



建屋コンクリートを対象としたクリアランス一括測定法
に関する一評価手法の提案（受託研究）

Clearance Assessment for Building Concrete
through Bulk In-situ γ -spectrometry (Contract Research)

前田 真吾* 平野 貴弘* 島田 太郎 中山 真一
Shingo MAEDA*, Takahiro HIRANO*, Taro SHIMADA and Shinichi NAKAYAMA

安全研究センター
廃棄物・廃止措置安全評価研究グループ
Waste Disposal and Decommissioning Safety Research Group
Nuclear Safety Research Center

October 2008

本レポートは独立行政法人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>)
より発信されています。

独立行政法人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
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

建屋コンクリートを対象としたクリアランス一括測定法に関する一評価手法の提案
(受託研究)

日本原子力研究開発機構 安全研究センター
原子力エネルギー関連施設安全評価研究ユニット
前田 真吾*1・平野 貴弘*2・島田 太郎・中山 真一

(2008年8月7日受理)

平成17年に導入されたクリアランス制度においては、着目する放射性核種に対し、クリアランス対象物を取り扱う評価単位(原則1トン)内の当該放射性核種の平均濃度がクリアランスレベル以下であるとともに、その評価単位を分割した測定単位(100kg程度)ごとの濃度がクリアランスレベルの10倍を超えないこと、つまり評価単位内の当該放射性核種濃度が均一であることを検認する必要があるとされている。

建屋コンクリートなど大きな表面積を有する物体に対するクリアランス測定手法の一つとして、可搬型Ge半導体検出器を用いた一括測定法と呼ばれる方法がある。従来の一括測定法では、表面汚染が均一に分布していることを前提にすることから、表面汚染の均一性を確認するためにサーベイメータ等による全面走査測定等による事前サーベイを必要としている。本報告では、上記のクリアランスレベル検認にかかる規制行政庁の基準を満足しつつ、事前サーベイを省略できる以下の方法を提案した。

- ①汚染の線源は、任意に設定した評価単位(重量1トン)の中で検出部先端中心から最も遠い位置に点線源として存在すると仮定し、この放射線源-検出部間距離に対応した放射能換算係数(Bq/cps)を準備して、可搬型Ge半導体検出器により得られる正味計数率(cps)から放射能(Bq)を算出する。
- ②①で求めた放射能(Bq)を、経済産業省原子力安全・保安院がクリアランスレベル検認にかかる内規に定めた100kgという測定単位で除して放射能濃度(Bq/g)を算出する。

すなわち、①で、放射線源が最も遠い位置に存在するとの仮定により、評価単位中に存在する汚染放射能を最大として、最も保守的に評価しておき、次いで②で、評価単位の1トンよりも

本報告の内容は、経済産業省原子力安全・保安院の委託事業により得られた研究成果の一部である。

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

*1 (株)鴻池組

*2 北光電子工業(株)

小さい、測定単位重量の 100kg で除して放射能濃度を算出するという、二重の保守性を持った評価である。そのため、本評価手法によって得られた放射性核種濃度評価値がクリアランスレベル以下であれば、現行のクリアランスレベル検認にかかる基準の上記 2 つの要求を同時に満足していると判断される。

なお、本評価手法は、保守的に評価された放射能を評価単位より小さい測定単位で除するため、クリアランスレベルの放射性核種濃度の 1/10 程度という極めて低い濃度を取り扱うこととなり、実際の原子力施設において、その適用範囲等が懸念される。そのため、原子力施設内における模擬放射線源を用いた測定やモンテカルロ計算コード EGS5 による評価等により、評価面積や測定時間の観点から検討を実施し、本評価手法の適用性を確認した。

Clearance Assessment for Building Concrete through Bulk In-situ γ -spectrometry
(Contract Research)

Shingo MAEDA ^{*1}, Takahiro HIRANO ^{*2}, Taro SHIMADA and Shinichi NAKAYAMA

Nuclear Facility Safety Research Unit
Nuclear Safety Research Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 7, 2008)

The regulation for the clearance of radioactive material from the regulatory control under the "Law for the Regulations of Nuclear Sources Material, Nuclear Fuel Material and Reactors" requires that the weight "unit" (clearance unit) of the material to be evaluated be in the order of "tons", and that measurement should be carried out for the part of the material of around 100kg. This 100 kg is referred to as "measurement unit" here. The second requirement is to ensure radioactive contamination shows uniformity on the surface of the concrete, that is, the concentrations of radionuclides in the "measurement unit do not exceed the values of ten times of the clearance levels".

Bulk in-situ γ -spectrometry has been established to measure a large surface for the purpose of clearance. This measurement is effective for a slightly and uniformly contaminated surface such as a room surrounded by concrete walls. The time-consuming scoping scanning survey for the entire surface is essential to ensure the slight and uniform contamination prior to the bulk in-situ measurement. However, the scoping scanning survey is omissible if the following conservative procedure is acceptable.

- 1) Radioactive point source is assumed to be situated at the furthest point within the clearance unit from the radioactivity detector.
- 2) The radioactivity conversion factor, Bq/cps, is known which depends on the distance from the center edge of detector to the furthest point.
- 3) The count rate, cps, for the material of interest can be obtained by in-situ Ge detector.
- 4) Radioactivity, Bq, from the counting rate, cps, can be calculated by using the radioactivity conversion factors, Bq/cps.

This study was conducted during 2001 through 2006 under contract with Ministry of Economy, Trade and Industry.

*1 KONOIKE CONSTRUCTION CO., LTD.

*2 HOKKO ELECTRONICS CO., LTD.

- 5) The radioactive concentration, Bq/g, is evaluated by dividing the radioactivity 4) by the "measurement unit" of 100kg.

This procedure could certainly produce a conservative value, because the radioactive contamination assessed conservatively through 1) above is divided by not 1 ton but a smaller weight of 100 kg. If the value obtained by this procedure is lower than the regulated clearance level, the material of interest can be cleared without the prior scoping scanning survey.

Since the procedure deals with very low radioactive concentration, the applicability was tested in a real-sized concrete-wall room through measurement using portable Ge detector and numerical analysis by Monte Carlo Code (EGS5), to ensure that the measurement can be completed within a reasonable surface area and period of measuring time.

Keywords: Clearance, Building Concrete, Portable Germanium Detector, Bulk In-situ γ -spectrometry, EGS5

目 次

1. はじめに	1
2. 検討の背景	3
2.1 一括測定法の概要	3
2.2 既往の研究	3
2.3.クリアランスレベル検認にかかる基準	6
3. 提案する評価手法の基本的な考え方	9
3.1 一括測定法の課題	9
3.2 本評価手法の基本的な考え方	9
4. 提案する評価手法の適用性検討	11
4.1 実機適用性の検討	11
4.1.1 クリアランス判定値及び部屋の大きさが測定時間に与える影響検討	11
4.1.2 コンクリート中の天然放射性核種濃度が測定時間に与える影響検討	13
4.2 本評価手法を適用するにあたっての留意点	14
4.3 可搬型 Ge 半導体検出器を用いた効率的な測定方法について	14
5. まとめ	15
謝 辞	16
参考文献	16

Contents

1. Introduction	1
2. Background of this study	3
2.1 Outline of bulk in-situ γ -spectrometry	3
2.2 Previous study	3
2.3 Current regulation for clearance of material from regulatory control	6
3. Fundamental concept of proposed method of bulk in-situ γ -spectrometry for building concrete	9
3.1 Issues of bulk in-situ γ -spectrometry	9
3.2 Fundamental concept of proposed method of bulk in-situ γ -spectrometry for building concrete	9
4. Study of the method of bulk in-situ γ -spectrometry	11
4.1 Applicability assessment of the method to actual facility	11
4.1.1 Effects of judgmental value of clearance and dimension of the room to measurement time	11
4.1.2 Effects of natural radionuclide concentration to measurement time	13
4.2 Important reminder for application of this method	14
4.3 Efficient measurement using in-situ Ge semiconductor detector	14
5. Concluding remarks	15
 Acknowledgement	 16
Reference	16

図、表及び写真のリスト

- 表 2.1 測定装置の規格、仕様
- 表 2.2 可搬型 Ge 半導体検出器の方向特性確認試験条件
- 表 4.1 本検討で対象とした部屋の構造寸法
- 表 4.2 各部屋タイプの放射能換算係数 (EGS5 評価値と測定値)
- 表 4.3 求めた測定時間及び測定効率一覧
- 表 4.4 計算に用いた天然放射性核種濃度
- 表 4.5 計算で考慮した天然放射性核種
- 表 4.6 検出限界計数率の比較 (天然放射性核種濃度最大値と平均値) $^{60}\text{Co}(1173.2\text{keV})$
-
- 図 2.1 建屋コンクリート一括測定法概念図
- 図 2.2 装置の構成
- 図 2.3 方向特性試験概念図
- 図 2.4 方向特性試験結果
- 図 2.5 二次的な汚染 (大面積の対象物) の場合の測定方法の選定
- 図 3.1 クリアランス判断フローの一例
- 図 4.1 旧溶融試験エリア (バックエンド技術開発建家)
- 図 4.2 ^{60}Co 検出限界計数率の経時変化
- 図 4.3 部屋タイプ別に $^{60}\text{Co}(1173.2\text{keV})$ に着目して求めた測定時間
- 図 4.4 部屋タイプ別に $^{60}\text{Co}(1173.2\text{keV})$ に着目して求めた測定効率
- 図 4.5 実験データ近似式と EGS 計算結果 (天然放射性核種濃度平均値) 比較 $^{60}\text{Co}(1173.2\text{keV})$
- 図 4.6 実験データ近似式と EGS 計算結果 (天然放射性核種濃度平均値) 比較 $^{60}\text{Co}(1332.5\text{keV})$
- 図 4.7 EGS 計算結果比較 (天然放射性核種濃度最大値と平均値) $^{60}\text{Co}(1173.2\text{keV})$
- 図 4.8 可搬型 Ge 半導体検出器を用いた測定方法の概念図
-
- 写真 2.1 方向特性試験状況 (線源位置角度 45°)
- 写真 2.2 方向特性試験状況 (線源設置状況)
- 写真 4.1 バックグラウンド測定状況 (その 1)
- 写真 4.2 バックグラウンド測定状況 (その 2)

Tables, Figures and Photos Captions

Table 2.1 Standards and specifications of measurement equipment

Table 2.2 Test condition for characterization of directions of in-situ Ge detector

Table 4.1 Dimension and structure of area room

Table 4.2 Radioactivity conversion factors for types of rooms

Table 4.3 List of calculated measurement time and efficiency

Table 4.4 Concentration of natural radionuclides existing in building concrete

Table 4.5 Natural radionuclides used for calculation

Table 4.6 Comparison of minimum counting rate between max and average of concentration

$^{60}\text{Co}(1173.2\text{keV})$

Fig. 2.1 Schematic view of bulk in-situ γ -spectrometry for building concrete

Fig. 2.2 Composition of equipment

Fig. 2.3 Schematic view of characterization test for direction dependence of detector

Fig. 2.4 Results of test for direction dependence

Fig. 2.5 Flow chart for selection of measurement method for secondary contamination (for large area)

Fig. 3.1 One example of clearance judgment's flow chart

Fig. 4.1 Ex-area for melting test in the Backend Technique Development Building

Fig. 4.2 Temporal change of minimum detection counting rate for ^{60}Co

Fig. 4.3 Measurement time for each type of room in case of focusing on $^{60}\text{Co}(1173.2\text{keV})$

Fig. 4.4 Measurement efficiency for each type of room in case of focusing on $^{60}\text{Co}(1173.2\text{keV})$

Fig. 4.5 Comparison of experimental data and calculation results, $^{60}\text{Co}(1173.2\text{keV})$

Fig. 4.6 Comparison of experimental data and calculation results, $^{60}\text{Co}(1332.5\text{keV})$

Fig. 4.7 Comparison of calculated results between max and average concentration of natural radionuclides,
 $^{60}\text{Co}(1173.2\text{keV})$

Fig. 4.8 Schematic view of measurement method for in-site Ge detector

Photo 2.1 Conditions of characterization test for direction dependence of detector (45° in source positional angle)

Photo 2.2 Conditions of characterization test for direction dependence of detector (installation of radioactive source)

Photo 4.1 Conditions of measurement for background (No. 1)

Photo 4.2 Conditions of measurement for background (No. 2)

1. はじめに

我が国の商用原子力発電所等を対象としたクリアランス制度は、平成 17 年 5 月の「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」¹⁾（以下、原子炉等規制法）の一部改正及び同年 11 月同法を施行するために整備された経済産業省令第 112 号「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第 61 条の 2 第 4 項に規定する精錬事業者等における工場等において用いた資材その他の物に含まれる放射性物質の放射能濃度についての確認等に関する規則」¹⁾（以下、放射能濃度確認規則）によりおおむね確立された。

このような状況の中、既に廃止措置中である日本原子力発電(株)東海発電所では、平成 18 年 6 月、我が国で初めて、上述のクリアランス制度に基づき「東海発電所において用いた資材等に含まれる放射性物質の放射能濃度の測定及び評価方法の認可申請書」（以下、クリアランス認可申請書）を経済産業大臣に提出し、同年 9 月、同大臣に認可された。同発電所は、管理区域で発生した金属廃棄物 2000 トンに対して認可された測定方法を適用して、クリアランス判断を実施している。平成 19 年 4 月、クリアランス判断されたその一部の 107 トンについて、その判断の妥当性の確認を得るために原子力安全・保安院に対して「クリアランス確認申請書」を提出した。そして同年 5 月、最終的に確認申請された全量 107 トンについて国の確認が得られ、「放射性廃棄物として扱う必要がない物」（以下、クリアランス物）として原子炉等規制法の規制から外れ、一般・産業廃棄物同様の扱いとなり、発電所内外での再生利用・再使用が可能となった。

