

## サム効果に関する検討

石橋 博

## Examination of Coincidence Summing Effect

Hiroshi Ishibashi

## 要旨

現在、原子力発電所周辺環境放射能調査において、環境試料の測定に使用されているゲルマニウム半導体検出器の相対効率、技術的な進歩により30%を越えるものが主流である。

複数個の $\gamma$ 線の放出を伴う一般的な放射性核種の崩壊において、サム効果が関与する測定時のピーク計数率への影響は、検出器の相対効率が30%を越える場合は、特に考慮する必要があるといわれている。

今回、当センターの検出器更新にあたり、検出器相対効率の違いによる測定結果へのサム効果補正の影響について、若干の検討を行ったので報告する。

キーワード：カスケード $\gamma$ 線、検出器相対効率

## はじめに

一般的に、放射性核種の崩壊は複数個の $\gamma$ 線の放出を伴う。崩壊を起こした原子核のエネルギー準位が順次低くなるにしたがい、その準位間のエネルギー差に相当する $\gamma$ 線が次々に放出される。ふつう、全ての $\gamma$ 線の放出が終了するまでに要する時間は $10^{-20}$ 秒以下であり、1崩壊に係る2つ以上の $\gamma$ 線（カスケード $\gamma$ 線）が検出器と反応しても、時間的に区別が出来ず、それらの $\gamma$ 線が同時に検出されると、信号は両者の和の波高値を持つ1個の信号として分析される。

この現象を「サム効果」というが、サム効果は検出効率と核種の壊変形式に依存するため、 $\gamma$ 線を1個だけ放出する壊変と異なり、複数個の $\gamma$ 線が放出される場合は、同時に放出される $\gamma$ 線の影響により、目的の $\gamma$ 線だけを単独に検出できない場合が生じ、ピークの計数率への影

響は場合により数10%になることがある。

これらサム効果の影響は、相対効率が30%を越える検出器においては少なからず無視できない問題とされているが、今回、当センターの所有するゲルマニウム半導体検出器の更新（2台所有分の1台を更新）にあたり、新旧検出器両者間での、サム効果補正の有無による測定結果への影響について、若干の検討をおこなったのでその概要を報告する。

## ゲルマニウム半導体検出器

現在当センターが所有しているゲルマニウム半導体検出器の性能概要を、表1にしめす。

## 標準線源並びに使用スペクトルデータ

## 1) 標準線源

\* ISOTOPE PRODUCT LAB  
ORATORIES 製

\* V-2 容器（高さ：5 mm、20 mm、40 mm）

## 2) スペクトルデータ

## \*平成8年度放射能分析確認調査標準試料

「模擬土壌 (V-2 容器)」

## \*平成8年度測定試料

「ほうれん草 (V-2 容器: 灰化物)」

「陸土 (V-2 容器)」

## 検討項目

今回の報告では、以下の各項目について検討した。

- (1) 更新分ゲルマニウム半導体検出器に関して、サム効果補正の有無による、効率の変動確認、ならびに、それぞれの場合の「エネルギー対効率校正曲線 (以下効率校正曲線と表現する)」の作成。

また、試料高さの違いによるサム効果の影響の確認。

- (2) 新旧検出器間での、サム効果補正の有無による分析結果への影響。(主として環境試料測定結果にもたらす影響の検討)

## 検討結果

検討結果については、表2~4ならびに図1~4のとおりであった。

それぞれの内容について、以下に述べる。

- (1) サム効果補正の有無による、効率変動の確認

サム効果の影響は、容積線源の場合は検出器からの高さの低い(距離の短い)ものほど影響を受けると言われている。これらについて確認する意味で、標準線源(V-2 容器)のうち、試料高さの異なる5mm、20mm、40mmについて、サム効果補正の有無により効率を求め比較した。

それぞれの条件下での検出効率並びに効率校正曲線を図1~3に示す。

また、各試料高さによるサム効果補正の影響を比較・確認する意味で、同一試料高さごとに、補正の有無がもたらす効率への影響を図4に示した。

この結果、当センターで使用しているゲルマニウム半導体検出器においても、試料高さに関して、今回使用した標準線源のうち高さの最も低い5mmのものと、最も高い40mmの間では、効率の差(%)として、約2倍の差が生じたことが確認できた。

