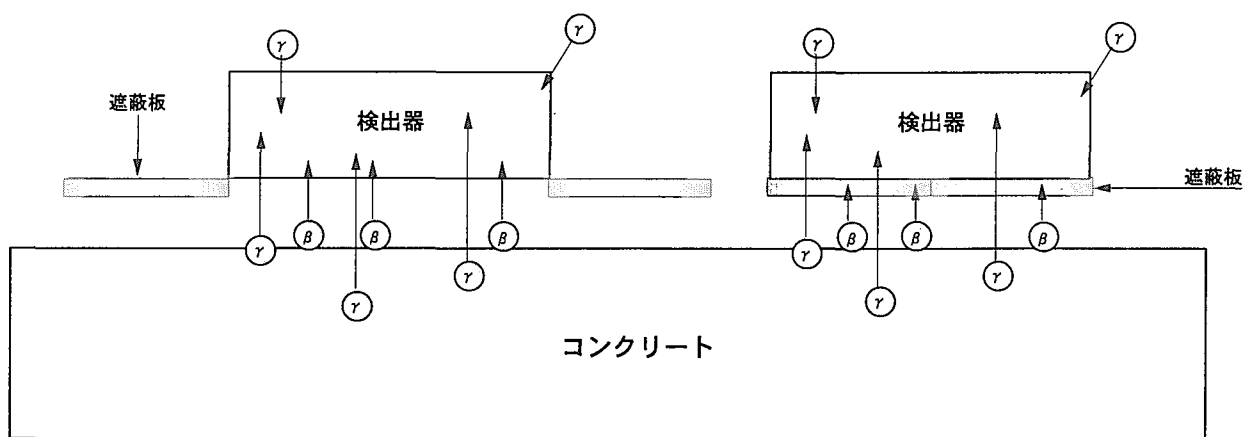


図 1 遮へい板を用いた β 線と γ 線の弁別測定方法の概念

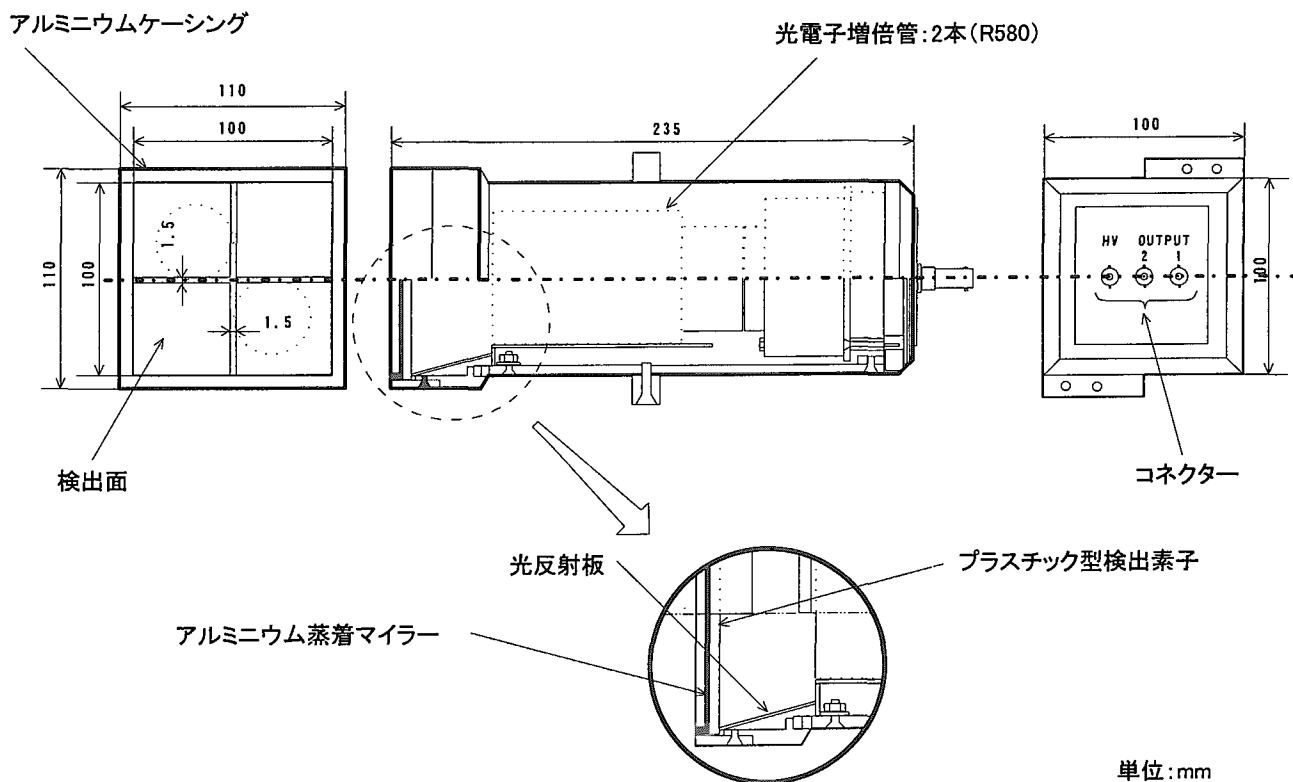


図 2 プラスチック型検出器の構造

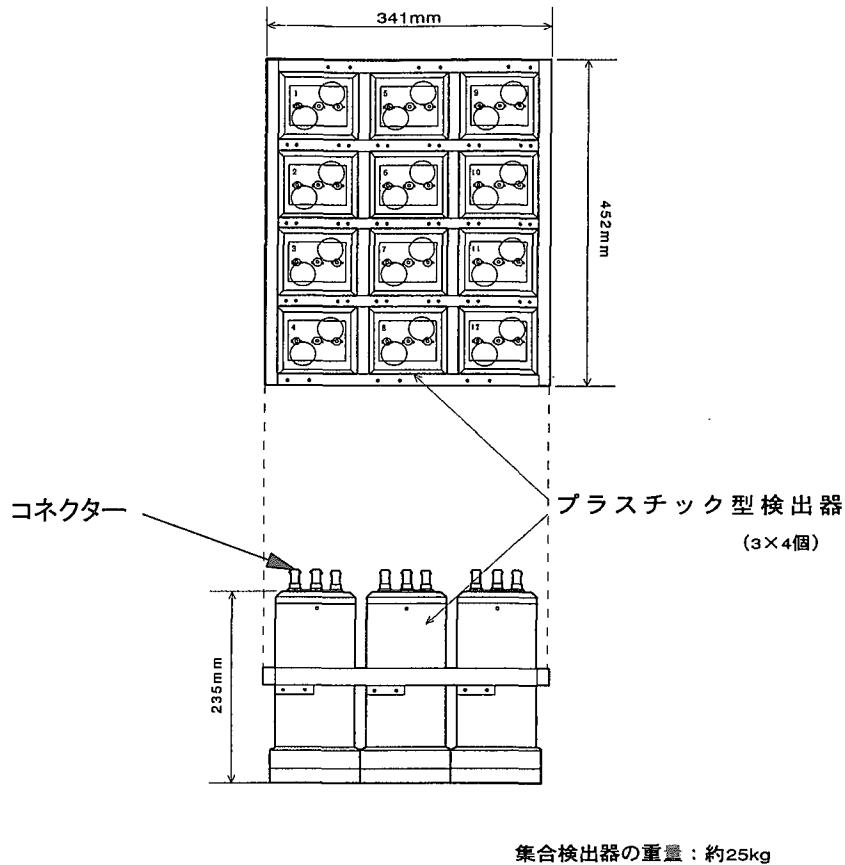


図3 集合検出器の構造

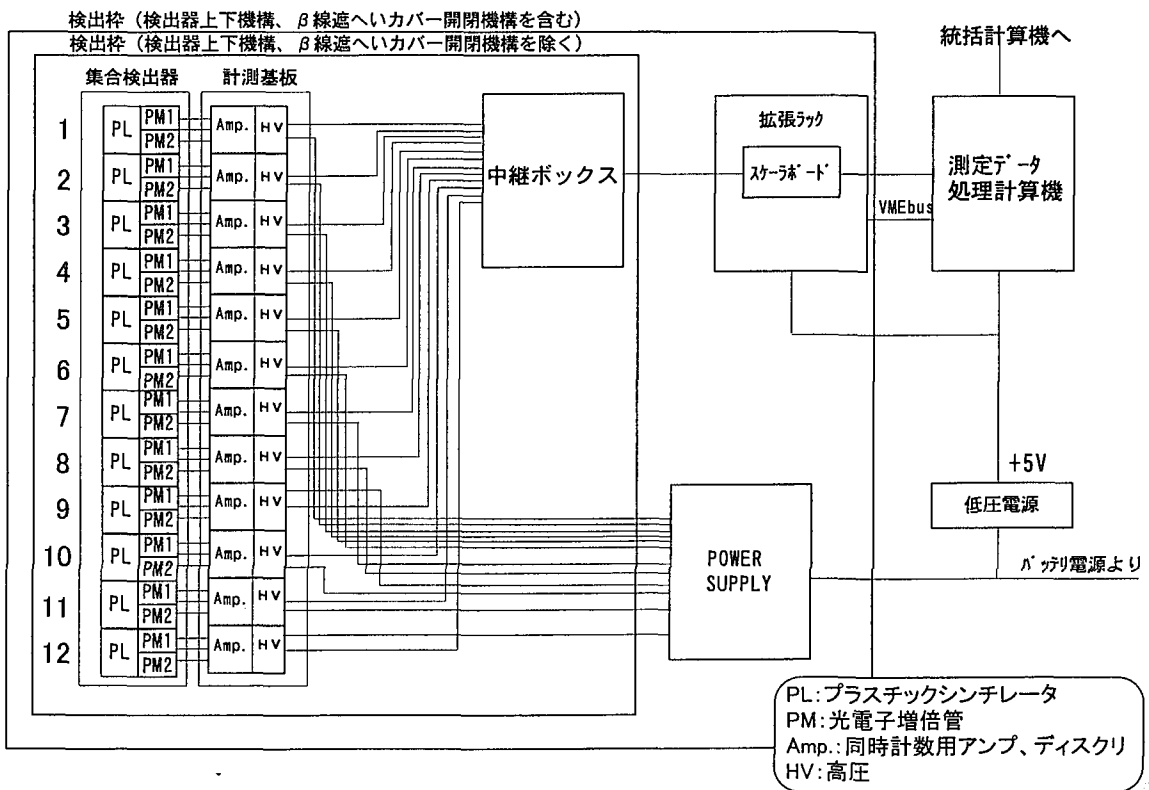


図4 計測系のブロック図

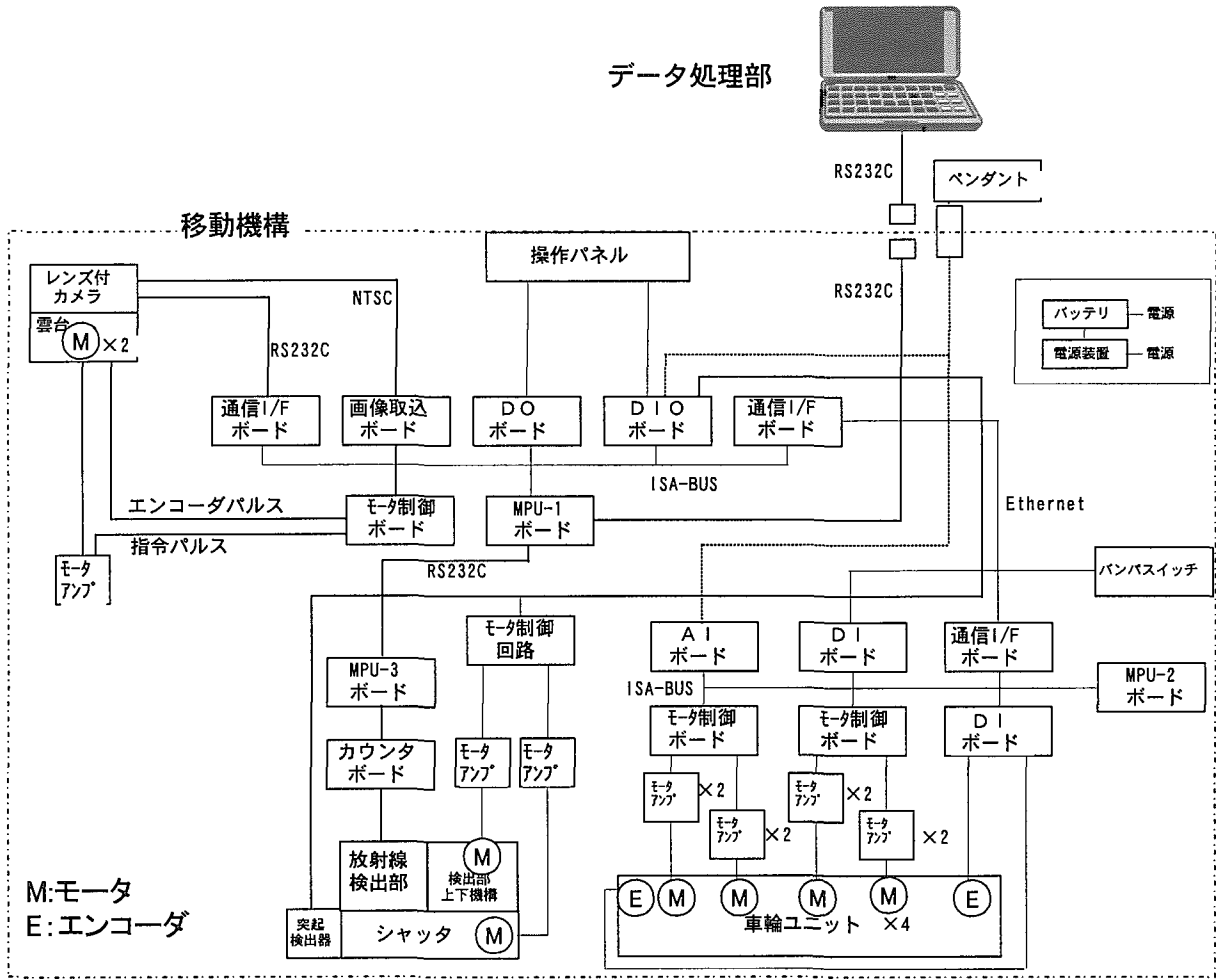


