

JAERI-M  
94-020

OG L-1の1次冷却系配管に沈着した  
FP量検証のための管状線源測定

1994年2月

松本実喜夫\*・伊藤 治彦・馬場 治・板橋 行夫

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）  
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11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おこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,  
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 日立高速印刷株式会社

OGL-1の1次冷却系配管に沈着したFP量検証のための管状線源測定

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

松本実喜夫\*・伊藤 治彦\*・馬場 治\*\*・板橋 行夫

(1994年1月25日受理)

高温工学試験研究炉 (High Temperature Engineering Test Reactor; HTTR) の1次系に沈着する核分裂生成物 (FP) の沈着量及び沈着分布を推定することは、原子炉の遮蔽設計、保守・点検及び事故解析に不可欠である。JMTRでは、HTTR用燃料照射研究に用いている高温ヘリウムインパイルガスループ (Oarai Gas Loop No.1; OGL-1) の1次冷却系に沈着するFPの分布測定を、原子炉運転中及び停止後にわたって行ってきた。

測定結果から、 $^{137}\text{Cs}$ についてはガス温度が $500^{\circ}\text{C}$ 付近の配管に多く沈着すること、運転中におけるヘリウムガス中のFP濃度変化によって離脱-再沈着現象が生じること等が明らかになった。また、 $^{131}\text{I}$ についてはガス温度が $200\sim 400^{\circ}\text{C}$ の範囲に多く沈着すること、OGL-1燃料試料からの放出割合は $2 \times 10^{-7} \sim 4 \times 10^{-5}$ であること、運転中におけるヘリウムガス中の濃度は $10^6 \sim 10^8 \text{Bq}/\text{m}^3$ で沈着量に比べて約1桁少ない量であること等が明らかになった。これらは、各核種の沈着量測定値から評価したものである。

本報告書は、FPの沈着量を定量するために用いてきた沈着量換算係数が妥当であるかを検証するため、管状線源を測定しその結果をまとめたものである。管状線源測定の結果、沈着量は20%の誤差範囲内で測定できていることが確認された。

---

大洗研究所：〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町字新堀3607

+ 企画室

++ 高温工学試験研究炉開発部

\* 原子力エンジニアリング (株)

Tubular Radiation Source Measurement for  
Verification of the FP Plate-out Activities in  
the OGL-1 Primary Cooling System

Mikio MATSUMOTO\*, Haruhiko ITO<sup>+</sup>  
Osamu BABA<sup>++</sup> and Yukio ITABASHI

Department of JMTR Project  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 25, 1994)

Activities and distribution of fission products (FPs), which plated-out in the primary cooling system of the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR), are important for the design, maintenance and accident analysis of the reactor. In the department of JMTR project, the distribution of FPs plated-out on inner surface of the primary cooling system piping of the high temperature gas cooling in-pile loop facility (OGL-1) has been measured during reactor operation and after shutdown. The OGL-1 is utilized for irradiation tests of the HTTR fuels.

It became clear in the measurement that a large amount of  $^{137}\text{Cs}$  plated-out on the piping whose operation temperature was around  $500^{\circ}\text{C}$ , and  $^{137}\text{Cs}$  plated-out on the  $500^{\circ}\text{C}$  piping was released with decrease of FPs release from fuel to primary gas and redeposited on the piping in temperature range of  $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ . It was also found that  $^{131}\text{I}$  release rate from HTTR fuels in irradiation was  $2\times 10^{-7}\sim 4\times 10^{-5}$ .

---

+ Office of Planning  
++ Department of HTTR Project  
\* Nuclear Engineering Company

In this report, tubular radiation source measurement for verification of the FP plated-out activities in the OGL-1 primary cooling system was shown. Measurement error of plated-out activities in the OGL-1 primary cooling system was evaluated to be within 20%.

Keywords : Radiation Source, Fission Product, Plate-out, Primary Cooling System, Conversion Coefficient, Detector Sensitivity, HTGR, HTTR, JMTR

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. FP沈着量測定 .....	2
2.1 測定装置 .....	2
2.2 測定方法 .....	2
2.3 測定箇所 .....	3
3. 沈着量換算係数の算出 .....	3
3.1 測定系のモデル化と基礎式 .....	3
3.2 沈着量換算係数プログラム .....	5
3.3 検出器感度分布測定方法 .....	6
4. 検出器感度分布と沈着量換算係数 .....	7
4.1 検出器感度分布 .....	7
4.2 沈着量換算係数 .....	7
5. 管状線源測定 .....	8
6. まとめ .....	8
謝辞 .....	9
参考文献 .....	9

## Contents

1. Introduction .....	1
2. FP Plate-out Measurement .....	2
2.1 Measuring System .....	2
2.2 Measuring Method .....	2
2.3 Measuring Locations .....	3
3. Calculation of Conversion Coefficient .....	3
3.1 Modeling of the Measuring System and Basic Formulae for Conversion Coefficient .....	3
3.2 Calculation Program .....	5
3.3 Measuring Method of Ge Detector Sensitivity .....	6
4. Ge Detector Sensitivity and Conversion Coefficient .....	7
4.1 Ge Detector Sensitivity .....	7
4.2 Conversion Coefficient .....	7
5. Tubular Radiation Source Measurement .....	8
6. Conclusion .....	8
Acknowledgment .....	9
References .....	9

# 1. ま え が き

HTTRでは、軽水炉や高速炉と異なった二酸化ウラン・被覆粒子／黒鉛分散型の燃料を採用している。被覆燃料粒子(Coated Fuel Particle)は燃料コンパクトの形に成形され、更に燃料コンパクトは黒鉛スリーブの中に挿入したものを燃料棒として使用するピン・イン・ブロック型の燃料体となる。被覆燃料粒子からは微量のFPが被覆層、コンパクト及び黒鉛スリーブ内を拡散して1次冷却材中に放出される。また、被覆粒子燃料製造時の核燃料物質による汚染或いは運転時に被覆層の破損が生じた場合にも、同様な経路でFPが放出される。放出されたFPは、1次冷却系を循環し一部が各機器及び配管の内面に沈着する。HTTRの遮蔽設計、保守・点検時の1次系機器への接近方法及び減圧事故時の環境へのFP放出量を推定するには、FPの1次系配管及び機器内面への沈着挙動と沈着機構のメカニズムを知ることが不可欠である。

JMTRに設置されている高温ヘリウムインパイルガスループ(UGL-1) 1次系の運転条件(冷却材圧力; 3 MPa, 試料出口冷却材最高温度; 1000 °C)は、HTTRの1次冷却系とほぼ同等である。JMTRでは、HTTRにおけるFP沈着挙動を知るために、UGL-1の1次系配管を対象にしてFP沈着分布測定を行ってきた。測定は、Ge検出器を用いて1次系配管をその場で測定する in-situ 非破壊測定法で行ってきた。本測定法は、1次系配管内面に沈着したFP核種が放出する $\gamma$ 線を配管外側からGe検出器で測定するもので、 $\gamma$ 線スペクトル中のピークエネルギー及び計数率からFP核種の同定及び定量を同時に行うものである。計数率から沈着量への換算には、別途算出した沈着量換算係数を用いている。この換算係数は、実験と計算の組み合わせにより求めたものである。

FP沈着分布測定で得られた沈着量の評価から、下記の事柄が明らかになった。

$^{137}\text{Cs}$ については、

- ① ヘリウムガス温度が500 °C付近の配管に多く沈着する
- ② 燃料試料から1次系へのFP放出量が減少すると、500 °C付近に沈着していた $^{137}\text{Cs}$ は離脱し、200~300 °Cの再生熱交換器伝熱管に再沈着する
- ③ ヘリウムガス中の放射能が先の運転に比し低下すると $^{137}\text{Cs}$ の離脱はUGL-1 起動直後から起こり、その運転サイクルを通して離脱し続ける
- ④  $^{137}\text{Cs}$ の沈着への過度変化(原子炉の出力上昇、下降時に起こるUGL-1のガス温度、圧力、流量等の過度変化)の影響は観察されなかった
- ⑤ UGL-1燃料試料からの $^{137}\text{Cs}$ の放出割合は、 $1 \sim 3 \times 10^{-4}$ であった。

また、 $^{131}\text{I}$ については、

- ① ヘリウムガス温度が200 ~ 400 °C付近の配管に多く沈着する
- ② 運転中のヘリウムガス中の放射能は、配管内面に沈着した放射能と比較すると約1桁少ない量である
- ③ UGL-1燃料試料からの $^{131}\text{I}$ の放出割合は、 $2 \times 10^{-7} \sim 4 \times 10^{-5}$ の範囲であった
- ④ 燃料コンパクト温度を通常の1300°Cから1500°Cに昇温すると、放出割合は約100倍増加する
- ⑤ No. 1とNo. 2再生熱交換器を含む約20mの配管にUGL-1 1次系全沈着量の約60%が沈着する。

本報告書は、UGL-1 1次系のFP沈着分布測定で得られた計数率から沈着量を定量するために用いてきた換算係数が、妥当であるかを検証するために行った管状線源測定の結果をまとめたものである。



## 2. FP沈着量測定

### 2.1 測定装置

測定に使用した検出器は、OGL-1の1次冷却系を収納したキュービクル内で容易に移動可能な、液体窒素ジュワーが5ℓの小型高純度Ge検出器である。本検出器の構造は、縦型下向きクライオスタット型で $^{60}\text{Co}$ の $\gamma$ 線(1.33MeV)に対する相対検出効率(線源と検出器間距離25cm時の $\phi 3'' \times 3''$ のNaI(Tl)検出器に対する検出効率)が13%以上、半値幅分解能が2.1keV以下である。検出器の主な仕様を、Table 2.1に示す。

測定点周辺のバックグラウンド $\gamma$ 線の計測量を少なくし、配管内面に沈着した核種からの $\gamma$ 線を効率良く計測するためにコリメータを用いた。コリメータは、周方向に鉛で100mmの遮蔽厚さを確保し、測定点方向に長さ4cm、幅1cmの長方形の窓を付けたものである。更に、鉛の特性X線を遮蔽するため、検出器とコリメータ間に厚さ2mmの銅筒を挿入した。測定位置としてはバックグラウンドが低い位置を選定し、コリメータの窓の開口方向は測定対象配管の背後に線源となる配管が無いよう配慮した。測定する配管には水平配管と垂直配管があるため、横型と縦型の2種類の窓を製作し、コリメータ開口部の軸方向を管の長軸方向に一致させた。使用したコリメータをFig. 2.1に、測定方法概略をFig. 2.2に示す。

データ処理装置は波高分析装置の自動制御及び連続測定、計測された $\gamma$ 線スペクトルの解析、核種の同定、沈着量の計算及び計算結果の図表整理を行うものである。そのシステムは、16bitのPDP11/34計算機「DEC社製」をメインとして、ハードディスク装置、磁気テープ装置、ラインプリンタ及びデジタルプロッタから構成されている。システム構成を、Fig. 2.3に示す。

### 2.2 測定方法

測定は、配管外側に設置したエネルギー分解能の良いGe検出器により、配管内面に沈着した核種からの $\gamma$ 線を計測する方法である。Ge検出器で計測される $\gamma$ 線は、鉛遮蔽体先端部に取り付けられたコリメータ窓を通して入射する $\gamma$ 線とコリメータ窓以外から入射して来る $\gamma$ 線の合計量である。コリメータ窓からのみ入射する $\gamma$ 線の計数率を算出するには、コリメータ窓を開けた状態で測定した計数率からコリメータ窓を閉じた状態で測定した計数率を差し引いて求めている。OGL-1の配管では、全般的に配管内面の沈着量が少ないため計数率が低く、計数率の統計誤差を小さく抑えるために、原子炉停止時における測定点1個所当たりの計測時間は15～20時間とした。一方、計数率が高く、バックグラウンドが相対的に低くなる原子炉運転中の計測時間は、1～2時間とした。

OGL-1 1次系配管及び機器を格納したキュービクル内への立ち入りは、原子炉が停止しOGL-1 1次系内の精製運転が終了した後可能となり、原子炉停止時測定は炉停止後2～3日経過した後開始する。このため、半減期の短い核種は検出限界(370 Bq/m<sup>2</sup>)以下に減衰する。従って、検出可能な核種は、中・長半減期核種に限定される。また、クリプトンやキセノンのような希ガスFPは、配管内面に沈着しないため1次系内の精製運転により除去される。一方、原子炉運転中の測定では、FPが1次系に連続して放出している間に測定できるので、短半減期核種も検出される。

### 2. 3 測定箇所

0GL-1 1次系のヘリウムガス流路は照射試料、高温3重配管、高温2重配管、No.1再生熱交換器、中温単管配管、No.2再生熱交換器、冷却器、フィルタ、ガス循環器、加熱器を経て照射試料に戻る全長約200mの閉ループとなっている。

測定箇所は、重要性及び測定が比較的容易な場所という2つの条件を考慮して、相対的に沈着量が多いと考えられる0GL-1 ガスループ上流側約100mの範囲の16箇所とした。測定点の特徴をTable 2.2に、配置図をFig. 2.4に示す。

## 3. 沈着量換算係数の算出

### 3. 1 測定系のモデル化と基礎式

FP沈着分布測定では、配管外側に設置したコリメータ窓を有する遮蔽体内に納められたGe検出器を用いて配管及びコリメータを通過する $\gamma$ 線を測定し、FP核種の同定及び定量を行う。

本測定法における沈着量換算係数は、コリメータ内に納められた検出器の感度分布と $\gamma$ 線発生源からコリメータに至るまでの $\gamma$ 線の減衰により定まる。同一の検出器及びコリメータを種々の測定点に使用する場合、コリメータ内に納められた検出器の感度分布は変わらないが、 $\gamma$ 線発生源からコリメータに至るまでの $\gamma$ 線の減衰が異なる。このため、前者を実験により、後者を計算により求めておくことにより、検出器と測定点の組み合わせに対し容易に沈着量換算係数を求めることができる。

コリメータ内に納められた検出器の感度分布は、コリメータ中心軸が最も高く、中心軸より離れるに従って低くなる。使用しているコリメータの形状は長方形であるので、コリメータ前面の任意の管軸方向角度 $\theta_3$ 、管軸直角方向角度 $\theta_2$ (Fig. 3.1のP点)に対する計数率は、コリメータ中心軸と管軸を含む面及び管軸に直角な面での計数率分布 $F_x(\theta_3)$ 、 $F_y(\theta_2)$ の積に比例するものとする。また、FPは測定点付近の管周方向及び長手方向に対し、均一に分布していると仮定する。即ち、コリメータで見込める範囲内でのFP沈着分布の変動は無視する。

この時、沈着したFPの面線源強度を $S_0$ (Photon/cm<sup>2</sup>·s)、検出器の計数率を $N_0$ (count/s)とすると、Fig. 3.2 より $N_0$ は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 N_0 &= 4 \int_0^\pi \int_0^\infty S_0 \cdot dx \cdot r d\theta_1 \cdot \frac{A \cdot B}{4\pi L^2} \cdot F_A(\theta_1, x) \cdot \eta_D \cdot F_x(\theta_3) \cdot F_y(\theta_2) \\
 &\approx 4 \int_0^\pi \int_0^\infty \frac{S_0 \cdot A \cdot B (\cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3)^2}{4\pi (\ell_1 - r \cos \theta_1)^2} \cdot r \cdot \eta_D \cdot F_A(\theta_1, x) \cdot F_x(\theta_3) \\
 &\quad \cdot F_y(\theta_2) \cdot dx \cdot d\theta_1 \\
 &= \frac{A \cdot B \cdot S_0 \cdot r \cdot \eta_D}{\pi} \cdot \int_0^\pi \int_0^\infty \frac{(\cos \theta_2 \cdot \cos \theta_3)^2}{(\ell_1 - r \cos \theta_1)^2} \cdot F_A(\theta_1, x) \cdot F_x(\theta_3) \\
 &\quad \cdot F_y(\theta_2) \cdot dx \cdot d\theta_1 \tag{1}
 \end{aligned}$$

### 2. 3 測定箇所

OGI-1 1次系のヘリウムガス流路は照射試料，高温3重配管，高温2重配管，No.1再生熱交換器，中温単管配管，No.2再生熱交換器，冷却器，フィルタ，ガス循環器，加熱器を経て照射試料に戻る全長約200mの閉ループとなっている。

