

本資料は 年 月 日付けで登録区分、  
変更する。

01.10.-4

[技術情報室]

# 遮蔽安全解析コードの検証研究（Ⅱ）

（動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書）

1995年3月

北海道大学 工学部 原子工学科

沢村貞史

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩等がないように管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33  
動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所  
技術開発推進部・技術管理室

## 遮蔽安全解析コードの検証研究（Ⅱ）

沢村 貞史\*

### 要 旨

核燃料施設からの直接線およびスカイシャイン線による線量評価は、施設の環境評価項目の1つに位置づけられており、遮蔽計算コードにより解析が行われている。しかし、ベンチマークデータが極めて少ないこと等もあり、評価においては十分な安全裕度が見込まれている。このため、合理的な評価を行うためには、スカイシャイン線に係わる実測データの取得が不可欠である。本研究は、施設からのスカイシャイン線のベンチマークデータの取得および各種計算コードの検証を目的として実施するものである。今年度は、同期方式によるパルス状放射線測定装置を作製し、北大45MeV電子線型加速器施設内の線量分布測定を実施することにより、作製した装置がスカイシャイン線による線量測定に有効であることを実験的に明らかにすると共に汎用ユーザーズ版EGS4による北大45MeV施設のスカイシャイン線評価への適用を検討するため以下の研究を行った。

- 同期法によるパルス状放射線測定装置を作製し、ゲート動作の有効性とバックグラウンド低減率の測定等の基礎実験を行った。その結果、ゲートパルス幅が $10\mu\text{s}$ 時において約 $1.5 \times 10^{-3}$ の低減率を得た。
- 北大45MeV電子線型加速器施設内の建て屋内外の線量分布測定を実施した。その結果、バックグラウンドレベルの $1/20$ – $1/250$ のレベルの施設からの放射線を短時間で精度良く評価できることが実証された。
- EGS4による北大45MeV電子線型加速器施設からのスカイシャイン線評価のためのシミュレーションを行った。その結果、約400m以遠において多重散乱の効果が大きくなることが示された。

---

※ 本報告書は、沢村貞史が動力炉・核燃料事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号・・・・・・：060D0130

事業団担当部課室：東海事業所 安全管理部 安全技術課 野尻一郎

\* 北海道大学 工学部 原子工学科



## Demonstration Study on Shielding Safety Analysis Code (II)

Sadashi Sawamura\*

### Abstract

Dose evaluation for direct radiation and skyshine from nuclear fuel facilities is one of the environment evaluation items. This evaluation is carried out by using some shielding calculation codes. Because of extremely few benchmark data of skyshine, the calculation has to be performed very conservatively. Therefore, the benchmark data of skyshine and the well-investigated code for skyshine would be necessary to carry out the rational evaluation of nuclear facilities.

The purpose of this study is to obtain the benchmark data of skyshine and to investigate the calculation code for skyshine. In this fiscal year, the followings are investigated ;

- Construction of a pulsed radiation measurement system due to the gated counting method,
- Using the system, carried out the radiation monitoring near and in the facility of 45MeV linear accelerator installed at Hokkaido University,
- Simulation analysis of the skyshine due to the leakage radiation from the 45-MeV linear accelerator facility by using the EGS4 code.

---

Work performed by Sadashi Sawamura under contract with Power Reactor  
and Nuclear Fuel Development Corporation

PNC Liaison: Ichiro Nojiri

Safety Technology Development section, Health and Safety Division,  
Tokai Works

\* Department of Atomic Science and Nuclear Engineering,  
Faculty of Engineering, Hokkaido University

目次

1	はじめに	1
2	同期法によるパルス状放射線測定装置の作成	2
2.1	作製したパルス状放射線測定装置とゲート動作	2
2.2	バックグランド低減率の測定	3
2.3	シンチレーション検出器の動作電圧とエネルギー校正	3
2.4	G(E)関数とその多項式近似	4
2.5	結果と考察	4
3	45MeV電子線形加速器施設内の線量測定	12
3.1	45MeV加速器施設の概観と測定点	12
3.2	制動X線発生用ターゲット	12
3.3	建て屋内外の線量分布測定	13
3.3.1	制御室における測定	13
3.3.2	建て屋外の線量分布	14
3.3.3	建て屋内の廊下における線量分布	14
3.4	結果と考察	29
4	EGS4による45MeVライナック施設からのスカイシャイン評価	29
4.1	制動放射線の発生とその角度依存性	29
4.1.1	計算のための幾何学的形状と体系	29
4.1.2	計算結果	29
	a)光子の角度分布計算	29
	b)電子ビームエネルギーに対する光子のエネルギー	29
4.2	建屋内の制動放射線の分布	30
4.2.1	計算のための幾何学的形状と体系	30
4.2.2	計算結果	30
4.3	45MeVライナックから発生するスカイシャイン計算	32
4.3.1	計算のための幾何学的計算体系	32
4.3.2	計算結果	32
	a)線源から各点に到達する光子のフルーエンス	32
	b)空気中での吸収線量計算	32
4.4	結果と考察	33
4.4.1	制動放射線の角度依存性	33
4.4.2	煙突ダクト内における制動放射線の分布	33
4.4.3	スカイシャイン評価	33
	a)各計算点における光子スペクトル	33
	b)距離および高度に対する線量評価	34
4.5	まとめ	35
	参考文献	51

## 1. はじめに

核燃料施設の安全評価では、評価のモデル化、パラメータの設定等において、評価手法の精度に応じて安全裕度を考慮している。このため、評価精度および信頼性の向上を図ることは、核燃料施設の実用化臭い重要な課題となっている。

核燃料施設からの直接線およびスカイシャイン線による線量評価は、施設の環境評価項目の1つに位置づけられており、遮蔽計算コードにより解析が行われている。

従来の解析では、ベンチマークデータが極めて少ないこともあり、その評価においては十分な安全裕度を見込んでいる。したがって、今後、合理的な評価を行うにあたっては、スカイシャイン線に係わる実測データの取得が不可欠である。

このため、本研究は、施設からのスカイシャイン線についてのベンチマークデータの取得及び各種コードによる検証計算を目的として実施するものである。今年度はスカイシャイン線の実験的研究に適した同期方式によるパルス状放射線測定装置を作製し、北大45MeV電子線型加速器施設内において、バックグラウンドレベル以下に減衰している加速器からの放射線による線量分布測定し、スカイシャイン線測定に対する装置の有効性を明らかにすることおよび汎用ユーザーズ版EGS4を用いて施設漏洩放射線によるスカイシャイン線のシミュレーションを行った。

本報告書の構成は以下のとおりである。

まず、第2章では同期法によるパルス状放射線測定装置の作製とその基本的な動作に関する実験結果について記す。ゲート動作の確認、バックグラウンド減衰率、エネルギー分解能、エネルギー校正実験、スペクトル線量変換演算子とその多項式近似、線量計算について示す。

第3章では、作製した装置を用いて、加速器からの放射線がバックグラウンドレベルの1/250程度の微弱な場合でも短時間で測定が可能であること、その結果からスカイシャイン線の測定に作製した装置が有効であることを示す。建て屋内外における線量分布から排気筒が漏洩放射線の強度や分布に大きく影響していることを示す。

第4章では、汎用ユーザーズ版EGS4を用いて北大45MeV電子線型加速器からの制動X線の加速器室内の分布、排気筒周辺ダクト内の散乱X線のエネルギー分布、角度分布の計算およびこの散乱線を線源とするスカイシャイン線のシミュレーション解析結果を示す。

## 2. 同期法によるパルス状放射線測定装置の作製

スカイシャイン線の実験的研究のため、バックグラウンド放射線レベル以下の微弱放射線の測定も可能なパルス状放射線測定装置を作成した。本章においては、作製した装置の概要とその特性実験結果について記す。

### 2.1 作製したパルス状放射線測定装置とゲート動作

図2.1に作製したパルス状放射線測定装置のブロック図を示す。検出器には感度の高い3"  $\phi$   $\times$  3" NaI (Tl) シンチレーション検出器を用いている。検出器からの信号は増幅されたのち、マイクロコンピュータによって制御されている波高分析器に送られる。一方、この信号は波形整形された後、加速器からのゲートトリガ信号とのコインシデンス回路に送られるか、アンチコインシデンス回路に送られる。コインシデンス回路の出力パルスは加速器からの放射線としては計数される。また、アンチコインシデンス回路の出力パルスはバックグラウンド放射線として計数される。ゲートトリガ信号は波高分析装置のコインシデンス動作のためにもしようされる。図中の波線部は加速器からの放射線の到来時間分布を測定するための回路である。同期法におけるバックグラウンド低減のためのゲート動作は実験開始時にオシロスコープによって確認される。加速器運転時に、本装置によって観測されたゲートパルス波形と放射線パルス波形を図2.2に示す。ゲートパルス幅は30  $\mu$ sである。ゲートパルス内の放射線パルス波形が加速器からの放射線によるものであり、コインシデンス回路の出力となる。図中にはバックグラウンド放射線によるパルス波形も掃引後50  $\mu$ s時にみられる。このパルスはアンチコインシデンス回路の出力となる。作製した装置の各部をphoto 2.1、photo 2.2 に示す。コンピューターと波高分析装置を除いた他の機器は一つの電源ビンの中に納められており、空間分布を測定するときに他の測定点へ移動し易くなっている。

### 2.2 バックグラウンド低減率の測定

図3.3にバックグラウンド低減率 $\alpha$ とゲート幅の関係を示す。加速器の繰返し周波数は150Hzで実験した。ゲートパルスと一致するときのみ検出器信号を計数する場合のバックグラウンド計数率をN<sub>gate</sub>、ゲートパルスが存在せず、検出器信号のすべてを計数する場合のバックグラウンド計数率をN<sub>no gate</sub>とするとき、 $\alpha$ は

$$\alpha = (N_{\text{gate}} / N_{\text{no gate}}) = (\text{ゲートパルス幅}) \times (\text{繰返し周波数})$$

で与えられる。この実験においては、加速器からゲートトリガ信号のみが発生し、電子ビームは発生しない様にして実験している。繰返し周波数が一定のときには、 $\alpha$ はゲート幅に比例することになる。図3.3その様子をよく示している。上式より、繰返し周波数が150Hz、ゲート幅が $10\mu\text{s}$ のとき、 $\alpha$ は $1.5 \times 10^{-3}$ と計算される。測定値はよく一致している。

### 2.3 シンチレーション検出器の動作電圧とエネルギー校正

エネルギー分解能が最適となるように、シンチレーション検出器（アロカ社製、ND-1271dV）内の光電子増倍管（R594型）の動作電圧と増幅器のゲインを調整した。実験は $^{60}\text{Co}$ 線源を用いて行った。表2.1にその結果を示す。エネルギー分解能は8.6-8.9%と求められた。印可電圧には大きく依存しないことが分かったが、測定したい放射線のエネルギー範囲や増幅器の入力端におけるダイナミックレンジから、光電子増倍管の印可電圧を1000Vに決定した。図2.4にエネルギー校正曲線を示す。実験は $^{60}\text{Co}$ の2つの光電ピークおよび $^{137}\text{Cs}$ の光電ピークを用いて行った。図に示すように良い直線性が得られた。エネルギー値とチャンネル数とが1対1に対応するように校正した。

### 2.4 G (E) 関数とその多項式近似

NaI (Tl) 検出器の波高分布にG (E) 関数を作用させることにより照射線量率Rを求めた。すなわち、

$$R = \int N(E) \cdot G(E) dE$$

ここで、 $N(E)$ は種々のエネルギーの $\gamma$ 線によって与えられた波高分布、 $G(E)$ は宮永らによるスペクトル線量変換演算子である。宮永らが求めた3"  $\phi \times 3$ " NaI (Tl) シンチレーターに対するG (E) 関数を図2.5に示す。本実験においては、加速器からの漏洩放射線を測定対象としているため、その主たるエネルギー範囲は0.1-2MeV程度である。上記の積分計算を簡単化するために、このエネルギー範囲内のG (E) 関数を以下の多項式によって近似した。

$$y = (a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3) \times 10^{-3}$$

ここで  $a_0 = -2.330306 \times 10^{-2}$



$$a_1 = 7.601230 \times 10^{-1}$$

$$a_2 = 9.418725 \times 10^{-1}$$

$$a_3 = -3.172671 \times 10^{-1}$$

である。その結果を図2.6に示す。図中の実線が多項式による計算値である。このエネルギー範囲内では良く  $G(E)$  関数を表している。

## 2.5 結果と考察

作製したパルス状放射線測定装置のバックグラウンド低減率は、ほぼ計算で予測される値を示し、正常なゲート動作が行われていることが確認された。コインシデンス回路とアンチコインシデンス回路を設置することにより、加速器からの放射線とバックグラウンド放射線を同時に測定することが可能となった。ゲートトリガ信号には、加速器制御卓から得られるエミッション信号が用いられた。その伝送には200m同軸ケーブル(RG/58U)が使用されたが、スカイシャイン測定に必要なより長い伝送にもエミッション信号は充分トリガ信号として利用できることが分かった。

$G(E)$  関数を多項式で近似したが、その結果、80 keV以下の低エネルギー側における寄与を無視することとなった。今後はこの点を改善する必要がある。

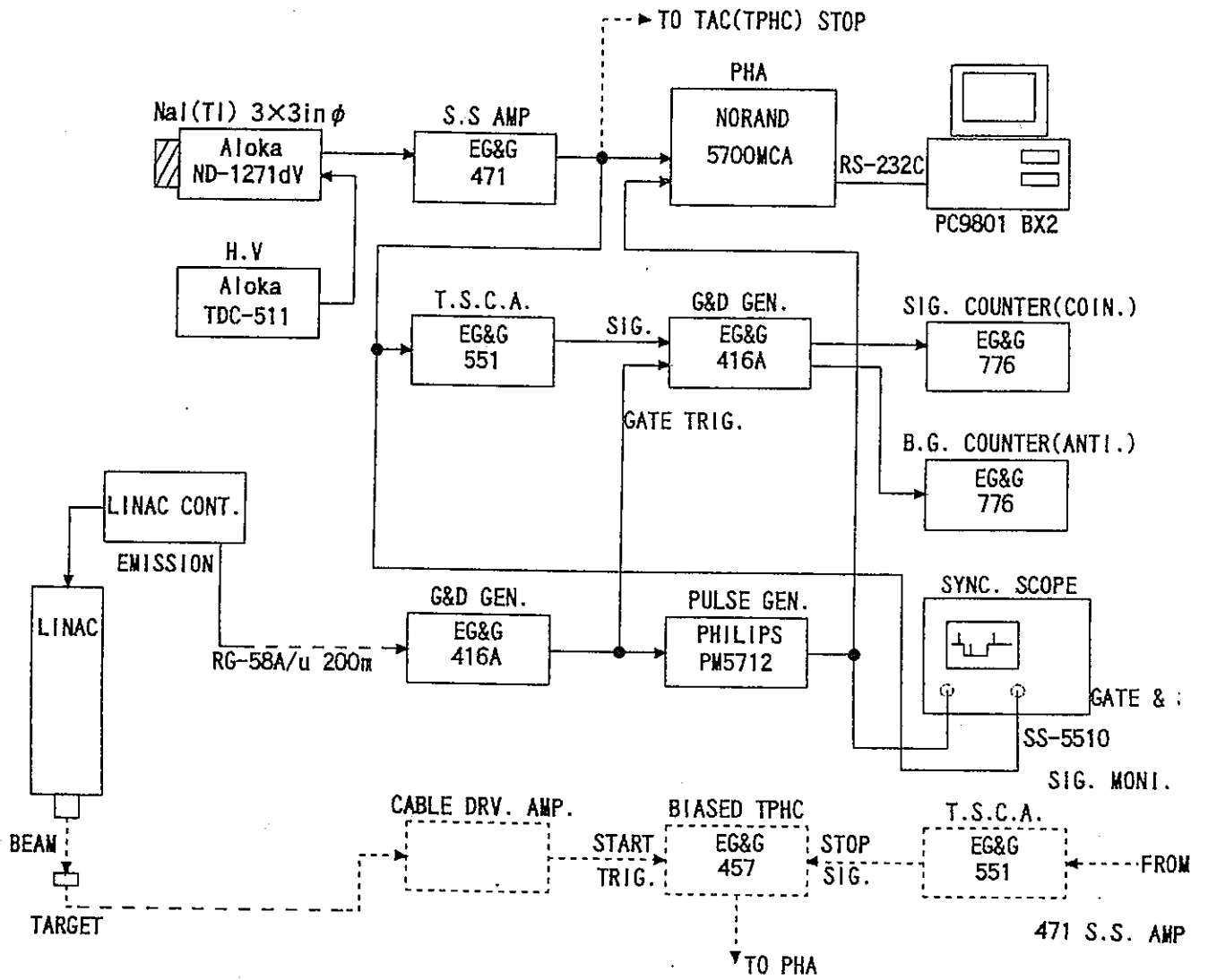


図 2. 1 同期法によるパルス状放射線測定装置のブロック図

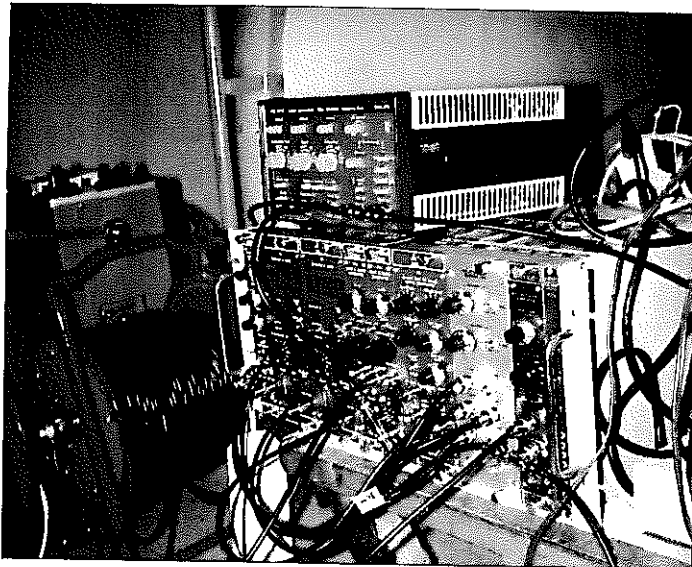


photo 2.1 パルス状放射線測定装置

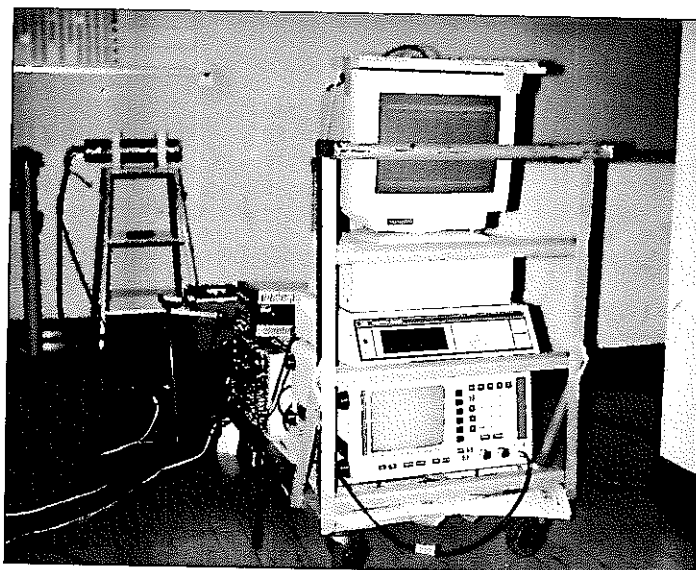


photo 2.2 波形解析装置とコンピュータ

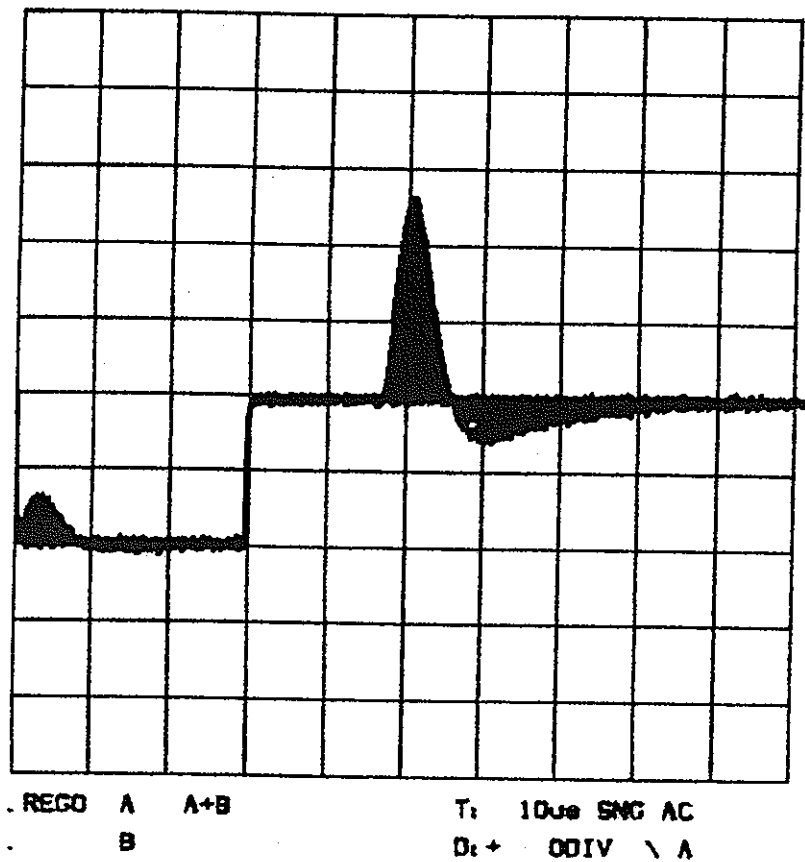


図 2. 2 ゲートパルス波形と放射線パルス波形  
横軸  $10\mu\text{s}$  縦軸 A:2V/div  
B:1V/div

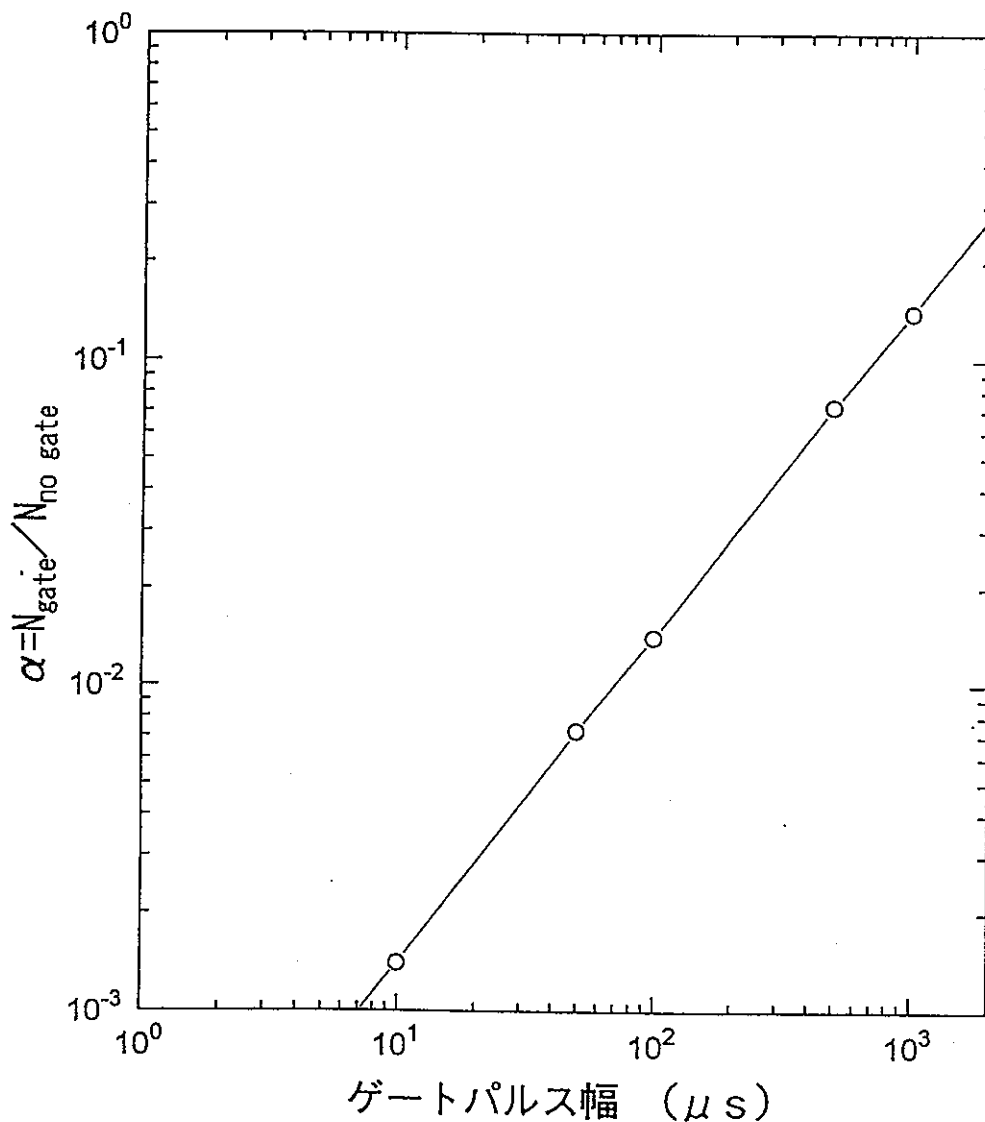


図 2. 3 バックグラウンド低減率のゲートパルス幅依存性

表 2. 1 光電子増倍管印加電圧とエネルギー分解能

印加電圧 [V]	増幅率		分解能 [%]
	coarse	fine	
1100	5.0	7.4	8.8
1000	5.0	14.3	8.6
900	10.0	14.3	8.95
800	50.0	6.4	8.7
700	100.0	7.4	8.85

