

JNC TJ4400 2002-001

緊急時における野外モニタリング手法に関する研究

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2002年3月

(財) 若狭湾エネルギー研究センター

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 茨木県那珂郡東海村村松4番49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquires 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)

2001

目 次

1. はじめに	1
2. バースト放射線に対する線量評価手法に関する調査・研究	2
2-1 タンデム加速器ビームを用いたガンマ線線量評価	3
2-2 シンクロトロン加速器ビームを用いたガンマ線線量評価	38
2-3 まとめ	91
3. 遠隔空中モニタリング手法に関する調査・研究	92
3-1 国外調査	92
3-2 ヘリコプター掲載用ガンマ線検出器の予備試験	104
3-3 小型ヘリコプターによる模擬試験	115
3-4 まとめ	141

2002年3月

緊急時における野外モニタリング手法に関する研究

伊藤慶文*,大谷暢夫*

要旨

原子力施設に於ける臨界事故時等に発生するバースト状の放射線に対する放射線用計測器の応答特性を調査し、緊急時における線量評価手法の確立に資することを目的として、タンデム／シンクロトロン加速器より放射されるバースト状のガンマ線をNaI検出器及びTLD積分線量計を用いて計測し、以下のことが明らかにされた。

(1) pile up rejection を併用したガンマ線計測を行った結果、count rate が 7kc/s 以下であれば pile up が問題とならないスペクトラムが得られることが分かった。100MeV プロトンビームが鉄ブロックを衝撃する際に放出されるガンマ線エネルギースペクトルを $E \exp(-E/T_{\text{eff}})$ と仮定し、非線形最小2乗法を用いたデータ解析により、実効的な温度 T_{eff} を見積もった。その結果、 $T_{\text{eff}} = 0.8 \sim 0.9 \text{ MeV}$ と推定された。本実験においては、電気ノイズの混入は観測されなかった。

(2) 種々の厚みの鉛で TLD を覆い、厚さの関数としての積分線量値を測定した。同様にガンマ線エネルギースペクトルを $E \exp(-E/T_{\text{eff}})$ と仮定して、実効的な温度 T_{eff} を見積もった。上記と同じ条件下で $T_{\text{eff}} = 0.6 \sim 3 \text{ MeV}$ と推定された。

原子力災害発生時の放射線状況を把握するための遠隔操作による野外モニタリング手法の確立のために、自律型無人ヘリコプターを利用した遠隔モニタリングシステムの生成性を調査・検討すると共に、小型ヘリコプター掲載用高感度ガンマ線量測定器の製作し、自律航行型無人ヘリコプターによるガンマ線計測を行い、以下の事が明らかにされた。

(1) 緊急時支援組織のグループ・アントラ(GROUPE INTRA)、及び CAC SYSTEMS 社への海外調査を行い、遠隔操作式ヘリコプターを用いた手法により緊急時の放射線モニタリング機能が強化されることが確認された。

(2) 塩化カリ肥料を試験用放射線源とした無人ヘリコプターのパターンフライトによって、明確に塩化カリ肥料位置が特定された。又、海岸線での自然界の微量な放射線量の変化が計測された。これらの計測試験により、放射線測定器を掲載した自律航行型無人ヘリコプターシステムは遠隔モニタリングシステムとして十分な機能を發揮することが分かった。

本報告書は(財)若狭湾エネルギー研究センターが核燃料サイクル機構との契約により実施した業務の成果である。

サイクル機構担当課及び者担当者：敦賀本部 技術企画部 環境監視課 野崎達夫

* (財)若狭湾エネルギー研究センター 研究部

Research on Environment Monitoring of Radiation Emergency

Yoshifumi ITO*, Nobuo OTANI*

Abstract

In a case of a nuclear accident at nuclear facilities, radiation such as γ -rays and neutrons might radiate at a burst in the initial stage. For the establishment of dose estimation system for such accidents, the experiments were carried out using the Tandem/Synchrotron accelerator. The following results were obtained:

- (1) Measurements of the γ -ray emission using the NaI detector together with pile up rejection system revealed that the good signals without the pile up phenomena could be obtained in case of count rate less than 7kc/s. On assumption that energy distribution function of the γ -rays was proportional to be $E \exp(-E/T_{\text{eff}})$, the effective temperature T_{eff} was estimated to be 0.8~0.9 MeV by use of non-linear least squares.
- (2) Doses of γ -rays were measured using the TLD elements shielded by Pb sheets with various widths. The effective temperature T_{eff} estimated under the same experimental conditions described in (1) was 0.6~3 MeV.

In an accident occurring in nuclear facility, radiation monitoring will be required with high degree of accuracy such as radiological mapping around the facility. Use of the unmanned helicopter is thought to be one of most possible way to get the mapping. The compact system of γ -ray measurements with high sensitivity was developed for addition to the helicopter. The measurements of the γ -ray radiation with low level emitted from KCl manure were demonstrated by use of the unmanned helicopter with the γ -ray system constructed. The quiet small variation of radiation occurring near sea side could also be detected. From above results, availability of the remote controlled helicopter was confirmed for radiation monitoring.

This work was performed by The Wakasa-wan Energy Research Center under contact with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

* The Wakasa-wan Energy Research Center

表と図の説明

2.1 節

表 2.1.1 タンデム加速器を用いた TLD による放射線検出時の実験条件。ターゲットと検出器に距離は約 3.6m。

表 2.1.2 厚みの異なる鉛板でシールドした TLD を用いて測定した放射線線量値。
12.6 μ A, 15MeV ヘリウムビームを 0.6 時間無酸化銅に照射。

表 2.1.3 同一の場所での他の積分放射線線量素子 (TLD 及びガラス) を用いた計測結果。

表 2.1.4 厚みの異なる鉛板でシールドした TLD を用いて測定した放射線線量値。
10 μ A, 10MeV プロトンビームを 0.62 時間無酸化銅に照射。

図 2.1.1 加速器装置の全体図

図 2.1.2 照射室 2

図 2.1.3-11 NaI 検出器で測定したガンマ線のスペクトル (タンデムビーム ; He²⁺)

図 2.1.12-18 NaI 検出器で測定したガンマ線のスペクトル (タンデムビーム ; H⁺)

図 2.1.19 カバーした鉛厚に対するガンマ線放射線量(15MeV,He²⁺)

図 2.1.20 カバーした鉛厚に対する推定熱中性子放射線量(15MeV,He²⁺)

図 2.1.21 カバーした鉛厚に対するガンマ線放射線量(10MeV,H⁺)

図 2.1.22 カバーした鉛厚に対する推定熱中性子放射線量(10MeV,H⁺)

図 2.1.23 種々の材料の全線減弱係数

図 2.1.24 厚さの異なる鉛を通過後のガンマ線強度のエネルギー依存性。(鉛の厚さは [W + 0.7]mm, W = 0~12mm)

図 2.1.25 T=0.1~1 MeV とした場合の測定線量の鉛厚依存性

図 2.1.26 T=1,2,4,8,26,32,64,128,256,512 MeV とした場合の測定線量の鉛厚依存性

2.2 節

表 2.2.1 pile up rejection (PUR)を行った場合と行わなかった場合の、放射ガンマ線放射体の実効温度 T_{eff} 。ここで、 T_{eff} は 1 成分温度を仮定。

表 2.2.2 厚みの異なる鉛板でシールドした TLD を用いて測定した放射線線量値。
(シンクロトロンビーム)

図 2.2.1 照射室 3, 4

図 2.2.2(a)-11(a) NaI で測定したビームのパルス波形(one spill)

図 2.2.2(b)-11(b) NaI で測定したパルス波形 (total spill)

図 2.2.2(c)-11(c) NaI で計測したガンマ線のエネルギースペクトル

図 2.2.3, 6, 8, 10 NaI で計測したバックグラウンドのエネルギースペクトル

図 2.2.12 パイロアップ影響

図 2.2.13-22 EGS4 を用いて計算された応答関数（入射ガンマ線エネルギー；0.1～10.0 MeV）

図 2.2.23(a)-27(a) 最小 2 乗法を用いて求められたフィーティング曲線（データ：pile up rejection 有り）。

図 2.2.23(b)-27(b) 最小 2 乗法を用いて求められたフィーティング曲線（データ：pile up rejection 無し）。

図 2.2.28 カバーした鉛厚に対するガンマ線放射線量(100MeV,H⁺)

図 2.2.29 カバーした鉛厚に対する推定熱中性子放射線量(100MeV,H⁺)

図 2.2.30 T=0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0,2.0,3.0 MeV とした場合の測定線量の鉛厚依存性

3.1 節

表 3.1 SYSDRON Program (Nuclear & Environment Monitoring by Remotely Piloted Helicopter) からの抜粋

3.2 節

表 3.2.1 温度特性試験結果

表 3.2.2 ドリフト試験の結果

表 3.2.3 エンジン始動時ノイズ試験結果

表 3.2.4 エンジン回転数ごとのノイズ調査の結果

表 3.2.5 電磁気的誘導試験の結果

表 3.2.6 電気的ノイズ試験の結果

図 3.2.1 ガンマ線検出器の回路構成図

図 3.2.2 小型ヘリコプター掲載用ガンマ線検出器の外観

図 3.2.3 ⁶⁰Co 線源に対する検出出力の時間的安定性

図 3.2.4 振動等の検出器のノイズ試験配置図

図 3.2.5 電磁気的誘導試験概略図

3.3 節

表 3.3.1 使用したヘリコプターの主要な緒言

表 3.3.2 昨年度のヘリを用いた試験結果のまとめ

表 3.3.3 種々の状況でのガンマ線検出系の出力カウント数

図 3.3.1 ヘリコプターからの放射線計測器へのノイズ混入試験

図 3.3.2 放射線計測用へ改良されたモニター画像

図 3.3.3 放射線計測用へ改良されたテキストデータ例

写真 3.3.1 別電源 (9.6V バッテリ) より

写真 3.3.2 5V に変換し供給

写真 3.3.3 ○端子追加

写真 3.3.4 スポンジ追加

写真 3.3.5 ホットメルトにて固定

図 3.3.4(a) ヘリコプターへ積載スペース

図 3.3.4(b) ヘリコプターへ組付方法

図 3.3.5 自律航行確認試験の飛行パターン

図 3.3.6 放射線源捜索試験のフライトに軌跡

図 3.3.7 放射線源捜索試験結果のモニター画面

図 3.3.8 図 3.3.7 の水色、緑色、黄色の表示をマスクしたモニター画面

図 3.3.9 遠州灘福田の海岸における自然界放射線量測定

1. はじめに

原子力施設に於ける臨界事故時等に対し、発生する急激な上昇下降を繰り返す放射線（以下、「バースト放射線」という）に対する環境放射線用計測器（モニタリングポスト等）を整備する必要がある。従来の環境放射線用計測器は、ノイズレベルを基準とした微量放射能を対象としており、そのような放射線に対する放射線計測機器が開発されてきた。臨界事故時に対応するには、発生するバースト放射線を精度良く測定できる測定機器の開発が必要とされる。本研究はガンマ線を対象とした環境放射線用計測器の応答特性を調査し、緊急時における線量評価手法を確立することを目的とする。

また、原子力災害発生時には、放射線放出源である事故発生施設に接近し放射線状況を把握することが重要となるが、事故によっては高線量のため当該施設に接近することが不可能となる事態が予想される。このような状況下においても環境放射線が測定可能となるような遠隔操作による野外モニタリング手法開発の研究を実施する。

ガンマ線バーストに対する野外モニタに対する応答特性に関する研究では、臨界事故等で発生する急速なガンマ線バーストに対する NaI 検出器の応答特性を調査する。又、TLD 等の積分型線量計を用いて放射線場の測定を行うと共に、積分型線量計のスペクトルメータを試作し、ガンマ線バーストのエネルギースペクトルを推定し、NaI 検出器で得られた波高分布及び推定されるエネルギーを比較・検討する。遠隔空中モニタリング手法に関する研究では、原子力災害発生時に放射線モニタリング機能を強化するため、懸隔による野外モニタリングに関する研究を実施する。具体的には、自律型無人ヘリコプターを利用した遠隔モニタリングシステムの生成性を検討し、無人ヘリ等の掲載を目的とした小型軽量のガンマ線測定装置を試作し、試験測定を行う。

2. バースト放射線に対する線量評価手法に関する調査・研究

イオンを生成し加速する加速器装置では、加速イオンビームは物質との相互作用により減速の後必ずどこかで静止する。静止する場所は、ビームライン上の測定素子、ビームシャッター、ビーム照射用ターゲット、真空壁、ビームラインの末端のビームダンプ等を様々である。核反応が起こる程度の高エネルギーイオンの場合、イオンビームが固体を衝撃する際核反応により生成される放射線が放出される。福井県若狭湾エネルギー研究センターに設置されている、タンデム/シンクロトロン装置、W-MAST (Wakasa-wan Multi-purpose Accelerator with Synchrotron and Tandem) 装置では、タンデム加速器より最大エネルギー10MeV、最大電流 $100\mu\text{A}(\text{DC})$ のプロトンビームが、シンクロトロン加速器より最大エネルギー200MeV、最大電流 $10\text{nA}(\text{DC 换算})$ のプロトンビームが生成される。加速器イオンビームが固体を衝撃する場所から、強力な放射線が生成されるため、本装置の加速器イオンビーム用いた放射線検出器の開発研究が可能となる。加速器応用の観点からは、本研究は、加速器イオンビームの利用の1つとして位置付けられる。

バースト放射線に対する研究が主目的の1つである本研究では、パルス的に生成されるシンクロトロン加速器ビームが用いられる。計測系の検討及び予備的な実験・調査には、タンデム加速器ビームも利用可能である。タンデム加速器を用いた放射線計測実験を先行して行い、ガンマ線検出系の整備を行った。この知見に基づきシンクロトロン加速器ビームを用いた放射線計測実験を実施した。

2.1 タンデム加速器ビームを用いたガンマ線線量評価

図 2.1.1 にタンデム/シンクロトロン装置 (W-MAST) の全体図を示す。本装置は、負イオン源、タンデム加速器、シンクロトロンの加速器からなる加速器本体及び、タンデム加速器ビームを用いる照射室 1、照射室 2、シンクロトロン加速器ビームを用いる照射室 3 (がん治療専用コース)、照射室 4 から成っている。負イオン源には、プラズマスパッタ型負イオン源及び荷電交換型負イオン源の 2 台が設置されており、前者からは水素又は炭素の負イオンが、後者からは水素又はヘリウムの負イオンが生成・加速され、タンデム加速器に入射される。タンデム加速器のターミナル部にはアルゴンガスセルが設置されており、ターミナルの電圧は最大 +5MV まで印加可能である。タンデム加速器に入射された負イオンは、ターミナル部まで加速された後ガスセル中でアルゴンとの衝突電離により正イオンに変換され、再びタンデム加速器の出射部に向けて加速される。ターミナル電圧が +5MV の場合、H, He, C はアルゴンガス中で H⁺, H²⁺, C⁴⁺ に変換され、タンデム加速器で得られるイオンビームエネルギーは H⁺, H²⁺, C⁴⁺ に対して、10MeV, 15MeV, 25MeV となる。タンデム加速器から出射したイオンビームは照射室 1 又は照射室 2 に入射され実験に使用されるか、シンクロトロン加速器に入射される。シンクロトロン加速器の運転パターンは、ビームの捕獲・加速・放出の一連の作動を 2 秒間隔で繰り返すように設計されている。得られるシンクロトロンビームのパルス巾は 200-400 msec、繰り返し周期は 2 秒である。

図 2.1.2 に照射室 2 辺りを拡大したビームラインを示す。照射室 2 には、高温・低温照射台でのイオン照射及びイオンビーム分析が可能なイオン注入コース及び大気中での微小部分細胞照射及び大気中 PIXE 分析の可能な生物コース (中エネルギー) が設置されている。本研究のガンマ線線量評価はイオン注入コースを用いて行われた。

図 2.1.2 に示すように、ガンマ線検出器をイオン注入コースのビームライン上のファラディーカップ (無酸化銅製) 挿入位置から約 3.6m 離れた位置に設置した。ビームライン上にファラディーカップを挿入し、ビーム電流を計測すると共に放射線線源として用いた。ガンマ線検出には、NaI シンチレータ (BICRON 製、直径 2 インチ) 及び積分型線量計測器 TLD(松下電器産後製、UD-801PQ) を用いた。又、同様の場所でのガラス線量計を用いた計測も行った。

ポリビニールパイプを厚さ 2mm のカドニウムで覆い厚さ 5cm の鉛で覆い、その外部を 5~10cm のボロン入りポリエチレンブロックで囲み、NaI シンチレータ部をその中に挿入した。検出部の前面には、直径 5mm ϕ の穴を開けた厚さ 5cm の鉛ブロックを設置し、NaI シンチレータ部がファラディーカップを見込むように設置した。又、シンチレータ部の前面にも、検出器の視野を遮らず且つ出来るだけ覆うように、厚さ 5cm ボロン入りポリエチレンブロックを設置した。タンデム加速器を用いた実験では、

最初、検出部の前面を直径 10・15mm ϕ 程度としていたが、イオン電流を下げるだけでは、測定回路のパイロアップが起こる可能性があったため、最終的に穴径を 5mm ϕ とした。又、検出器設置位置も当初はファラディーカップの位置より 2m と程度としたが、同様の理由により最終的に約 3.6m とした。放射線源が検出部を見込む立体角は非常に小さく～ 1.2×10^{-7} 程度である。

厚さの異なる鉛板で TLD 素子を覆い、複数の素子を NaI シンチレータ部とほぼ同位置に設置し、時間積分された放射線線量を測定した。

本実験に使用したイオン種はヘリウム及びプロトンの 2 種であり、各々のビームエネルギーは 15MeV 及び 10MeV である。

15MeV He²⁺が無酸化銅ターゲット（ファラディーカップ）を衝撃した際に測定された NaI 検出器出力のエネルギースペクトルを図 2.1.3～図 2.1.11 に示す。実験はイオンビームを加速器室内で止め、照射室 2 にビームを導かない無い場合のバックグラウンドレベル信号、及び適当なビーム電流での信号よりエネルギースペクトルを得た。測定エネルギー範囲は、最初にエネルギーのより広い領域 (>7MeV) で行った（図 2.1.3～図 2.1.8）。実験開始より徐々にバックグラウンドの count rate は上昇するが、殆どの場合ターゲットにビームを照射した時の 1/10 程度又はそれ以下である。又、バックグラウンドのスペクトルは 1.5MeV より急速に減少し、2.5MeV 以上で極めて小さくなる。ヘリウムビームがターゲットを照射している時のスペクトルは、高エネルギーまでテールを引く、ガウス分布に類似したスペクトルとなる。低エネルギー部分のカウント数による回路系のパイロアップを避けるために、メインアンプの低電圧部をカットして測定をした。観測されるガンマ線の低エネルギー部を計測するために、メインアンプのゲインを変え測定を行った結果が図 2.1.9～図 2.1.11 である。

10MeV H⁺が無酸化銅ターゲット（ファラディーカップ）を衝撃した際の同様のエネルギースペクトルを図 2.1.12～図 2.1.18 に示す。ここでは、メインアンプのゲインを調整し $E < 3\text{MeV}$ を測定対象とする条件で実験した。電流値をヘリウムのそれより 1 衍下げたにもかかわらず同じ程度の count rate であった以外は、細かいスペクトルの差異を除けば、定性的にはヘリウムビームの場合と同様である。パイロアップによるデータ取得の誤差を出来るだけ小さくするために、図 2.1.17 は図 2.1.14～図 2.1.16 より電流値を半分に抑え、count rate を小さくして測定した結果である。図 2.1.14 では 4.6 kc/s、図 2.1.17 では 2.3 kc/s であった。両者のエネルギースペクトルを比較する限り、パイロアップは問題にならないように思われるが、直接的な根拠にはならない。

放射線積分線量測定用に使用した TLD バッチ (UD-801PQ) は、4つのエレメント (E1~E4) からなり、以下の蛍光体材料が使われている。

エレメント番号	蛍光体材料	シールド
E1・E2	$^{10}\text{Li}_{2}^{11}\text{B}_4\text{O}_7(\text{Cu})$	樹脂 $14\text{mg}/\text{cm}^3$
E3・E4	$\text{CaSO}_4(\text{Tm})$	鉛 厚さ 0.7mm

放射積分線量測定時の実験条件を表 2.1.1 に示す。15MeV ヘリウムビーム照射 (ビーム電流 : 13.6mA、照射時間 : 0.6 時間、ターゲット : 無酸化銅) では、8種の厚さの異なる鉛で TLD バッチ前面を覆い、測定を行った。その結果を表 2.1.2 に示す。エレメント E1・E2 から読みとられた値は、エレメント E3-E4 に比べて一桁高い値を示している。ここで使用したエレメント E1・E2 (ホウ酸リチウム) は、X線、 γ 線、 β 線、及び熱中性子に感度を持ち、特に熱中性子に対しては γ 換算で約 46 倍の感度を持つ。但し、高速中性子に対しては、ほとんど感度が無い。一方、エレメント E3-E4 (硫酸カルシウム) は中性子に対してまったく感度が無く、またシールドが厚い (鉛 0.7mm) ため β 線にも感じない。これらを考慮して、E3-E4 の平均値を γ 線による積分線量とした。E1-E2 は熱中性子に対しても感度を持つ。ここでは E1-E2 が熱中性子のみによると仮定し、以下の式を用いて、熱中性子による積分放射線量 I_n を推定した。

$$I_n = \left(\frac{E1+E2}{2} - \frac{E3+E4}{2} \right) / 46 \quad (1)$$

上式では、記号 E1~E4 を各々のエレメントでのドーズ量を表す記号として用いた。このようにして求めた、 γ 線積分線量及び推定熱中性子積分放射線量の鉛厚依存性をそれぞれ図 2.1.19、図 2.1.20 に示す。 γ 線線量は ~0.38mSv, (線量率 : ~0.63 mSv/h)、熱中性子放射線量は ~0.07 mSv, (線量率 : ~0.12 mSv/h) であった。

ほぼ同一の場所で、他の積分型放射線線量素子 (TLD 及びガラス) を用いて同時に計測した放射線線量の結果を表 2.1.3 に示す。TLD による γ 線線量値は 0.28~0.32 mSv、熱中性子線量値は 0.032~0.036 mSv、ガラスによる γ 線線量値は 0.3~0.4 mSv、中性子線量値は 6.2~7.2 mSv であった。これらの値を比較すると、 γ 線積分線量はほぼ正しく計られていると考えられる。推定熱中性子積分放射線量は約 2 倍大きな値となっており、X線等の影響がによるものと考えられる。

10MeV H^+ を用いた積分放射線線量計測では、鉛厚を 13 種選び同様な実験及びデータ整理を行った。表 2.1.4 に各エレメントから得られた値、E3-E4 の平均値 (γ 線積分線量)、推定熱中性子放射線量を示す。図 2.1.21、図 2.1.22 にそれぞれ γ 線積分線量及び推定熱中性子積分放射線量の鉛厚依存性を示す。 γ 線線量は ~2.5mSv, (線量率 : ~4.03mSv/h)、推定熱中性子放射線量は ~0.4mSv, (線量率 : ~0.7mSv/h) であつ

た。

鉛厚の異なった積分線量より、放出されるガンマ線のエネルギースペクトルの推定を行った。ガンマ線のエネルギースペクトルを $f(E)$ とすると、厚さ d の鉛を通過して観測される積分線量 $F(d)$ は、

$$F(d) = \int_0^{\infty} f(E) \exp(-\mu(E) \cdot d) dE \quad (2)$$

で与えられる。ここで $\mu(E)$ は光子の全線減弱係数である。図 2.1.23 に C, Al, Fe, Cu, W, Pb 材料の全線減弱係数のエネルギー依存性を示す。Al, Cu では比較的広い範囲にエネルギー依存性を持つがその値は小さい。W, Pb は $0.1\text{MeV} < E < 1\text{MeV}$ 範囲で顕著な依存性を持つが、 $1\text{MeV} < E < 10\text{MeV}$ の範囲ではその依存性は少なく、且つ値も小さい。図 2.1.24 に強度 1 の光子が厚さ $d = 0.7 \sim 12.7\text{mm}$ の鉛を通過後の強度をエネルギーの関数としてプロットする。本実験で使用した TLD には厚さ 0.7mm の鉛板で覆われていることを考慮し、図 2.1.24 の計算では、最小厚を 0.7mm としている。

幾つかの厚み($d_1, d_2, \dots, d_n, \dots$)に対し得られたデータ($F_1, F_2, \dots, F_n, \dots$)の組より、原理的にはガンマ線のエネルギースペクトル $f(E)$ が推定可能と考えられる。 $f(E)$ を幾つかのパラメータ a, b, c, \dots を持つ関数と仮定し、最小二乗法を用いたパラメータ推定によりスペクトル $f(E)$ を決める事を検討した。仮定した関数型は、

$$f(E; a, b) = aE \exp(-bE) \quad (3)$$

である。 $T_{\text{eff}} = 1/b$ がガンマ線放射体の実効的な温度 T_{eff} を与える。エネルギーを適当な区間にわけ、積分を和で表現すれば、(2)式は以下の様に表せる。

$$F(d_k; a, b) = a \sum_n E_n \exp(-bE_n) \cdot \exp(-\mu(E_n) \cdot d_k) \Delta E \quad (4)$$

式(4) は非線形形式であるので、直接通常の最小二乗法を適用する事は出来ない。パラメータ a, b を $a = a_0 + \Delta a, b = b_0 + \Delta b$ とし、式(4) を a_0, b_0 の周りでテーラー展開し 1 次の項までを採用すれば、

$$F(d_k; a, b) = F(d_k; a_0, b_0) + \frac{\partial F}{\partial a} \Big|_{\substack{a=a_0 \\ b=b_0}} \Delta a + \frac{\partial F}{\partial b} \Big|_{\substack{a=a_0 \\ b=b_0}} \Delta b \quad (5)$$

と線形化される。適当に決めた値 (a_0, b_0) より、 $\Delta a, \Delta b$ の最適値を最小二乗法を適用して求め、 $a_0 = a_0 + \Delta a, b_0 = b_0 + \Delta b$ により、 (a_0, b_0) を補正し再び $\Delta a, \Delta b$ を求める操作を繰り返す、繰り返し計算により十分小さい値 $\Delta a / a_0, b / b_0$ が求まれば、テ

ーラー展開で高次の項を無視した事が正当化され、パラメータ a, b が決定される。

上記の非線形最小二乗法を図 2.1.21 のデータに適用したが、広範囲の初期値 (a_0, b_0) に対し、繰り返し計算が収束しなかった。仮定した関数型の妥当性、取得したデータは 1 つの鉛厚につき 2 つのデータのみであることによる正確さの欠如等の原因が考えられる。 $E > 1\text{MeV}$ では、全線減弱係数のエネルギー依存性が顕著でなく、 $E > 2\text{MeV}$ では鉛の厚さのみで減衰が決まる事も、繰り返し計算が収束しなかった主要な理由の 1 つと考えられる。

ガンマ線のエネルギースペクトルが式(3)で表されると仮定して、種々の実効温度 $T_{\text{eff}} (= 1/b)$ に対して、厚さの異なる鉛を通過後の積分線量を計算した。図 2.1.25 に、 $T_{\text{eff}} = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1 \text{ MeV}$ とした場合の積分線量の鉛厚依存性を示す。ここで、積分線量は、付加する鉛厚 d が zero (但し、0.7mm の鉛板付き) の積分線量値で規格してある。図 2.1.25 によれば、式(3)で定義される実効温度 T_{eff} は 1 MeV より大きいことが分かる。同様に、 $T_{\text{eff}} = 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512 \text{ MeV}$ とした場合の積分線量の鉛厚依存性を図 2.1.26 に示す。得られたデータ点の殆どは $1\text{MeV} < T_{\text{eff}} < 4 \text{ MeV}$ 内である。但し、ある決まった T_{eff} では表せない。これはガンマ線のスペクトルが単純に式(3)では表せず、複数の実効温度 T_1, T_2, \dots を持つ関数型

$$f(E) = A_1 E \exp\left(-\frac{E}{T_1}\right) + A_2 E \exp\left(-\frac{E}{T_2}\right) + \dots \quad (6)$$

が適している事を示唆している。

表 2.1.1 タンデム加速器を用いた TLD による放射線検出時の実験条件。
 ターゲットと検出器に距離は約 3.6m。

	Tandem (H131024)	Tandem (H131025)
ビーム種	He^{2+}	H^+
ビームエネルギー	15 MeV	10 MeV
ビーム電流	12.6 μA (DC)	10 μA (DC)
ターゲット	無酸化銅 (Faraday Cup)	無酸化銅 (Faraday Cup)
照射時間	0.6 時間	0.62 時間

表 2.1.2 厚みの異なる鉛板でシールドした TLD を用いて測定した放射線線量値。

12.6 μ A, 15MeV ヘリウムビームを 0.6 時間無酸化銅に照射。

鉛厚 (mm)	E1 (mSv)	E2 (mSv)	(E1+E2)/2 (mSv)	E3 (mSv)	E4 (mSv)	(E3+E4)/2 (mSv)	Neutron (mSv)	ID番号
0.0	3.580	3.840	3.710	0.409	0.350	0.380	0.072	1000001
0.5	3.290	3.860	3.575	0.370	0.320	0.345	0.070	1000002
1.0	3.520	3.270	3.395	0.347	0.370	0.359	0.066	1000003
1.5	3.500	3.780	3.640	0.320	0.311	0.316	0.072	1000004
2.5	3.430	2.950	3.190	0.297	0.305	0.301	0.063	1000005
3.5	3.280	3.380	3.330	0.291	0.284	0.288	0.066	1000006
4.5	3.210	3.440	3.325	0.280	0.270	0.275	0.066	1000007
5.5	3.160	3.340	3.250	0.261	0.251	0.256	0.065	1000008

表 2.1.3 同一の場所での他の積分放射線線量素子（TLD 及びガラス）を用いた
計測結果。

	1 (mSv)	2 (mSv)
TLD γ	0.32	0.28
TLD thn	0.036	0.032
ガラス γ	0.3	0.4
ガラス n	7.2	6.2

表 2.1.4 厚みの異なる鉛板でシールドした TLD を用いて測定した放射線線量値。
 10 μ A, 10MeV プロトンビームを 0.62 時間無酸化銅に照射。

鉛厚 (mm)	E1 (mSv)	E2 (mSv)	(E1+E2) / 2 (mSv)	E3 (mSv)	E4 (mSv)	(E3+E4) / 2 (mSv)	Neutron (mSv)	ID_1
0.0	20.600	20.100	20.350	2.660	2.340	2.500	0.388	1000001
1.0	19.000	21.200	20.100	2.440	2.150	2.295	0.387	1000002
2.0	22.000	20.100	21.050	2.240	2.350	2.295	0.408	1000003
3.0	20.100	21.900	21.000	2.030	2.010	2.020	0.413	1000004
4.0	20.800	17.900	19.350	1.900	1.930	1.915	0.379	1000005
5.0	17.700	19.200	18.450	1.930	1.780	1.855	0.361	1000006
6.0	18.700	20.200	19.450	1.820	1.770	1.795	0.384	1000007
7.0	18.400	19.300	18.850	1.680	1.490	1.585	0.375	1000008
8.0	16.100	19.100	17.600	1.520	1.420	1.470	0.351	1000009
9.0	18.600	16.500	17.550	1.460	1.430	1.445	0.350	1000010
10.0	16.300	17.100	16.700	1.400	1.380	1.390	0.333	1000011
11.0	14.400	16.900	15.650	1.330	1.410	1.370	0.310	1000012
12.0	13.900	15.700	14.800	1.540	1.330	1.435	0.291	1000013

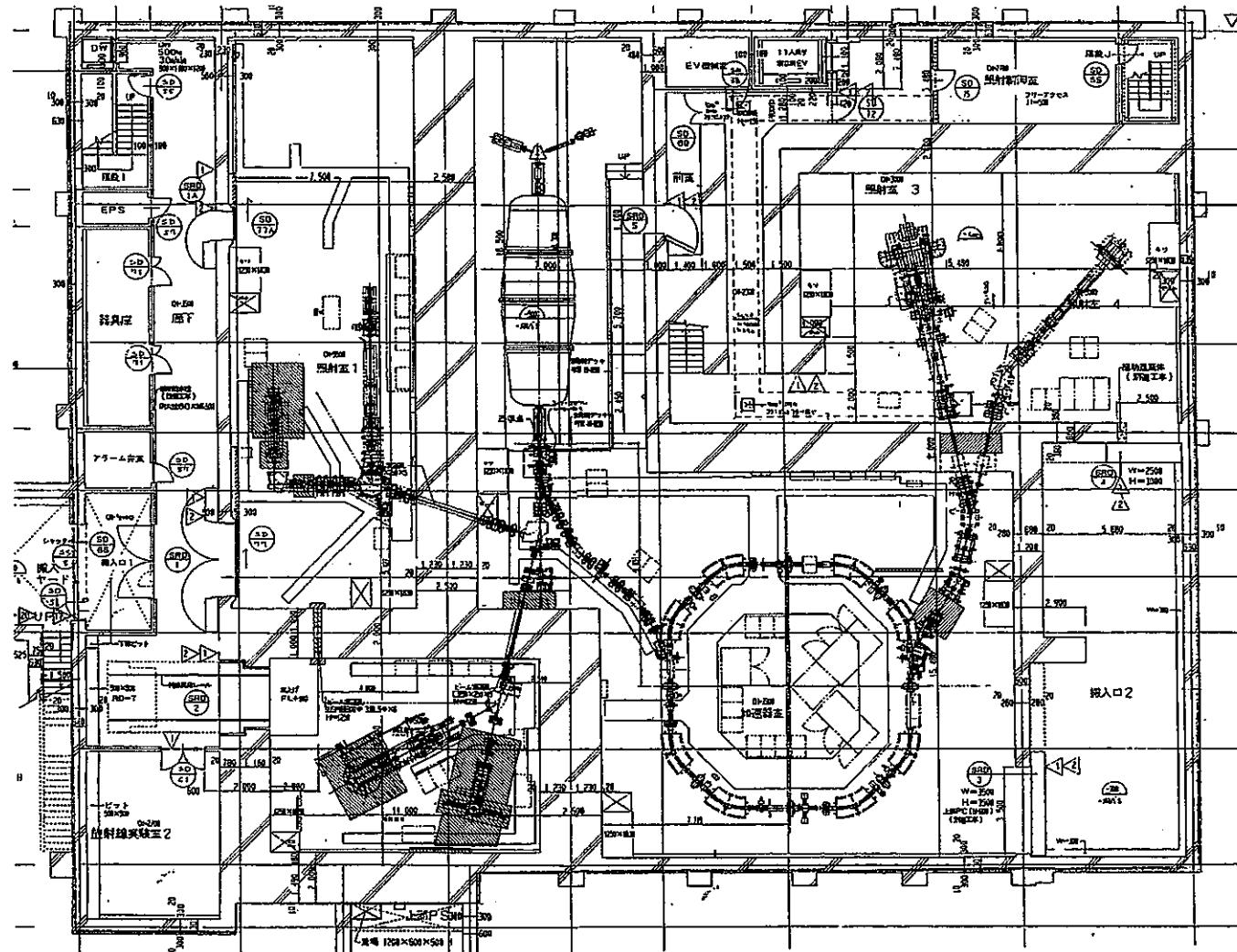


図 2.1.1 加速器装置の全体図

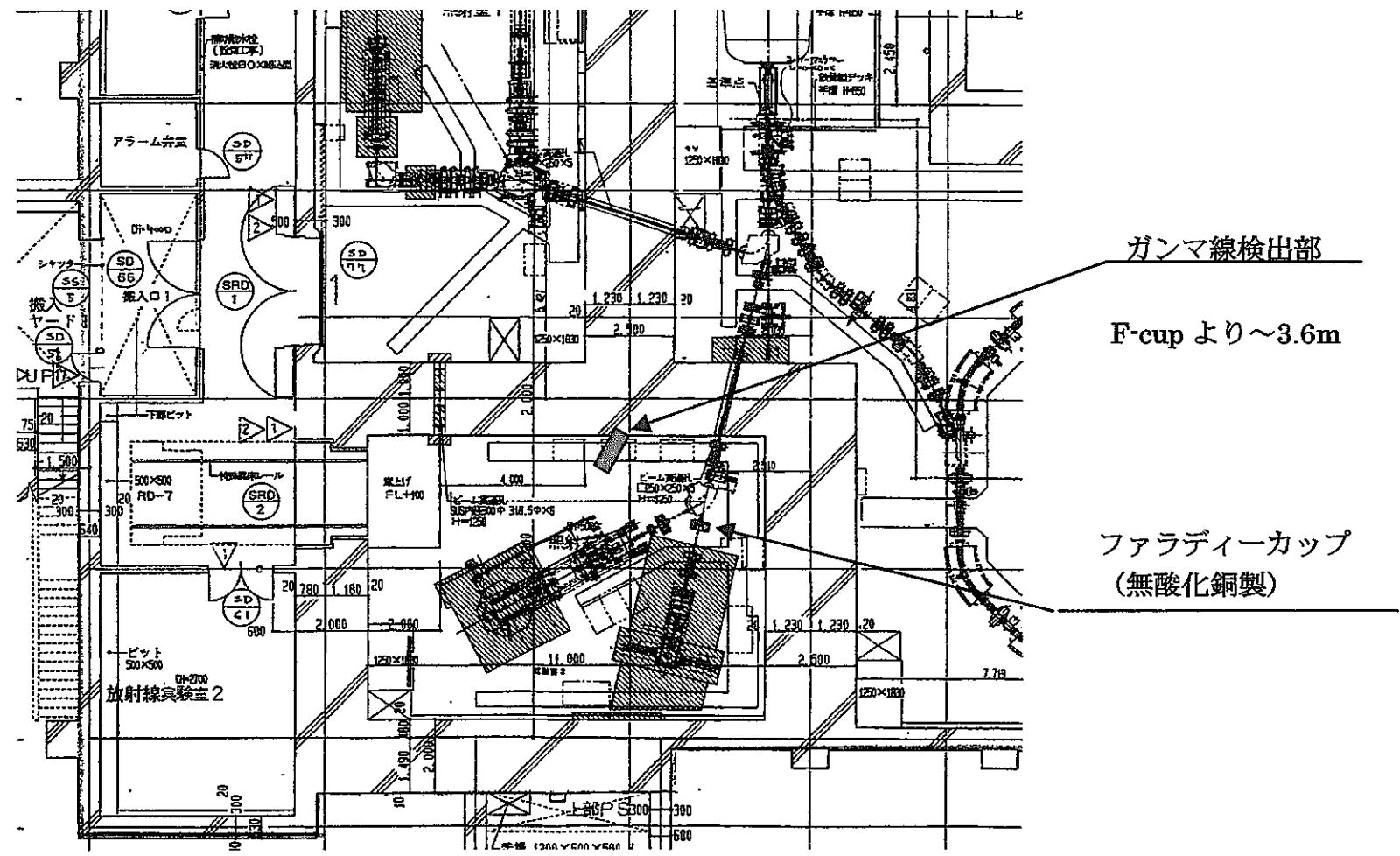


図 2.1.2 照射室 2

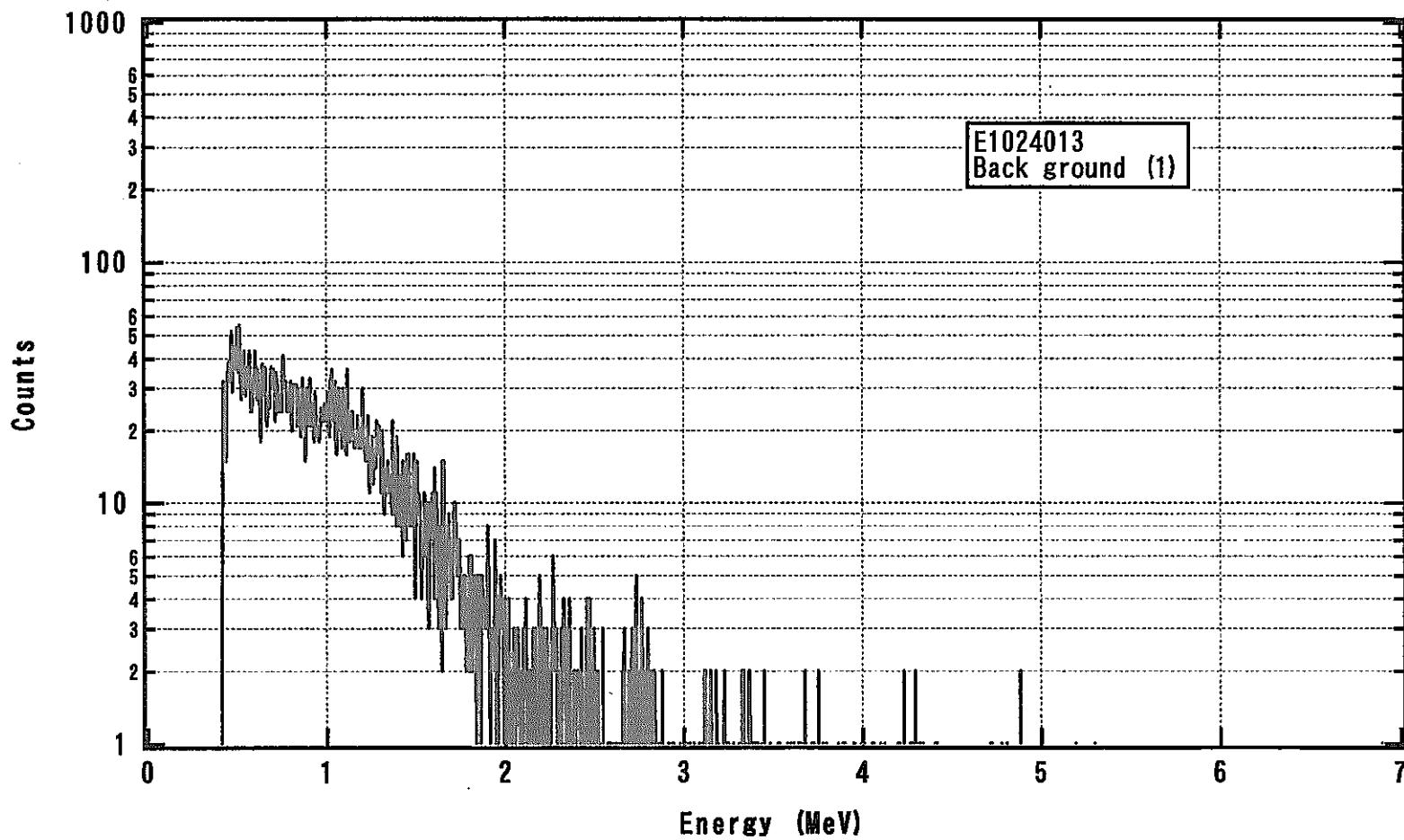


図 2.1.3 NaI 検出器で測定したガンマ線のスペクトル(タンデムビーム; He^{2+})

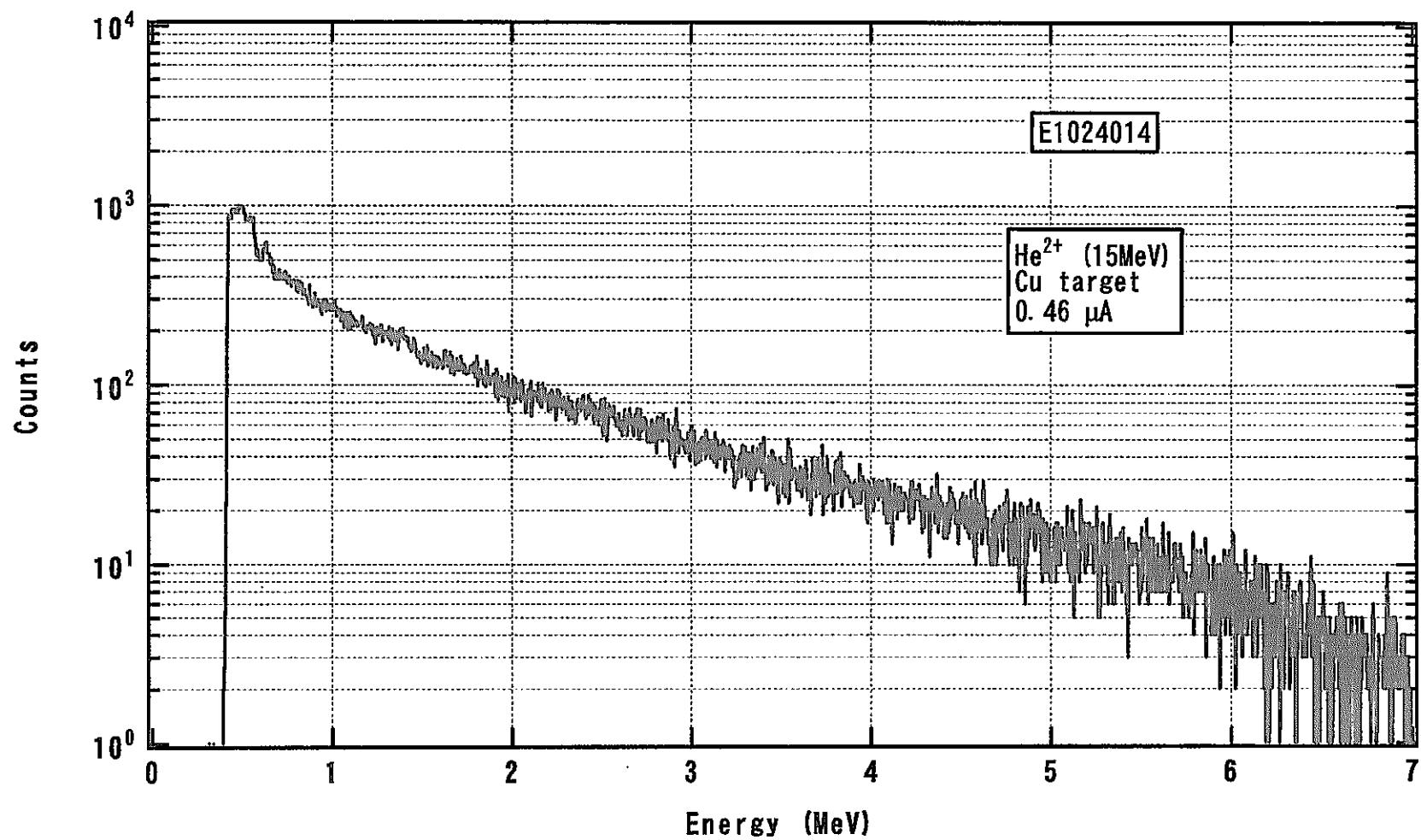


図 2.1.4 NaI 検出器で測定したガンマ線のスペクトル(タンデムビーム; He²⁺)

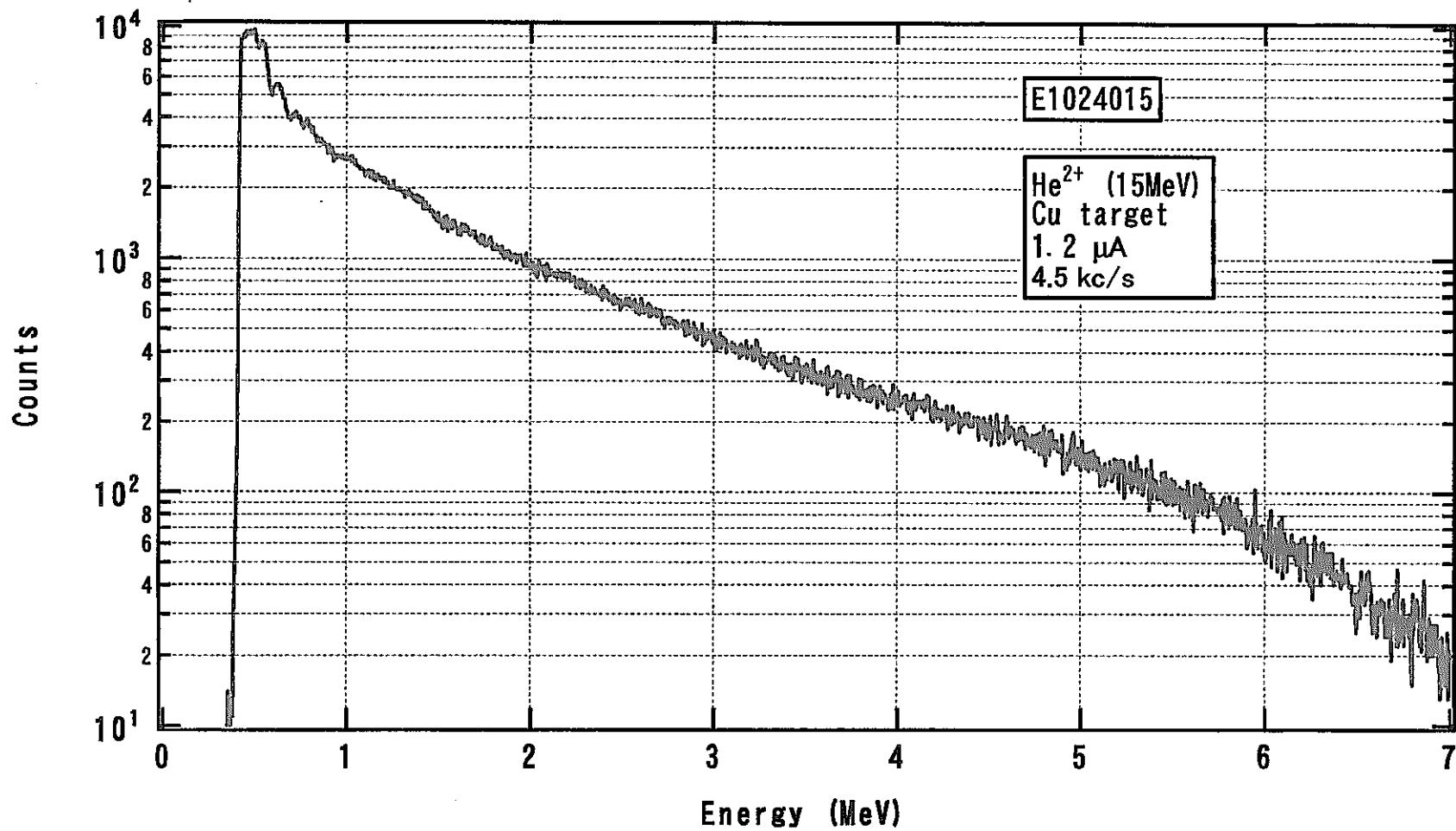


図 2.1.5 NaI 検出器で測定したガンマ線のスペクトル(タンデムビーム;He²⁺)

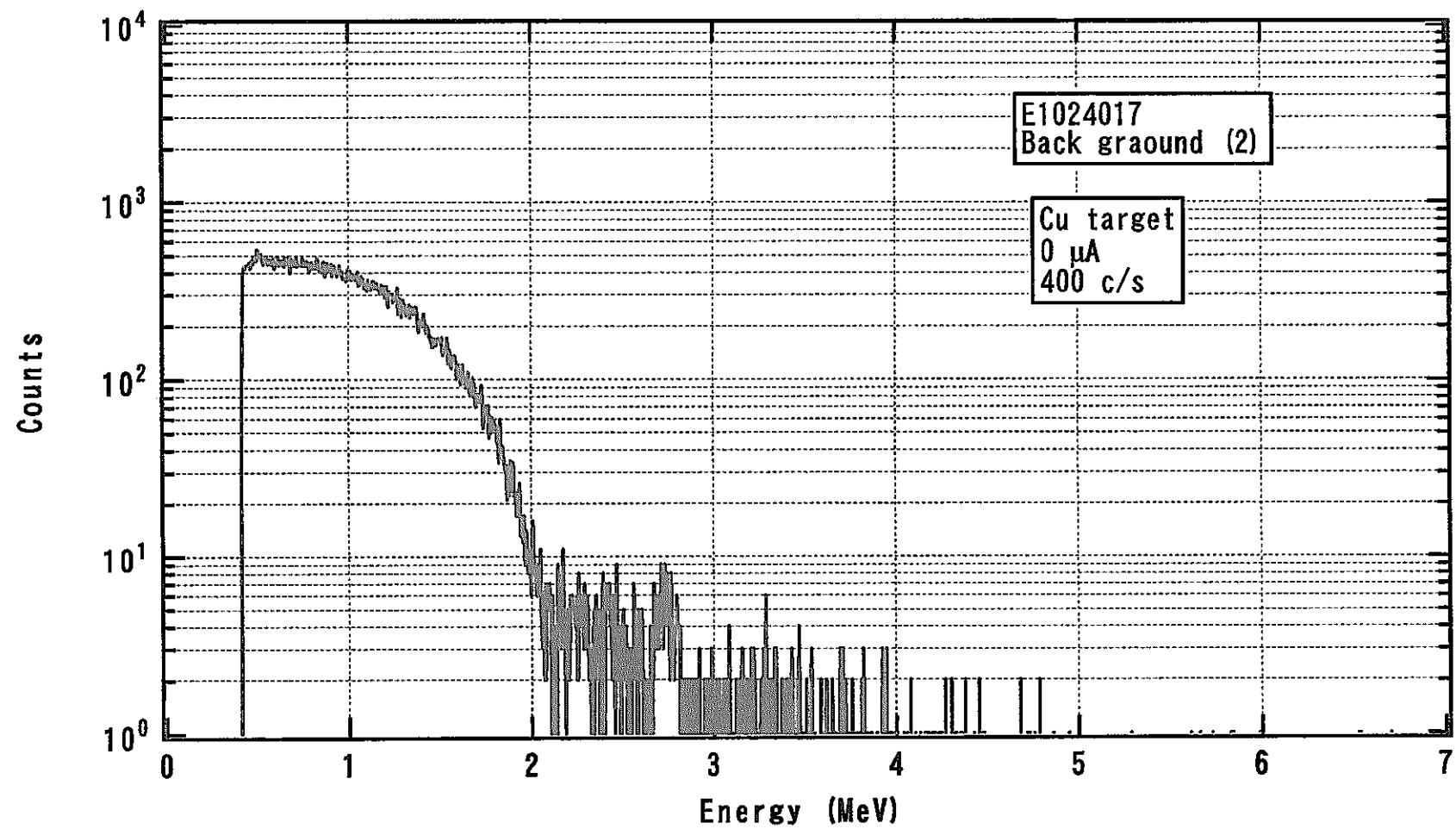


図 2.1.6 NaI 検出器で測定したガンマ線のスペクトル(タンデムビーム;He²⁺)