- (2) 新旧検出器間での、サム効果補正の有無による分析結果への影響。(主として環境試料測定結果にもたらす影響の検討)

表1にもしめしたように、新旧ゲルマニウム半導体検出器の相対効率には、約5%以上の差がある。この相対効率の差が、サム効果補正を行った場合と行わなかった場合で、測定結果にどのような影響を与えるのかを確認するために、新旧検出器で同一の試料を測定し、測定結果を比較検討した。結果を表2~4に示す。

なお、検討の目的が、主として環境試料の測定結果に与えるサム効果補正の影響であることから、本来ならば佐賀県が実施している「玄海原子力発電所周辺環境放射能調査」の核種分析項目中、指標核種であり、かつ、サム効果を考慮しなければならない「Co-60」に着目して検討すべきであったが、環境試料の測定において「Co-60」の検出が無く、比較検討が出来なかったため、ほとんどの環境試料の測定で検出される核種であり、「Co-60」付近のエネルギー位置で検出され、あわせてカスケードの影響が少ない核種で検討し、その影響を推測することとして、「K-40」に着目し検討することにした。

## 1) 模擬土壌 (V-2 容器)

平成8年度に、(財)日本分析センターとの間で実施された、環境放射能分析確認調査で送付

された標準試料のうち、模擬土壌について新旧検出器による測定を実施し、その結果を比較した。(表2)

サム効果補正実施の有無別に放射能濃度の測定値を比較すると、旧型検出器では補正を行った場合が「 $0.870 \text{ Bq/g}$ 」、行わなかった場合が「 $0.916 \text{ Bq/g}$ 」と、補正を行った場合の方が、約5.0%低い結果であった。

新型検出器では、サム効果補正を行った場合が「 $1.03 \text{ Bq/g}$ 」、行わなかった場合が「 $1.09 \text{ Bq/g}$ 」と、補正を行った場合の方が、約5.5%低い結果であった。

## 2) ほうれん草 (V-2 容器)

平成8年度の分析対象試料のなかから、灰試料として「ほうれん草」を選び、1)と同様に新旧検出器で測定を実施し、その結果を比較した。(表3)

新旧検出器とも、測定結果については1)と同様な結果であり、サム効果補正の有無に起因すると思われる測定結果の差は、旧型検出器では約4.8%、新型検出器では約5.1%、それぞれサム効果補正を行った場合の方が低い値であった。

## 3) 陸土 (V-2 容器)

2)と同じく、平成8年度の分析対象試料のなかから、「陸土」を選び、同様に測定、結果比較を行った。(表4)

新旧検出器とも、測定結果については1)、2)と同様な結果であり、サム効果補正の有無に起因すると思われる測定結果の差は、旧型検出器では約4.7%、新型検出器では約5.0%、それぞれサム効果補正を行った場合の方が低い値であった。

### まとめ

今回の報告では、まず(1)により、サム効果に関して文献等で得られた、測定試料の厚みが検出効率に与える影響を実際に確認することが出来た。

また(2)では、相対効率の異なるゲルマニウム半導体検出器の間で、サム効果は検出効率に依存し、検出器相対効率の高い方が顕著になることの確認を試み、比較した3つの試料に関する限り、いずれも検出器相対効率の高い新型検出器の方が、サム効果補正実施の有無による「K-40」の測定結果の差が大きいことは確認することが出来た。

ただし、(2)に関しては、比較した試料数が少ないこと、また、新旧両検出器はメーカーも異なり、効率校正への対応が異なること、あわせて今回の検討では、この効率校正の対応に関して詳細な検討を行っていないこと等から、ここに記載した結果からは、新旧両検出器の相対効率の差によって生じる、サム効果補正の有無がもたらしたであろう、測定結果への影響のごく一部が確認出来たにすぎず、サム効果と検出器相対効率の関連性について検討を行うには不足している検討事項、ファクターが多い。

今後、さらに充実したサム効果に関する検討を重ねる必要があることは確認出来たが、今回は、サム効果補正を検討するための基礎的事項である「パイルアップ」や「不感時間」の取扱い、さらに「 $\gamma$ 線放出比データの確認」、あわせて「自己吸収補正」も考慮したうえで、新旧両検出器間での効率校正の内容の十分な検討を行い、比較試料数をさらに増やす等、検討を行う事前の条件整備が必要である。

