

β 線の最大飛程測定のための Feather 法の改良

Improvement of the Feather Method for
Measurement of β -Ray's Maximum Range

川上弘泰

(1995年1月20日受理)

緒言

前報⁽¹⁾で述べた Feather 法による ^{42}K - β 線の最大エネルギーの推定では, GM 計数器による計数値に混在する γ 線 (1.525MeV) および制動放射 (以下, これらを γ 線と総称する) に起因する計数値の補正は推定で行った。

本報では, 混在する γ 線の計数値を Feather 法に基礎を置いた実験的方法で補正し, その妥当性を検討した。

一般的に Feather 法は β 線のみを放射する核種に適用されるが, この補正法は γ 線が混在する任意の核種についても, β 線の最大エネルギーの決定が可能なことを示唆している。

γ 線の補正

1. ^{42}K 試料の作成

「 ^{42}Ar - ^{42}K ジェネレーター」からの ^{42}K 試料作成法は前報⁽¹⁾で述べたのでここでは省略する。ただし, 今回は ^{42}K 収集電極棒への印加は72時間, ^{42}K の抽出は30分とした。

2. ^{42}K - β 線のアルミニウムに対する吸収曲線の多項式近似

^{42}K - β 線のアルミニウムに対する吸収曲線は, 実験的にはほぼ指数関数形となる。ただし, β 線エネルギーの連続性と物質中での多数回の散乱に起因する後方散乱のために, γ 線の吸収曲線のように理論的には指数関数とはならない⁽²⁾。

したがって, この ^{42}K - β 線吸収曲線の形状を指数関数よりも, さらに良好に fit する多項式で近似させるために, 4~6次多項式につきその適合度を推計学の分散分析法⁽³⁾を用いて検討した。

この結果, 5次式および指数関数の適合度 (R^2) は各々99.92%および98.63%となり, 以下に述べる γ 線に対する補正率の算出には, 適合度の高い5次式を採用することにした。

3. γ 線の補正

表1に GM 計数器で計測した ^{42}K - β 線のアルミニウムに対する吸収線量, 図1に ^{42}K - β 線のアルミニウムに対する吸収曲線 (点線は計測値) を示す。

表1 ^{42}K - β 線のアルミニウムに対する吸収線量

No.	Al 吸収板 No.	Al 吸収板の厚さ (mg/cm ²)	計測時間 t_c (m)	総計数値 N_c (count)	減衰時間 (m)	数落補正計数率 N_r (cpm)	BG 補正計数率 $N_r - BG$ (cpm)	減衰補正計数率 N_d (cpm)	γ 線補正率 F	γ 線補正計数率 N (cpm)	標準偏差計数率 \pm (cpm)
1	1	0	1	44580	0	49966.90	49940.32	49940.3	1.0000	49940.3	223.5
2	10	44.35	1	37446	2	41174.65	41148.07	41225.0	0.9932	40944.7	202.4
3	12	100.6	1	32219	3	34941.51	34914.93	35013.0	0.9925	34750.4	186.5
4	14	163	1	27190	5	29103.70	29077.12	29213.3	0.9871	28836.4	169.9
5	15	221.6	1	23033	6	24391.65	24365.07	24502.1	0.9831	24088.0	155.3
6	17	297	1	18644	7	19524.30	19497.72	19625.7	0.9668	18974.1	137.8
7	19	416.7	1	13099	8	13527.52	13500.94	13602.2	0.9384	12764.4	113.1
8	20	541.4	2	18269	10	9340.84	9314.26	9401.7	0.8757	8233.1	64.3
9	22	768.2	3	13632	12	4594.49	4567.91	4619.4	0.7402	3419.3	33.9
10	23	979	6	11397	*25	1908.27	1881.69	1926.2	0.6967	1342.0	15.1
11	24	1191.8	15	11007	*38	735.10	708.52	734.1	0.6442	472.9	5.8
12	25	1646	20	3139	*57	157.01	130.43	137.6	0.2609	35.9	1.9

