

クリアランス検認測定等のための PLシンチレーションサーベイメータの製作

Production of Plastic Scintillation Survey Meter for
Clearance Verification Measurement

立花 光夫 白石 邦生 石神 努 富居 博行

Mitsuo TACHIBANA, Kunio SHIRAIKI, Tsutomu ISHIGAMI and Hiroyuki TOMII

バックエンド推進部門
廃止措置技術開発グループ

Decommissioning Technology Development Group
Nuclear Cycle Backend Directorate

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

クリアランス検認測定等のための PL シンチレーションサーベイメータの製作

日本原子力研究開発機構
バックエンド推進部門 バックエンド技術開発ユニット
立花 光夫・白石 邦生・石神 努・富居 博行⁺

(2008 年 1 月 8 日 受理)

原子力科学研究所では、原子力機構（日本原子力研究開発機構）の中期計画に従って、各種原子力施設の廃止措置を進めている。今後、原子力施設の解体の進捗に伴い、管理区域解除に係る建屋コンクリートの放射線測定やクリアランス検認測定の増加が予想される。このうち、管理区域解除の放射線測定については、これまで JPDR（動力試験炉）をはじめ小規模の原子力施設で行ってきたが、埋設配管等に残留する放射性物質からの放射線の影響で既存測定器では放射線測定が困難な場合が観られた。一方、クリアランス検認測定については、原子力機構において実施された経験はないが、今後、原子力施設の廃止措置に伴って多量のクリアランス対象物の発生が予想される。このため、管理区域解除に係る放射線測定やクリアランス検認測定に適用するために、PL シンチレーションサーベイメータ（以下、「PL 測定器」とする）を製作し、各種試験を実施した。

その結果、PL 測定器による放射能量の評価値は、既存測定器と同等の精度が得られることがわかった。これより、PL 測定器は、軽量で容易な操作性を有し、 γ 線を補償した測定を行えることから、クリアランス検認測定等に有効と考えられる。

原子力科学研究所（駐在）：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

+東海研究開発センター 原子力科学研究所 バックエンド技術部

Production of Plastic Scintillation Survey Meter for Clearance Verification Measurement

Mitsuo TACHIBANA, Kunio SHIRAIKI, Tsutomu ISHIGAMI and Hiroyuki TOMII⁺

Nuclear Cycle Backend Technology Development Unit

Nuclear Cycle Backend Directorate

Japan Atomic Energy Agency

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 8, 2008)

In the Nuclear Science Research Institute, the decommissioning of various nuclear facilities is carried out according to the plan for meeting the midterm goal of the Japan Atomic Energy Agency (JAEA). An increase in the clearance verification measurement of concrete on buildings and the radiation measurement for releasing controlled areas will be expected along with the dismantlement of nuclear facilities in the future. The radiation measurement for releasing controlled areas has been carried out in small-scale nuclear facilities including the JPDR (Japan Power Demonstration Reactor). However, the radiation measurement with an existing measuring device was difficult in effects of radiation from radioactive materials that remains in buried piping. On the other hand, there is no experience that the clearance verification measurement is executed in the JAEA. The generation of a large amount of clearance object will be expected along with the decommissioning of the nuclear facilities in the future. The plastic scintillation survey meter (hereafter, 'PL measuring device') was produced to apply to the clearance verification measurement and the radiation measurement for releasing controlled areas. The basic characteristic test and the actual test were confirmed using the PL measuring device.

As a result of these tests, it was found that the evaluation value of radioactivity with the PL measuring device was accuracy equal with the existing measuring device. The PL measuring device has feature of the existing measuring device with a light weight and easy operability. The PL measuring device can correct the gamma ray too. The PL measuring device is effective to the clearance verification measurement of concrete on buildings and the radiation measurement for releasing controlled areas.

⁺Department of Decommissioning and Waste Management, Nuclear Science Research Institute, Tokai Research and Development Center

Keywords: Decommissioning, Plastic Scintillation Survey Meter, Clearance Verification Measurement, Release of Controlled Area

This is a blank page

目 次

1.はじめに	1
2. PL測定器の概要	1
2.1 検出部	1
2.2 測定ユニット	2
2.3 測定原理及び評価方法	2
2.4 測定方法	3
3. 基本特性試験	4
3.1 線量率特性試験	4
3.2 エネルギー特性試験	5
3.3 方向特性試験	5
3.3.1 水平方向特性	5
3.3.2 垂直方向特性	6
3.4 感度試験	7
4. 実地適用試験	7
4.1 バックグラウンドの測定	7
4.2 冶金特別研究施設の汚染評価	8
5. まとめ	9
謝 辞	9
参考文献	9
付録 1 放射能の評価方法	29
付録 2 BG補正係数の評価	31
付録 3 表面密度の評価方法	32

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Outline of PL Measuring Device	1
2.1 Detector	1
2.2 Measurement Unit	2
2.3 Principle of Radiation Measurement and Methods of Evaluation	2
2.4 Methods of Radiation Measurement	3
3. Basic Characteristic Test	4
3.1 Dose Rate Characteristics Test	4
3.2 Energy Response Test	5
3.3 Directional Characteristics Test	5
3.3.1 Characteristics of Horizontal Direction	5
3.3.2 Characteristics of Vertical Direction	6
3.4 Response Characteristic Test	7
4. Actual Test	7
4.1 Background Measurement	7
4.2 Contamination Evaluation of Metallurgical Test Laboratory	8
5. Conclusion	9
Acknowledgement	9
References	9
Appendix 1 Evaluation Methods of Radioactivity	29
Appendix 2 Evaluation of BG correction factor	31
Appendix 3 Evaluation methods of surface contamination	32

図表リスト

- 表 1 PL 測定器の基本仕様
- 表 2 測定結果のデータ構造
- 表 3 PL 測定器 No.1 の計数効率
- 表 4 実地適用試験に使用した既存測定器の仕様

- 図 1 PL 測定器の基本構成
- 図 2 PL 測定器による建屋床面の測定概念
- 図 3 検出部内部の基本構成
- 図 4 検出部の外観
- 図 5 測定ユニットの外観
- 図 6 PL 測定器のシステム構成
- 図 7 建屋コンクリート測定時の測定原理
- 図 8 線量率特性試験における試験体系
- 図 9 基準線量当量率の測定方法
- 図 10 線量率特性試験の結果 (PL 測定器 No.1)
- 図 11 エネルギー特性試験における検出部と線源との位置関係
- 図 12 PL 測定器 No.1 のエネルギー特性
- 図 13 水平方向特性試験における試験体系
- 図 14 水平方向特性試験における検出部の中心位置と水平回転軸
- 図 15 水平方向特性試験の結果 (PL 測定器 No.1(CH1))
- 図 16 水平方向特性試験の結果 (PL 測定器 No.1(CH2))
- 図 17 既存測定器の方向特性
- 図 18 垂直方向特性試験における試験体系
- 図 19 垂直方向特性試験における検出部の中心位置と垂直回転軸
- 図 20 垂直方向特性試験の結果 (PL 測定器 No.1(CH1))
- 図 21 垂直方向特性試験の結果 (PL 測定器 No.1(CH2))
- 図 22 感度試験における検出部と線源との位置関係
- 図 23 建屋コンクリートの BG 測定の結果 (PL 測定器 No.1(CH1))
- 図 24 建屋コンクリートの BG 測定の結果 (PL 測定器 No.1(CH2))
- 図 25 冶金特別研究施設 11 号室の汚染分布図 (床面)
- 図 26 PL 測定器と既存測定器の放射能比

Tables and Figures Captions

- Table 1 Basic specification of PL measuring device
- Table 2 Data structures of measurement results
- Table 3 Counting Efficiency of PL measuring device No.1
- Table 4 Specification of existing measuring devices used in actual test
- Figure 1 Basic configuration of PL measuring device
- Figure 2 Measurement concepts of floor on building with PL measuring device
- Figure 3 Basic configurations in inner part of detector
- Figure 4 Appearance of detector
- Figure 5 Appearance of measurement unit
- Figure 6 System configuration of PL measuring device
- Figure 7 Measurement concept for measuring concrete on building
- Figure 8 Examination system in dose equivalent rate characteristic test
- Figure 9 Measurement method of reference dose equivalent rate
- Figure10 Result of dose equivalent rate characteristic test (PL measuring device No.1)
- Figure11 Positional relation between detector and radiation source in energy characteristic test
- Figure12 Energy characteristic test of PL measuring device No.1
- Figure13 Examination system in horizontal characteristic test
- Figure14 Center position of detector and horizontal rotation axis in horizontal characteristic test
- Figure15 Result of horizontal characteristic test (PL measuring device No.1 (CH1))
- Figure16 Result of horizontal characteristic test (PL measuring device No.1 (CH2))
- Figure17 Direction characteristic of existing measuring devices
- Figure18 Examination system in vertical direction characteristic test
- Figure19 Center position of detector and vertical rotation axis in vertical characteristic test
- Figure20 Result of vertical characteristic test (PL measuring device No.1 (CH1))
- Figure21 Result of vertical characteristic test (PL measuring device No.1 (CH2))
- Figure22 Positional relation between detector and radiation source in sensitivity test
- Figure23 Result of BG measurement of concrete on building (PL measuring device No.1 (CH1))
- Figure24 Result of BG measurement of concrete on building (PL measuring device No.1 (CH2))
- Figure25 Contamination distribution map of room No.11 in metallurgical test laboratory (floor)
- Figure26 Ratio of radioactivity measured by PL measuring device and existing measuring device

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下、「原子力機構」とする）が達成すべき業務運営に関する目標（中期目標）①においては、原子力施設の設置者として、保有する原子力施設の廃止措置を、その責任でもって、安全確保を大前提に、計画的かつ効率的に実施することの必要性が示された。この中期目標に従って、原子力機構では、中期目標を達成するための計画（中期計画：平成 17 年度～平成 21 年度）②において、使命を終えた施設及び老朽化した施設については、効率的な廃止措置を進めるとともに、機能の類似・重複する施設については、機能の集約・重点化を進め、不要となった施設を効率的かつ計画的に廃止することとしている。

原子力科学研究所（以下、「原科研」とする）では、原子力機構の中期計画に従って、ホットラボ③、セラミック特研、Pu 研究 2 棟、冶金特別研究施設、再処理試験室、同位体分離研究室、高温ガス炉臨界実験装置(VHTRC)、JRR2、再処理特別研究棟(JRTF)等の廃止措置を進めている。

このため、今後、これら原子力施設の廃止措置の進捗に伴い、管理区域解除に係る建屋コンクリートの放射線測定やクリアランス検認測定の増加が予想される。

しかし、これまで、原科研においては、管理区域解除の放射線測定について、JPDR（動力試験炉）をはじめとする小規模の原子力施設で行ってきたが、埋設配管等に残留する放射性物質からの放射線の影響の為に既存測定器では測定の困難な場合が観られた④、⑤。このため、埋設配管の汚染状況を把握するために、配管内部を検出器が移動することにより配管内部の汚染分布を効率的に直接測定する技術の開発が行われた⑥。また、バックグラウンド計数の変動に影響される低レベル放射線を自動測定することを目的に、測定対象から放出される β 線と γ 線を分離して、 β 線のみを評価する大面積の積層型検出器を搭載した全方向に移動可能な自動走行を行うロボットを開発した⑦。

ここでは、多種多様な原子力施設での管理区域解除に係る建屋コンクリートの放射線測定やクリアランス検認測定に適用することを目的に、軽量で容易な操作性のある既存測定器の特徴を有する、 γ 線の補償が可能な PL シンチレーションサーベイメータ（以下、「PL 測定器」とする）による基本特性試験及び実地適用試験の結果について報告する。

2. PL 測定器の概要

PL 測定器は、検出部と測定ユニットで構成されている。図 1 に PL 測定器の基本構成を示す。PL 測定器による建屋床面の放射線測定については、上部に測定ユニットを搭載し、下部に検出部を取り付けた床面測定用カートを移動しながら行うことができる。図 2 に PL 測定器による建屋床面の測定概要を示す。表 1 に PL 測定器の基本仕様を示す。

2.1 検出部

検出部は、PL シンチレータ、波長シフトファイバ（ β 線用：3 本、 γ 線用：3 本）、光電子増倍管（ β 線用：3 本、 γ 線用：3 本）、遮光膜から構成されている。

なお、検出部は、チャンネル1（以下、「CH1」とする）とチャンネル2（以下、「CH2」とする）の上下二つに分かれている。

検出部の寸法は $300\times180\times155\text{mm}$ で、重量が 2.4kg であり、検出窓面積は $100\text{cm}^2\times2$ （チャンネル）である。

また、検出部は、 β 線用PLシンチレータのある β 線検出部（1層目）と γ 線用PLシンチレータのある γ 線検出部（2層目）の2層式となっている。

図3に検出部内部の基本構成、**図4**に検出部の外観を示す。

2.2 測定ユニット

測定ユニットには、パソコン、パソコン用ACアダプター、バッテリー（2台）、バッテリー用ACアダプター（2台、バッテリーの充電用）が内蔵されている。PL測定器は、測定ユニットに内蔵したバッテリーにより約6時間の動作が可能である。

測定ユニットの寸法は、 $310\times270\times80\text{mm}$ で、重量が 4.6kg である。**図5**に測定ユニットの外観、**図6**にPL測定器のシステム構成の概要を示す。

測定条件等の設定については、測定ユニットで行い、測定開始の信号は、検出部の測定開始ボタン又は測定ユニットの両方から行うことができる。また、測定方法（走査／固定）についても、測定ユニット又は検出部の測定方法切替スイッチ（**図4**参照）により選択できる。