図 5 移動機構部の計算機制御の概要

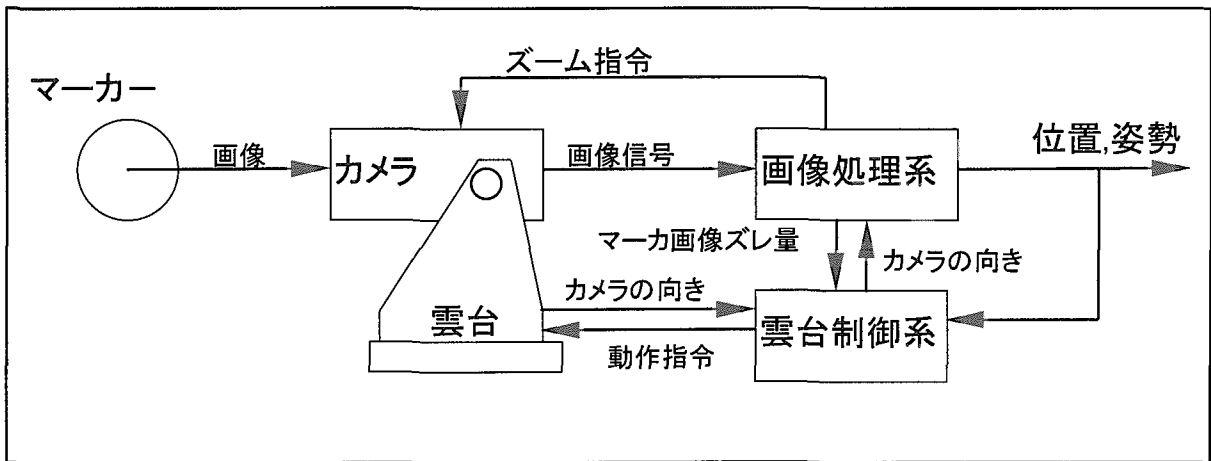


図 6 自己位置同定システムの構成

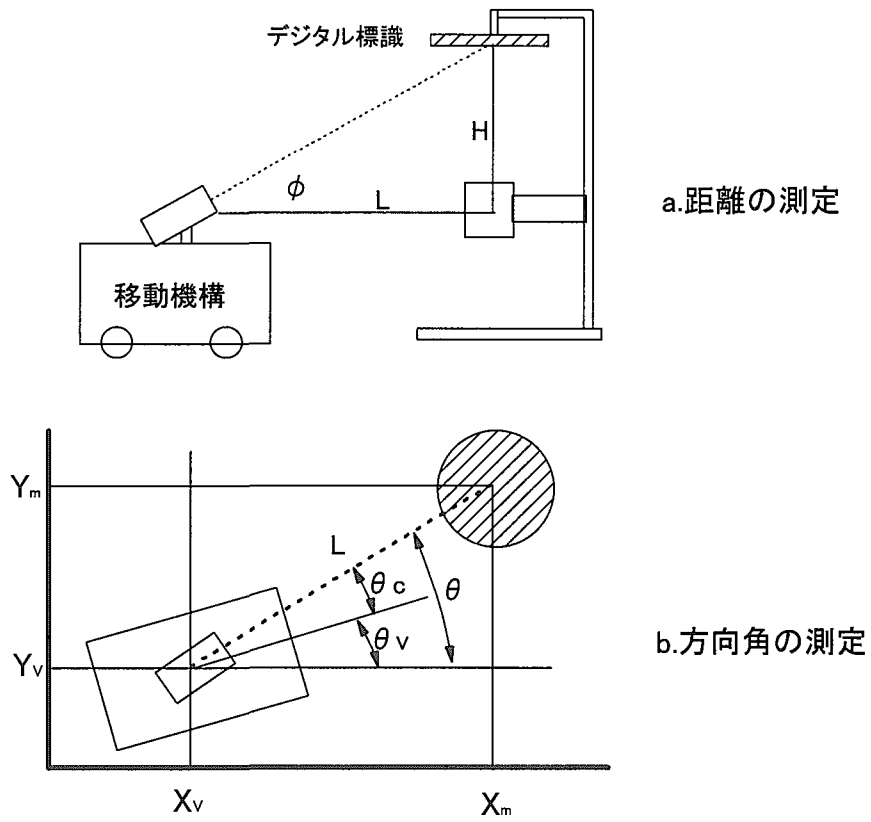


図 7 装置の位置及び姿勢の計測方法

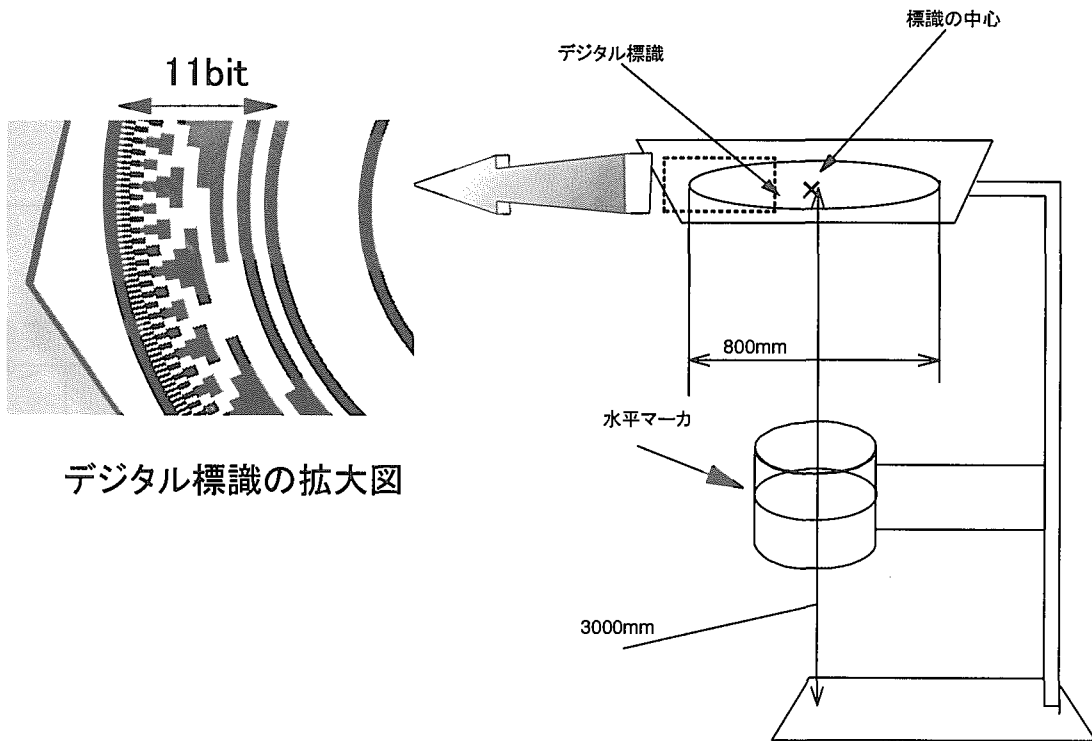


図 8 デジタル標識

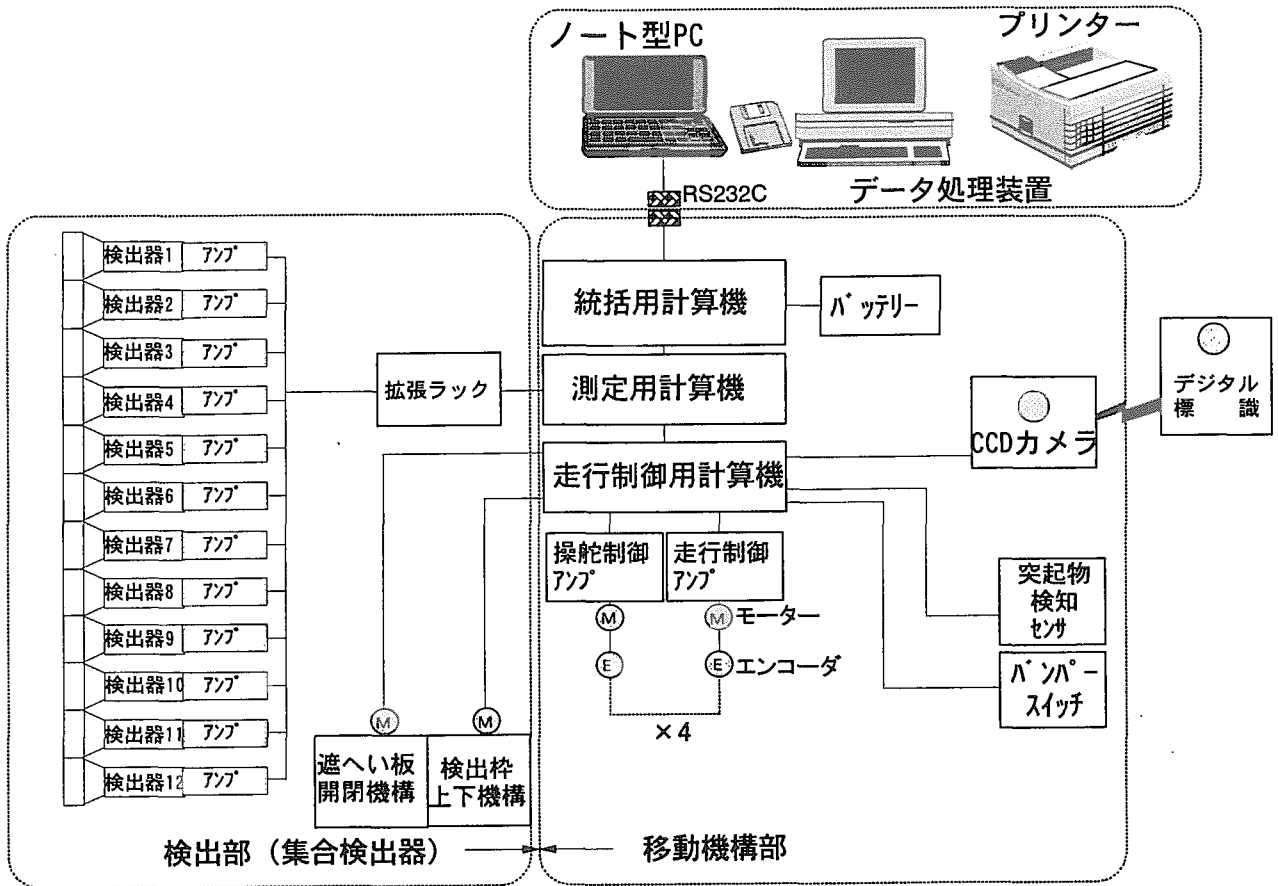


図9 装置のデータ処理の概要

