クローバー検出器のadd-backモードにおける高計数率条件下の検出効率決定に関する研究

名古屋大学工学研究科エネルギー理工学専攻　山口智也
名古屋大学アイソトープ総合センター　柴田理尋

背景

中性子捕獲γ線や短半減期の核分裂生成物などの高エネルギーのγ線を放出し、半減期が数秒かつ極めて収率が低いものを測定対象とした時に収率を上げて測定を行いたいが、親核種または娘核種によるγ線も必然に増加し計数率が高くなる。故に、高計数率における高エネルギー範囲までの検出効率が必要である。Ge検出器の校正には一般的に単色線源またはそれらの混合線源を使用するが、最大エネルギーは^{88}Yの1836keVが上限である（図１）。対して^{56}Coの最大エネルギーは3548keVで、サムピークを考慮するとそれ以上となる（図1）。測定には貫通孔内結晶中心で立体角が98％に及ぶクローバー検出器のadd-backモードを使用したい。

表１ 図1の線源の半減期と崩壊形式

単色γ線源	半減期	崩壊形式
^{109}Cd	462.6 d	EC
^{139}Ce	137.6 d	EC
^{51}Cr	27.70 d	EC
^{85}Sr	64.8 d	EC
^{137}Cs	30.07 y	β^-
^{54}Mn	312.3 d	EC,β^+
単純なカスケードを持つγ線源		
^{57}Co	271.79 d	EC
^{60}Co	5.27 y	β^-
^{24}Na	14.95 h	β^-
^{88}Y	106.65 d	EC,β^+
複雑なカスケードを持つγ線源		
^{152}Eu	13.54 y	EC,β^-
^{56}Co	77.27 d	EC,β^+
^{56}Mn	2.58 h	β^-

表２ 提供頂いた^{56}COと^{57}Coの放射能[kBq]

sheetNo.	^{56}Co	^{57}Co
19070101	9.01±0.29	0.28±0.07
19070102	13.9±0.42	0.24±0.07
19070103	22.8±0.38	0.12±0.03
19070104	31.4±0.30	0.24±0.02
19070105	31.4±0.61	0.38±0.05
19070106	25.0±0.32	0.45±0.03
19070107	8.38±0.24	0.20±0.02
total	142±1	1.9±0.1
2019年08月02日　12:00:00の時点		