2.3 測定原理及び評価方法

(1)測定原理

PL測定器の測定原理を以下に示す。**図7**に建屋コンクリート測定時の測定原理を示す。

対象物からPLシンチレータに入射した放射線により、その内部で蛍光（シンチレーション）パルスを発生し、発生した蛍光パルスはPLシンチレーション側面に配置した波長シフトファイバに入射する。波長シフトファイバは垂直に入射した蛍光パルスを吸収して再発光パルスを発生する。さらに、再発光パルスは、波長シフトファイバを通して光電子増倍管に伝送され、計数される^{(8),(9)}。

なお、検出部では、CH1とCH2の間に設置した光電子増倍管と各チャンネルの側面に設置した光電子増倍管によりそれぞれ同時計数を行っている。

さらに、1層目の β 線検出部において対象物からの β 線と γ 線を計数し、2層目の γ 線検出部において対象物からの β 線を1層目と2層目の間に設置した β 線遮へい板（厚さ 1mm のアルミ板）により遮へいし、対象物からの γ 線のみを計数する。

1層目の計数値から2層目の計数値を差し引く事により、1層目の β 線検出部において、BGを補償した対象物の β 線放射能を評価でき、2層目の γ 線検出部においては対象物の γ 線放射能を評価できる。

これより、PL測定器は、BGを補償したコンクリート表面の β 線を測定して管理区域解除を行う場合の放射線測定に適用可能であるとともに、対象物の内部汚染からの γ 線を測定するクリア

ランス検認測定等にも適用可能である。

(2)評価方法

PL 測定器の各検出部の正味計数率の評価方法を以下に示す。

β 線検出部（1層目）における β 線正味計数率

β 線検出部(CH1)では、予め評価した BG 補正係数 ($\alpha 1$ 、付録 2 参照) を用いて、 β 線検出部と γ 線検出部のグロス計数率より対象物からの β 線正味計数率 ($NET_{Bch1}(s^{-1})$) を次のように評価する。

$$NET_{Bch1} = GRS_{Bch1} - \alpha 1 \times GRS_{Gch1}$$

ここで、

GRS_{Bch1} : β 線検出部のグロス計数率 (s^{-1})

$\alpha 1$: PL シンチレータの厚みの違いによる BG 計数率の BG 補正係数

GRS_{Gch1} : γ 線検出部のグロス計数率 (s^{-1})

γ 線検出部（2層目）の γ 線正味計数率

γ 線検出部(CH1)では、1 層目と 2 層目の間に設置した β 線遮へい板により対象物からの β 線を遮へいすることにより、対象物からの γ 線正味計数率 ($NET_{Gch1}(s^{-1})$) を次のように評価する。

$$NET_{Gch1} = GRS_{Gch1} - BG_{Gch1}$$

ここで、

BG_{Gch1} : γ 線検出部の BG 計数率 (s^{-1})

2.4 測定方法

PL 測定器には、走査測定と固定測定の 2 種類の測定方法がある。

走査測定では、検出部により対象物表面を一定速度（時定数に応じた速度）で移動しながら対象物の放射線を計数し、その最大計数率を示す位置を特定する。

測定結果については、チャンネル毎に時定数（1~60s）で規定する移動時間でのグロス計数率（平均、 s^{-1} ）、正味計数率（平均、 s^{-1} ）、表面密度（ Bq/cm^2 、付録 3 参照）として測定ユニットのパソコンモニタに、時定数に応じた時間の間表示されるとともに、測定時間（1~60,000s）の最大値が同一画面に表示される。また、検出部には、計数率等（グロス計数率、正味計数率、表面密度）の大きさに応じて測定値レベル表示 LED が点滅する。

さらに、測定ユニットのパソコンには、測定結果として、対象物番号、測定箇所番号、測定者

名、時定数、測定日時、最大計数率が保存される（表2参照）。

固定測定では、対象物表面の任意の位置に検出部を固定し、設定した測定時間（1～10,000s）の計数を積算する。測定結果は、測定時間に応じグロス計数率、正味計数率、汚染密度として測定ユニットのパソコンモニタに表示される。測定ユニットのパソコンには、対象物の重量、測定結果等（表2参照）が記録される。正味計数率の評価方法は、2.3(2)に示す通りである。表面密度の評価方法は、付録3に示す通りである。

さらに、補助機能としてBG測定モード、校正測定モードがある。

BG測定モードでは、固定測定モードで特定位置におけるBGを測定（1～10,000s）する。測定ユニットのパソコンには、測定時間、BG計数率、BG補正係数が記録される。なお、BG補正係数は、 β 線用PLシンチレータ（厚さ1mm）と γ 線用PLシンチレータ（厚さ3mm）の厚さの違いによるBGの γ 線計数率の違いを補正するためのものである（付録2参照）。

校正測定モードでは、予め線源情報（核種、線種(β 線/ γ 線)、半減期、校正日、線源強度、等)を登録し、固定測定モードで β 線検出部又は γ 線検出部で登録した線源を用いて測定し、その結果より換算係数（Bq/c $m^2 \cdot s^{-1}$ ）を算出する。測定ユニットのパソコンには、線源情報に加えて、線源距離、測定時間、計数率、BG計数率、換算係数が記載される。 β 線検出部の校正測定では、遮へい板の有る場合とない場合について測定を実施し、その時の計数率の違いから換算係数を算出する。

3. 基本特性試験

PL測定器の基本特性を把握するため、線量率特性試験、エネルギー特性試験、方向特性試験、感度試験を実施した。各種試験における試験方法及び試験結果を以下に記す。

3.1 線量率特性試験

(1) 試験方法

γ 線ビームの中心軸上に γ 線源（ ^{60}Co ）を設置し、PL測定器の検出部中心位置（検出器窓正面は γ 線源を向いている）の基準線量当量率（基準とする1cm線量当量率）を $1\mu\text{Sv/h}$ から $10\mu\text{Sv/h}$ まで変化させ、検出部より設定した各基準線量当量率において60s間測定した。基準線量当量率の設定は、検出部を固定し、 γ 線源を移動させ、検出部と γ 線源間の距離を変化（860～2,790mm）させることにより行った。

なお、検出部中心位置の基準線量当量率については、検出部中心位置にShonka-Wyckoff型電離箱（EXRADIN社、model A6）を設置し、 γ 線源の位置を変化させ、RAMTEC1000D型線量計（東洋メディック株）により測定した。基準線量当量率の測定に使用した機器は、計量法第137条第1項により証明書の交付（2006/3）を受けた二次標準器である。

図8にPL測定器の線量率特性試験における試験体系、図9に基準線量当量率の測定方法を示す。

(2) 試験結果

図 10 に PL 測定器 No.1 の線量率特性試験の試験結果を示す。その結果、 β 線検出部(CH1、CH2)、 γ 線検出部(CH1、CH2)とも線量当量率と正味計数率の相関関係は、それぞれ $104.1(s^{-1}/(\mu Sv/h))$ 、 $101.9(s^{-1}/(\mu Sv/h))$ 、 $197.6(s^{-1}/(\mu Sv/h))$ 、 $192.1(s^{-1}/(\mu Sv/h))$ となり、綺麗な直線性が保たれていることがわかった。

なお、600s 間 BG を測定した結果、 β 線検出部(CH1、CH2)においてそれぞれ $10.7s^{-1}$ 、 $10.3s^{-1}$ 、 γ 線検出部(CH1、CH2)においてそれぞれ $24.7s^{-1}$ 、 $23.4s^{-1}$ であった。

3.2 エネルギー特性試験

(1) 試験方法

各種放射線のエネルギーの違いによる PL 測定器の β 線計数効率を測定することにより、PL 測定器のエネルギー特性を把握した。試験では、検出部表面と各種線源間の距離を 5mm とし、 $^{14}C(156keV)$ 、 β 線放出率 : $1.1E+2s^{-1}/4\pi$ (1981/5/25)、 $^{60}Co(318keV)$ 、 β 線放出率 : $8.6E+2s^{-1}/4\pi$ (2005/9/16)、 $^{36}Cl(709keV)$ 、 β 線放出率 : $1.1E+2s^{-1}/4\pi$ (1981/5/25)) の β 線源を PL 測定器の中央に設置し、それぞれ 300s、60s、300s 間測定した。図 11 にエネルギー特性試験における検出部と線源の位置関係を示す。

(2) 試験結果

測定結果より評価した各エネルギーにおける計数効率は、 $156keV(^{14}C)$ のとき 5.0%、 $318keV(^{60}Co)$ のとき 17.6%、 $709keV(^{36}Cl)$ のとき 25.9% となった。

以上の結果を元に作成した PL 測定器 No.1 のエネルギー特性を図 12 に示す。

3.3 方向特性試験

検出部の水平及び垂直の 2 平面について γ 線による方向依存性を調べた。各方向特性の試験方法及び試験結果について以下に記す。

3.3.1 水平方向特性

(1) 試験方法

検出部中心位置から 860mm 離れた位置に γ 線源 (^{60}Co) を設置し、検出部を 0deg (検出窓正面からの照射) から 315deg (検出部の左側からの照射を 90deg、右側からの照射を 270deg とする) まで水平回転軸を中心に 45deg 毎に回転し、検出部により 60s 間測定した。

なお、検出部中心位置における基準線量当量率は $10 \mu Sv/h$ とした。基準線量当量率は、 γ 線源から検出部中心位置に Shonka-Wyckoff 型電離箱 (EXRADIN 社、model A6) を設置し、RAMTEC1000D 型線量計 (東洋メディック株) により測定した。基準線量当量率の測定に使用した機器は、計量法第 137 条第 1 項により証明書の交付 (2006/3) を受けた二次標準器である。

図 13 に水平方向特性試験における試験体系を示す。また、図 14 に水平方向特性試験における

検出部の中心位置と水平回転軸との関係を示す。

(2) 試験結果

図 15 に規格化した PL 測定器 No.1 (CH1) の水平方向特性試験の結果を示す。

図に示すように β 線検出部(CH1)は、90deg で 67.9% (0deg で規格化) の正味計数率となり、180deg では 80.7%の正味計数率となった。最も方向依存性が強いのは 62.7%の 270deg 方向であった。

γ 線検出部(CH1)は、90deg で 77.0%の正味計数率となり、180deg で 88.8%の正味計数率となった。最も方向依存性が強いのは 71.9%の 270deg 方向であったが、 β 検出部と比べて約 10%良い結果となった。

図 16 に規格化した PL 測定器 No.1 (CH2) の水平方向特性試験の結果を示す。図に示すように β 線検出部(CH2)は、90deg で 66.0%の正味計数率となり、180deg で 79.8%の正味計数率となった。最も方向依存性が強いのは 61.9%の 270deg 方向であった。

γ 線検出部(CH2)は、90deg で 77.1%の正味計数率となり、180deg で 87.8%の正味計数率となった。最も方向依存性が強いのは 71.7%の 270deg 方向であった。

図 15 と **図 16** からわかるように CH1 と CH2 では、水平方向特性にほとんど違いは見られなかった。**図 17** に既存測定器の方向特性を示す。これより、前面、後面の計数が少ない GM 計数管式サーベイメータや後面の計数が少ない NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータの方向特性に比べて PL 測定器はかなり方向依存性が少ないとわかった。

β 線検出部(CH1、CH2)の規格化した正味計数率の平均値は、それぞれ 0.796、0.788 となり、標準偏差はそれぞれ 0.123、0.127 となった。また、 γ 線検出部(CH1、CH2)の規格化した正味計数率の平均値は、それぞれ 0.873、0.869 となり、それぞれの標準偏差は 0.0928、0.0929 となった。

なお、600s 間 BG を測定した結果、 β 線検出部(CH1、CH2)において、それぞれ 10.3 、 10.2s^{-1} 、 γ 線検出部(CH1、CH2)において、それぞれ 24.4 、 23.5s^{-1} であった。

3.3.2 垂直方向特性

(1) 試験方法

検出部中心位置から 860mm の位置に γ 線源 (^{60}Co) を設置し、PL 検出部を 0deg (検出器窓正面からの照射) から 315deg まで 45deg 毎に回転し、検出部により 60s 間測定した。

なお、検出部中心位置の基準線量当量率は $10 \mu \text{Sv/h}$ とした。基準線量当量率は、 γ 線源から検出部中心位置に Shonka-Wyckoff 型電離箱 (EXRADIN 社、model A6) を設置し、RAMTEC1000D 型線量計 (東洋メディック株) により測定した。基準線量当量率の測定に使用した機器は、計量法第 137 条第 1 項により証明書の交付 (2006/3) を受けた二次標準器である。

図 18 に垂直方向特性試験における試験体系を示す。また、**図 19** に垂直方向特性試験における検出部の中心位置と垂直回転軸との関係を示す。

(2) 試験結果

図 20 に規格化した PL 測定器 No.1(CH1)の垂直方向特性試験の結果を示す。図に示すように β 線検出部(CH1)は、90deg、180deg でそれぞれ 75.3%、80.6% (0deg で規格化) の正味計数率となつた。最も方向依存性が強いのは、270deg の 58.1%であった。

γ 線検出部(CH1)は、90deg で 74.1%の正味計数率となり、180deg で 87.7%の正味計数率となつた。最も方向依存性が強いのは 270deg の 56.6%であった。

図 21 に規格化した PL 測定器 No.1(CH2)の垂直方向特性試験の結果を示す。図に示すように、 β 線検出部(CH2)は、90deg が 59.4%、180deg が 80.8%であり、最も方向依存性が強いのは CH1 とは逆に 90deg の 59.4%であった。一方、 γ 線検出部(CH2)では、90deg が 54.7%と最も方向依存性が強かつた。

