

JAERI-M
8600

寒天容積線源法による Ge (Li)
半導体検出器の校正

1979年12月

柳瀬 信之・笠井 篤

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

寒天容積線源法によるGe(Li)半導体検出器の校正

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

柳瀬 信之・笠井 篤

(1979年11月13日受理)

Ge(Li)検出器の環境試料に対するピーク効率の校正を寒天容積線源法で行い、その実用性を検討した。

用いた線源の形状は円柱で、直径が6 cmと8 cmの2種類、厚みがそれぞれ1, 5, 10, 20, 30, 40 (直径8 cmのみ) mmで、合計11種類である。核種は、 ^{22}Na , ^{51}Cr , ^{56}Co , ^{57}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{241}Am の8種類である。調製した容積線源の放射能は、0.03~0.2 μCi であった。線源の強さに応じて $10^3\sim 10^4$ 秒間測定を行った。校正に要した日数は、線源作りに1日、測定に約1週間であった。

容積線源の厚みと効率の逆数との関係から、寒天固化操作による誤差はかなり小さいことが分った。また、効率曲線の各測定点のばらつきから、放射能標準溶液の濃度の値、希釈操作、 γ 線放出比のデータ、測定時の γ 線のサム効果などが原因と考えられる誤差が認められた。しかし、得られた絶対ピーク効率曲線の誤差は5~10%であり、環境試料の測定に対しては充分使用しうるものであった。

Calibration of Ge(Li) Semiconductor Detector
by Method using Agar Volume Source

Nobuyuki YANASE and Atsushi KASAI
Division of Environmental Safety Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received November 13, 1979)

The Ge(Li) semiconductor detector was calibrated for measurements of environmental samples. The radioisotopes used for standard sources are ^{22}Na , ^{51}Cr , ^{56}Co , ^{57}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{144}Ce and ^{241}Am . These are mixed with hot agar aqueous solution and fixed uniformly in a cylindrical plastic case in cooling. The agar volume source is advantageous in handling over the fluid aqueous source. The prepared cylindrical standard sources are in diameters 6 and 8 cm and thicknesses 1, 5, 10, 20, 30 and 40 mm (only for 8 cm diameter). The radioactivities of prepared standard sources are between 0.03 μCi and 0.2 μCi . It takes only a week to make the calibration except data processing.

The obtained full energy peak efficiency curves include 5-10 % error due to preparation of agar source, reference radioactivity data of purchased standard solutions, reference data of branching ratio of gamma-ray and sum effect. The efficiency curves, however, are sufficient for quantitative analysis of environmental samples.

Keyword: Ge(Li) Semiconductor Detector, Environmental Sample, Agar Volume Source, Cylindrical Standard Source, Calibration Method, Full Energy Peak Efficiency Curve, Error

目 次

1. 序 論	1
2. 標準線源の調製	1
2.1 希釈標準溶液の調製	1
2.2 標準容積線源の調製	2
3. 標準線源の測定	2
3.1 Ge(Li) 検出器と測定装置	2
3.2 標準容積線源の測定	3
3.3 データ解析	3
3.4 測定結果	4
4. 結果と考察	4
参考文献	6
附録 I	7
附録 II	7

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Preparation of Standard Sources	1
2.1 Preparation of Diluted Standard Solutions	1
2.2 Preparation of Standard Volume Sources	2
3. Measurement of Standard Sources	2
3.1 Ge(Li) Detector and Measurement System	2
3.2 Measurement of Standard Volume Sources	3
3.3 Analysis of Data	3
3.4 Results of Measurement	4
4. Results and Discussion	4
References	6
Appendix I	6
Appendix II	7

表 目 次

Table 1	標準寒天容積線源の調製に使用した放射能標準溶液	7
Table 2	Ge (Li) 測定機器の補償性能	10
Table 3	Ge (Li) 検出器のバックグラウンドスペクトル中のピーク計数率 (cph)	11
Table 4	Ge (Li) 測定機器の長期間測定によるピーク中心チャンネルの変動	10
Table 5	ピーク効率の算出に使用した核データ	12
Table 6	ピーク効率と γ 線のエネルギーとの関係式	13
Table 7	Ge (Li) γ 線スペクトロメトリーによる各種環境試料中の放射性核種の検出 限界	14
Table 8	検出限界を求めた各試料の測定条件	15

図 目 次

Fig. 1	Ge (Li) 検出器のバックグラウンドスペクトル	16
Fig. 2	$^{241}\text{Am} - ^{56}\text{Co}$ 寒天容積線源の γ 線スペクトル (直径 6 cm, 厚み 1mm)	17
Fig. 3	ピーク効率の逆数と線源 (直径 6 cm) の厚みとの関係	18
(A)	^{57}Co , ^{22}Na と ^{137}Cs について	18
(B)	^{144}Ce と ^{51}Cr について	19
(C)	^{56}Co について	20
(D)	^{241}Am と ^{56}Co について	21
Fig. 4	ピーク効率の逆数と線源 (直径 8 cm) の厚みとの関係	22
(A)	^{57}Co , ^{22}Na と ^{137}Cs について	22
(B)	^{144}Ce と ^{51}Cr について	23
(C)	^{56}Co について	24
(D)	^{241}Am と ^{56}Co について	25
Fig. 5	近似式 $1/\epsilon = a + bh + ch^2$ の係数 a と γ 線のエネルギーの関係	26
Fig. 6	近似式 $1/\epsilon = a + bh + ch^2$ の係数 b と γ 線のエネルギーの関係	26
Fig. 7	近似式 $1/\epsilon = a + bh$ の係数 a と γ 線のエネルギーの関係	27
Fig. 8	近似式 $1/\epsilon = a + bh$ の係数 b と γ 線のエネルギーの関係	27
Fig. 9	容積試料 (直径 6 cm) に対する厚み別効率曲線	28
Fig. 10	容積試料 (直径 8 cm) に対する厚み別効率曲線	29
Fig. 11	ウラン鉱石粉末, トリウム鉱石粉末と KCl 試薬を用いて測定した効率曲線 (直径 6 cm, 厚み 3 cm)	30
Fig. 12	放射能標準溶液を用いて測定した効率曲線 (直径 13 cm, 厚み 7 cm)	31
Fig. 13	^{60}Co の 1332 keV γ 線のスペクトルと Ge (Li) 測定機器の分解能	32

Table Contents

Table 1	Radioactive standard solutions used for the preparation of standard agar volume sources	9
Table 2	Quality assurance data of Ge(Li) detector system	10
Table 3	Counting rate(cph) of gamma-ray peak in background spectrum of Ge(Li) detector	11
Table 4	Peak channel shift in measurement for a long time period by Ge(Li) detector system	10
Table 5	Nuclear data used to calculate the peak efficiency	12
Table 6	Relational equation between peak efficiency and gamma-ray energy	13
Table 7	Detection limit of radioactive nuclides in various environmental samples by Ge(Li) gamma-ray spectrometry	14
Table 8	Measuring conditions of detection limit for each sample	15

Figuer Contents

Fig. 1	Background gamma-ray spectrum of Ge(Li) detector	16
Fig. 2	Gamma-ray spectrum of ^{241}Am - ^{56}Co agar volume source (6 cm in diameter and 1 mm in thickness)	17
Fig. 3	Relation between reciprocal of peak efficiency and thickness of source (6 cm in diameter)	18
	(A) for ^{57}Co , ^{22}Na and ^{137}Cs	18
	(B) for ^{144}Ce and ^{51}Cr	19
	(C) for ^{56}Co	20
	(D) for ^{241}Am and ^{56}Co	21
Fig. 4	Relation between reciprocal of peak efficiency and thickness of source (8 cm in diameter)	22
	(A) for ^{57}Co , ^{22}Na and ^{137}Cs	22
	(B) for ^{144}Ce and ^{51}Cr	23
	(C) for ^{56}Co	24
	(D) for ^{241}Am and ^{56}Co	25
Fig. 5	Relation between coefficient a in approximate equation, $1/\epsilon = a + bh + ch^2$, and gamma-ray energy	26

Fig. 6	Relation between coefficient b in approximate equation, $1/\epsilon=a+bh+ch^2$, and gamma-ray energy	26
Fig. 7	Relation between coefficient a in approximate equation, $1/\epsilon=a+bh$, and gamma-ray energy	27
Fig. 8	Relation between coefficient b in approximate equation, $1/\epsilon=a+bh$, and gamma-ray energy	27
Fig. 9	Full energy peak efficiency curves for each thickness in the case of volume sample with 6 cm diameter	28
Fig. 10	Full energy peak efficiency curves for each thickness in the case of volume sample with 8 cm diameter.....	29
Fig. 11	Full energy peak efficiency curve obtained by measuring uranium ore(powder), thorium ore(powder) and KCl reagent (for 6 cm in diameter and 3 cm in thickness).....	30
Fig. 12	Full energy peak efficiency curve obtained by measuring radio- active standard solution (for 13 cm in diameter and 7 cm in thickness).....	31
Fig. 13	The peak of 1332 keV gamma-ray of ^{60}Co and its resolution by Ge(Li) detector system.....	32

1. 序 論

環境試料中の γ 線放出核種は、Ge(Li)半導体検出器による直接測定で、試料を非破壊で定量できる。この時、検出器の各核種に対する絶対ピーク効率曲線が必要となる。それをあらかじめ標準線源を用いて求めておく必要がある。この作業は、ピーク効率曲線が個々の検出器固有の特性であるため^{注1)}、現在のところ検出器購入者が使用に先だって必ず行わなければならないものの1つである。しかし、一般に環境試料は種々の形状で測定されることが多く、それと同形状の市販の標準線源を得ることは非常に困難である。したがって、購入者自身が使用目的に応じて、ピーク効率曲線測定用の標準線源を調製する必要がある。そこで、ごく普通の器具で手軽に行える寒天容積線源法について、実験方法と必要時間、および精度について検討を行った。

今回行った方法は、放射能標準溶液と寒天温水溶液とを混合した後、測定しようとする環境試料と同形状に冷却固化するものである。最近では、点線源や面積線源の測定値から、任意の容積試料に対するピーク効率を、計算で求める方法も出されている¹⁾²⁾。点線源の場合、市販の標準線源が使えること、また面積線源の場合も、調製線源数が少なく済むという利点をそれぞれ有している。しかし、測定時の検出器に対する線源の幾何学的位置を正確に決める特別の装置と、データ処理を行うための計算機が不可欠となる。その点、線源調製時の問題点を別にすれば、本法は試料測定と同操作で済むので信頼性は高いものと思われる。以下に今回行った実験の手順と実験中に気付いた点などについて、できる限り詳細に記述した。

2. 標準線源の調製

2.1 希釈標準溶液の調製

今回用いた放射能標準溶液は、 ^{22}Na 、 ^{51}Cr 、 ^{56}Co 、 ^{57}Co 、 ^{133}Ba 、 ^{137}Cs 、 ^{144}Ce 、 ^{241}Am であり、放射能はそれぞれ約14～41 $\mu\text{Ci/g}$ のものである。それらの標準溶液の特性をTable 1に示す。

これらを、容積線源調製に適する放射能(0.01～0.1 $\mu\text{Ci/ml}$)にするため、2回の希釈操作を行った。あらかじめ秤量済の50 mlメスフラスコの中に、駒込ピペットを用いて、上記標準溶液をそれぞれ別々に分取した。標準溶液の入ったメスフラスコ全体の重量を測定し、その差より標準溶液の分取量を求めた。なお、溶液の比重は1とみなした^{注2)}。次に標準溶液と同一の化学的形狀(担体の化学形、濃度および酸濃度など)の溶液にてこれを希釈し50 mlの溶液とした。再び重量測定により希釈率を求めた。この溶液を第1次標準溶液とした。

この溶液をあらかじめ秤量済の50 mlメスフラスコに、1 mlあるいは5 ml(^{144}Ce のみ)のホールピペットで分取した。以下上記と同様にして第2次標準溶液を得た。分取量、希釈率よ

注1) 結晶の形状、容積がほぼ等しければ、類似の特性を示すことが予想される。

注2) 温度による水の比重の変化は、0～40℃の範囲で1%以下である。また標準溶液中の担体の量は極微量であり、ほぼ純水とみなせる。

1. 序 論

環境試料中の γ 線放出核種は、Ge(Li)半導体検出器による直接測定で、試料を非破壊で定量できる。この時、検出器の各核種に対する絶対ピーク効率曲線が必要となる。それをあらかじめ標準線源を用いて求めておく必要がある。この作業は、ピーク効率曲線が個々の検出器固有の特性であるため^{注1)}、現在のところ検出器購入者が使用に先だって必ず行わなければならないものの1つである。しかし、一般に環境試料は種々の形状で測定されることが多く、それと同形状の市販の標準線源を得ることは非常に困難である。したがって、購入者自身が使用目的に応じて、ピーク効率曲線測定用の標準線源を調製する必要がある。そこで、ごく普通の器具で手軽に行える寒天容積線源法について、実験方法と必要時間、および精度について検討を行った。

今回行った方法は、放射能標準溶液と寒天温水溶液とを混合した後、測定しようとする環境試料と同形状に冷却固化するものである。最近、点線源や面積線源の測定値から、任意の容積試料に対するピーク効率を、計算で求める方法も出されている¹⁾²⁾。点線源の場合、市販の標準線源が使えること、また面積線源の場合も、調製線源数が少なく済むという利点をそれぞれ有している。しかし、測定時の検出器に対する線源の幾何学的位置を正確に決める特別の装置と、データ処理を行うための計算機が不可欠となる。その点、線源調製時の問題点を別にすれば、本法は試料測定と同操作で済むので信頼性は高いものと思われる。以下に今回行った実験の手順と実験中に気付いた点などについて、できる限り詳細に記述した。

2. 標準線源の調製

2.1 希釈標準溶液の調製

今回用いた放射能標準溶液は、 ^{22}Na 、 ^{51}Cr 、 ^{56}Co 、 ^{57}Co 、 ^{133}Ba 、 ^{137}Cs 、 ^{144}Ce 、 ^{241}Am であり、放射能はそれぞれ約14～41 $\mu\text{Ci/g}$ のものである。それらの標準溶液の特性をTable 1に示す。

これらを、容積線源調製に適する放射能(0.01～0.1 $\mu\text{Ci/ml}$)にするため、2回の希釈操作を行った。あらかじめ秤量済の50 mlメスフラスコの中に、駒込ピペットを用いて、上記標準溶液をそれぞれ別々に分取した。標準溶液の入ったメスフラスコ全体の重量を測定し、その差より標準溶液の分取量を求めた。なお、溶液の比重は1とみなした^{注2)}。次に標準溶液と同一の化学的形狀(担体の化学形、濃度および酸濃度など)の溶液にてこれを希釈し50 mlの溶液とした。再び重量測定により希釈率を求めた。この溶液を第1次標準溶液とした。

この溶液をあらかじめ秤量済の50 mlメスフラスコに、1 mlあるいは5 ml(^{144}Ce のみ)のホールピペットで分取した。以下上記と同様にして第2次標準溶液を得た。分取量、希釈率よ