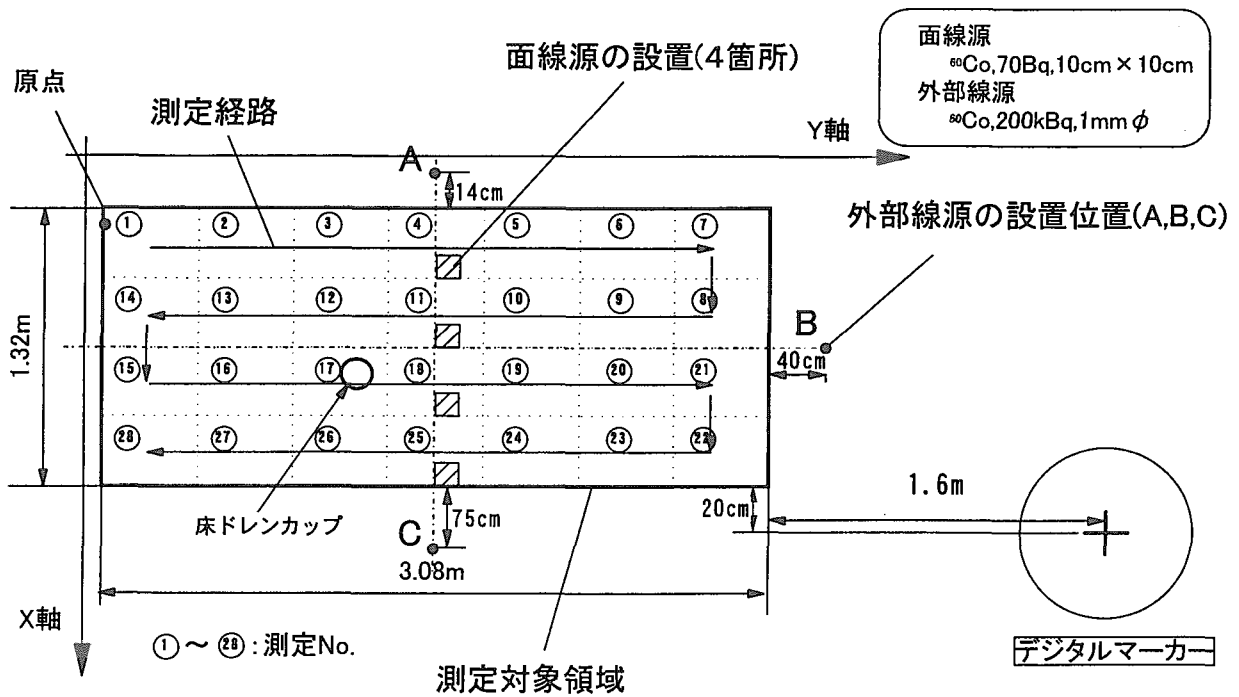


図10 実測試験の体系

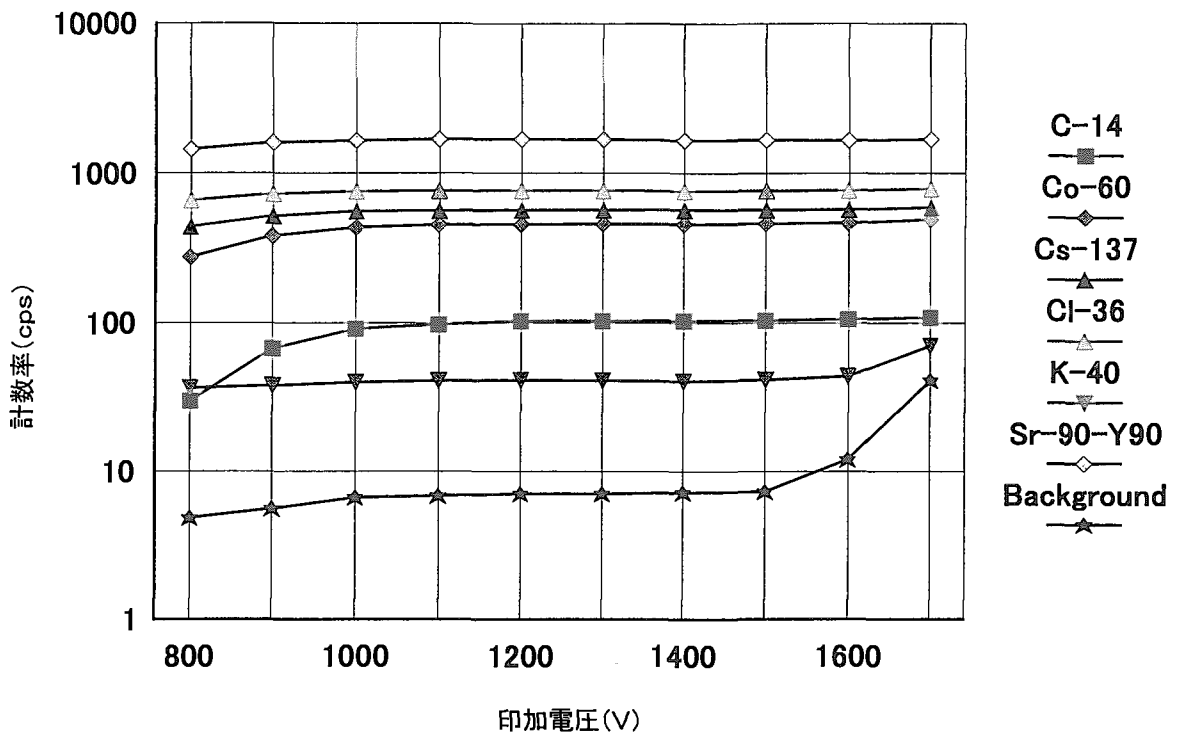


図 11 集合検出器の計数プラトー特性
(計数率は、12個の平均値を示す。)

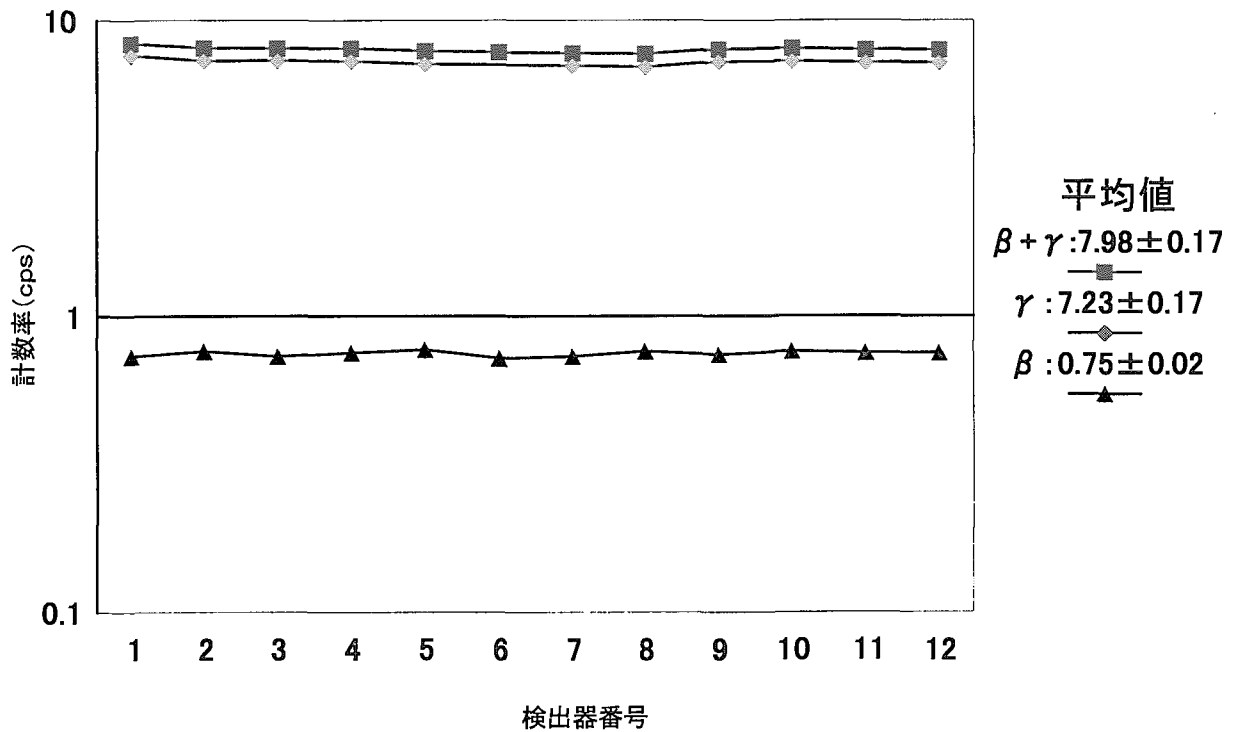


図 12 コンクリート試験体のBG計数率

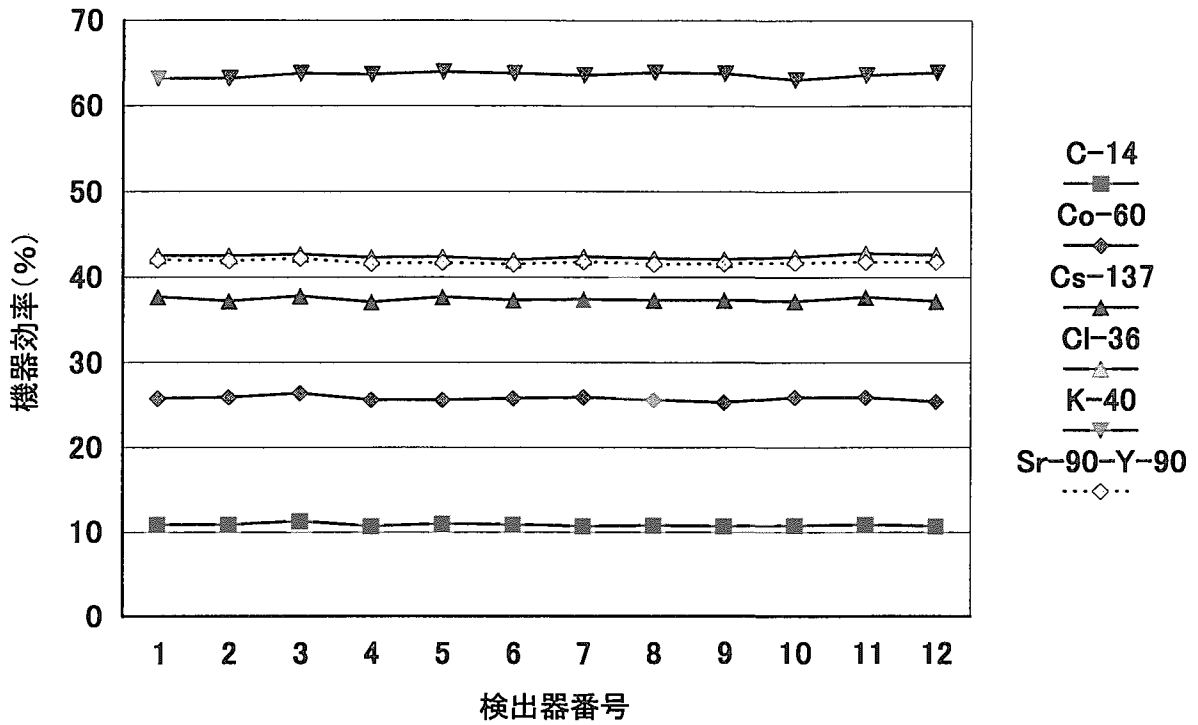
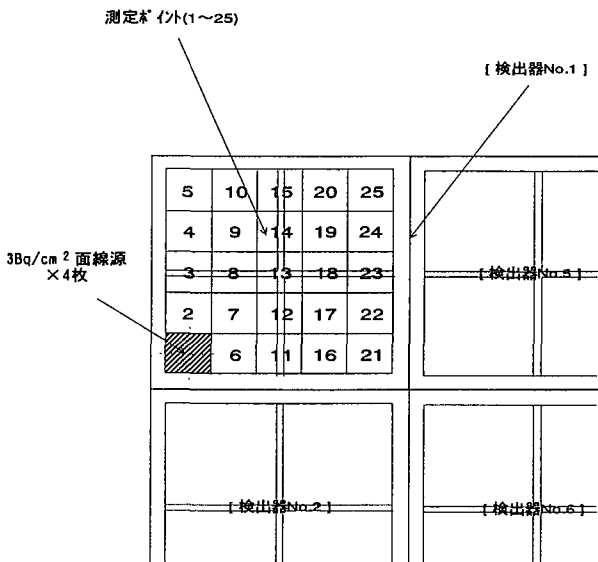