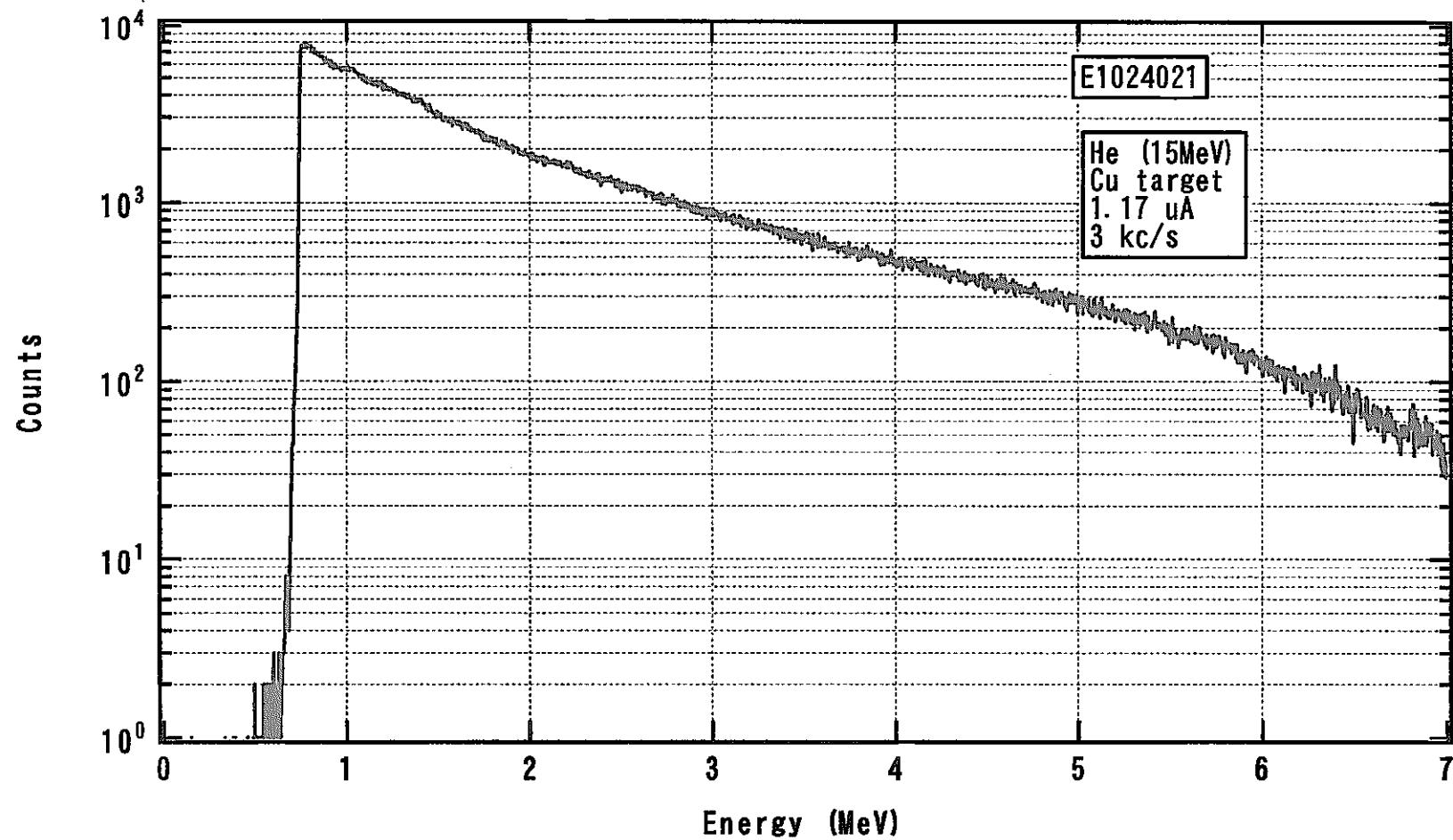


図 2.1.7 NaI 検出器で測定したガンマ線のスペクトル(タンデムビーム; He^{2+})

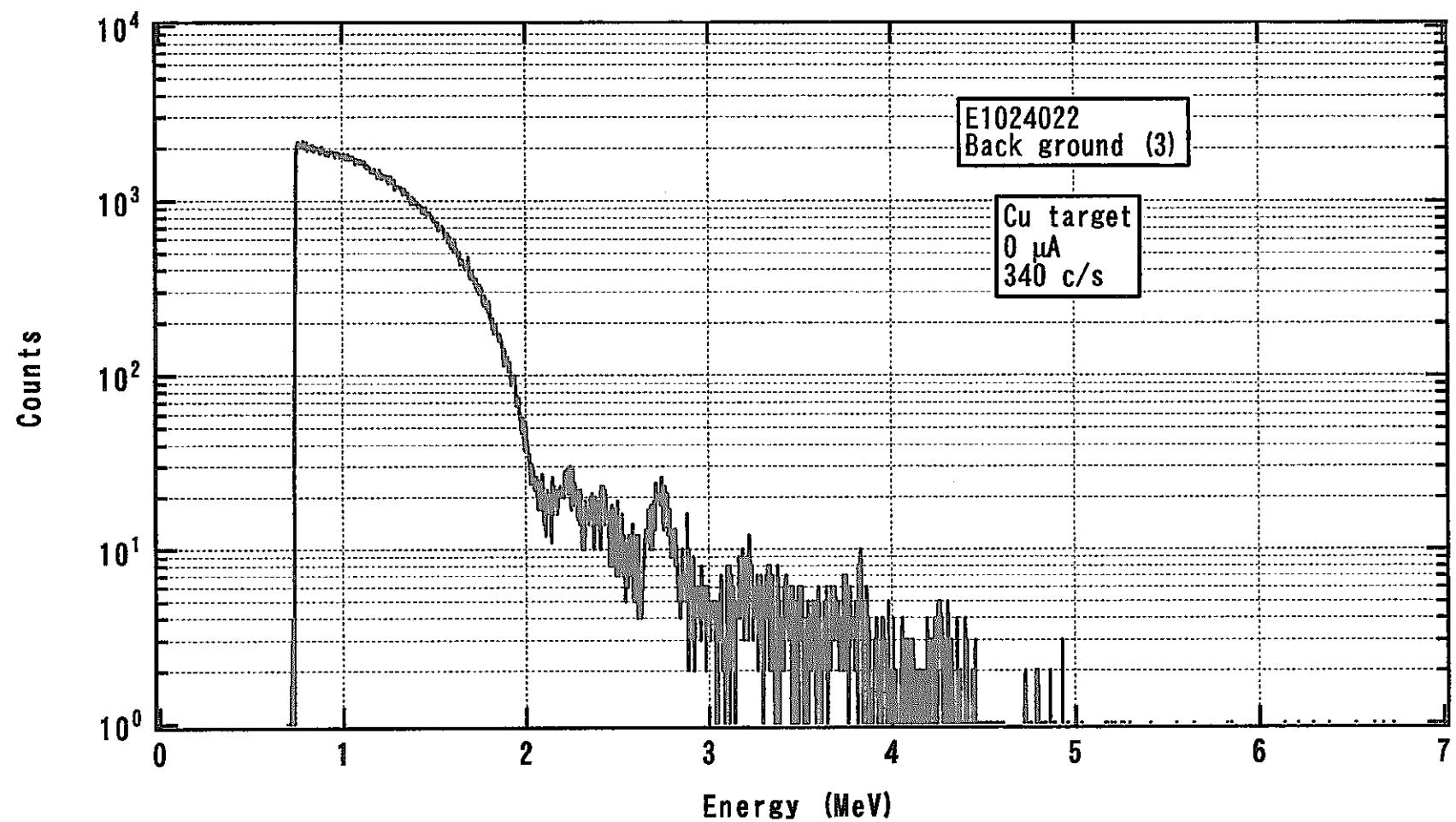


図 2.1.8 NaI 検出器で測定したガンマ線のスペクトル(タンデムビーム;He²⁺)

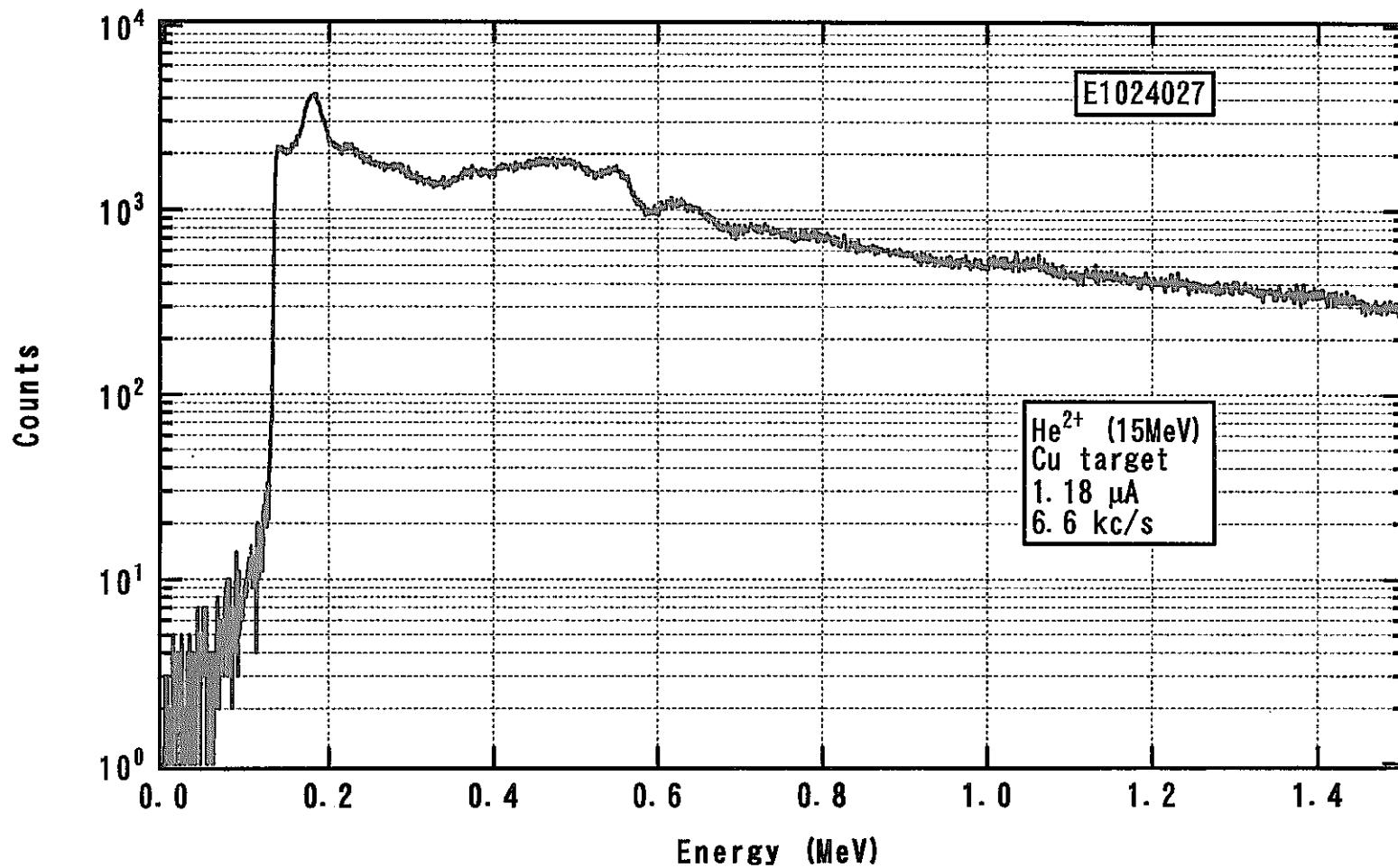


図 2.1.9 NaI 検出器で測定したガンマ線のスペクトル(タンデムビーム;He²⁺)

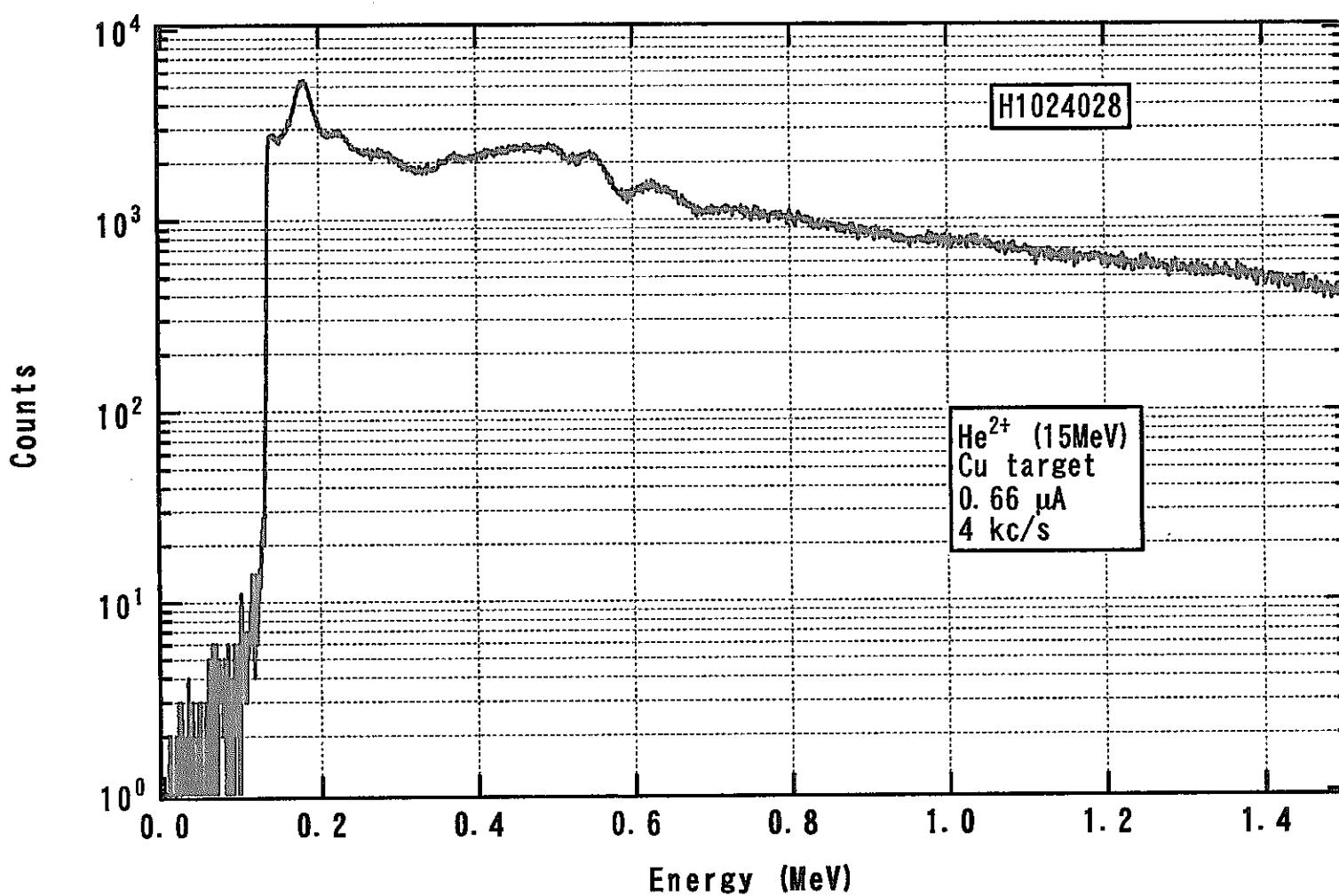


図 2.1.10 NaI 検出器で測定したガンマ線のスペクトル(タンデムビーム;He²⁺)

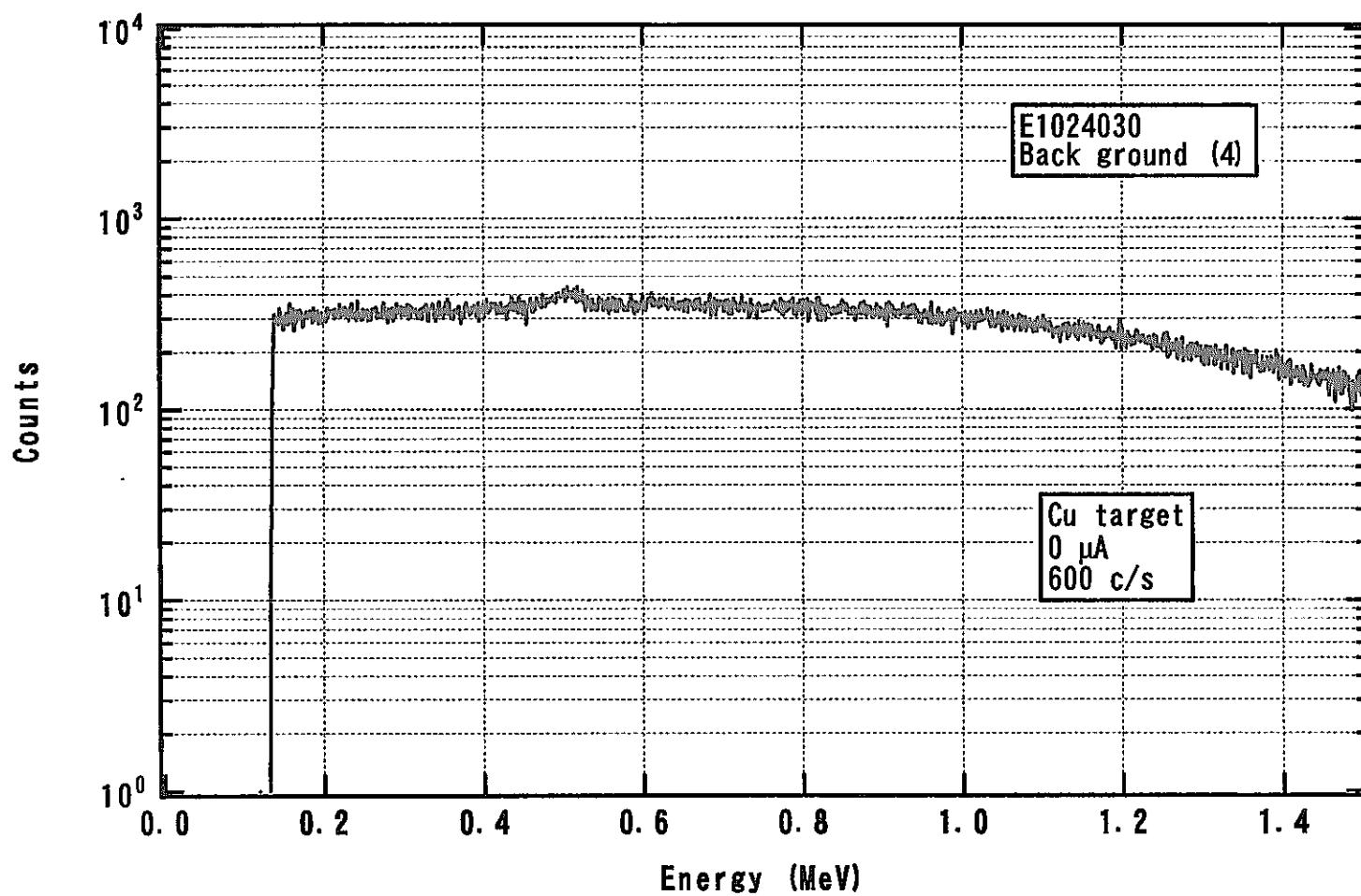


図 2.1.11 NaI 検出器で測定したガンマ線のスペクトル(タンデムビーム;He²⁺)

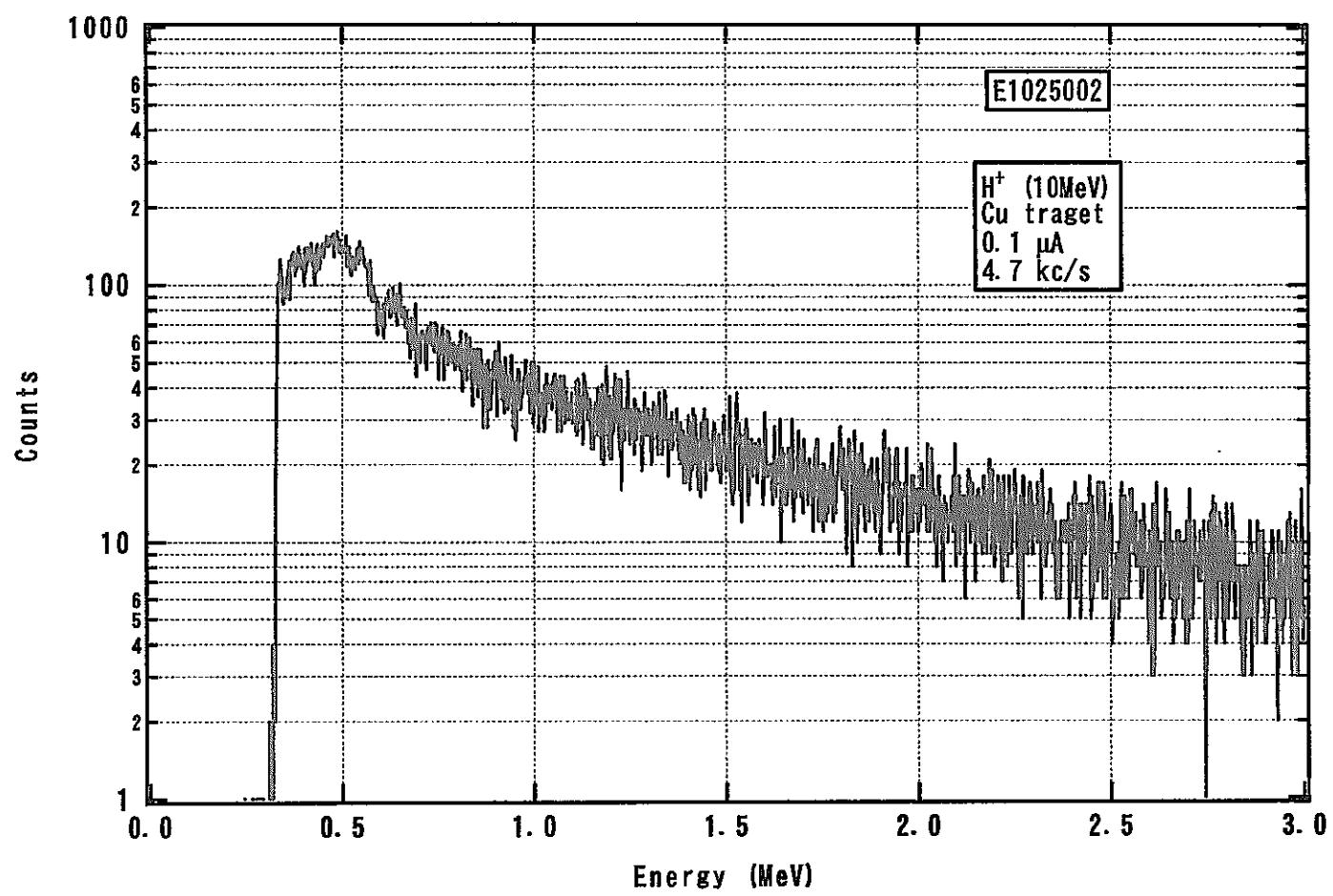


図 2.1.12 NaI 検出器で測定したガンマ線のスペクトル(タンデムビーム; H^+)

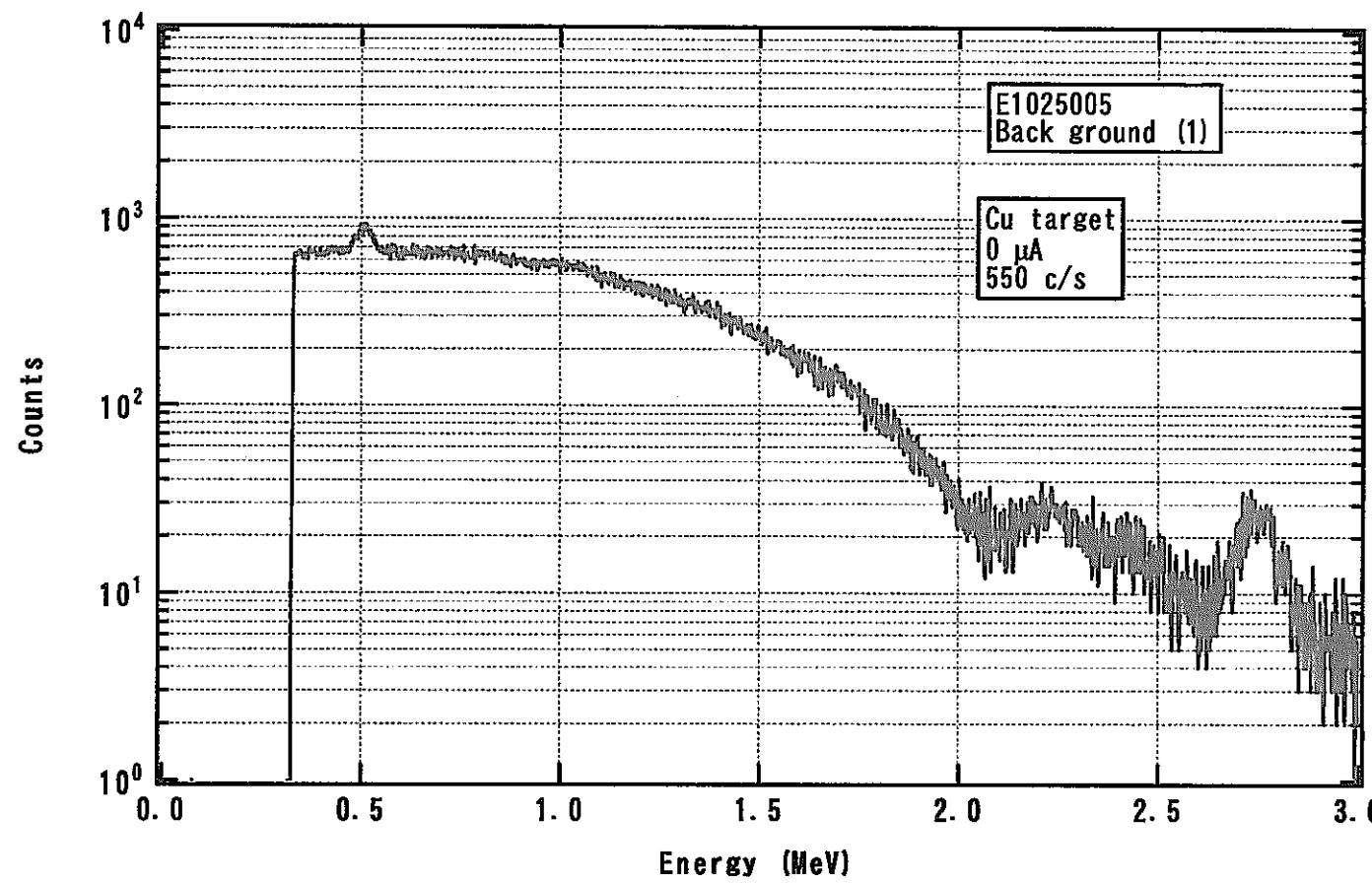


図 2.1.13 NaI 検出器で測定したガンマ線のスペクトル(タンデムビーム;H⁺)

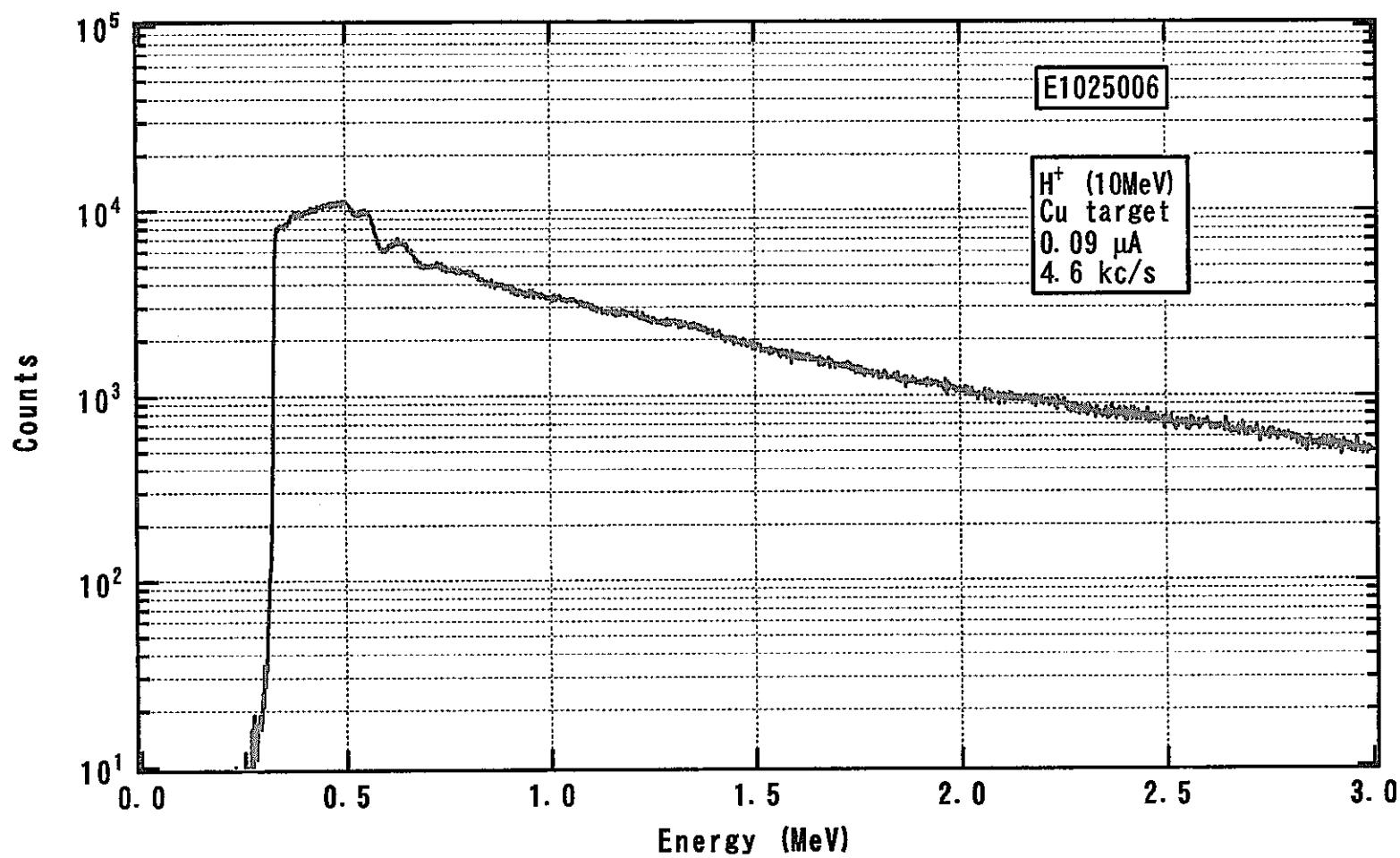


図 2.1.14 NaI 検出器で測定したガンマ線のスペクトル(タンデムビーム; H^+)

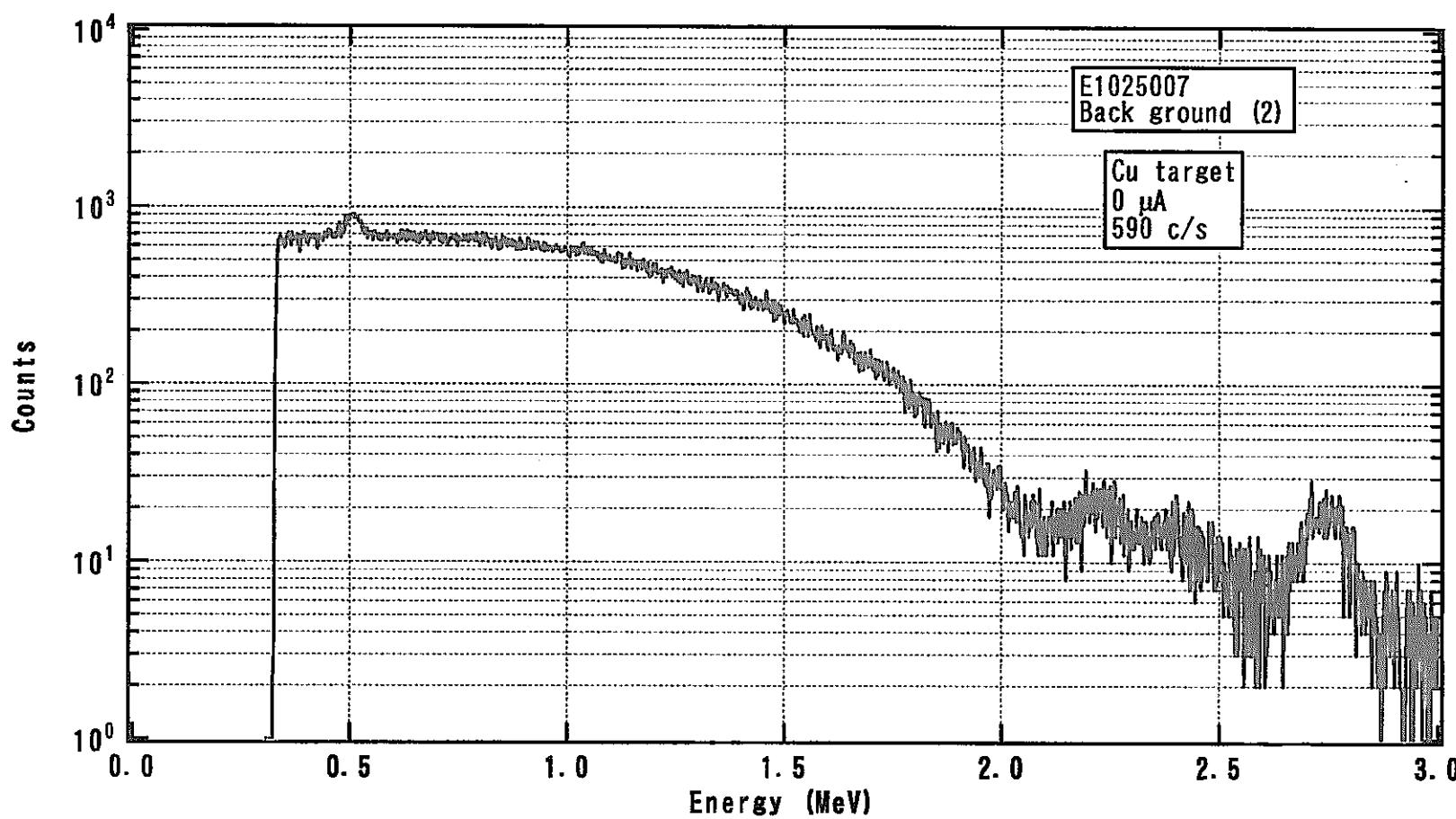


図 2.1.15 NaI 検出器で測定したガンマ線のスペクトル(タンデムビーム; H^+)

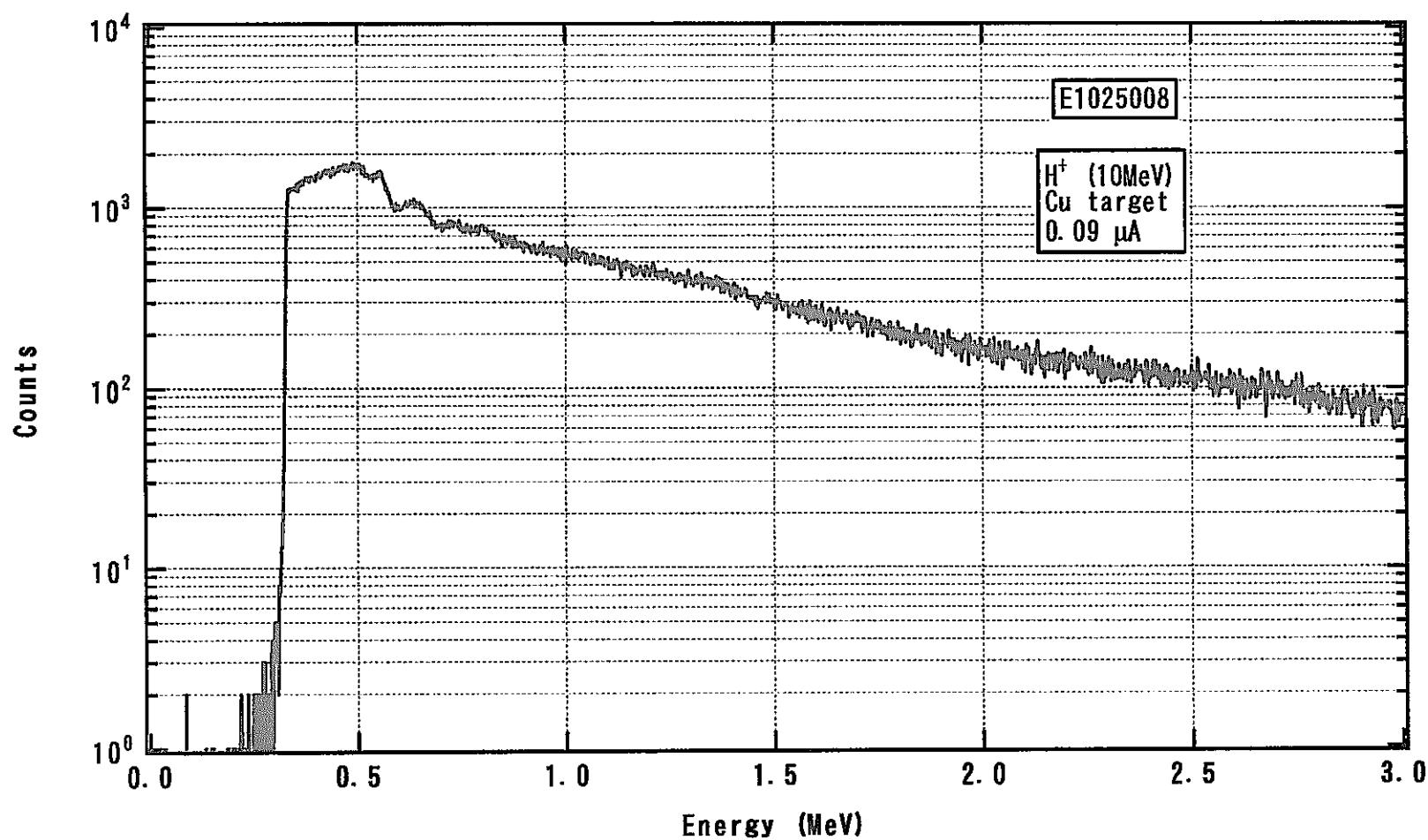


図 2.1.16 NaI 検出器で測定したガンマ線のスペクトル(タンデムビーム; H⁺)

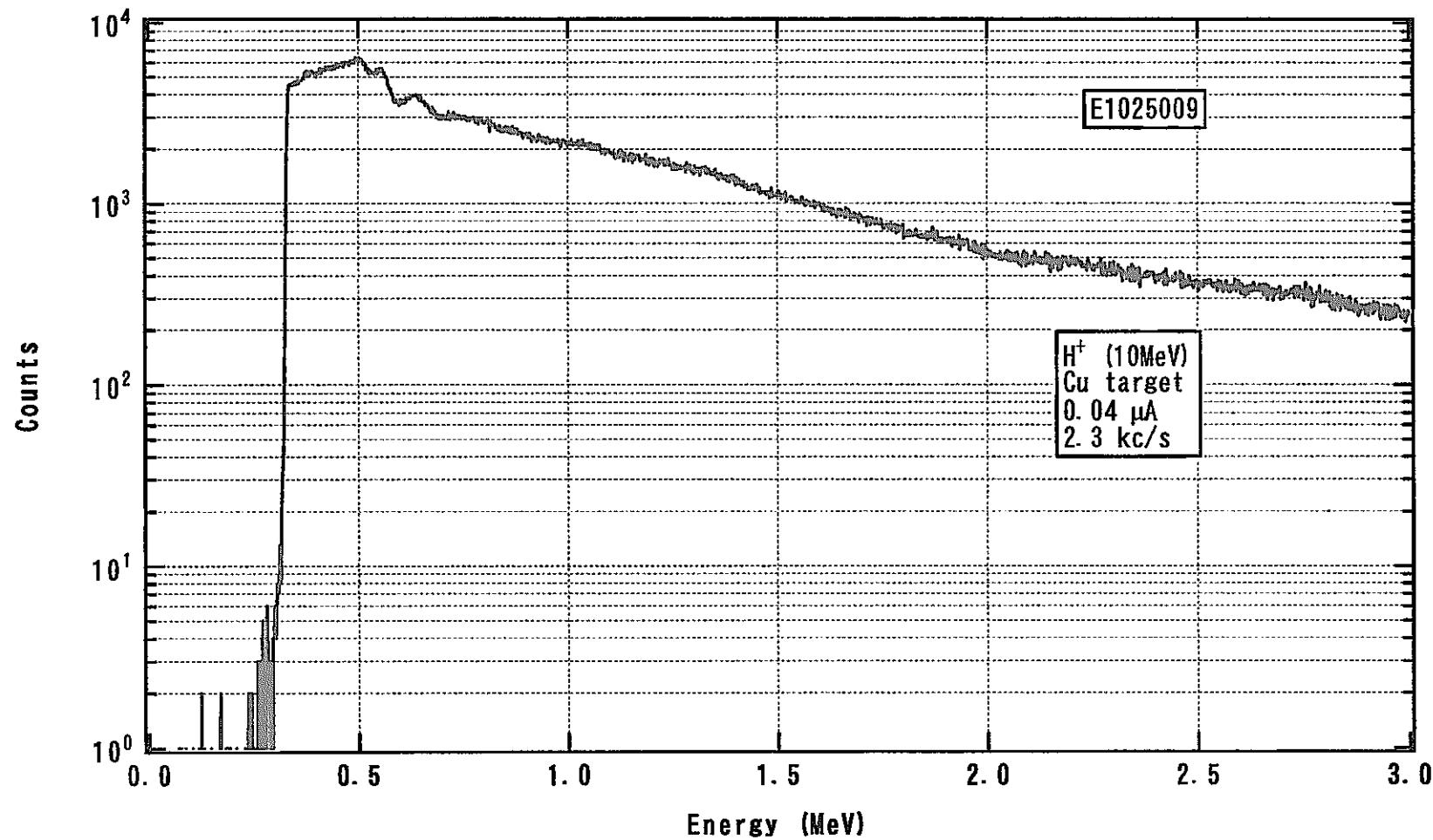


図 2.1.17 NaI 検出器で測定したガンマ線のスペクトル(タンデムビーム; H^+)

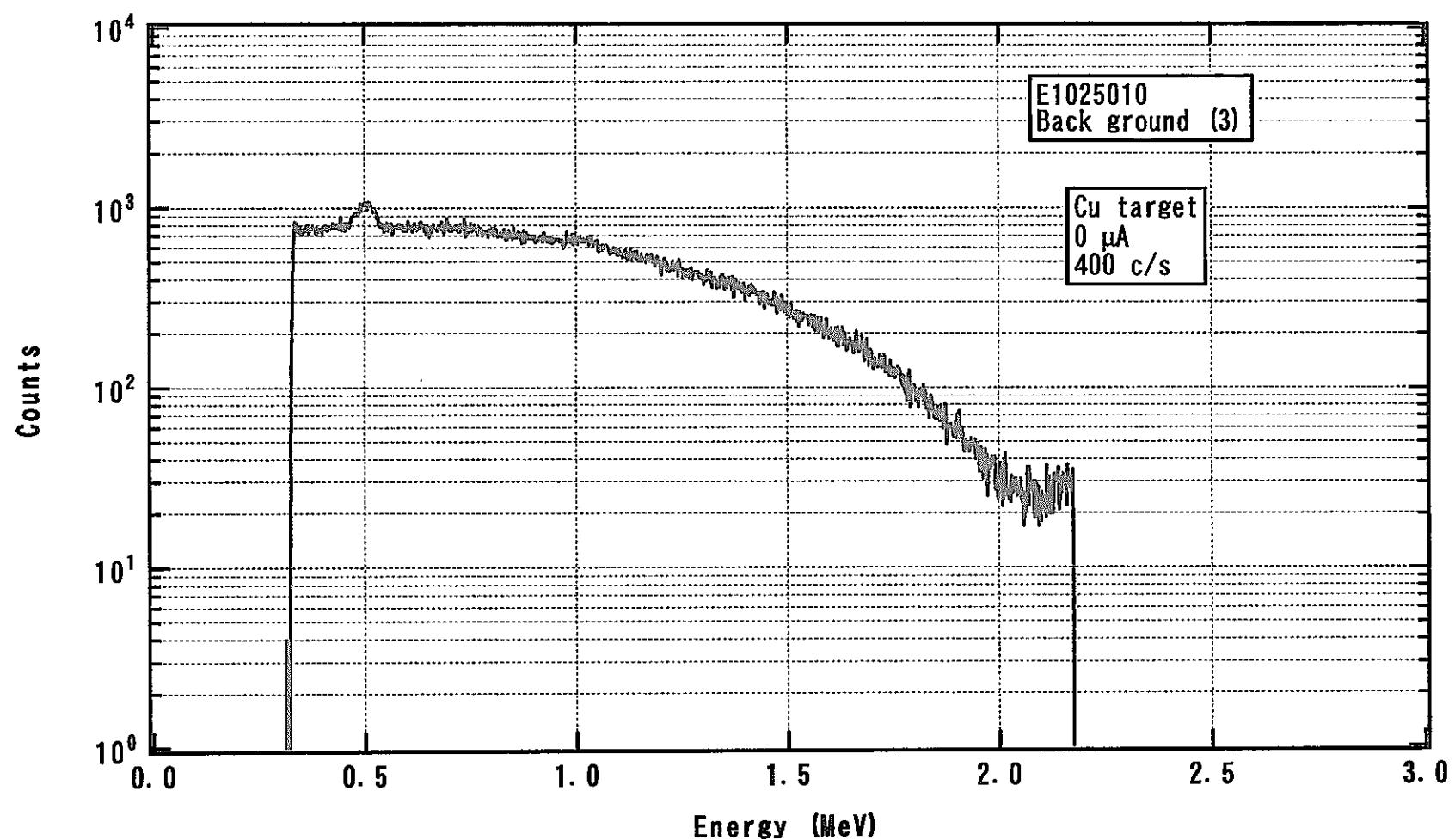


図 2.1.18 NaI 検出器で測定したガンマ線のスペクトル(タンデムビーム; H^+)

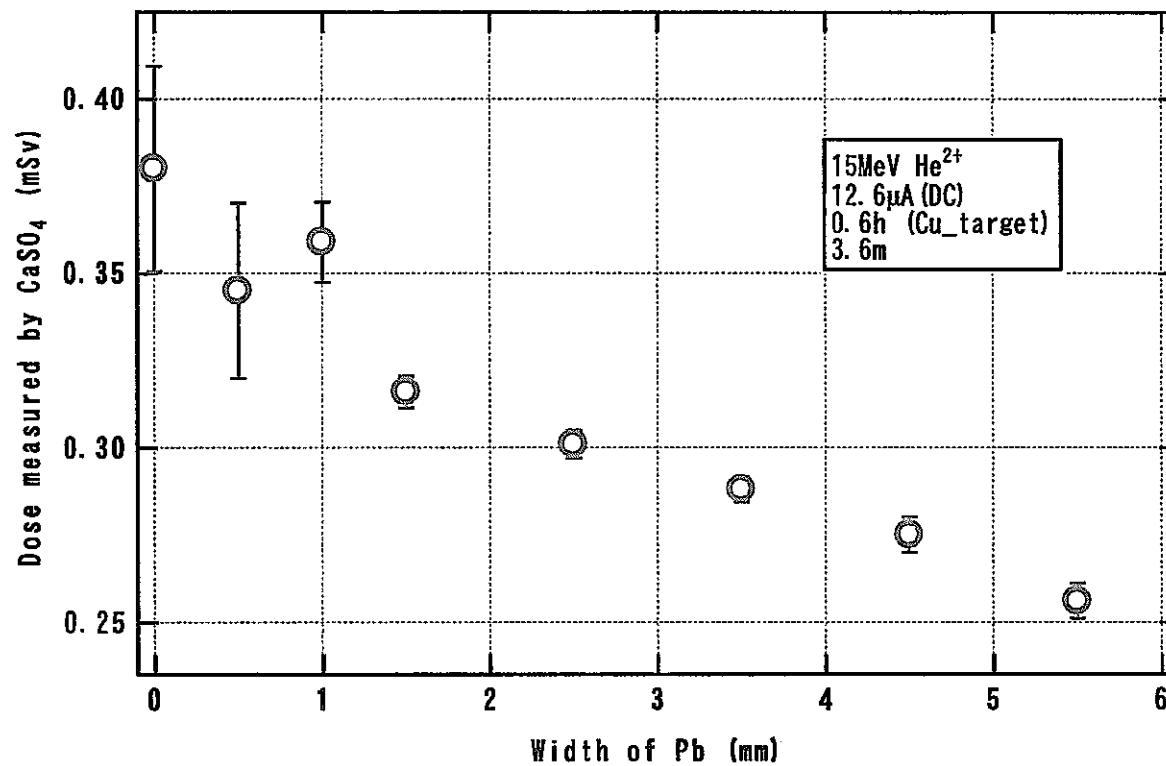


図 2.1.19 カバーした鉛厚に対するガンマ線放射線量 (15MeV, He^{2+})

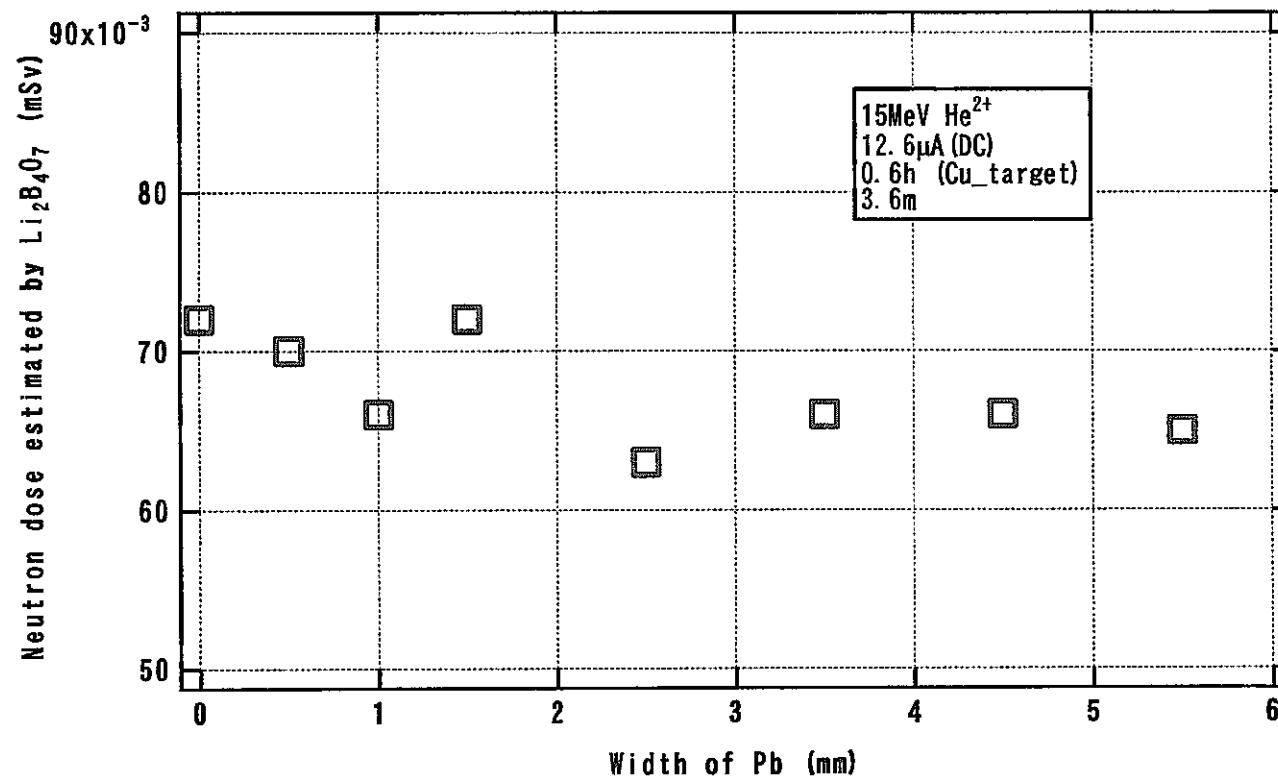


図 2.1.20 カバーした鉛厚に対する推定熱中性子放射線量 (15MeV, He^{2+})