注1) 結晶の形状、容積がほぼ等しければ、類似の特性を示すことが予想される。

注2) 温度による水の比重の変化は、0～40℃の範囲で1%以下である。また標準溶液中の担体の量は極微量であり、ほぼ純水とみなせる。

り求めた放射能は、 $0.03 \sim 0.2 \mu\text{Ci}/\text{ml}$ の範囲である。

2.2 標準容積線源の調製

標準容積線源の作り方としては、まず円柱状プラスチック容器に、調製したい線源の厚みに応じて印をつける。今回は、容器の直径が6 cmと8 cmのものについて、厚みが1, 5, 10, 20, 30, 40 (直径8 cmのみ) mmの線源を作った。ただし、厚み1 mmのものだけは、容器の底に直径6 cmか8 cmの戸紙を敷き、それに第2次標準溶液を1 ml しみ込ませた^{注3)}。このように準備した容器に第2次標準溶液を、1 ml ホールピペットで分取した^{注4)}。これにあらかじめ用意しておいた寒天末の温水溶液(約3%水溶液)を加え、さらに防腐剤としてホルマリン溶液を数 ml 加えた後、ガラス棒で良く攪拌した。この時、なるべく正確に印のところまで寒天溶液を入れた方がよい。線源の厚みが不揃いになった場合には、後述する方法で特定の厚みでのピーク効率を内挿する必要がある。容器一杯に入れる時は、最初8分目位まで入れ、充分攪拌したのち一杯とし、さらに少し攪拌した。また、ガラス棒に付着した分はそのまま捨てた。

なお、今回は、測定する線源数を減少させるために、放出 γ 線のピークエネルギーが相互に妨害とならない核種を、対にして寒天に溶かし込んだ。その組合せは、 $^{241}\text{Am}-^{56}\text{Co}$, $^{133}\text{Ba}-^{137}\text{Cs}$, $^{57}\text{Co}-^{22}\text{Na}$, $^{51}\text{Cr}-^{144}\text{Ce}$ である。必要に応じてさらに多核種を混合させても良いが、なるべく単一核種、単一ピークでの測定が良い。容器に入れた寒天溶液は、10~20分間放置すると完全に凝固したが、まだ水分の蒸発があるため、数時間放置後蓋をした。線源の厚みを正確に測り、容器と蓋をビニールテープで完全にふさいだ後、ビニール袋で包んだ。ここまでを使用した薬品は、寒天末を除いてすべて試薬特級を用いた。

3. 標準線源の測定

3.1 Ge(Li)検出器と測定装置

検出器はORTEC社製の同軸型Ge(Li)半導体で、補償性能をTable 2に示す。検出器を囲むしゃへい体は、鉄と鉛を組み合わせて、鉄20 cm相当となっており、内側に5 mmの銅とアクリル板が張ってある。測定試料の入る空間は、一辺が30 cmの立方体で、かなり大きな試料も測定可能である。現在のバックグラウンドスペクトルをFig. 1に、主なピークの計数率をTable 3に示す。また、環境試料を測定する際に問題となる。長時間測定時のゲイン変動について検討した結果をTable 4に示す。それぞれの期間に、7, 12, 7回と測定を行い、各ピークが示したチャンネルの最大と最小の値の差をエネルギー幅に換算した値である。なお、各回毎の測定におけるピークの半値幅は正常な値を示しており、測定中のゲイン変動も認められな

注3) 直径6 cmの場合2枚、8 cmの場合1枚で、溶液が多過ぎたり、また、しみ込まない部分ができたりせず、均一にしみ込んだ。

注4) ピペティングの回数が多いことと、それによる誤差が1%以下であることから、今回は重量測定を行わなかった。

り求めた放射能は、 $0.03 \sim 0.2 \mu\text{Ci}/\text{ml}$ の範囲である。

2.2 標準容積線源の調製

標準容積線源の作り方としては、まず円柱状プラスチック容器に、調製したい線源の厚みに応じて印をつける。今回は、容器の直径が6 cmと8 cmのものについて、厚みが1, 5, 10, 20, 30, 40 (直径8 cmのみ) mmの線源を作った。ただし、厚み1 mmのものだけは、容器の底に直径6 cmか8 cmの戸紙を敷き、それに第2次標準溶液を1 mlしみ込ませた^{注3)}。このように準備した容器に第2次標準溶液を、1 mlホールピペットで分取した^{注4)}。これにあらかじめ用意しておいた寒天末の温水溶液(約3%水溶液)を加え、さらに防腐剤としてホルマリン溶液を数 ml 加えた後、ガラス棒で良く攪拌した。この時、なるべく正確に印のところまで寒天溶液を入れた方が良い。線源の厚みが不揃いになった場合には、後述する方法で特定の厚みでのピーク効率を内挿する必要がある。容器一杯に入れる時は、最初8分目位まで入れ、充分攪拌したのち一杯とし、さらに少し攪拌した。また、ガラス棒に付着した分はそのまま捨てた。

なお、今回は、測定する線源数を減少させるために、放出 γ 線のピークエネルギーが相互に妨害とならない核種を、対にして寒天に溶かし込んだ。その組合せは、 $^{241}\text{Am} - ^{56}\text{Co}$, $^{133}\text{Ba} - ^{137}\text{Cs}$, $^{57}\text{Co} - ^{22}\text{Na}$, $^{51}\text{Cr} - ^{144}\text{Ce}$ である。必要に応じてさらに多核種を混合させても良いが、なるべく単一核種、単一ピークでの測定が良い。容器に入れた寒天溶液は、10~20分間放置すると完全に凝固したが、まだ水分の蒸発があるため、数時間放置後蓋をした。線源の厚みを正確に測り、容器と蓋をビニールテープで完全にふさいだ後、ビニール袋で包んだ。ここまでを使用した薬品は、寒天末を除いてすべて試薬特級を用いた。

3. 標準線源の測定

3.1 Ge(Li)検出器と測定装置

検出器はORTEC社製の同軸型Ge(Li)半導体で、補償性能をTable 2に示す。検出器を囲むしゃへい体は、鉄と鉛を組み合わせて、鉄20 cm相当となっており、内側に5 mmの銅とアクリル板が張ってある。測定試料の入る空間は、一辺が30 cmの立方体で、かなり大きな試料も測定可能である。現在のバックグラウンドスペクトルをFig. 1に、主なピークの計数率をTable 3に示す。また、環境試料を測定する際に問題となる。長時間測定時のゲイン変動について検討した結果をTable 4に示す。それぞれの期間に、7, 12, 7回と測定を行い、各ピークが示したチャンネルの最大と最小の値の差をエネルギー幅に換算した値である。なお、各回毎の測定におけるピークの半値幅は正常な値を示しており、測定中のゲイン変動も認められな

注3) 直径6 cmの場合2枚、8 cmの場合1枚で、溶液が多過ぎたり、また、しみ込まない部分が多過ぎたりせず、均一にしみ込んだ。

注4) ピペッティングの回数が多いことと、それによる誤差が1%以下であることから、今回は重量測定を行わなかった。

かった。

3.2 標準容積線源の測定

容積線源の測定は、容積線源とGe(Li)検出器の軸中心が合うよう検出器の上に密着してのせ、 γ 線スペクトルを放射能の強さに応じて $10^3 \sim 10^4$ 秒間測定した。 $^{241}\text{Am} - ^{56}\text{Co}$ の γ 線スペクトルを1例としてFig. 2に示す。図中のピークに対応して書かれた数字はエネルギー(keV)を表わす。 $^{241}\text{Am} - ^{56}\text{Co}$ の場合、あまりにも γ 線のピークエネルギーが離れ過ぎていて(0.06~3MeV)、ピーク解析上不都合なので、低エネルギー側と高エネルギー側を別々に測定する必要があった。また、 ^{144}Ce の場合は(0.08~2.2MeV)単独でも2回測定する必要があった。

測定した γ 線スペクトルのデータは、大型計算機(FACOM230-75)でピーク面積の計算を行った。 γ 線スペクトル解析の計算コードには、BOB73SGを使用した³⁾。得られた各核種のピーク面積から、絶対ピーク効率 ϵ (%)を次式により求めた。

$$\epsilon = \frac{N}{A \cdot f} \times 10^4$$

ここで、N；ピーク計数率(cpm)

A；測定時点における核種の壊変率(dpm)

f； γ 線放出比(%)

Ge検出器校正用核種の核データについては、最近多くの文献が出ているが^{4~6)}、ここで用いた標準線源核種の核データは、Lederer et al.による「Table of Isotopes(第7版)」の値を用い、それをTable 5に示す。得られたピーク効率の中で、 ^{56}Co の1360 keVと ^{133}Ba の384 keVの γ 線に対するピーク効率値が、他の核種のピーク効率の値との比較から、明らかに異常値を示しているので注意を要する。これは核データの不正確さによるものと考えられる。

3.3 データ解析

今回得られたピーク効率は、線源の厚みが厳密に一定ではないので、正確に一定の厚みに対するピーク効率とエネルギーの関係を測定値から求めることはできない。そこで、ピーク効率の逆数($1/\epsilon$)と線源の厚み(h)との関係にある関数で近似し、その式から計算によって、同一厚に対するピーク効率とエネルギーの関係を求めた。

すなわち、まずピーク効率の逆数($1/\epsilon$)と線源の厚み(h)の関係の実測値を図にプロットする。一方、計数効率と線源厚(h)との関係は、関数形としていくつかの近似関数が考えられるが、その中の1つとして次式のような近似関数が考えられる。

$$\frac{1}{\epsilon} = a + bh + ch^2 \quad (1)$$

この(1)式を用いて、測定された $1/\epsilon$ とhの関係を最小自乗法により曲線近似を行った。その結果を各エネルギー別に示したのがFig. 3, 4である。

ところで、(1)式の関係は、ある特定の γ 線エネルギーについて成り立つ、 $1/\epsilon$ と h の関係であるから、 γ 線のエネルギーが変われば係数 a , b , c の値も変化する。その関係を示したのがFig. 5, 6である。なお、係数 C についてはばらつきが激しく、今回の実験では相関が認められなかった。また、図中の矢印は近似の悪いものについて、特にはずれている1点を除いて計算し直した結果、相関が良くなった事を示している。

得られた近似式の係数 C がかなり小さく直線に近いことから、同様に最小自乗法により、次式の間数で直線近似を行った。

$$\frac{1}{\epsilon} = a + bh \quad (2)$$

Fig. 3, 4の中の内線が得られた結果である。同様に係数 a , b と γ 線のエネルギーの関係をプロットするとFig. 7, 8となり、かなり良い相関が得られた。(2)式の場合、特にはずれている1点を除いても除かなくても、係数 a , b の値はほとんど変化しなかった。

3.4 測定結果

Fig. 3, 4より、両近似の間数がほぼ一致しているので、直線の間数からそれぞれ、 $h = 1, 5, 10, 20, 30, 40$ (直径8cmのみ) mmの厚みでのピーク効率を、 γ 線の各エネルギーについて計算で求めた。得られた結果をFig. 9, 10に示す。図中の実線のうち直線部分については、122 ~ 1274 keVまでの点について最小自乗法により近似したものである。直線の近似式をTable 5に示す。図には描かなかったが、 $h = 15, 25, 35$ (直径8cmのみ) mmの場合の式も載せた。

効率曲線については今回の実験とは別に、直径6cm、高さ3cmの場合のみについて、ウラン鉱石(粉末)、トリウム鉱石(粉末)、KCl 特級試薬 104.8g (0.473 μ Ci)を測定した。前二者については、それぞれの鉱石を特級CaCO₃試薬中に混合分散させ、 9.39×10^{-3} , 3.39×10^{-3} μ Ciの放射能としたものを用いた。Fig. 11はその結果のピーク効率曲線であるが、寒天容積線源の結果と良く一致した。また、直径13cm、高さ7cmの容器に、¹³³Ba, ⁵⁷Co, ²²Na, ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am, ⁵⁶Coの標準溶液を既知量加え、0.1M塩酸溶液を一杯に満たし調製した線源を測定した結果もFig. 12に示す。

4. 結果と考察

今回行った標準容積線源作りについては、Fig. 3, 4を見る限り、ばらつきも少なくかなり良い方法と言える。しかし、さらに今回気付いた改良点をあげるとすれば、(1)放射能標準溶液の希釈を1段階で済ませる。(2)着色標準溶液を用いて混合の均一性を確かめる。(3)ガラス棒による附着損失を無くする。(4)濾紙にしみ込ませた場合、濾紙の変形を防ぐ、などが考えられる。(3)については、放射能標準溶液を一定量溶かし込んだ寒天溶液を大量に作り、それから一定量分取する方法もあるが、線源調製中の寒天溶液からの水分蒸発などもあり、分取量の算出は必

ところで、(1)式の関係は、ある特定の γ 線エネルギーについて成り立つ、 $1/\epsilon$ と h の関係であるから、 γ 線のエネルギーが変われば係数 a , b , c の値も変化する。その関係を示したのがFig. 5, 6である。なお、係数 C についてはばらつきが激しく、今回の実験では相関が認められなかった。また、図中の矢印は近似の悪いものについて、特にはずれている1点を除いて計算し直した結果、相関が良くなった事を示している。

得られた近似式の係数 C がかなり小さく直線に近いことから、同様に最小自乗法により、次式の関係で直線近似を行った。

$$\frac{1}{\epsilon} = a + bh \quad (2)$$

Fig. 3, 4の中の内線が得られた結果である。同様に係数 a , b と γ 線のエネルギーの関係をプロットするとFig. 7, 8となり、かなり良い相関が得られた。(2)式の場合、特にはずれている1点を除いても除かなくても、係数 a , b の値はほとんど変化しなかった。

3.4 測定結果

Fig. 3, 4より、両近似の関数がほぼ一致しているので、直線の関数からそれぞれ、 $h = 1, 5, 10, 20, 30, 40$ (直径8cmのみ) mmの厚みでのピーク効率を、 γ 線の各エネルギーについて計算で求めた。得られた結果をFig. 9, 10に示す。図中の実線のうち直線部分については、122 ~ 1274 keVまでの点について最小自乗法により近似したものである。直線の近似式をTable 5に示す。図には描かなかったが、 $h = 15, 25, 35$ (直径8cmのみ) mmの場合の式も載せた。

効率曲線については今回の実験とは別に、直径6 cm, 高さ3 cmの場合のみについて、ウラン鉱石(粉末), トリウム鉱石(粉末), KCl 特級試薬 104.8 g (0.473 μ Ci)を測定した。前二者については、それぞれの鉱石を特級CaCO₃試薬中に混合分散させ、 9.39×10^{-3} , 3.39×10^{-3} μ Ciの放射能としたものを用いた。Fig. 11はその結果のピーク効率曲線であるが、寒天容積線源の結果と良く一致した。また、直径13 cm, 高さ7 cmの容器に、¹³³Ba, ⁵⁷Co, ²²Na, ¹³⁷Cs, ²⁴¹Am, ⁵⁶Coの標準溶液を既知量加え、0.1M塩酸溶液を一杯に満たし調製した線源を測定した結果もFig. 12に示す。