図 13 核種毎の機器効率



※検出器No.1の検出面に対する3x3グリッドを25分割して面線源4枚を使用しポイント1~25まで移動させながら測定した。なお、上図は、線源をポイント1にセットした時である。

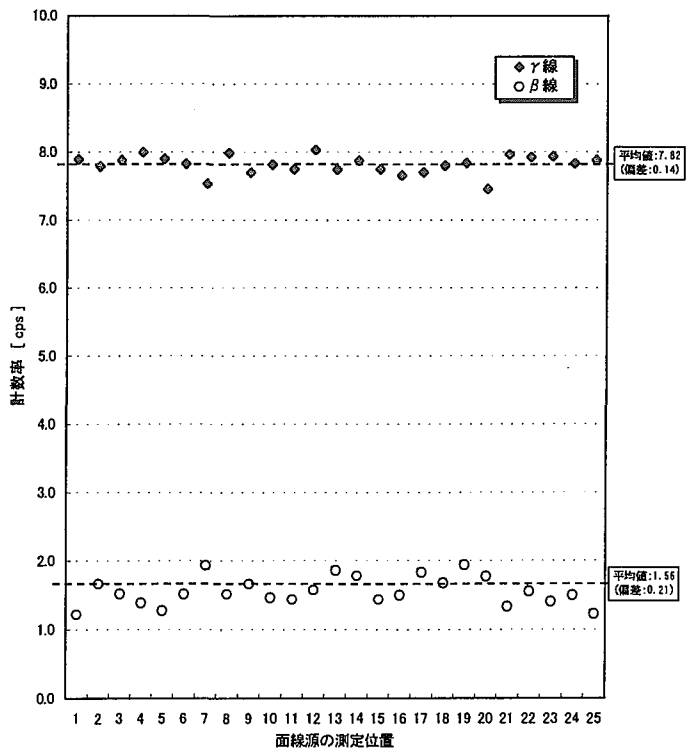
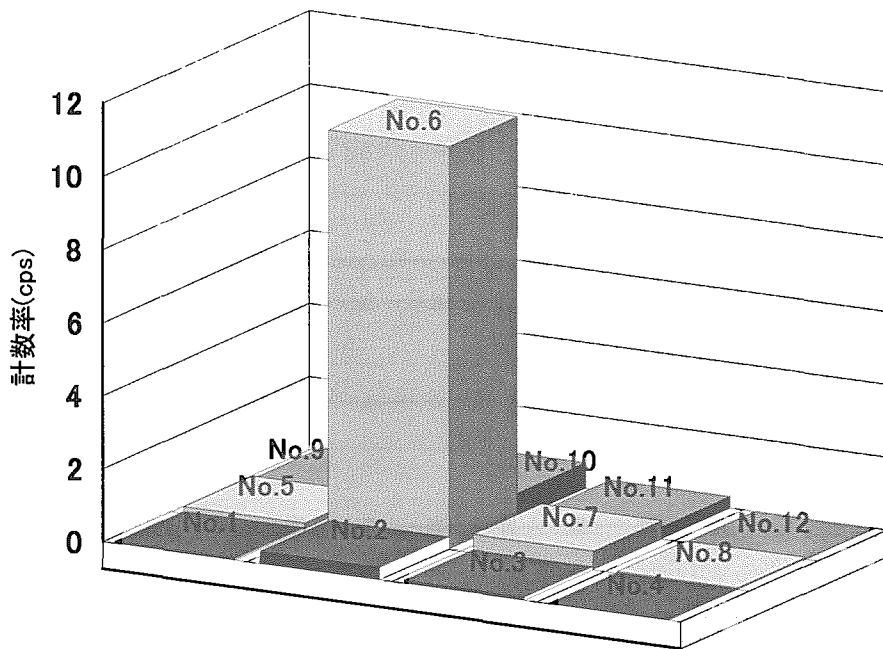


図 14 集合検出器の感度分布



● 検出器(No.6)の真下に⁶⁰Coの面線源を置き、各検出器の計数率を測定した。面線源のβ線強度は40Bq/100cm²である。検出距離は、2cmである。

図 15 集合検出器の面線源に対する計数率

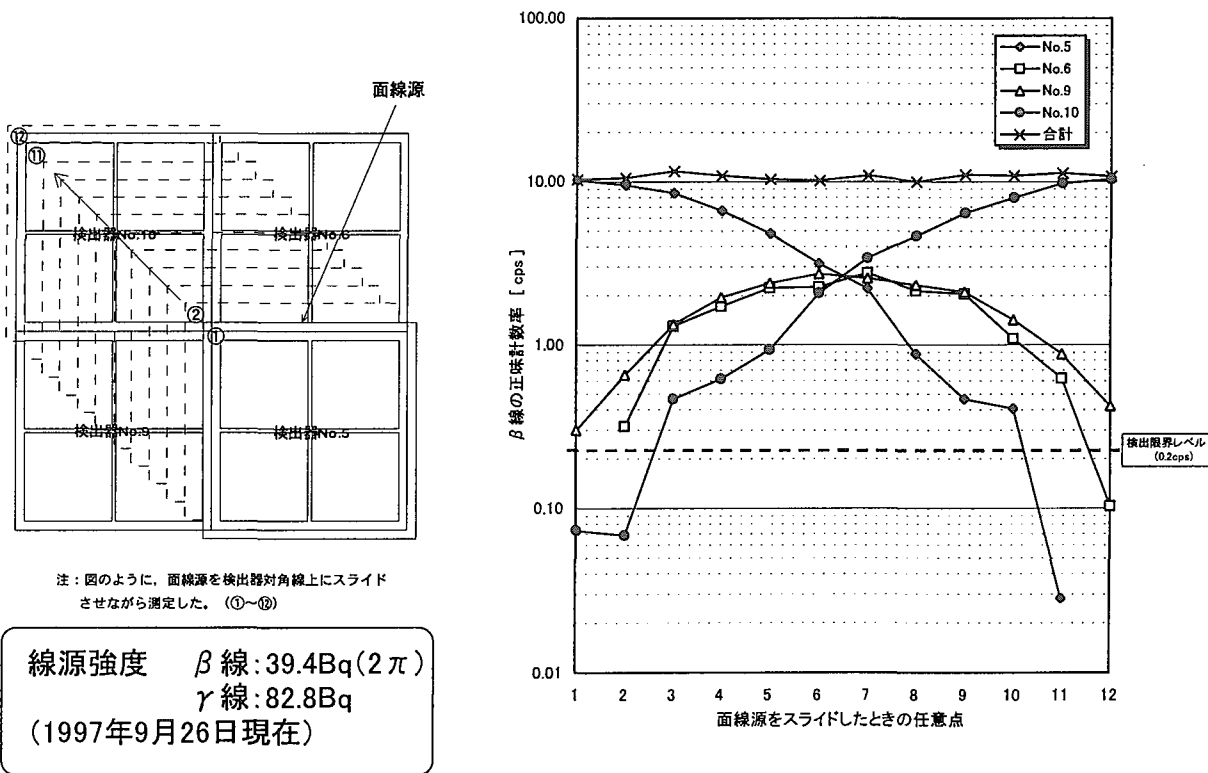


図 16 集合検出器を用いた面線源に対する計数率

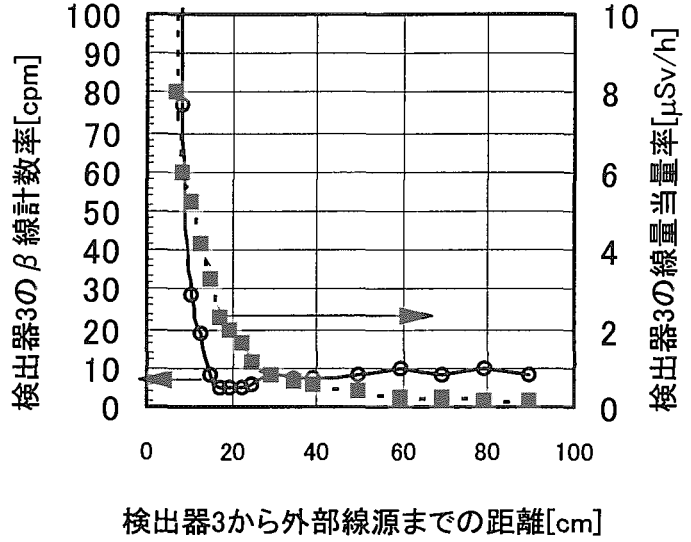
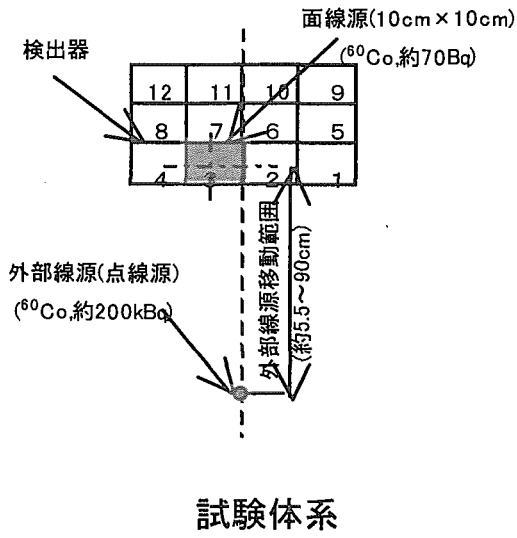


図 17 外部線源によるβ線計数率の影響

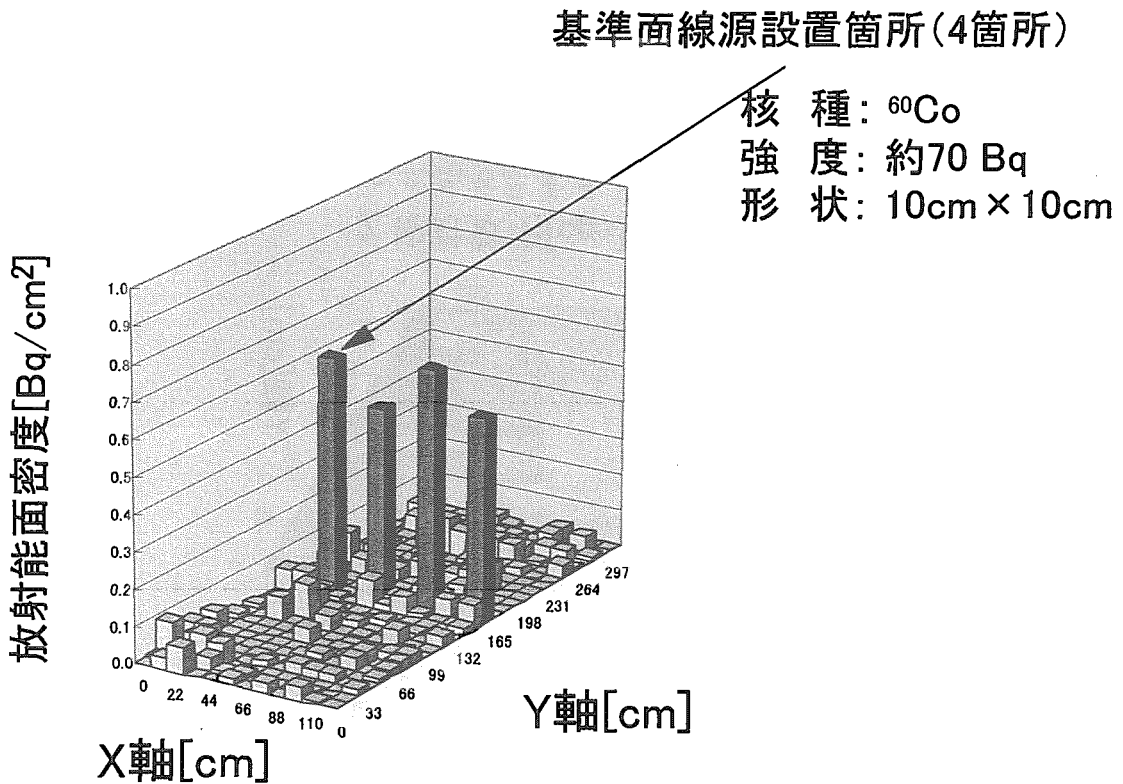


図 18 管理区域の放射能面密度の測定結果

測定条件

測定距離: 2cm

測定時間: 30+30秒

外部線源設置箇所

核種: ^{60}Co

強度: 約200kBq

線量当量率: 約90 $\mu\text{Sv/h}$

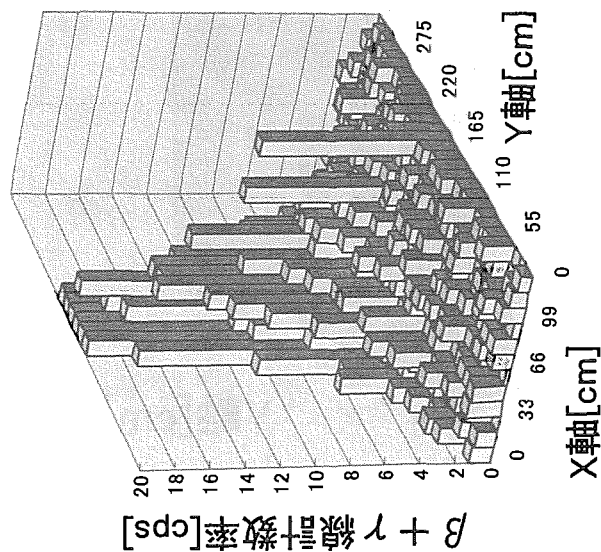
高さ: 0cm(床面)