検討結果の(2)でも一部ふれたが、佐賀県では、「玄海原子力発電所周辺環境放射能調査」の核種分析項目として、4つの指標核種「Co-60」、「I-131」、「Cs-137」、「Sr-90」と「K-40」等7つの参考核種について分析・調査している。

現在は、環境試料の測定に関する限り、サム効果補正は行っていない。今回、「K-40」のみの検討ではあるが、サム効果補正の有無による測定結果の差が、新旧両検出器ともそれぞれ約5%の差が見られた。

上記分析項目として掲げた核種については、様々な面で測定条件にも差異は認められるが、今回の結果から、新旧両検出器を用いた測定結果には、補正の有無により数%の違いが生じることが予想される。

これからも、新旧両検出器を用いた原子力発電所周辺環境放射能調査は継続されるが、今回の経験を生かし、今後サム効果の影響をどう取り扱うのか、また、今までの測定結果についてはどう対応するのかを、今回不足していると思われる検討事項、ファクターをさらに充実したうえで、早急に検討したいと思う。

#### 参考文献

- 1) 科学技術庁：ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー
- 2) (財)日本分析センター： $\gamma$ 線計測におけるサム効果補正法（環境放射能分析研修テキスト）
- 3) 野口正安： $\gamma$ 線スペクトロメトリー
- 4) (社)日本アイソトープ協会：アイソトープ手帳（改訂9版）

表1 ゲルマニウム半導体検出器性能比較表

性能 \ 検出器	新型検出器	旧型検出器
検出器印加電圧	2,500V	2,500V
分解能	1.73KeV	1.92KeV
ピーク対コンプトン比	62.0	57.0
相対効率	31.0%	25.2%

表2 模擬土壌測定結果 (K-40のみ)

放射能濃度 \ 検出器	新型検出器	旧型検出器
サム効果補正有	1.03Bq/g	0.870Bq/g
サム効果補正無	1.09Bq/g	0.916Bq/g

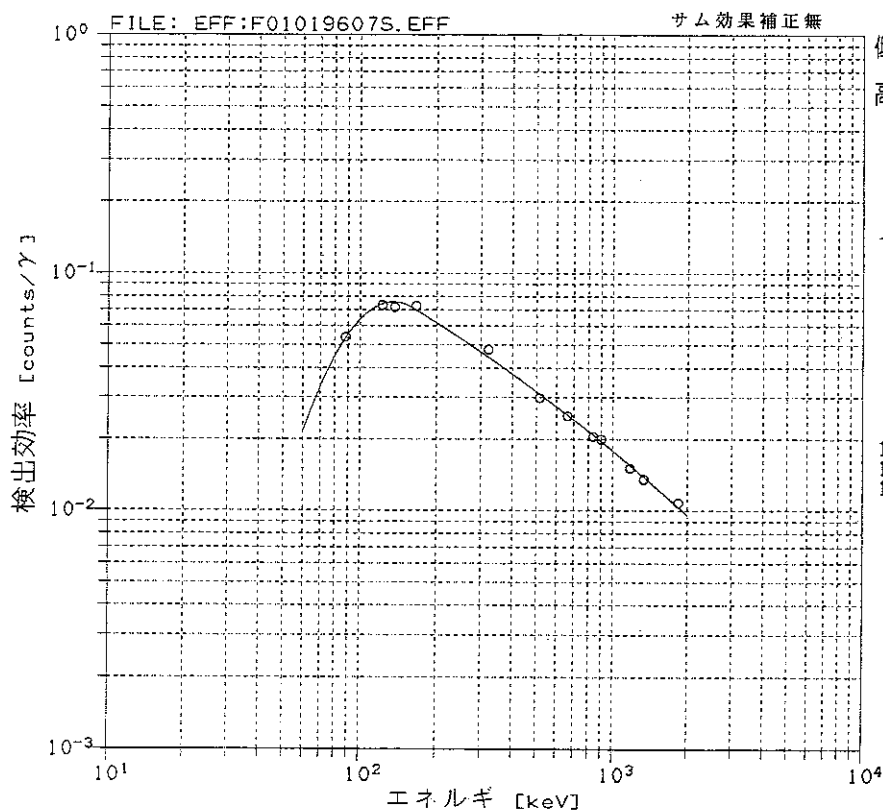
表3 ほうれん草測定結果 (K-40のみ)