^{56}Coは東北大学サイクロン・ラジオアイソトープセンターで^{56}Fe(p,n)反応で生成した。

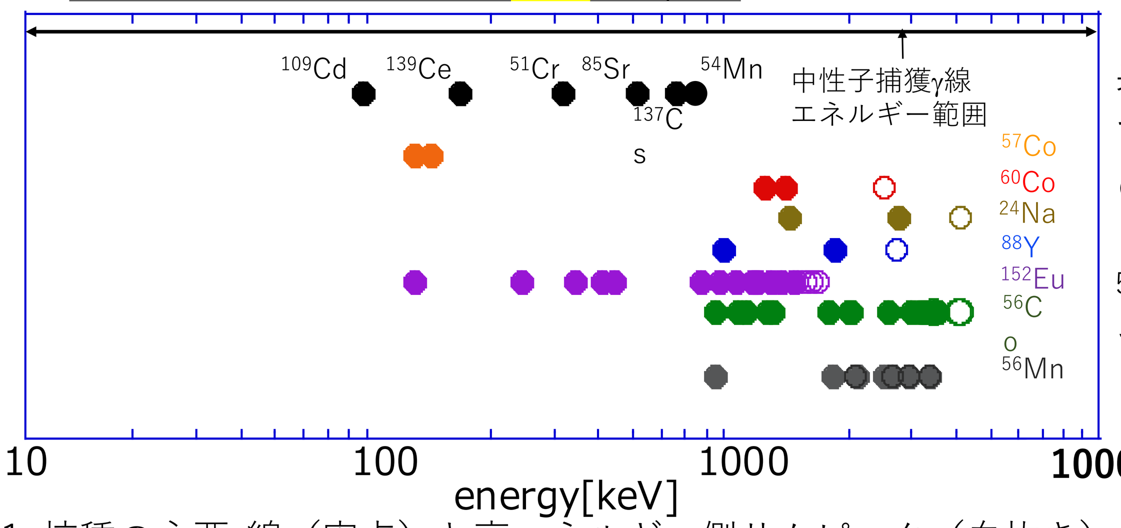


図１ 核種の主要γ線（実点）と高エネルギー側サムピーク（白抜き）エネルギー

表１と図１は一般的に校正に使用する核種とそれ以上のエネルギーのγ線を放出する核種である。

^{56}Co以外は半減期が短く実験室で使用できない故、^{56}Coが必要となる。

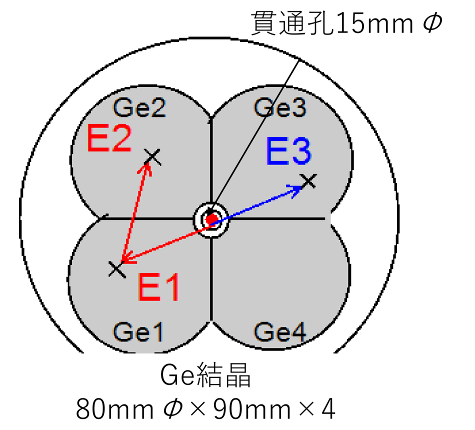


図２ 全立体角型クローバー検出器

・貫通孔結晶中心で立体角98％

・各結晶で独立したデータ収集（30kcpsまで対応）

・二つのスペクトル作成モード（singles , add-back）

	energy[keV] Ge1	Ge2	Ge3	Ge4	time [ns]
	start				0
E1	200				120
E2		300			350
E3			400		920
E4	301				1080

