

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 (Ⅲ)

(動力炉・核燃料開発事業団 委託研究成果報告書)

1996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 (Ⅲ)

沢村 貞史*

要 旨

核燃料施設の環境評価項目の1つとして、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がある。この線量評価は遮蔽計算コードにより解析が行われている。しかし、ベンチマーク実験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、作成した同期型パルス状放射線測定装置を用いて、北大45MeV電子線形加速器施設周辺の線量分布測定を、漏洩ガンマ線の平均自由行程の約10倍程度の距離(約600m)にわたって実施することにより、施設周辺におけるスカイシャインの影響を明らかにするとともに、汎用ユーザズ版EGS4コードにより北大45MeV施設のスカイシャイン線の評価を行い、実験結果との比較検討を行うため以下の研究を行った。

- 電子線加速器から発生する制動X線を線源とし、作成した同期法パルス状放射線測定装置を用いて、施設から西方向350m、南方向100m、北方向600mにわたるスカイシャイン線の測定を行った。測定結果はG(E)関数法により空間線量率に換算された。その結果、施設から70m以内、100m-400mの区間および400m以遠では異なる空間変化を示すことが分かった。
- 汎用版EGS4に備えられたポイント検出器を用いて、北大45MeV電子線形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。
- シミュレーションの結果と実験結果とを比較検討した。双方のデータに未だ統計誤差を含むが、70m以内の実験データとの比較には、施設の構造をより反映した幾何学的形状が必要である。しかし、本シミュレーション結果は100m以遠の実験結果をよく再現することが分かった。

※ 本報告書は、沢村貞史が動力炉・核燃料開発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・・・・・・070D0180

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



OFFICIAL USE ONLY
PNC IIJ 1600 96-003
March 1996

Demonstration Study on Shielding Safety Analysis Code (III)

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 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 ;

- Using the pulsed radiation measurement system with gated counting operation mode, skyshine of gamma ray from the 45MeV linear accelerator facility were measured in the distance up to 600m around the facility.
- A point detector was used to simulate the skyshine dose up to 700m from the LINAC facility by using the general purpose user's version of EGS4 monte carlo code.
- Simulations were well fitted to the experimental results within the statistical errors. It has shown that the general purpose version was useful to simulate not only in the simply idealized geometry but also in the complex one as that of the real existing facility.

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 the Atomic Science and Nuclear Engineering,
Faculty of Engineering, Hokkaido University

目次

1. はじめに	1
2. 同期型パルス状放射線測定方式とスカイシャイン	2
2.1 作製したパルス状放射線測定装置とバックグラウンド低減率	2
2.2.1 放射線源	2
2.1.2 同期測定法とパルス状放射線測定装置	2
2.2 G(E) 関数の多項式近似	3
2.3 遠距離測定のための改良	4
2.3.1 トリガ信号系	4
2.3.2 シンチレーション検出器系のエネルギー校正	4
2.4 ポイント検出器を用いたスカイシャイン計算	5
2.5 結果と考察	5
3. 45MeV 電子線型加速器施設周辺の線量測定	13
3.1 45MeV 加速器施設の概観	13
3.2 制動X線発生用ターゲット	13
3.3 施設周辺の測定点と周辺状況	13
3.4 施設周辺の線量分布測定	14
3.4.1 施設の敷地内における測定	14
3.4.2 西方向における測定	15
3.4.3 北方向における測定	15
3.5 結果と考察	16
4. EGS4 計算コードを用いたシミュレーション解析	47
4.2 施設からの制動放射線発生計算	47
4.2.1 計算体系	47
4.2.2 計算結果	48
4.3 施設からの漏洩放射線および線量分布	55
4.3.1 施設からの漏洩放射線	55
4.3.2 計算体系	55
4.3.3 計算結果	55
4.4 スカイシャイン線量における測定値との比較	67
4.5 解析結果の検討	68
参考文献	72
付録	74

1. はじめに

核燃料施設をはじめとして原子力施設の安全評価において、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において重要な課題となっている。

施設から発生する高エネルギー放射線の周辺環境への伝播は、直接線によるものはもちろんの事、むしろ遠距離では空気散乱現象（スカイシャイン）によるものが主体を占める。従って、核燃料施設からの直接線のみならず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。従来の解析においては、ベンチマークデータが極めて少ないこともあり、スカイシャインの基となる線源の空間分布やエネルギー分布さらにはその発生原因等の違いを考慮するため、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、今後より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および各種計算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。これまでに、ベンチマークデータや計算コードの調査（初年度）、同期型パルス状放射線測定装置の開発と北大45MeV電子線形加速器施設内における測定と汎用ユーザズ版EGS4コードを用いたスカイシャイン線のシミュレーションを行ってきた。今年度はこれまでの成果を基にして、作成した同期型パルス状放射線測定装置を用いて施設周辺から約600mまでの距離にわたるスカイシャイン線の測定を行い、シミュレーション結果との比較検討を行った。

本報告書の構成は以下の通りである。

まず、第2章では、これまでの結果を概観し、パルス状放射線測定装置の特色と性能を記した。さらに、遠方の測定が行えるように測定装置を強化して点についても触れた。

第3章では、漏洩源となっている排気筒を中心として西方向350m、南方向130m、北方向600mにわたるスカイシャイン実験の結果を示した。

第4章では、汎用ユーザズ版EGS4に備えられたポイント検出器を用いて北大45MeV電子線形加速器からのスカイシャイン線のシミュレーションを行い、実験結果との比較検討を行った結果を示した。

尚、本委託研究の成果として得られた結果を、その都度、まとめたものを付録として添付した。

2. 同期型パルス状放射線測定方式とスカイシャイン

本章では、これまでに作成したパルス状放射線測定装置の概要と遠距離測定のために、本年度加えた改良点について記す。

2.1 作成したパルス状放射線測定装置とバックグランド低減率

電子線形加速器から発生するパルス状放射線は、通常のラジオアイソトープからの放射線と比較して以下のような大きな特色を有している。

- (1) 平均放射線強度に対して瞬間放射線強度が極端に高い。
- (2) 時間的に放射線の発生時点を定めることが出来、他の不要な放射線（例えば、バックグランド放射線）との識別が容易である。

これらの特色を利用して、ゲート信号を用いた同期方式による測定装置を開発し、S/N比の高い測定系を実現化することが出来た。さらに、この装置をスカイシャイン測定に応用することを試みた。

2.1.1 放射線源

北大 45MeV 電子線形加速器に鉛ターゲットを設置し、パルス状の制動X線を発生させ、これを放射線源とした。電子ビームのパルス幅は $3\mu\text{s}$ 、繰り返し周波数は 100Hz で運転された。各測定点における線量は鉛ターゲットに捕集される平均電流値（ $2-48\mu\text{A}$ ）で規格化された。加速器施設の外観をPhoto2.1に、加速器の外観をPhoto2.2に示す。加速器は地下3.4mに据え付けられている。ビームの高さは加速器室床面から1.5mである。加速器室には排気筒が取り付けられており（Photo2.1中の最も高い筒）、電離箱サーベイメータによる施設建屋屋上の線量分布測定によれば、この排気筒周辺が最も高い値を示した。そのため、各測定点までの距離の原点を排気筒位置にした。

2.1.2 同期測定法とパルス状放射線測定装置

同期測定法を用いることにより、加速器からの放射線が到来しない時間の自然放射線（バックグランド放射線）による計数を除去することが出来、加速器からの放射線を精度よく測定することが出来る。Photo2.3、Photo2.4に作成したパルス状放射線測定装置の写真を示す。検出器は $3''\phi\times 3''\text{NaI(Tl)}$ シンチレーション検出器を使用した。線量分布を測定するときには、検出器は地上1mの高さにセットされた。ゲート信号と放射線信号の波形をPhoto2.5、Photo2.6に示す。上の写真は自然放射線の場合で、ゲート信号から外れているため、バックグランド測定用アン

チコインシデンス回路の出力となる。下の写真は加速器からの信号放射線に対するものり、ゲートの中にあるので信号放射線としてコインシデンス回路の出力となり、また、波高分析装置に蓄えられ、測定終了後、G (E) 関数を用いて照射線量に変換される。

いま、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ときのバックグラウンド計数率をN gate、検出器信号をすべて計数する場合のバックグラウンド計数率をN no gate とする。このとき、バックグラウンド低減率 α は、

$$\alpha = (N \text{ gate } / N \text{ no gate })$$

である。 α はゲートパルスの幅と繰り返し周波数に依存し、測定時間を充分長くすると、

$$\alpha = (\text{ゲートパルス幅}) \times (\text{繰り返し周波数})$$

になる。本実験においては、ゲートパルス幅 $= 30 \mu s$ 、繰り返し周波数 $= 100 \text{ Hz}$ である。故に、 $\alpha \doteq 1 / 300$ となる。この値は実験的にも確認された。

2.2 G (E) 関数の多項式近似

各測定点における照射線量はG (E) 関数法により求めた。N (E) を波高分布とすると、照射線量Rは

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

で与えられる。宮永等が求めた3" $\phi \times 3$ " Na I (T1) にたいするG (E) 関数を図 2.1 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、おおよそ、0.1 - 2 MeV 程度である。上記の積分計算を簡単化するため、このエネルギー範囲内のG (E) 関数を以下の多項式で近似した。

$$y = (a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3) \times 10^{-3}$$

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。多項式近似の結果を図 2.2 に示す。図中の実線が多項式による計算値である。80 keV 以上で良くG (E) 関数を近似していることが分かる。

2.3 遠距離測定のための改良

昨年度作成したシステムは、最大200mの範囲内における測定が可能な装置であった。これを600mまで測定が出来るように改良した。

2.3.1 トリガ信号系

パルス状放射線測定装置においては、測定点までゲート開閉用トリガ信号を伝送する必要がある。現在、このトリガ信号伝送に特性インピーダンス50Ωの同軸コードを使用している。測定点までの距離が600mとすると、伝送ケーブル長はさらに長くなる。トリガ信号を、600m以上の距離にわたって、歪み無く伝送するためには、トリガ信号の伝送経路のインピーダンス整合にも充分注意する必要がある。また、トリガ信号発生器は600m以上の長さの同軸コードを駆動する充分な信号エネルギーを発生できなければならない。図2.3にパルス状放射線測定体系のブロック図を示す。トリガ系を除けば、昨年の200m系と同一である。これまで、トリガ信号としてエミッション信号をLINAC制御盤から取り出して使用してきた。このエミッション信号は実際の加速器出力電子ビームと最も時間的に近い信号であるため、制御信号として使用し易い特色がある。しかし、エミッション信号には

- (1) 出力電力が小さいこと
- (2) 遠距離の時には、同軸ケーブル中の信号伝送速度が遅いため、トリガパルスが放射線パルスよりも遅く測定点に到達する恐れがある

ことから、トリガ信号としては採用しなかった。そこで、LINAC制御系で、最も早い時刻に発生しているスコープ1信号を採用した。この信号をトリガ信号として使用できるように、ゲートデレー回路を新たに作成した(Photo2.7)。この回路は直接1000m程度のケーブルを駆動することが出来る。ゲートデレー回路に600m長のケーブルを繋いだときの入力パルスと出力パルス波形を図2.4に示した。伝送後の波形歪みは未だ存在するが、充分トリガ信号として使用可能である。

2.3.2 シンチレーション検出器系のエネルギー校正

遠距離へ行くほど、到来する放射線は低エネルギー成分が増加すると予測される。従って、波高分析装置の低エネルギー側の各チャンネルと実際の光子エネルギーとの対応をより正確に行う様に注意する必要がある。昨年度は ^{137}Cs 、 ^{60}Co の計3個の光電ピークを用いて校正したが、本年度は、これに ^{133}Ba の81keV、356keVの2個の光電ピークを

加えた計5個の光電ピークを用いてエネルギー校正を行った。尚、光電子増倍管の印可電圧(1000V)や増幅器のゲイン等は昨年と同様である。図2.5にエネルギー校正の結果を示す。

2.4 ポイント検出器を用いたスカイシャイン計算

EGS4計算コード汎用ユーザズ版に組み込まれている検出器機能のうち、今回の計算では円環検出器などの平板検出器に代わり、施設からの漏洩放射線方向依存性を解析するために、すべてポイント検出器を用いて計算を行った。

2.5 結果と考察

パルス状放射線測定装置に必須なトリガ信号として、従来、エミッション信号を用いていたが、遠距離測定時における到来放射線とトリガ信号の時間関係が逆転する恐れがあったため、トリガ信号をスコープ1信号に変えた。その結果、昨年度作成したパルス状放射線測定体系は、新たにゲートディレイ回路を加えることにより、充分遠方のスカイシャイン測定に使用出来ることとなった。また、ポイント検出器の使用により、汎用ユーザズ版EGS4コードは、サーフェスクロッシング検出器より、一層、スカイシャインシミュレーションの精度の向上が期待できるようになった。

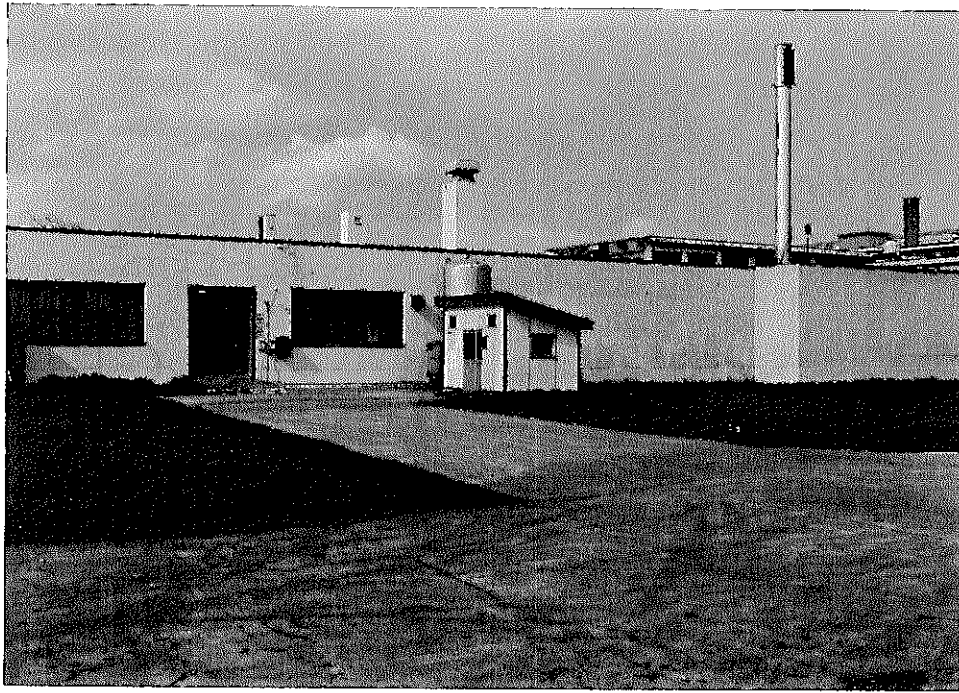


Photo2.1 北大 45MeV 加速器建屋概観

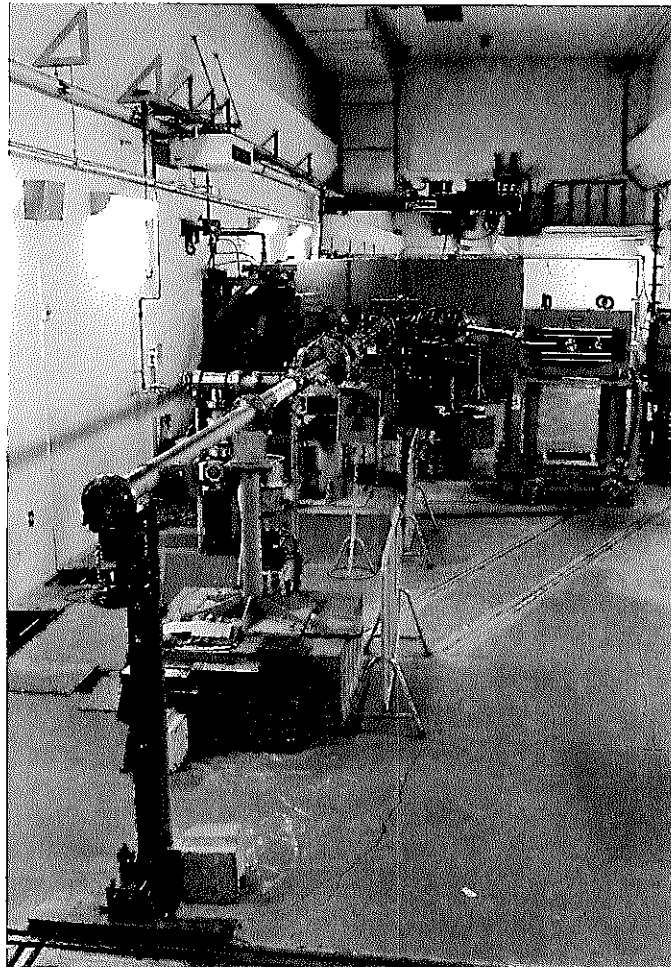


Photo2.2 加速器概観

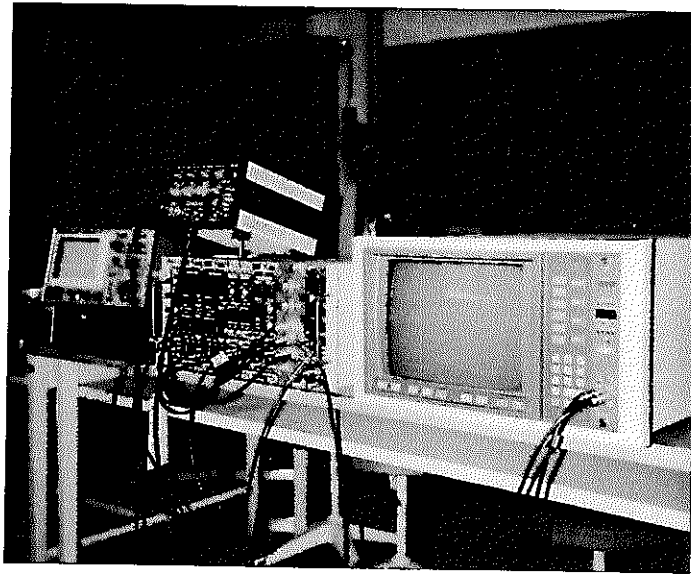


Photo2.3 パルス状放射線測定装置

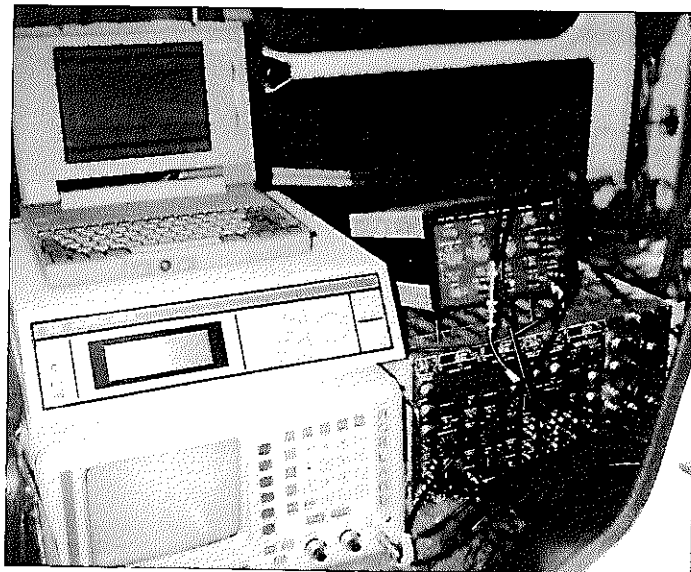


Photo2.4 波形解析装置とコンピュータ

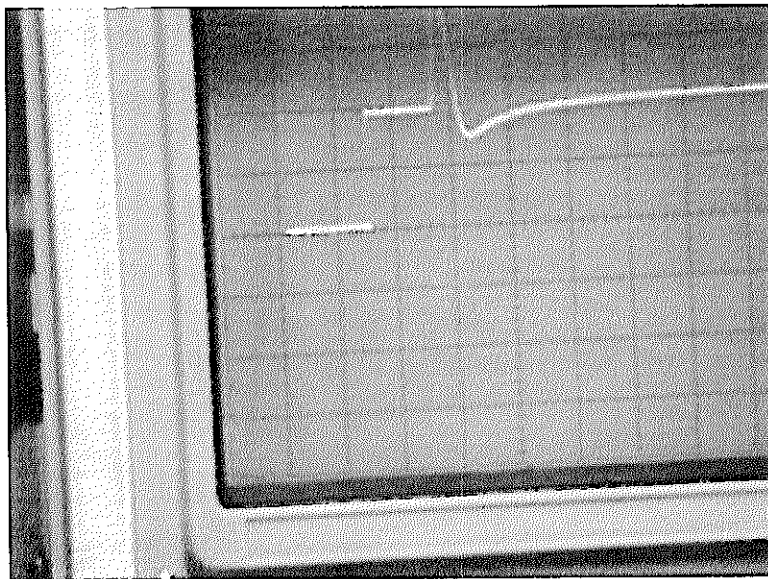


Photo2.5 ゲートパルス波形と放射線パルス波形
(ゲートと一致していない自然放射線)

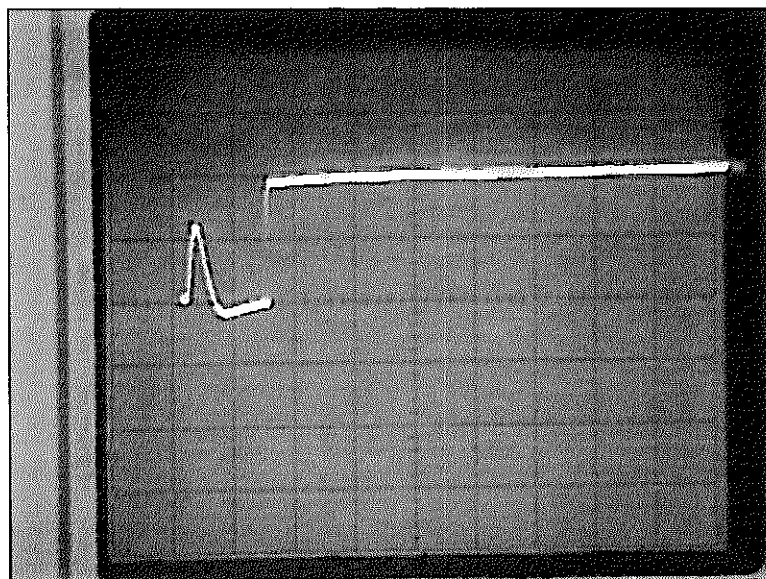


Photo2.6 ゲートパルス波形と放射線パルス波形
(ゲートと一致した加速器からの放射線)

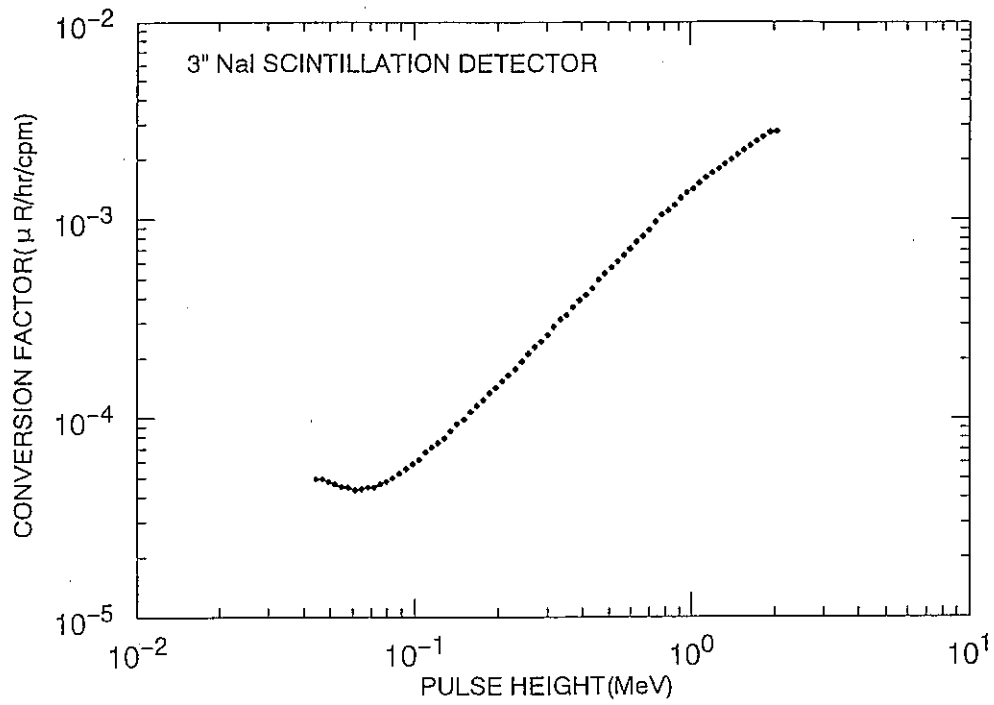


図 2.1 3"φ×3"NaI(Tl) の G(E) 関係
 (宮永一郎、森内茂：日本原子力学会誌、
 vol.9, No8, p440 (1967) より引用)