測定箇所は，重要性及び測定が比較的容易な場所という2つの条件を考慮して，相対的に沈着量が多いと考えられるOGI-1 ガスループ上流側約100mの範囲の16箇所とした。測定点の特徴をTable 2.2に，配置図をFig. 2.4に示す。

## 3. 沈着量換算係数の算出

### 3. 1 測定系のモデル化と基礎式

FP沈着分布測定では，配管外側に設置したコリメータ窓を有する遮蔽体内に納められたGe検出器を用いて配管及びコリメータを通過する $\gamma$ 線を測定し，FP核種の同定及び定量を行う。

本測定法における沈着量換算係数は，コリメータ内に納められた検出器の感度分布と $\gamma$ 線発生源からコリメータに至るまでの $\gamma$ 線の減衰により定まる。同一の検出器及びコリメータを種々の測定点に使用する場合，コリメータ内に納められた検出器の感度分布は変わらないが， $\gamma$ 線発生源からコリメータに至るまでの $\gamma$ 線の減衰が異なる。このため，前者を実験により，後者を計算により求めておくことにより，検出器と測定点の組み合わせに対し容易に沈着量換算係数を求めることができる。

コリメータ内に納められた検出器の感度分布は，コリメータ中心軸が最も高く，中心軸より離れるに従って低くなる。使用しているコリメータの形状は長方形であるので，コリメータ前面の任意の管軸方向角度 $\theta_3$ ，管軸直角方向角度 $\theta_2$ (Fig. 3.1のP点)に対する計数率は，コリメータ中心軸と管軸を含む面及び管軸に直角な面での計数率分布 $F_X(\theta_3)$ ， $F_Y(\theta_2)$ の積に比例するものとする。また，FPは測定点付近の管周方向及び長手方向に対し，均一に分布していると仮定する。即ち，コリメータで見込める範囲内でのFP沈着分布の変動は無視する。

この時，沈着したFPの面線源強度を $S_0$ (Photon/cm<sup>2</sup>·s)，検出器の計数率を $N_0$ (count/s)とすると，Fig. 3.2 より $N_0$ は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 N_0 &= 4 \int_0^\pi \int_0^\infty S_0 \cdot dx \cdot r d\theta_1 \cdot \frac{A \cdot B}{4\pi L^2} \cdot F_A(\theta_1, x) \cdot \eta_D \cdot F_X(\theta_3) \cdot F_Y(\theta_2) \\
 &\Rightarrow 4 \int_0^\pi \int_0^\infty \frac{S_0 \cdot A \cdot B (\cos\theta_2 \cdot \cos\theta_3)^2}{4\pi (\ell_1 - r \cos\theta_1)^2} \cdot r \cdot \eta_D \cdot F_A(\theta_1, x) \cdot F_X(\theta_3) \\
 &\quad \cdot F_Y(\theta_2) \cdot dx \cdot d\theta_1 \\
 &= \frac{A \cdot B \cdot S_0 \cdot r \cdot \eta_D}{\pi} \cdot \int_0^\pi \int_0^\infty \frac{(\cos\theta_2 \cdot \cos\theta_3)^2}{(\ell_1 - r \cos\theta_1)^2} \cdot F_A(\theta_1, x) \cdot F_X(\theta_3) \\
 &\quad \cdot F_Y(\theta_2) \cdot dx \cdot d\theta_1 \quad \text{①}
 \end{aligned}$$

ここで、

$\eta_D$  : コリメータ正面にある線源に対する検出器の計数効率 (cps/(photon/s))

$S_0$  : 面線源強度 (Photon/cm<sup>2</sup>·s)

$r$  : 線源半径 (沈着している管内半径) (cm)

$L$  : 微小線源要素 ( $S_0 \cdot dx \cdot r d\theta_1$ ) - 検出器中心間距離 (cm)

$\ell_1$  : 沈着している管 - 検出器中心間距離 (cm)

$x$  : 検出器中心より管軸線へ下ろした垂線の足から微小線源要素のある断面までの距離 (cm)

$F_A$  : 線源から管外面に達するまでの  $\gamma$  線の減衰 (-)

$F_x, F_y$  : x 軸管軸, y 軸管軸と直角方向の規格化された感度分布 (-)

$A, B$  : コリメータ窓の寸法 縦×横 (cm)

である。

更に, Fig. 3.2 から明らかなように、

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{r \sin \theta_1}{\ell_1 - r \cos \theta_1} \quad (2)$$

$$\theta_3 = \tan^{-1} \frac{x}{\ell_1 - r \cos \theta_1} \quad (3)$$

$F_A(\theta_1, x)$  は,  $\gamma$  線が線源から管表面 (保温材を含む) に到達するまでの減衰である。OGL-1 の FP 沈着量測定では, 沈着している管の外側に内壁管, 圧力管, 断熱材等が存在し, この部分での減衰が大きい。この部分は, FP が沈着している管径に比較し十分に大きいので, 遮蔽層を平板として近似し  $F_A$  を求める (Fig. 3.3 参照)。  $F_A$  は各遮蔽層による減衰の積で表され, 次式のようなになる。

$$F_A(\theta_1, x) = \exp \left\{ - \sum_i \mu_i \cdot \rho_i \cdot t_i \cdot \frac{1}{\cos \theta_2} \cdot \frac{1}{\cos \theta_3} \right\} \quad (4)$$

ここで,  $\mu_i, \rho_i, t_i$  はそれぞれ  $i$  番目の遮蔽層における  $\gamma$  線質量減衰係数, 遮蔽体密度, 遮蔽厚さである。

今,  $\ell_1 \gg r$  となるように検出器位置を選び,  $\theta_2 = (1/2) \tan^{-1}(r/\ell_1)$  とおき,  $F'_A$  を次式で定めると,

$$F'_A = \exp \left\{ - \sum_i \mu_i \cdot \rho_i \cdot t_i \cdot \frac{1}{\cos \theta_2} \cdot \frac{1}{\cos \theta_3} \right\} \quad (5)$$

$$F_A(\theta_1, x) \approx F'_A(x) \quad (6)$$

また,  $\theta_3$  に対し,

$$\theta_3 \approx \theta'_3 = \tan \frac{x}{\ell_1}$$

と近似し, ①式を  $F'_A$ ,  $\theta'_3$  を用いて表すと, ①式の二重積分は分離できて次のようになる。

$$\begin{aligned} N_0 &\approx \frac{A \cdot B \cdot S_0 \cdot r \cdot \eta_D}{\pi} \cdot \int_0^\pi \frac{Fy(\theta_2)}{(\ell_1 - r \cos \theta_1)^2} d\theta_1 \\ &\quad \cdot \int_0^\infty (\cos \bar{\theta}_2 \cdot \cos \theta'_3)^2 \cdot F'_A(x) \cdot Fx(\theta'_3) dx \\ &= \frac{A \cdot B \cdot S_0 \cdot r \cdot \eta_D \cdot \cos^2 \bar{\theta}_2}{\pi} \cdot \int_0^\pi \frac{Fy(\theta_2)}{(\ell_1 - r \cos \theta_1)^2} d\theta_1 \\ &\quad \cdot \int_0^\infty \cos^2 \theta'_3 \cdot F'_A(x) \cdot Fx(\theta'_3) dx \end{aligned} \quad (7)$$

従って, FPが均一に沈着している管に対する沈着量換算係数  $\eta_{total}$  (cps/ ( $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ )) は, 次式で表される。

$$\begin{aligned} \eta_{total} &= 3.7 \times 10^4 \cdot \frac{N_0}{S_0} \\ &= 3.7 \times 10^4 \cdot \frac{A \cdot B \cdot r \cdot \eta_D \cdot \cos^2 \bar{\theta}_2}{\pi} \cdot \int_0^\pi \frac{Fy(\theta_2)}{(\ell_1 - r \cos \theta_1)^2} d\theta_1 \\ &\quad \cdot \int_0^\infty \cos^2 \theta'_3 \cdot F'_A(x) \cdot Fx(\theta'_3) dx \end{aligned} \quad (8)$$

以上により, 沈着量換算係数は  $\eta_D$ ,  $Fx(\theta'_3)$ ,  $Fy(\theta_2)$  を実験的に求めることにより, ⑧式を用いて求めることができる。

### 3. 2 沈着量換算係数プログラム

3. 1項に示した基礎式による沈着量換算係数計算プログラム「KKKP」のフローシートをFig. 3.4に示す。

KKKPにおいては, まず検出器の複数の $\gamma$ 線エネルギーに対し, 実験的に求めたコリメータ前面の水平面及び垂直面での感度分布とこの時の線源強度より⑧式の  $\eta_D$ ,  $Fx(\theta'_3)$ ,  $Fy(\theta_2)$  を求める。更に, この検出器と測定点の幾何学的形状及び測定点の周囲にあって $\gamma$ 線に対し遮蔽となる物体の材質, 寸法, 密度からその測定点に対する沈着量換算係数を, 各 $\gamma$ 線エネルギーに対し計算する。その後, 数領域に分割した $\gamma$ 線エネルギーに対し最小自乗法を用いて, 沈着量換算係数を $\gamma$ 線エネルギーによる近似多項式として求める。

実験により求めた水平面、垂直面内での計数率を  $N_x$ 、 $N_y$  (cps) とすると、コリメータ正面での計数率は  $N_x \theta_3=0$  と  $N_y \theta_2=0$  の幾何平均を用いて KKKP では、 $\eta_D$ 、 $F_x$ 、 $F_y$  を次のようにして求めている。

$$\eta_D = \frac{1}{3.7 \times 10^4 \cdot S \cdot Y_\gamma} \cdot \frac{4\pi \ell_2^2}{A \cdot B} \cdot \sqrt{N_{x\theta_3=0} \cdot N_{y\theta_2=0}} \quad (9)$$

$$F_x(\theta_3) = \frac{N_x(\theta_3)}{\sqrt{N_{x\theta_3=0} \cdot N_{y\theta_2=0}}} \quad (10)$$

$$F_y(\theta_2) = \frac{N_y(\theta_2)}{\sqrt{N_{x\theta_3=0} \cdot N_{y\theta_2=0}}} \quad (11)$$

ここで、

$S_1$  : 実験に用いた線源の強さ ( $\mu\text{Ci}$ )

$Y_\gamma$  : 1崩壊当たりの  $\gamma$ 線放出割合

$\ell_2$  : 線源-検出器中心間距離 (cm)

$A, B$  : コリメータ窓の大きさ 縦×横 (cm)

である。

実験により求める  $N_x$ 、 $N_y$  は  $\theta_3$ 、 $\theta_2$  がそれぞれ不連続の値であるが、KKKP においては直線内挿による近似を行っている。

⑧式における各積分は、不等間隔離散点に対するシンプソン 1/3 則による数値積分により求めている。

### 3. 3 検出器感度分布測定方法

感度分布測定は、Fig. 3.5 に示す専用装置を用いて行った。使用したコリメータは、Fig. 2.1 に示す通りである。

検出器中心と線源の距離は 350 mm に設定し、横型及び縦型コリメータに対し垂直、水平の各々 2 方向について測定した。線源には、エネルギー範囲に対し多くの  $\gamma$ 線ピークを有する点状の  $^{152}\text{Eu}$  (7.16  $\mu\text{Ci}$ ) を使用した。

水平、垂直方向のそれぞれの計数率の最も高い所を  $0^\circ$  としてプラス側、マイナス側に分け、計測は主としてプラス側を測定した。計数率の高い所の測定時間は統計誤差を考慮に入れて 3 時間とし、計数率が低くなる位置については 6 時間又は 15 時間とした。

## 4. 検出器感度分布と沈着量換算係数

### 4. 1 検出器感度分布

3. 3項に示した方法で行った感度分布測定実績を、Table 4.1 に示す。

検出器感度分布測定データは、検出された $\gamma$ 線のうち放出分岐比の高い8本について整理した。コリメータ窓を開けた状態で測定した各 $\gamma$ 線のカウント数を測定時間、放出分岐比及び線源強度で除して検出効率(cps/(photon/s))を求めた。なお、コリメータ窓を閉じた状態のいわゆるバックグラウンド時のカウント数を補正して正味の検出効率を求めてみたが、コリメータの鉛厚さは100 mmと十分に厚く、検出効率にほとんど影響を与えなかった。横型及び縦型コリメータ窓に対し、水平、垂直方向各角度の検出効率値をTable 4.2 からTable 4.5 に、 $\gamma$ 線入射角度(コリメータ内のGe検出器中心に対する線源の移動方向の角度： $\theta$ )に対する検出効率分布を、Fig. 4.1 からFig. 4.4 に示す。なお、図中の破線は、外挿値を示す。

### 4. 2 沈着量換算係数

沈着量換算係数を算出するにあたって、コリメータ窓と線源を同一線上( $\theta = 0^\circ$ )に配置し、線源-検出器中心距離をパラメータにして、 $\gamma$ 線エネルギーに対する計数効率(cps/( $\mu$ Ci/cm<sup>2</sup>))を求めた。この結果を、Table 4.6 に示す。計数効率値は、距離が離れるほど、また、 $\gamma$ 線エネルギーが大きくなるほど小さくなる。なお、この計数効率値は、コリメータ窓の形状(縦、横型)にほとんど影響されない。

感度分布測定に使用したGe検出器の沈着量換算係数を、線源-検出器中心距離毎にFig. 4.5 に示す。沈着量換算係数は、KKKPにより求めたものである。図は、縦軸に単位時間、単位面積、1壊変数あたりの計数率を、横軸に $\gamma$ 線エネルギーをとってある。また、図から、 $\gamma$ 線エネルギーの約250 keVを境にして低エネルギー側は3次式で、高エネルギー側は1次式で近似できることがわかる。各線源-検出器中心距離に対する換算係数算出式を、Table 4.7 に示す。

## 5. 管状線源測定

本測定に使用した線源は、外径12mm、内径10mm、長さ100mmの管内面に核種を沈着させたものである。核種及び線源強度は、Co-57;370kBq, Ba-133;290kBq, Cs-137;303kBq, Co-60;302kBqである。線源の測定は、計数率(cps)から沈着量( $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ )を求める換算係数を算出した際に設定した、線源-検出器間中心距離をパラメータ(193, 243, 293, 343, 543 mm)にして行った。検出器のクリスタル部を挿入した鉛製コリメータの半径は143 mm(Fig. 2.1参照)であり、管状線源をコリメータ窓端面から50, 100, 150, 200, 400 mmの位置にセットした。線源長さは100mmと短いため、各距離においてはコリメータ窓中心と線源長さ方向中心を一致させた位置(C位置とする)とコリメータ窓中心から100 mmずれた点に線源長さ方向中心を一致させた位置(S位置とする)のそれぞれ2位置について測定した。測定概要図を、Fig. 5.1に示す。図中の、管状線源を実線で示したのがC位置、点線部がS位置である。

線源-検出器間中心距離毎の各核種(各 $\gamma$ 線エネルギー)の測定結果を、Table 5.1に示す。表には、測定値である計数率(cps)と換算係数を用いて算出した沈着量( $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ )を併せて記載した。計数率は、線源-検出器間距離が離れるほど小さくなっている。また、測定値と標準値を比較するため、各核種の沈着量( $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ )を標準値との誤差(%)と併せてTable 5.2に示す。標準値は、上述した線源強度を単位換算し、管内表面積で割った値である。尚、核種は、管の内表面に均一に沈着しているものとした。比較の結果、測定値は標準値より小さめで、線源-検出器間距離が離れるほど、そのマイナス幅が大きくなる傾向を示している。

検出器感度分布測定を行った時の線源-検出器間距離は350 mmであるので、管状線源を測定したときの343 mmで測定値と標準値を比較すると、沈着量の誤差は $\gamma$ 線エネルギーに関係なく、約-20%であった。

## 6. ま と め

OGL-iの1次系配管を対象にして行ってきたFP沈着分布測定は、配管-検出器間距離が236~500 mmの範囲であることから、沈着量はマイナス側ではあるが20%の誤差範囲内で測定された。これにより、FP沈着分布測定における計数率から沈着量に換算する沈着量換算係数は、妥当な数値であった。