90deg、270deg における方向依存性の違いは、PL 測定器内部にある光電子増倍管の幾何学的な配置の影響であると思われる。

β 線検出部(CH1、CH2)の規格化した正味計数率の平均値は、それぞれ 0.799、0.797 となり、それぞれの標準偏差は 0.139、0.139 となつた。 γ 線検出部(CH1、CH2)の正規化した正味計数率の平均値は、0.841、0.837 となり、それぞれの標準偏差は 0.144、0.148 となつた。

なお、600s 間 BG を測定した結果、 β 線検出部(CH1、CH2)において、それぞれ 10.3、 10.2s^{-1} 、 γ 線検出部(CH1、CH2)において、それぞれ 24.4、 23.5s^{-1} であった。

3.4 感度試験

(1) 試験方法

^{60}Co γ 点線源 (γ 線放出率 : $1.8\text{E}+5\text{s}^{-1}/4\pi$ (2005/11/4))、 ^{60}Co β 面線源 (β 線放出率 : $1.1\text{E}+3\text{s}^{-1}/4\pi$ (2005/12/7))、 ^{238}U β 面線源 (β 線放出率 : $2.8\text{E}+2\text{s}^{-1}/4\pi$ (1977/2/9)) を検出部表面から 5 又は 10mm の距離に設定し、それぞれ 10s、60s、200s 間測定した。

図 22 に感度試験における検出部と線源の位置関係を示す。

(2) 試験結果

表 3 に測定結果より求めた計数効率を示す。その結果、測定距離 5mm の時の ^{60}Co γ 点線源の計数効率は 13.9%、 ^{60}Co β 面線源の計数効率は 0.9%、 ^{238}U β 面線源の計数効率は 25.9%であった。

4. 実地適用試験

4.1 バックグラウンドの測定

(1) 試験方法

原子力施設の管理区域解除の放射線測定に PL 測定器を適用するため、建屋コンクリートの BG 測定を実施した。BG 測定は、昭和 43 年に建設されたプルトニウム研究 2 棟の管理区域の中から使用履歴から判断して汚染の可能性のないエリアのうちコンクリートが剥き出しになつてゐる床面 (約 90m²) を対象として行つた。

試験は、床面測定用カートに PL 測定器を搭載して固定測定により行った。測定時間は 60sec とし、 1m^2 に 1 点の割合で 88 カ所の BG 測定を行った。なお、BG 測定では、床面の汚染部からの β 線を遮へいするために、検出部と床面の間に約 $100 \times 100 \times 1\text{mm}$ のアクリル板を設置した。

(2) 試験結果

図 23 に PL 測定器 No.1(CH1)の測定結果を示す。図に示すように、 β 線検出部(CH1)の BG 計数率は $12.0 \pm 1.9\text{s}^{-1}(3\sigma)$ 、 γ 線検出部(CH1)の BG 計数率は $26.6 \pm 3.9\text{s}^{-1}(3\sigma)$ となった。これより、 β 線検出部と γ 線検出部の BG 補正係数（ β 線検出部の BG 計数率／ γ 線検出部の BG 計数率）を評価した結果 0.449 となった。さらに、 β 線検出部及び γ 線検出部の検出限界計数率を評価した結果、それぞれ 2.7s^{-1} 、 4.9s^{-1} となった。

図 24 に PL 測定器 No.1(CH2)の測定結果を示す。図に示すように、 β 線検出部(CH2)の BG 計数率は $11.3 \pm 1.7\text{s}^{-1}(3\sigma)$ 、 γ 線検出部(CH2)の BG 計数率は $25.5 \pm 3.7\text{s}^{-1}(3\sigma)$ となった。これより、 β 線検出部と γ 線検出部の BG 補正係数を評価した結果 0.445 となった。さらに、 β 線検出部及び γ 線検出部の検出限界計数率を評価した結果、それぞれ 2.6s^{-1} 、 4.7s^{-1} となった。

4.2 冶金特別研究施設の汚染評価

PL 測定器及び二種類の既存測定器（表 4 参照）を用いて冶金特別研究施設の建屋コンクリートの汚染評価を実施した。以下にその詳細を記す。

(1) 試験方法

汚染部から β 線の影響を受けないように厚さ 1mm のアクリル板（ $100 \times 100\text{mm}$ ）を検出部とコンクリートの間に設置し、測定対象エリアの中の汚染の可能性の少ない箇所においてエリアの BG を 60s 間測定した。これらの操作を CH1、CH2 において繰り返し、実施した。

冶金特別研究施設の 11 号室の床面の汚染分布を求めるため、床面を 60 区画（ $1 \times 1\text{m}/\text{区画}$ ）に区分し、その中を既存測定器によりスキャンし、最大値となる位置を探し、その位置で 60s 間の固定測定を実施した。次に、同一位置において PL 測定器により 60s 間の固定測定を実施した。

さらに、15,17,18 号室を対象として、既存測定器により同一の測定を実施し、そのうち有意な値の検出された同一区画の同一位置において PL 測定器により 60s 間の固定測定を実施した。

(2) 試験結果

図 25 に PL 測定器と既存測定により評価した 11 号室床面の汚染分布図を示す。これより、PL 測定器により評価した汚染分布図と既存測定器により評価した汚染分布図がほぼ同一であることが分かった。

冶金特別研究施設全体における既存測定器による床面測定で有意な汚染の検出された箇所について、PL 測定器と既存測定器の放射能量の評価値の比較結果を **図 26** 示す。その結果、PL 測定器の評価値は、既存測定器の評価値の 1.2 倍となり、PL 測定器による放射能量の評価は、既存測定器と同等の精度が得られることがわかった。これより、PL 測定器は、操作性を有し、 γ 線を

補償した測定を行えることから、クリアランス検認測定等に有効であると考えられる。

5. まとめ

PL 測定器を製作して、基本特性試験及び実地適用試験を実施し、次の結果が得られた。

- (1) 軽量で容易な操作性を有し、 γ 線の補償が可能な 2 層式 PL 測定器を製作した。
- (2) 線量率特性試験を行った結果、 β 線検出部(CH1)、 γ 線検出部(CH1)とも線量当量率と正味計数率の相関関係は、それぞれ $104.1 \text{ (s}^{-1}/(\mu \text{ Sv/h})$ 、 $101.9 \text{ (s}^{-1}/(\mu \text{ Sv/h})$ となり、綺麗な直線性が保たれていることがわかった。
- (3) PL 測定器のエネルギー特性を調べた結果、 ^{60}Co の β 線最大エネルギーである 318keV のとき 17.6% であった。
- (4) PL 測定器の水平方向特性を調べた結果、 β 線検出部(CH1)の 270deg で 62.7%、 γ 線検出部(CH1)の 270deg で 71.9% と最も依存性が強い結果となった。また、 β 線検出部(CH2)の 270deg で 61.9%、 γ 線検出部(CH2)の 270deg で 71.7% と最も依存性が強い結果となった。
- (5) PL 測定器の垂直方向特性を調べた結果、 β 線検出部(CH1)の 270deg で 58.1%、 γ 線検出部(CH1)の 270deg で 56.6% と最も依存性が強い結果となった。また、 β 線検出部(CH2)の 90deg で 59.4%、 γ 線検出部(CH2)の 90deg で 54.7% と最も依存性が強い結果となった。
- (6) PL 測定器によりプルトニウム研究 2 棟の管理区域における建屋コンクリート床面の BG を評価した結果、 β 線検出部(CH1)で $12.0 \pm 1.9 \text{ s}^{-1}(3\sigma)$ 、 γ 線検出部で $26.6 \pm 3.9 \text{ s}^{-1}(3\sigma)$ となった。
- (7) 冶金特別研究施設の床面の汚染分布を評価した。また、PL 測定器による測定区画毎の放射能量の評価値は、既存測定器による測定区画毎の放射能量の評価値の 1.2 倍となった。

以上の結果から、PL 測定器は管理区域解除に係る放射線測定及びクリアランス検認測定に有効と考えられる。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたって、バックエンド技術部廃止措置課の諸氏に種々の助言や多くの協力をいただきました。ここに、深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- (1) “独立行政法人日本原子力研究開発機構が達成すべき業務運営に関する目標（中期目標）”、文部科学省、経済産業省、平成 19 年 3 月 29 日(変更指示)

- (2) “独立行政法人日本原子力研究開発機構の中期計画を達成するための計画（中期計画）”、独立行政法人日本原子力研究開発機構、平成 19 年 3 月 30 日(認可変更)
- (3) 野沢幸男、高野利夫、関野甫、“ホットラボの廃止措置（鉛セル解体・撤去 I ）”、JAEA-Technology2007-019、2007 年
- (4) 立花光夫、畠山睦夫、柳原敏、“原子力施設の廃止措置における「放射性廃棄物でない廃棄物の区分手順”、日本原子力学会誌、Vol.41、No.6、pp.677-685(1999)
- (5) 畠山睦夫、立花光夫、柳原敏、“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-Tech97-064、1997 年
- (6) 伊藤博邦、畠山睦夫、立花光夫、柳原敏、“配管内部汚染分布測定装置の開発”、JAERI-Tech2003-0012、2003 年
- (7) 立花光夫、伊藤博邦、畠山睦夫、柳原敏、“建屋表面を対象とした低レベル放射能汚染の自動測定装置の開発”、日本原子力学会和文論文誌、Vol.3、 No.1、pp.120-127(2004)
- (8) 吉村幸雄、山本修治、牧野俊一郎、後藤哲夫、“汚染分布測定トレイ型クリアランスレベル測定装置”、東芝レビュー、Vol.59、No.8、pp.40-43(2004)
- (9) 牧野俊一郎、山本修治、吉村幸雄、後藤哲夫、小野寺徹、前川立行、“バックグラウンド補償機能付検出器の開発－大型廃棄物のクリアランス測定への適用検討－”、日本原子力学会「2004 年秋の大会」要旨集、K33
- (10)“日本原子力学会標準 クリアランス判断方法:2005”、日本原子力学会 AESJ-SC-F005:2005、2005 年 7 月

表 1 PL 測定器の基本仕様

検出部			
寸法・重量	300×180×155mm	2.4kg	
検出窓面積	100cm ² ×2		
β 線検出部	PL シンチレータ (EJ-212、ELJEN Technology 社)、2 枚		
		寸法	100×100×1mm
		最大放出波長	423nm
		アントラセンの発光効率	65%
	波長シフトファイバ		3 本
光電子増倍管 (R5611-01、浜松フォトニクス(株))、3 本			
		寸法	φ 19×30mm
		種類	ヘッドオン型
		光電面(有効直径 φ 15mm)	バイアルカリ
		ピーク感度波長	420nm
β 線遮へい板 (アルミニウム)	100×200×1mm		
γ 線検出部	PL シンチレータ (EJ-212、ELJEN Technology 社)、2 枚		
		寸法	100×100×3mm
		最大放出波長	423nm
		アントラセンの発光効率	65%
	波長シフトファイバ		3 本
光電子増倍管 (R5611-01、浜松フォトニクス(株))、3 本			
		寸法	φ 19×30mm
		種類	ヘッドオン型
		光電面(有効直径 φ 15mm)	バイアルカリ
		ピーク感度波長	420nm
測定ユニット			
寸法・重量	310×270×80mm	4.55kg	
パソコン (Libretto U100/190NLB、(株)東芝)、1 台			
	寸法・重量	210×165×33.4mm	999g
	CPU	Intel Pentium M733	
	OS	Windows XP	
	ディスプレイ	7.2 型 WXGA	
パソコン用 AC アダプター (株)東芝)、1 台			
	電圧	AC100V～240V	
バッテリー (Slim 60USB、エナックス(株))、2 台			
	寸法・重量	242×179×11mm	520g
	種類	リチウムポリマー電池	
	容量	60Wh	
	対応電圧	15～24V	
バッテリー用 AC アダプター (エナックス(株))、2 台			
	電圧	AC100V～240V	
床面測定用カート			
寸法	450×335×1020mm		

表2 測定結果のデータ構造

○走査測定（ファイル名：Scan_xxymmmddzzz、xx：PL測定器番号、yymmddzzz：対象物番号）

No.	データ名	フォーマット	備考
1	PL測定器番号	xx	
2	測定箇所番号	XXX	
3	測定者名	12文字	
4	時定数	XX	s
5	測定日時	yy/mm/dd hh:mm:ss	
6	最大計数率(γ線検出部 CH1)	X.XXE±XX	s ⁻¹ ,測定中の最大値
	最大計数率(γ線検出部 CH2)	X.XXE±XX	s ⁻¹ ,測定中の最大値
	最大計数率(β線検出部 CH1)	X.XXE±XX	s ⁻¹ ,測定中の最大値
	最大計数率(β線検出部 CH2)	X.XXE±XX	s ⁻¹ ,測定中の最大値