放射能濃度 \ 検出器	新型検出器	旧型検出器
サム効果補正有	225.0Bq/g	204.5Bq/g
サム効果補正無	237.0Bq/g	214.8Bq/g

表4 陸上測定結果 (K-40のみ)

放射能濃度 \ 検出器	新型検出器	旧型検出器
サム効果補正有	320.0Bq/g	293.7Bq/g
サム効果補正無	337.0Bq/g	308.2Bq/g

エネルギー対効率校正曲線 サム効果補正有



エネルギー対効率校正曲線 サム効果補正無

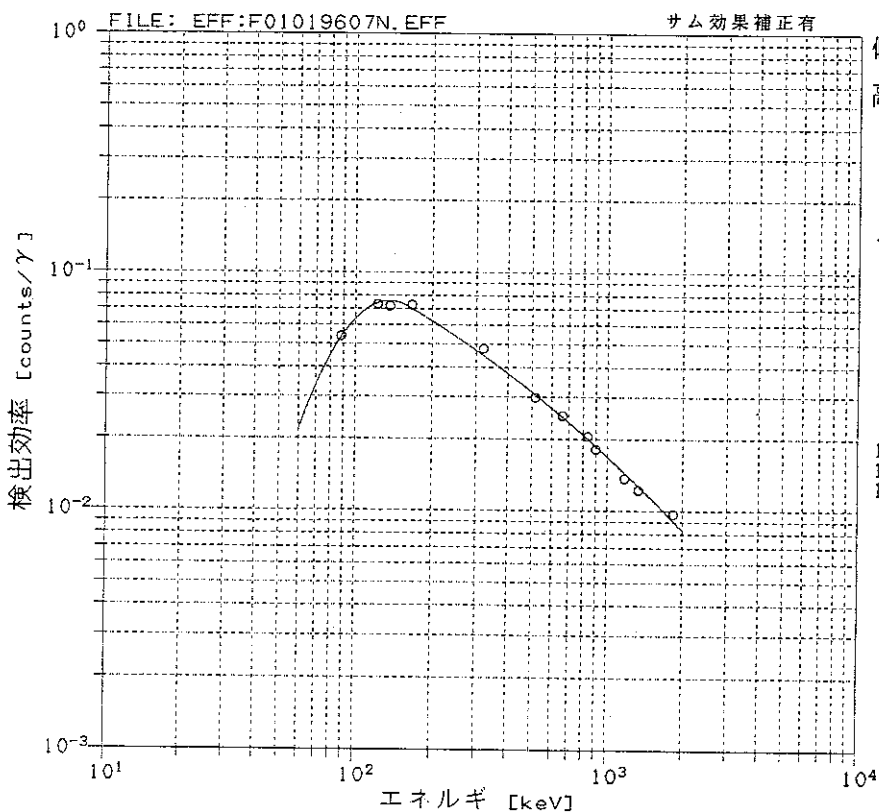
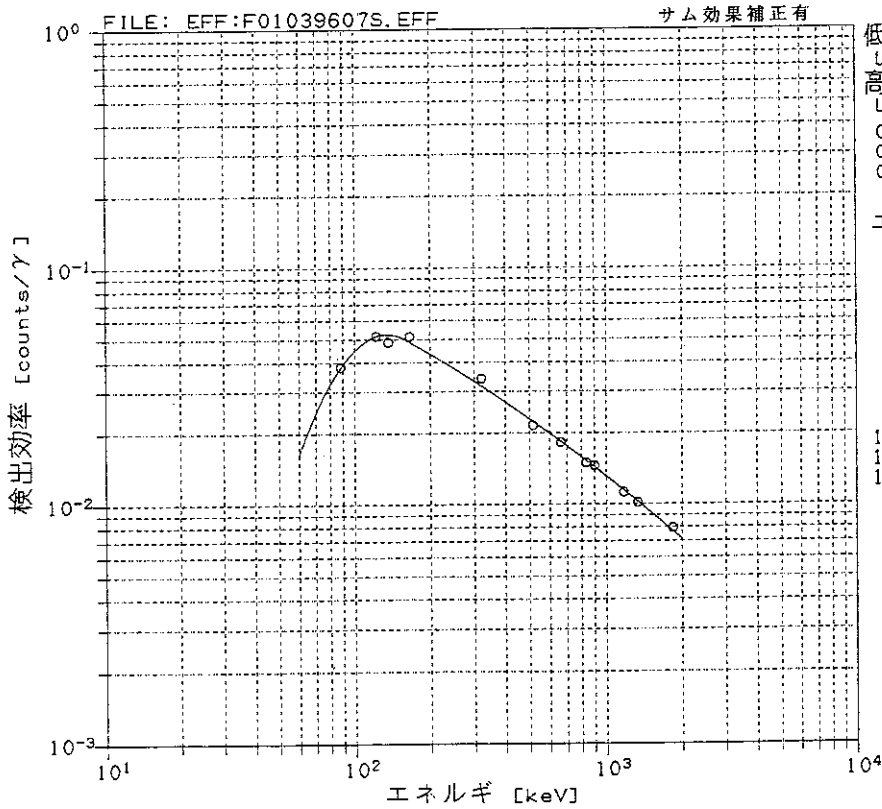