一本のγ線と見なす

図３ タイムスタンプ式データ収集の様子

図２で赤、青２本のγ線が放出されたとき図３のようにデータ収集され、各モードで以下のようにスペクトルを作成し、その検出効率の結果は図4になる。

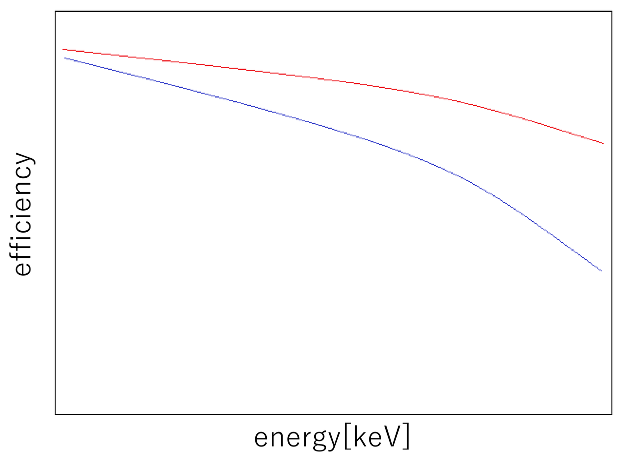


図４ singles(青)とadd-back(赤)の検出効率曲線

・singlesモード
各結晶でスペクトルを作成し足し合わせる
（E1,E2に1カウント）

・add-backモード
時間幅内をエネルギーを足し合わせてスペクトルを作成
（E=E1+E2,Eにカウント）

問題点

add-backモードは複数の結晶で相互作用する高エネルギーはパイルアップによる影響が大きくなる（図２の赤色γ線で二つの結晶でパイルアップする可能性）。

高計数率で検出効率を使用するにはこの減少量を評価しなければならない。

実験

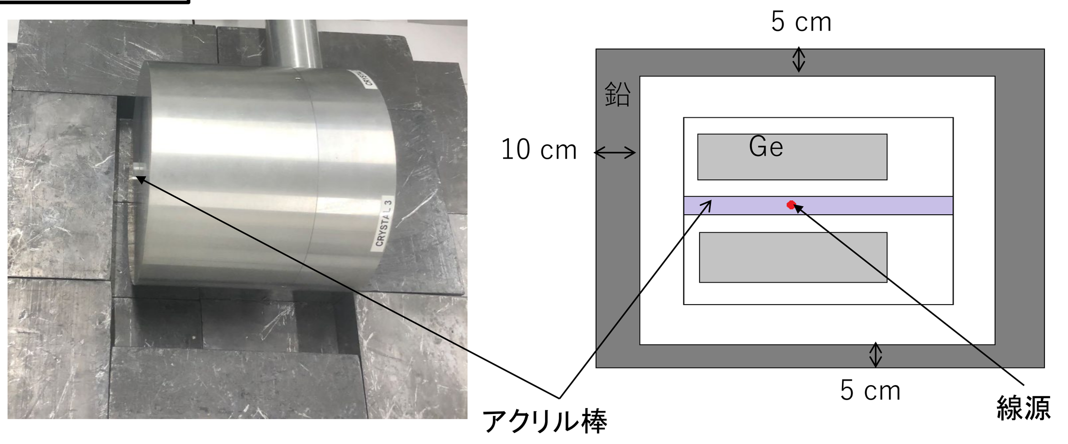


図５　クローバー検出器の写真と測定時のジオメトリー

表3 測定核種と測定時の計数率

					測定時の各結晶の計数率（kcps）
混合線源（ろ紙 1×1cm^2)	単色線源	^{137}Cs	^{139}Ce	^{85}Sr	1.0
		^{109}Cd	^{51}Cr		
	単純カスケード線源	^{57}Co	^{60}Co	^{88}Y	
複雑なカスケード線源		^{152}Eu（ろ紙1×1cm^2)			0.4, 13.6
		^{56}Co（金属箔 1.2×1.2×0.01mm^3)			0.9, 1.7, 4.2, 10.7, 13.6

図５のジオメトリーで全方位を鉛で遮蔽し、表３に示した条件で各核種で測定を行った。データは表４の収集系を使用した。

表４ 使用したデータ収集系の性能表

データ収集系 Techno AP 社製 Digital Signal Processing (DSP)
・入射したγ線をリストデータで10nsごとに収集
・データは結晶番号、時間情報、吸収エネルギーを記録
・時間分解能は0.625ns
・データを記録後にdead time が1000ns