複数箇所測定の場合、2～6が繰り返し記載させる。

○固定測定（ファイル名：FIX_xxymmmddhhss、xx：PL測定器番号、yymmddhhss：測定日時）

No.	データ名	フォーマット	備考
1	容器番号	AyyxxxxCL	
2	測定器番号	XX	
3	対象物番号	01yymmdd001	
4	対象物重量	XXXXXX	kg
5	測定箇所	XXXXXX	
6	測定者名	12文字	
7	除染の有無	X	
8	測定時間	XXXX	s
9	BG測定時間	XXXX	s
10	r1(γ)	X.XXX	
11	r1(β)	X.XXX	
12	r2(γ)	X.XXX	
13	r2(β)	X.XXX	
14	測定日時	yy/mm/dd hh:mm	
15	γ線検出部の最大値 CH	X	
16	γ線検出部の最大値 CH の検出限界値	X.XXE±XX	Bq/c m ²
17	γ線検出部の最大値 CH の表面密度	X.XXE±XX	Bq/c m ²
18	γ線検出部の最大値 CH の換算係数	X.XXE±XX	
19	γ線検出部のBG(CH1)	X.XXE±XX	s ⁻¹
20	γ線検出部のBG(CH2)	X.XXE±XX	s ⁻¹
21	γ線検出部の測定値(CH1)	X.XXE±XX	s ⁻¹
22	γ線検出部の測定値(CH2)	X.XXE±XX	s ⁻¹
23	β線検出部の最大値 CH	X	
24	β線検出部の最大値 CH の検出限界値	X.XXE±XX	Bq/c m ²
25	β線検出部の最大値 CH の表面密度	X.XXE±XX	Bq/c m ²
26	β線検出部の最大値 CH の換算係数	X.XXE±XX	
27	β線検出部のBG(CH1)	X.XXE±XX	s ⁻¹
28	β線検出部のBG(CH2)	X.XXE±XX	s ⁻¹
29	β線検出部の測定値(CH1)	X.XXE±XX	s ⁻¹
30	β線検出部の測定値(CH2)	X.XXE±XX	s ⁻¹
31	走査測定ファイル名	Scan01yymmddZZ	
32	γ線検出器の換算係数ファイル名	CALG01yymmddhhmmss	
33	β線検出器の換算係数ファイル名		
34	BG参照ファイル名		

表 3 PL 測定器 No.1 の計数効率

	放出量	測定距離 (mm)	測定時間 (sec)	計数効率(%)
$^{60}\text{Co} \gamma$ 点線源	1.82E+5s ⁻¹ /4 π (2005/11/4)	5	10	13.91
		10	10	12.59
$^{60}\text{Co} \beta$ 面線源	1.06E+3s ⁻¹ /4 π (2005/12/7)	5	60	0.88
		10	60	0.77
$^{238}\text{U} \beta$ 面線源	2.81E+2s ⁻¹ /4 π (1977/2/9)	5	200	25.85
		10	200	23.81

表 4 実地適用試験に使用した既存測定器の仕様

型番	LB122AS	FHT111M
検出器	ガス充填型比例計数管	ガス充填型比例計数管
測定対象	α 線及び β 線	α 、 β ／ γ 同時測定
窓面積	120×190mm (220cm ²)	166cm ²
計数ガス	PR ガス	PR ガス
寸法	140×234×126mm	216×138×111mm
重量	2,175kg	約 1,700kg
メーカー名	BERTHOLD TECHNOLOGIES	Thermo ELECTRON CORPORATION
実地適用試験場所	冶金特別研究施設 11号室	冶金特別研究施設 15号室、17号室、18号室

