

JAERI-Tech  
97-006



放射線測定器の校正に用いる $\gamma$ 線場中の  
光子エネルギー分布評価

1997年3月

高橋史明・清水 滋・山口恭弘

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。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。

This report is issued irregularly.  
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

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

放射線測定器の校正に用いる $\gamma$ 線場中の光子エネルギー分布評価

日本原子力研究所東海研究所保健物理部

高橋 史明・清水 滋・山口 恭弘

(1997年1月27日受理)

放射線管理に用いられる $\gamma$ 線測定器は、線量値に関して国家標準とトレーサビリティが確保されている $\gamma$ 線校正場において指示校正が実施される。校正場には一次線と校正場周辺の構造物において発生した散乱線が混在するが、通常の校正作業下では散乱線は考慮されない。散乱線は、校正場のエネルギー分布に影響を与え、これによりエネルギー依存性のある測定器の指示値に影響を与える可能性がある。校正場における構造物の材質も、散乱線の割合及びエネルギー分布に影響を与える。また、検出器を置いた場所におけるエネルギー分布は、散乱線が発生した位置との幾何条件により変化する。このため、高精度な校正結果を保証するためには、使用される $\gamma$ 線場のエネルギー分布及びそれらが校正結果に与える影響を評価しておくことが不可欠である。

そこで、日本原子力研究所放射線標準施設棟内のいくつかの $\gamma$ 線校正場の光子エネルギー分布を、実測及びモンテカルロ計算により評価した。その結果、光子エネルギー分布はコリメータの使用により大きく変化することがわかった。他に、測定及び計算結果を解析した結果、散乱線の起源及び散乱線の一次線に対する割合が得られた。これらの結果は、当該校正場における散乱線の特性を明確にするとともに、実施される校正の品質を保証するものである。

Estimation of Photon Energy Distribution in Gamma Calibration Field

Fumiaki TAKAHASHI, Shigeru SHIMIZU and Yasuhiro YAMAGUCHI

Department of Health Physics  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 27, 1997)

Photon survey instruments used for radiation protection are usually calibrated at gamma radiation fields, which are traceable to the national standard with regard to exposure. Whereas scattered radiations as well as primary gamma-rays exit in the calibration field, no consideration for the effect of the scattered radiations on energy distribution is given in routine calibration works. The scattered radiations can change photon energy spectra in the field, and this can result in misinterpretations of energy-dependent instrument responses. Construction materials in the field affect the energy distribution and magnitude of the scattered radiations. The geometric relationship between a gamma source and an instrument can determine the energy distribution at the calibration point. Therefore, it is essential for the assurance of quality calibration to estimate the energy spectra at the gamma calibration fields.

Then, photon energy distributions at some fields in the Facility of Radiation Standard of the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) were estimated by measurements using a NaI(Tl) detector and Monte Carlo calculations. It was found that the use of collimator gives a different feature in photon energy distribution. The origin of scattered radiations and the ratio of the scattered radiations to the primary gamma-rays were obtained. The results can help to improve the calibration of photon survey instruments in the JAERI.

Keywords: Calibration Field, Photon Energy Distribution, NaI(Tl) Detector, Unfolding, Monte Carlo Calculation, EGS4

## 目 次

1. 序論	1
2. 評価方法	1
2.1 測定方法	1
2.2 計算方法	2
3. 評価結果	3
3.1 測定結果	3
3.2 計算結果	4
4. 散乱線の解析及び考察	4
4.1 測定による散乱線の光子エネルギー分布評価	4
4.2 計算による散乱線の光子エネルギー分布評価	6
4.3 各散乱線成分の特性	7
4.4 周辺線量当量率の算出	7
5. 結論	8
謝 辞	9
参考文献	10

## Contents

1. Introduction	1
2. Methods	1
2.1 Measurement	1
2.2 Calculation	2
3. Results	3
3.1 Measured Results	3
3.2 Calculated Results	4
4. Analysis of Scattered Radiations and Discussion	4
4.1 Estimation of Photon Energy Distributions Based on Measurement	4
4.2 Estimation of Photon Energy Distributions Based on Calculation	6
4.3 Characteristics of Scattered Radiations	7
4.4 Calculation of Ambient Dose Equivalent Rate	7
5. Conclusion	8
Acknowledgements	9
References	10

## 表リスト

- Table 1 コリメータ及び遮へい体の組み合わせによる照射方式, 及び波高分布に含まれる $\gamma$ 線成分
- Table 2  $^{137}\text{Cs}$ 線源及び $^{60}\text{Co}$ 線源の計算に使用したエネルギー幅
- Table 3 第1照射室内の2つの照射方式における各散乱線成分の全体に対する照射線量単位での割合(測定結果)
- Table 4 第3照射室内の2つの照射方式における各散乱線成分の全体に対する照射線量単位での割合(測定結果)
- Table 5 各散乱線成分の全体に対する照射線量単位での割合(計算結果)
- Table 6 第1照射室の周辺線量当量率,  $H^*(10)$ (測定結果)
- Table 7 第3照射室の周辺線量当量率,  $H^*(10)$ (測定結果)
- Table 8 第1照射室の周辺線量当量率,  $H^*(10)$ (計算結果)
- Table 9 第3照射室の周辺線量当量率,  $H^*(10)$ (計算結果)

## 図リスト

- Fig. 1 コリメートビームを用いた照射の概観図
- Fig. 2 自由空間中の線源を用いた $4\pi$ 等方照射方式の概観図
- Fig. 3 2つの照射方式による $^{137}\text{Cs}$ 線源の第1照射室内のエネルギースペクトル分布。線源-検出器間距離2.0m。(測定結果)
- Fig. 4 コリメートビーム照射方式による $^{60}\text{Co}$ 線源のエネルギースペクトル分布(測定結果)
- Fig. 5  $4\pi$ 等方照射方式による $^{60}\text{Co}$ 線源のエネルギースペクトル分布(測定結果)
- Fig. 6 2つの照射方式による $^{137}\text{Cs}$ 線源の第1照射室内の照射線量単位エネルギースペクトル分布。線源-検出器間距離2.0m。(測定結果)
- Fig. 7 コリメートビーム照射方式による $^{60}\text{Co}$ 線源の照射線量単位エネルギースペクトル分布(測定結果)
- Fig. 8  $4\pi$ 等方照射方式による $^{60}\text{Co}$ 線源の照射線量単位エネルギースペクトル分布(測定結果)
- Fig. 9 コリメートビーム照射方式による $^{137}\text{Cs}$ 線源の第1照射室内の照射線量単位エネルギースペクトル分布。線源-検出器間距離2.0m。
- Fig. 10  $4\pi$ 等方照射方式による $^{137}\text{Cs}$ 線源の第1照射室内の照射線量単位エネルギースペクトル分布。線源-検出器間距離2.0m。
- Fig. 11 2つの照射方式による $^{137}\text{Cs}$ 線源の第1照射室内のエネルギースペクトル分布。線源-検出器間距離2.0m。(計算結果)
- Fig. 12 コリメートビーム照射方式による $^{60}\text{Co}$ 線源のエネルギースペクトル分布(計算結果)
- Fig. 13  $4\pi$ 等方照射方式による $^{60}\text{Co}$ 線源のエネルギースペクトル分布(計算結果)
- Fig. 14 2つの照射方式による $^{137}\text{Cs}$ 線源の第1照射室内の照射線量単位エネルギースペクトル分布。線源-検出器間距離2.0m。(計算結果)
- Fig. 15 コリメートビーム照射方式による $^{60}\text{Co}$ 線源の照射線量単位エネルギースペクトル分布(計算結果)
- Fig. 16  $4\pi$ 等方照射方式による $^{60}\text{Co}$ 線源の照射線量単位エネルギースペクトル分布(計算結果)
- Fig. 17 第1照射室内の $^{137}\text{Cs}$ 線源の散乱線エネルギースペクトル分布。線源-検出器間距離2.0m。(測定結果)
- Fig. 18 第1照射室内の $^{60}\text{Co}$ 線源の散乱線エネルギースペクトル分布。線源-検出器間距離2.0m。(測定結果)
- Fig. 19 第1照射室内の $^{137}\text{Cs}$ 線源の散乱線の照射線量単位エネルギースペクトル分布。線源-検出器間距離2.0m。(測定結果)
- Fig. 20 第1照射室内の $^{60}\text{Co}$ 線源の散乱線の照射線量単位エネルギースペクトル分布。線源-検出器間距離2.0m。(測定結果)
- Fig. 21  $^{60}\text{Co}$ 線源のコリメータ散乱線エネルギースペクトル分布(測定結果)
- Fig. 22  $^{60}\text{Co}$ 線源の室内散乱線エネルギースペクトル分布(測定結果)

- Fig. 23  $^{60}\text{Co}$ 線源のコリメータ散乱線の照射線量単位エネルギースペクトル分布 (測定結果)
- Fig. 24  $^{60}\text{Co}$ 線源の室内散乱線の照射線量単位エネルギースペクトル分布 (測定結果)
- Fig. 25 第1照射室内の  $^{137}\text{Cs}$ 線源のコリメータ散乱線エネルギースペクトル分布。線源-検出器間距離2.0m。
- Fig. 26 第1照射室内の  $^{137}\text{Cs}$ 線源の室内散乱線エネルギースペクトル分布。線源-検出器間距離2.0m。
- Fig. 27 第1照射室内の  $^{137}\text{Cs}$ 線源のコリメータ散乱線の照射線量単位エネルギースペクトル分布。線源-検出器間距離2.0m。
- Fig. 28 第1照射室内の  $^{137}\text{Cs}$ 線源の室内散乱線の照射線量単位エネルギースペクトル分布。線源-検出器間距離2.0m。
- Fig. 29 第1照射室内の  $^{137}\text{Cs}$ 線源の散乱線エネルギースペクトル分布。線源-検出器間距離2.0m。(計算結果)
- Fig. 30 第1照射室内の  $^{60}\text{Co}$ 線源の散乱線エネルギースペクトル分布。線源-検出器間距離2.0m。(計算結果)
- Fig. 31 第1照射室内の  $^{137}\text{Cs}$ 線源の散乱線の照射線量単位エネルギースペクトル分布。線源-検出器間距離2.0m。(計算結果)
- Fig. 32 第1照射室内の  $^{60}\text{Co}$ 線源の散乱線の照射線量単位エネルギースペクトル分布。線源-検出器間距離2.0m。(計算結果)
- Fig. 33  $^{60}\text{Co}$ 線源のコリメータ散乱線エネルギースペクトル分布 (計算結果)
- Fig. 34  $^{60}\text{Co}$ 線源の  $4\pi$ 等方照射による室内散乱線エネルギースペクトル分布 (計算結果)
- Fig. 35  $^{60}\text{Co}$ 線源のコリメータ散乱線の照射線量単位エネルギースペクトル分布 (計算結果)
- Fig. 36  $^{60}\text{Co}$ 線源の  $4\pi$ 等方照射による室内散乱線の照射線量単位エネルギースペクトル分布 (計算結果)
- Fig. 37 コリメータ散乱線の全放射線成分に対する照射線量単位での割合
- Fig. 38 第3照射室内の  $^{137}\text{Cs}$ 線源の  $4\pi$ 等方照射による室内散乱線エネルギースペクトル分布 (計算結果)
- Fig. 39 第3照射室内の  $^{137}\text{Cs}$ 線源の  $4\pi$ 等方照射による室内散乱線の照射線量単位エネルギースペクトル分布 (計算結果)



## 1. 序論

放射線モニタリングに使用される $\gamma$ 線測定器は、線量(率)が既知な $\gamma$ 線又はX線の場合(校正場)において校正及び特性試験が実施される。通常の校正作業においては、 $\gamma$ 線校正場の光子エネルギー分布は線源から放出される一次 $\gamma$ 線のエネルギーのみを考慮した単一なものとして扱われる。しかし、線源より放出された $\gamma$ 線は、線源カプセル、コリメータ、校正室の床や壁、及び測定器を設置する校正台車によって散乱される。このため、実際の校正場においては一次線のほかに散乱線が混在し、各校正場は固有の光子エネルギー分布を持つことになる<sup>1)</sup>。これら $\gamma$ 線の散乱形態は校正室の広さ、線源-検出器間距離、 $\gamma$ 線源及びコリメータの形状や材質に依存する。

一般的に、 $\gamma$ 線測定器のレスポンスにはエネルギー依存性がある。また、照射線量単位から現在外部被ばくモニタリングに使用される各種線量当量単位への換算関係はエネルギーにより変化する。このため、より高精度な $\gamma$ 線測定器の校正作業を行おうとすると、校正場の光子エネルギー分布の情報が必要となる。

本報告においては、日本原子力研究所(原研)の放射線標準施設棟内のいくつかの $\gamma$ 線校正場の光子エネルギー分布をNaI(Tl)シンチレーション検出器を用いて測定した結果について述べる。散乱線に関しては、その発生源により分類を行い、各散乱線成分についてその光子エネルギー分布を評価した。校正作業において重要となる照射線量率単位についての光子エネルギー分布を評価した。また、実測の他に散乱線の特徴をより明確にするために、モンテカルロ計算シミュレーションを実行した。

## 2. 評価方法

### 2.1 測定方法

原研放射線標準施設棟内にある第1照射室(5.5m(縦)×6.5m(横)×4m(高さ))及び第3照射室(12m(縦)×6.5m(横)×6m(高さ))内の各校正場において、光子エネルギー分布の測定を実施した。これらの校正場は、国家標準(電子技術総合研究所所管)とのトレーサビリティが確保されている。

測定条件は、通常の校正作業条件を考慮して決定した。測定器として、直径が3インチの球形のNaI(Tl)シンチレーション検出器を使用した。測定に使用した $\gamma$ 線源は、第1照射室については<sup>137</sup>Cs線源(強度111GBq, 3mCi)及び<sup>60</sup>Co線源(37GBq, 1mCi)、第3照射室については<sup>60</sup>Co線源(37GBq, 1mCi)のみとした。これらの $\gamma$ 線源は、床から1.2mの高さの位置に設置した。線源から検出器中心までの距離は、第1照射室においては1.5m及び2.0mとし、第3照射室においては1.5m, 2.0m, 2.5m及び3.0mとした。Fig. 1に示すように、 $\gamma$ 線源を鉛製のコリメータを有する照射装置に設置して、コリメートビーム照射を実施した。この他に、Fig. 2に示すように、室内の自由空間中に $\gamma$ 線源を設置して、4 $\pi$ 等方照射を実施した。また、一次線を遮へいするため、線源と検出器の中間点に鉛製のシャドウコーンを置いた。これにより、Table 1に

## 1. 序論

放射線モニタリングに使用される $\gamma$ 線測定器は、線量(率)が既知な $\gamma$ 線又はX線の場合(校正場)において校正及び特性試験が実施される。通常の校正作業においては、 $\gamma$ 線校正場の光子エネルギー分布は線源から放出される一次 $\gamma$ 線のエネルギーのみを考慮した単一なものとして扱われる。しかし、線源より放出された $\gamma$ 線は、線源カプセル、コリメータ、校正室の床や壁、及び測定器を設置する校正台車によって散乱される。このため、実際の校正場においては一次線のほかに散乱線が混在し、各校正場は固有の光子エネルギー分布を持つことになる<sup>1)</sup>。これら $\gamma$ 線の散乱形態は校正室の広さ、線源-検出器間距離、 $\gamma$ 線源及びコリメータの形状や材質に依存する。

一般的に、 $\gamma$ 線測定器のレスポンスにはエネルギー依存性がある。また、照射線量単位から現在外部被ばくモニタリングに使用される各種線量当量単位への換算関係はエネルギーにより変化する。このため、より高精度な $\gamma$ 線測定器の校正作業を行おうとすると、校正場の光子エネルギー分布の情報が必要となる。

本報告においては、日本原子力研究所(原研)の放射線標準施設棟内のいくつかの $\gamma$ 線校正場の光子エネルギー分布をNaI(Tl)シンチレーション検出器を用いて測定した結果について述べる。散乱線に関しては、その発生源により分類を行い、各散乱線成分についてその光子エネルギー分布を評価した。校正作業において重要となる照射線量率単位についての光子エネルギー分布を評価した。また、実測の他に散乱線の特徴をより明確にするために、モンテカルロ計算シミュレーションを実行した。

## 2. 評価方法

### 2.1 測定方法

原研放射線標準施設棟内にある第1照射室(5.5m(縦)×6.5m(横)×4m(高さ))及び第3照射室(12m(縦)×6.5m(横)×6m(高さ))内の各校正場において、光子エネルギー分布の測定を実施した。これらの校正場は、国家標準(電子技術総合研究所所管)とのトレーサビリティが確保されている。

測定条件は、通常の校正作業条件を考慮して決定した。測定器として、直径が3インチの球形のNaI(Tl)シンチレーション検出器を使用した。測定に使用した $\gamma$ 線源は、第1照射室については<sup>137</sup>Cs線源(強度111GBq, 3mCi)及び<sup>60</sup>Co線源(37GBq, 1mCi)、第3照射室については<sup>60</sup>Co線源(37GBq, 1mCi)のみとした。これらの $\gamma$ 線源は、床から1.2mの高さの位置に設置した。線源から検出器中心までの距離は、第1照射室においては1.5m及び2.0mとし、第3照射室においては1.5m, 2.0m, 2.5m及び3.0mとした。Fig. 1に示すように、 $\gamma$ 線源を鉛製のコリメータを有する照射装置に設置して、コリメートビーム照射を実施した。この他に、Fig. 2に示すように、室内の自由空間中に $\gamma$ 線源を設置して、4 $\pi$ 等方照射を実施した。また、一次線を遮へいするため、線源と検出器の中間点に鉛製のシャドウコーンを置いた。これにより、Table 1に

示すようにコリメータ及びシャドウコーンの組み合わせにより以下の4つの条件下で測定を実施した。

- a) コリメータ使用, シャドウコーン未使用 (以下, コリメートビーム照射方式)
- b) コリメータ未使用, シャドウコーン未使用 (以下,  $4\pi$  等方照射方式)
- c) コリメータ使用, シャドウコーン使用
- d) コリメータ未使用, シャドウコーン使用

測定後は, アンフォールディングを行い<sup>3)</sup>, 光子エネルギー分布を評価した。また, 校正作業の上で重要となる照射線量率単位での光子エネルギー分布を評価した。

## 2.2 計算方法

前節に述べた測定に関して, 光子エネルギー分布を評価するためのモンテカルロ計算シミュレーションを実施した。計算シミュレーションには, EGS4コード<sup>3)</sup> (Electron Gamma Shower Code Version 4)汎用ユーザズ版<sup>4)</sup>を用いた。EGS4コードは, 様々な物質内の電磁カスケードをシミュレーションする3次元モンテカルロコードであり, 以下の機能及び特徴がある<sup>3), 5)</sup>。