## 5. 管状線源測定

本測定に使用した線源は、外径12mm、内径10mm、長さ100mmの管内面に核種を沈着させたものである。核種及び線源強度は、Co-57;370kBq, Ba-133;290kBq, Cs-137;303kBq, Co-60;302kBqである。線源の測定は、計数率(cps)から沈着量( $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ )を求める換算係数を算出した際に設定した、線源-検出器間中心距離をパラメータ(193, 243, 293, 343, 543 mm)にして行った。検出器のクリスタル部を挿入した鉛製コリメータの半径は143 mm(Fig. 2.1参照)であり、管状線源をコリメータ窓端面から50, 100, 150, 200, 400 mmの位置にセットした。線源長さは100mmと短いため、各距離においてはコリメータ窓中心と線源長さ方向中心を一致させた位置(C位置とする)とコリメータ窓中心から100 mmずれた点に線源長さ方向中心を一致させた位置(S位置とする)のそれぞれ2位置について測定した。測定概要図を、Fig. 5.1に示す。図中の、管状線源を実線で示したのがC位置、点線部がS位置である。

線源-検出器間中心距離毎の各核種(各 $\gamma$ 線エネルギー)の測定結果を、Table 5.1に示す。表には、測定値である計数率(cps)と換算係数を用いて算出した沈着量( $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ )を併せて記載した。計数率は、線源-検出器間距離が離れるほど小さくなっている。また、測定値と標準値を比較するため、各核種の沈着量( $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ )を標準値との誤差(%)と併せてTable 5.2に示す。標準値は、上述した線源強度を単位換算し、管内表面積で割った値である。尚、核種は、管の内表面に均一に沈着しているものとした。比較の結果、測定値は標準値より小さめで、線源-検出器間距離が離れるほど、そのマイナス幅が大きくなる傾向を示している。

検出器感度分布測定を行った時の線源-検出器間距離は350 mmであるので、管状線源を測定したときの343 mmで測定値と標準値を比較すると、沈着量の誤差は $\gamma$ 線エネルギーに関係なく、約-20%であった。

## 6. ま と め

OGL-1の1次系配管を対象にして行ってきたFP沈着分布測定は、配管-検出器間距離が236 ~ 500 mmの範囲であることから、沈着量はマイナス側ではあるが20%の誤差範囲内で測定された。これにより、FP沈着分布測定における計数率から沈着量に換算する沈着量換算係数は、妥当な数値であった。

## 謝 辞

本測定実験に係る放射線管理の面で多大な協力を頂いた管理部放射線管理課長代理高橋豊氏をはじめ同課第1係諸氏に、FP沈着分布測定したOGL-1の運転・保守を行っている材料試験炉部照射第2課長代理猿田徹氏をはじめとする同課第4係諸氏に深く感謝致します。また、本報告書をまとめる上で有益な助言を頂いた材料試験炉部長齋藤実氏に深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- (1) 松永朔郎, 他: 「高温ヘリウムインパイルガスループ(OGL-1)の建設と性能試験」, 原子力学会誌, Vol.21, No.3. P39 ~ P61 (1979).
- (2) 馬場治, 露崎典平, 齋藤隆, 後藤一郎, 奥田豪博, 渡辺久: 「OGL-1 FPプレートアウト測定における沈着量換算係数」, JAERI-M 9593 (1981).
- (3) 露崎典平, 松本実喜夫: 「OGL-1における $^{137}\text{Cs}$ の沈着分布」, JAERI-M 88-225 (1988).
- (4) 馬場治, 露崎典平, 沢和弘: 「高温ガス炉におけるFP沈着解析コード-PLAIN-」, JAERI-M 88-266 (1989).
- (5) 松本実喜夫, 遠藤泰一, 伊藤治彦, 板橋行夫, 猿田徹, 横内猪一郎, 安藤弘栄: 「高温高圧ガスループ中のヨウ素沈着分布」, JAERI-M 92-212 (1993).
- (6) 日本原子力研究所: 「高温工学試験研究の現状」 (1988), (1989), (1990), (1991)

## 謝 辞

本測定実験に係る放射線管理の面で多大な協力を頂いた管理部放射線管理課長代理高橋豊氏をはじめ同課第1係諸氏に、FP沈着分布測定したOGL-1の運転・保守を行っている材料試験炉部照射第2課長代理猿田徹氏をはじめとする同課第4係諸氏に深く感謝致します。また、本報告書をまとめる上で有益な助言を頂いた材料試験炉部長斎藤実氏に深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- (1) 松永朔郎, 他: 「高温ヘリウムインパイルガスループ(OGL-1)の建設と性能試験」, 原子力学会誌, Vol.21, No.3, P39 ~ P61 (1979) .
- (2) 馬場治, 露崎典平, 齋藤隆, 後藤一郎, 奥田豪博, 渡辺久: 「OGL-1 FPプレートアウト測定における沈着量換算係数」, JAERI-M 9593 (1981) .
- (3) 露崎典平, 松本実喜夫: 「OGL-1における $^{137}\text{Cs}$ の沈着分布」, JAERI-M 88-225 (1988) .
- (4) 馬場治, 露崎典平, 沢和弘: 「高温ガス炉におけるFP沈着解析コードPLAIN-」, JAERI-M 88-266 (1989) .
- (5) 松本実喜夫, 遠藤泰一, 伊藤治彦, 板橋行夫, 猿田徹, 横内猪一郎, 安藤弘栄: 「高温高圧ガスループ中のヨウ素沈着分布」, JAERI-M 92-212 (1993) .
- (6) 日本原子力研究所: 「高温工学試験研究の現状」 (1988), (1989), (1990), (1991)

Table 2.1 High-purity germanium coaxial detector specification

Dimensions	Crystal diameter	48.9 mm
	Crystal length	50.4 mm
	End cap to crystal	3 mm
Absorbing layers	Aluminum	1.27 mm
	Inactive germanium	0.7 mm
Recommended operating bias, POSITIVE		3500 V
Performance specifications	Resolution(FWHM) at 1.33MeV, $^{60}\text{Co}$	1.67 keV
	Peak-to-compton ratio, $^{60}\text{Co}$	55.1
	Efficiency at 1.33MeV, $^{60}\text{Co}$	18.0 %
	Resolution(FWHM) at 122keV, $^{57}\text{Co}$	778 eV

Table 2.2 Main features of the FP plate-out measuring point

Measuring point	Pipe diameter (mm)	Interval between the pipe and the detector (mm)	Distance from the fuel (m)	Type of the collimator	Temperature region of helium gas and location of measuring point in the OGL-1 primary coolant circuit
1	59.0	316	13.3	Vertical	High temp. *1) Outlet of in-pile tube
2	44.6	371	15.7	Vertical	High temp.
4	44.6	341	26.0	Horizontal	High temp.
5	44.6	346	26.7	Vertical	High temp.
6	44.6	346	31.2	Vertical	High temp. Inlet of No.1 IHX *4)
8-1	11.9	500	33.5	Vertical	Middle temp. *2) Heat transfer tube of No.1 IHX
8-2	11.9	500	37.0	Vertical	Middle temp. Heat transfer tube of No.1 IHX
7	52.7	368	41.0	Horizontal	Middle temp. Outlet of No.1 IHX
8-3	12.7	500	46.5	Vertical	Middle temp. Heat transfer tube of No.2 IHX
8-4	12.7	500	49.0	Vertical	Middle temp. Heat transfer tube of No.2 IHX
3	52.7	308	61.0	Vertical	Low temp. *3) Inlet of cooler
10	52.7	308	75.0	Vertical	Low temp. Outlet of cooler
11	52.7	236	84.7	Horizontal	Low temp. Inlet of filter
13	52.7	323	88.7	Vertical	Low temp. Outlet of filter
14	52.7	293	102.8	Vertical	Low temp. Outlet of gas circulator
9	52.7	333	57.3	Vertical	Low temp. Bypass line

\*1) &gt; 500°C \*2) 200°C ~ 500°C \*3) &lt; 200°C

\*4) Intermediate heat exchanger

Table 4.1 Condition of sensitivity distribution measurement(1/2)

Collimator	Direction	Angle (deg.)	Counting time (sec)	Date	
Horizontal	Horizontal	+ 9. 0	5 4 0 0 0	1988 10.26	
		0	1 0 8 0 0	10.27	
		+ 1 0. 0	5 4 0 0 0	10.27	
		- 6. 0	1 8 0 0 0	10.28	
		- 3. 0	1 0 8 0 0	10.28	
		- 5. 0	1 8 0 0 0	10.31	
		- 2. 0	1 0 8 0 0	10.31	
		+ 1 2. 0	5 4 0 0 0	10.31	
		- 4. 0	1 8 0 0 0	11. 1	
		- 1. 0	1 0 8 0 0	11. 1	
		+ 1 3. 0	5 4 0 0 0	11. 1	
		+ 4. 0	1 8 0 0 0	11. 2	
		+ 2. 0	1 0 8 0 0	11. 2	
		+ 1 4. 0	5 4 0 0 0	11. 2	
		+ 5. 0	1 8 0 0 0	11. 4	
		+ 1. 0	1 0 8 0 0	11. 4	
		+ 6. 0	1 8 0 0 0	11. 4	
	+ 7. 0	1 8 0 0 0	11. 7		
	+ 3. 0	1 0 8 0 0	11. 7		
	+ 8. 0	1 8 0 0 0	11. 7		
	Vertical	Vertical	0	1 0 8 0 0	11. 8
			- 1. 0	1 0 8 0 0	11. 8
			- 5. 0	5 4 0 0 0	11. 8
			- 0. 5	1 0 8 0 0	11. 9
			+ 0. 5	1 0 8 0 0	11. 9
			- 4. 0	5 4 0 0 0	11. 9
			- 2. 0	1 8 0 0 0	11.10
- 3. 0			5 4 0 0 0	11.10	
+ 1. 0			1 0 8 0 0	11.11	
+ 2. 0			5 4 0 0 0	11.11	
+ 3. 0	5 4 0 0 0	11.11			
- 1. 5	1 8 0 0 0	11.14			
+ 4. 0	5 4 0 0 0	11.14			
+ 5. 0	5 4 0 0 0	11.15			
+ 2. 5	1 8 0 0 0	11.16			

Table 4.1 Condition of sensitivity distribution measurement(2/2)

Collimator	Direction	Angle (deg.)	Counting time (sec)	Date	
Vertical	Horizontal	- 5. 0	5 4 0 0 0	1988 11. 17	
		- 1. 0	1 0 8 0 0	11. 18	
		- 4. 0	5 4 0 0 0	11. 21	
		- 2. 0	1 8 0 0 0	11. 22	
		- 3. 0	5 4 0 0 0	11. 22	
		- 0. 5	1 0 8 0 0	11. 24	
		0	1 0 8 0 0	11. 24	
		+ 2. 0	5 4 0 0 0	11. 24	
		- 1. 5	1 8 0 0 0	11. 25	
		+ 0. 5	1 0 8 0 0	11. 25	
		+ 3. 0	5 4 0 0 0	11. 25	
		+ 1. 0	1 0 8 0 0	11. 26	
		+ 4. 0	5 4 0 0 0	11. 26	
		+ 1. 5	1 8 0 0 0	11. 28	
		+ 5. 0	5 4 0 0 0	11. 28	
		Vertical	- 3. 0	1 0 8 0 0	11. 29
			- 2. 0	1 0 8 0 0	11. 29
	+ 9. 0		5 4 0 0 0	11. 29	
	- 1. 0		1 0 8 0 0	11. 30	
	0		1 0 8 0 0	11. 30	
	+ 1 0. 0		5 4 0 0 0	11. 30	
	- 5. 0		1 8 0 0 0	12. 1	
	+ 1. 0		1 0 8 0 0	12. 1	
	+ 1 1. 0		5 4 0 0 0	12. 1	
	- 4. 0		1 8 0 0 0	12. 2	
	+ 2. 0		1 0 8 0 0	12. 2	
	+ 1 2. 0	5 4 0 0 0	12. 2		
	+ 4. 0	1 8 0 0 0	12. 5		
+ 3. 0	1 0 8 0 0	12. 5			
+ 1 3. 0	5 4 0 0 0	12. 5			
+ 5. 0	1 8 0 0 0	12. 6			
+ 1 4. 0	5 4 0 0 0	12. 6			
+ 6. 0	1 8 0 0 0	12. 7			
+ 7. 0	1 8 0 0 0	12. 7			
+ 8. 0	1 8 0 0 0	12. 8			
- 5. 0	1 8 0 0 0	12. 12			
- 4. 0	1 8 0 0 0	12. 13			
- 3. 0	1 0 8 0 0	12. 13			

Table 4.2 Detection efficiency in horizontal direction with the horizontal lead collimator

[ cps/(photon/s) ]

$\gamma$ -ray Angle (deg.) \ energy (keV)	1 2 2	2 4 5	3 4 4	4 4 4	7 7 9	9 6 4	1 1 1 2	1 4 0 8
- 5. 0	$1.57 \times 10^{-4}$	$1.24 \times 10^{-4}$	$9.30 \times 10^{-5}$	$7.47 \times 10^{-5}$	$4.72 \times 10^{-5}$	$4.01 \times 10^{-5}$	$3.62 \times 10^{-5}$	$3.01 \times 10^{-5}$
- 4. 0	$1.74 \times 10^{-4}$	$1.40 \times 10^{-4}$	$1.03 \times 10^{-4}$	$8.22 \times 10^{-5}$	$5.15 \times 10^{-5}$	$4.42 \times 10^{-5}$	$3.89 \times 10^{-5}$	$3.32 \times 10^{-5}$
- 3. 0	$1.94 \times 10^{-4}$	$1.51 \times 10^{-4}$	$1.13 \times 10^{-4}$	$8.96 \times 10^{-5}$	$5.48 \times 10^{-5}$	$4.68 \times 10^{-5}$	$4.26 \times 10^{-5}$	$3.49 \times 10^{-5}$
- 2. 0	$1.98 \times 10^{-4}$	$1.57 \times 10^{-4}$	$1.15 \times 10^{-4}$	$9.16 \times 10^{-5}$	$5.66 \times 10^{-5}$	$4.83 \times 10^{-5}$	$4.22 \times 10^{-5}$	$3.56 \times 10^{-5}$
- 1. 0	$1.98 \times 10^{-4}$	$1.55 \times 10^{-4}$	$1.14 \times 10^{-4}$	$9.23 \times 10^{-5}$	$5.73 \times 10^{-5}$	$4.82 \times 10^{-5}$	$4.27 \times 10^{-5}$	$3.55 \times 10^{-5}$
0. 0	$2.01 \times 10^{-4}$	$1.56 \times 10^{-4}$	$1.15 \times 10^{-4}$	$9.17 \times 10^{-5}$	$5.75 \times 10^{-5}$	$4.82 \times 10^{-5}$	$4.39 \times 10^{-5}$	$3.56 \times 10^{-5}$
1. 0	$1.97 \times 10^{-4}$	$1.54 \times 10^{-4}$	$1.15 \times 10^{-4}$	$9.13 \times 10^{-5}$	$5.64 \times 10^{-5}$	$4.81 \times 10^{-5}$	$4.26 \times 10^{-5}$	$3.56 \times 10^{-5}$
2. 0	$1.95 \times 10^{-4}$	$1.53 \times 10^{-4}$	$1.13 \times 10^{-4}$	$8.96 \times 10^{-5}$	$5.37 \times 10^{-5}$	$4.78 \times 10^{-5}$	$4.24 \times 10^{-5}$	$3.49 \times 10^{-5}$
3. 0	$1.94 \times 10^{-4}$	$1.50 \times 10^{-4}$	$1.12 \times 10^{-4}$	$8.93 \times 10^{-5}$	$5.56 \times 10^{-5}$	$4.66 \times 10^{-5}$	$4.23 \times 10^{-5}$	$3.47 \times 10^{-5}$
4. 0	$1.82 \times 10^{-4}$	$1.43 \times 10^{-4}$	$1.07 \times 10^{-4}$	$8.65 \times 10^{-5}$	$5.31 \times 10^{-5}$	$4.50 \times 10^{-5}$	$3.99 \times 10^{-5}$	$3.38 \times 10^{-5}$
5. 0	$1.66 \times 10^{-4}$	$1.33 \times 10^{-4}$	$9.90 \times 10^{-5}$	$8.10 \times 10^{-5}$	$5.03 \times 10^{-5}$	$4.24 \times 10^{-5}$	$3.81 \times 10^{-5}$	$3.18 \times 10^{-5}$
6. 0	$1.49 \times 10^{-4}$	$1.19 \times 10^{-4}$	$8.89 \times 10^{-5}$	$7.18 \times 10^{-5}$	$4.51 \times 10^{-5}$	$3.84 \times 10^{-5}$	$3.45 \times 10^{-5}$	$2.89 \times 10^{-5}$
7. 0	$1.26 \times 10^{-4}$	$9.99 \times 10^{-5}$	$7.50 \times 10^{-5}$	$6.11 \times 10^{-5}$	$3.84 \times 10^{-5}$	$3.38 \times 10^{-5}$	$3.01 \times 10^{-5}$	$2.54 \times 10^{-5}$
8. 0	$1.07 \times 10^{-4}$	$8.33 \times 10^{-5}$	$6.30 \times 10^{-5}$	$5.05 \times 10^{-5}$	$3.33 \times 10^{-5}$	$2.88 \times 10^{-5}$	$2.61 \times 10^{-5}$	$2.20 \times 10^{-5}$
9. 0	$8.65 \times 10^{-5}$	$6.78 \times 10^{-5}$	$5.14 \times 10^{-5}$	$4.20 \times 10^{-5}$	$2.77 \times 10^{-5}$	$2.43 \times 10^{-5}$	$2.23 \times 10^{-5}$	$1.89 \times 10^{-5}$
1 0. 0	$6.53 \times 10^{-5}$	$5.17 \times 10^{-5}$	$3.86 \times 10^{-5}$	$3.22 \times 10^{-5}$	$2.18 \times 10^{-5}$	$1.97 \times 10^{-5}$	$1.84 \times 10^{-5}$	$1.58 \times 10^{-5}$
1 1. 0	$4.59 \times 10^{-5}$	$3.39 \times 10^{-5}$	$2.64 \times 10^{-5}$	$2.25 \times 10^{-5}$	$1.63 \times 10^{-5}$	$1.48 \times 10^{-5}$	$1.40 \times 10^{-5}$	$1.23 \times 10^{-5}$
1 2. 0	$2.57 \times 10^{-5}$	$1.88 \times 10^{-5}$	$1.46 \times 10^{-5}$	$1.30 \times 10^{-5}$	$1.07 \times 10^{-5}$	$1.02 \times 10^{-5}$	$9.94 \times 10^{-6}$	$9.14 \times 10^{-6}$
1 3. 0	$9.31 \times 10^{-6}$	$6.35 \times 10^{-6}$	$5.82 \times 10^{-6}$	$5.53 \times 10^{-6}$	$6.52 \times 10^{-6}$	$6.74 \times 10^{-6}$	$6.68 \times 10^{-6}$	$6.60 \times 10^{-6}$
1 4. 0	$2.66 \times 10^{-7}$	$3.03 \times 10^{-7}$	$8.46 \times 10^{-7}$	$1.77 \times 10^{-6}$	$3.60 \times 10^{-6}$	$4.10 \times 10^{-6}$	$4.34 \times 10^{-6}$	$4.63 \times 10^{-6}$