結果・解析

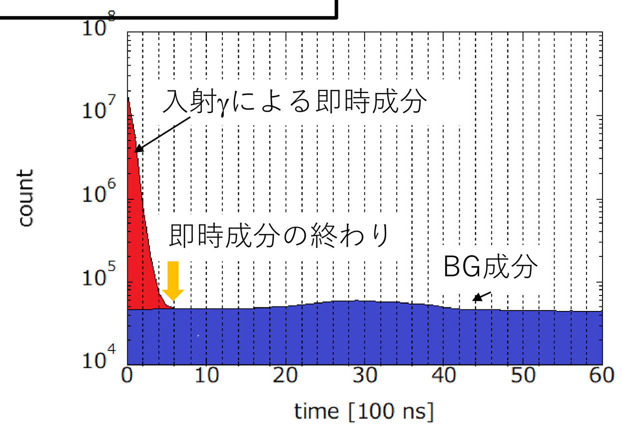


図6 ^{56}Coの時間差スペクトル

図6 はデータ記録の時間差スペクトルである。

計数率でBG成分は変動するが即時成分はすべて600nsで終わるため、足し合わせ時間幅を600nsとした。

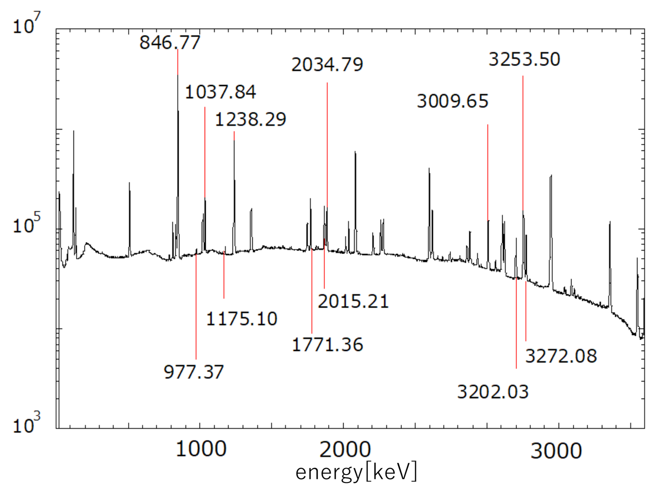
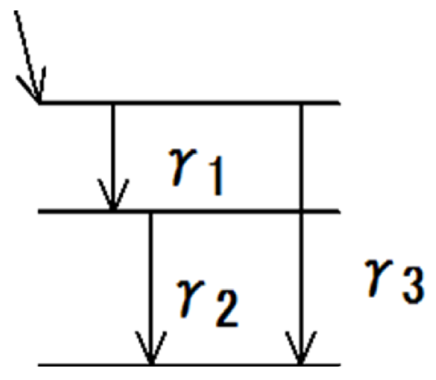


図7 ^{56}Co13.6 kcpsのadd-backスペクトル



$$N_1 = A\varepsilon_{p1} I_{\gamma1}$$
$$N_2 = A\varepsilon_{p2} I_{\gamma2}$$
$$N_{sum} = A\varepsilon_{p1} I_{\gamma1} I_{\gamma2}\varepsilon_{p1}\varepsilon_{t2}$$
$$N_{exp} = N_1 - N_{sum} = A\varepsilon_{p1} I_{\gamma1}(1-\varepsilon_{t2}I_{\gamma2})$$

A;放射能強度　ε_p;検出効率
ε_t;全効率　I_γ;γ線放出率
N_1;γ_1の真のカウント
N_2; γ_2の真のカウント
N_{sum}; γ_1とγ_2サムしたカウント
N_{exp}; サムで損失が生じたγ1のカウント

図8 簡易的なカスケード関係とその補正式

図７は^{56}Coのadd-backスペクトルで、アサインしたエネルギーに着目した。

コインシデンスサムとはカスケード関係（図８に簡易的なものを示す）にあるγ線が2本以上同時に検出器の時間分解能内に入射し検出されることでピークカウントが減少する現象であるが、上の式を用いて補正することができる。