- (1) 電子, 陽電子及び光子の輸送を原子番号が1から100の元素, 化合物及び混合物についてシミュレーションできる。
- (2) 適用エネルギー範囲は, 荷電粒子が運動エネルギー数10keV~数TeV, 光子が1keV~数TeVである。
- (3) ユーザーの設定により, 結果を任意の物理量で評価することができる。
- (4) 以下の9つの物理現象が, 取り扱われている。
  - (i) 制動放射線生成, (ii) 陽電子消滅, (iii) Moliere多重散乱, (iv) Moller散乱及びBhabha散乱, (v) 荷電粒子の飛程に沿った連続エネルギー損失, (vi) 電子対生成, (vii) Compton散乱, (viii) Rayleigh散乱, (ix) 光電効果

EGS4コード汎用ユーザズ版においては, 他にCG (Combinatorial Geometry)<sup>6), 7)</sup>の使用により, 容易に3次元の形状定義ができる機能がある<sup>4)</sup>。そこで, 照射室の構造, 室内の照射装置, 校正台車及び線源カプセルに関して可能な限り測定条件に近似させたモデルを作成し, モンテカルロ計算を実行した。この他, 照射室の構造及び照射装置のみを考慮した簡易モデルにおいても計算を実行した。

$\gamma$ 線源として, 測定と同様に<sup>137</sup>Cs線源(662keV)及び<sup>60</sup>Co線源(1173keV及び1333keV)を考慮した。その強度は, 測定に使用したものと同様とした。 $\gamma$ 線源の形状は近似体系では体積線源を仮定した。簡易体系においては点線源を仮定し,  $\gamma$ 線は一点から等方的に発生するものとした。測定と同様に, 線源を照射装置に設置した条件 (Fig. 1) 及び室内の空間中に設置した条件 (Fig. 2) で計算を実行した。また, シャドウコーンを設置した条件についての計算も実行した。

本計算においては, 光子のカットオフエネルギーを10keVとし, カットオフエネルギーに達するか体系の外に逃れるまで光子の追跡を行った。光子のエネルギー分布の評価を目的として計算を実行したこと, また計算時間が長くなる等の理由より, 電子の追跡は行わなかった。光子の断

面積データは、Photox<sup>8)</sup> データベースの Hubbellのデータを用いた。

光子エネルギー分布を評価する際に、下記の飛跡長評価法<sup>4)</sup>を用いて粒子線束を計算した。

$$\phi_{kg} = \frac{1}{N} \sum_i \sum_j x(E_{gmin} < E_{ij} < E_{gmax}) \cdot x(r_{ij} \in V_k) \cdot l_{jk} / vol_k$$

ここで、

N : ヒストリー数

g : 沈着エネルギー群

i : ヒストリー

j : ヒストリー i 中での粒子の衝突

x(f) = 0 fが偽の時

x(f) = 1 fが真の時

$\phi_{kg}$  : k番目の検出器でのエネルギー群 g での粒子線束。

$E_{min}$  : 沈着エネルギー群の下限エネルギー

$E_{max}$  : 沈着エネルギー群の上限エネルギー

$V_k$  : k番目の検出器領域。

$r_{ij}$  : ヒストリー i 中の j 回目の衝突の起こった位置。

$l_{jk}$  : j 回目の衝突から次の衝突までの粒子の飛行距離。ただし、次の衝突が k 番目の検出器領域外の場合は、領域境界までの距離。

$vol_k$  : k 番目の検出器領域の体積

である。

なお、測定と同様に 50keV 及び各  $\gamma$  線源に関して一次線エネルギーとそれ以外の散乱線エネルギーを分離するために Table 2 に示すエネルギー幅で光子エネルギー分布を評価した。

### 3. 評価結果

#### 3.1 測定結果

##### 3.1.1 エネルギースペクトル分布

第1照射室内の線源から2.0mの距離における <sup>137</sup>Cs 線源のコリメートビーム照射方式及び 4 $\pi$  等方照射方式による光子エネルギースペクトル分布の測定結果を Fig. 3 に示す。コリメートビーム照射方式では、低エネルギー領域に分布した散乱線が少なくなった。この理由は、コリメートビーム照射方式に関してはコリメータの使用により、検出された多くの散乱線は小角散乱を起こした成分であること、また鉛製のコリメータ内で発生した低エネルギー散乱線の多くが吸収されてしまうためである。

面積データは、Photox<sup>8)</sup> データベースの Hubbellのデータを用いた。

光子エネルギー分布を評価する際に、下記の飛跡長評価法<sup>9)</sup>を用いて粒子線束を計算した。

$$\phi_{kg} = \frac{1}{N} \sum_i \sum_j x(E_{gmin} < E_{ij} < E_{gmax}) \cdot x(r_{ij} \in V_k) \cdot l_{jk} / vol_k$$

ここで、

N : ヒストリー数

g : 沈着エネルギー群

i : ヒストリー

j : ヒストリー i 中での粒子の衝突

x(f) = 0 fが偽の時

x(f) = 1 fが真の時

$\phi_{kg}$  : k 番目の検出器でのエネルギー群 g での粒子線束。

$E_{min}$  : 沈着エネルギー群の下限エネルギー

$E_{max}$  : 沈着エネルギー群の上限エネルギー

$V_k$  : k 番目の検出器領域。

$r_{ij}$  : ヒストリー i 中の j 回目の衝突の起こった位置。

$l_{jk}$  : j 回目の衝突から次の衝突までの粒子の飛行距離。ただし、次の衝突が k 番目の検出器領域外の場合は、領域境界までの距離。

$vol_k$  : k 番目の検出器領域の体積

である。

なお、測定と同様に 50keV 及び各  $\gamma$  線源に関して一次線エネルギーとそれ以外の散乱線エネルギーを分離するために Table 2 に示すエネルギー幅で光子エネルギー分布を評価した。

### 3. 評価結果

#### 3.1 測定結果

##### 3.1.1 エネルギースペクトル分布

第1照射室内の線源から2.0mの距離における <sup>137</sup>Cs 線源のコリメートビーム照射方式及び 4 $\pi$  等方照射方式による光子エネルギースペクトル分布の測定結果を Fig. 3 に示す。コリメートビーム照射方式では、低エネルギー領域に分布した散乱線が少なくなった。この理由は、コリメートビーム照射方式に関してはコリメータの使用により、検出された多くの散乱線は小角散乱を起こした成分であること、また鉛製のコリメータ内で発生した低エネルギー散乱線の多くが吸収されてしまうためである。

部屋の広さ及び線源-検出器間距離が異なる場合の $^{60}\text{Co}$ 線源の2つの照射方式による光子エネルギースペクトル分布をFig. 4 及びFig. 5 に示す。コリメートビーム照射方式においては、光子エネルギー分布に大きな変化は見られなかった。一方、 $4\pi$ 等方照射方式においては、部屋が小さい場合は、線源-検出器間距離が同じでも散乱線の割合が増加した。しかし、いずれの場合においても光子エネルギー分布には大きな差が見られなかった。これより、測定条件下とほぼ同様である通常の校正作業条件下においては、照射方式が同一な場合には光子エネルギースペクトル分布には大きな違いがないことがわかる。

### 3.1.2 照射線量率単位でのエネルギースペクトル分布

前節と同じ測定条件下におけるエネルギースペクトル分布を照射線量率単位でFig. 6, Fig. 7 及びFig. 8 にそれぞれ示す(以下、照射線量率エネルギースペクトル)。照射線量率単位への換算係数はICRU47<sup>9)</sup>の値を使用した。 $4\pi$ 等方照射方式では散乱線のエネルギーが低エネルギー領域に分布する。そのため、Fig. 6 に示すように2つの照射方式間で、全体に占める散乱線の割合に大きな差は見られなかった。

## 3.2 計算結果

Fig. 9 及びFig. 10に、第1照射室内の線源から2.0mの場所における $^{137}\text{Cs}$ 線源の照射線量率単位の光子エネルギー分布の計算結果を示す。簡易体系を用いた計算結果と測定結果との間には、低エネルギー領域で差が見られた。また、その差は $4\pi$ 等方照射方式の方が大きくなった。これは、コリメートビーム照射方式と比較して、校正台車における相互作用により発生した散乱線が多いためである。一方、近似体系を用いた計算による光子エネルギー分布の評価結果は、測定による評価結果に近くなった。

Fig. 11, Fig. 12及びFig. 13に、近似体系を用いた計算による光子エネルギー分布の評価結果を示す。また、Fig. 14, Fig. 15及びFig. 16に、それぞれの分布を照射線量率単位で示した場合の評価結果を示す。これらの分布のエネルギー幅は、Table 2 にあるものを使用した。これらの計算結果は測定結果と同様の傾向を示した。これより、可能な限り近似を行った体系を用いたモンテカルロシミュレーション計算により、実際の校正場の光子エネルギー分布を正しく評価できることが予想される。

## 4. 散乱線の解析及び考察

### 4.1 測定による散乱線の光子エネルギー分布評価

#### 4.1.1 発生源による散乱線の分離

散乱線をその発生源により、①コリメータ散乱線、②校正室の壁、床、天井及び校正台車で散乱を起こした室内散乱線及び③空気散乱線の3成分に分類した<sup>10)</sup>。これら各成分の光子エネルギー

部屋の広さ及び線源-検出器間距離が異なる場合の $^{60}\text{Co}$ 線源の2つの照射方式による光子エネルギースペクトル分布をFig. 4 及びFig. 5 に示す。コリメートビーム照射方式においては、光子エネルギー分布に大きな変化は見られなかった。一方、 $4\pi$ 等方照射方式においては、部屋が小さい場合は、線源-検出器間距離が同じでも散乱線の割合が増加した。しかし、いずれの場合においても光子エネルギー分布には大きな差が見られなかった。これより、測定条件下とほぼ同様である通常の校正作業条件下においては、照射方式が同一な場合には光子エネルギースペクトル分布には大きな違いがないことがわかる。

### 3.1.2 照射線量率単位でのエネルギースペクトル分布

前節と同じ測定条件下におけるエネルギースペクトル分布を照射線量率単位でFig. 6, Fig. 7 及びFig. 8 にそれぞれ示す(以下、照射線量率エネルギースペクトル)。照射線量率単位への換算係数はICRU47<sup>9)</sup>の値を使用した。 $4\pi$ 等方照射方式では散乱線のエネルギーが低エネルギー領域に分布する。そのため、Fig. 6 に示すように2つの照射方式間で、全体に占める散乱線の割合に大きな差は見られなかった。

## 3.2 計算結果

Fig. 9 及びFig. 10に、第1照射室内の線源から2.0mの場所における $^{137}\text{Cs}$ 線源の照射線量率単位の光子エネルギー分布の計算結果を示す。簡易体系を用いた計算結果と測定結果との間には、低エネルギー領域で差が見られた。また、その差は $4\pi$ 等方照射方式の方が大きくなった。これは、コリメートビーム照射方式と比較して、校正台車における相互作用により発生した散乱線が多いためである。一方、近似体系を用いた計算による光子エネルギー分布の評価結果は、測定による評価結果に近くなった。

Fig. 11, Fig. 12及びFig. 13に、近似体系を用いた計算による光子エネルギー分布の評価結果を示す。また、Fig. 14, Fig. 15及びFig. 16に、それぞれの分布を照射線量率単位で示した場合の評価結果を示す。これらの分布のエネルギー幅は、Table 2 にあるものを使用した。これらの計算結果は測定結果と同様の傾向を示した。これより、可能な限り近似を行った体系を用いたモンテカルロシミュレーション計算により、実際の校正場の光子エネルギー分布を正しく評価できることが予想される。

## 4. 散乱線の解析及び考察

### 4.1 測定による散乱線の光子エネルギー分布評価

#### 4.1.1 発生源による散乱線の分離

散乱線をその発生源により、①コリメータ散乱線、②校正室の壁、床、天井及び校正台車で散乱を起こした室内散乱線及び③空気散乱線の3成分に分類した<sup>10)</sup>。これら各成分の光子エネルギー

ギー分布を評価するために、シャドウコーンを使用した。

それぞれの照射方式は、Table 1 に示す散乱線成分を含むものとした<sup>10)</sup>。ここで、一次線、コリメータ散乱線、室内散乱線及び空気散乱線の波高分布は、それぞれ次式に示すように各照射方式において測定された波高分布を互いに差し引くことにより得た。

$$\begin{aligned} \text{一次線} &= (b) - (d) \\ \text{コリメータ散乱線} &= (a) - \text{一次線} - (c) \\ \text{室内散乱線} &= (d) - (c) \\ \text{空気散乱線} &= (c) \end{aligned}$$

得られた各散乱線成分の波高分布についてもその光子エネルギー分布を評価した。

#### 4.1.2 照射条件が散乱線の光子エネルギー分布に及ぼす影響

第1照射室内の線源から2.0mにおける<sup>137</sup>Cs線源及び<sup>60</sup>Co線源の各散乱線成分の光子エネルギー分布をそれぞれFig. 17及びFig. 18に示す。室内散乱線は低エネルギー領域に分布し、その量が多い。その一方で、コリメータ散乱線は一次線に近いエネルギー領域に分布し、その量が少ないことがわかる。この2つの散乱成分の分布の差が、コリメートビーム照射方式及び4 $\pi$ 等方照射方式の光子エネルギー分布の差となる。2つの照射方式に含まれる空気散乱線は、広い範囲にわたりエネルギーが分布している。

各散乱線成分の照射線量率単位の光子エネルギー分布をFig. 19及びFig. 20に示す。コリメータ散乱線は比較的エネルギーが高いため、照射線量率単位では全体に占める割合が室内散乱線とほぼ同じとなる。空気散乱線に関しては、<sup>137</sup>Cs線源及び<sup>60</sup>Co線源ともに他の2つの散乱線成分と比較して、その寄与が少なくなることがわかった。

<sup>60</sup>Co線源のコリメータ散乱線の線源-検出器間距離及び照射室の広さの違いによる光子エネルギー分布の移動をFig. 21に示す。同様に、室内散乱線の光子エネルギー分布の移動をFig. 22に示す。また、これらの照射線量率単位の光子エネルギー分布の移動をFig. 23及びFig. 24に示す。コリメータ散乱線に関しては、その分布は大きく移動しなかった。その一方で、室内散乱線に関しては線源-検出器間距離が長くなるに従って、その光子エネルギー分布がわずかに高エネルギー側に移動した。これは、線源-検出器間距離が長くなるに従って、校正室の床面により浅い角度で入射して、より小さな角度で散乱された $\gamma$ 線が増加したことによる。

#### 4.1.3 散乱線成分の割合

Table 3 及びTable 4に、照射線量率単位における各散乱線成分の全体に占める割合を示す。Table 4 に示すように、室内散乱線及び空気散乱線に関しては、散乱割合は線源-検出器間距離に従って増加した。増加した理由は、これらの散乱線が室内の広い範囲において発生し、一次線とは同様の減衰傾向を示さないことによる。一方、コリメータ散乱線は、線源-検出器間距離により散乱割合は大きく変化しなかった。これは、コリメータ散乱線の発生源が $\gamma$ 線源に近いために、一次線とほぼ同様の減衰傾向を示すことによる。一方、他に、Fig. 13で示したように4 $\pi$ 等方照射方式においては、線源-検出器間距離が同一でも部屋の大きさによりその割合が変化した。

また、Table 3 に示すように線源-検出器間距離が同じ場合には、<sup>137</sup>Cs線源では室内散乱



線の方が、 $^{60}\text{Co}$ 線源ではコリメータ散乱線の方が散乱割合が多くなった。

## 4.2 計算による散乱線の光子エネルギー分布評価

### 4.2.1 発生源による散乱線の分離

測定と同様の条件下でシャドウコーンを設置した場合のモンテカルロ計算シミュレーションを実行した。4.1.1で述べた測定と同様の方法で分離を行い算出したコリメータ散乱線及び室内散乱線の光子エネルギー分布の評価結果をそれぞれFig. 25及びFig. 26に示す。これらを照射線量率単位で示したものをそれぞれFig. 27及びFig. 28に示す。計算結果と測定結果の間には良い一致が見られた。

E G S 4 コード汎用ユーザーズ版においては、興味対象以外の領域で散乱を起こした $\gamma$ 線の輸送を止めることが可能である<sup>(4)・(7)</sup>。そこで、散乱線を測定と同様にコリメータ散乱線、室内散乱線及び空気散乱線に分類し、それぞれの散乱線成分のみの輸送計算を行い光子エネルギー分布を評価した。特に、コリメートビーム照射方式における空気散乱線と室内散乱線の分類も行い、個々についての輸送計算も行った。エネルギー幅は、Table 2にあるものを使用した。これらの光子エネルギー分布評価は、第1照射室に関しては線源-検出器間距離2.0mについて、第3照射室に関しては2.0m及び3.0mについて実施した。

### 4.2.2 散乱線成分の光子エネルギー分布

Fig. 29及びFig. 30に第1照射室における $^{137}\text{Cs}$ 線源及び $^{60}\text{Co}$ 線源のコリメータ散乱線及び $4\pi$ 等方照射方式における室内散乱線の光子エネルギー分布を示す。また、これらの光子エネルギー分布をFig. 31及びFig. 32に照射線量率単位で示す。コリメータ散乱線は、計算においても一次線に近いエネルギー領域にそのエネルギーは分布した。室内散乱線は、低エネルギー領域にそのエネルギーは分布した。

Fig. 33及びFig. 34に、 $^{60}\text{Co}$ 線源のコリメータ散乱線及び $4\pi$ 等方照射における室内散乱線の光子エネルギー分布を示す。これらの照射線量率単位の分布をFig. 35及びFig. 36に示す。室内散乱線に関しては、測定結果と同様に線源-検出器間距離が増加するに従い、光子エネルギー分布が高エネルギー側に移動した。

### 4.2.3 散乱線成分の割合

Table 5に各散乱線成分の散乱割合を照射線量率単位で示す。ここで、全散乱割合とは第3章で示した計算結果で、各照射条件における一次線以外のエネルギーを有する $\gamma$ 線の割合を示している。各散乱線成分の和は、測定結果とほぼ同様の値を示した。その一方で、各散乱線成分の和は全散乱割合よりも少なくなった。これは、実際の照射条件下においては、測定において一次線として評価を行った線源カプセルで散乱を起こした散乱 $\gamma$ 線が存在するためである。そのずれは、コリメートビーム照射方式よりも $4\pi$ 等方照射方式の方が大きくなった。これは、コリメートビーム照射方式においては線源カプセルで散乱をおこした $\gamma$ 線が、線源を囲む鉛製のコリメータに吸収されるためである。

空気散乱線は、 $4\pi$ 等方照射方式の方が散乱割合が多くなった。これは、コリメートされていない分だけ散乱線が発生する可能性のある空気の容積が大きくなるためである。

測定結果と同様に、同じ評価点において $^{60}\text{Co}$ 線源ではコリメータ散乱線の方が、 $^{137}\text{Cs}$ 線源では室内散乱線の方が割合が大きくなった。

#### 4.3 散乱線成分の特性

##### 4.3.1 コリメータ散乱線

コリメータ散乱線は、測定結果及び計算結果ともに、 $^{60}\text{Co}$ 線源の方が $^{137}\text{Cs}$ 線源よりもその割合が多くなった。そこで、同一の鉛製のコリメータ内に200keV、800keV及び2MeVの一次線エネルギーを有する $\gamma$ 線源を仮定し、散乱線の割合を計算した。