4. 結果と考察

今回行った標準容積線源作りについては、Fig. 3, 4を見る限り、ばらつきも少なくかなり良い方法と言える。しかし、さらに今回気付いた改良点をあげるとすれば、(1)放射能標準溶液の希釈を1段階で済ませる。(2)着色標準溶液を用いて混合の均一性を確かめる。(3)ガラス棒による附着損失を無くする。(4)濾紙にしみ込ませた場合、濾紙の変形を防ぐ、などが考えられる。(3)については、放射能標準溶液を一定量溶かし込んだ寒天溶液を大量に作り、それから一定量分取する方法もあるが、線源調製中の寒天溶液からの水分蒸発などもあり、分取量の算出は必

ずしも容易ではない。

ピーク効率の逆数と厚みの関係については、線源の厚みが3~4 cm程度のものについては、直線でかなり良い近似が行えることが分った。また、直線ならば、必ずしも最小自乗法で計算しなくても目測で近似直線が引けるので、データ処理の時間短縮となる。さらに、2次式近似の場合、かなり曲った線にもかかわらず、かなり良く全部の測定点が近似曲線と合っている場合もあるが、これは偶然性が強いので、その場合も、近似は悪いが直線を用いた方が良い。むしろ、最小自乗法により無理に近似を行い、そのデータを使うのではなく、近似の悪いデータは使わない方が賢明である。

今回使用した核種のうち、 ^{133}Ba の放出する γ 線については、線源の直径が6 cmと8 cmの場合、他の核種の γ 線のピーク効率の値より求めたピーク効率曲線より、20%以上ピーク効率が低くなったため除外した。しかし、直径13 cmの場合ピーク効率曲線上に良くのることから、これはサム効果が影響しているものと考えられる。また、Table 3とTable 7で ^{22}Na の511 keVの γ 線について、厚み1 mmの点が大きくずれているのも、サム効果の影響と考えられる。この傾向は大容積のGe(Li)検出器ほど顕著になる。この効果をできる限り小さくするためには、カスケード γ 線を放出しない核種を用いるのが良い。一方、このようにして求めた効率曲線を、今度は ^{133}Ba などサム効果の出やすい核種の定量に用いるには、補正が必要であることに注意しなければならない。

今回は多核種を用いた校正法を行ったが、単一核種で多数の γ 線を放出する ^{152}Eu などを使う方法もある⁷⁾。しかし、この方法には次のような問題点がある。(1)使用する標準線源の放射能の値が違っていても検知できないので、効率曲線の絶対値がくるってしまう。(2)小さなピークまでの正確な γ 線放出比のデータが必要⁸⁾。(3) γ 線のエネルギー間隔が固定してしまう。(4)多数の γ 線を放出するため、サムピーク、エスケープピークなどの多い複雑なスペクトルを解析しなければならない。

今回求めたピーク効率曲線は、点のばらつきから考えて5~10%程度の誤差を含んでいる。しかし、Table 1から分るとおり、標準溶液の放射能値がすでに1~3%の誤差を含んでおり、また、 γ 線放出比の値も数%の誤差を含んでいるものが多い。したがって、単に実験精度を上げても、効率曲線の精度が良くなるとは限らない。

環境試料中の定量に際しては、まず、試料採取および前処理の段階で、比較的大きな誤差を生じることが多い。したがって、5~10%程度の誤差を有する効率曲線でも充分使用可能である。さらに、所用日数が線源作りに1日、測定期間が1週間であることを考え合わせれば、この方法の有効性はかなり大きいと考えられる。

なお、今回得られた効率曲線を実際の環境試料に対して適用する場合に、厳密にはマトリックスによる自己吸収の違いを補正しなければならない。しかし、寒天と環境試料との吸収係数の差は、0.1~3 MeVのエネルギー範囲では多くて数%程度なので、測定試料の密度が大きく異ならなければ無視しうる⁹⁾。今回調製した寒天容積線源のみかけ上の密度は 0.85 g/cm^3 であった。

以上述べてきたように、今回行った寒天容積線源を用いたGe(Li)検出器の校正法は、さらに改善の余地はあるが、手持ちの容器で環境試料を測定しようとする場合には、費用、時間、

簡便さなどの点から、かなり有効かつ実用的な方法といえる。

参 考 文 献

- (1) 本田哲太郎, 武田健治, 宮野敬治, 野口正安 : Radioisotopes, 27, 3 (1978)
- (2) 本田哲太郎, 武田健治, 宮野敬治, 野口正安 : 第15回理工学における同位元素研究発表
会要旨集, 28p-II-15
- (3) Baba H., Sekine T. et al : JAERI 1227 (1973)
- (4) Morii T. : Nucl. Instrum. Methods, 151, 489 (1978)
- (5) Helmer R. G., Greenwood R. C. and Gehrke R. J. : Nucl. Instrum.
Methods, 155, 189 (1978)
- (6) Greenwood R. C., Helmer R. G. and Gehrke R. J. : Nucl. Instrum.
Methods, 159, 465 (1979)
- (7) Hnatowicz V. : Nucl. Instrum. Methods, 161, 151 (1979)
- (8) Debertain K. : Nucl. Instrum. Methods, 158, 479 (1979)
- (9) Laichter Y., Norea A. and Shafrir N. H. : Nucl. Instrum. Methods,
113, 61 (1973)
- (10) ゲルマニウム半導体検出器を用いた機器分析法 (昭和54年改訂版) 科学技術庁

簡便さなどの点から、かなり有効かつ実用的な方法といえる。

参 考 文 献

- (1) 本田哲太郎, 武田健治, 宮野敬治, 野口正安 : Radioisotopes, 27, 3 (1978)
- (2) 本田哲太郎, 武田健治, 宮野敬治, 野口正安 : 第15回理工学における同位元素研究発表
会要旨集, 28p-II-15
- (3) Baba H., Sekine T. et al : JAERI 1227 (1973)
- (4) Morii T. : Nucl. Instrum. Methods, 151, 489 (1978)
- (5) Helmer R. G., Greenwood R. C. and Gehrke R. J. : Nucl. Instrum.
Methods, 155, 189 (1978)
- (6) Greenwood R. C., Helmer R. G. and Gehrke R. J. : Nucl. Instrum.
Methods, 159, 465 (1979)
- (7) Hnatowicz V. : Nucl. Instrum. Methods, 161, 151 (1979)
- (8) Debertain K. : Nucl. Instrum. Methods, 158, 479 (1979)
- (9) Laichter Y., Norea A. and Shafrir N. H. : Nucl. Instrum. Methods,
113, 61 (1973)
- (10) ゲルマニウム半導体検出器を用いた機器分析法 (昭和54年改訂版) 科学技術庁

附録 I

○ 測定装置の検出限界

今回測定した効率曲線を用いて、土壌、灰化松葉、ダスト用紙、活性炭(エアースンプラー内蔵のヨウ素吸着用トラップとして使用)、水盤試料について、実際の測定データから求めた検出限界濃度を Table 7 に示す。また、各試料の内訳を Table 8 に示す。検出限界 A (pCi) の計算に用いた式を以下に示す¹⁰⁾。

$$A(\text{pCi}) = \frac{27}{\epsilon, a, t} (K_\alpha + K_\beta) \sqrt{2B}$$

ここで、 ϵ はピーク効率、 a は γ 線放出比、 t は測定時間 (秒)、 K_α 、 K_β は危険率 α 、 β により定まる定数で、ここでは、 α 、 β を 5% にとった時の値、 $K_\alpha = K_\beta = 1.64$ を使った。 B はピーク領域内のベースライン計数 (カウント) である。

附録 II

○ 検出器のエネルギー分解能と 25 cm 相対効率の求め方

検出器のピーク効率曲線を求めるのと同時に、エネルギー分解能や 3" x 3" NaI (Tl) 検出器に対する相対効率が仕様通りであるか検査する事も必要である。また、購入後も半年に 1 度くらいは性能を検査した方がよい。

方法としてはまず、検出器の軸上 25 cm の距離に、約 1.0 μCi 程度の ^{60}Co あるいは ^{57}Co の密封 γ 線源を置く。つぎに、ピーク領域が 10 チャンネル以上に及ぶようにゲインをセットする。ピークの最大計数値が 10^4 カウント以上になるまで測定する。 ^{60}Co の 1332 keV と ^{57}Co の 122 keV のピークをそれぞれ方眼紙にプロットし、ピークの高さの半分および 10 分の 1 の所のチャンネル幅 (それぞれ、 $W_{\frac{1}{2}}$ 、 $W_{\frac{1}{10}}$ とする) を有効数字 3 桁まで読み取る。 ^{60}Co について行った例を Fig. 13 に示す。エネルギー分解能 FWHM (Full Width at Half Maximum) と FWTM (Full Width at Tenth Maximum) は、エネルギー E の γ 線のピーク中心チャンネルを $Pc(E)$ とすれば、次式で求まる。 ^{60}Co の 1332 keV の場合、

$$\text{FWHM} = \frac{159 W_{\frac{1}{2}}}{Pc(1332) - Pc(1173)}$$

$$\text{FWTM} = \frac{159 W_{\frac{1}{10}}}{Pc(1332) - Pc(1173)}$$

^{57}Co の 122 keV の場合、

$$\text{FWHM} = \frac{14.4 W_{\frac{1}{2}}}{Pc(136) - Pc(122)}$$

$$\text{FWTM} = \frac{14.4 W_{10}^2}{\text{Pc}(136) - \text{Pc}(122)}$$

一般的に、FWHMが2 keV前後で、FWTMがその2倍以内であれば正常である。

また、25 cm相対効率 (ϵ_{rel}) は、25 cmの距離で ^{60}Co の1332 keV γ 線を測定した時の、Ge(Li)検出器と3"×3" NaI(Tl)検出器の絶対効率をそれぞれ、 ϵ_{Ge} と ϵ_{NaI} とすると、次式のようになる。

$$\epsilon_{\text{rel}} (\%) = \frac{\epsilon_{\text{Ge}}}{\epsilon_{\text{NaI}}} \times 100 = 0.833 \times 10^3 \cdot \epsilon_{\text{Ge}} \times 100$$

さらに、Ge(Li)検出器で測定した1332 keV γ 線のピーク計数率を N_{25} (cps)、標準線源の放射能を N_0 (dps) とすれば、次式のようになる。

$$\epsilon_{\text{rel}} (\%) = 0.833 \times 10^3 \cdot \frac{N_{25}}{N_0} \times 100$$

また、標準線源の放射能を A_0 (μCi) とすれば、次式のようになる。

$$\epsilon_{\text{rel}} (\%) = 2.25 \cdot \frac{N_{25}}{A_0}$$

Table 1 標準寒天容積線源の調製に使用した放射能標準溶液

核種名	放射能 ($\mu\text{Ci/g}$)	誤差 (%)	溶液量 (g)	化学体形 (担体量)	購入先
^{22}Na	27.57	2.7	3.119	NaCl (0.1 N - HCl 溶液 1 g 中に NaCl 0.1 mg)	日本アイソトープ協会
^{51}Cr	41.38	2.9	3.151	Na_2CrO_4 (0.1 N - HCl 溶液 1 g 中に Na_2CrO_4 0.1 mg)	"
^{56}Co	24.33	2.0	5.00 ml	CoCl_2 (0.1 N - HCl 溶液 1 g 中に CoCl_2 5 μg)	LMRI (仏)
^{57}Co	23.07	2.8	3.383	CoCl_2 (0.1 N - HCl 溶液 1 g 中に CoCl_2 0.1 mg)	日本アイソトープ協会
^{133}Ba	25.52	2.7	3.040	BaCl_2 (0.1 N - HCl 溶液 1 g 中に BaCl_2 0.1 mg)	"
^{137}Cs	25.78	1.5	3.050	CsCl (0.1 N - HCl 溶液 1 g 中に CsCl 0.1 mg)	"
^{144}Ce	14.22	2.7	3.261	CeCl_3 (0.1 N - HCl 溶液 1 g 中に CeCl_3 0.1 mg)	"
^{241}Am	26.81	1.1	3.321	$\text{Am}(\text{NO}_3)_3$ (0.1 N - HNO_3 溶液)	"

LMRI : Laboratoire de Métrologie des Rayonnements Ionisants

Table 2 Ge (Li) 測定機器の補償性能

形 状 (mm)	55 ϕ \times 75
容 積 (cc)	160.1
印 加 電 圧 (V)	+ 4800
エネルギー分解能 (keV) (FWHM)	2.10 (^{60}Co の 1332 keV)
相 对 効 率 (%)	31.6
ピーク, コンプトン比	51

Table 4 Ge (Li) 測定機器の長期間測定によるピーク
中心チャンネルの変動

ピークエネルギー (keV)	ピークの変動幅 (keV)			
	239 (^{212}Pb)	511	1462 (^{40}K)	2614 (^{208}Tl)
測定期間				
8月18～29日	0.29	1.0	0.83	2.0
8月31日～9月20日	0.27	0.68	1.0	1.9
9月25日～10月4日	0.15	0.42	0.82	1.1

Table 3 Ge(Li) 検出器のバックグラウンドスペクトル^{*}中の
ピーク計数率 (cph)

ピーク エネルギー (keV)	放出核種	計数率 (cph)	ピーク エネルギー (keV)	放出核種	計数率 (cph)
186	²³⁵ U, ²²⁶ Ra	15	860	²⁰⁸ Tl	3.7
239	²¹² Pb	91	911	²²⁸ Ac	4.0
242	²¹⁴ Pb	9.6	934	²¹⁴ Bi	1.3
277	²⁰⁸ Tl	2.6	965	²²⁸ Ac	0.84
295	²¹⁴ Pb	11	969	"	1.6
300	²¹² Pb	4.1	1120	²¹⁴ Bi	4.1
338	²²⁸ Ac	2.8	1173	⁶⁰ Co	3.2
352	²¹⁴ Pb	20	1238	²¹⁴ Bi	2.6
511	主に宇宙線	44	1332	⁶⁰ Co	2.8
583	²⁰⁸ Tl	24	1462	⁴⁰ K	13
609	²¹⁴ Bi	18	1730	²¹⁴ Bi	1.0
727	²¹² Bi	5.5	1765	"	3.7
768	²¹⁴ Bi	1.7	2204	"	0.84
785	²¹² Bi	1.9	2614	²⁰⁸ Tl	10

^{*}測定試料, 容器のない状態におけるスペクトル。

Table 5 ピーク効率の算出に使用した核データ

核種	半減期	γ 線エネルギー (keV)	γ 線放出比 (%)
^{22}Na	2.6026(22)年	511	181
		127451 (3)	99.934(16)
^{51}Cr	27.701 (6)日	320.0761(55)	10.2 (6)
^{56}Co	78.76 (12)日	846.751 (19)	99.95 (2)
		1037.83 (7)	13.99 (10)
		1175.13 (8)	2.279(20)
		1238.28 (4)	67.57 (40)
		1360.22 (7)	4.328(40)
		1771.49 (6)	15.69 (15)
		2015.36 (5)	3.078(30)
		2034.92 (6)	7.886(70)
		2598.58 (8)	16.89 (15)
		3202.30 (16)	3.038(30)
		3253.60 (16)	7.406(65)
^{57}Co	271.65 (13)日	122.0583(21)	85.6 (4)
		136.4709(23)	11.1 (3)
^{133}Ba	10.352 (40)年	53.17 (1)	2.19 (5)
		79.63 (3)	2.4 (1)
		80.998 (8)	32.6 (8)
		276.397 (12)	7.09 (18)
		302.851 (15)	18.2 (5)
		356.005 (17)	62 (1)
		383.851 (20)	8.97 (25)
^{137}Cs	30.174 (34)年	661.649 (12)	89.9 (5)
^{144}Ce (^{144}Pr)	284.3 (5)日	80.106 (5)	1.13 (12)
		133.544 (5)	11.1 (2)
		696.49 (2)	1.34 (2)
		1489.15 (5)	0.279(3)
		2185.70 (6)	0.700(10)
^{241}Am	432.0 (2)年	59.537 (1)	35.5 (3)