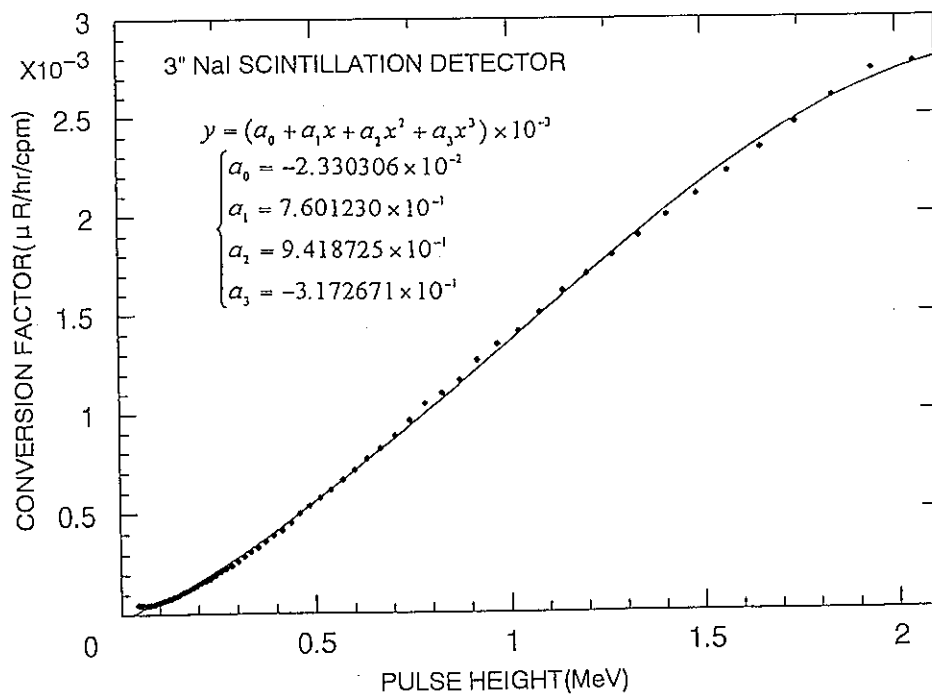


図 2.2 G(E) 関係の多項式 y による近似

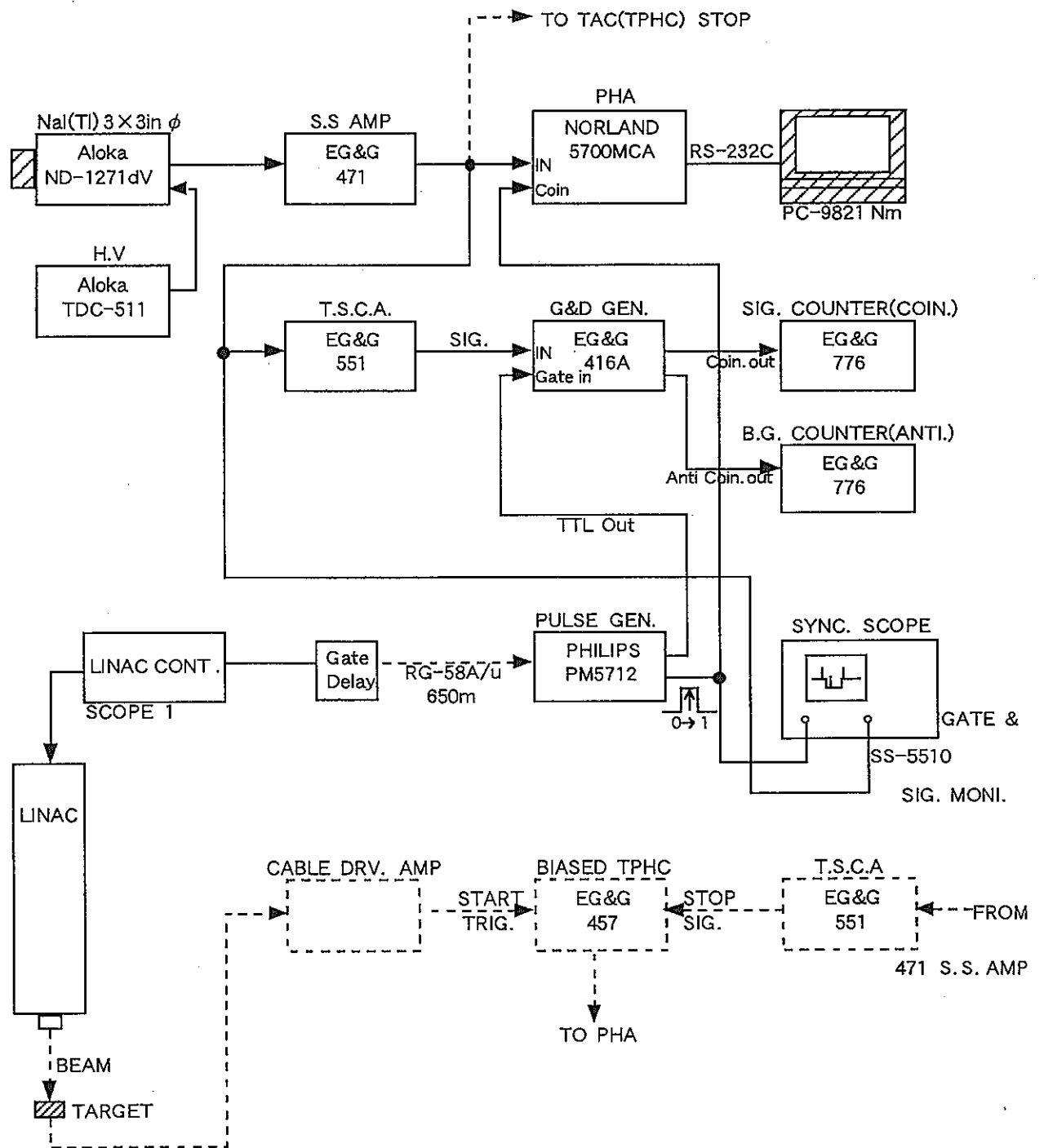


図2.3 同期法によるパルス状放射線測定装置のブロック図

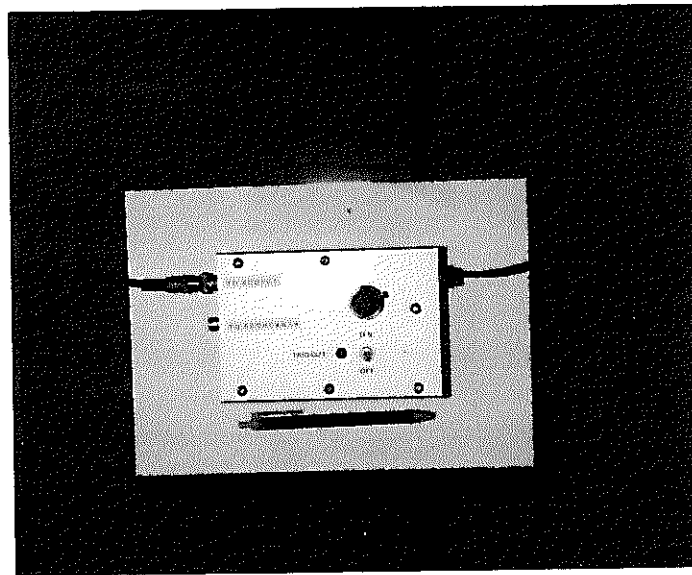


Photo2.7 ゲートディレイ回路

10:51:29 95 Aug 29

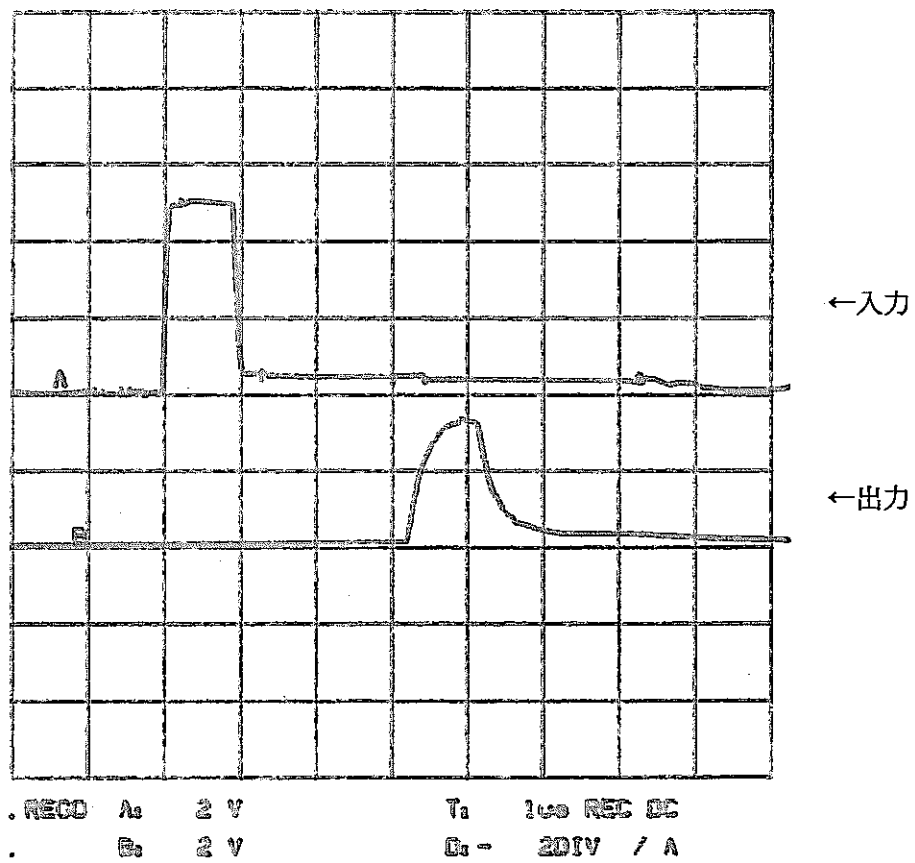


図 2.4 ゲートディレイ回路の入・出力パルス波形と時間関係

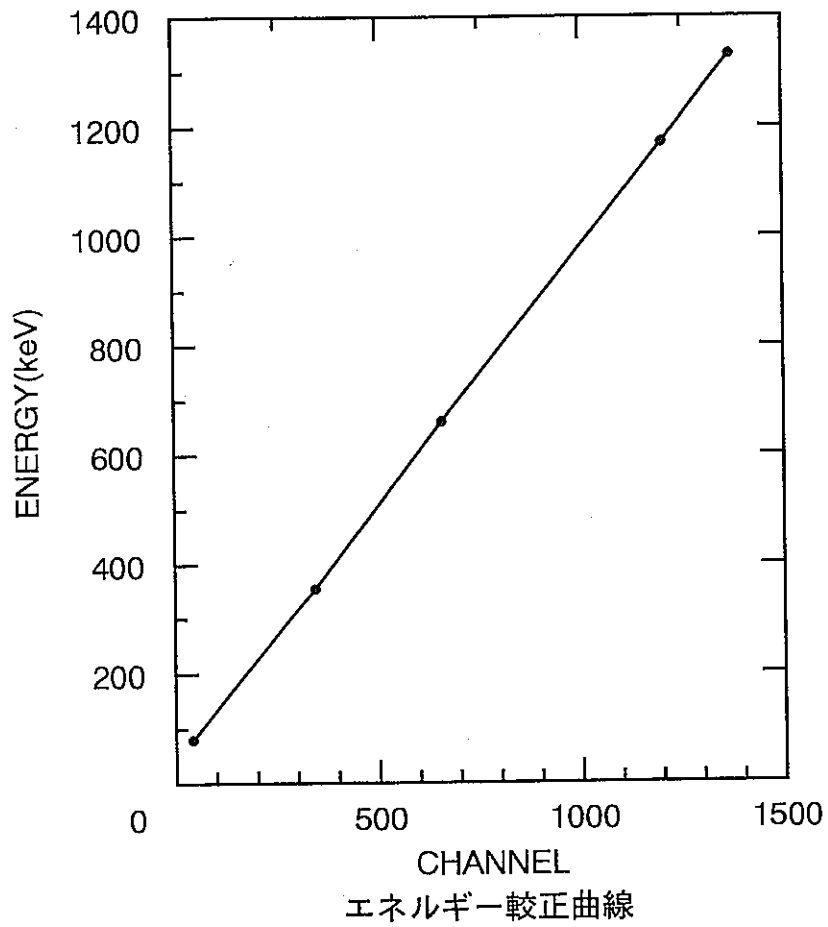


図 2.5 3"φ NaI(Tl) 検出器のエネルギー校正

3. 45MeV 電子線型加速器施設周辺の線量測定

3.1 45MeV 加速器施設の概観

北大 45MeV 加速器施設内の加速器室 (加速器が実際に設置されている部屋) 平面図および立面図を図 3.1 に示した。立面図内の G.L はグラウンドレベルを表している。また、ターゲット室およびライナック室の概観をそれぞれ Photo3.1、Photo3.2 に示した。加速器は地下に設置されており、ターゲット室およびライナック室の他に、制御室、工作室、中性子実験室や中性子飛行管実験室などの実験用の設備もほとんど地下に設置されている。ターゲット室には換気用のダクトがあり、それは外の排気筒 (Photo2.1 右側) へとつながっており、定期サーベイによって、この排気筒周辺において漏洩放射線の強度が強くなることが知られている。

3.2 制動 X 線発生用ターゲット

制動 X 線の発生源として、鉛版 (縦×横×厚さ=30cm×30cm×3mm) を 3 枚重ねた、厚さが合計 9mm のターゲットを用いた。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 の距離をおいて設置した。ターゲットは熱負荷によって溶けることのないように、強力なファンで常時空冷した。また、4 章で述べる EGS4 によるシミュレーションにおいても、測定結果と計算結果を比較するために、同様の厚さのターゲットを用いた解析が行われている。Photo3.3 に、加速器ビーム管、鉛ターゲットおよび空冷用ファンの概観を示した。

3.3 施設周辺の測定点と周辺状況

図 3.2 には施設の敷地内および施設付近における測定点を示した。図中に示されるように、施設近傍においては約 10m 間隔で西方向 (PW01 点～PW02 点) および南方向 (PS01 点～PS10 点) の測定が行われた。

図 3.3 には敷地外の測定点および施設の周辺状況を示した。測定方向は西方向 (PW03 点～PW08 点) および北方向 (PN03 点～PN06 点) である。またこの 2 方向が農場内での測定であるという周辺状況により、線量の建物による影響は受けていないと考えられる。

表 3.1 には測定日と、図 3.2～図 3.3 中のそれぞれの測定点に対応した測定距離および測定時間を示した。今回の測定は約 3 か月間にわたって行われ、測定距離は西方向では約 350m、南方向では約 100m、北方向では約 600m である。また、表 3.1 のファイル名内の下線部の GS は加速器からの放射線測定を表し、B はバックグラウンド放射線測定であることを表

す。

加速器の運転条件は、繰り返し周波数は 100Hz、パルス幅は 3 μ sec、電流値は 2.0~48 μ A である。

3.4 施設周辺の線量分布測定

線量分布測定は、西、南、北の 3 方向について、最大 600m の距離まで行われた。測定の際には、パルス状放射線測定装置、波高分析装置、コンピュータおよびシンチレーション検出器などの測定装置一式をエリアモニターカーに載せ、各測定点を移動した (Photo3.4)。また検出器を地面から 1m の所に設置して測定が行った。

表 3.2 に測定結果を示した。表には測定日と、それぞれの測定に対応したカウント数、加速器の電流値および線量率をまとめた。カウント数のうち、coincidence はコインシデンス回路の出力パルス数、anti はアンチコインシデンス回路の出力パルス数である。敷地内および施設付近の測定では、パイルアップを避けるために、表中で示されるように加速器の電流値を下げて測定を行い (最大出力の 5%~20%)、線量率は電流値を 100% に換算した値である。またファイル名内の下線部の GS は加速器からの放射線測定を表し、B はバックグラウンド放射線測定であることを表す。各測定点で得られた波高分布を図 3.4~図 3.20 に示した。また図 3.21~図 3.24 には、距離に対する線量率の関係を示した。図中にはそれぞれ測定方向と測定日を記した。図 3.21 は全方向についてまとめた。図 3.22 には施設近傍、図 3.23 には西方向、図 3.24 には北方向について示した。測定日によって加速器の運転状況が多少異なるため、それぞれの測定値を、加速器の電流値を 48 μ A に換算した。

図 3.21 には、今回測定が行われた西、南、北方向の測定値についてまとめている。これによると、加速器からの漏洩放射線は施設から約 600m までの距離で、 10^{-5} ~ 10^{-8} R/h の範囲に分布していることが分かった。図より、施設近傍 ($r < 100$ m) では、線源が等方的でないと考えられるためであるが、南方向が西方向に比べて大きな値を示している。しかし、施設周辺 ($r > 100$ m) の測定点においては、近傍で見られるような方向による線量率の差は見られない。これは、施設から遠方になると線源がほぼ等方的になるためと考えられる。

3.4.1 施設の敷地内における測定

敷地内における測定では、排気筒から約 10m の地点で線量率が最大になる傾向が見られた。図 3.22 の距離と線量率の関係から、排気筒下

($r=0\text{m}$) から 10m の測定点で一度線量率の値が大きくなり、そこから距離が遠くなるにつれて減少していることが分かる。これは、検出器の高さが地面から 1m に設置されており、PW01 点および PS01 点からは排気筒を直視できず、次の測定点である 10m 地点から排気筒が見えはじめるために、PW012 点および PS02 点で線量率が最も大きくなると考えられる。これにより、施設の敷地内では、排気筒との位置関係が線量率に影響を与えていると言える。

3.4.2 西方向における測定

西方向における測定は、施設から約 350m までの間のうち、施設の敷地内を含む合計 13 点における測定が行われた (図 3.2 と図 3.3 中の PW_ _ で表される点)。測定点の周辺状況を Photo3.5 に、測定風景を Photo3.6 に示した。Photo3.5 (測定点から施設方向に撮られている) から分かるように、周辺に建物がないため、建物による線量への影響は受けないと考えられる。図 3.4～図 3.12 には、各測定点 (PW01 点、PW01X 点、PW02 点～PW08 点) における加速器からの放射線による波高分布 (図中の (a)) とバックグラウンド放射線 (図中の (b)) による波高分布をそれぞれ示した。それぞれの図中の (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偏っていることが分かった。

PW06 点 (ファイル名 BP06GS01、排気筒からの距離 $r=235.5\text{m}$) における線量率は、表 3.2 より $3.97 \times 10^{-8} \text{ R/h}$ であり、また同測定点におけるバックグラウンド放射線の線量率は $3.72 \times 10^{-6} \text{ R/h}$ であるので、バックグラウンド放射線の約 1/100 となった。このときのコインシデンス回路の出力パルス数は 4382 であり、相対誤差は約 1.5% である。すなわち、作成した装置は、施設から約 250m の距離において、バックグラウンドレベルの 1/100 程度の微弱放射線を約 15 分間の測定で相対誤差を 1.5% の精度で測定できる能力を有することが分かった。

3.4.3 北方向における測定

測定点周辺に建物がなく、かつ施設から遠方の測定が行えることを目的として、図 3.3 中の PN_ _ 点で示される北方向についての測定を行った。

測定点の周辺状況と測定風景を Photo3.7 (測定点から施設に向かって撮られている) と Photo3.8 に示した。また PN03 点と PN06 点における波高分布を図 3.19、図 3.20 に示した。図 3.20 より、PN06 点では、施設近

傍に比べて波高分布がかなり低くなっていることが分かる。

図 3.24 より、 $r > 400\text{m}$ において減衰傾向の変化が見られた。この範囲における線量率の変化が緩やかになっている。これは、遠方では、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の中に、加速器からの放射線が埋もれていることが考えられる。今回の測定に用いられたゲートパルス幅は加速器が $3 \mu\text{sec}$ であるのに対して $30 \mu\text{sec}$ の幅をとっているが、加速器の電流値を上げ、また測定時間を増加させるなど、精度の良い測定を行うためには、バックグラウンドに対する配慮が必要である。

3.5 結果と考察

作製したパルス状放射線測定装置を用いて、北大 45MeV 加速器施設からの漏洩放射線を、施設の敷地内および施設周辺の約 600m にわたる測定を行うことができた。その結果、加速器からの放射線は $10^{-5} \sim 10^{-8} \text{ R/h}$ であり、装置は、約 250m の距離においてバックグラウンドレベルの 1/100 程度の微弱放射線を、15 分間の測定で相対誤差を 1.5% の精度で測定できる能力を有していることが分かった。これらの測定結果は、EGS4 によるシミュレーションとの比較が可能であり、その結果を次章で述べる。。また、施設から遠方における測定では、精度の良い測定を行うために、バックグラウンド放射線に対する更なる配慮が必要である。

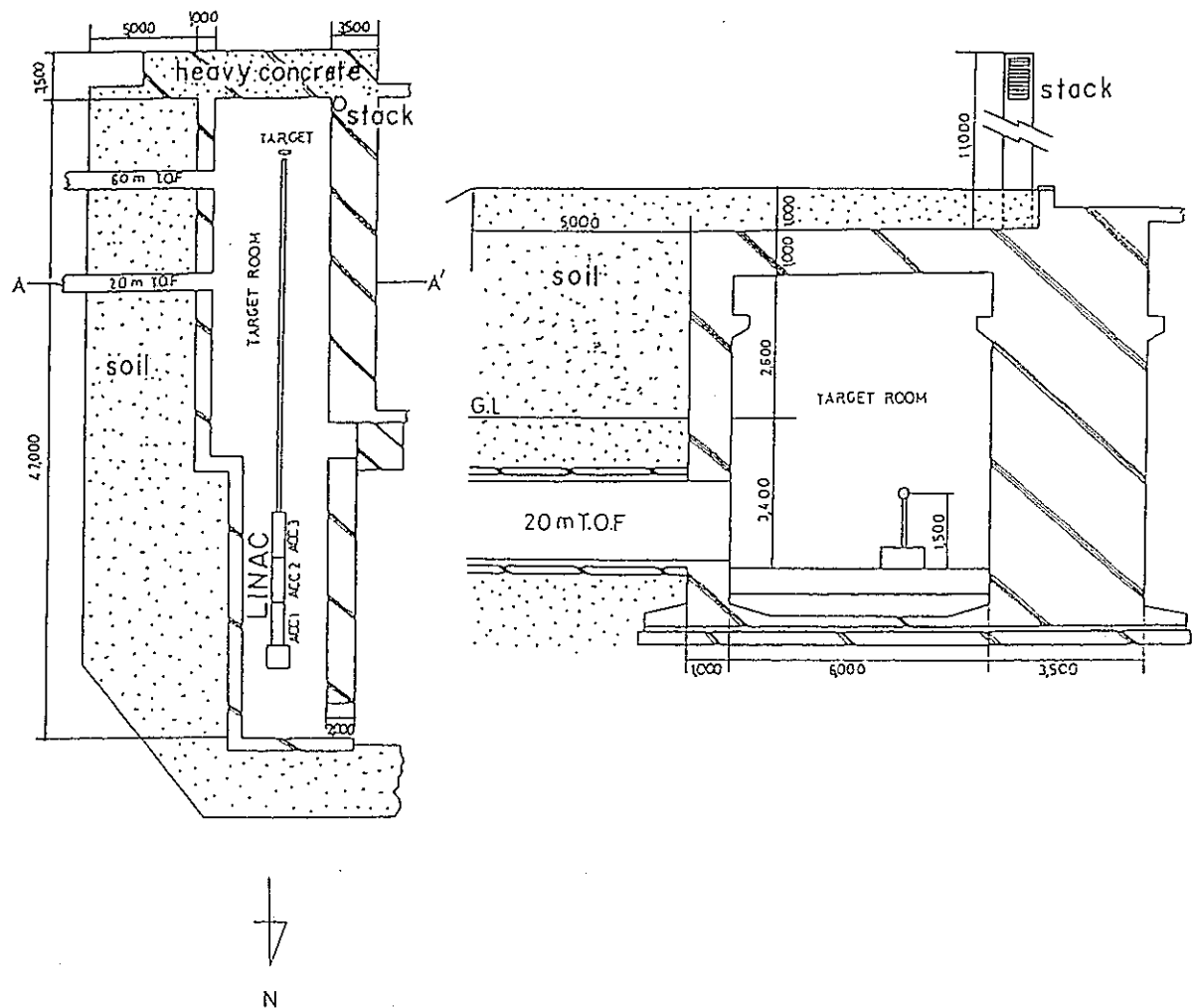


図 3.1 加速器室の平面図と立面図

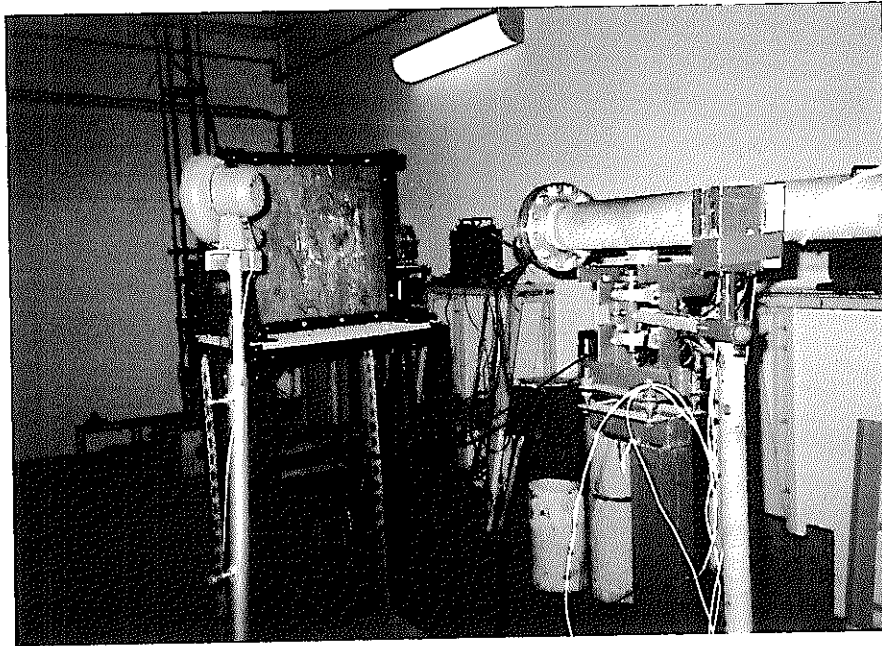


Photo3.1 ターゲット室概観

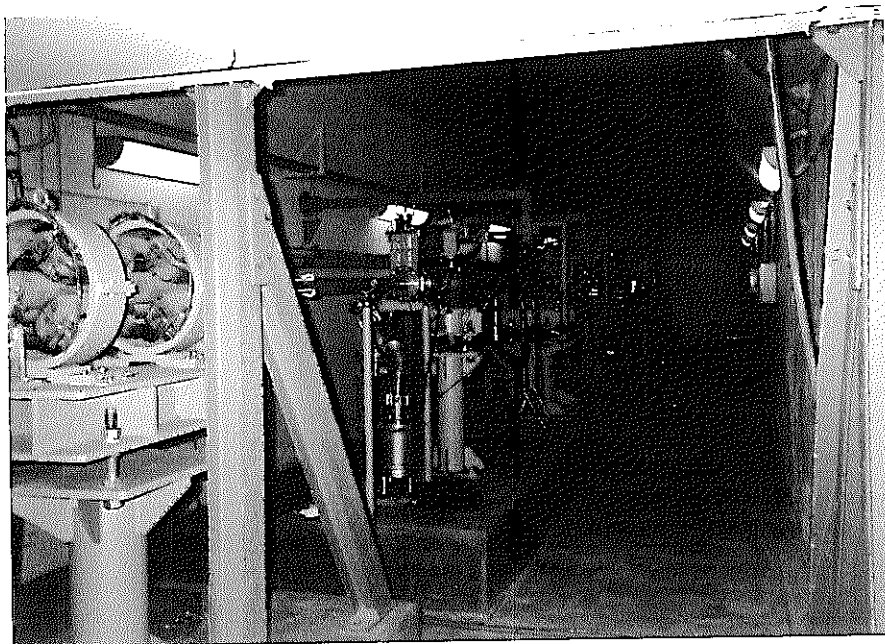


Photo3.2 ライナック室概観

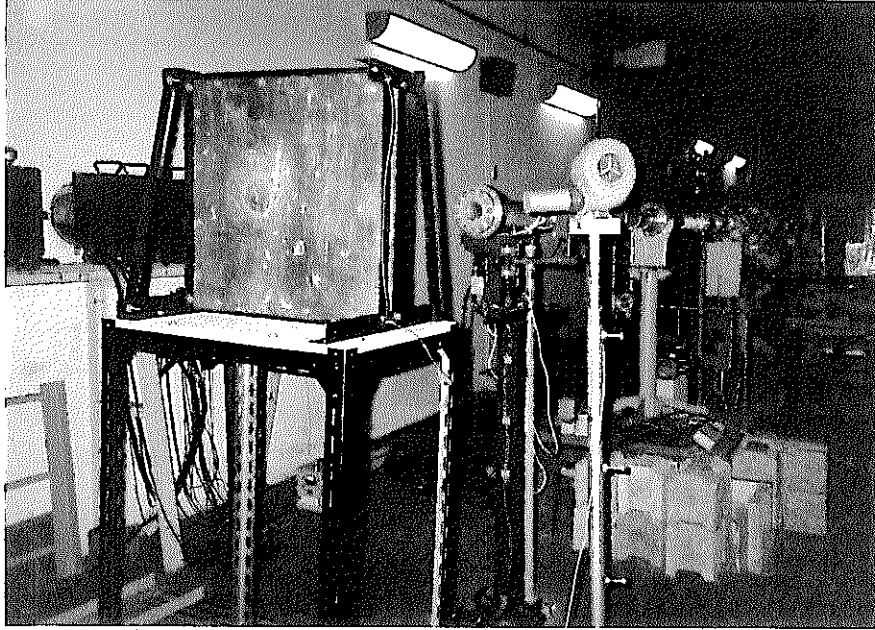


Photo3.3 制動X線用鉛ターゲット (厚さ : 9mm)
(ビーム出口 1m に設置)

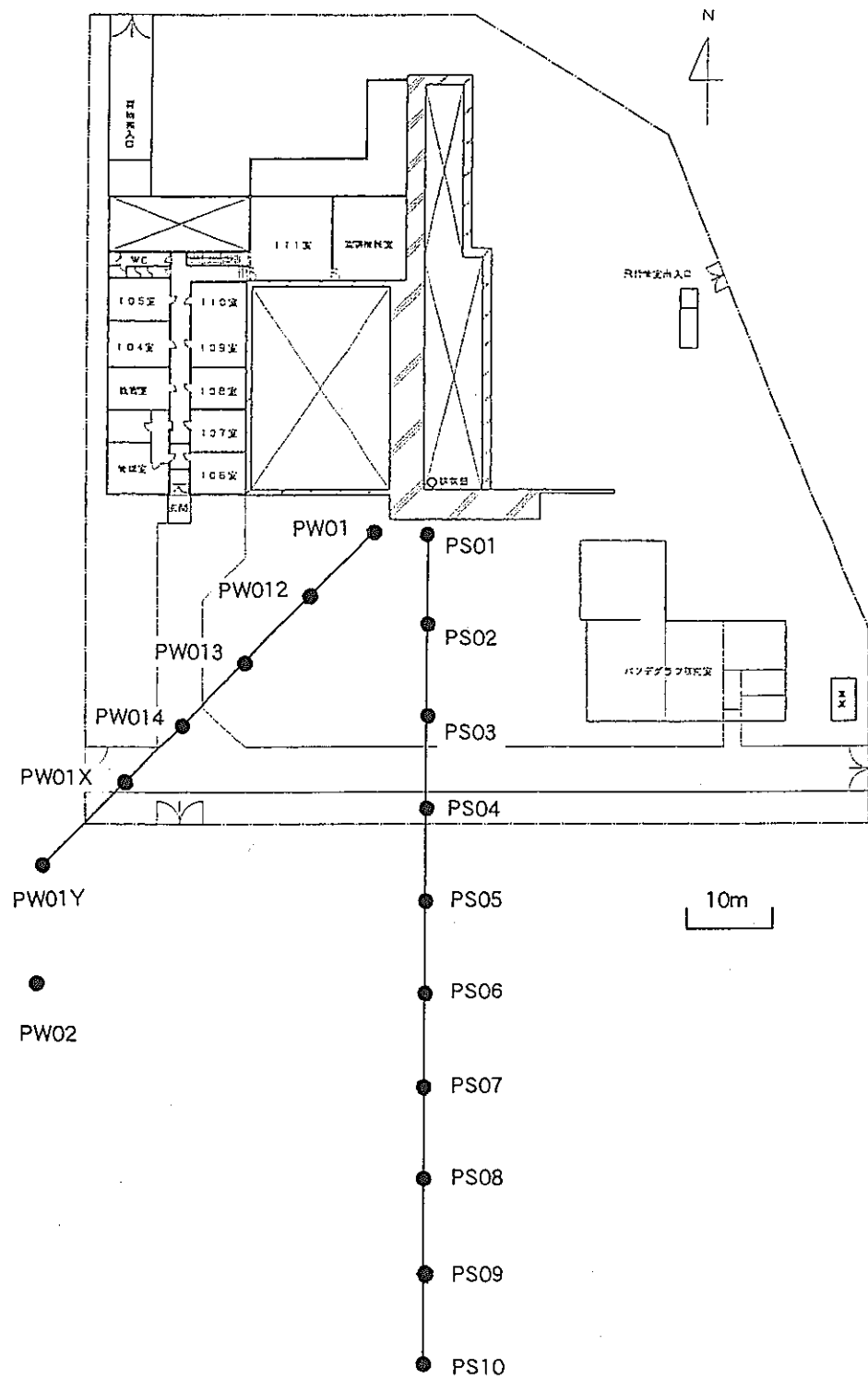


図 3.2 施設近傍の測定点

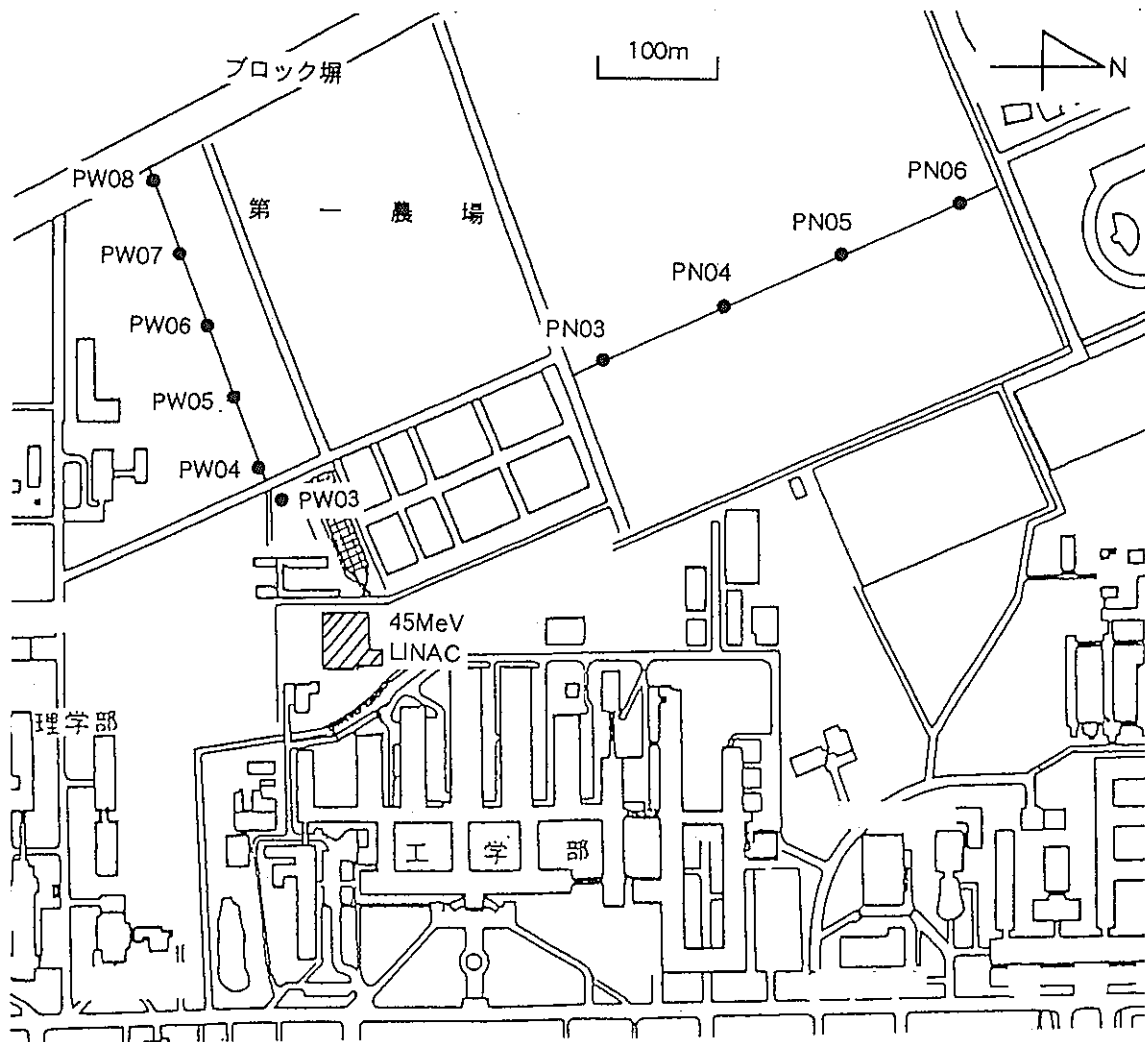


図 3.3 施設周辺の測定点と周辺状況

表 3.1 各測定地点における距離と測定時間

1995, 9/11~14

FILE 名	測定地点	排気筒からの距離	測定時間
AP02GS01	PW04	136m	600sec
BP01GS03	PW01	0m	600sec
BP01XGS1	PW01X	38.5m	600sec
BP04GS01	PW04	136m	600sec
BP05GS01	PW05	186.2m	600sec
BP06GS01	PW06	235.5m	1000sec
CP01XGS1	PW01X	38.5m	600sec
CP01YGS1	PW02	61m	600sec
CP03GS01	PW03	98m	600sec
CP03GS02	PW03	98m	600sec
CP07GS01	PW07	285.3m	3000sec
CP08GS01	PW08	356.1m	3000sec
DP01GS01	PW01	0m	600sec
DP01GS02	PW01	0m	600sec
DP01GS03	PW01	0m	600sec
DP01GS04	PW01	0m	600sec
DP01GS05	PW01	0m	600sec
DP01GS06	PW01	0m	600sec
DP01XGS1	PW01X	38.5m	600sec
AP01B01	PW01	0m	300sec
BP01B01	PW01	0m	600sec
BP01XB01	PW01X	38.5m	600sec
BP04B01	PW04	136m	300sec
BP05B01	PW05	186.2m	300sec
BP06B01	PW06	235.5m	300sec
CP01XB01	PW01X	38.5m	300sec
CP01YB01	PW02	61m	300sec
CP03B01	PW03	98m	300sec
CP03B02	PW03	98m	300sec
CP07B01	PW07	285.3m	300sec
CP08B01	PW08	356.1m	300sec
DP01B01	PW01	0m	300sec
DP01XB01	PW01X	38.5m	300sec