補正結果とモンテカルロ計算コードGEANT４で外挿した検出効率は図9になった。

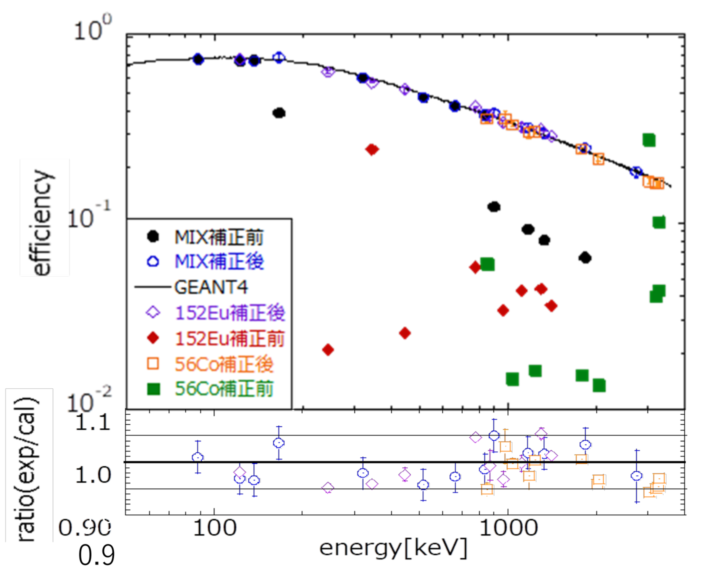


図9 低計数率のadd-backモードの補正結果

補正後の検出効率が不確かさ5％の範囲で外挿した。

低計数率の3.5 MeV までの検出効率を決定した。高計数率では不確かさ６％以下の時補正できたと判断した。

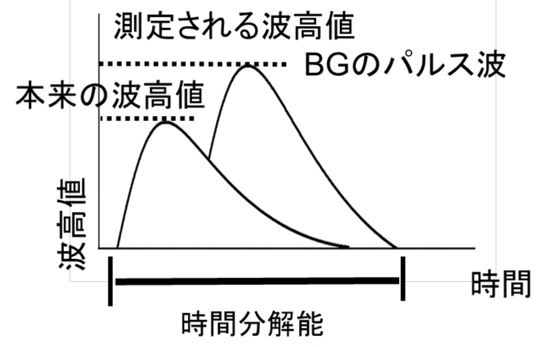


図10 パイルアップの概念図

高計数率で問題となるパイルアップは時間分解能内に1本目のγ線と次に入射するγ線が同時に検出されることで、本来より高いエネルギーにカウントが表れる現象（図10）であり、これはカスケード関係ではなく、全計数に依存する。

結晶が1つのみの場合は検出効率が同割合で減少するが、add-backモードの場合、散乱回数が多い高エネルギー程影響を受ける。

高計数率のadd-backモードで検出効率を補正する時、低計数率の全効率を使用してコインシデンスサム補正を行えない問題がある。

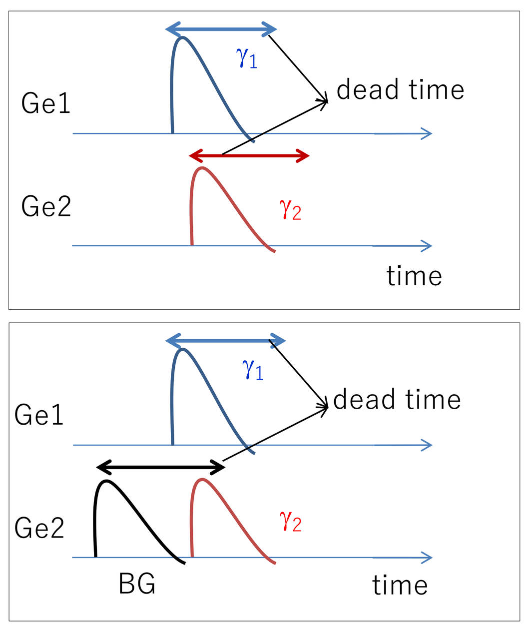


図11 カスケード関係の2本のγ線が別々の結晶で反応する様子（上低計数率、下高計数率）

図11のようにGe1とGe2にカスケード関係のγ線が入射した時、低計数率ではコインシデンスサムが起こり、サムピークとなる。高計数率ではγ2は先行するＢＧのdead timeにより検出されず、γ1のピークカウントは減少しない。

データ収集系の記録後1000nsのdead timeと足し合わせ時間幅が600nsであるため無視できない。

低計数率の全効率の代わりに補正後の値が滑らかになる全効率を「実効的な全効率」と定義し、補正に用いた。

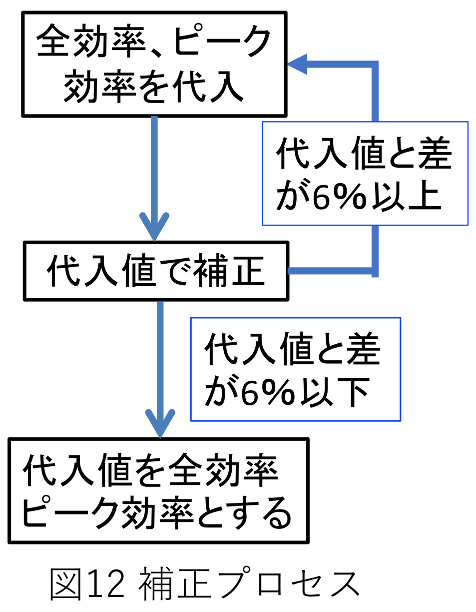
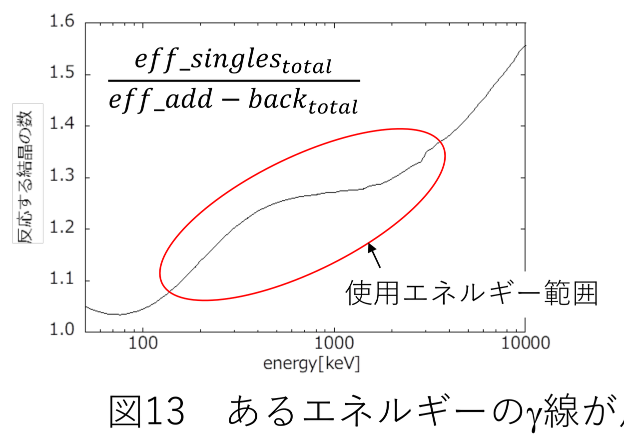