()内は誤差を表わす。例えば、2.6026(22)は 2.6026 ± 0.0022 。

Table 6 ピーク効率と γ 線のエネルギーとの関係式

◎ 近似式 $\log \varepsilon = a - b \log E$

ε ; 効率 (%)

a, b ; 係数

E ; γ 線のエネルギー (keV), $120 < E < 1500$

6 cm ϕ			8 cm ϕ		
厚み (mm)	a	b	厚み (mm)	a	b
1	3.30	1.007	1	3.06	0.984
5	3.19	0.981	5	2.96	0.926
10	3.07	0.955	10	2.84	0.900
15	2.96	0.934	15	2.74	0.881
20	2.88	0.919	20	2.66	0.865
25	2.81	0.906	25	2.58	0.852
30	2.74	0.893	30	2.52	0.841
			35	2.46	0.832
			40	2.41	0.823

Table 7 Ge(Li)γ線スペクトロメトリによる各種環境試料中の放射性核種の検出限界

		土 (110°C 乾燥)		松 葉 (灰)		ダスト汚紙(灰) 〔移動式〕		ダスト汚紙 (固定式)		活性炭	水 盤
核 種 (ピーク エネルギー keV)	A	B	A	B	A	B	A	B			
	PCi/g ($\times 10^{-2}$)		PCi/g ($\times 10^{-1}$)		PCi/m ³ ($\times 10^{-4}$)		PCi/m ³ ($\times 10^{-4}$)		PCi/m ³ ($\times 10^{-4}$)	PCi/m ²	
¹⁴⁴ Ce (134)	13	14	5.5	12	7.2	15	16	25	7.2	21	
⁹⁹ Mo (140)	1.6	1.7	0.69	1.5	0.89	1.9	2.0	3.2		2.5	
¹⁴¹ Ce (145)	2.9	3.2	1.4	3.0	1.7	3.6	3.8	6.4		5.0	
⁵¹ Cr (320)	19	20	8.7	18	11	23	26	44		37	
¹³¹ I (364)	2.1	2.2	0.98	2.1	1.2	2.4	2.9	4.8		3.8	
¹²⁵ Sb (428)	5.7	5.7	2.7	5.8	3.2	6.3	7.4	13		10	
⁷ Be (477)	18	18	8.4	18	9.6	19	23	40		32	
¹⁰³ Ru (497)	2.0	2.2	1.0	2.0	1.2	2.2	2.7	4.4		3.7	
¹³⁴ Cs (605)	1.7	1.9	0.92	1.9	1.0	2.2	2.6	4.1		3.2	
¹⁰⁶ Ru (622)	16	18	7.9	16	8.7	17	22	36		29	
¹³⁷ Cs (662)	2.0	2.4	0.97	2.1	1.1	2.2	2.7	4.4		3.6	
⁹⁵ Zr (724)	3.5	4.5	1.6	3.4	1.9	4.8	5.0	9.5		6.4	
⁹⁵ Nb (765)	1.8	2.2	0.80	1.9	0.91	1.9	2.8	4.7		3.1	
⁵⁸ Co (810)	1.6	2.0	0.81	1.8	0.96	1.8	2.5	4.2		3.2	
⁵⁴ Mn (835)	1.9	2.2	0.85	1.9	0.94	2.1	2.5	4.3		3.5	
⁵⁹ Fe (1095)	3.5	4.6	1.8	4.2	1.7	3.5	4.5	7.9	6.1		
⁶⁰ Co (1173)	2.1	3.2	1.2	2.9	0.9	2.0	3.2	5.5	3.3		
²³⁸ U	32	15	/	/	/	/	/	/	/	/	
²³² Th	62	19	/	/	/	/	/	/	/	/	
⁴⁰ K	1200	1800	1300	1900	160	210	/	/	1300		
¹³⁷ Cs	130	59	74	41	26	23	24	20	120		
¹⁴⁴ Ce	/	/	/	/	190	140	340	120	1600		
¹²⁵ Sb	/	/	11	/	15	31	8.7	/	44		
⁷ Be	/	/	21	/	410	560	560	1000	1400		
¹⁰³ Ru	/	/	/	/	/	/	/	/	12		
¹⁰⁶ Ru	/	/	60	70	90	65	62	52	370		
⁹⁵ Zr	/	/	10	9	9.7	/	/	/	22		
⁹⁵ Nb	/	/	22	21	24	/	/	/	44		
⁵⁴ Mn	/	/	/	/	/	/	/	/	5.8		

Table 8 検出限界を求めた各試料の測定条件

	土 壤 (110 °C 乾燥)		松 葉 (灰)		ダスト戸紙(灰) 〔移動式〕		ダスト戸紙 〔固定式〕		活性炭	水 盤
	A	B	A	B	A	B	A	B		
測定時間 (ksec)	80	58	90	55	241	94	248	90	57	54
採取時期 (年,月,日)	1977 9,21	1978 7,11	1977 9,21	1977 9,21	1978 2月	1978 7月	1978 7月	1978 8月	1978 7月	1978 6月
測定試料 の 形 状	6 cmφ ×3 cm	6 cmφ ×3 cm	8 cmφ ×3.5 cm	8 cmφ ×3.5 cm	8 cmφ ×4 cm	8 cmφ ×4 cm	6 cmφ ×0.5 cm	6 cmφ ×0.5 cm	6 cmφ ×1.5 cm	6 cmφ ×1 cm
測定重量 (g)	91	113	24.5	13.4	15.0	16.9				
生 重 量 (g)			1970	1010						
試料密度 (g/cm ³)	1.1	1.3	0.14	0.076	0.075	0.084				
大気吸引量 (m ³)					1.13 × 10 ⁴	1.06 × 10 ⁴	2.15 × 10 ³	2.17 × 10 ³	2.15 × 10 ³	