今後、老朽化した商用原子力発電所等の廃止措置が本格化するとされており²⁾、上述の東海発電所同様にクリアランス制度の適用は増え、クリアランス物量は増大すると予想される。また、上記東海発電所のガス冷却炉や、今後廃止措置が見込まれる加圧水型軽水炉、沸騰水型軽水炉の 1 基あたりの廃止措置に伴い発生する廃棄物等の発生推定量³⁾によれば、「クリアランス物」と「放射性廃棄物でない廃棄物」の合計が、発生廃棄物量全体に占める割合は、いずれの炉型も 90%以上となっており、発生量のほとんどを占めている。そして、その中でも材質に着目すると金属と比較してコンクリートの物量が圧倒的に多い結果となっている。したがって、我が国におけるクリアランス制度の定着のためには、特にこの対象物量の多いコンクリートに対してクリアランス測定及び判断を適切に実施することが、極めて重要であると考えられる。

コンクリートに対するクリアランス測定の実施時期は、これまでの解体経験で得た知見を基に管理区域解除までの解体手順等を考慮すれば、コンクリートガラになる前、すなわち建屋コンクリート構造物解体前が望ましい。

この建屋コンクリート構造物の解体撤去前の有効なクリアランス測定として一括測定法が挙げられる⁴⁾⁵⁾⁶⁾。一括測定法とは、可搬型 Ge 半導体検出器を建屋内の適切な位置に配置し、天井、壁及び床等の広い領域の残存放射能を一括で測定・評価する方法であり、原子炉施設を廃止措置する際に利用されるクリアランス測定法の一つである。

一方、現行の我が国のクリアランスレベル検認にかかる基準では、クリアランス対象物の測定・評価に関して、次のことを要求している。

- ①ある評価単位内の平均放射能濃度がクリアランスレベルを超えないこと
- ②その評価単位内で放射能濃度が均一であること

従来の一括測定法による評価では、放射能濃度が均一であることを事前にサーベイメータ等による全面測定で確認しておく必要があり、それにかかる時間及び労力が膨大になることが懸念されている。本報告では、放射化による汚染のないこと、及び、表面からの浸透汚染のないことを前提に、建屋コンクリート表面汚染を対象とした一括測定法の測定・評価手法の一つとして、上記のクリアランスレベル検認にかかる基準を、事前サーベイすることなく、可搬型 Ge 半導体検出器による一度の測定で判断できる合理的な考え方及び評価手法を提案し、その評価手法の適用性を、測定範囲及び測定時間の観点から検討するとともに、本評価手法を適用するにあたっての留意点、適用範囲等について明らかにする。

2. 検討の背景

2.1 一括測定法の概要

(1) 概要

建屋コンクリートの一括測定法とは、可搬型 Ge 半導体検出器を建屋コンクリート区画エリア内の適切な位置に配置し、天井、壁及び床等の広い領域の残存放射能を一括で測定・評価する方法である。本測定の具体的方法は、一般的に図 2.1 に示すように、建屋コンクリート区画エリア内の中央に測定器を設置して適切な時間、測定を実施し、その後、測定器を反転して測定を繰り返し実施する。したがって、一つのエリアの測定には、基本的に 2 回の測定が必要となる。この 2 回の測定で満足する理由は、次項に示す可搬型 Ge 半導体検出器の優れた方向特性による。

(2) 可搬型 Ge 半導体検出器の方向特性

ここでは、今回検討で使用する可搬型 Ge 半導体検出器の方向特性を確認するために以下の試験を実施した。試験では、 ^{60}Co の密封線源を用いた。測定装置の規格、仕様及び試験条件を表 2.1、表 2.2 にそれぞれ示し、また、測定装置の構成を図 2.2 に示す。

本試験は、図 2.3 に示すとおり、可搬型 Ge 半導体検出器の検出部先端中心を中心とした半径 1m の同心円上で、かつ検出部先端中心を中心に検出器前面軸方向を角度 0° として、 15° 毎に角度 180° までのそれぞれ所定の位置に ^{60}Co 線源を移動させて、各角度で測定を実施した。測定実施状況を写真 2.1 及び 2.2 に示す。

試験結果は、角度 0° の ^{60}Co 測定カウント数に対する各角度の ^{60}Co 測定カウント数の割合を、 ^{60}Co の γ 線エネルギー 1173.2keV 及び 1332.5keV に分けて図 2.4 にそれぞれ示した。なお、負の角度側の結果については、正の角度側の測定結果と対称としている。

図に示すとおり、角度 0° に対する各角度の ^{60}Co 測定カウント数の割合は、角度 $0^\circ \sim \pm 150^\circ$ までは 2 種類の γ 線エネルギーの差異によらずおおむね 90%以上であり、可搬型 Ge 半導体検出器の優れた方向特性が確認できた。なお、 $\pm 150^\circ$ より広角で ^{60}Co 測定カウント数が低下する原因としては、可搬型 Ge 半導体検出器の検出部背面に配置されているデュワーびんによる遮へいの影響と推察される。

2.2 既往の研究

(1) (社)日本原子力学会による標準（民間規格）

日本原子力学会標準「クリアランスの判断方法：2005」（以下、学会標準）の本文中において一括測定法は、建屋構築物、大型機器のような面積の大きなクリアランス対象物の測定法の一つとして、濃度的代表位置測定法及び統計的代表点測定法とともに紹介されている⁴⁾。

その学会標準の「付属書」には、一括測定法の補足説明として以下の記述がある。「一括測定方法は、NUPEC や DIN 規格で示されている方法であり、評価単位を全て見込んで測定する方法であり、一種の全面測定であるが、評価単位での表面汚染が均一であるとして表面密度を求める。従って、局在汚染の可能性がなく表面密度が低い場合に適用できる方法である。」（著者注

-NUPEC：（財）原子力発電技術機構、DIN：（社）ドイツ規格協会）また、大面積の対象物で表面密度を測定する場合の測定方法の選定フロー図が掲載されている（図 2.5 参照）。

さらに、学会標準の「解説」には、建家コンクリートや大型機器のような大面積の対象物に適用する測定方法について、以下の記述がある。「一括測定方法 汚染の存在する可能性が殆どない領域に対しては、コリメータのない Ge 検出器を用いて一度に大面積を測定することも可能である。この場合には、例えば 100cm² から 1m² 単位での放射能分布を評価することはできないので、そのような分布が存在しないか、存在したとしてもそのバラツキが小さい場合に限定されることになる。」また、一括測定法の具体的な適用事例として(財)原子力環境整備促進・資金管理センター（以下、原環センター）の報告書⁷⁾を挙げている。上記 NUPEC（（財）原子力発電技術機構）及び原環センターの研究内容は後述する。

以上のことから、NUPEC 及び原環センターの既往の研究を参考とした学会標準における一括測定法の測定結果の評価手法は、測定対象エリアに局在汚染がないこと及び当該エリアの表面密度が低いことの確認を前提条件に、事前準備した”表面汚染均一とした放射能換算係数”と”測定によって得られた正味計数率”の積により当該エリアの平均放射能濃度を評価する手法である。学会標準では、局在汚染がないこと及び当該エリアの表面密度が低いことを確認する手段については言及されていないが、使用履歴等での確認が困難な場合、全面走査測定等による確認が必要になることも考えられる。

また、本標準では、評価単位の重量制限の項目で、対象物の評価厚さについて、「クリアランスと判断された物の取扱と対象物の放射能濃度を過小評価しないことを考慮して最大 5cm とする」と記述されている。

(2) (財)原子力発電技術機構(NUPEC)における研究

NUPEC においては、一括測定法について、まだクリアランスレベルや評価単位など具体的に示されなかった平成 8 年～12 年頃に研究され、報告書「実用発電用原子炉廃炉設備確証試験 — 建屋残存放射能等評価技術確証試験」に結果を報告している⁵⁾。その中に以下の記述がある。「一括測定方式は、コンクリート壁や部屋単位の最終確認測定用として、部屋の中央に高効率ポータブル Ge 検出器を設置して測定する方式である。」

研究内容としては、国外の規制動向などを参考にしながら、一括測定に要求する汚染検出の目標性能として、表面密度 0.1Bq/cm²（ホットスポットは 100cm² の窓面積に対し 30Bq/100cm²）及び分布評価単位 1m×1m を設定している。また、表面密度(Bq/cm²)から放射能濃度(Bq/g)へ換算の際に必要な評価厚さは、表層 5mm、同 10mm の 2 種類を仮定しており、それぞれの厚さを考慮して 1kBq/m² の表面密度を放射能濃度換算すると 0.1Bq/g、0.05Bq/g になることから、汚染検出の目標性能には、クリアランスレベルを意識した設定が伺われる。因みに現行の ⁶⁰Co 及び ¹³⁷Cs のクリアランスレベルはともに 0.1Bq/g である⁴⁾。なお、現時点における表面汚染コンクリートの評価厚さは、上述のように学会標準等にも示される 50mm とするのが一般的であることから、評価単位内で許容される現時点での総放射エネルギーは、NUPEC がその当時設定していた総放射エネルギーの 5～10 倍ということになる。

本研究の中では、実機発電所サイト内で適当な部屋（¹³⁷Cs 汚染が確認されている汚染エリアと

非汚染エリア)を選定して実際に一括測定を実施し、得られた測定結果を①部屋内均一、②検出器正面壁上隅の $1\text{m}\times 1\text{m}$ の領域、③正面の $1\text{m}\times 1\text{m}$ の領域など数種類の汚染の分布を仮定して表面密度(^{137}Cs)として評価を行い、それぞれのエリアの放射線管理基準を満たしていることの確認等の検討を行っている。

また、汚染を模擬した計算等により、一括測定で得られる測定値を①部屋内均一評価した場合と②正面上隅の $1\text{m}\times 1\text{m}$ の領域を評価した場合に汚染検出のそれぞれの目標値を満足するのに必要な測定時間について $5\text{m}\times 5\text{m}\times 5\text{m}$ (全表面積 150m^2)の部屋を対象に検討を行っている。その結果、①部屋内汚染を均一とし、汚染検出の目標値を $0.01\text{kBq}(^{60}\text{Co})/\text{m}^2$ とした場合は、1.5時間で目標同等の検出限界密度が達成されるとし、また②検出器正面壁上隅の $1\text{m}\times 1\text{m}$ のみ表面汚染し、汚染検出の目標を $1\text{kBq}(^{60}\text{Co})/\text{m}^2$ とした場合は、15時間で目標同等の検出限界密度が達成されるとしている。ホットスポットについては、米国規制を参考に設定した $30\text{Bq}/100\text{cm}^2$ のレベルを前提として「一括測定方式は $10\text{cm}\times 10\text{cm}$ の局在汚染を検出することは実用的には困難であり、測定対象となる部屋内に局在汚染がないことを使用履歴等からあらかじめ把握しておくことが必要である」⁵⁾との見解である。

なお、以上の検討は、測定器として相対効率約120%の高感度可搬型Ge検出器を使用することを条件としている。

(3) (財)原子力環境整備促進・資金管理センターにおける研究

原環センターでは、上述したNUPECの検討結果を踏まえて平成13年度に「原子力発電施設解体放射性廃棄物基準調査－クリアランスレベル区分マニュアルの検討」を実施しており、その添付資料「クリアランスレベル区分マニュアル」の中では、一括測定について具体的に例を挙げ、クリアランス測定から判断までの流れを掲載している⁷⁾。その中に以下の記述がある。「一括測定法は、部屋のほぼ中央にコリメータのないGe検出器を長時間設置し、部屋全体に汚染がないことを効率よく測定評価する方法である。」

そこでの検討は、約 $15\text{m}\times$ 約 $4.5\text{m}\times$ 約 5.8m の形状の部屋を対象に、部屋内均一の汚染があるとして、下記式によりクリアランス判断を行うこととしている。

$$\frac{[\text{測定計数率}(cps)]}{[\text{評価対象エリア内に均一汚染があるとした検出効率}(cps/(Bq/g))]} < R(Bq/g)$$

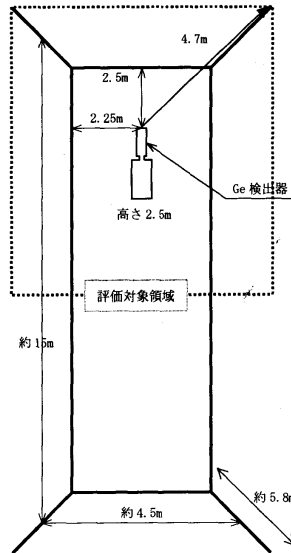
ここで、 R はクリアランス判定値である。本幾何条件での検出効率は $32\text{cps}/(\text{Bq}/\text{g})$ と示されている。したがって、クリアランス判定値を ^{60}Co のクリアランスレベル $0.1\text{Bq}/\text{g}$ とした場合には、測定計数率が 3.2cps 未満であればクリアランス可能の判断となる。天然放射性核種として存在する ^{40}K の計数率は、コンクリート壁で囲まれた部屋で測定した場合 2.0cps 程度であり、 ^{60}Co の測定計数率 3.2cps という値は、測定判断に使用する値として、決して小さくはない。

本判定式により、クリアランス判断を行う場合には、前述した学会標準の中で示される“局在汚染がない”かつ“表面密度が小さい”ということを事前に測定対象領域全面に亘って測定評価しておくことが、クリアランス判断の誤りの防止の観点から特に重要と考えられる。