基準面線源設置箇所(4箇所)

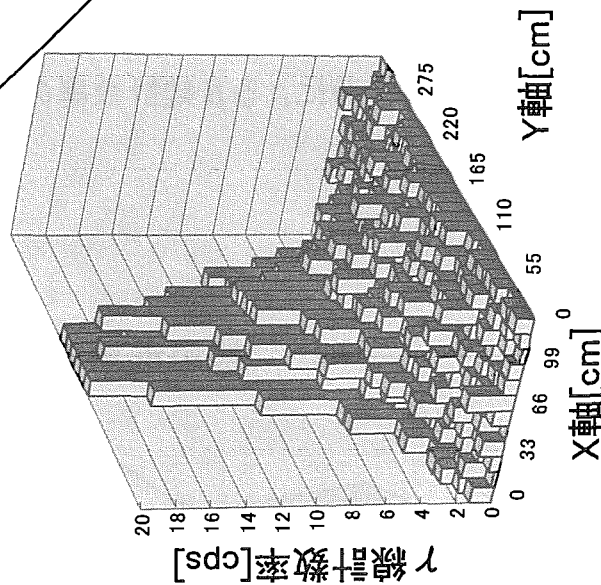
核種: ^{60}Co

強度: 約70 Bq

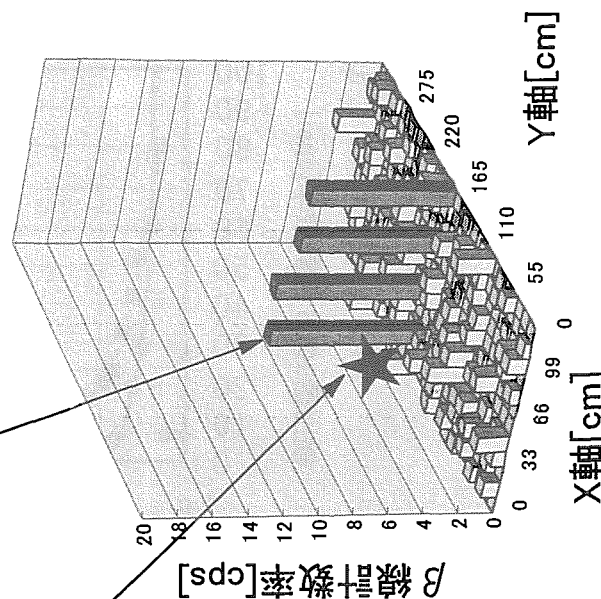
形状: 10cm x 10cm



(a) $\beta + \gamma$ 線の測定データ



(b) γ 線の測定データ



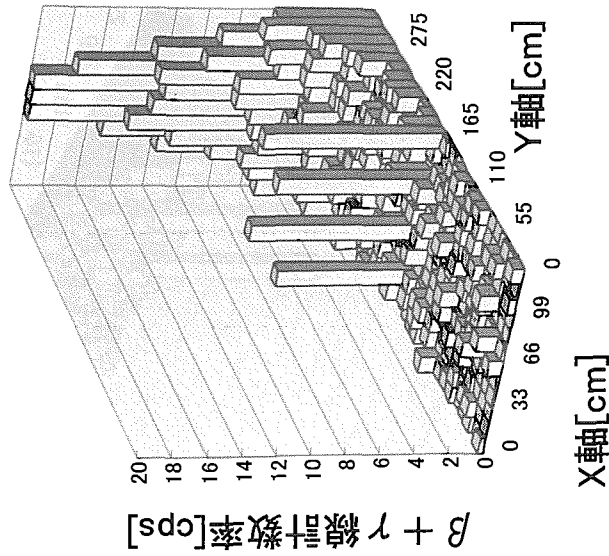
(c) β 線のデータ

図 19 外部線源存在下における実測データ(1)

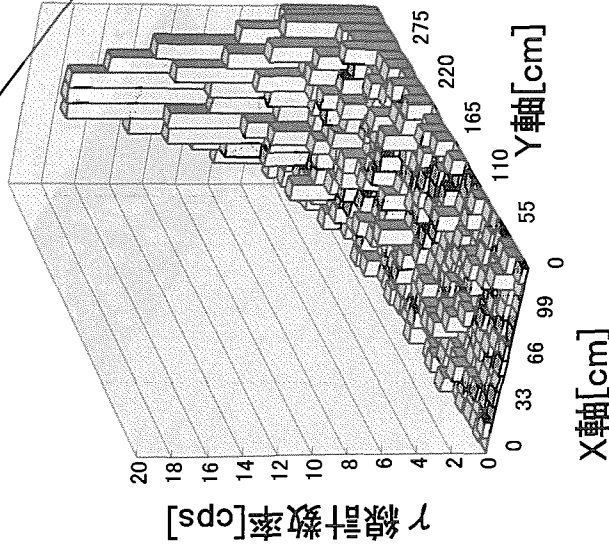
外部線源設置箇所
 核種 : ^{60}Co
 強度 : 約200kBq
 線量当量率: 約 $90\mu\text{Sv/h}$
 高さ : 0cm(床面)

基準面線源設置箇所(4箇所)
 核種 : ^{60}Co
 強度 : 約70 Bq
 面積 : 10cm角

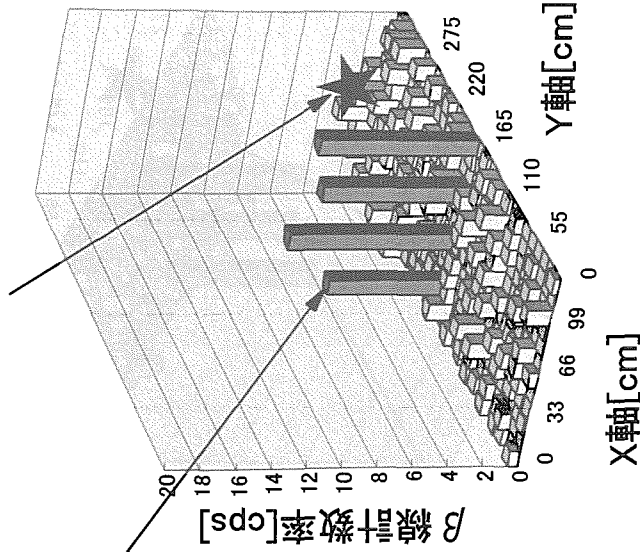
測定条件
 測定距離: 2cm
 測定時間: 30+30秒



(a) $\beta + \gamma$ 線の測定データ



(b) γ 線の測定データ



(c) β 線のデータ

図 20 外部線源存在下における実測データ(2)

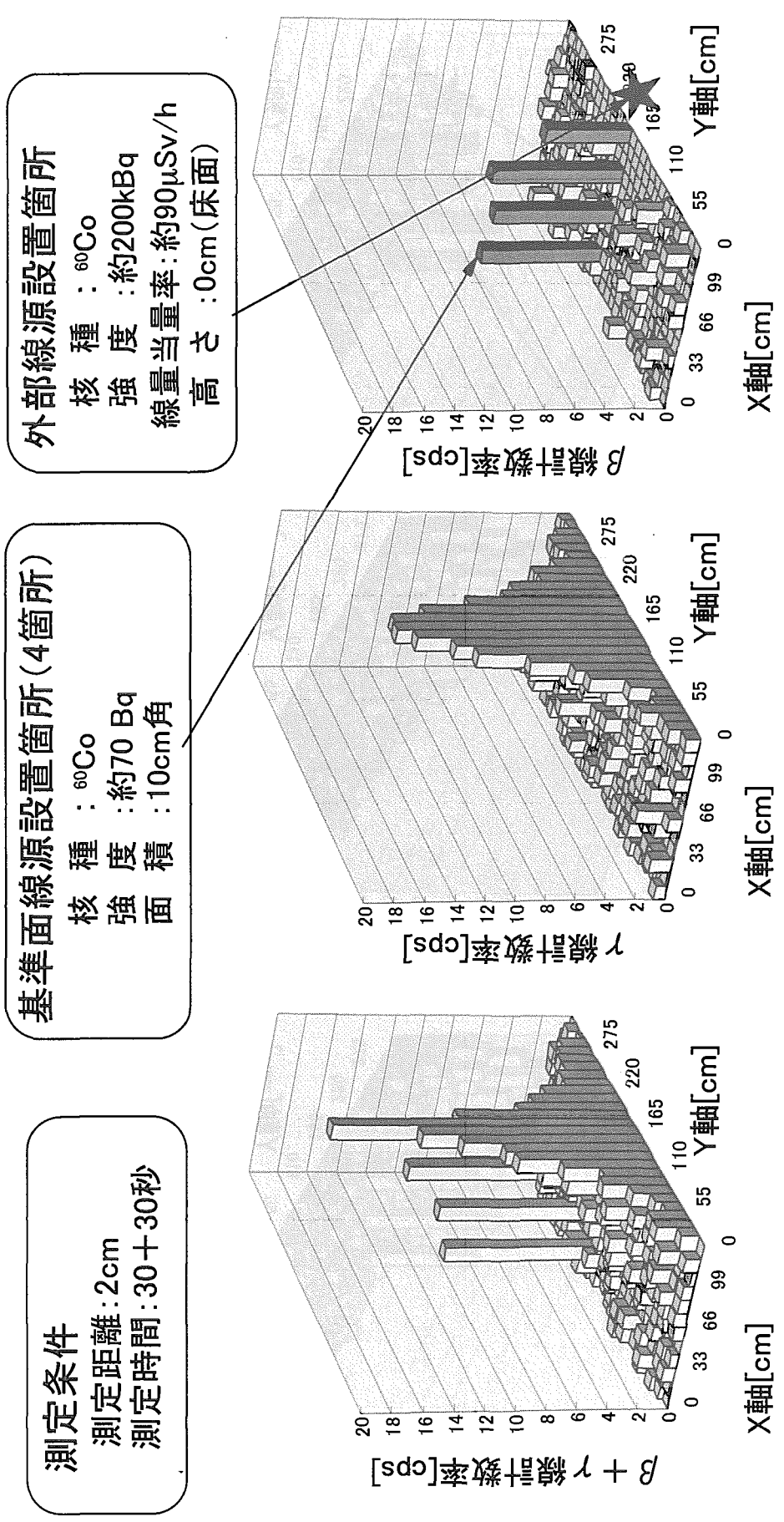


図 21 外部線源存在下における実測データ(3)