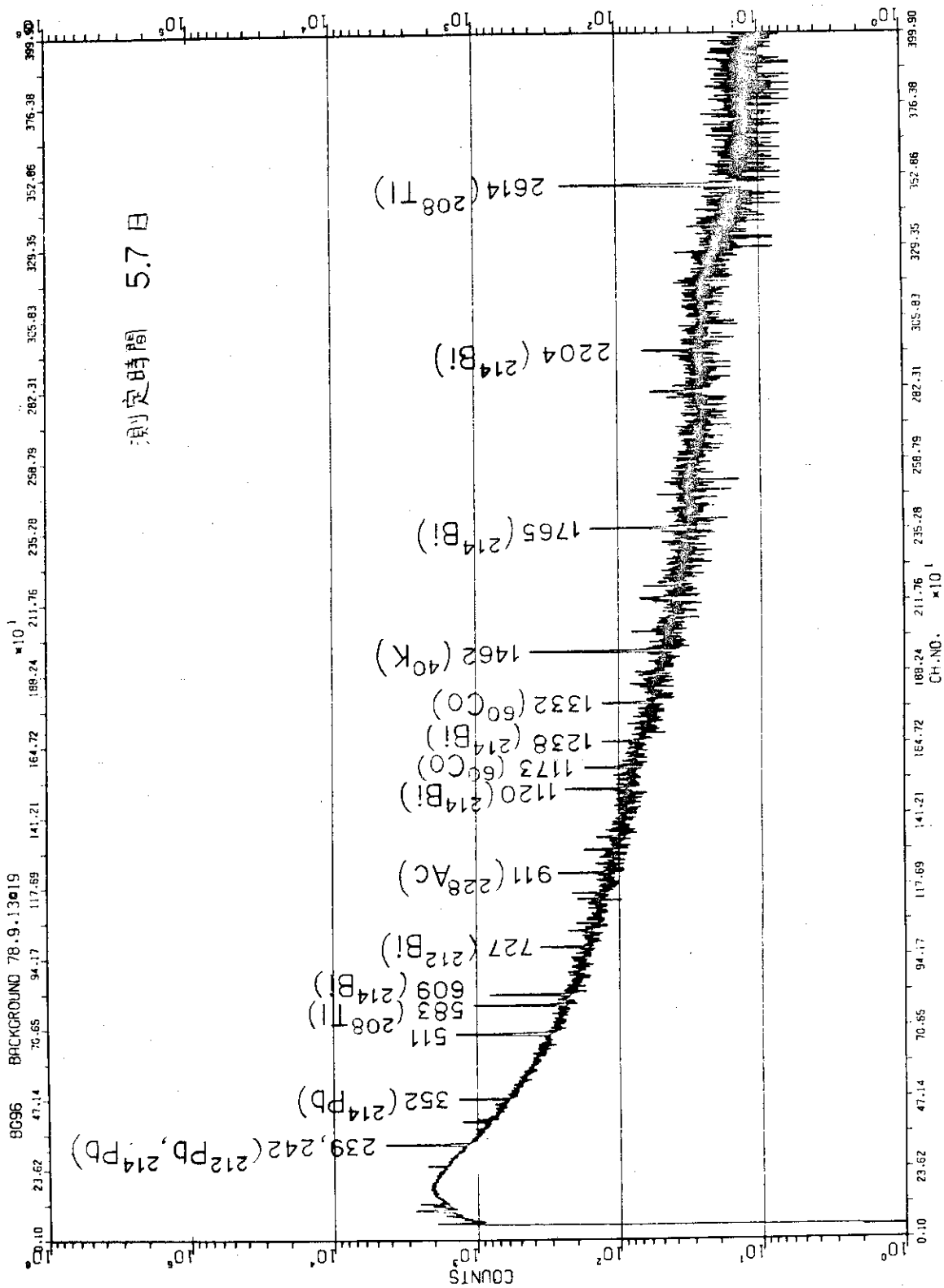


Fig.1 Ge(Li) 検出器のバックグラウンドスペクトル

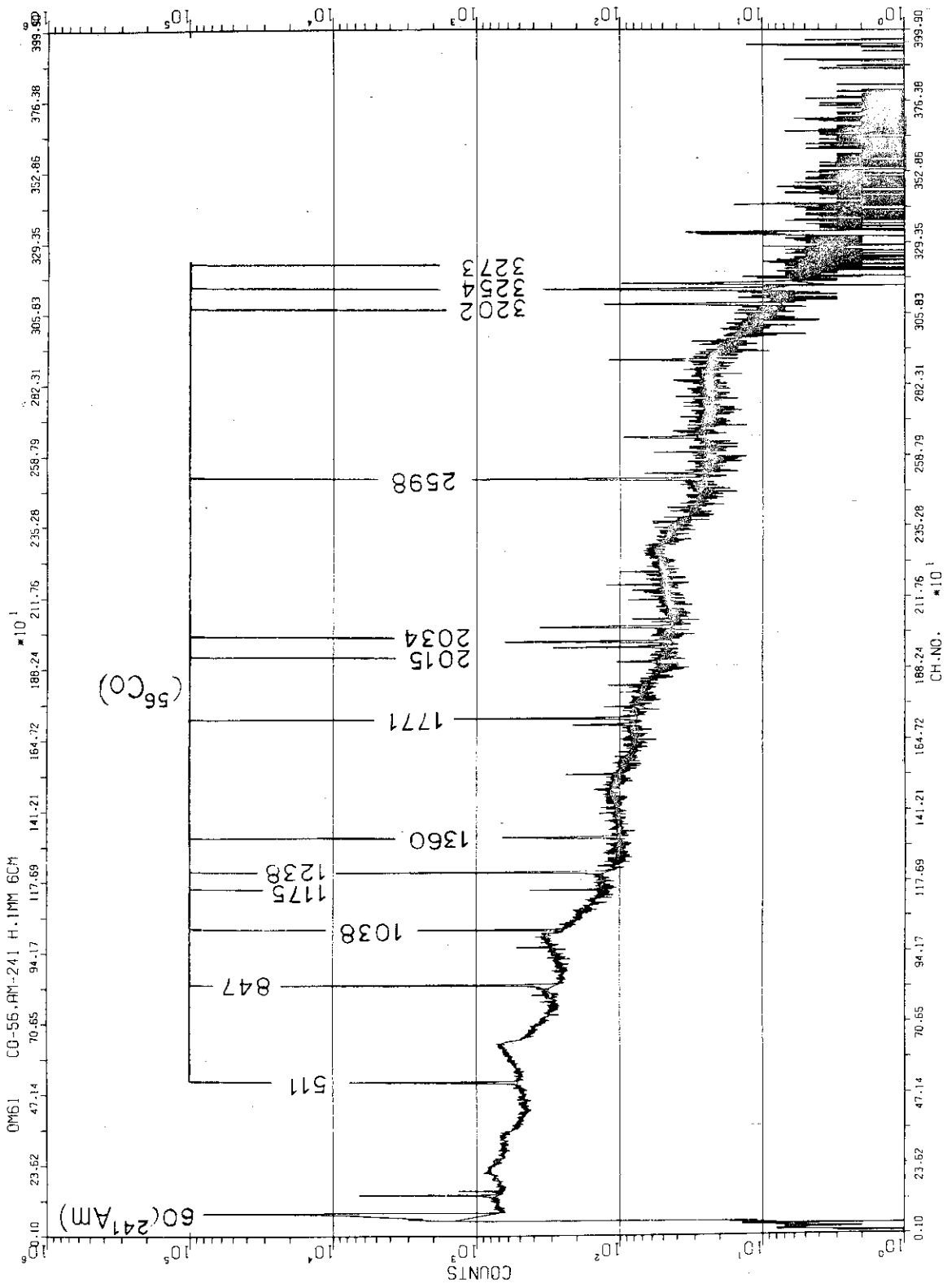
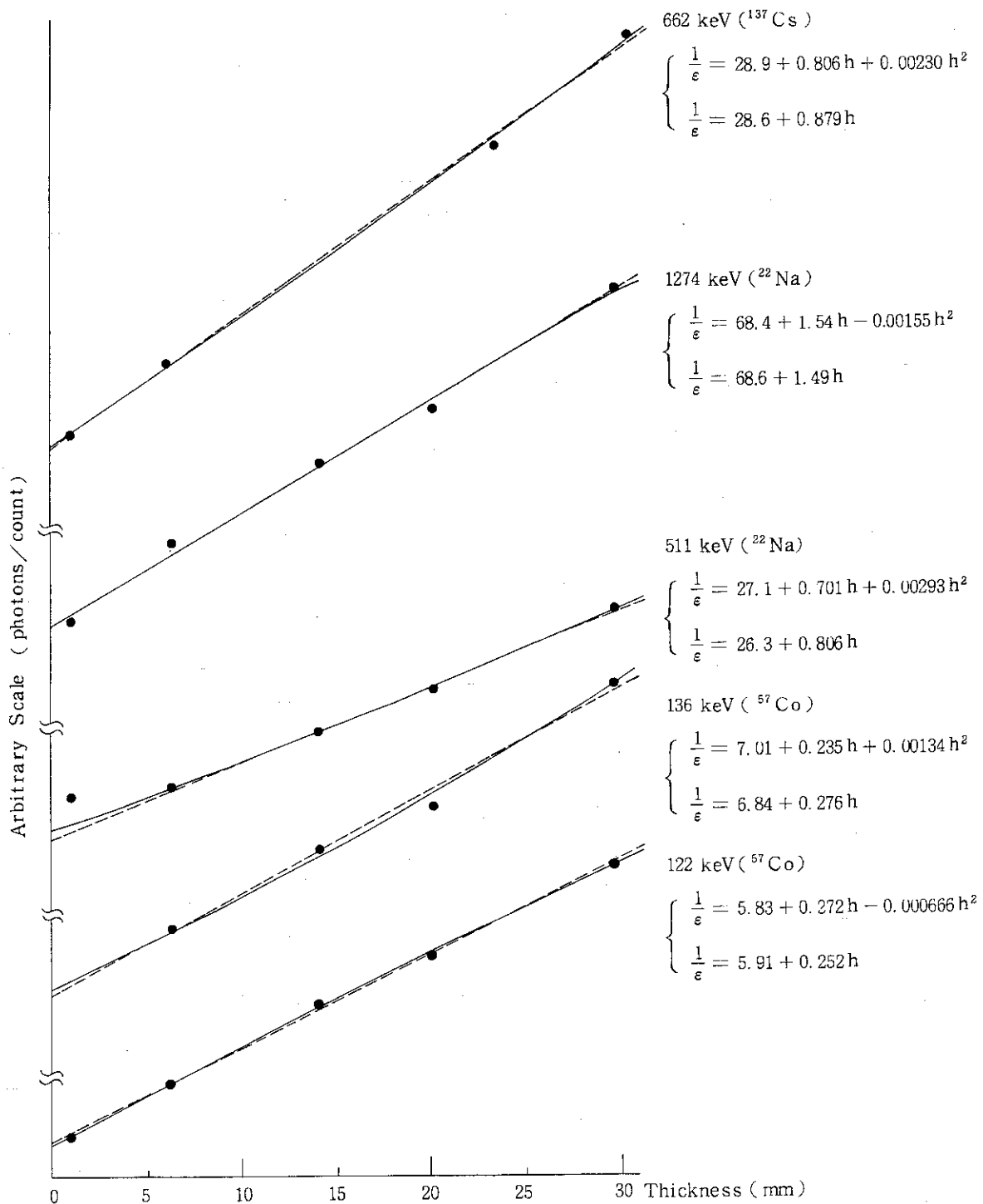
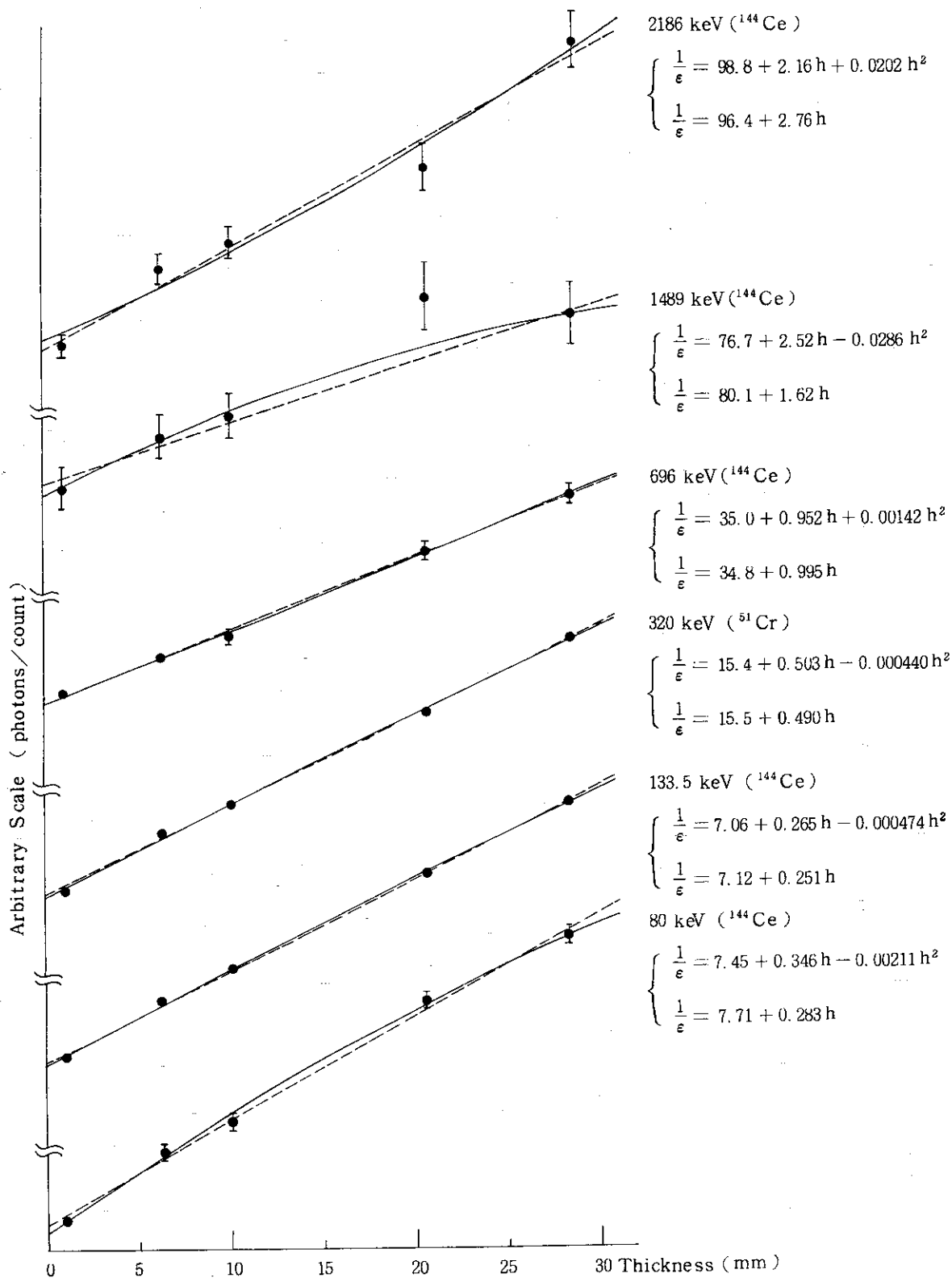


Fig. 2 ^{241}Am - ^{56}Co 寒天谷積線源の γ 線スペクトル (直径 6 cm, 厚み 1 mm)