本事例のクリアランス測定から判断までの主な流れを以下に引用し紹介する。

①検出器

- Ge 検出器：相対効率 約 120%
- 検出感度：12.8cps/(0.4Bq/g)for 評価領域内 ^{60}Co 一様分布
 $\therefore 32\text{cps}/[\text{Bq/g}] (=12.8 \div 0.4)$



②クリアランス判定値

- 主要核種を ^{60}Co とし、 ^{60}Co のクリアランス判断目安値が 0.39Bq/g である場合には、その 1/2 である 0.19Bq/g
- クリアランス判断目安値に対する計数率：12.48cps
- クリアランス判定値に相当する計数率：12.48 ÷ 2 = 6.2cps

③測定時間

- 1000 秒測定時の検出時の検出下限：0.064cps → 0.002Bq/g 相当 (=0.064cps ÷ 32cps/(Bq/g))

④測定場所の設定

- 上図
- 評価領域における距離の変化 < 3 倍
- 評価領域の面積：約 110m²

⑤測定

- 検出限界以下：0.064cps

⑥測定値の評価

- 判定：0.064cps < 6.2cps
- クリアランス判断目安値以下であり、クリアランスレベルを満足している。

2.3 クリアランスレベル検認にかかる基準

「1. はじめに」で述べたとおり、我が国における商用原子力発電所の廃止措置などで適用されるクリアランス制度は、平成 17 年 5 月の原子炉等規制法の一部改正及び同年 11 月の同法を実施

するための経済産業省令・放射能濃度確認規則の整備によりその枠組みが確立された。

その後、更に、経済産業省原子力安全・保安院（NISA）は、平成 18 年 1 月、クリアランス制度の適切な運用のため、放射能濃度確認規則第 6 条の放射能濃度の測定及び評価方法についての留意事項を「放射能濃度の測定及び評価の方法の認可について（内規）」（以下、NISA 内規）に示した。その NISA 内規の中で、放射能濃度確認規則第 6 条第 2 号の適用に当たって留意する点として、「放射能濃度の分布の均一性」及び「評価単位制限の考え方（基本評価単位，評価単位の拡張）」等を挙げている。放射能濃度確認規則第 6 条第 2 号とあわせて以下に示す。

【放射能濃度確認規則第 6 条第 2 号】

（測定及び評価の方法の認可の基準）

第 6 条 法第 61 条の 2 第 2 項の規定に基づく放射性物質の放射能濃度の測定及び評価の方法の認可の基準は、次に掲げるとおりとする。

2 放射能濃度確認対象物中の放射性物質の放射能濃度の評価単位は、その評価単位内の放射能濃度の分布の均一性及び想定される放射能濃度を考慮し、適切な重量であること。

【NISA 内規】より抜粋

2. 放射能濃度確認規則第 6 条第 2 号関係

放射能濃度確認規則第 6 条第 2 号の適用に当たっては、以下の点に留意すること。

- 「放射能濃度の分布の均一性」については、100kg 程度を測定単位として測定されたそれぞれの測定単位ごとの放射能濃度に著しい偏りがないことを確認すること。（評価単位内の一部の測定単位において、クリアランスレベルの 10 倍を超える放射能濃度が測定された場合には、著しい偏りがあるものとして取り扱う。対象物に局所的に放射能濃度の高い部分がある場合には、除染等が行われ、著しい偏りがないことが求められる。）
- 「想定される放射能濃度」については、平均放射能濃度（測定により求められる放射能濃度の平均をいう。以下同じ。）がクリアランスレベル以下になることが見込まれていることを確認すること。
- 1 回測定で取り扱うことのできる重量については測定装置の種類などにより異なるものの、当分の間、評価単位については、原則、1 トンを上限とし、認可申請の審査に当たっては、評価単位が 1 トン以下であることを確認すること。（なお、IAEA の安全指針（RS-G-1.7）や原子力安全委員会における検討では、10 トン程度の対象物を前提としたシナリオに基づいてクリアランスレベルを算出しているところ、クリアランス制度を初めて我が国において導入することにかんがみ、上記のとおり、原則として 1 トンを上限とするものである。）
- ただし、建屋コンクリート、大型機器などの大型の対象物については、あらかじめ 100kg 程度を測定単位として対象物に係る測定単位毎の放射能濃度を測定し、これらの測定単位ごとの放射能濃度のうち最大濃度と最小濃度を比較した結果、最大濃度が最小濃度の 10 倍以内であると認められる場合には、上記のように評価単位を原則 1 トンとする取扱いにかかわらず、評価単位の上限を最大 10 トンまで拡張することができる。このほか、これらの測定単位ごとの放射能濃度のうち最大濃度がクリアランスレベル以下であり、かつ、平均放射能濃度がク

クリアランスレベルと比較して極めて低いレベルにある場合にも、評価単位の上限を 10 トンまで拡張することができる。

以上のことから現行の我が国のクリアランス制度では、クリアランスレベル検認の測定・評価に関して、特に次の 2 点を要求している。

- ①ある評価単位内の平均放射能濃度がクリアランスレベルを超えないこと
- ②その評価単位内で放射能濃度が均一であること

今般、NISA 内規では上記評価単位を原則 1 トンとし、その評価単位内を細分化した測定単位を 100kg と明確に示した。これは、評価単位 1 トンの中での「放射能濃度の分布の均一性」については、評価単位の 1/10 重量である 100kg を測定単位として、その測定単位毎の放射能濃度のバラツキを確認することであり、言い換えれば、その測定単位内での放射能濃度のバラツキは論じないとする考え方が示されたと考えられる。さらに建屋コンクリートなどの大型の対象物を対象とした「評価単位の拡張」の条件として、測定単位 100kg 程度ごとの放射能濃度のうち最大濃度が最小濃度の 10 倍以内と認められる場合には、評価単位を原則 1 トンにとらわれず最大 10 トンまで拡張できると示されており、ここでも測定単位 100kg が示される。

なお、前述した「2.2 既往の研究」は、クリアランスレベル、評価単位及び測定単位等が明確にされていない時期での検討であった。

なお、本内規には「3. 放射能濃度確認規則第 6 条第 3 号関係」として、

(1) 対象物の汚染が表面汚染のみである場合には、放射能濃度確認規則第 6 条第 3 号にいう放射能濃度を決定する場合の適切な方法としては、対象物の放射エネルギー（測定により求められる当該対象物の表面汚染密度に当該評価単位ごとの汚染面の表面積を乗じて得られる放射エネルギーをいう。）を当該対象物の重量で除すことによって放射能濃度を決定する方法も認められる。ただし、建屋コンクリートのように部材が厚い場合には、決定される放射能濃度が過小評価とならないように、適切な厚さ（5cm 程度）に応じた当該対象物の重量をもとに放射能濃度が決定されていることを確認すること。

と記載されている。従って、5cm 厚さのコンクリート表面を対象とすると、測定単位 100kg に相当する表面積は、コンクリート密度を 2.3g/cm^3 として、 8696cm^2 で 90cm 角程度の正方形、また、評価単位 1 トン=1000kg に相当する表面積は 86956cm^2 で 295cm 角程度の正方形が目安となる。

3. 提案する評価手法の基本的な考え方

3.1 一括測定法の課題

「2.3 クリアランスレベル検認にかかる基準」で述べたとおり、クリアランスの測定・判断に関する基準では、「評価単位」内での平均放射能濃度がクリアランスレベルを超えないこと（「平均放射能濃度の評価」）の他に、その「評価単位」内を細分化した『測定単位』ごとの放射能濃度にあまり大きな差異がなく、評価単位全体に亘って均一であること（「放射能濃度の分布の均一性」）を確認することが求められている。

従来の一括測定法の評価手法では、事前に「放射能濃度の均一性」等を床面、壁面、天井面等に対して別途全面走査測定等で確認した上で“表面汚染分布が均一”として評価する方法が採用されている。一方、以下提案する一括測定法は、測定値等から対象物表面の汚染分布等を推定することは困難ではあるが、足場の組立等の準備作業が必要な事前サーベイによる均一性確認をすることなく、つまり、汚染分布によらず、可搬型 Ge 半導体検出器を測定エリア内の適切な場所に設置するだけで測定が完了できるという利点がある。

すなわち、クリアランスレベル検認にかかる基準で要求される「平均放射能濃度の評価」と「放射能濃度の分布の均一性」という 2 点の測定評価を可搬型 Ge 半導体検出器による 1 回の測定で満足させることとし、そのために有効と考えられる評価手法の基本的考え方を以下に提案する。

3.2 本評価手法の基本的な考え方

一括測定により得られる測定値（着目核種の計数率等）から放射能濃度（Bq/g 等）を算出するには、汚染源と検出部の距離に応じた換算係数（Bq/cps、Bq/g/cps 等）を求める必要がある。したがって、汚染源が測定対象範囲に点在するようであれば正確な評価は非常に困難であり、何らかの保守的な考え方を導入する必要性が生じると考えた。

ここでは、得られる測定結果を次のように保守的に評価して、クリアランス判断を行うことを提案する。

- ①汚染源は、任意に設定した測定対象範囲の中で検出部先端中心から最も遠いコンクリート表面位置 1 箇所に点線源として存在すると仮定し、事前に着目核種の汚染源と検出部との距離に対応した放射能換算係数（Bq/cps）を準備して、着目核種の正味計数率（cps）から放射能（Bq）を導出する。
- ②クリアランス判断は放射能濃度（Bq/g）に基づく必要があるので、①で求めた放射能（Bq）を重量で除す必要がある。この重量を NISA 内規で示された測定単位重量 100kg とする。
- ③①および②により求めた着目核種の放射能濃度を、クリアランス判定値（核種組成比等を考慮して、評価対象核種の各放射能濃度(D)を当該核種のクリアランスレベル(C)で除した割合の総和 $\Sigma D/C$ が 1 以下となるように求めた着目核種の放射能濃度）と比較することにより、クリアランスの判断を行う。

①により、得られた正味計数率 (cps) を最も保守的に放射能 (Bq) 評価することになる。また、②の測定単位重量 100kg は、これまでの評価手法の評価単位 (基本的には検出器の視野範囲、すなわちエリア半分の表面積に評価厚さ及び対象物の単位体積重量を考慮した重量) と比較して、極めて小さな値である。また、③で示すように②の測定単位重量 100kg で除した放射能濃度をクリアランス判断に用いることにより、評価単位内に複数の測定単位を設定せず、単一の測定単位 (100kg) を設定することになるため、NISA 内規に示される「平均放射能濃度の評価」と「放射能濃度の分布の均一性」の確認を一回の測定で満足することが可能と考えられる。したがって、本評価手法は、これまで一括測定法で必要とされてきた「放射能濃度の分布の均一性」等の事前確認のための全面走査測定等も不要となることから、一括測定法の利点を生かした合理的な手法であると考えられる。

その反面、本評価方法では、1 トンの物量中の放射能を 100kg で除するため、クリアランス判定に用いられる放射性核種濃度は実質的には通常の 1/10 程度になる。従って、本評価手法に基づく測定でクリアランス判定値を超える場合には、例えば評価単位重量を 1 トン等に変更してクリアランス判定を再度実施し、その結果クリアランス判定を満足するのであれば全面走査測定等によって局在汚染の有無を確認するといったクリアランス判断のフローも考えられる。クリアランス判断フローの一例を図 3.1 に示す。換言すれば、この場合については、本測定・評価が確認方法の認可申請のための事前測定のように位置づけられる。さらに、事業者による測定が終了した後の『規制当局による確認検査』の一部として、本測定・評価方法を適用することも有用と考えられる。

本評価手法では、測定された計数率から保守的に放射能を評価するものであり、上述したようにコンクリート表面上にのみ汚染放射能が存在することを前提としている。表面の亀裂等から深さ方向へ浸透した汚染については、その放射エネルギーを本手法で評価することは困難であるため、評価対象から除外する。浸透汚染が存在する可能性のあるエリアを対象とする場合、従来の全面走査測定と試料採取による方法、あるいは全面走査測定と可搬型 Ge 半導体検出器を組み合わせた従来の一括測定法を適用するのが望ましい。

4. 提案する評価手法の適用性検討

「3. 提案する評価手法の基本的な考え方」で提案した評価法は、極めて保守的な評価法であり、極めて低いレベルにのみ適用できる方法であるため、体系内に放射能が少なく、膨大な測定時間が要求される可能性がある。全面測定による作業人工数を低減できても、膨大な測定時間を要しては、時間効率の観点から、その適用性に疑問符を付けられることが懸念される。そこで、ここでは、クリアランス判定値に相当する計数率を満足する検出限界計数率が得られるまでの時間を目安の測定時間として求め、実機適用性を検討した。

上述の測定時間は、建屋コンクリートのバックグラウンドの影響を受け、着目核種のクリアランス判定値及び部屋の大きさ（汚染までの距離）に依存する。ここでは、管理区域内の建屋コンクリート区画エリアにてバックグラウンドの測定を実施して着目核種の検出限界計数率の経時変化を求めた。また、モンテカルロ計算コード EGS5 を用いて放射能換算係数を求めた。それらの結果から、部屋寸法ごとに測定時間及び測定効率について検討し、提案する評価法の実機適用性について考察した。

また、コンクリート配合等が異なれば ^{40}K 等の天然放射性核種濃度が異なり、着目核種の検出限界計数率が変動し、測定時間に影響を及ぼすことが懸念される。ここでは、文献を参考にして、コンクリート中に含まれる天然放射性核種濃度を平均値と最大値の2水準設定し、EGS5によりバックグラウンド計数率を求め、着目核種の検出限界計数率の経時変化を計算し、天然放射性核種濃度が測定時間に与える影響について検討を実施した。

最後に、以上の検討を踏まえて、本評価手法を適用するにあたっての留意点及び可搬型 Ge 半導体検出器を用いた効率的な測定のあり方についての提案を行った。なお、本検討における着目核種は ^{60}Co とした。