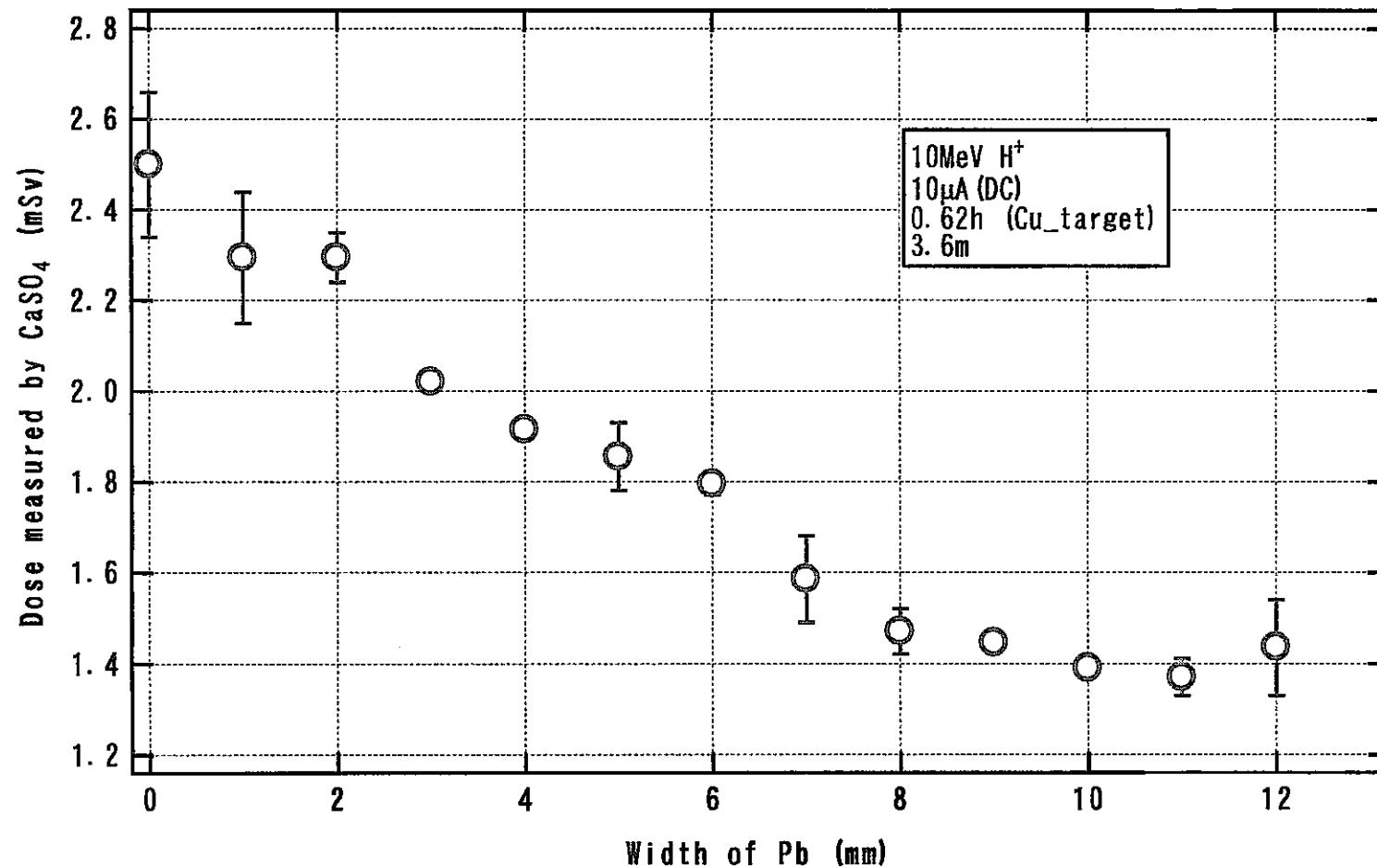


図 2.1.21 カバーした鉛厚に対するガンマ線放射線量 (10MeV, H^+)

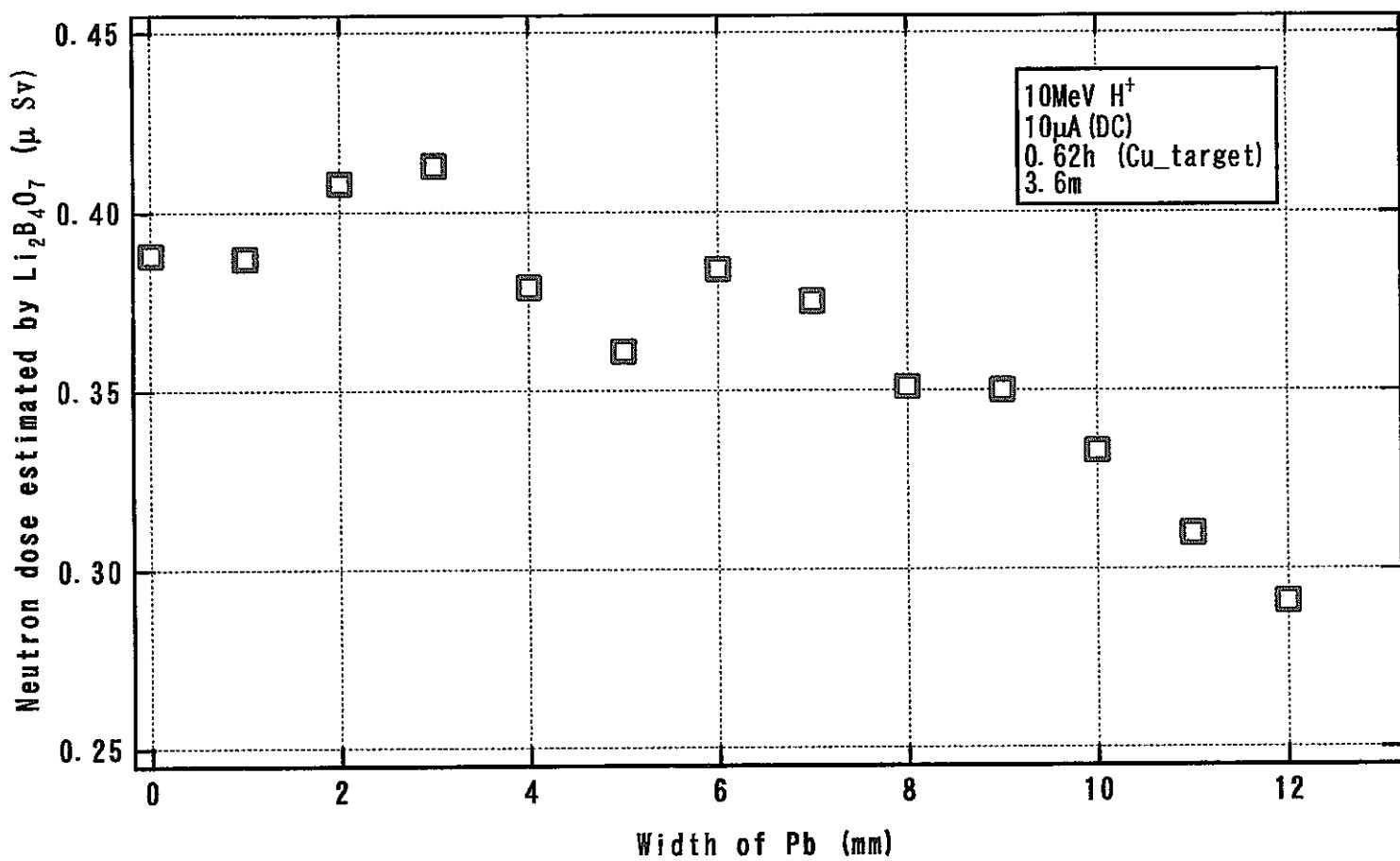


図 2.1.22 カバーした鉛厚に対する推定熱中性子放射線量 (10MeV, H⁺)

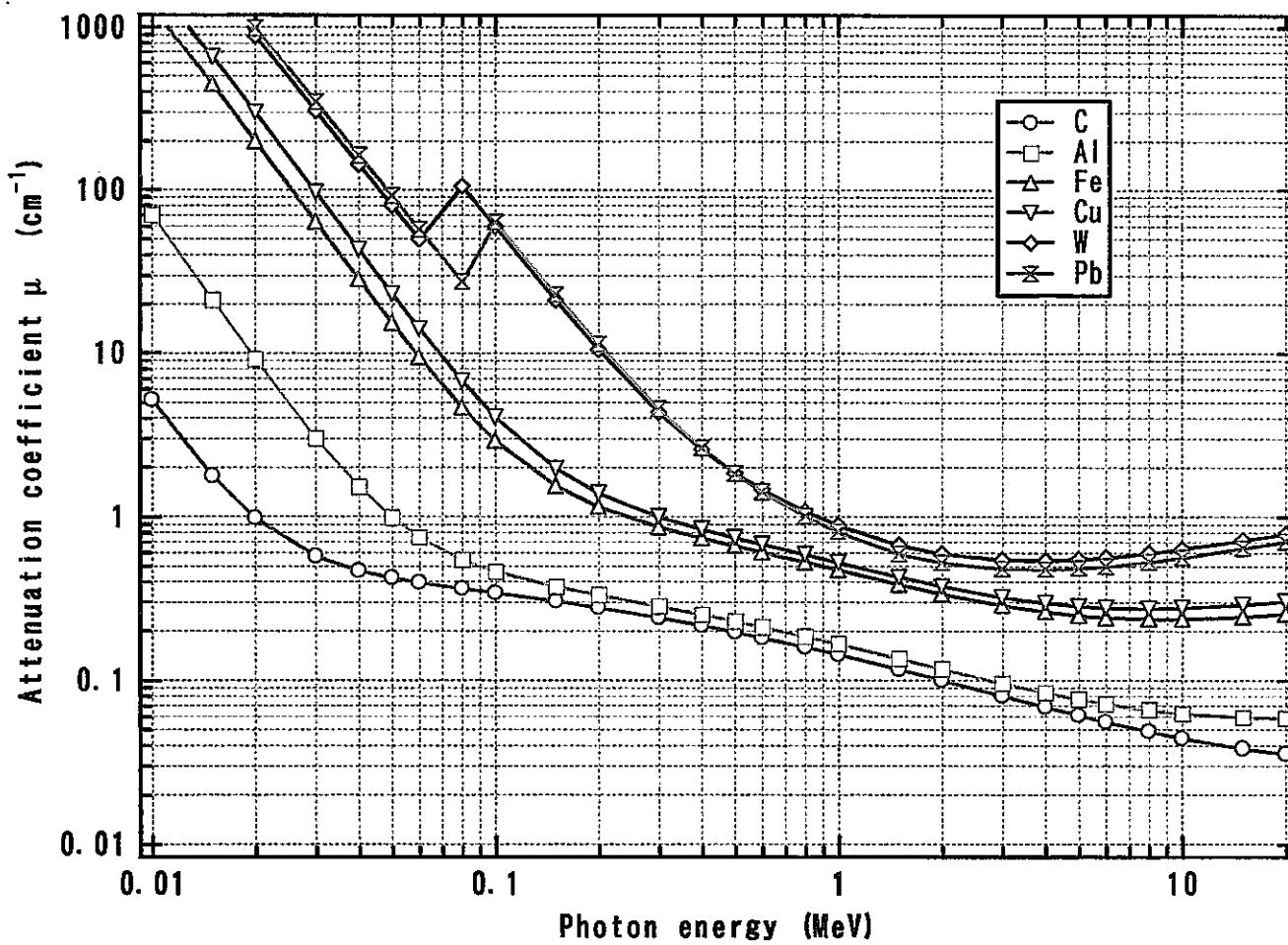


図 2.1.23 種々の材料の全線減弱係数

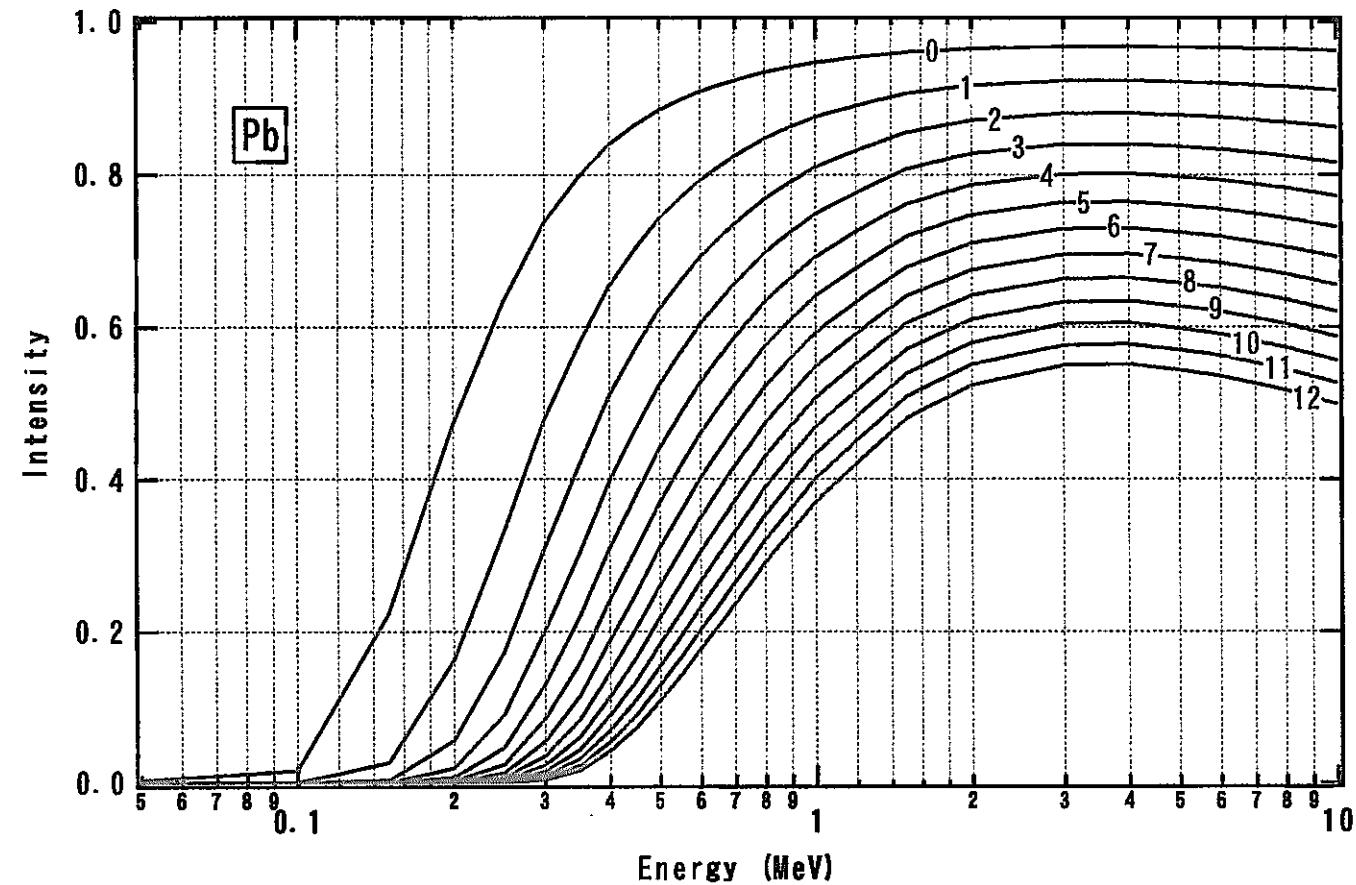


図 2.1.24 厚さの異なる鉛を通過後のガンマ線強度のエネルギー依存性。
(鉛の厚さは $[W + 0.7]$ mm, $W = 0 \sim 12$ mm)

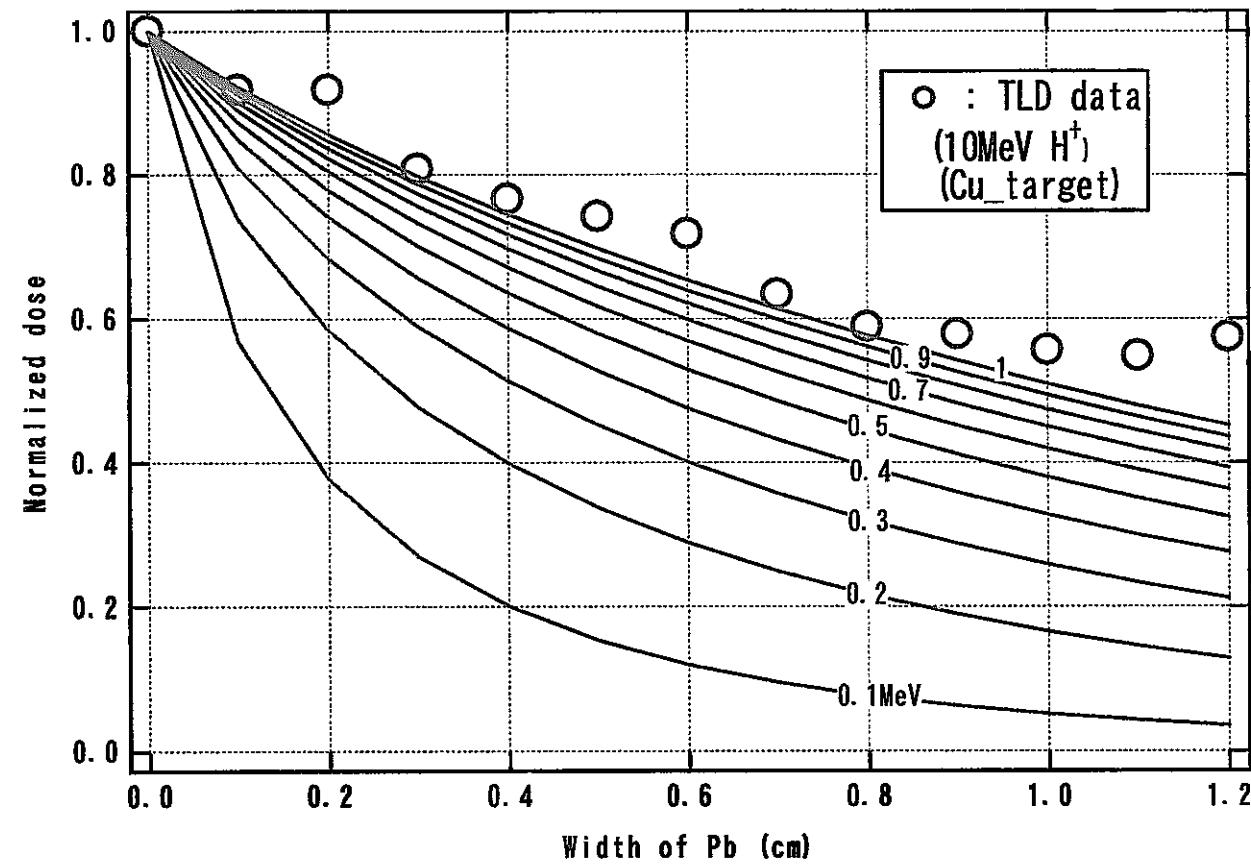


図 2.1.25 T=0.1~1 MeVとした場合の測定線量の鉛厚依存性

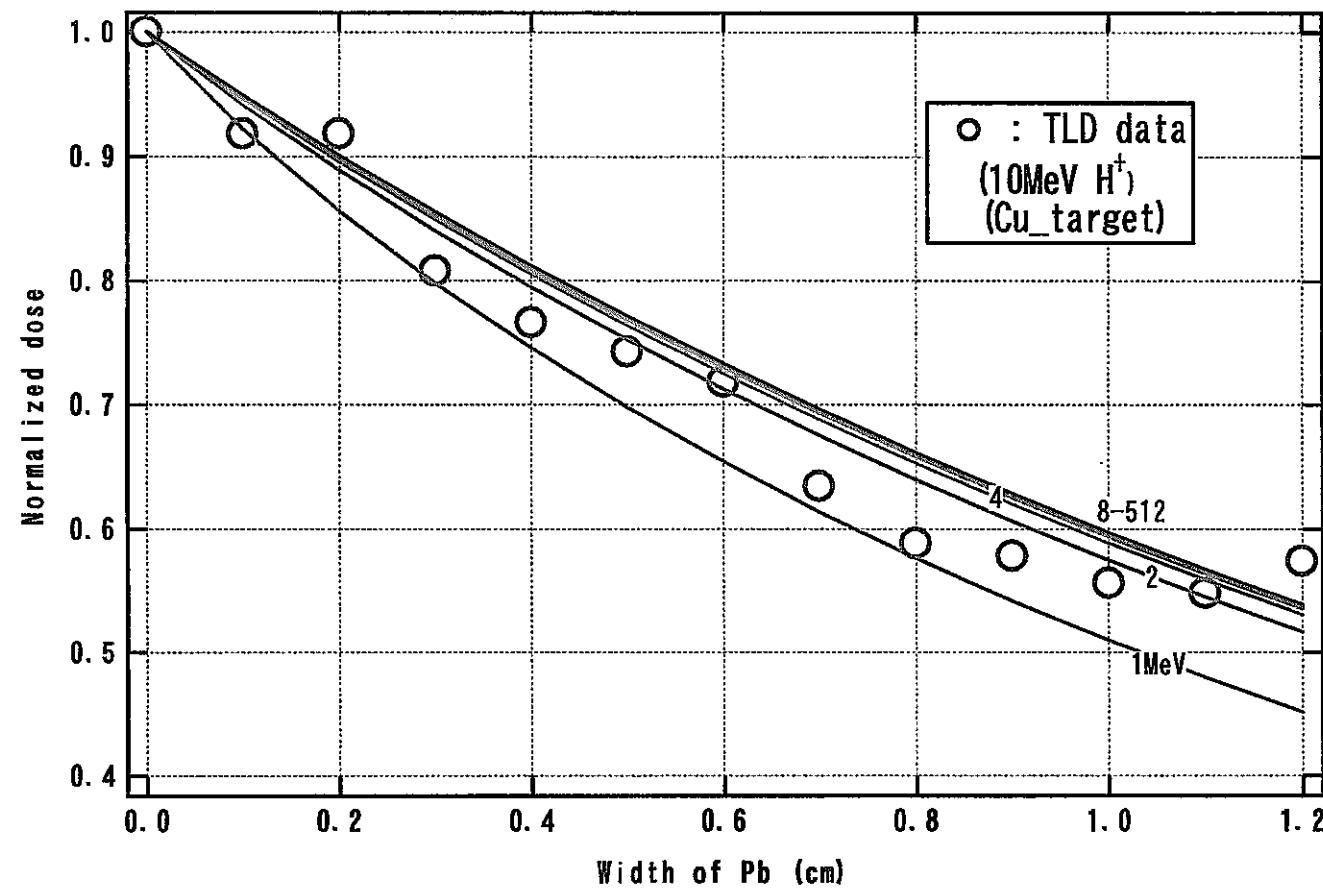


図 2.1.26 T=1, 2, 4, 8, 26, 32, 64, 128, 256, 512 MeVとした場合の測定線量の鉛厚依存性

2.2 シンクロトロン加速器ビームを用いたガンマ線線量評価

図 2.2.1 に照射室 3、照射室 4 辺りを拡大したビームラインを示す。照射室 3 はがん治療専用のコースであり、水平・垂直 2 本のビームラインが設置されている。照射室は、がん治療以外のシンクロトロン加速器ビームを用いた実験を行うビームラインであり、材料の照射損傷実験、品種改良のための生物照射実験、治療用ビーム光学系の開発実験、等々が行われている。

図 2.2.1 に示すように、ガンマ線検出器を照射室 4 のビームラインの末端部に設置されたビームダンプ（鉄ブロック）位置から約 5m 離れた位置に設置した。NaI シンチレータ部の放射線シールドは、2.2 節のタンデム加速器ビーム使用時に用いた方法と全く同じである。使用したシールド材は、厚さ 2mm のカドニウム、厚さ 5cm の鉛ブロック、及び厚さ 5~10cm のボロン入りポリエチレンブロックである。NaI シンチレータ部の前面には、直径 5mm ϕ の穴の開いた厚さ 5cm の鉛ブロックが設けられており、ビームダンプで生成されたガンマ線は、この穴を通してのみシンチレータ部に入射する。ガンマ線発生部からシンチレータ部を見込む立体角は $\sim 6.3 \times 10^{-8}$ である。

100MeV H⁺が鉄ブロックを衝撃した際に放出されるガンマ線を、上記の様に配置した NaI 検出系を用いで測定した。NaI 検出器、プリアンプ、メインアンプは照射室 4 内に設置した。メインアンプからの UNI 信号（半値全巾、 $\sim 2\mu s$ ）及び BI 信号を加速器制御室まで伝送し、BI 信号を利用して作った gate 信号（ゲート巾、2~3 μs ）より UNI 信号の時間幅を設定後、Analog to Digital Converter (ADC)により波高分析を行った。又、シンクロトロン出射前のタイミングの信号を基準として、1ms 間隔のカウント数を記録し、ガンマ線の時間変化を計測した。ここで述べる実験では、検出器が 1 個のガンマ線を検出し始めた時刻より $\sim 4\mu s$ の間に、ガンマ線が検出器に入射した場合、直前のパルスを消去する pile up rejection を合わせて行った。尚、本実験においては、電気的なノイズが混入するトラブルは生じなかった。

NaI 検出系で得られた結果を図 2.2.2~図 2.2.11 に示す。2 秒毎にシンクロトロンから放出されるパルス信号の 1 個 (one spill) を(a)に、信号取得時間に渡って加算したパルス信号 (summation of spills) を(b)に、pile up rejection を行った場合 (赤印) 及び無視した場合 (青印) のエネルギースペクトルを (c) に示す。又、参考のために、本実験中の適当な測定時間に照射室 4 入射のビームを遮断し、照射室 4 内のバックグラウンド信号によるエネルギースペクトルを求めた。

時間変化信号 ((a)と(b)) より、本実験でのシンクロトロンビームのパルス幅 (半値全巾) は約 250 msec であることが分かる。2 秒毎のパルスビーム以外の部分は、鉄ブロックが放射化した事によるバックグラウンド放射による信号レベルである。パルス波形のピーク値に比べて 1/10 以下であることが分かる。図 2.2.2(c)~図 2.2.11(c)

において、図 2.2.11(c) を除いて pile up rejection を行った場合（赤印）及び無視した場合（青印）のスペクトルに見かけ上の差異は認められない。本研究で使用したガンマ線検出システムにおいて、受信信号のパイロアップがどの程度の count rate から発生して、エネルギースペクトルに影響を与えるかを検討するために、

$$\frac{1}{N} \left[\sum_{n=1}^N \left(\frac{Y_{\text{non}}(n) - Y_p(n)}{Y_p(n)} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

を計算した。ここで Y_{non} は pile up rejection を行わなかった時のカウント数 Y_p は行ったときの時のカウント数、N はエネルギーチャンネルの数であり、和は全のエネルギーチャンネルについて行う。計算結果を図 2.2.12 に示す。図より、7kc/s では問題がないことが分かる。~10kc/s を超えると pile up の影響が出始めると結論される。

NaI 検出系で測定されたエネルギースペクトルより、100MeV プロトンが鉄ブロックを衝撃する際に放出されるガンマ線のエネルギースペクトルの推定を、前節と同様な最小 2 乗法を用いて行った。ガンマ線のエネルギースペクトルを $f_\gamma(E)$ とすると、NaI 検出系により観測されるエネルギースペクトル $F_{\text{ob}}(E)$ は、

$$F_{\text{ob}}(E) = \int_0^\infty f_\gamma(E') \cdot S(E', E) dE' \quad (8)$$

で与えられる。ここで $S(E', E)$ は NaI 検出系の応答関数である。図 2.2.13～図 2.2.22 にモンテカルロシミュレーションコード EGS4 を用いて計算した、入射ガンマ線に対する応答関数 $S(E_n, E_m)$ を示す。計算では、本実験で使用した幾何学配置及び使用 NaI 検出系のエネルギー分解能が考慮されている。入射ガンマ線のエネルギーは、 $E_n (= E')$ = 0.1 MeV から 10MeV まで 0.1MeV 間隔で変え、各々のスペクトルに対するエネルギー巾 dE_m は 0.01MeV とした。ガンマ線のエネルギースペクトルを $f_\gamma(E)$ は、2.1 節と同様に

$$f_\gamma(E; a, b) = aE \exp(-bE) \quad (9)$$

を仮定した。パラメータ b 値を用いて、ガンマ線放射体の実効的な温度 T_{eff} ($= 1/b$) の推定が可能である。積分を和で表現し、パラメータ a, b を a_0, b_0 の周りでテーラー展開し ($a_0 = a_0 + \Delta a, b_0 = b_0 + \Delta b$) 高次の項を無視して線形化した後、繰り返し最小 2 乗法を適用してパラメータ a, b を決定した。

測定データ（図 2.2.2(c)～図 2.2.11(c)）のエネルギー間隔を 0.01MeV 間隔で平均化し、最小 2 乗法を適用した。計算に用いたエネルギースペクトル（赤色）及び最確値

a, b を用いて計算されたスペクトル（青色）を図 2.2.23(a)(b)～図 2.2.27(a)(b)に示す。ここで、(a)は pile up rejection を行った場合のデータを用いた計算結果であり、(b) は pile up rejection を行わなかった場合のデータを用いた計算結果である。各々の場合の推定されたガンマ線放射体の実効的な温度 T_{eff} を表 2.2.1 に示す。Count rate が 7.3 kc/s では pile up rejection の有無よらず推定される温度 T_{eff} に殆ど差異が無いが、12 kc/s では pile up rejection を行わなかった場合、明らかな過大評価となる。pile up が起こっているとき、高いエネルギーのガンマ線が入射したと検出系が処理するためと考えられる。表 2.2.1 より、本測定でのガンマ線放射体の実効的な温度に 1 成分温度を仮定した場合、推定された実効温度 T_{eff} は 0.8～0.9 MeV であると結論される。

図 2.2.23(a)(b)～図 2.2.27(a)(b)が示すように、 $E > 3$ MeV の領域での、計算に用いたスペクトル及び計算されたスペクトルの差異が大きい。最小 2 乗法の計算では各々のデータの分散が考慮されており、count 数が小さいほど誤差が大きくなる事を反映して、count 数の少ない領域では小さいフィティングが悪くなる。 $E > 3$ MeV の領域も含めて測定データと一致するフィティング曲線を得るには、式(6)で表される複数の実効温度 T_1, T_2, \dots を持つ関数型を仮定する必要がある。

表 2.2.2 に TLD による放射線線量計測結果を示す。十分な積分線量を得るために、プロトンビームの照射時間を 59 分とした。鉄に流れ込んだトータルクーロン量は 6.4×10^{-7} クーロンであった。同表に各エレメントから得られた値、E3・E4 の平均値 (γ 線積分線量)、推定熱中性子放射線量が示す。図 2.2.28、図 2.2.29 にそれぞれ γ 線積分線量及び推定熱中性子積分放射線量の鉛厚依存性を示す。 γ 線線量は～0.11 mSv, (線量率：～0.11 mSv/h)、推定熱中性子放射線量は～0.04 mSv, (線量率：～0.04 mSv/h) であった。同一の場所に設置されたガラス線量計による結果では、X・ γ 線の線量は 0.1 mSv、中性子線量は 1.3 mSv であった。

前節と同様に、ガンマ線のエネルギースペクトルが式(9)で表されると仮定して、種々の実効温度 T_{eff} ($= 1/b$) に対して、厚さの異なる鉛を通過後の積分線量を計算し（但し、0.7 mm の鉛板付き）、図 2.2.30 にプロットした。ここで、 $T_{\text{eff}} = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 2.0, 3.0$ MeV とした。場合の積分線量の鉛厚依存性を示す。ここで、積分線量は、付加する鉛厚 d が zero の積分線量値で規格してある。鉛の厚さが 6 mm 以下のデータのみに着目すれば、 $0.6 \text{ MeV} < T_{\text{eff}} < 2 \text{ MeV}$ 程度と推定されるが、上記のように、1 成分の実効温度で推定するのは疑問である。厚さが 6 mm 以上のデータが、式(9)以上の場所に位置するのは、ここで採用した規格値のばらつきにも起因していると考えられる。

表 2.2.1 pile up rejection (PUR)を行った場合と行わなかった場合の、放射ガ
ンマ線放射体の実効温度 T_{eff} 。ここで、 T_{eff} は1成分温度を仮定。

Run number	Count rate	T_{eff} (with PUR)	T_{eff} (without PUR)
H124001	1.8-2.5 kc/s	0.795 MeV	0.798 MeV
H124004	2.9 kc/s	0.821 MeV	0.825 MeV
H124006	4.3 kc/s	0.848 MeV	0.855 MeV
H124013	7.3 kc/s	0.876 MeV	0.889 MeV
H124015	12 kc/s	0.775 MeV	0.907 MeV

表 2.2.2 厚みの異なる鉛板でシールドした TLD を用いて測定した放射線線量値。(シンクロトロンビーム)

鉛厚 (mm)	E1 (mSv)	E2 (mSv)	(E1+E2)/2 (mSv)	E3 (mSv)	E4 (mSv)	(E3+E4)/2 (mSv)	Neutron (mSv)	ID
0	1.770	1.900	1.835	0.112	0.104	0.108	0.0375	1000001
0	2.000	2.070	2.035	0.122	0.103	0.113	0.0418	1000002
0	2.210	1.940	2.075	0.112	0.123	0.118	0.0426	1000003
0	2.120	1.950	2.035	0.106	0.094	0.100	0.0421	1000004
0	2.160	1.750	1.955	0.093	0.095	0.094	0.0405	1000005
0	1.740	1.610	1.675	0.107	0.104	0.106	0.0341	1000006
0	2.180	1.820	2.000	0.115	0.110	0.113	0.0410	1000007
0	1.670	1.690	1.680	0.104	0.103	0.104	0.0343	1000008
1	1.890	2.030	1.960	0.102	0.092	0.097	0.0405	1000009
2	2.090	1.680	1.885	0.089	0.077	0.083	0.0392	1000010
3	2.360	1.910	2.135	0.077	0.074	0.076	0.0448	1000011
4	1.790	1.870	1.830	0.081	0.088	0.085	0.0379	1000012
5	1.570	1.660	1.615	0.088	0.084	0.086	0.0332	1000013
6	2.000	1.800	1.900	0.081	0.078	0.080	0.0396	1000014
7	1.850	1.720	1.785	0.065	0.072	0.069	0.0373	1000015
8	1.620	1.640	1.630	0.090	0.073	0.082	0.0337	1000016
9	1.570	1.610	1.590	0.075	0.076	0.076	0.0329	1000017
10	1.540	1.370	1.455	0.073	0.065	0.069	0.0301	1000018
11	1.880	1.590	1.735	0.069	0.066	0.068	0.0363	1000019
12	1.670	1.500	1.585	0.067	0.076	0.072	0.0329	1000020

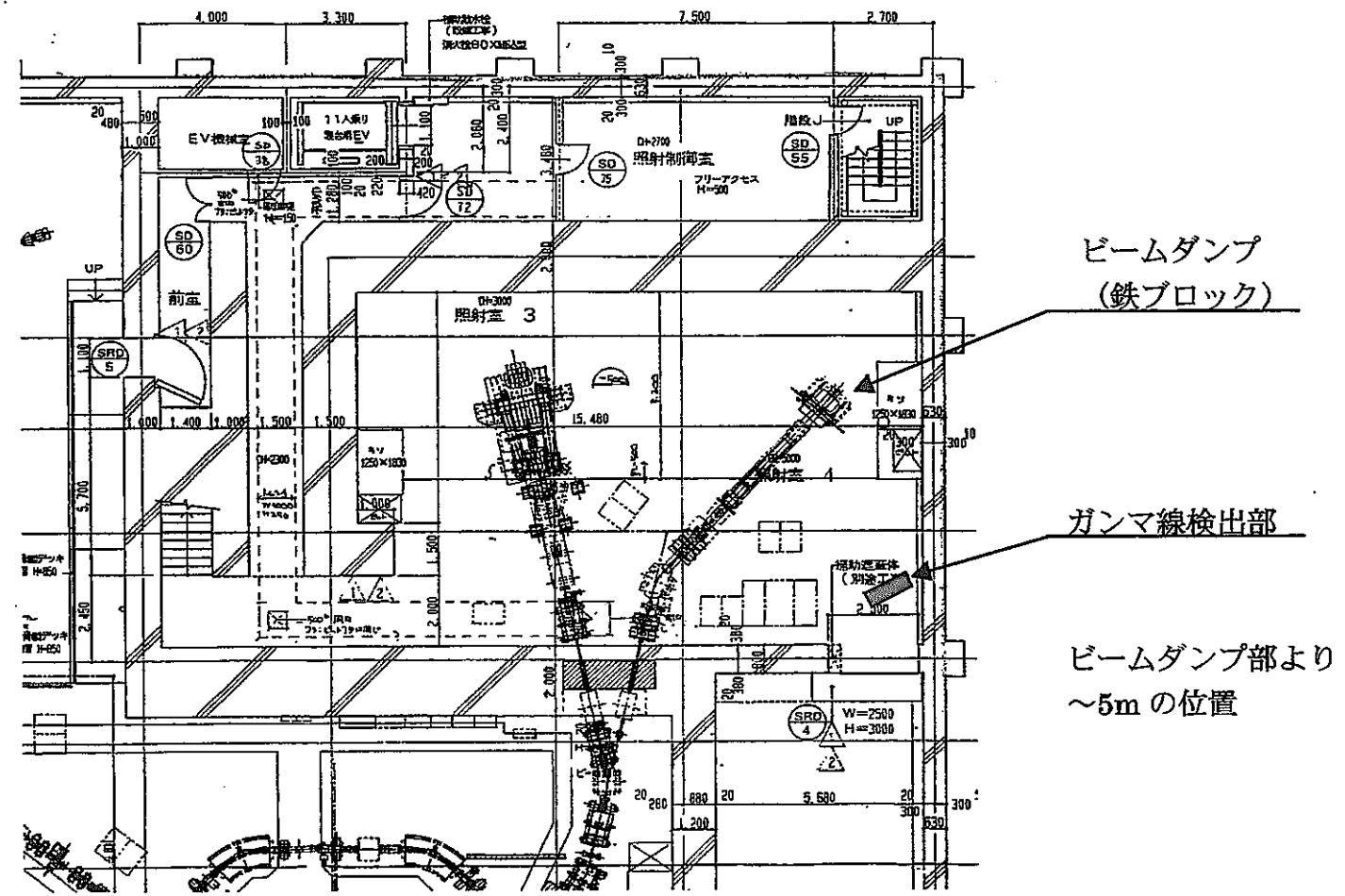


図 2.2.1 照射室 3, 4

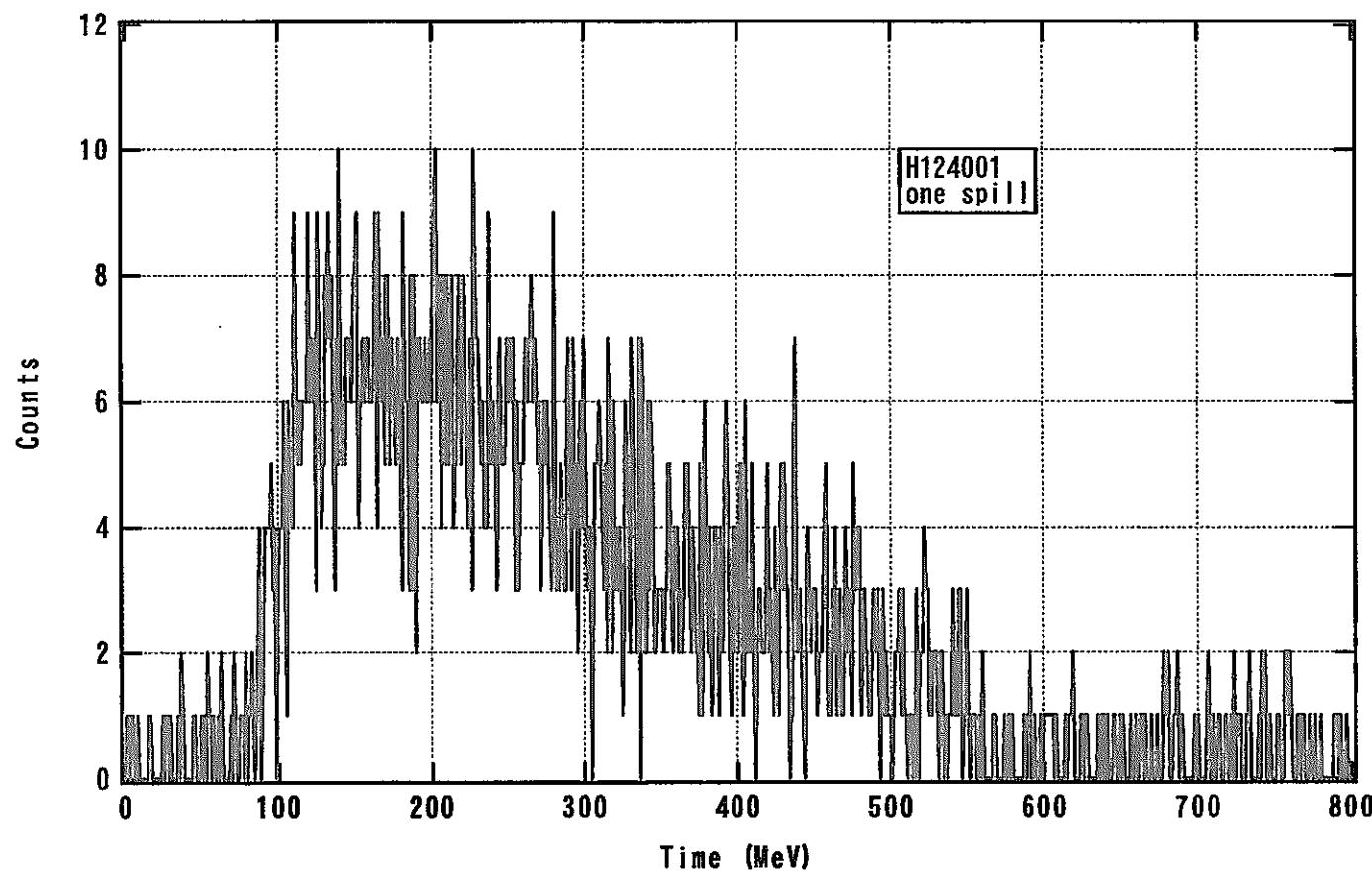


図 2. 2. 2 (a) NaI で測定したビームのパルス波形 (one spill)

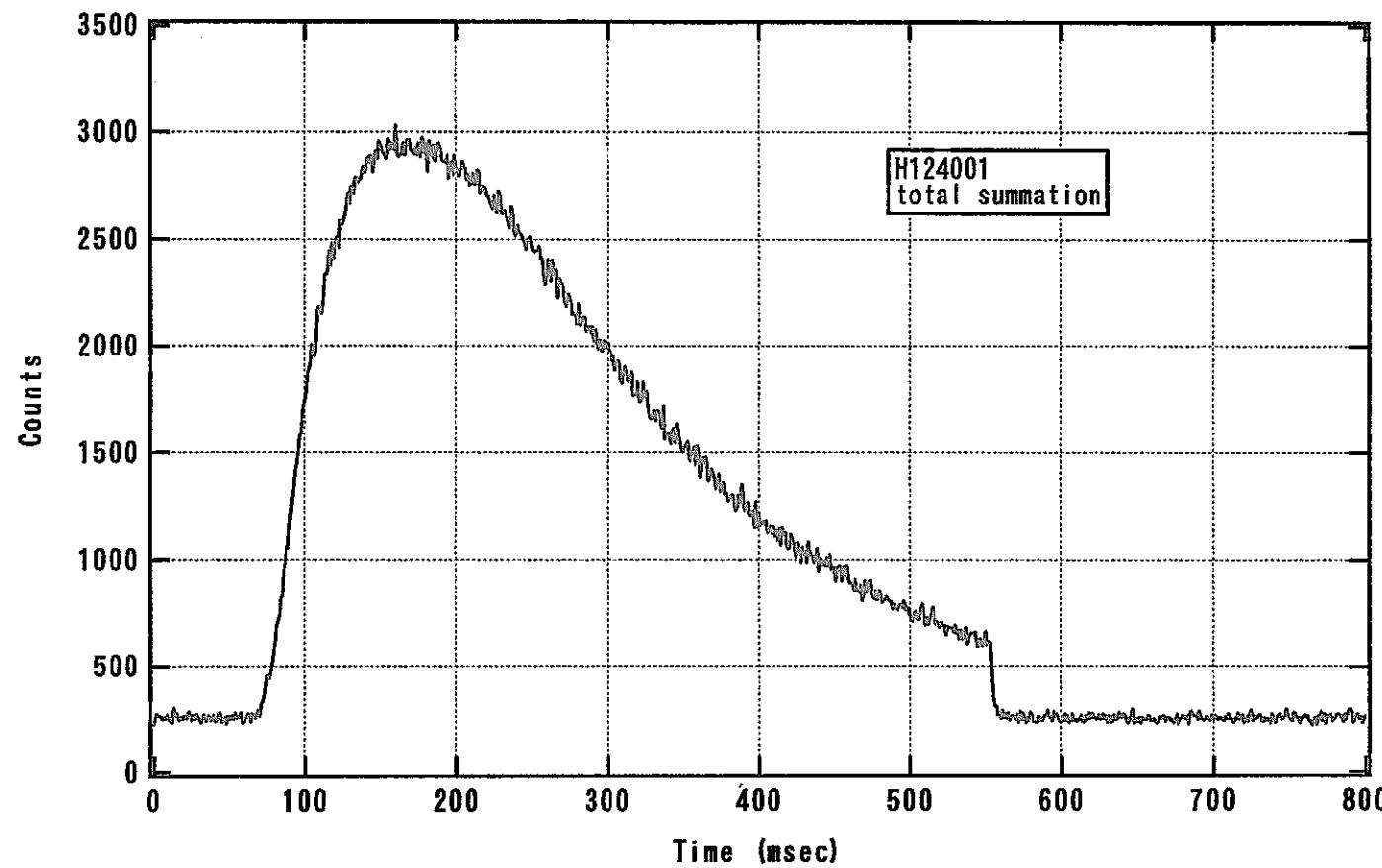


図 2. 2. 2 (b) NaI で測定したパルス波形 (total spill)