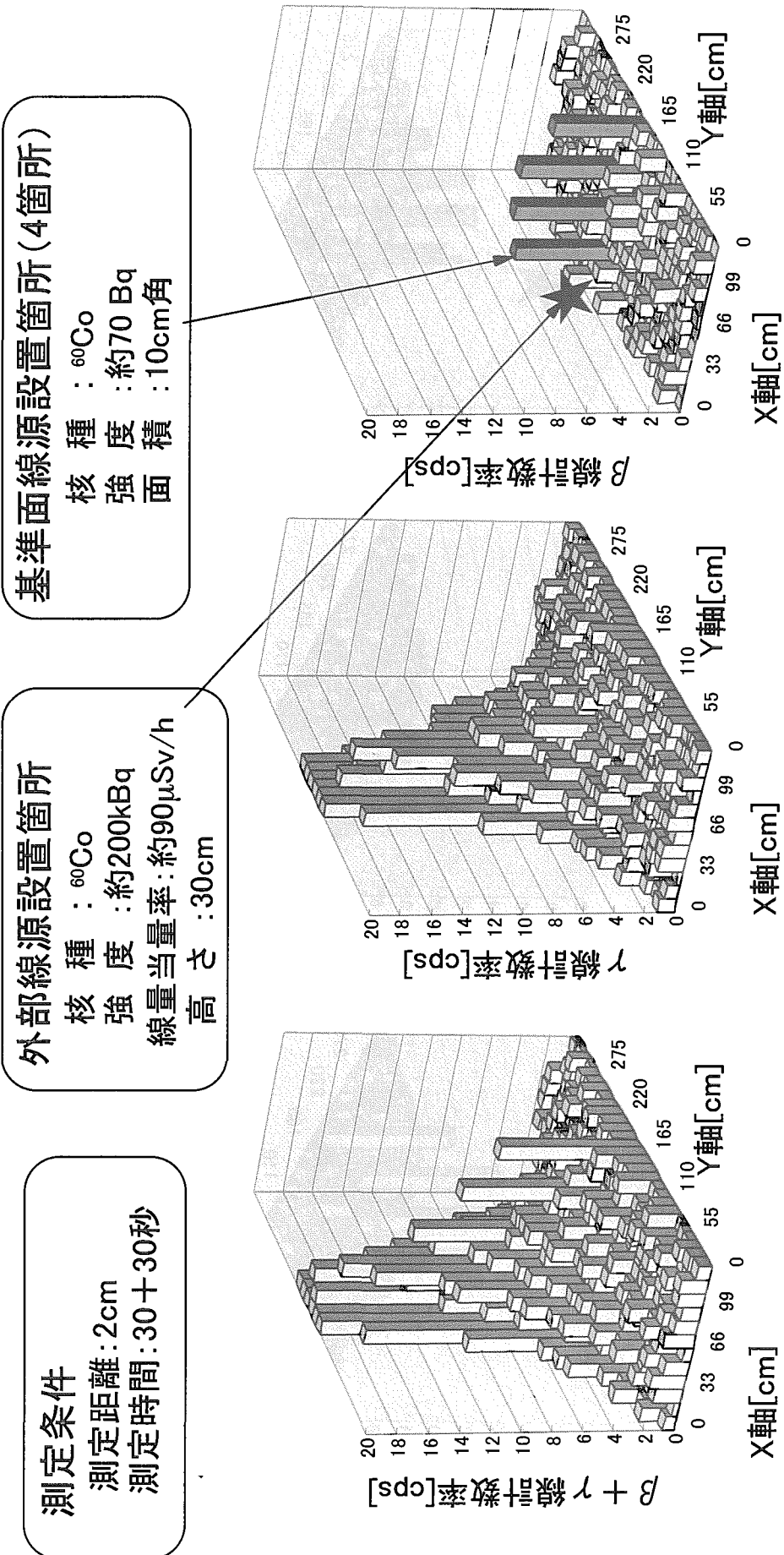


図 22 外部線源存在下における実測データ(4)

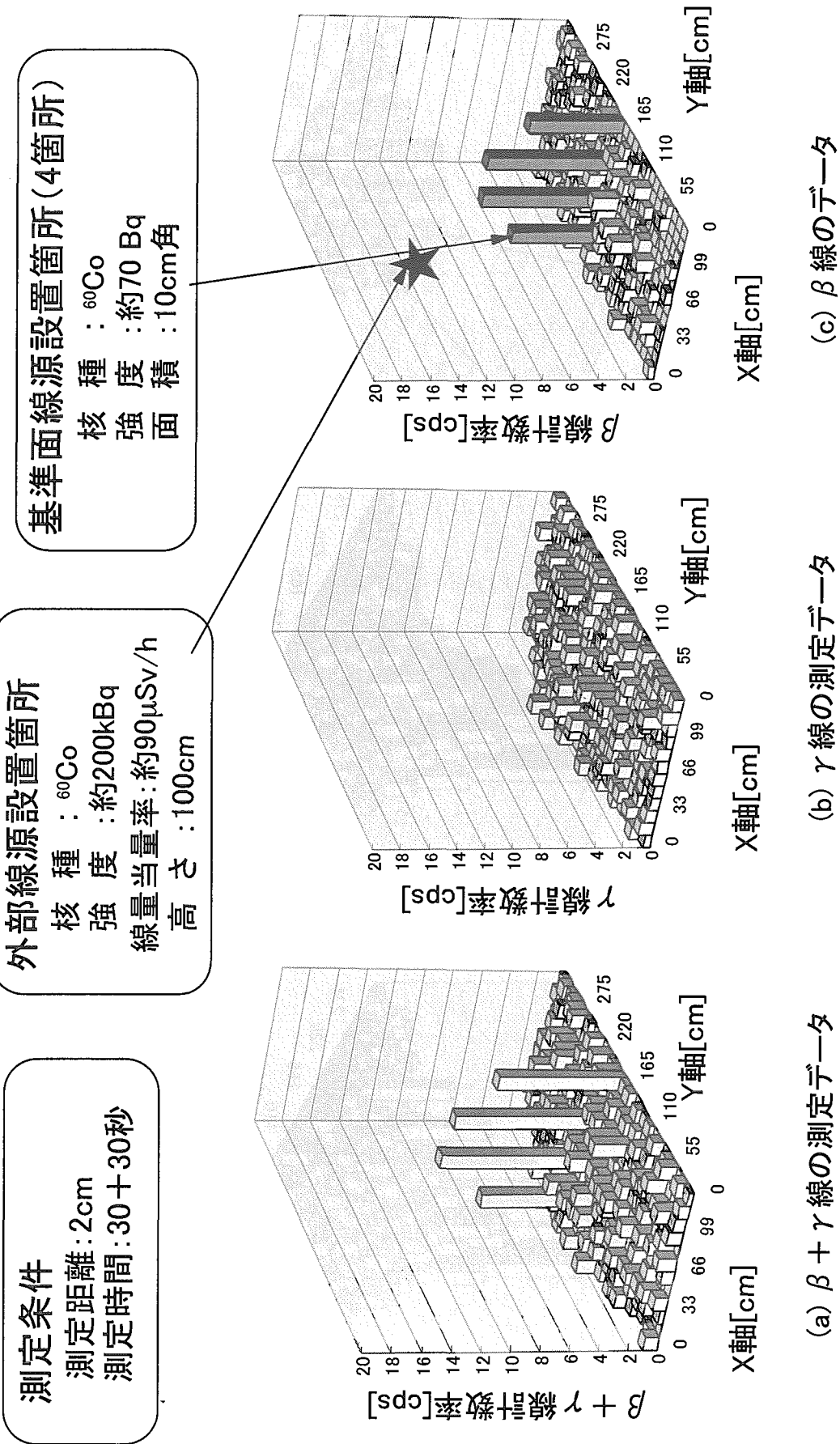


図 23 外部線源存在下における実測データ(5)

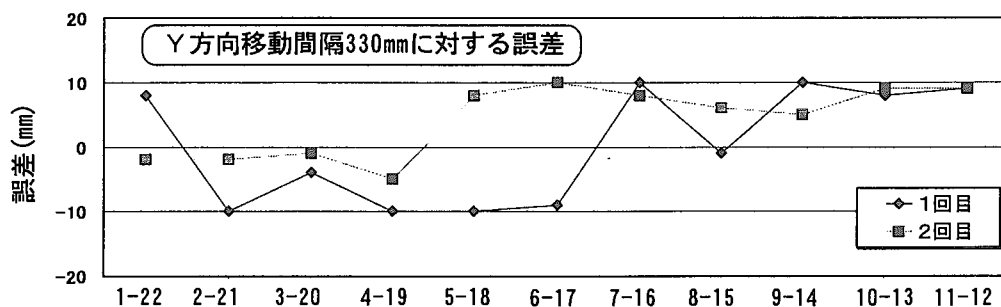
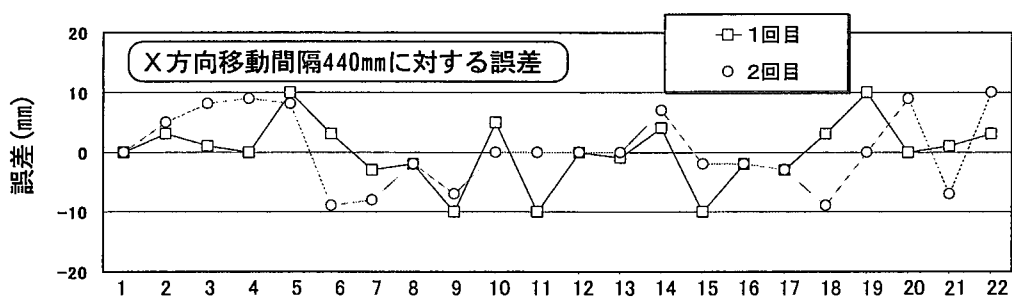
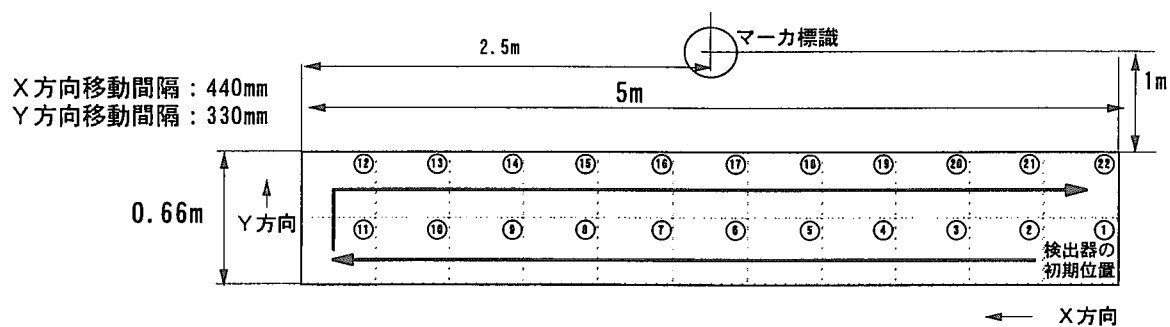
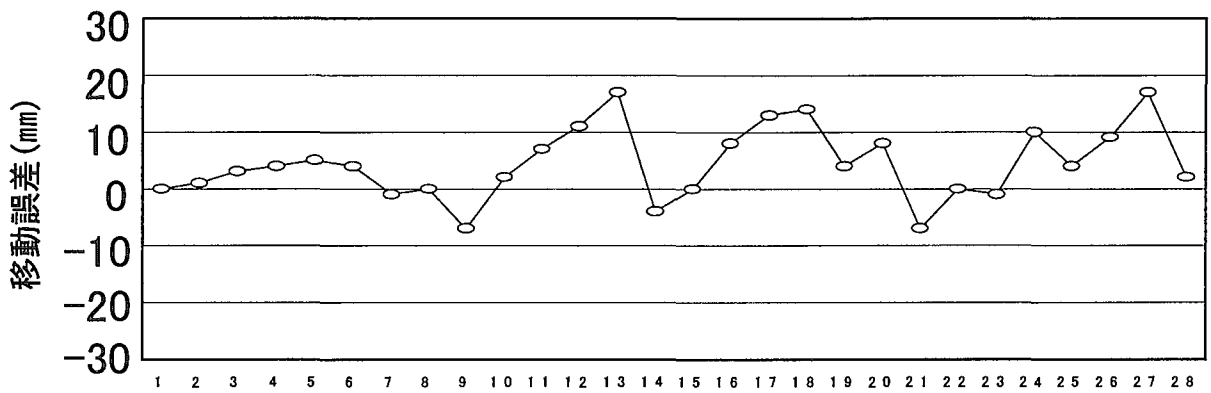
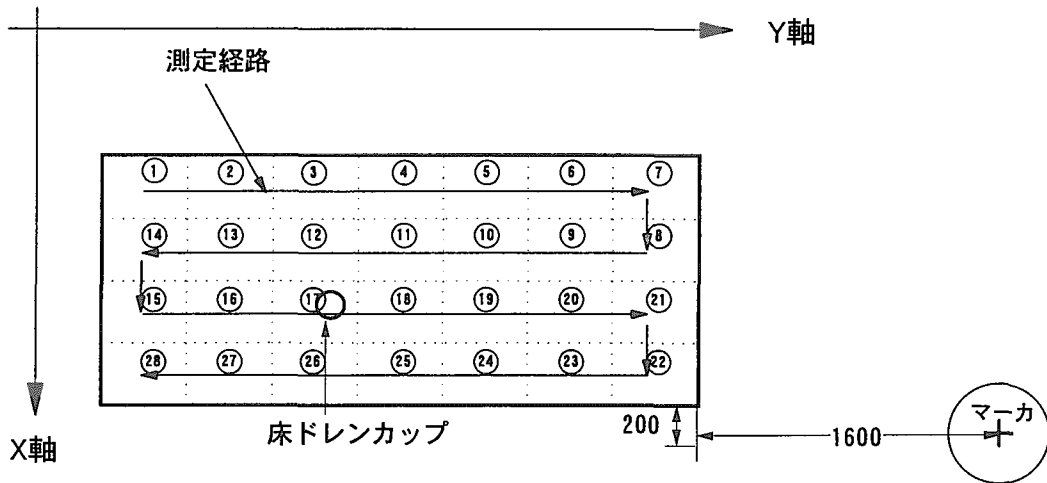
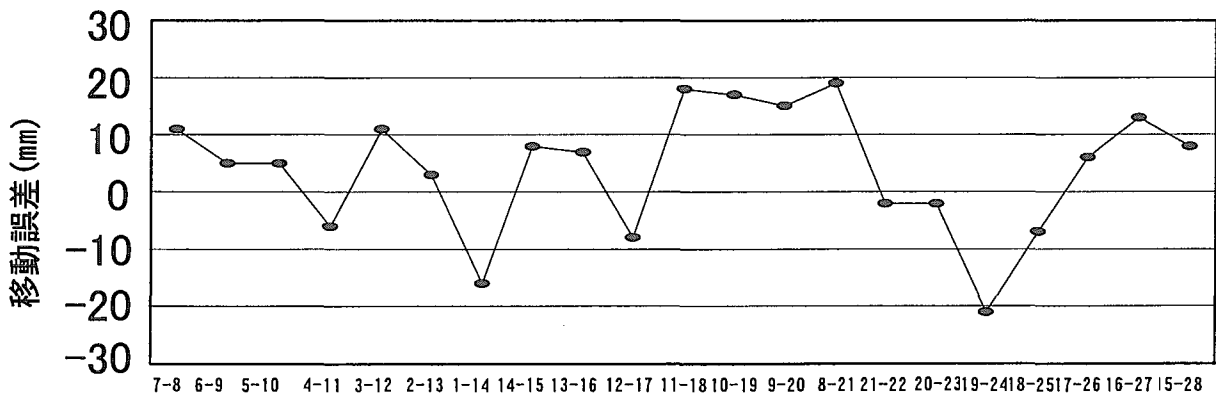