図1 エネルギー対効率校正曲線 (V-2 容器: 5 mm)

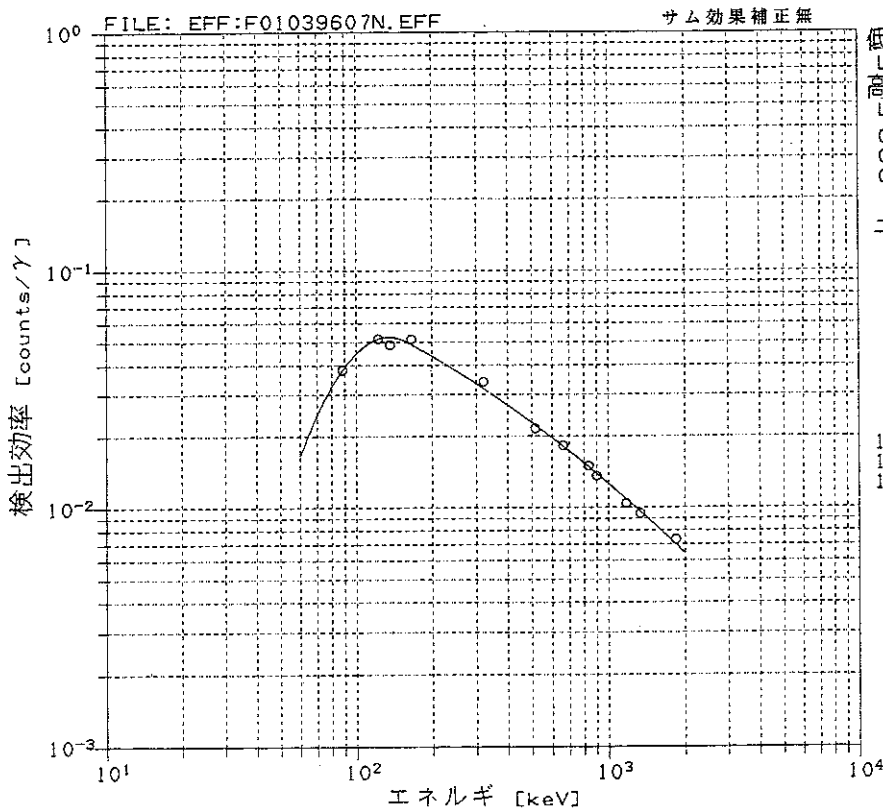
エネルギー対効率校正曲線 サム効果補正有



FILE: EFF:F01039607S.EFF  
サム効果補正有  
低 160.0keV未満  
 $LN(Eff)=C0+C1*LN(KEV)+C2*LN(KEV)^2$   
高 160.0keV以上  
 $LN(Eff)=C3+C4*LN(KEV)+C5*LN(KEV)^2$   
C0=-4.55150E+01 C3=-1.60050E+00  
C1=1.73613E+01 C4=5.57095E-02  
C2=-1.77018E+00 C5=-6.52517E-02