図12 補正プロセス

サムの補正は図12のプロセスで行った。全効率は図13の値を式に代入して得た値で補正を行った。



$$\varepsilon_{th} = \varepsilon_{tl}(1 - A^{\frac{In}{3}+1})$$

ε_{th}:高計数率の全効率
ε_{tl}:低計数率の全効率
A :適当な数値
In:エネルギーが反応する結晶数の平均

図13　あるエネルギーのγ線が反応する結晶数の平均値と全効率の式

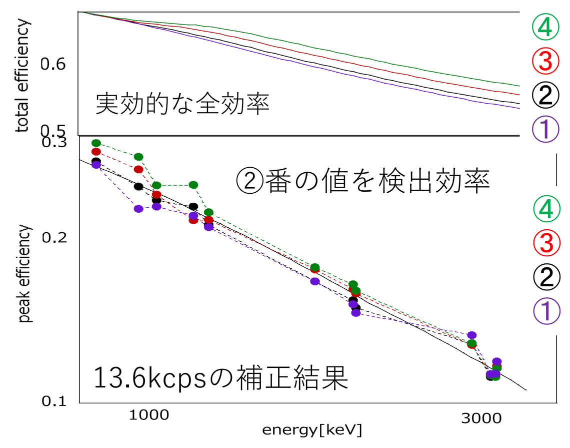


図14 高計数率の補正過程

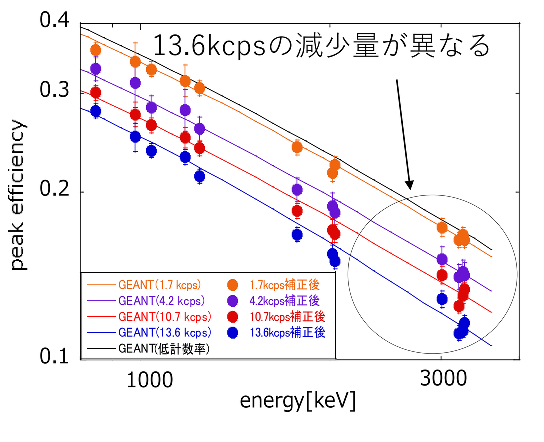


図15 ^{56}Coの各計数率の補正結果

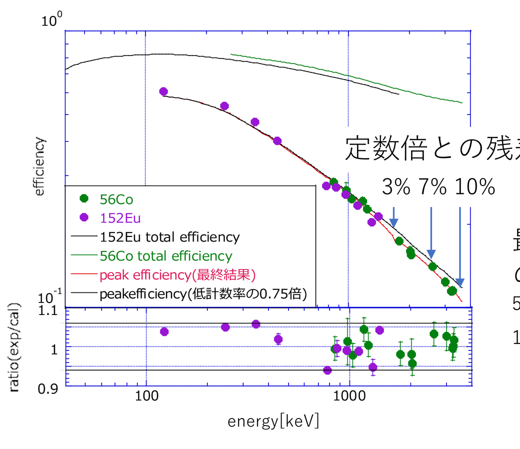


図16 13.6kcpsの最終結果

結論

高計数率の検出効率の減少量が異なることを確認できた（3500keVで残差10％）。残差は^{88}Yの1836keVで3％とサムピークの2734keVで7％であったことから、^{56}Coを使用しなければ、本結果を得ることは困難だったと考えられる。

今後の予定

核種ごとに異なった全効率の依存性について検討する

最終的に実際に中性子捕獲γ線などの測定に用いる