4.1 実機適用性の検討

4.1.1 クリアランス判定値及び部屋の大きさが測定時間に与える影響検討

(1) 検討を行う部屋の構造寸法について

一括測定を含むクリアランス測定は、前述した「2.3 クリアランスレベル検認にかかる基準」の NISA 内規に示すように評価単位の観点（最大 10t に制限）から 1 回の測定で評価可能な構造寸法の制限を受けることになる。したがって、本検討で対象とする部屋の構造寸法は、天井高を 3m、平面形状を正方形と仮定し、評価単位の制限（10ton 以内）を踏まえ、コンクリートの単位体積重量 ρ を $2.3\text{g}/\text{cm}^3$ とし、2.3 で記述したように、コンクリート評価厚さ t を 5cm として決定した。本検討で対象とする部屋の構造寸法を表 4.1 に示す。

(2) 検出限界計数率の経時変化

着目核種 ^{60}Co の検出限界計数率を求めるために、実際に建屋コンクリートのバックグラウンドを測定した。図 4.1 に示すように、測定は日本原子力研究開発機構原子力科学研究所バックエンド技術開発建家内の旧溶融試験炉エリアで実施した。測定実施状況を写真 4.1 及び 4.2 に示す。

測定は、バックグラウンド測定を 300 秒ごとに行い、得られた測定データから ^{60}Co の γ 線エネルギー

ギー1173.2keV 及び 1332.5keV におけるそれぞれの検出限界計数率の経時変化を求めた。検出限界計数率は、Cooper の方法⁸⁾を指定して市販の γ 線核種分析プログラムにより解析して求めた。検出限界計数率の経時変化を図 4.2 に示す。

図に示すとおり、このエリアにおける γ 線エネルギー1173.2keV 及び 1332.5keV における検出限界計数率の経時変化の近似式はそれぞれ下式となる。

$$1332.5\text{keV} : N_d = 1.995 \times t^{-0.509}$$

$$1173.2\text{keV} : N_d = 2.514 \times t^{-0.498}$$

ここに、 N_d は検出限界計数率(cps)、 t は測定時間(sec)である。 γ 線エネルギー1173.2keV における検出限界計数率の方が 1332.5keV の検出限界計数率よりも大きくなった理由としては、建屋コンクリートの天然放射性核種 (^{40}K (γ 線エネルギー1460.6keV)等) の影響により 1332.5keV と比較して 1173.2keV の方が高いバックグラウンド計数を有することが主要因と考えられる。したがって、これ以降の測定時間の検討では、着目核種を ^{60}Co とした場合、測定時間が長くなる、検出限界計数率が大きい 1173.2keV に着目して検討を進める。

なお、建屋コンクリートのバックグラウンドは、コンクリートの種別等が同じとした場合では検出器の位置や部屋の大きさ等による大きな差異はないと考え、各部屋タイプの検討には、本測定で得た検出限界計数率の経時変化が同等であるとして検討した。

(3) EGS5 による放射能換算係数 (Bq/cps) の計算

^{60}Co スポット汚染源は、表 4.1 に示した 2m~7m タイプの部屋のそれぞれ空間中心に可搬型 Ge 半導体検出器先端中心を一致させた時に検出器先端から測定対象範囲の中で最も遠くなる位置、すなわち部屋隅角部にあるとして、EGS5 により放射能換算係数(Bq/cps)を求めた。部屋タイプごとに算出した放射能換算係数を表 4.2 に示す。本表の一部には、2.1 節に記述した、密封標準 ^{60}Co 線源を利用した方向特性測定試験で得られた放射能換算係数の代表例をあわせて示す。計算値と測定値がほぼ一致していることが確認された。

(4) 測定時間の検討

ここでは、着目核種 ^{60}Co のクリアランス判定値を 10 水準 (^{60}Co クリアランスレベル(0.1Bq/g) の 1/10~1 倍までの範囲) 考慮して検討を進める。これは、実際の原子炉施設等のクリアランス判断では、選定した評価対象核種の放射能濃度とそれぞれの核種のクリアランスレベルの比の総和が 1 を超えないことを確認することになるので、この評価対象核種が複数核種 (^{60}Co 以外の核種の存在) あることを勘案してのことである。

測定時間は、部屋タイプごとに、NISA 内規に従った測定単位重量 100kg を考慮してクリアランス判定値から求められる総放射能量 (100kg×クリアランス判定値) と(3)で求めた放射能換算係数 (Bq/cps)よりクリアランス判定値に相当する計数率を求め、その計数率を(2)の実測により求めた建屋コンクリートの ^{60}Co 検出限界計数率の経時変化の近似式に代入することにより求めた。

結果を表 4.3 に示す。表中には、求めた測定時間と測定効率をクリアランス判定値及び部屋タイプごとに示した。また、 γ 線エネルギー1173.2keVに着目して、図 4.3 には測定時間を、図 4.4 には測定効率を、それぞれ部屋タイプ別にまとめた。表及び図に示すとおり、このバックグラウンド状況下の範囲内で以下のことがわかる。

- ・ クリアランス判定値がいずれの値でも、小さい部屋タイプの方が、測定時間は短く、測定効率は大きくなる傾向である。
- ・ 例えば、エリア半分の測定時間を一昼夜(24時間)に制限するとクリアランス判定値が0.07Bq/g程度以上であれば、最大の7mタイプまでの測定が可能である。また、クリアランス判定値が0.05Bq/g程度以上であれば、7mタイプは制限時間を超過するものの6mタイプまで測定可能である。クリアランス判定値が0.02Bq/gを下回ると最小の2mタイプでも制限時間内での測定は困難となる。

以上の測定時間の検討結果より、提案した評価手法は、設定されるクリアランス判定値に測定時間が大きく影響を受け、事前に合理的な測定計画等の検討が必要となるものの、測定開始後は特段の作業が発生せず、放置できる簡便な測定であることを踏まえれば、十分に実機適用性があると判断される。

4.1.2 コンクリート中の天然放射性核種濃度が測定時間に与える影響検討

前項では、本評価法の実機適用性について、クリアランス判定値及び測定対象エリアの大きさをパラメータに求めた測定時間を基に検討した。その際に必要とした検出限界計数率は、建屋コンクリート内で実測したバックグラウンド測定により得たが、当該計数率はコンクリート中の天然放射性核種濃度の影響を大きく受けると考えられる。

ここでは、コンクリート中に含まれる天然放射性核種濃度が検出限界計数率に与える影響を、EGS5を利用した計算により検討した。

「2.2 既往の研究」で述べた NUPEC の報告書によれば、コンクリート中の天然放射性核種濃度の平均値及び最大値は、表 4.4 に示すとおりである。この天然放射性核種濃度の平均値及び最大値を用いて、EGS5によりスペクトル計算を実施し、 ^{60}Co のフォトピーク領域に対応する領域のカウント数の総和をバックグラウンドとし、 3σ を考慮して ^{60}Co の検出限界計数率の経時変化を求めた。計算で考慮した天然放射性核種を表 4.5 に示す。

天然放射性核種濃度の平均値を用いて得た ^{60}Co の検出限界計数率の経時変化と前項の実測データを図 4.5 及び 4.6 に示す。図に示すとおり、1173.2keV 及び 1332.5keV とともに計算値と実測値は良く一致していることから、実測した建屋コンクリートの天然放射性核種濃度は平均値程度と推定される。

天然放射性核種濃度の平均値を用いた計算と実測したデータが比較的良く一致したことを確認した上で、天然放射性核種濃度が最大値と平均値の比較を計算により実施することとした。

$^{60}\text{Co}(1173.2\text{keV})$ の検出限界計数率の経時変化の計算結果を図 4.7 及び表 4.6 に示す。

図及び表に示すとおり、当然測定時間は、天然放射性核種濃度(最大値)の大きい方が長くな

る。また、天然放射性核種濃度比（最大値/平均値）約 2 倍に対して、測定時間比も同様に約 2 倍となっており、測定時間は天然放射性核種濃度に比例する結果となった。

この結果より、前項で示した 24 時間以内の測定が可能とした部屋タイプ、クリアランス判定値の条件範囲も異なることになり、コンクリート中の天然放射性核種濃度のレベルによって測定計画等に影響が生じてくるものと考えられる。

4.2 本評価手法を適用するにあたっての留意点

本評価手法を適用するにあたっての主な留意点を以下に示す。

- ①これまでの検討より、本評価法を適用した場合の測定時間は、クリアランス判定値、測定対象エリアの大きさ及びコンクリート中の天然放射性核種濃度（エリアバックグラウンド）の影響を大きく受ける。したがって、任意に設定する測定対象エリアは評価単位を考慮することはもちろんのこと、できるだけ効率的な測定時間や測定対象の漏れに配慮するなど、総合的観点から合理的な測定計画を立案することが重要である。
- ②測定対象範囲内に機器架台などの障害物があると放射線を遮へいすることになり、適切な放射能評価を行うことができなくなるため、クリアランス測定以前に、室内設置の機器等の撤去範囲についても留意する必要がある。

4.3 可搬型 Ge 半導体検出器を用いた効率的な測定方法について

一括測定法は、これまで述べてきたとおり建屋コンクリート区画エリア内の中央に測定器を設置して測定を実施し、その後、測定器を反転して測定を繰り返し実施する方法が一般的であり、前項までの検討においてもその一般的な測定方法を想定して検討を実施してきた。

その検討の結果、クリアランス判定値のレベルや部屋の大きさによっては測定時間が数日以上も必要とするなど必ずしも効率的とはいえないケースもある。このようなケースでは、前述した一般的な測定方法にこだわらないで、以下に提案する測定方法も検討する価値がある。

測定にあたっては、コンクリート壁などの境界にこだわらず、1 回の測定対象範囲を測定計画者等が任意に設定し、その測定対象範囲の中で検出部先端中心と最も距離が遠くなる位置に汚染源があると仮定する本評価手法の基本的な考え方に従い、測定・評価を繰り返す。このように一つの区画エリアを分割して測定することにより、現実的でない測定時間となった部屋タイプにおいても、効率的な測定計画で対処できる可能性があると考えられる。

なお、測定器は実際の測定において任意に設定した測定対象範囲外からの放射能の影響も受けることから保守的な評価となる。この考えに従えば、例えばトンネル通路のように平面的に細長い形状のエリアであっても、**図 4.8** に示すように、1 回の測定完了後には測定対象範囲を考慮した次回測定器設置位置に測定器を移動して、測定・評価を繰り返すことで全エリアを網羅することが可能であると考えられる。

5. まとめ

クリアランスレベル検認にかかる基準を、事前サーベイすることなく、対象物に対する一回の測定・評価だけで満足する一括測定法の評価法を提案し、かつ、その実機適用性についても検討を行った。以下にその内容を整理する。

- クリアランスレベル検認にかかる基準において要求される、(1)ある評価単位内の平均放射能濃度がクリアランスレベルを超えないこと、(2)その評価単位内で放射能濃度が均一であることという2つの事項を、可搬型 Ge 半導体検出器を用いた1回の測定・評価で判断できる一括測定法の評価手法を提案した。本評価手法は、従来の評価手法では前提条件とされた全面走査測定等による「放射能濃度の分布の均一性」等の事前確認が省略可能な合理的測定法と考えられる。
- 提案した評価法は、極めて保守的にクリアランス判断を行うため、測定時間に関する実機適用性が懸念された。そこで、モンテカルロ計算コード EGS5 及び建屋コンクリートのバックグラウンド測定結果を利用して、クリアランス判定値や部屋タイプの大きさをパラメータに測定時間の算定を行い、各条件での測定時間や測定効率の目安を定量的に示した。一例を挙げると、 ^{60}Co 単一核種で存在している場合で部屋構造寸法が $7\text{m} \times 7\text{m} \times 3\text{m}$ の条件では、クリアランスレベル以下であると判断するために必要な測定時間は12時間程度となる。
- コンクリートの天然放射性核種濃度が測定時間に与える影響については、EGS5 を用いた数値解析により、 ^{60}Co 検出に要する測定時間が天然放射性核種濃度に比例することが確認された。
- 可搬型 Ge 半導体検出器を用いた効率的な測定方法として、本評価法の基本的な考え方に基づいた上で、これまで一般的に想定されてきた一括測定法とは異なる「測定対象範囲を測定計画者等が自ら設定して測定・評価を繰り返す測定方法」を提案した。

最後に、本評価手法の基本的な考え方に基づく可搬型 Ge 半導体検出器を用いた建屋コンクリートの一括測定は、極めて保守的に評価でき、かつ、測定開始後は走査測定等、特段の作業が発生しない方法であることから『簡便なクリアランス測定・評価方法』として非常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、ワシントン事務所 大越 実 所長をはじめ、その他関係者の方々から貴重な御助言、御指導をいただいた。ここに深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 原子力規制関係法令研究会：2006年原子力規制関係法令集、2005年11月
- 2) 総合資源エネルギー調査会(原子力安全・保安部会 廃止措置安全小委員会)：原子力施設の廃止措置規制のあり方について、平成16年12月9日
- 3) 総合資源エネルギー調査会(原子力安全・保安部会 廃止措置安全小委員会)：原子力施設におけるクリアランス制度の整備について、平成16年9月14日
- 4) (社)日本原子力学会：日本原子力学会標準「クリアランスの判断方法：2005」、2005年6月
- 5) (財)原子力発電技術機構：実用発電用原子炉廃炉設備確証試験-建屋残存放射能等評価技術確証試験、平成4年～15年
- 6) (独)原子力安全基盤機構：原子炉施設のクリアランスに係る基準についてのガイダンス、2006年10月
- 7) (財)原子力環境整備促進・資金管理センター：平成13年度 放射性廃棄物処理システム開発調査等報告書(第1分冊) 原子力発電施設解体放射性廃棄物基準調査-クリアランスレベル区分マニュアル検討、平成14年3月
- 8) Cooper, J. A. : Nucl. Instr. Methods, 82, p.273 (1970)