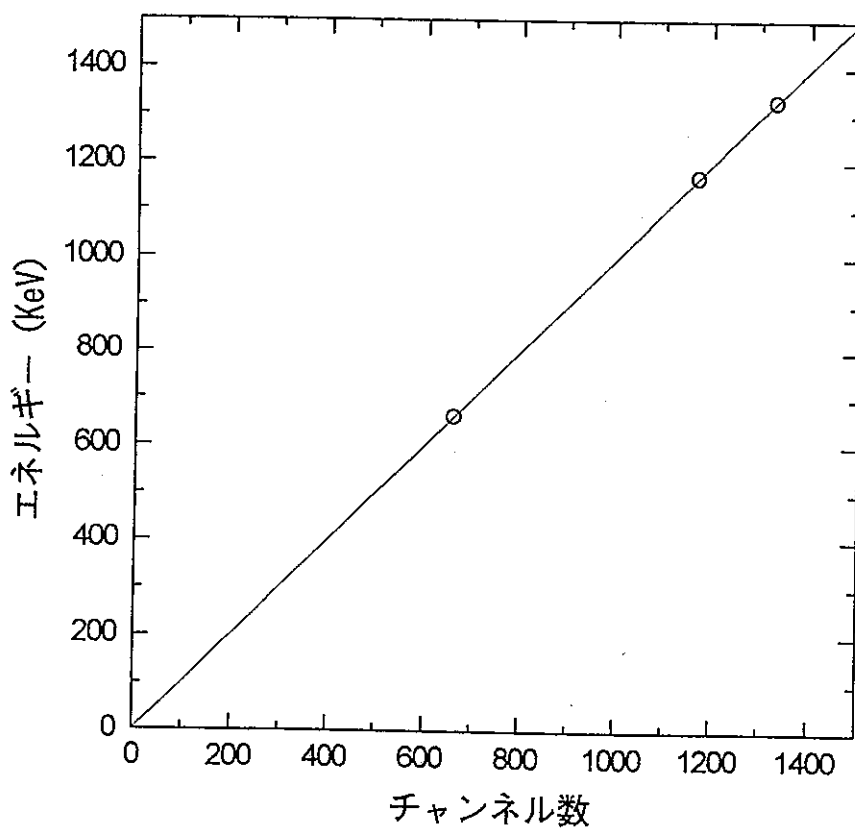


図 2. 4 3" φNaI(Tl)検出器のエネルギー校正

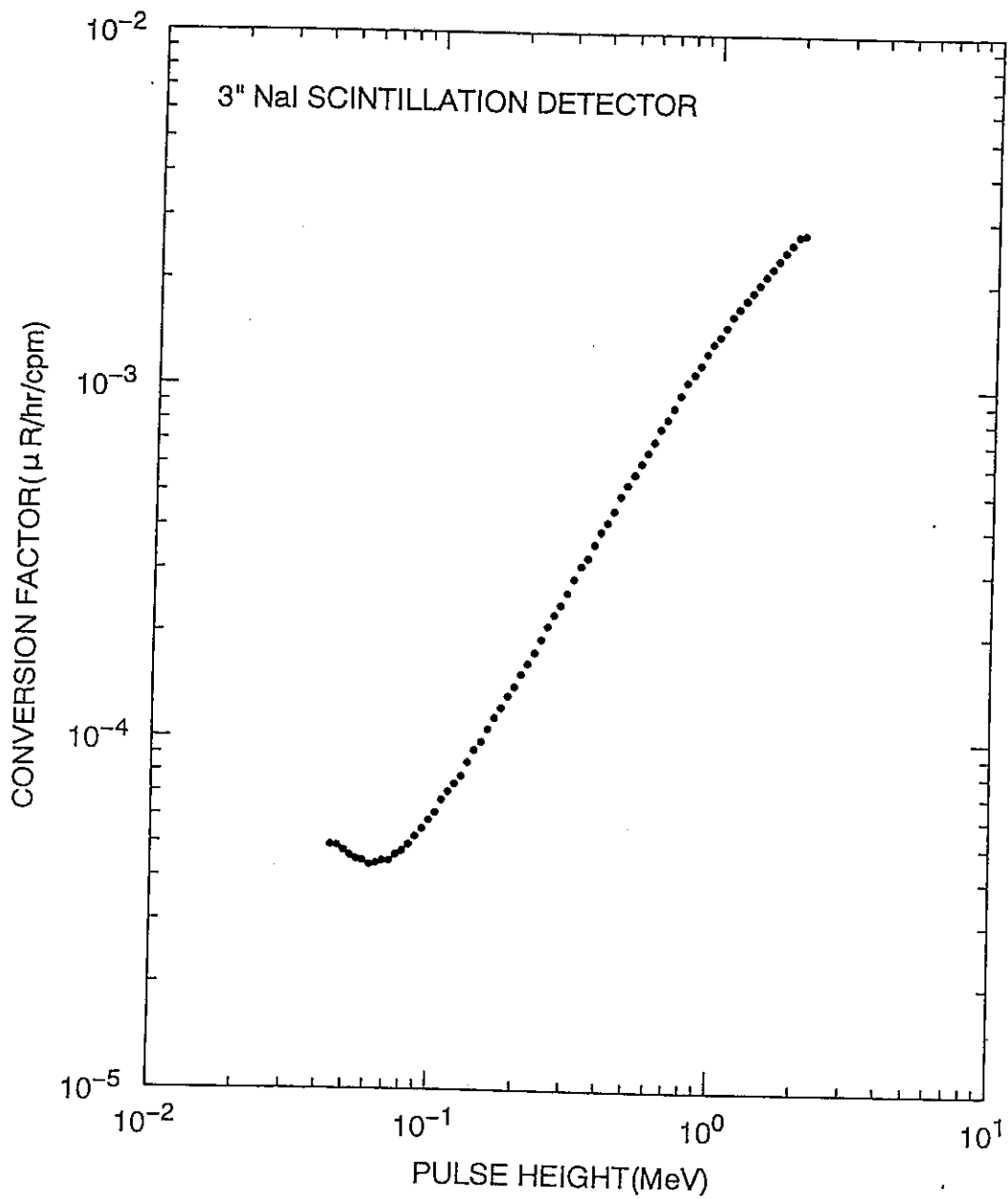


図 2. 5 3"  $\phi \times 3$ " NaI(Tl) の G(E) 関係  
(宮永一郎、森内茂：日本原子力学会誌，  
vol. 9, No8, p440(1967)より引用)

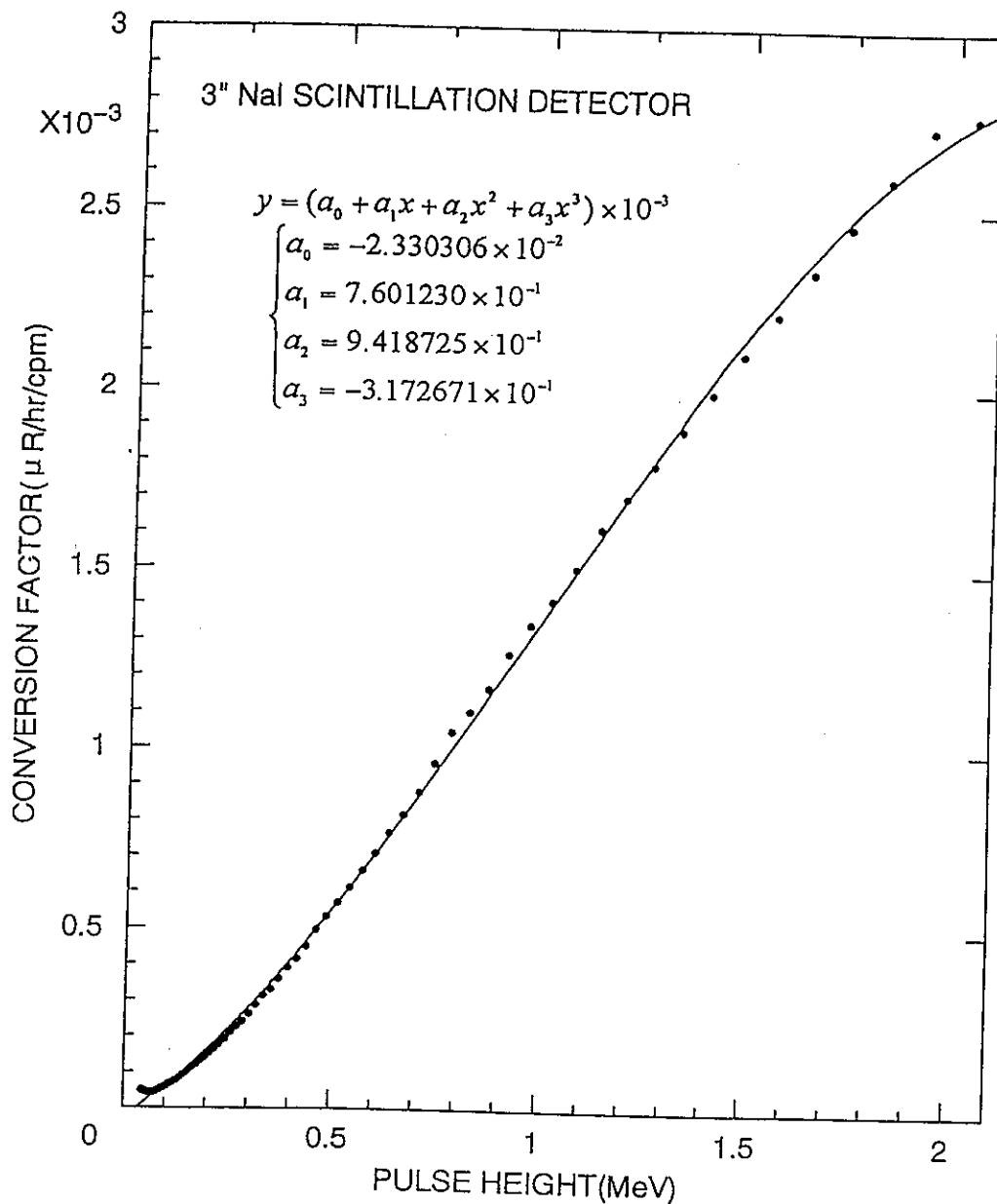


図 2. 6 G(E)関係の多項式yによる近似



### 3. 45MeV電子線型加速器施設内の線量測定

#### 3.1 45MeV加速器施設の概観と測定点

45MeV加速器施設と加速器の概観をPhoto 3.1、Photo 3.2に示す。加速器は地下に設置されている。しかし、加速器室には換気のための排気筒につながるダクトがある。この排気筒の周辺において漏洩放射線強度が強くなることが定期サーベイによって知られている。図3.1、図3.2に地下1階と地上1階の平面図を示す。地上1階には管理室や実験準備室、電子工作のためのエレクトロニクス室等があり、常時人が立ち入る場所となっている。表3.1に測定点および測定時間を示す。表中の各測定点に与えられた記号は図3.1、図3.2中に示した場所に対応している。表中の測定場所の欄に記されている数値は玄関扉を原点として、そこから測った距離を示す。+符号は建物内部を示す。加速器の運転条件は、いずれの測定においても、繰り返し周波数は100Hz、パルス幅は3 $\mu$ s、平均電流は36 $\mu$ Aである。尚、測定が冬季に行われたため、建物内外の温度差が大きく、参考のため測定点の温度も示した。

#### 3.2 制動X線発生用ターゲット

制動X線発生のために、鉛板（縦x横x厚さ=30cm x 30cm x 3mm）を3枚重ねたものをターゲット（厚さは合計9mmとなっている）として使用した。このターゲットを加速器のビーム出口（センター出口を使用）窓から1mの位置に設置した。ターゲットは熱負荷によって溶けないように強力なファンで、常時、空冷した。鉛の1放射距離は約0.56mmであり、45MeV電子に対しては、このときに最も多くの制動X線を発生することがEGS4モンテカルロシミュレーションを用いた著者らの計算によって知られている。しかし、以前に行われた同種の実験において9mm厚のターゲットを用いており、その実験結果と比較するために、本実験においても9mm厚の鉛ターゲットを用いた。

Photo 3.3に鉛ターゲットを示す。

#### 3.3 建て屋内外の線量分布測定

測定は地下1階にある制御室、地上1階にある廊下および建て屋外で行われた。シンチレーション検出器は地上1mに設置された（Photo 3.4）。制御室における測定は制御卓（Photo 3.5）前で行われた。廊下における測定は、装置一式をキャリアに乗せて移動した（Photo 3.6）。建て屋外はエリアモニターカーにより移動した。

表3.2に測定結果を示す。各測定点で得られた波高分布を図3.3-図3.11に示す。ファイル名の最後の記号がBの測定はバックグラウンド放射線の測定であり、Sの測定は加速器からの放射線測定であることを示す。

### 3.3.1 制御室における測定

制御室（A点）では、装置の基本動作の確認も含めた実験を行った。表3.2中のファイル名がCONT-が相当する。例えば、ファイル名がCONT2-B（図3.3）の場合、バックグラウンド測定であり、約 $6.2 \times 10^{-6}$ R/hであることが分かる。バックグラウンド測定であるため、加速器は運転されておらず、アンチコインシデンス回路の出力パルスのみがあり、コインシデンス回路の出力パルス数はゼロとなっている。この場合は、バックグラウンド放射線の波高分布が測定され、その線量率が求められる。

CONT2-S（図3.5(b)）の場合、加速器は運転され、加速器放射線と同期したゲートパルスによってコインシデンス回路が動作し、その出力として加速器からの放射線が計数される。周期10msのうち、 $30 \mu\text{s}$ は加速器放射線の測定に使われるが、残りの時間はバックグラウンド放射線の測定に使われる。そのため、この場合にはコインシデンス回路の出力もアンチコインシデンス回路の出力も計数されることになる。ただし、波高分布測定は加速器からの放射線に対してしか行っていない。制御室における加速器からの放射線による線量率は約 $2.9 \times 10^{-7}$ R/hであり、バックグラウンドレベルの1/20程度であることが分かった。このときのコインシデンス回路の出力パルス数は6525である。相対誤差は約1.2%である。すなわち、作製した装置はバックグラウンドレベルの1/20の微弱放射線を約5分間の短時間測定で相対誤差1.2%の精度で測定できる能力を有するものであることが分かった。また、図3.5中の(a)と(b)を比較することにより、加速器からの放射線は、バックグラウンド放射線に比べて、低エネルギー側にかたよっていることがわかった。

ゲートパルス幅内に偶然計数されるバックグラウンド放射線が存在する。その度合を調べるために、電子ビームは発生せずにゲートトリガ信号のみを発生するようにして実験を行った。その結果がCONT3BB（図3.4）、CONT4BBである。図3.3と図3.4を比較することにより、ゲート信号がある時と無いときの差を明確に知ることができる。

### 3.3.2 建て屋外の線量分布

ファイル名MF1-S（図3.6(b)）、MF2-S（図3.7(b)）、MF3-S（図3.8(b)）の各

測定結果が示すように、制御室における加速器からの放射線の波高分布よりも、はるかに高エネルギー成分の多いスペクトルとなっている。線量率は最も遠いC点 ( $2.3 \times 10^{-6}$ R/h) が最も高く、B点、D点と建て屋に近づくにつれて小さくなっている。これは、排気筒との位置関係によって線量率が決定されているからであると考えられる。

### 3.3.3 建て屋内の廊下における線量分布

ファイル名MF4-S (図 3.9(b))、MF5-S (図 3.10(b))、MF6-S (図 3.11(b)) の各測定結果に見られるように、制御室よりさらに一桁程度低い線量レベルであることが分かる。D点とE点は、加速器ビーム出口からの距離にすればほとんど等しい距離にあるが、D点からは排気筒が直接見えるのに対して、E点からは直視できないため、線量率には約30倍もの差があることが分かった。

## 3.4 結果と考察

作製したパルス状放射線測定装置を用いて45MeV施設の建て屋内外の漏洩放射線レベルを測定することができた。バックグラウンドレベルの1/250程度の微弱放射線を15分程度の時間で測定することができた。作製した装置はスカイシャイン線を測定するのに十分な性能を有していることが分かった。より遠方での測定を実施し、スカイシャインの効果を実験的に明かにし、EGS4によるシミュレーションとの比較が可能な段階に達したと言えよう。