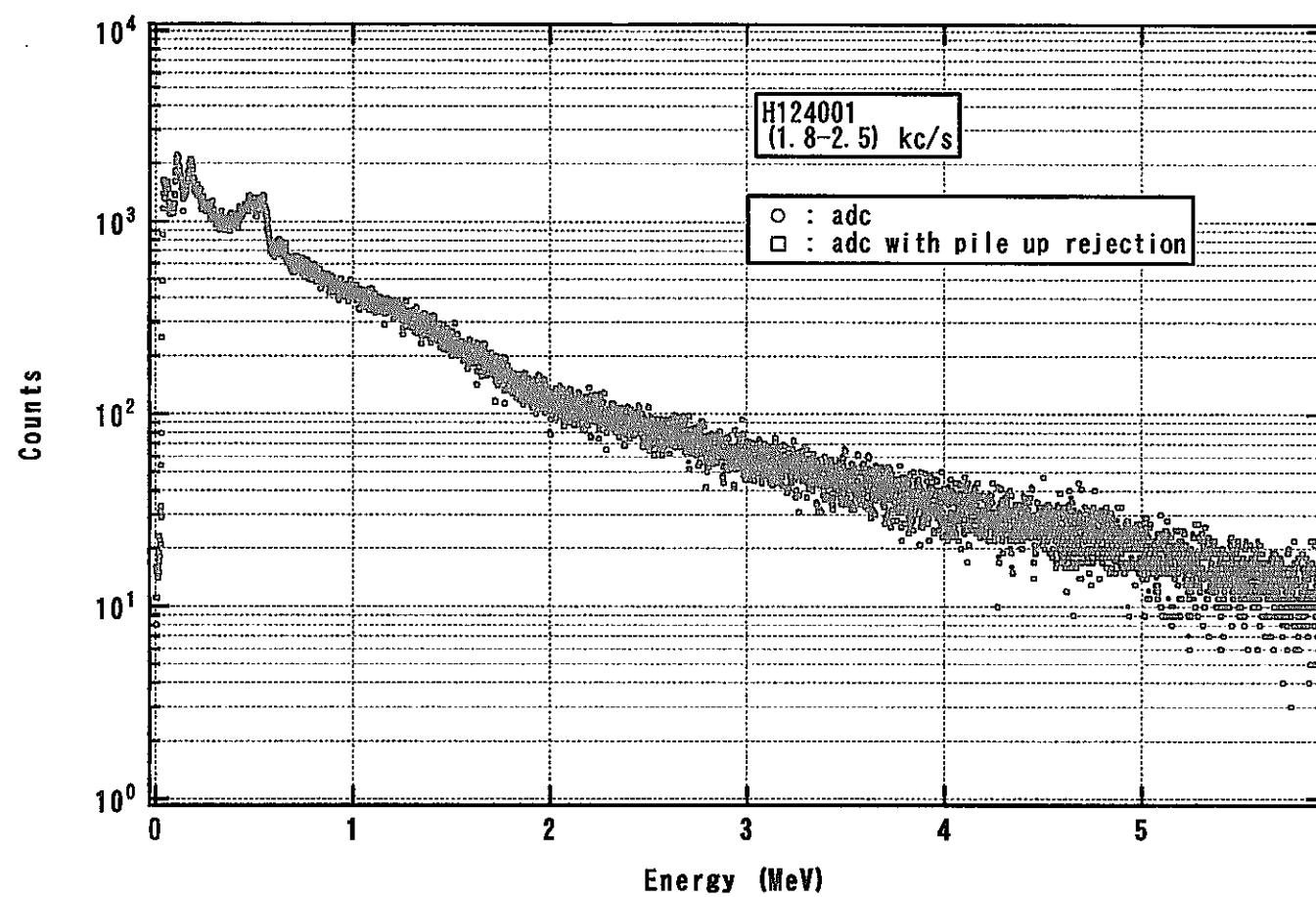


図 2.2.2 (c) NaI で計測したガンマ線のエネルギースペクトル

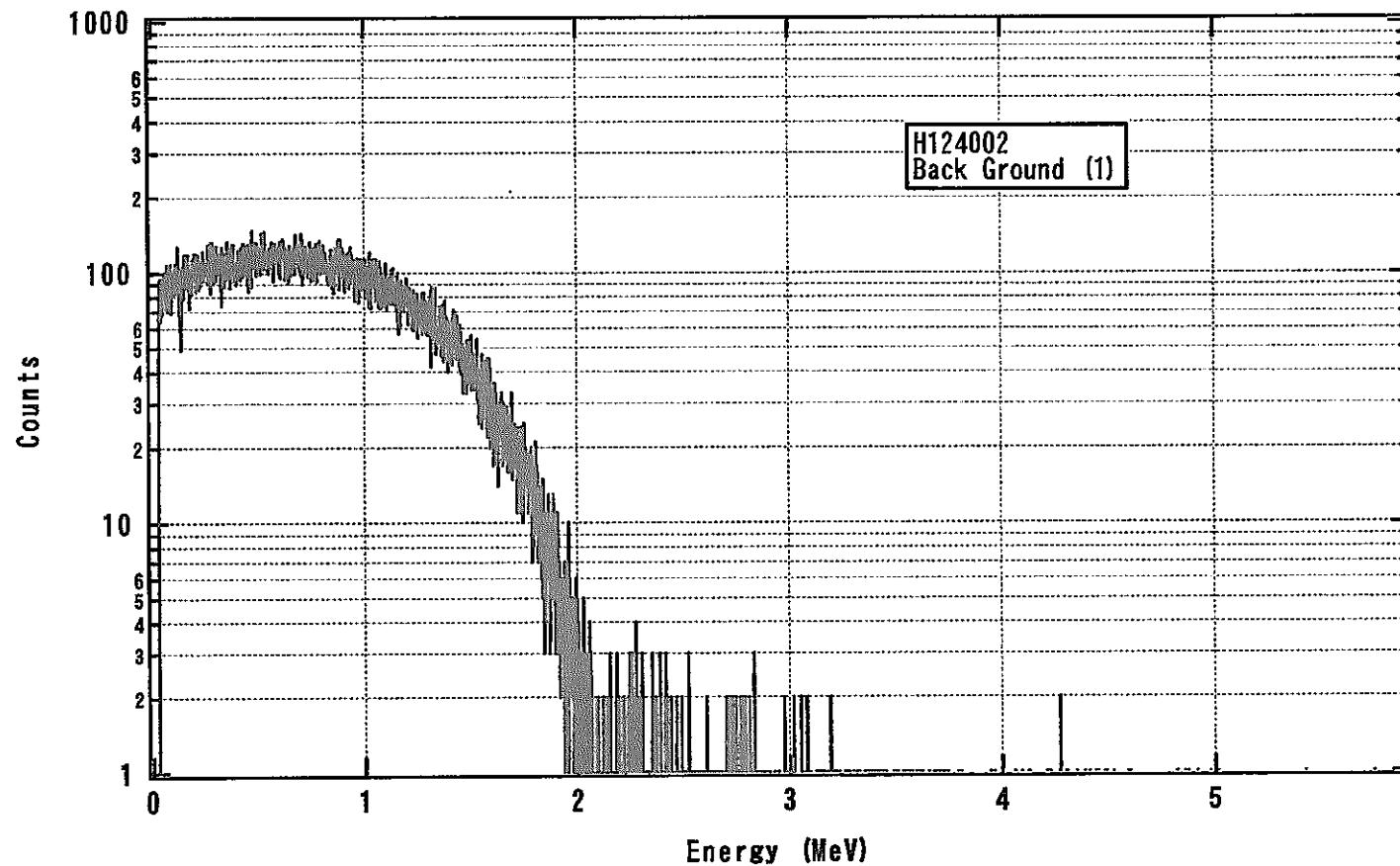


図 2.2.3 NaI で計測したバックグラウンドのエネルギースペクトル

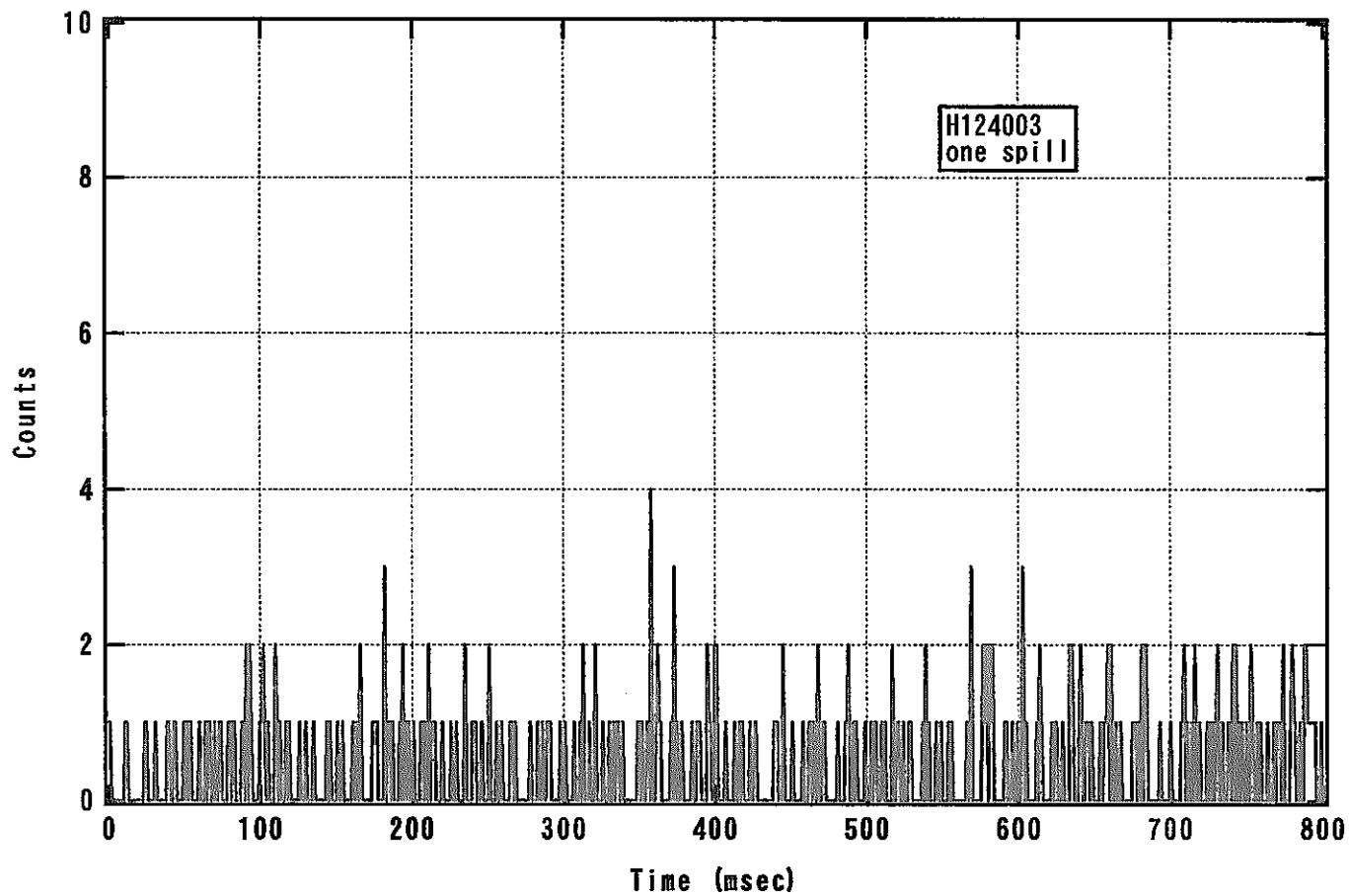


図 2.2.4 (a) NaI で測定したパルス波形 (one spill)

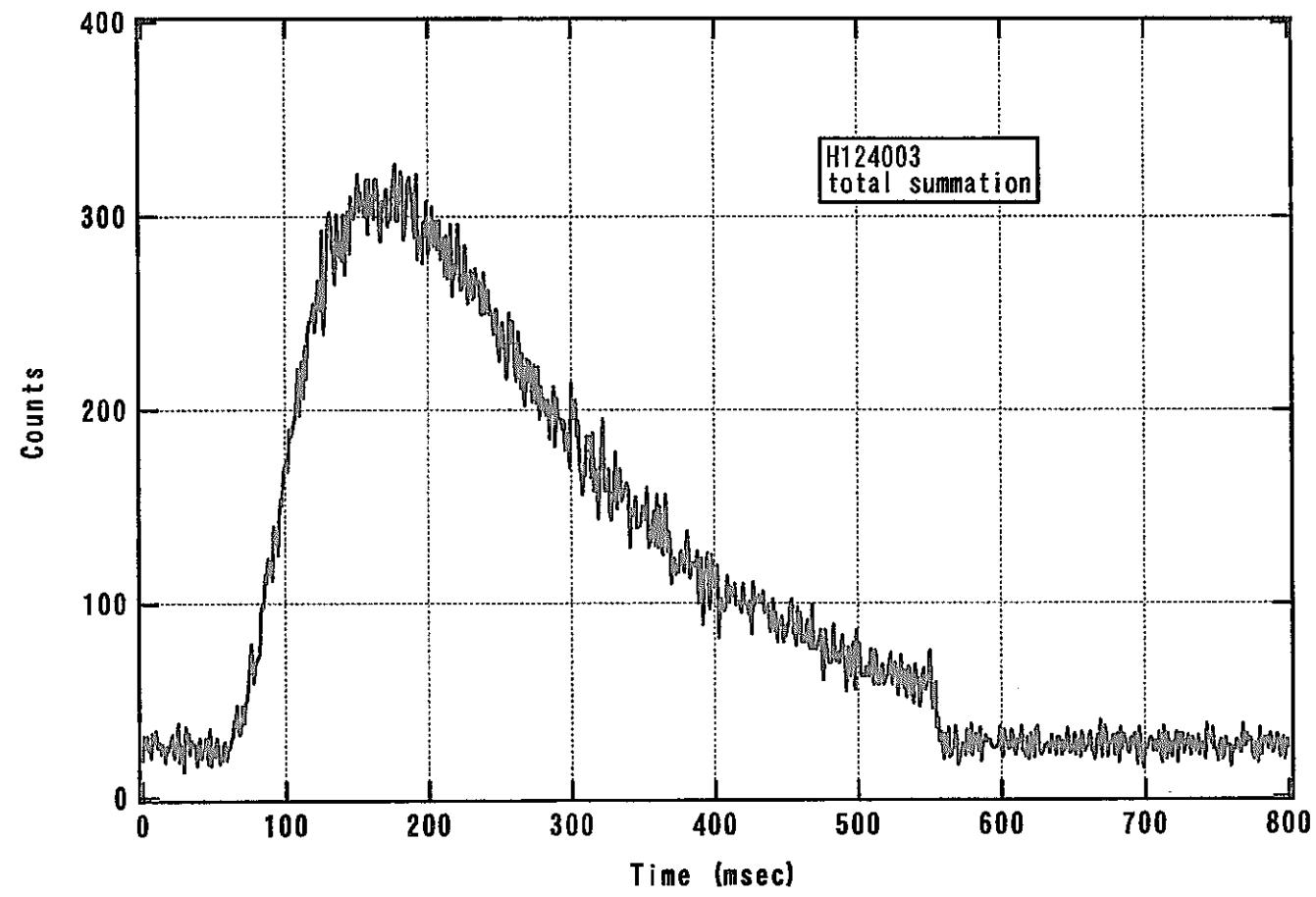


図 2.2.4 (b) NaI で測定したパルス波形 (total spill)

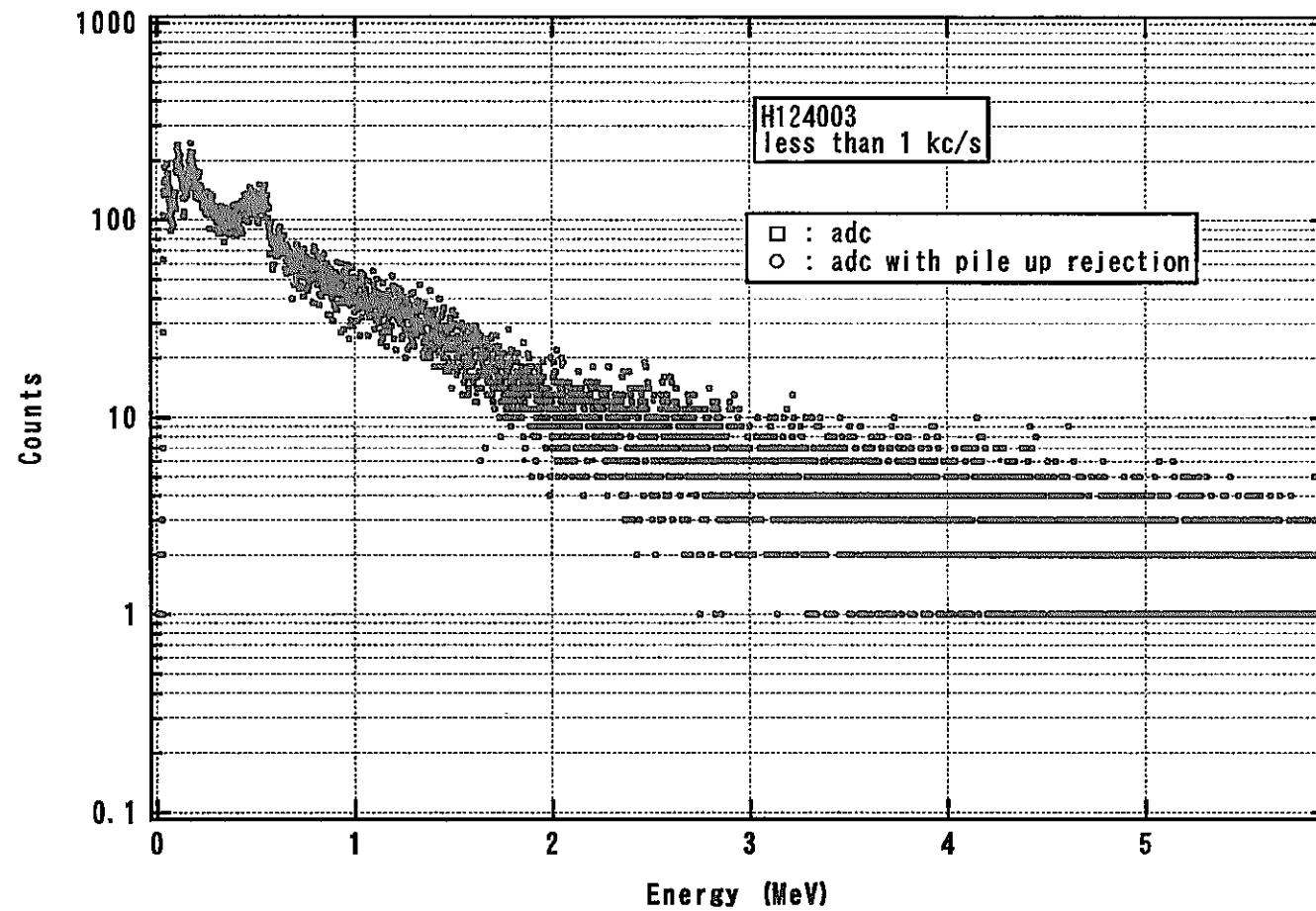


図 2.2.4(c) NaI で計測したガンマ線のエネルギースペクトル

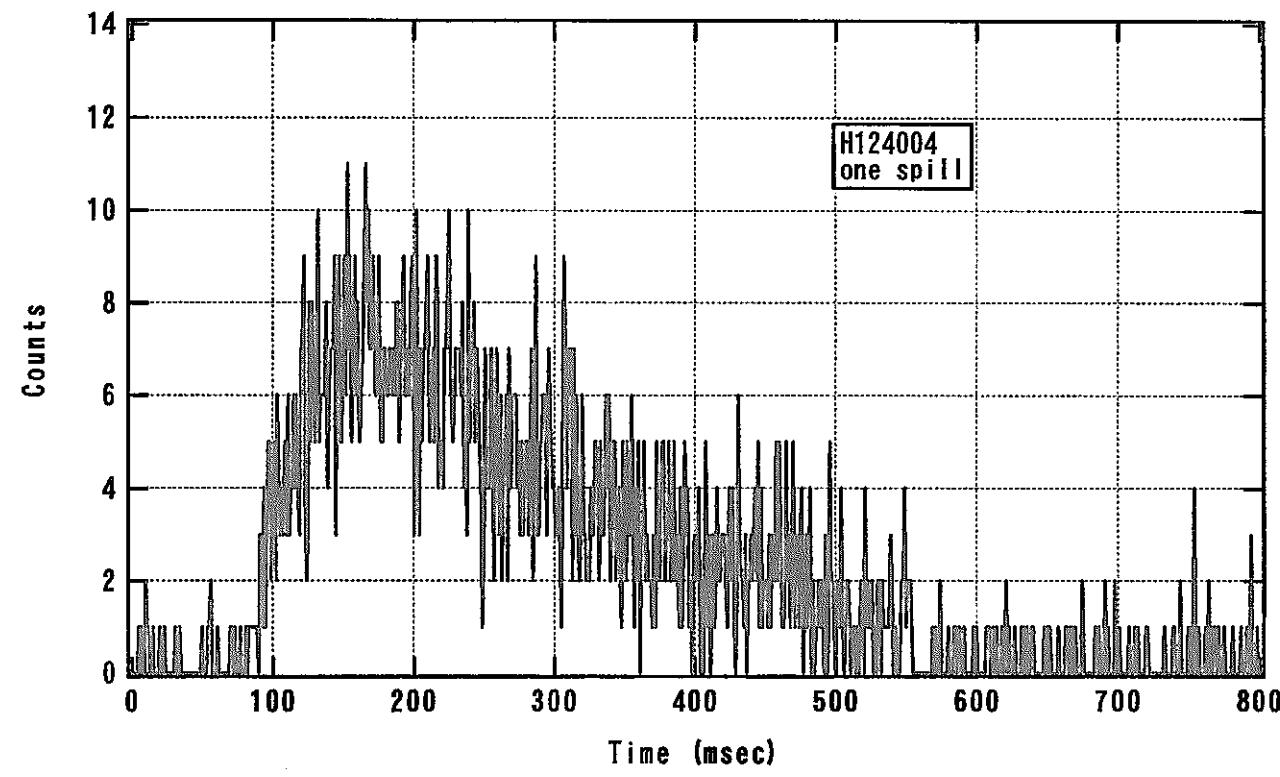


図 2.2.5 (a) NaI で測定したパルス波形 (one spill)

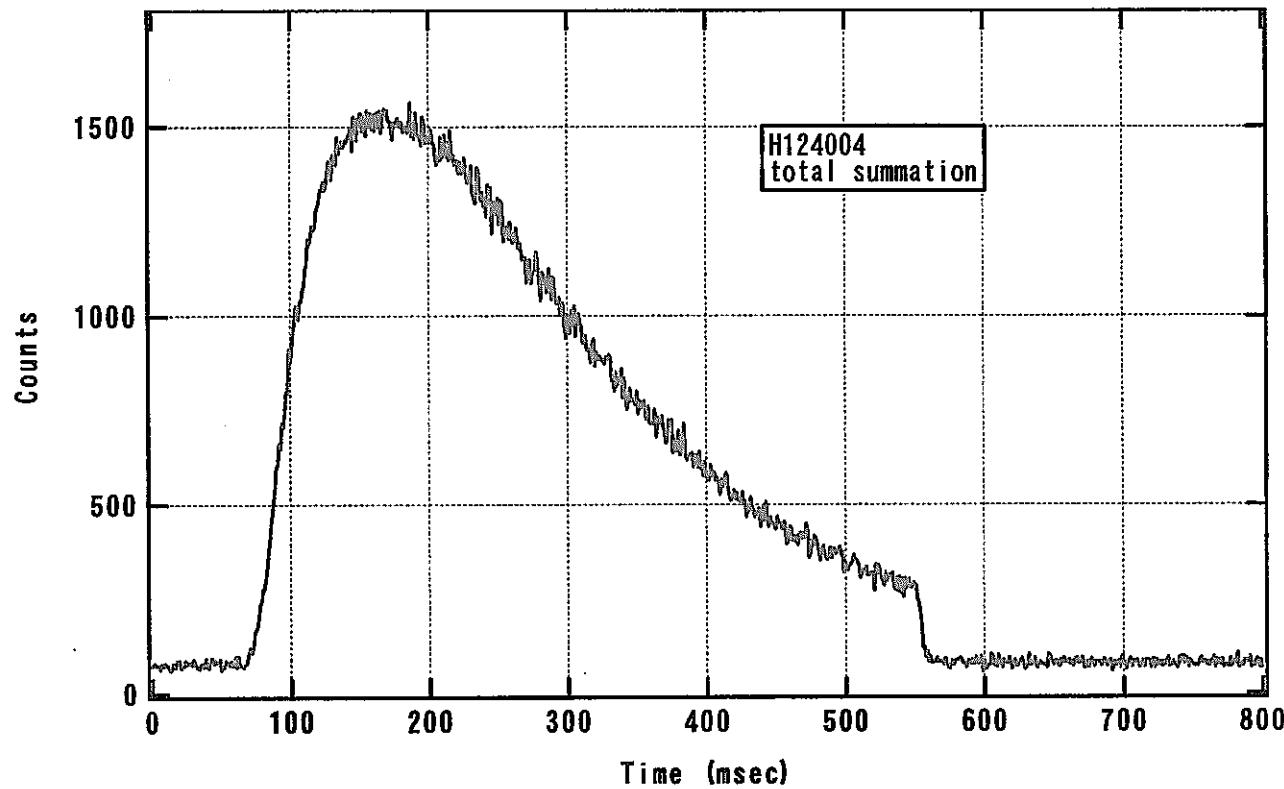


図 2.2.5 (b) NaI で測定したパルス波形 (total spill)

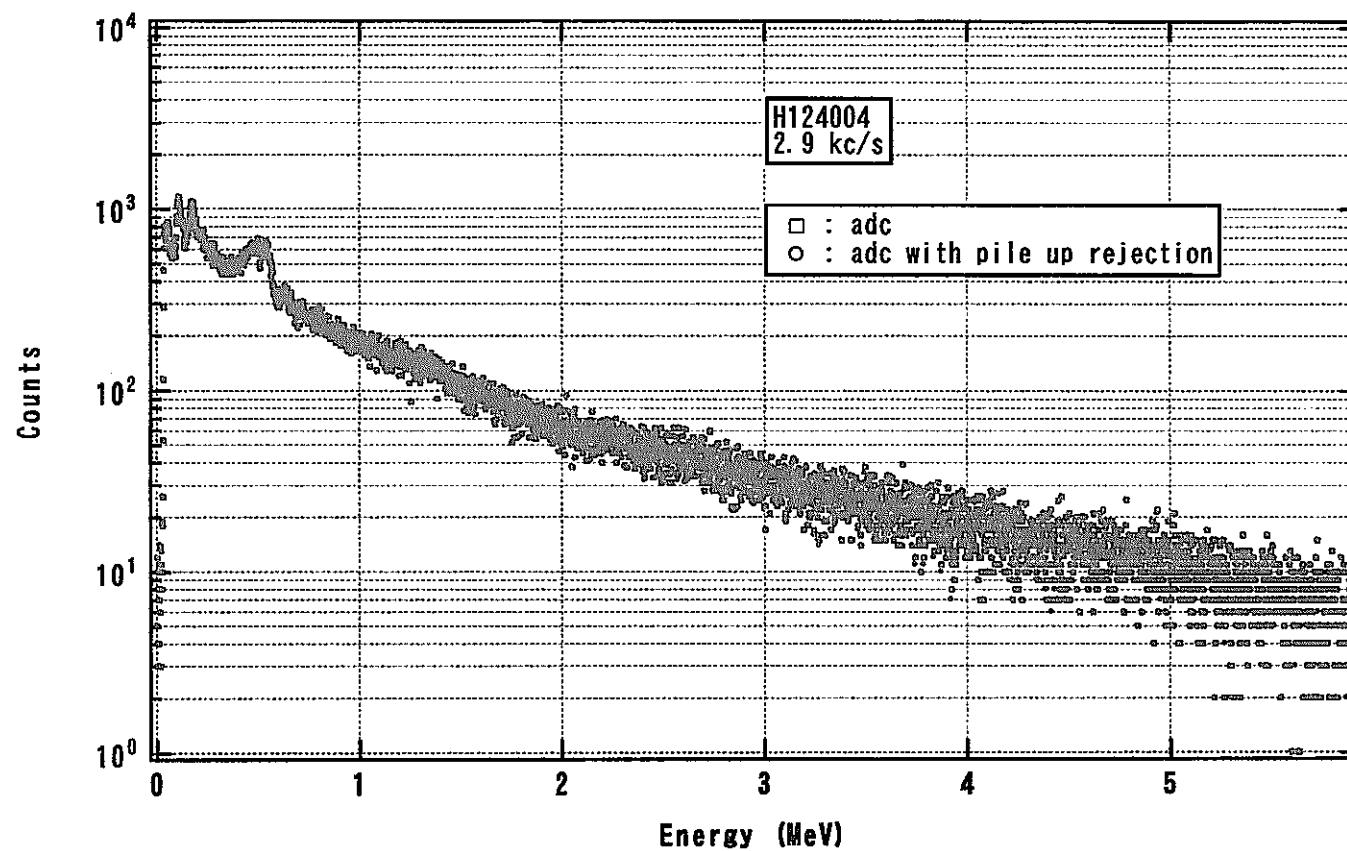


図 2.2.5 (c) NaI で計測したガンマ線のエネルギースペクトル

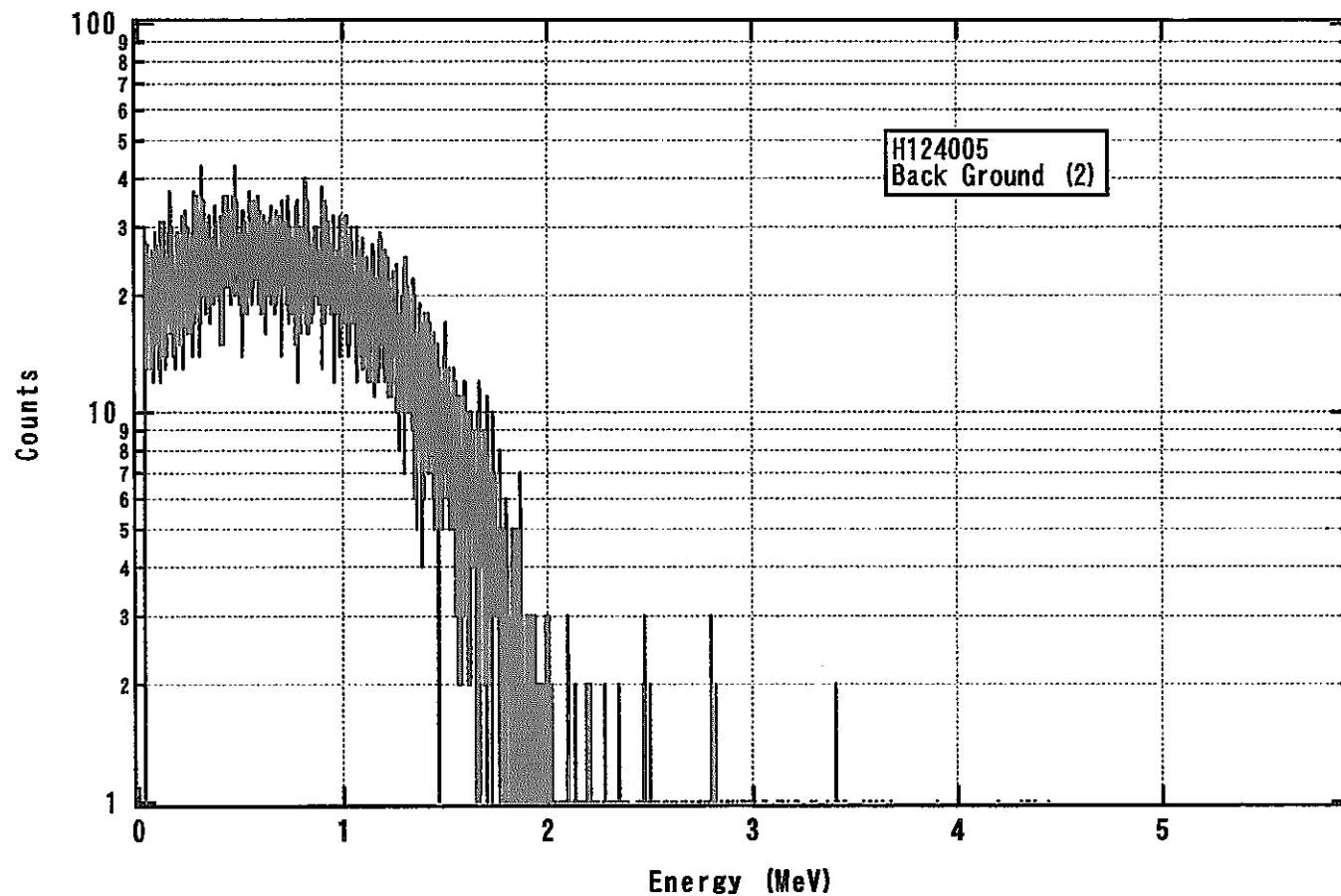


図 2.2.6 NaI で計測したバックグラウンドのエネルギースペクトル

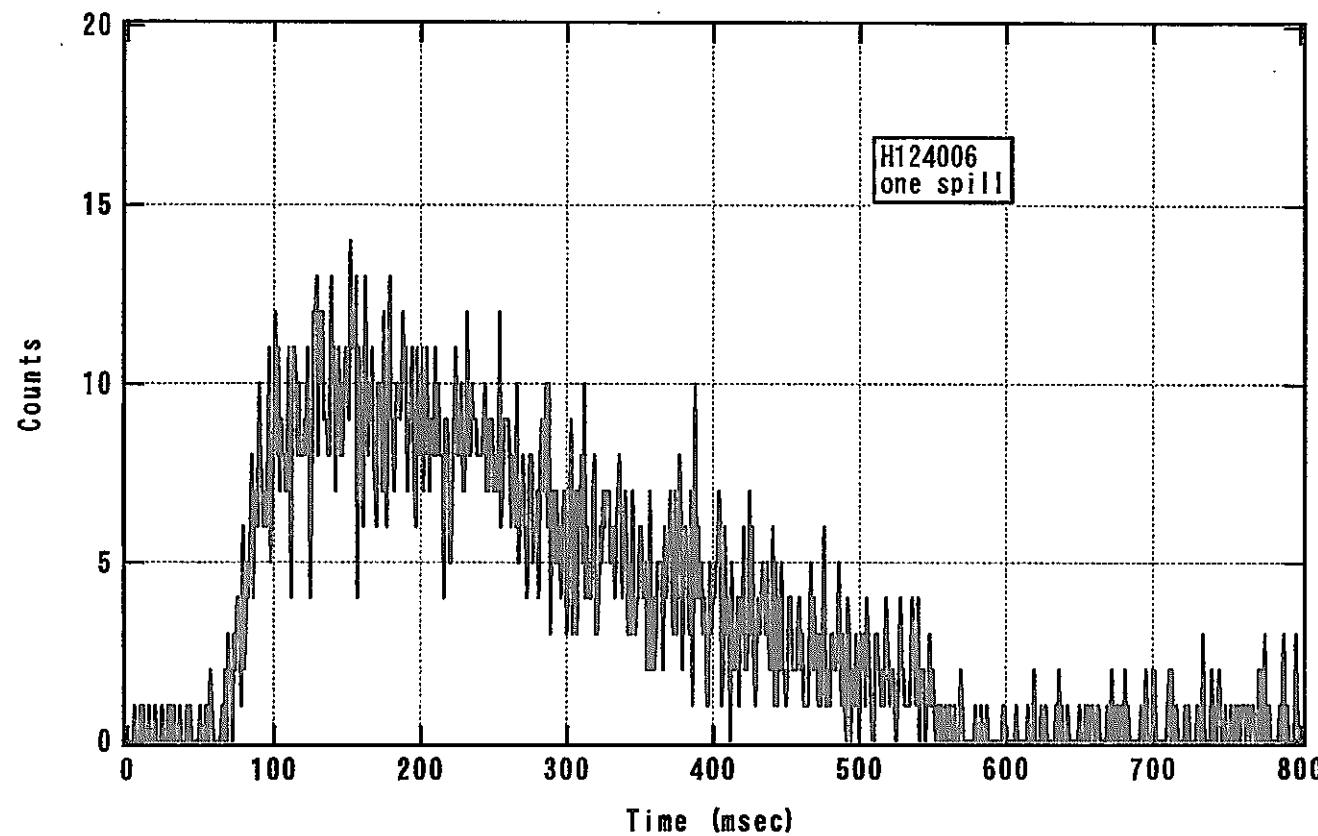


図 2.2.7 (a) NaI で測定したパルス波形 (one spill)

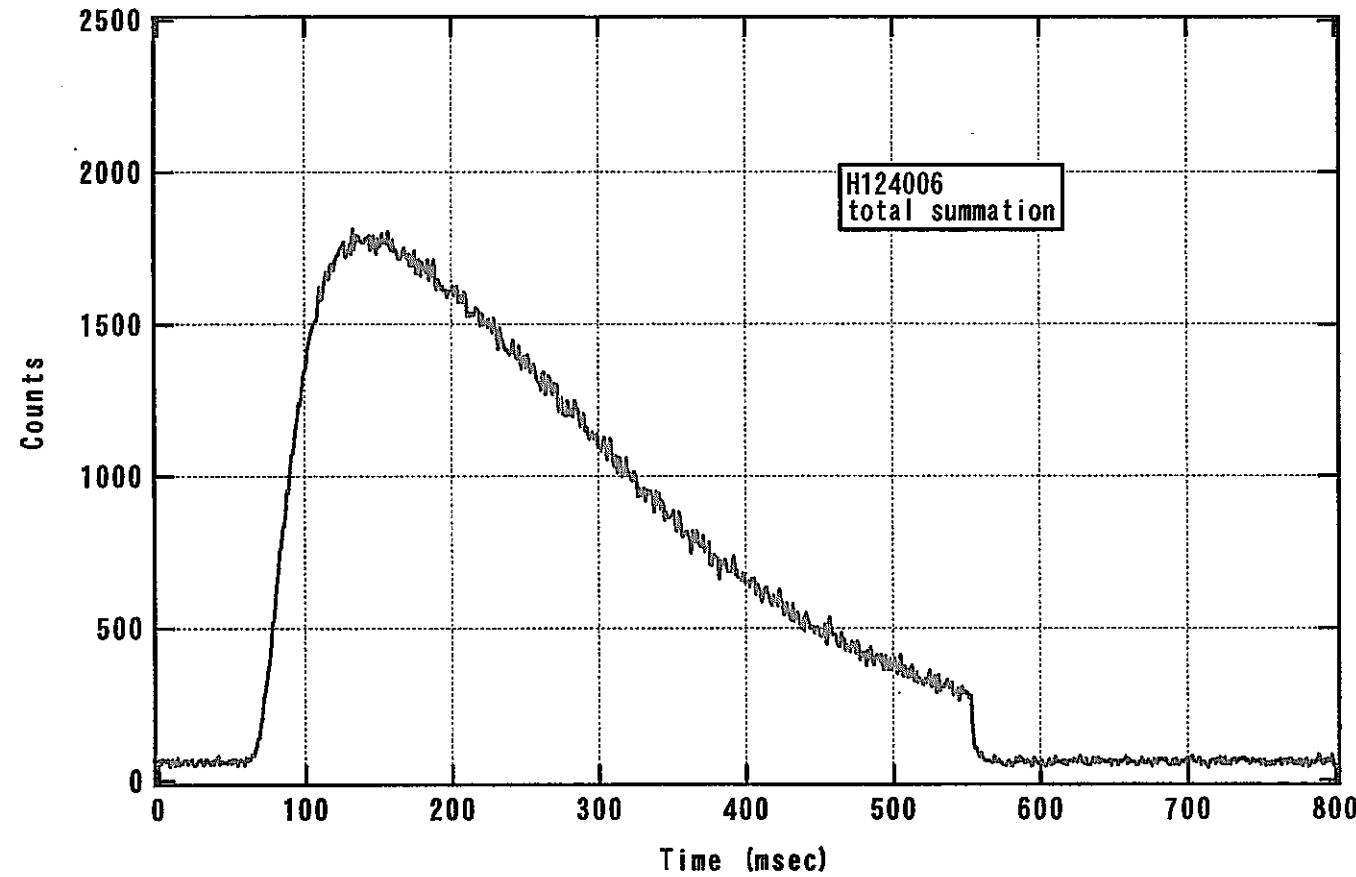


図 2.2.7 (b) NaI で測定したパルス波形 (total spill)

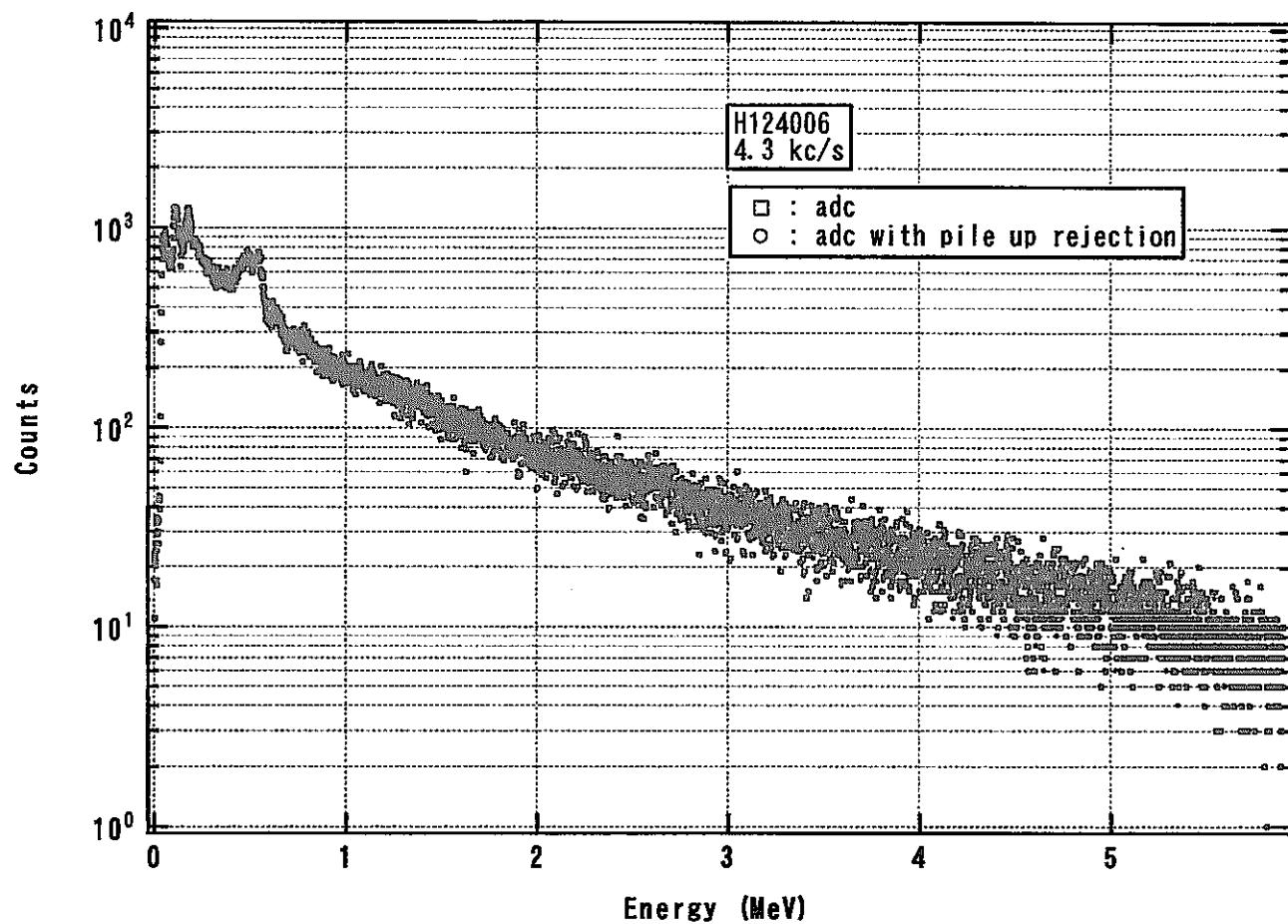


図 2.2.7 (c) NaI で計測したガンマ線のエネルギースペクトル

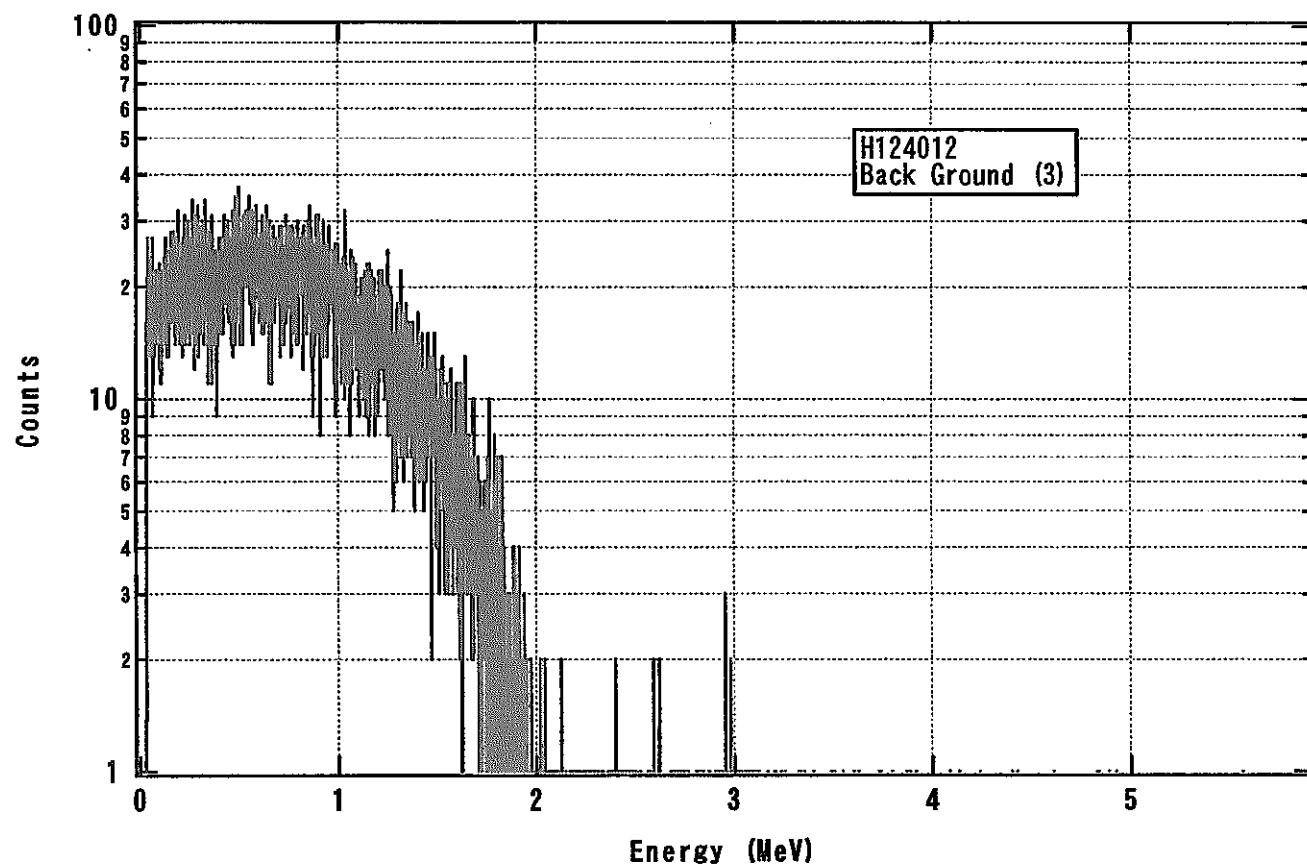


図 2.2.8 NaI で計測したバックグラウンドのエネルギースペクトル

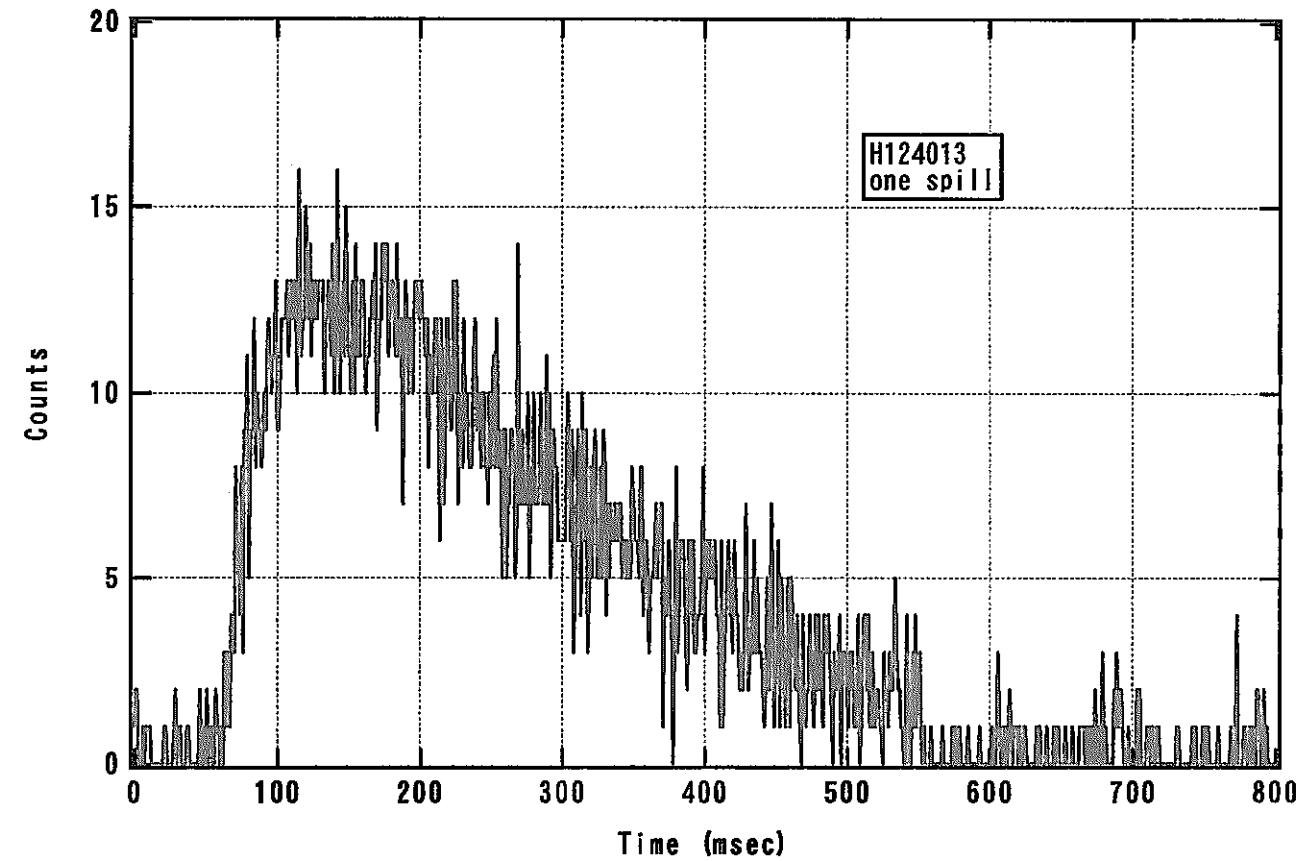


図 2. 2. 9 (a) NaI で測定したパルス波形 (one spill)

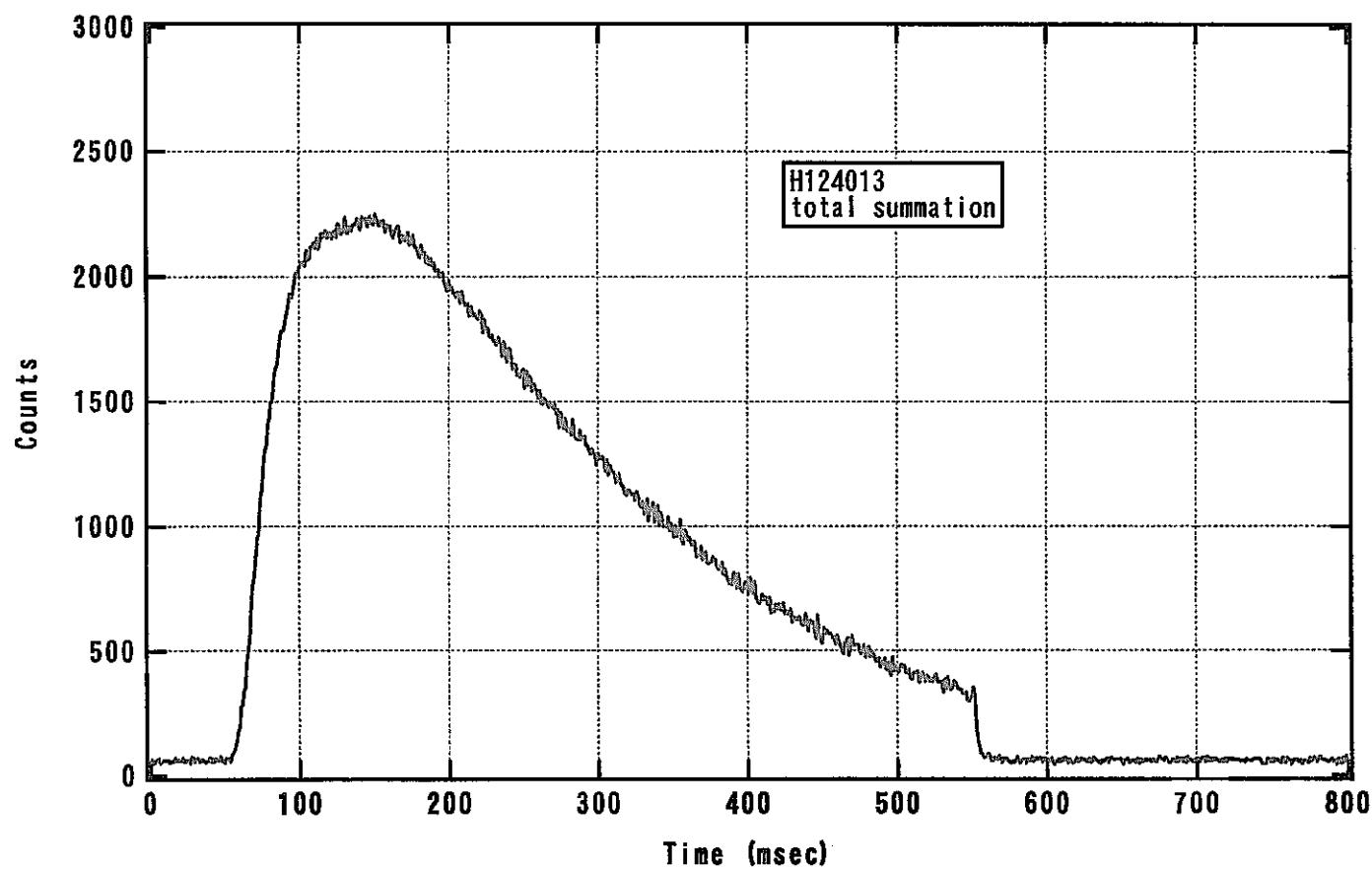


図 2.2.9 (b) NaI で測定したパルス波形 (total spill)