Fig. 37に、各光子線源のコリメータ散乱線の割合を照射線量率単位で示す。 $\gamma$ 線源の一次線エネルギーが高くなるに従い、散乱割合は増加した。これは、以下の2つの理由による。

- (1) 一次 $\gamma$ 線のエネルギーが高いほどコリメータ内を深く透過することができ、散乱線が発生させるコリメータの容積が大きくなる。
- (2) 光子エネルギーが高くなるに従い、コリメータ内で吸収される確率は低くなる。

一般的に、散乱線はエネルギーの低い光子ほど同一の物質内で散乱を起こす確率は高くなる。しかし、鉛のように高原子番号を有する元素が $\gamma$ 線源を被った場合は、そこで吸収される散乱線が増加するため、逆の傾向を示した。

##### 4.3.2 $4\pi$ 等方照射方式における室内散乱線

室内散乱線の光子エネルギー分布は、線源-検出器間距離が増加するに従い、高エネルギー側に移動した。そこで、 $^{137}\text{Cs}$ 線源を第3照射室に設置して、 $4\pi$ 等方照射方式を実施した場合のいくつかの場所における室内散乱線の光子エネルギー分布を計算した。

Fig. 38及びFig. 39に、室内散乱線の光子エネルギー分布の移動を示す。線源-検出器間距離が長くなるに従って、光子エネルギー分布が高エネルギー側に移動する傾向がここでも見られた。室内散乱線の発生源のうち、校正室の床面は線源に最も近い。このため、この領域で散乱を起こした散乱線が光子エネルギー分布の評価点に対して大きく寄与すると予測される。線源-検出器間距離が長くなった場合、床面に浅い角度で入射しより小さな角度で散乱を起こした散乱 $\gamma$ 線が発生する。このため、より高エネルギーの散乱 $\gamma$ 線が生じる可能性が高くなる。

これより、自由空間中に設置した $\gamma$ 線源を用いて $4\pi$ 等方照射を実施し、線源-検出器間距離を長くした場合、散乱線の割合が増加する他に光子エネルギー分布が高エネルギー側に移動することが計算においても確認された。

#### 4.4 周辺線量当量率の算出

現在、放射線の環境モニタリングに用いられる単位として周辺線量当量、 $\text{H}^*(10)$ 、が国際的に推奨されている<sup>9)</sup>。日本国内においても外部被ばくモニタリングには、この概念を基本とし

ている単位 (1cm 線量当量) が使用されている。そこで、各照射条件について、光子エネルギー分布を考慮して周辺線量当量 (1cm 線量当量) 率,  $\dot{H}^*(10)$ , を算出した。この場合、周辺線量当量率  $\dot{H}^*(10)$  (mSv/h) は下記のように算出される。照射線量からの換算係数は、現在国内で採用されている ICRP51<sup>1)</sup> に示されている値を使用した。

$$\dot{H}^*(10) = \sum_i X_i K_i$$

ここで、

$X_i$  : エネルギー  $i$  群の照射線量率 (R/h)

$K_i$  : エネルギー  $i$  群の換算係数 (mSv/R)

である。

測定結果及び計算結果より得られた周辺線量当量率をそれぞれ Table 6, Table 7, Table 8 及び Table 9 に示す。

コリメートビーム照射方式においては、光子エネルギー分布を考慮して算出された値と散乱線が含まれないものとして算出された値のずれはほとんど見られなかった。これは、散乱線が一次線に近いエネルギー領域に分布するためである。また、線源-検出器間距離の変化により、値は大きく変動しなかった。これは、散乱線のほとんどがコリメータ散乱線であり、一次線と同様の減衰傾向を示すため、散乱割合がほぼ一定になるためである。

他方、 $4\pi$  等方照射方式においては、散乱線成分により生じる光子エネルギー分布を考慮して算出された周辺線量当量の値は、一次  $\gamma$  線のみが存在するものとして算出された値よりも大きくなった。これは、散乱線が低エネルギー領域に分布し、そのエネルギー領域における換算係数の値が大きいためである。また、線源-検出器間距離が長くなるに従い、光子エネルギー分布の考慮による線量当量率のずれが大きくなった。これは散乱線のエネルギーが高エネルギー側に移動する一方で、散乱線の割合が増加することによる。特に、線源から 7.5m の位置においては、光子エネルギー分布を考慮して周辺線量当量を算出した場合に、その値は約 5% 大きくなった。

以上に述べたように、コリメータを使用することにより“硬い”スペクトルを得ることができると、線量当量の算出にスペクトル分布の考慮はほとんど影響を与えなかった。一方、コリメータを使用せず照射を実施した場合、スペクトル分布は“柔らかく”なる。通常、校正作業を行っている線源-検出器間距離が 3.0m 以下の場合、スペクトルを考慮して算出された線量当量と、考慮せずに算出された値とのずれは最大で約 3% であった。

## 5. 結論

測定及びモンテカルロ計算シミュレーションにより、原研放射線標準施設棟の  $\gamma$  線校正場の光子エネルギー分布を評価した。また、校正作業の上で重要となる照射線量率単位の光子エネルギー分布を明らかにした。発生源により散乱線の分類を行い、それらの光子エネルギー分布より、

ている単位 (1cm 線量当量) が使用されている。そこで、各照射条件について、光子エネルギー分布を考慮して周辺線量当量 (1cm 線量当量) 率,  $\dot{H}^*(10)$ , を算出した。この場合、周辺線量当量率  $\dot{H}^*(10)$  (mSv/h) は下記のように算出される。照射線量からの換算係数は、現在国内で採用されている ICRP51<sup>1)</sup> に示されている値を使用した。

$$\dot{H}^*(10) = \sum_i X_i K_i$$

ここで、

$X_i$  : エネルギー  $i$  群の照射線量率 (R/h)

$K_i$  : エネルギー  $i$  群の換算係数 (mSv/R)

である。

測定結果及び計算結果より得られた周辺線量当量率をそれぞれ Table 6, Table 7, Table 8 及び Table 9 に示す。

コリメートビーム照射方式においては、光子エネルギー分布を考慮して算出された値と散乱線が含まれないものとして算出された値のずれはほとんど見られなかった。これは、散乱線が一次線に近いエネルギー領域に分布するためである。また、線源-検出器間距離の変化により、値は大きく変動しなかった。これは、散乱線のほとんどがコリメータ散乱線であり、一次線と同様の減衰傾向を示すため、散乱割合がほぼ一定になるためである。

他方、 $4\pi$  等方照射方式においては、散乱線成分により生じる光子エネルギー分布を考慮して算出された周辺線量当量の値は、一次  $\gamma$  線のみが存在するものとして算出された値よりも大きくなった。これは、散乱線が低エネルギー領域に分布し、そのエネルギー領域における換算係数の値が大きいためである。また、線源-検出器間距離が長くなるに従い、光子エネルギー分布の考慮による線量当量率のずれが大きくなった。これは散乱線のエネルギーが高エネルギー側に移動する一方で、散乱線の割合が増加することによる。特に、線源から 7.5m の位置においては、光子エネルギー分布を考慮して周辺線量当量を算出した場合に、その値は約 5% 大きくなった。

以上に述べたように、コリメータを使用することにより“硬い”スペクトルを得ることができると、線量当量の算出にスペクトル分布の考慮はほとんど影響を与えなかった。一方、コリメータを使用せず照射を実施した場合、スペクトル分布は“柔らかく”なる。通常、校正作業を行っている線源-検出器間距離が 3.0m 以下の場合、スペクトルを考慮して算出された線量当量と、考慮せずに算出された値とのずれは最大で約 3% であった。

## 5. 結論

測定及びモンテカルロ計算シミュレーションにより、原研放射線標準施設棟の  $\gamma$  線校正場の光子エネルギー分布を評価した。また、校正作業の上で重要となる照射線量率単位の光子エネルギー分布を明らかにした。発生源により散乱線の分類を行い、それらの光子エネルギー分布より、

以下の校正場中の散乱線発生の特徴を明確にした。

- (1) コリメータの使用の有無により光子エネルギー分布は大きく変化した。コリメータを使用する照射においては、その散乱線のエネルギーは一次線に近い領域に分布した。一方、コリメータを使用しない場合、散乱線は低エネルギー領域に分布する。
- (2) 鉛製のコリメータに線源を設置した場合、一次 $\gamma$ 線のエネルギーが高くなるに従い、コリメータで散乱を起こす割合が増加する。
- (3) コリメータを使用しない照射の場合、線源-検出器間距離が長くなるに従って、散乱線の割合が増加し、光子エネルギー分布が高エネルギー側に移動する。
- (4) 周辺線量当量(1cm 線量当量)は、通常の校正作業においては散乱線が含まれないものとして、一次 $\gamma$ 線のエネルギーのみを考慮して算出される。散乱線により生じるスペクトル分布の考慮が、コリメータを使用しない照射を実施した場合、線源-検出器間距離を長くするに従い必要となってくる。コリメータを使用した照射に関しては、スペクトルの考慮は周辺線量当量の算出結果に大きな影響を与えない。

他に、カプセル部で発生した散乱線は、本試験において一次線として扱ったが、線源カプセル部で散乱をおこした散乱線が寄与することが計算結果よりわかった。今後は、線源カプセルにおいて発生した散乱線の特性を調査する必要がある。

## 謝辞

アンフォールディングを実行するにあたり、助言を頂きました原研環境物理研究室の斎藤公明副主任研究員に深く感謝いたします。

以下の校正場中の散乱線発生の特徴を明確にした。

- (1) コリメータの使用の有無により光子エネルギー分布は大きく変化した。コリメータを使用する照射においては、その散乱線のエネルギーは一次線に近い領域に分布した。一方、コリメータを使用しない場合、散乱線は低エネルギー領域に分布する。
- (2) 鉛製のコリメータに線源を設置した場合、一次 $\gamma$ 線のエネルギーが高くなるに従い、コリメータで散乱を起こす割合が増加する。
- (3) コリメータを使用しない照射の場合、線源-検出器間距離が長くなるに従って、散乱線の割合が増加し、光子エネルギー分布が高エネルギー側に移動する。
- (4) 周辺線量当量(1cm線量当量)は、通常の校正作業においては散乱線が含まれないものとして、一次 $\gamma$ 線のエネルギーのみを考慮して算出される。散乱線により生じるスペクトル分布の考慮が、コリメータを使用しない照射を実施した場合、線源-検出器間距離を長くするに従い必要となってくる。コリメータを使用した照射に関しては、スペクトルの考慮は周辺線量当量の算出結果に大きな影響を与えない。

他に、カプセル部で発生した散乱線は、本試験において一次線として扱ったが、線源カプセル部で散乱をおこした散乱線が寄与することが計算結果よりわかった。今後は、線源カプセルにおいて発生した散乱線の特徴を調査する必要がある。

## 謝辞

アンフォールディングを実行するにあたり、助言を頂きました原研環境物理研究室の斎藤公明副主任研究員に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) NCRP : " Calibration of survey instruments used in radiation protection for the assessment of ionizing radiation fields and radioactive surface contamination", Report 112 (1991).
- 2) 斎藤公明, 森内茂 : JAERI 1306, "モンテカルロ計算によるNaI(Tl) シンチレーション検出器  $\gamma$  線応答関数のデータカタログ" (1987).
- 3) W. R. Nelson, H. Hirayama and D. W. O. Rogers : "The EGS4 Code System", Stanford Linear Accelerator Center Report SLAC-265 (Stanford Calif) (1985).
- 4) 百瀬他 : "EGS4コード汎用ユーザーズ版の開発", KEK Proceedings, 92-14, 48 (1991).
- 5) D. W. O. Rogers and A. F. Bielajew : "The dosimetry of ionizing radiation Volume III (Edited by K. R. Kase et al)", Academic press, San Diego, 427 (1990).
- 6) J. T. West, T. J. Hoffman and M. B. Emmett : "Morse-CGS/S for the Scale System", NUREG/CR-0200, Vol. 3, sect. F9 (1980).
- 7) O. Sato, S. Iwai, M. Nakamura, T. Uehara, S. Takagi and H. Hirayama : "UCMARS-A User Code with a Multiple-Array System using Combinatorial Geometry for EGS4", KEK Internal, 94-12 (1994).
- 8) D. K. Trubey, M. J. Berger and J. H. Hubbell : "Photon Cross Sections for ENDF/B-VI", Advanced in Nuclear Computation and Radiation Shielding, American Nuclear Society Topical Meeting (1989).
- 9) ICRU : "Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations", Report 47 (1992).
- 10) 清水滋 : JAERI-Review 94-007, "保健物理-管理と研究-No. 36", 196 (1994).
- 11) ICRP Publication 51 : "Data for Use in Protection Against External Radiation" (1987).

Table 1 Irradiation type using collimator and shadow cone shield, and gamma-ray components appearing on the pulse-height distribution.

Irradiation type	Collimator	Shadow cone shield	Gamma-ray components on the pulse-height spectrum
(a)	used	not used	Primary, Collimator-scattered and Air-scattered radiations
(b)	not used	not used	Primary, Room-scattered and Air-scattered radiations
(c)	used	used	Air-scattered radiations
(d)	not used	used	Room-scattered and Air-scattered radiations

Primary radiations = (b) - (d)  
 Collimator-scattered radiations = (a) - Primary radiations - (c)  
 Room-scattered radiations = (d) - (c)  
 Air-scattered radiations = (c)



Table 2 Energy bins in the calculation for  $^{137}\text{Cs}$  source and  $^{60}\text{Co}$  source.

Group No.	Energy range (keV)	
	$^{137}\text{Cs}$ source	$^{60}\text{Co}$ source
1	10 - 40	10 - 40
2	40 - 60	40 - 80
3	60 - 80	80 - 140
4	80 - 120	140 - 210
5	120 - 184	210 - 290
6	184 - 250	290 - 380
7	250 - 320	380 - 470
8	320 - 400	470 - 580
9	400 - 500	580 - 700
10	500 - 661	700 - 840
11	661 - 662	840 - 1000
12	—————	1000 - 1172
13	—————	1172 - 1173
14	—————	1173 - 1332
15	—————	1332 - 1333

Table 3 Ratio of exposure by the scattered radiations to that by all radiations for the two irradiation types in No. 1 room. (measurement)

Irradiation type	Gamma-ray components	$^{137}\text{Cs}$		$^{60}\text{Co}$	
		1.5m	2.0m	1.5m	2.0m
(a) (Collimated beam)	Collimator-scattered	0.065	0.061	0.081	0.085
	Air-scattered	0.016	0.020	0.012	0.015
	Total	0.081	0.081	0.093	0.100
(b) ( $4\pi$ isotropic)	Room-scattered	0.068	0.098	0.040	0.061
	Air-scattered	0.015	0.018	0.013	0.015
	Total	0.083	0.116	0.053	0.076

Table 4 Ratio of exposure by the scattered radiations to that by all radiations for the two irradiation types in No. 3 room. (measurement)

Irradiation type	Gamma-ray components	$^{60}\text{Co}$			
		1.5m	2.0m	2.5m	3.0m
(a) (Collimated beam)	Collimator-scattered	0.074	0.073	0.079	0.083
	Air-scattered	0.010	0.011	0.014	0.015
	Total	0.084	0.084	0.093	0.093
(b) ( $4\pi$ isotropic)	Room-scattered	0.032	0.049	0.066	0.083
	Air-scattered	0.010	0.011	0.013	0.015
	Total	0.042	0.060	0.079	0.098

Table 5 Ratio of exposure by the scattered radiations to that by all radiations. (calculation)

Irradiation type	Gamma-ray components	No. 1 Room		No. 3 Room	
		$^{137}\text{C s}$	$^{60}\text{C o}$	$^{60}\text{C o}$	
		2.0m	2.0m	2.0m	3.0m
(a) (collimated beam)	Collimator-scattered	0.088	0.090	0.110	0.094
	Room-scattered	0.009	0.003	0.004	0.007
	Air-scattered	0.004	0.004	0.003	0.009
	Sum of components	0.101	0.097	0.117	0.110
	Total* <sup>1</sup>	0.139	0.167	0.183	0.186
	Measurement	0.081	0.100	0.084	0.098
(b) (4 $\pi$ isotropic)	Room-scattered	0.104	0.066	0.051	0.085
	Air-scattered	0.014	0.010	0.011	0.017
	Sum of components	0.118	0.076	0.062	0.102
	Total* <sup>2</sup>	0.206	0.179	0.171	0.187
	Measurement	0.116	0.076	0.060	0.098

\*1 : The ratio of scattered radiations with energy below 662keV in Fig. 14.

\*2 : The ratio of scattered radiations with energy except 1173keV and 1333keV in Fig. 15 and Fig. 16.

Table 6 Ambient dose equivalent rate,  $H^*(10)$  in No.1 room. (measurement)

Irradiation type	Method of calculation	Ambient dose equivalent rate, $H^*(10)$ (mSv/h)			
		$^{137}\text{Cs}$		$^{60}\text{Co}$	
		1.5m	2.0m	1.5m	2.0m
(a) (Collimated beam)	A	3.657	2.076	4.450	2.520
	B	3.633	2.060	4.402	2.495
	A/B	1.007	1.008	1.011	1.010
(b) ( $4\pi$ isotropic)	A	3.852	2.285	4.337	2.512
	B	3.779	2.226	4.262	2.454
	A/B	1.019	1.027	1.018	1.024

A : Calculation with the spectral distribution of exposure.  
 B : Calculation without consideration of scattered radiations.

Table 7 Ambient dose equivalent rate,  $H^*(10)$  in No.3 room. (measurement)

Irradiation type	Method of calculation	Ambient dose equivalent rate, $H^*(10)$ (mSv/h)			
		$^{60}\text{Co}$			
		1.5m	2.0m	2.5m	3.0m
(a) (Collimated beam)	A	4.407	2.494	1.602	1.113
	B	4.364	2.469	1.586	1.101
	A/B	1.010	1.010	1.010	1.011
(b) ( $4\pi$ isotropic)	A	4.295	2.485	1.616	1.147
	B	4.231	2.439	1.581	1.118
	A/B	1.015	1.019	1.022	1.026

A : Calculation with the spectral distribution of exposure.  
 B : Calculation without consideration of scattered radiations.

Table 8 Ambient dose equivalent rate,  $H^*(10)$  in No.1 room. (calculation)

Irradiation type	Method of calculation	Ambient dose equivalent rate, $H^*(10)$ (mSv/h)			
		$^{137}\text{Cs}$		$^{60}\text{Co}$	
		1.5m	2.0m	1.5m	2.0m
(a) (Collimated beam)	A	3.813	2.149	4.104	2.281
	B	3.792	2.135	4.081	2.267
	A/B	1.006	1.007	1.006	1.006
(b) ( $4\pi$ isotropic)	A	4.103	2.392	4.038	2.349
	B	4.011	2.324	3.975	2.298
	A/B	1.023	1.029	1.016	1.022

A : Calculation with the spectral distribution of exposure.