GM 計数器の分解時間=145.1 (μs), BG 計数率=26.6 (cpm), *印の減衰時間には計測時間の半分を加算。

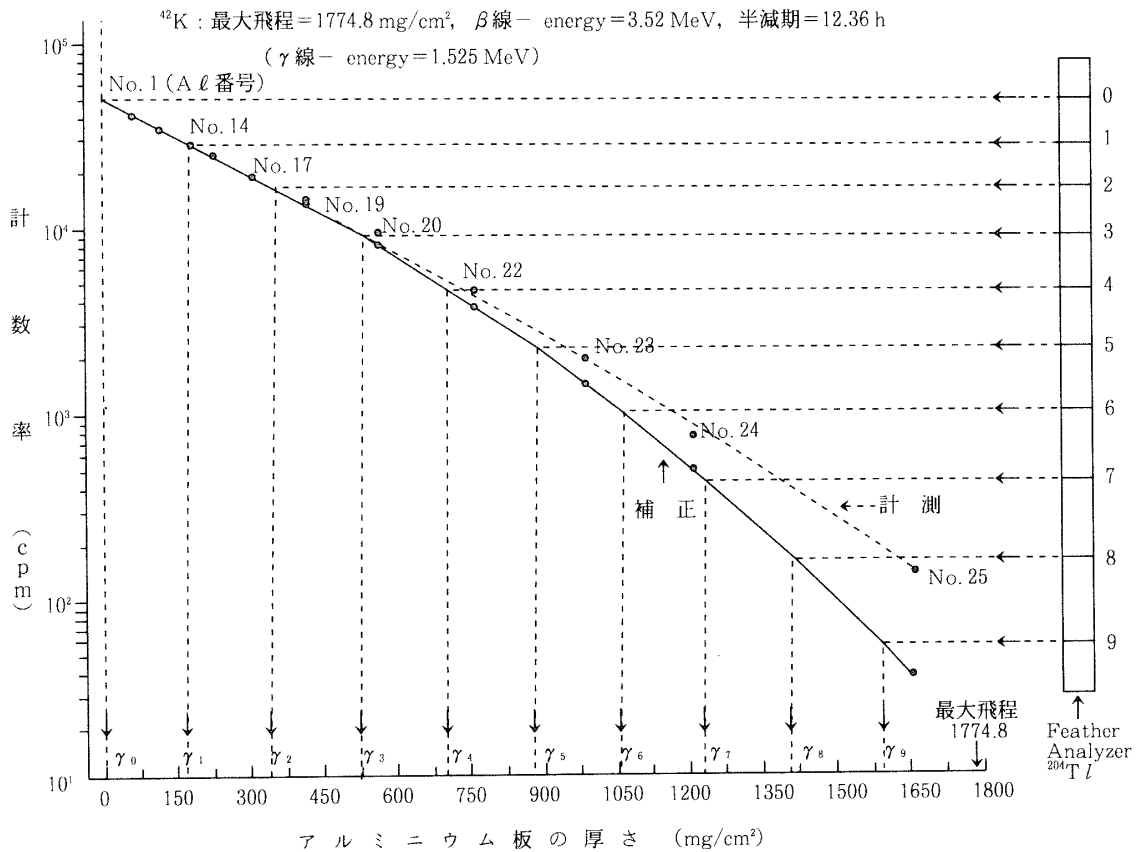


図1 ^{42}K - β 線のアルミニウムに対する吸収曲線

ただし、表1のGM管の分解時間による数落補正 N_r および半減期による減衰補正 N_d の計算法は、前報⁽¹⁾で述べたのでここでは省略する。

表2に図1の ^{42}K - β 線吸収曲線から求めた R_n 値、図2に ^{42}K - β 線のアルミニウムに対する飛程曲線(以下、この $n-R_n$ 曲線を飛程曲線と称する。点線は図1の r_n 値から算出した R_n 値)を示す。

表 2 ⁴²K-β線のアルミニウムに対する飛程曲線の R_n 値

R _n = r _n × (10/n)				
n	計 測		補 正	
	r _n (mg/cm ²)	R _n (mg/cm ²)	r _n (mg/cm ²)	R _n (mg/cm ²)
1	165.6	1656	165.6	1656
2	340.6	1703	340.6	1703
3	521.8	1740	521.8	1740
4	731.3	1828	698.4	1746
5	943.8	1888	875.0	1750
6	1159.4	1932	1053.1	1755
7	1378.1	1969	1223.4	1748
8	1621.9	2027	1407.8	1760
9			1587.5	1764