表 2.1 測定装置の規格、仕様

装置名	製造元	規格及び仕様
可搬型 Ge 半導体検出器	CANBERRA	型名：GC30187935SL-7 (S/N:01027469) ・エネルギー分解能 FWHM@1.33MeV：1.8keV ・エネルギー分解能 FWHM@122keV：1.0keV ・ピーク/コンプトン：58：1 ・相対効率：30%
波高分析装置	SEIKO EG&G	型名：MCA 7600 本体はベースユニット(シャーシ、LCD ディスプレイ、タッチパネル等)と専用スロットに実装される電源ボード、CPU ボードによる構成。 ・デジタル PHA ボード(可搬型 Ge 半導体検出器用) ・5kV 高压電源ボード：出力 POS/NEG 0~5000V(最大 100 μ A) ・PC インターフェース：イーサネット及び USB 接続可能
データ処理用パソコン	EPSON	型名：Endeavor NT6000 ・解析ソフト： γ スタジオ (文部科学省「ゲルマニウム半導体検出器による γ 線スペクトロメトリー」平成 2 改訂に対応した γ 線核種分析プログラムを搭載)

表 2.2 可搬型 Ge 半導体検出器の方向特性確認試験条件

使用線源			線源位置		測定時間
核種	形状	放射エネルギー	ls	θ s	
Co-60	点線源	36,220Bq	1m	0°~180°(15°毎)	600秒

ls；検出部先端中心と線源との距離

θ s；線源設置角度(検出器前面軸方向を0°とし、右回りで表示)

表 4.1 本検討で対象とした部屋の構造寸法

部屋タイプ	平面形状×天井高	lsmax(m)	評価単位(t)
2mタイプ	(2m×2m)×3m	2.06	1.8
3mタイプ	(3m×3m)×3m	2.60	3.1
4mタイプ	(4m×4m)×3m	3.20	4.6
5mタイプ	(5m×5m)×3m	3.84	6.3
6mタイプ	(6m×6m)×3m	4.50	8.3
7mタイプ	(7m×7m)×3m	5.17	10.5

lsmax(m);測定対象範囲の中の検出部先端中心からの最大距離

表 4.2 各部屋タイプの放射能換算係数 (EGS5 評価値と測定値)

部屋タイプ	放射能換算係数(Bq/cps)			
	⁶⁰ Co(1173keV)		⁶⁰ Co(1332.5keV)	
	計算値	測定値	計算値	測定値
2mタイプ	1.29E+05	1.35E+05	1.42E+05	1.54E+05
3mタイプ	2.03E+05	2.22E+05	2.26E+05	2.41E+05
4mタイプ	3.06E+05	-	3.39E+05	-
5mタイプ	4.38E+05	-	4.91E+05	-
6mタイプ	6.02E+05	-	6.72E+05	-
7mタイプ	8.03E+05	8.58E+05	9.01E+05	8.57E+05

表 4.3 求めた測定時間及び測定効率一覧

クリアランス判定値 (Bq/g)	部屋タイプ	1回測定面積 (m ²)	クリアランス判定値に相当する計数率(cps)		測定時間(h)		測定効率(m ² /h)	
			⁶⁰ Co(1173keV)	⁶⁰ Co(1332.5keV)	⁶⁰ Co(1173keV)	⁶⁰ Co(1332.5keV)	⁶⁰ Co(1173keV)	⁶⁰ Co(1332.5keV)
0.01	2mタイプ	16	7.76E-03	7.02E-03	3.05E+01	1.76E+01	0.52	0.91
	3mタイプ	27	4.92E-03	4.43E-03	7.61E+01	4.35E+01	0.35	0.62
	4mタイプ	40	3.26E-03	2.95E-03	1.74E+02	9.66E+01	0.23	0.41
	5mタイプ	55	2.28E-03	2.04E-03	3.57E+02	2.00E+02	0.15	0.28
	6mタイプ	72	1.66E-03	1.49E-03	6.74E+02	3.70E+02	0.11	0.19
	7mタイプ	91	1.25E-03	1.11E-03	1.20E+03	6.58E+02	0.08	0.14
	0.02	2mタイプ	16	1.55E-02	1.40E-02	7.59E+00	4.51E+00	2.11
3mタイプ		27	9.85E-03	8.85E-03	1.89E+01	1.12E+01	1.43	2.42
4mタイプ		40	6.53E-03	5.90E-03	4.32E+01	2.48E+01	0.93	1.62
5mタイプ		55	4.56E-03	4.07E-03	8.87E+01	5.12E+01	0.62	1.07
6mタイプ		72	3.32E-03	2.97E-03	1.68E+02	9.50E+01	0.43	0.76
7mタイプ		91	2.49E-03	2.22E-03	2.99E+02	1.69E+02	0.30	0.54
0.03		2mタイプ	16	2.33E-02	2.11E-02	3.36E+00	2.03E+00	4.76
	3mタイプ	27	1.48E-02	1.33E-02	8.39E+00	5.03E+00	3.22	5.37
	4mタイプ	40	9.79E-03	8.85E-03	1.91E+01	1.12E+01	2.09	3.58
	5mタイプ	55	6.84E-03	6.11E-03	3.93E+01	2.31E+01	1.40	2.38
	6mタイプ	72	4.99E-03	4.46E-03	7.42E+01	4.28E+01	0.97	1.68
	7mタイプ	91	3.74E-03	3.33E-03	1.32E+02	7.61E+01	0.69	1.20
	0.04	2mタイプ	16	3.10E-02	2.81E-02	1.89E+00	1.15E+00	8.47
3mタイプ		27	1.97E-02	1.77E-02	4.71E+00	2.86E+00	5.74	9.44
4mタイプ		40	1.31E-02	1.18E-02	1.07E+01	6.34E+00	3.72	6.30
5mタイプ		55	9.12E-03	8.14E-03	2.21E+01	1.31E+01	2.49	4.19
6mタイプ		72	6.65E-03	5.95E-03	4.16E+01	2.43E+01	1.73	2.96
7mタイプ		91	4.98E-03	4.44E-03	7.43E+01	4.32E+01	1.23	2.10
0.05		2mタイプ	16	3.88E-02	3.51E-02	1.21E+00	7.45E-01	13.27
	3mタイプ	27	2.46E-02	2.21E-02	3.01E+00	1.84E+00	8.98	14.63
	4mタイプ	40	1.63E-02	1.47E-02	6.87E+00	4.09E+00	5.83	9.77
	5mタイプ	55	1.14E-02	1.02E-02	1.41E+01	8.48E+00	3.90	6.49
	6mタイプ	72	8.31E-03	7.44E-03	2.66E+01	1.57E+01	2.71	4.58
	7mタイプ	91	6.23E-03	5.55E-03	4.75E+01	2.79E+01	1.92	3.26
	0.06	2mタイプ	16	4.65E-02	4.21E-02	8.36E-01	5.21E-01	19.13
3mタイプ		27	2.95E-02	2.66E-02	2.08E+00	1.29E+00	12.95	20.94
4mタイプ		40	1.96E-02	1.77E-02	4.76E+00	2.86E+00	8.40	13.98
5mタイプ		55	1.37E-02	1.22E-02	9.77E+00	5.92E+00	5.63	9.28
6mタイプ		72	9.97E-03	8.92E-03	1.85E+01	1.10E+01	3.90	6.56
7mタイプ		91	7.48E-03	6.66E-03	3.29E+01	1.95E+01	2.77	4.67
0.07		2mタイプ	16	5.43E-02	4.91E-02	6.14E-01	3.85E-01	26.07
	3mタイプ	27	3.45E-02	3.10E-02	1.53E+00	9.53E-01	17.65	28.34
	4mタイプ	40	2.28E-02	2.06E-02	3.49E+00	2.11E+00	11.45	18.92
	5mタイプ	55	1.60E-02	1.43E-02	7.17E+00	4.38E+00	7.67	12.57
	6mタイプ	72	1.16E-02	1.04E-02	1.35E+01	8.11E+00	5.32	8.88
	7mタイプ	91	8.72E-03	7.77E-03	2.41E+01	1.44E+01	3.77	6.32
	0.08	2mタイプ	16	6.21E-02	5.62E-02	4.69E-01	2.96E-01	34.09
3mタイプ		27	3.94E-02	3.54E-02	1.17E+00	7.33E-01	23.08	36.83
4mタイプ		40	2.61E-02	2.36E-02	2.67E+00	1.63E+00	14.97	24.59
5mタイプ		55	1.82E-02	1.63E-02	5.48E+00	3.37E+00	10.03	16.33
6mタイプ		72	1.33E-02	1.19E-02	1.04E+01	6.24E+00	6.95	11.54
7mタイプ		91	9.97E-03	8.88E-03	1.85E+01	1.11E+01	4.93	8.21
0.09		2mタイプ	16	6.98E-02	6.32E-02	3.71E-01	2.35E-01	43.18
	3mタイプ	27	4.43E-02	3.98E-02	9.23E-01	5.82E-01	29.24	46.42
	4mタイプ	40	2.94E-02	2.65E-02	2.11E+00	1.29E+00	18.97	30.99
	5mタイプ	55	2.05E-02	1.83E-02	4.33E+00	2.67E+00	12.71	20.58
	6mタイプ	72	1.50E-02	1.34E-02	8.17E+00	4.95E+00	8.81	14.54
	7mタイプ	91	1.12E-02	9.99E-03	1.46E+01	8.79E+00	6.24	10.35
	0.1	2mタイプ	16	7.76E-02	7.02E-02	3.00E-01	1.91E-01	53.36
3mタイプ		27	4.92E-02	4.43E-02	7.47E-01	4.73E-01	36.13	57.09
4mタイプ		40	3.26E-02	2.95E-02	1.71E+00	1.05E+00	23.43	38.12
5mタイプ		55	2.28E-02	2.04E-02	3.50E+00	2.17E+00	15.70	25.32
6mタイプ		72	1.66E-02	1.49E-02	6.62E+00	4.03E+00	10.88	17.89
7mタイプ		91	1.25E-02	1.11E-02	1.18E+01	7.15E+00	7.71	12.73

表 4.4 計算に用いた天然放射性核種濃度

	コンクリート中の放射性核種濃度(Bq/g)	
	平均	最大
^{40}K	0.61	1.22
^{238}U 系列核種	0.052	0.081
^{232}Th 系列核種	0.022	0.048

表 4.5 計算で考慮した天然放射性核種

*核種名	E(MeV)	放出率	娘分岐比
⁴⁰ K	1.4608	0.107	1
²³⁸ U系列 ²²⁶ Ra	0.18599	0.0328	1
²¹⁴ Pb	0.05323	0.0105	0.9998
	0.24198	0.0684	0.9998
	0.29521	0.179	0.9998
	0.35192	0.343	0.9998
	0.78591	0.0102	0.9998
²¹⁴ Bi	0.60931	0.426	0.999
	0.76836	0.0464	0.999
	0.80617	0.0115	0.999
	0.93406	0.0295	0.999
	1.12029	0.139	0.999
	1.15519	0.016	0.999
	1.23811	0.0551	0.999
	1.28096	0.0141	0.999
	1.37765	0.0378	0.999
	1.40105	0.0133	0.999
	1.40798	0.0236	0.999
	1.50923	0.0204	0.999
	1.66128	0.0107	0.999
	1.7296	0.0268	0.999
	1.76449	0.146	0.999
1.84742	0.0193	0.999	
2.11855	0.0108	0.999	
2.20419	0.0459	0.999	
2.44778	0.0141	0.999	
²³² Th系列 ²²⁸ Ac	0.1291	0.0293	1
	0.2094	0.0455	1
	0.2703	0.0377	1
	0.328	0.0366	1
	0.3384	0.12	1
	0.463	0.0464	1
	0.7948	0.0484	1
	0.9111	0.29	1
	0.9646	0.0545	1
	0.9689	0.1746	1
	1.5879	0.0371	1
²¹² Pb	0.23862	0.431	1
	0.30009	0.033	1
²¹² Bi	0.03986	0.0113	1
	0.72717	0.0666	1
	0.78542	0.0112	1
	1.62056	0.0156	1
²⁰⁸ Tl	0.27735	0.0679	0.36
	0.51072	0.216	0.36
	0.58314	0.858	0.36
	0.76313	0.0164	0.36
	0.86037	0.12	0.36
	2.6145	0.998	0.36

表 4.6 検出限界計数率の比較 (天然放射性核種濃度最大値と平均値) ⁶⁰Co(1173.2keV)