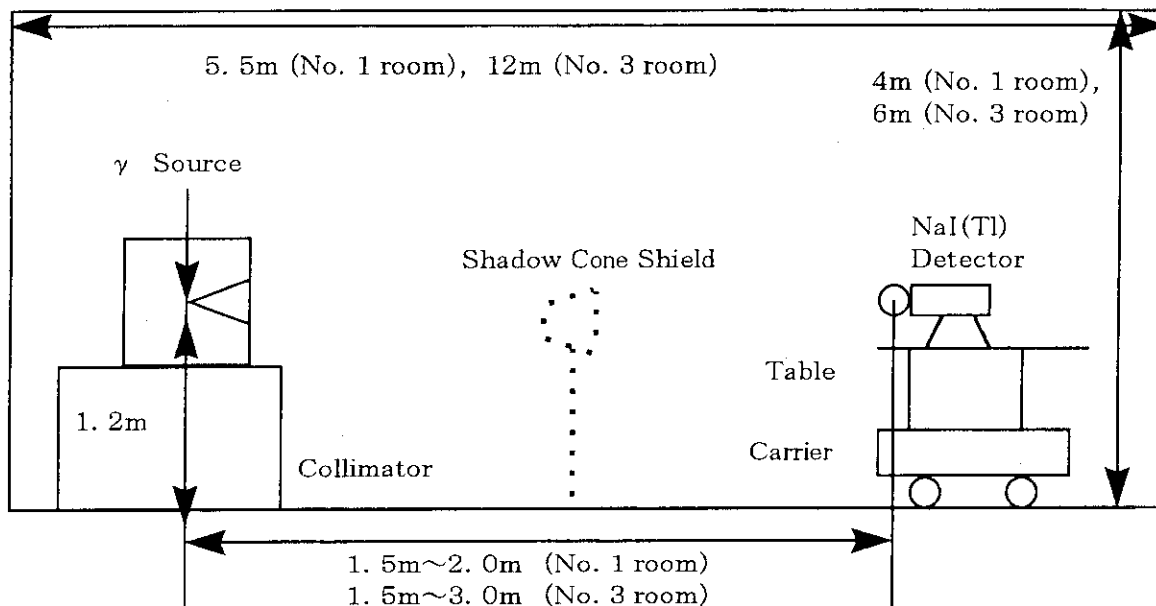
B : Calculation without consideration of scattered radiations.

Table 9 Ambient dose equivalent rate,  $H^*(10)$  in No.3 room. (calculation)

Irradiation type	Method of calculation	Ambient dose equivalent rate, $H^*(10)$ (mSv/h)				
		$^{60}\text{Co}$				
		1.5m	2.0m	2.5m	3.0m	7.5m
(a) (Collimated beam)	A	4.133	2.300	1.498	1.044	0.185
	B	4.109	2.286	1.489	1.037	0.183
	A/B	1.006	1.006	1.006	1.007	1.011
(b) ( $4\pi$ isotropic)	A	4.052	2.312	1.495	1.081	0.178
	B	3.999	2.271	1.464	1.057	0.170
	A/B	1.013	1.018	1.021	1.023	1.047

A : Calculation with the spectral distribution of exposure.

B : Calculation without consideration of scattered radiations.



Width : 6.5m (No. 1 room, No. 3 room)

Fig.1 Irradiation using a collimated beam.

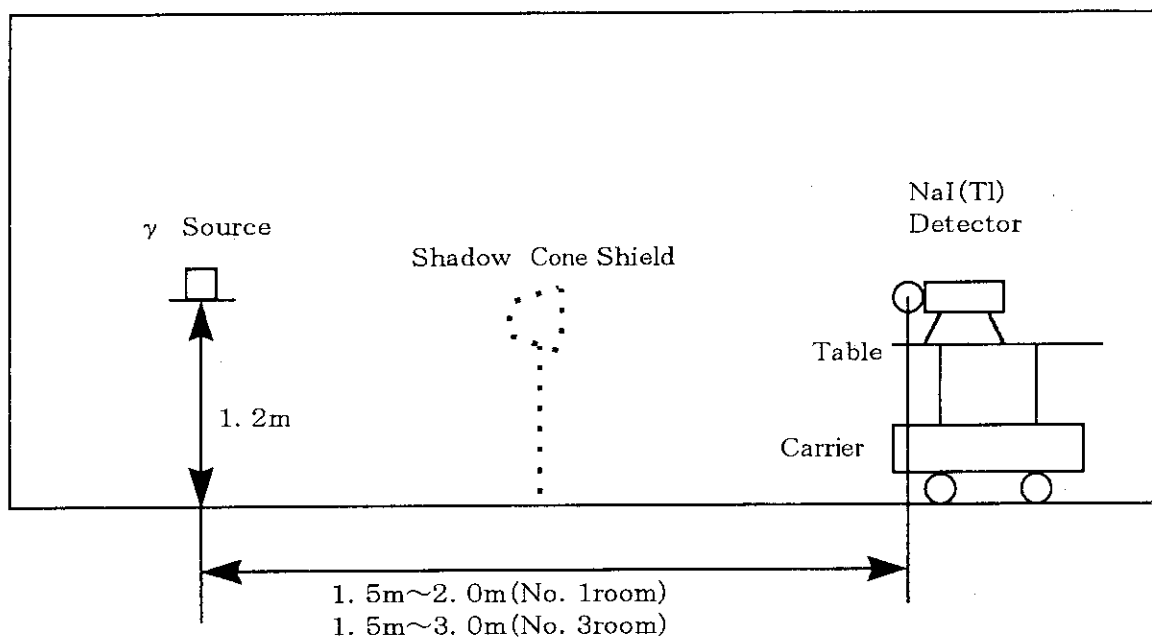


Fig.2  $4\pi$  isotropic irradiation using a source in free-air.

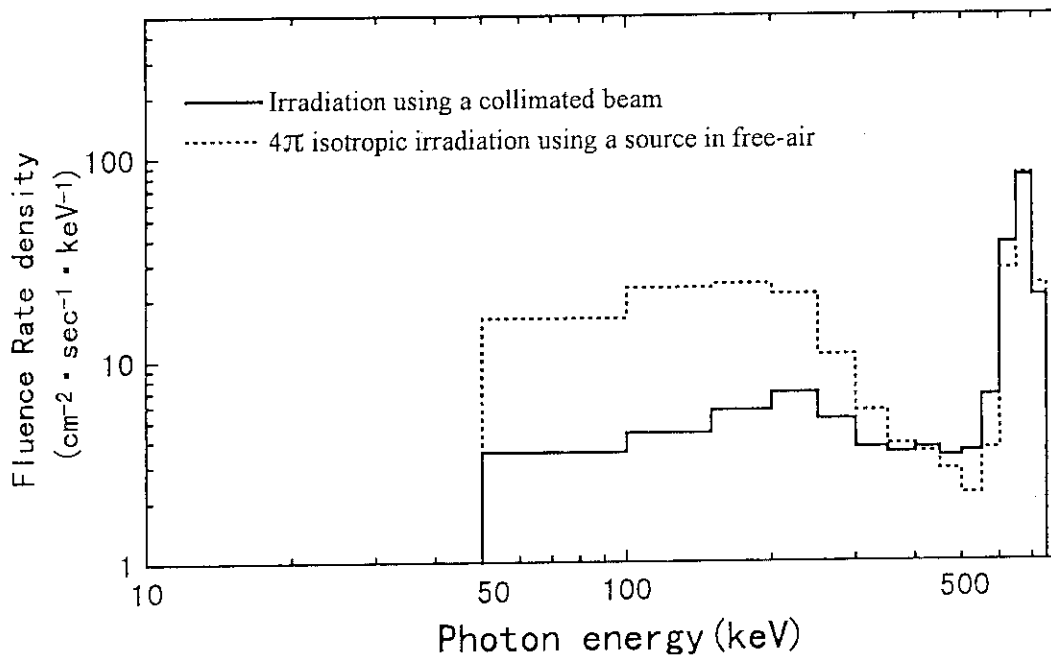


Fig.3 Spectra for the two irradiation types in No.1 room with  $^{137}\text{Cs}$  source. The source-to-detector distance is 2.0m. (measured)

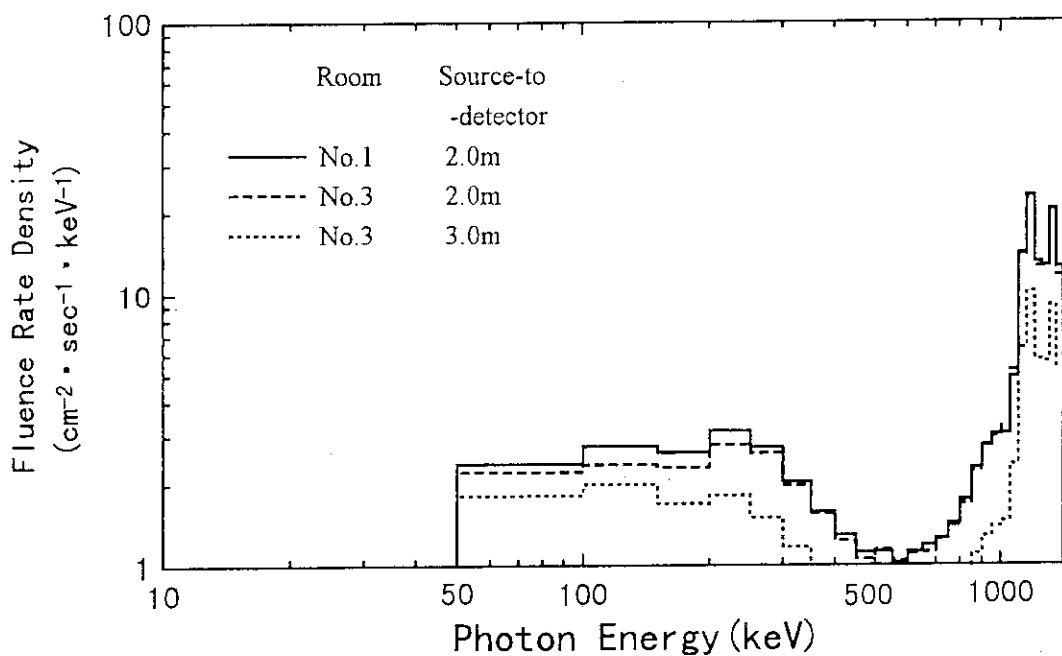


Fig.4 Spectra for the irradiation using a collimated beam with  $^{60}\text{Co}$  source. (measured)

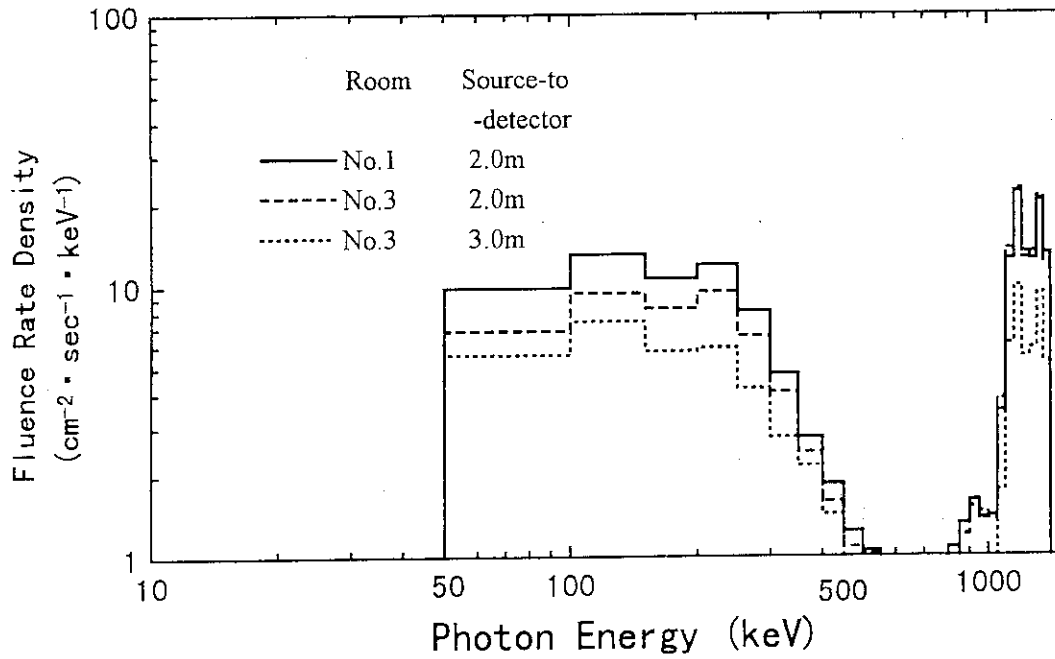


Fig.5 Spectra for the  $4\pi$  isotropic irradiation using a source in free-air with  $^{60}\text{Co}$  source. (measured)

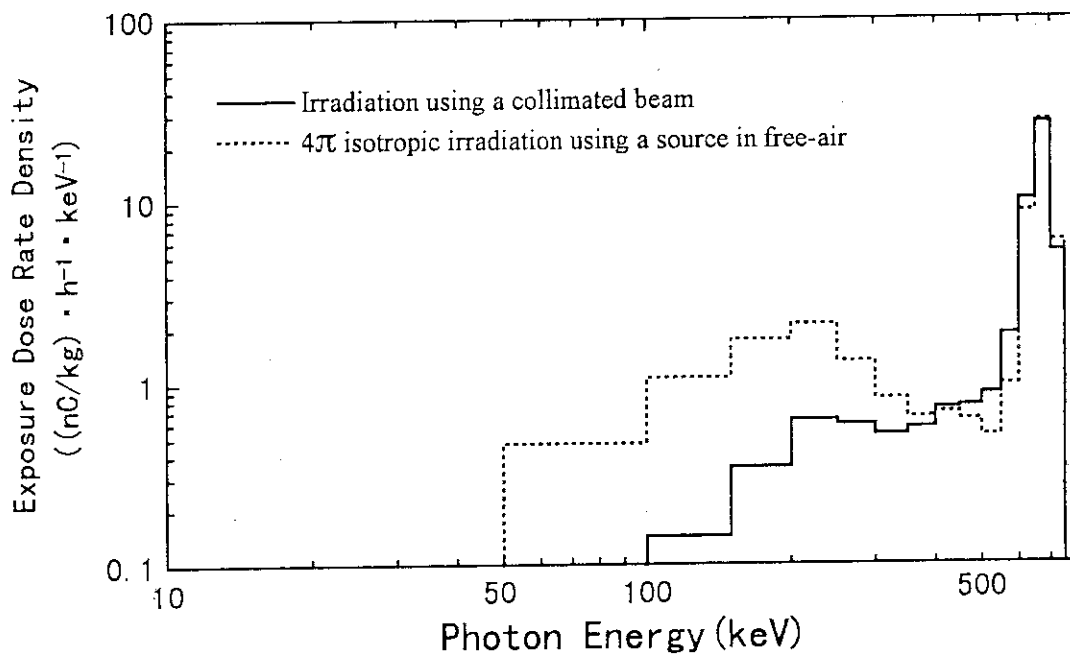


Fig.6 Spectral distributions of exposure for the two irradiation types in No.1 room with  $^{137}\text{Cs}$  source. The source-to-detector distance is 2.0m.(measured)



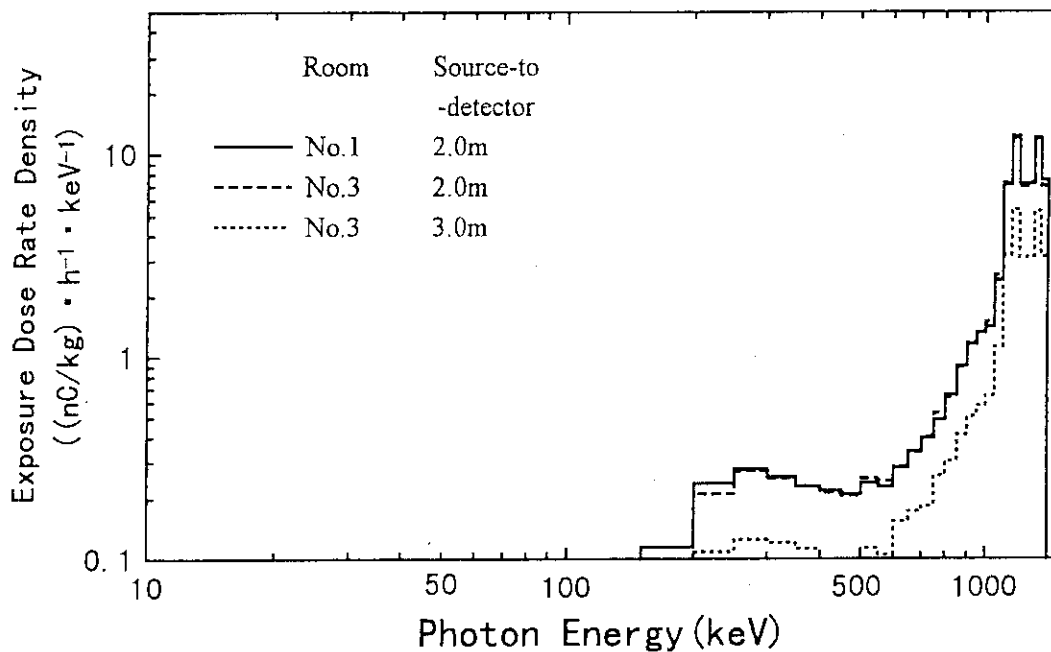


Fig.7 Spectral distributions of exposure for the irradiation using a collimated beam with  $^{60}\text{Co}$  source. (measured)

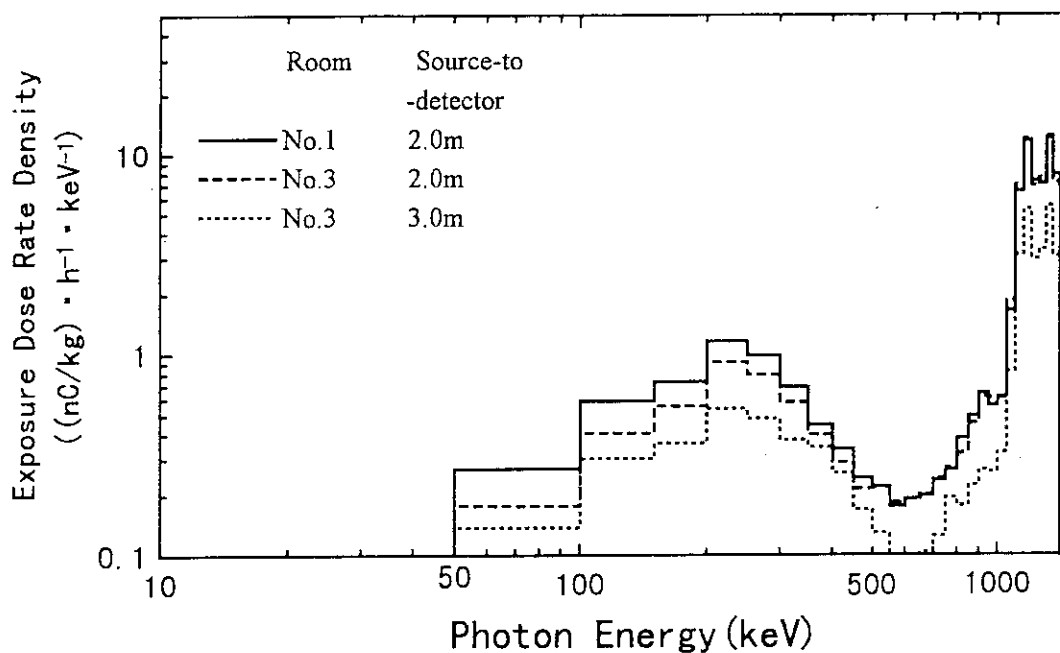


Fig.8 Spectral distributions of exposure for the  $4\pi$  isotropic irradiation using a source in free-air with  $^{60}\text{Co}$  source. (measured)