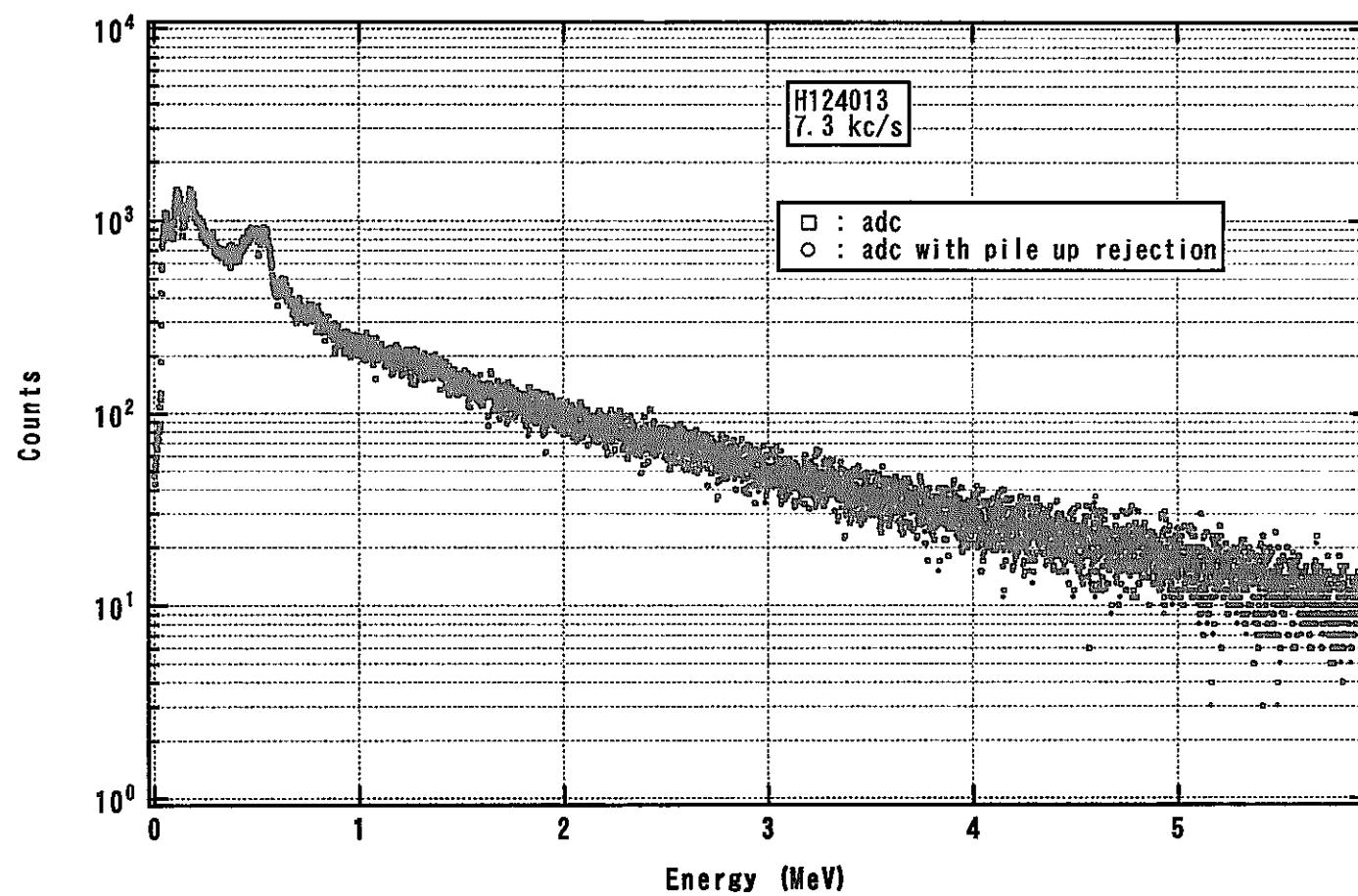


図 2.2.9 (c) NaI で計測したガンマ線のエネルギースペクトル

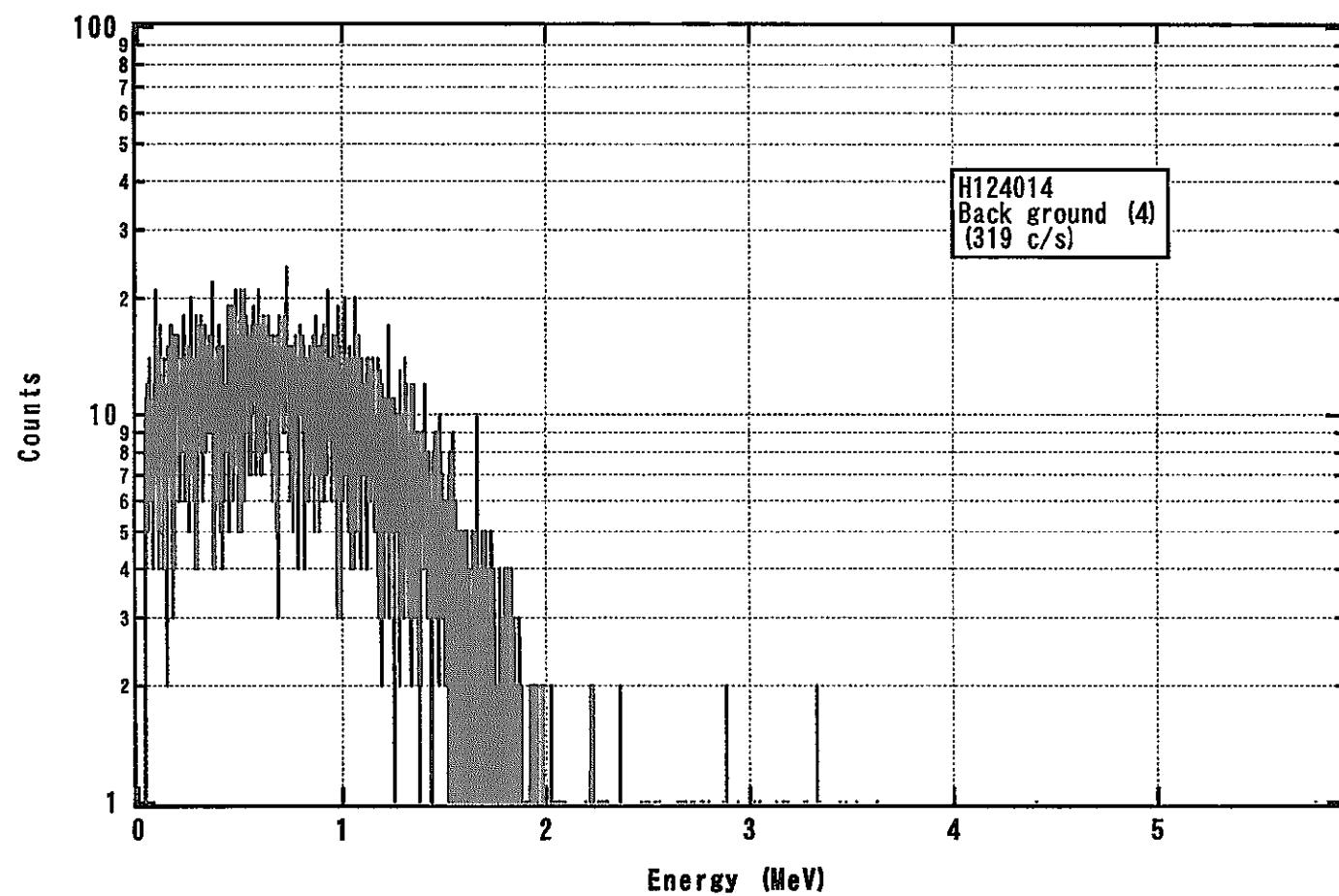


図 2.2.10 NaI で計測したバックグラウンドのエネルギースペクトル

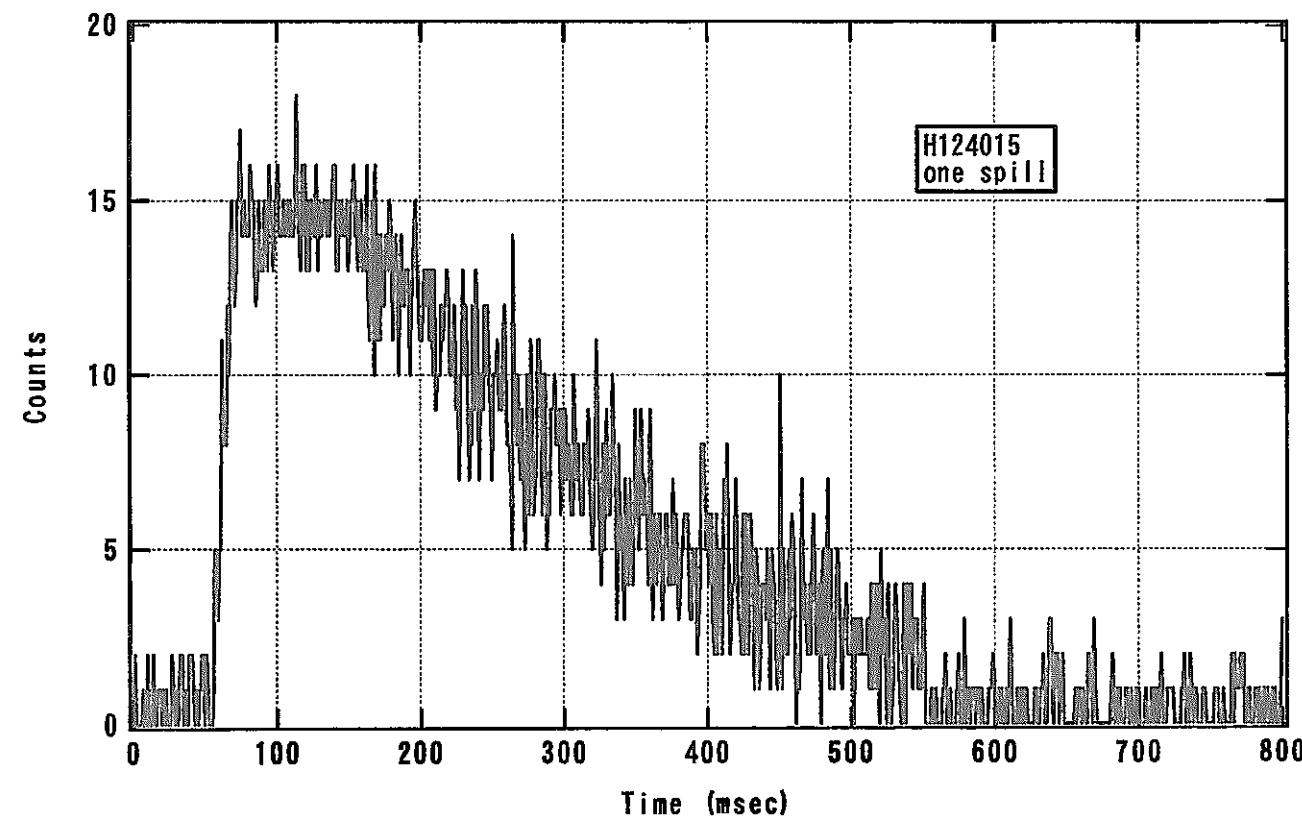


図 2. 2. 11 (a) NaI で測定したパルス波形 (one spill)

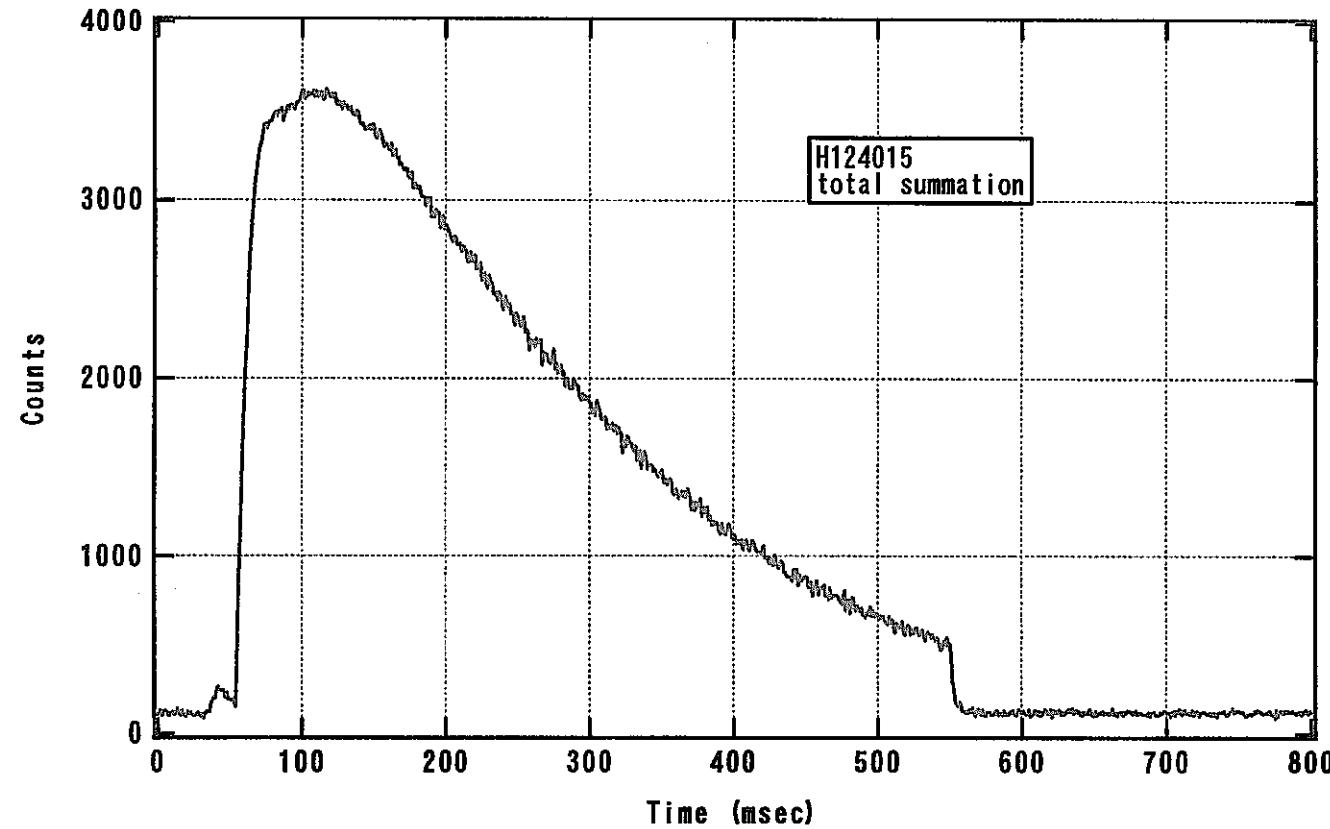


図 2. 2. 11 (b) NaI で測定したパルス波形 (total spill)