1995, 10/27

FILE 名	測定地点	排気筒からの距離	測定時間
P011GS1	PW01	0m	600sec
P011GS2	PW01	0m	600sec
P012GS1	PW012	10m	600sec
P013GS1	PW013	20m	600sec
P014GS1	PW014	30m	600sec
P01XGS1	PW01X	38.5m	600sec
P01YGS1	PW01Y	48.5m	600sec
P03GS1	PW03	98m	600sec
P04GS1	PW04	136m	600sec
P05GS1	PW05	186.2m	600sec
P06GS1	PW06	235.5m	600sec

1995, 11/21

FILE 名	測定地点	排気筒からの距離	測定時間
PS01GS01	PS01	0m	600sec
PS02GS01	PS02	10m	600sec
PS03GS01	PS03	20m	600sec
PS04GS01	PS04	30m	600sec
PS05GS01	PS05	40m	600sec
PS06GS01	PS06	50m	900sec
PS07GS01	PS07	60m	1000sec
PS08GS01	PS08	70m	900sec
PS09GS01	PS09	80m	1000sec
PS10GS01	PS10	90m	900sec
P04GS01	PW04	136m	900sec
PS04B01	PS04	30m	600sec

1995, 11/22

FILE 名	測定地点	排気筒からの距離	測定時間
P04GS01	PW04	136m	900sec
P05GS01	PW05	186.2m	2000sec
PN03GS01	PN03	300m	2000sec
PN04GS01	PN04	PN04 から 100m	3000sec

1995, 12/1

FILE 名	測定地点	排気筒からの距離	測定時間
PS01GS01	PS01	0m	600sec
PN05GS01	PN05	PN04 から 200m	3000sec
PN06GS01	PN06	PN04 から 300m	3000sec
PS01B01	PS01	0m	600sec



Photo3.4 施設周辺の線量分布測定装置

表3.2 各測定地点における線量率(線量率は電流値を100%に換算した値)

1995, 9/11~14

FILE名	測定地点	カウント数		電流値 (μ A)	線量率 (R/h)
		coincidence	anticoin		
AP02GS01	PW04	9869	67453	48	1.41E-07
BP01GS03	PW01	7487	107168	48	3.74E-06
BP01XGS1	PW01X	17083	78521	48	2.28E-06
BP04GS01	PW04	8989	68050	48	1.25E-07
BP05GS01	PW05	4648	69787	48	6.35E-08
BP06GS01	PW06	4382	115734	48	3.97E-08
CP01XGS1	PW01X	77904	15700	48	2.53E-06
CP01YGS1	PW02	71713	23060	48	1.06E-06
CP03GS01	PW03	15931	74097	48	2.44E-07
CP03GS02	PW03	15866	74789	48	2.43E-07
CP07GS01	PW07	6904	33612	48	2.43E-08
CP08GS01	PW08	3437	323136	48	1.59E-08
DP01GS01	PW01	9026	103264	48	3.43E-06
DP01GS02	PW01	12681	96004	38.4	3.56E-06
DP01GS03	PW01	16921	100390	28.8	3.78E-06
DP01GS04	PW01	23241	98348	19.2	4.01E-06
DP01GS05	PW01	28092	95973	9.6	3.55E-06
DP01GS06	PW01	22183	91710	4.8	3.11E-06
DP01XGS1	PW01X	18569	69504	9.6	2.34E-06
AP01B01	PW01	0	45119		5.22E-06
BP01B01	PW01	29	88642		4.75E-06
BP01XB01	PW01X	21	75217		3.63E-06
BP04B01	PW04	9	51334		3.50E-06
BP05B01	PW05	10	53659		3.75E-06
BP06B01	PW06	10	52842		3.72E-06
CP01XB01	PW01X	10	36655		3.69E-06
CP01YB01	PW02	44	35639		3.28E-06
CP03B01	PW03	10	56547		3.94E-06
CP03B02	PW03	7	37075		3.92E-06
CP07B01	PW07	7	51204		3.57E-06
CP08B01	PW08	0	48306		3.27E-06
DP01B01	PW01	15	68061		4.85E-06
DP01XB01	PW01X	12	51642		3.76E-06

1995, 10/27

FILE 名	測定地点	カウント数		電流値 (μ A)	線量率 (R/h)
		coincidence	anticoïn		
P011GS1	PW01	437	35846	2.3	1.90E-06
P011GS2	PW01	514	44904	2.3	1.89E-06
P012GS1	PW012	1749	39486	2.3	3.73E-06
P013GS1	PW013	33658	32337	2.3	2.49E-06
P014GS1	PW014	36378	35541	2.3	1.75E-06
P01XGS1	PW01X	13120	31042	2.3	1.30E-06
P01YGS1	PW01Y	38579	38178	2.3	8.68E-07
P03GS1	PW03	343	35579	9.2	1.95E-07
P04GS1	PW04	230	29018	9.2	1.15E-07
P05GS1	PW05	277	38544	23	5.64E-08
P06GS1	PW06	208	40394	23	4.66E-08

1995, 11/21

FILE 名	測定地点	カウント数		電流値 (μ A)	線量率 (R/h)
		coincidence	anticoïn		
PS01GS01	PS01	191	27270	1.9	1.93E-06
PS02GS01	PS02	944	21149	1.9	7.43E-06
PS03GS01	PS03	599	19922	1.9	5.26E-06
PS04GS01	PS04	392	18902	1.9	3.42E-06
PS05GS01	PS05	227	17540	1.9	2.08E-06
PS06GS01	PS06	250	26690	1.9	1.57E-06
PS07GS01	PS07	214	27664	1.9	1.12E-06
PS08GS01	PS08	246	25485	3.8	7.86E-07
PS09GS01	PS09	205	27384	3.8	5.21E-07
PS10GS01	PS10	284	25172	7.6	3.96E-07
P04GS01	PW04	152	26167	7.6	1.74E-07
PS04B01	PS04	0	17710		3.70E-06

1995, 11/22

FILE 名	測定地点	カウント数		電流値 (μ A)	線量率 (R/h)
		coincidence	anticoïn		
P04GS01	PW04	167	4115	8.8	1.89E-07
P05GS01	PW05	251	5084	8.8	1.24E-07
PN03GS01	PN03	177	2962	26.4	2.50E-08
PN04GS01	PN04	243	2604	44	1.11E-08

1995, 12/1

FILE 名	測定地点	カウント数		電流値 (μ A)	線量率 (R/h)
		coincidence	anticoïn		
PS01GS02	PS01	171	37309	2.0	1.14E-06
PN05GS01	PN05	317	1561	40	9.67E-09
PN06GS01	PN06	308	1471	40	9.86E-09
PS01B01	PS01	8	36284		5.33E-06

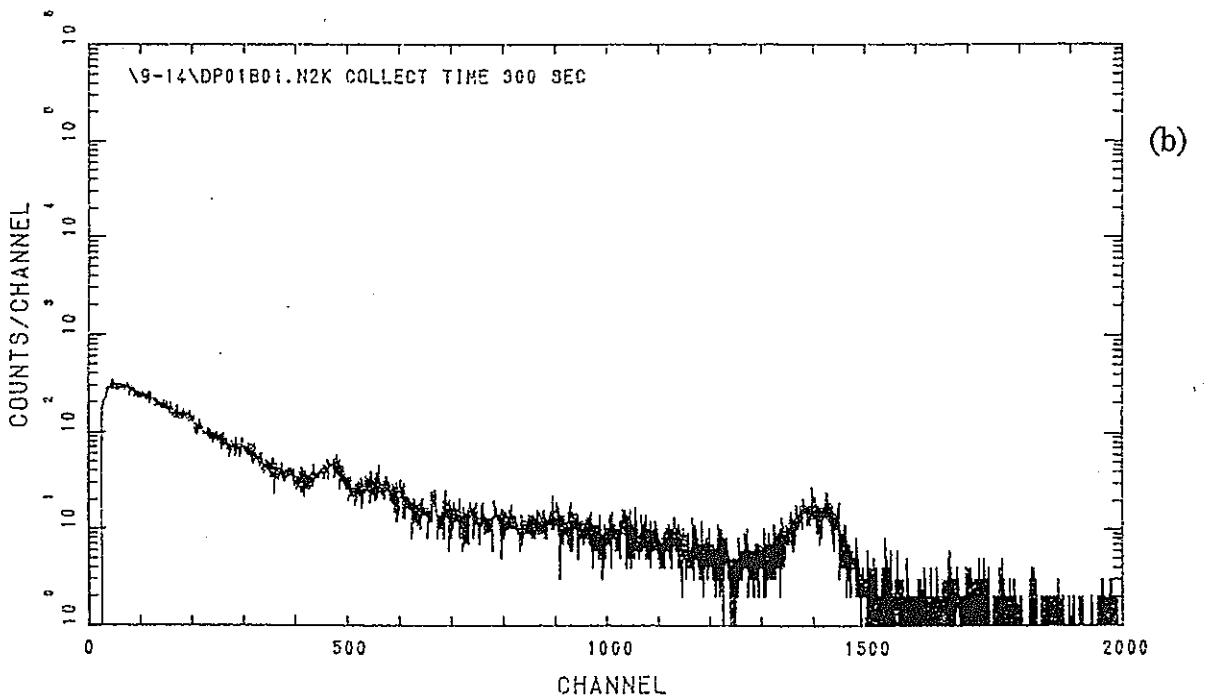
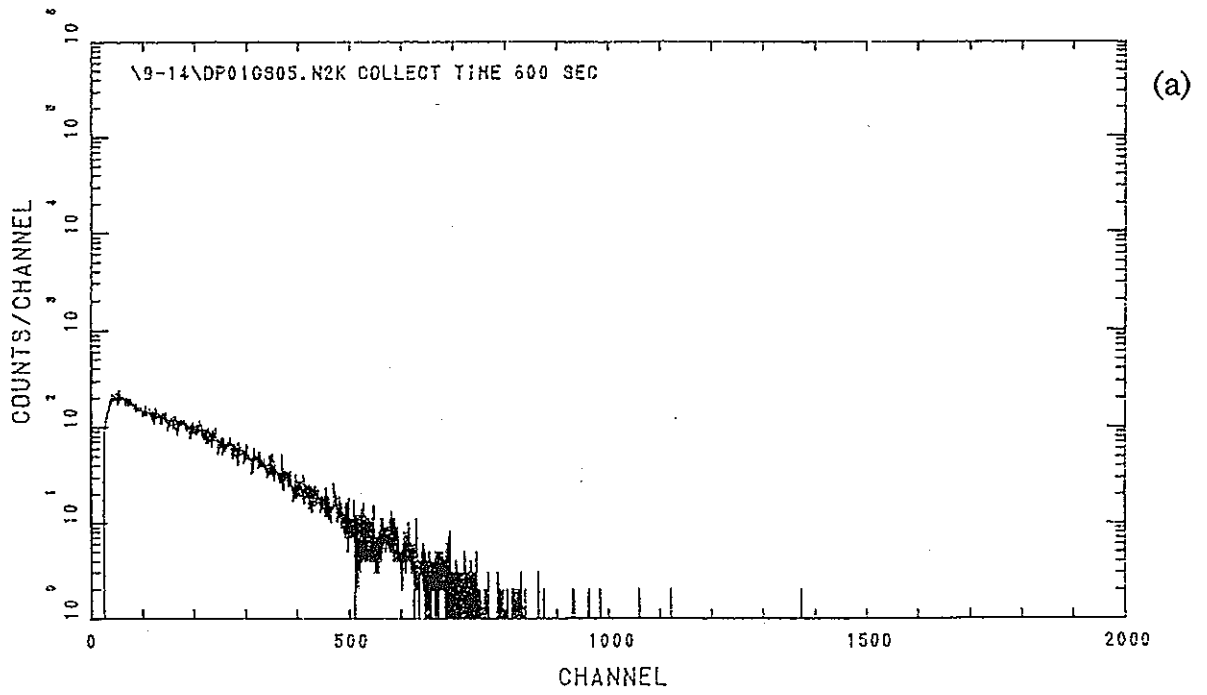


図 3.4 測定点 P01 における波高分布

(a) 加速器からの放射線による波高分布

(b) バックグラウンド放射線による波高分布

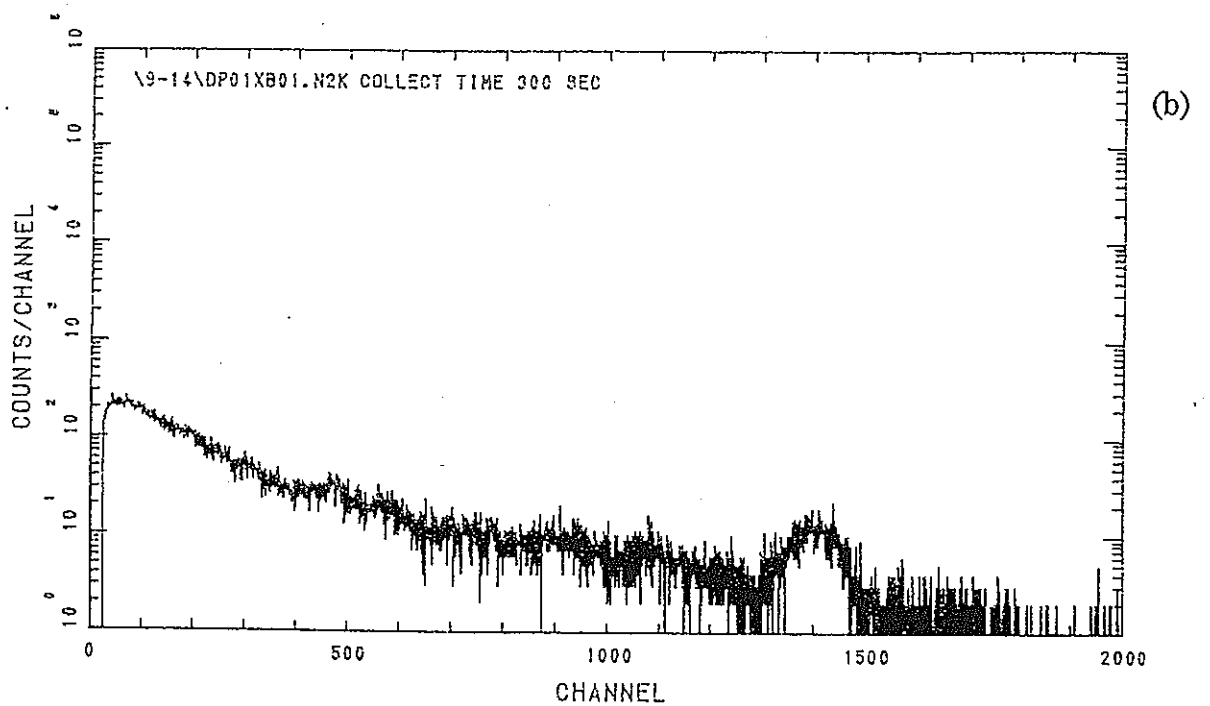
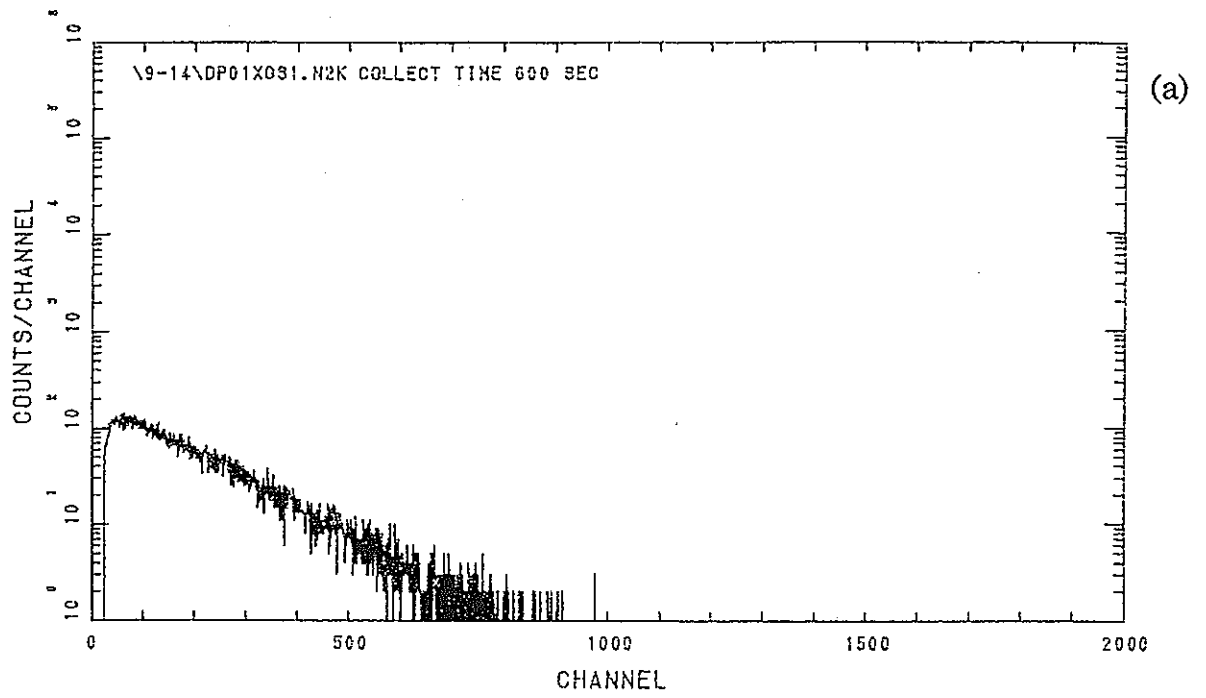


図 3.5 測定点 P01X における波高分布
(a) 加速器からの放射線による波高分布
(b) バックグラウンド放射線による波高分布

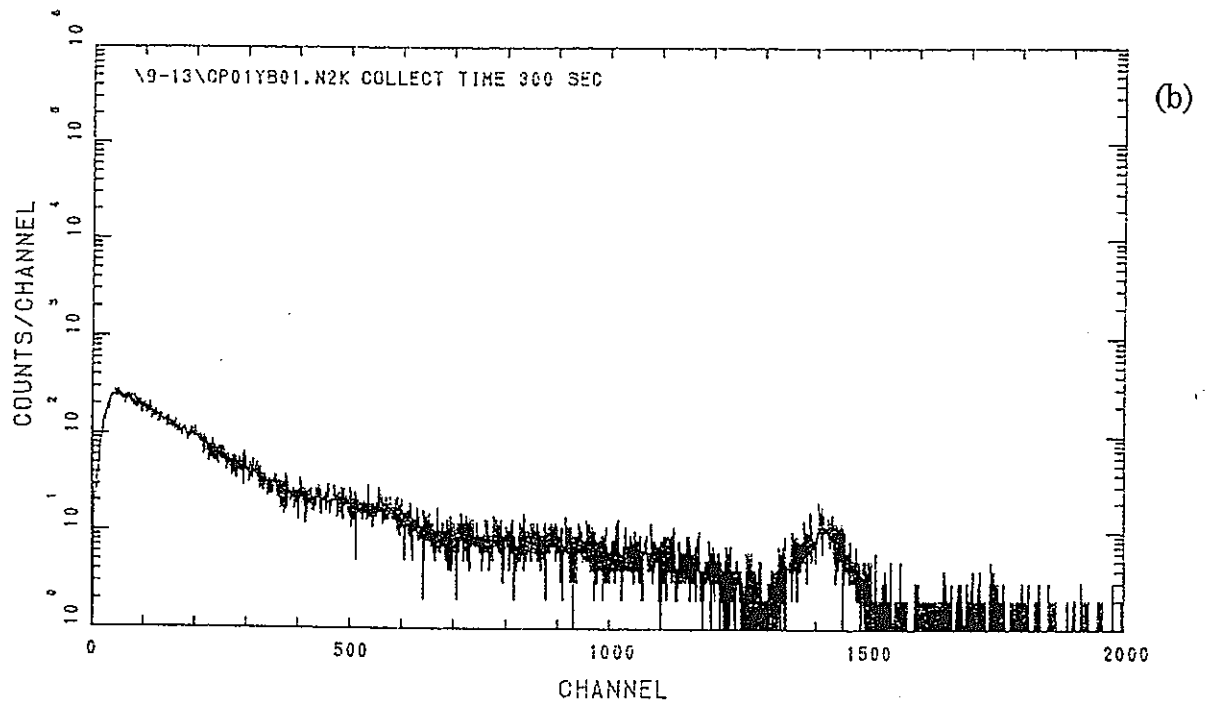
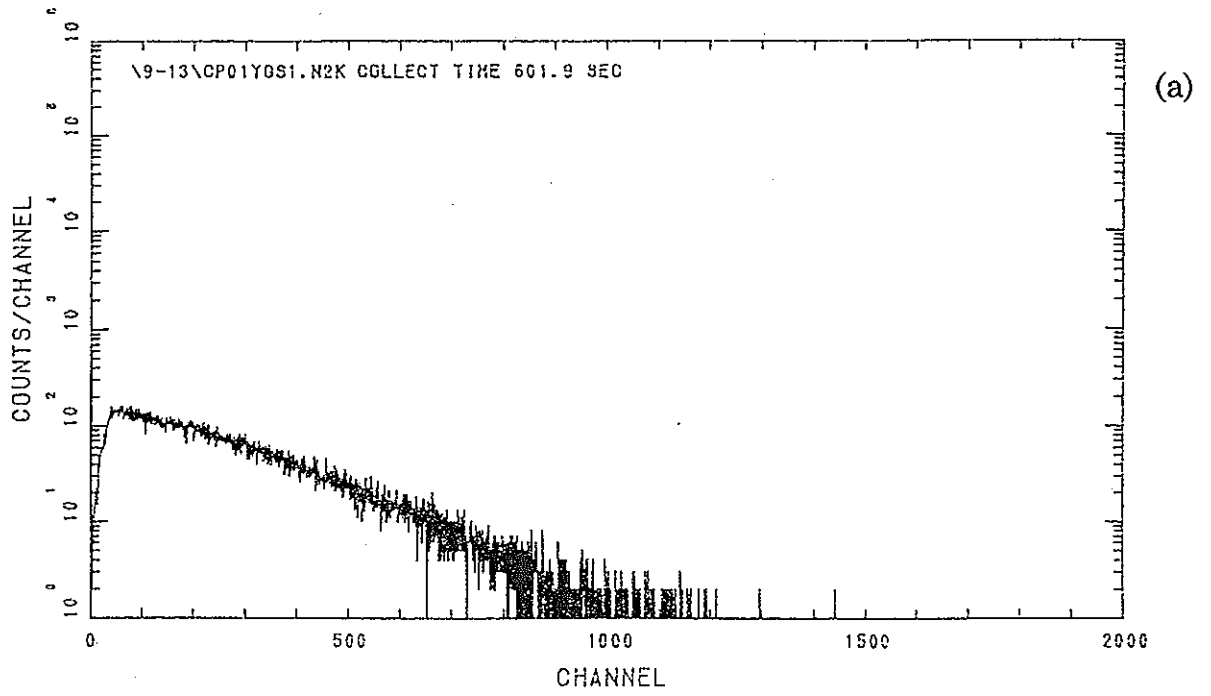


図 3.6 測定点 P02 における波高分布
(a) 加速器からの放射線による波高分布
(b) バックグラウンド放射線による波高分布

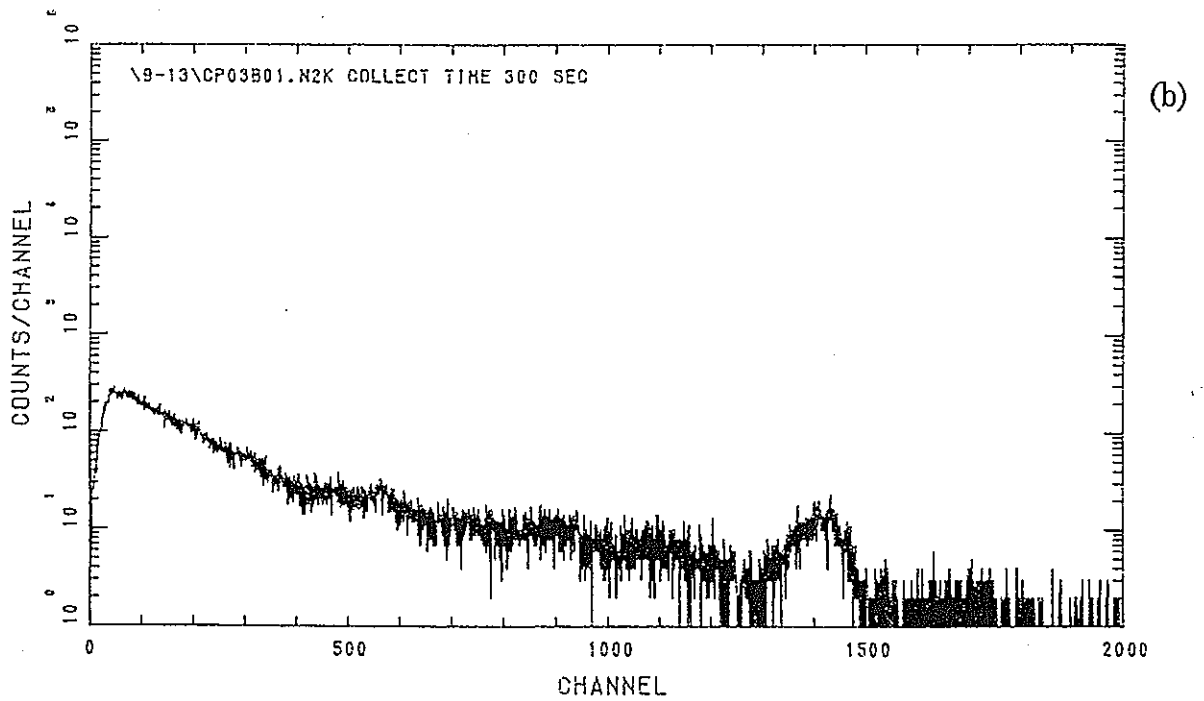
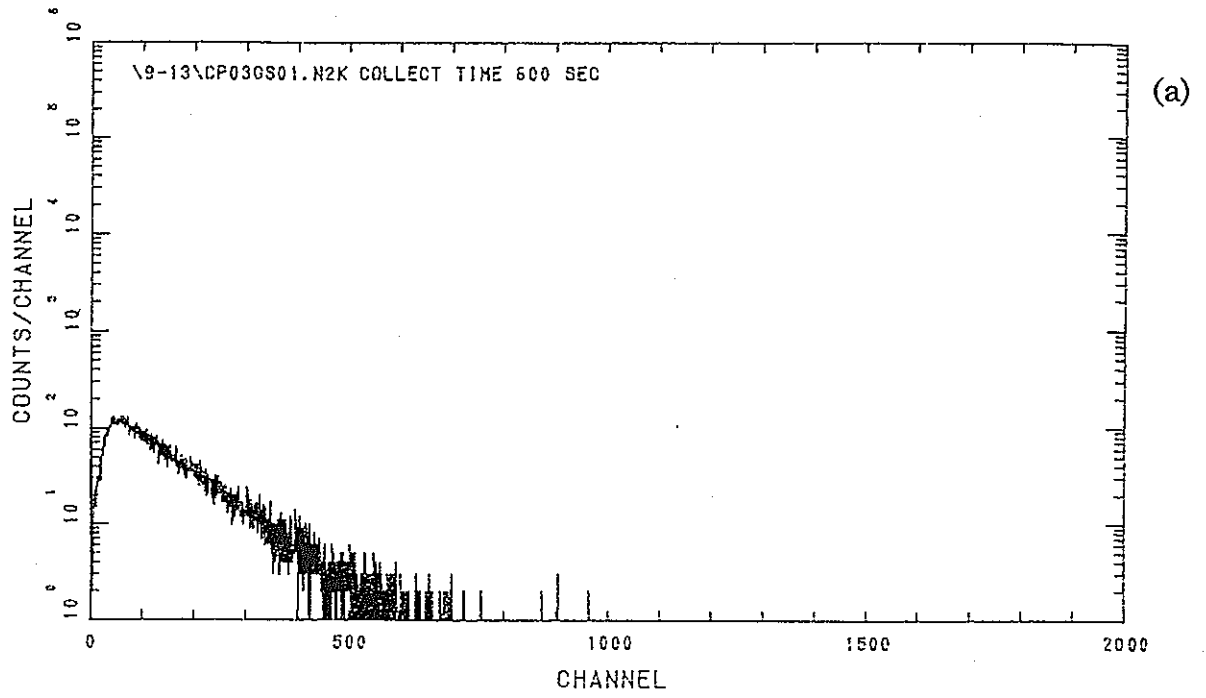