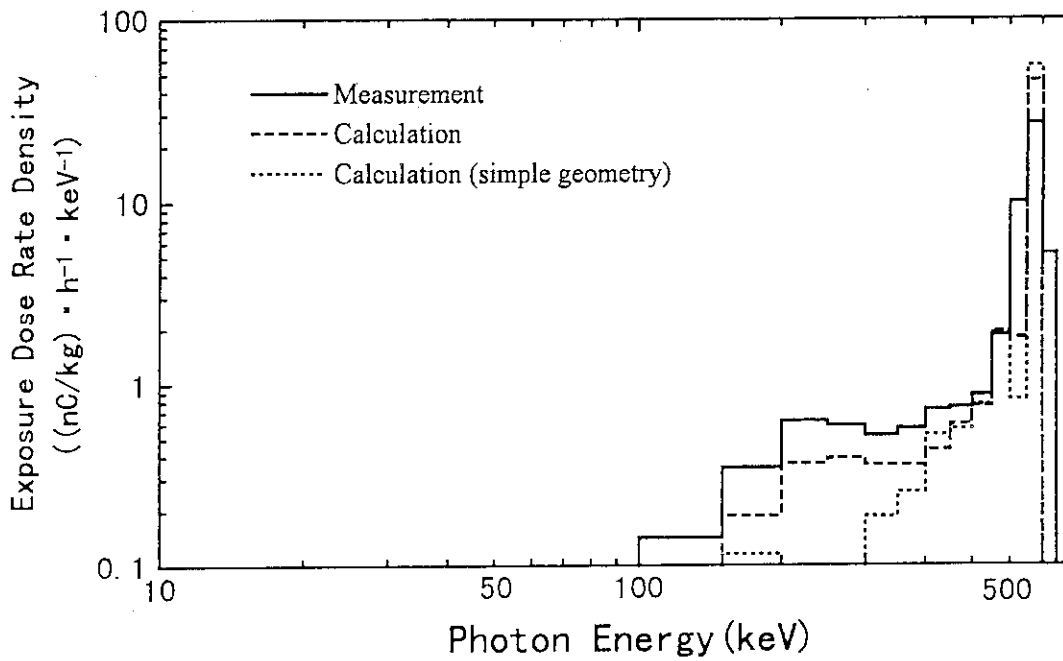


Fig.9 Spectral distributions of exposure for the irradiation using a collimated beam in No.1 room with <sup>137</sup>Cs source. The source-to-detector distance is 2.0m.

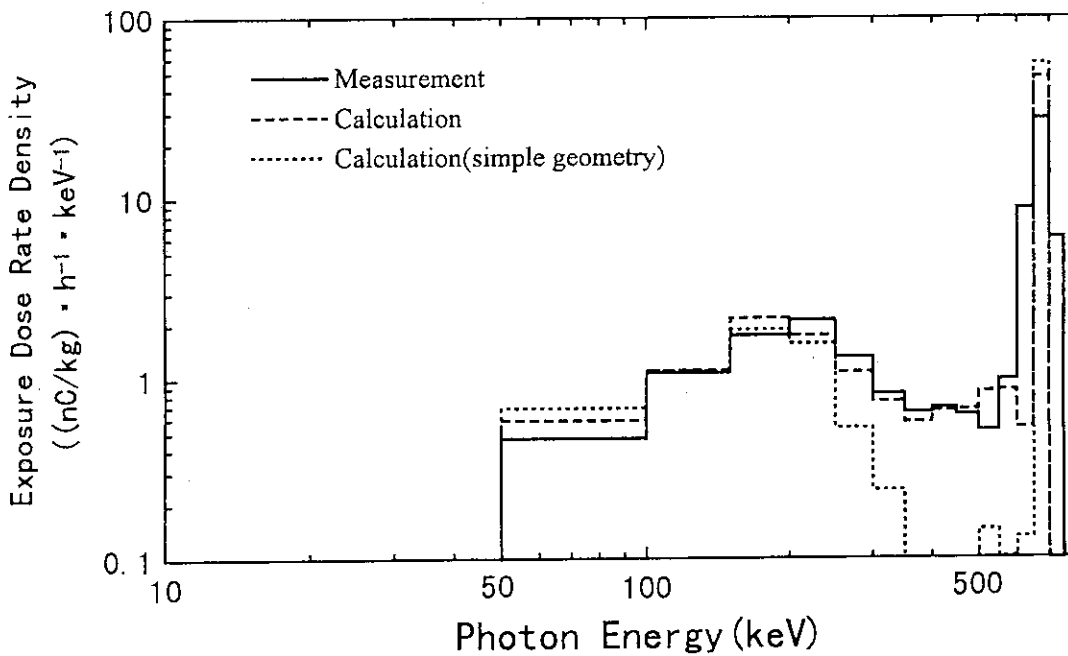


Fig.10 Spectral distributions of exposure for the 4π isotropic irradiation using a source in free-air in No 1 room with <sup>137</sup>Cs source. The source-to-detector distance is 2.0m.

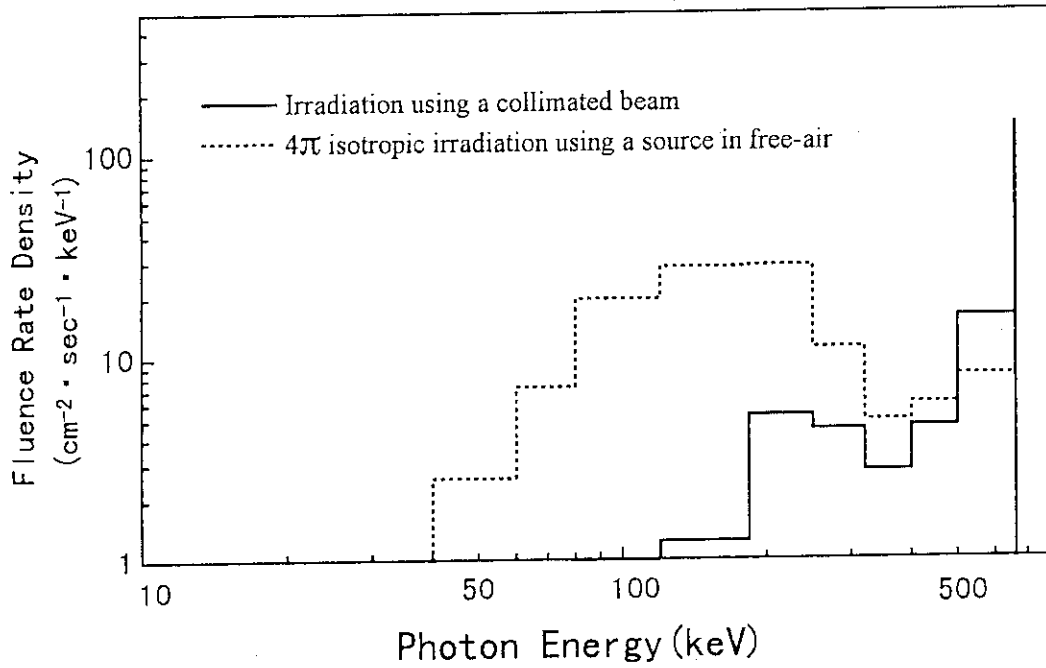


Fig.11 Spectra for the two irradiation types in No.1 room with  $^{137}\text{Cs}$  source.  
The source-to-detector distance is 2.0m.(calculated)

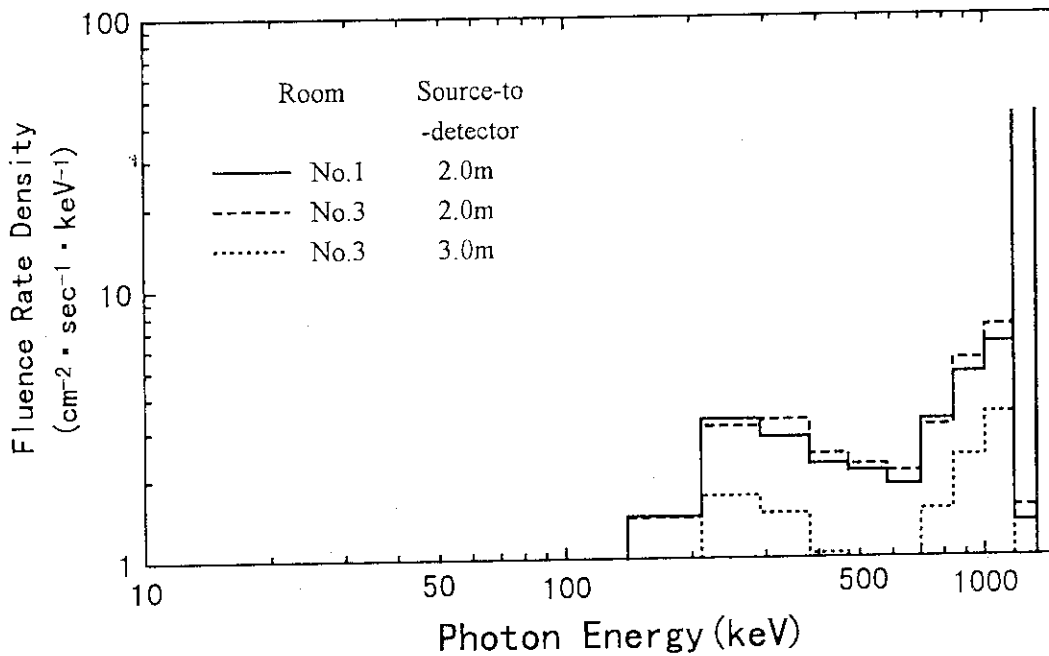


Fig.12 Spectra for the irradiation using a collimated beam with  $^{60}\text{Co}$  source.  
(calculated)

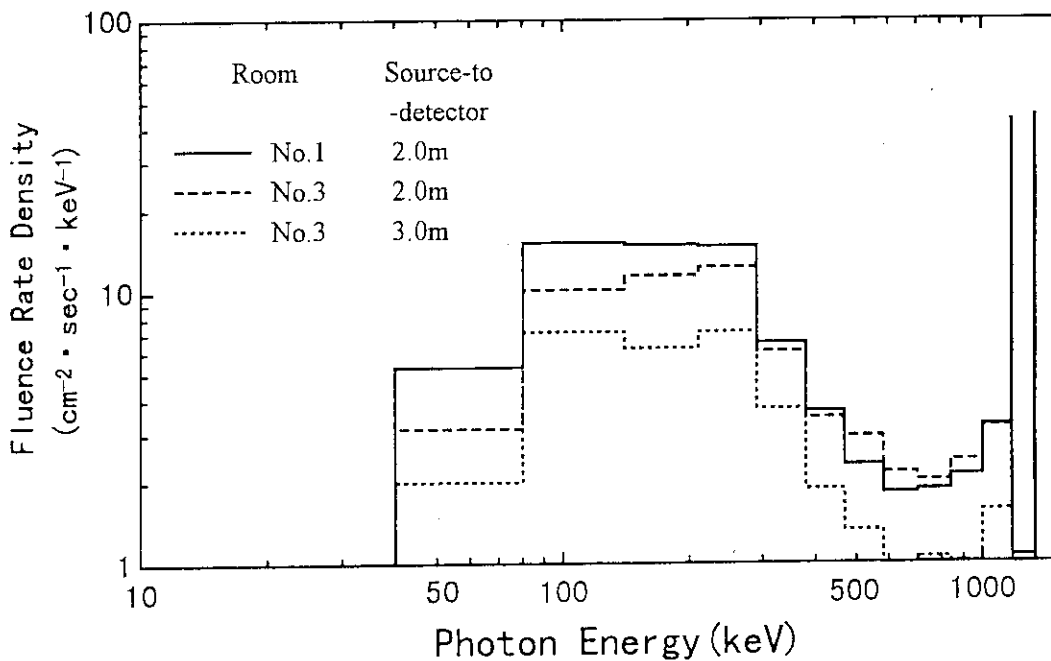


Fig.13 Spectra for the  $4\pi$  isotropic irradiation using a source in free-air with  $^{60}\text{Co}$  source. (calculated)

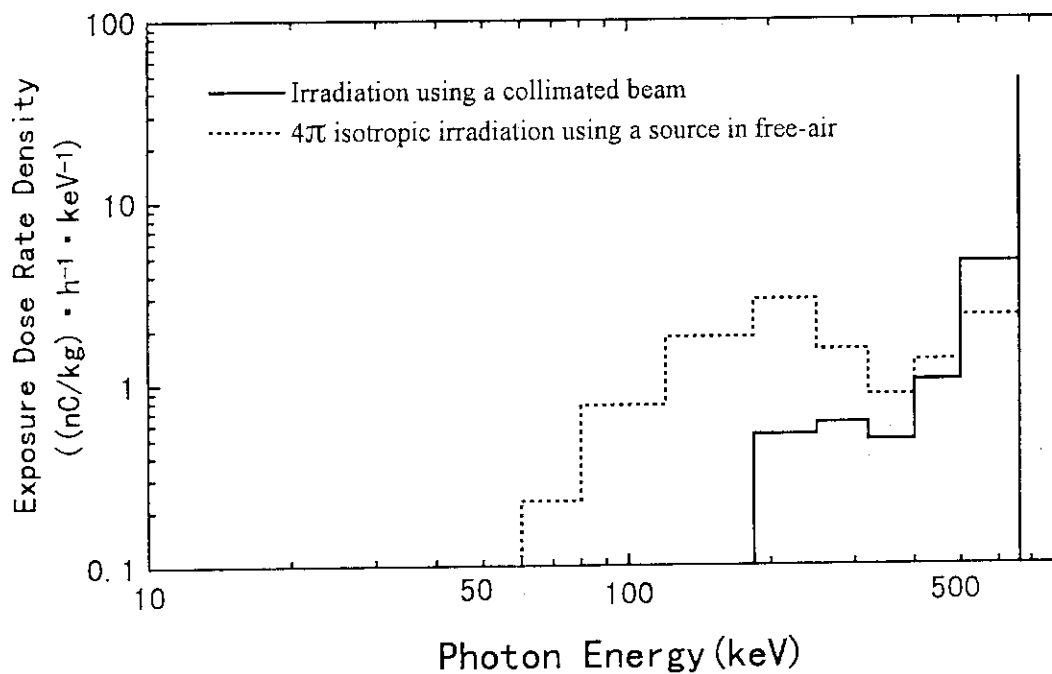


Fig.14 Spectral distributions of exposure for the two irradiation types in No.1 room with  $^{137}\text{Cs}$  source. The source-to-detector distance is 2.0m.(calculated)

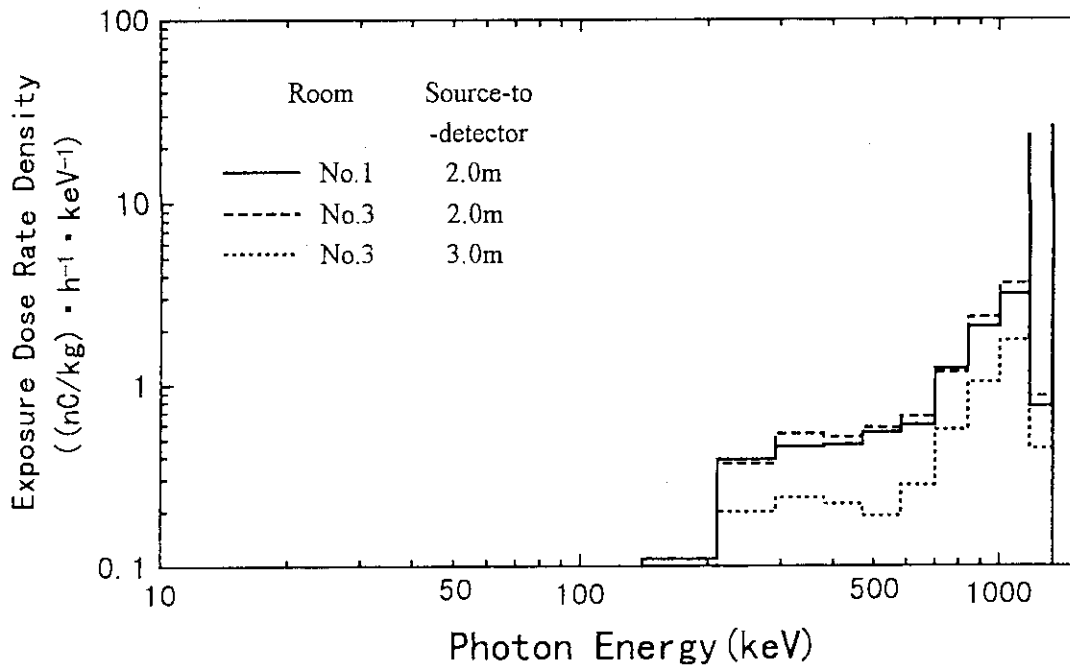


Fig.15 Spectral distributions of exposure for the irradiation using a collimated beam with <sup>60</sup>Co source. (calculated)

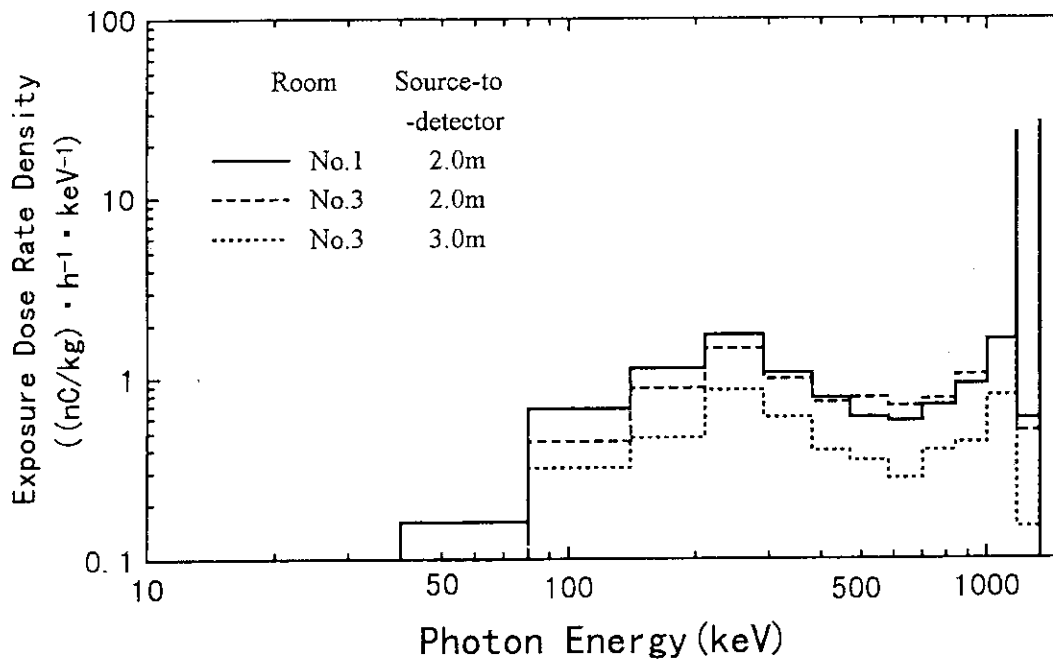


Fig.16 Spectral distributions of exposure for the 4π isotropic irradiation using a source in free-air with <sup>60</sup>Co source. (calculated)