Table 4.3 Detection efficiency in vertical direction with the horizontal lead collimator

[ cps/(photon/s) ]

Angle (deg) \ $\gamma$ -ray energy (keV)	1 2 2	2 4 5	3 4 4	4 4 4	7 7 9	9 6 4	1 1 1 2	1 4 0 8
- 2. 0	$1.39 \times 10^{-4}$	$1.10 \times 10^{-4}$	$8.31 \times 10^{-5}$	$6.76 \times 10^{-5}$	$4.35 \times 10^{-5}$	$3.77 \times 10^{-5}$	$3.43 \times 10^{-5}$	$2.89 \times 10^{-5}$
- 1. 0	$2.00 \times 10^{-4}$	$1.56 \times 10^{-4}$	$1.16 \times 10^{-4}$	$9.45 \times 10^{-5}$	$5.73 \times 10^{-5}$	$4.85 \times 10^{-5}$	$4.34 \times 10^{-5}$	$3.61 \times 10^{-5}$
- 0. 5	$2.11 \times 10^{-4}$	$1.65 \times 10^{-4}$	$1.22 \times 10^{-4}$	$9.78 \times 10^{-5}$	$5.98 \times 10^{-5}$	$5.07 \times 10^{-5}$	$4.52 \times 10^{-5}$	$3.72 \times 10^{-5}$
0. 0	$2.10 \times 10^{-4}$	$1.65 \times 10^{-4}$	$1.22 \times 10^{-4}$	$1.00 \times 10^{-4}$	$5.95 \times 10^{-5}$	$5.06 \times 10^{-5}$	$4.56 \times 10^{-5}$	$3.72 \times 10^{-5}$
0. 5	$2.10 \times 10^{-4}$	$1.63 \times 10^{-4}$	$1.22 \times 10^{-4}$	$9.74 \times 10^{-5}$	$5.91 \times 10^{-5}$	$5.03 \times 10^{-5}$	$4.51 \times 10^{-5}$	$3.71 \times 10^{-5}$
1. 0	$2.00 \times 10^{-4}$	$1.57 \times 10^{-4}$	$1.16 \times 10^{-4}$	$9.04 \times 10^{-5}$	$5.70 \times 10^{-5}$	$4.84 \times 10^{-5}$	$4.31 \times 10^{-5}$	$3.57 \times 10^{-5}$
1. 5	$1.69 \times 10^{-4}$	$1.32 \times 10^{-4}$	$9.99 \times 10^{-5}$	$8.03 \times 10^{-5}$	$5.08 \times 10^{-5}$	$4.29 \times 10^{-5}$	$3.87 \times 10^{-5}$	$3.22 \times 10^{-5}$
2. 0	$1.39 \times 10^{-4}$	$1.09 \times 10^{-4}$	$8.31 \times 10^{-5}$	$6.79 \times 10^{-5}$	$4.43 \times 10^{-5}$	$3.77 \times 10^{-5}$	$3.42 \times 10^{-5}$	$2.89 \times 10^{-5}$
2. 5	$1.06 \times 10^{-4}$	$8.60 \times 10^{-5}$	$6.54 \times 10^{-5}$	$5.41 \times 10^{-5}$	$3.59 \times 10^{-5}$	$3.22 \times 10^{-5}$	$2.96 \times 10^{-5}$	$2.50 \times 10^{-5}$
3. 0	$7.41 \times 10^{-5}$	$6.08 \times 10^{-5}$	$4.78 \times 10^{-5}$	$4.13 \times 10^{-5}$	$2.96 \times 10^{-5}$	$2.62 \times 10^{-5}$	$2.45 \times 10^{-5}$	$2.16 \times 10^{-5}$
4. 0	$1.29 \times 10^{-5}$	$1.42 \times 10^{-5}$	$1.45 \times 10^{-5}$	$1.52 \times 10^{-5}$	$1.55 \times 10^{-5}$	$1.56 \times 10^{-5}$	$1.52 \times 10^{-5}$	$1.45 \times 10^{-5}$
5. 0	$4.58 \times 10^{-7}$	$2.57 \times 10^{-7}$	$3.84 \times 10^{-7}$	$1.78 \times 10^{-6}$	$5.26 \times 10^{-6}$	$6.79 \times 10^{-6}$	$7.49 \times 10^{-6}$	$8.39 \times 10^{-6}$
6. 0	$2.76 \times 10^{-7}$	$7.24 \times 10^{-8}$	$2.50 \times 10^{-7}$		$2.20 \times 10^{-6}$	$3.36 \times 10^{-6}$	$4.31 \times 10^{-6}$	$5.15 \times 10^{-6}$

Table 4.4 Detection efficiency in horizontal direction with the vertical lead collimator

[ cps/(photon/s) ]

$\gamma$ -ray Angle (deg.)	energy (keV)	1 2 2	2 4 5	3 4 4	4 4 4	7 7 9	9 6 4	1 1 1 2	1 4 0 8
- 3. 5		$1.05 \times 10^{-4}$	$8.71 \times 10^{-5}$	$6.71 \times 10^{-5}$	$5.53 \times 10^{-5}$	$3.92 \times 10^{-5}$	$3.45 \times 10^{-5}$	$3.16 \times 10^{-5}$	$2.77 \times 10^{-5}$
- 2. 5		$1.45 \times 10^{-4}$	$1.16 \times 10^{-4}$	$8.73 \times 10^{-5}$	$7.06 \times 10^{-5}$	$4.74 \times 10^{-5}$	$4.15 \times 10^{-5}$	$3.71 \times 10^{-5}$	$3.18 \times 10^{-5}$
- 1. 5		$2.09 \times 10^{-4}$	$1.63 \times 10^{-4}$	$1.22 \times 10^{-4}$	$9.91 \times 10^{-5}$	$6.15 \times 10^{-5}$	$5.16 \times 10^{-5}$	$4.64 \times 10^{-5}$	$3.88 \times 10^{-5}$
0. 0		$2.29 \times 10^{-4}$	$1.82 \times 10^{-4}$	$1.33 \times 10^{-4}$	$1.08 \times 10^{-4}$	$6.69 \times 10^{-5}$	$5.67 \times 10^{-5}$	$4.98 \times 10^{-5}$	$4.16 \times 10^{-5}$
0. 5		$2.28 \times 10^{-4}$	$1.78 \times 10^{-4}$	$1.33 \times 10^{-4}$	$1.07 \times 10^{-4}$	$6.59 \times 10^{-5}$	$5.61 \times 10^{-5}$	$4.97 \times 10^{-5}$	$4.15 \times 10^{-5}$
1. 0		$2.26 \times 10^{-4}$	$1.77 \times 10^{-4}$	$1.32 \times 10^{-4}$	$1.06 \times 10^{-4}$	$6.52 \times 10^{-5}$	$5.53 \times 10^{-5}$	$4.92 \times 10^{-5}$	$4.11 \times 10^{-5}$
1. 5		$2.24 \times 10^{-4}$	$1.74 \times 10^{-4}$	$1.30 \times 10^{-4}$	$1.04 \times 10^{-4}$	$6.51 \times 10^{-5}$	$5.52 \times 10^{-5}$	$4.87 \times 10^{-5}$	$4.05 \times 10^{-5}$
2. 0		$1.94 \times 10^{-4}$	$1.52 \times 10^{-4}$	$1.14 \times 10^{-4}$	$9.14 \times 10^{-5}$	$5.75 \times 10^{-5}$	$4.93 \times 10^{-5}$	$4.38 \times 10^{-5}$	$3.70 \times 10^{-5}$
3. 0		$1.27 \times 10^{-4}$	$1.01 \times 10^{-4}$	$7.81 \times 10^{-5}$	$6.46 \times 10^{-5}$	$4.33 \times 10^{-5}$	$3.78 \times 10^{-5}$	$3.41 \times 10^{-5}$	$2.96 \times 10^{-5}$
4. 0		$5.92 \times 10^{-5}$	$5.08 \times 10^{-5}$	$4.12 \times 10^{-5}$	$3.70 \times 10^{-5}$	$2.83 \times 10^{-5}$	$2.61 \times 10^{-5}$	$2.44 \times 10^{-5}$	$2.20 \times 10^{-5}$
5. 0		$6.31 \times 10^{-7}$	$1.84 \times 10^{-6}$	$4.80 \times 10^{-6}$	$7.94 \times 10^{-6}$	$1.25 \times 10^{-5}$	$1.34 \times 10^{-5}$	$1.35 \times 10^{-5}$	$1.35 \times 10^{-5}$

Table 4.5 Detection efficiency in vertical direction with the vertical lead collimator

[ cps/(photon/s) ]

γ-ray Angle (deg.) \ energy (keV)	1 2 2	2 4 5	3 4 4	4 4 4	7 7 9	9 6 4	1 1 1 2	1 4 0 8
- 4. 0	$2.11 \times 10^{-4}$	$1.63 \times 10^{-4}$	$1.19 \times 10^{-4}$	$9.30 \times 10^{-5}$	$5.92 \times 10^{-5}$	$4.96 \times 10^{-5}$	$4.44 \times 10^{-5}$	$3.68 \times 10^{-5}$
- 3. 0	$2.28 \times 10^{-4}$	$1.77 \times 10^{-4}$	$1.30 \times 10^{-4}$	$1.03 \times 10^{-4}$	$6.34 \times 10^{-5}$	$5.38 \times 10^{-5}$	$4.78 \times 10^{-5}$	$3.99 \times 10^{-5}$
- 2. 0	$2.30 \times 10^{-4}$	$1.78 \times 10^{-4}$	$1.32 \times 10^{-4}$	$1.05 \times 10^{-4}$	$6.44 \times 10^{-5}$	$5.48 \times 10^{-5}$	$4.83 \times 10^{-5}$	$4.07 \times 10^{-5}$
- 1. 0	$2.29 \times 10^{-4}$	$1.81 \times 10^{-4}$	$1.33 \times 10^{-4}$	$1.06 \times 10^{-4}$	$6.51 \times 10^{-5}$	$5.55 \times 10^{-5}$	$4.92 \times 10^{-5}$	$4.12 \times 10^{-5}$
0. 0	$2.30 \times 10^{-4}$	$1.79 \times 10^{-4}$	$1.33 \times 10^{-4}$	$1.07 \times 10^{-4}$	$6.60 \times 10^{-5}$	$5.66 \times 10^{-5}$	$4.91 \times 10^{-5}$	$4.15 \times 10^{-5}$
1. 0	$2.29 \times 10^{-4}$	$1.78 \times 10^{-4}$	$1.33 \times 10^{-4}$	$1.06 \times 10^{-4}$	$6.58 \times 10^{-5}$	$5.56 \times 10^{-5}$	$4.91 \times 10^{-5}$	$4.14 \times 10^{-5}$
2. 0	$2.29 \times 10^{-4}$	$1.76 \times 10^{-4}$	$1.32 \times 10^{-4}$	$1.05 \times 10^{-4}$	$6.56 \times 10^{-5}$	$5.54 \times 10^{-5}$	$4.91 \times 10^{-5}$	$4.08 \times 10^{-5}$
3. 0	$2.27 \times 10^{-4}$	$1.75 \times 10^{-4}$	$1.31 \times 10^{-4}$	$1.04 \times 10^{-4}$	$6.45 \times 10^{-5}$	$5.47 \times 10^{-5}$	$4.85 \times 10^{-5}$	$4.07 \times 10^{-5}$
4. 0	$2.14 \times 10^{-4}$	$1.68 \times 10^{-4}$	$1.24 \times 10^{-4}$	$1.02 \times 10^{-4}$	$6.09 \times 10^{-5}$	$5.20 \times 10^{-5}$	$4.53 \times 10^{-5}$	$3.88 \times 10^{-5}$
5. 0	$1.95 \times 10^{-4}$	$1.51 \times 10^{-4}$	$1.13 \times 10^{-4}$	$9.10 \times 10^{-5}$	$5.64 \times 10^{-5}$	$4.77 \times 10^{-5}$	$4.27 \times 10^{-5}$	$3.59 \times 10^{-5}$
6. 0	$1.75 \times 10^{-4}$	$1.35 \times 10^{-4}$	$1.01 \times 10^{-4}$	$8.19 \times 10^{-5}$	$5.07 \times 10^{-5}$	$4.33 \times 10^{-5}$	$3.85 \times 10^{-5}$	$3.24 \times 10^{-5}$
7. 0	$1.54 \times 10^{-4}$	$1.18 \times 10^{-4}$	$8.85 \times 10^{-5}$	$7.05 \times 10^{-5}$	$4.51 \times 10^{-5}$	$3.87 \times 10^{-5}$	$3.43 \times 10^{-5}$	$2.92 \times 10^{-5}$
8. 0	$1.31 \times 10^{-4}$	$9.94 \times 10^{-5}$	$7.49 \times 10^{-5}$	$6.25 \times 10^{-5}$	$3.93 \times 10^{-5}$	$3.40 \times 10^{-5}$	$3.04 \times 10^{-5}$	$2.58 \times 10^{-5}$
9. 0	$1.11 \times 10^{-4}$	$8.29 \times 10^{-5}$	$6.24 \times 10^{-5}$	$4.98 \times 10^{-5}$	$3.36 \times 10^{-5}$	$2.85 \times 10^{-5}$	$2.59 \times 10^{-5}$	$2.22 \times 10^{-5}$
1 0. 0	$8.95 \times 10^{-5}$	$6.58 \times 10^{-5}$	$4.97 \times 10^{-5}$	$4.05 \times 10^{-5}$	$2.70 \times 10^{-5}$	$2.40 \times 10^{-5}$	$2.19 \times 10^{-5}$	$1.89 \times 10^{-5}$
1 1. 0	$7.00 \times 10^{-5}$	$5.03 \times 10^{-5}$	$3.77 \times 10^{-5}$	$3.12 \times 10^{-5}$	$2.18 \times 10^{-5}$	$1.95 \times 10^{-5}$	$1.78 \times 10^{-5}$	$1.56 \times 10^{-5}$
1 2. 0	$5.09 \times 10^{-5}$	$3.40 \times 10^{-5}$	$2.55 \times 10^{-5}$	$2.15 \times 10^{-5}$	$1.58 \times 10^{-5}$	$1.46 \times 10^{-5}$	$1.38 \times 10^{-5}$	$1.23 \times 10^{-5}$
1 3. 0	$3.16 \times 10^{-5}$	$1.94 \times 10^{-5}$	$1.45 \times 10^{-5}$	$1.26 \times 10^{-5}$	$1.06 \times 10^{-5}$	$1.02 \times 10^{-5}$	$9.78 \times 10^{-6}$	$9.39 \times 10^{-6}$
1 4. 0	$1.33 \times 10^{-5}$	$7.44 \times 10^{-6}$	$5.85 \times 10^{-6}$	$5.65 \times 10^{-6}$	$6.42 \times 10^{-6}$	$6.68 \times 10^{-6}$	$6.64 \times 10^{-6}$	$6.61 \times 10^{-6}$
1 5. 0	$3.99 \times 10^{-7}$	$6.77 \times 10^{-7}$	$1.18 \times 10^{-6}$	$1.65 \times 10^{-6}$	$3.62 \times 10^{-6}$	$4.13 \times 10^{-6}$	$4.26 \times 10^{-6}$	$4.52 \times 10^{-6}$