図 3.7 測定点 P03 における波高分布

- (a) 加速器からの放射線による波高分布
- (b) バックグラウンド放射線による波高分布

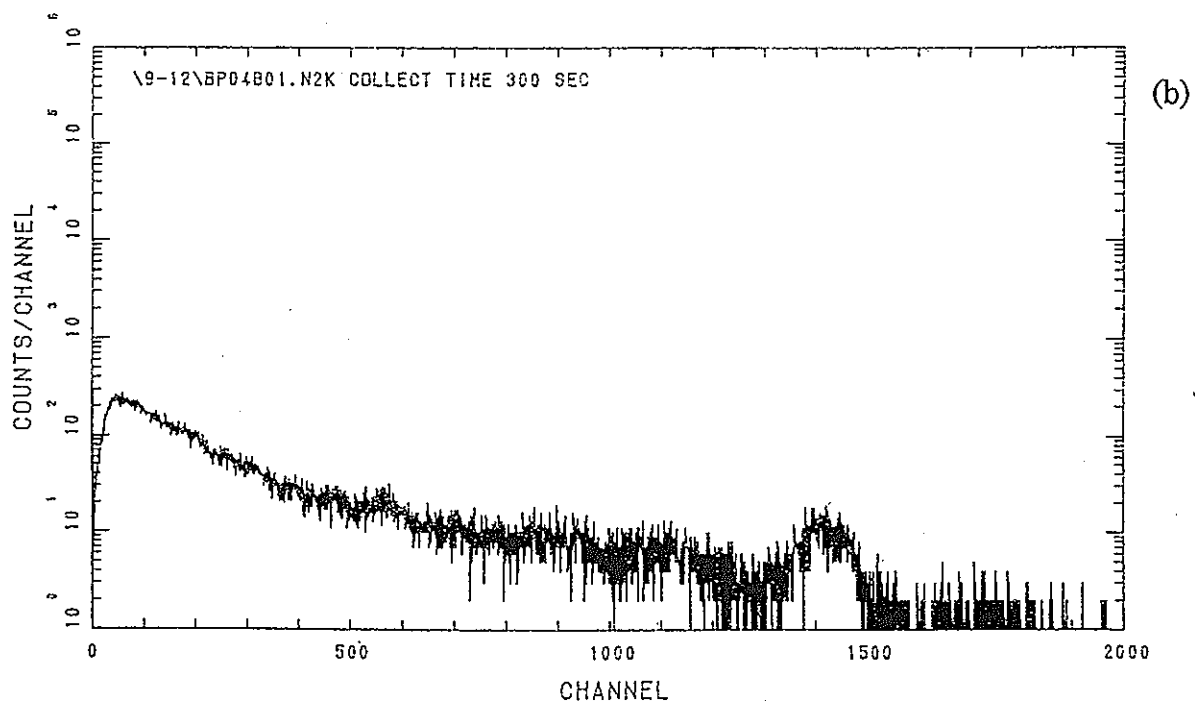
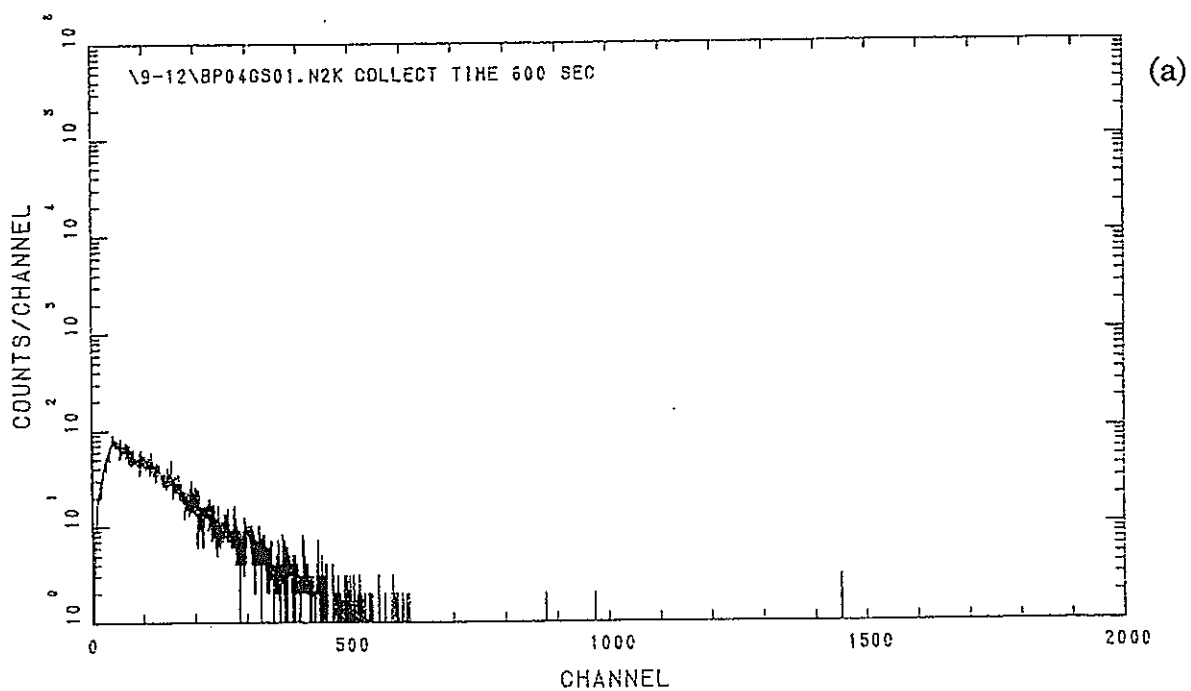


図 3.8 測定点 P04 における波高分布
(a) 加速器からの放射線による波高分布
(b) バックグラウンド放射線による波高分布

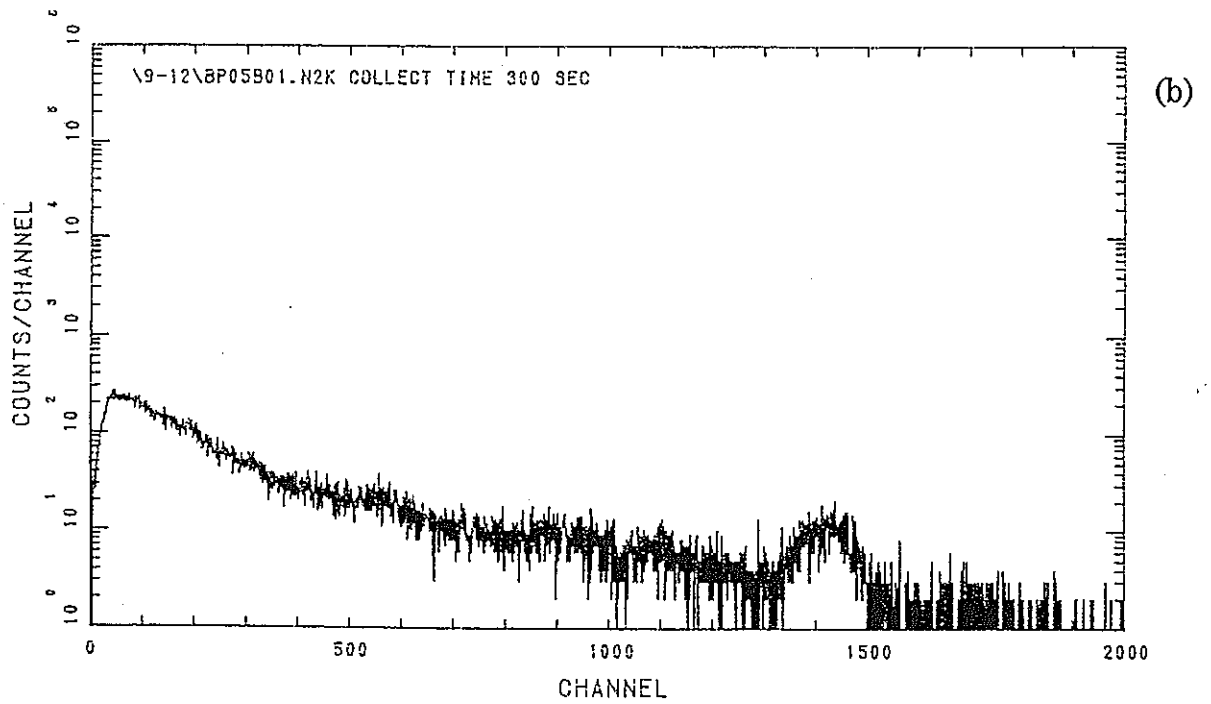
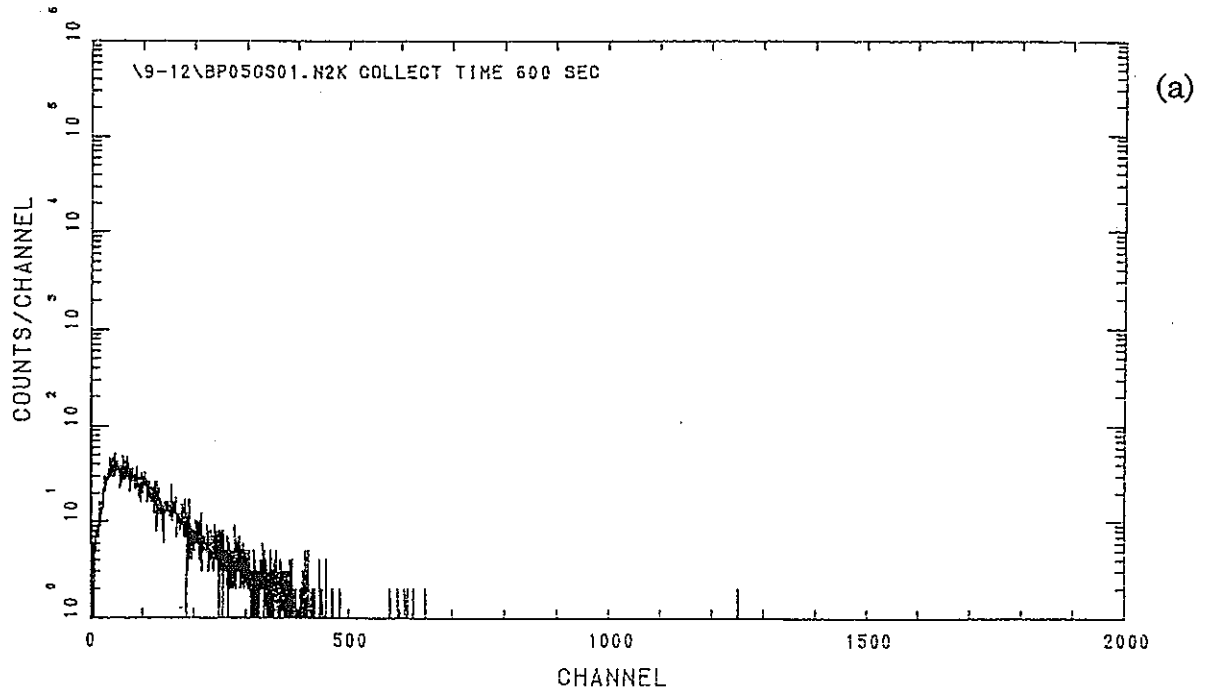


図 3.9 測定点 P05 における波高分布
(a) 加速器からの放射線による波高分布
(b) バックグラウンド放射線による波高分布

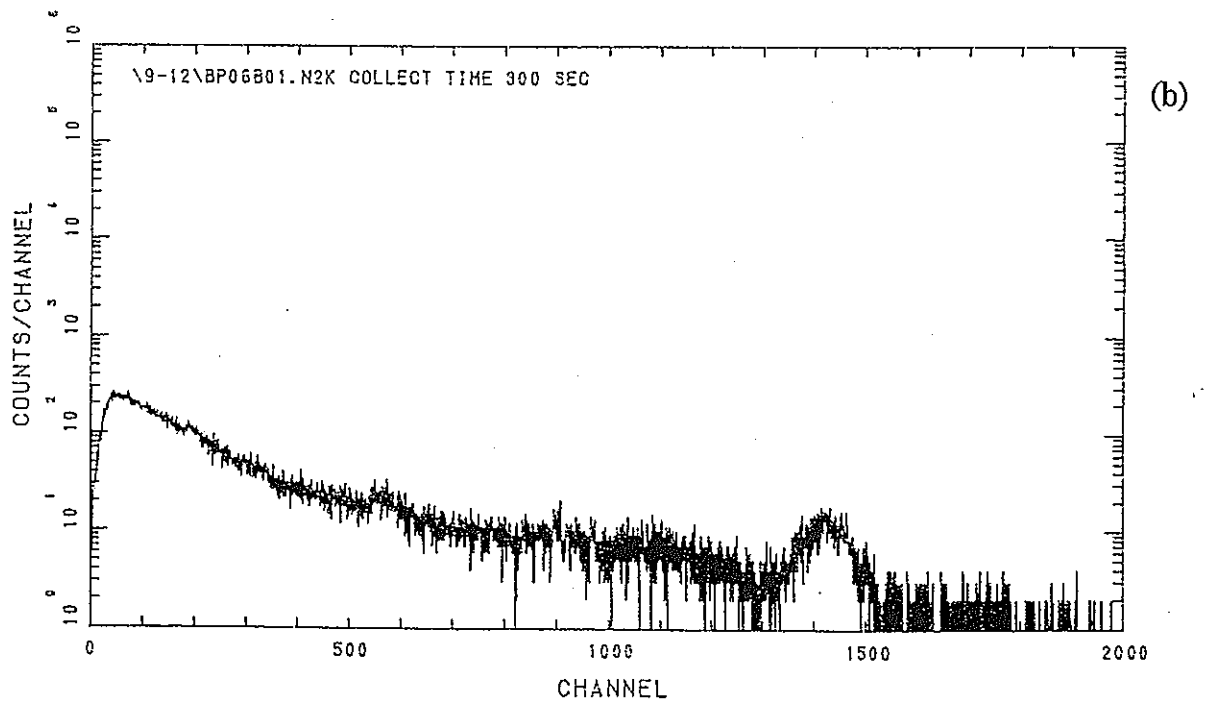
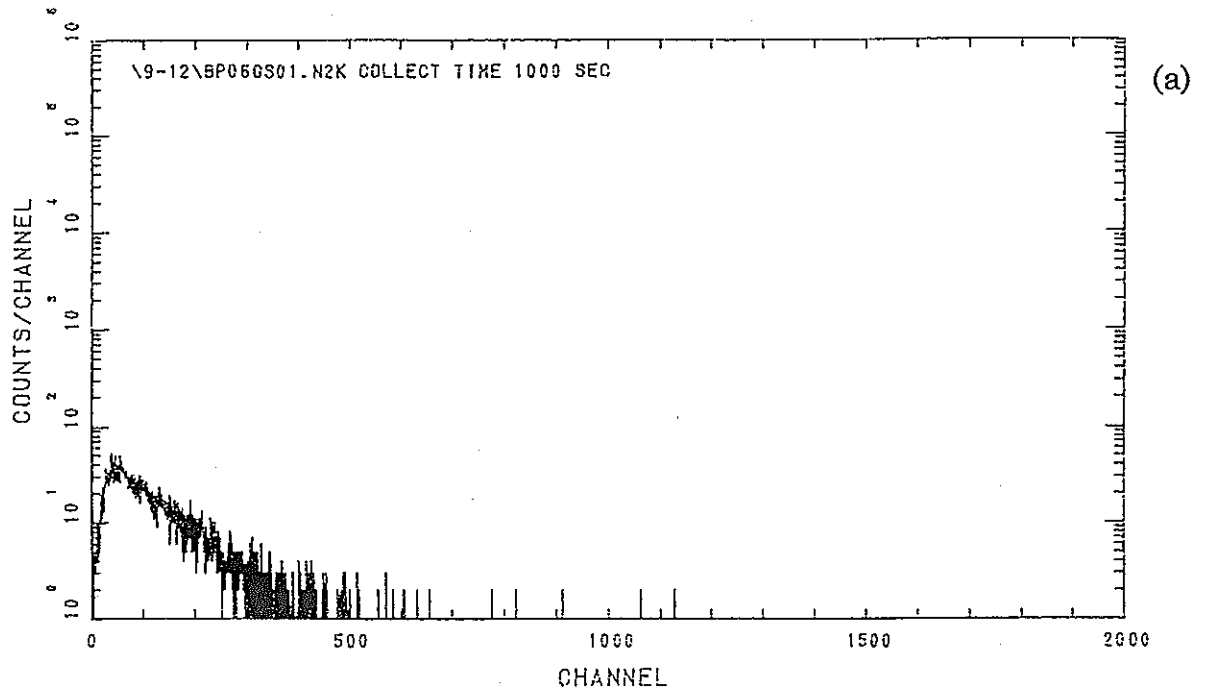


図 3.10 測定点 P06 における波高分布

(a) 加速器からの放射線による波高分布

(b) バックグラウンド放射線による波高分布

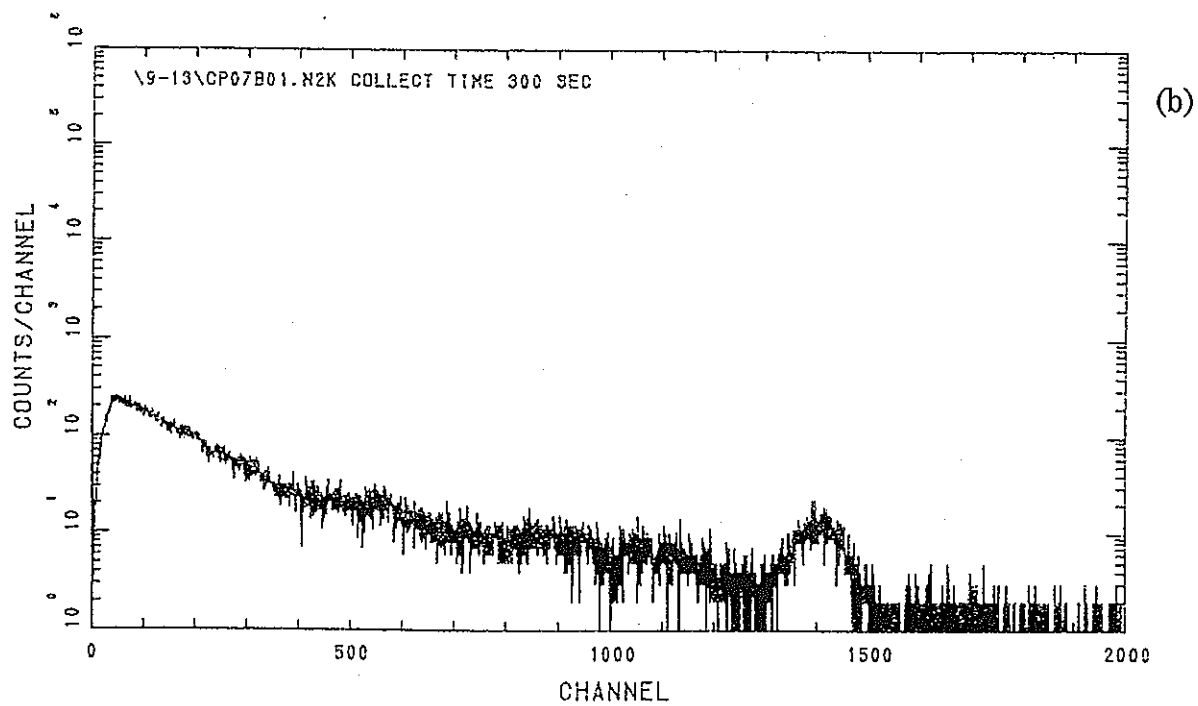
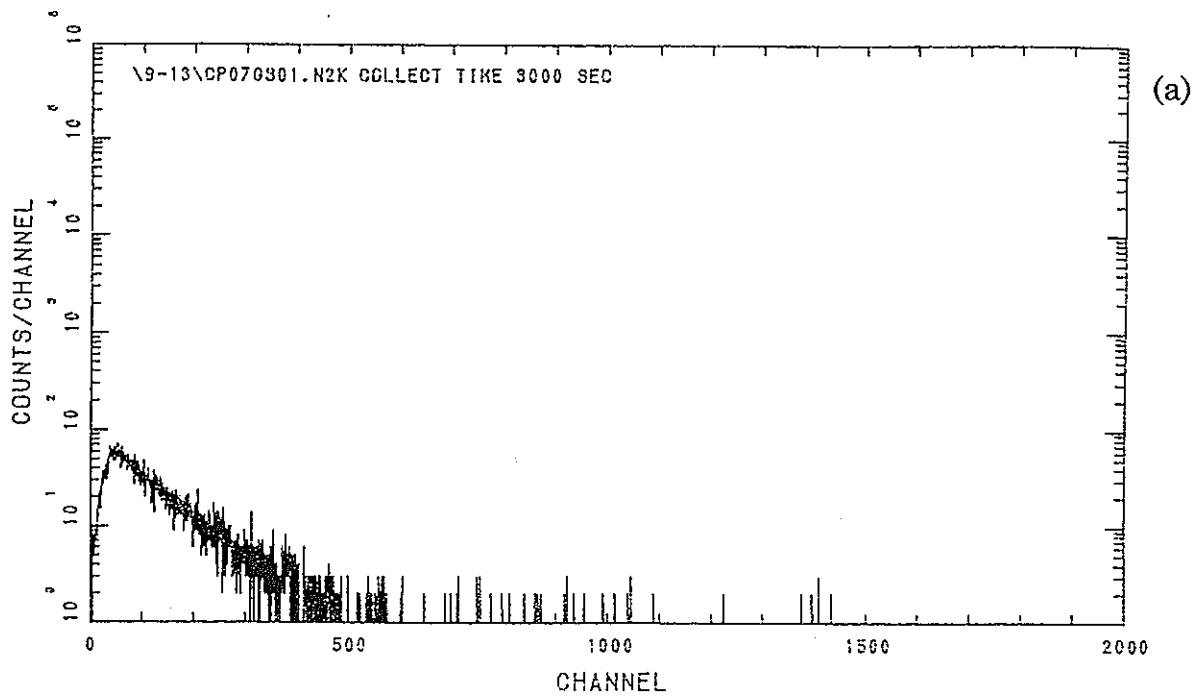


図 3.11 測定点 P07 における波高分布

- (a) 加速器からの放射線による波高分布
- (b) バックグラウンド放射線による波高分布

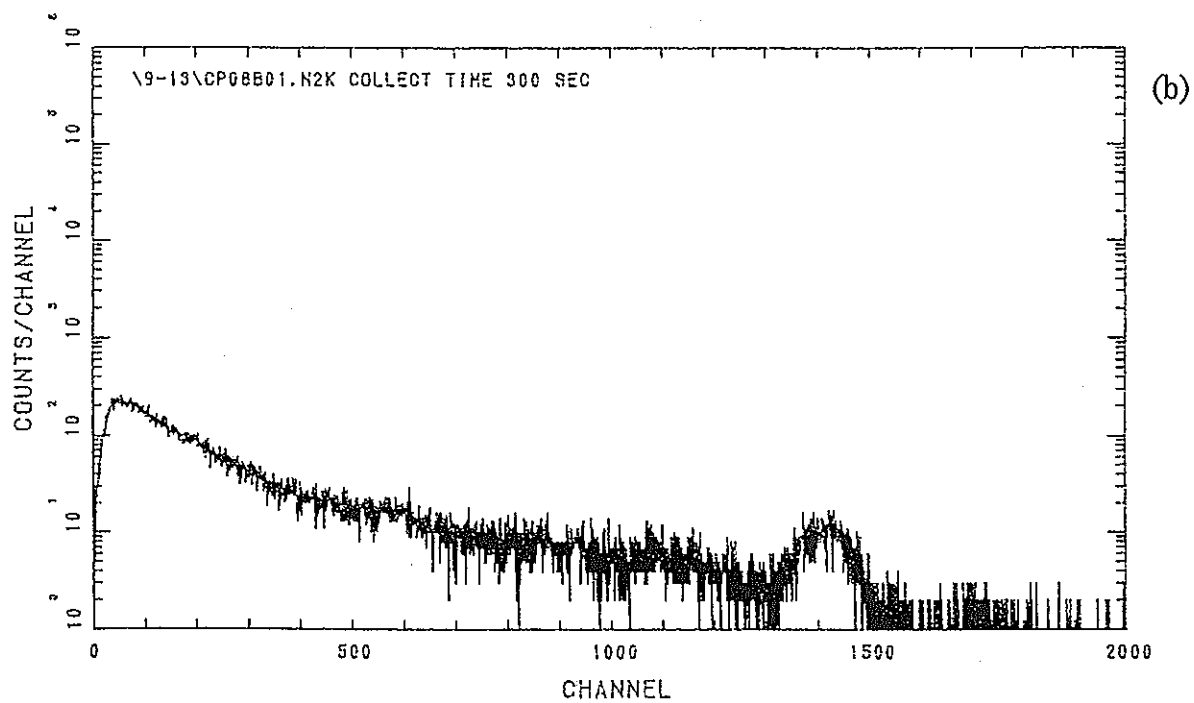
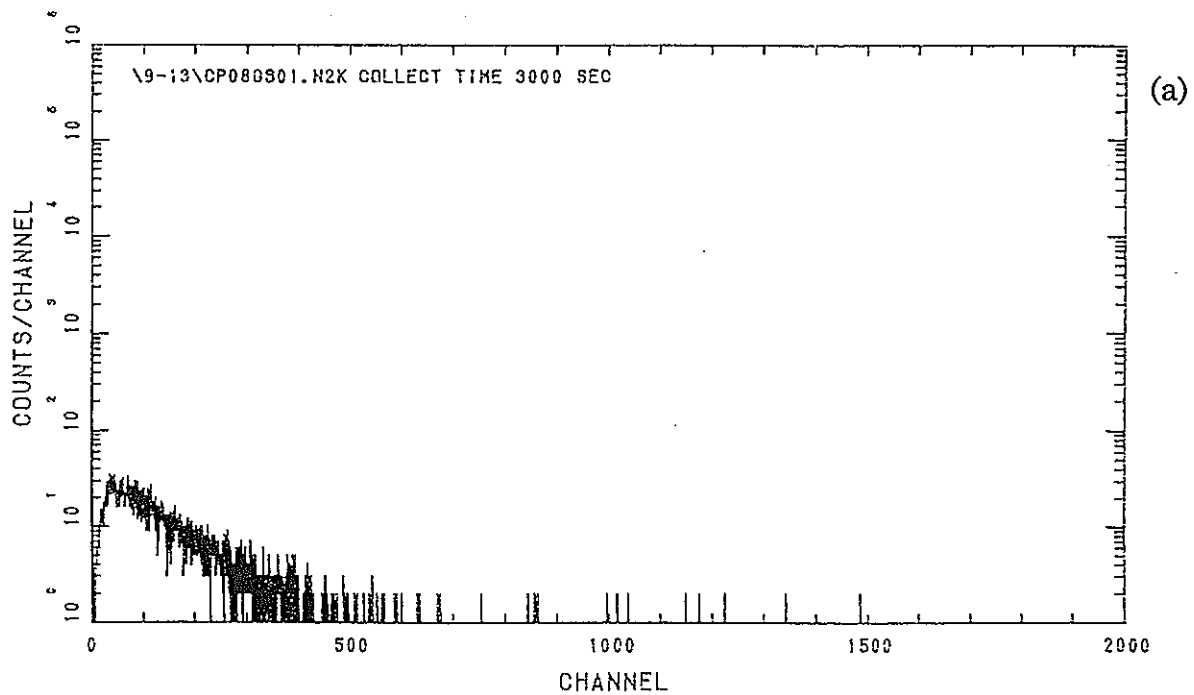