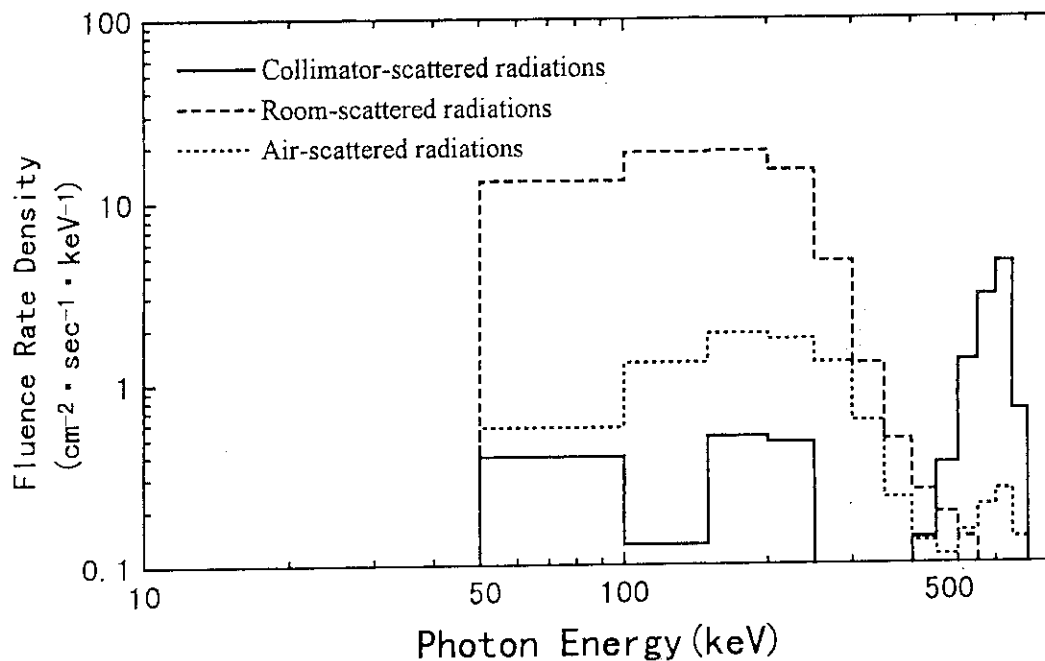


Fig.17 Spectra of scattered radiations in No.1 room with  $^{137}\text{Cs}$  source.  
The source-to-detector distance is 2.0m.(measured)

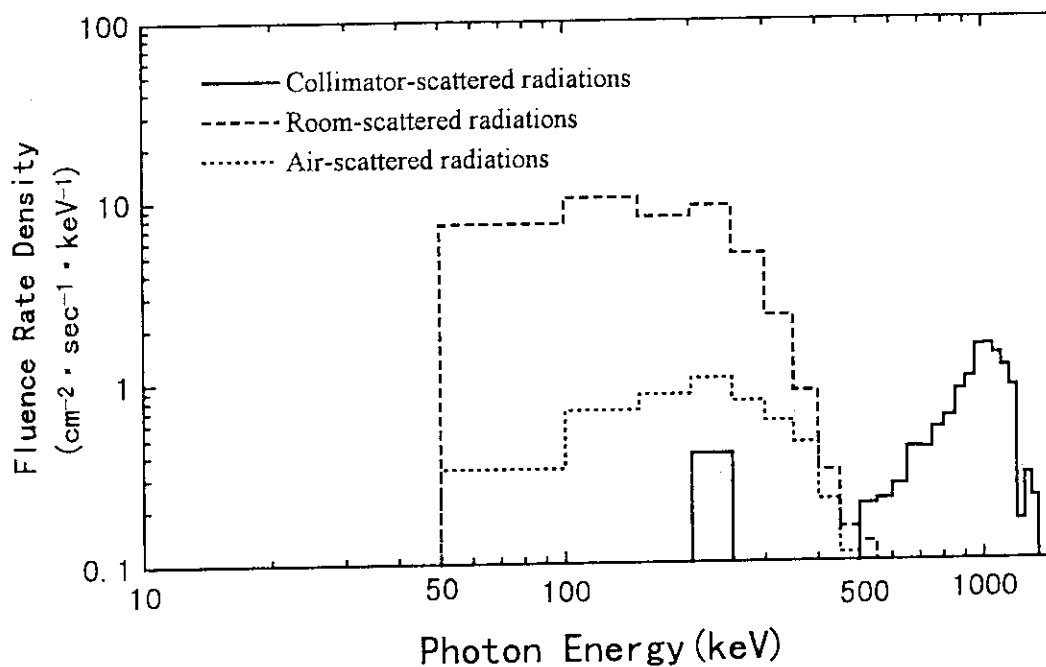


Fig.18 Spectra of scattered radiations in No.1 room with  $^{60}\text{Co}$  source.  
The source-to-detector distance is 2.0m.(measured)

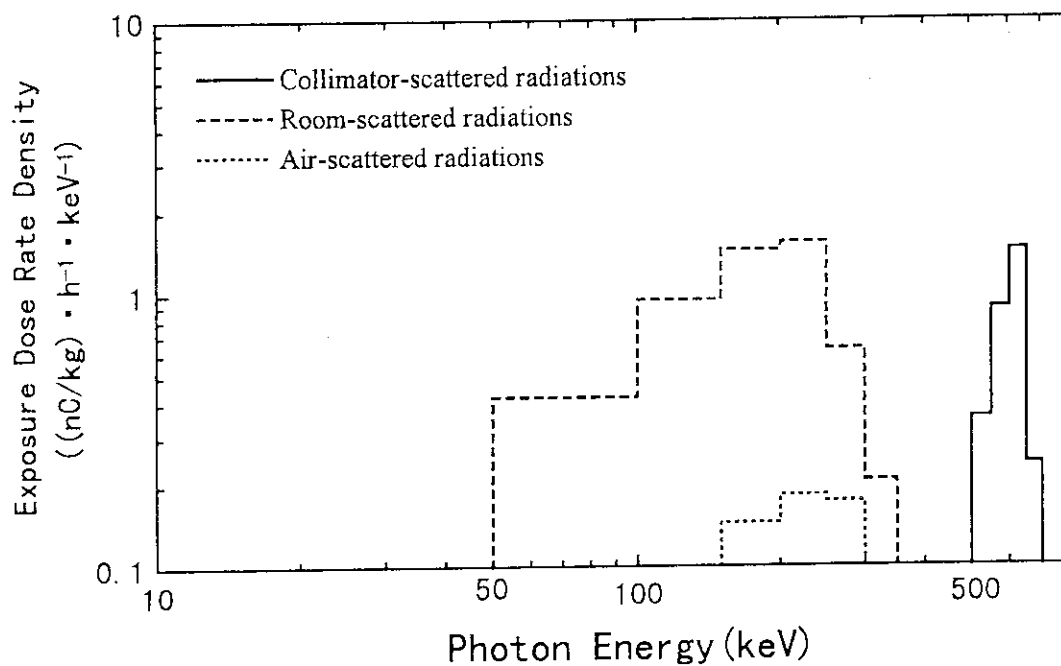


Fig.19 Spectral distributions of exposure of scattered radiations in No.1 room with  $^{137}\text{Cs}$  source. The source-to-detector distance is 2.0m.(measured)

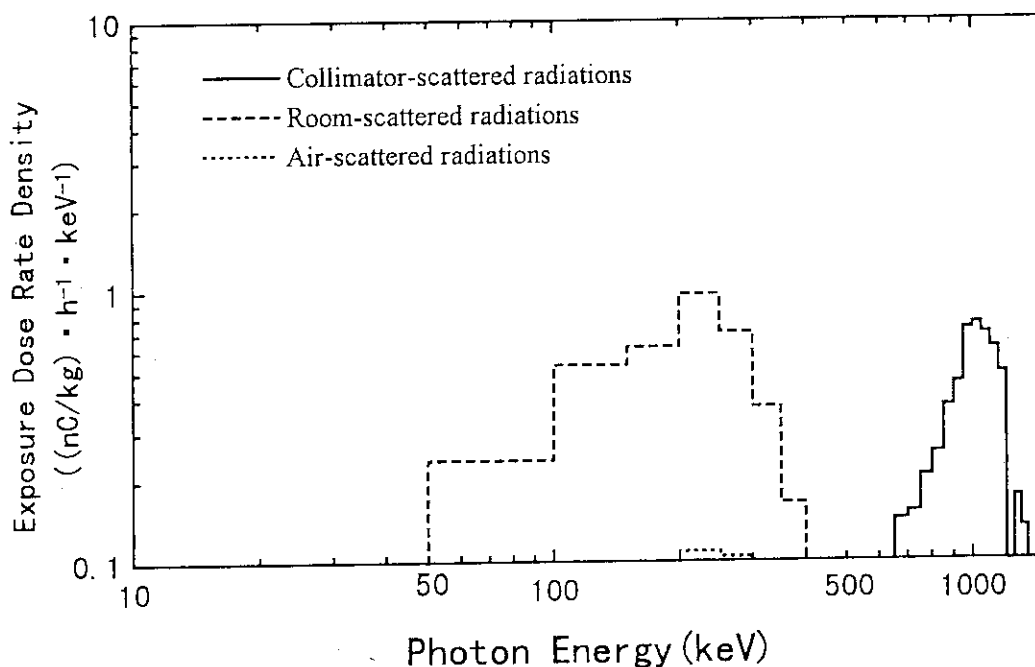


Fig.20 Spectral distributions of exposure of scattered radiations in No.1 room with  $^{60}\text{Co}$  source. The source-to-detector distance is 2.0m. (measured)

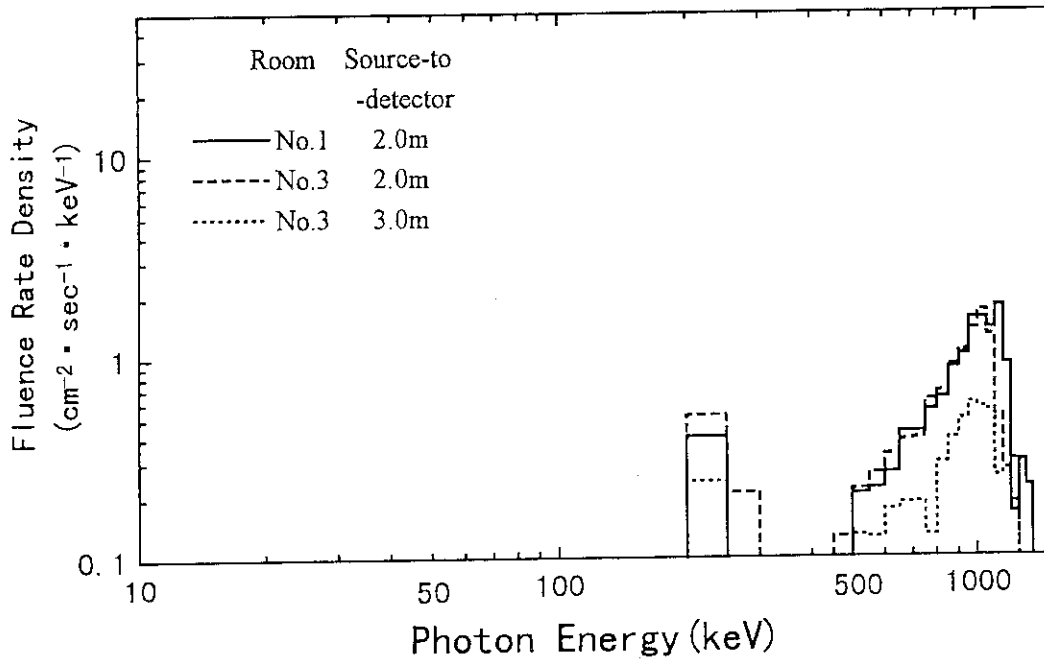


Fig.21 Spectra of collimator-scattered radiations with  $^{60}\text{Co}$  source. (measured)

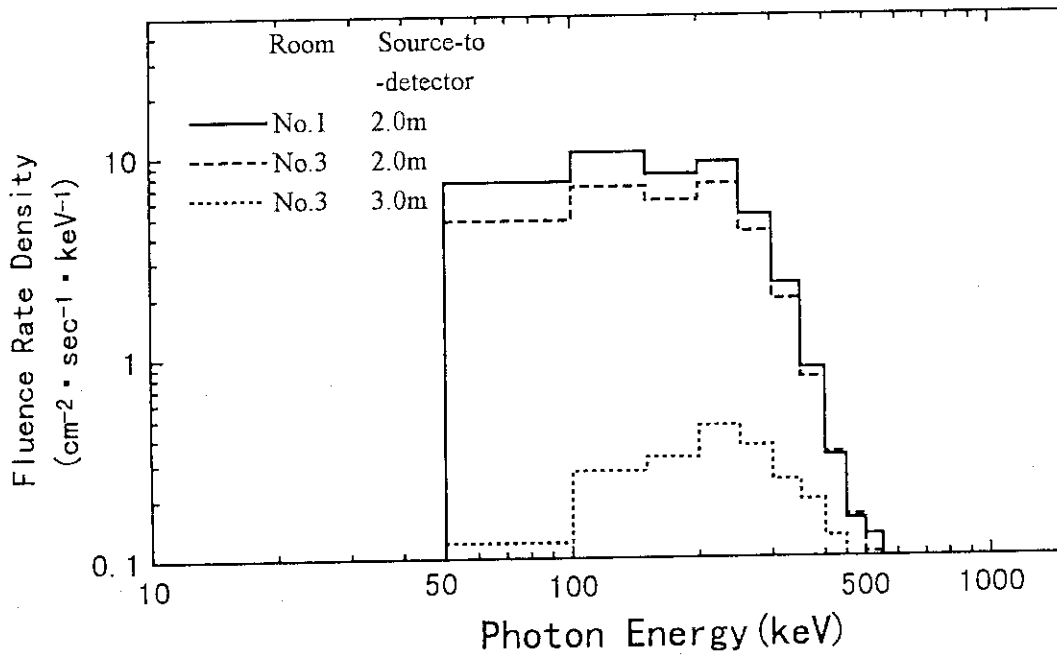


Fig.22 Spectra of room-scattered radiations with  $^{60}\text{Co}$  source. (measured)



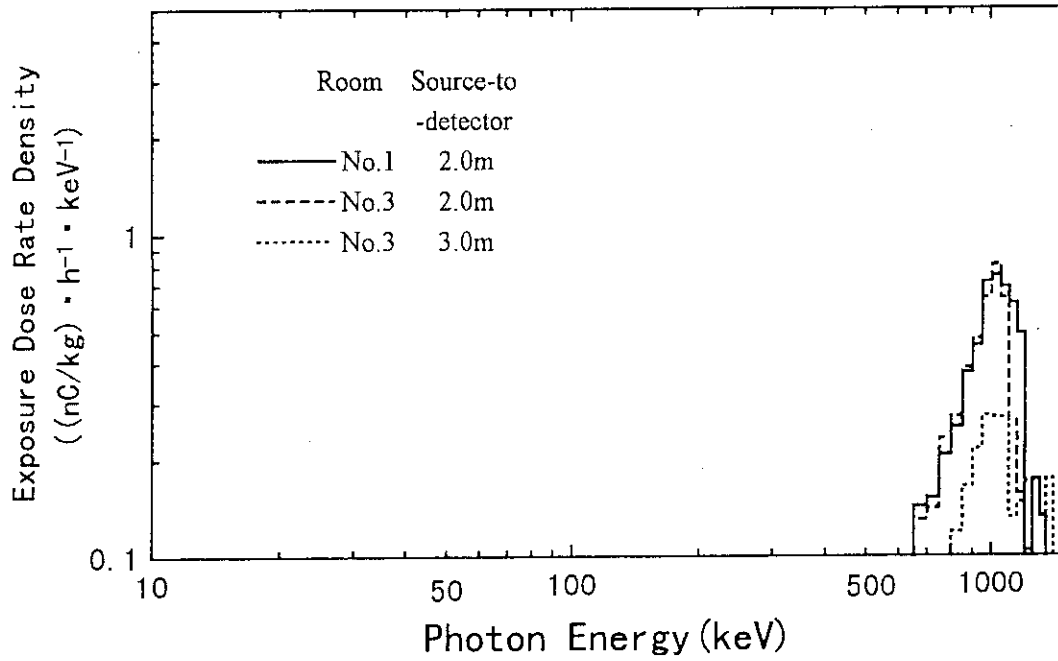


Fig.23 Spectral distributions of exposure of collimator-scattered radiations with <sup>60</sup>Co source. (measured)

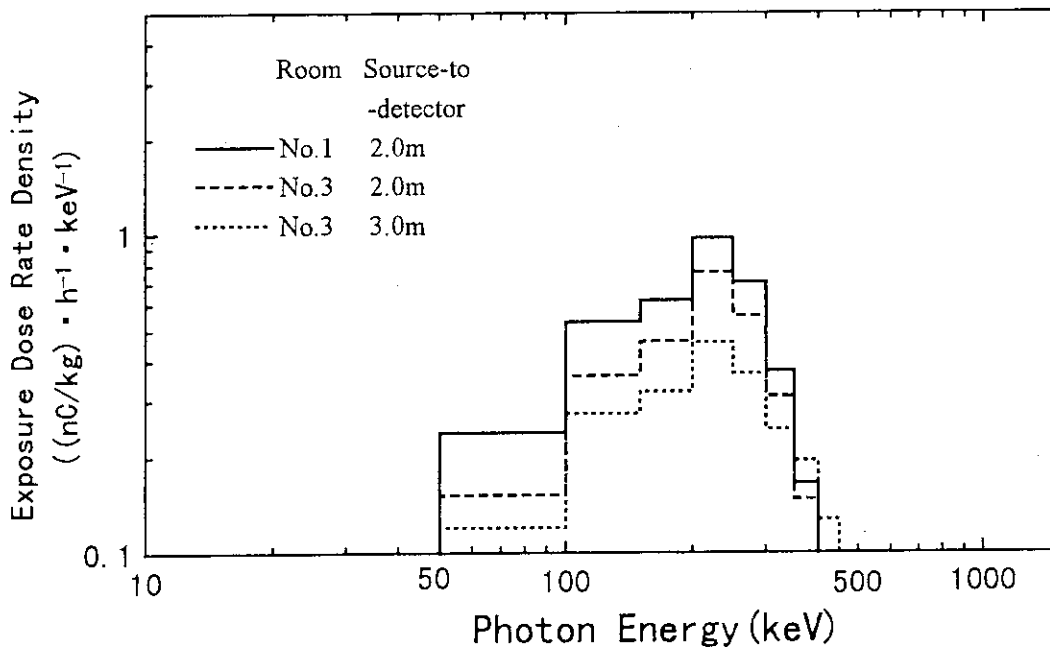


Fig.24 Spectral distributions of exposure of room-scattered radiations with <sup>60</sup>Co source. (measured)