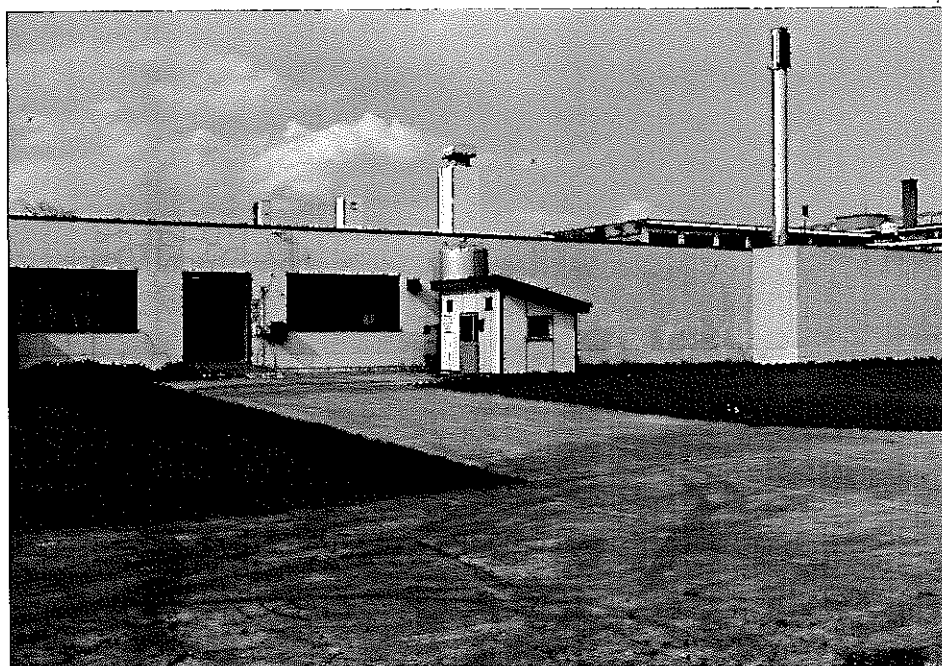


photo 3.1 建物概観

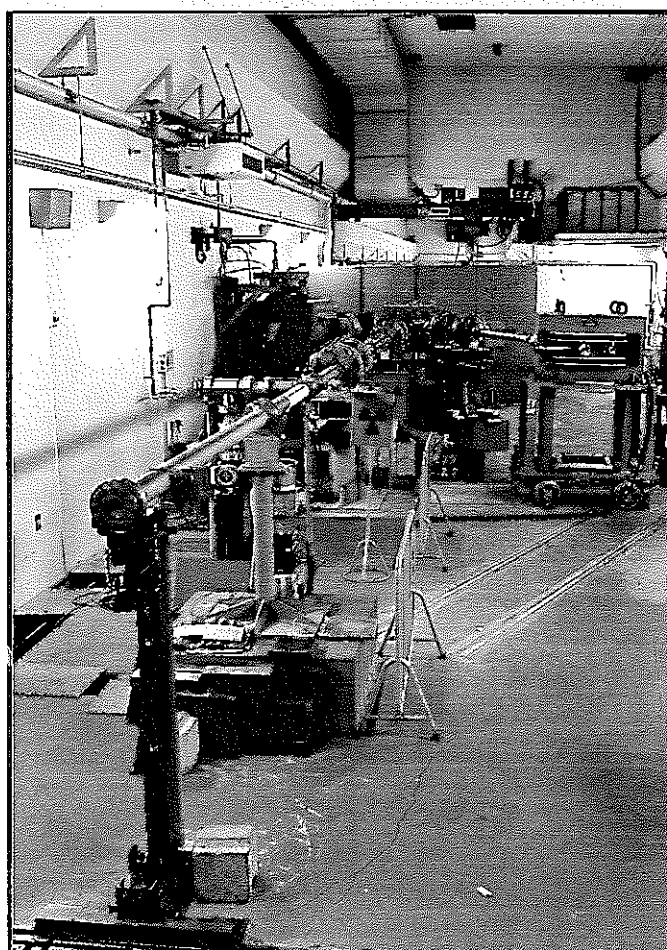


photo 3.2 加速器概観

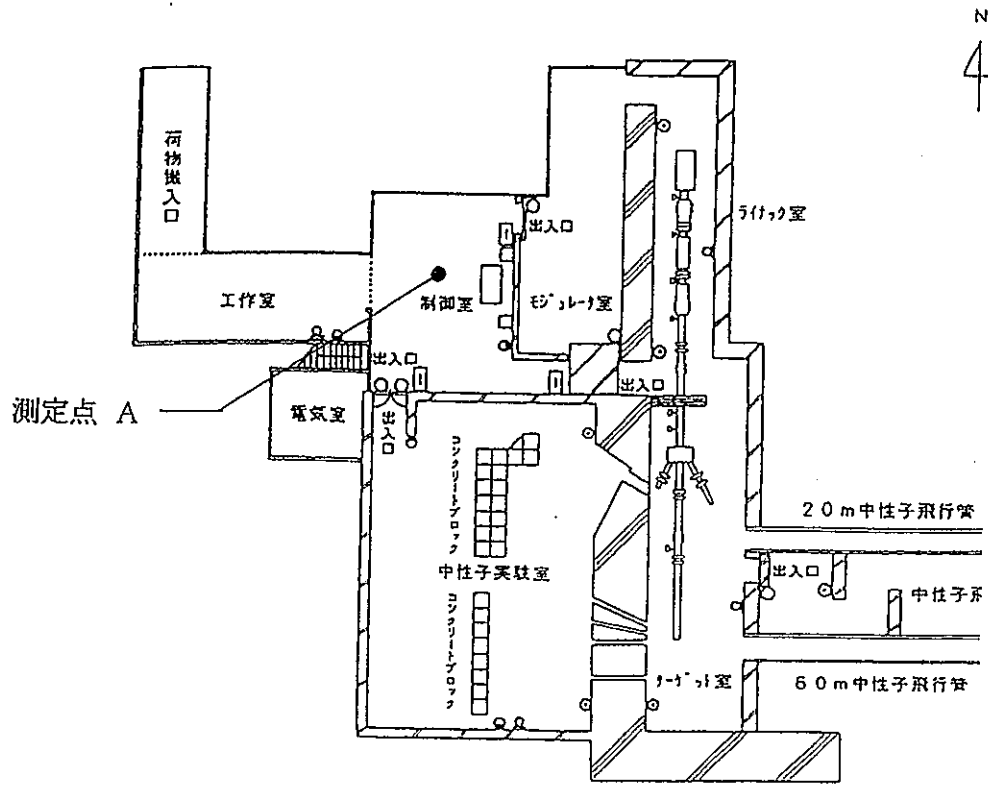


図3. 1 建屋地下平面図（ライナック本体の設置個所）と測定点A

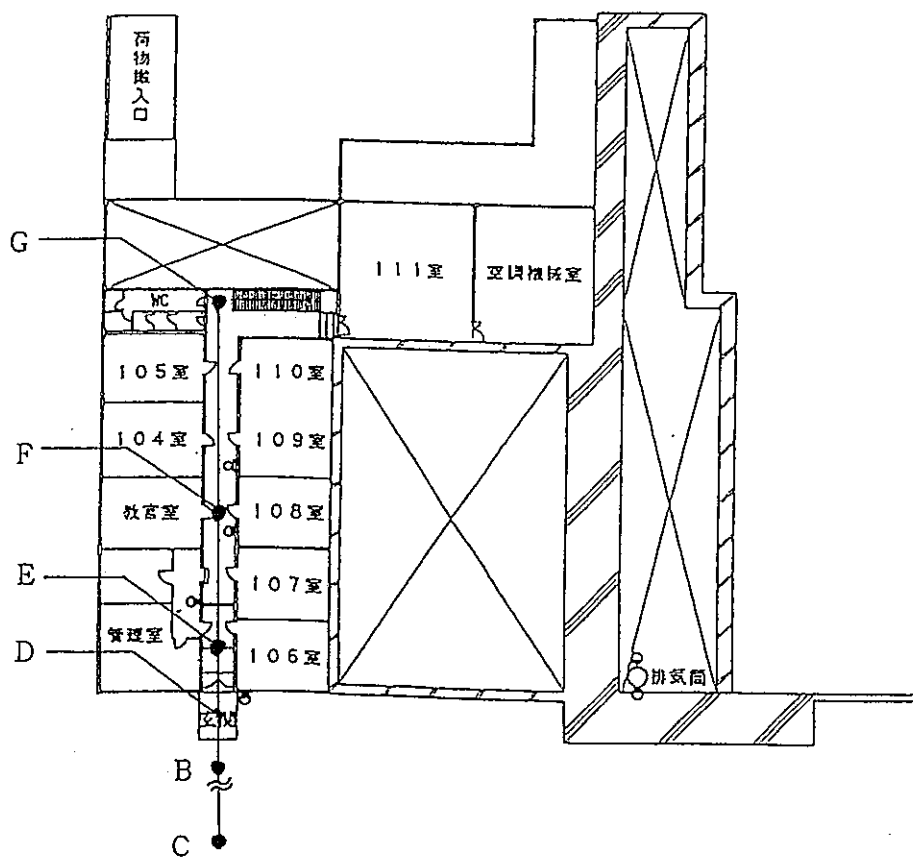


図3. 2 建屋1階平面図と測定点（B～G）

表 3.1 測定時間と測定場所

(施設入口玄関を原点にとり(-)符号は建物外側,(+)符号は建物内側を示す)

ファイル名	測定時間	測定場所	温度[°C]
CONT2__B	300sec	A (制御室)	22
CONT2__S	300sec	A	22
CONT3BB	300sec	A	22
CONT4BB	300sec	A	22
CONT5__S	1000sec	A	22
MF1__S	1000sec	B (-6.4 m)	-7
MF1__B	1000sec	B	-7
MF2__S	1000sec	C (-29 m)	-7
MF2__B	1000sec	C	-7
MF3__B	1000sec	D (-1.94 m)	0
MF3__S	1000sec	D	1
MF4__B	1000sec	E (+1.7 m)	15
MF4__S	1000sec	E	14
MF5__B	1000sec	F (+10.5 m)	14
MF5__S	1000sec	F	14
MF6__B	1000sec	G (+24.1 m)	14
MF6__S	1000sec	G	14

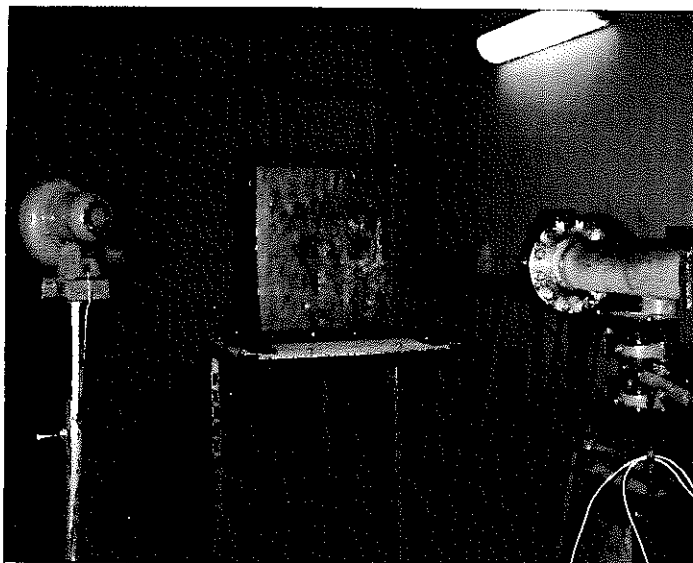


photo 3.3 制動X線用鉛ターゲット (厚さ:9mm)  
(ビーム出口1mに設置)

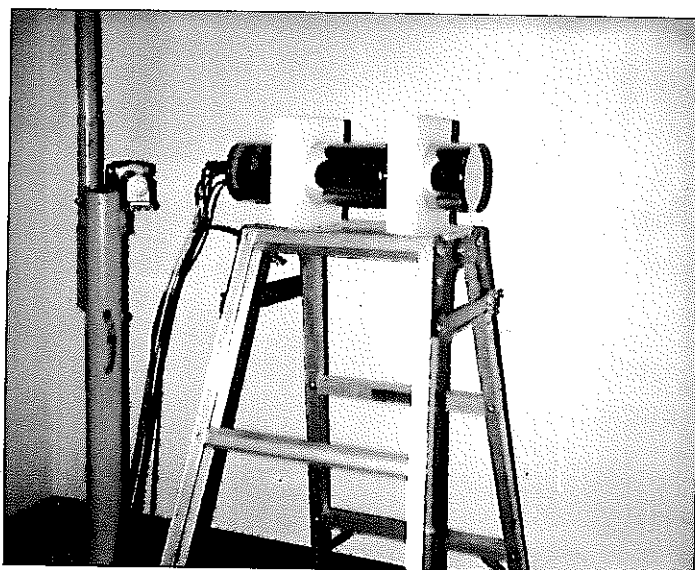


photo 3.4 3"  $\phi$   $\times$  3" NaI(tl)検出器  
(地上1mの高さに設置)

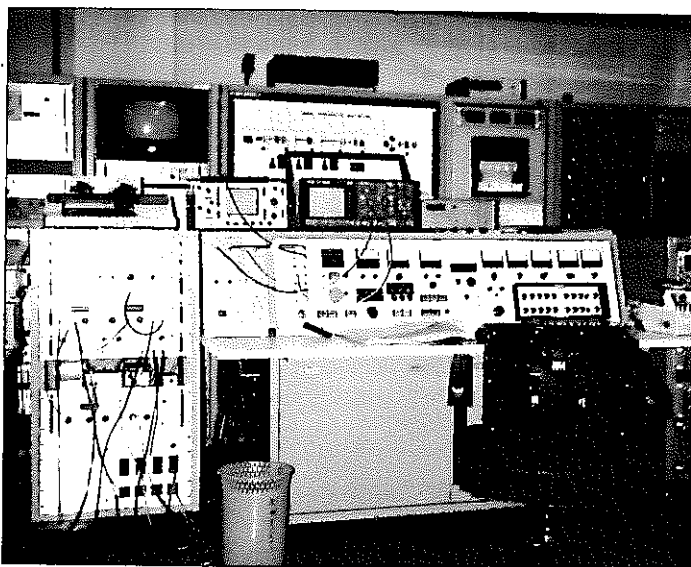


photo 3.5 45 MeVライナック制御卓

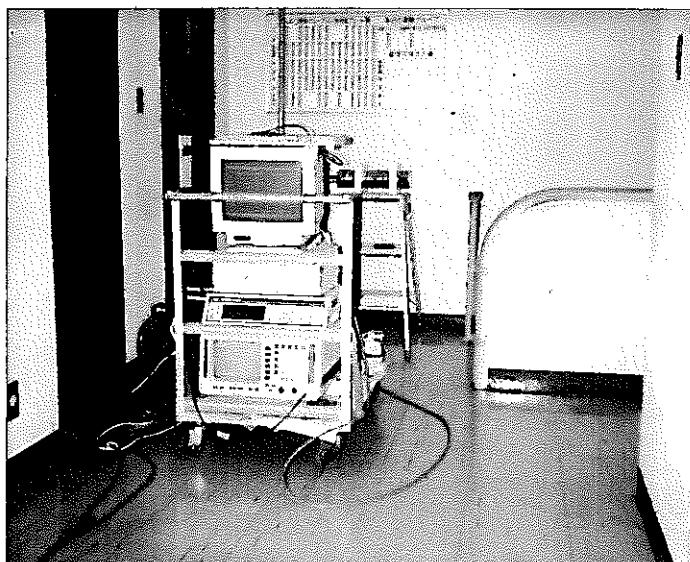


photo 3.6 廊下における測定風景



表 3. 2 各測定点における線量率

ファイル名	測定場所	カウント数		線量率[R/h]
		coincidence	anticoin	
CONT2__B	A (制御室)	0	53965	6.16E-6
CONT2__S	A	6525	54902	2.93E-7
CONT3BB	A	230	55117	2.13E-8
CONT4BB	A	187	56411	1.73E-8
CONT5__S	A	21206	186282	2.89E-7
MF1__S	B (-6.4 m)	32717	92001	2.15E-6
MF1__B	B	0	78820	2.7E-6
MF2__S	C (-29 m)	30926	80437	2.260E-6
MF2__B	C	0	75481	2.60E-6
MF3__B	D (-1.94 m)	274	99978	4.77E-6
MF3__S	D	35671	103601	8.241E-7
MF4__B	E (+1.7 m)	0	169109	7.68E-6
MF4__S	E	1676	166464	2.95E-8
MF5__B	F (+10.5 m)	0	175220	7.89E-6
MF5__S	F	719	175229	2.53E-8
MF6__B	G (+24.1 m)	0	199374	9.03E-6
MF6__S	G	732	195545	2.89E-8

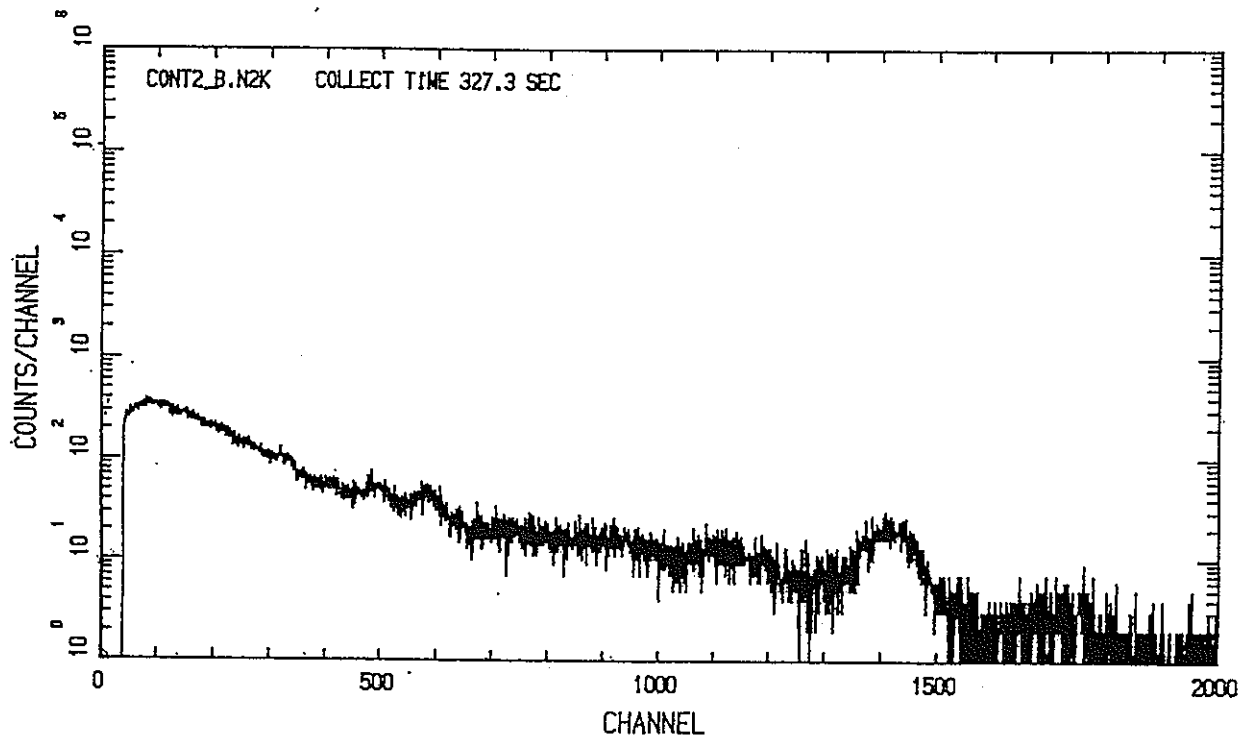


図 3. 3 A点（制御室）におけるバックグラウンド放射線による波高分布（ゲート信号なし）

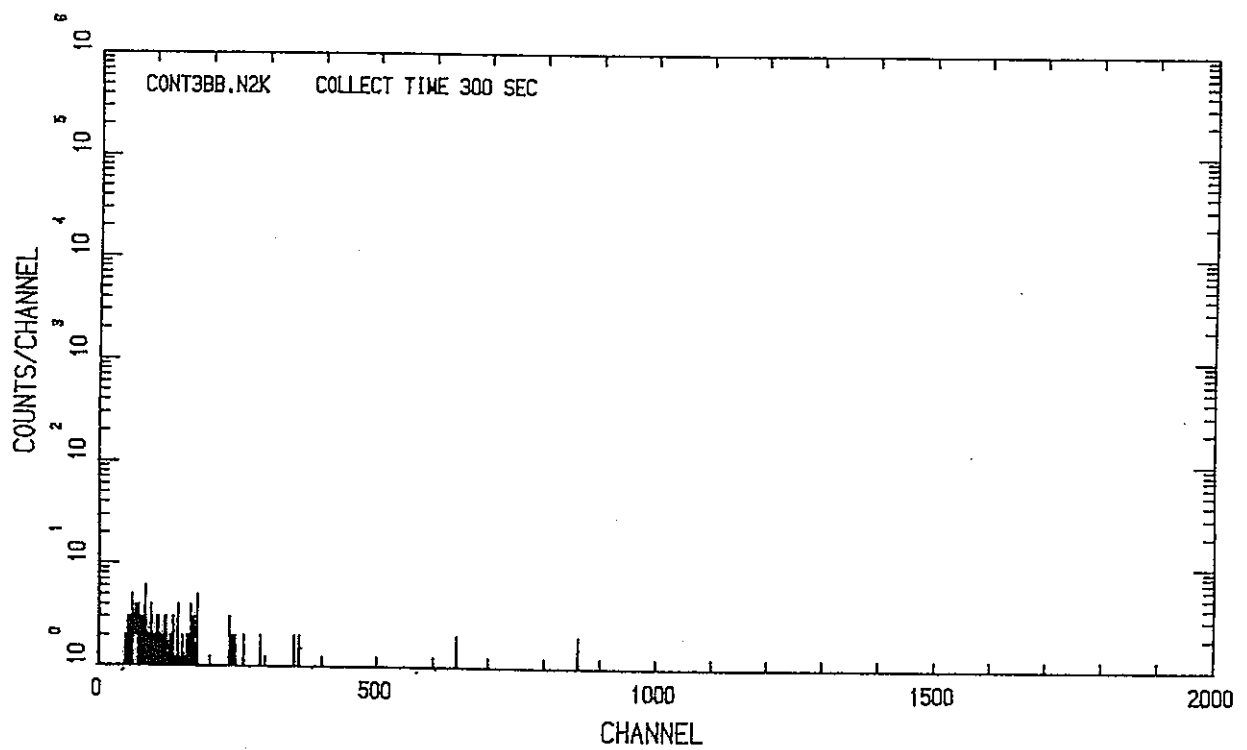


図 3. 4 30  $\mu$ sの制御幅を偶然通過したバックグラウンド放射線による波高分布（A点，ゲート信号あり）

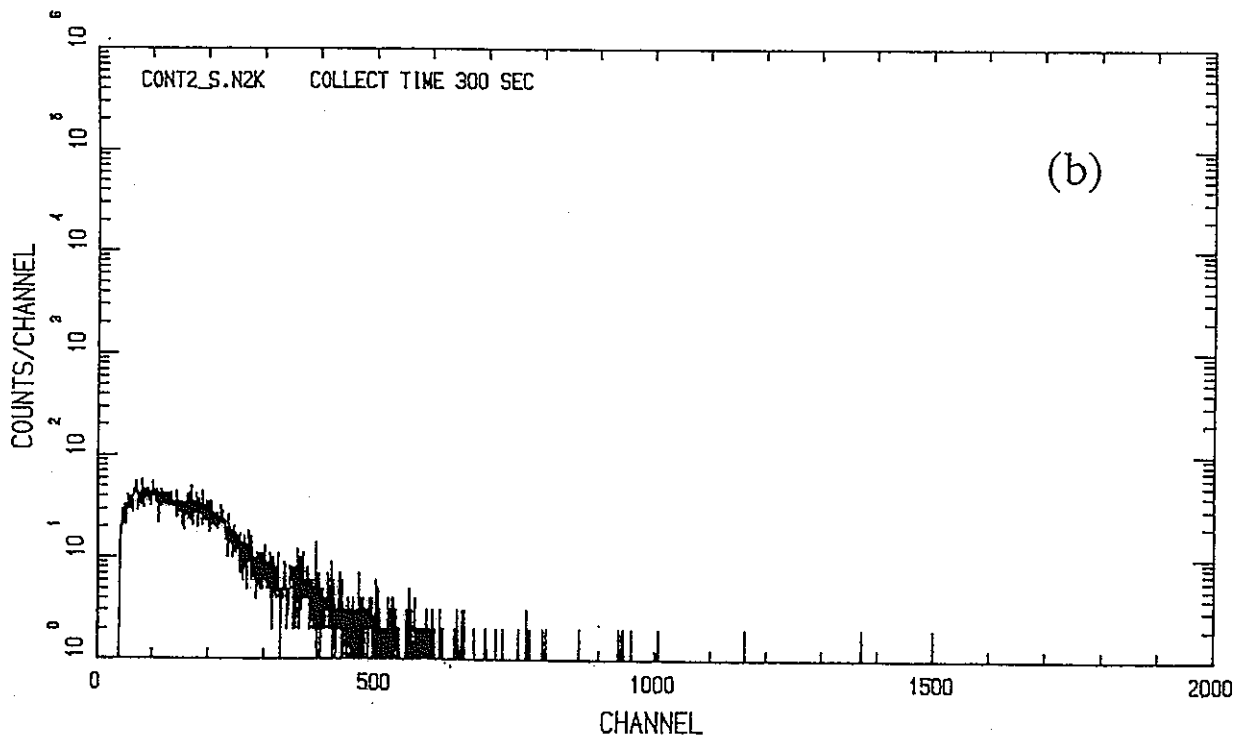
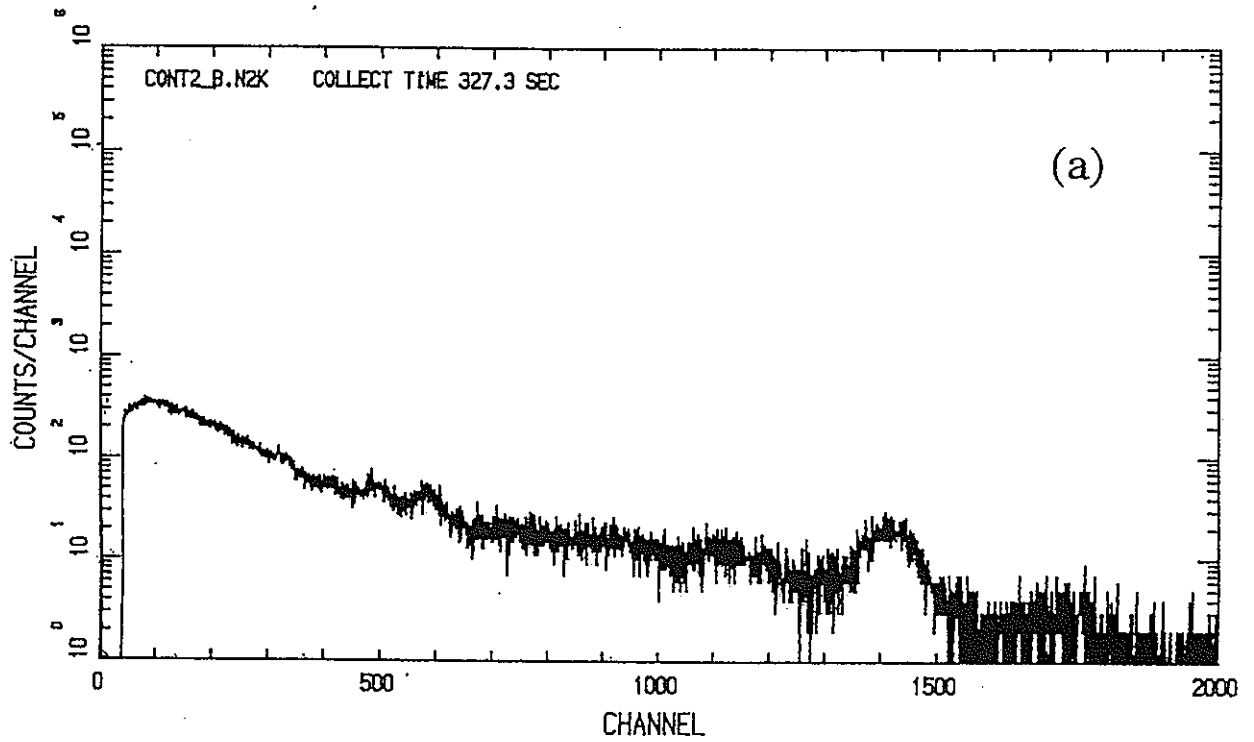