図 3.12 測定点 P08 における波高分布

(a) 加速器からの放射線による波高分布

(b) バックグラウンド放射線による波高分布

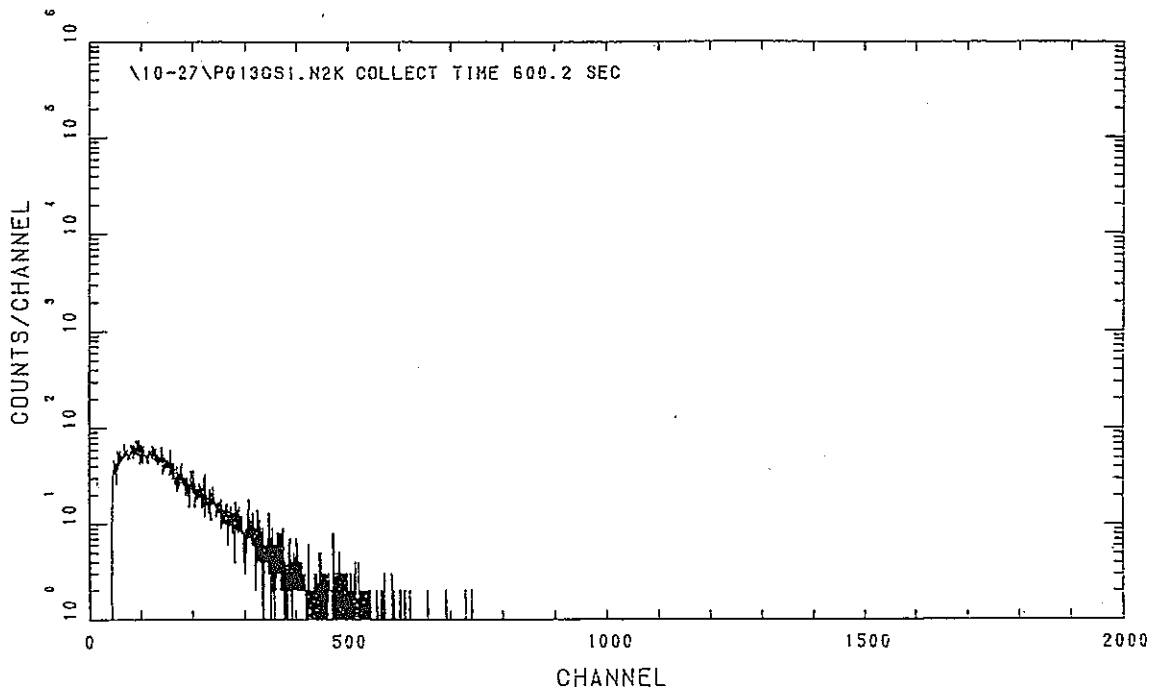


図 3.13 測定点 P013 における波高分布

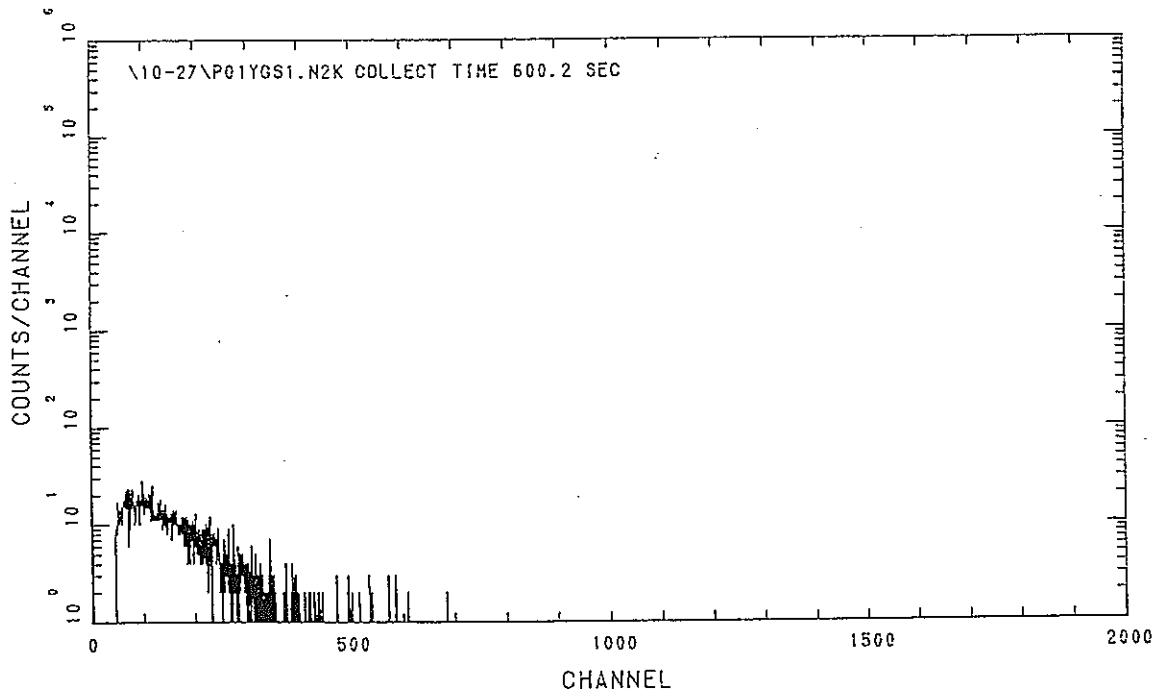


図 3.14 測定点 P01Y における波高分布

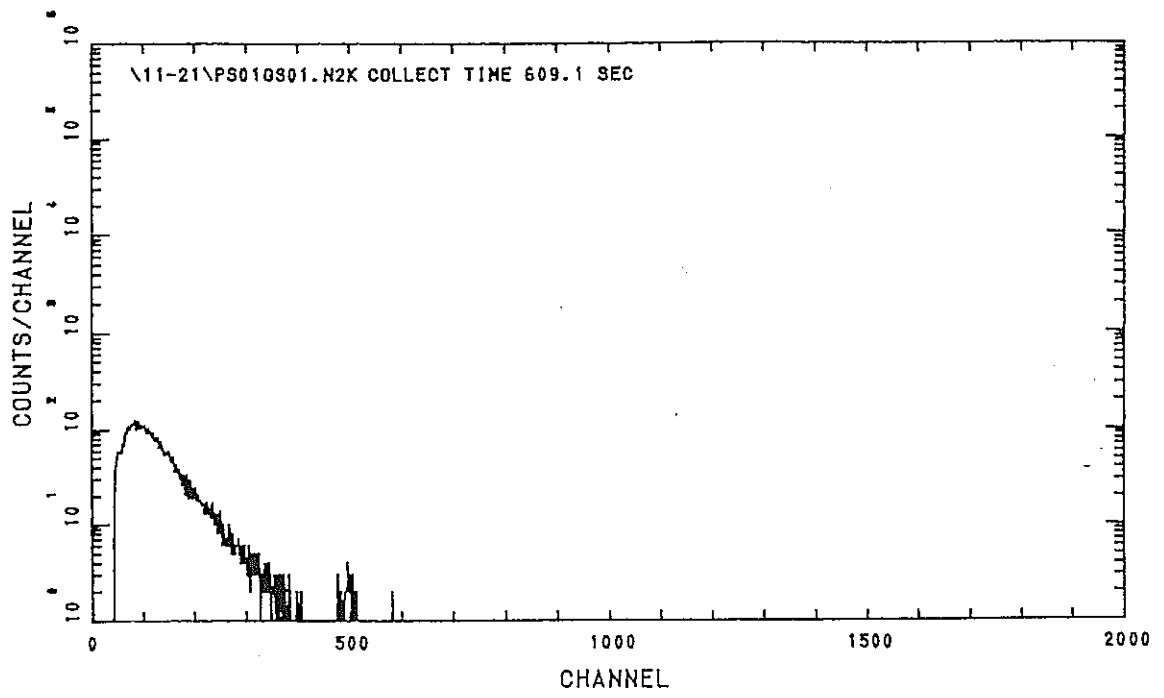


図 3.15 測定点 PS01 における波高分布

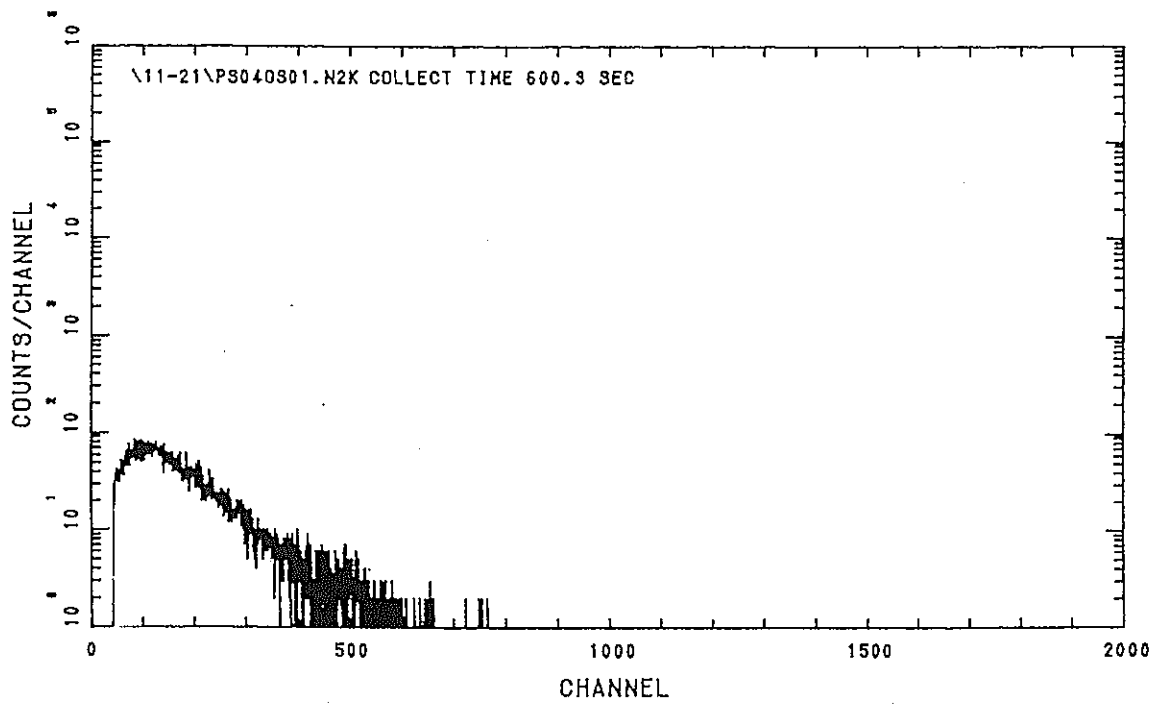


図 3.16 測定点 PS04 における波高分布

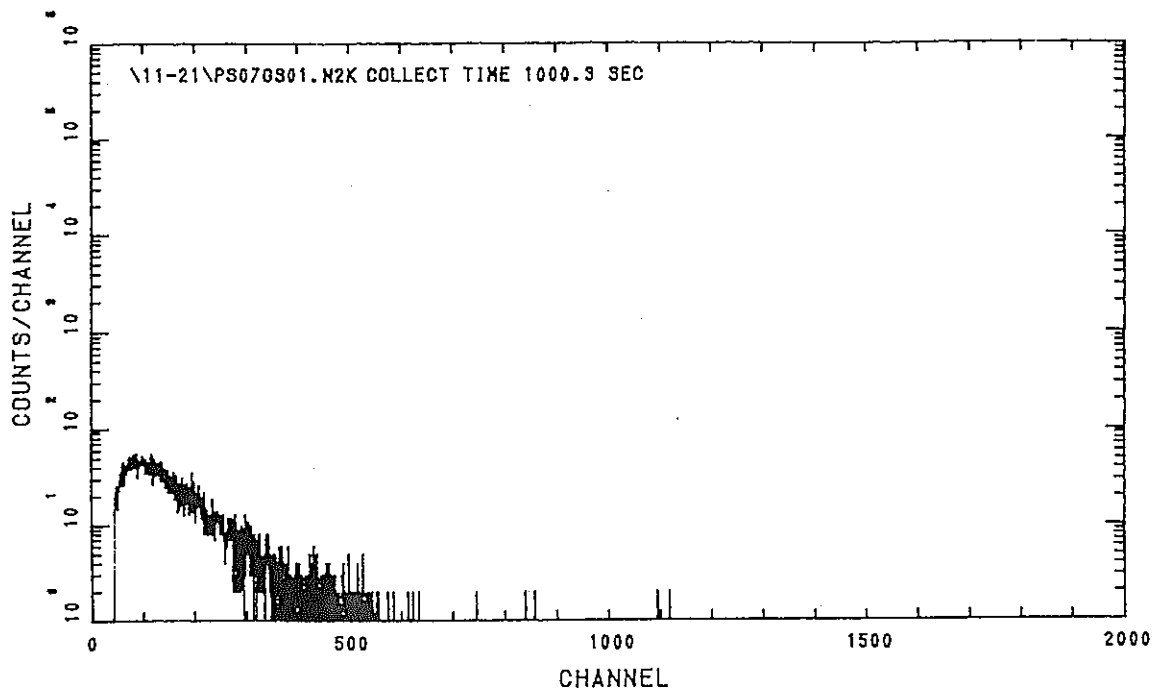


図 3.17 測定点 PS07 における波高分布

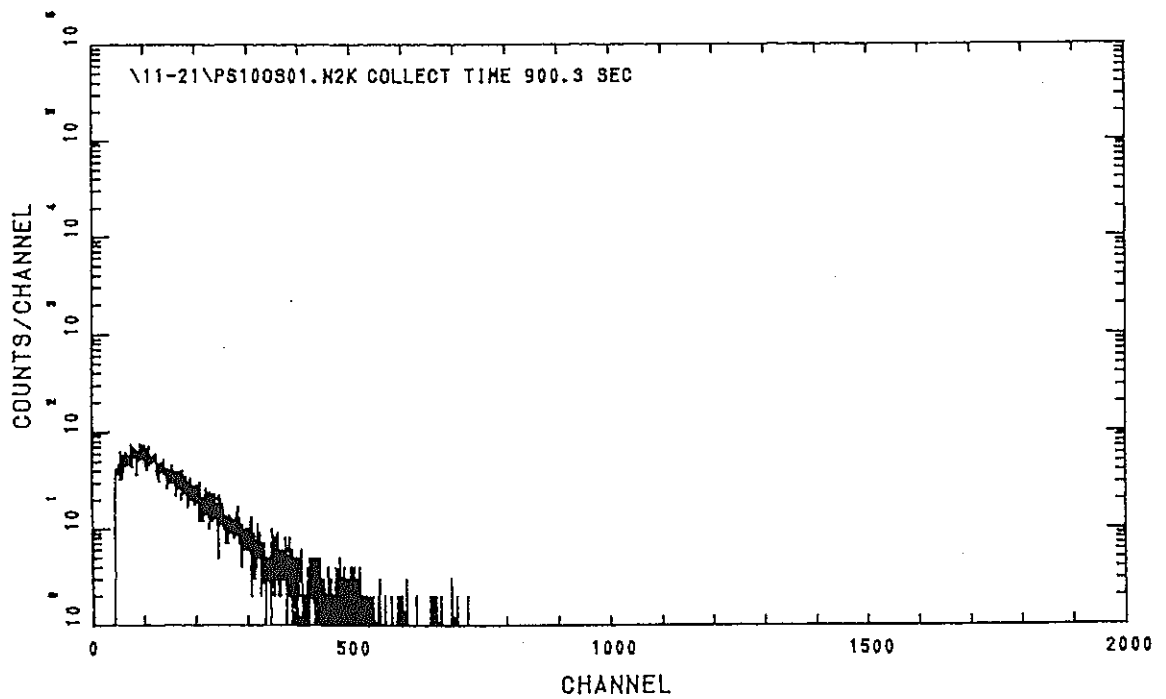


図 3.18 測定点 PS10 における波高分布

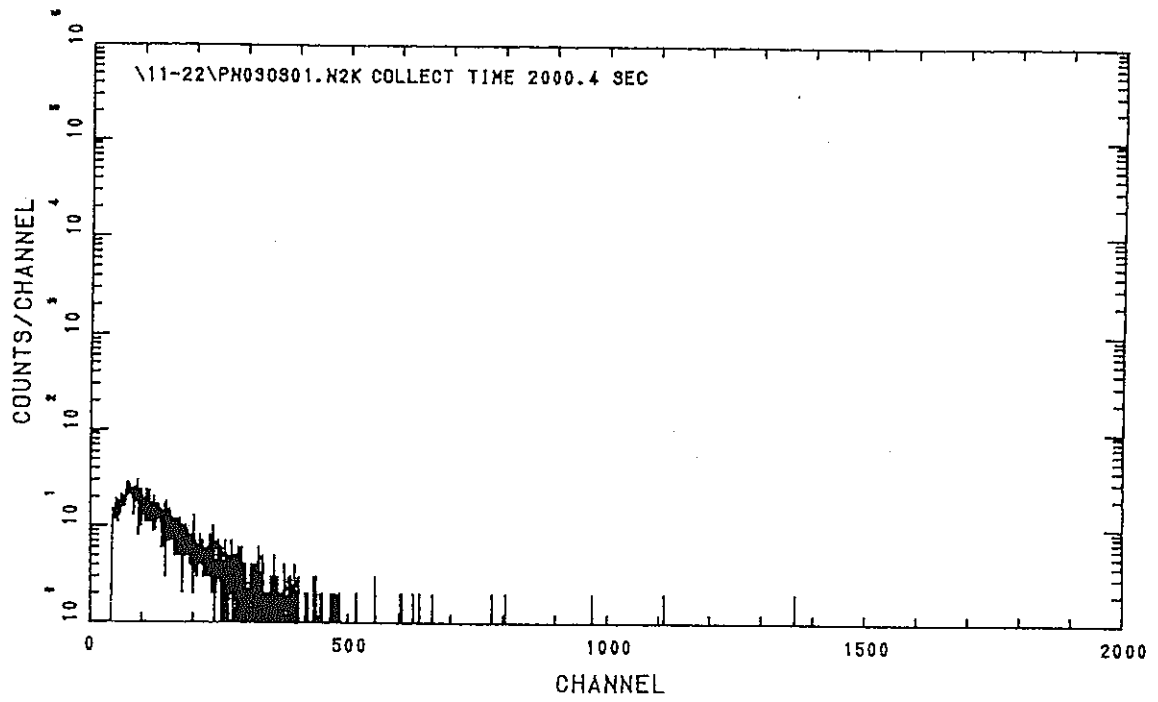


図 3.19 測定点 PN03 における波高分布

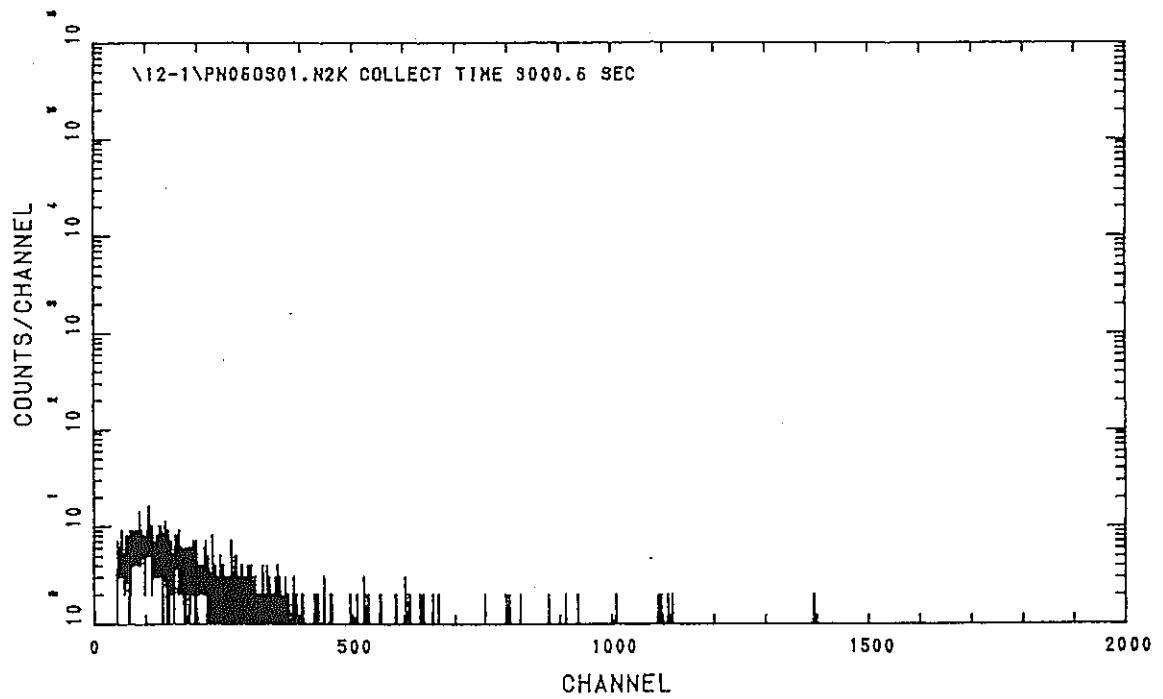


図 3.20 測定点 PN06 における波高分布

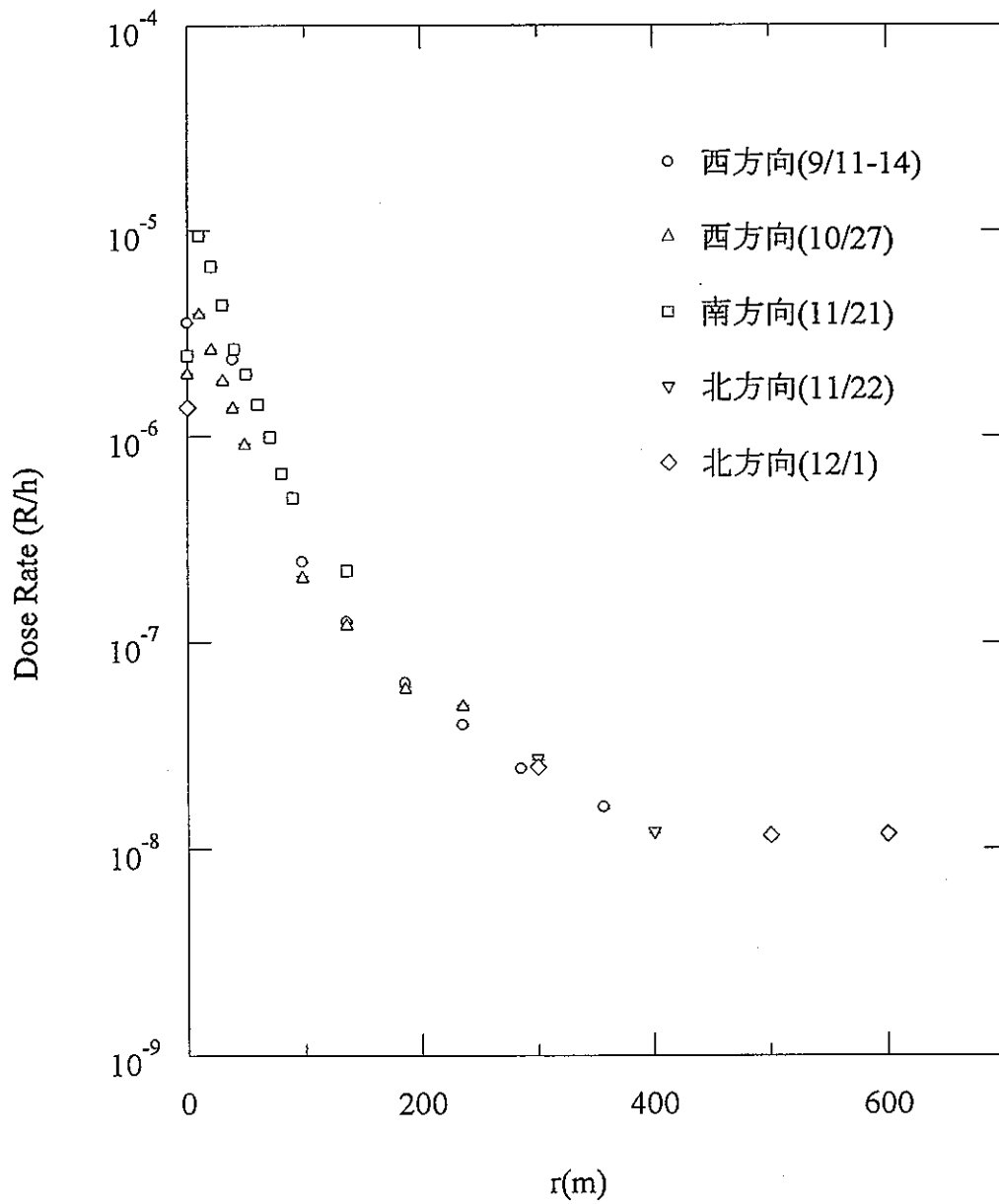


図3.21 45MeVライナック施設からのスカイシャイン測定

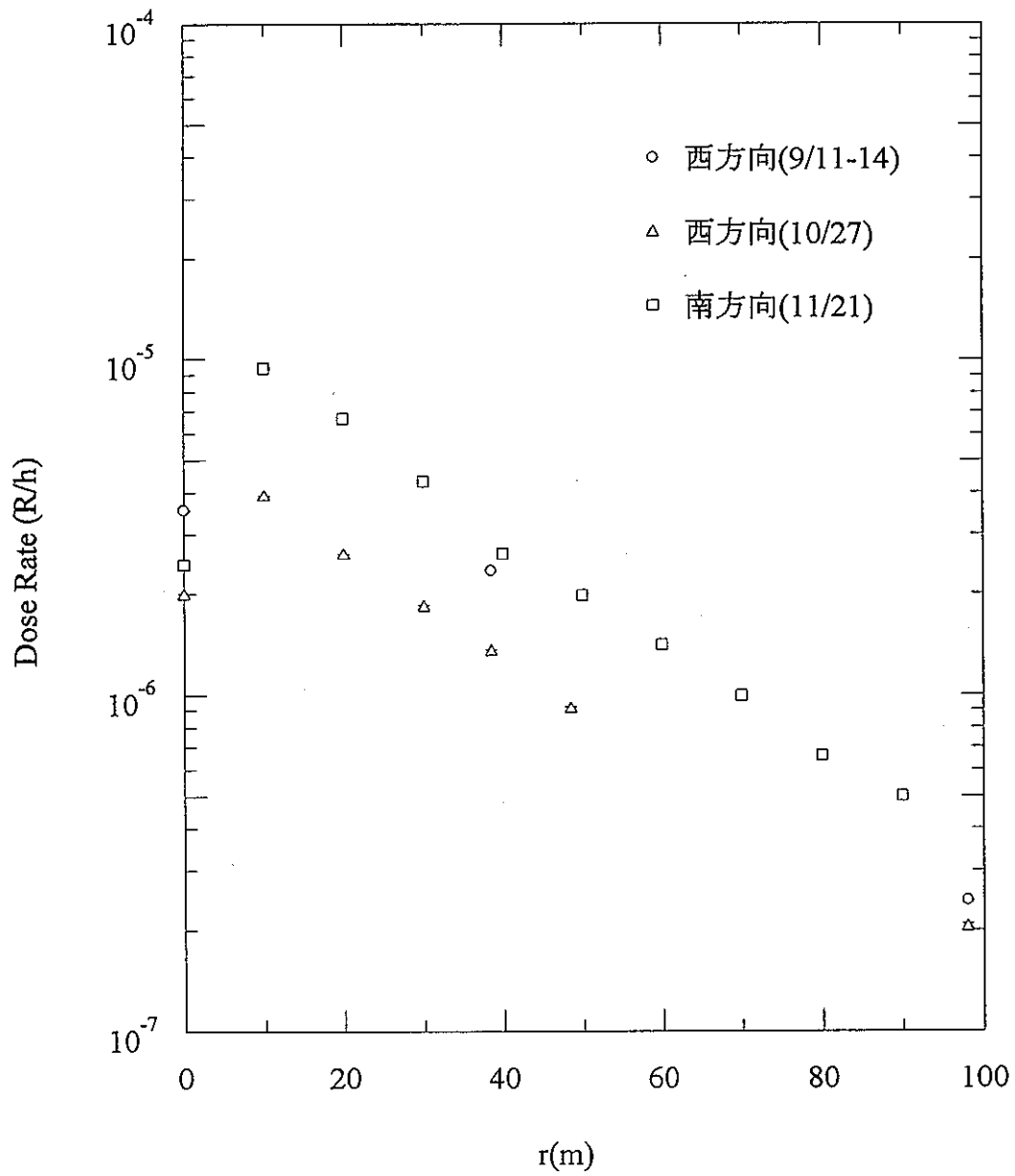


図3.22 45MeVライナック施設からのスカイシャイン測定

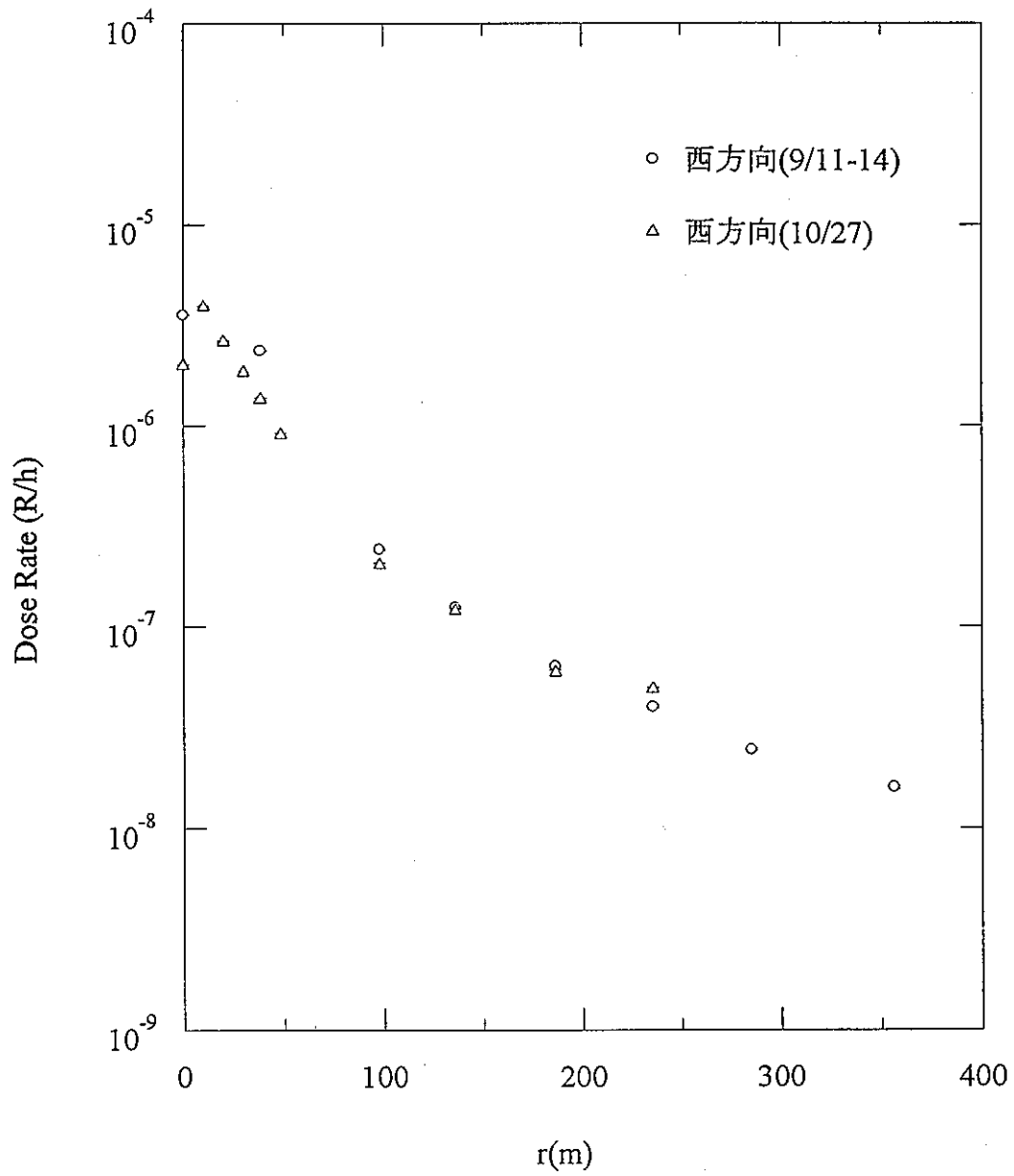


図3.23 45MeVライナック施設からのスカイシャイン測定

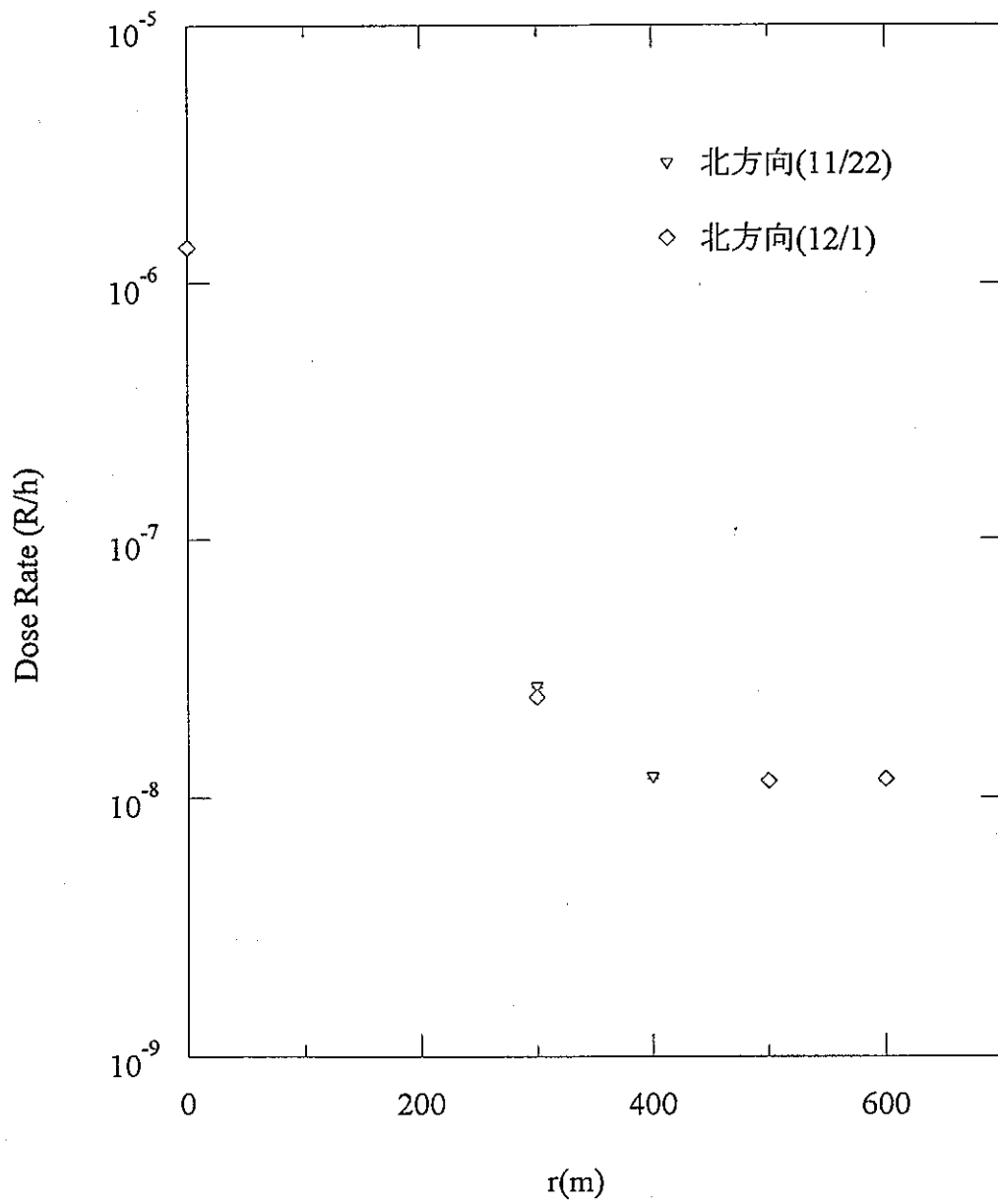


図3.24 45MeVライナック施設からのスカイシャイン測定



Photo3.5 西方向測定点の周辺状況



Photo3.6 西方向の測定風景



Photo3.7 北方向測定点の周辺状況



Photo3.8 北方向の測定風景

4. EGS4 計算コードを用いたシミュレーション解析

4.1 解析の概要

放射線取り扱い施設の安全評価には、種々の計算コードによる線量評価が有効な手段の一つとなっている。しかし、そのような施設からの、スカイシャイン線についてのベンチマーク実験データは極めて少なく、測定データの取得は必要不可欠であるとともに、計算コードの、スカイシャイン線評価への適用性を検討する必要がある。

そこで本章では、EGS4 計算コード⁽¹⁾ 汎用ユーザズ版⁽²⁾ の、スカイシャインベンチマーク実験への適用性を検証することを目的として、前章までの測定体系および測定手法をもとに、45MeV ライナック施設からのスカイシャイン線に対するシミュレーション解析を行った。