図 24 平坦な床面に対する移動誤差



(a) X方向移動距離の誤差



(b) 直進安定性 (Y方向の移動誤差)

図 25 傾斜面に対する移動誤差(床ドレンカップ周辺)

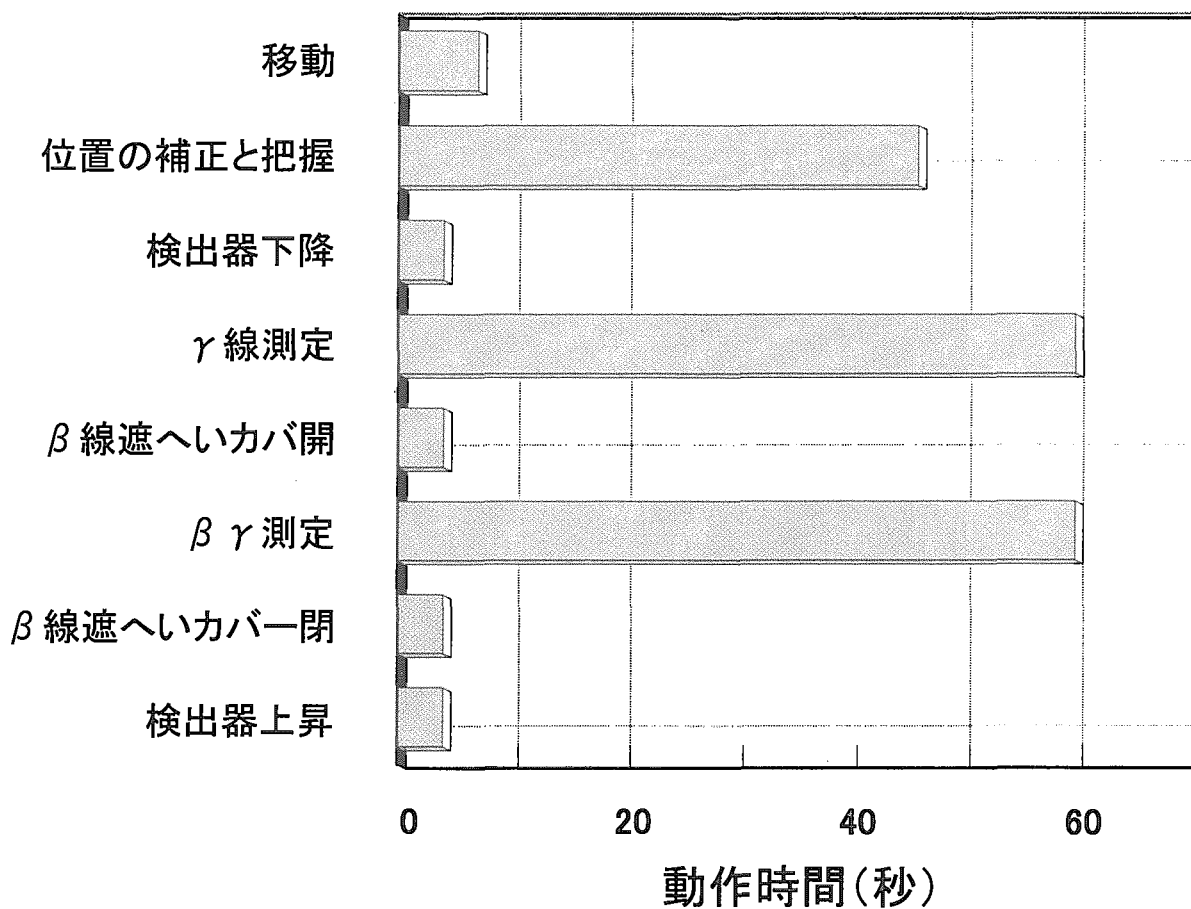


図 26 自律測定 of 動作時間の例

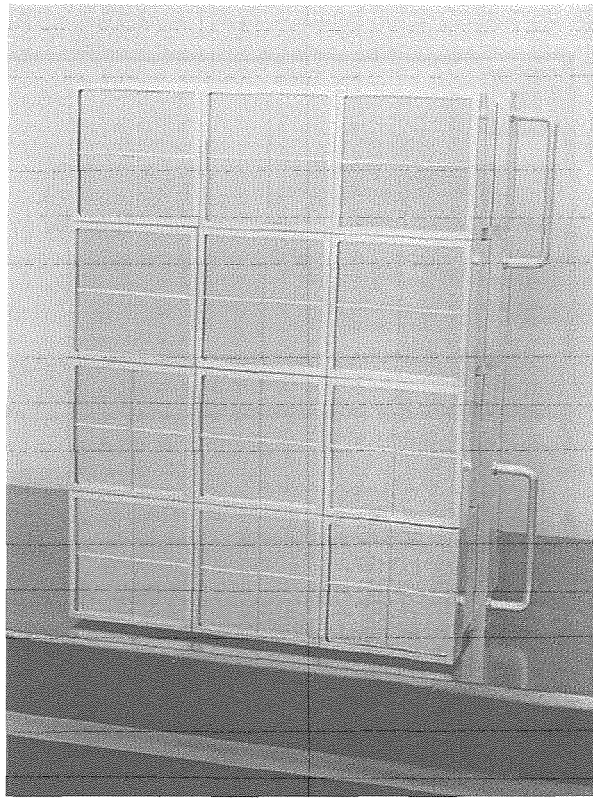
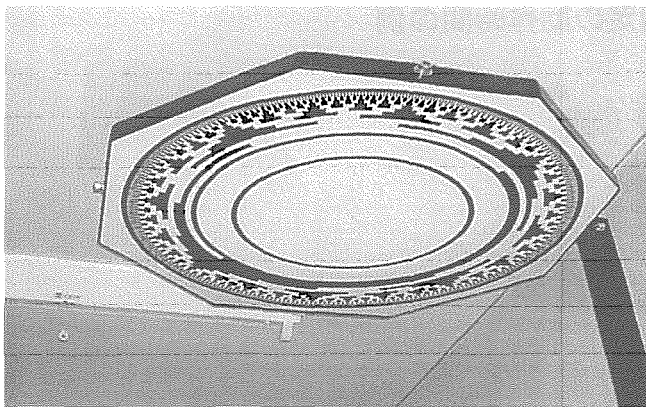
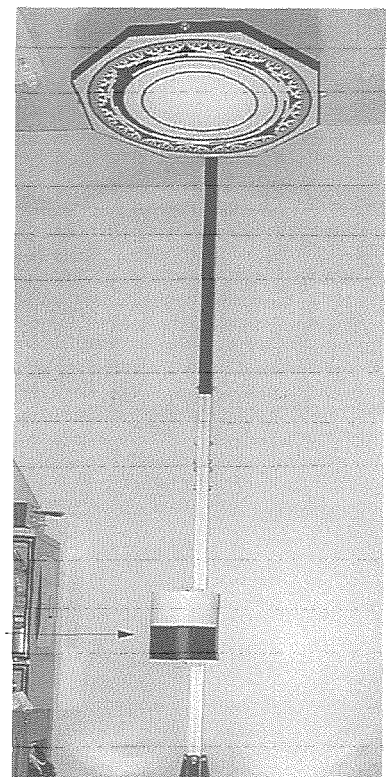


写真.1 集合検出器(検出面)