クリアランス判定値 (Bq/g)	部屋タイプ	クリアランス判定値に相当する 計数率(cps)	測定時間(h)		測定時間比 (天然核種濃度最大値/天然核種濃度平均値)
			⁶⁰ Co(1173keV)	⁶⁰ Co(天然核種濃度平均値)	
0.01	2mタイプ	7.76E-03	2.73E+01	5.43E+01	1.99
	3mタイプ	4.92E-03	6.44E+01	1.30E+02	2.02
	4mタイプ	3.26E-03	1.40E+02	2.85E+02	2.04
	5mタイプ	2.28E-03	2.74E+02	5.67E+02	2.07
	6mタイプ	1.66E-03	4.98E+02	1.04E+03	2.09
	7mタイプ	1.25E-03	8.57E+02	1.80E+03	2.11
0.02	2mタイプ	1.55E-02	7.41E+00	1.44E+01	1.94
	3mタイプ	9.85E-03	1.75E+01	3.44E+01	1.97
	4mタイプ	6.53E-03	3.79E+01	7.57E+01	2.00
	5mタイプ	4.56E-03	7.43E+01	1.50E+02	2.02
	6mタイプ	3.32E-03	1.35E+02	2.75E+02	2.04
	7mタイプ	2.49E-03	2.32E+02	4.78E+02	2.06
0.03	2mタイプ	2.33E-02	3.45E+00	6.63E+00	1.92
	3mタイプ	1.48E-02	8.13E+00	1.58E+01	1.95
	4mタイプ	9.79E-03	1.76E+01	3.48E+01	1.97
	5mタイプ	6.84E-03	3.46E+01	6.91E+01	2.00
	6mタイプ	4.99E-03	6.29E+01	1.27E+02	2.02
	7mタイプ	3.74E-03	1.08E+02	2.20E+02	2.03
0.04	2mタイプ	3.10E-02	2.01E+00	3.82E+00	1.90
	3mタイプ	1.97E-02	4.73E+00	9.12E+00	1.93
	4mタイプ	1.31E-02	1.03E+01	2.01E+01	1.95
	5mタイプ	9.12E-03	2.01E+01	3.98E+01	1.98
	6mタイプ	6.65E-03	3.66E+01	7.30E+01	2.00
	7mタイプ	4.98E-03	6.29E+01	1.27E+02	2.02
0.05	2mタイプ	3.88E-02	1.32E+00	2.49E+00	1.89
	3mタイプ	2.46E-02	3.11E+00	5.95E+00	1.92
	4mタイプ	1.63E-02	6.74E+00	1.31E+01	1.94
	5mタイプ	1.14E-02	1.32E+01	2.60E+01	1.96
	6mタイプ	8.31E-03	2.40E+01	4.76E+01	1.98
	7mタイプ	6.23E-03	4.13E+01	8.27E+01	2.00
0.06	2mタイプ	4.65E-02	9.36E-01	1.76E+00	1.88
	3mタイプ	2.95E-02	2.20E+00	4.20E+00	1.90
	4mタイプ	1.96E-02	4.78E+00	9.23E+00	1.93
	5mタイプ	1.37E-02	9.39E+00	1.83E+01	1.95
	6mタイプ	9.97E-03	1.70E+01	3.36E+01	1.97
	7mタイプ	7.48E-03	2.93E+01	5.83E+01	1.99
0.07	2mタイプ	5.43E-02	7.00E-01	1.31E+00	1.87
	3mタイプ	3.45E-02	1.65E+00	3.12E+00	1.90
	4mタイプ	2.28E-02	3.58E+00	6.87E+00	1.92
	5mタイプ	1.60E-02	7.02E+00	1.36E+01	1.94
	6mタイプ	1.16E-02	1.27E+01	2.50E+01	1.96
	7mタイプ	8.72E-03	2.19E+01	4.34E+01	1.98
0.08	2mタイプ	6.21E-02	5.44E-01	1.01E+00	1.86
	3mタイプ	3.94E-02	1.28E+00	2.42E+00	1.89
	4mタイプ	2.61E-02	2.78E+00	5.32E+00	1.91
	5mタイプ	1.82E-02	5.46E+00	1.06E+01	1.93
	6mタイプ	1.33E-02	9.91E+00	1.94E+01	1.95
	7mタイプ	9.97E-03	1.71E+01	3.36E+01	1.97
0.09	2mタイプ	6.98E-02	4.36E-01	8.08E-01	1.85
	3mタイプ	4.43E-02	1.03E+00	1.93E+00	1.88
	4mタイプ	2.94E-02	2.23E+00	4.24E+00	1.90
	5mタイプ	2.05E-02	4.37E+00	8.43E+00	1.93
	6mタイプ	1.50E-02	7.94E+00	1.55E+01	1.95
	7mタイプ	1.12E-02	1.37E+01	2.68E+01	1.96
0.1	2mタイプ	7.76E-02	3.57E-01	6.60E-01	1.85
	3mタイプ	4.92E-02	8.42E-01	1.58E+00	1.87
	4mタイプ	3.26E-02	1.83E+00	3.47E+00	1.90
	5mタイプ	2.28E-02	3.59E+00	6.89E+00	1.92
	6mタイプ	1.66E-02	6.51E+00	1.26E+01	1.94
	7mタイプ	1.25E-02	1.12E+01	2.19E+01	1.96