4.2 施設からの制動放射線発生計算

4.2.1 計算体系

45MeV ライナック施設の、幾何学的計算体系を図 4.1 に示した。体系には図 3.1 で示されるような、ターゲット室の周囲の中性子実験室や中性子飛行管などを含まず、ターゲット室のみが考慮されている。電子線源の位置を座標原点として、図中の単位は全て cm となっている。ターゲットの位置を原点から 100cm とし、測定体系におけるビーム管の窓からターゲットまでの距離と一致させた。ターゲットの周囲およびターゲット室内を空気で囲み、その周囲をコンクリート壁で囲んだ。更にその周囲は、土壌からの散乱の影響を線量計算に取り入れるため、空気と土の 2 層を考えた。またターゲット室には、図中に示される外部に通じるダクトを考え、このダクトからの漏洩放射線が主にスカイシャインになると考えている。

線源とターゲットの幾何学的計算体系を図 4.2 に示した。線源は半径が 0.25cm、エネルギーが 45MeV の平板電子線を考え、また、ターゲットは、測定体系では厚さが 3mm の鉛板が 3 枚重ねられているのに対し、計算体系では、厚さが 9mm、半径が 20cm の 1 枚の鉛ターゲットを考え、電子線がターゲット表面の円の中心に当たるものとした。そして、そこから制動放射線が発生させ、スカイシャイン線源になるものとしている。

EGS4 汎用版に組み込まれている検出器機能のうち、今回の計算では円環検出器などの平板検出器に代わり、漏洩放射線の方向依存性を調べるためにすべて点検出器を用いて計算を行った。

計算体系中で用いた鉛、空気、コンクリート、土の 4 つの物質の組成の、PEGS への入力データを表 4.1⁽³⁾ に示した。また表 4.2 で表されるように、

追跡する粒子のエネルギー範囲は、それぞれの物質について、荷電粒子は 1.00~45MeV、光子は 0.01~45MeV とした。ここで荷電粒子については、発生する荷電粒子の挙動を追跡することは不要であると考えられるため、下限エネルギーの設定値を高くし、計算時間の短縮を図っている。

以前の解析においては、まず施設のみを体系を考え、ダクトにおける漏洩放射線のスペクトルを計算した後に、そのスペクトルを線源として、施設外の空気と土のみの体系を用いて線量の計算を行うという、体系を2段階に分けた解析方法であったために、2段階の体系の間に生じる誤差が問題となっていた。本章における解析では、図 4.1 (および 4.3 章における図 4.6) で示されるような、施設と、施設外の空気と土の領域を1つの体系として組み込み、誤差の問題を解消した。

4.2.2 計算結果

45MeV ライナック施設のターゲット室には、図 4.1 中に示されるような換気のためのダクトが設置されており、それはそのまま外の排気筒につながっている。定期サーベイによって、この排気筒付近での漏洩放射線が最も強いことが知られているため、まず、このダクトにおける漏洩放射線のスペクトル解析を行った。

図 4.3 にその計算結果を示した。計算方法については、EGS4 汎用ユーザーズ版の検出器機能を用いて計算を行い、結果は横軸を光子のエネルギー、縦軸をターゲットへの入射電子1個に対する光子数として、両対数プロットで表した。これにより、ダクトにおける漏洩放射線は、入射電子のエネルギーが 45MeV であるのに対し、およそ 50keV~10MeV の範囲に分布しているという結果が得られ、100keV 付近にピークが現れており、その個数は、入射電子1個に対し約 10^{-7} 個となった。しかし 1MeV 以上は誤差が大きいため再検討する必要があると考えられる。

図 4.4~4.5 には、方向による漏洩放射線のスペクトルの違いを示した。方向は、ダクトを中心とした西、南、東、北の4方向を選び、同様に結果は横軸を光子のエネルギー、縦軸をターゲットへの入射電子1個に対する光子数として、両対数プロットで表した。まず光子のエネルギー分布については、10MeV の範囲にまで分布しているという点では4方向に大きな違いは見られないが、西方向では、50keV 以下のより低い範囲にまで分布しているという結果が得られた。光子のエネルギーに対する発生光子数については、北方向が最も少なく、特に 1MeV 以上で他の3方向との差が見られた。この結果は、電子線の方向と、ターゲット室の幾何学的体系によるものと考えられる。

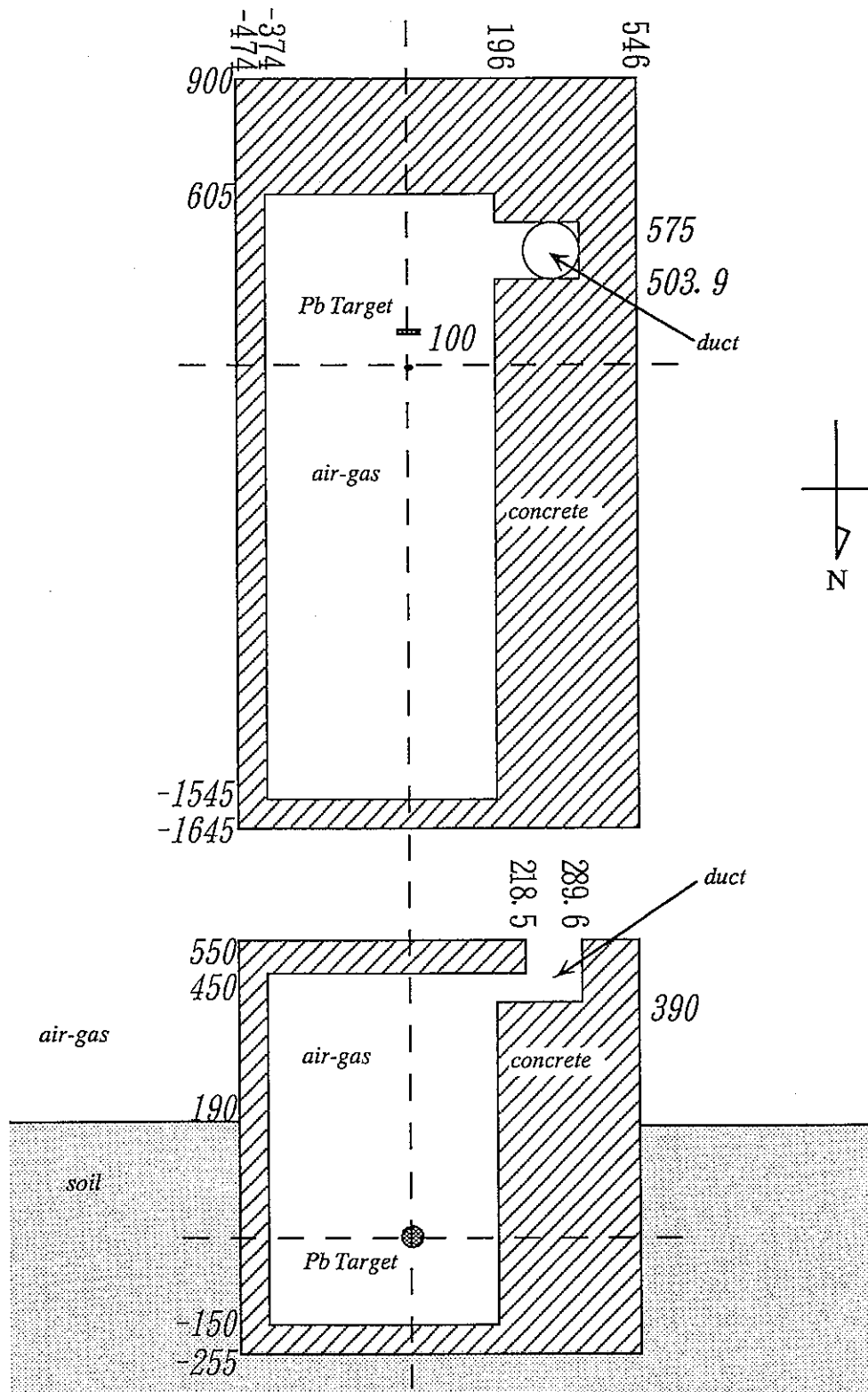


図 4.1 ターゲット室の幾何学的体系(単位 cm)

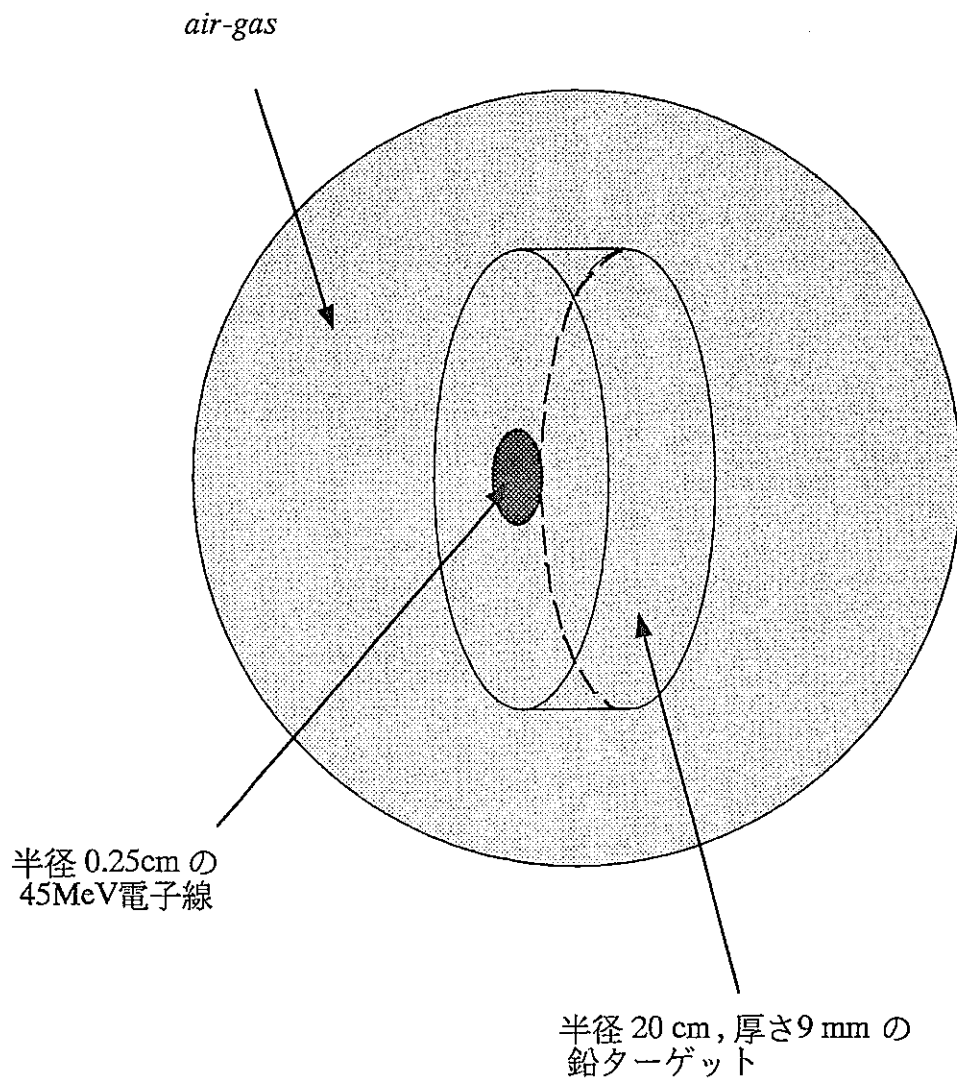


図 4.2 線源とターゲットの幾何学的体系

表 4.1 スカイシャイン線量計算で用いた物質の組成⁽³⁾

物質	密度(g/cm ³)	元素	割合(%)
Lead	PEGS 内蔵値	Pb	100
Air-Gas	1.29E-03	N	78.18
		O	20.97
		Ar	0.85
Concrete	2.17	H	0.56
		O	49.83
		Na	1.71
		Mg	0.24
		Si	31.58
		S	0.12
		K	1.92
		Ca	8.26
Soil	1.71	Fe	5.78
		H	0.36
		C	1.47
		O	49.59
		Na	0.84
		Mg	1.60
		Al	7.08
		Si	27.09
		P	0.06
		S	0.22
		K	2.37
		Ca	4.21
Ti	0.34		
Fe	4.04		

表 4.2 追跡粒子のエネルギー範囲

	下限エネルギー(MeV)	上限エネルギー(MeV)
荷電粒子 (電子, 陽電子)	AE=1.00	UE=45.00
光子	AP=0.01	UP=45.00

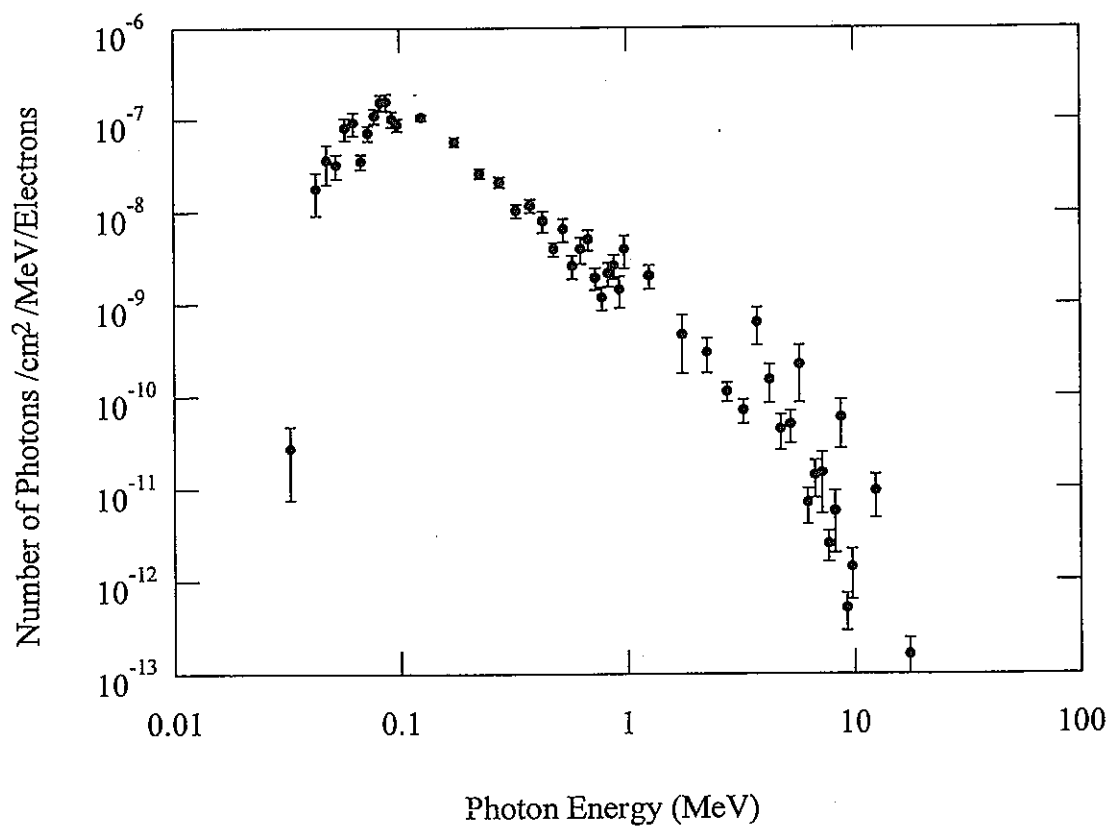


図4.3 排気ダクトにおける漏洩放射線スペクトル

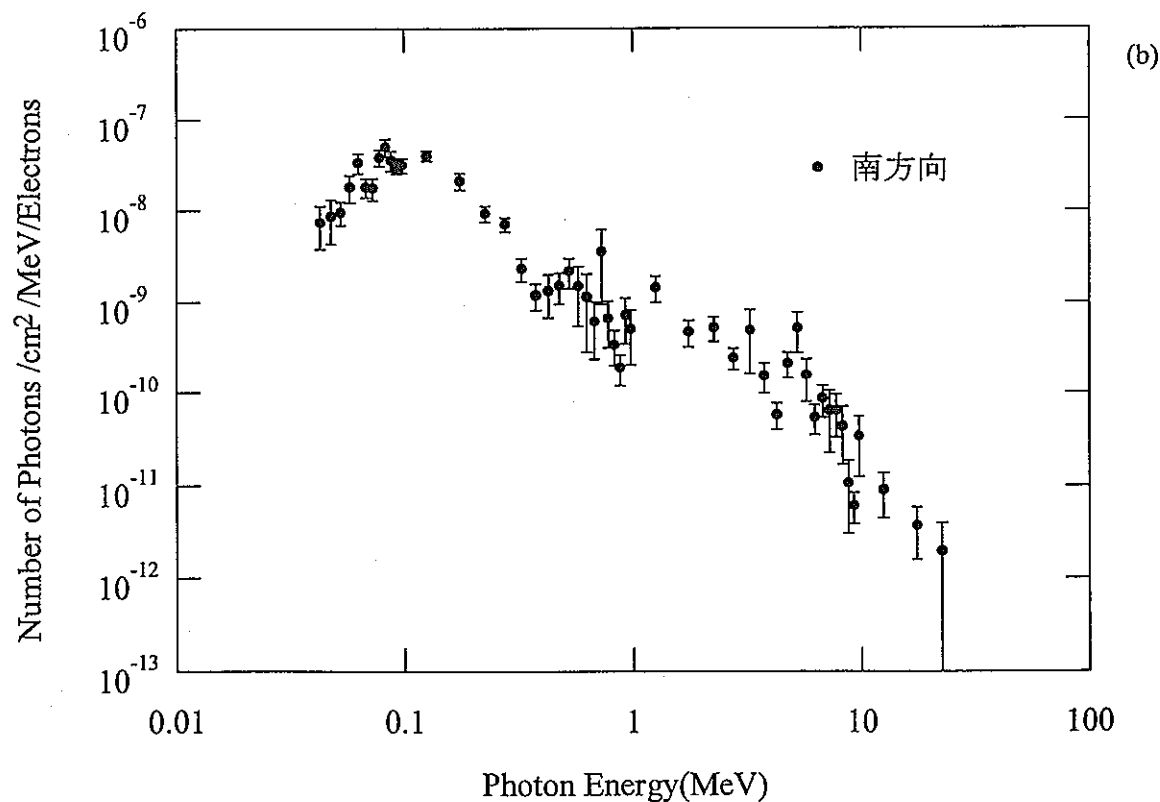
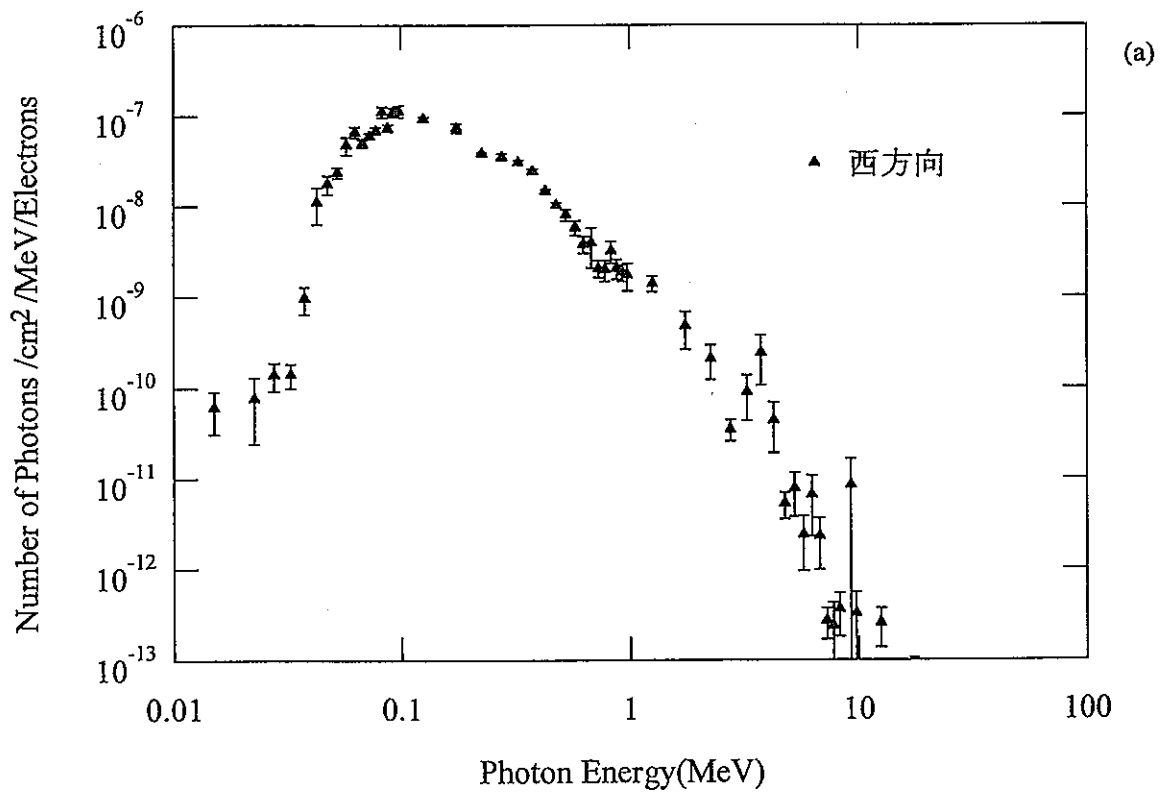


図4.4 排気ダクトにおける漏洩放射線の方向依存性

(a)西方向

(b)南方向

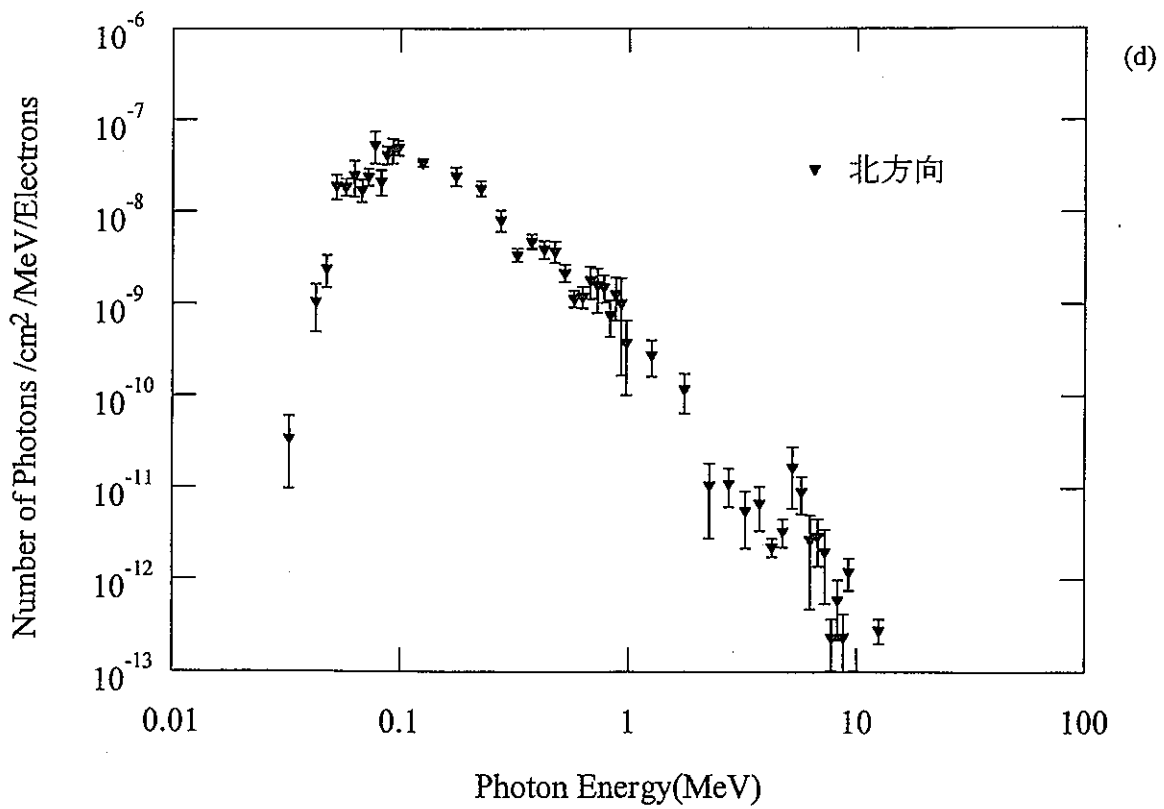
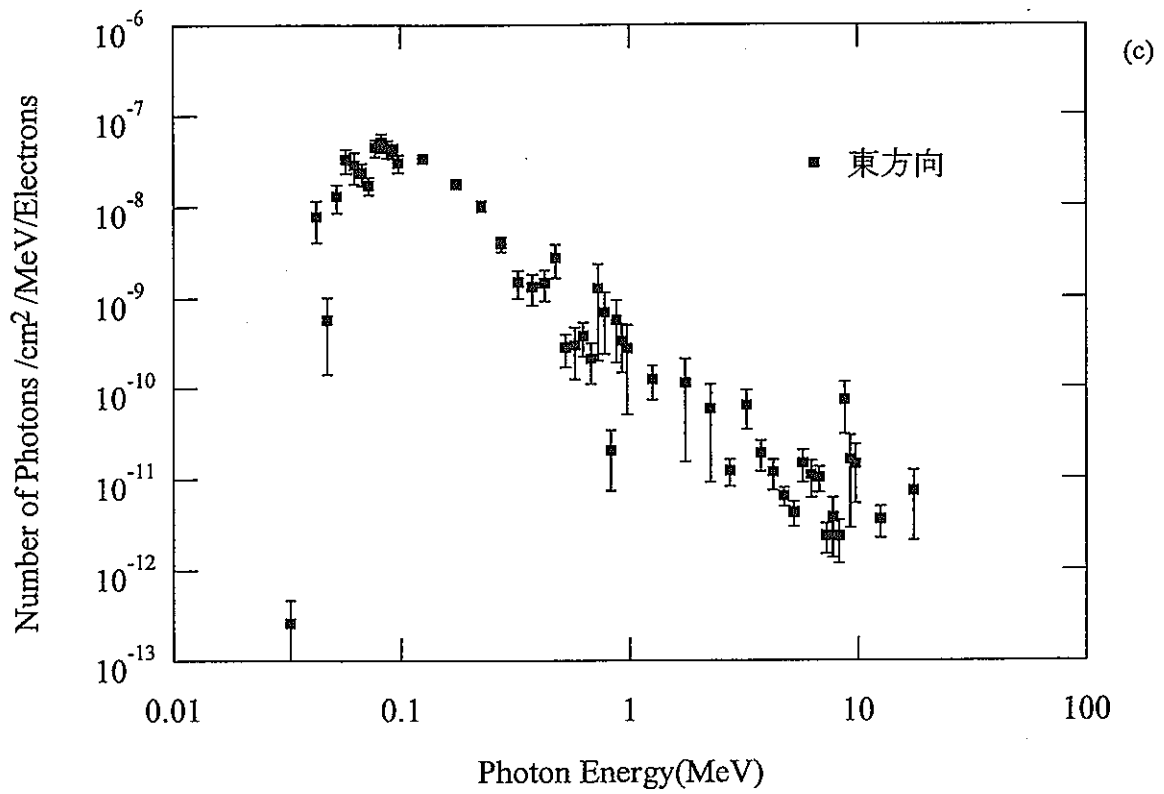


図4.5 排気ダクトにおける漏洩放射線の方向依存性

(c)東方向

(d)北方向

4.3 施設からの漏洩放射線および線量分布

4.3.1 施設からの漏洩放射線

放射線施設から敷地外への漏洩放射線による線量率には、施設内の線源から直接評価点に至る線量率寄与、いわゆる直接線と、施設内の線源から天井等を通り抜け上方に放出された後、空気とのコンプトン散乱により散乱され評価点に至る線量率寄与、いわゆるスカイシャインがある。(3)たとえば、BWR型発電炉では、原子炉運転中にタービン建屋から発生する ^{16}N のガンマ線(6.2MeV)が、タービン建屋の屋根を通過し、スカイシャインとなることが知られている。(4)

45MeVライナック施設では、ターゲットや加速管から発生する制動放射線が線源となっていることが知られている。加速器は地下に設置されており、また壁には十分な遮蔽がされているが、ターゲット室上方に取り付けられた、排気用のダクトからの漏洩が外の排気筒へ抜け、主にスカイシャイン線源となると考えられている。そのため、測定では排気筒を中心とした線量測定が行われており、またシミュレーション解析においても、ダクトを中心とした線量計算とその評価を行った。

4.3.2 計算体系

図4.6に、スカイシャイン線量計算のための幾何学的体系を示した。体系は図4.1中で示されるダクトを中心として、上方向には半径が800m、高さが1.0kmの円柱状の空気の領域と、下方向には半径が800m、深さが50mの円柱状の土の領域を考え、これにより土による散乱の影響も考慮した計算を行った。検出器の高さは、図中に示されるように、空気と土との境界面から高さ1mとした。

図4.7には、検出器の位置、すなわちEGS4に入力した計算点の、ダクトからの距離を示した。検出器は西、南、東、北の4方向にそれぞれ8個ずつ、計32個を、50~700mの距離の間におき、これにより、施設からの漏洩放射線の、距離および方向に対する依存性を解析を行った。

4.3.3 計算結果

まず図4.8~4.9には、ダクトから100mの地点における、4方向それぞれについての漏洩放射線のスペクトルの計算結果を示した。横軸は光子のエネルギー、縦軸はターゲットへの入射電子1個に対する光子数として、両対数プロットで表した。これによると、4方向ともに50~100keVの間にピークがあるとみられ、そのときの光子数は、入射電子1個に対して、

西、南、東方向では約 10^{-10} 個、北方向では約 10^{-11} 個となった。ダクトにおける光子の数は、100keV で約 10^{-7} 個であったから、ダクトから 100m の地点では 3~4 桁ほど減少したと言える。

図 4.10~4.13 には、4 方向それぞれについて、距離の変化に伴う漏洩放射線のスペクトル変化を示した。西、南、東、北方向のそれぞれについて、100m 地点と 500m 地点においての比較を行ったところ、さらに 1 桁程度の減少が見られた。

図 4.14 には 4 方向についての、距離に対する光子のフルエンス変化を、図 4.15 には線量分布を示した。線量は、それぞれの方向について、50~700m の間の 8 点を計算し、入射電子 1 個に対する値を求めたところ、およそ 10^{-20} ~ 10^{-23} R の範囲の分布が得られた。4 方向の線量分布を比較すると、線量の距離に対する減衰傾向は、4 方向とも近い傾向を示していると考えられるが、線量の値は、東方向が他の 3 方向に比べて 1 桁ほど大きくなった。これは、実際の施設の東側の壁には盛り土が施されており、また図 3.1 で示されるような飛行管実験室などが、計算体系には組み込まれていないことが影響していると考えられる。