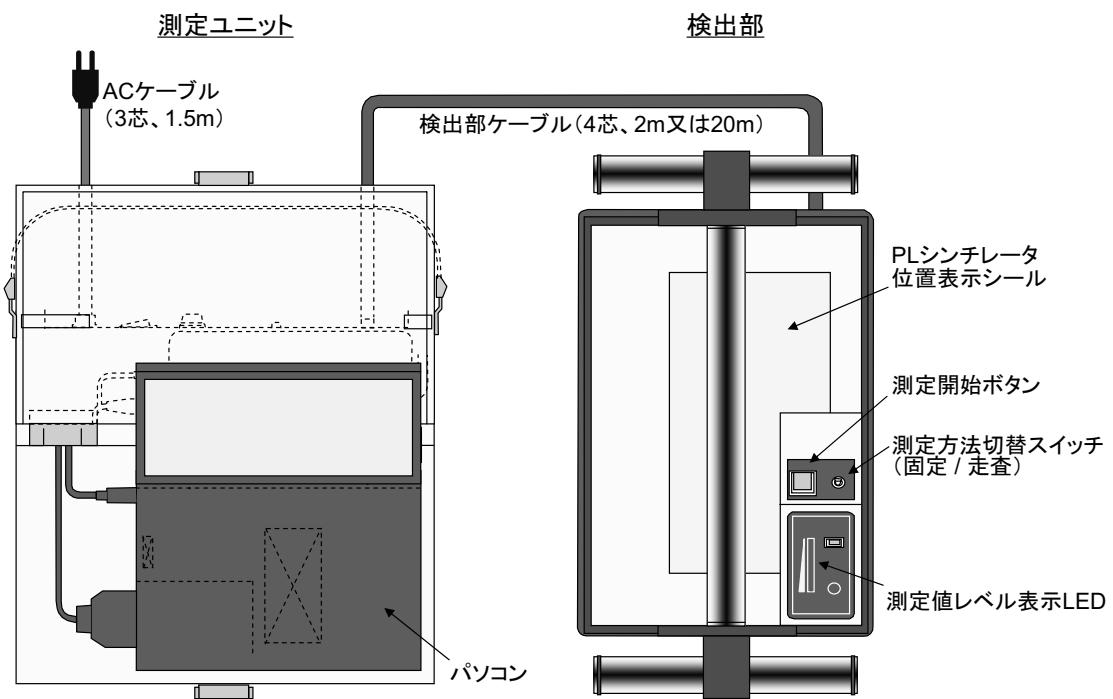


図1 PL測定器の基本構成

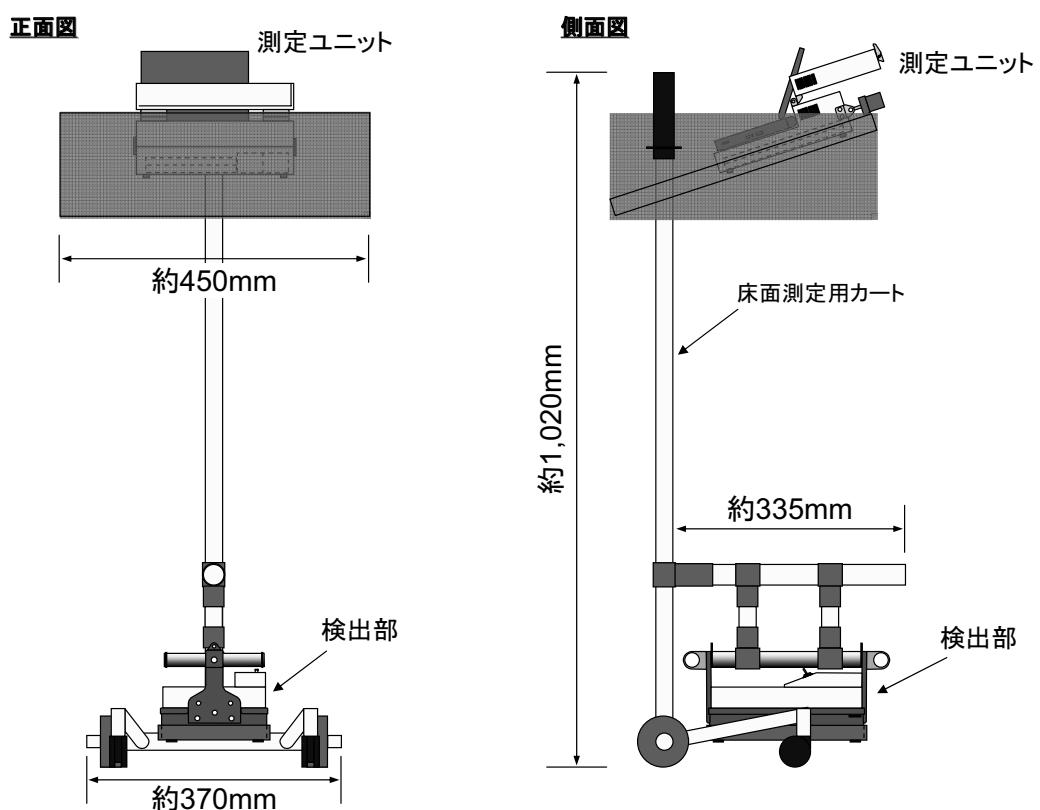


図2 PL測定器による建屋床面の測定概念

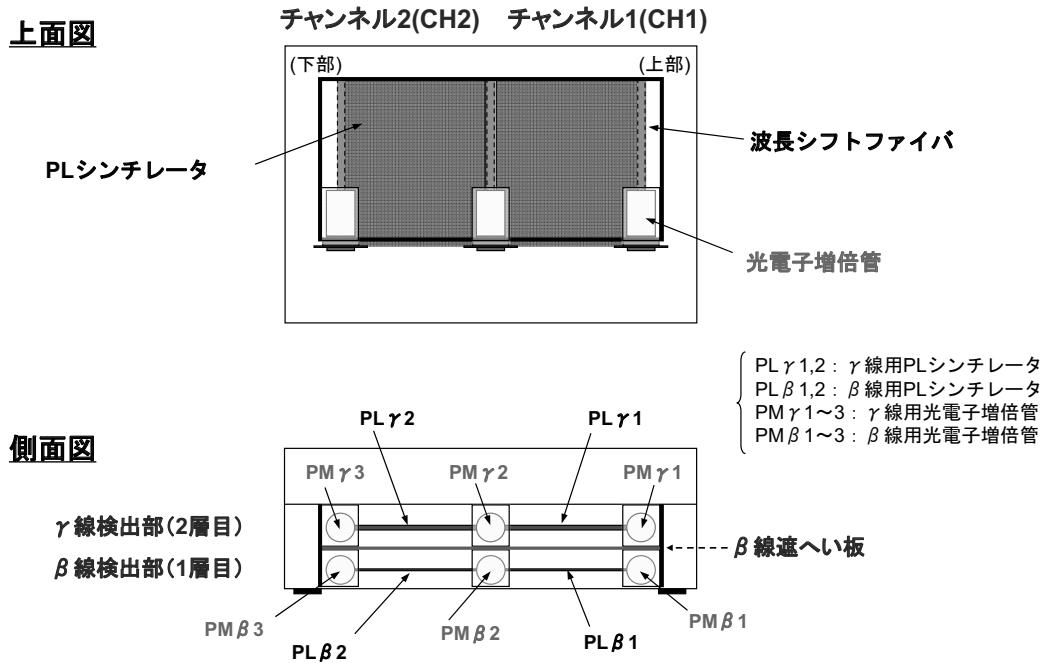


図3 検出部内部の基本構成

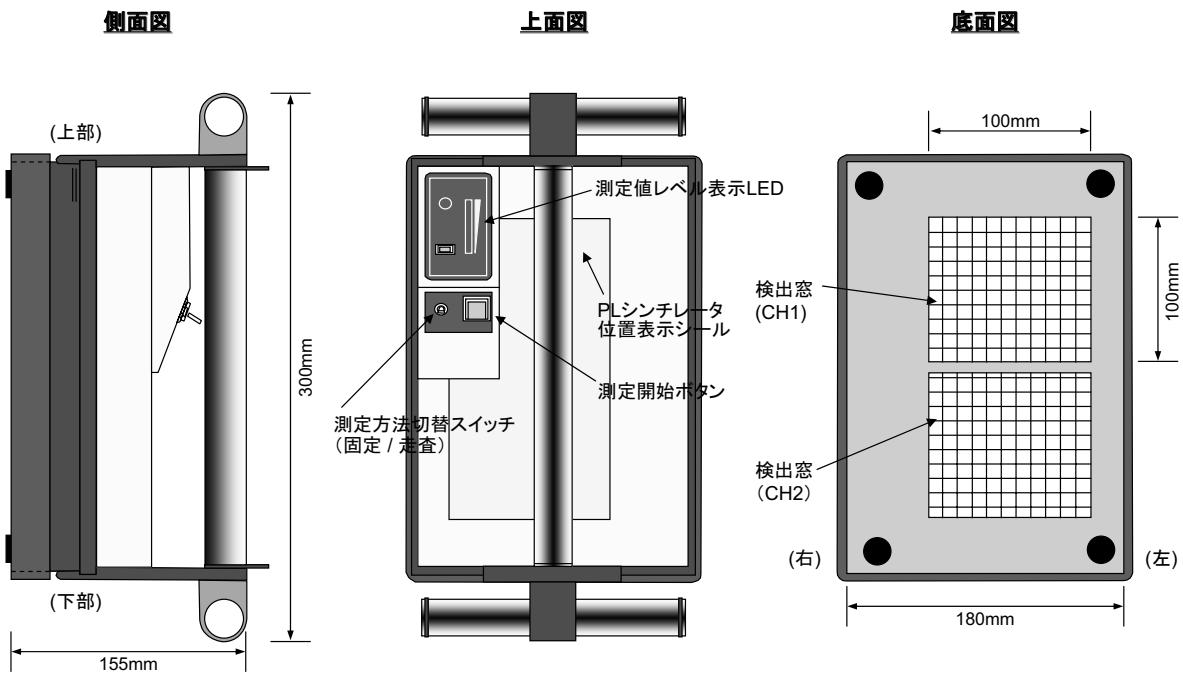


図4 検出部の外観

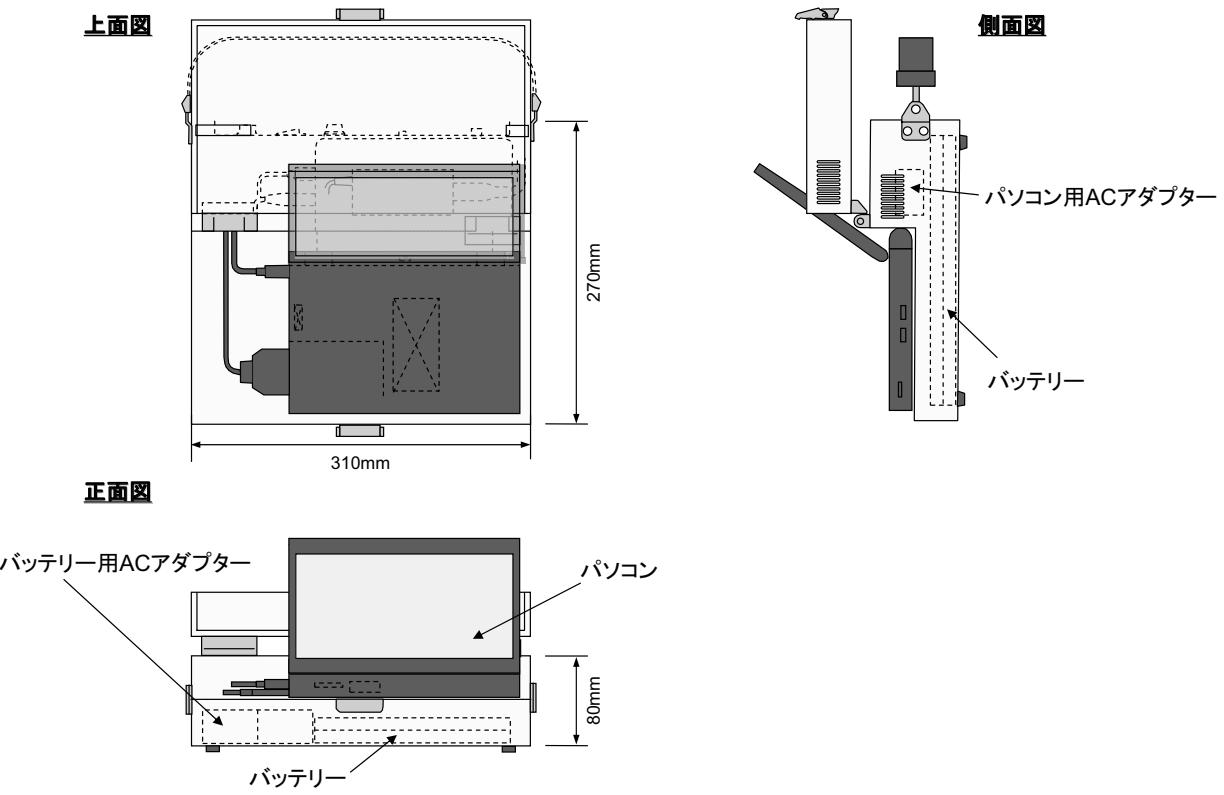


図5 測定ユニットの外観

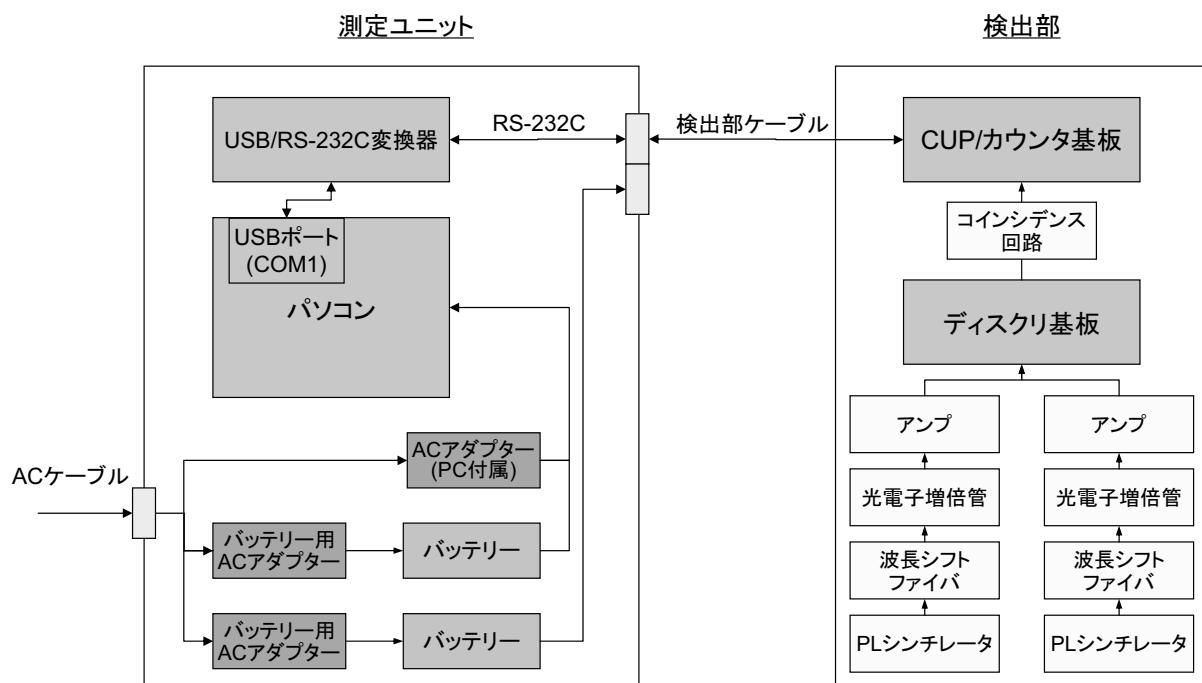


図6 PL測定器のシステム構成

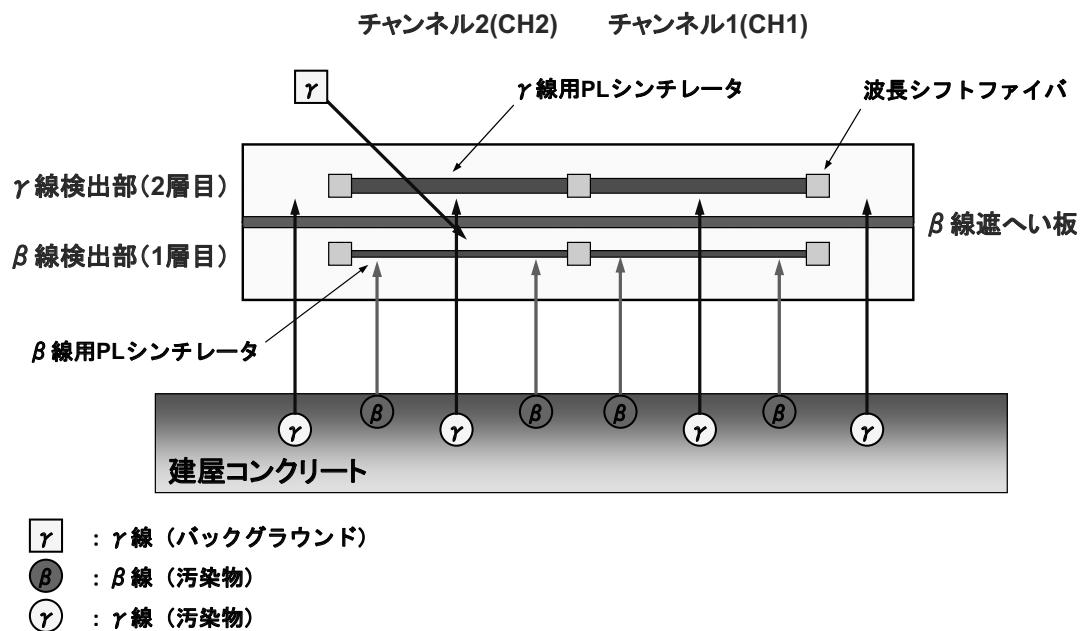


図7 建屋コンクリート測定時の測定原理

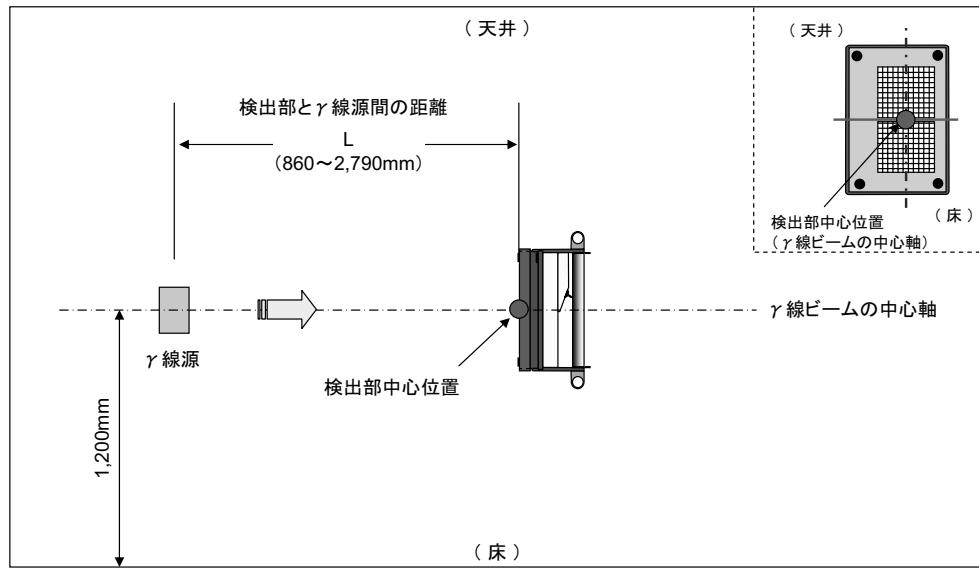


図8 線量率特性試験における試験体系

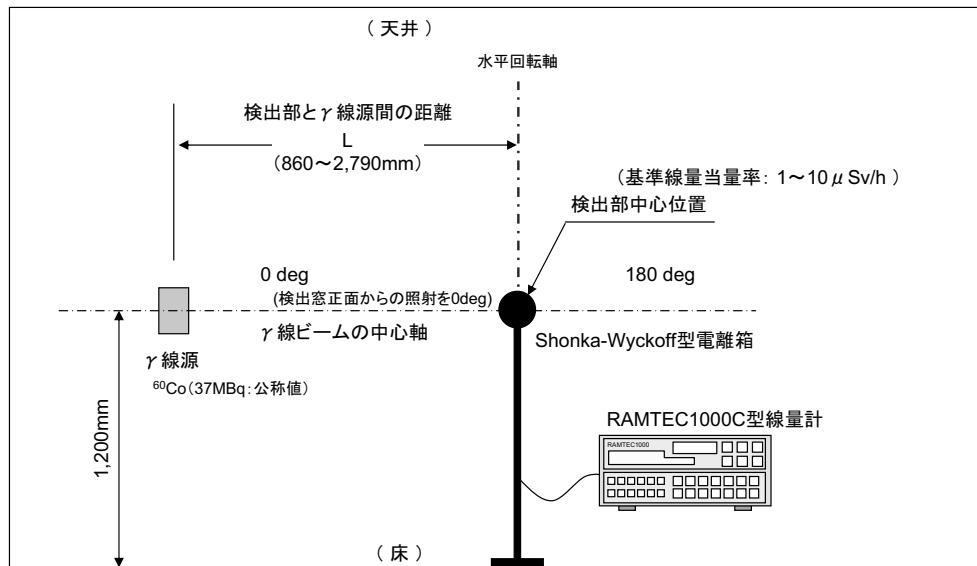


図9 基準線量当量率の測定方法

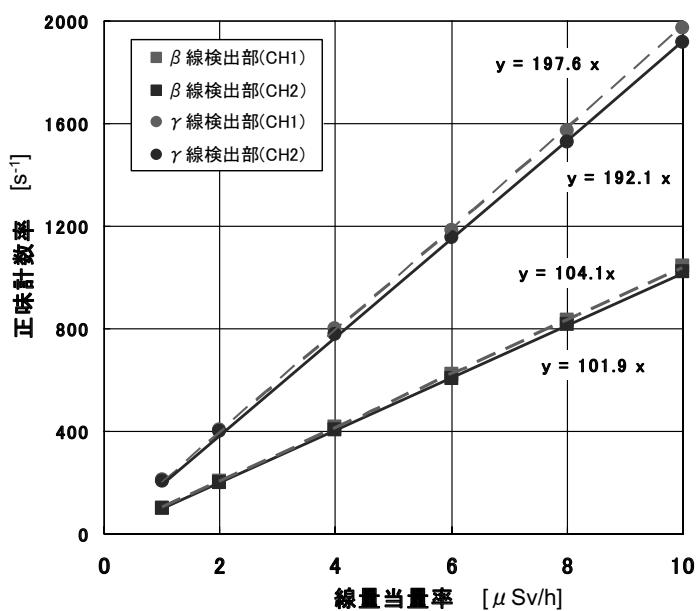


図10 線量率特性試験の結果(PL測定器No.1)