図3. 5 測定点Aにおける波高分布  
(a) バックグラウンド放射線による波高分布  
(b) 加速器からの放射線による波高分布

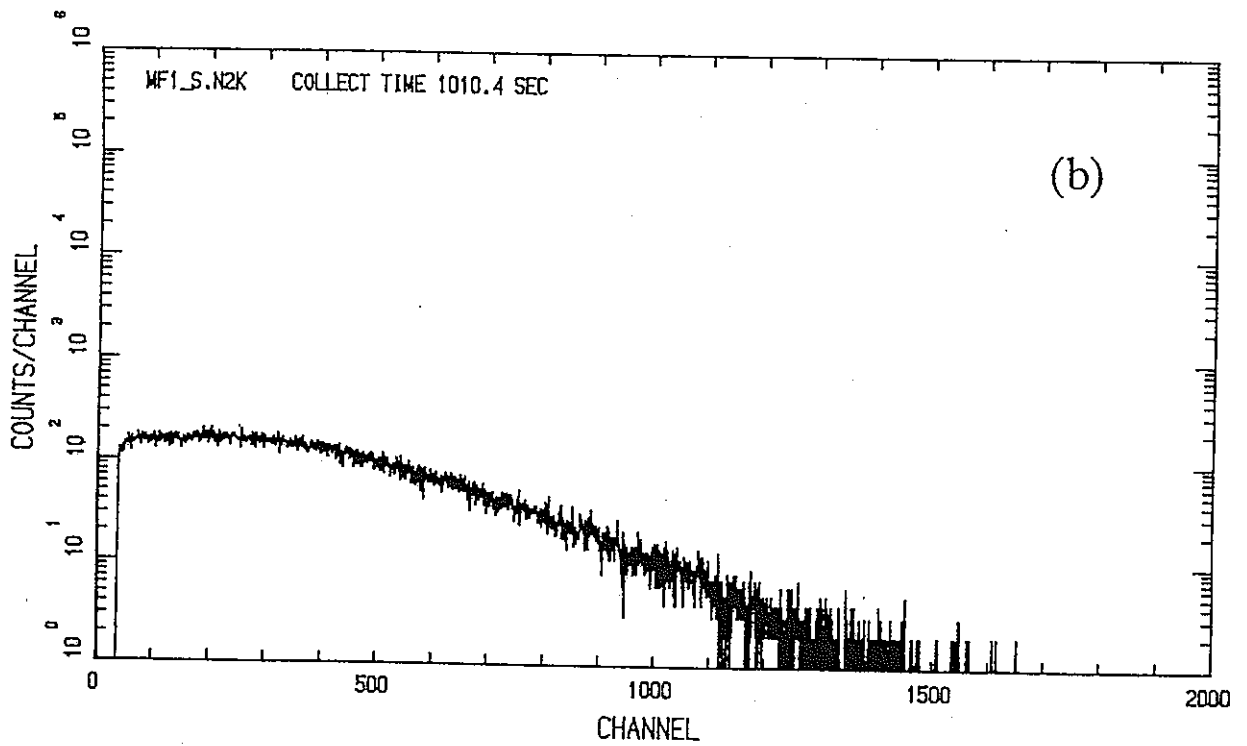
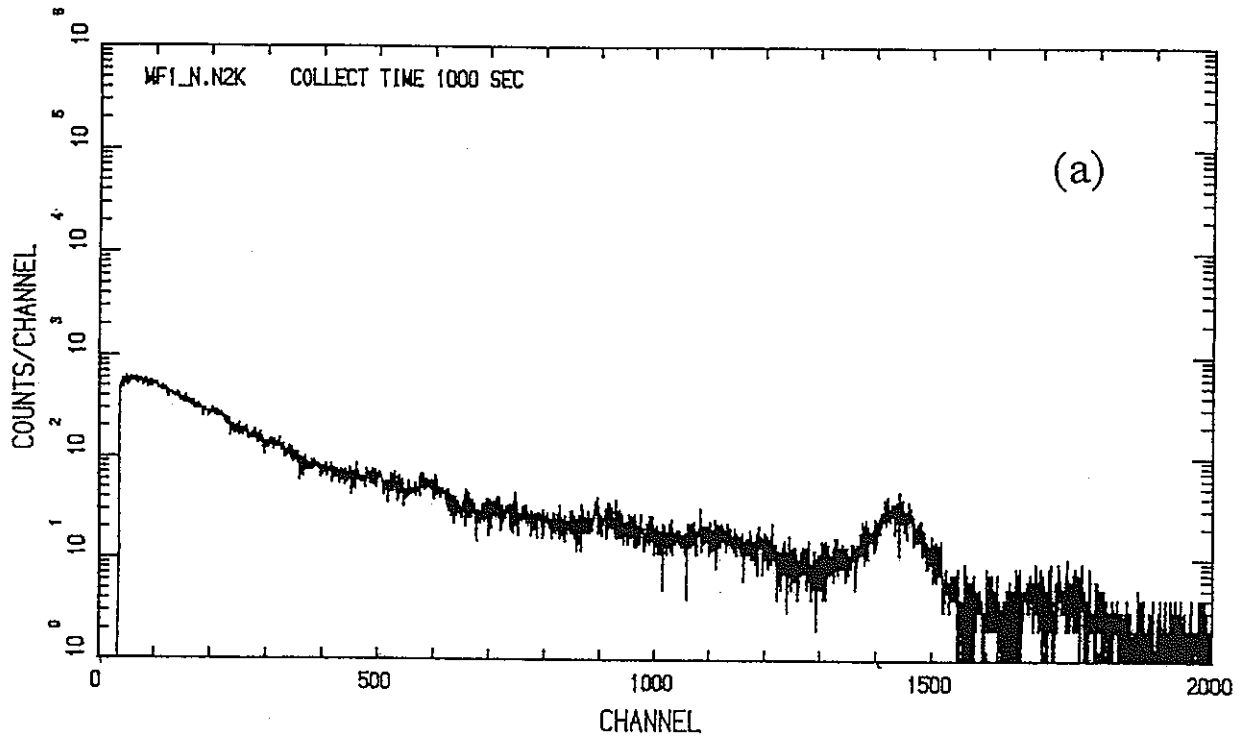


図 3. 6 測定点Bにおける波高分布  
(a) バックグラウンド放射線による波高分布  
(b) 加速器からの放射線による波高分布

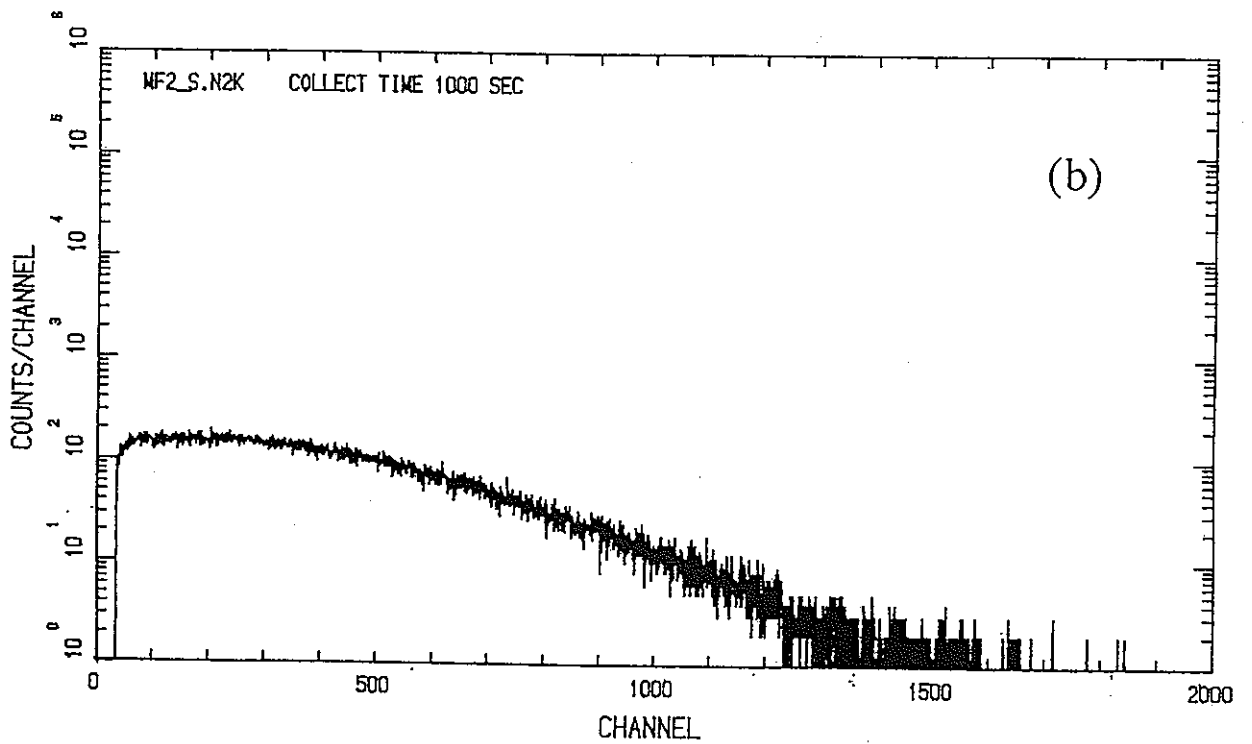
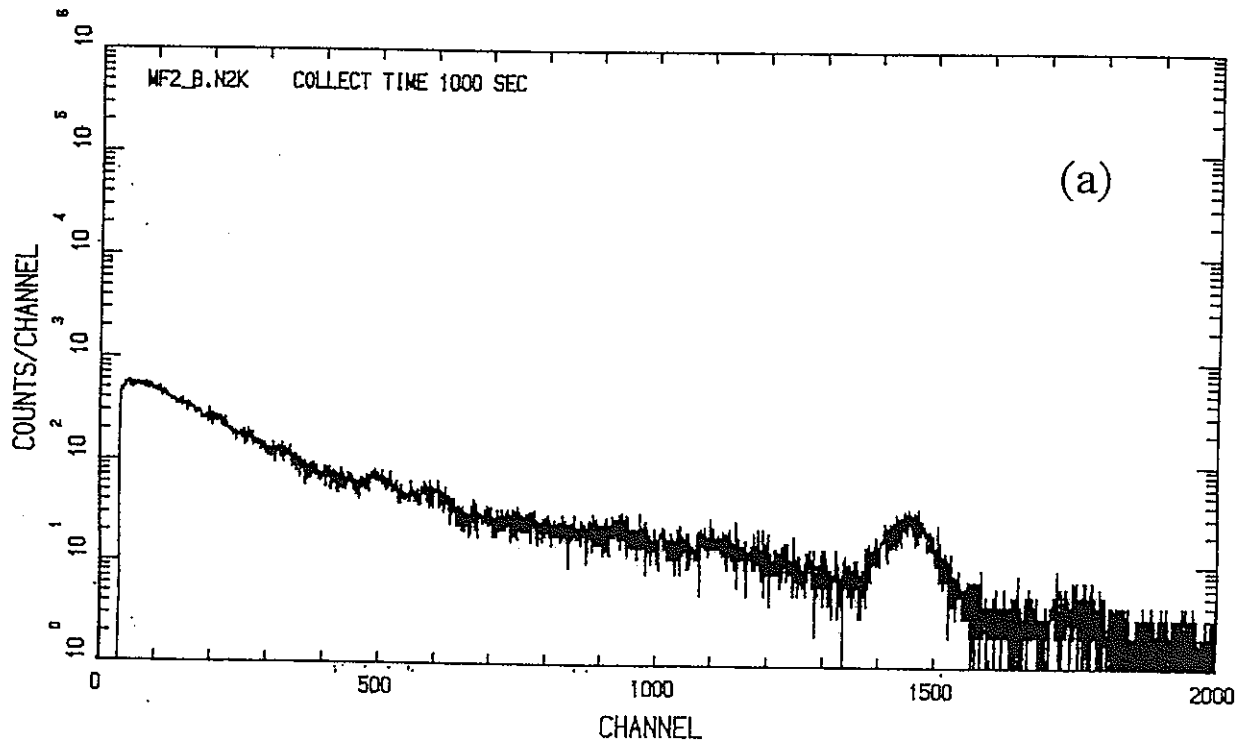


図 3. 7 測定点 C における波高分布  
(a) バックグラウンド放射線による波高分布  
(b) 加速器からの放射線による波高分布

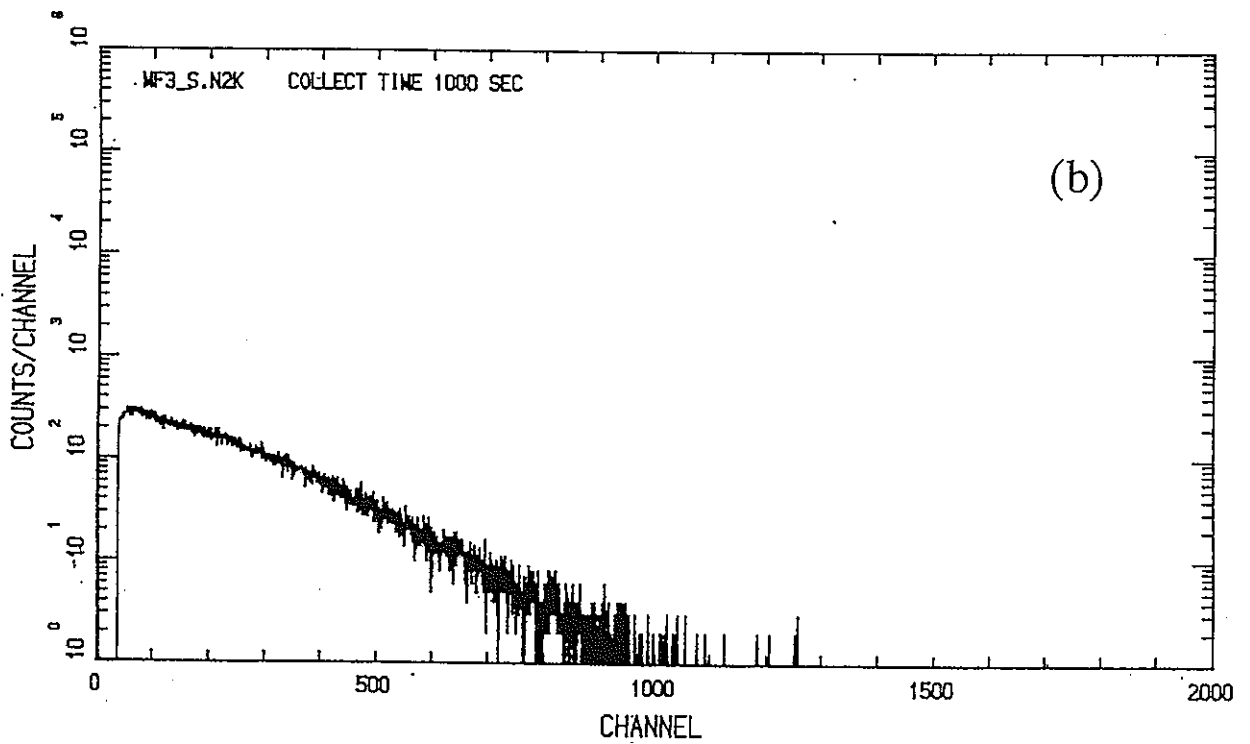
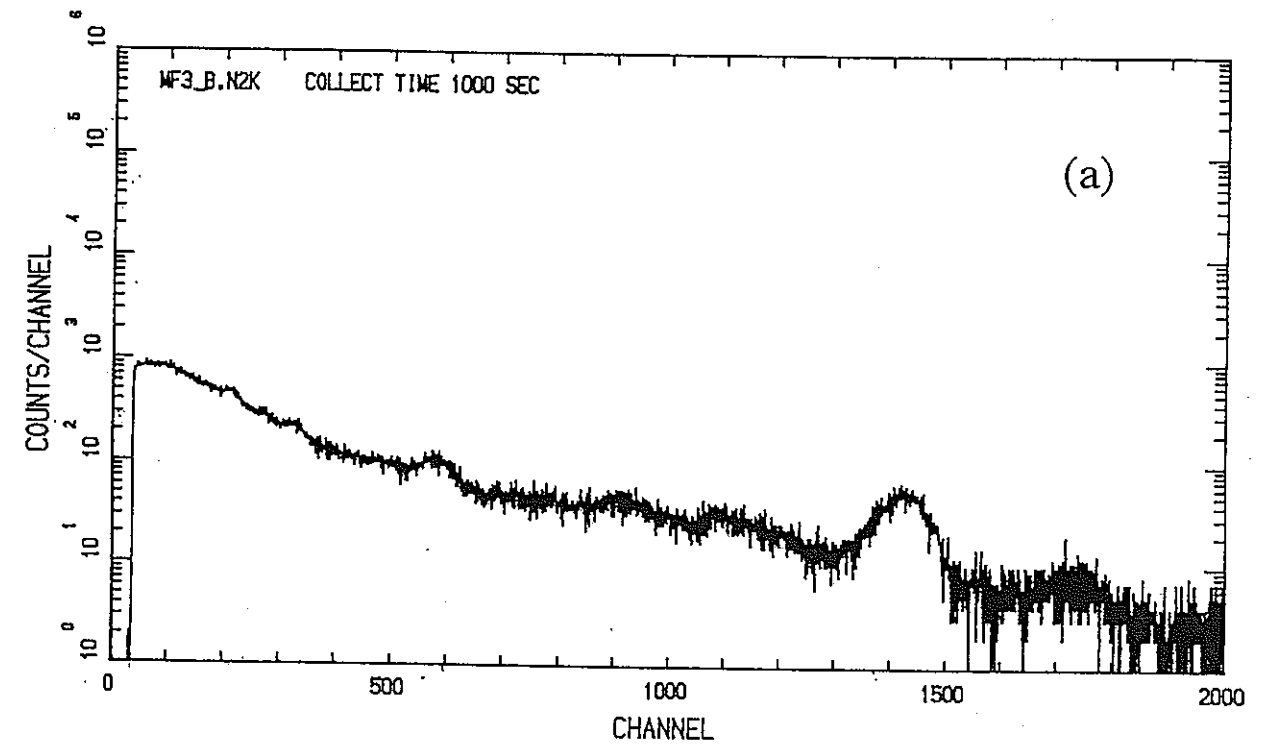


図 3. 8 測定点Dにおける波高分布  
(a) バックグラウンド放射線による波高分布  
(b) 加速器からの放射線による波高分布

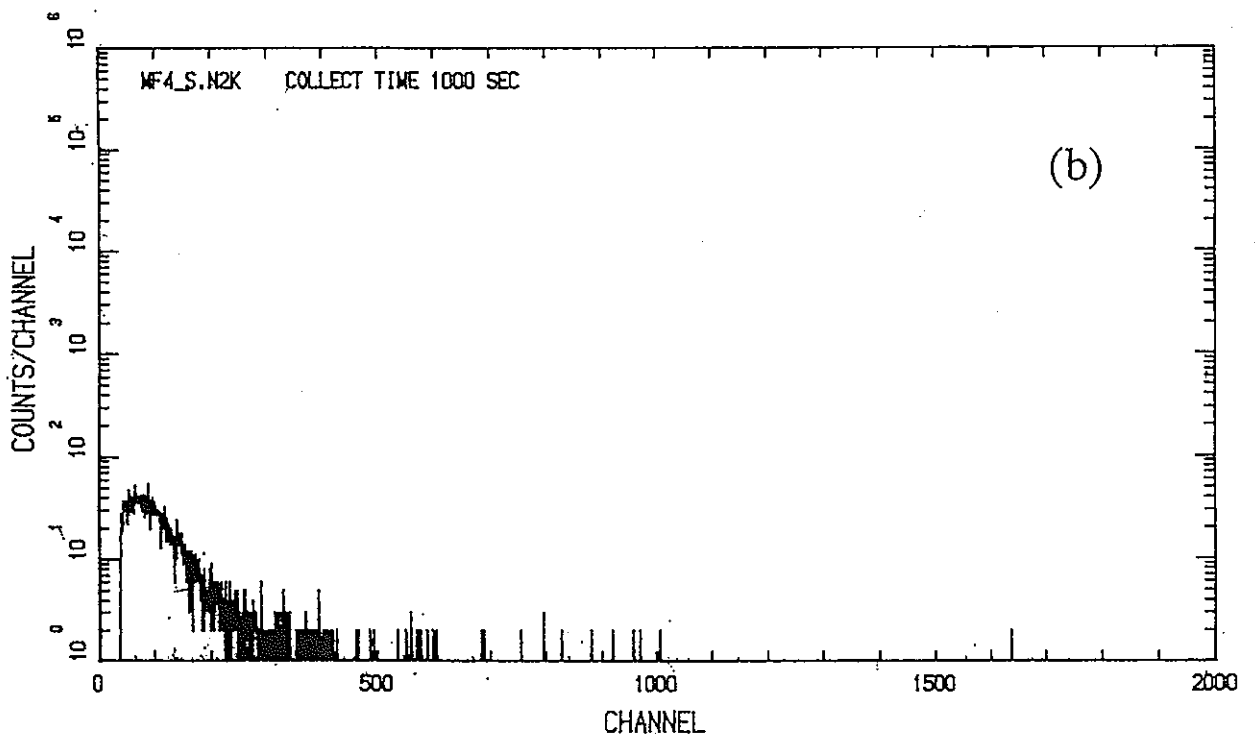
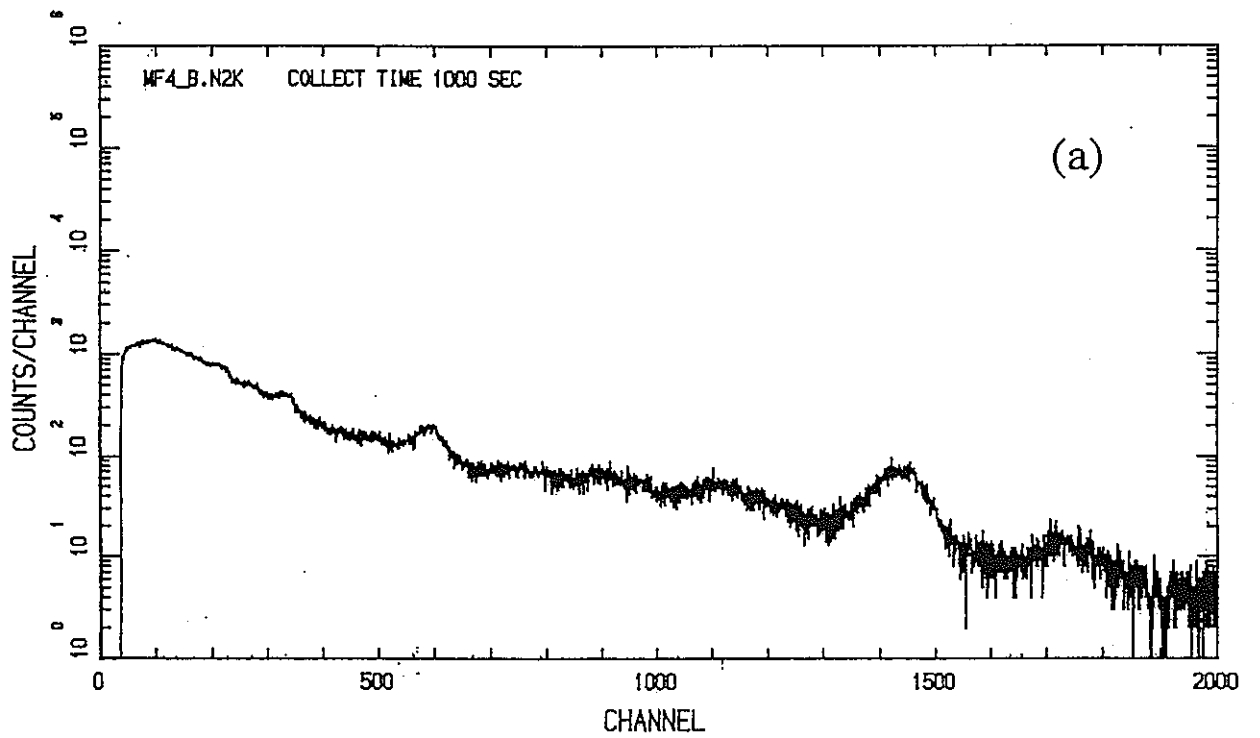