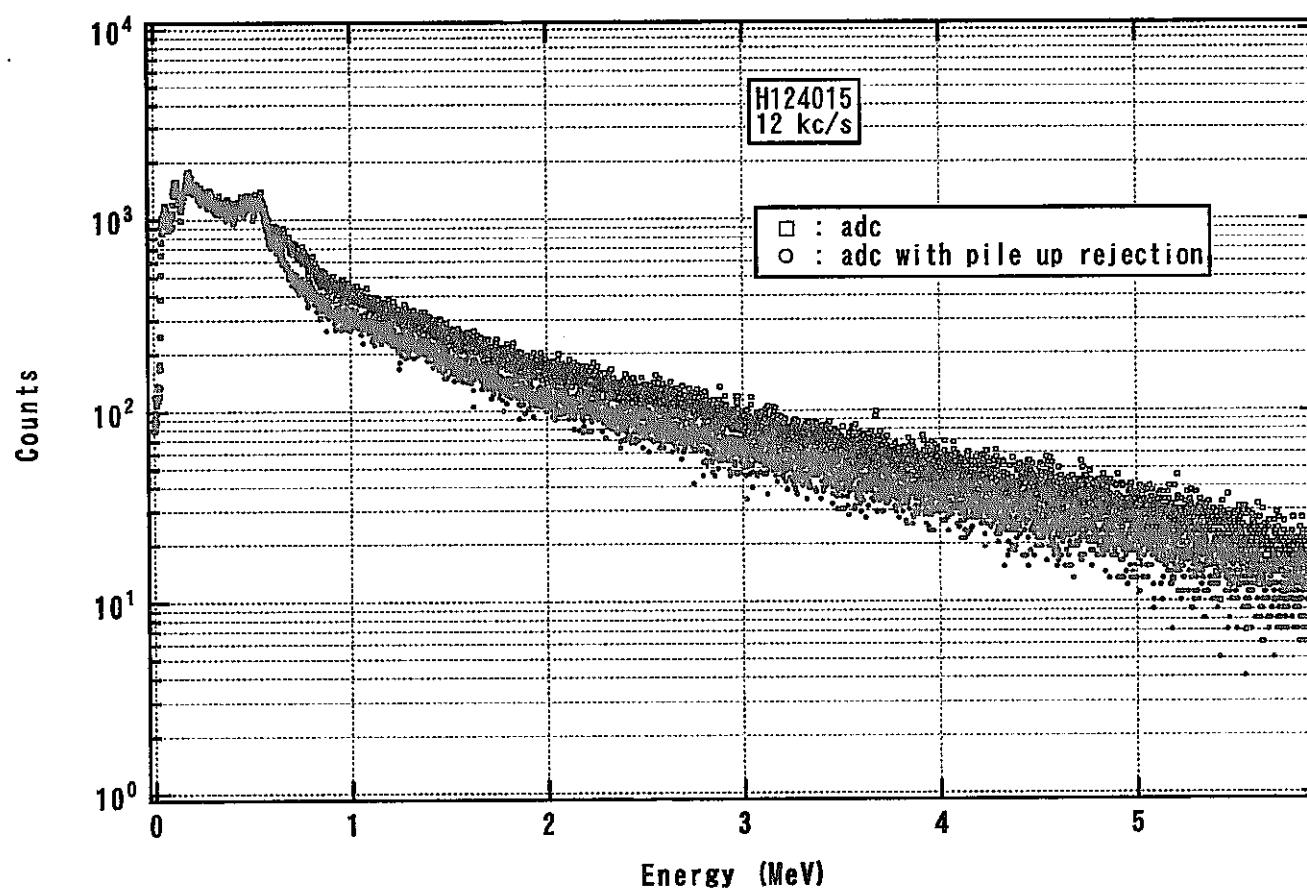


図 2. 2. 11 (c) NaI で計測したガンマ線のエネルギースペクトル

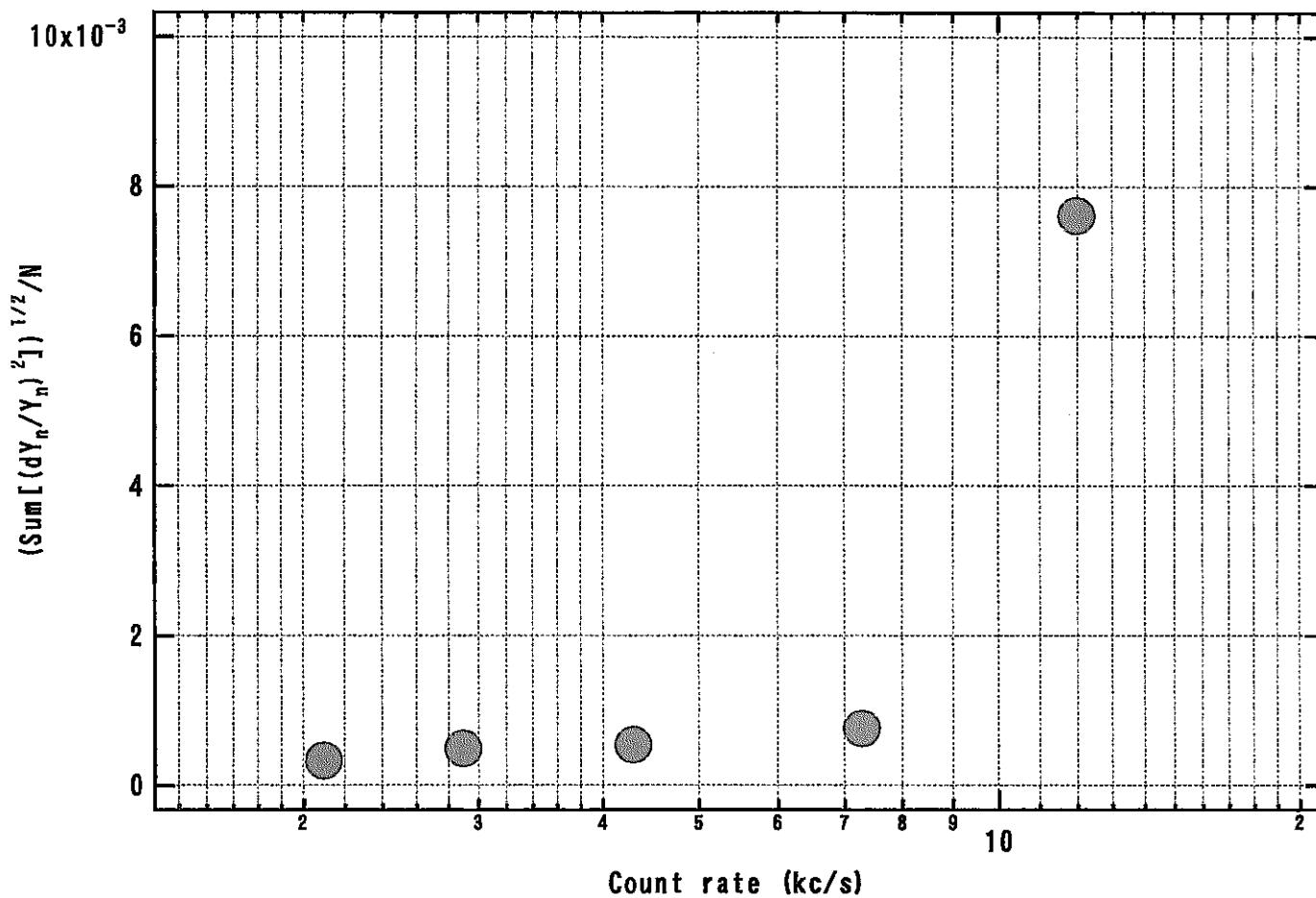


図 2.2.12 パイロアップ影響

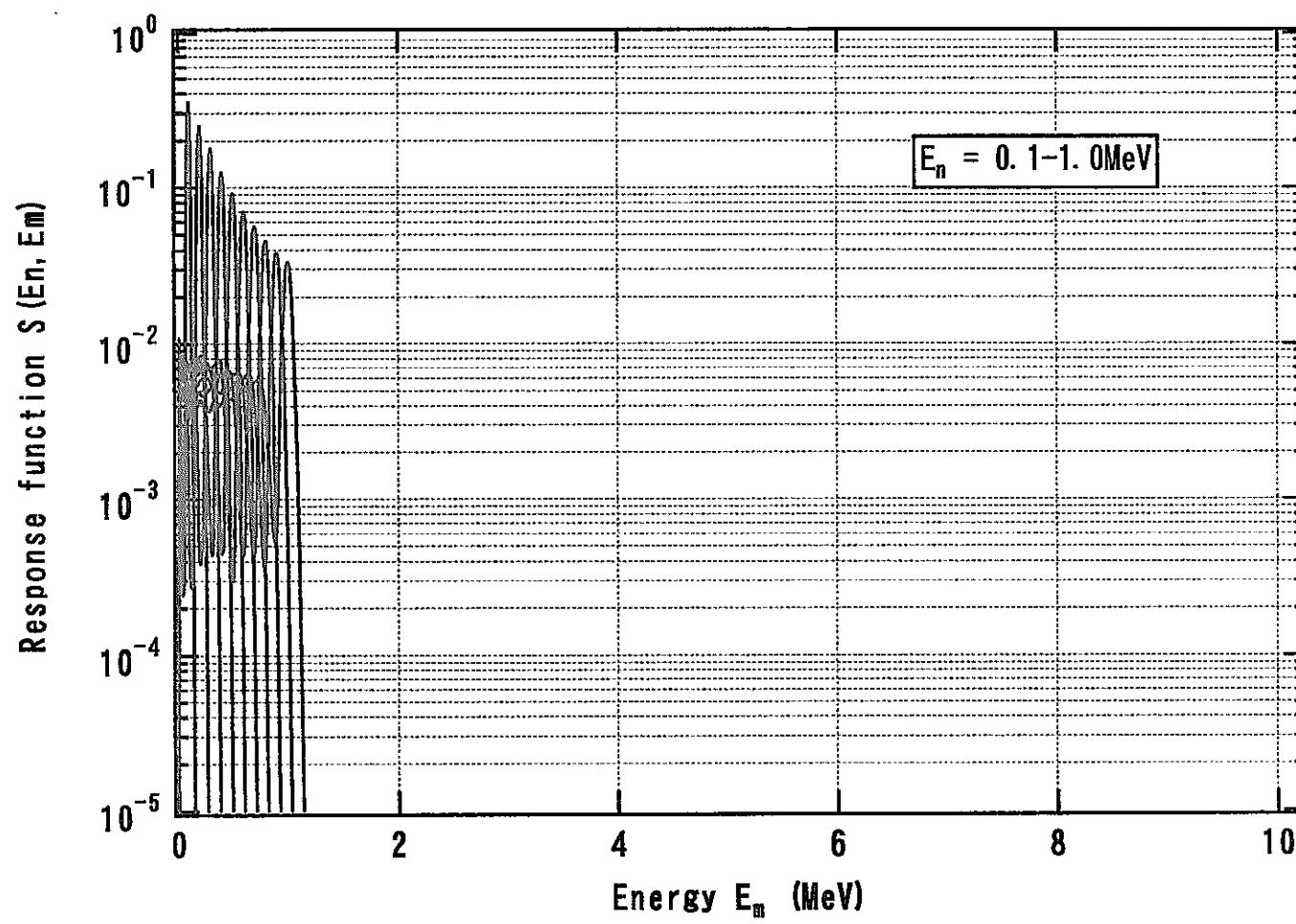


図 2.2.13 EGS4 を用いて計算された応答関数（入射ガンマ線エネルギー；0.1～1.0 MeV）

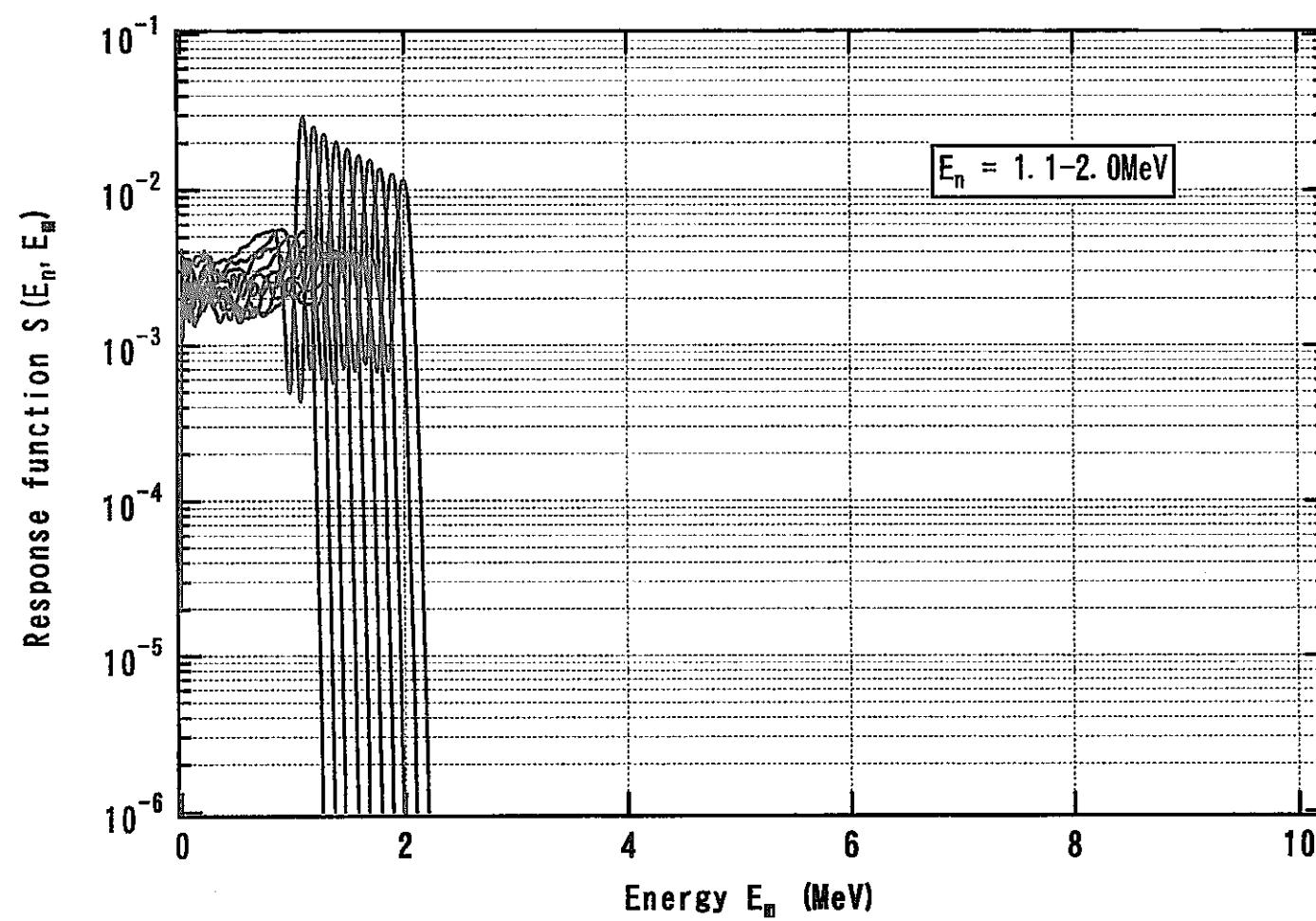


図 2.2.14 EGS4 を用いて計算された応答関数（入射ガンマ線エネルギー；1.1~2.0 MeV）

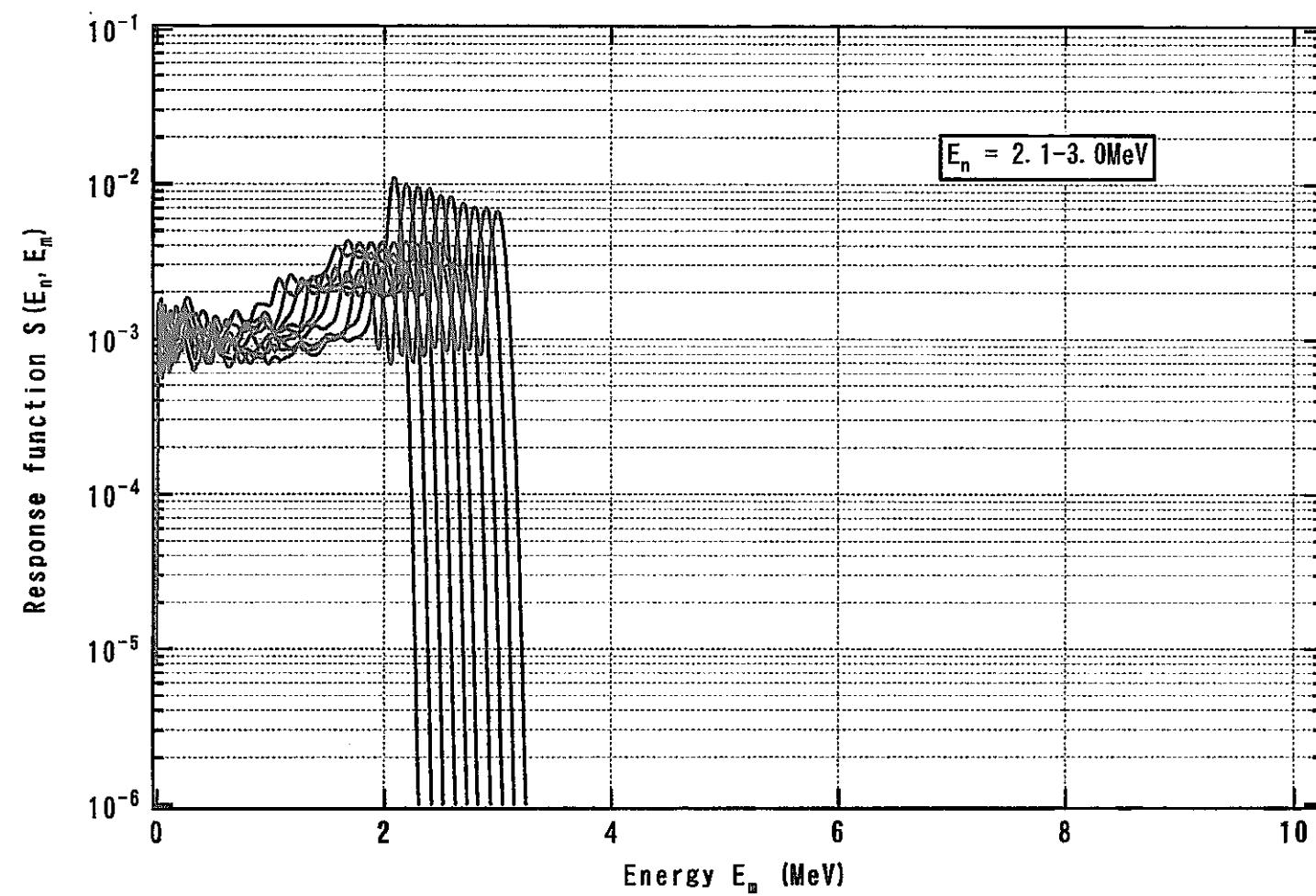


図 2.2.15 EGS4 を用いて計算された応答関数（入射ガンマ線エネルギー；2.1～3.0 MeV）

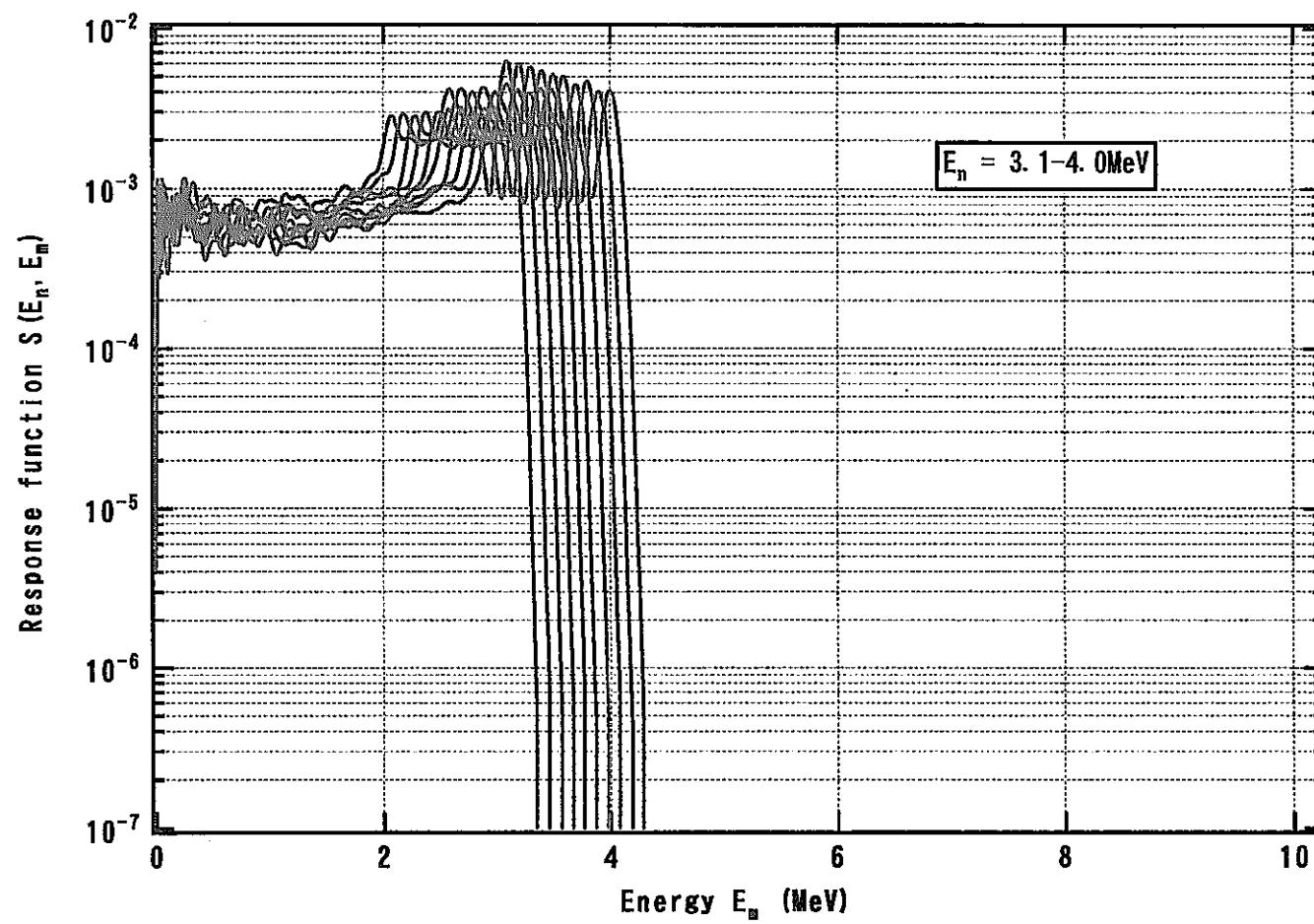


図 2.2.16 EGS4 を用いて計算された応答関数（入射ガンマ線エネルギー；3.1～4.0 MeV）

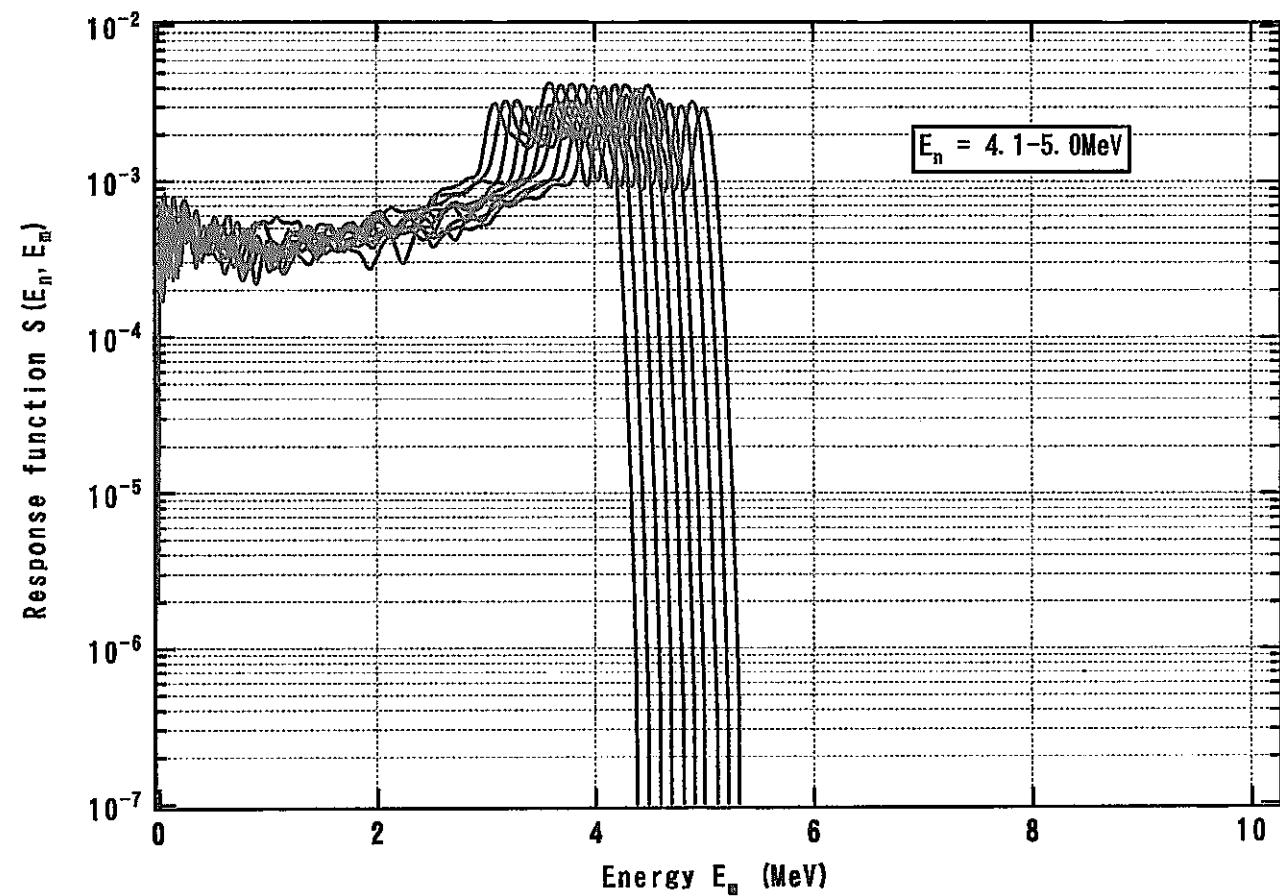


図 2.2.17 EGS4 を用いて計算された応答関数（入射ガンマ線エネルギー；4.1～5.0 MeV）

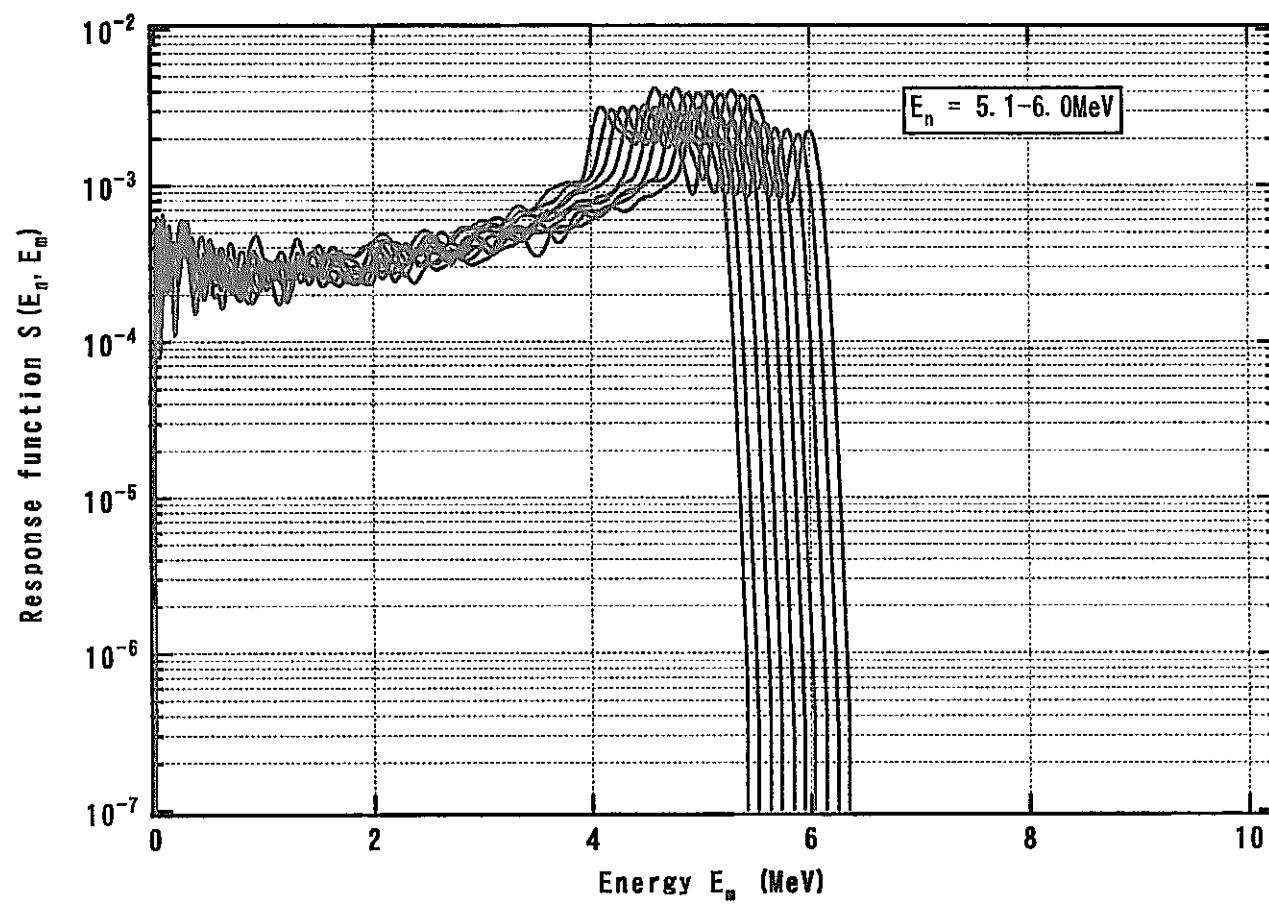


図 2.2.18 EGS4 を用いて計算された応答関数（入射ガンマ線エネルギー；5.1～6.0 MeV）

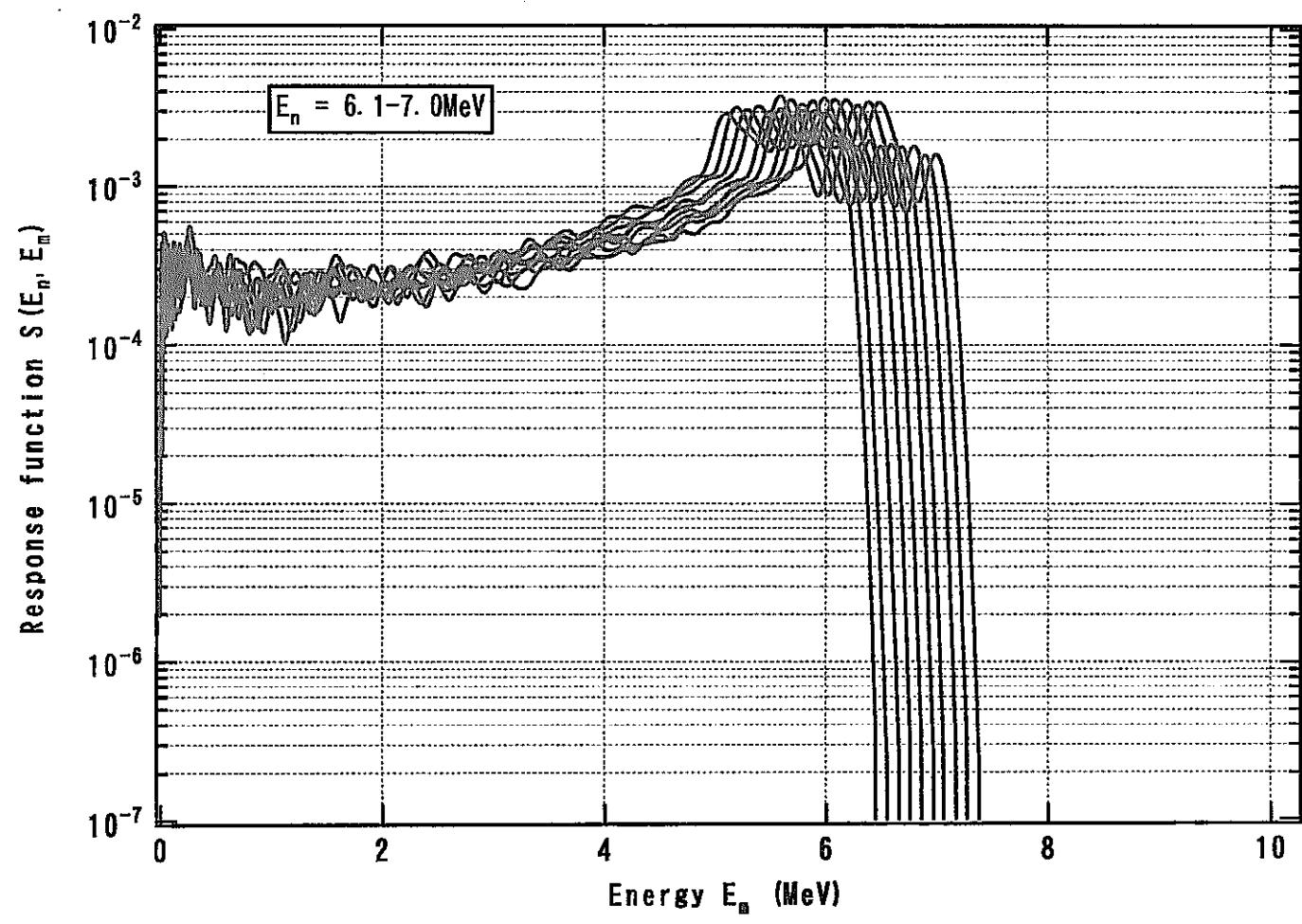


図 2.2.19 EGS4 を用いて計算された応答関数（入射ガンマ線エネルギー；6.1～7.0 MeV）

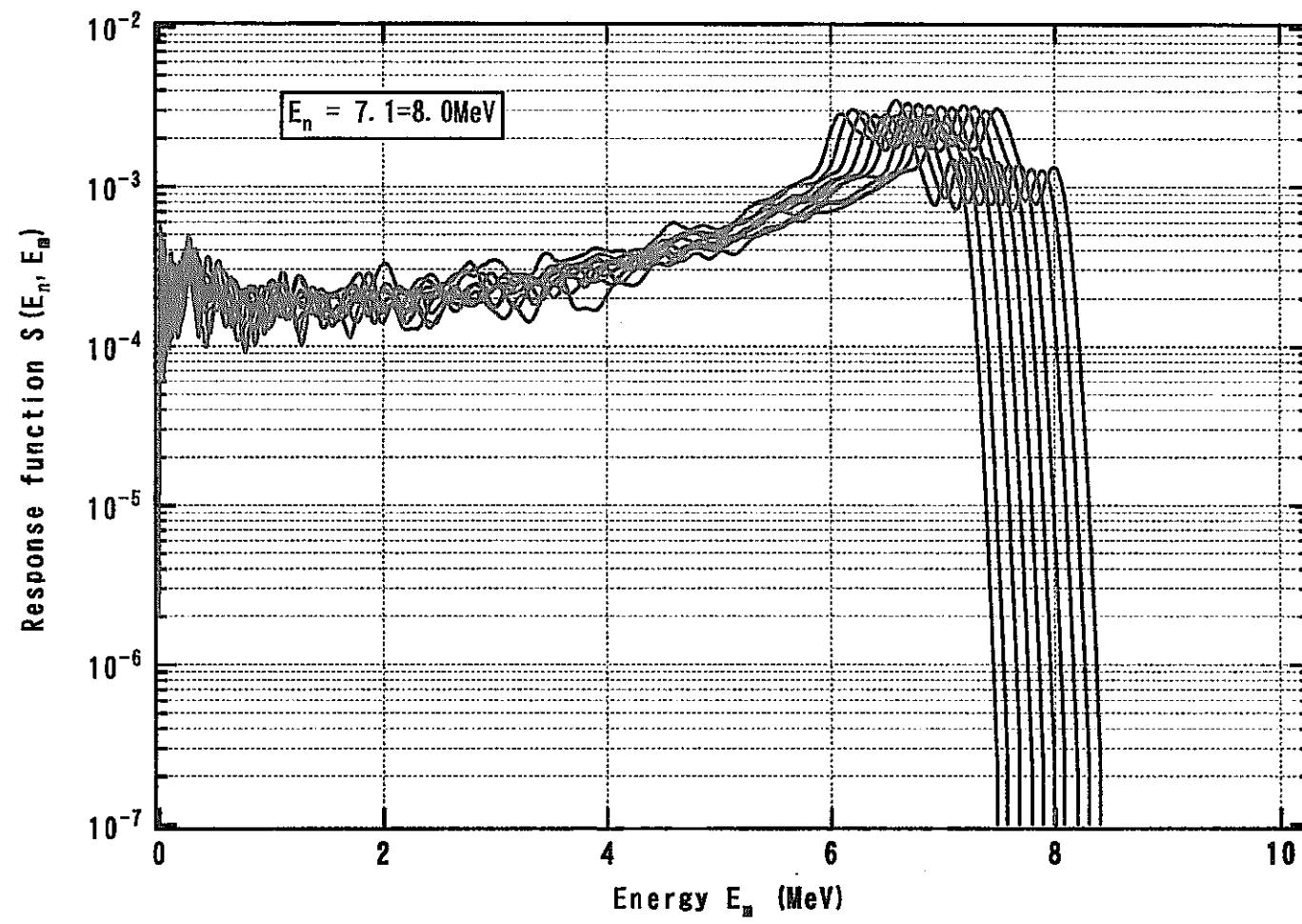


図 2.2.20 EGS4 を用いて計算された応答関数（入射ガンマ線エネルギー；7.1～8.0 MeV）

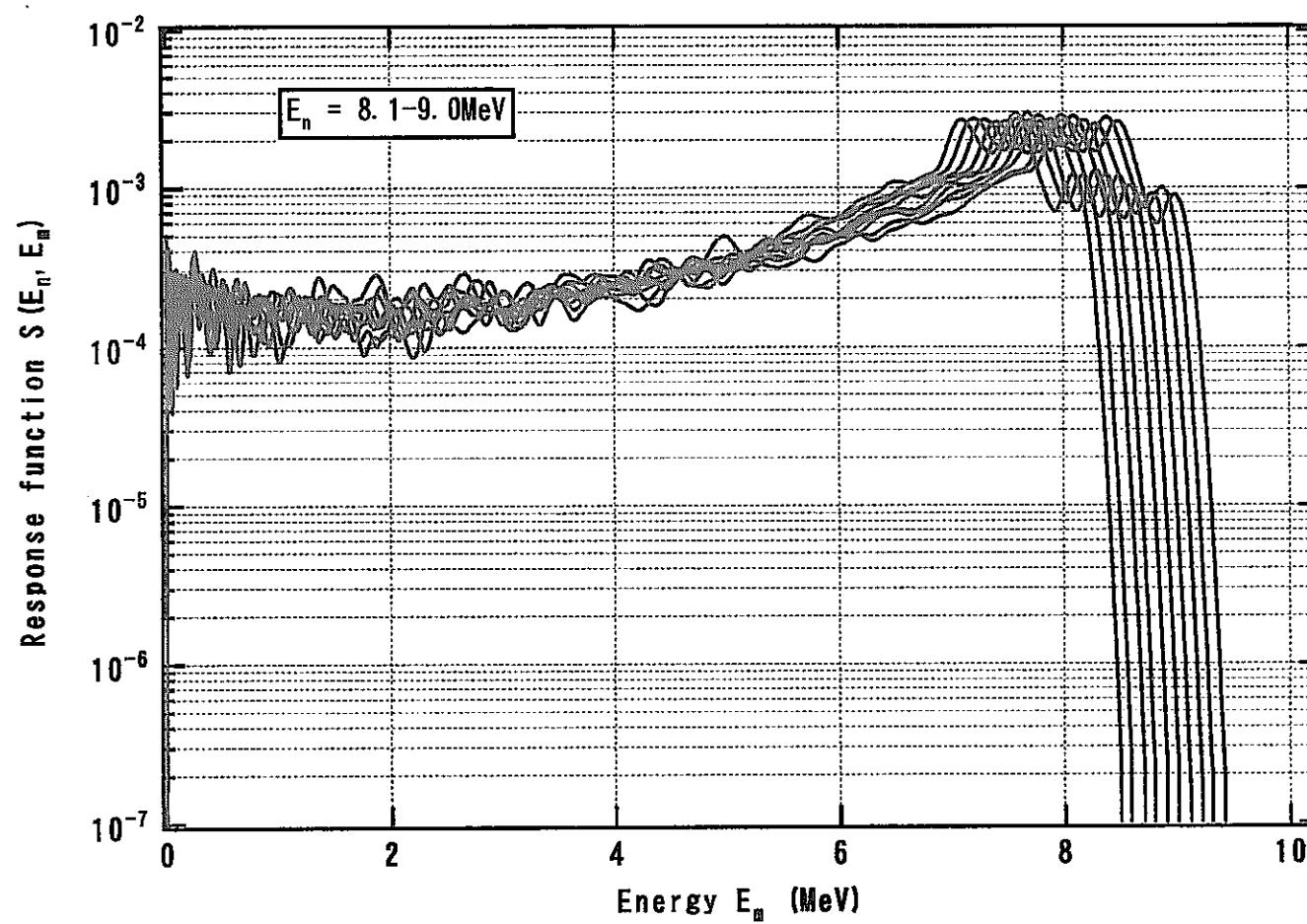


図 2.2.21 EGS4 を用いて計算された応答関数（入射ガンマ線エネルギー；8.1～9.0 MeV）

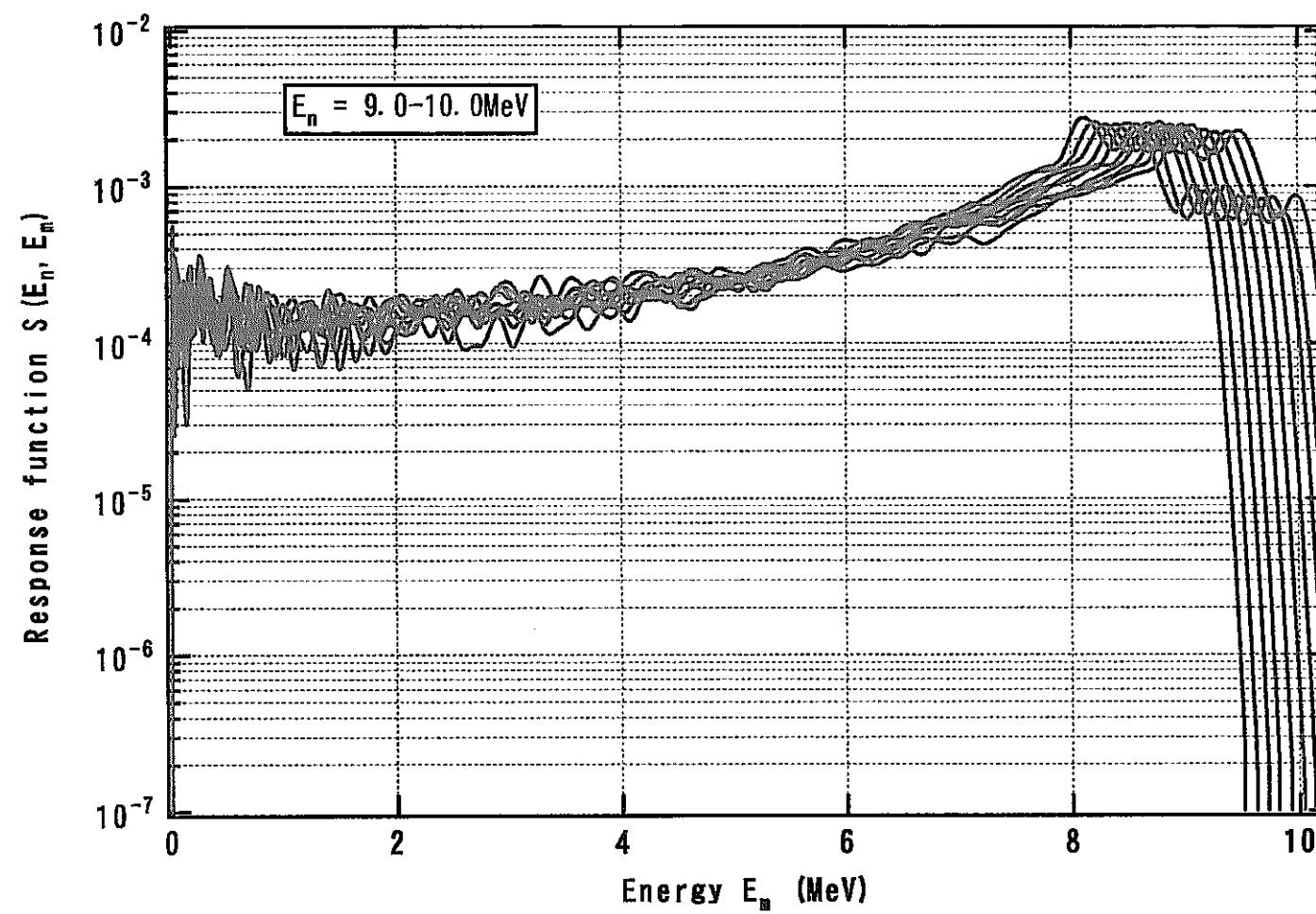


図 2.2.22 EGS4 を用いて計算された応答関数（入射ガンマ線エネルギー；9.1~10.0 MeV）

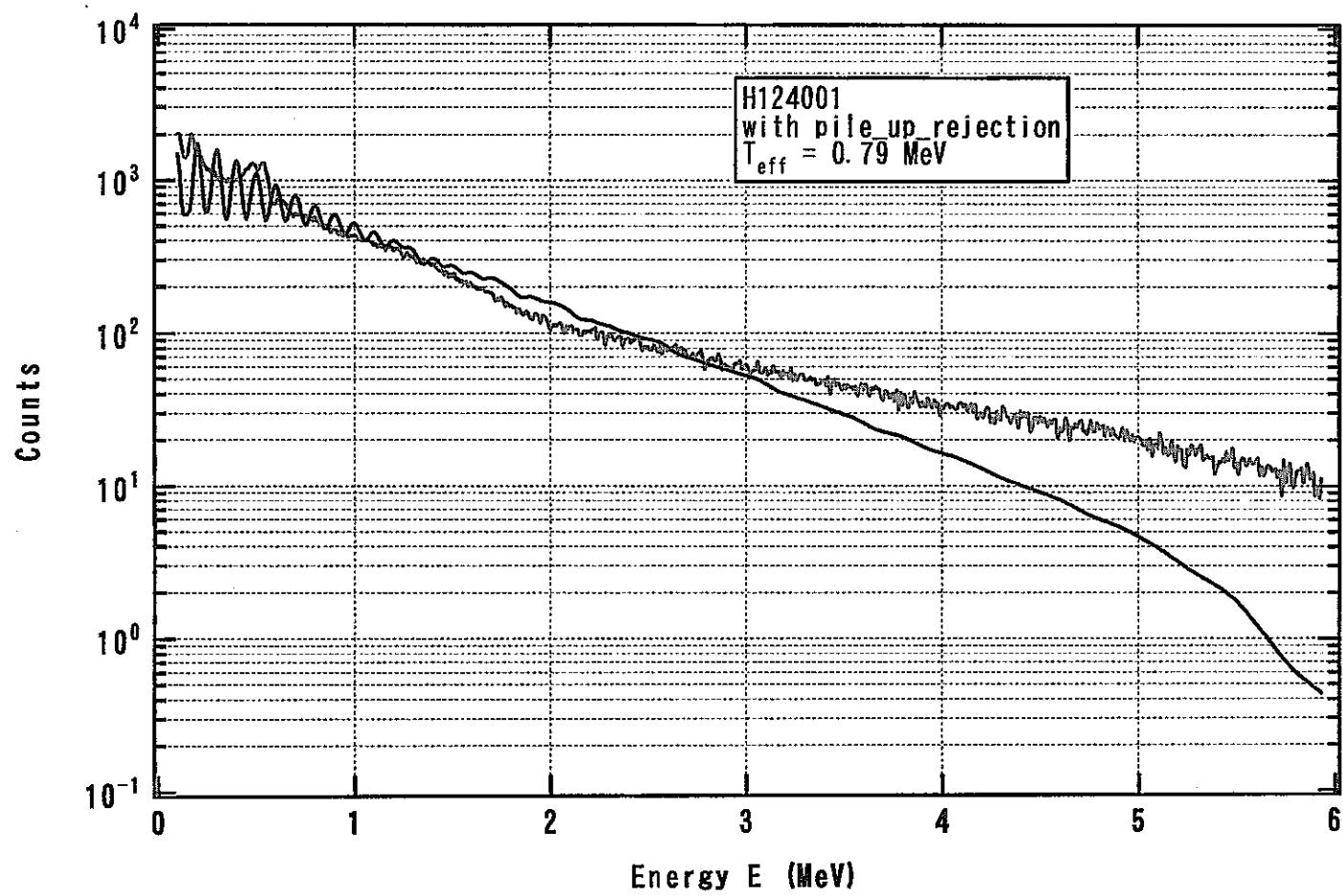


図 2.2.23 (a) 最小 2 乗法を用いて求められたフィティング曲線 (データ : pile up rejection 有り)。

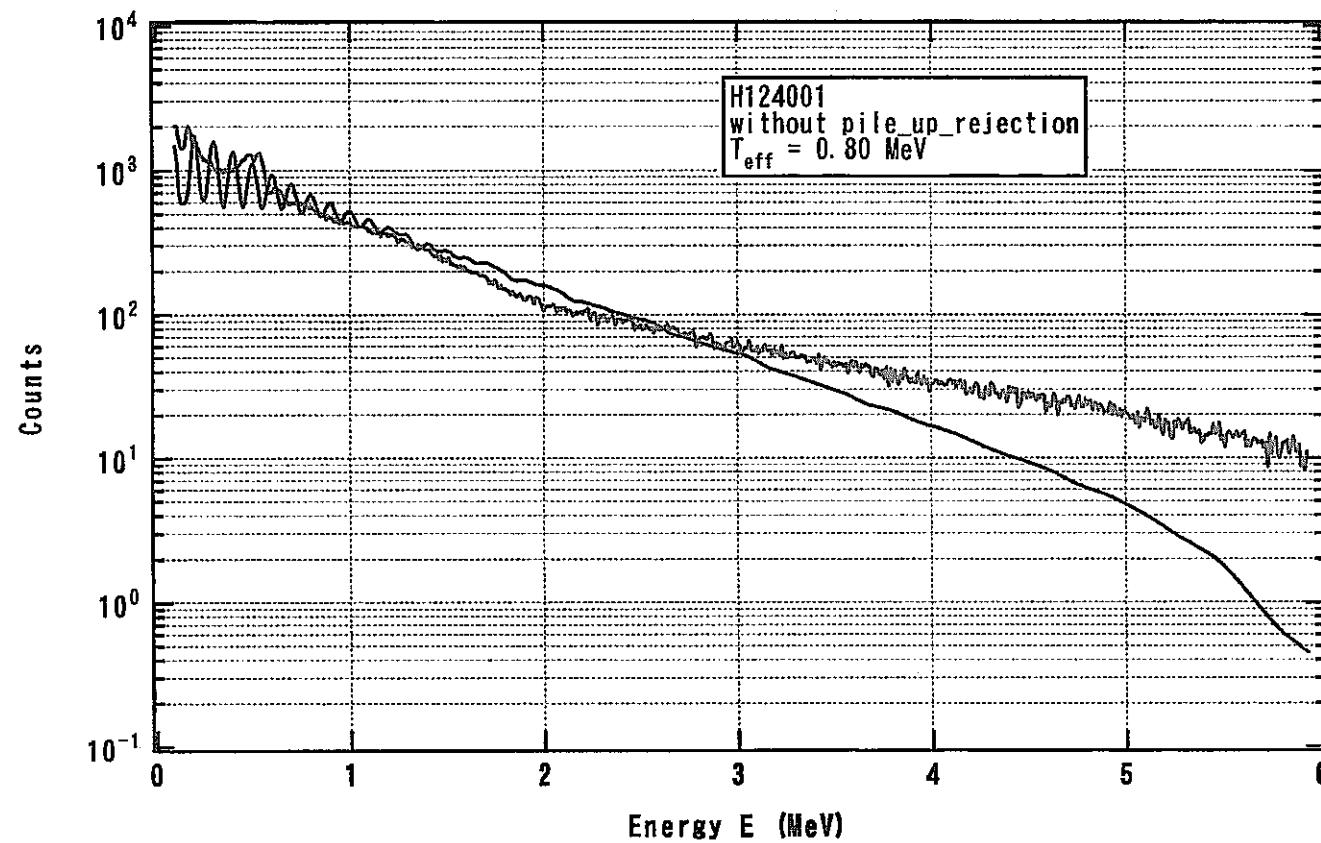


図 2.2.23 (b) 最小 2 乗法を用いて求められたフィティング曲線 (データ : pile up rejection 無し)。

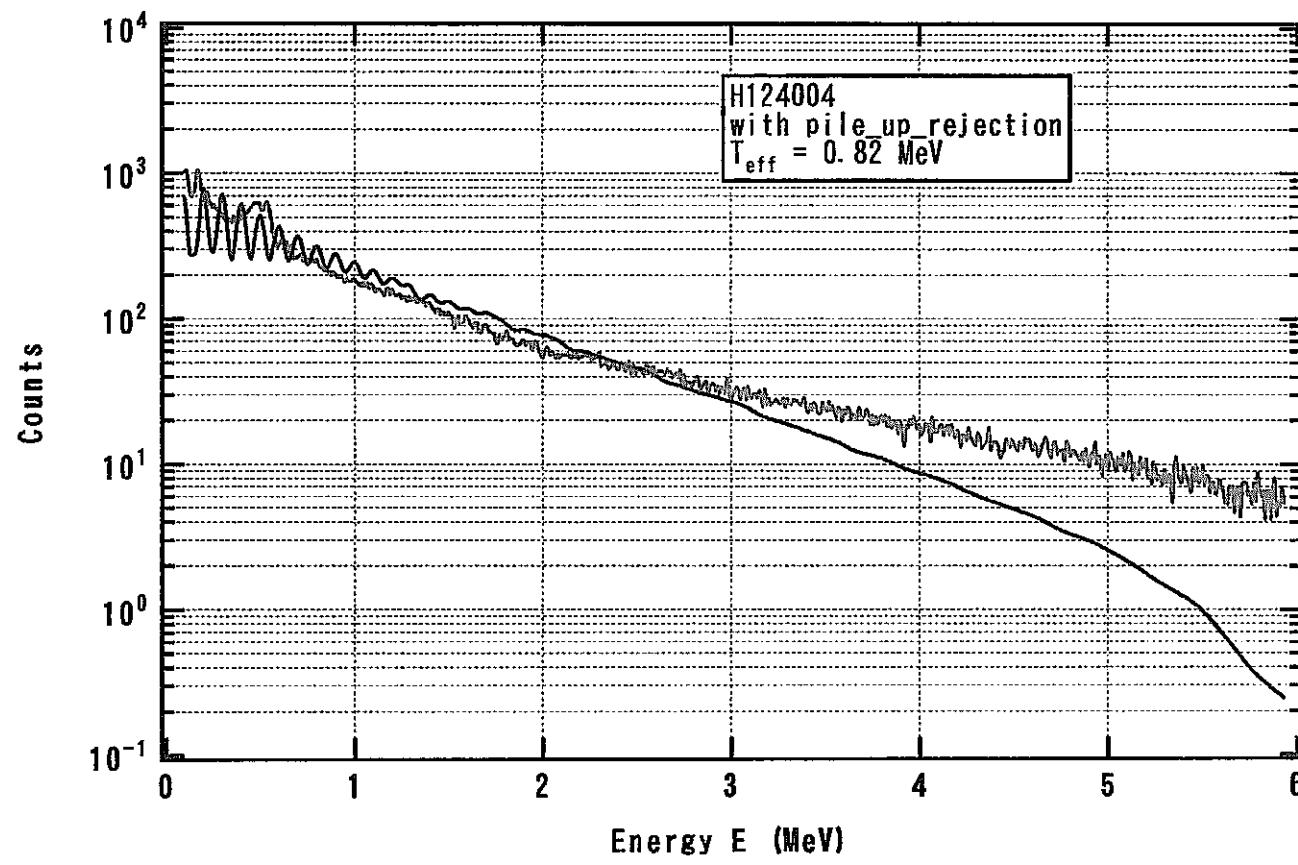


図 2.2.24(a) 最小2乗法を用いて求められたフィティング曲線(データ: pile up rejection 有り)。

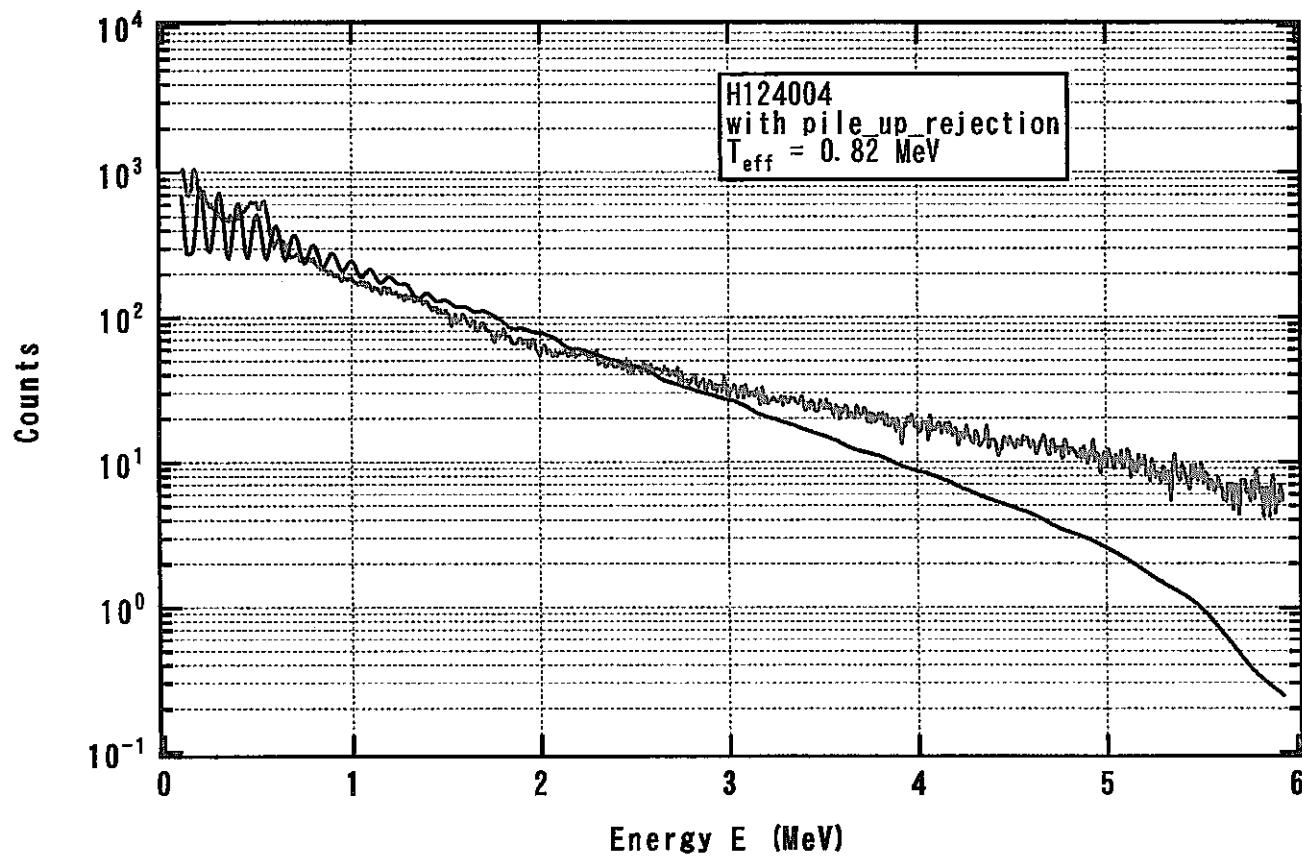


図 2.2.24 (a) 最小2乗法を用いて求められたフィティング曲線（データ：pile up rejection 有り）。

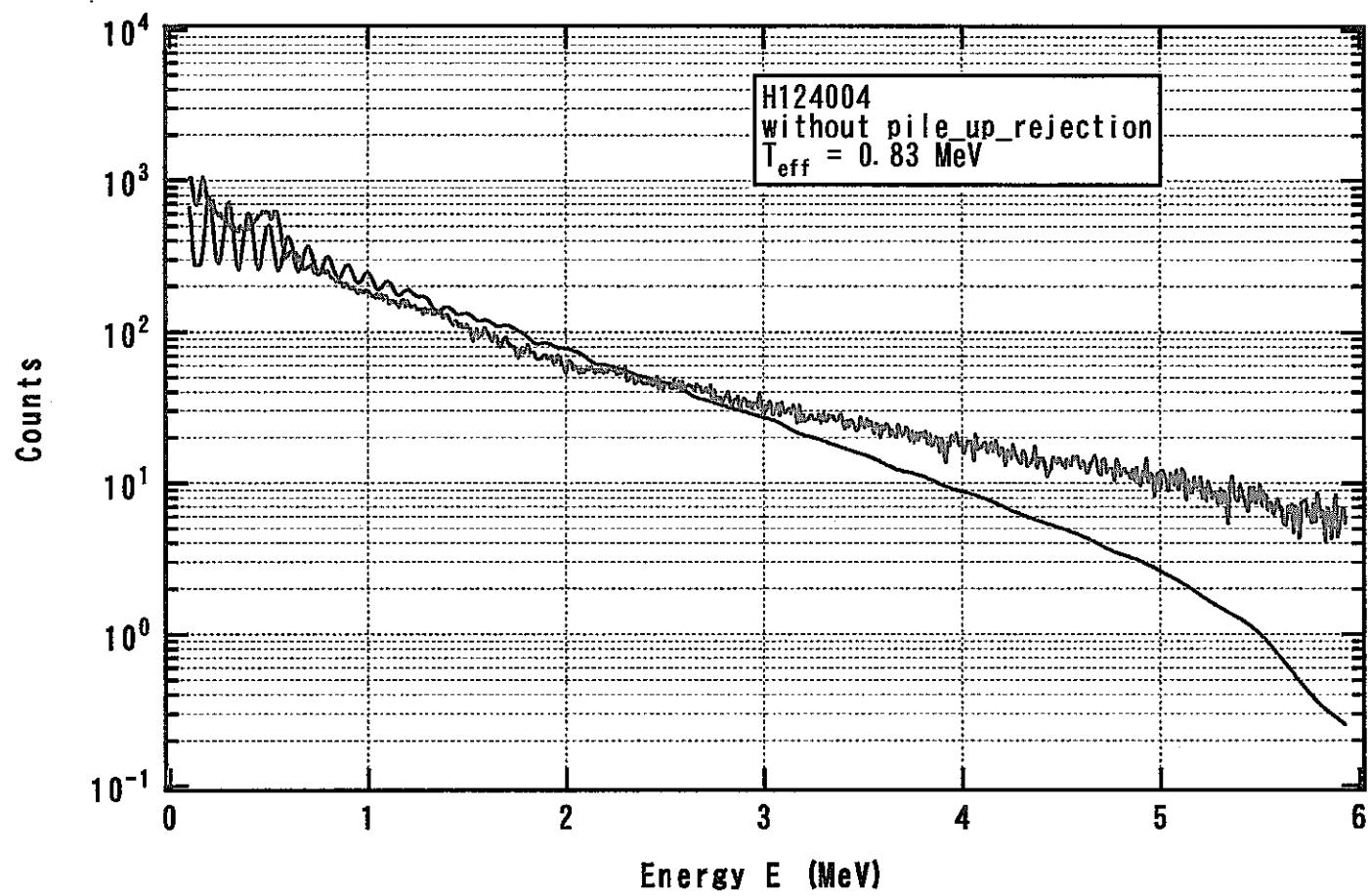


図 2.2.24 (b) 最小 2 乗法を用いて求められたフィティング曲線 (データ : pile up rejection 無し)。

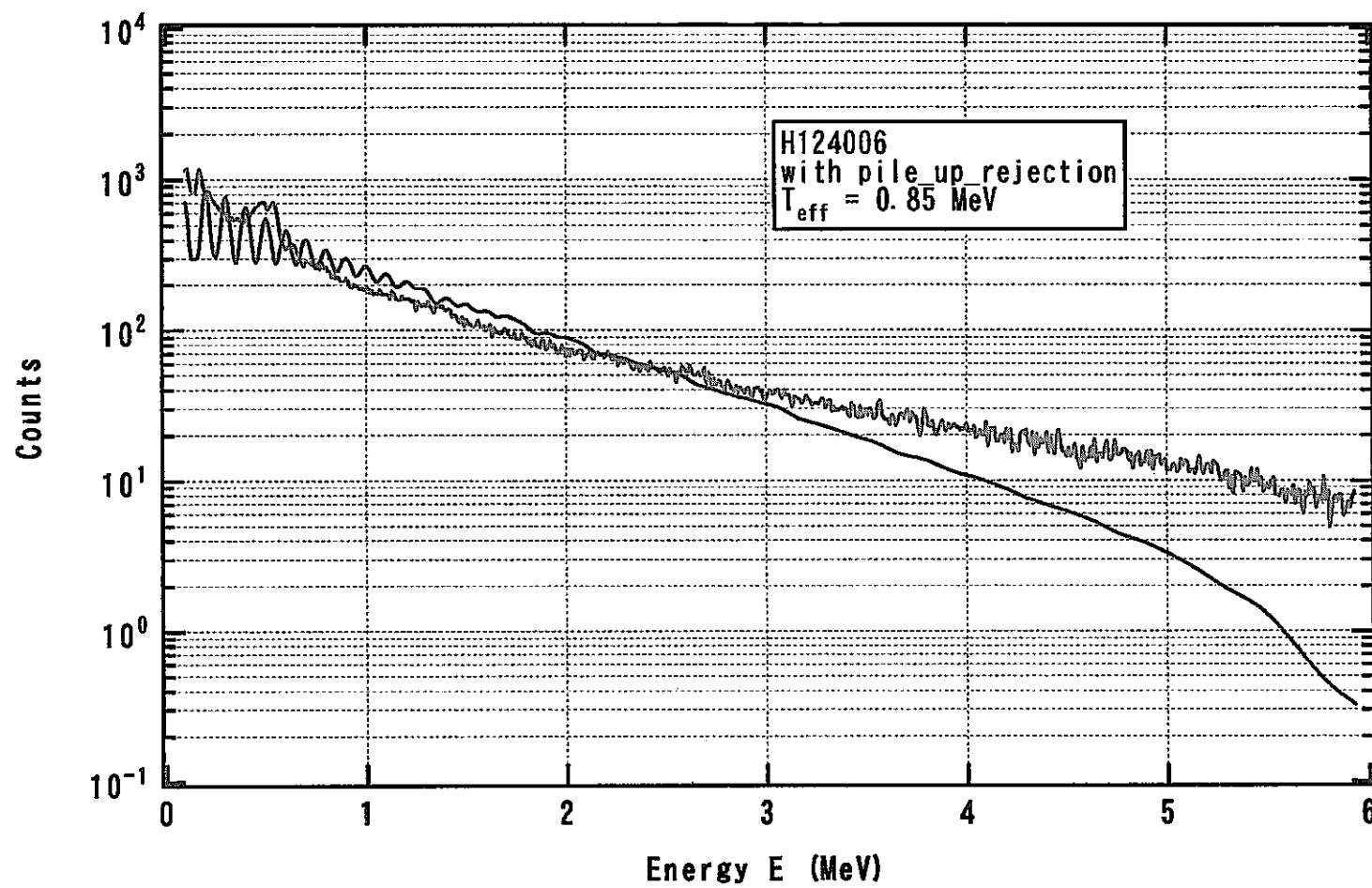


図 2.2.25 (a) 最小2乗法を用いて求められたフィティング曲線（データ：pile up rejection 有り）。

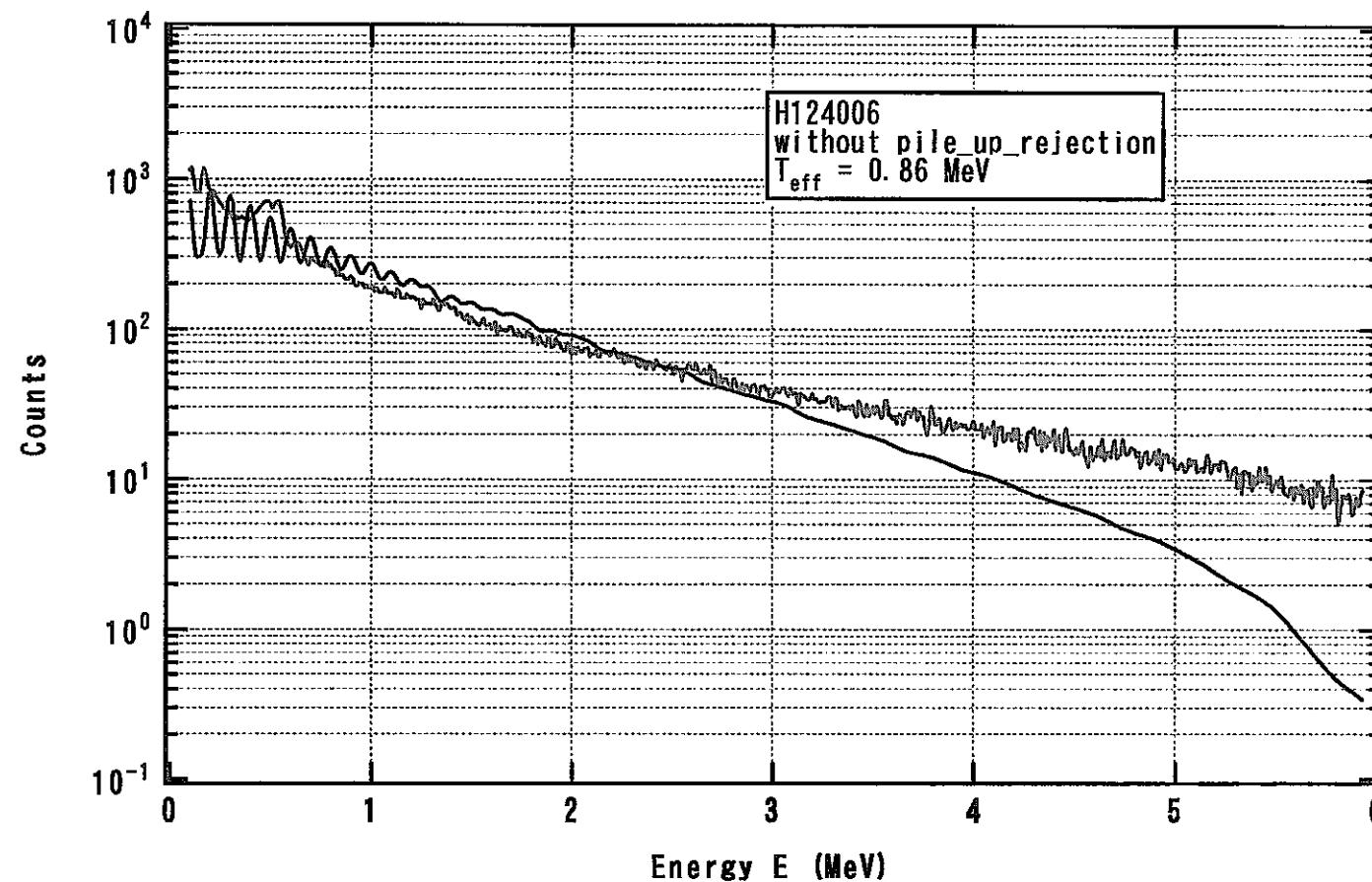


図 2.2.25 (b) 最小 2 乗法を用いて求められたフィティング曲線 (データ : pile up rejection 無し)。

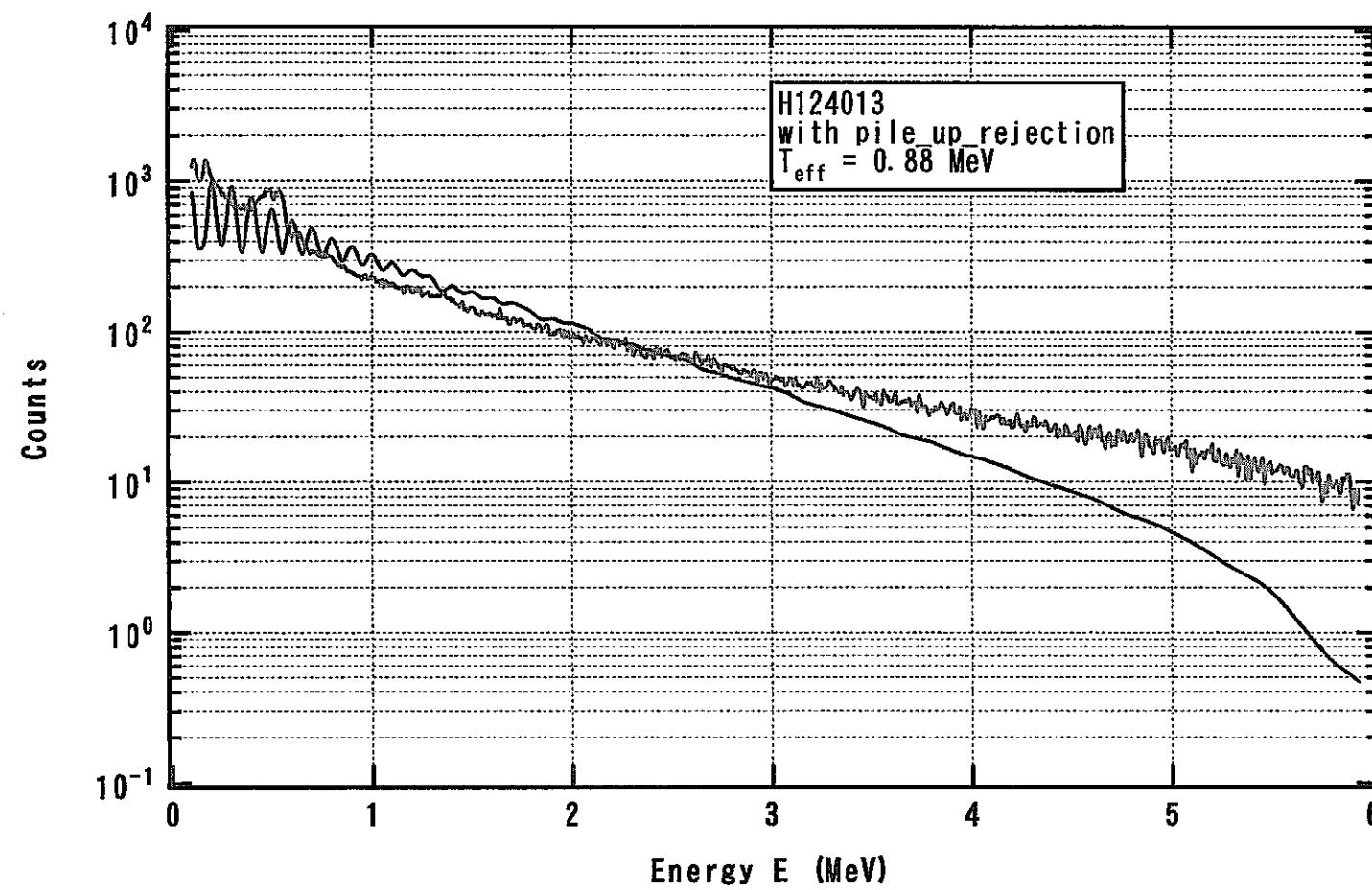


図 2.2.26 (a) 最小2乗法を用いて求められたフィティング曲線 (データ : pile up rejection 有り)。

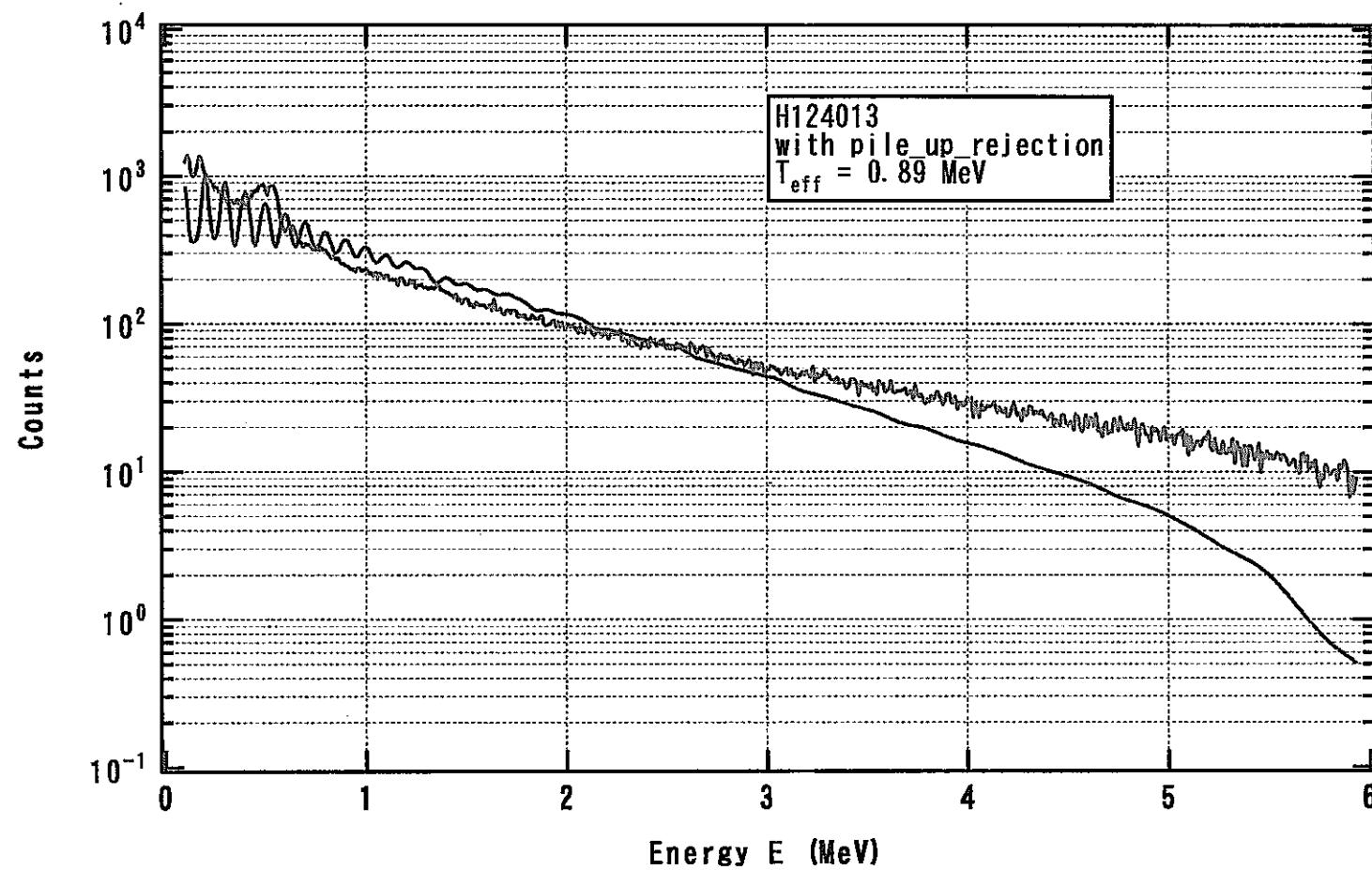


図 2.2.26 (b) 最小2乗法を用いて求められたフィティング曲線（データ：pile up rejection 無し）。

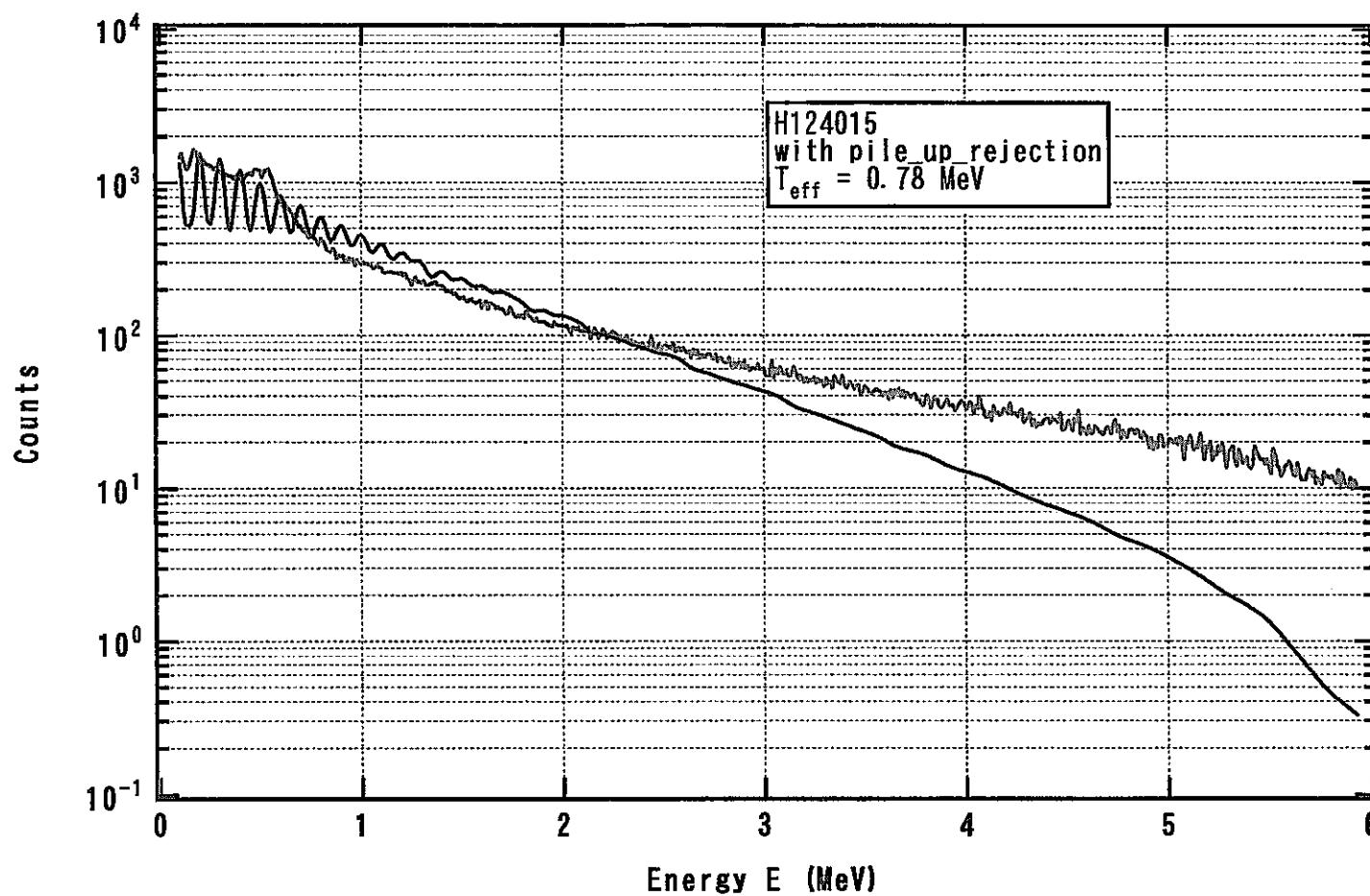


図 2.2.27 (a) 最小2乗法を用いて求められたフィティング曲線（データ：pile up rejection有り）。

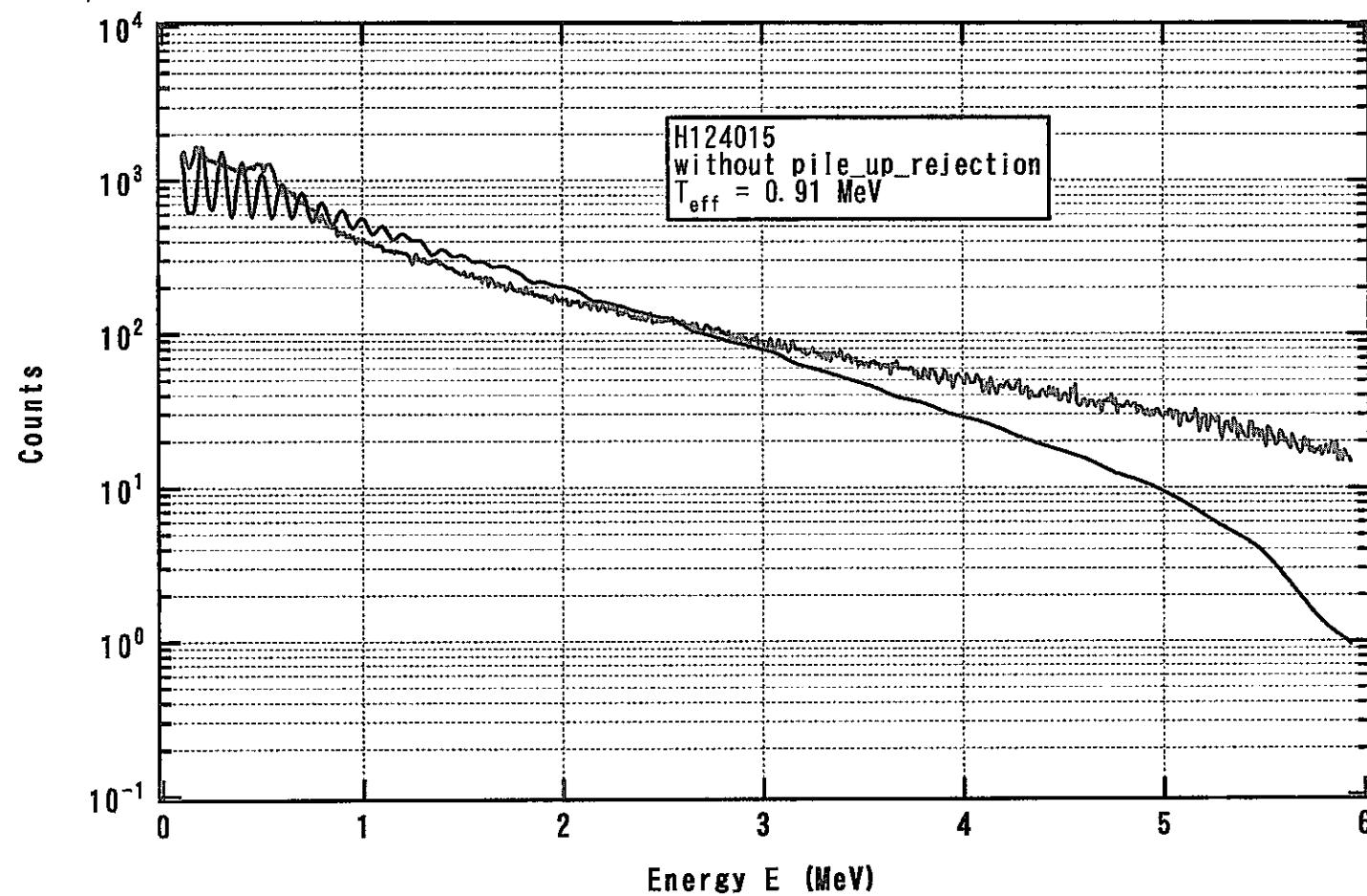


図 2. 2. 27 (b) 最小2乗法を用いて求められたフィティング曲線 (データ : pile up rejection 無し)。

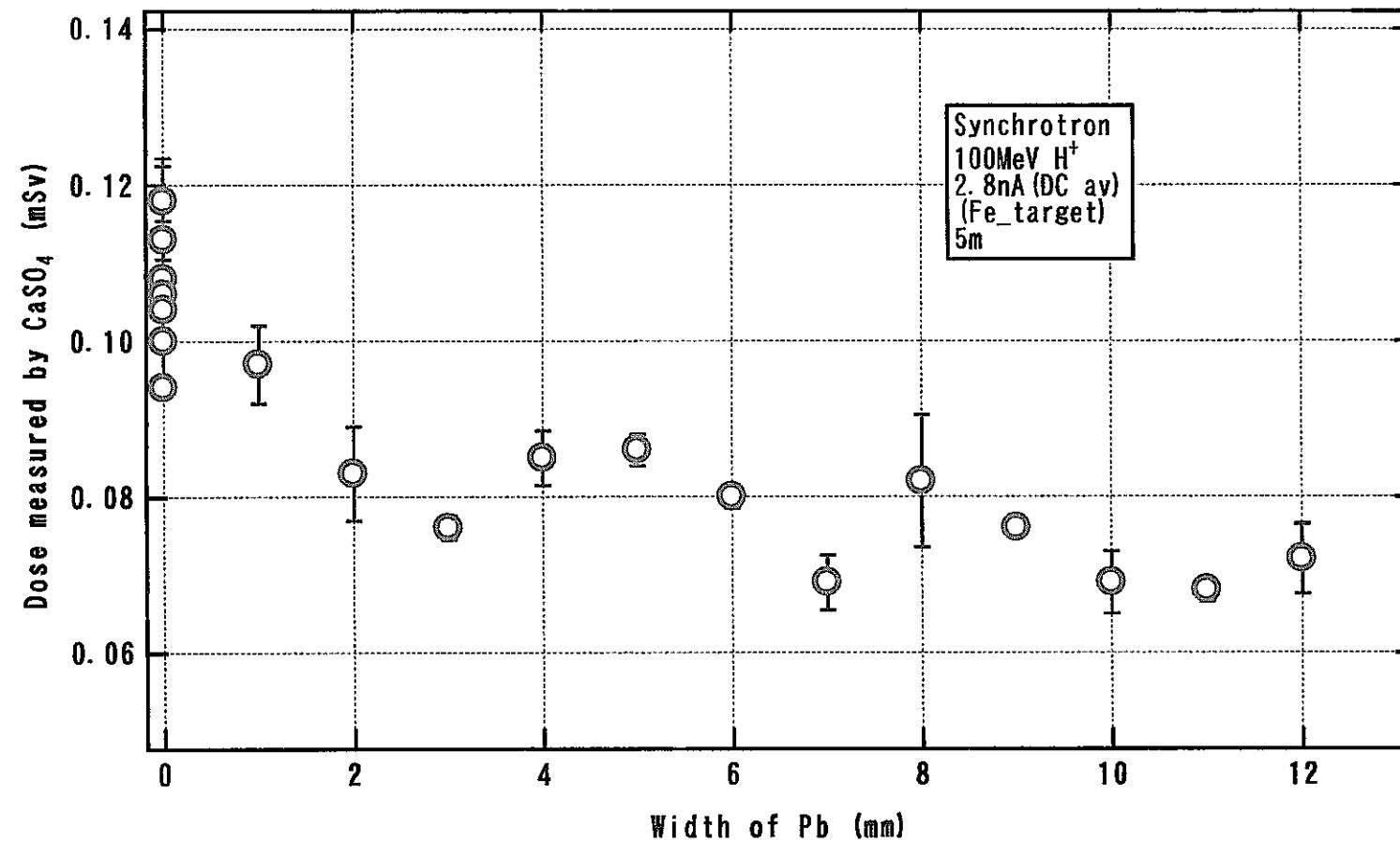


図 2.2.28 カバーした鉛厚に対するガンマ線放射線量 (100MeV, H^+)