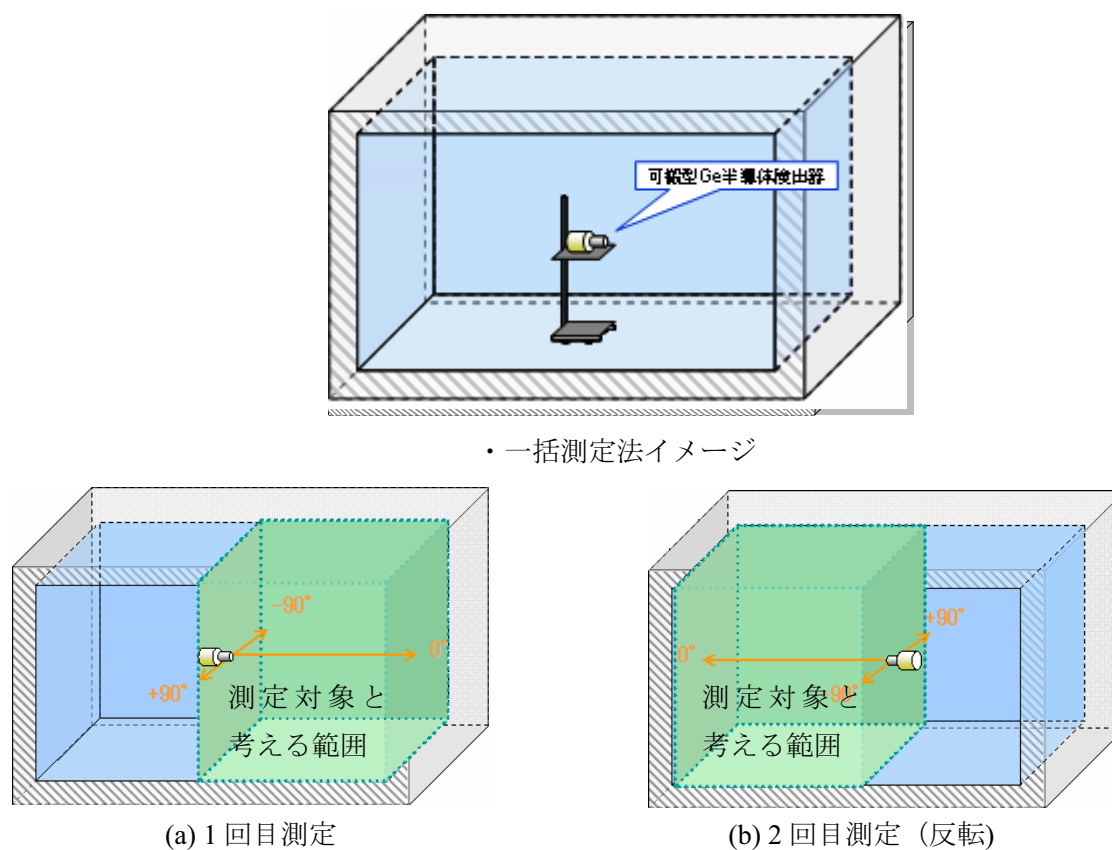


図 2.1 建屋コンクリート一括測定法概念図

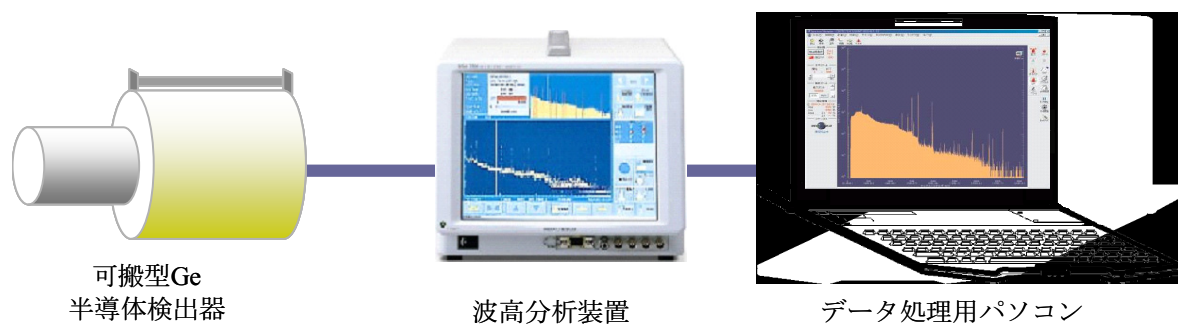


図 2.2 装置の構成

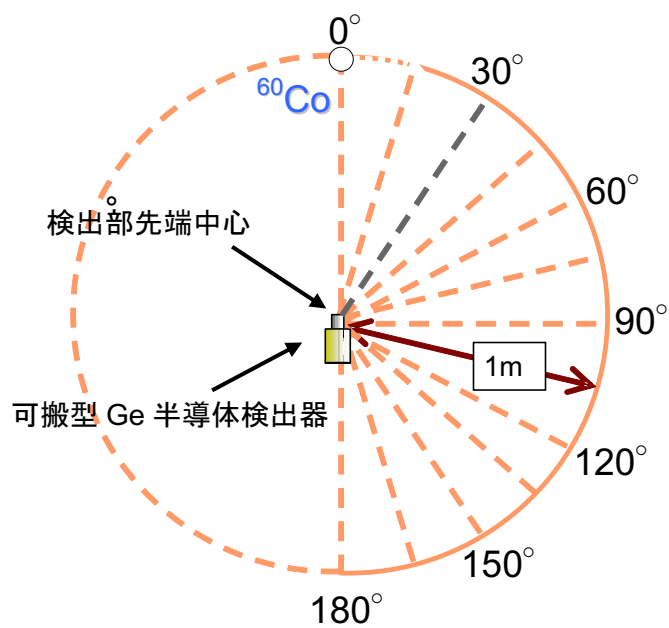


図 2.3 方向特性試験概念図

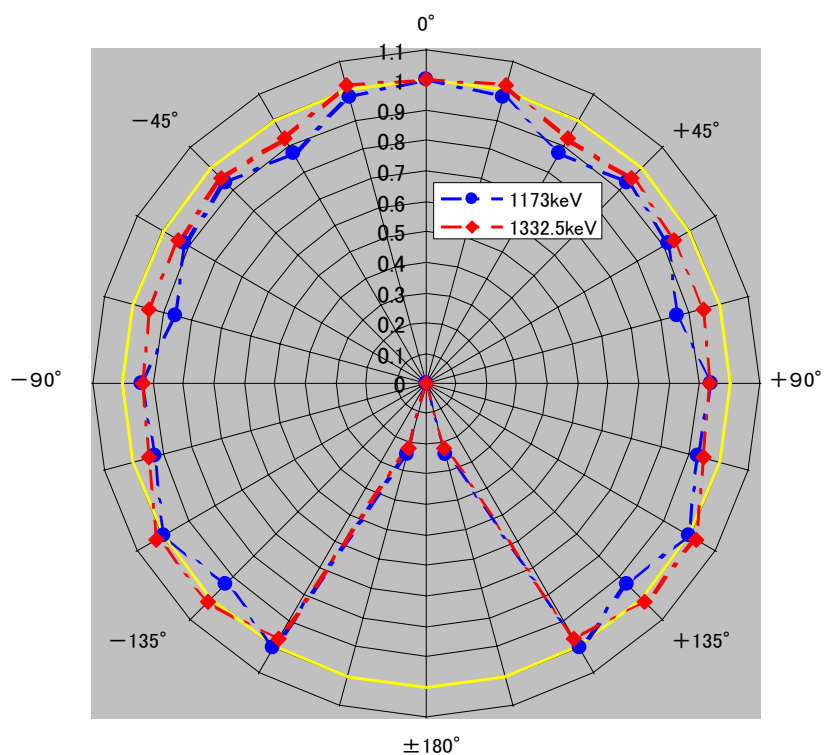


図 2.4 方向特性試験結果

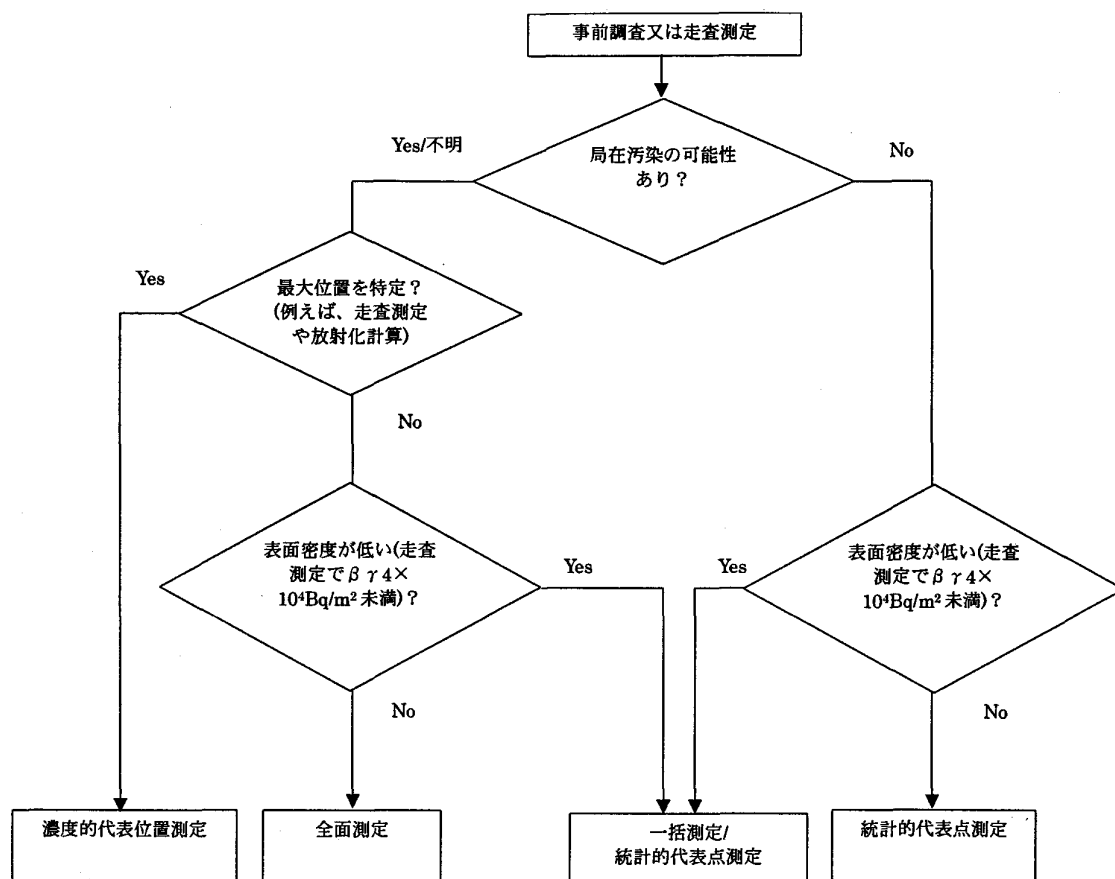


図 2.5 二次的な汚染(大面積の対象物)の場合の測定方法の選定

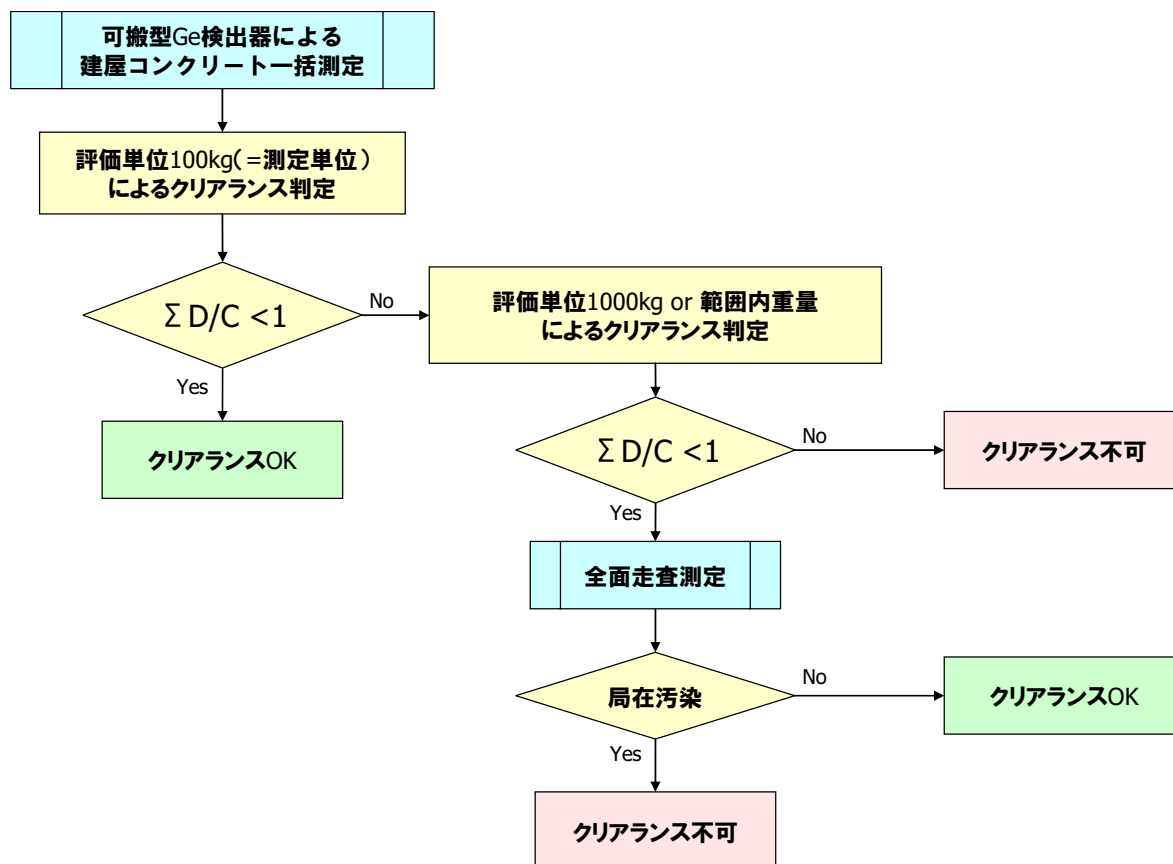


図 3.1 クリアランス判断フローの一例

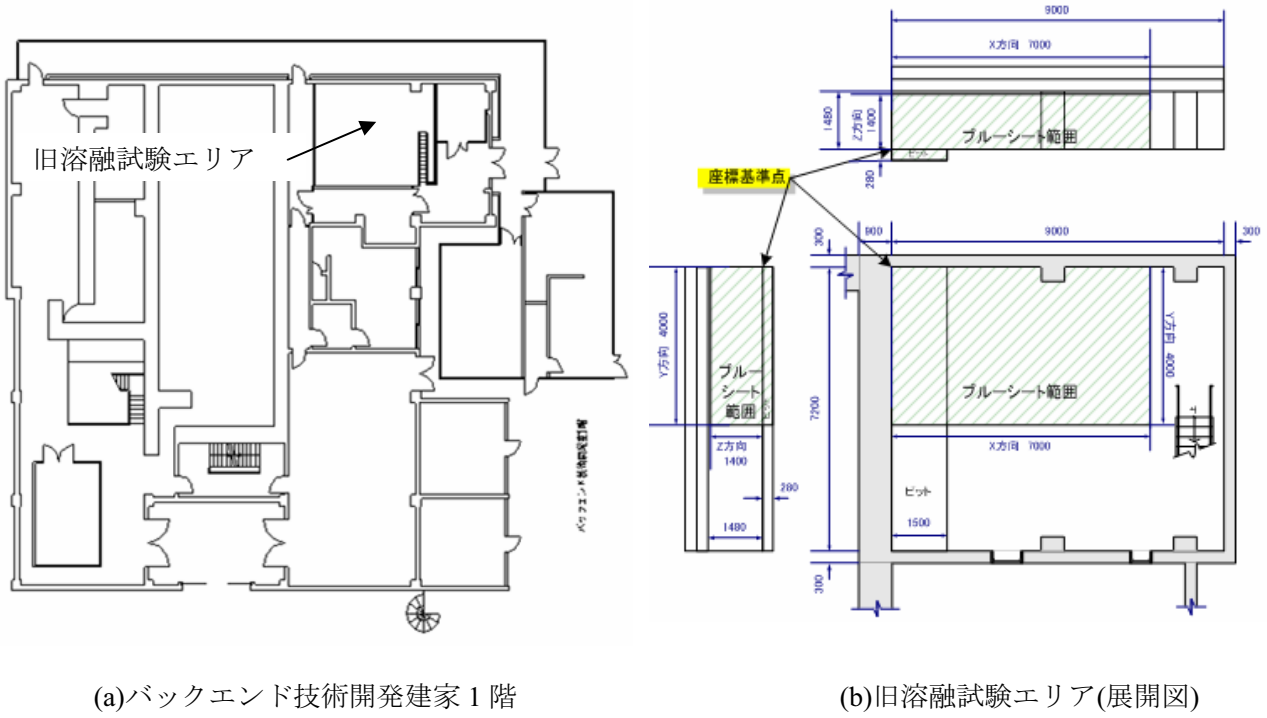


図 4.1 旧溶融試験エリア (バックエンド技術開発建家)

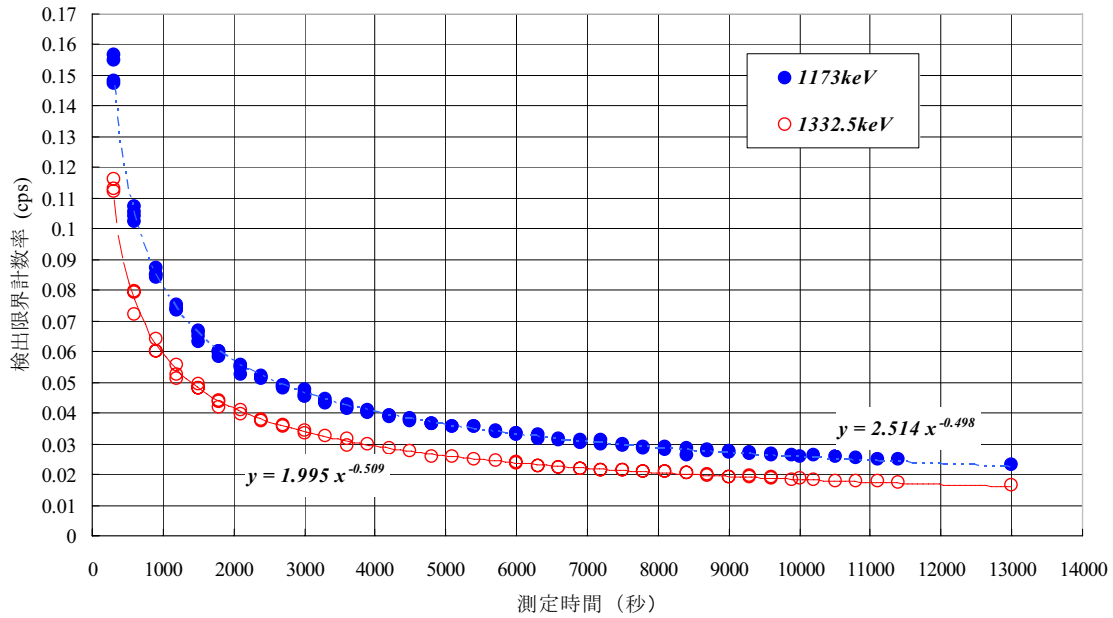


図 4.2 ^{60}Co 検出限界計数率の経時変化

This is a blank page.

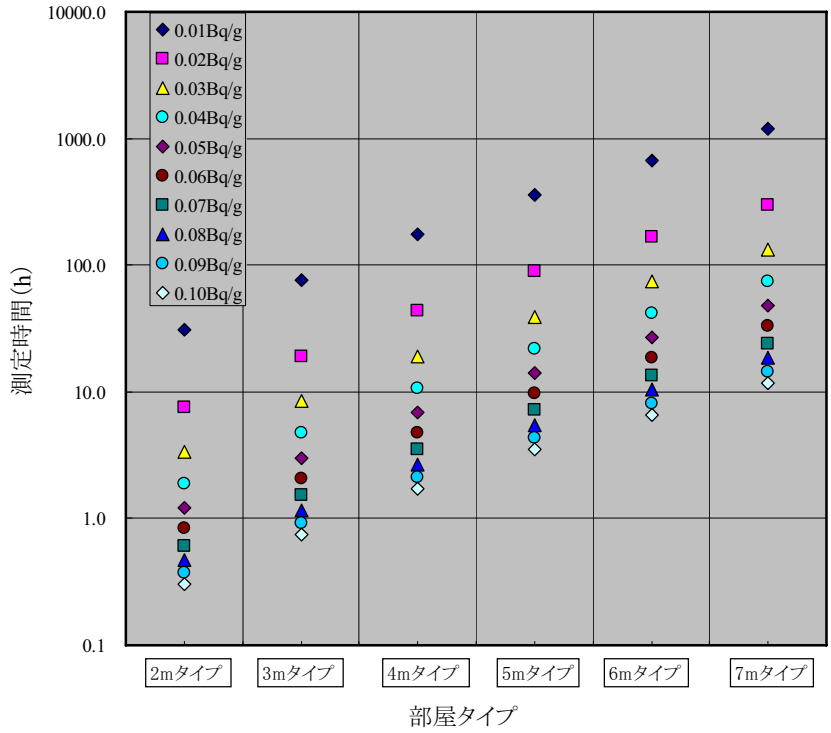


図 4.3 部屋タイプ別に $^{60}\text{Co}(1173.2\text{keV})$ に着目して求めた測定時間
(クリアランス判定値 ; 10 水準考慮)