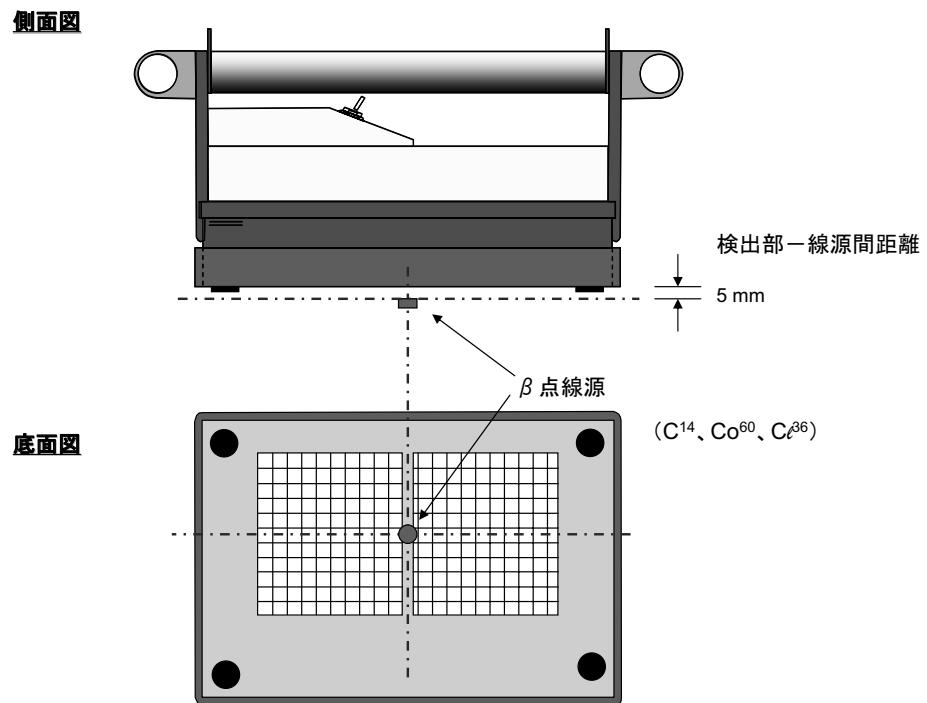


図11 エネルギー特性試験における検出部と線源との位置関係

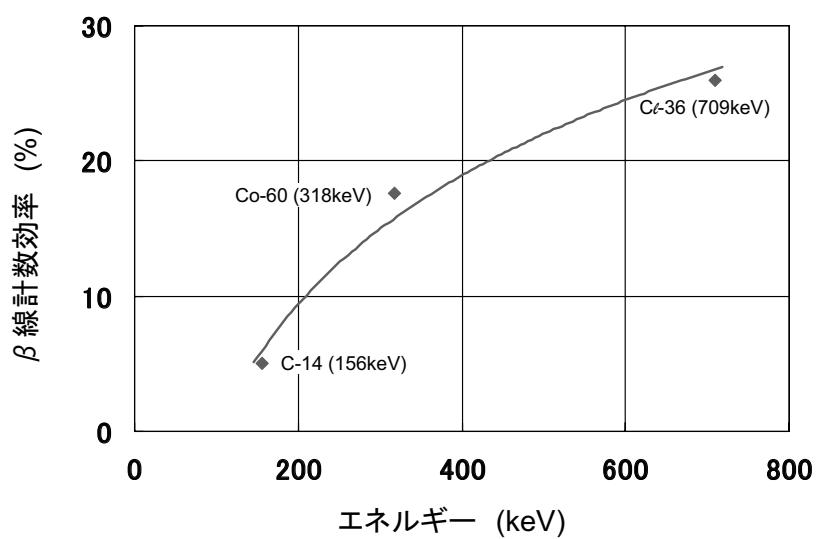


図12 PL測定器No.1のエネルギー特性

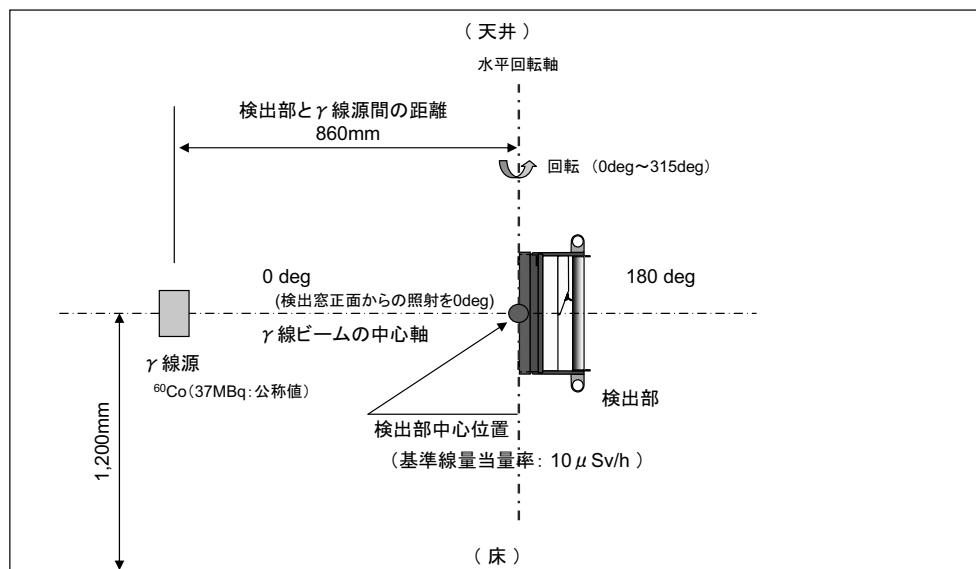


図13 水平方向特性試験における試験体系

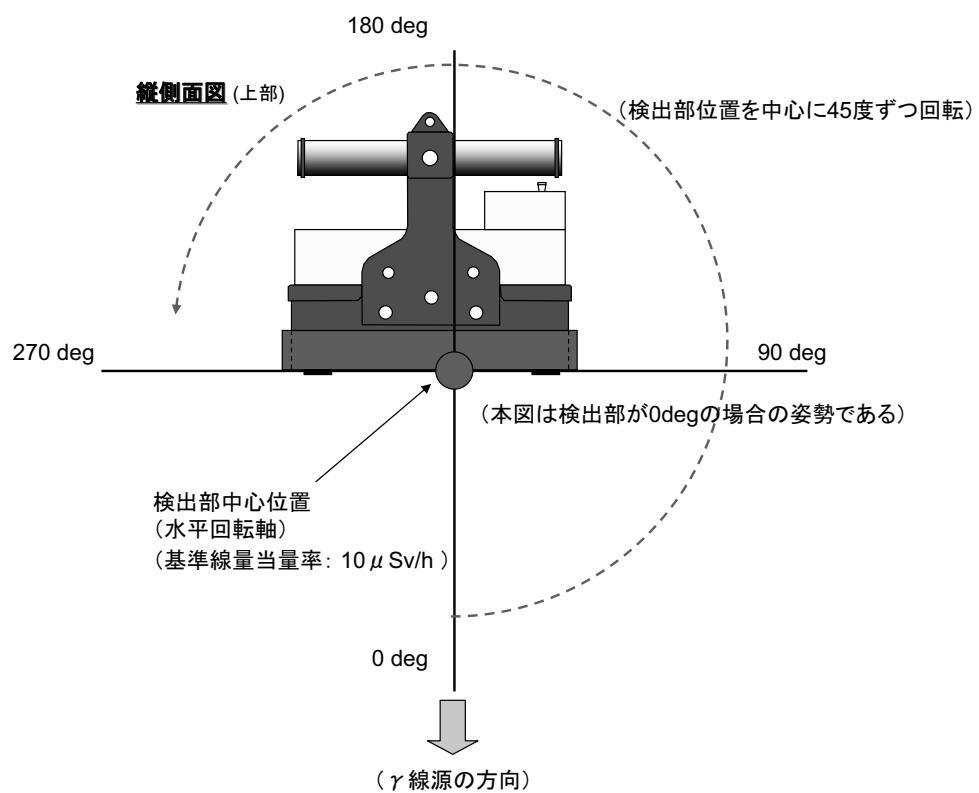


図14 水平方向特性試験における検出部の中心位置と水平回転軸

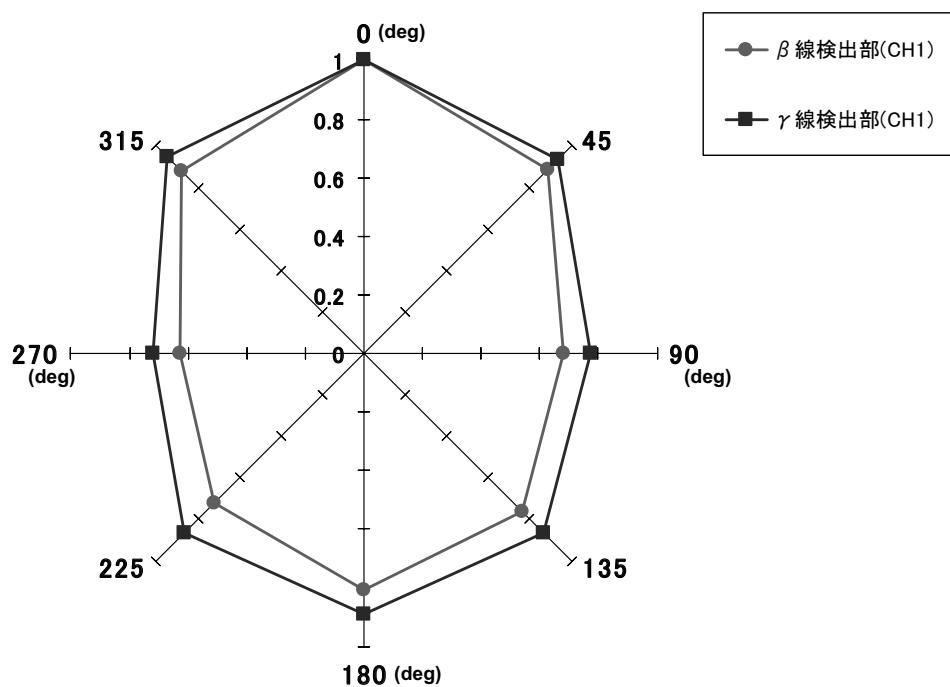


図15 水平方向特性試験の結果(PL測定器No.1 (CH1))

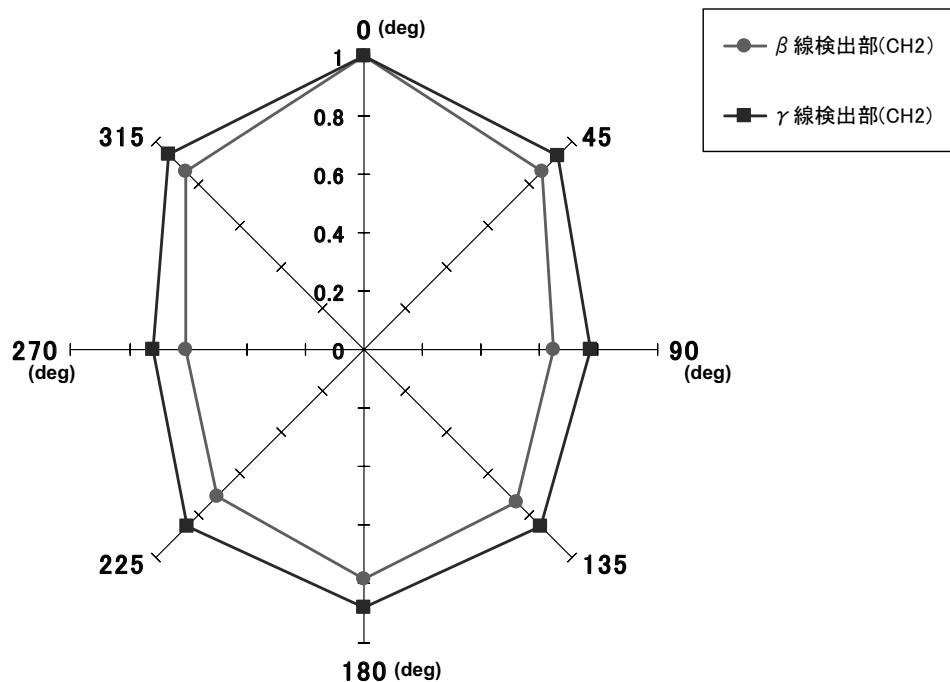
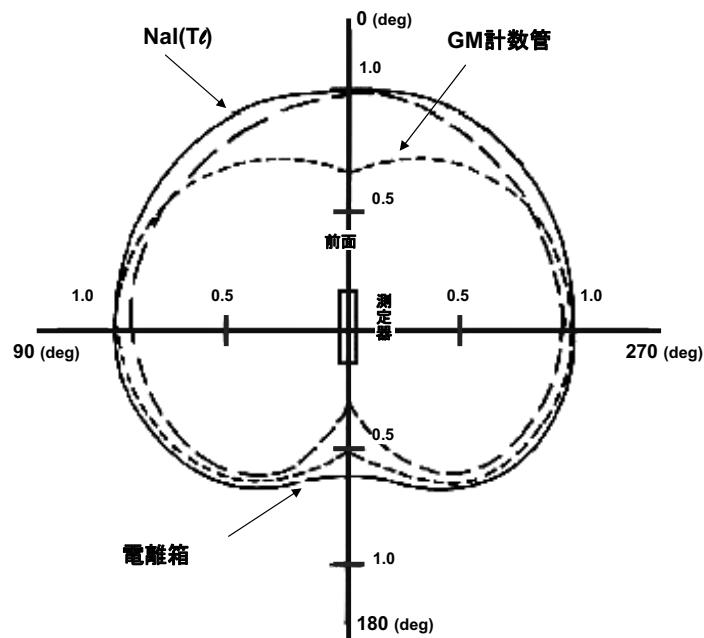


図16 水平方向特性試験の結果(PL測定器No.1 (CH2))