図 3. 9 測定点 E における波高分布  
(a) バックグラウンド放射線による波高分布  
(b) 加速器からの放射線による波高分布

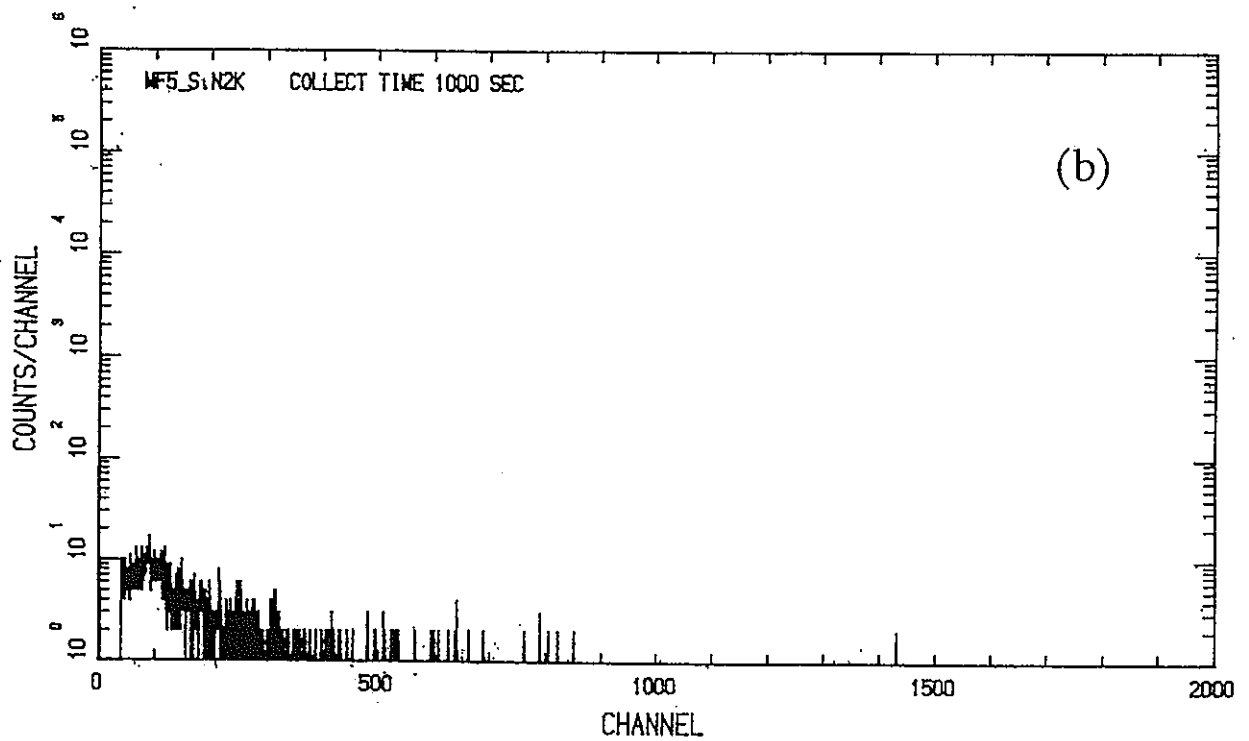
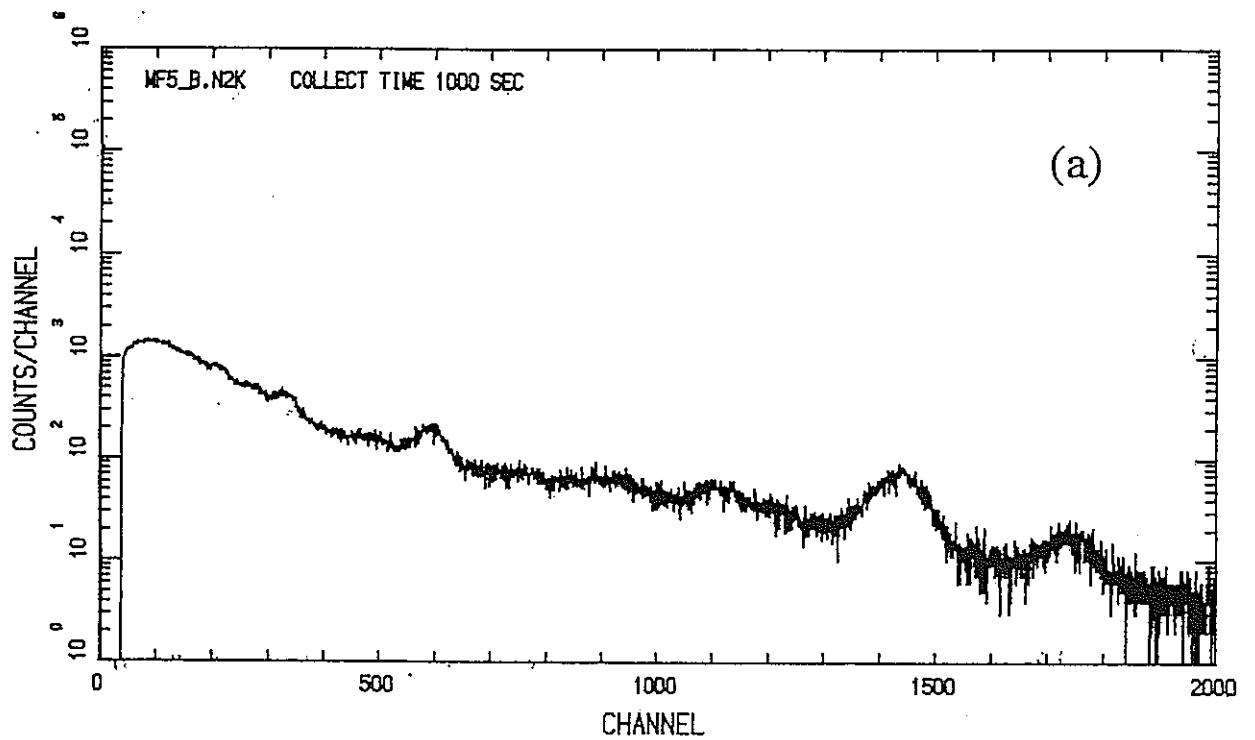


図3. 10 測定点Fにおける波高分布  
(a) バックグラウンド放射線による波高分布  
(b) 加速器からの放射線による波高分布



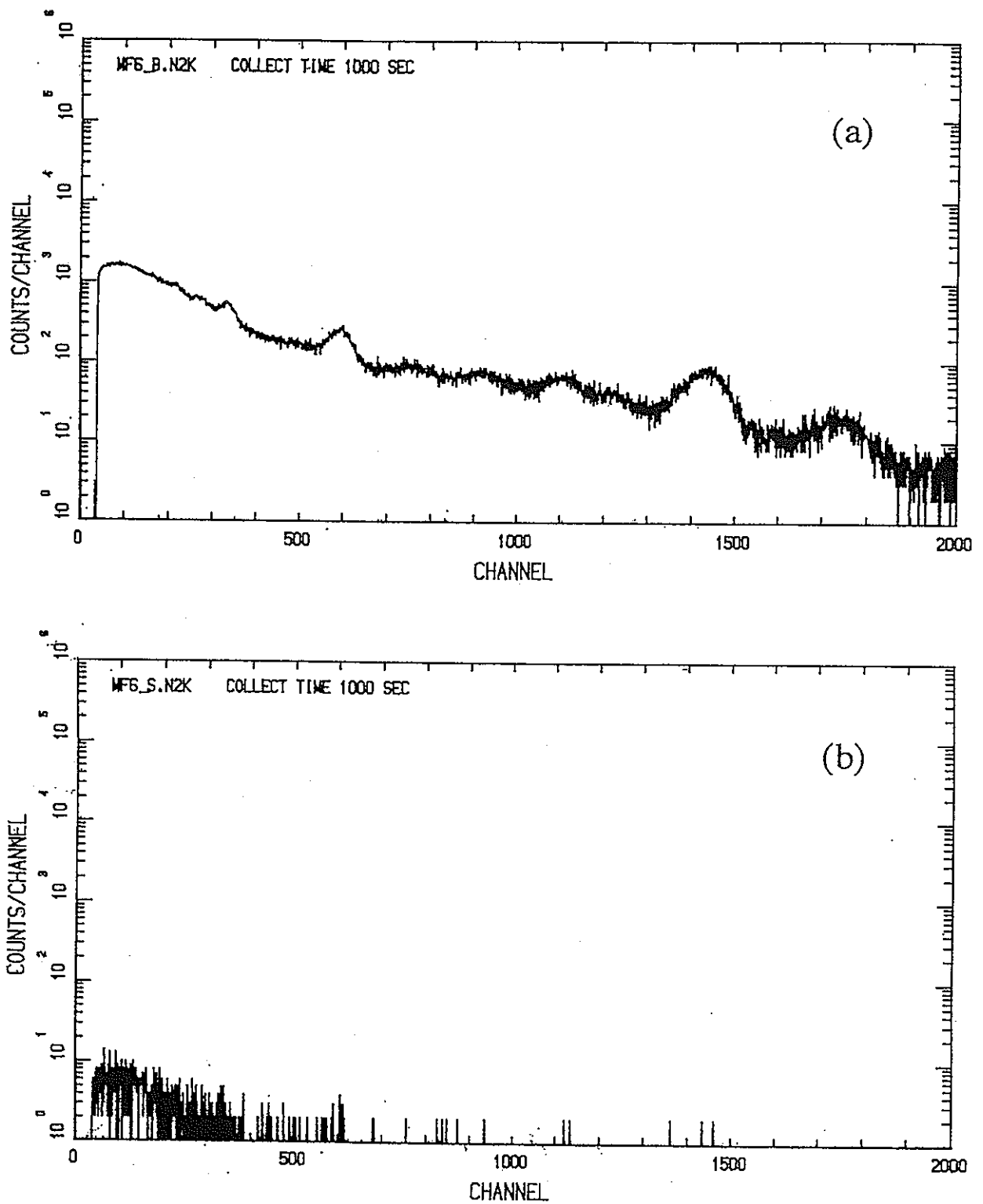


図3. 1.1 測定点Gにおける波高分布  
(a) バックグラウンド放射線による波高分布  
(b) 加速器からの放射線による波高分布

#### 4. EGS4による45MeVライナック施設からのスカイシャイン評価

##### 4.1 制動放射線の発生とその角度依存性

###### 4.1.1 計算のための幾何学的形状と体系

電子ビームとして、半径0.25cmの円盤から一様に放出される線源(面線源)を用い、エネルギーは45、60、90MeVの3種類とした。ターゲットは半径5cm、厚さ1放射距離の円柱状の鉛を用い、ターゲットの円の中心にビームが当たるものとし、周囲を半径1mの球の真空領域で満たした。(図4.1)

検出器はターゲットから50cm離れたところに電子ビームの進行方向を軸にとった円環検出器を用い、 $0^{\circ}$  ~  $45^{\circ}$  までを $5^{\circ}$  刻みで検出した。(図4.2)

検出方法は Surface Crossing Detector とした。

###### 4.1.2 計算結果

###### a)光子の角度分布計算

入射電子ビームエネルギーが45、60、90MeVの、角度に対する発生光子数を図4.3に示した。

角度範囲が $0^{\circ}$  ~  $5^{\circ}$ 、 $20^{\circ}$  ~  $25^{\circ}$ 、 $40^{\circ}$  ~  $45^{\circ}$  で、入射電子ビームエネルギーがそれぞれ45、60、90MeVの、エネルギーに対する発生光子数をそれぞれ図4.4~図4.6、図4.7~図4.9、図4.10~図4.12に示した。

計算は全て電子一個に対して発生する光子の数とした。

###### b)電子ビームのエネルギーに対する発生光子のエネルギー

入射電子ビームエネルギーがそれぞれ45、60、90MeVの、角度に対する光子の平均エネルギーを図4.13に示した。

入射電子ビームエネルギーに対する、光子の平均エネルギー/電子ビームエネルギーを図4.14に示した。

## 4.2 建屋内の制動放射線の分布

### 4.2.1 計算のための幾何学的形状と体系

半径5cm、厚さ1放射距離の鉛ターゲットを、45MeVの電子線源から1mの所に設置し、その周囲を空気で満たし、さらにその周囲をコンクリートの壁で囲み、壁の一部に外気に通じる煙突ダクトを設けた。線源およびターゲットの高さはコンクリートの床から1.5m、ダクトの高さは線源とターゲットから11m、地面から4.5mとした。(図4.15)

検出器としては、加速器室内から外気に通じる煙突の入り口に長方形(60×71.1cm)の検出器(検出器1)を、煙突上部には半径35.55cmの円盤検出器(検出器2)を置き、検出方法は Surface Crossing Detector とした(図4.16)コンクリート壁の厚さに関しては十分に遮蔽がなされていると考えられる。そのためスカイシャイン線源としては煙突ダクトから漏洩する放射線が考えられ、検出器をダクトの入り口および出口に置いて計算を行った。

コンクリート壁の厚さ、線源の位置やダクトの高さなどのこの計算で用いる体系の位置や寸法は、北海道大学工学部の45MeVライナックの建屋を基準に設定したものである。

### 4.2.2 計算結果

電子1個当たりについてターゲットから発生する光子のうち、検出器1および2に入射する光子の数を表4.1、表4.2および図4.17に示した。特に図4.17は両対数プロットの形で示した。またこの結果を、スカイシャインの計算のための線源として用いた。

表4.1 検出器1に入射する光子数

群	下限エネルギー (MeV)	上限エネルギー (MeV)	光子数 (個/MeV)
1	0.060	0.065	$1.429 \times 10^{-2}$
2	0.085	0.090	$2.705 \times 10^{-2}$
3	0.1	0.2	$1.075 \times 10^{-2}$
4	0.2	0.3	$4.479 \times 10^{-3}$
5	0.3	0.4	$1.877 \times 10^{-3}$
6	0.4	0.5	$2.052 \times 10^{-3}$
7	0.5	0.6	$2.854 \times 10^{-3}$
8	0.6	0.7	$1.280 \times 10^{-4}$
9	0.7	0.8	$9.044 \times 10^{-5}$
10	0.8	0.9	$1.779 \times 10^{-4}$
11	0.9	1.0	$9.086 \times 10^{-5}$
12	1.0	2.0	$9.300 \times 10^{-5}$
13	2.0	3.0	$2.031 \times 10^{-4}$
14	3.0	4.0	$4.091 \times 10^{-5}$
15	4.0	5.0	$4.185 \times 10^{-5}$

表4.2 検出器2に入射する光子数

群	下限エネルギー (MeV)	上限エネルギー (MeV)	光子数 (個/MeV)
1	0.060	0.065	$5.876 \times 10^{-4}$
2	0.085	0.090	$1.854 \times 10^{-3}$
3	0.1	0.2	$6.709 \times 10^{-4}$
4	0.3	0.4	$7.464 \times 10^{-5}$
5	0.5	0.6	$5.836 \times 10^{-5}$

### 4.3 45MeVライナックから発生するスカイシャイン計算

#### 4.3.1 計算のための幾何学的体系

線源は、表5.1で示すエネルギースペクトルを用いた。形状としては、煙突を仮定した半径35.55cmの円盤線源で、地上より4.5mの高さから放出角17.6度で真上に打ち上げた。(図4.19)この放出角は図4.16において、光子が点線上の飛跡を通る際の角度で、煙突ダクト内でのコンクリート壁との一回散乱で大気中に放出される時の最大角として求めた。すなわち光子はダクト内で少なくとも一回は壁とのコンプトン散乱を起こし、大気中に飛び出す時には全て17.6度以内に収まるものとした。

検出器は、地上から1mの高さに線源から50~700mの範囲と、線源から100mの地点で高度1~1000mの範囲にそれぞれ線源を囲むように(円環検出器)置いた。また検出方法としては Surface-Crossing Detecor とした。(図4.18)

表4.3 線源エネルギースペクトル

群	下限エネルギー (MeV)	上限エネルギー (MeV)	相対強度
1	0.05	0.075	0.11
2	0.075	0.1	0.33
3	0.1	0.2	0.47
4	0.3	0.4	0.05
5	0.5	0.6	0.04

#### 4.3.2 計算結果

##### a)線源から各点に到達する光子のフルーエンス

線源から50、100、200、500mの地点における光子のフルーエンスを図4.21に示した。線源から100mの地点の高度50、100、200、500mにおける光子のフルーエンスを図4.22に示した。フルーエンスは、煙突ダクトから漏洩する光子一個当たりで計算を行った。

##### b)空気中での吸収線量計算

ライナックの電子ビーム1パルス(=10<sup>-8</sup>クーロン)を単位とした、線源からの距離および線源から100mの地点における高度に対する空気中での吸収線量分布を図4.23、図4.24に示した。また図4.23には1回散乱近似でフィットさせた曲線も同時に描いて、各点との比較を行った。

## 4.4 結果と考察

### 4.4.1 制動放射線の角度依存性

入射電子ビームのエネルギーを変化させて鉛ターゲットから発生する光子数の比較を示した図4.3からは、電子ビームのエネルギーが大きくなるにつれて光子はビーム方向に集まり、90MeVでは $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$ の範囲に集中し、逆に $20^{\circ}$ よりも大きくなると45、60MeVに比べて光子数は減少するという結果が得られた。正確な光子のビーム幅を決定するには、角度を細かく区切った詳細な計算を行う必要がある。

図4.4～図4.12は鉛ターゲットから発生する光子のスペクトルを両対数プロットしたものである。電子ビームのエネルギーが45MeVである図4.4～図4.6を見ると、角度が大きくなるにつれて0.511MeV付近でのピークが顕著になっていることが分かる。60、90MeVでも同様のピークが見られる。これは鉛ターゲット内での陽電子消滅によるピークと考えられるが、0.5～0.6MeVの範囲での詳しい計算が必要である。

図4.13には $5^{\circ}$ 刻みで $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ までの発生光子の平均エネルギーを示した。電子ビームのエネルギーに対する光子の平均エネルギーの変化は、ビーム方向付近では電子ビームのエネルギーが大きいほど大きいが、角度が大きくなると電子ビームのエネルギーによるその差はほとんどなくなっている。

図4.14には光子の平均エネルギーと入射電子のエネルギーの比を示した。いずれも0.1付近に収まっているが、電子のエネルギーが増加するにつれて比の値は小さくなる事が分かる。

### 4.4.2 煙突ダクト内における制動放射線の分布

図4.17によると、スカイシャイン線源となる検出器2で得られた光子のエネルギーは、電子ビームが45MeVであるのに対し主に600keV以下となった。また検出器1と2では光子数は1桁程度の差があり、これはダクト内に入った光子のうちの多くは、コンクリート壁に衝突した際にエネルギーの大部分を失ったためと考えられる。更に検出器1が連続スペクトルであるのに対し検出器2は離散的な値しか得られなかった。今後の課題として連続スペクトルを得る必要がある。

### 4.4.3 スカイシャイン評価

#### a)各計算点における光子スペクトル

図4.21と図4.22には距離と高度についての光子フルーエンスを示した。図4.21によ

ると、どの計算点においても0.3~0.4MeVと0.5~0.6MeVにピークが見られた。これは表4.3で示す通り、線源エネルギーとして離散的な値を用いたためにこのようなピークが現れたと考えられる。これに対し図4.22の曲線はほぼ表4.3の相対強度に対応した形であることと見ることができるが、相対強度が最大であるエネルギー値(0.1~0.2MeV)よりも低い値で図4.22は最大となっている。

#### b) 距離および高度に対する線量評価

図4.23にはライナックの電子ビーム1パルス単位とした、距離に対する空気中の吸収線量分布を示した。一回散乱近似によってフィットさせた曲線と比較すると、200m位まではよく一致しているが、距離が遠くなるほど曲線よりも値が大きくなっているのがわかる。これは距離が遠くなると多重散乱効果の影響が大きくなるためと考えられる。図4.23によると400m付近からその影響が現れ始めている。

図4.24には高度に対する吸収線量を示した。高度が増すにつれて減少しているが、今後地上から100m以内の線量分布の詳しい計算を行う必要がある。

#### 4.5 まとめ

加速器などの放射線源取り扱い施設内での遮蔽を考える上では、施設から上方に漏洩する放射線が空気との散乱により周辺の公衆に影響を与える可能性がある、いわゆるスカイシャインが問題となる。本研究ではモンテカルロシミュレーションコードであるEGS4を用いて、45MeVライナック施設からのスカイシャインの線量計算を行った。ライナックから漏洩する放射線は、ターゲットから発生する制動放射線が主である。しかしターゲットの自己吸収など、その理論値計算は複雑である。そのためまず1放射距離の鉛ターゲットからの制動放射線の $0^{\circ} \sim 45^{\circ}$ における角度分布を含めたシミュレーション計算を行った。その結果、発生光子は電子ビームのエネルギーが大きくなるにつれて前方に集まり、また消滅ガンマ線によるピークは角度が大きくなるにつれて顕著になることが分かった。45MeVライナック施設では、その建屋の形状から煙突ダクトから漏洩する放射線がスカイシャインを考える際に重要であることが知られている。そこでEGS4に組み込まれている検出器を用いて、1放射距離の鉛ターゲットから発生する制動放射線の煙突ダクト出口におけるスペクトルの計算を行ったところ、光子のエネルギーは、電子ビームが45MeVであるのに対し主に600keV以下であるという結果を得た。次にその結果をスカイシャインの線源として、ターゲット室やダクトの形状から線源の放出角を $17.6^{\circ}$ として、距離700mまでの空気中の吸収線量の計算を行った。その結果、建屋から200m位の地点までは、計算点に到達する光子のほとんどは空気中での一回散乱による光子であり、距離が遠くなるに従って多重散乱の影響が現れ始めることが分かった(図4.23)。今後の課題としては、建屋からの漏洩放射線のスペクトルの詳しい計算、建屋付近(100m以内)での吸収線量計算、そして実際の測定結果との比較などが挙げられる。