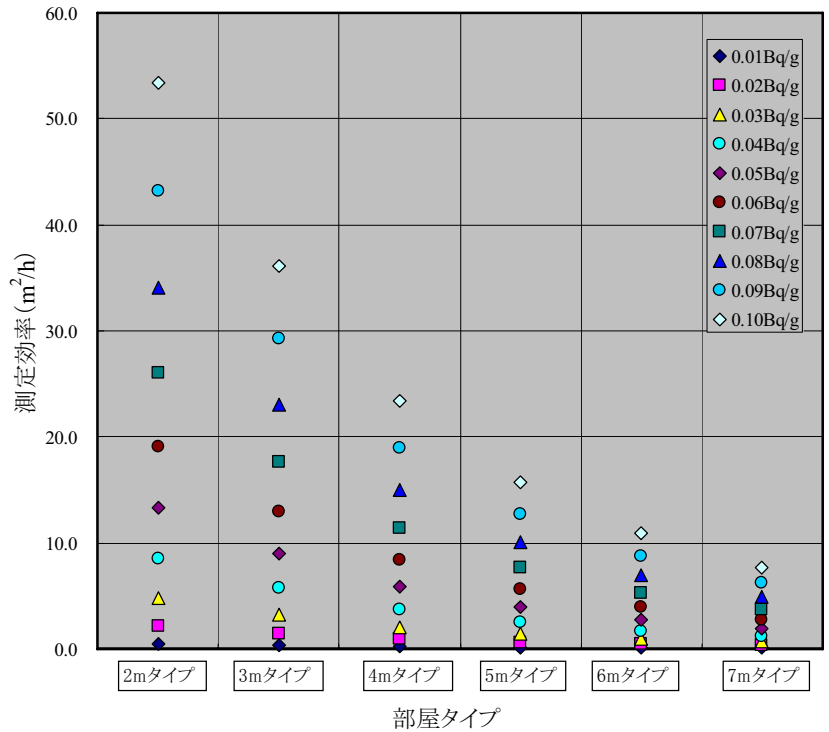
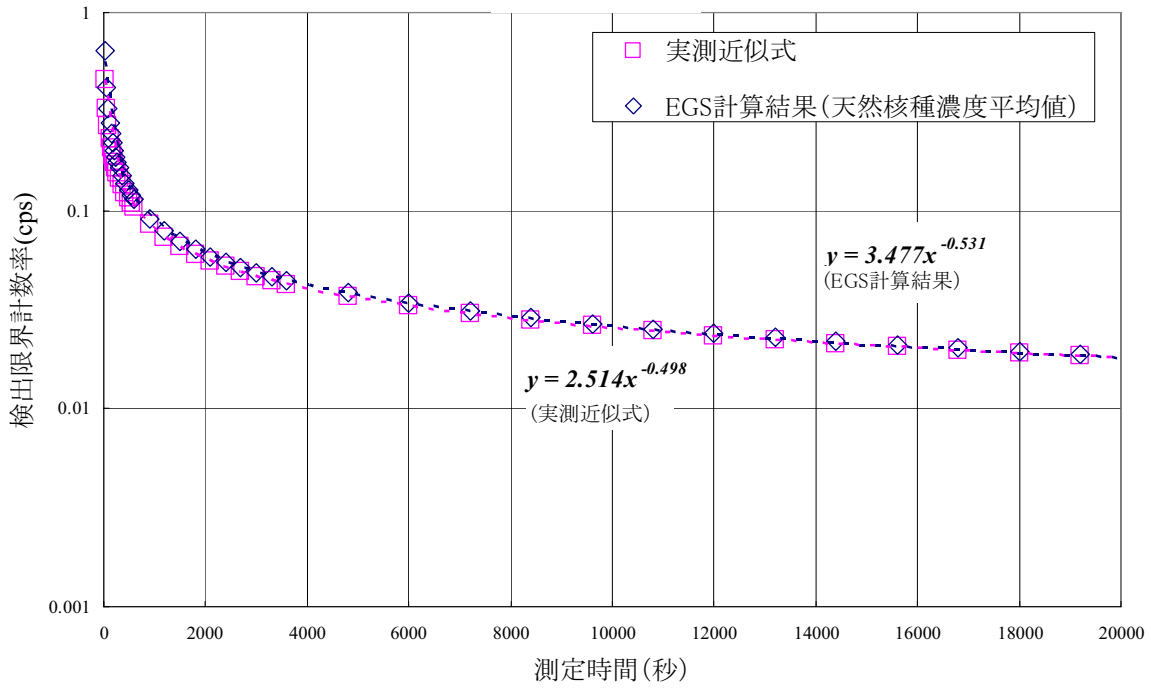


図 4.4 部屋タイプ別に $^{60}\text{Co}(1173.2\text{keV})$ に着目して求めた測定効率
(クリアランス判定値 ; 10 水準考慮)

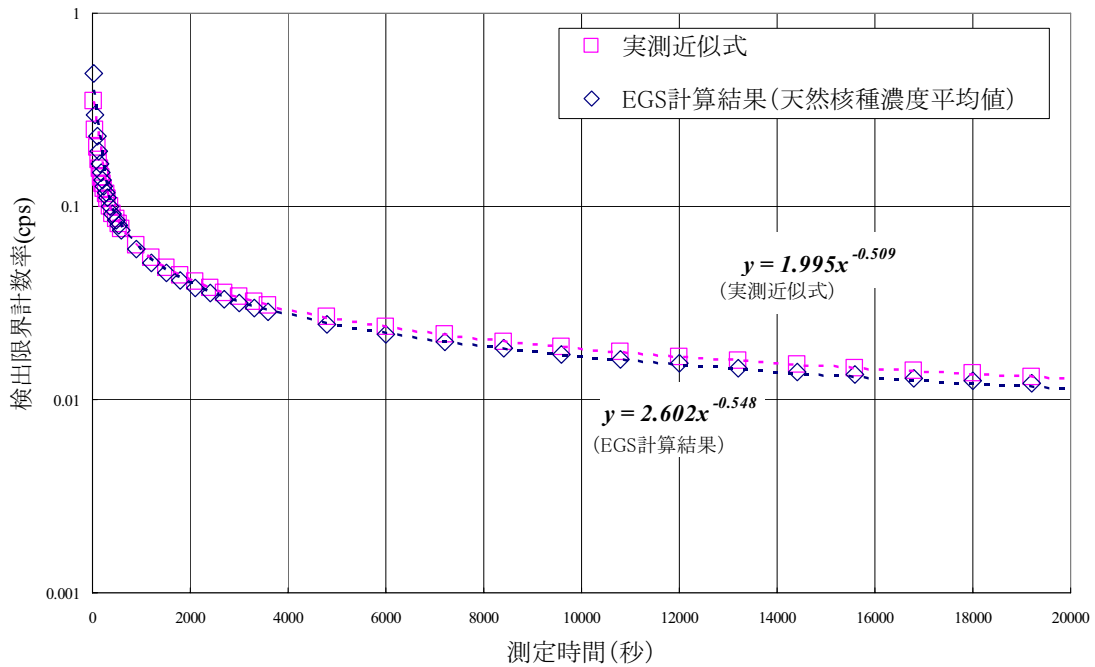
This is a blank page.



$^{60}\text{Co}(1173.2\text{keV})$

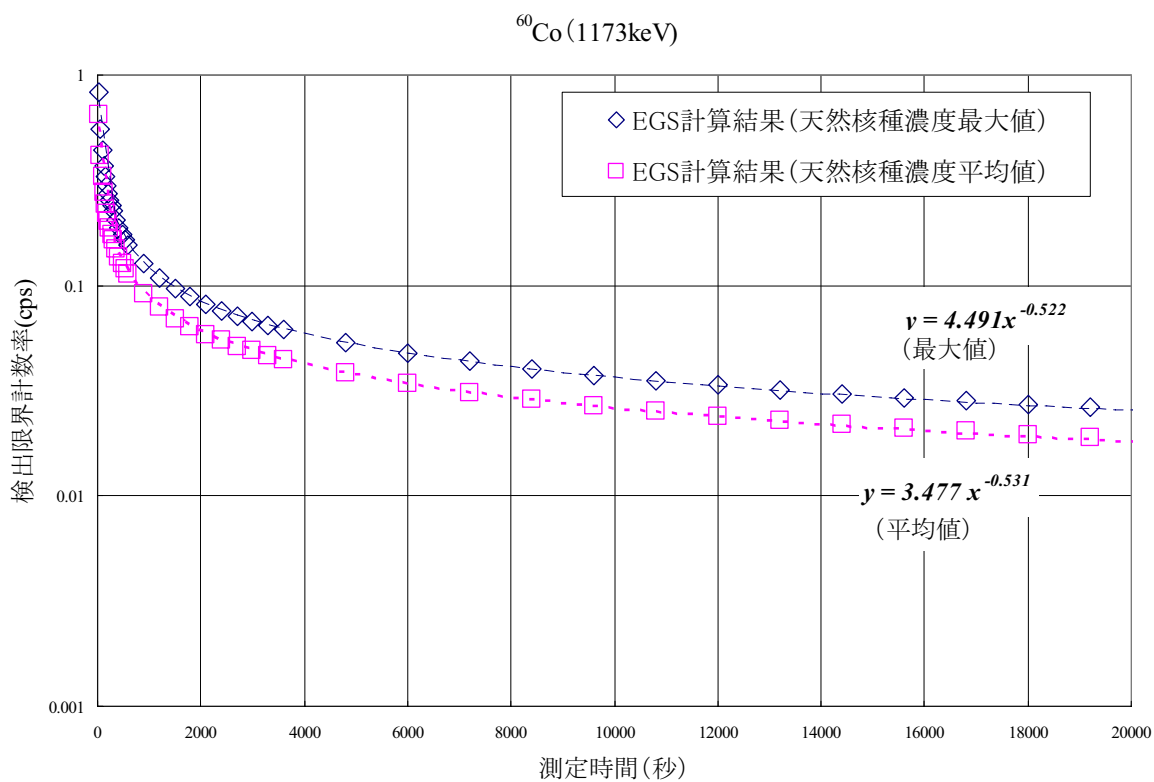
図 4.5 実験データ近似式と EGS 計算結果(天然放射性核種濃度平均値)比較

$^{60}\text{Co}(1332.5\text{keV})$



$^{60}\text{Co}(1332.5\text{keV})$

図 4.6 実験データ近似式と EGS 計算結果(天然放射性核種濃度平均値)比較



$^{60}\text{Co}(1173.2\text{keV})$

図 4.7 EGS 計算結果比較 (天然放射性核種濃度最大値と平均値)

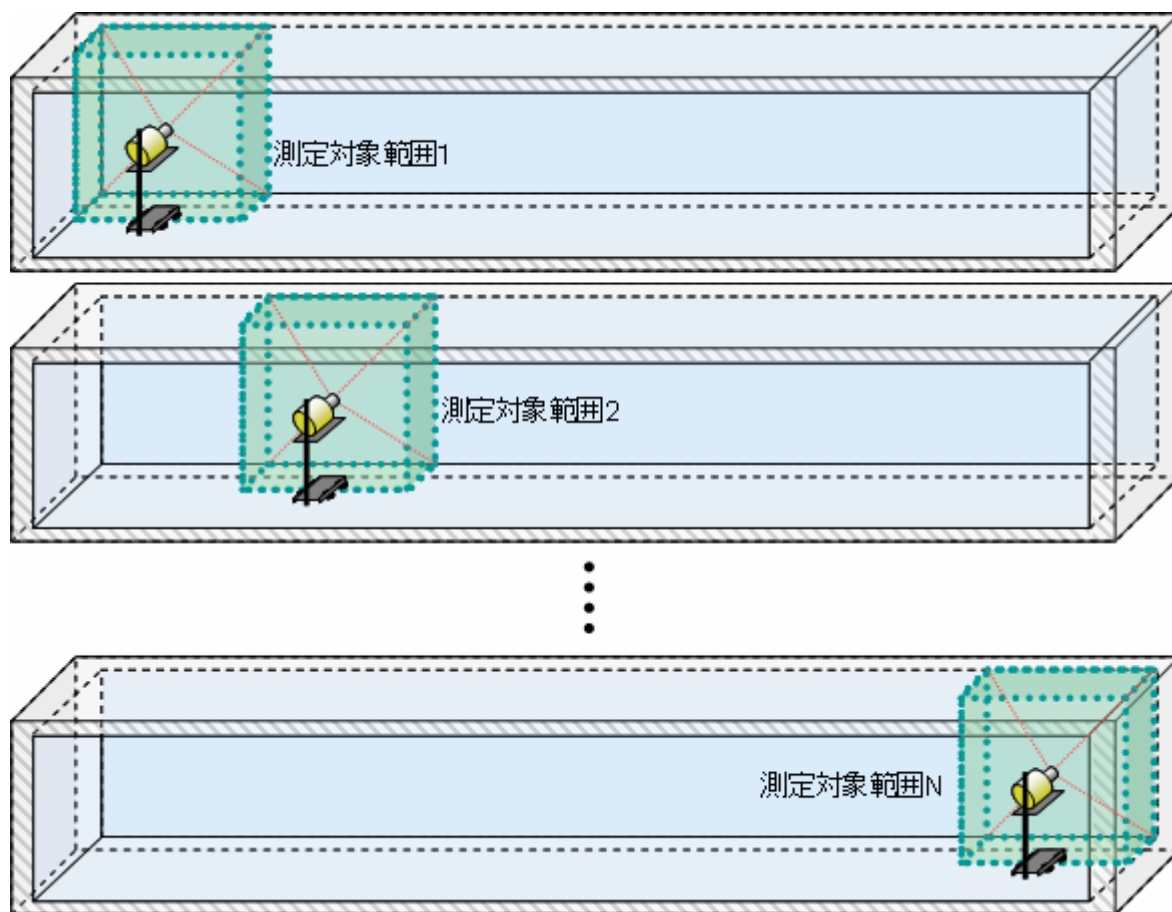


図 4.8 可搬型 Ge 半導体検出器を用いた測定方法の概念図



写真 2.1 方向特性試験状況（線源位置角度 45° ）



写真 2.2 方向特性試験状況（線源設置状況）



写真 4.1 バックグラウンド測定状況 (その 1)



写真 4.2 バックグラウンド測定状況 (その 2)

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
物質の量	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
波数	毎メートル	m ⁻¹
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	ヨタ	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	ゼプト	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	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ⁻¹ ・m ¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ¹ ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd
(放射性核種の) 放射能吸収線量, 質量エネルギー分与, 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	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (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った性質をもっ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に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
粘力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ¹ ・s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg ¹ ・s ⁻²
表角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ¹ ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ¹ ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ¹ ・s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・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 ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ¹ ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ¹ ・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ¹ ・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ¹ ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ¹ ・s ⁻³ =kg ¹ ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で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	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×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	海里	1 海里=1852m
ノット	ノット	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	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
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・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 ≅ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≅ 10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	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
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻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=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