Table 4.6 Counting efficiency against  $\gamma$ -ray energy[ cps/( $\mu$  Ci/cm<sup>2</sup>) ]

$\gamma$ -ray energy (keV) \ / \ Distance *1) (mm)	1 9 3	2 4 3	2 9 3	3 4 3	5 4 3
1 2 2	323.3	265.4	224.2	192.9	123.0
1 6 0 *2)	319.0	263.0	222.2	191.0	122.2
2 0 0 *2)	306.7	252.6	213.1	182.7	116.0
2 4 5	284.4	234.9	199.3	170.9	108.8
3 4 4	219.7	180.1	152.7	131.2	83.80
4 4 4	176.8	144.8	122.6	106.1	68.43
7 7 9	117.7	95.69	80.73	69.30	44.13
8 6 7	110.3	90.09	75.63	65.01	41.37
9 6 4	101.8	83.82	70.69	60.50	38.60
1 0 8 6	93.67	76.64	64.34	54.97	34.97
1 1 1 2	92.39	75.28	63.43	54.39	34.78
1 4 0 8	79.03	64.57	54.45	46.53	29.75

\*1) Interval between the radiation source and the detector.

\*2) Counting efficiency at these  $\gamma$ -ray energies was obtained by interpolation.

Table 4.7 Conversion coefficient for the plate-out activity

Distance (mm) *2)	Boundary energy Coefficient ( $\mu\text{Ci}^{-1}$ )	< 250 keV				> 250 keV	
		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
1 9 3		28.482	- 20.828	4.3567	- 0.30404	- 0.84366	- 0.73454
2 4 3		11.118	- 10.835	2.4190	- 0.17888	- 1.0118	- 0.73941
2 9 3		- 6.2141	- 0.70123	0.42691	- 0.04849	- 1.1464	- 0.74478
3 4 3		- 15.899	4.8880	- 0.66291	0.02218	- 1.2774	- 0.74816
5 4 3		- 56.645	28.337	- 5.2039	0.31481	- 1.7209	- 0.74895

\*1) Formulas for conversion coefficient ;

$$C = C_1 + C_2 \cdot E + C_3 \cdot E^2 + C_4 \cdot E^3, \text{ Low energy side } (< 250 \text{ keV})$$

$$C = C_1 + C_2 \cdot E, \text{ High energy side } (> 250 \text{ keV})$$

$$E : \ln[\gamma\text{-ray energy(keV)}]$$

$$C : \ln[\text{cps}/(\text{dps}/\text{cm}^2)]$$

\*2) Interval between the radiation source and the detector.

Table 5.1 Measurement results of tubular radiation source

No.	Source-to-detector distance (mm)	Nuclide	$\gamma$ -ray energy (keV)	Measurement results *)	
				(cps)	( $\mu$ Ci/cm <sup>2</sup> )
1	193	<sup>57</sup> Co	122.1	1.30	$3.03 \times 10^{-1}$
		<sup>133</sup> Ba	356.0	24.9	$2.52 \times 10^{-1}$
		<sup>137</sup> Cs	661.7	27.5	$2.66 \times 10^{-1}$
		<sup>60</sup> Co	1332.50	12.5	$2.79 \times 10^{-1}$
2	243	<sup>57</sup> Co	122.1	1.14	$3.26 \times 10^{-1}$
		<sup>133</sup> Ba	356.0	19.3	$2.38 \times 10^{-1}$
		<sup>137</sup> Cs	661.7	20.6	$2.44 \times 10^{-1}$
		<sup>60</sup> Co	1332.50	9.34	$2.55 \times 10^{-1}$
3	293	<sup>57</sup> Co	122.1	0.823	$2.78 \times 10^{-1}$
		<sup>133</sup> Ba	356.0	14.8	$2.15 \times 10^{-1}$
		<sup>137</sup> Cs	661.7	15.5	$2.17 \times 10^{-1}$
		<sup>60</sup> Co	1332.50	6.92	$2.25 \times 10^{-1}$
4	343	<sup>57</sup> Co	122.1	0.670	$2.63 \times 10^{-1}$
		<sup>133</sup> Ba	356.0	12.2	$2.07 \times 10^{-1}$
		<sup>137</sup> Cs	661.7	12.7	$2.07 \times 10^{-1}$
		<sup>60</sup> Co	1332.50	5.81	$2.21 \times 10^{-1}$
5	543	<sup>57</sup> Co	122.1	0.469	$2.90 \times 10^{-1}$
		<sup>133</sup> Ba	356.0	6.85	$1.81 \times 10^{-1}$
		<sup>137</sup> Cs	661.7	7.37	$1.88 \times 10^{-1}$
		<sup>60</sup> Co	1332.50	3.41	$2.03 \times 10^{-1}$

\*) Corrected to 1988/Oct. 1

Table 5.2 Comparison between measured value and reference value

Nuclide	$\gamma$ -ray energy (keV)	Source-to-detector distance(mm)	Plate-out activity ( $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ )		Error ((a-b)/b)*100 (%)
			Measurement :a	Reference :b	
$^{57}\text{Co}$	122.06	1 9 3	$3.028 \times 10^{-1}$	$3.183 \times 10^{-1}$	- 4.87
		2 4 3	$3.262 \times 10^{-1}$		+ 2.48
		2 9 3	$2.782 \times 10^{-1}$		- 12.6
		3 4 3	$2.632 \times 10^{-1}$		- 17.3
		5 4 3	$2.897 \times 10^{-1}$		- 8.99
$^{133}\text{Ba}$	356.00	1 9 3	$2.518 \times 10^{-1}$	$2.495 \times 10^{-1}$	+ 0.922
		2 4 3	$2.379 \times 10^{-1}$		- 4.65
		2 9 3	$2.154 \times 10^{-1}$		- 13.7
		3 4 3	$2.067 \times 10^{-1}$		- 17.2
		5 4 3	$1.810 \times 10^{-1}$		- 27.5
$^{137}\text{Cs}$	661.65	1 9 3	$2.663 \times 10^{-1}$	$2.607 \times 10^{-1}$	+ 2.15
		2 4 3	$2.435 \times 10^{-1}$		- 6.60
		2 9 3	$2.166 \times 10^{-1}$		- 16.9
		3 4 3	$2.074 \times 10^{-1}$		- 20.4
		5 4 3	$1.881 \times 10^{-1}$		- 27.8
$^{60}\text{Co}$	1332.50	1 9 3	$2.785 \times 10^{-1}$	$2.598 \times 10^{-1}$	+ 7.20
		2 4 3	$2.553 \times 10^{-1}$		- 1.73
		2 9 3	$2.248 \times 10^{-1}$		- 13.5
		3 4 3	$2.205 \times 10^{-1}$		- 15.1
		5 4 3	$2.029 \times 10^{-1}$		- 21.9