デジタル標識パターンの拡大



デジタル標識パターン

写真.2 デジタル標識の外観

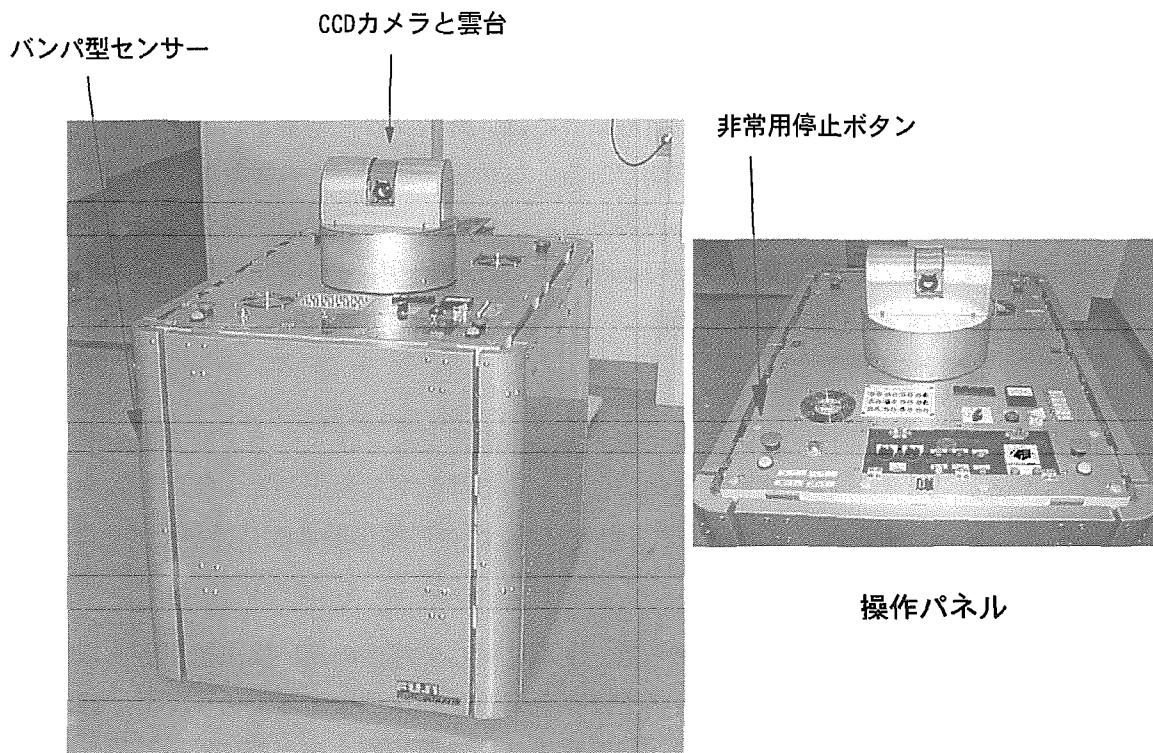


写真 3 自己位置同定システムを搭載した移動型放射能測定装置

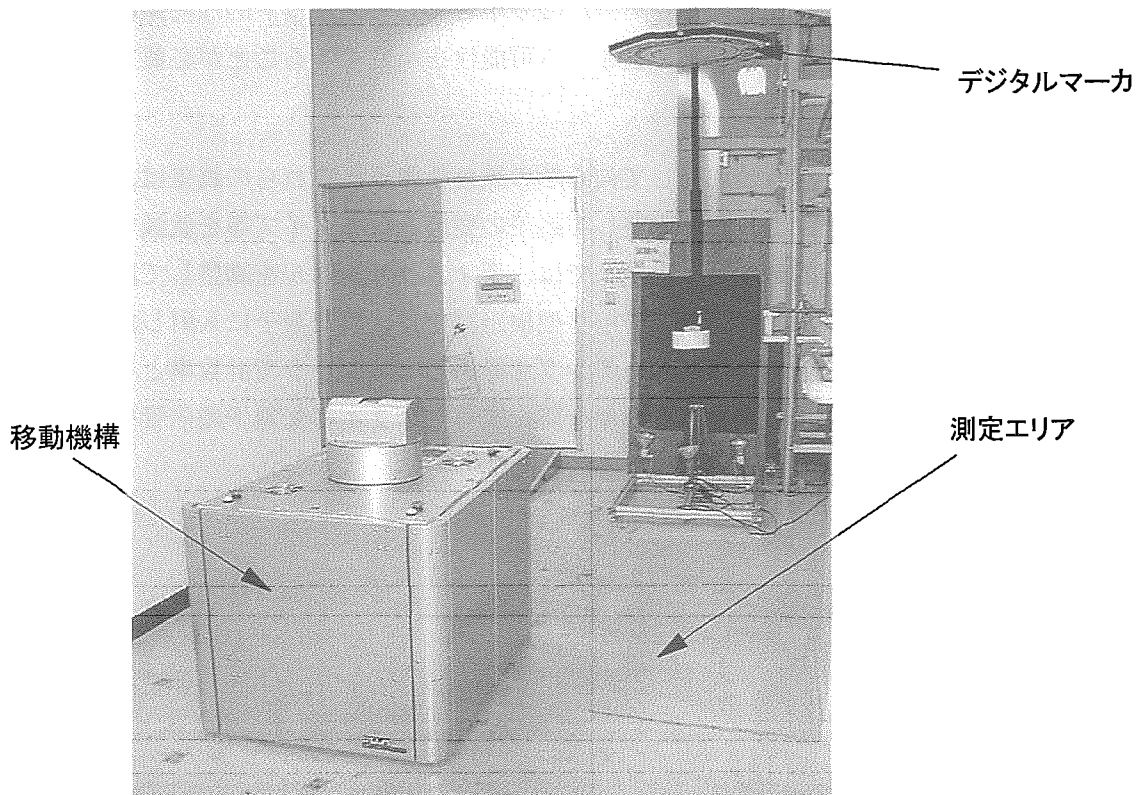


写真 4 自動測定の様子

付録-I 検出器に関する基本要件

放射能汚染分布の測定に用いる代表的な表面汚染計には、ガスフロー型やプラスチックシンチレータ型があり、 β 線の他に γ 線の検出が可能である。しかし、建家表面の放射能分布の測定では、 γ 線を主体にした測定よりも β 線による汚染分布の評価の方が汚染部位情報の取得及び検出感度の向上等を期待できる。また、低レベルの β 線による放射能汚染分布を精度良く測定するために、以下の条件を満たす検出器を選定した。

β 線に高感度な検出器

β 線に高感度な検出器としては、ガスフロー型や薄い検出素子のプラスチック型のものが現在主に使用されている。しかし、建家表面を自動的に測定する移動型放射能測定装置に搭載するためには、汎用性及びメンテナンスフリーが要求されるため、既存の検出器の改良等が必要となる。

γ 線に低い感度の検出器

β 線による放射能汚染分布の評価の観点からは、 γ 線に対して感度の低い検出器が望ましい。しかし、ガスフロー型や薄い検出素子のプラスチックシンチレータ型検出器であっても γ 線に対してわずかな感度を有しており、可能な限り γ 線の検出感度を低く押えるためには極薄型の検出素子を用いることが必要である。

スポット的な汚染の検出

放射能の低いスポット的な汚染を検出するためには、 β 線に対して高感度の検出器を用いることは勿論であるが、検出器の検出窓面積を可能な限り小さくしてスポット的な汚染の放射能が大きな検出窓面積で平均化（希釈）されて見逃される可能性を小さくすることが必要である。

ノイズ等の低減

放射線の計測においては、計数値に対して何らかの誤差を伴う。これらの誤差は、検出器や計測系等に起因する。そのため、これらを調整して誤差の要因となるノイズ等を低減し検出感度を上げることが必要であるが、この場合、計測系では、ディスクリレベルを調整して計数値の安定化を図る考慮が求められる。なお、プラスチック型検出器では、検出素子に入射した放射線によって発光した光が光電子増倍管で増倍され、アンプを経由してスケーラで計数率として表示されるので、この光電子増倍管による偶発的な事象を防止するため2本の光電子増倍管を用いて同時計数方式によりノイズの低減を図るべきである。

付録-II 移動機構の構成

移動機構の外寸法は、幅 80cm、長さ 110cm、高さ 80cm で、その重量は約 290kg である。本体フレームの 4 隅に 4 輪独立駆動型の車輪ユニットを配置し、バッテリー、各種センサ及び自動測定を制御する計算機等、操作パネル、操作ペンダント等で構成した。

駆動方式

車輪ユニットの駆動方式には、オフセット駆動輪による全方向移動方式を採用し、走行安定性を図った。また、車輪は、20mm 程度の段差の乗り越えを考慮し車輪径を 130mm とした。走行速度は、測定時には 100mm/sec、長距離走行時には 500mm/sec を目標とした。

自己位置同定システム

移動機構の上部には、デジタル標識パターンによる移動位置の把握と補正のための CCD カメラ及びこれを搭載するための雲台を取り付けた。CCD カメラは、白黒 38 万画素、12 倍電動ズーム式（オートフォーカス）を採用した。また、雲台の水平軸動作範囲は、-180 ~ 180 度以上、垂直軸動作範囲は、0 ~ 90 度以上とした。

センサー

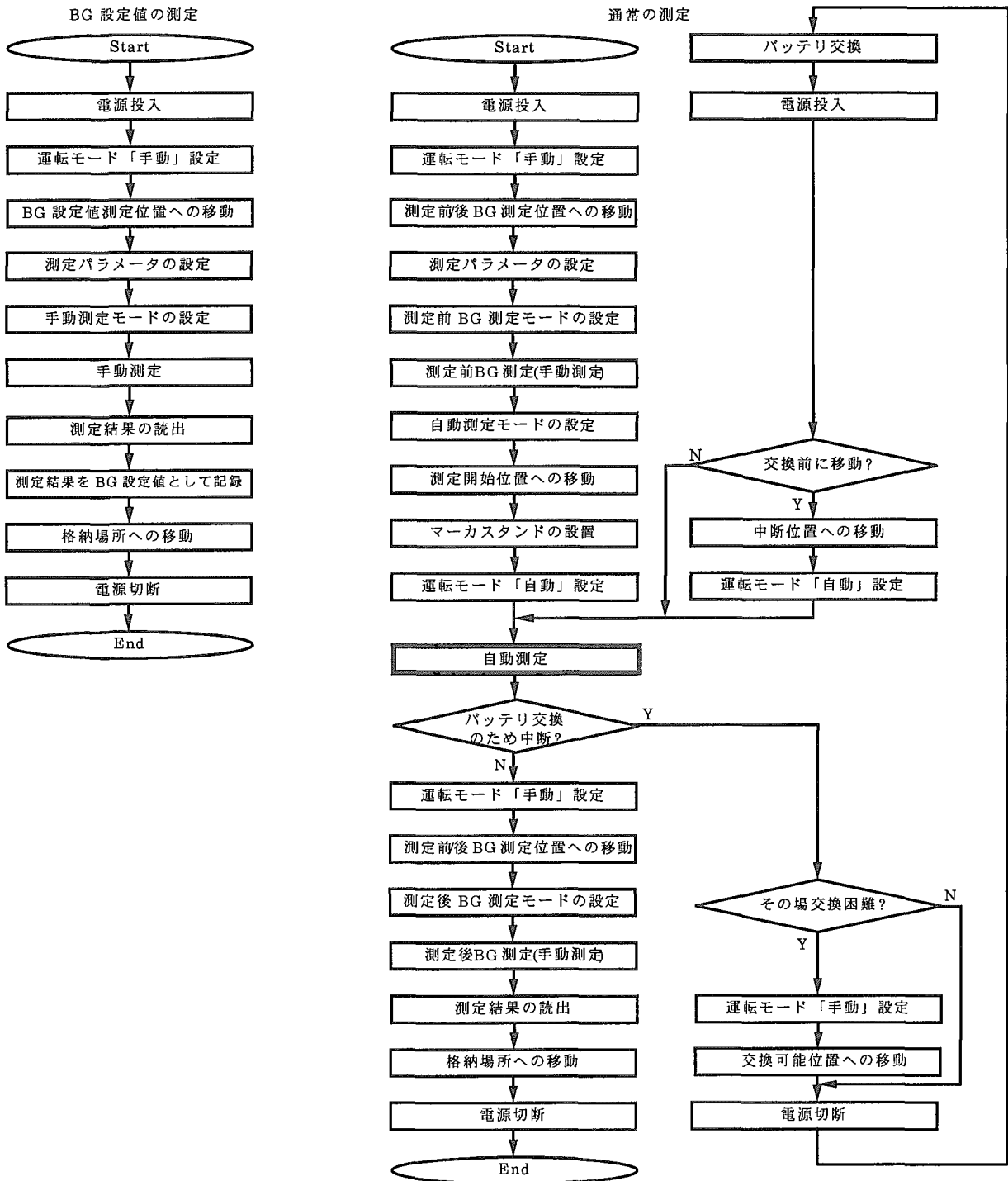
移動機構の側面は、すべて衝突防止用のバンパ型センサーを配置した。また、検出器の β 線遮へい板には、突起物検知器を取り付けた。

操作パネル

操作パネルは、電源の入切や測定モードの選択、自動スタート、一時停止等の移動機構の動作に関するスイッチ類と、検出器の上下機構、遮へい板の開閉機構等の検出器の個別動作に関するスイッチ類で構成した。また、表示機能として現在位置・測定総数等の表示を行う 7 桁表示器、検出器の動作状態を示す表示灯、バッテリー電圧計、障害物の異常検知表示等の表示灯類で構成するとともに、ジョイスティック用の操作ペンダントは、小型軽量の操作ボックスと長さ約 2m のケーブルで構成し、手動移動時にはケーブルを移動機構に接続した状態で操作する方式とした。

付録-III 装置の運転パターン

装置の基本的な運転パターンは、BG設定値の測定と通常の測定の2つのフローとした。基本的な運転パターンのフローを下図に示す。



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

$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$
 $1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$

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

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	$\text{m} \cdot \text{kg} / \text{s}^2$
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	$\text{N} \cdot \text{m}$
工率, 放射束	ワット	W	J / s
電気量, 電荷	クーロン	C	$\text{A} \cdot \text{s}$
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	$\text{V} \cdot \text{s}$
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	$^{\circ}\text{C}$	
光束	ルーメン	lm	$\text{cd} \cdot \text{sr}$
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	\AA
バ	b
バール	bar
ガロン	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$
 $1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$
 $1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$
 $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm}^3 / \text{s}^2 = 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s}^2$
 $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
 $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C} / \text{kg}$
 $1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$
 $1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$

(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, ヘクト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 $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} (\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g} / (\text{cm} \cdot \text{s}))$

動粘度 $1 \text{ m}^2 / \text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2 / \text{s})$

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

$1 \text{ cal} = 4.18605 \text{ J} (\text{計量法})$
 $= 4.184 \text{ J} (\text{熱化学})$
 $= 4.1855 \text{ J} (15^{\circ}\text{C})$
 $= 4.1868 \text{ J} (\text{国際蒸気表})$
 仕事率 1 PS (仏馬力)
 $= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{s}$
 $= 735.499 \text{ W}$

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