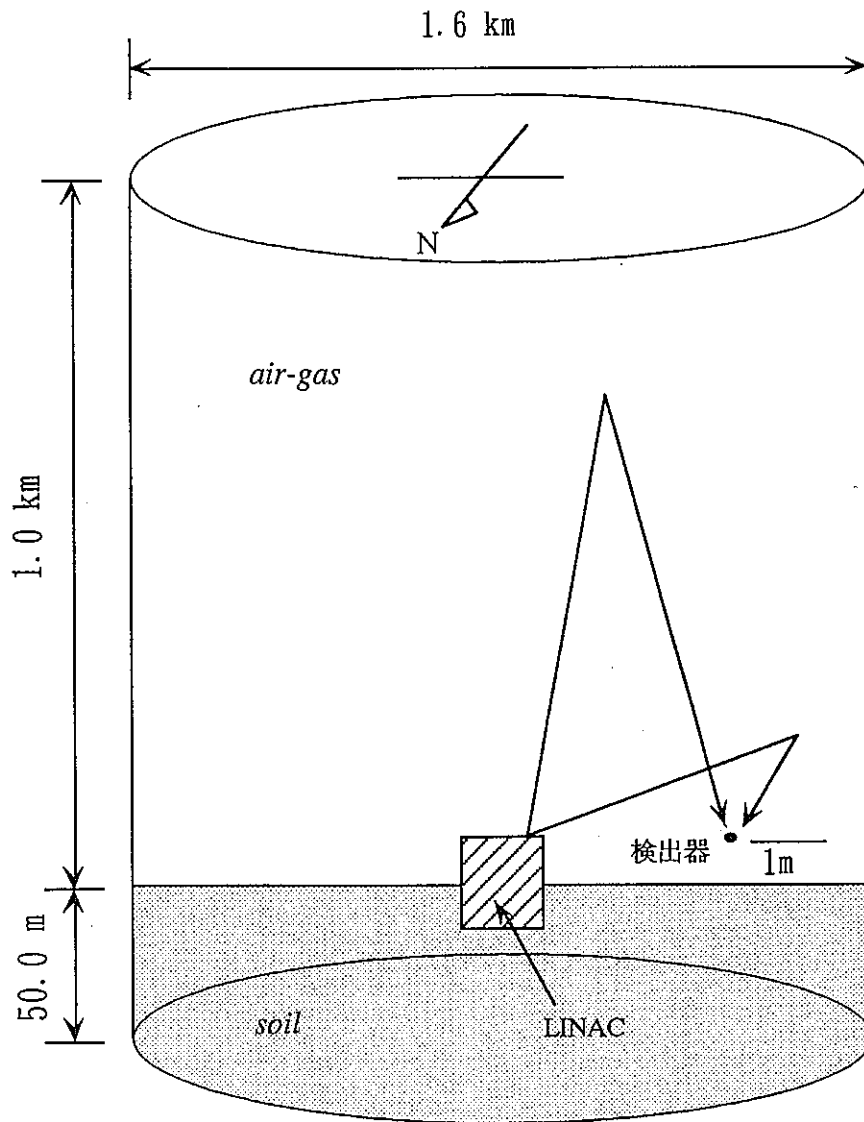


図 4.6 スカイシャイン線量の計算体系

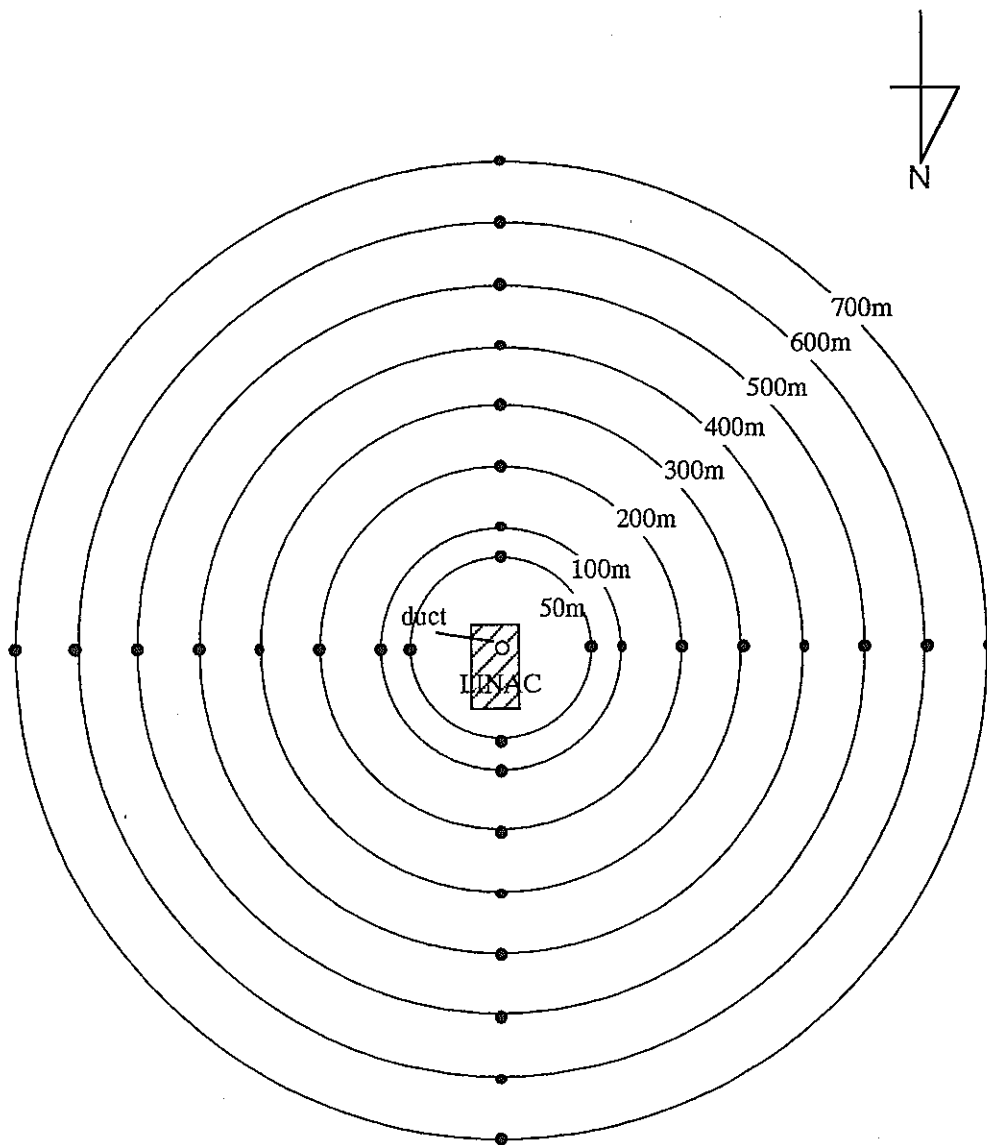


図 4.7 EGS4における検出器(計算点)の位置

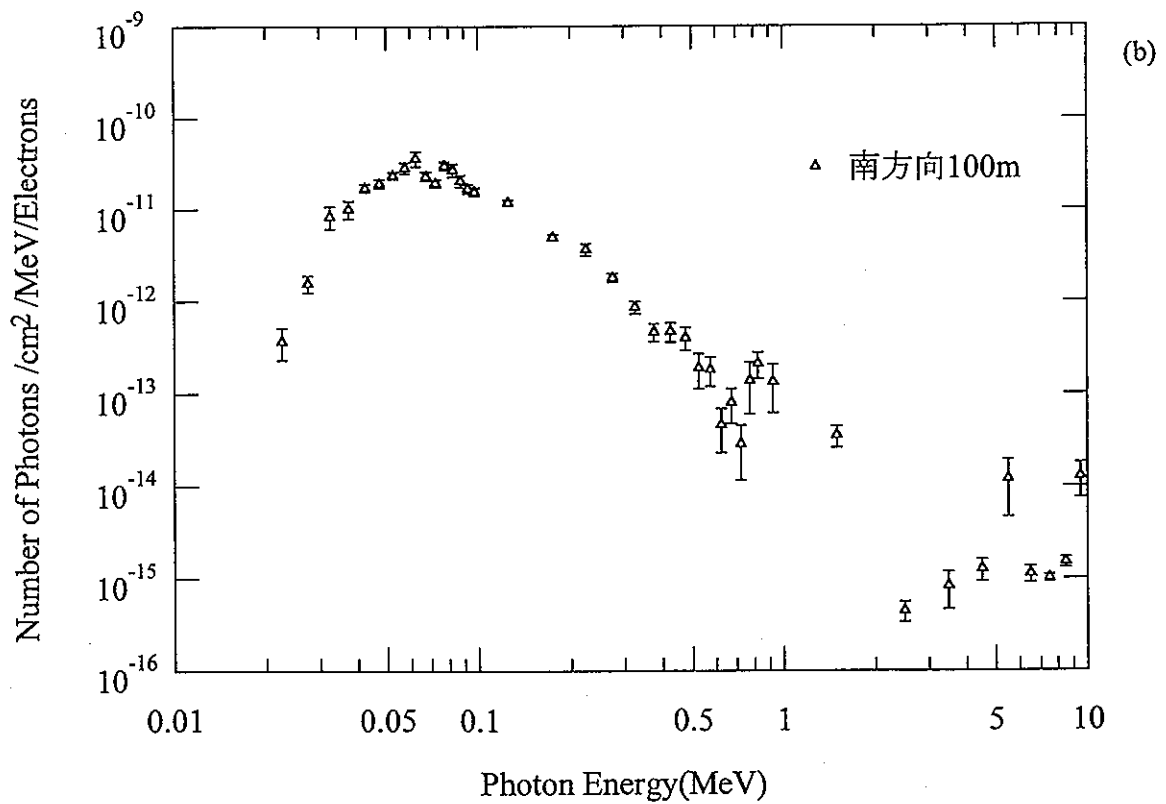
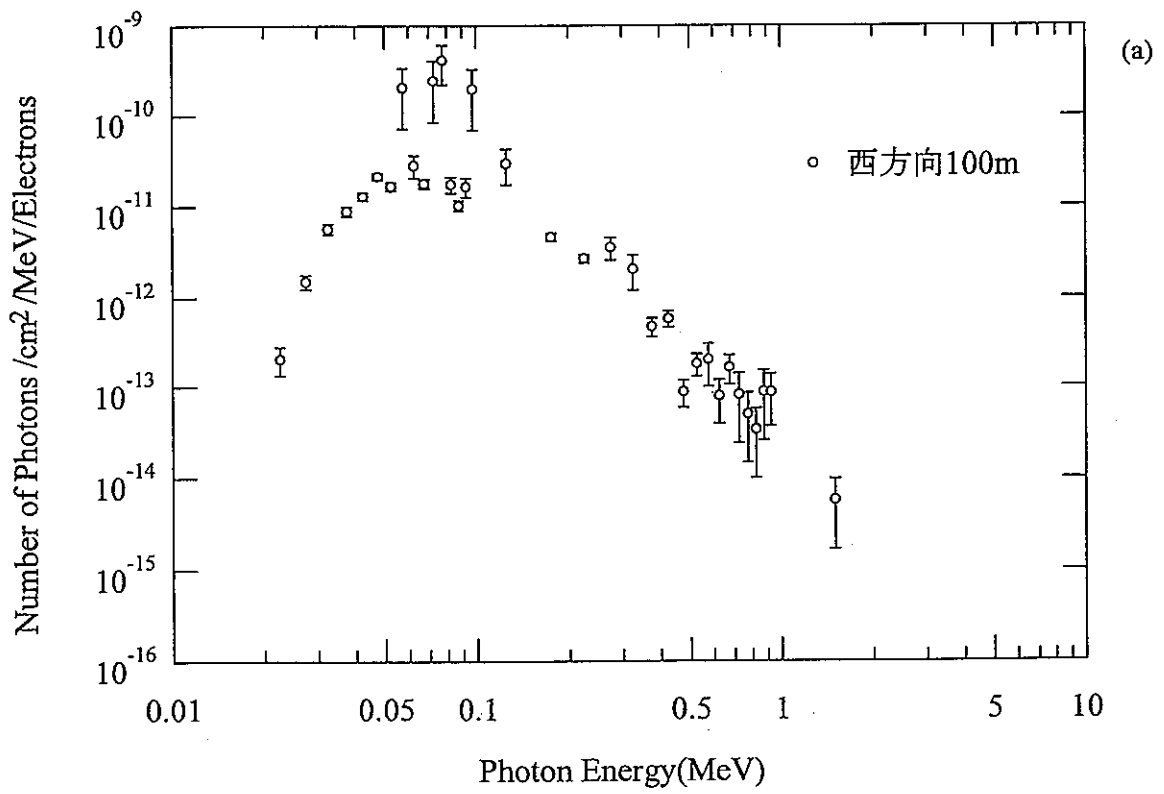


図4.8 漏洩放射線の方法依存性

(a)西方向

(b)南方向

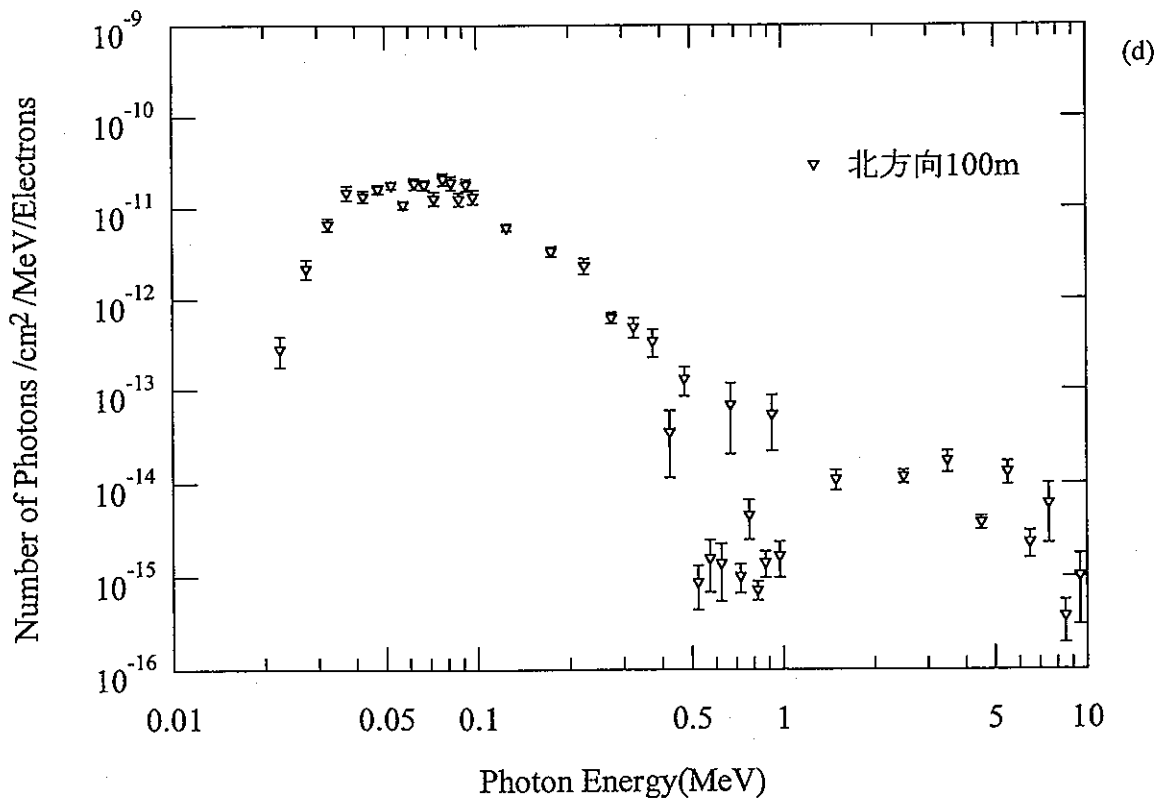
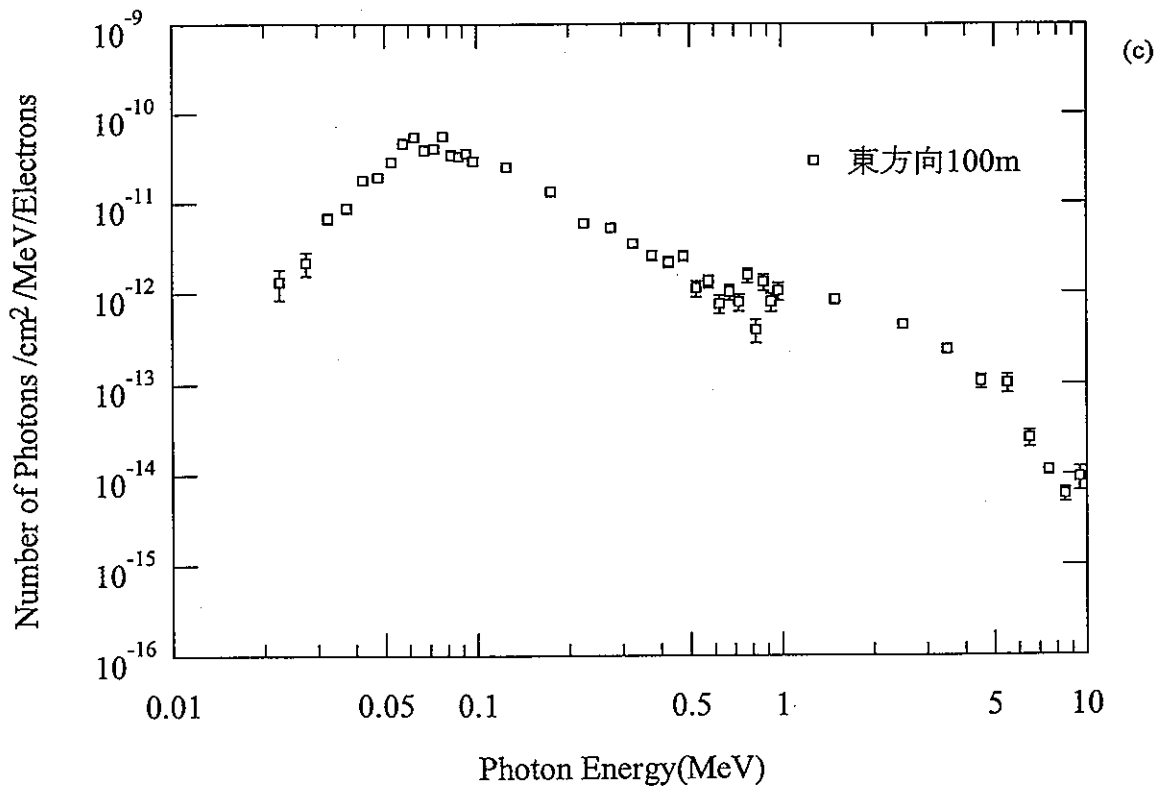