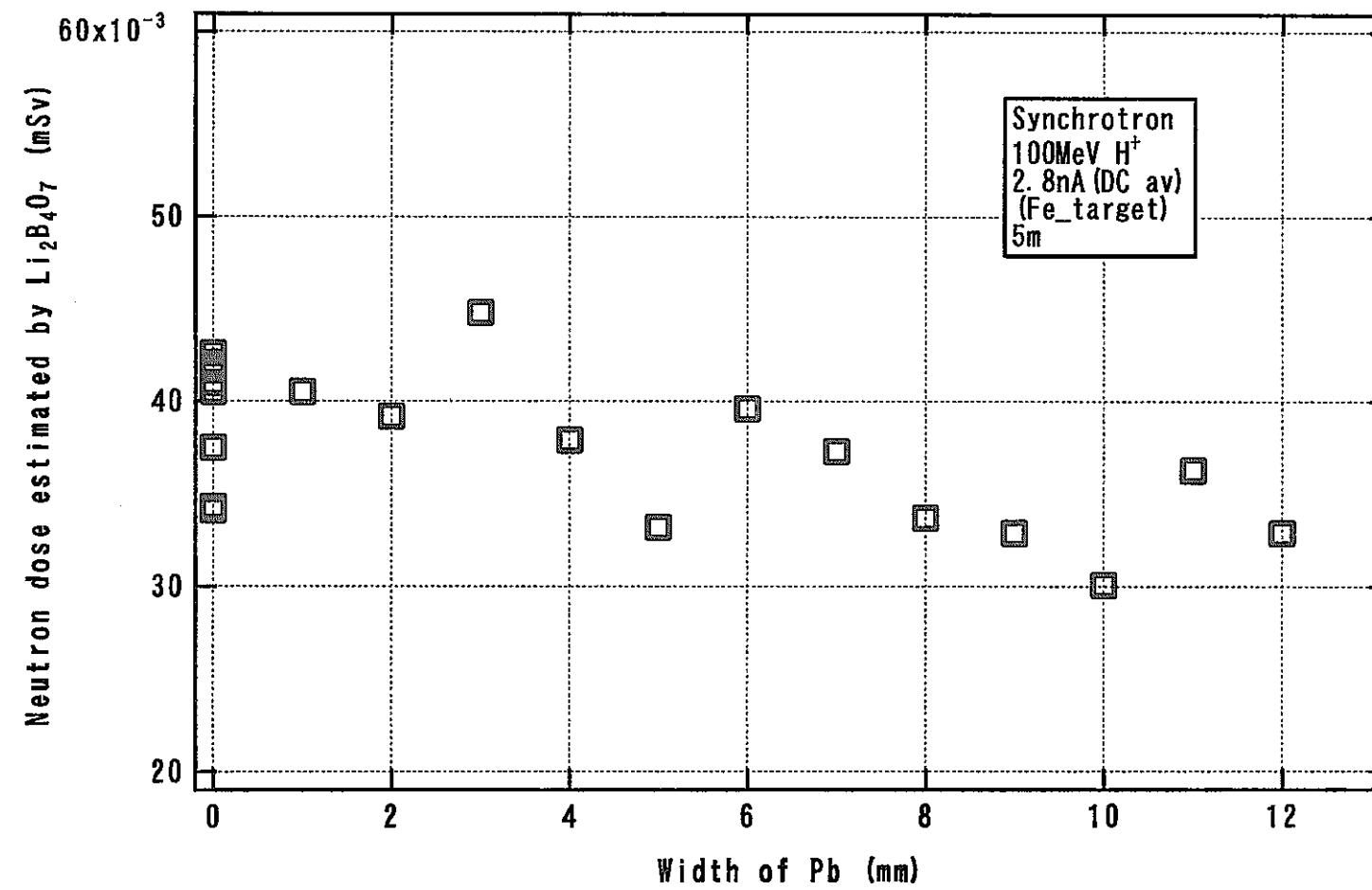


図 2.2.29 カバーした鉛厚に対する推定熱中性子放射線量(100MeV, H⁺)

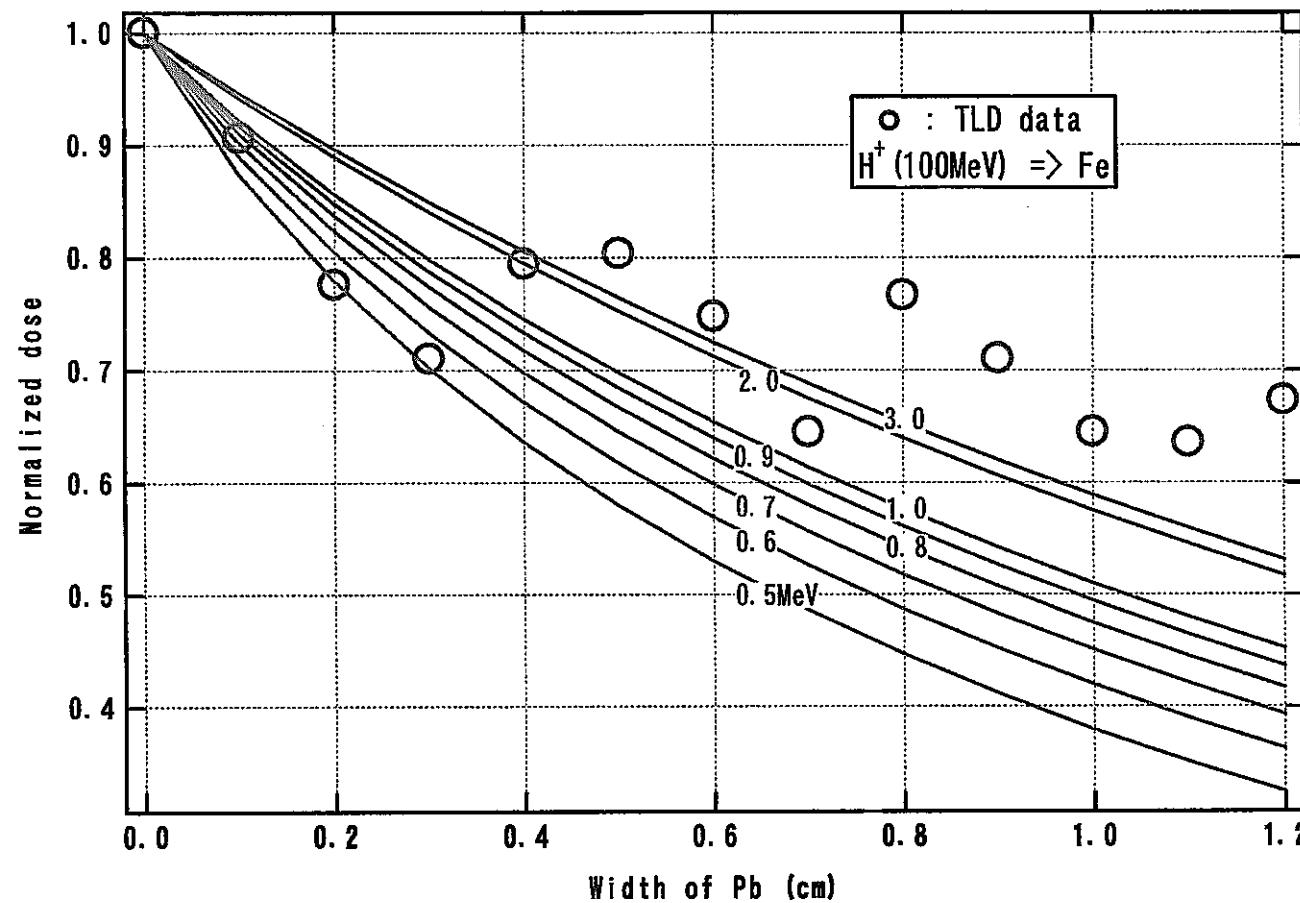


図 2.2.30 $T=0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 2.0, 3.0$ MeVとした場合の測定線量の鉛厚依存性

2.3 まとめ

タンデム加速器ビーム及びシンクロトロン加速器ビームが固体材料を衝撃する際に放射されるガンマ線の計測を NaI 検出器及び TLD を用いて行った。NaI 検出器で得られるエネルギースペクトルの形は count rate が 6kc/s 以内では殆ど変わらないことが、タンデムンデム加速器ビームを用いた計測で分かった。シンクロトロン加速器を用いた実験では、pile up rejection を併用した計測を行い、NaI 検出系の count rate と得られるエネルギースペクトルの関係を調べた。本研究で用いた検出システムでは、7kc/s 以下であれば pile up が問題となるないスペクトラムが得られることが分かった。NaI 検出器で得られたエネルギースペクトルより、100MeV プロトンが鉄ブロックを衝撃する際に放出されるガンマ線のエネルギースペクトルを、実効温度 T_{eff} を持つガウス型の関数型を仮定して、非線形最小 2 乗法により推定した。実効的な温度に 1 成分温度を仮定した場合、推定された実効温度 T_{eff} は 0.8~0.9MeV であった。尚、本実験においては、前年度の様な電気ノイズの混入は観測されなかった。

今後は中性子等の影響について調査する必要がある。シンチレータ部への中性子シールドの有無、シールドの程度、等の条件の組み合わせで実験的に検討する必要がある。

TLD を用いた積分線量計測において、タンデム加速器の 15MeV ヘリウムビーム照射実験 (12.6μA, 0.6h) では、 γ 線線量は ~0.38mSv, (線量率: ~0.63 mSv/h)、10MeV プロトンビーム照射実験 (8.6μA, 0.62h) では、 γ 線線量は ~2.5mSv, (線量率: ~4.03mSv/h) であった。ターゲットは無酸化銅、検出部はターゲットより約 3.6m の位置である。シンクロトロン加速器の 200MeV プロトンビーム照射実験(トータルクロトン量: 6.4×10^7 クーロン、1h)では、 γ 線線量は ~0.11mSv, (線量率: ~0.11mSv/h) であった。ターゲットは鉄ブロック、検出部はターゲットより約 6m の位置である。

種々の厚みの鉛で TLD を覆い、厚さの関数としての積分線量値を測定した。ガンマ線エネルギースペクトルを $E \exp(-E/T_{\text{eff}})$ と仮定して、実効的な温度 T_{eff} を見積もった。その結果 $T_{\text{eff}} = 1 \sim 4$ MeV と推定された。

シンクロトロン加速器ビーム実験では、鉛を付けない TLD を同時に 8 使用したが、得られた値はかなりばらつく。空間配置をうまく工夫し、複数素子を用いた同時計測が必要とされる。鉛の厚さが 6mm 以下のデータのみに着目した場合、実効温度 T_{eff} は $0.6 \text{ MeV} < T_{\text{eff}} < 2 \text{ MeV}$ 程度と推定された。

3. 遠隔空中モニタリング手法に関する調査・研究

3. 1 国外調査

今回の海外調査は、ヘリコプターを用いた遠隔空中モニタリング手法を実用化する際に疑問と思われる事項及び曖昧な点等についての、遠隔操作を用いた緊急時支援を行っているフランスの関係者の意見を収集する目的で行われた。

事業者が主体となった遠隔操作式ロボットシステムの運用を中心とする緊急時支援組織が、グループ・アントラ(GROUPE INTRA)という形で組織されている。シノン(CINON)に本部を置くグループ・アントラでは、遠隔操作式ロボットによる緊急時支援体制が備えられている。CAC SYSTEMS社は遠隔操作式ヘリコプターを使用するSYSDRON Program を考案しており、グループ・アントラに納入予定である。今回の海外調査の訪問先は CAC SYSTEMS 社及び CINON にある GROUPE INTRA であり、あらかじめ用意した質問事項に対する答えを得る事とした。収集した調査結果を Q&A の形式で、以下に示す。

<Introduction>

In an accident occurring in nuclear facility, radiation monitoring should be required with high degree of accuracy such as radiological mapping around the facility. We consider that the use of the unmanned helicopter is one of the most possible ways to get the mapping of radioactivity such as the γ ray. We have examined to make a plan to use the small size helicopter for the above monitoring. So, we have a great interest in your monitoring system utilizing the unmanned helicopter and your activity.

Would you please answer the following questions?

(1) About SYSDRON:

Q1: What is the aim to develop a SYSDRON system? How long did it take to develop the SYSDRON system?

A1: 事故が起きたときなど広範囲に環境監視を行い、事故状況を可視化する。特にUGVを用いることにより、人が近づくことが難しいところもモニタリングできる。現在も開発中である。

Q2: What is the performance of SYSDRON system? When you make a plan of SYSDRON system, what is the criterion about its performance?

A2: イタリアのヘリコプターを使用するつもりであったが、掲載重量等のいろいろな問題があるため、米国社製のヘリコプターに変更する積もりである。

Q3: What kinds of detector for the radioactivity measurement do you use in SYSDRON?

A3: 1. Si-PIN ダイオード。アルミニウム容器に入っている。方向が分かる。EURISYS Measures 社製。スレッショルドは 30keV。
2. NOVELE 社製。スレッショルドは 50keV。

Q4: We suppose you detect mainly the gamma ray. Do you also detect neutrons?

A4: 測っていない。

Q5: Do you measure the radioactivity in the dose rate or in counting rate?

A5: カウントレートとエネルギー。

Q6: We suppose that you measure the radioactivity in the highest level in case of accident at the nuclear facility. What is the dynamic range of the measurements? Do you measure the radioactivity in the back ground level using the same detectors?

A6: 50keV 以上。バックグラウンドレベルも測れる。

Q7: What is the energy range of the measurement? Can you select the radio nucleus emitted in the nuclear accident?

A7: エネルギースペクトルのピークから、ガンマ線源の特定ができる。

Q8: How do you transfer the data form the helicopter to control station? What frequency of the radio wave do you use?

A8: ガンマ線データはイベントバイイベントで 100ms 程度の不感時間がある。転送レートは 9600bps。2.2GHz。

Q9: How do you display the output of data in the control station?

A9: 強度分布を色分けで表示。

Q10: We are afraid that the helicopter engine becomes the strong noise source for the detectors in the measurement of the radioactivity. Have you experienced such kind of noise troubles?

A10: 無い。ケーブル等はシールドしている。その他の電子機器もケースに収められており、静電的にシールドされているので大丈夫。

Q11: We suppose that other kinds of measuring system such as the CCD camera and the thermal imager are also loaded on the helicopter. Is it correct or not?

A11: 正しい。

Q12: If it is correct, please answer the next question (otherwise skip the next one). How do you use the data of the CCD camera and the thermal imager in connection of the radioactivity mapping?

A12: CCD は地上の様子を見るため。赤外線温度センサーは温度分布を地図上にマッピングする。

Q13: Have you ever used the SYSDRON system in the exercise of disaster protection carried out by government or by the company?

A13: 無い。アントラにまだ納品していない。

Q14: We suppose that, if you used it, you measured the dose distribution around the nuclear facility. How many km did the area of the distribution cover roughly from the center of the nuclear facility?

A14: 20km。

Q15: How many persons do you need to operate the SYSDRON system?

A15: マッピングシステムと地上機器の運転の 2 名だが、指揮 1 名で、3 人。

Q16: Where is the helicopter arranged now?

Where is the SYSDRON system equipped now?

A17: イタリア。

Q18: When will you use the SYSDRON system? In the case of accident in level 2 and/or level 3, will you use it? Who is commander in use of the SYSDRON system?

A18: (アントラ) 原発のオペレーターの判断により原発のオペレーターが発動を要請する。

Q19: Did you experience any troubles in the SYSDRON system? What parts did not work?

A19: ヘリコプターのトラブル。

Q20: Do you have a plan to improve the SYSDRON system? What parts will you replace (or improve)?

A20: 米国製ヘリコプターを導入する予定である。

(2) About the helicopter

Q21: Firstly, please show us the outline of the CAC company.

A21: 無人飛行機を製造したり、それを搭載し飛ばすための車などのシステムを設計し組み立てたりしている。

Q22: What is the role of your company in the SYSDRON system?

A22: アントラから受注し、システム設計及び組み立てを行う。個々のもの（例えば、ヘリコプターや検出器など）は、適切なものを選んで買う。一般に仕様を伝えてもらえば、その通りに製作する。

Q23: Do you use the unmanned helicopter except the SYSDRON system?

A23: 小型飛行機やロケット。

Q24: What kinds of outdoor robots do you produce expect the unmanned helicopter?

A24: ターゲットシステムとなる飛行機。

Q25: Please fill up the following right column about the characteristics and performances of the unmanned helicopter.

A25: 変更予定だが、一応書いておく。

Trade name:	HELIOT
Type:	イタリア・ドラゴンフライ社製(型については不明)
Rotor diameter:	6.7m
Length:	6.0m
Empty weight:	230kg
Max take off weight:	450kg
Payload capacity:	120kg
Cruise speed:	35m/s
Rate of climb:	6.6m/s
Max altitude:	300m

Q26: Do you use GPS in order to decide the position of the helicopter?

A26: 使っている。

Q27: In the GSP, do you collect the position by taken account of the difference between the position of the control station and one of the helicopter?

A27: 使っている。

Q28: Before the helicopter flies at the position from which the radio wave cannot reach the control station, dose the helicopter return automatically?

A28: 基本的に電波が届かなくなることはない。マッピングシステムに既に地図データが入力しており、電波が届かないところがあらかじめ分かっているから、その場所に飛んでいかないようにになっている。

Q29: How many antennas do you equip on the ground around the nuclear facility in order to receive the radio-wave form the helicopter?

A29: 基地（マッピングしているところ）にひとつとリレーがひとつ。

(3) Others (to INTRA)

Q30: What is the purpose for establishment of INTRA?

A30: 原発で事故が起きたとき、無人（作業地点で）で運転できる機械を24時間以内で送る会社。同様な会社でドイツにKHGという会社があり、そことも協力関係にある。

Q31: What is the mission of INTRA?

A31: 機材を配備しておき、その整備をする。事故の可能性を研究する。

Q32: How many personnel work in INTRA?

A32: 20～21人。全員シノンにいる。

A33: Do you have other kinds of the outdoor robots for monitoring the nuclear accident?

Q33: マニピュレータを持つ機械（E R I I），マッピング用データ収集車（E R A S E），大型ブルドーザー（E B U L L）など。

A34: Do you have the relation with IPSN?

Q34: 無い。ただ、IPSN には知人がいる。指導があるときもある。

Thank you very much.

CAC SYSTEMS 社が考案した SYSDRON Program (Nuclear & Environment Monitoring by Remotely Piloted Helicopter) からの抜粋を表 3.1 に示す。

表 3.1 SYSDRON Program (Nuclear & Environment Monitoring by Remotely Piloted Helicopter) からの抜粋

1) INTRA Presentation

The three main operators of the French nuclear system – EDF, CEA, COGEMA, decided to put their resources together and created, in 1988, an economic interest group, GIE Group Intra.

Today, Groupe Intra has decided to widen its range of actions to other types of interventions in dangerous or even lethal environmental conditions for human being.

GIE Groupe INTRA	CEA (37.5%)	Nuclear R & D
	EDF (50.0%)	Electricity Production, Nuclear Power Plants
	COGEMA (12.5%)	Nuclear fuel extraction & reprocessing

2) INTRA's main activities

As a results, Groupe Intra has defined 3 new areas of applications:

- by extending its interventions to possible incidents occurring in a nuclear installation which would require remote operated or robotised means.
- by enlarging its actions to other non-nuclear industries such as the chemical industry or by carrying out civilian rescue operations in conditions which could endanger human lives.
- by intervening on foreign nuclear sites by the signature of a contract.

3) Main Requirements of the SYSDRON System

In case of nuclear event, the SYSDRON system should be the FIRST to penetrate the suspected area.

- High degree of availability & reliability
- Compact system, quick operation concepts
- High payload capacity
- Wide range of sensors simultaneously
- Fully integrated in the existing system of UGV's

- Cost effective solution

The concept of the Unmanned Helicopter was highly required in order to avoid exposure of Pilot to unacceptable levels of radiation.

4) The Principles of Nuclear & Environmental Monitoring

Ground Monitoring (Local area)

- Visual assessment of the situation
- Hot spots monitoring
- Support to UGV's (Ground Pobots)
- Magnitude of contamination

Atmospheric Monitoring (Extended area)

- Magnitude of contamination
- Extension of the cloud
- Altitude of the cloud
- Orientation & tendency

5) The HELIOT Drone: main characteristics of the DF 333 helicopter

MAIN CHARACTERISTICS:

- Rotor diameter:	6.70 m
- Length:	5.60 m
- Empty weight:	260 kg
- Max take-off weight:	500 kg
- Payload capacity:	120 kg
- Piston engine:	105 HP

MAIN PERFORMANCES:

- VNE:	80 kts
- Cruise speed:	65 kts
- Rate of climb:	6.5 m/s
- Max altitude:	2000 m
- Endurance:	2h30

6) The SYSDRON Ground Station

Piloting Control Station

- Full computerized
- Analog High Quality Video displays
- Autonomous Navigator Mgt

- Pre-programmed behaviors:
 - Loitering
 - Homing
 - Recovery
- DGPS trajectory monitoring
- NBC Equipments
 - Fully NBC protected shelter (α, β)
 - Air conditioning: $-20^\circ\text{C} \sim +45^\circ\text{C}$ external
 - α, β & γ monitoring & alarms internal/external:
 - α : 0.2 Bq/m³ at 3 Bq/m³ radon
 - β : 4 Bq/m³ in 30' at 10 $\mu\text{SV}/\text{h}$
 - γ : full span of 1 mrd/h \sim 1000 mrd/h
- Mission Control Station
 - Fully computerized
 - Multi sensor handling:
 - Optronic Sensors
- The CCD Camera
 - Pixel arrangement: 768 x 494
 - Resolution: 600 x 350 TV lines
 - Sensitivity: 1.0 lux at f/1.4
 - Frame rate: 25Hz
 - Video format: PAL
 - Interlace ratio: 2:1
 - Aspect ratio: 4:3
 - Lens focal lengths: 12 \sim 120 mm
 - Auto-iris range: f2.1 \sim 22
 - Effective diameter: 58 mm
 - Wide FOV: $29^\circ \times 22^\circ$
 - Narrow FOV: $29^\circ \times 22^\circ$
- The Thermal Imager
 - Detector type: HgCdTe
 - Number of elements: 4
 - Spectral range: 8 \sim 12 μm
 - Sensitivity/resolution: MRT (typ. $^\circ\text{C}$, cy/mR)
 - 0.32 at 0.375 \sim 0.25 at 1.5
 - Type of cooling: closed cycle

Active IR lines: 445 / frame
Video format: CCIR

Magnification: 1.5 x ~ 12.0 x (4 steps)

FOV: 18.6° x 14.0° ~ 2.3° x 1.75°

IFOV: 1.2mR ~ 0.3 mR

Nuclear sensors

GAMMAGONIO IV

Manufacture: EURISYS Measures

Amplification gain: 5.6 mV/keV

Detection threshold: 30 keV

Counter capacity: 65536 impulses

Count time: 250 ms

Isotropy: <20% in orthogonal planes

Detector: Si PIN diodes in Al sphere

Detector sensitivity: 45.6 impuls/s/mGy/h
under Co60 radiation

Weight: 4.9 kg (1 sphere)

Operational temperatures: -20°C ~ +60°C

Output: RS 485, 192000 bds

DG5

Manufacture: NOVELEC

Detection threshold: 50 keV

Responses: +/-10% 100 keV – 700 keV

Linearity (Co60): 10% loss at 3000 c/s

Isotropy: +/-10% in orthogonal planes

Detection time constant: 0.1 s

Measure time constant: 2 s

S/N ratio: 50 – 500 nGy/h (5 – 50 µrad/h)

Size: 190 x 138 x 68 mm

Weight: 1000 g with batteries

Operational temperatures: -20°C ~ +50°C

Output: RS422, 9600bds

Radio relay

- DGPS trajectory monitoring
- Multi level report generation
- Real time Recording capacities

7) Data Exploitation

- IR Analysis
 - Visual identification of "hot spots"
 - Graphical enhancement of temperatures monitoring
 - Video recording
- Radiometry
 - Color enhancement of DGPS trajectory of the Drone
 - Text printing of digital data
 - Recording of trajectory, telemetry & radiometry data

8) Extension of SYSDRON applications

- HELINUC
 - Spectrometry
 - Ground contamination measurement
 - Radioisotopes characterization
- Chemical
 - Samples collection
 - Real time monitoring
- Bacteriological
 - Samples collection
 - Real time monitoring
- Police / anti-terrorism
 - Nuclear devices / weapons research (gamma, neutron, ...)
 - Proof images (Visual, IR)

.....

9) Operational Conditions

In France:

- Very short time of availability (<2 hours)
- Short delay of intervention in all the territory (< 24 hours)
- Support to all the other means
- Quick damage assessment
- Complete radioactivity monitoring

Abroad:

- Requisition upon agreement with foreign governments
- Short delay of intervention in European countries (< 3 days)

3. 2 ヘリコプター掲載用ガンマ線検出器の予備試験

放射線検出器をヤマハ製の小型ヘリコプター掲載用野外放射線検出器に適合するように改良した。改良したガンマ線検出器の回路の概要を図 3.2.1 に、概観を図 3.2.2 に示す。ガンマ線検出用のプラスチックシンチレータの大きさは 270 (W) × 300 (D) × 20 (t) mm、ホトマルには 7696 (浜松ホトニクス製) が用いられている。小型ヘリコプターへの取り付け、ヘリコプター運転時のノイズ等を解決するために以下のように改良した。

- 1) ヤマハ製の小型ヘリコプターの通信ソフトで受信信号が送信可能となる様に信号送信ソフトを変更。
- 2) アンプ基板をノイズに強い基板に変更。
- 3) 電源を乾電池から供給する様に変更。
- 4) 小型ヘリコプターに掲載可能な本体板金とする。

小型ヘリコプター掲載での模擬試験に先立ち、以下の項目についてガンマ線検出器系の性能試験を行った。

- 1) 温度特性試験
- 2) ドリフト試験
- 3) 振動の影響
- 4) 電磁気的誘導の影響
- 5) 電気的ノイズ

3.2.1 温度特性試験 (JIS 試験に準拠)

バックグラウンド及び数え落としの影響が十分無視できる線量率の γ 線 (^{137}Cs 、 $100\mu\text{Ci}$) を照射して、検出器の温度特性を試験した。検出部全体を恒温槽内に設置し、 20°C における指示値（基準）から -10°C 、 30°C 及び 40°C における指示値を差し引いた値の基準値に対する百分率を求める。測定は、検出部が恒温槽内の温度と十分平衡に達してから行った。なお、計数率は 20 回測定し、その平均値で判定した。表 3.2.1 に温度特性試験の結果を示す。指示値の変化が $\pm 5\%$ 以内であることが判定基準であり、表 3.2.1 に示されるように、Back Ground 計数および GROSS 計数ともに規格内であることが分かる。（ここで、GROSS とは、検出された計数そのものであり、Back Ground 計数も含まれている。）

3.2.2 ドリフト試験

^{60}Co 線源($10 \mu\text{Ci}$)を用いて、検出器のアンプ系のドリフトについて試験した。通信用外部コネクタから送られてくる計数信号を1秒ごとにパソコンで記録する。24時間連続して動作させ、その間の指示値(GROSS 計数)を連続的にパソコンにより記録する。用いた線源は、バックグラウンドの変化及び統計変動が十分無視できる。1時間毎の係数率を表3.2.2に示す。24時間の指示値の平均を基準値は、 3238.56 s^{-1} であった。時間内の指示の最大値及び最小値から基準値を差し引いた値の基準値に対する百分率は、

$$\text{最小値の百分率} = ((3238.56 - 3201)/3238.56) \times 100 = 1.160\%$$

$$\text{最大値の百分率} = ((3276 - 3238.56)/3238.56) \times 100 = 1.156\%$$

であった。判定基準は平均値(基準値)の±2%以内とした場合、十分満足にされる値であった。以上の結果から検出系を連続的に作動させても、計数変動は小さく長時間の測定でも安定した動作をすることが分かる。表3.2.2の値を図3.2.3にプロットした。

表3.2.2 ドリフト試験の結果

経過時間 [hour]	計数率 [s^{-1}]	経過時間 [hour]	計数率 [s^{-1}]
0	3236.0	13	3232.0
1	3247.0	14	3201.0 (最小値)
2	3244.0	15	3276.0 (最大値)
3	3251.0	16	3234.0
4	3208.0	17	3229.0
5	3259.0	18	3272.0
6	3261.0	19	3223.0
7	3225.0	20	3217.0
8	3259.0	21	3249.0
9	3233.0	22	3225.0
10	3231.0	23	3229.0
11	3251.0	24	3229.0
12	3243.0	平均値(基準値)	3238.56

表 3.2.1 溫度特性試験結果

温度 [°C]	BG [s ⁻¹]	規格 [s ⁻¹]	GROSS [s ⁻¹]	規格 [s ⁻¹]
20	186.32	177.0~195.6 (20°Cの±5%以内)	3309.5	3144~3475 (20°Cの±5% 以内)
40	189.55		3299.5	
30	186.40		3336.0	
-10	186.75		3340.5	
20	187.75		3362.0	

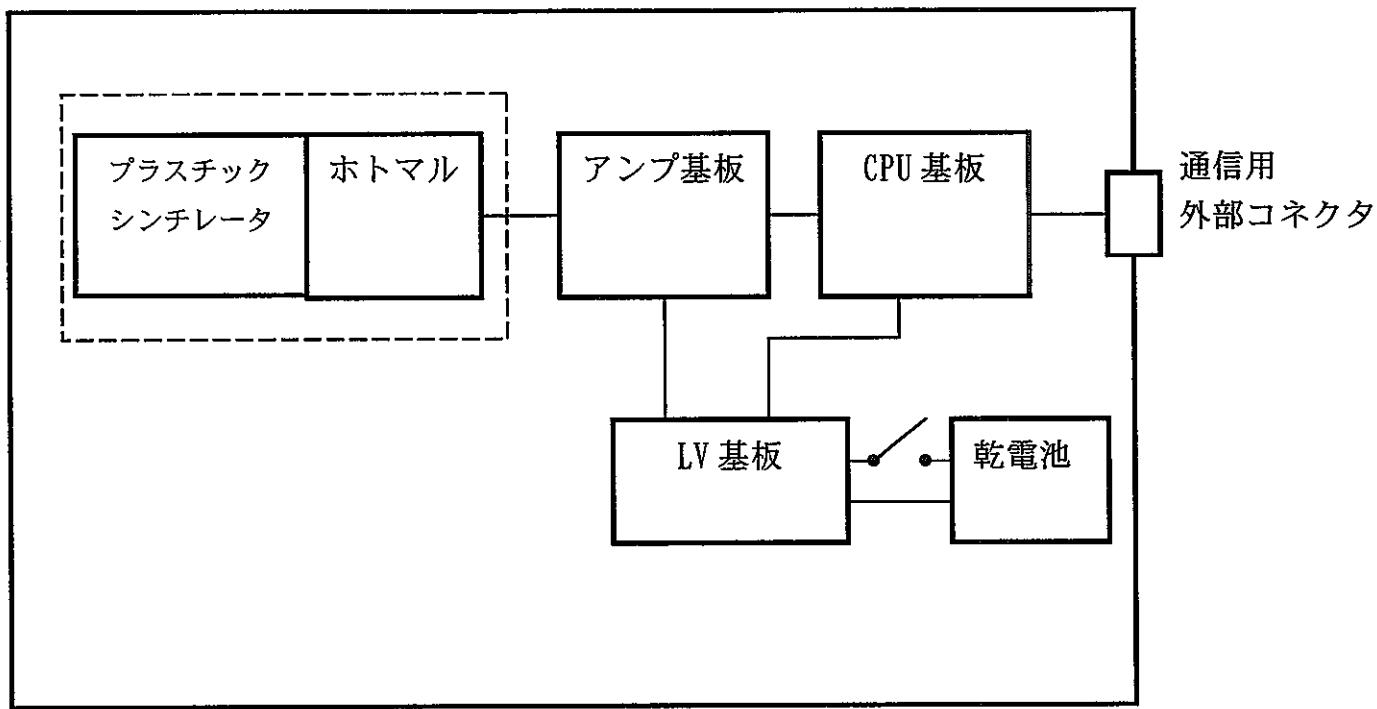


図 3.2.1 ガンマ線検出器の回路構成図



図 3.2.2 小型ヘリコプター掲載用ガンマ線検出器の外観

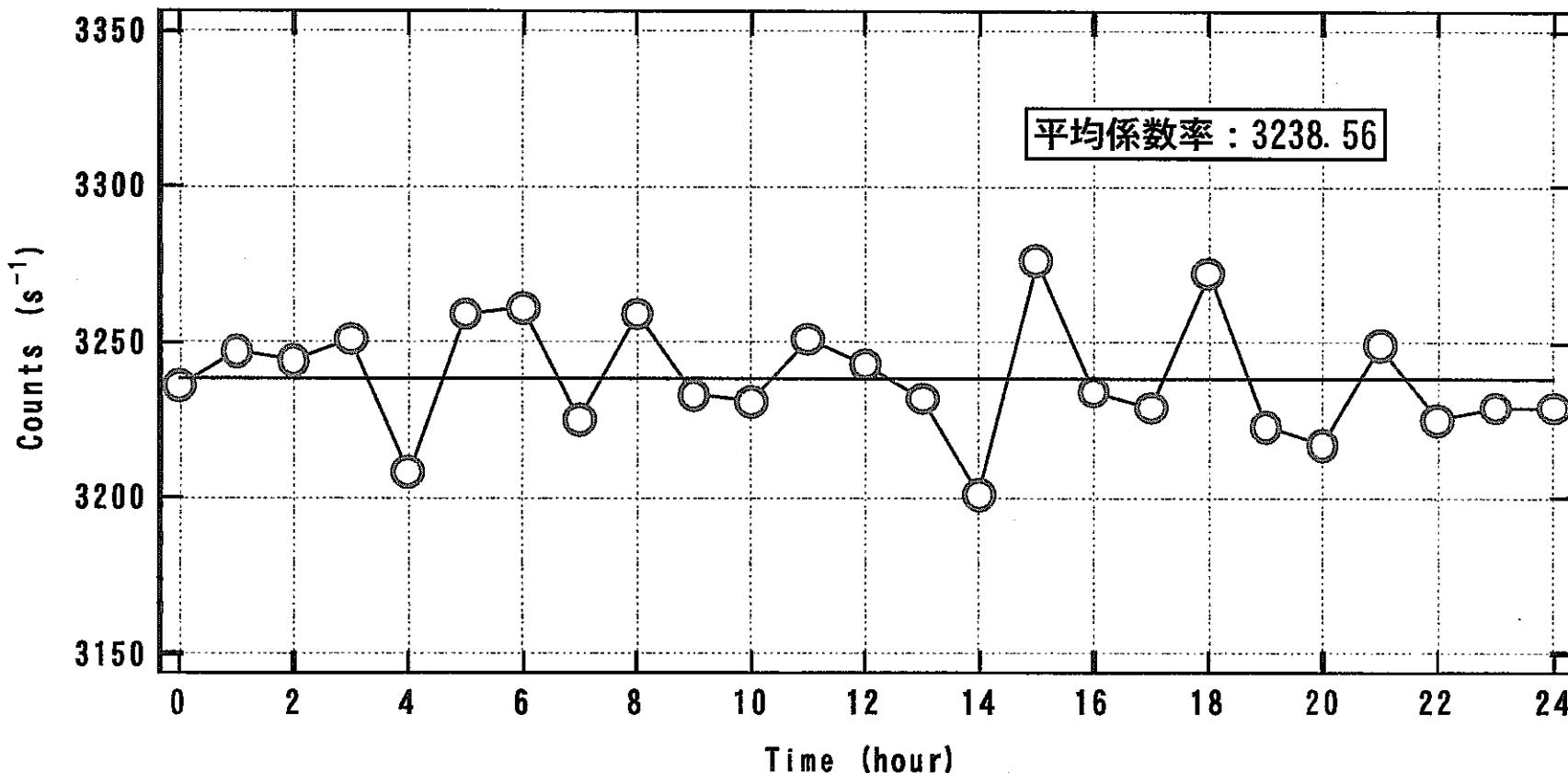


図 3.2.3 ^{60}Co 線源に対する検出出力の時間的安定性

3.2.3 振動の影響

検出器の小型ヘリコプターの搭載を想定し、400ccのバイクを用いた、エンジン起動時及びエンジン連続駆動時に発生する振動および電気的ノイズによる検出系の影響を試験した。図3.2.4に示すように、実験は検出器はバイクの座席シート上に設置した装置で行った。

パソコンにより検出器からのBG計数を連続的に記録させておき、エンジン起動時にBGが統計的な標準偏差以内であるかを試験した。その結果を表3.2.3に示す。ノイズ混入の判断基準は、計数が標準偏差以上であるとした。表より、エンジン起動時にBG計数率に異常が無いことが分かる。エンジン始動時のノイズ混入は無視できる事が分かった。測定は3回行い、良好な再現性を得た。

エンジン連続駆動時のノイズ試験では、エンジンの回転数を2000rpm、4000rpm、6000rpm、8000rpm、10000rpm等に設定し、それぞれの計数率を10回測定した。検出器を搭載する小型ヘリコプターのエンジンは6000rpm程度で駆動するため、上記の設定回転数を選んだ。エンジン連続駆動時の影響を以下の変化率で検討した。

$$\text{変化率 [%]} = \frac{\text{各回転数でのBG計数} - \text{エンジン停止時のBG計数}}{\text{エンジン停止時のBG計数}} \times 100$$

表3.2.4に、各設定回転数でエンジンが駆動されているときの係数及び、変化率を示す。6000rpmの場合が一番大きな変化率をしましたが、4%以下であり、いずれの回転数の場合でも表中偏差内のバラツキと考えられる。

表 3.2.3 エンジン始動時ノイズ試験結果

		起動前	起動後
BG 計数率 [s ⁻¹]	シート上 (振動)	259	253
	距離 50cm	250	

表 3.2.4 エンジン回転数ごとのノイズ調査の結果

回転数 [rpm]	BG 計数	変化率 [%]
停止状態	234.2	—
2000	238.8	1.96
4000	235.1	0.38
6000	242.8	3.67
8000	234.9	0.30
10000	233.7	0.21

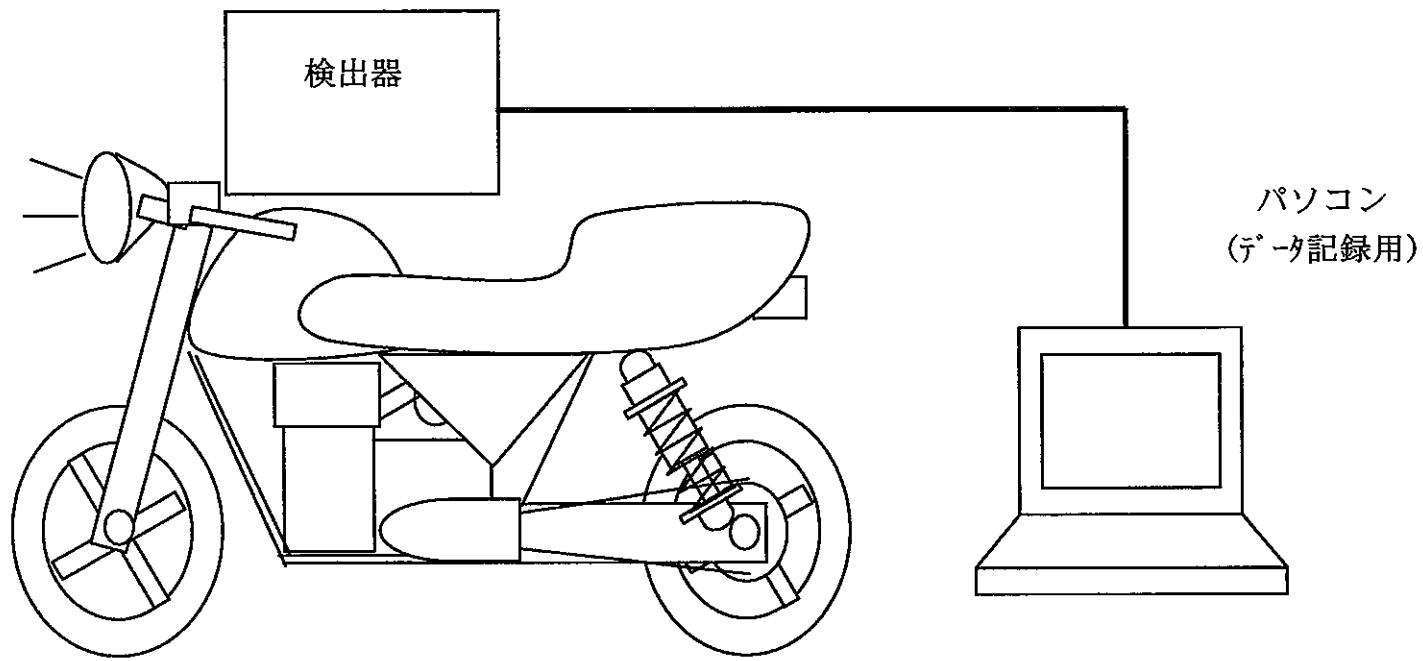


図 3.2.4 振動等の検出器のノイズ試験配置図

3.2.4 電磁気的誘導

図 3.2.5 に示す配置で、トランシーバ（27MHz 及び 145MHz）、携帯電話を用いて、BG 計数率を 10 回測定しました。各々の場合の BG 計数率の平均値および変化率を表 3.2.5 に示す。トランシーバ及び携帯電話は距離 10cm で、検出器上部と側面の 2箇所に設置して測定を行った。最大 6% の変化率であるため、現実には問題にならないと考えられる。

表 3.2.5 電磁気的誘導試験の結果

	BG 計数 [s ⁻¹]		変化率 [%]
通常 BG	314.8		2.48
トランシーバ (27MHz)	上部	275.4	3.53
	側面	295.6	3.37
トランシーバ (145MHz)	上部	308.4	2.54
	側面	314.9	6.1
携帯電話	上部	308.4	2.0
	側面	314.9	0.03

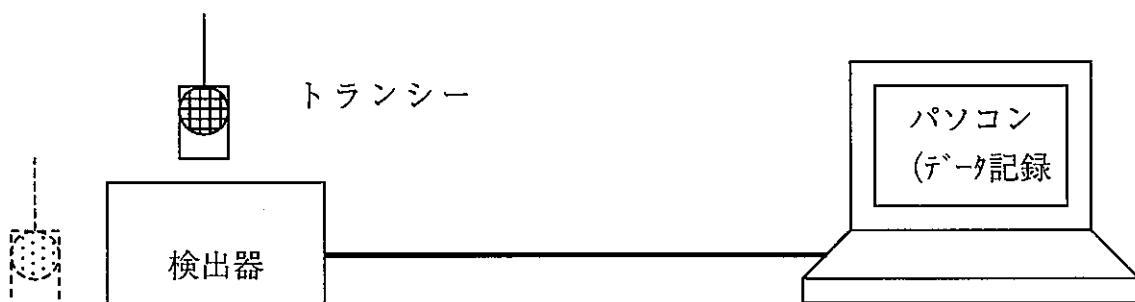


図 3.2.5 電磁気的誘導試験概略図

3.2.5 電気的ノイズの影響

エンジンの回転数を 6000rpm にしたときの、検出器の BG 計数率への変化を距離を変えて測定した。バイクからの距離は 1、2、3、4 および 5m とした。BG 計数率は各距離において 10 回測定した。BG 計数率の平均値及び変化率を表 3.2.6 に示す。計数は、やや大きくなる傾向にあるが、そのいずれも変動は標準偏差内である。

表 3.2.6 電気的ノイズ試験の結果

距離 [m]	BG 計数率 [s^{-1}]	変化率 [%]
1	296.3	2.0
2	294.4	1.34
3	301.8	3.89
4	296.3	2.00
5	289.6	-0.31
エンジン停止時	290.5	—

3.2.6 試験結果のまとめ

小型ヘリコプター掲載での試験に先立ち、温度特性試験、ドリフト試、振動の影響、電磁気的誘導の影響等、放射線を検出・送信する際に懸念されるノイズに対する予備実験を実施した。改良されたガンマ線検出装置において、全て標準偏差内であると考えられる。ヘリコプターに掲載した状態での検出器に混入するノイズについては、そのレベルが不明なため実際にヘリコプターに掲載して調べる必要がある。

3.3 小型ヘリコプターによる模擬試験

原子力発電所等における有事の際の遠隔観測野外放射線モニタリングとして、無人ヘリコプターを使用可能することを検討してきた。昨年度明らかにされた放射線計測系に混入するノイズ等の対策の後、無人ヘリコプターにガンマ線観測機器を搭載し、カリ肥料を用いた模擬試験、自然界の微量な放射線量の変化の計測試験等を実施した。

昨年度の実施状況を簡単にまとめた後、遠隔操作無人ヘリコプターシステムを放射線観測用に改良した箇所を述べる。最後に、本年度行った模擬試験の結果を述べる。本研究で用いた自律航行型無人ヘリコプターの主要な諸元を表 3.3.1 に示す。

3.3.1 昨年度の実施状況

自律航行型無人ヘリコプターのフライト能力、特にプログラムフライト、の確認を行なうと共に、無人ヘリコプターシステムと放射線量測定装置が相互干渉しないこと、即ち放射線計測系がヘリコプター運転時の通信電波に影響を及ぼさないこと、及び測定装置はヘリコプター運転時に正常な計測が可能なこと等を確認する目的で種々の試験を実施した。図 3.3.1 にヘリコプターと放射線計測機器の配置を示す。木製台座に固定した無人ヘリコプター下部のバケット内に γ 線、 β 線測定器を、中性子線測定器を台座の下部に設置した。試験結果を表 3.3.2 にまとめる。計測器のアースをヘリコプターのスタータアース部へ接続した状態では、ヘリコプターのエンジンを駆動時（アイドリング：～6380rpm）に、73MHz 帯送信機を機体に近づけると、恒常的ノイズが発生した。無人ヘリコプター自律システムにおいては、73MHz 帯送信機は基地局に固定されており、実質的にはこのノイズは無害である。又、この配置ではエンジン駆動時に原因不明の針状のノイズが不定期に混じった。但し、ヘリコプターシステムには問題は生じない。以上より、放射線計測系にノイズの混入が認められたが、相互干渉は少なく、無人ヘリコプターと放射線測定装置は十分に共存が可能であることが確認された。

表 3.3.1 使用したヘリコプターの主要な諸言

基本性能

(1) 最大離陸質量	100kg 未満
(2) 最大搭載質量	10kg 以上
(3) 航続時間	80 分以上
(4) 最大運航距離	2km 以上
(5) 最高高度	対地 150m 以上
(6) 最高速度	20km/h 以上
(7) 離陸可能風速	10m/s 以上
(8) ホバリング位置精度	3.0m ³ 以下 (無風時は 1.0m ³)
(9) 画像ブレ (1/100 シャッタースピードにて)	1/1000 以下

主要諸元

(1) メインロータ径	3.0m 以上
(2) テールロータ径	0.5m 以上
(3) 全長 (メインロータ、テールロータ)	3.7m 以下
(4) 機体長	2.8m 以下
(5) 軸間距離 (メインロータ、テールロータ)	1.8m 以下
(6) 全幅	2.5m 以下
(7) 全高	1.3m 以下

(8) 機体総質量 95kg 以下

各部諸元

(1) 機関

形式 水冷、2サイクル、水平対向
始動装置 電動スター \cdot タ
燃料供給 キャブレター
使用燃料 ガソリン・オイル混合(50:1)
空気清浄機 湿式
最高出力 14kW(20PS)以上
最大トルク 21Nm(2.2kgm)以上

(2) 燃料タンク容量

10L以上(予備タンク含む)

(3) 動力伝達装置

クラッチ 乾式(遠心式)
メインロータ駆動 2段減速 減速比 7.42
テールロータ駆動 1段減速 減速比 1.10

(4) 蓄電池

鉛シールドタイプ 12V-7A

(5) 発電装置

12V-140W

(6) フレーム

アルミ板とCFRPで補強したボックス構造

(7) テールボディ

CFRP製のモノコック構造

(8) 降着装置

FRP製板スプリング、アルミパイプスキッド

(9) ペイロード積載位置

降着位置の左右の間

(10) メインロータ	FRP 製
(11) メインロータヘッド	ベル、ピラー混合システム 上下 2 分割構造
(12) テールロータ	FRP 製
(13) テールロータヘッド	リジッドタイプ
(14) ツインラジエター	容量 300cc
(15) ロングリーフ	ペイロード懸架用
(16) 増設ガソリンタンク	容量 4.5

制御装置

(1) センサー	慣性系と GPS 系をカルマンフィルターによるハイブリッド出力
・ INS [慣性航法センター]	3 軸姿勢角、加速度、速度、位置出力
・ GPS 移動局	
形式	リアルタイムキネマティック GPS
精度	水平 1cm 以下、垂直 2cm 以下
周期	1Hz 以上
(2) 制御方式	姿勢角制御、速度制御、位置制御のくみあわせ
(3) コントロールサーボ	
・ メインロータ制御用	3 個
・ テールロータ制御用	1 個
・ キャブレタ開度制御用	1 個

無線装置

(1) データ、映像用送受信機

電波形式	スペクトラム拡散変調波
周波数	2.4GHz 帯
伝送距離	1.5km
伝送速度	1Mbps
空中線電力	10mW/MHz 以下
伝送データ	
画像データ 動画像	
画素数	640×480 ピクセル以上
伝送可能画像数	5 枚/s
信号方式	NTSC 方式
制御データ	機体遠隔操作制御
カメラ制御 (パン、チルト、ズーム)	
機体データ	挙動データ等

(2) マニュアル操縦受信機

電波形式	F M変調方式
周波数	73MHz 帯
伝送距離	200m
伝送速度	2kbps
空中線電力	500m 離れて電界強度が $200 \mu \text{v/m}$ 以下
伝送データ	操縦用データ

表 3.3.2 昨年度のヘリを用いた試験結果のまとめ

No.	テスト項目	テスト結果
1	暗騒音測定	基準値が測定され問題なし。
2	機体、自律システム、測定器電源 ON	<ul style="list-style-type: none"> ・放射線測定側異常なし。 ・ヘリ側異常なし。 ・姿勢制御のみ ON でサーボモーターにビビリ発生（1回のみ）。 <p>※相互干渉によるヘリ側内部の手順問題の可能性あり。</p>
3	エンジンを始動した状態でノイズ 測定 (アイドリング～6380 r p m)	<ul style="list-style-type: none"> ・放射線測定側異常なし。
4	この状態で計測器のアースをヘ リコプターのスタータアース部 へ接続	<ul style="list-style-type: none"> ・73MHz 帯送信機を機体に近づけた際、明らかな恒常的 ノイズの発生を認める。 ・自律システムにおいて、73MHz 帯送信機は、基地局に 固定のため実質無害と考える。 ・基本的には OK ではあるが、針状のノイズが不定期に 混じる。（原因不明）
5	距離テスト（73MHz 帯の電波受 信了解度を確認）	<ul style="list-style-type: none"> ・100mまでは、送信機アンテナ最短で、1 エラーのみで 影響は全く受けていない。

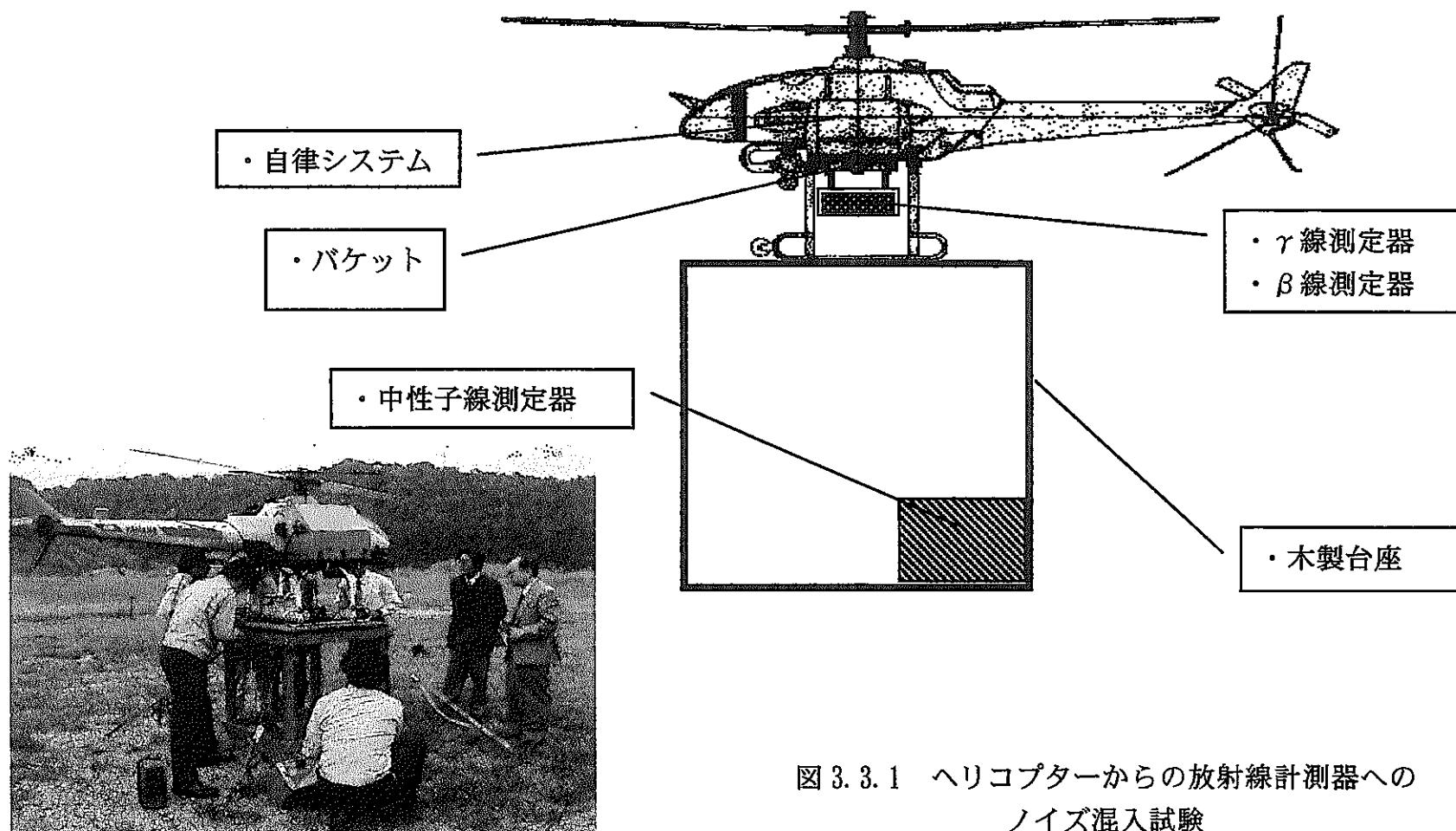


図 3.3.1 ヘリコプターからの放射線計測器への
ノイズ混入試験

3.3.2 無人ヘリコプターシステムの放射線計測用への改良

放射線計測用に、遠隔操作式無人ヘリコプターシステムのモニター表示及びテキストデータ表示の追加変更を行った。無人ヘリコプター取り付け用に製作したガンマ線計測装置の通信確認テスト時に幾つかの不具合が起こり、無人ヘリコプターを用いた模擬試験の前にこれらの改善を行った。又、出来るだけ多くの放射線測定機器が掲載出来る様に、無人ヘリコプターの掲載可能場所を確保した。