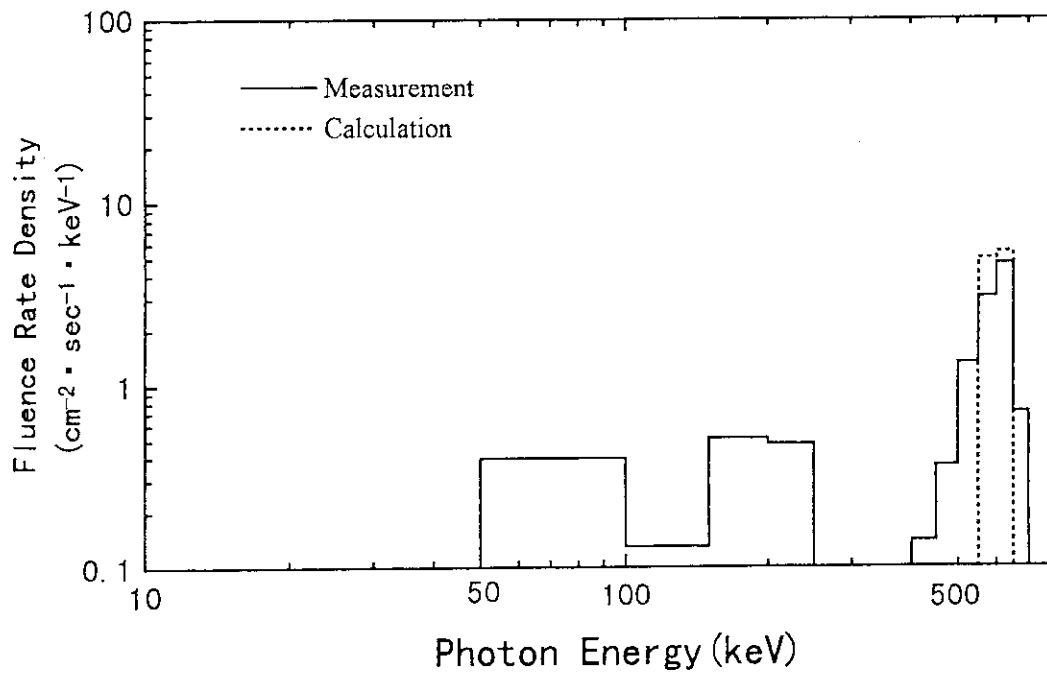


Fig.25 Spectra of collimator-scattered radiations in No.1 room with  $^{137}\text{Cs}$  source. The source-to-detector distance is 2.0m.

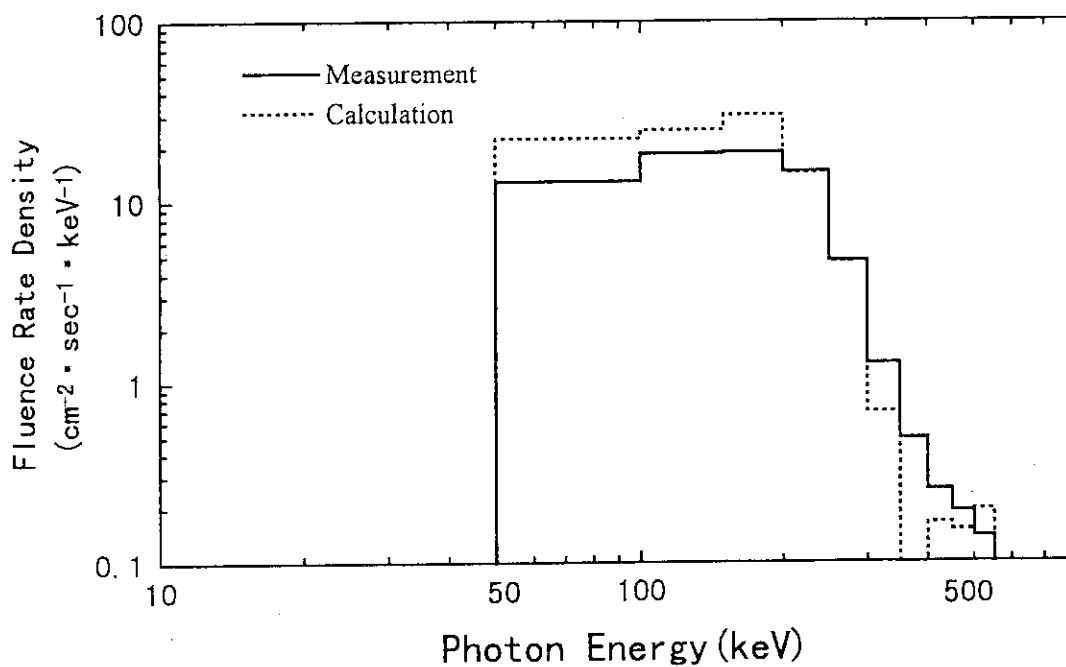


Fig.26 Spectra of room-scattered radiations in No.1 room with  $^{137}\text{Cs}$  source. The source-to-detector distance is 2.0m.

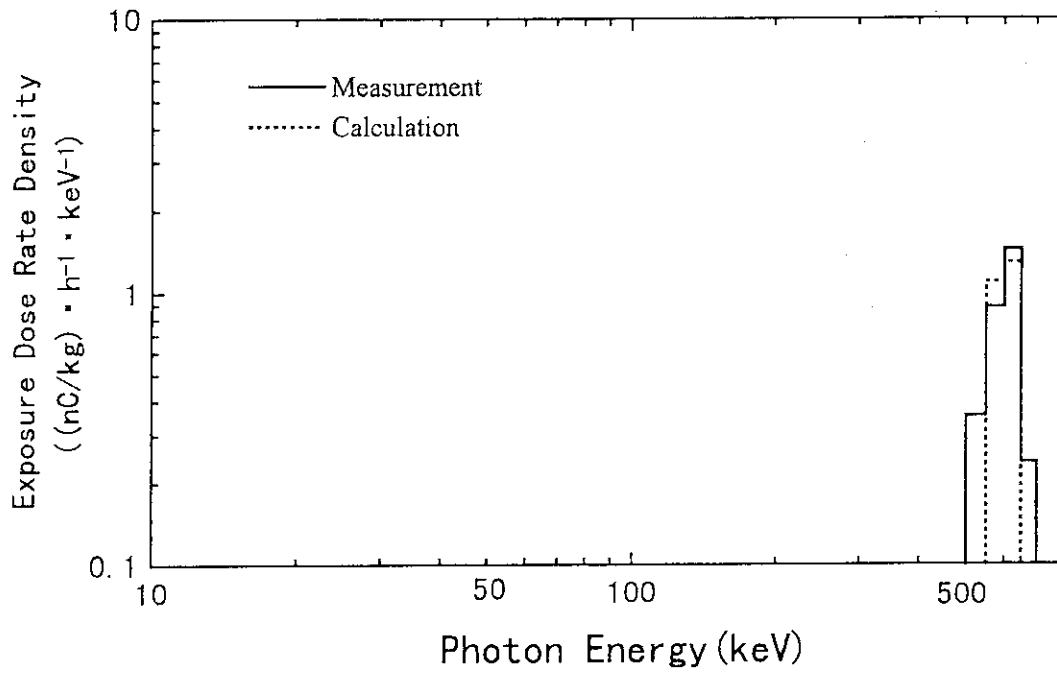


Fig.27 Spectral distributions of exposure of collimator-scattered radiations in No.1 room with  $^{137}\text{Cs}$  source. The source-to-detector distance is 2.0m.

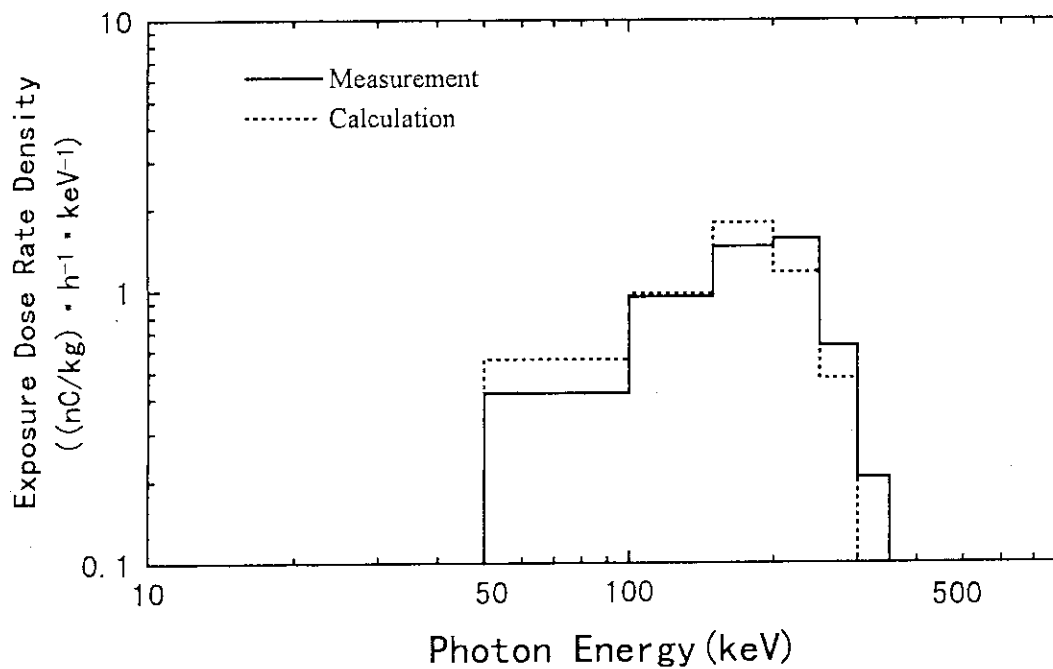


Fig.28 Spectral distributions of exposure of room-scattered radiations in No.1 room with  $^{137}\text{Cs}$  source. The source-to-detector distance is 2.0m.

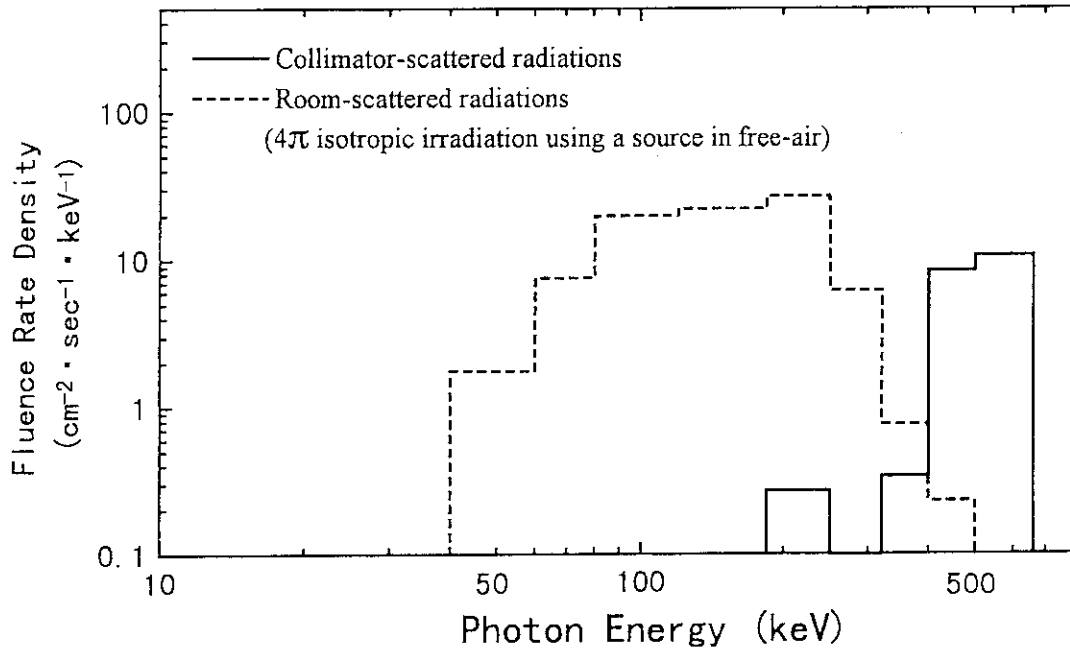


Fig.29 Spectra of scattered radiations in No.1 room with  $^{137}\text{Cs}$  source. The source-to-detector distance is 2.0m. (calculated)

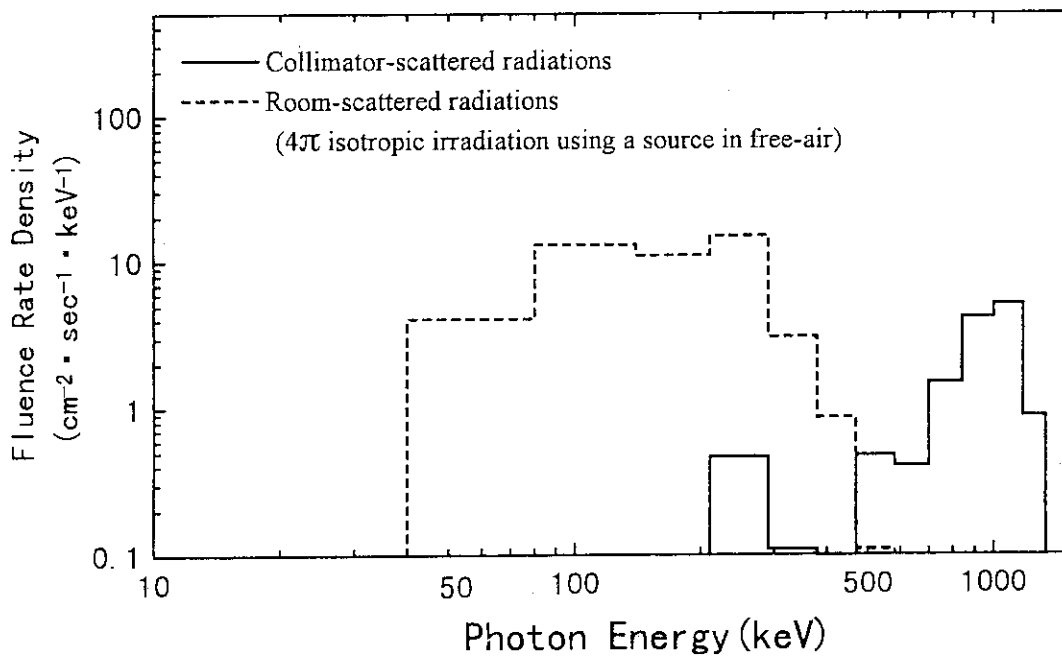


Fig.30 Spectra of scattered radiations in No.1 room with  $^{60}\text{Co}$  source. The source-to-detector distance is 2.0m. (calculated)

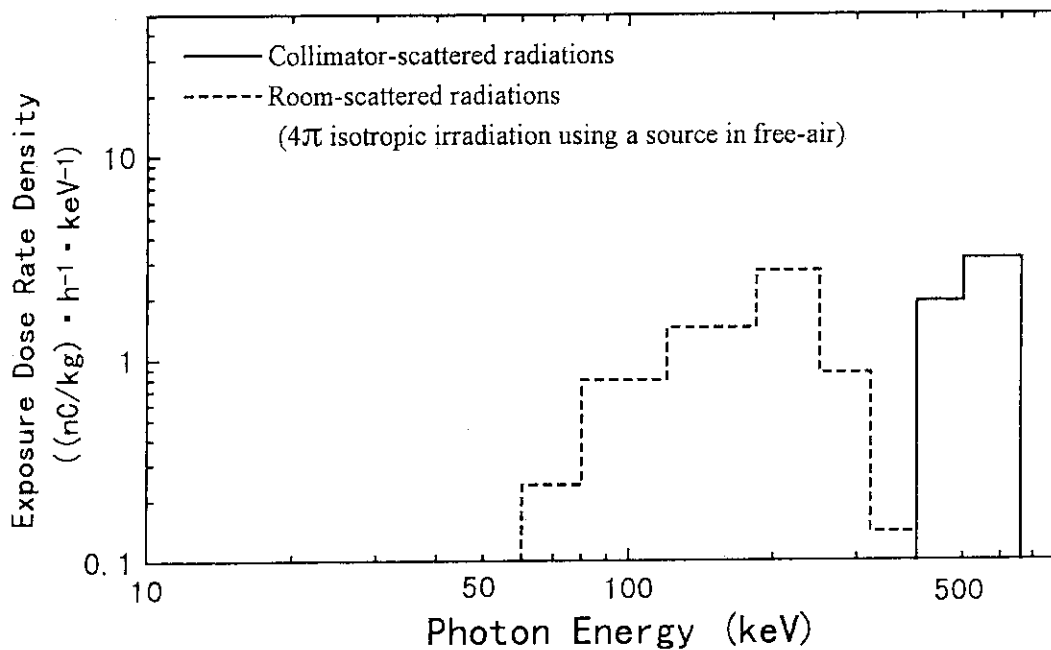


Fig.31 Spectral distributions of exposure of scattered radiations in No.1 room with <sup>137</sup>Cs source. The source-to-detector distance is 2.0m. (calculated)

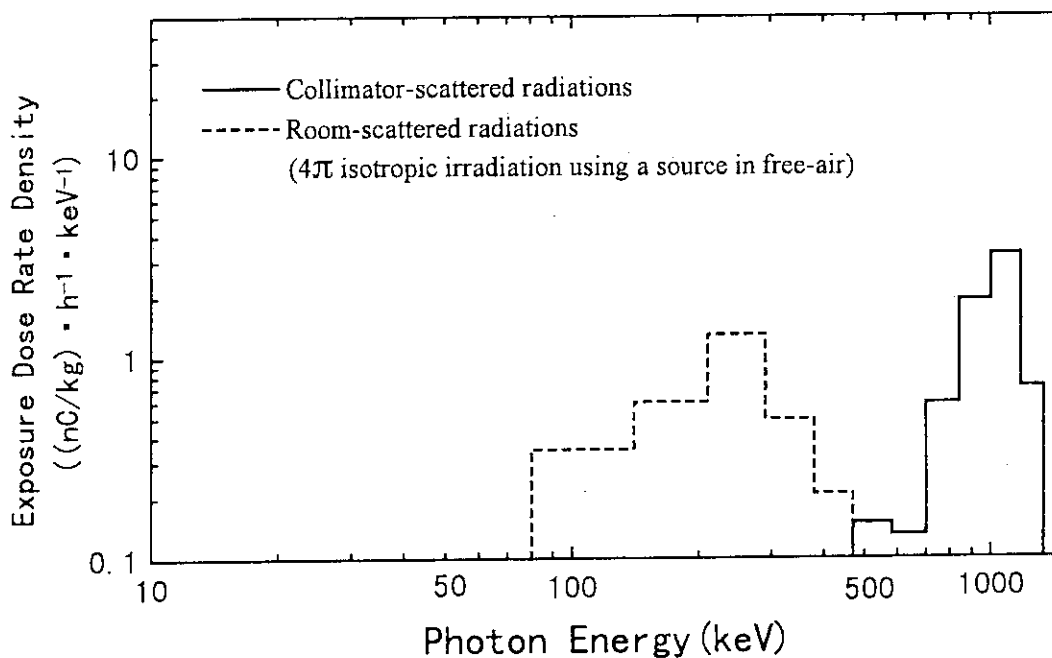


Fig.32 Spectral distributions of exposure of scattered radiations in No.1 room with <sup>60</sup>Co source. The source-to-detector distance is 2.0m. (calculated)