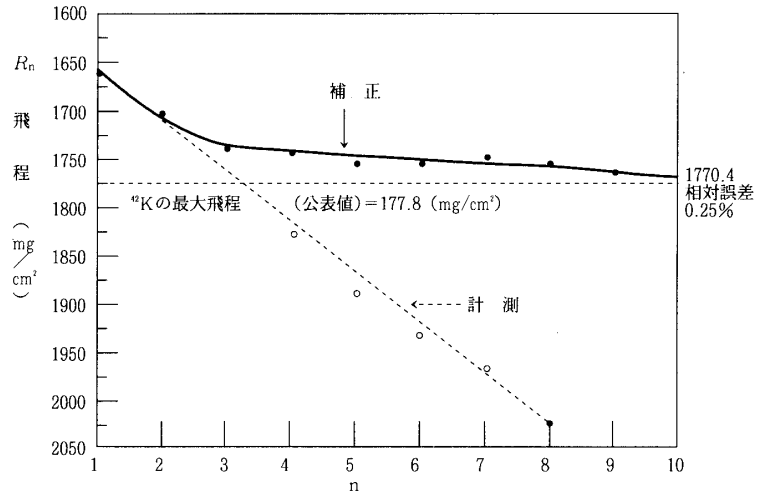


図 2 ⁴²K-β線のアルミニウムに対する飛程曲線

表 1 の右側に示した γ線の補正率 F を求める方法をつぎに述べる。

1) 図 2 のように ⁴²K-β線の飛程曲線は、n 値の 2 と 3 の間に変曲点がみられる。この範囲に対応する図 1 の ⁴²K-β線の吸収曲線のアルミニウム板番号は No. 1 ~ No. 20 である。したがって、図 2 の n 値 1 ~ 3 に対応する R_n 値は、図 1 の r_n 値から求めた R_n 値を使用する。

n 値 3 ~ 10 の間は直線として近似する。すなわち、n 値 3 および n 値 10 を二点間の X 値とし、これに対応する R_n 値を Y 値として直線回帰式を決定する。ただし、n = 10 の R_n 値は ⁴²K の β線の最大エネルギー値 1774.8 (mg/cm²) を使用する。

2) 決定された直線回帰式から n = 4 ~ 10 に対応する R_n 値を算出、これを r_n 値に変換して X 値とする。Feather Analyzer の各レベル (X 値) に対応するカウント (cpm) を、2. で決定した 5 次式から算出し、これを Y 値とする。

つぎに、この X 値 (mg/cm²) と Y 値 (cpm) に fit する 5 次式を算出し、これをつぎに示す。

$$Y = -5.6298 \times 10^{-12} \cdot X^5 + 3.6500 \times 10^{-8} \cdot X^4 - 1.0275 \times 10^{-4} \cdot X^3 + 1.5796 \times 10^{-1} \cdot X^2 - 1.3133 \times 10^2 \cdot X + 46466$$

5 次式の代わりに指数関数で近似した場合は、アルミニウム板の薄い範囲内の γ線補正率が 1 以上となるために、指数関数では近似できない。

3) 以上の fit させた 5 次式を利用して、計測に使用したアルミニウム板の各厚さに対する吸収線量 (cpm) を算出する。最後に、この算出吸収線量と計測吸収線量との比を求め、これを γ線に対する補正率 F とする。

検 討

1. ⁴²K-β線のアルミニウムに対する飛程曲線の形状

図 2 の ⁴²K-β線のアルミニウムに対する飛程曲線の計測値のプロットは、混在する γ線

の影響を受けほぼ直線（点線）となる。したがって、GM 計数値に混在する γ 線を補正しなければ、Feather 法は適用できない。

本報の γ 線に対する補正率算出法の基礎となる飛程曲線の形状を知るために、 $^{204}\text{Tl}-\beta$ 線のアルミニウムに対する飛程曲線⁽¹⁾ の形状を指数関数で近似し、その適合度を分散分析法で検討したが、信頼係数は約70%と低く指数関数による近似は不適當であった。

つぎに、 $n=1$ と $n=10$ の二点間を直線で近似し、「3.~1)」の R_n 算出法を試みたが、アルミニウム板の薄い範囲内の γ 線補正率が1以上となり、これも採用できなかった。

以上の理由から飛程曲線の形状に対する曲線近似には、本報の方法を実施した。

ただし、 $n=10$ のアルミニウム板の厚さは本報では、 ^{42}K の最大飛程1774.8(mg/cm²) を採用したが、実際の場合には計測 β 核種の最大飛程を越えた、 γ 線および制動放射領域⁽²⁾ のアルミニウム板の厚さを使用する。