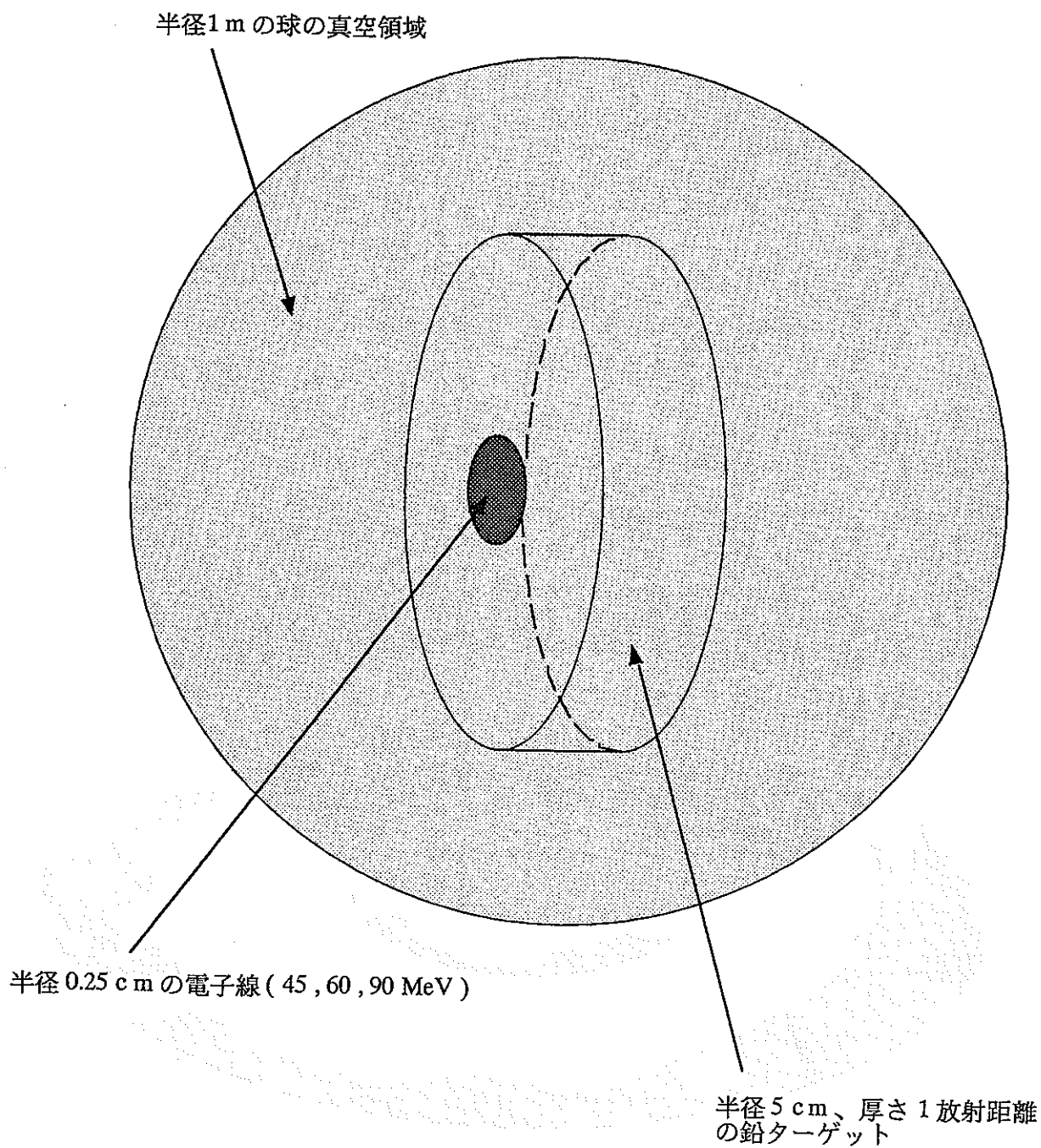


図4. 1 制動放射線発生計算のための幾何学的体系

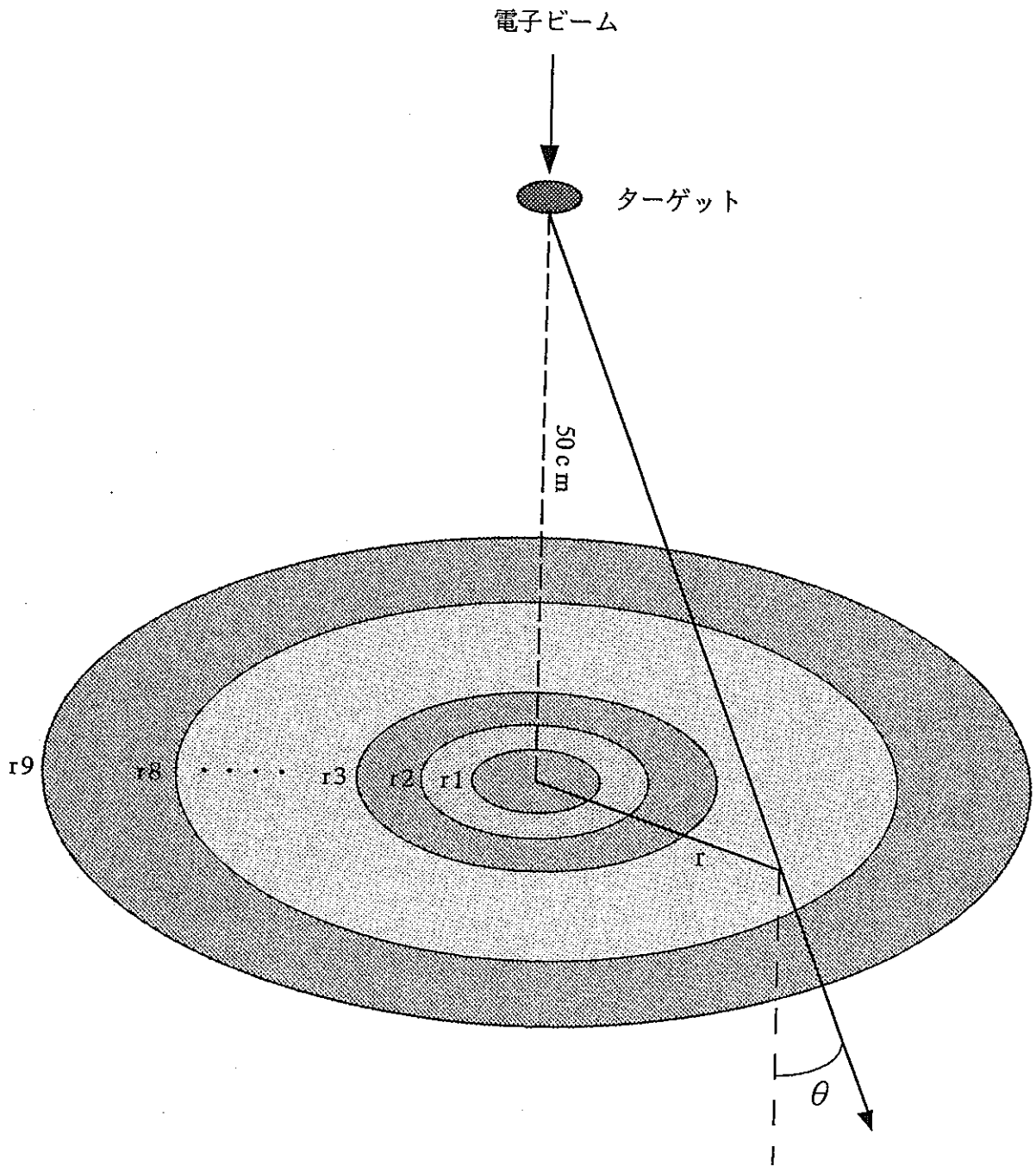


図4. 2 制動放射線角度分布計算のための幾何学的体系

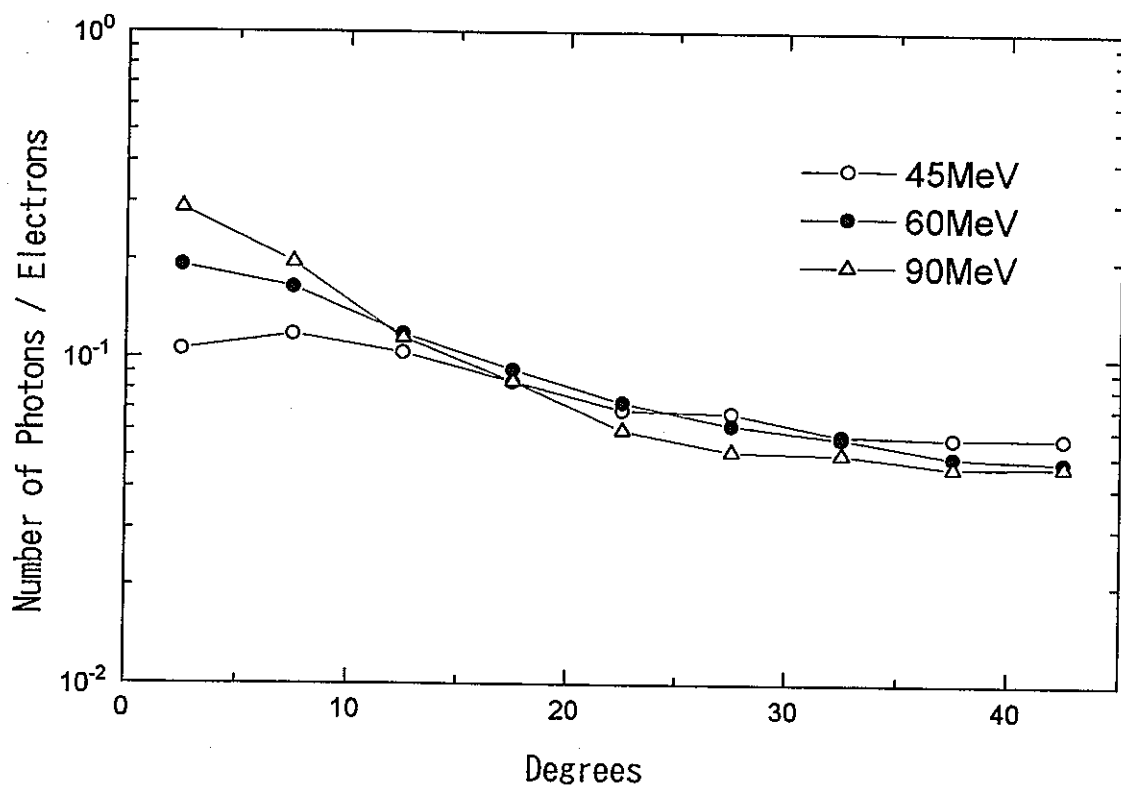


図4. 3 鉛ターゲットから発生する光子数

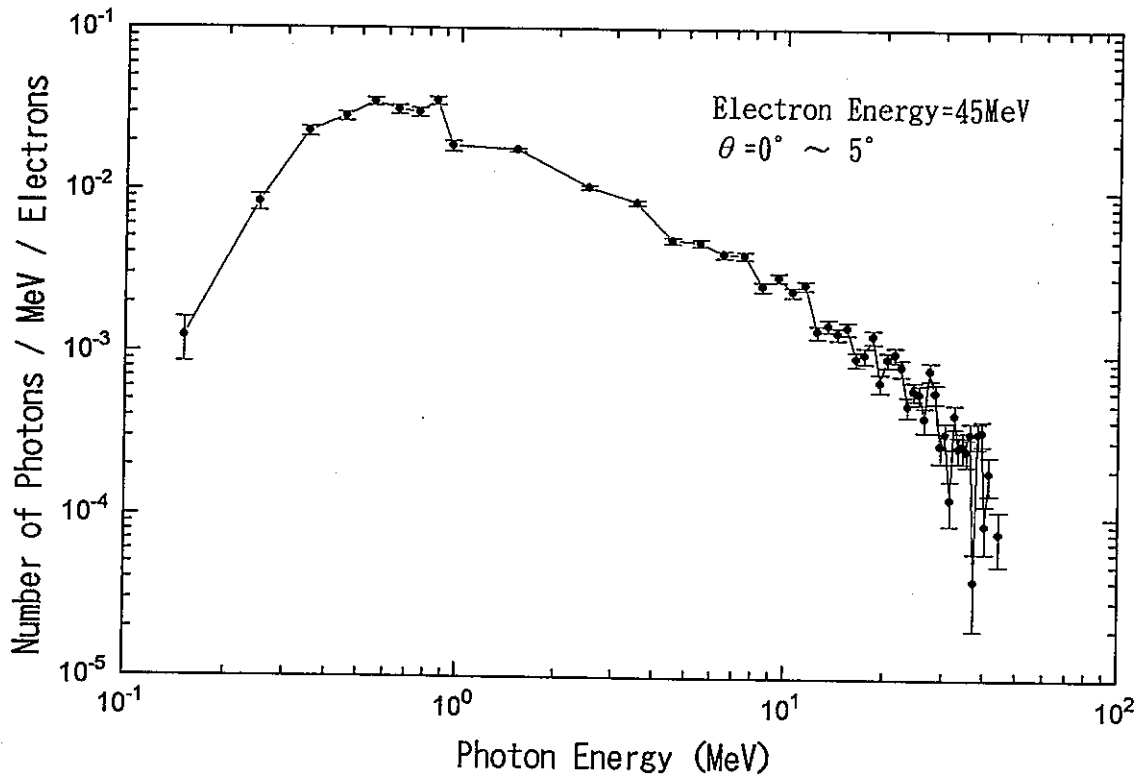


図 4. 4 鉛ターゲットから発生する光子のスペクトル

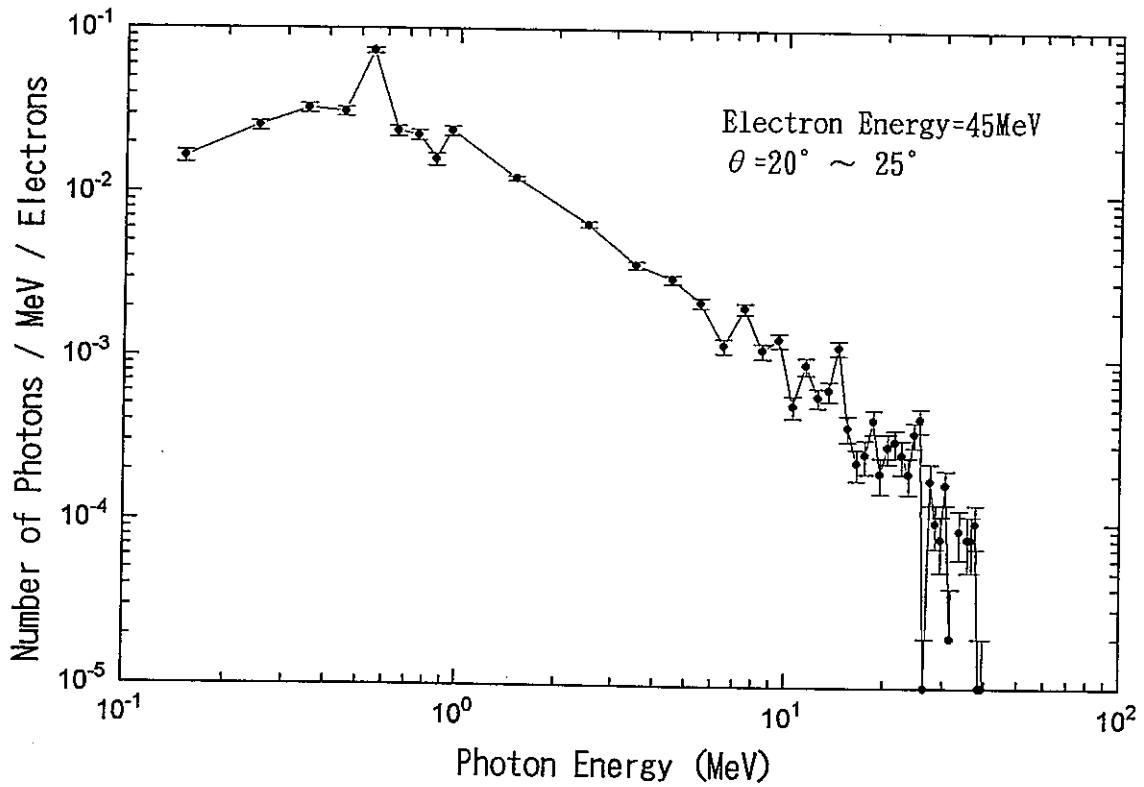


図 4. 5 鉛ターゲットから発生する光子のスペクトル

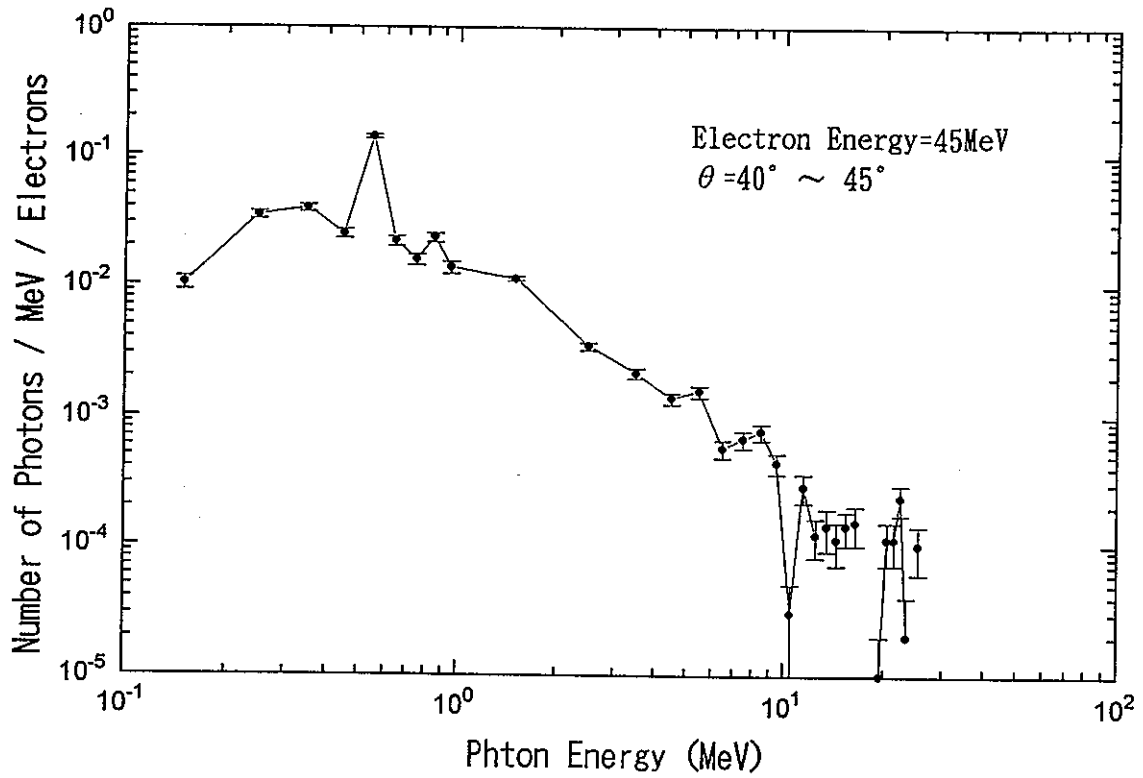


図 4. 6 鉛ターゲットから発生する光子のスペクトル

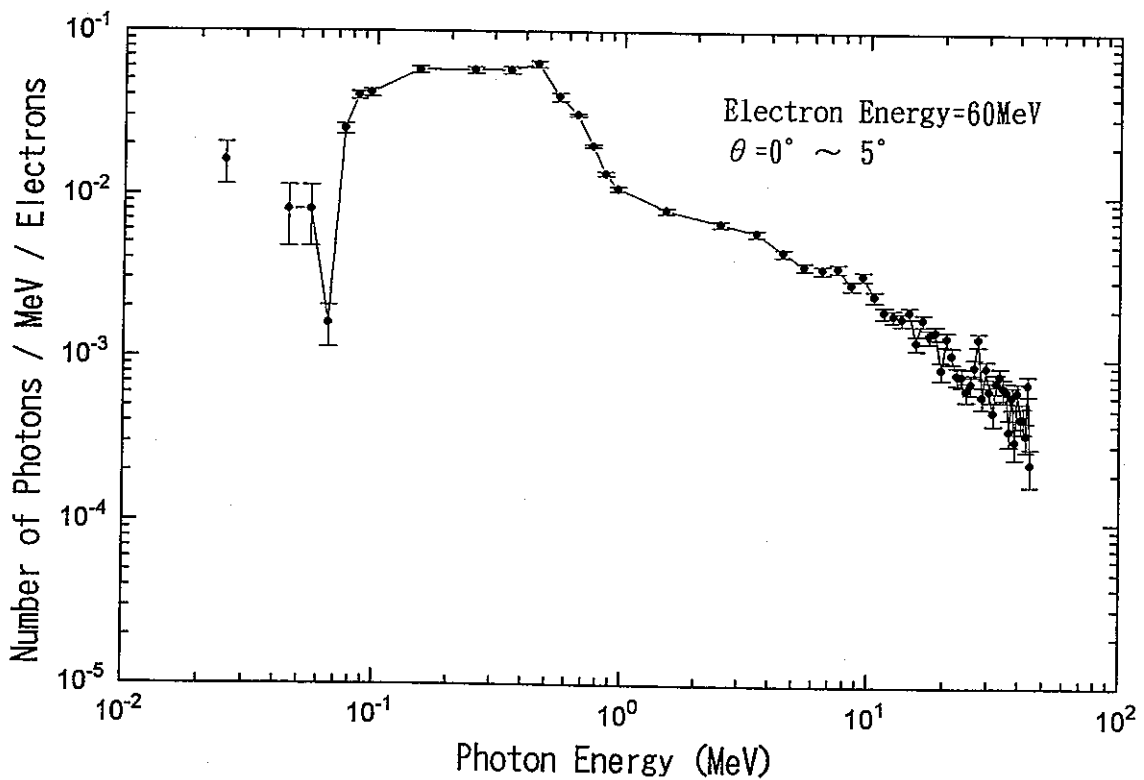


図 4. 7 鉛ターゲットから発生する光子のスペクトル

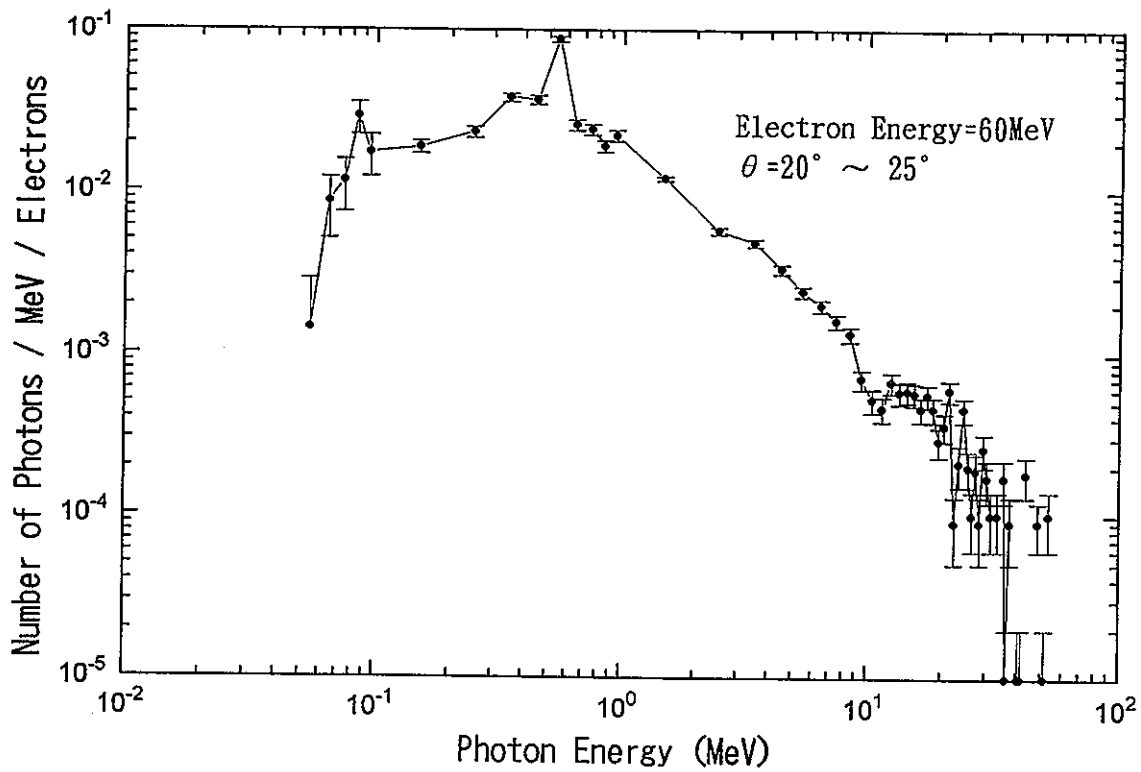


図4. 8 鉛ターゲットから発生する光子のスペクトル

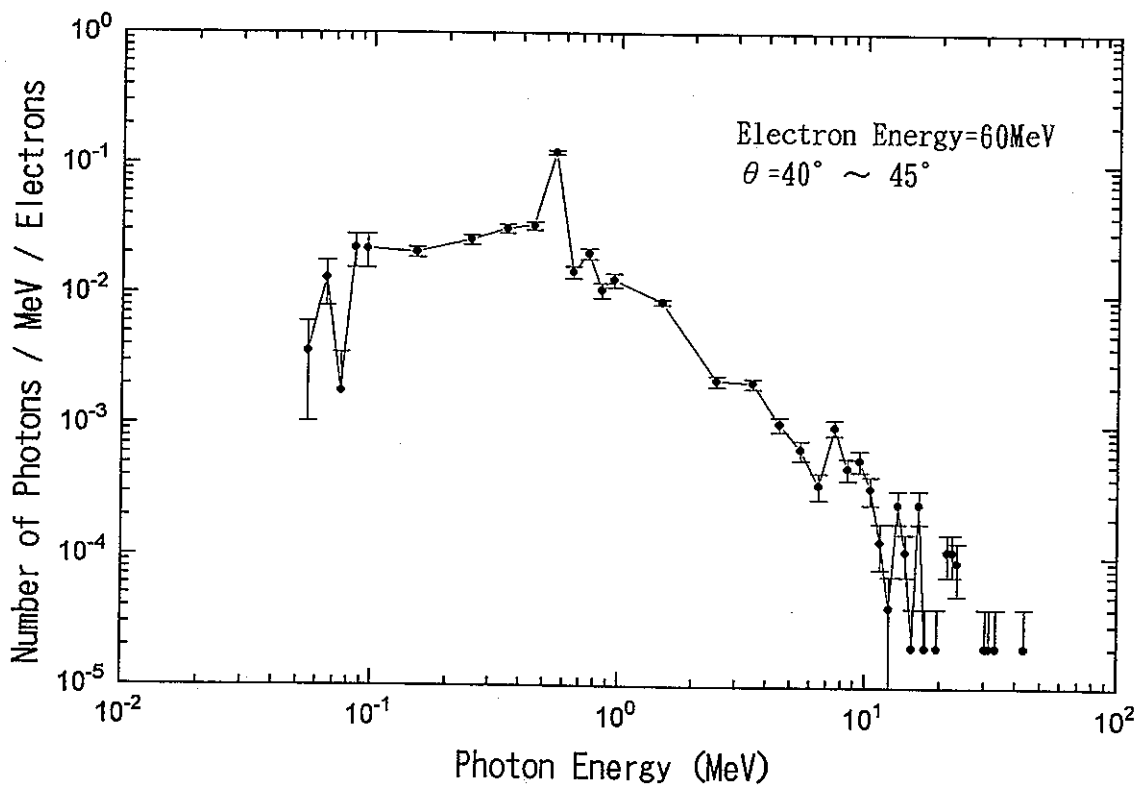


図4. 9 鉛ターゲットから発生する光子のスペクトル

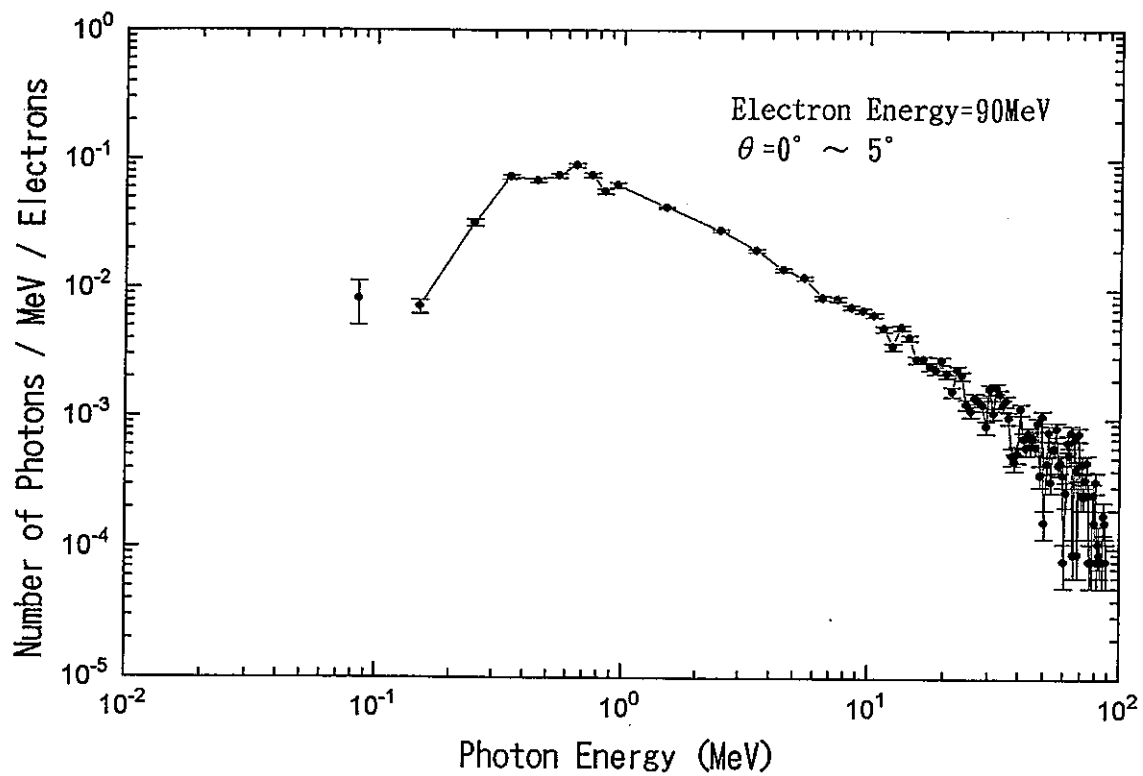


図 4. 10 鉛ターゲットから発生する光子のスペクトル

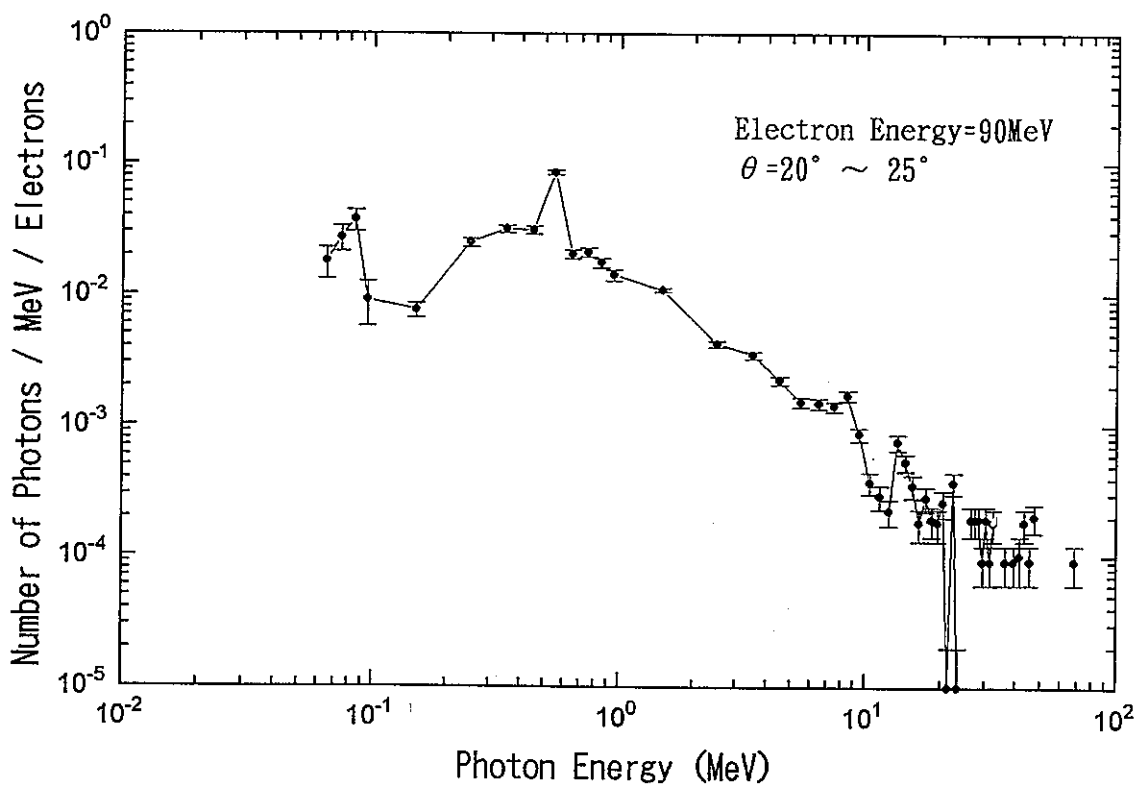


図 4. 11 鉛ターゲットから発生する光子のスペクトル

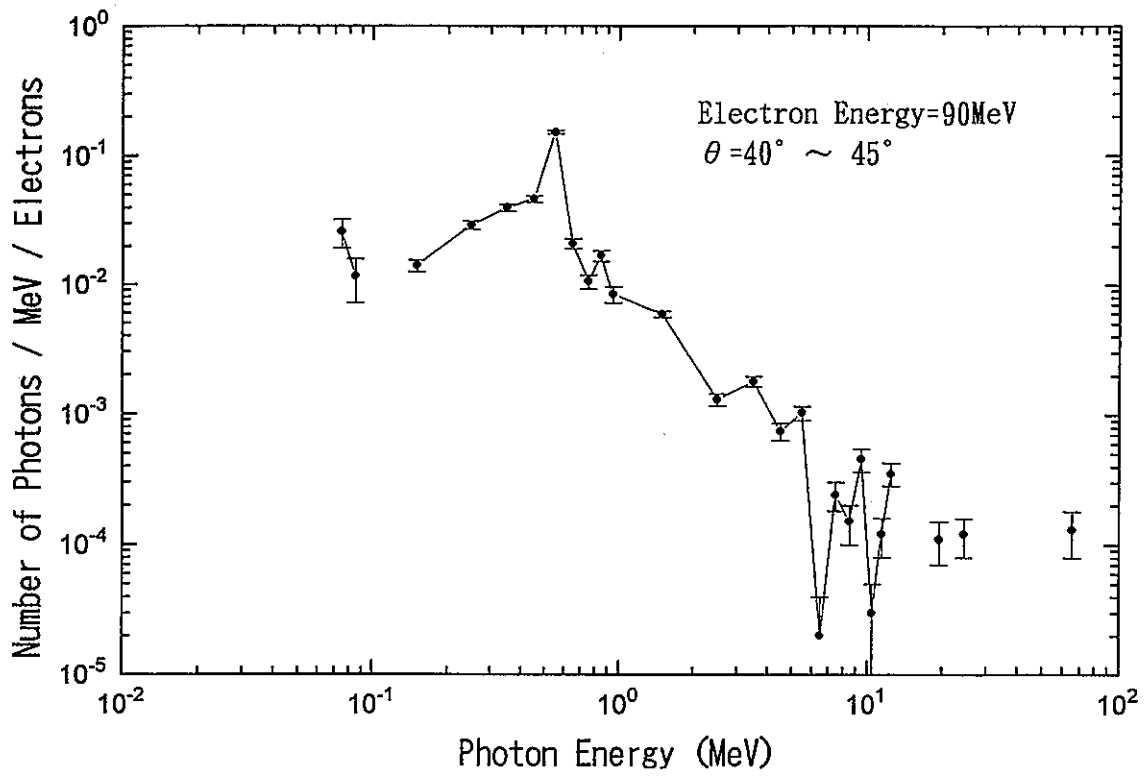


図4. 1 2 鉛ターゲットから発生する光子のスペクトル