使用した遠隔操作式無人ヘリコプターシステムの機能には、

- 1) 機体の航路、軌跡を国土地理院 1/25000 地図上に表示する。
- 2) オペレータが、地図上に任意に飛行経路をプログラムすることが出来る。
- 3) 機体飛行情報（電波通信状態、燃料残量、GPS コンディション、エンジン回転数、飛行高度）が表示される。オペレータはこの情報を見て操縦、ナビゲーションフライトを行うことが出来る。

等が備わっている。上記のモニター表示以外に、図 3.3.2 に示すように、以下の内容が図内に表示出来る事とした。

- 1) 高度表示の色を可変とし、無人ヘリコプターの飛行高度を視覚的に判りやすく表示する。
- 2) 100m 毎に軌道表示を行う。地図を拡大することにより重なり部分を調整できる。
- 3) 軌道上にアイコンを置くと選択部分の重なった箇所の平均値が表示される。
- 4) 放射線強度の時間変化がリアルタイムで表示される。
- 5) 表示される X 軸及び Y 軸のスケールを共に自由に変えることが出来る。
- 5) 放射線強度の位置情報を棒グラフで表示する。

テキストデータ画面で表示される位置データ情報は、GPS 精度上、緯度経度方向 ±20cm、上下方向 ±30cm を示し、5Hz の伝送周期で地上局に伝送されてくる。無人ヘリコプターに掲載した放射線検出器からの放射線線量データもヘリコプター機体位置情報と同様に通信機を使って伝送し、図 3.3.3 に示すように、テキストデータ画面に同時に表示可能とした。尚、放射線データも位置情報と共にダウンリンクされ、伝送周期は GPS データと同じく 5Hz である。

放射線測定装置の通信確認実施時に、測定器から出力されるデータをラインモニタ及びパソコンを通しての確認が出来なかった。CPUが搭載されている基板の入力電源が4.6Vであり、ラインモニタ及びパソコンを通した際、電圧降下又は電流容量不足が原因でにより通信が出来ないことが分かった。写真3.3.1,写真3.3.2に示すように、CPUが搭載されている基板の入力電源に別から5V供給し、正常な通信を可能とした。

又、無人ヘリコプターのフライトに際して、不具合が発生する可能性があると思われる幾つかの箇所に対して、測定器保護を目的とした以下の改良を実施した。

アースをとっているハーネスの芯線がそのままナット締めされていたため、丸型端子を追加して、外れないように固定した。(写真3.3.3参照)

基板保護のため防振させているプレートが固定部分と接触する構造となっていた。放射線検出器へのノイズの混入を避けるため、接触部分(4箇所)にスポンジを添付した。(写真3.3.4参照)

測定子に接続させている同軸ケーブルの芯線が固定されていおらず、振動による断線を避けるためにホットメルト処理を追加した。(写真3.3.5参照)

通常の機体の足よりも160m長いロングリーフの機体に組替え、長さx巾x高さに130cmx450cmx300cmの積載スペースを確保した。このように設計した懸架部を図3.3.4(a)、図3.3.4(b)に示す。懸架はボルト2本で脱着可能なフレームベースにワイヤータイプの防振材を介して組付けられている。

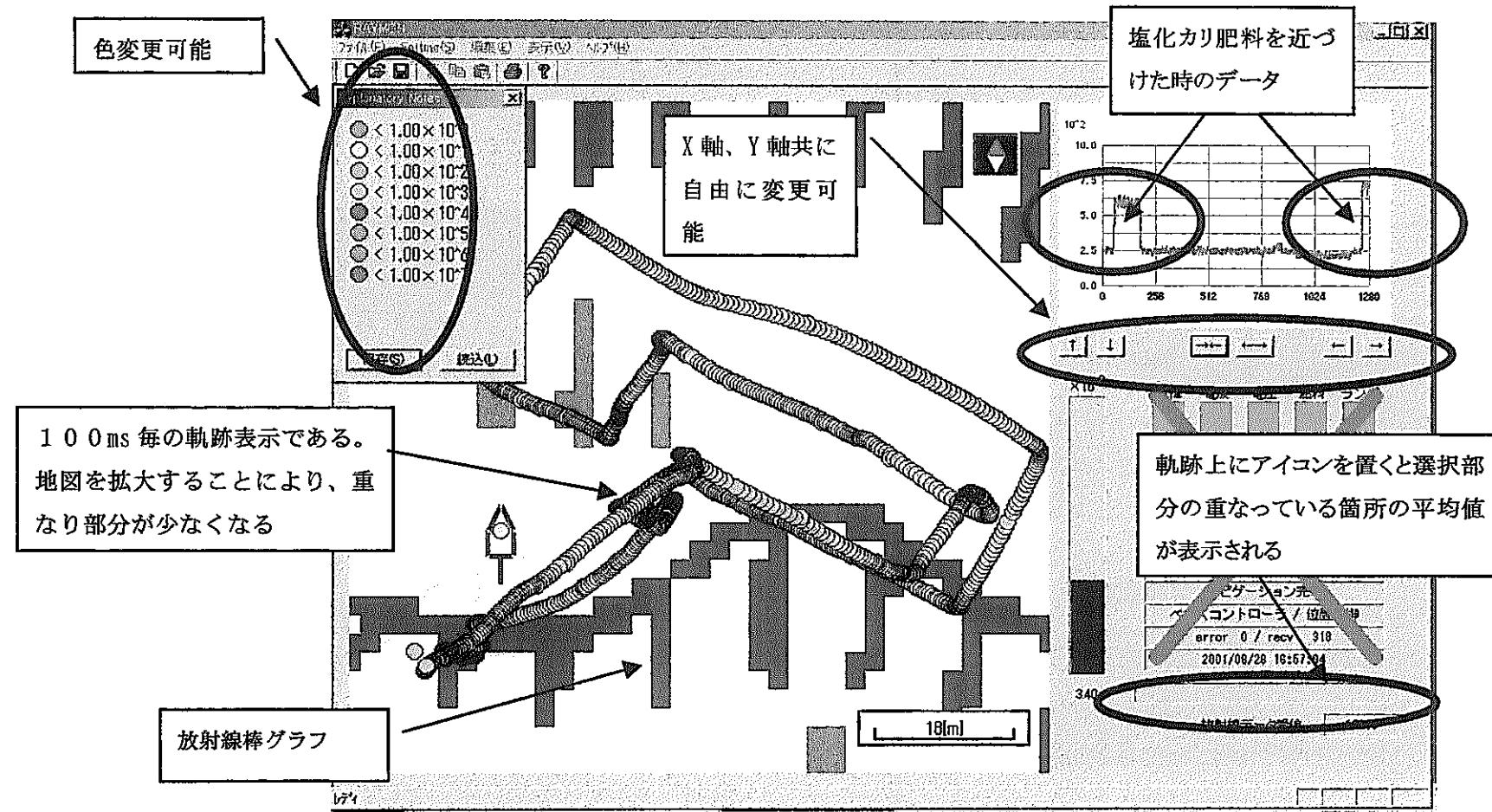


図 3.3.2 放射線計測用へ改良されたモニター画像

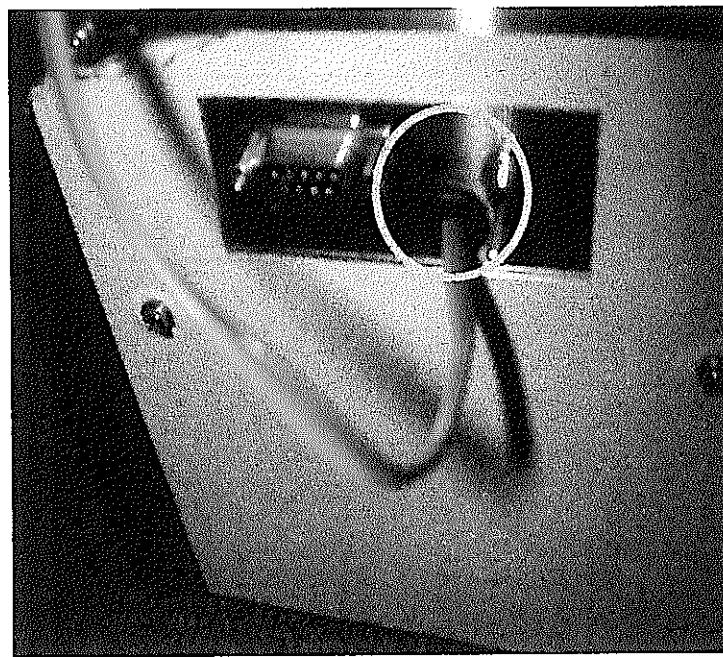


写真 3.3.1 別電源（9.6Vバッテリ）より

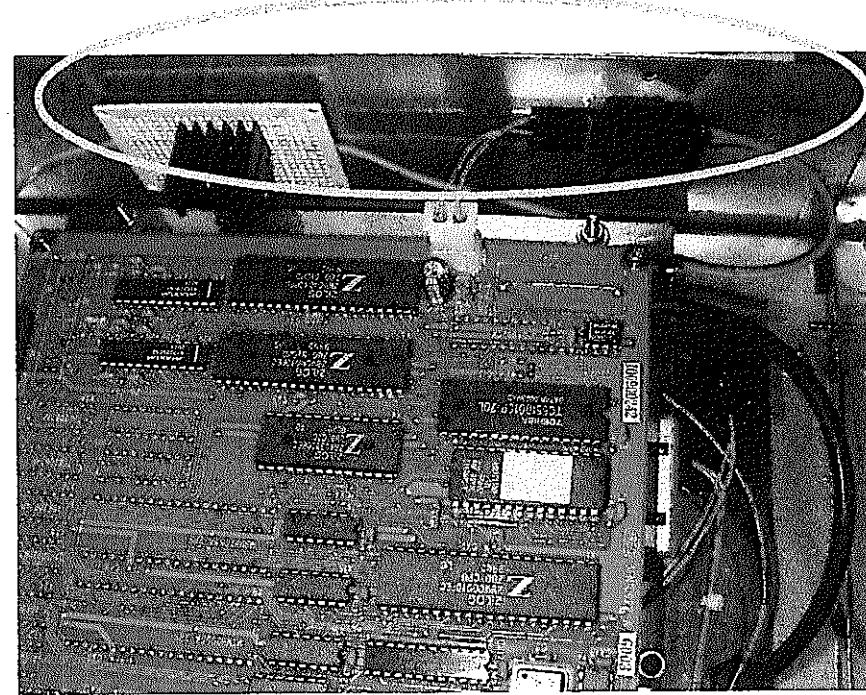


写真 3.3.2 5Vに変換し供給

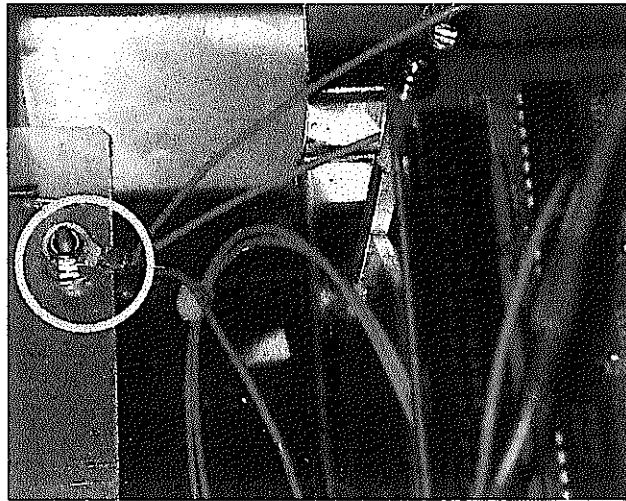


写真 3.3.3
○端子追加

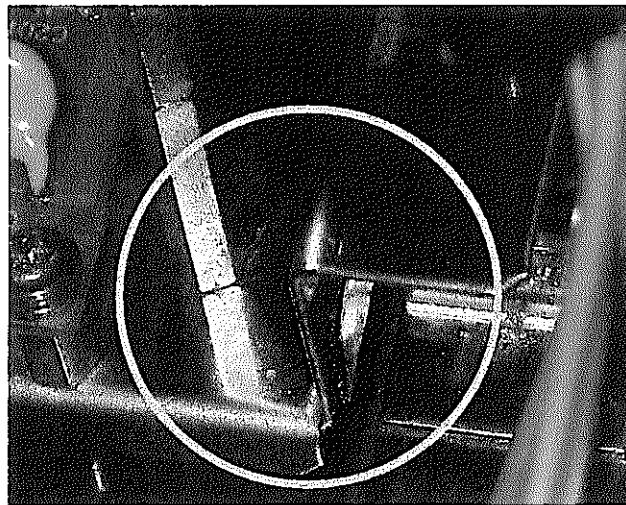


写真 3.3.4
スポンジ追加

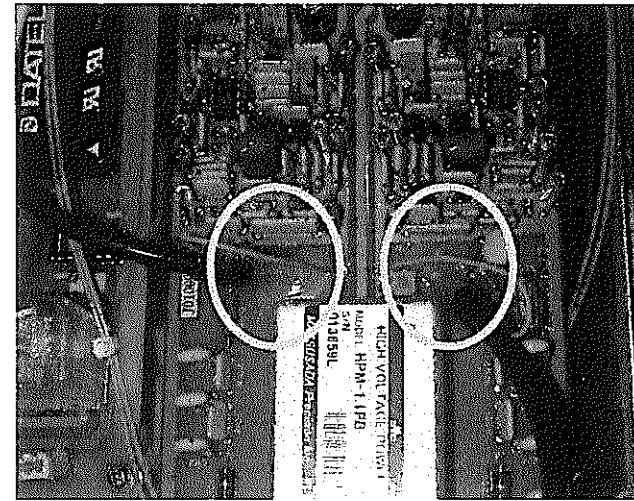


写真 3.3.5 ホットメルトにて固定

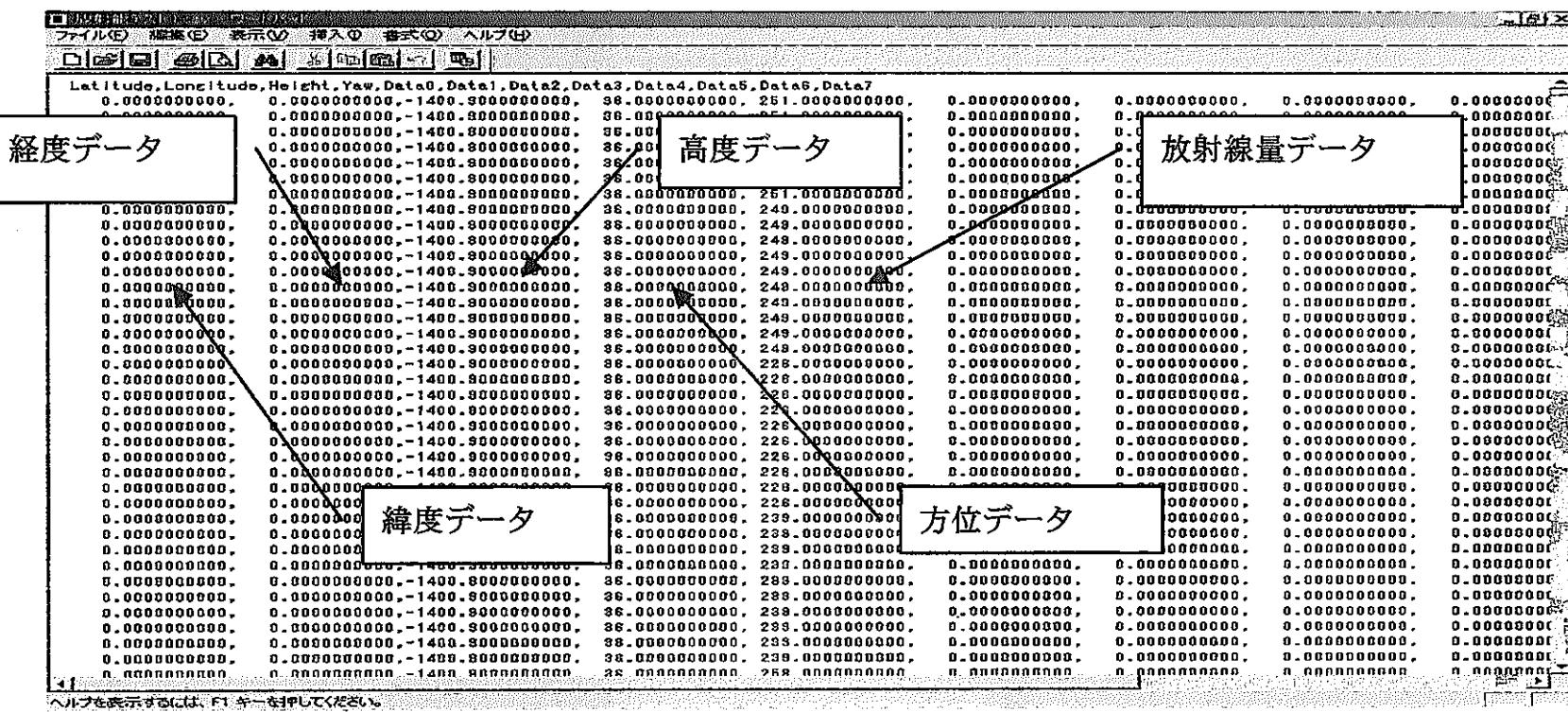


図 3.3.3 放射線計測用へ改良されたテキストデータ例

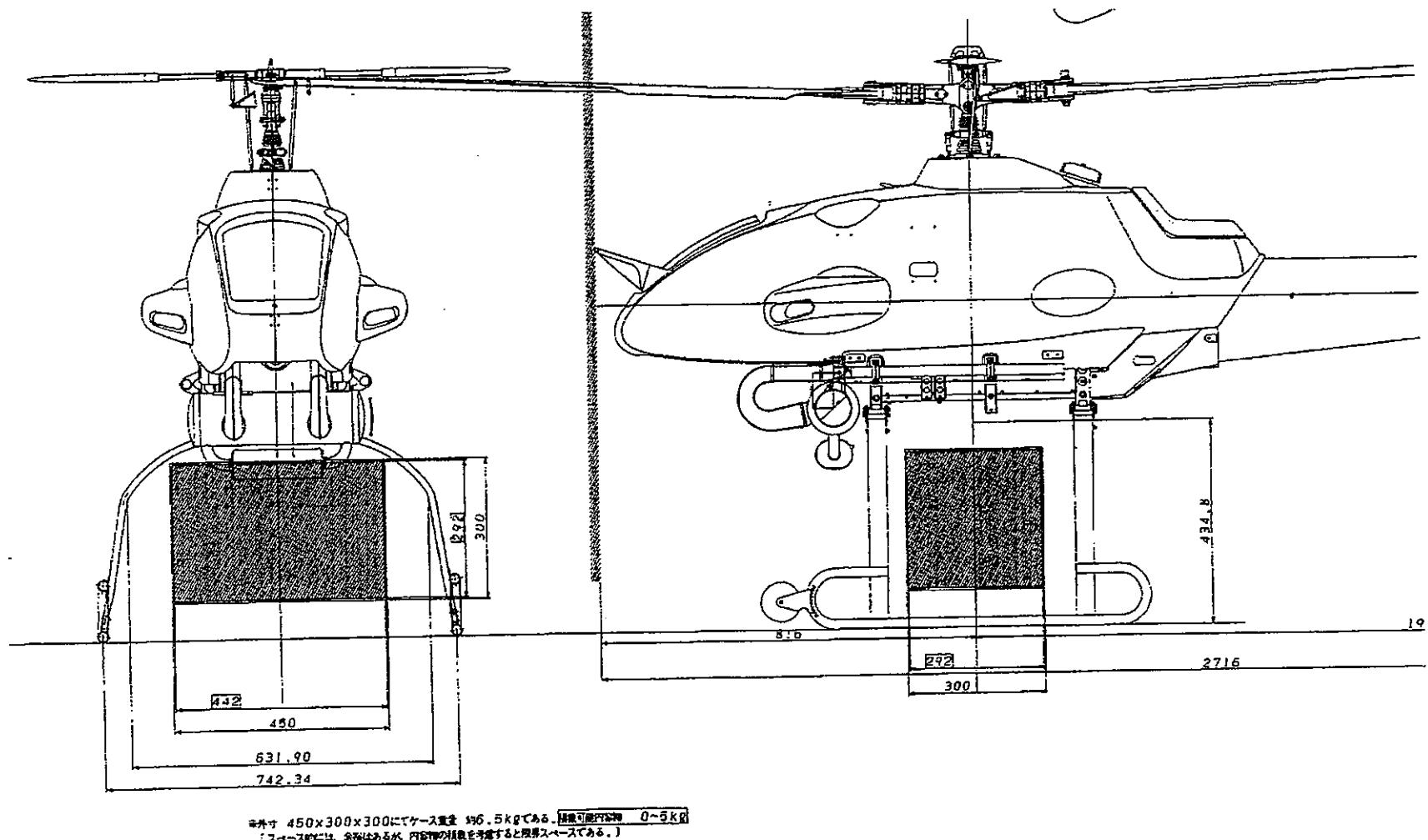


図 3.3.4 (a) ヘリコプターへ積載スペース

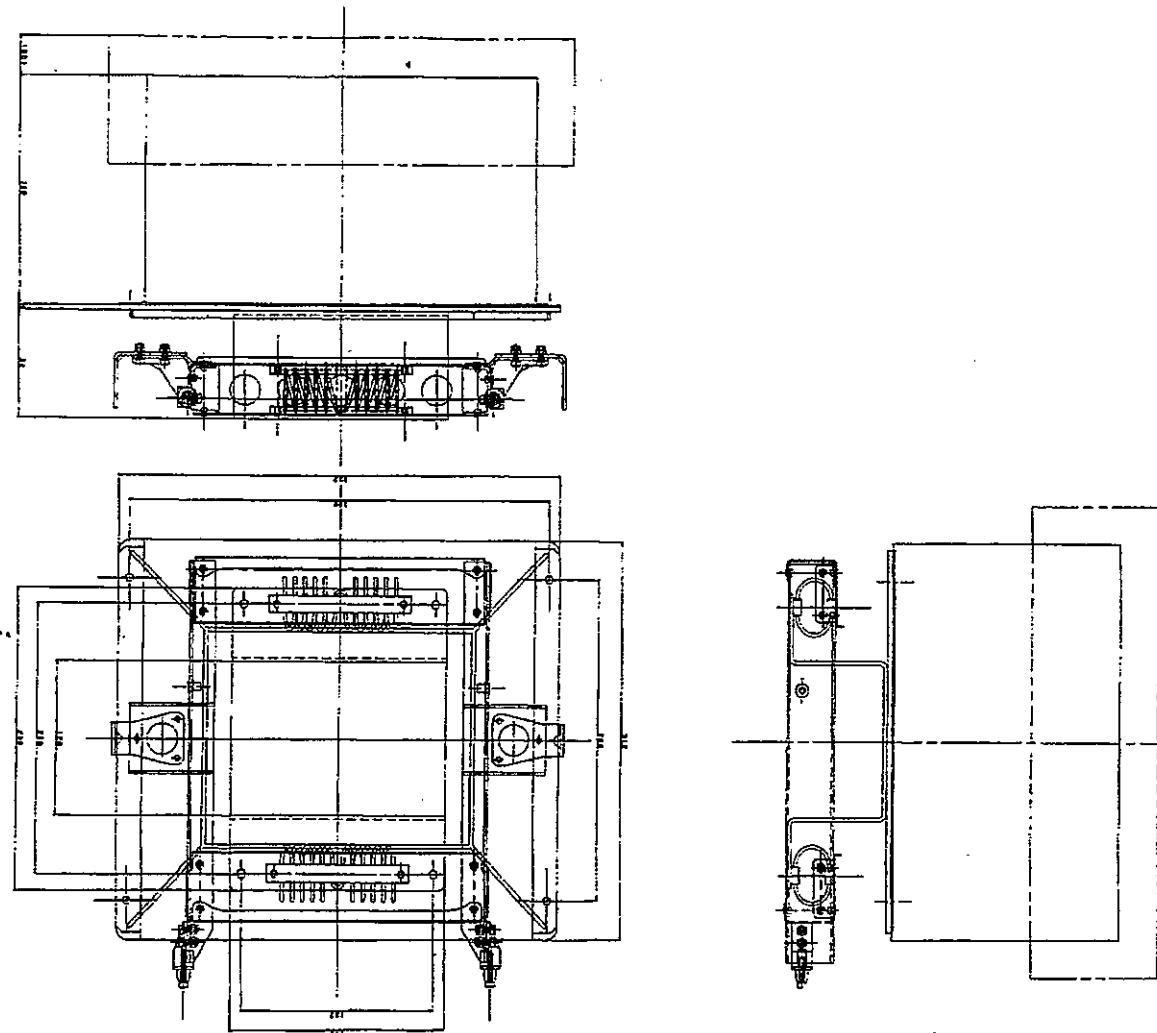


図 3.3.4 (b) ヘリコプターへ組付方法

3.3.3 自律制御型無人ヘリコプターを用いたガンマ線線量測定試験

自律制御型無人ヘリコプターに高感度 γ 線測定器を積載し、ヘリコプターシステムと放射線検出系との相互ノイズテスト、ヘリコプター制御精度、放射線線量測定感度等の基礎的な試験を行なった後、カリ肥料を用いた放射線源搜索テスト及び海岸線における自然界の放射線量測定の試験を行ない、原子力災害時の実用性について検討を行った。試験実施場所は、ヤマハ発動機株向笠フライテ스트場（静岡県磐田市竹之内字中原 1171 番外）及び遠州灘海岸（静岡県磐田郡福田町）である。

(1) ノイズ確認試験

ヘリコプターのエンジンの駆動（回転を 5000-6000rpm）、距離 20m 及び距離 1m 離れた位置でのプロポ電波発信時、及び携帯電話発信時（エンジンオフ、プロポオフ）でのガンマ線検出器のバックグラウンド計数率を測定した。その結果を表 3.3.3 に示す。検出系は外部からの電波ノイズ、エンジン点火ノイズ等の影響を全く受けていないことが分かる。

(2) 自律航行確認試験

操作用モニターで飛行ルートを設定し、自律航行を行なう。ヘリコプターが $\pm 2\text{m}$ の精度で飛行することを確認する。飛行パターンを図 3.3.5 に示すように長方形に設定した。図中、緑線がプログラム設定経路であり、赤が実際の飛行経路である。試験の結果は、

横誤差	0m
停止位置誤差	3m

であった。機体を飛行させ、目標物を搭載カメラで捕らえたモニターで確認する試験を、高度 3m, 5m, 10m で行い、いずれの高度に於いても良好であった。

停止位置誤差が 3m になったのは GO TO POINT モードで長距離を走った後、スムーズに停止できるように、目標点の 3m 以内になつたら止めるプログラムになっていたためであり、高精度ライトモードを移植すれば精度良く停止位置に移動する。これまでのヤマハの実績では静止精度で $\pm 1\text{m}$ 、動作精度はスピードにもよるが 2m/s で $\pm 2\text{m}$ 程度である。

自律制御型無人ヘリコプターシステムには調査用カメラとは別に操縦用カメラが 3 台搭載されているので放射線を観測しながら、その時の下面状況を観測可能である。放射線測定時は、1 台は真下観測、1 台は進行方向観測に用いる。もう 1 台はチルト、パン軸に駆動できズームも可能で基地から自由にコントロールできるので、目標物把握に適している。

表 3.3.3 種々の状況でのガンマ線検出系の出力カウント数

試験条件	カウント数
Back ground	250 cps
エンジン ON (回転数 : 5-6000 rpm)	250 cps
アーム電波発信時 (距離 : 20m)	250 cps
アーム電波発信時 (距離 : 1m)	250 cps
携帯電話発信時 (エンジン, アーム電波 OFF)	250 cps

操縦ダイアログボックス

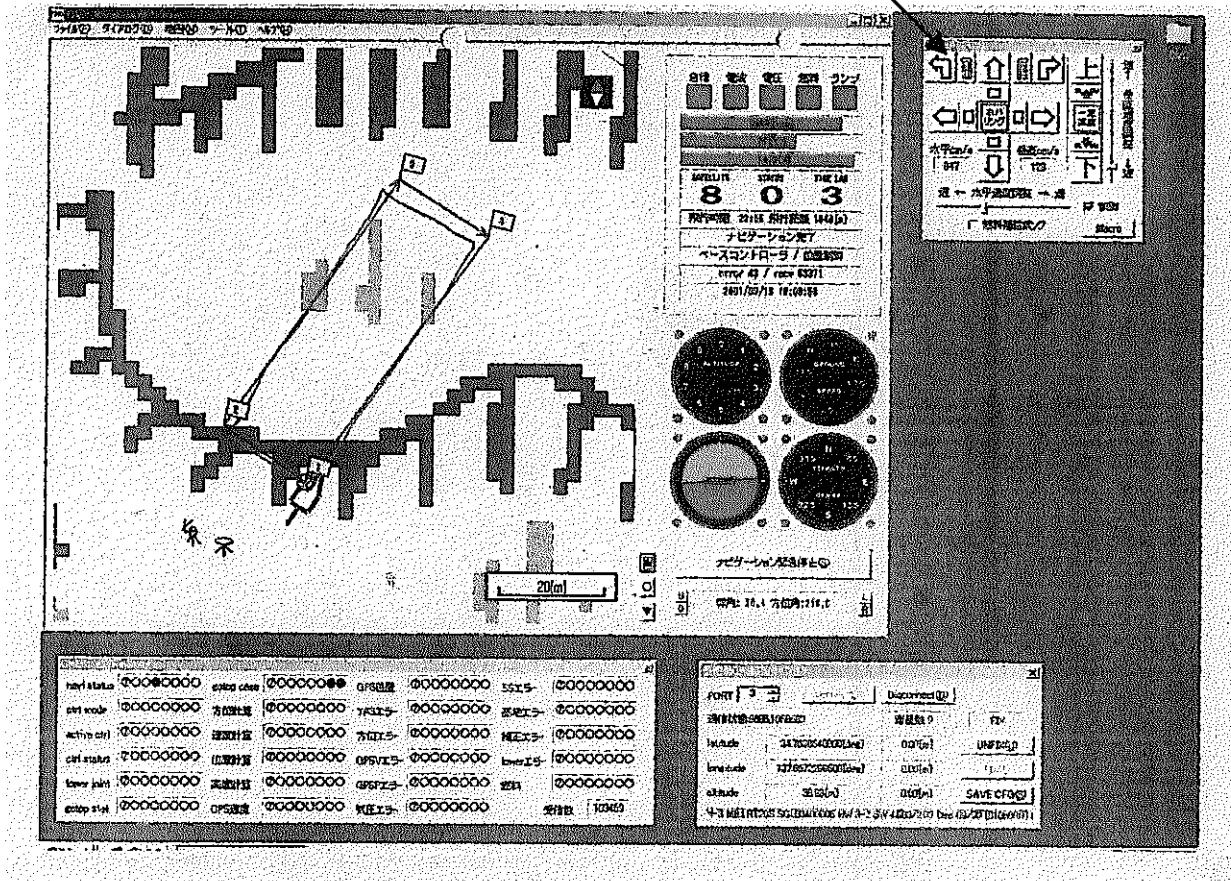


図 3.3.5 自律航行確認試験の飛行パターン

(3) 線量率の感度試験

(3-1) 高度別感度試験

放射線源としてカリ肥料を2段重ねで以下のように並べた。

下段： $4 \times 4 = 16$ 個

上段： $4 \times 3 = 12$ 個 ($2m \times 1.4m$)

この上空でホバリングを行ない、1~10mの高度でガンマ線の検出を行った。各々の高度で検出された値を、以下に示す。

1m	5.8×100 cps
2m	3.5×100 cps
3m	3.0×100 cps
5m	2.5×100 cps
10m	2.2×100 cps

高度に応じて検出される放射線線量が少なくなることが分かる。高度1mではカリ肥料とヘリのクリアランスが少なく且つ、機体が不安定であったため得られた値のバラツキが大きかった。

(3-2) 通過スピード別感度試験

ヘリコプターの高度を2mに固定し、3段階のスピードでカリ肥料の上空を通過させ計測を行った。各々のスピードでの測定値の最大値は

0.5m/s	3.6×100 cps
1m/s	3.6×100 cps
2m/s	3.1×100 cps

であった。スピードが速いほど最大指示値のポイントがカリ肥料から離れる。巾2mの放射線線源上を2m/s以上のスピードで飛行すると、過小評価となることを示す。

高度1mではヘリコプターのフライトが不安定なため測定値にバラツキが多くテスト条件には不適と判断した。逆に5m以上ではバックグラウンド値以下となってしまうためテスト高度を2mに選んだ。

以下のテストでは、ヘリコプタースピードは1m/sとした。

(4) 緊急時の自動帰還システムの動作確認試験

自律フライト中に地上局にトラブルまたは電波障害が発生して指令がヘリコプターに届かなくなった時に、どのようにエマージェンシー対応がおこなわれるかを実際に通信機の電源を切って確かめた。通信機の電源が切られたヘリコプターは自動帰還モードに入り、5秒間のホバリングの後、5m上昇、その後機首を基地に向か直線的に離陸ポイントの上空にもどってきた。この時点で、73MHzプロポで操縦権をマニアルに戻し着陸させた。

本試験で使用した自律制御型無人ヘリコプターシステムでは、自律制御システムの中で最も発生頻度が高いと思われる電波トラブルに対しては、それだけでは墜落しないシステムとなっている。法律上、強い電波は使用で出来ない。自律システムで使っている電波はすべて免許を必要としない電波である。そのため実際のフライトに当たっては電波障害が起こっても安全に基地に着陸できる自動帰還モードの装備は必須となる。電波以外の構成要素についてもすべてトラブルに対するプログラムがくまれているので、無人ヘリコプターをオペレイトする人はそれを理解しておく必要がある。

(5) 放射線源検索試験

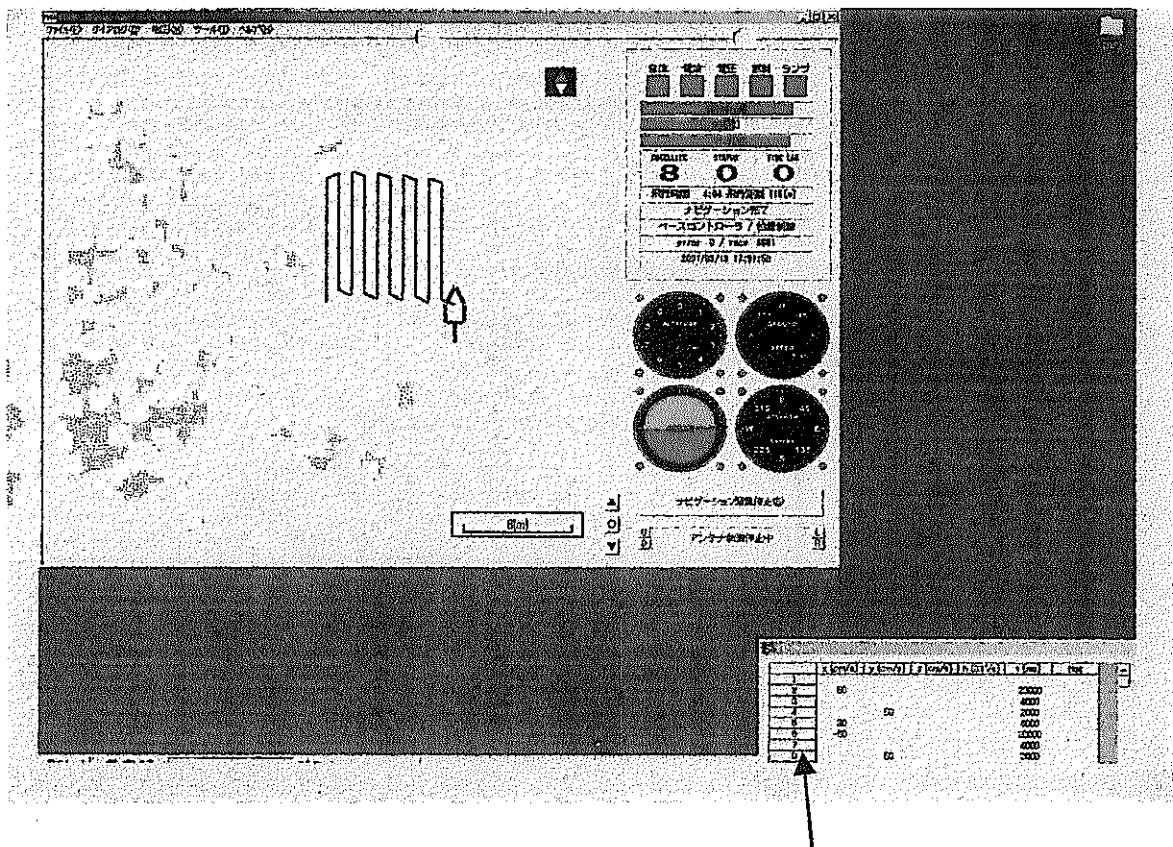
上記カリ肥料を試験場中央に設定し、プログラム飛行によりヘリコプターを高度2mでジグザグ的に飛行させた。線量率表示モニターに線量率分布マップ表示が表示され、何処に肥料があるかを判定する試験を実施した。

図3.3.6にプログラムしたフライトに軌跡を示す。10m前進して1m右移動、10m後進して1m右移動これを5回繰り返して10m四方をスイープするパターンがプログラムされている。プログラムの入力の仕方はスピード×時間のタイムスケジュールを入力することで比較的簡単に見える。プログラムフライトでは、開始点でヘリコプターをホバリングさせておき、プログラム開始のボタンをおすと全自動でパターン通りにヘリコプターがフライトする。

実施した探索フライトでは、図3.3.7のモニター画面上のグラフに示した様にはっきりカリ肥料の場所を浮き出させることができた。暗騒音レベルである緑から肥料に近づくに連れて、黄色、オレンジ色、ピンク色、赤色と色が変わり放射線量の多いところが浮き上がって見える。又、右上の放射線量表示グラフを見ても肥料の上を通過している時は特徴的に計測値が上昇することが確認できる。

フライト軌道が乱れているのはスケールが細かいことに起因している。実用上はこのままで充分と考えられるが、前述の様に、高精度フライトモードを移植すれば位置精度は改善される。

尚、グラフの表示を切り替えることでより、目的とする対象物の場所を見やすくすることができます。図3.3.8のモニター画面は水色、緑色、黄色の表示をマスクし隠したものである。



飛行プログラム入力窓

図 3.3.6 放射線源捜索試験のフライトに軌跡

放射線量カラー表示

放射線量表示グラフ

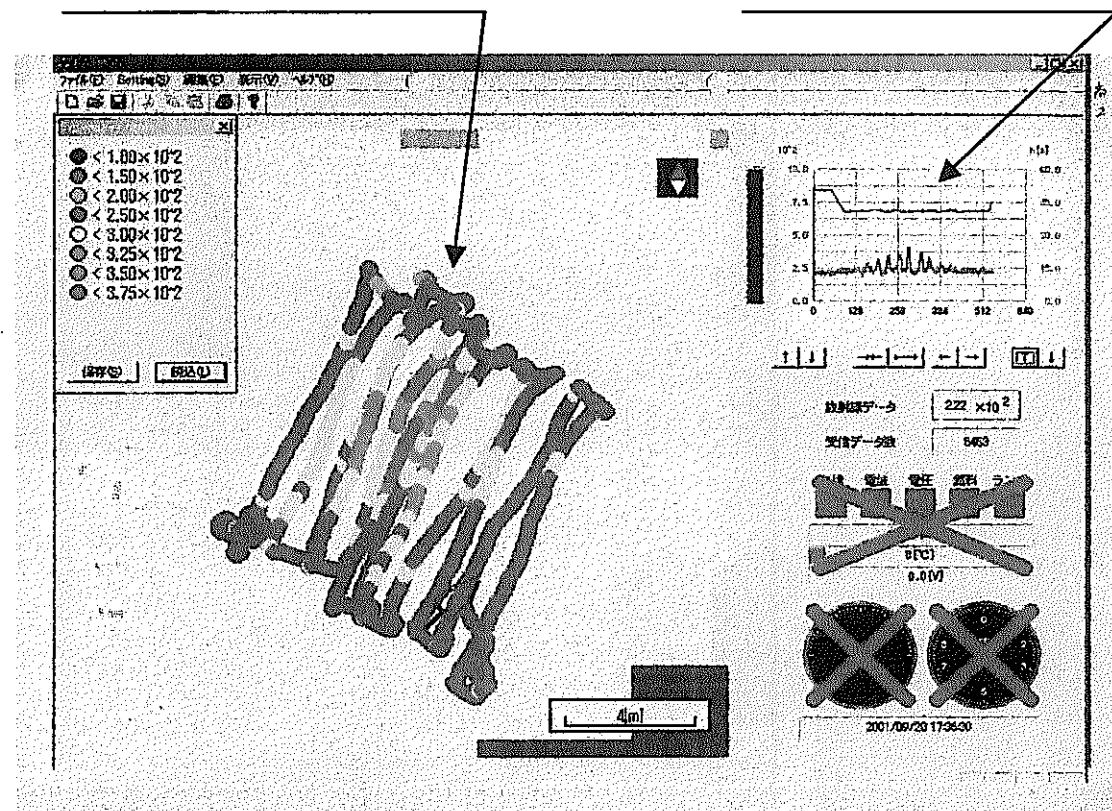


図 3.3.7 放射線源搜索試験結果のモニター画面

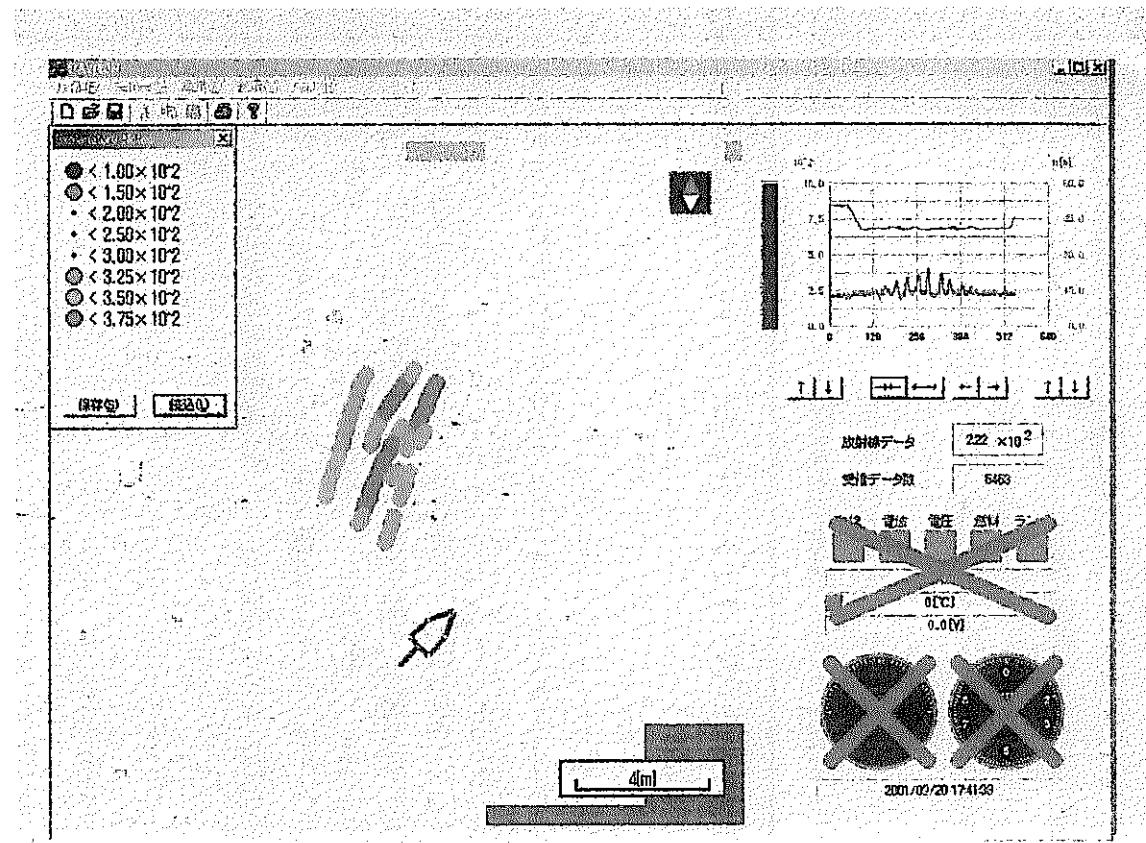


図 3.3.8 図 3.3.7 の水色、緑色、黄色の表示をマスクしたモニター画面

(6) 海岸線における実フィールドの放射線量測定試験

遠州灘福田の海岸に移動し海岸線での海水の遮蔽効果による差を測定した。自然放射線による差を見分けられるのなら、原子力災害時の放射線測定用のツールとして充分な感度を有していると考えることが出来るためである。

この試験のフライトでは海岸線の砂浜に基地をおき、自律フライトの中のマウスダイアログモード*でヘリコプターからの映像を見ながら指令を入力し、ヘリコプターを飛行させた。飛行経路は、高度 50m 一定で波打ち際を挟んで海側 50m、陸側 50m をジグザグ上に 3 往復、次に内陸部で微速前進しながら 100m まで高度をあげ機首をわずかに右に振り微速後退しながら 50m まで高度をさげる事とした。

図 3.3.9 に観測結果を示す。波打ち際の往復時に、はくっきり波打ち際の線でグラフの色がかわり、海側において海水の遮蔽効果により放射線量の低下することが明確に示されている。

高度を上げた試験では、ヘリコプターの高度の上昇とともに放射線量が少なくなることが確認できた。

<マウスダイアログモード*について>

マウスダイアログモードとは、F4 画面にあるダイアログボックスの上下、左右、前後、右(左)周り回転のボタンをパソコン上でマウスにより選ぶことでその動作をさせるモードである。ヘリコプターの持つ 4 つの運動軸が独立にコントロール出来る。選ばれていないボタンは静止を維持する。たとえば“上”ボタンをクリックすると前後左右は位置をキープしながら真上に 1m/s のスピードで上昇する。また、2 つ以上のボタンをえらぶことも可能でその組み合わせの挙動が出来る。例えば“左 “と” 左回転”を同時に選べば左ノイズインサークルで正確な円運動を行うことが可能である。

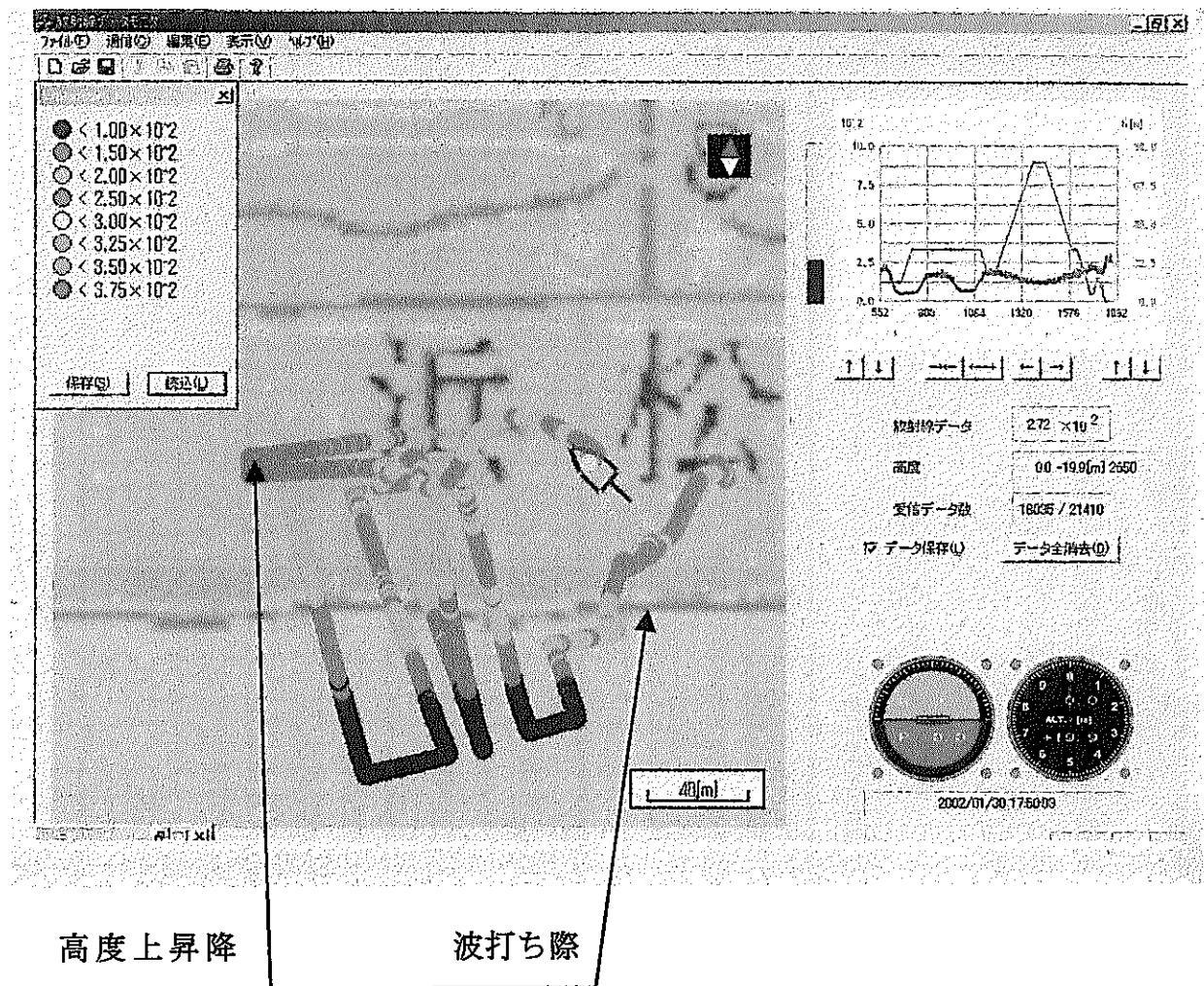


図 3.3.9 遠州灘福田の海岸における自然界放射線量測定

3.4 まとめ

緊急時支援組織のグループ・アントラ(GROUPE INTRA)、及びSYSDRON Program を考案したCAC SYSTEMS社への海外調査では、具体的・実用的な疑問に対する回答が得られると共に、遠隔操作式ヘリコプターを用いた手法により緊急時の放射線モニタリング機能が強化されることが確認された。

小型ヘリコプター掲載用に製作した高感度 γ 線量測定器を、ヤマハ製自律航行型無人ヘリコプターに搭載し、屋外での放射線量測定を実施した。この試験により、以下の結果を得ることができた。

- (1) 自律航行型無人ヘリコプターと放射線量測定器は相互干渉をほとんど受けず、正確なフライトと正確な測定が行える。
- (2) 小型ヘリコプター掲載用に作製した高感度 γ 線量測定器は、信号の通信に問題は無く、測定される計数率にノイズの混入も無く、ヘリコプターに掲載された状態で微量なガンマ線まで計測可能である。
- (3) 塩化カリ肥料を試験用放射線源としたパターンフライトにおいて、未知の放射線源を発見し、その位置を特定できることができた。
- (4) 海岸線でのテストにより、自然界の微量な放射線量の変化を見極めることができる高感度なシステムであることがわかった。

上記の成果により自律航行型無人ヘリコプターが持つ高精度なフライト制御技術と自動帰還モード等のフェールセーフ機能を活用することにより、実用性の高い三次元放射線量測定システムが可能と思われる。