エネルギー	検出効率	核種
88.03	3.8083E-02	Cd-109
122.06	5.1614E-02	Co-57
136.47	5.2509E-02	Co-57
165.80	4.8793E-02	Ce-139
320.08	3.1731E-02	Cr-51
514.00	2.2476E-02	Sr-85
661.64	1.8480E-02	Cs-137
834.83	1.5318E-02	Mn-54
898.00	1.4421E-02	Y-88
1173.21	1.1492E-02	Co-60
1332.47	1.0281E-02	Co-60
1836.10	7.6940E-03	Y-88

エネルギー対効率校正曲線 サム効果補正無

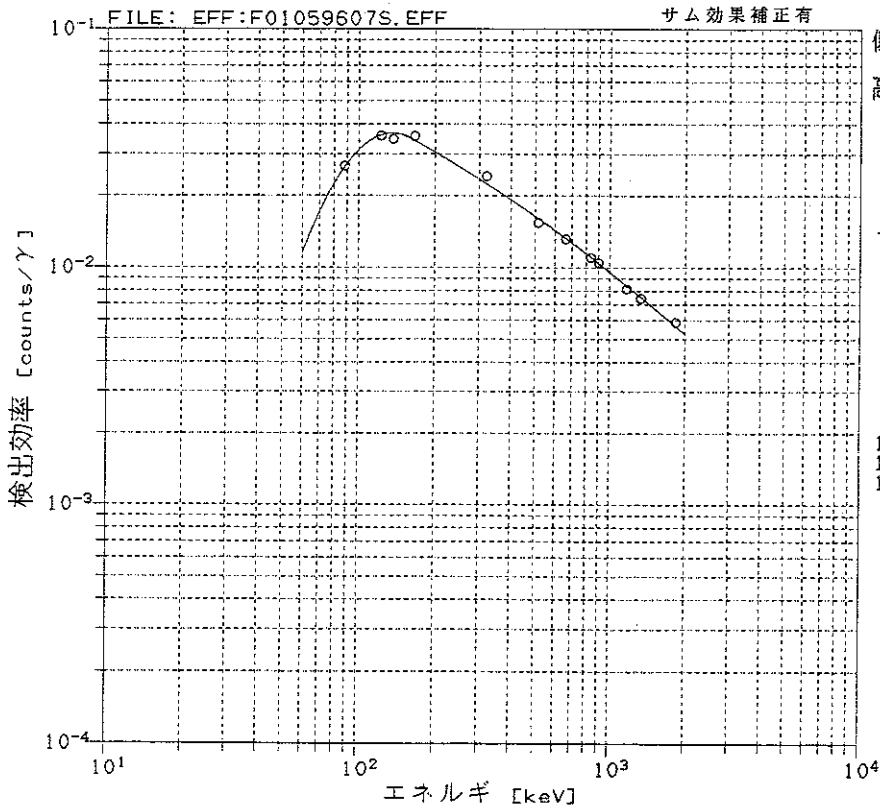


FILE: EFF:F01039607N.EFF  
サム効果補正無  
低 160.0keV未満  
 $LN(Eff)=C0+C1*LN(KEV)+C2*LN(KEV)^2$   
高 160.0keV以上  
 $LN(Eff)=C3+C4*LN(KEV)+C5*LN(KEV)^2$   
C0=-4.48420E+01 C3=-2.35256E+00  
C1=1.70755E+01 C4=3.31451E-01  
C2=-1.73989E+00 C5=-9.02942E-02

エネルギー	検出効率	核種
88.03	3.8094E-02	Cd-109
122.06	5.1548E-02	Co-57
136.47	5.2492E-02	Co-57
165.80	4.8944E-02	Ce-139
320.08	3.1898E-02	Cr-51
514.00	2.2328E-02	Sr-85
661.64	1.8159E-02	Cs-137
834.83	1.4859E-02	Mn-54
898.00	1.3925E-02	Y-88
1173.21	1.0887E-02	Co-60
1332.47	9.6392E-03	Co-60
1836.10	7.0024E-03	Y-88

図2 エネルギー対効率校正曲線 (V-2容器:20mm)