図4.9 漏洩放射線の方方向依存性

(c)東方向

(d)北方向

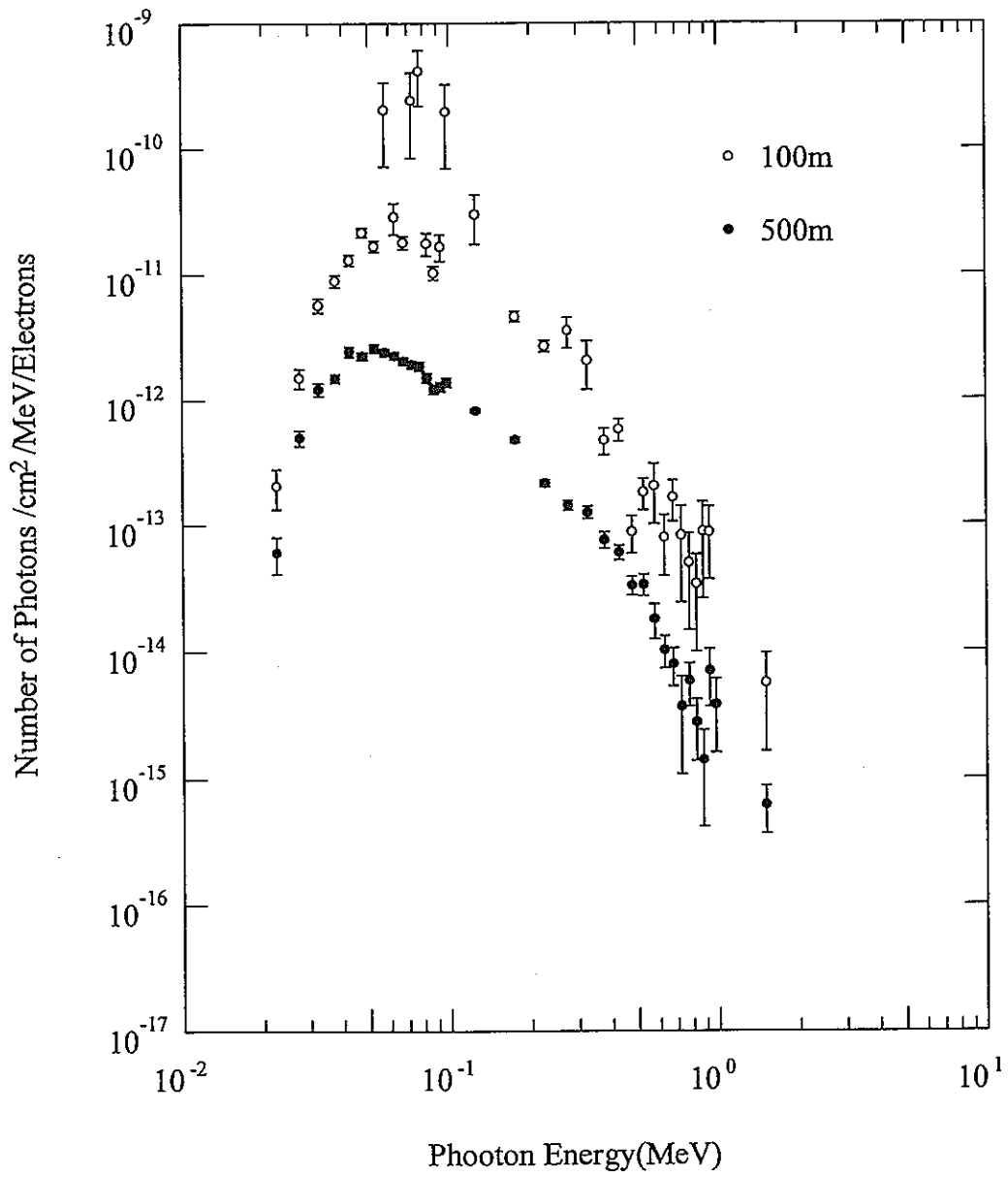


図4.10 西方向における漏洩放射線のスペクトル変化

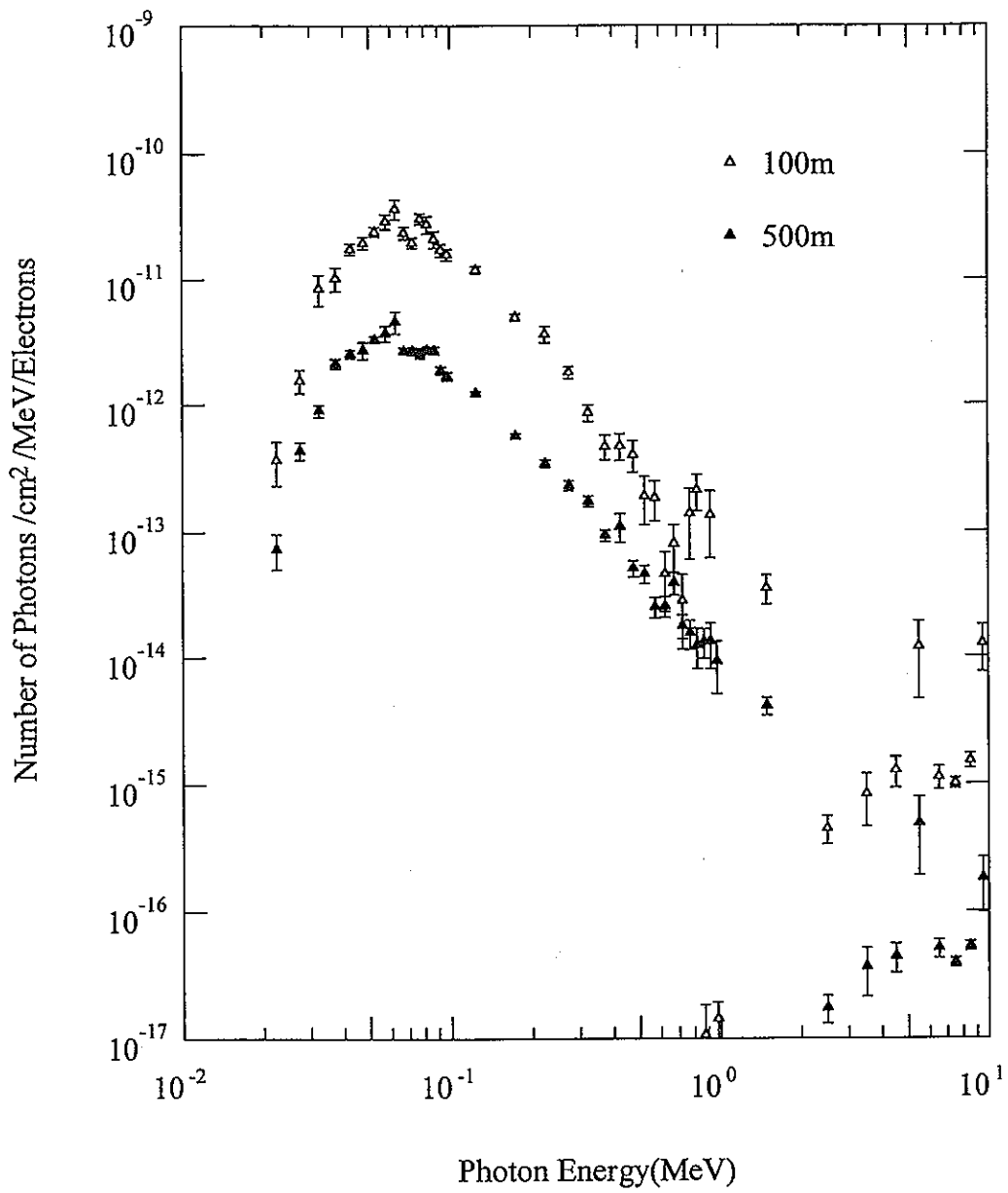


図4.11 南方向における漏洩放射線のスペクトル変化

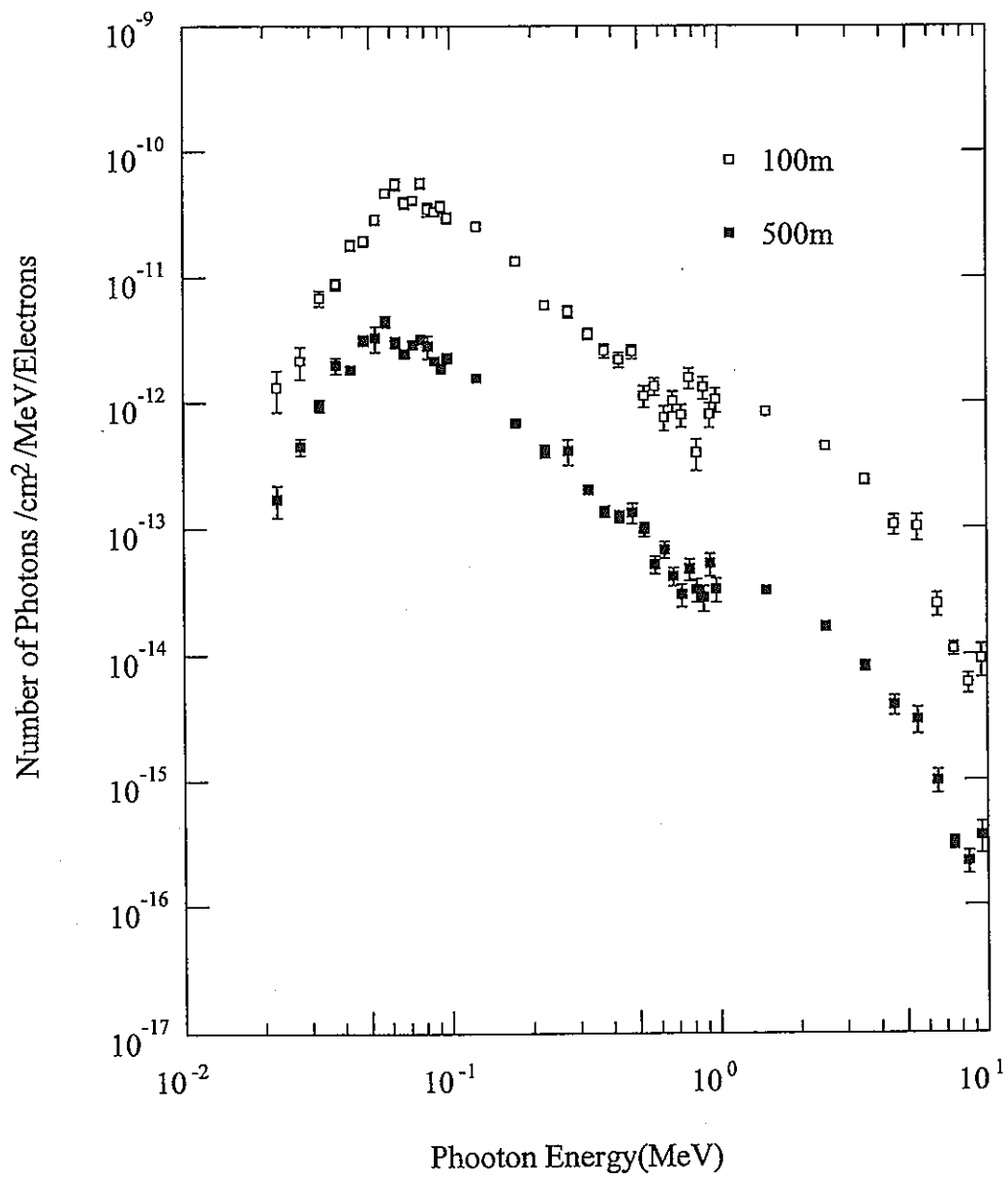


図4.12 東方向における漏洩放射線のスペクトル変化

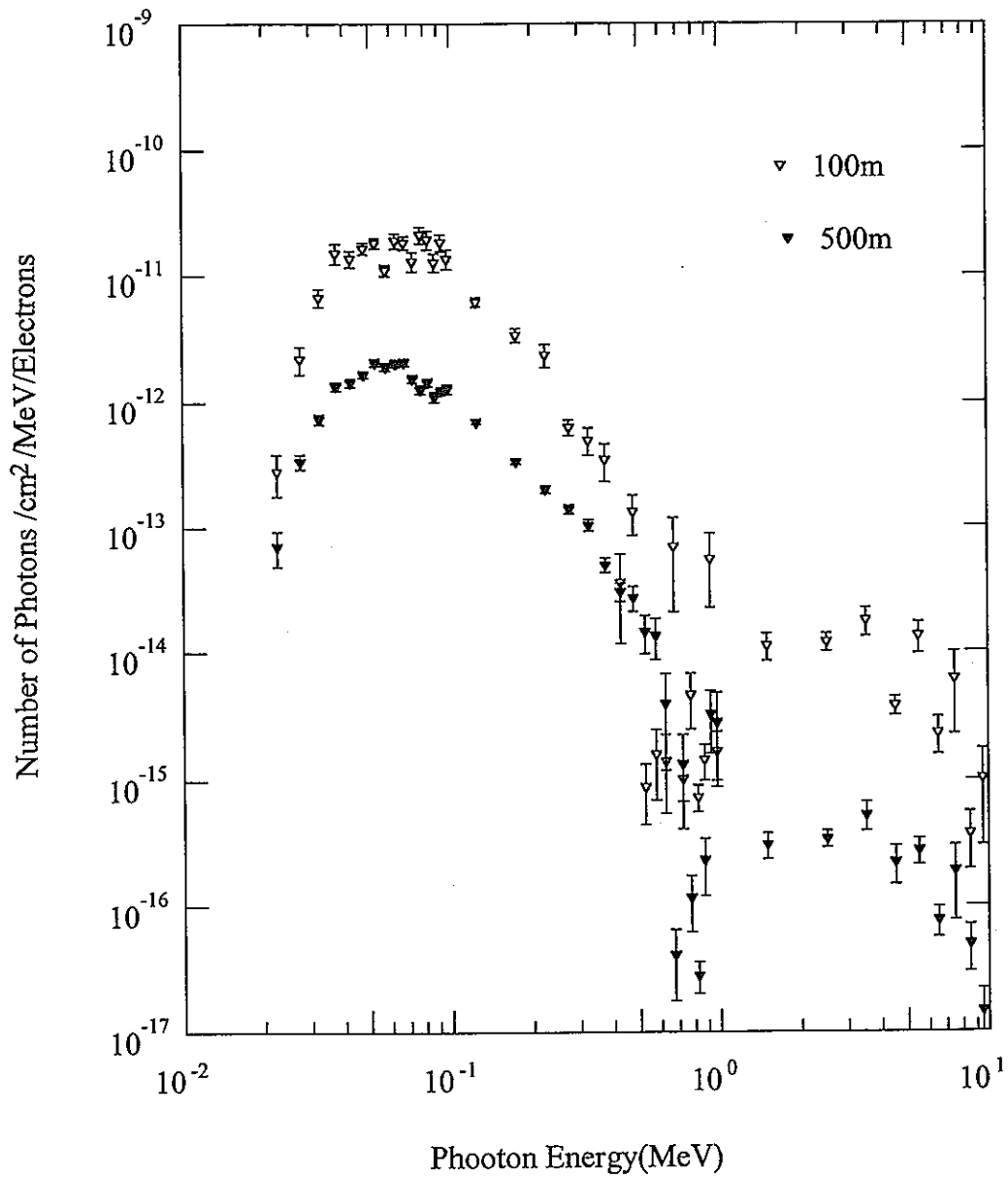


図4.13 北方向における漏洩放射線のスペクトル変化

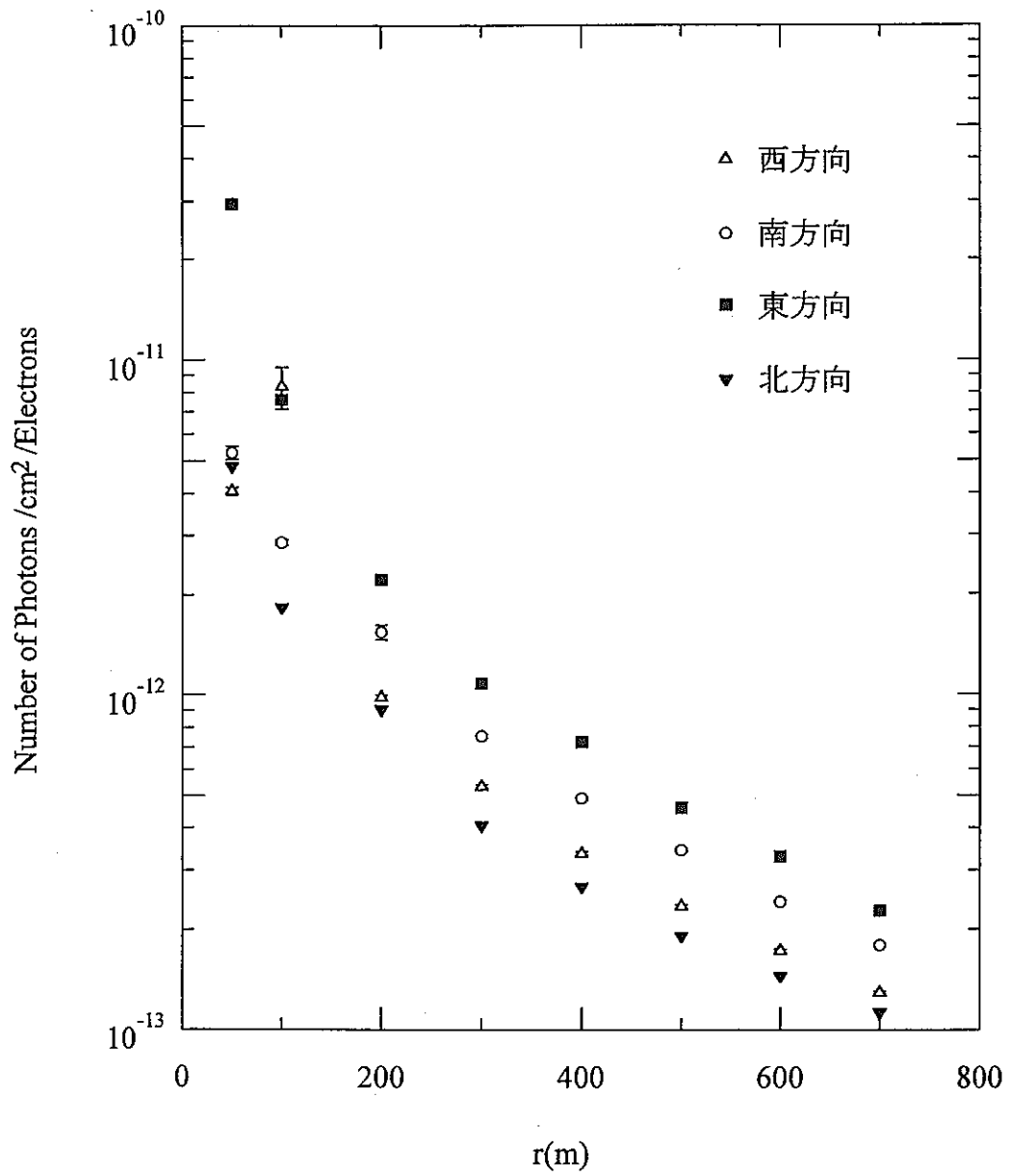


図4.14 距離に対する光子のフルーエンス変化

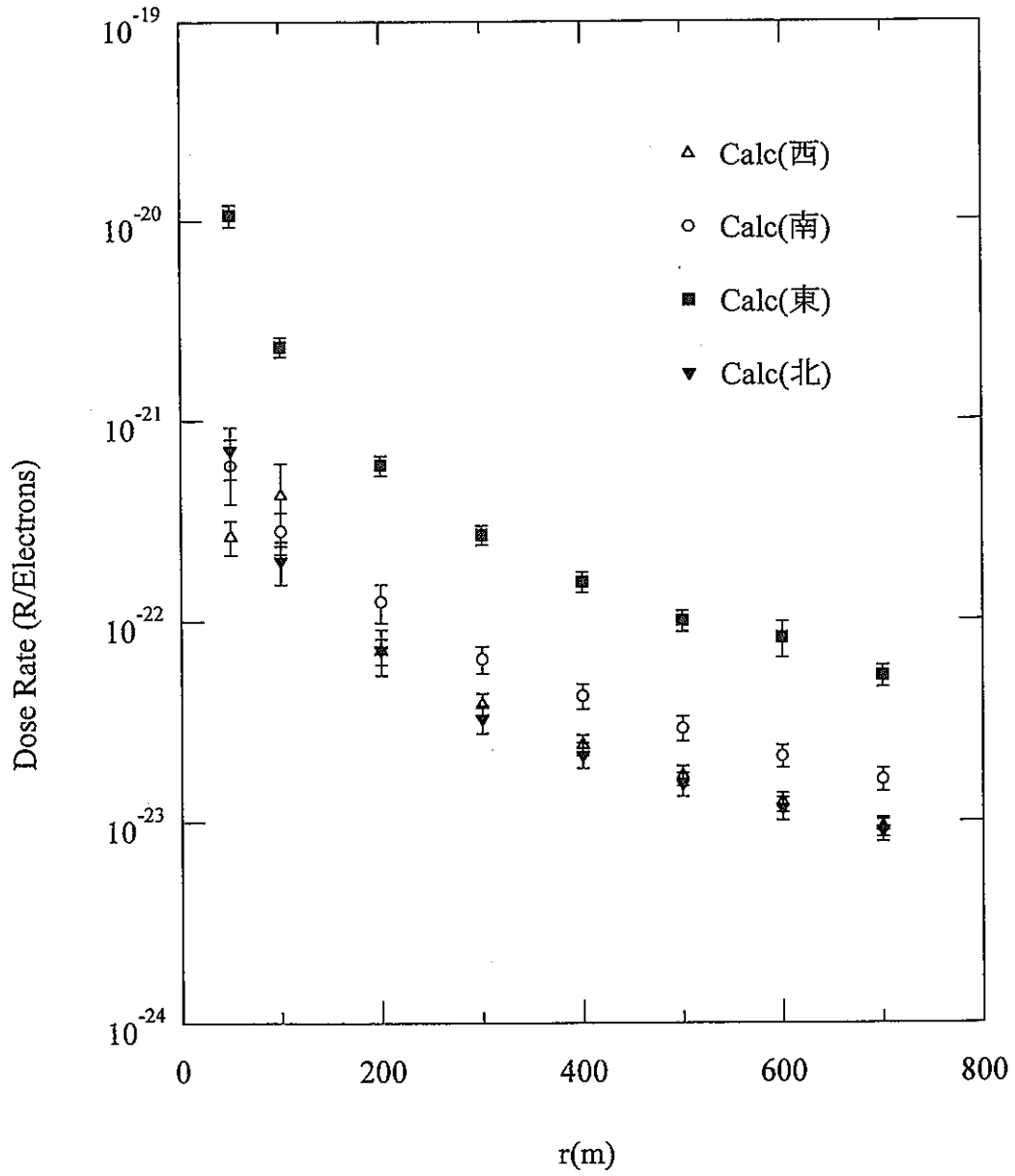


図4.15 線量分布の方向依存性

4.4 スカイシャイン線量における測定値との比較

図 4.16 には西方向の、図 4.17 には南方向、図 4.18 には北方向における測定値と計算値との比較を示した。

Clarke によると、スカイシャイン線量は $r > 0.2\text{mfp}$ (mfp は光子の平均自由行程)以上で、

$$D(r) = D_0 (1\text{mfp}) \exp(-\mu r) / r \quad (4.1)$$

D_0 :1mfp における線量

r :線源からの距離

μ :空気中のエネルギー吸収係数

でよく近似できることが提案されている。⁽⁵⁾ これは、Clifford⁽⁶⁾、Burson らの⁽⁷⁾ や Starbird らの⁽⁸⁾ の実験と、Spencer らの⁽⁹⁾ のモーメント法を用いた計算をもとに得られた経験式として求められている。これから、西方向と南方向については横軸に距離、縦軸に 200m 地点で規格化したときの、 $r \times \text{Dose}$ の値をとってプロットした。また北方向については、測定地点の関係から 300m 地点で規格化を行った。なお、南方向における測定は 90m までしか行われていないが、過去に南方向に約 600m までの測定が行われているため (1978 年度に

南方向の測定が行われた⁽¹⁰⁾)、その結果もあわせてプロットした。これらの結果から、減衰傾向を比較するため、 $100\text{m} < r < 400\text{m}$ の範囲でそれぞれについてのエネルギー吸収係数

表 4.3 エネルギー吸収係数

方向	値	$\mu (\text{m}^{-1})$
西方向	測定値	0.0055
	計算値	0.0053
南方向	測定値	0.0091
	計算値	0.0062
北方向	計算値	0.0028

を求め、その結果を表 4.3 に示した(北方向の測定値については、300~600m の範囲の値しか得られていないため除いた)。

西方向については、図 4.16 や μ の値を比較すると、近い減衰傾向を示しているといえる。100m 以下の線源から近いところでは数 10% の誤差があり、またこの範囲における詳細な計算は行っておらず、測定値との比較を行うためには、施設の構造をより反映した幾何学的体系を組むことが必要であると考えられる。これは他の方向についても同様である。

次に南方向については、図 4.17 および表 4.3 から、計算値に対し測定値

の減衰が早く、その減衰傾向について差が見られた。これは、測定点周辺の建物による影響が大きいと考えられる。西方向には農場が広がっており、測定点周辺に建物がないため (Photo3.5)、この方向の線量への影響はないと考えられるが、南方向には理学部、農学部棟およびそれぞれの関連施設が並んでおり、それらが吸収体としてはたらいっていることが考えられる。

また北方向の比較については、300m 地点を基準としており、計算値は比較しやすいように距離をずらしてプロットされているが、本来は同一距離の値である。 $r > 300\text{m}$ の範囲の比較をしてみると、減衰する傾向は比較的近いと言えるが、より遠方での測定を精度良く行うためにはバックグラウンド放射線に対する配慮が必要であるため、また今回は $r < 300\text{m}$ の範囲の測定は行われていないため、計算との比較には検討を要する。今後の測定により比較を行う予定である。

4.5 解析結果の検討

本章では、北大 45MeV ライナック施設からのスカイシャイン線に対するシミュレーション解析について述べた。まず、施設からの漏洩放射線のスペクトルが得られ、およそ 50keV~10MeV の範囲に分布しており、100keV 付近にピークが現れ、そのときの光子の数は約 10^{-7} 個/cm²/電子 であるという結果を得た。次に施設から、50m から 700m までの距離で 4 方向、計 32 点における線量値が求められ、方向による線量分布の違いが得られた。また西方向と南方向について、測定値との、減衰傾向について比較が可能となった。

施設からの漏洩放射線は、高エネルギー範囲での誤差が大きく、また線量分布についても、線源に近いところで数 10% の誤差があり、今後の計算においてこれらの点を改善する必要がある。

今後は、施設近傍における詳細な解析を行い、また東方向と北方向の測定からこれらの方向の計算との比較を行い、また計算により土がある場合とない場合の違いを調べ、線源からの距離によって地面が散乱体または吸収体としてのはたらきが線量にどの程度の影響を与えるかを解析する予定である。

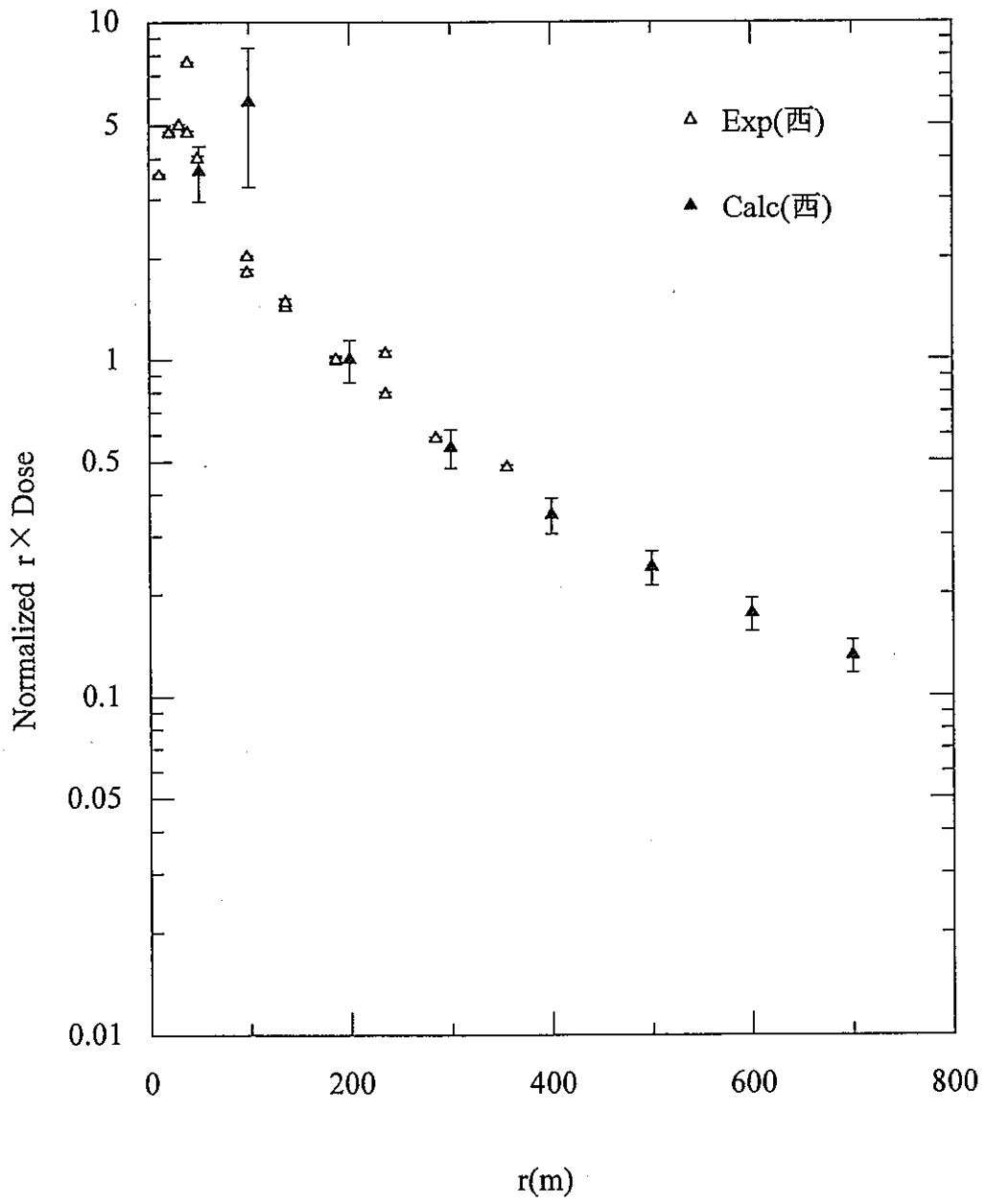


図4.16 測定値と計算値との比較(西方向)

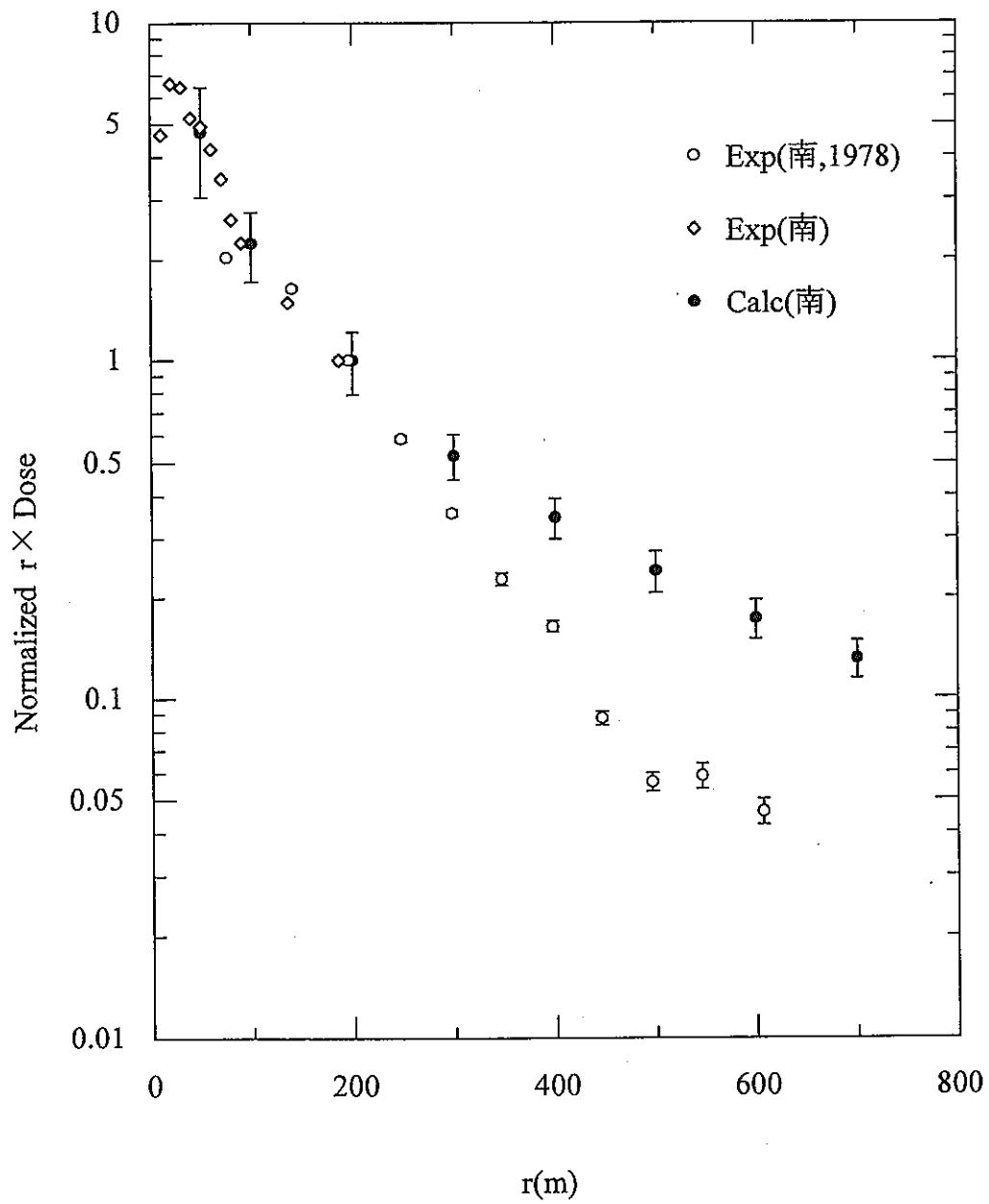


図4.17 測定値と計算値との比較(南方向)

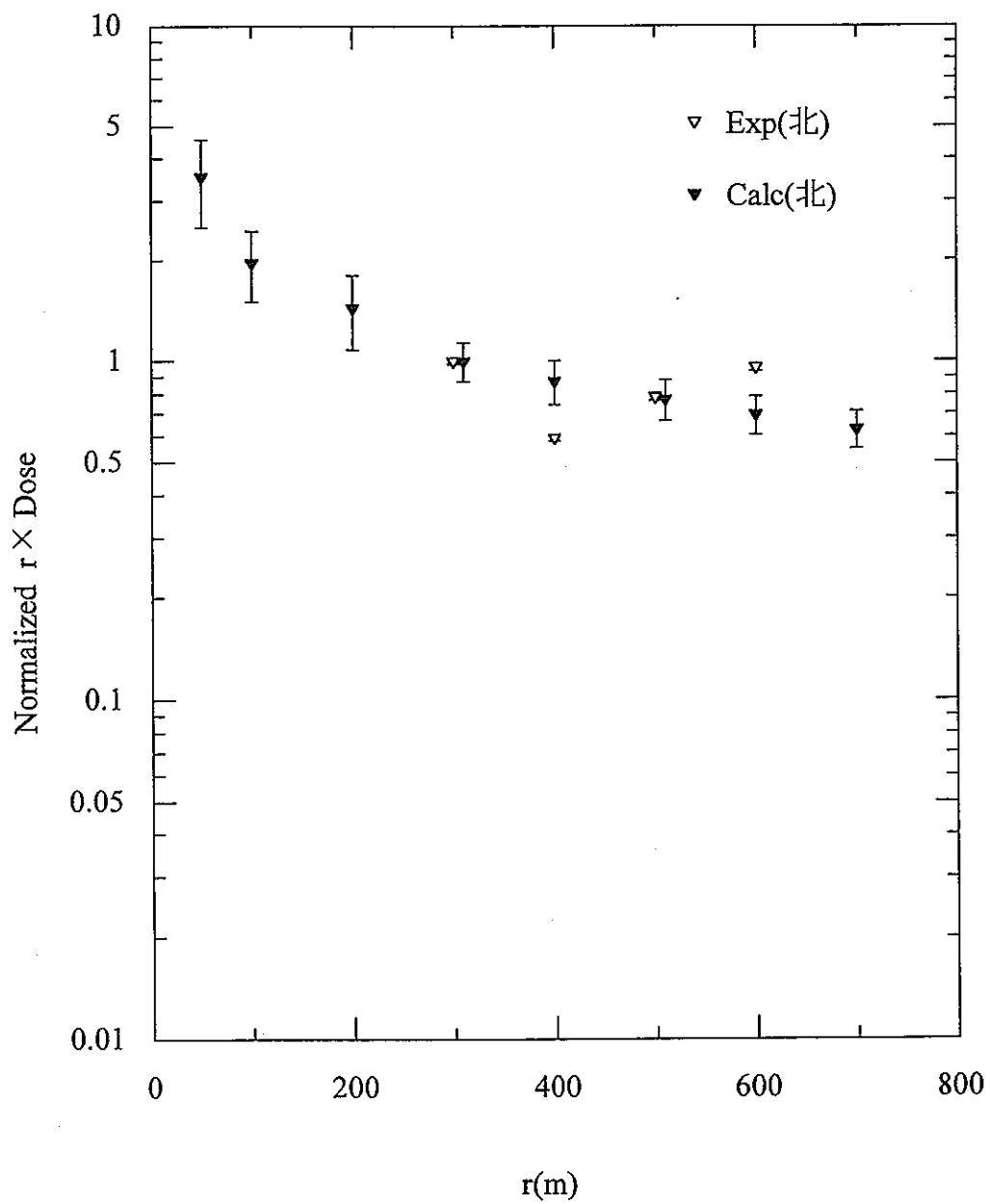


図4.18 測定値と計算値との比較(北方向)

(計算値は距離をずらしてプロットされているが、本来同一距離の値である)

参考文献

- (1) W. R. Nelson, H. Hirayama and D. O. Rogers
"The EGS4 Code System", SLAC-Report-265(1985)
- (2) 成田脩、野尻一郎、百瀬琢磨
「汎用電子- γ 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
- (3) I. NOJIRI, Y. FUKASAKU, O. NARITA
"APPLICATION OF A GENERAL PURPOSE USER'S VERSION
OF THE EGS4 CODE SYSTEM TO A PHOTON SKYSHINE BEN
-CHMARKING CALCULATION", Proceeding of the Fourth EGS4
User's Meeting in Japan, July 25-27, 1994
- (4) 「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
- (5) E. T. Clarke, "Gamma-Ray Scattering Near an Air-Ground
Interface," *Nucl. Sci. Eng.*, 27, 394(1967)
- (6) C. E. CLIFFORD, J. A. CARRUTHERS, and J. R. CUNNINGHAM,
"Scattered Gamma Radiation from a Simulated Fallout Field
Using Cesium-137," Report-296, Canadian Defense Research Che
-m Labs.(1959)
- (7) Z. G. BURSON and R. L. SUMMERS, "Barrier Attenuation of Air
-Scattered Gamma Radiation," CEX-63.3, USAGE, Div. Biol. Med.
(1965)
- (8) ALBERT W. STARBIRD and JOHN F. BATTER, "Angular Distri
bution of Skyshine Radiation at the Surface of a Plane of Fal
-lout Contamination," TO-B 63-40, Technical Operations, Inc. (196
4)

- (9) L. V. SPENCER, "Structure Shielding Against Fallout Radiation from Nuclear Weapons," NBS Monograph 42, US Dept. of Commerce (1962)
- (10) 松山邦夫 「同期法による施設漏洩 γ 線の測定」
北海道大学工学部原子工学科昭和 53 年度卒業論文

付録

EGS4 汎用ユーザズ版を用いた研究業績

国際会議
ワークショップ
研究会
学会口頭発表

EGS4 研究会

1. 澤村貞史、藤原朋春、北市雅敏、藤田文行、野尻一郎：ライナック電子線による水溶液中のエネルギー付与分布、Proceedings of the 3rd EGS4 User's Meeting in Japan、(1993年12月)
2. 彦次基偉、片桐実穂、高橋 仁、北市雅敏、澤村貞史、野尻一郎：MONTE CARLO CALCULATIONS OF EFFECTIVE DOSES IN NON-UNIFORM BEAM EXPOSURE FOR HIGH ENERGY ELECTRONS、Proceedings of the 5th EGS4 User's Meeting in Japan、(1995年7月)
3. 新川伸之、藤田文行、北市雅敏、澤村貞史、野尻一郎：CALCULATION OF ENERGETIC POSITRON BEAM PRODUCED FROM A 45 MeV LINAC、Proceedings of the 5th EGS4 User's Meeting in Japan、(1995年7月)
4. 堀 雅則、新川伸之、北市雅敏、澤村貞史、野尻一郎：CALCULATION OF ABSORBED DOSE FOR SKYSHINE RADIATION FROM A 45MeV ELECTRON LINAC、Proceedings of the 5th EGS4 User's Meeting in Japan、(1995年7月)

最近の外部被ばく線量評価法に関するワークショップ

5. 澤村貞史：電子線に対する実効線量計算、JAERI-Conf 95-007、(1995年3月)

LINACに関する国際会議

6. 澤村貞史、藤原朋春、片桐実穂、北市雅敏、野尻一郎、成田 脩：MONTE CARLO CALCULATIONS OF DOSE EQUIVALENTS FOR HIGH ENERGY ELECTRONS USING THE MIRD-5 HUMAN PHANTOM、Proceedings of the 1994 International Linac Conference、(1994年8月)

LINAC 研究会

7. 澤村貞史、北市雅敏、藤原朋春、藤田文行、佐藤孝一、谷田弘明：電子線照射された水溶液中における吸収線量分布のモンテカルロ計算、Proceedings of the 18th Linear Accelerator Meeting in Japan、(1993年7月)
8. 彦次基偉、片桐実穂、北市雅敏、谷田弘明、佐藤孝一、澤村貞史：電子線による不均等被曝に対する実効線量計算、Proceedings of the 20th Linear Accelerator Meeting in Japan、(1995年9月)

日本原子力学会

9. 藤原朋春、片桐実穂、北市雅敏、澤村貞史、野尻一郎、成田 脩：人体形状ファントムを用いた電子線による臓器線量当量の計算、日本原子力学会 1994年春の年会(1994年4月)
10. 藤原朋春、北市雅敏、三宅俊介、澤村貞史、野尻一郎、成田 脩：パルスラジオリシス法による水溶液中の吸収線量深度分布測定 -EGS4を用いたシミュレーション-、日本原子力学会 1994年春の年会(1994年4月)
11. 片桐実穂、新川伸之、北市雅敏、澤村貞史、野尻一郎、成田 脩：高エネルギー電子線に照射された人体の臓器線量当量計算、日本原子力学会 1994年秋の大会(1994年9月)
12. 片桐実穂、高橋 仁、北市雅敏、澤村貞史、野尻一郎、成田 脩：高エネルギー電子線による実効線量当量及び実効線量の計算 -EGS4によるシミュレーション-、日本原子力学会 1995年春の年会(1995年4月)
13. 新川伸之、堀 雅則、北市雅敏、澤村貞史、野尻一郎：北大 45MeVライナック施設のスキャイン線評価、日本原子力学会 1995年秋の大会(1995年10月)
14. 彦次基偉、片桐実穂、高橋 仁、北市雅敏、澤村貞史、野尻一郎：高エネルギー電子線の部分照射に基づく実効線量、日本原子力学会 1995

年秋の大会(1995年10月)

日本原子力学会北海道支部研究発表会

15. 藤原朋春、北市雅敏、片桐実穂、谷田弘明、澤村貞史：EGS4を用いた電子線による人体形状ファントムへのエネルギー付与計算、日本原子力学会北海道支部第11回研究発表会(1993年12月)
16. 藤原朋春、北市雅敏、片桐実穂、谷田弘明、澤村貞史：高エネルギー電子線による水溶液へのエネルギー付与 - EGS4を用いたシミュレーション -、日本原子力学会北海道支部第11回研究発表会(1993年12月)
17. 高橋 仁、片桐実穂、北市雅敏、澤村貞史：ICRU球における高エネルギー電子の線量当量計算、日本原子力学会北海道支部第12回研究発表会(1994年12月)
18. 片桐実穂、高橋 仁、北市雅敏、澤村貞史：高エネルギー電子線による実効線量当量計算 - EGS4を用いたシミュレーション -、日本原子力学会北海道支部第12回研究発表会(1994年12月)
19. 新川伸之、藤田文行、北市雅敏、澤村貞史：高速陽電子線による消滅ガンマ線の発生、- EGS4によるモンテカルロシミュレーション -、日本原子力学会北海道支部第12回研究発表会(1994年12月)