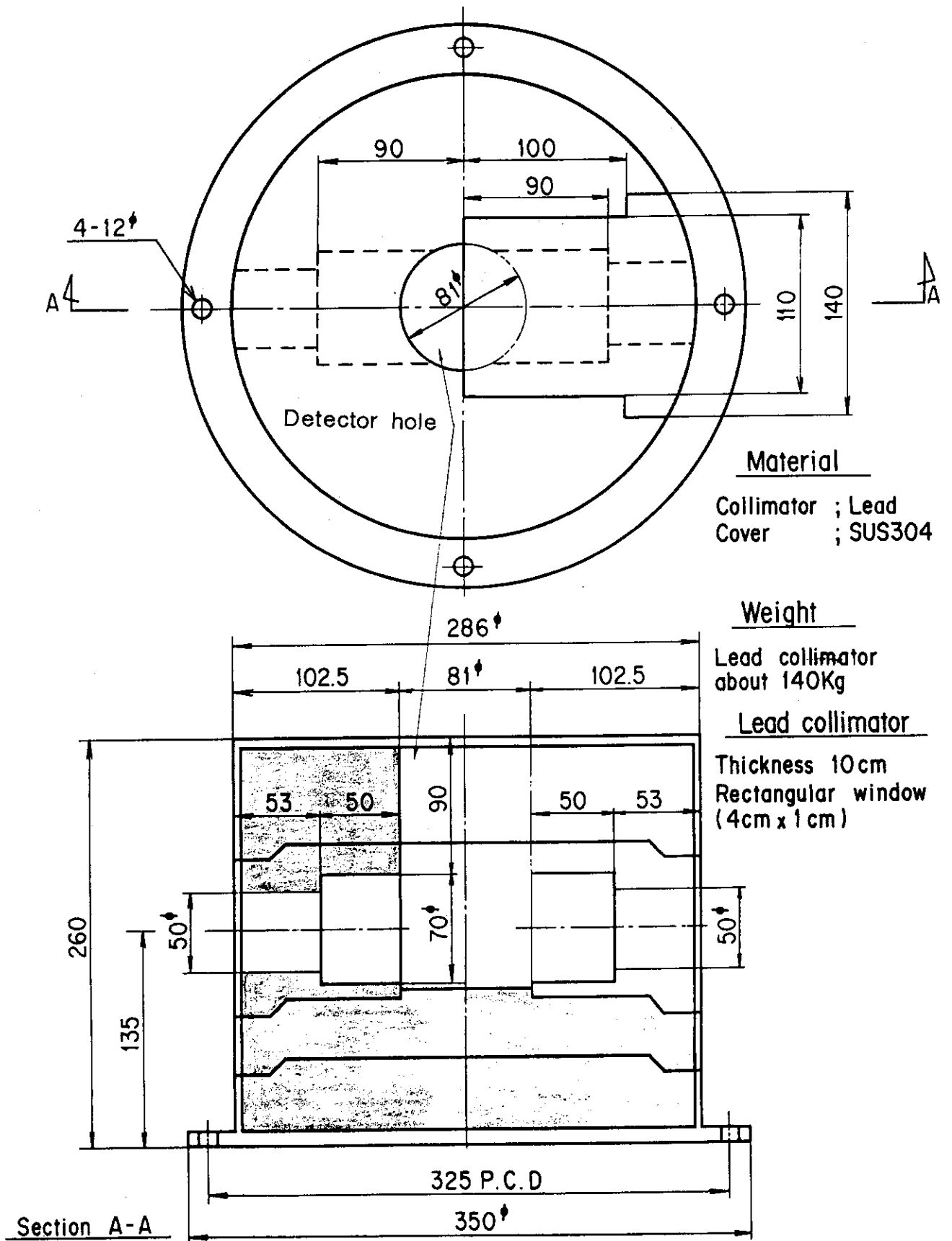


Fig. 2.1 Lead cylinder



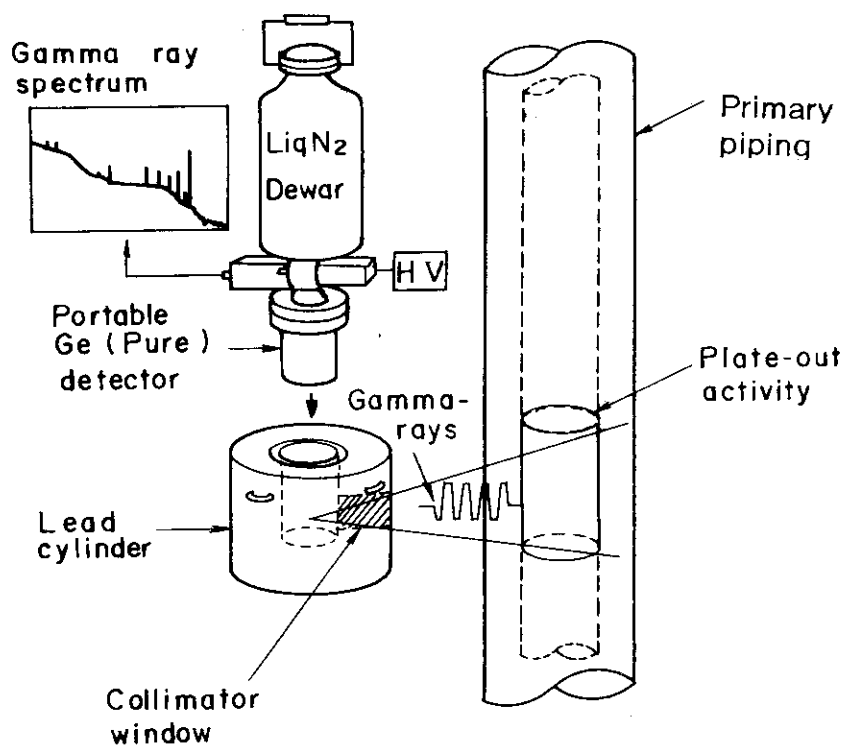


Fig. 2.2 In-situ Measurement of the Fission Product Plate-out in OGL-1

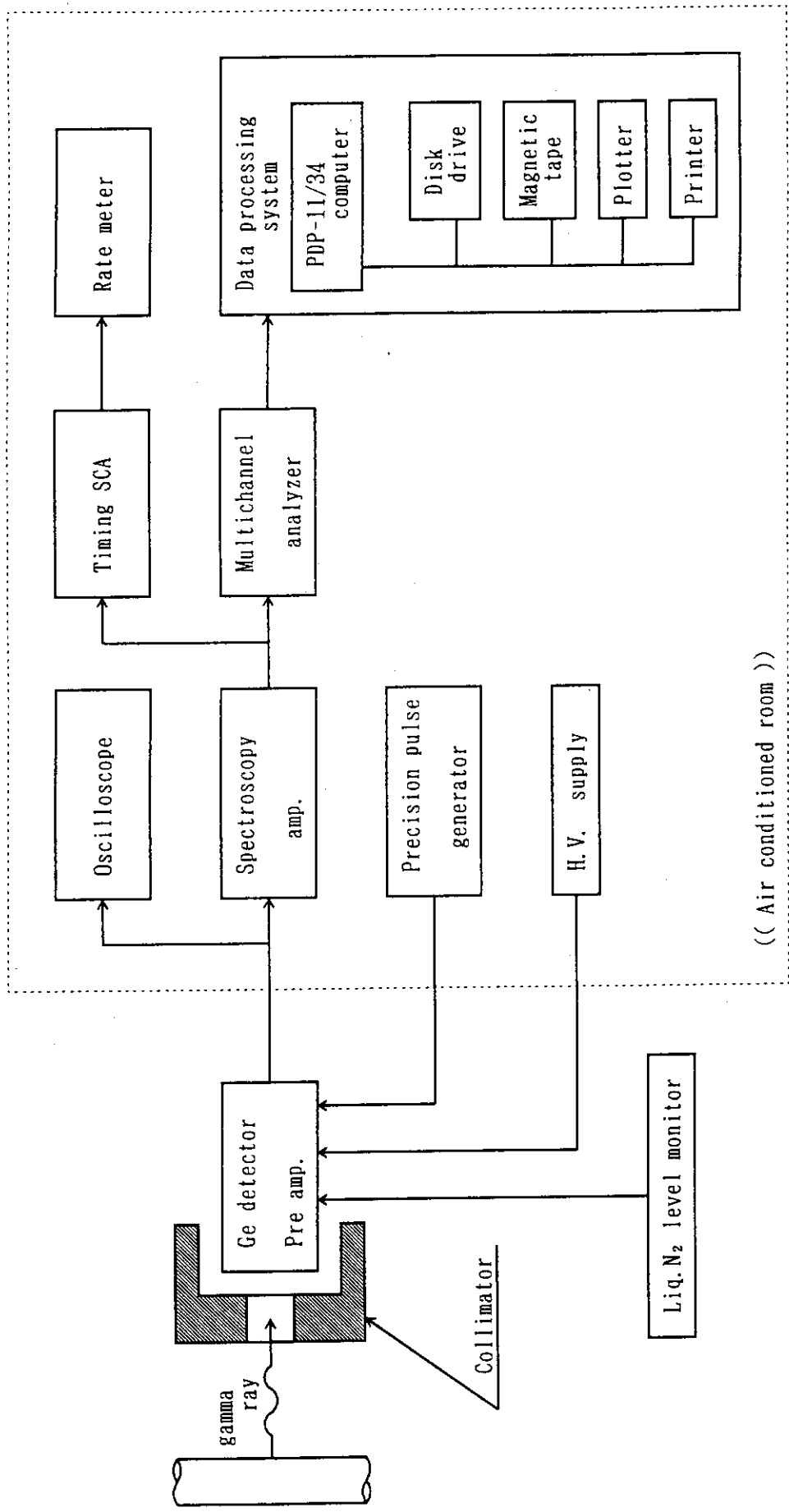


Fig. 2.3 OGL-1 FP plate-out measuring system

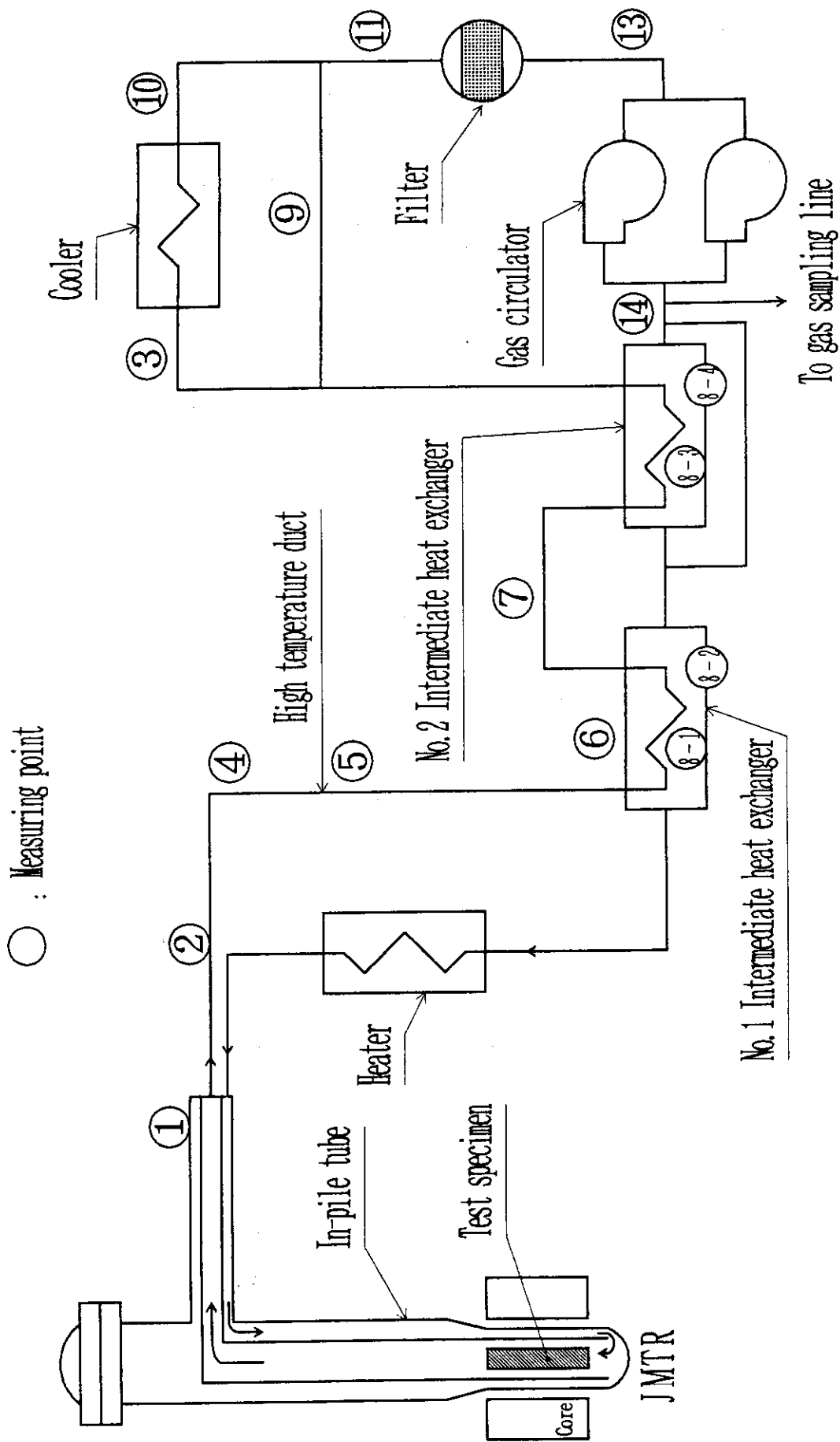


Fig. 2.4 Location of plate-out measuring points

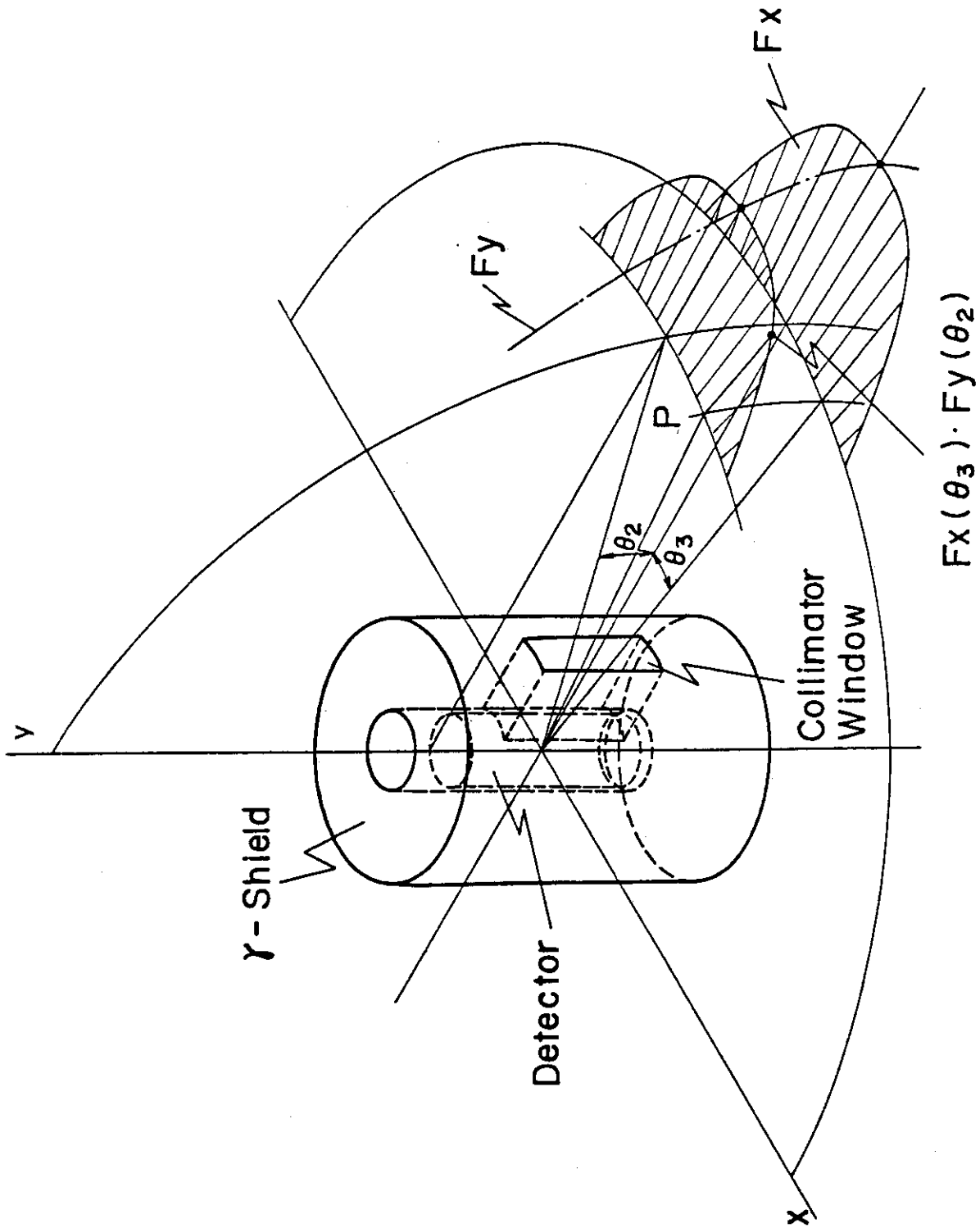


Fig. 3.1 Sensitivity calculation model of Ge-Detector with collimator

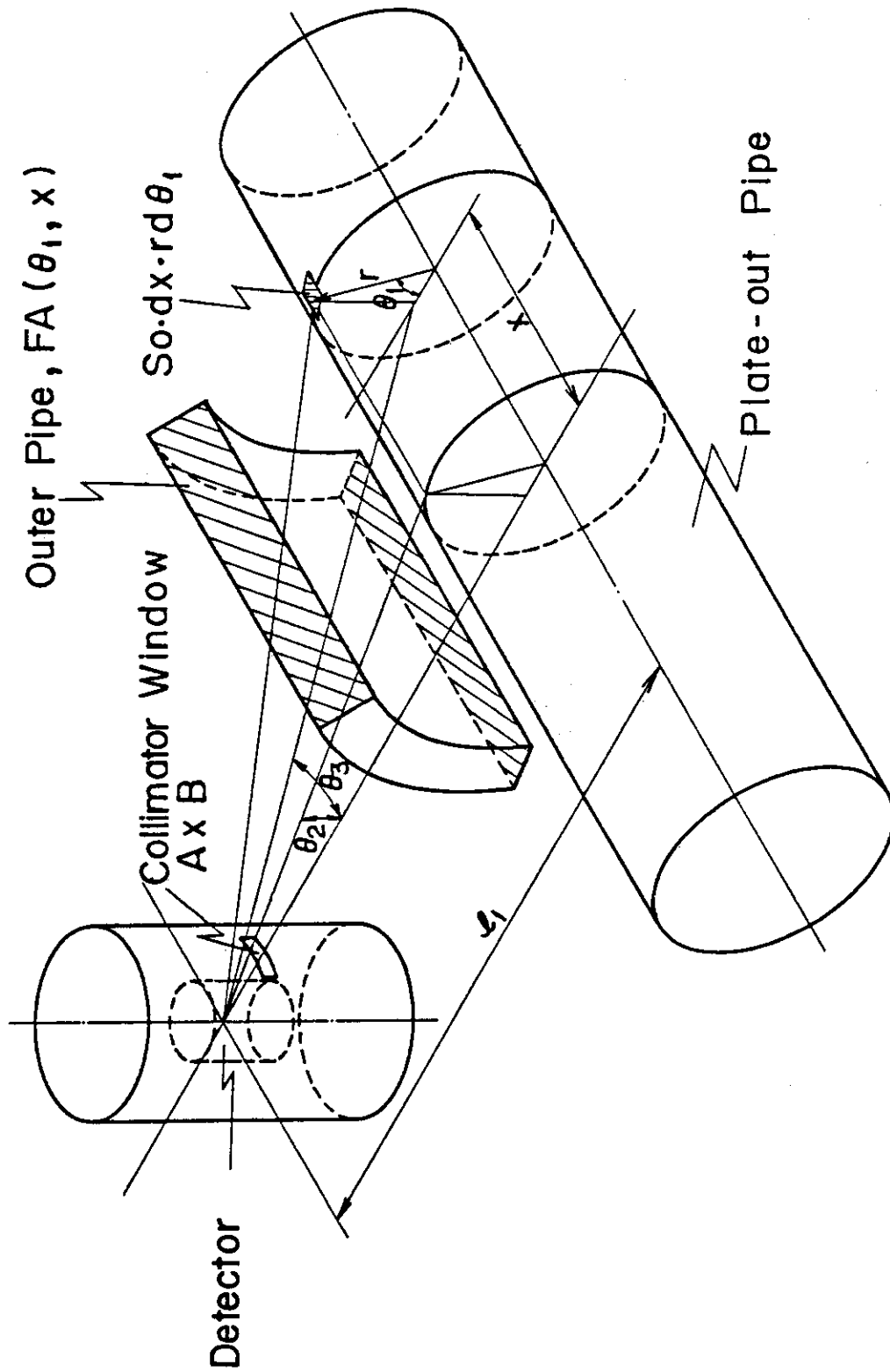


Fig. 3.2 Conversion Coefficient Calculation Model