2. $^{42}\text{K}-\beta$ 線のアルミニウムに対する吸収線量の精度

^{42}K の計数値に各種の補正を加えた吸収線量（表1: N_d ）の精度を、 ^{42}K および ^{60}Co のアルミニウムに対する全減衰係数（ γ 線および β 線）の特性を利用して検討する。

1) ^{42}K および ^{60}Co の γ 線のアルミニウムに対する全減衰係数

γ 線の吸収曲線は理論的には指数関数形となるので、 γ 線吸収曲線を指数関数で fit し、アルミニウムに対する全減衰係数を算出する。

γ 線の吸収線量の計測には、 γ 線スペクトロメーターを用い、図3に $^{42}\text{K}-\gamma$ 線スペクトル、表3に ^{42}K （作成試料）- γ 線の吸収線量、図4に $^{60}\text{Co}-\gamma$ 線スペクトル、表4に ^{60}Co （RI 協会製）- γ 線の吸収線量を示す。

各 γ 線ピークの計数値からの BG 除去法は、ピークの両端（図3の a と b など）の計数

表3 $^{42}\text{K}-\gamma$ 線のアルミニウムに対する吸収線量

No.	Al 吸収板 No.	Al 吸収板の厚さ (mg/cm ²)	減衰時間 (m)	総計数値 (3min.) (count)	95~115ch 計数値 (count)	減衰補正計数値 (count)	補正計数率 (cpm)
1	1	0	0	163620	9207.0	9207.0	3069.0
2	10	44.35	3	157646	8923.0	8950.6	2983.5
3	12	100.6	7	149846	8339.5	8393.3	2797.8
4	14	163	10	144948	8225.0	8304.0	2768.0
5	15	221.6	14	140413	8550.0	8660.3	2886.8
6	17	297	17	135143	8340.5	8475.0	2825.0
7	19	416.7	20	130597	8361.0	8522.5	2840.8
8	20	541.4	24	127409	8299.0	8485.8	2828.6
9	22	768.2	27	124401	8077.5	8285.2	2761.7
10	23	979	30	123021	7954.5	8184.3	2728.1
11	24	1191.8	34	122008	8034.0	8292.0	2764.0
12	25	1646	37	120755	7941.0	8221.4	2740.5
13	25+10	1690.35	41	119933	7965.5	8273.1	2757.7
14	25+12	1746.6	44	119649	7495.0	7808.9	2603.0
15	25+14	1809	47	119281	7293.0	7622.4	2553.0

表4 ^{60}Co - γ 線のアルミニウムに対する吸収線量

No.	Al 吸収板 No.	Al 吸収板の厚さ (mg/cm ²)	総計数值 (3min.) (count)	BGを除いた計数率 (cpm)		
				73~90ch	90~104ch	73~104ch
1	1	0	199165	5504.3	4454.2	9958.5
2	10	44.35	198651	5644.0	4405.0	10049.0
3	12	100.6	199473	5561.0	4341.5	9902.5
4	14	163	199571	5677.7	4349.5	10027.2
5	15	221.6	199468	5564.7	4368.5	9933.2
6	17	297	198532	5469.3	4276.3	9745.6
7	19	416.7	199672	5267.3	4361.0	9628.3
8	20	541.4	197717	5371.3	4278.3	9649.6
9	22	768.2	197985	5533.0	4294.2	9827.2
10	23	979	198716	5252.7	4110.0	9362.7
11	24	1191.8	199323	5498.3	4146.5	9644.8
12	25	1646	196407	4873.0	3991.8	8864.8
13	25+10	1690.35	198441	5249.0	4082.2	9331.2
14	25+12	1746.6	198167	4854.3	3995.7	8850.0
15	25+14	1809	197318	5121.7	4065.0	9186.7