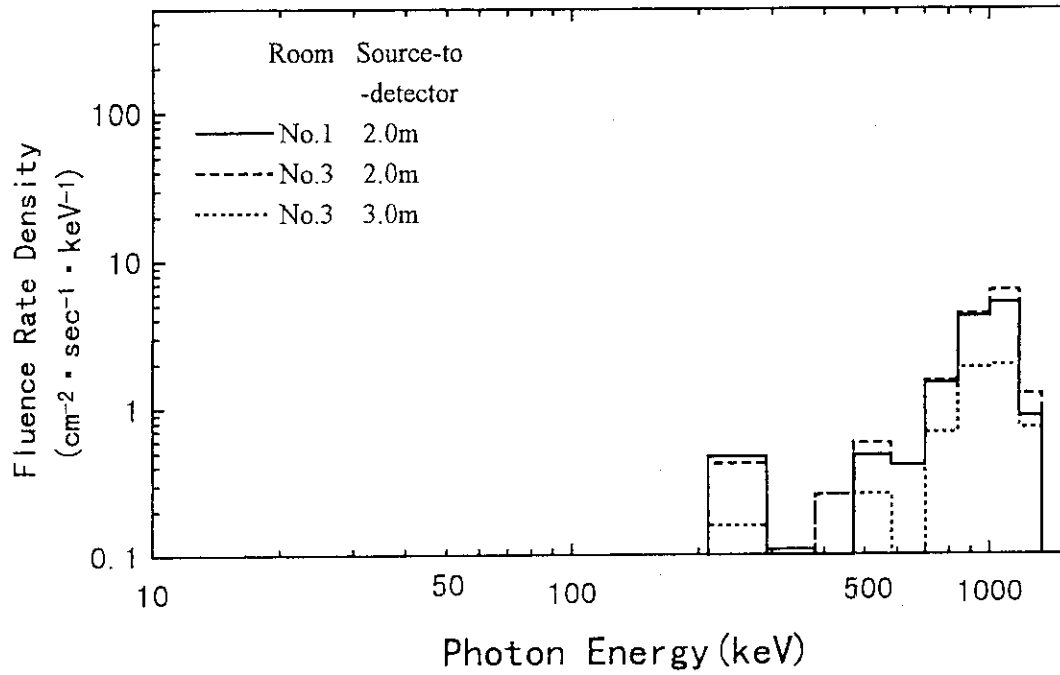


Fig.33 Spectra of collimator-scattered radiations with  $^{60}\text{Co}$  source. (calculated)

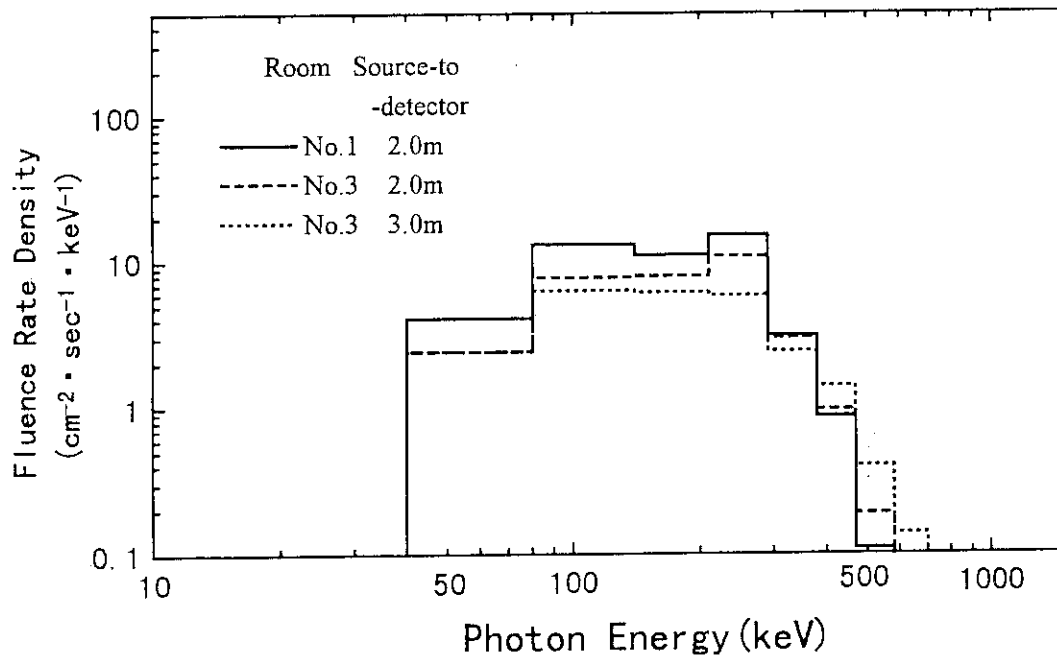


Fig.34 Spectra of room-scattered radiations for the  $4\pi$  isotropic irradiation using a source in free-air with  $^{60}\text{Co}$  source. (calculated)

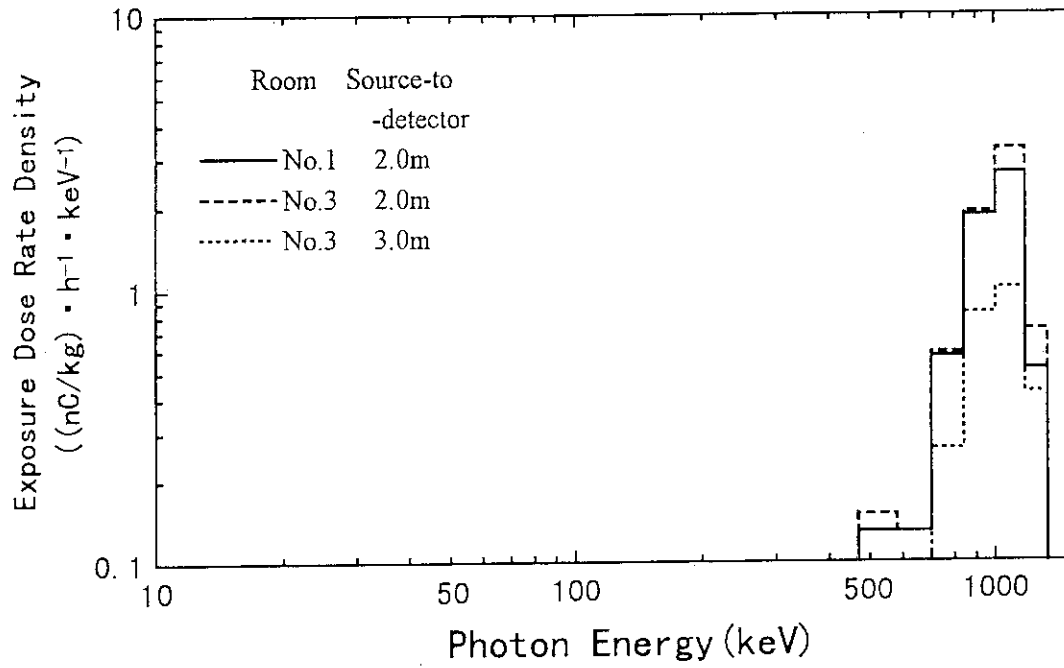


Fig.35 Spectral distributions of exposure of collimator-scattered radiations with  $^{60}\text{Co}$  source. (calculated)

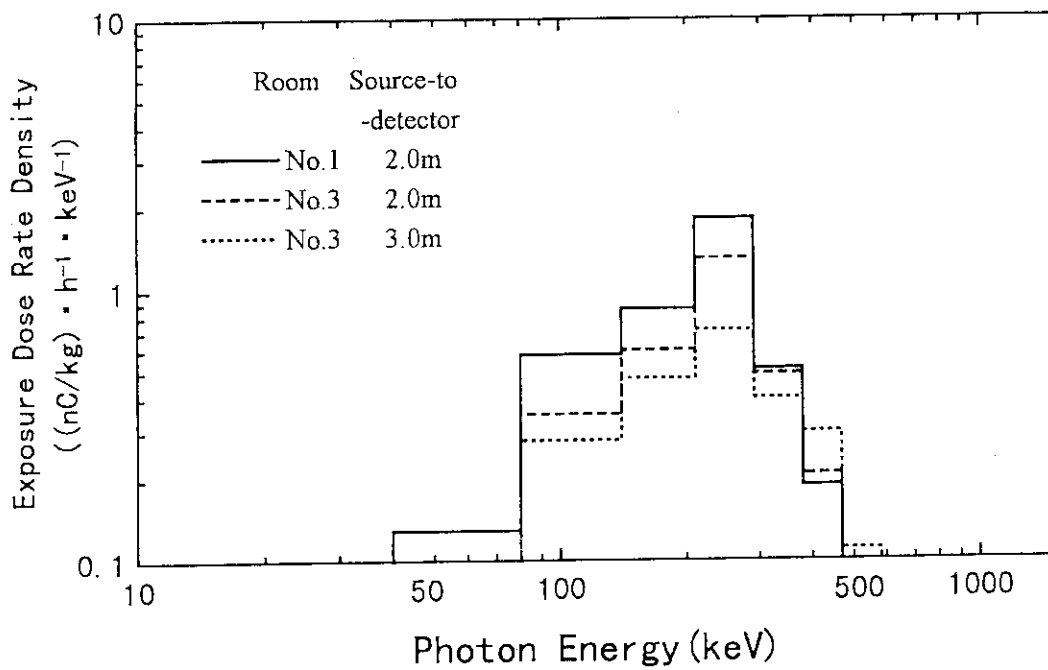


Fig.36 Spectral distributions of exposure of room-scattered radiations for the  $4\pi$  isotropic irradiation using a source in free-air with  $^{60}\text{Co}$  source. (calculated)

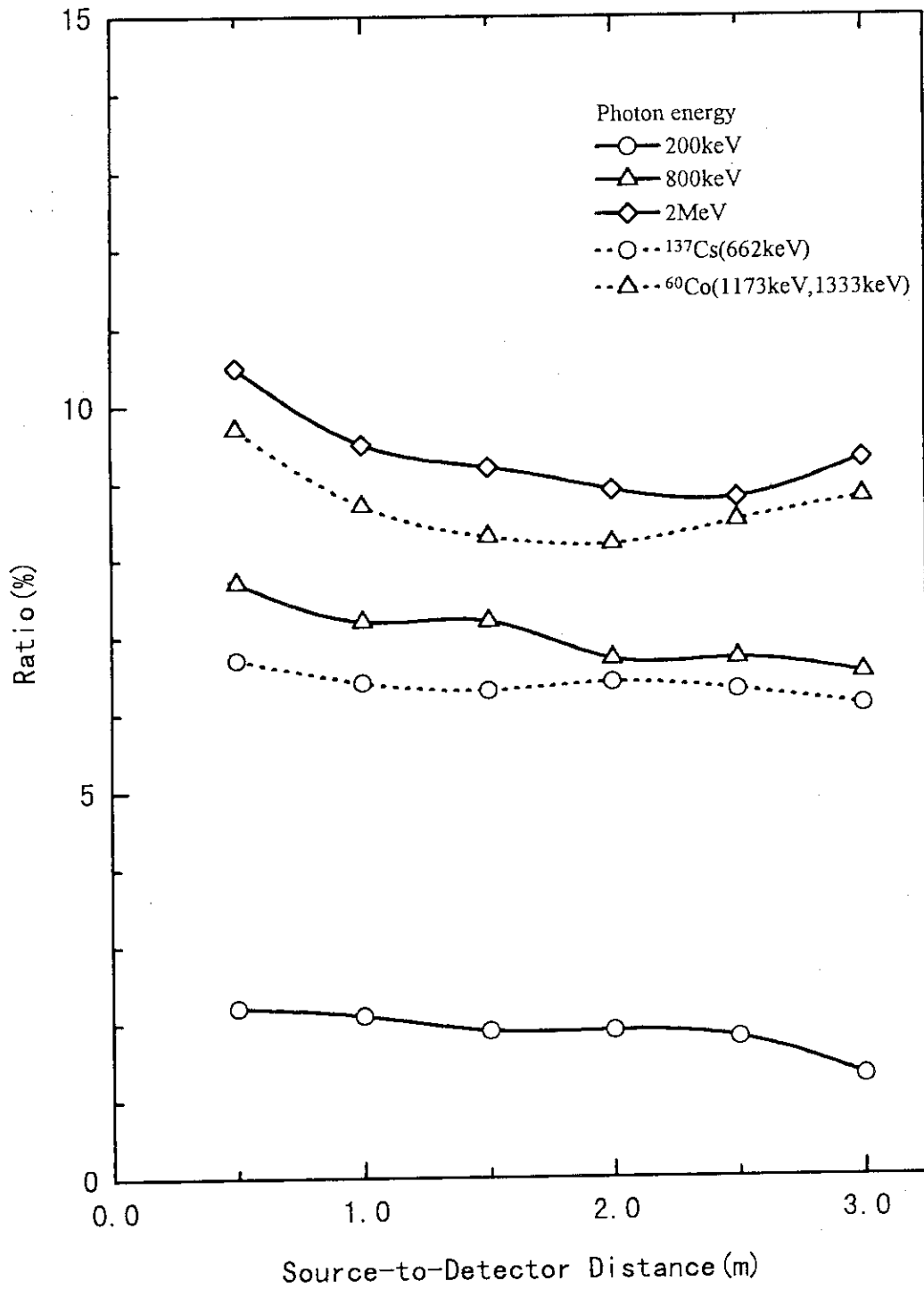


Fig.37 Ratio of exposure by collimator-scattered radiations to that by all radiations.



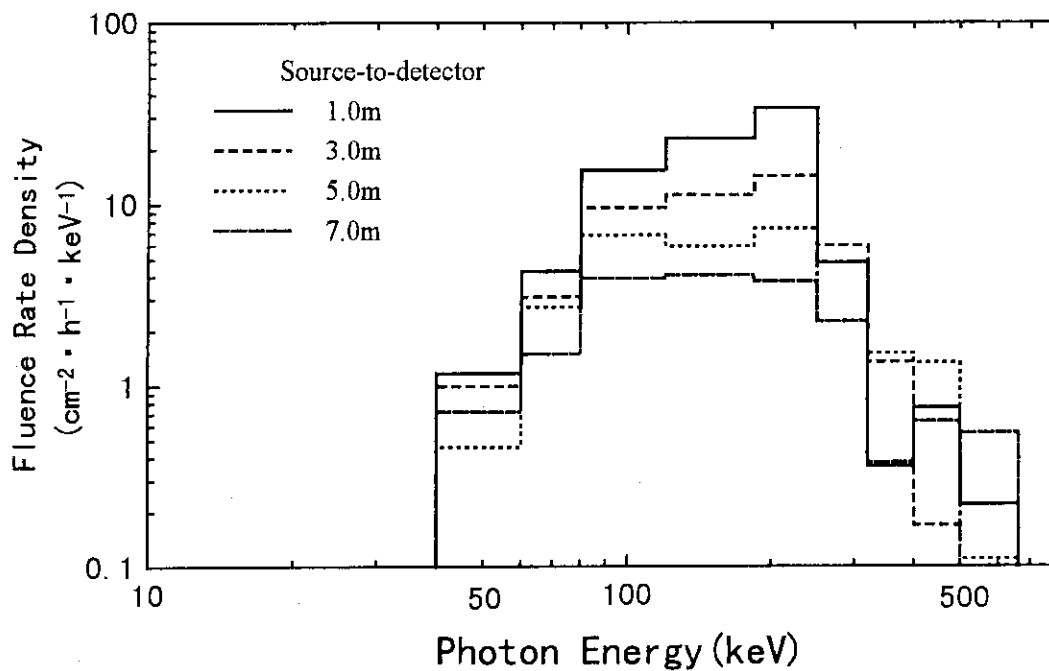


Fig.38 Spectra of room-scattered radiations for the  $4\pi$  isotropic irradiation using a source in free-air in No.3 room with  $^{137}\text{Cs}$  source. (calculated)

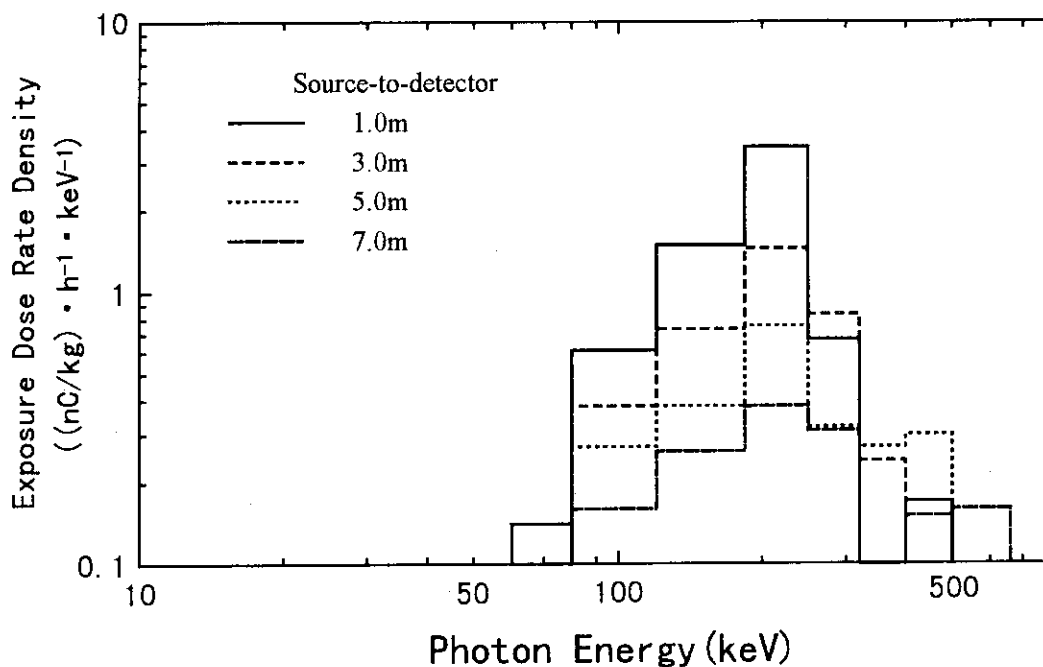


Fig.39 Spectral distributions of exposure of room-scattered radiations for the  $4\pi$  isotropic irradiation using a source in free-air in No.3 room with  $^{137}\text{Cs}$  source. (calculated)