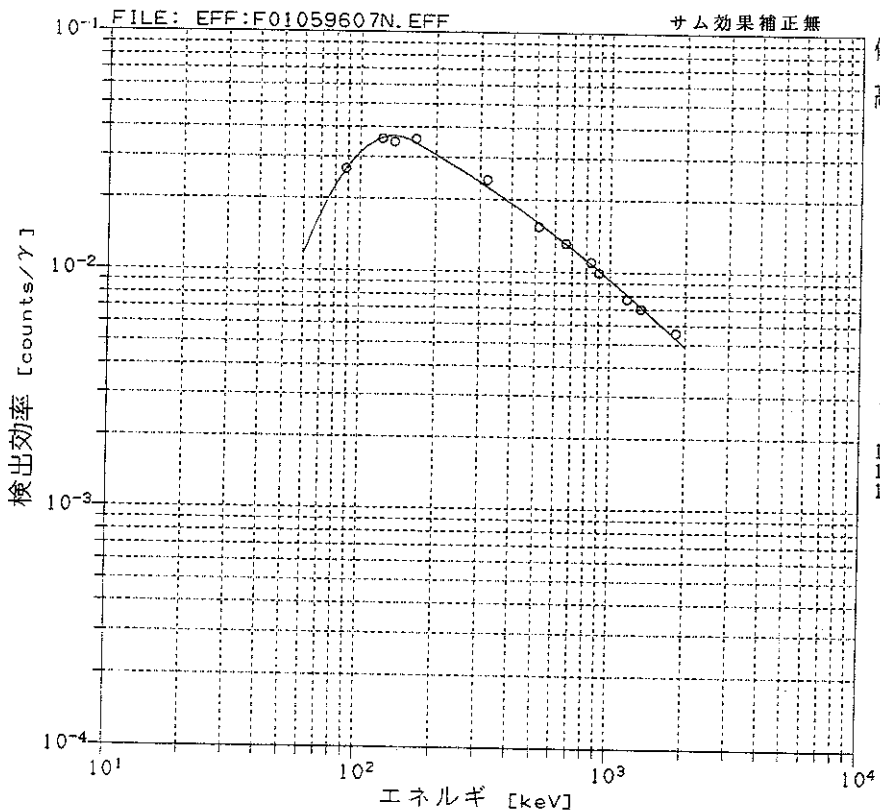
エネルギー対効率校正曲線 サム効果補正有



低 160.0keV未満  
 $LN(Eff)=C0+C1*LN(KEV)+C2*LN(KEV)^2$   
 高 160.0keV以上  
 $LN(Eff)=C3+C4*LN(KEV)+C5*LN(KEV)^2$   
 $C0=-4.54312E+01$   $C3=-2.00687E+00$   
 $C1=1.71702E+01$   $C4=5.77968E-02$   
 $C2=-1.74960E+00$   $C5=-6.37033E-02$

エネルギー	検出効率	核種
88.03	2.6591E-02	Cd-109
122.06	3.6038E-02	Co-57
136.47	3.6700E-02	Co-57
165.80	3.4204E-02	Ce-139
320.08	2.2522E-02	Cr-51
514.00	1.6110E-02	Sr-85
661.64	1.3319E-02	Cs-137
834.83	1.1098E-02	Mn-54
898.00	1.0466E-02	Y-88
1173.21	8.3931E-03	Co-60
1332.47	7.5317E-03	Co-60
1836.10	5.6815E-03	Y-88

エネルギー対効率校正曲線 サム効果補正無



低 160.0keV未満  
 $LN(Eff)=C0+C1*LN(KEV)+C2*LN(KEV)^2$   
 高 160.0keV以上  
 $LN(Eff)=C3+C4*LN(KEV)+C5*LN(KEV)^2$   
 $C0=-4.49745E+01$   $C3=-2.53657E+00$   
 $C1=1.69761E+01$   $C4=2.52338E-01$   
 $C2=-1.72900E+00$   $C5=-8.14042E-02$

エネルギー	検出効率	核種
88.03	2.6596E-02	Cd-109
122.06	3.6009E-02	Co-57
136.47	3.6695E-02	Co-57
165.80	3.4279E-02	Ce-139
320.08	2.2601E-02	Cr-51
514.00	1.6029E-02	Sr-85
661.64	1.3149E-02	Cs-137
834.83	1.0856E-02	Mn-54
898.00	1.0204E-02	Y-88
1173.21	8.0727E-03	Co-60
1332.47	7.1909E-03	Co-60
1836.10	5.3111E-03	Y-88