(A) ^{57}Co , ^{22}Na と ^{137}Cs について

Fig.3 ピーク効率の逆数と線源 (直径 6 cm) の厚みとの関係



(B) ^{144}Ce と ^{51}Cr について

Fig. 3

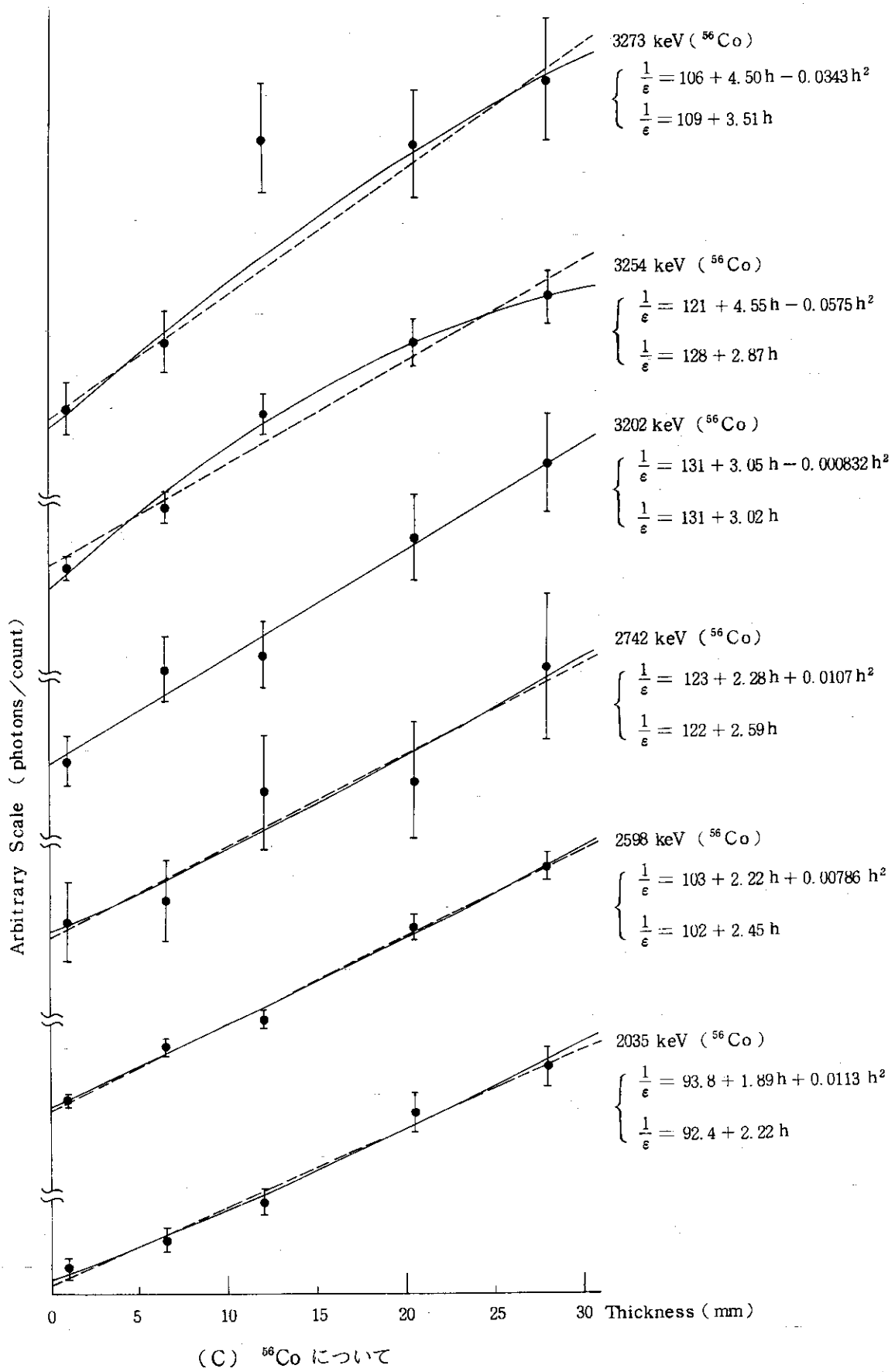


Fig. 3

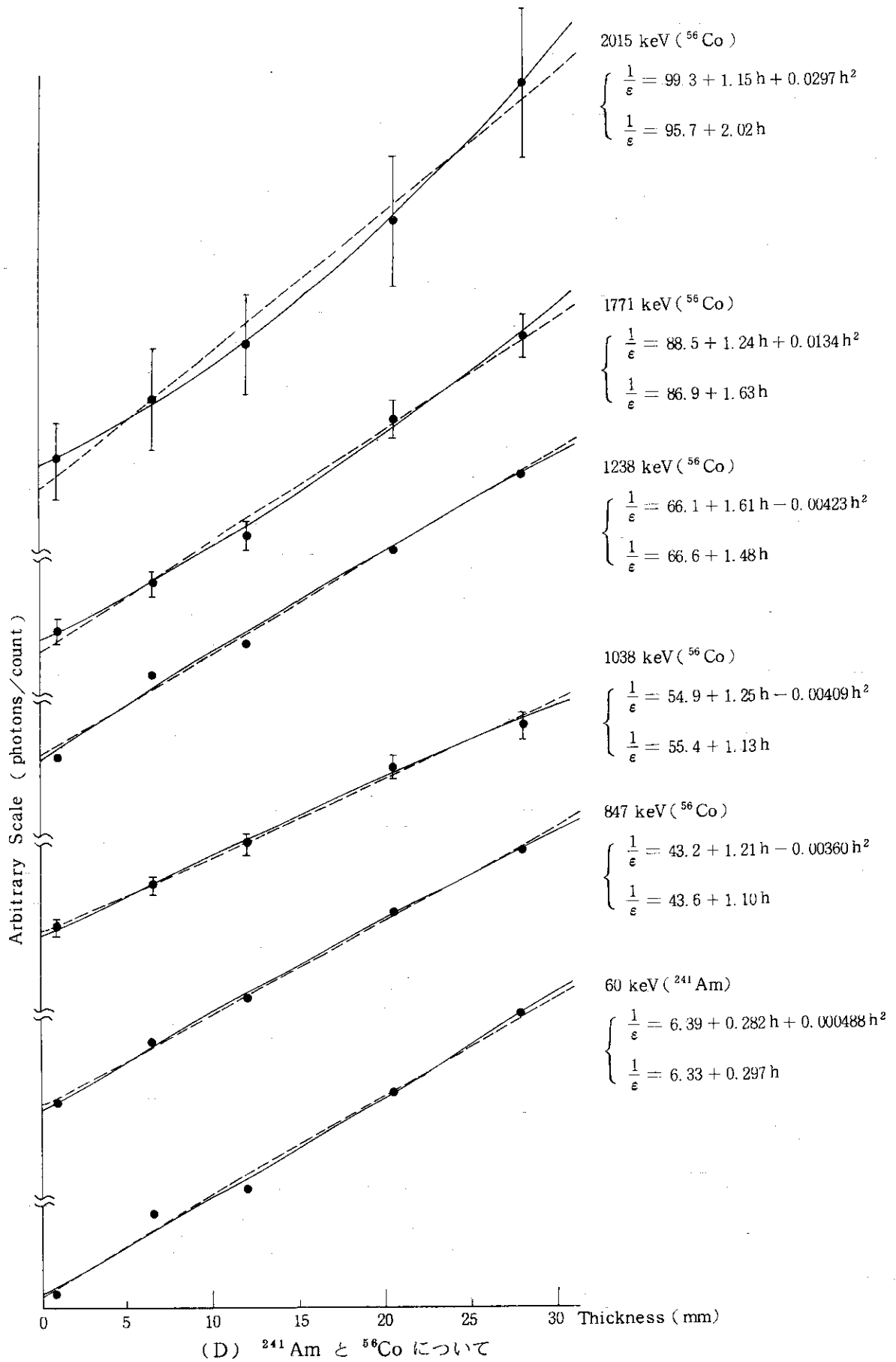


Fig. 3

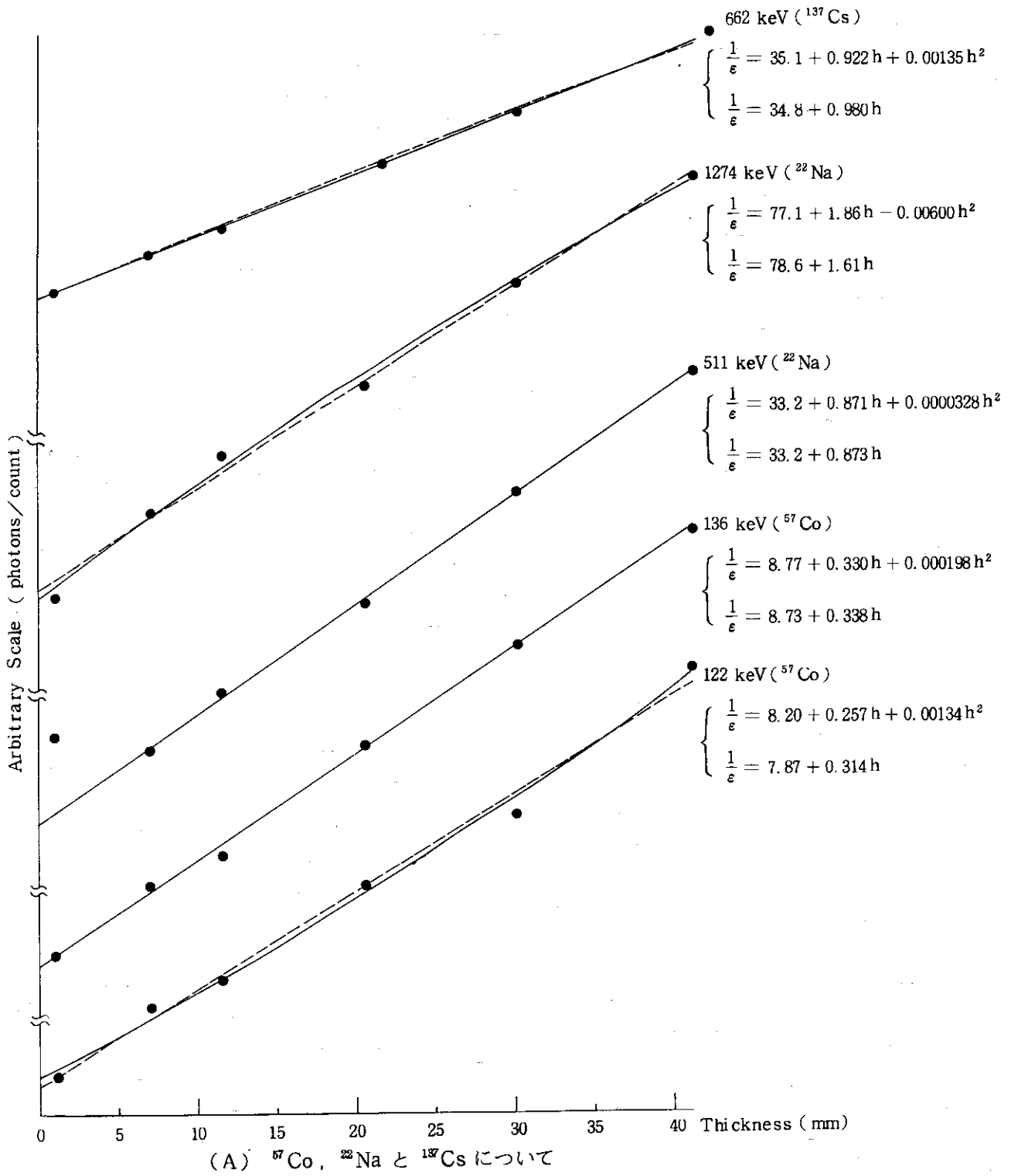
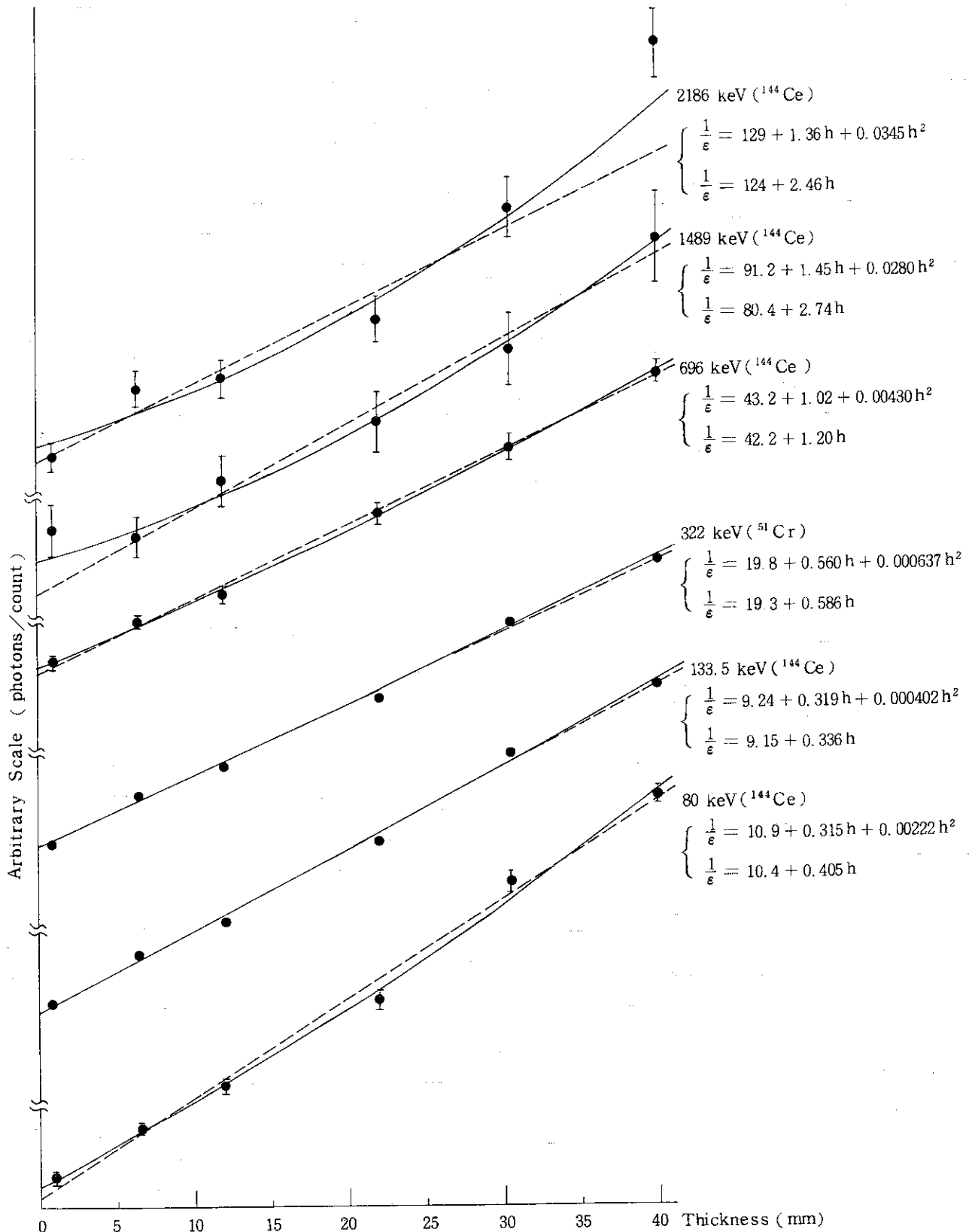
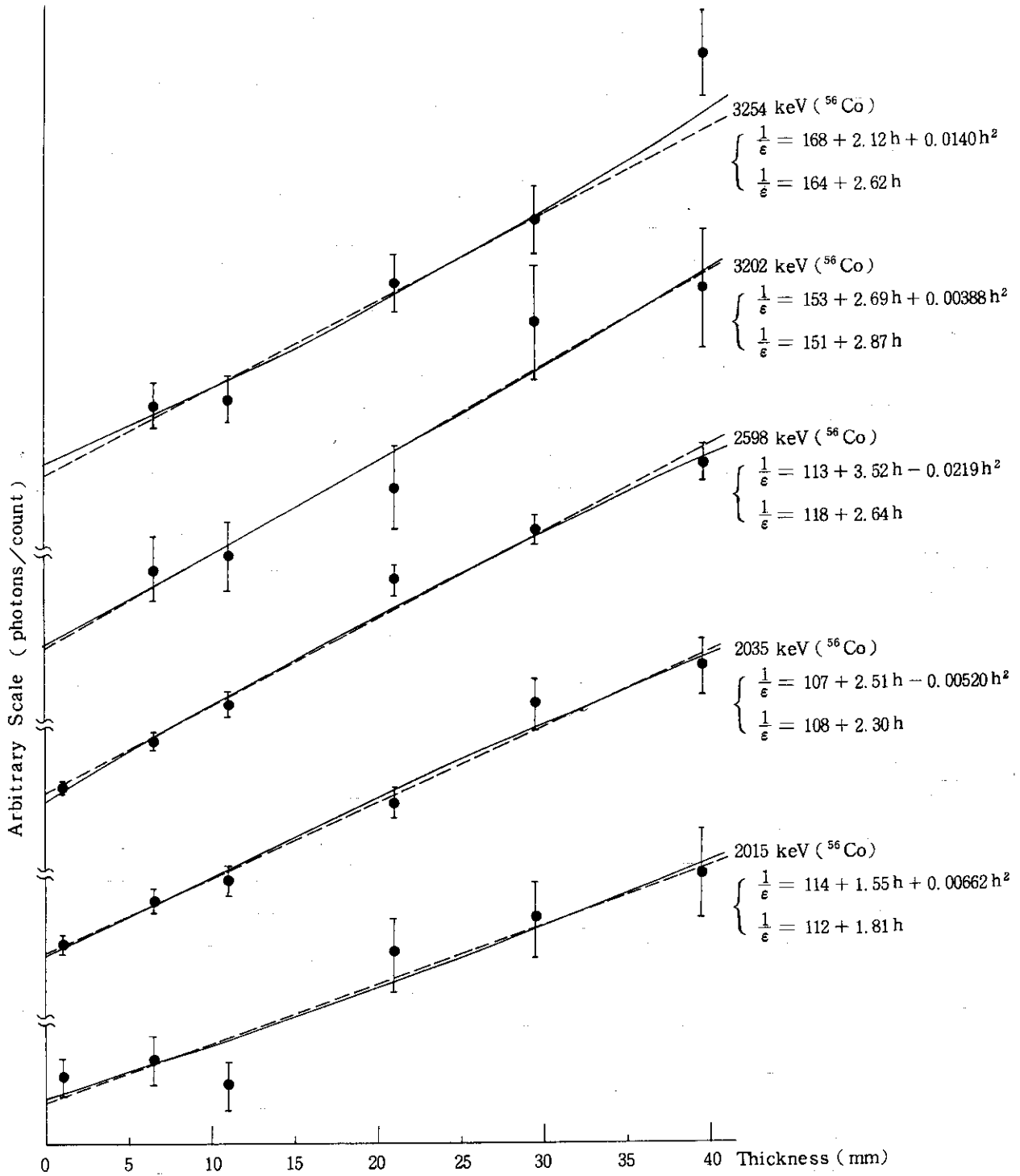