### Approximated Outer Pipe and Thermal Insulator

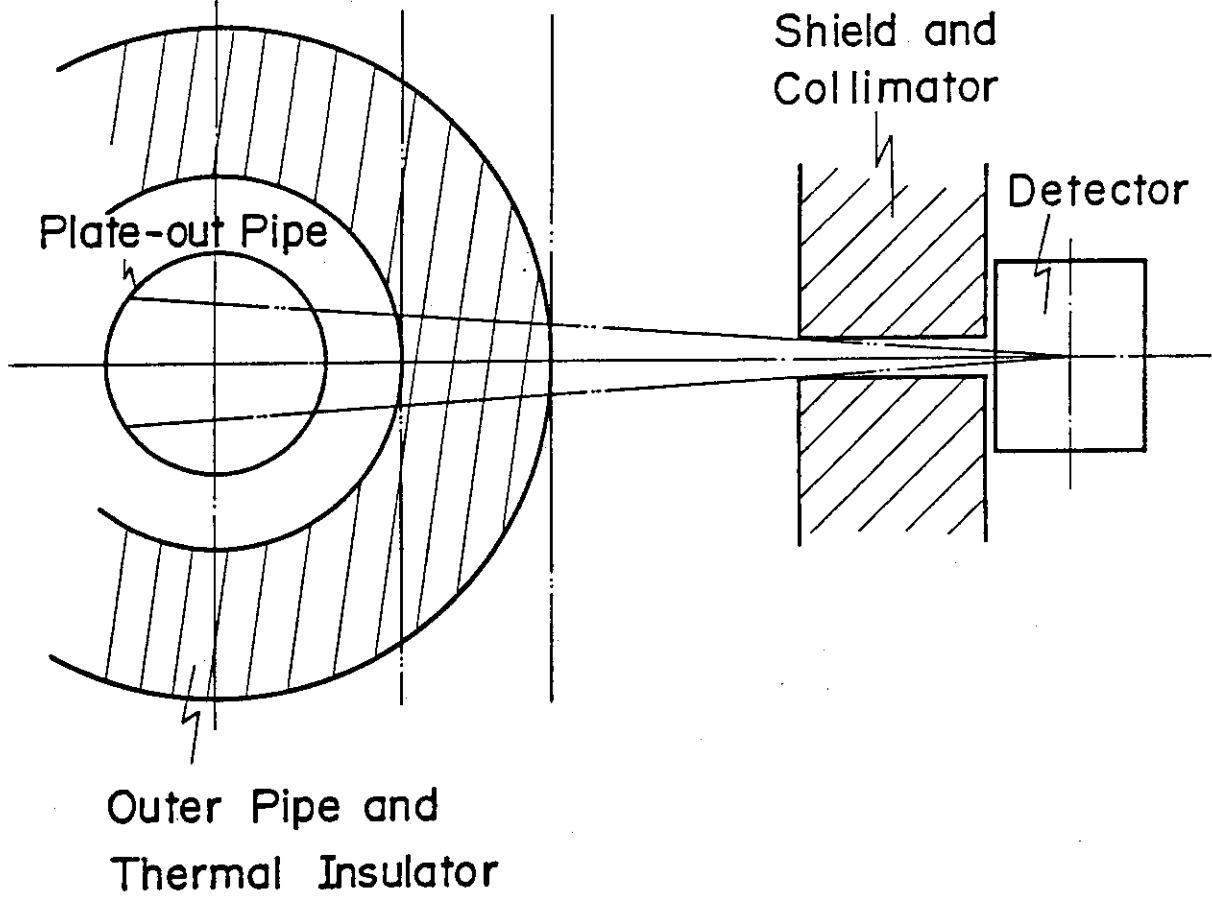


Fig. 3.3 Approximation model of outer pipe and thermal insulator

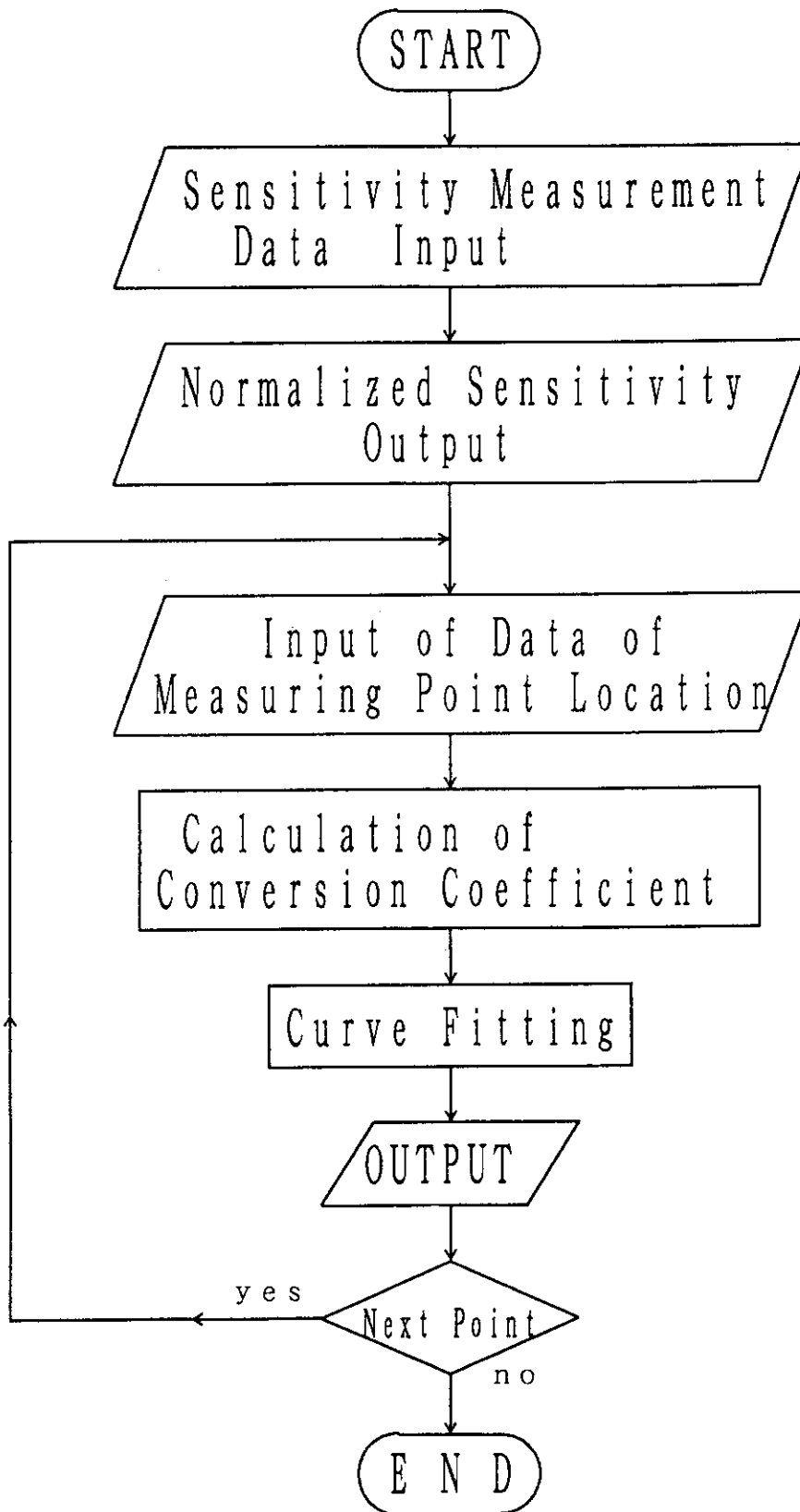


Fig. 3.4 Flow diagram of KKKP

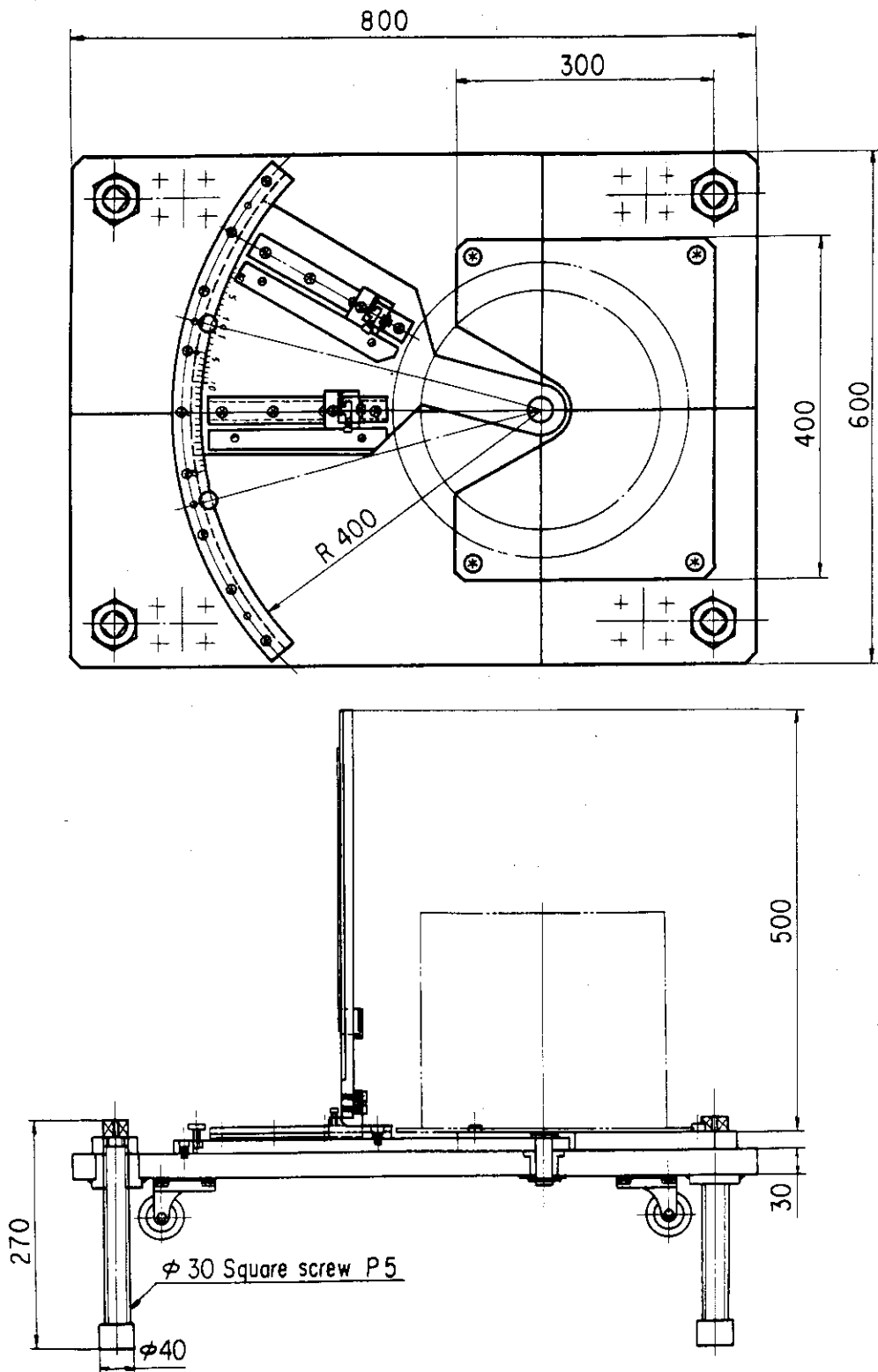


Fig. 3.5 Device for measurement of Ge detector sensitivity



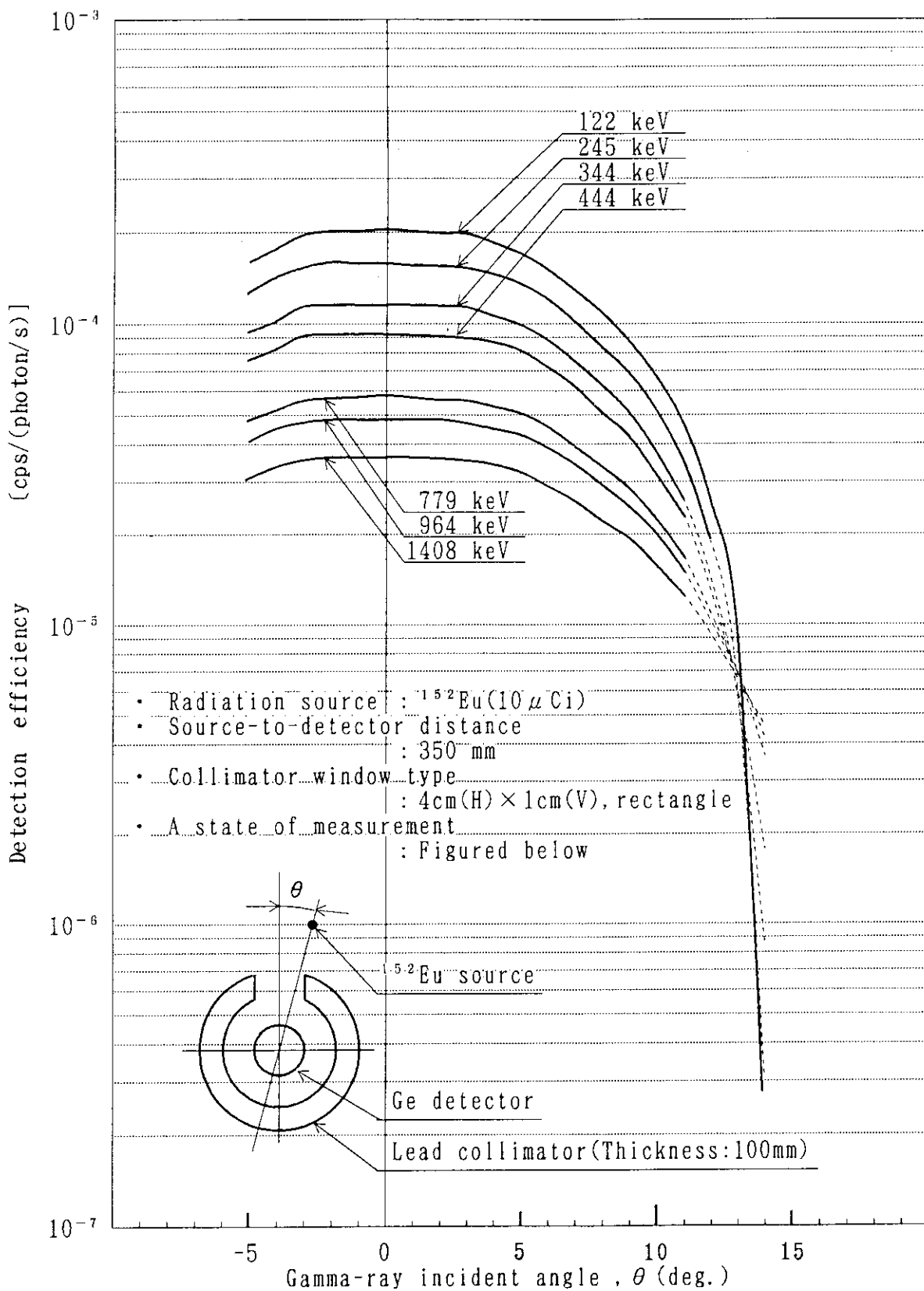


Fig. 4.1 Horizontal direction characteristics of a Ge detector with a horizontal lead collimator

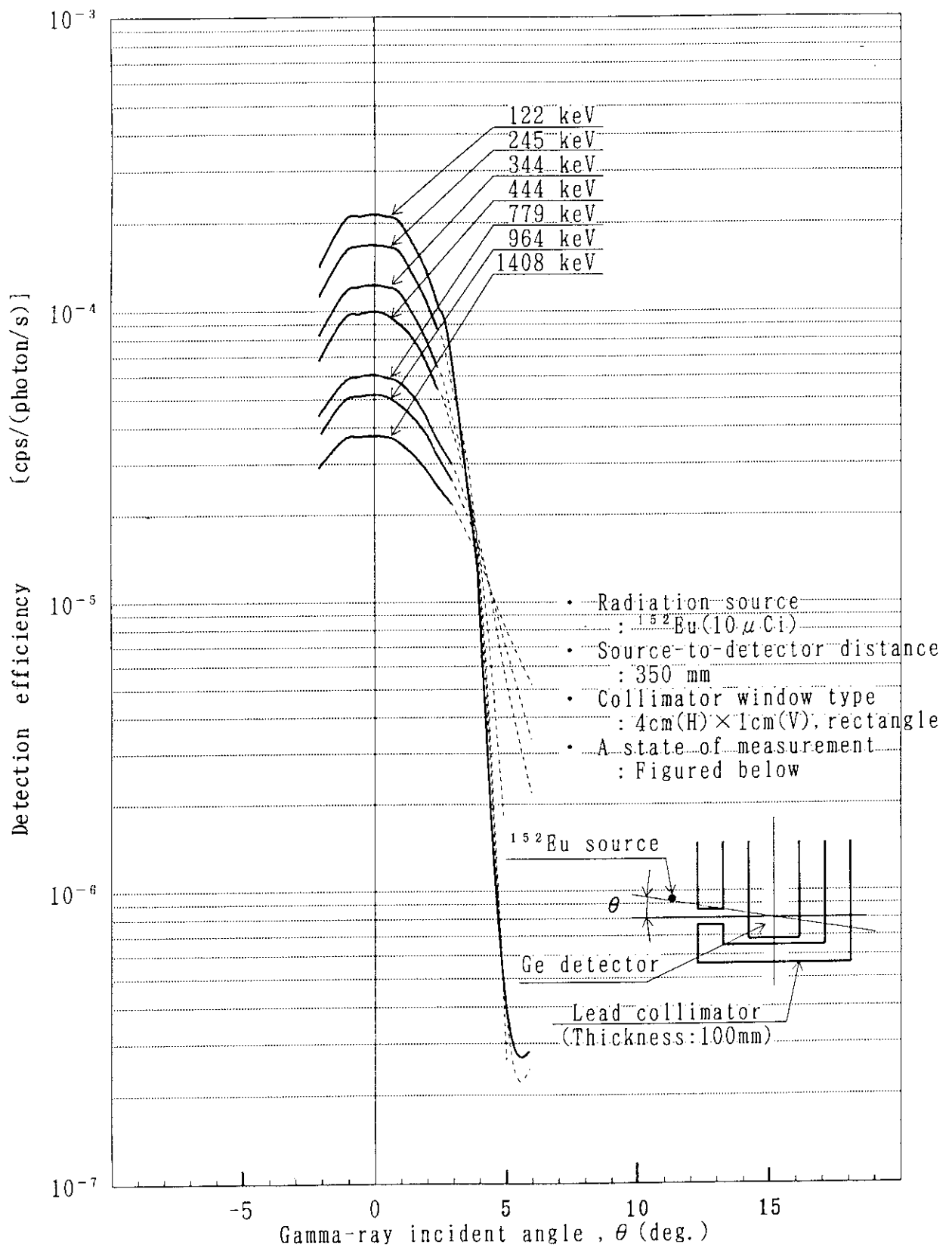


Fig. 4.2 Vertical direction characteristics of a Ge detector with a horizontal lead collimator