図3 エネルギー対効率校正曲線 (V-2容器:40mm)



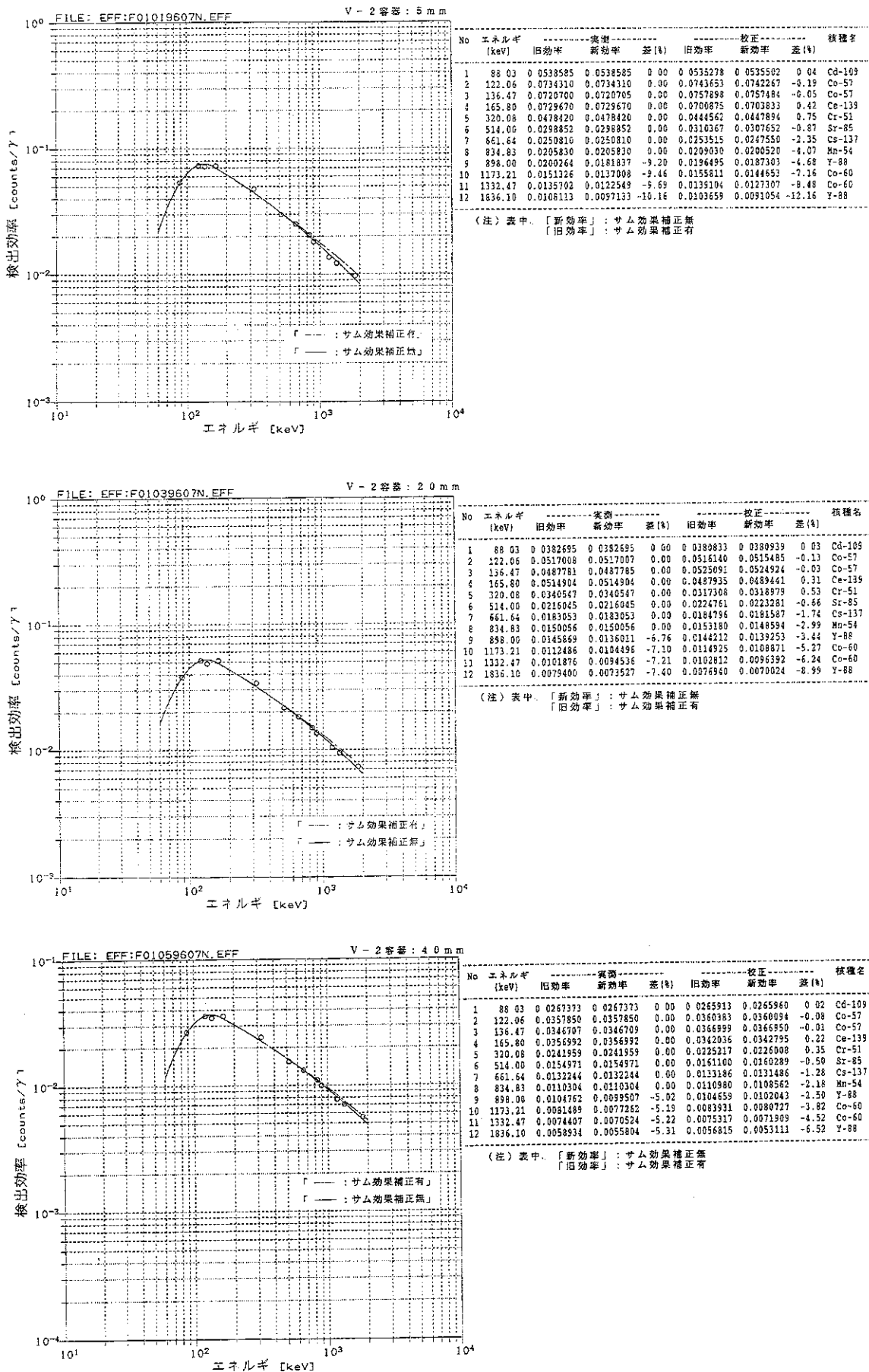


図4 エネルギー対効率校正曲線(比較)