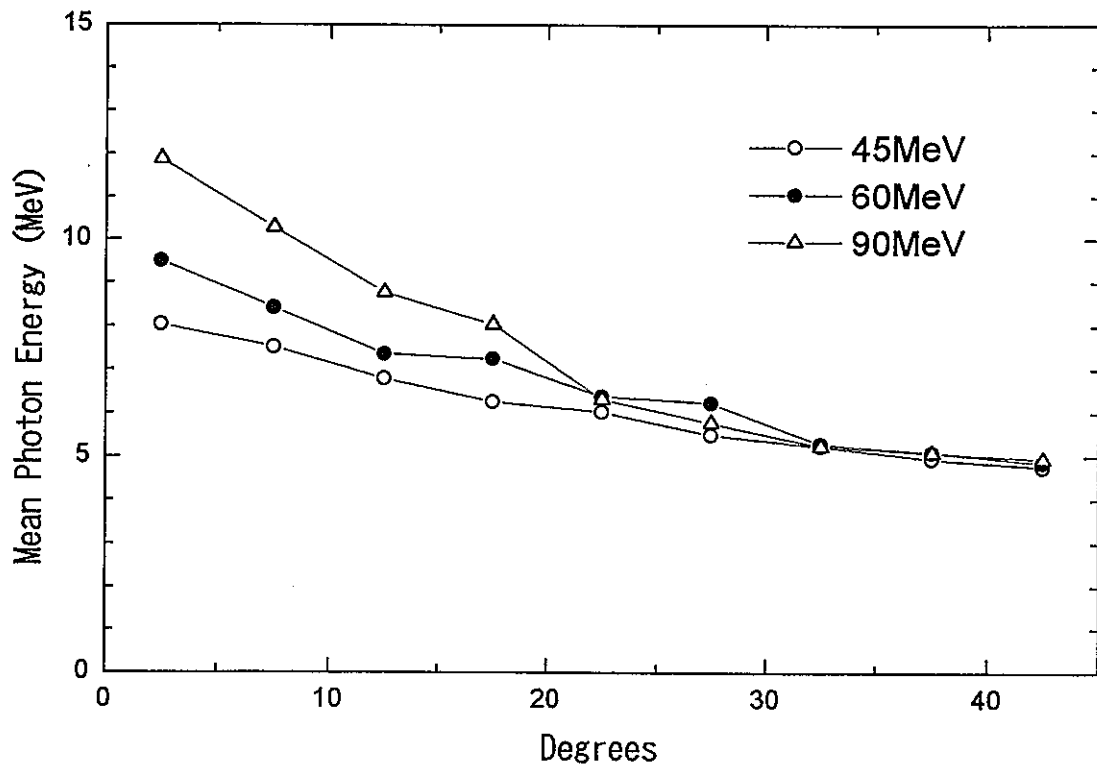


図 4. 1 3 発生光子の平均エネルギー

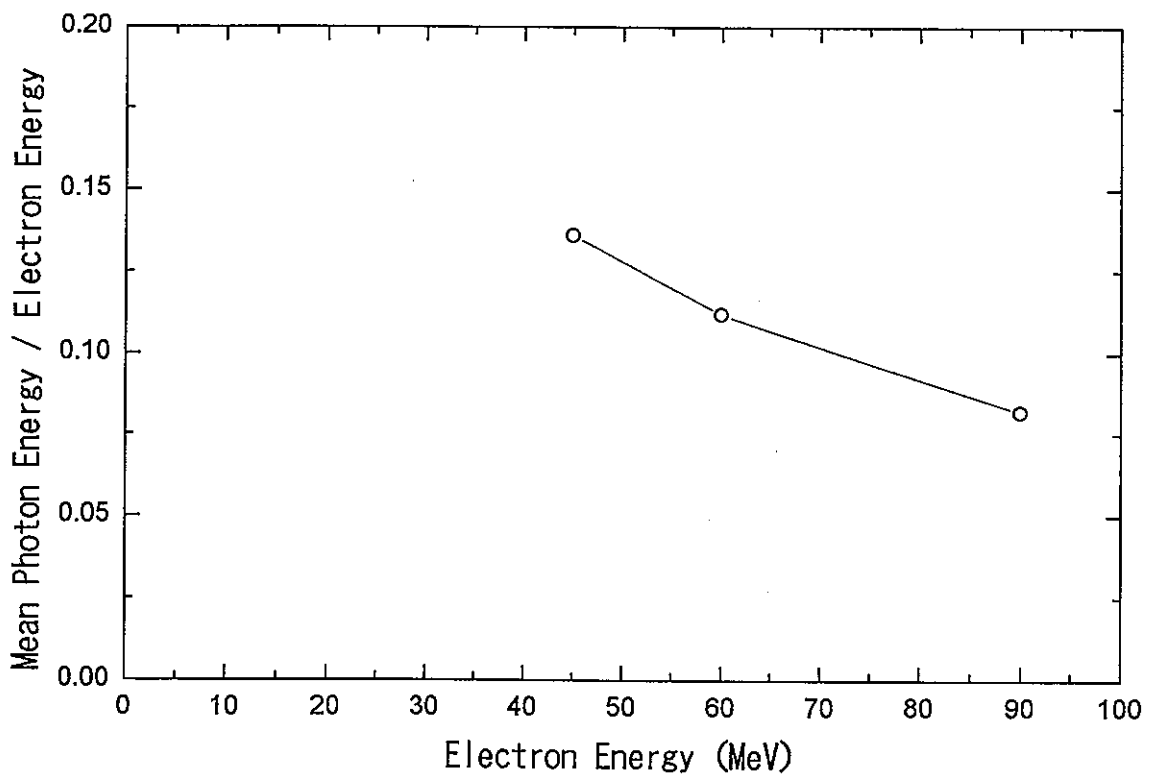


図 4. 1 4 光子の平均エネルギーと入射電子エネルギーの比

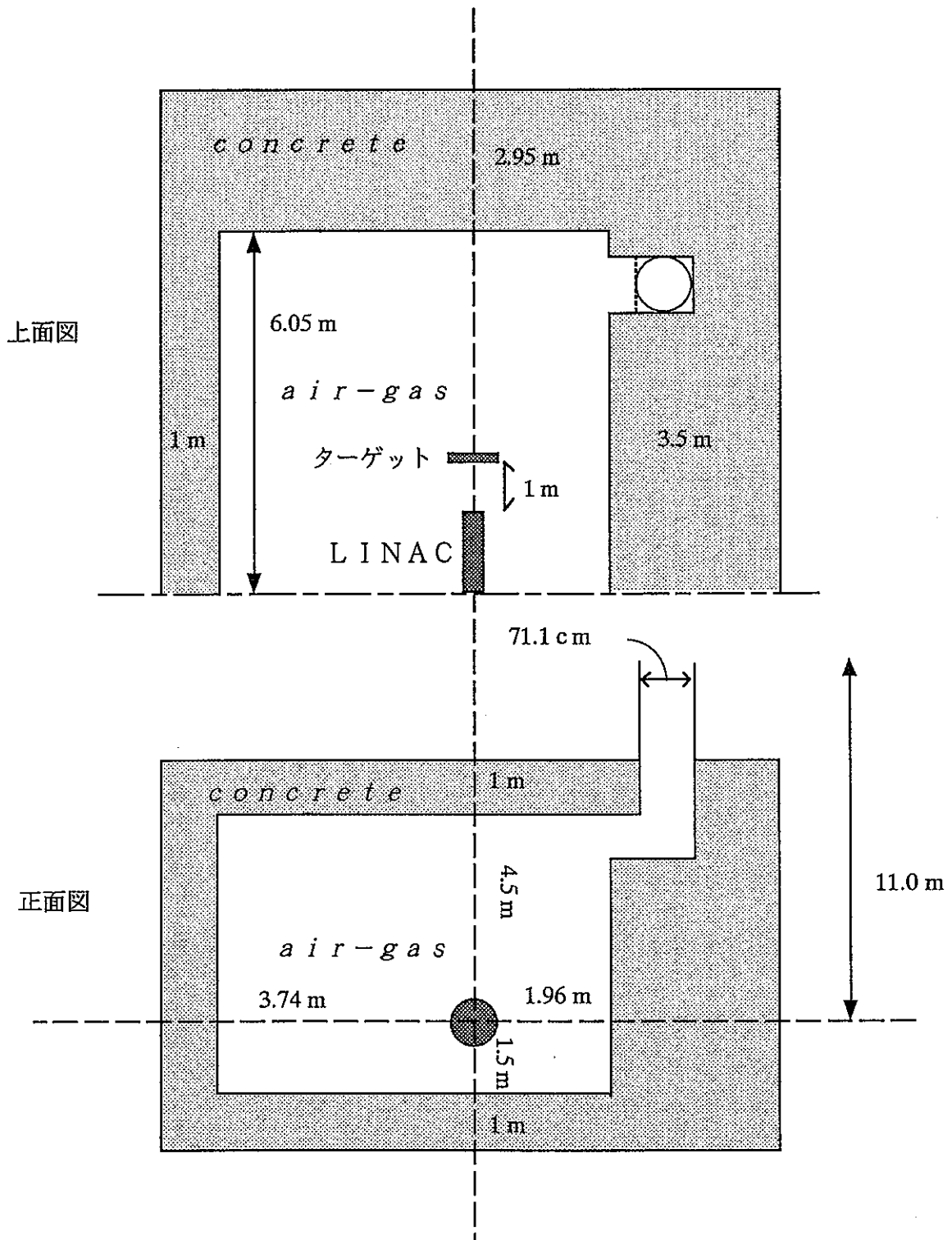


図4. 15 加速器室の幾何学的形状

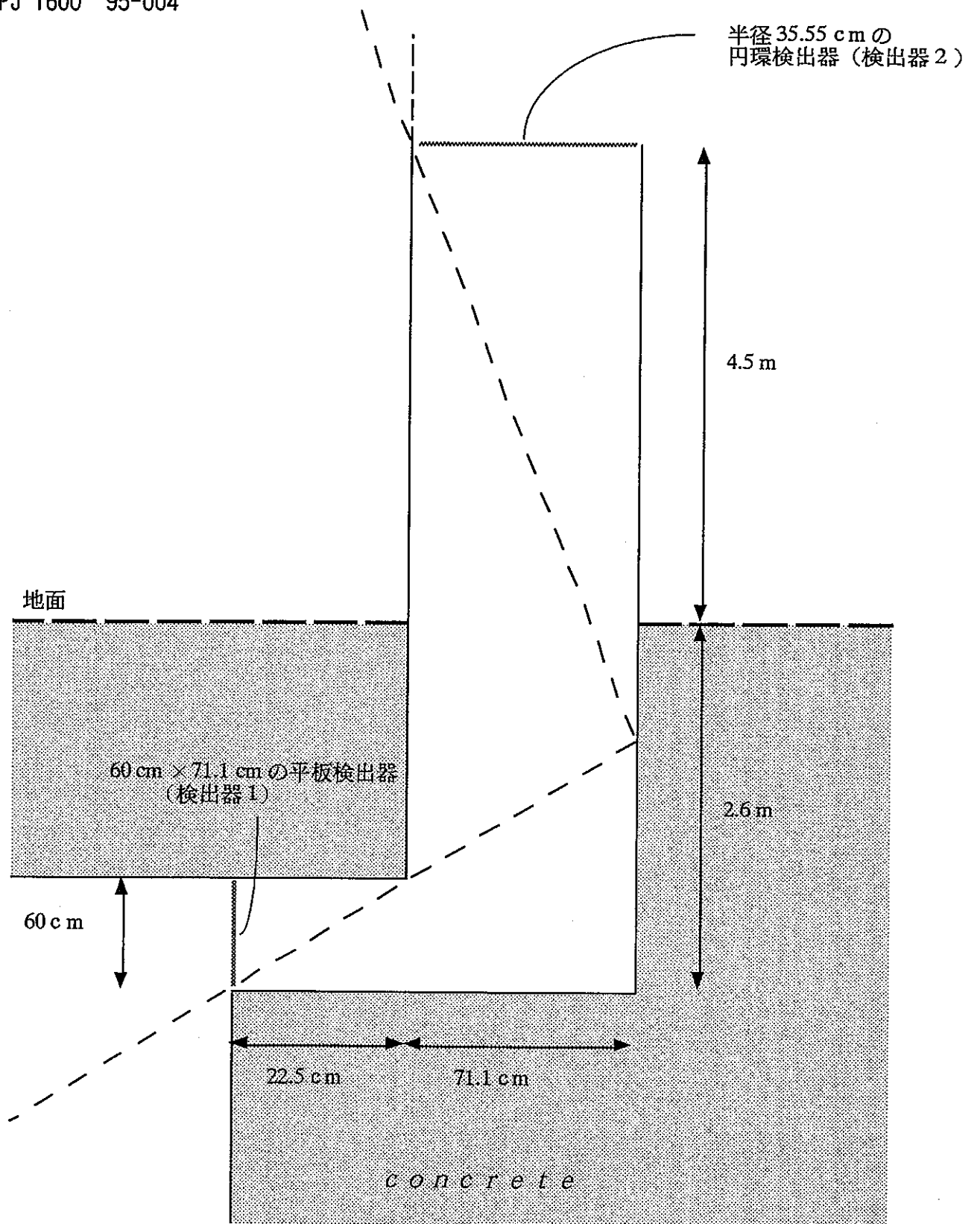


図4. 16 煙突ダクト部分の幾何学的形状と検出器

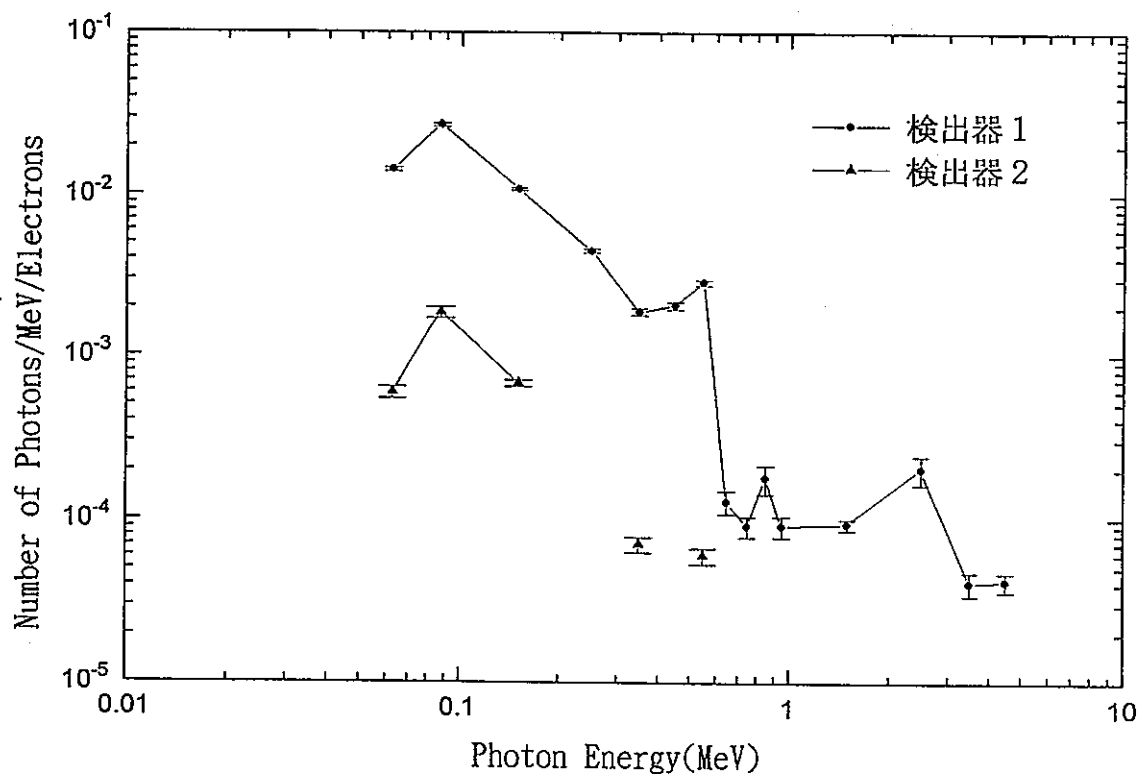


図4. 17 煙突ダクトに入射するターゲットからの発生光子数

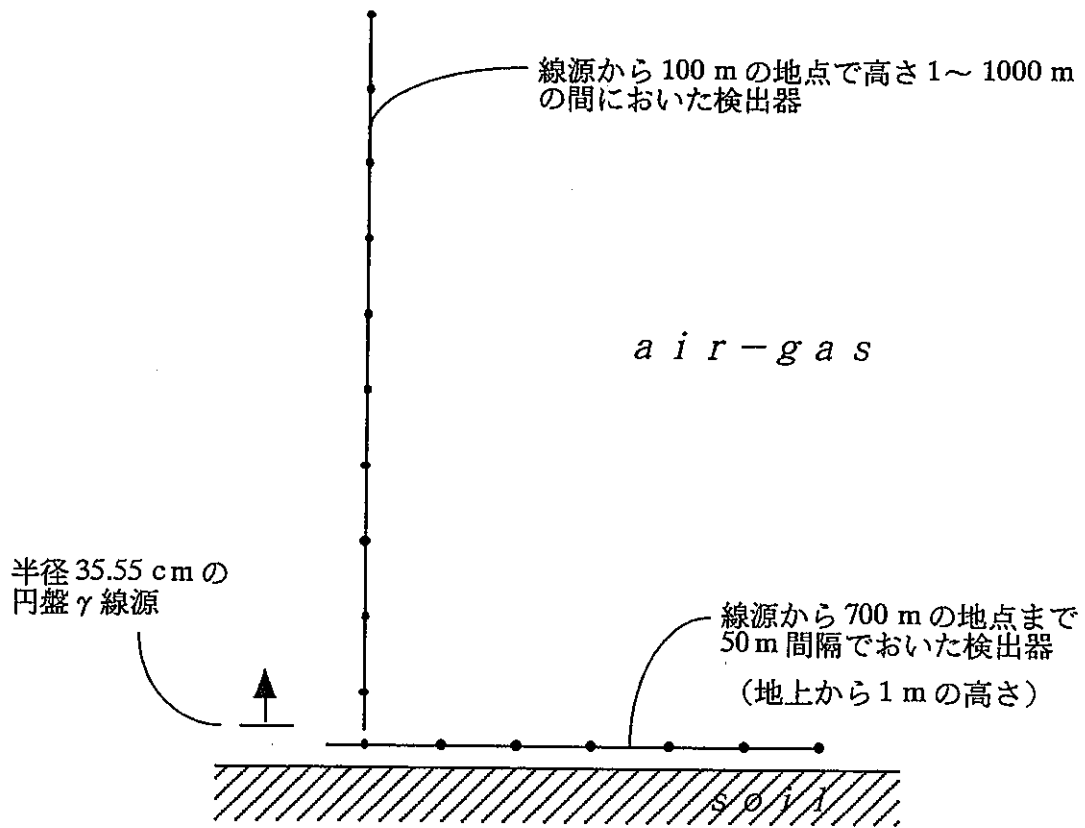


図4. 18 スカイシャイン計算のための幾何学的体系

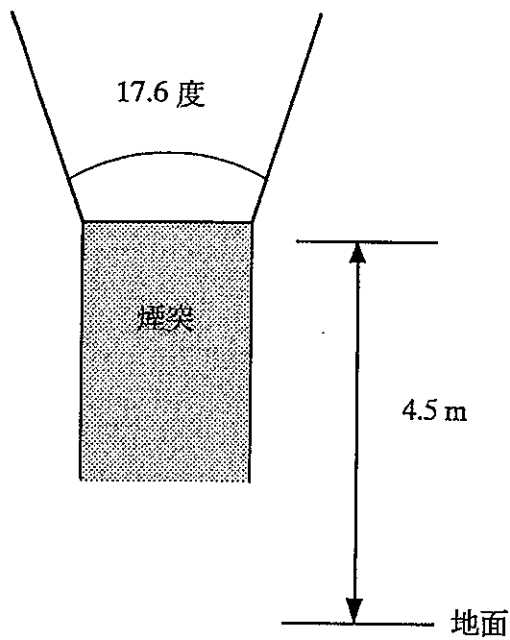


図4. 19 線源の放出角度

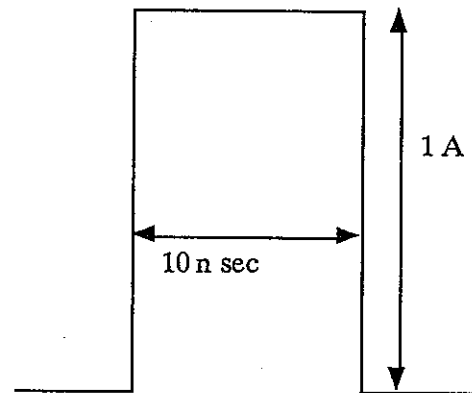


図4. 20 45 MeVライナックのパルス

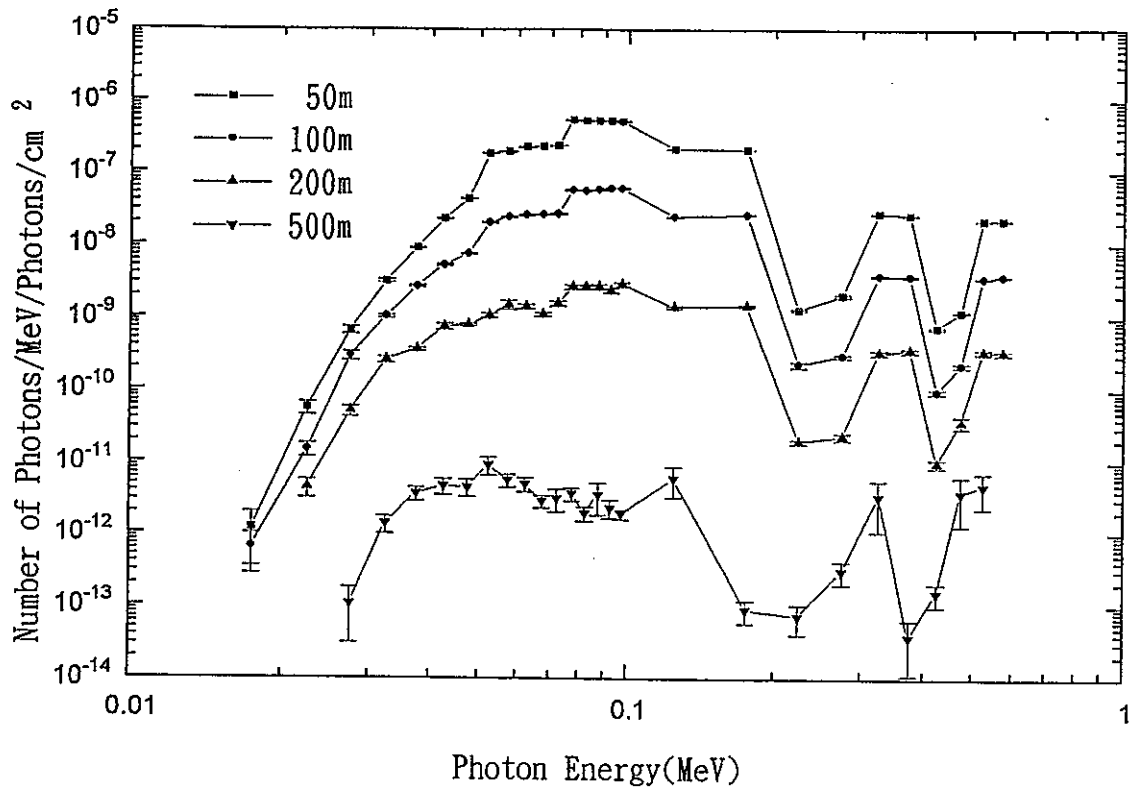


図4. 2 1 距離に対する光子のフルーエンス

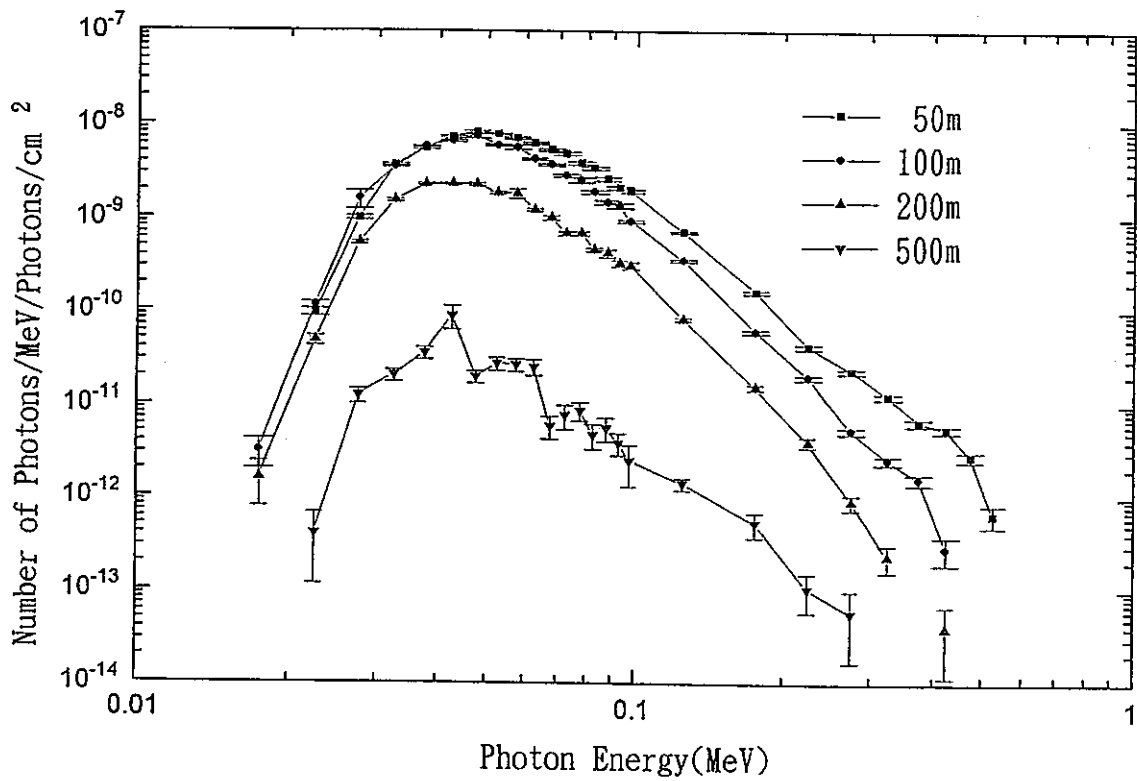


図4. 2 2 高度に対する光子のフルーエンス

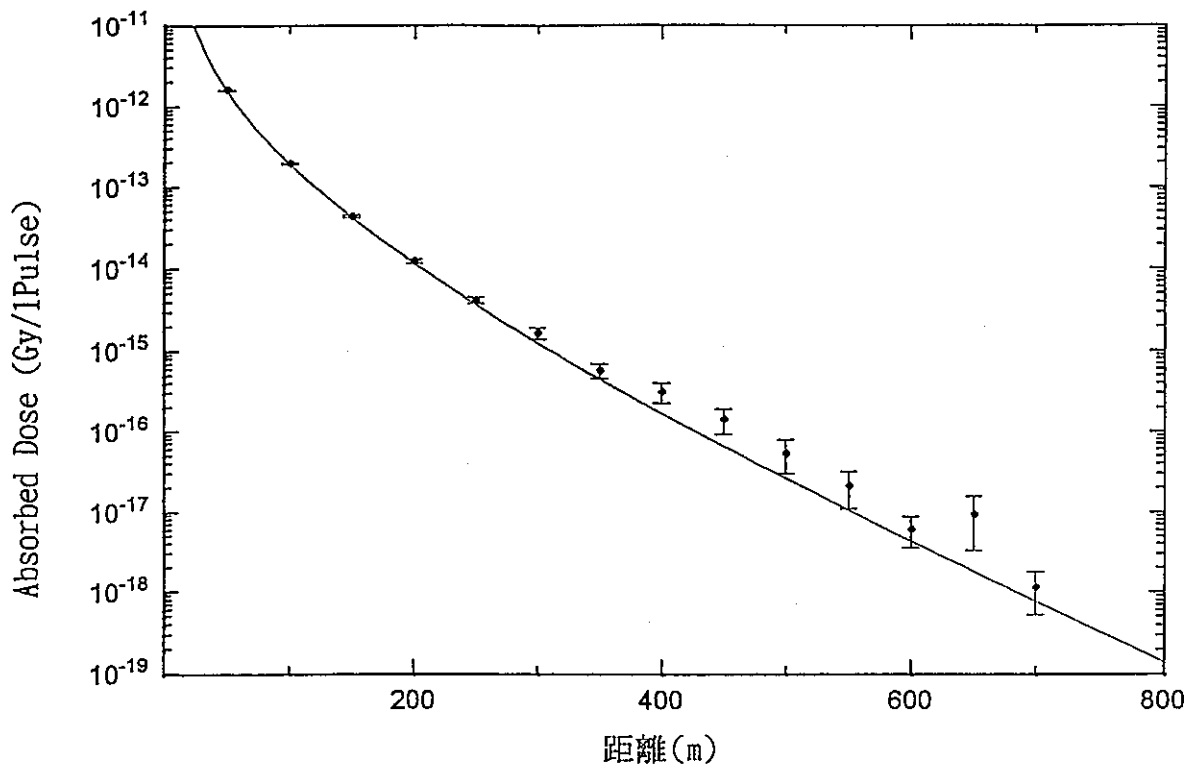


図4. 23 距離に対する吸収線量

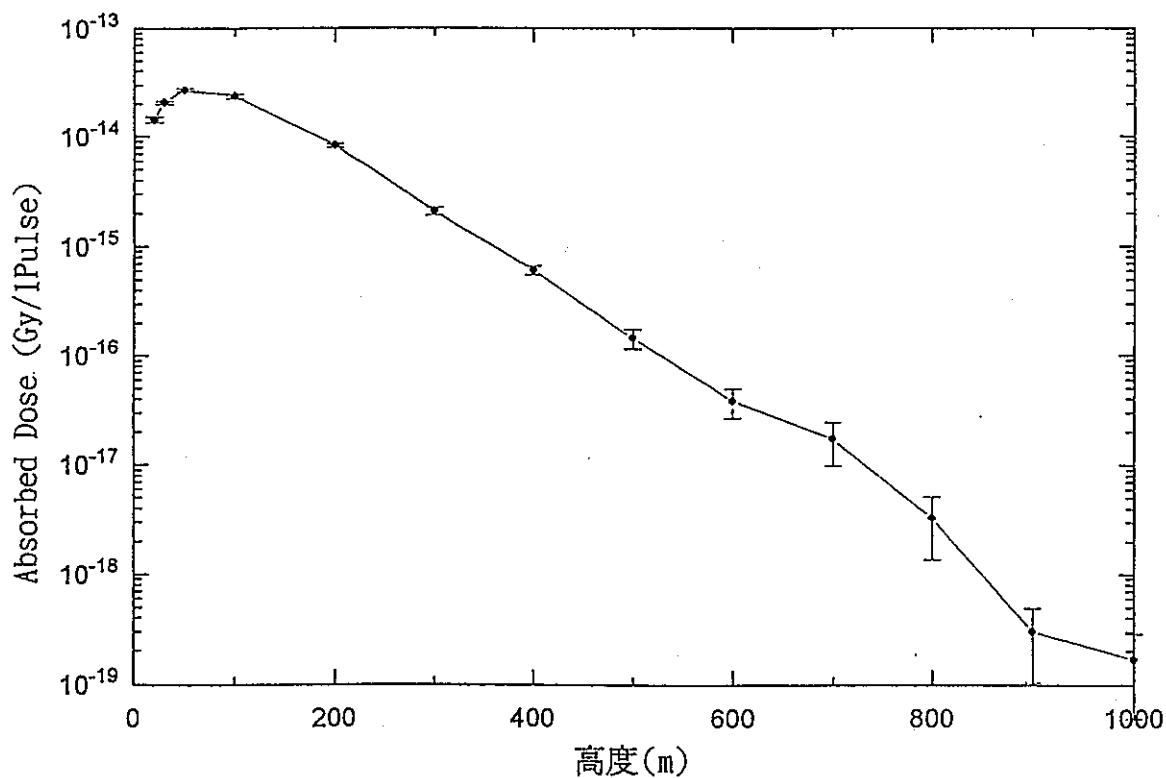


図4. 24 高度に対する吸収線量

参考文献

- (1) 原子力委員会編：「原子力白書」 大蔵省印刷局
- (2) W. R. Nelson, H. Hirayama and D. O. Rogers  