出典：“緊急被ばく医療「地域フォーラム」テキスト—詳細版一”、
平成18年度、(財)原子力安全研究協会

図17 既存測定器の方向特性

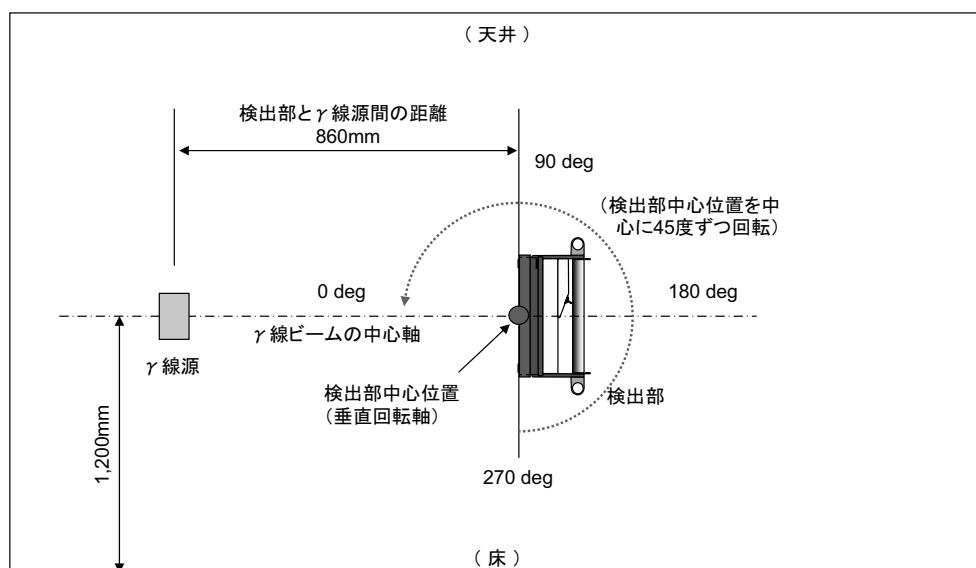


図18 垂直方向特性試験における試験体系

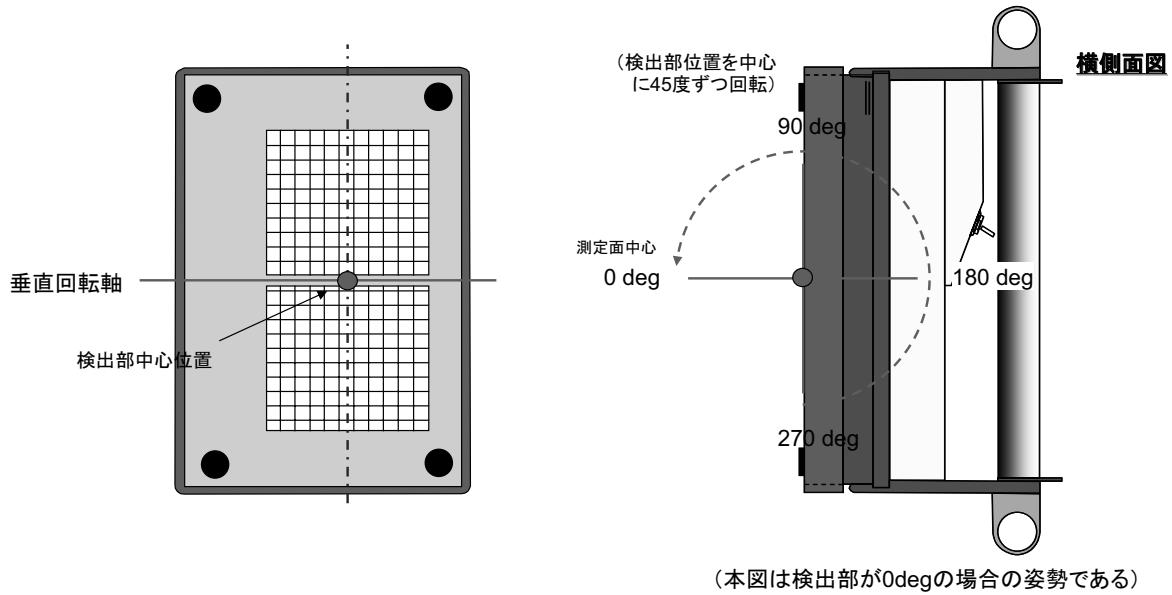


図19 垂直方向特性試験における検出部の中心位置と垂直回転軸

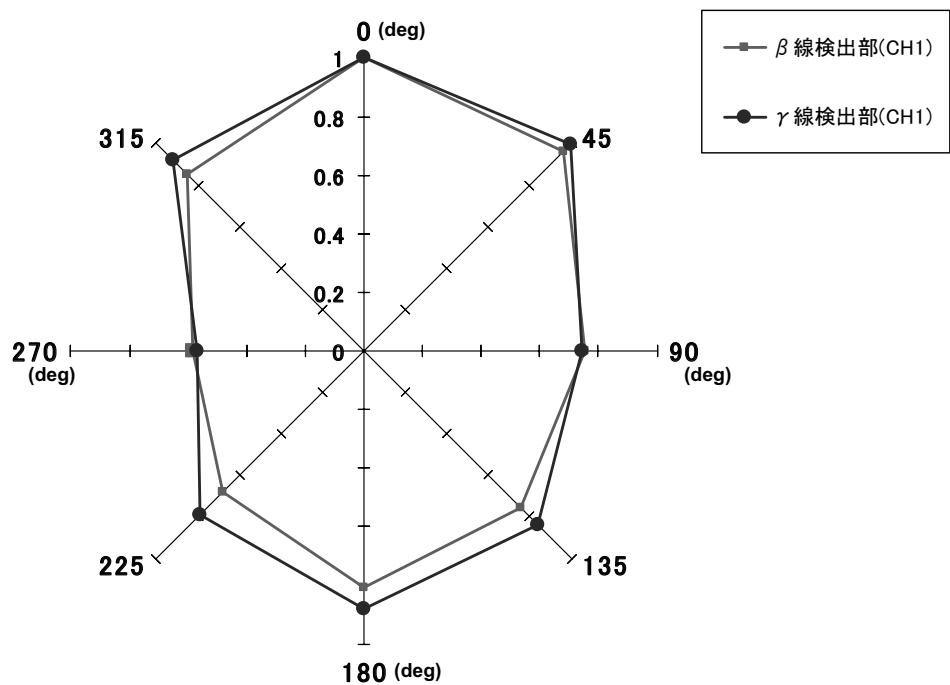


図20 垂直方向特性試験の結果(PL測定器No.1 (CH1))

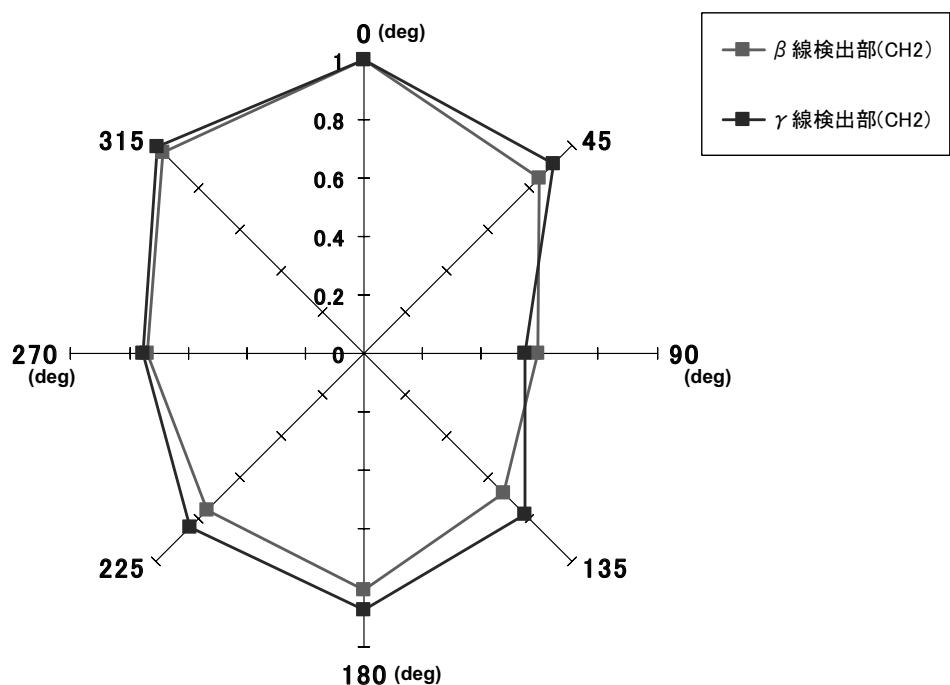


図21 垂直方向特性試験の結果(PL測定器No.1 (CH2))

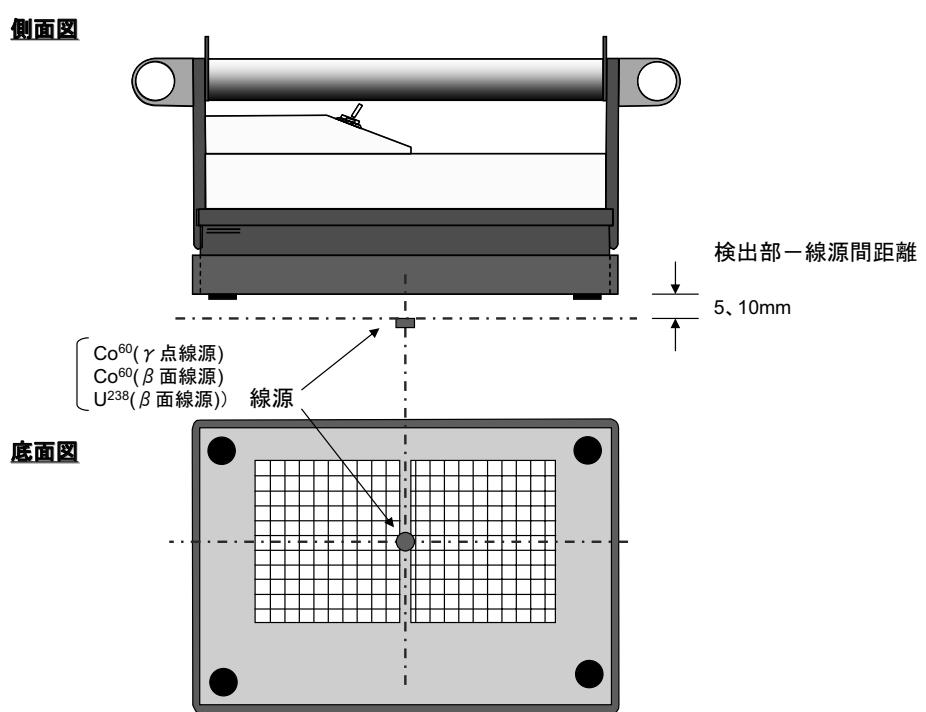


図22 感度試験における検出部と線源との位置関係

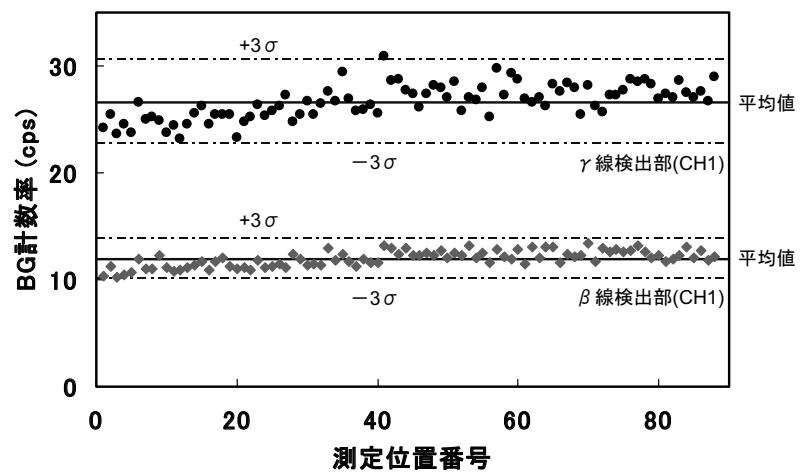


図23 建屋コンクリートのBG測定の結果(PL測定器No.1(CH1))

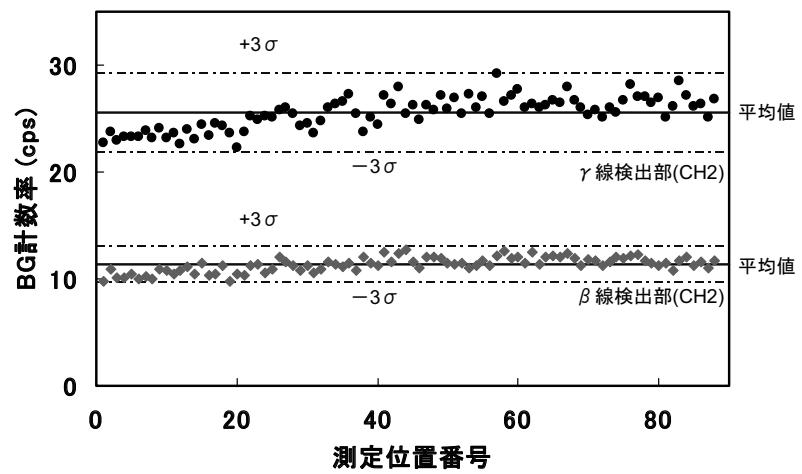


図24 建屋コンクリートのBG測定の結果(PL測定器No.1(CH2))