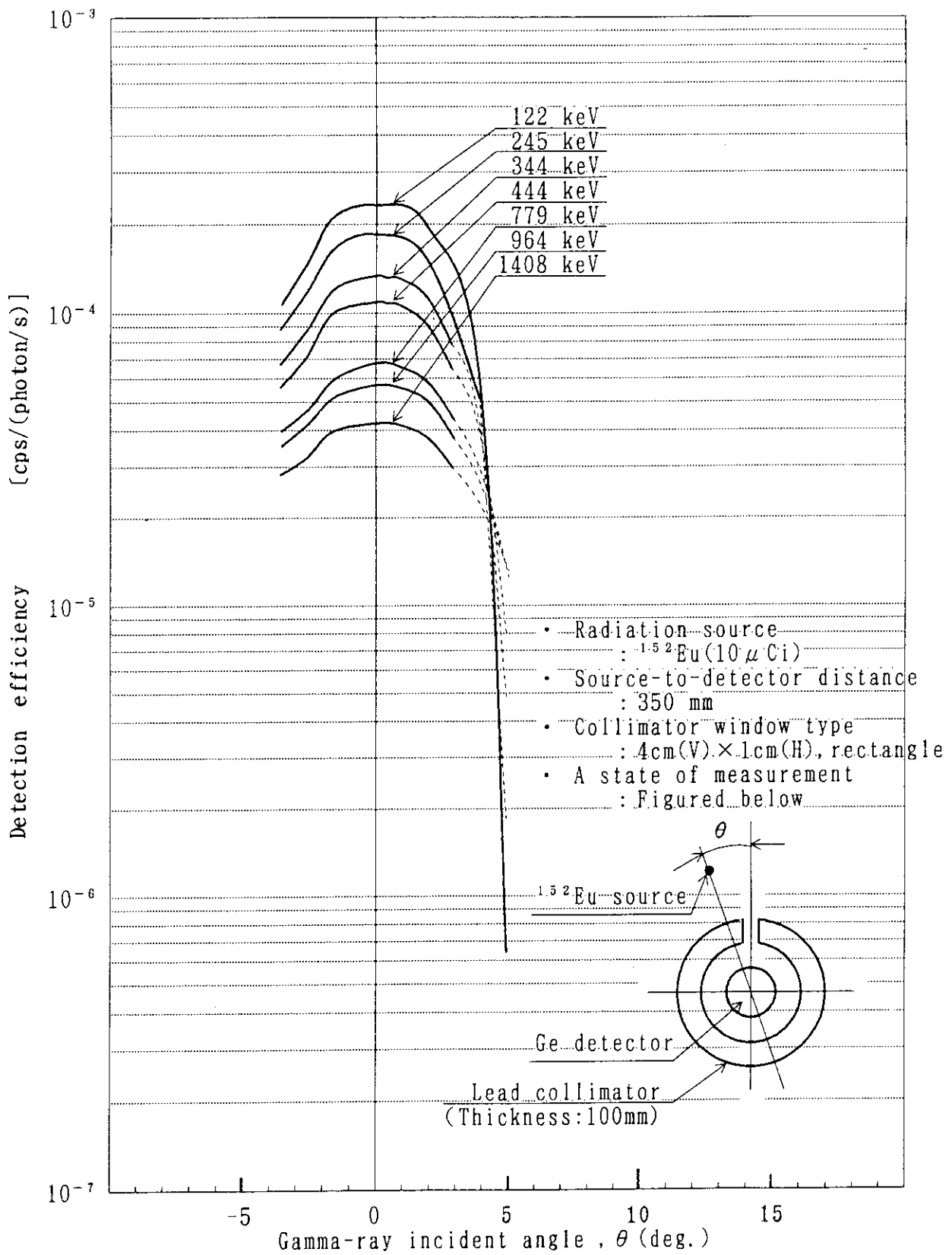


Fig. 4.3 Horizontal direction characteristics of a Ge detector with a vertical lead collimator

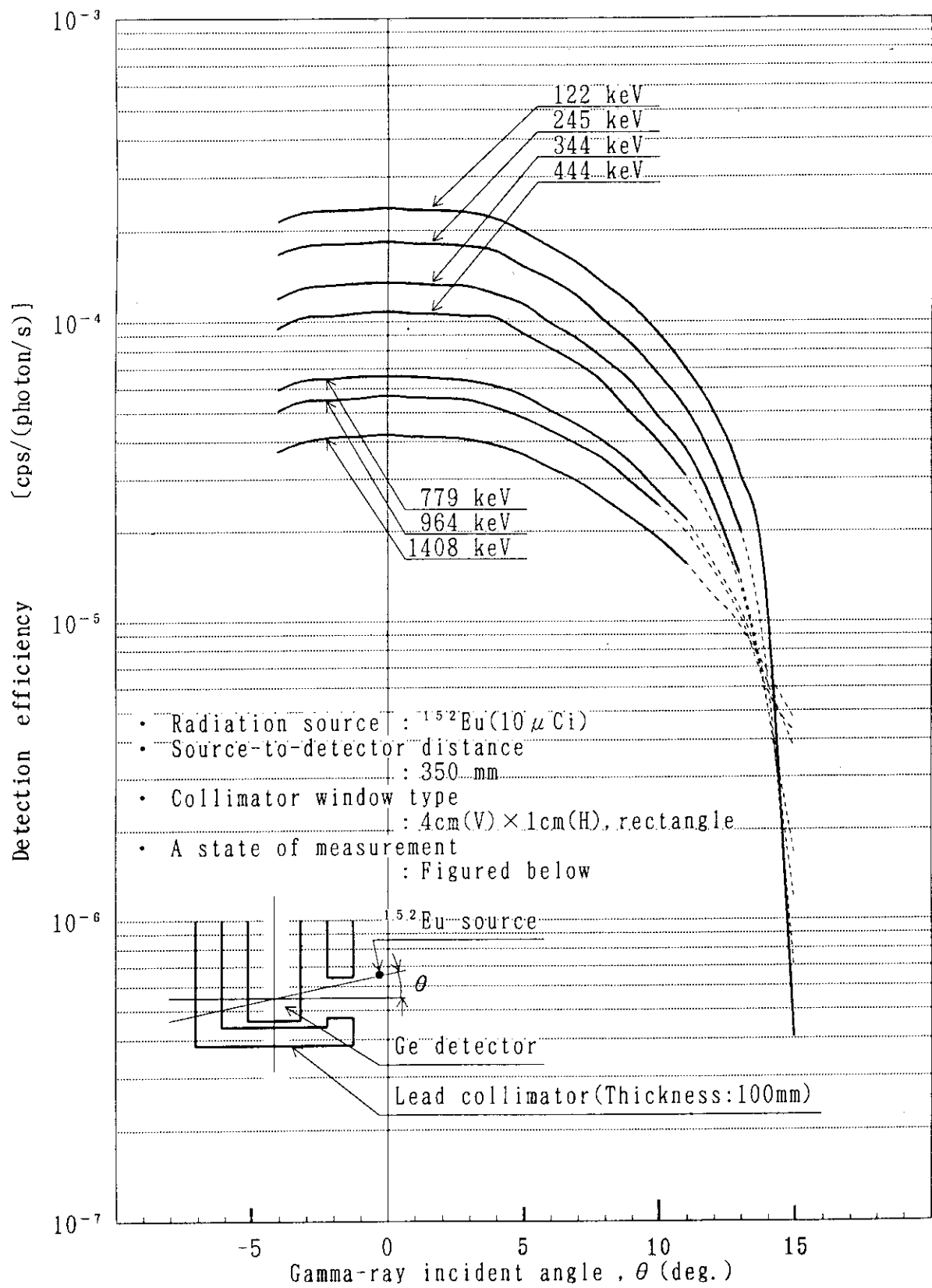


Fig. 4.4 Vertical direction characteristics of a Ge detector with a vertical lead collimator

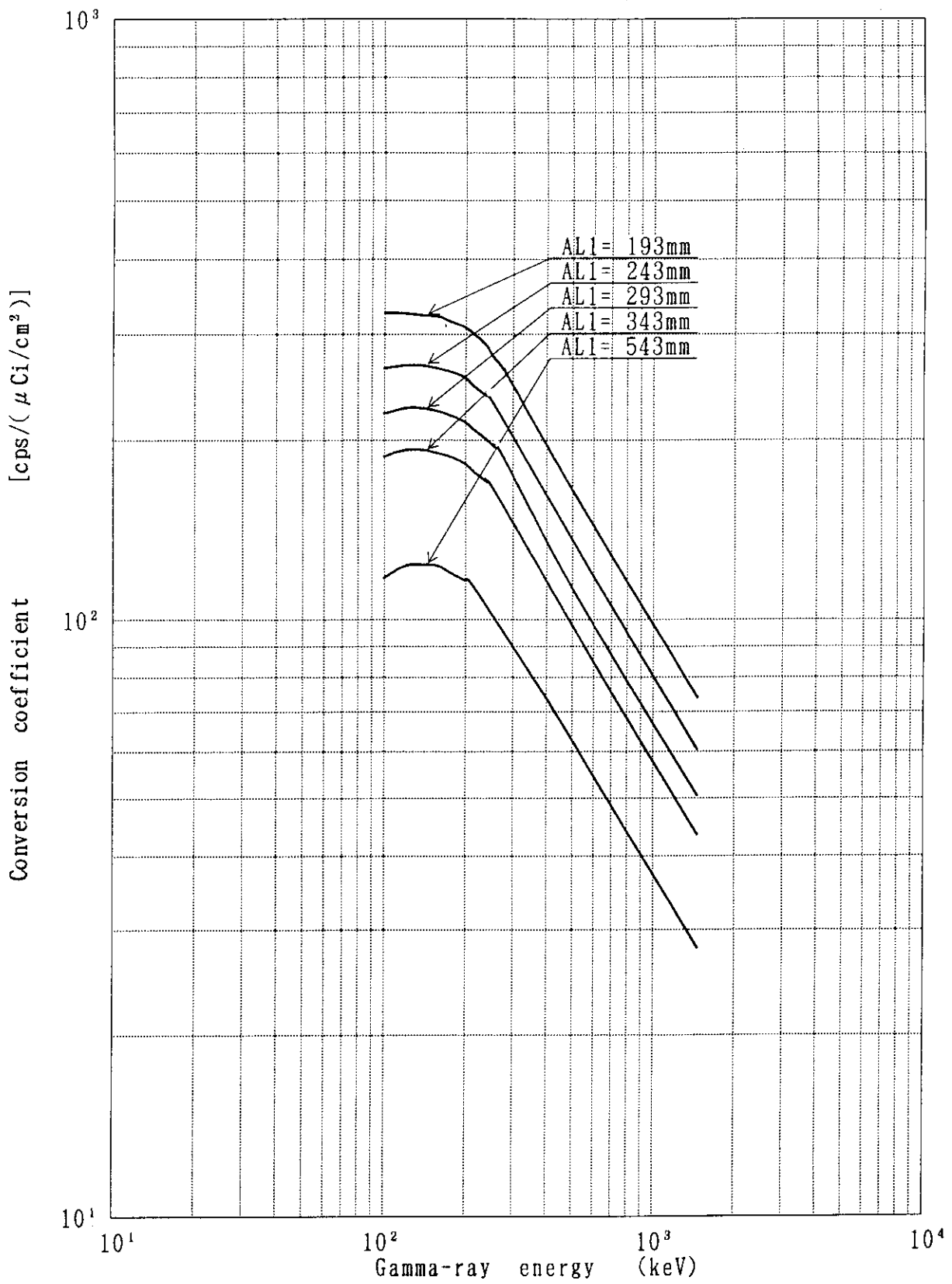


Fig. 4.5 Relationship between conversion coefficient of the plate-out activity and gamma-ray energy  
 (AL1: Interval between the radiation source and the detector)

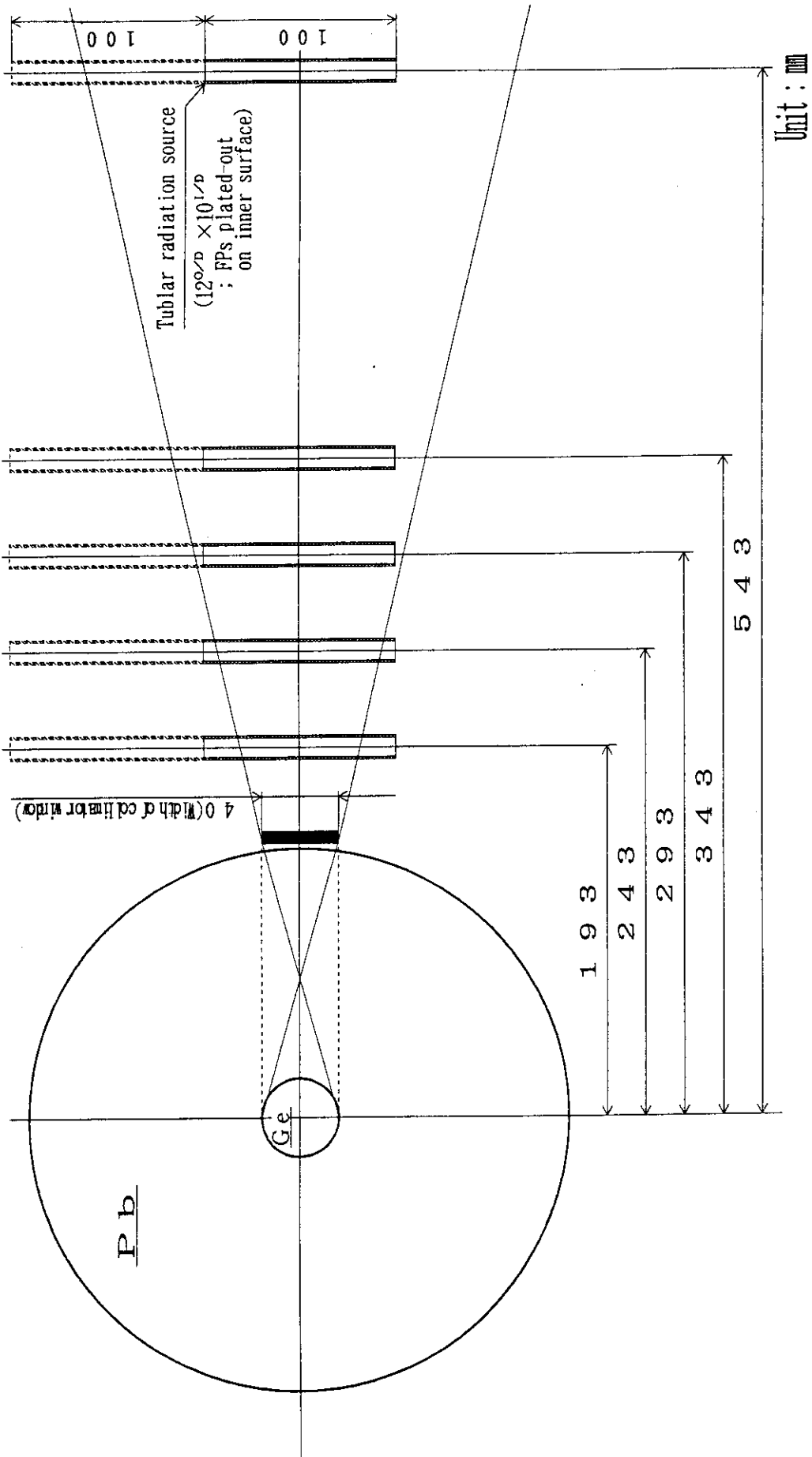


Fig. 5.1 The outline of tubular radiation source measurement