Fig.4 ピーク効率の逆数と線源 (直径 8 cm) の厚みとの関係



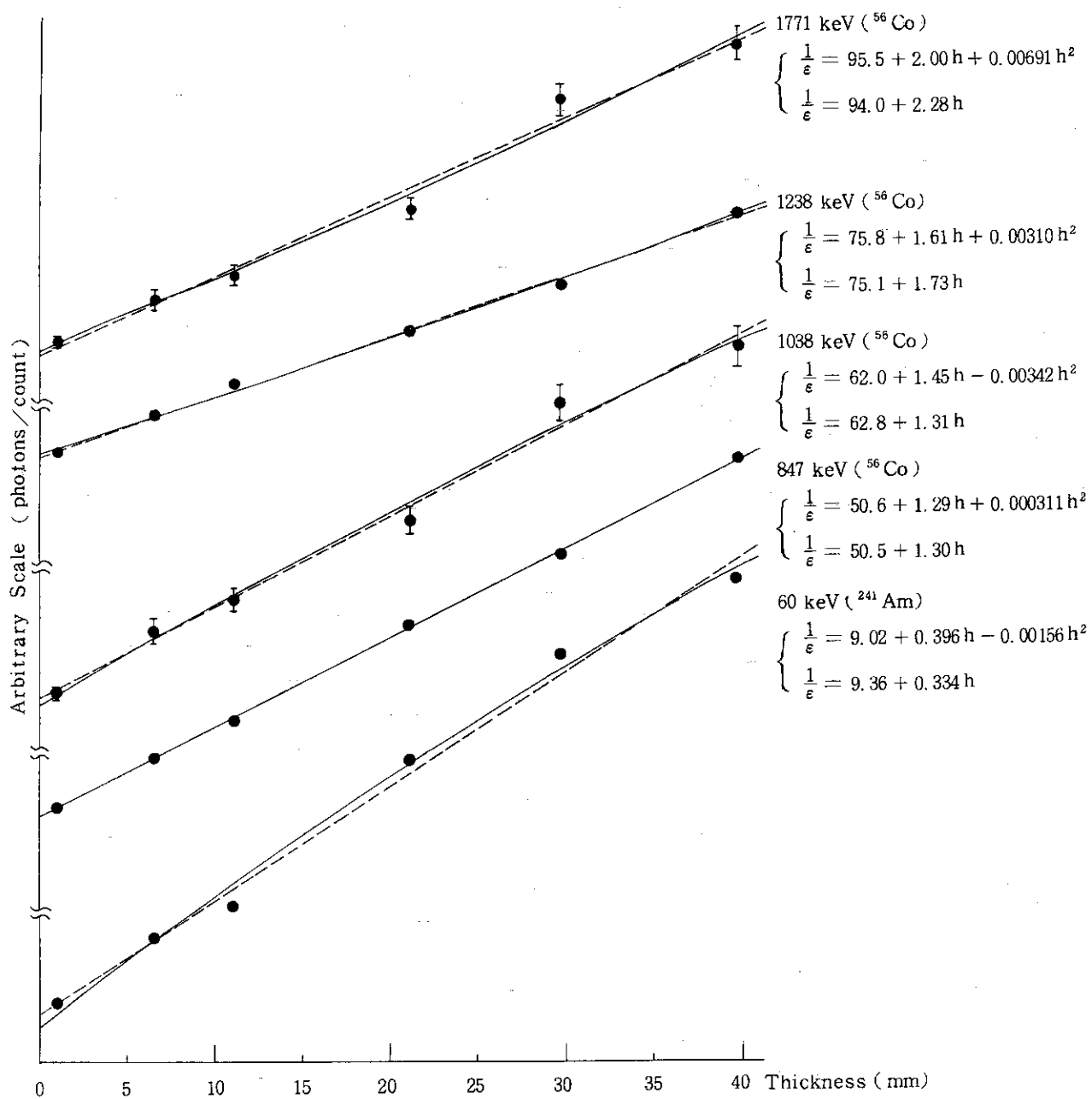
(B) ^{144}Ce と ^{51}Cr について

Fig. 4



(C) ^{56}Co について

Fig.4



(D) ^{241}Am と ^{56}Co について

Fig. 4

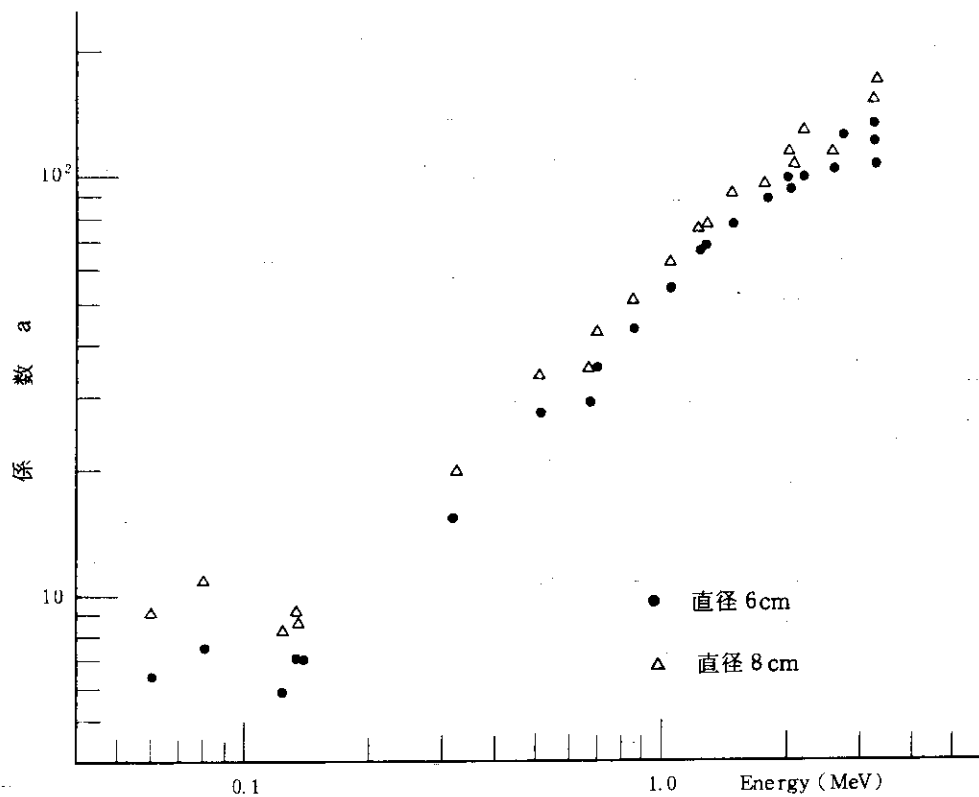


Fig. 5 近似式 $1/\epsilon = a + bh + ch^2$ の係数 a と γ 線のエネルギーの関係

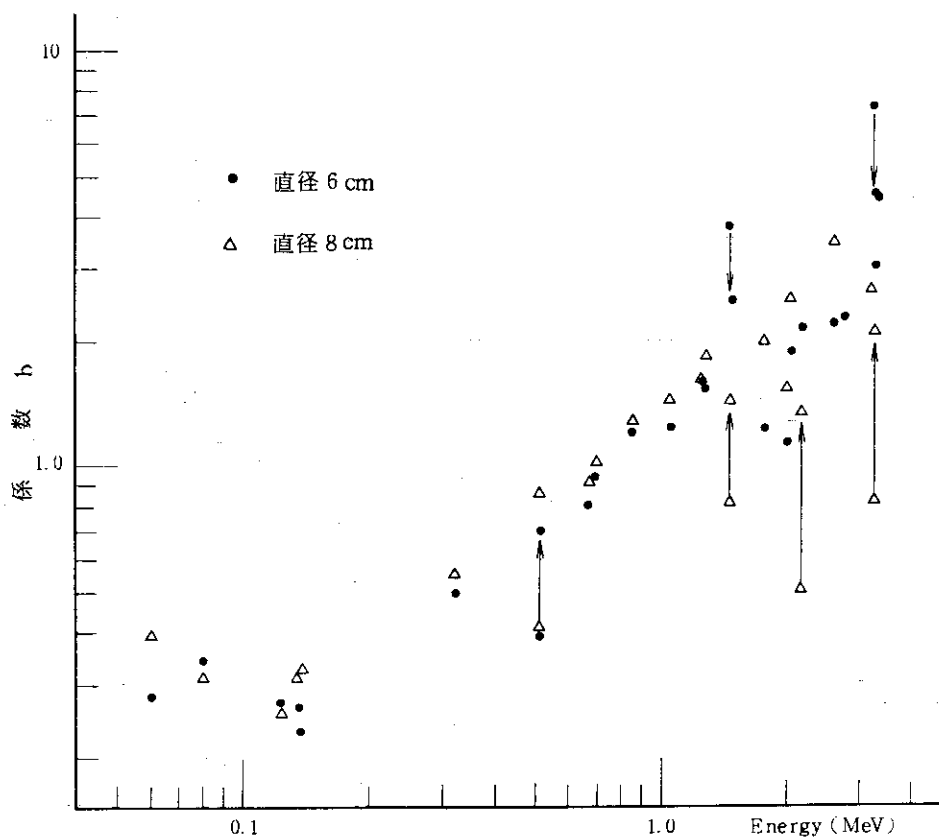


Fig. 6 近似式 $1/\epsilon = a + bh + ch^2$ の係数 b と γ 線のエネルギーの関係

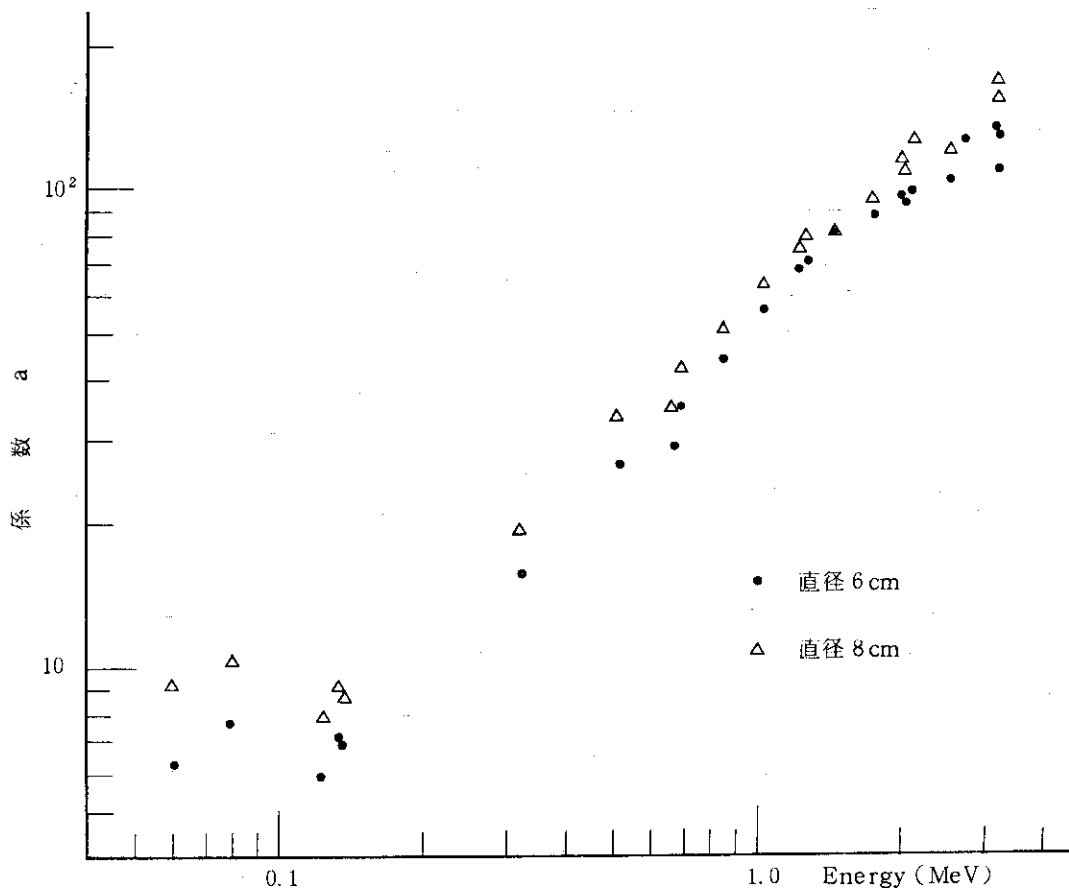


Fig. 7 近似式 $1/\epsilon = a + bh$ の係数 a と γ 線のエネルギーの関係

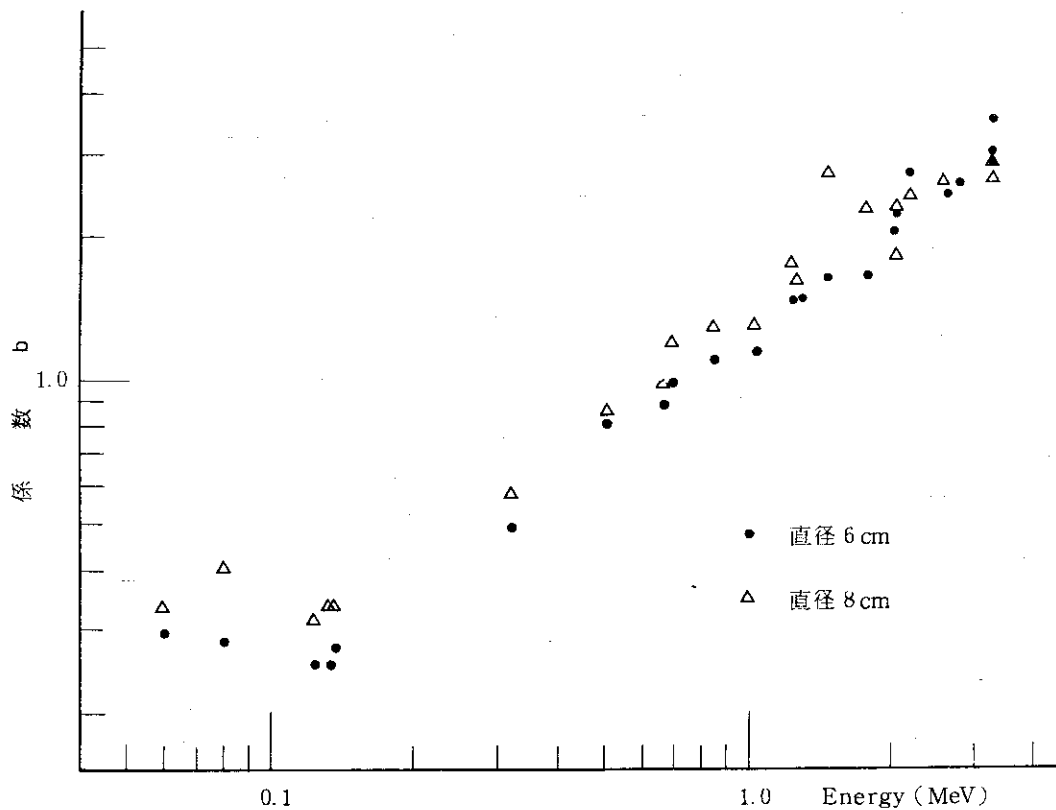