“The EGS4 Code System” , SLAC-Report-265(1985)
- (3) 成田脩、野尻一郎、百瀬琢磨  
「汎用電子- $\gamma$ 線モンテカルロコードEGS-4システムの改良(II)」  
動力炉・核燃料開発事業団
- (4) 山崎文男 編 「放射線」 共立出版株式会社
- (5) W. Hitler 著 沢田克郎 訳 「輻射の量子論」 吉岡書店
- (6) TECHNICAL REPORTS SERIES NO. 188  
“Radiological Safety Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerators”  
INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 1979
- (7) A. Edward Profio  
“Radiation Shielding and Dosimetry”
- (8) JAEGER, R. G. (Ed.) : “Engineering Compendium on Radiation Shielding,  
Vol. 1”  
Shielding Fundamentals and Methods, Chap. 4. 5, (1968), Springer-Verlag
- (9) 宮坂俊一、他：日本原子力学会誌、20[7]、485(1978)
- (10) 「放射線施設遮蔽」研究専門委員会、「ガンマ線遮蔽設計法」ワーキング  
グループ：「ガンマ線遮蔽設計ハンドブック」 日本原子力学会
- (11) Anno, G. H., Witthaus, J. K. : EAD-119, ANCOMP-196, (1964)
- (12) ANS-6. 6 : ANSI N346, (1977)
- (13) 木邨 祐二  
「スカイシャイン線量評価手引と散乱ガンマ線に関する米国基準」