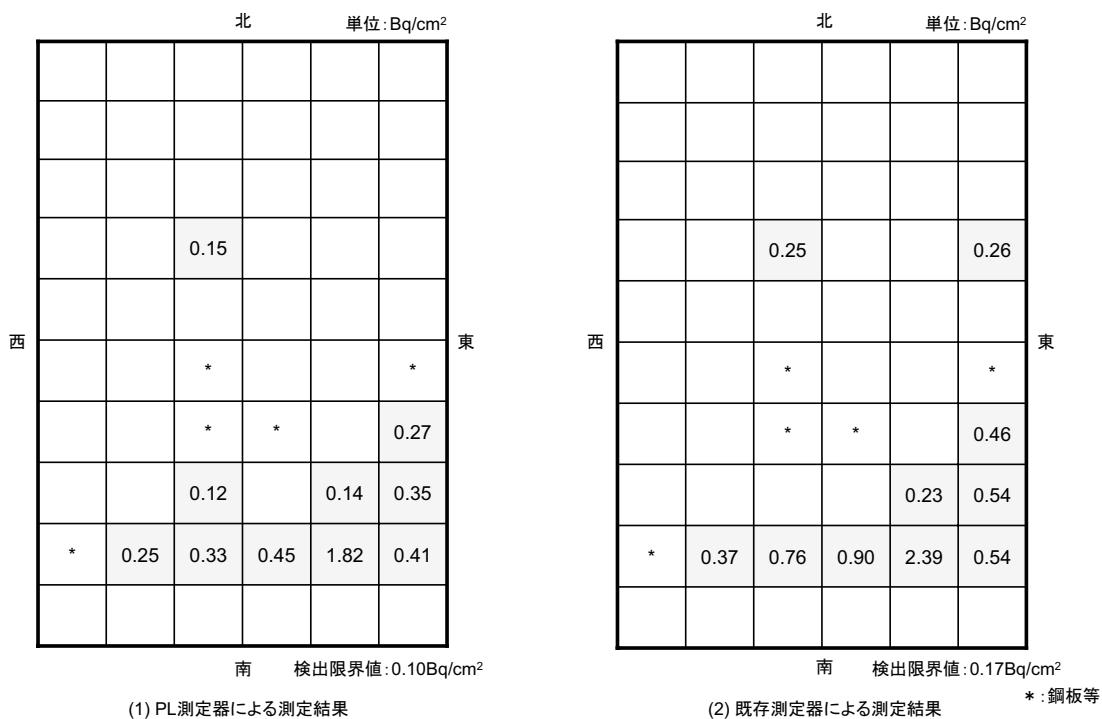


図25 冶金特別研究施設 11号室の汚染分布図(床面)

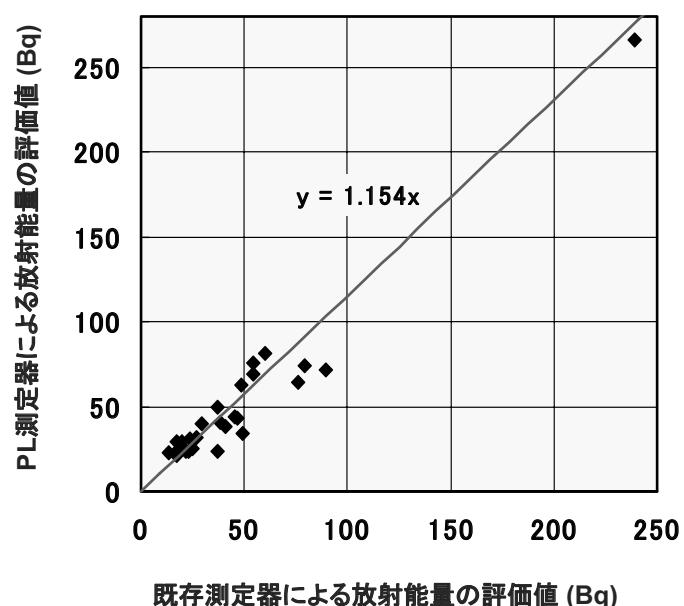


図26 PL測定器と既存測定器の放射能比

This is a blank page

付録 1 放射能の評価方法

β 線検出部及び γ 線検出部に計測された正味計数率を用いて対象物の放射能を評価する場合には、対象物に応じた評価方法が必要となる。次に、金属類（内部汚染）の γ 線測定、建屋コンクリート等（表面汚染）の β 線測定における放射能の評価方法を示す。

1. 金属類（内部汚染）の γ 線測定

PL 測定器により金属類の γ 線測定を行う場合、次のように放射能の評価を行う。

金属類（内部汚染）の γ 線測定では、 γ 線検出部の正味計数率から対象物の放射能量 $A_{Gch1}(Bq)$ を次のように算出する。

$$A_{Gch1} = CF_{Gch1} \times NET_{Gch1}$$

CF_{Gch1} : 換算係数 (Bq/s^{-1})

NET_{Gch1} : γ 線検出部（2層目）の正味計数率(s^{-1})

換算係数 CF_{Gch1} は、シミュレーション計算で算出し、代表的な模擬線源でその妥当性を確認する。

この場合の検出限界放射能 ALD は、日本原子力学会標準⁽¹⁰⁾に示されている次式で評価する。

$$ALD = CF_{Gch1} \times \frac{\frac{3^2}{t_T} + \sqrt{\left[\left(\frac{3^2}{t_T} \right)^2 + 4 \times (1 - 3^2 r_2^2) \times 3^2 \times \left\{ n_b \times \left(\frac{1}{t_T} + \frac{1}{t_b} \right) + r_1^2 n_B^2 \right\} \right]}{2 \times (1 - 3^2 r_2^2)}$$

t_T : 測定時間 (s)

t_B : BG 測定時間 (s)

r_1 : BG の変動に起因する相対誤差

r_2 : 換算係数の相対誤差

n_B : BG 計数率(s^{-1}) (γ 線検出部 BG_{Gch1})

なお、 β 線検出部では、対象物表面の汚染放射能評価が可能であり、その際の対象物の放射能量 $A_{Bch1}(Bq)$ は次のように算出する。

$$A_{Bch1} = CF_{Bch1} \times NET_{Bch1}$$

CF_{Bch1} : 換算係数 (Bq/s^{-1})

NET_{Bch1} : β 線検出部（1層目）の正味計数率(s^{-1})

なお、換算係数 CF_{Bch1} は、 β 線面線源により評価する。表面密度を算出する場合の面積には、 100cm^2 を使用する。

この場合の検出限界放射能 A_{LD} は、次のように評価する。

$$A_{LD} = CF_{Bch1} \times \frac{\frac{3^2}{t_T} + \sqrt{\left[\left(\frac{3^2}{t_T}\right)^2 + 4 \times 3^2 \times \left\{n_b \left(\frac{1}{t_T} + \frac{1}{t_b}\right)\right\}\right]}}{2}$$

2. 建屋コンクリート等（表面汚染）の β 線測定

建屋コンクリート等の表面汚染の測定では、 β 線検出部の計数率から γ 線検出部の計数率を差し引いた β 線検出部の計数率から対象物の放射能 $A_{Bch1}(\text{Bq})$ を次のように算出する。

$$A_{Bch1} = CF_{Bch1} \times NET_{Bch1}$$

CF_{Bch1} : 換算係数 (Bq/s^{-1})

NET_{Bch1} : β 線検出部（1層目）の正味計数率(s^{-1})

なお、換算係数 CF_{Bch1} は、対象物が平板コンクリートであり、測定の際には密着測定となるため、 β 線面線源により評価する。

その際の検出限界放射能 A_{LD} は、次のように評価する。

$$A_{LD} = CF_{Bch1} \times \frac{\frac{3^2}{t_T} + \sqrt{\left[\left(\frac{3^2}{t_T}\right)^2 + 4 \times 3^2 \times \left\{n_b \left(\frac{1}{t_T} + \frac{1}{t_b}\right)\right\}\right]}}{2}$$

付録 2 BG 補正係数の評価

1 層目の検出部は β 線の測定を主目的としているため薄い PL を使用しており、2 層目の検出部は γ 線の測定を主目的としているため厚めの PL を使用している。

このため、PL シンチレータの厚みの違いによる BG 計数率の BG 補正係数 $\alpha 1$ は、次のように評価する。

$$\alpha 1 = BG_{Bch1} / BG_{Gch1}$$

ここで、

BG_{Bch1} : β 線検出部の BG 計数率 (s^{-1})

BG_{Gch1} : γ 線検出部の BG 計数率 (s^{-1})

BG_{Bch1} は、検出部と対象物の間にアクリル板 ($100 \times 100 \times 1\text{mm}$) を設置し、60s 間の固定測定により得られた値であり、測定位置での β 線検出部に計測される γ 線の BG 計数率である。

一方、 BG_{Gch1} も、検出部と対象物の間にアクリル板 ($100 \times 100 \times 1\text{mm}$) を設置し、60s 間の固定測定により得られた値であり、測定位置での γ 線検出部に計測される γ 線の BG 計数率である。

両者の計数率は、同じ位置での γ 線の BG 計数率であるが、PL シンチレータの厚さが異なるため計数率に違いが発生する。BG 計数率の BG 補正係数 $\alpha 1$ は、その両者の違いを補正するための係数である。

付録3 表面密度の評価方法

正味計数率から表面密度 (Bq/cm^2) への換算は、次のように行う。

1. β 線計数率からの表面密度の評価方法

β 線検出部 (CH1) で計測される β 線計数率から対象物の表面密度 AC_{Bch1} (Bq/cm^2) の評価方法は次のように行う。

$$\text{AC}_{\text{Bch1}} = \text{CF}_{\text{Bch1}} \times \text{NETC}_{\text{Bch1}}$$

ここで、

$\text{NETC}_{\text{Bch1}}$: β 線検出部の正味計数率 (s^{-1})

CF_{Bch1} : β 線検出部の換算係数 ($\text{Bq}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

さらに、 β 線検出部の換算係数 CF_{Bch1} ($\text{Bq}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) は次のように評価する。

$$\text{CF}_{\text{Bch1}} = \frac{\text{S}}{(\text{C}_1 - \text{C}_2)} \times 50 \times 1/\varepsilon_s$$

S : 線源強度 (β 線放出率/ $4\pi \cdot \text{cm}^{-2}$)

C_1 : β 線遮へい板がないときの計数率(s^{-1})

C_2 : β 線遮へい板が有るときの計数率(s^{-1})

ε_s : β 線源の線源効率

2. γ 線計数率からの表面密度の評価方法

γ 線検出部 (CH1) で計測される γ 線計数率から対象物の表面密度 AC_{Gch1} (Bq/cm^2) の評価方法は次のように行う。

$$\text{AC}_{\text{Gch1}} = \text{CF}_{\text{Gch1}} \times \text{NETC}_{\text{Gch1}}$$

ここで、

$\text{NETC}_{\text{Gch1}}$: γ 線検出部の正味計数率 (s^{-1})

CF_{Gch1} : γ 線検出部の換算係数 ($\text{Bq}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

さらに、 γ 線検出部の換算係数 CF_{Gch1} ($\text{Bq}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) は次のように評価する。

$$CF_{Bch1} = \frac{S}{(C1 - C2)}$$

ここで、

S : 線源強度 (γ 線線源強度(Bq/cm²))

C₁ : 計数率(s⁻¹)

C₂ : BG 計数率(s⁻¹)

This is a blank page

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
密度(質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率	(数の)1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨーダ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペクタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^9	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^6	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼット	z
10^1	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー, 仕事, 熱量	ジユール	J	$N \cdot m$
功率, 放射束	ワット	W	J/s
電荷, 電気量	クーロン	C	$s \cdot A$
電位差(電圧), 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	フアラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジメンス	S	A/V
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 ^(d)	°C	K
光束度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$
(放射性核種の)放射能吸収線量, 質量エネルギー一分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	ベクレル	Bq	lm/m^2
	グレイ	Gy	J/kg
	シーベルト	Sv	J/kg

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもつた量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa·s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートン每メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度, 放射照度	ワット每平方メートル	W/m ²	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量), 質量エンタルピー	ジュール毎キログラム	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m·K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン每立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン每平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエンタルピー	ジュール每モル每ケルモル	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	Gy	$m^2 \cdot s^{-3}$
吸収線量率	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每平方メートル	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m ² ·sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表7. 国際単位系と併用されこれに属さないSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	mi	1海里=1852m
ノット	n	1ノット=1海里每時=(1852/3600)m/s
アーチル	a	$1a=1 dam^2=10^2 m^2$
ヘクタール	ha	$1ha=1 hm^2=10^4 m^2$
バル	bar	$1 bar=0.1 MPa=100kPa=1000hPa=10^5 Pa$
オンストローム	Å	$1 \text{ Å}=0.1nm=10^{-10} m$
ペニン	b	$1 b=100fm^2=10^{-28} m^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイニン	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボアズ	P	$1 P=1 dyn \cdot s/cm^2=0.1Pa \cdot s$
ストークス	St	$1 St=1cm^2/s=10^4 m^2/s$
ガウス	G	$1 G=10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe=(1000/4\pi)A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=10^{-8} Wb$
スチール	sb	$1 sb=1cd/cm^2=10^4 cd/m^2$
ホタル	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1cm/s^2=10^{-2} m/s^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad=1cGy=10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem=1 cSv=10^{-2} Sv$
X線単位	X	$1 X unit=1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 nT=10^{-9} T$
ジャンスキ	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fermi	$1 fermi=1 fm=10^{-15} m$
メートル系カラット		$1 metric carat=200 mg=2 \times 10^{-4} kg$
トル	Torr	$1 Torr=(101325/760) Pa$
標準大気圧	atm	$1 atm=101325 Pa$
カリ	cal	$1 cal=1J=10^4 J$
ミクロ	μ	$1 \mu m=10^{-6} m$