Fig. 8 近似式 $1/\epsilon = a + bh$ の係数 b と γ 線のエネルギーの関係

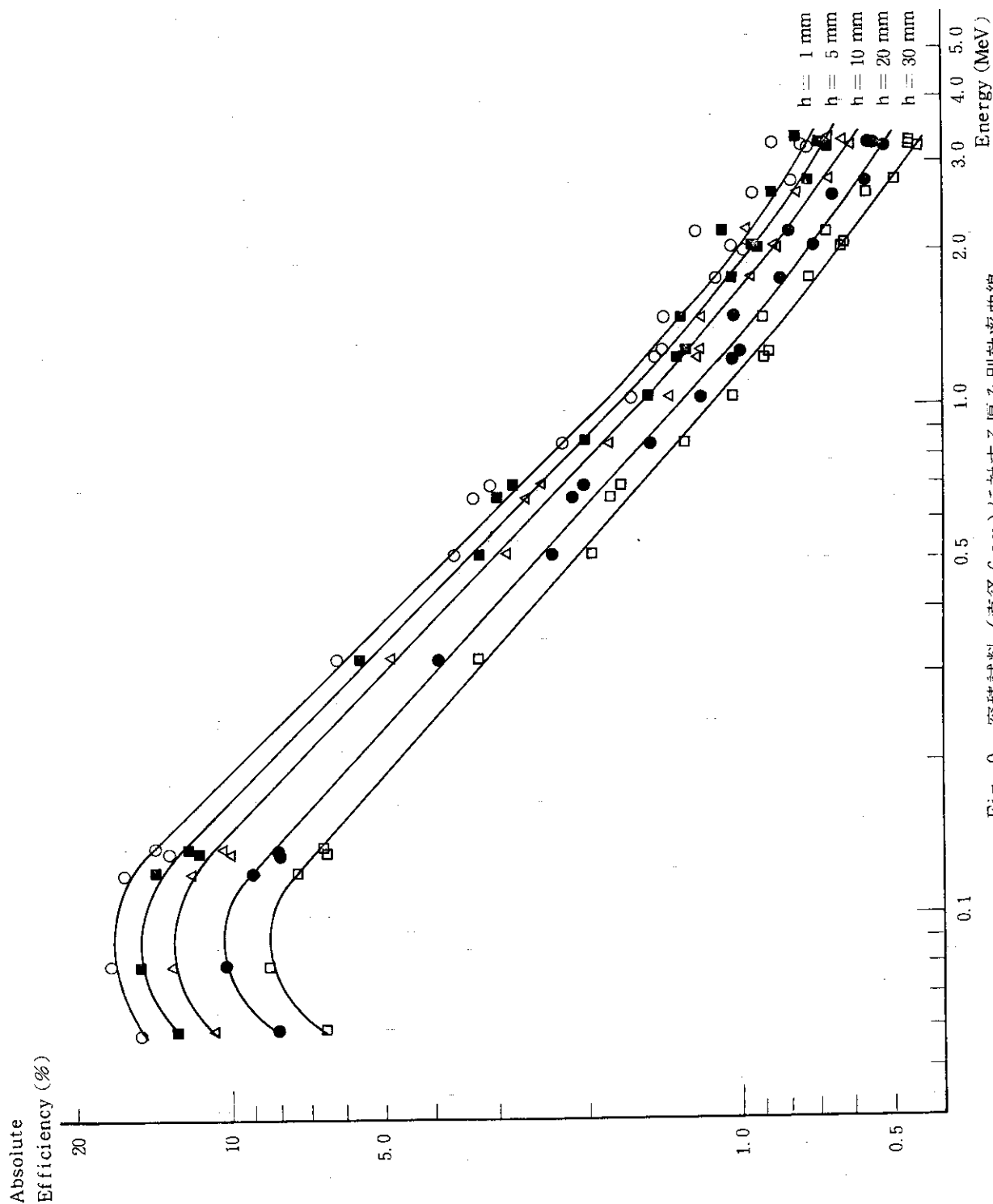


Fig. 9 容積試料 (直径 6 cm) に対する厚み別効率曲線

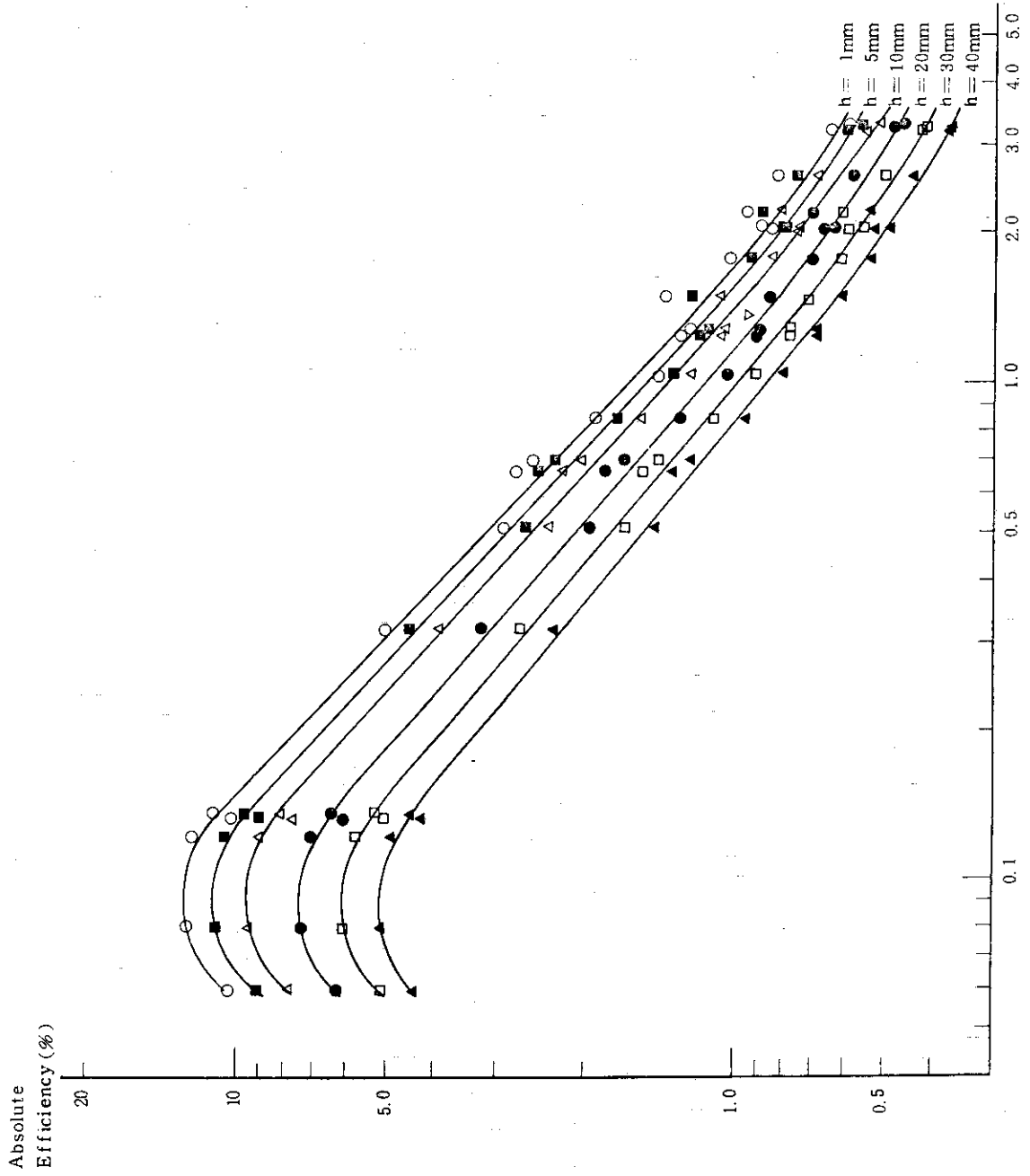


Fig. 10 容積試料 (直径 8 cm) に対する厚み別効率曲線

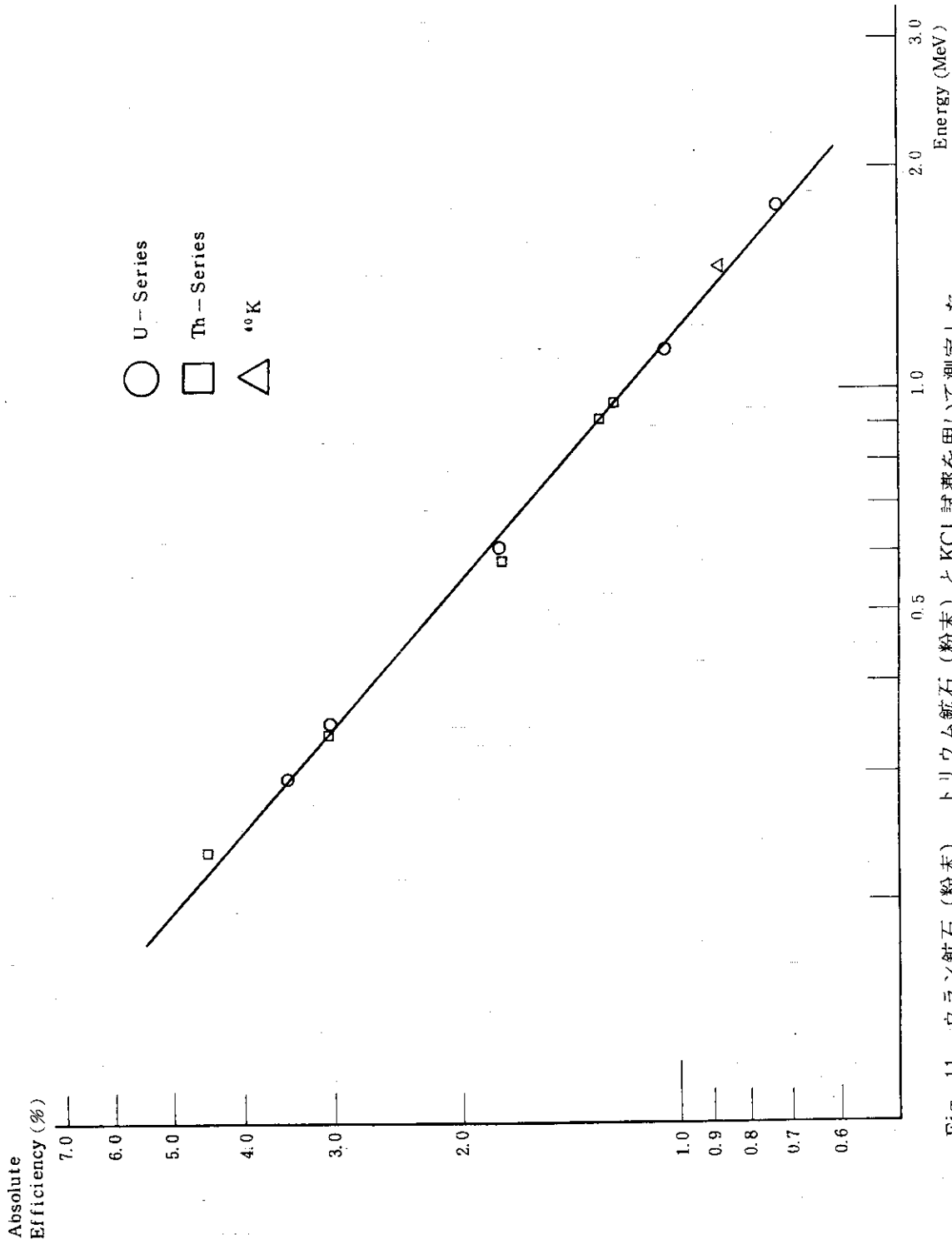


Fig. 11 ウラン鉱石 (粉末), トリウム鉱石 (粉末) と KCl 試薬を用いて測定した
効率曲線 (直径 6 cm, 厚み 3 cm)

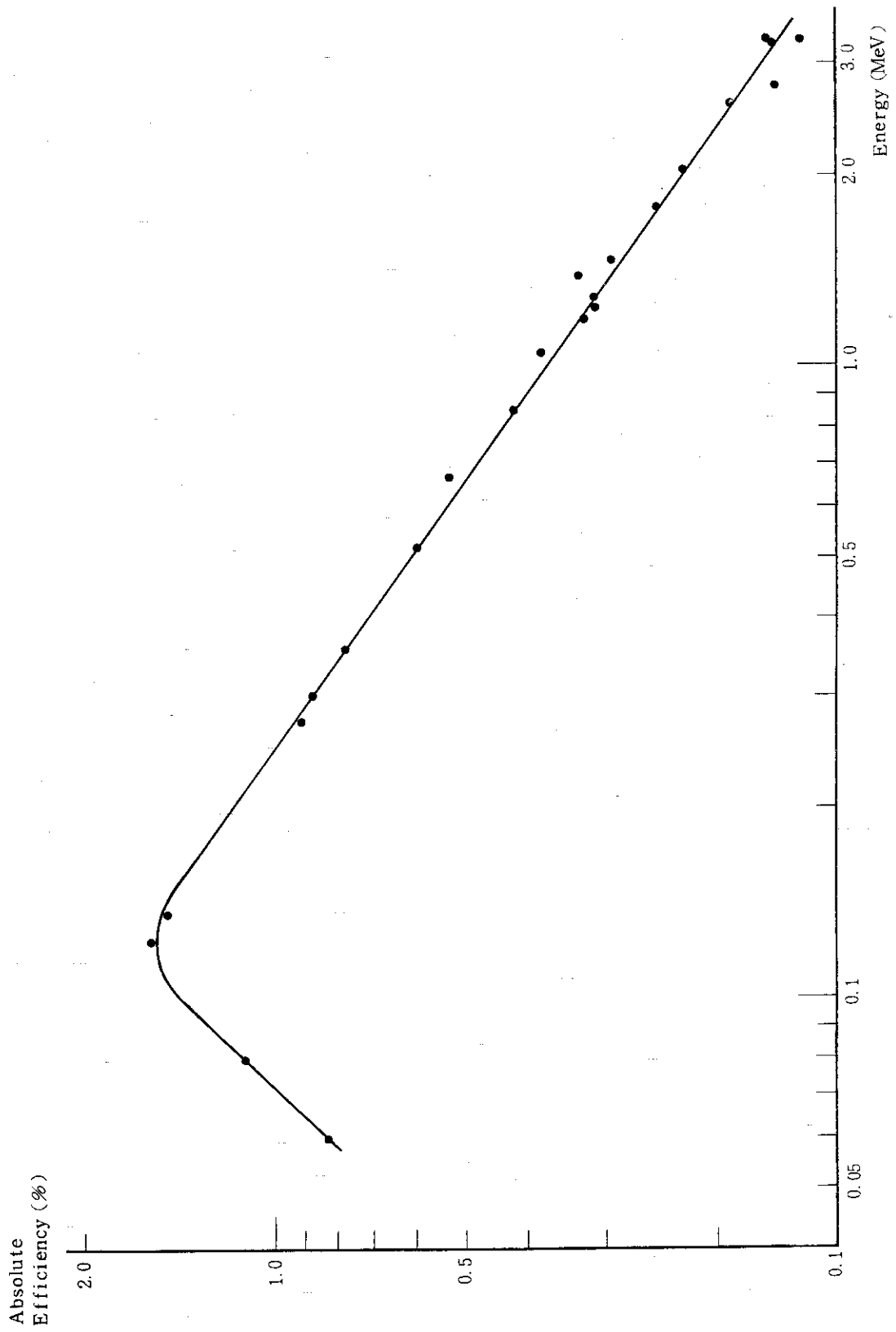


Fig. 12 放射能標準溶液を用いて測定した効率曲線 (直径 13 cm, 厚み 7 cm)

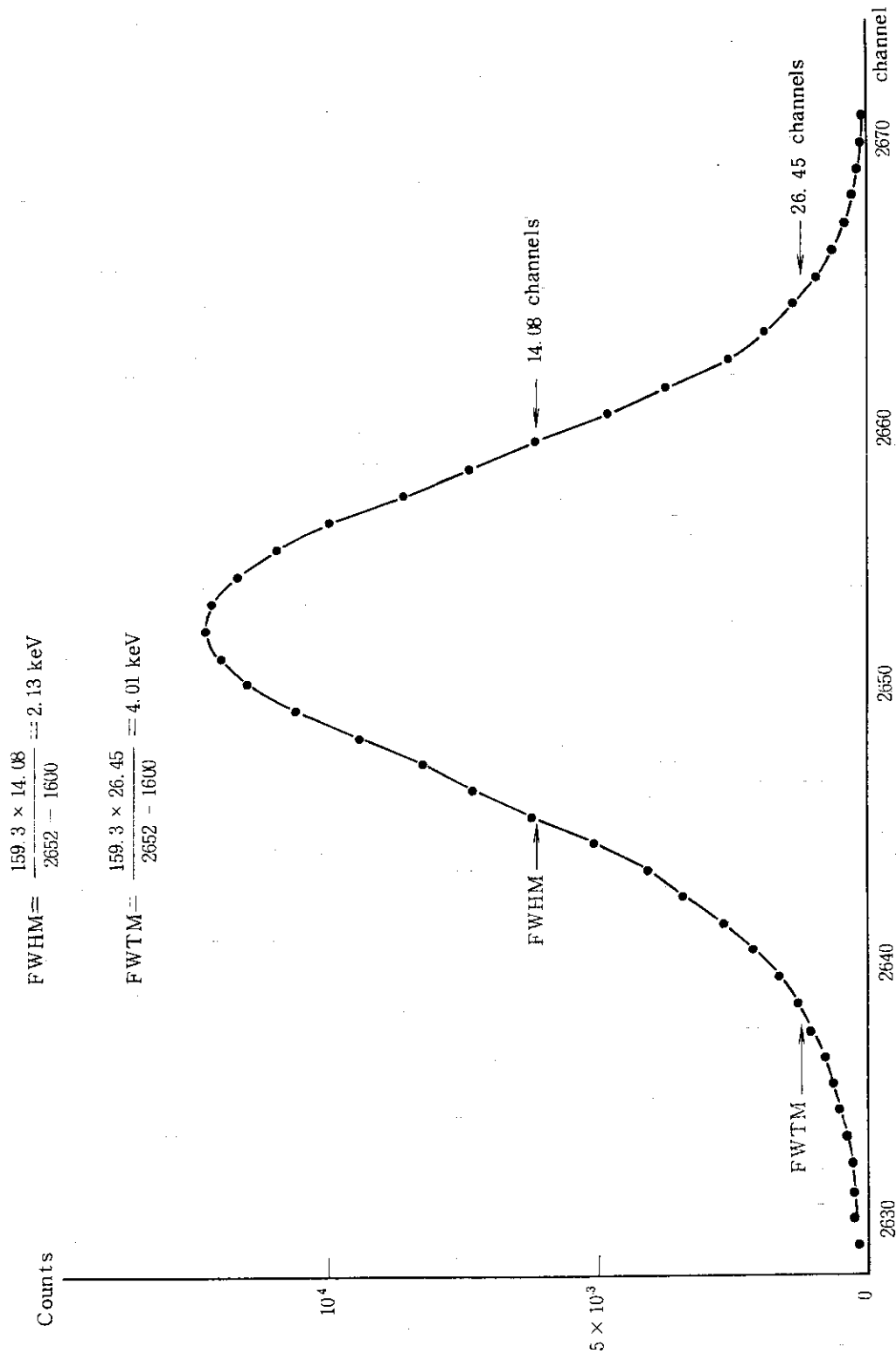


Fig. 13 ⁶⁰Co の 1332 keV γ 線のスペクトルと Ge(Li) 測定機器の分解能