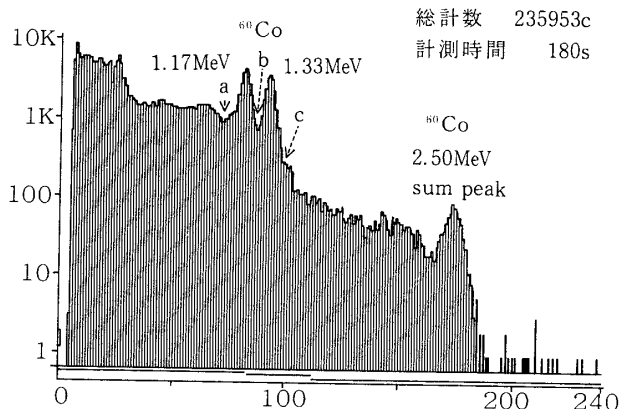


図3 ^{42}K - γ 線スペクトル

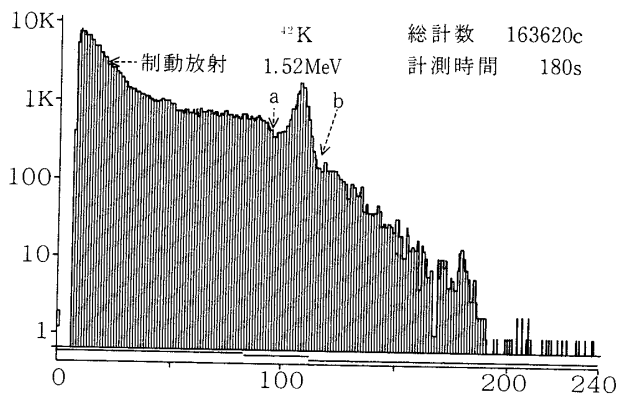


図4 ^{60}Co - γ 線スペクトル

値を平均し、 γ 線ピークの各チャンネル当たりの計数值から差引く。 ^{60}Co の計数值は1.173MeV および1.333MeV の両 γ 線ピークの計数值の合計である（表4の「73~104ch」の計数率）。

図3および図4の γ 線スペクトルは、参考にした γ 線スペクトル⁽⁴⁾と比較してBG領域が広く計測されている。これは使用した γ 線スペクトロメーターのチャンネル幅が240と小さいためである。

2) ^{60}Co のアルミニウムに対するGM計測値による吸収線量

^{60}Co のアルミニウムに対するGM計測値による吸収線量を表5に示す。 β 線の吸収線量は実験的に、ほぼ指数関数形となるので、 ^{42}K (γ 線は未補正) および ^{60}Co の吸収曲線の形状を指数関数で近似し、 β 線および γ 線を含む見掛上の全減衰係数（以下、これを β 線全減衰係数と仮称する）を算出し、 γ 線の全減衰係数と共に表6に示す。

表6について、 ^{42}K および ^{60}Co の γ 線全

表5 ^{60}Co のアルミニウムに対する GM 計数値による吸収線量

No.	Al 吸収板 No.	Al 吸収板の厚さ (mg/cm ²)	GM 計数値		計数率 (cpm)
			(count)	(cpm)	
1	1	0	20364	509.1	480.0
2	10	44.35	17358	434.0	404.9
3	12	100.6	15385	384.6	355.5
4	14	163	14095	352.4	323.3
5	15	221.6	13099	327.5	298.4
6	17	297	12836	320.9	291.8
7	19	416.7	12582	314.6	285.5
8	20	541.4	12502	312.6	283.5
9	22	768.2	11648	291.2	262.1
10	23	979	11616	290.4	261.3
11	24	1191.8	11650	291.3	262.2
12	25	1646	11468	286.7	257.6
13	25+10	1690.35	10939	273.5	244.4
14	25+12	1746.6	10922	273.1	244.0
15	25+14	1809	11040	276.0	246.9

^{60}Co 計測時間=40(m), BG 計数率=29.1 (cpm)
GM 計数器の分解時間=145.1 (μs)

を受け, ^{60}Co は BG 補正の誤差のために, いずれも低下している。

β 線の全減衰係数は, ^{42}K の方が ^{60}Co よりも小さい。これは ^{60}Co の β 線エネルギー (0.318 MeV) よりも ^{42}K の β 線エネルギー (3.52 MeV) の方が大きいためである。

^{42}K では β 線の方が γ 線よりもエネルギーの放出割合が大きく, ^{60}Co ではこれとは逆となり, また GM 計数器に対する γ 線の計数効率なども関係する。

吸収曲線の形状を指数関数形で fit させる方法は, 適合度 (R^2) よりみて ^{42}K の方が ^{60}Co よりも好結果が得られた。

以上の検討により, ^{42}K (γ 線は未補正) および ^{60}Co の計数値を用いてアルミニウムに対する全減衰係数を算出したが, これが理論的に矛盾しないことから, ^{42}K の GM 計数器による補正計数値の精度が保証される。

3. ^{42}K および ^{204}Tl の β 線のアルミニウムに対する吸収係数の比較

表1の γ 線補正率 F を用いて補正した ^{42}K - β 線の吸収曲線および ^{204}Tl - β 線の吸収曲線の両者から, β 線のアルミニウムに対する吸収係数を求め比較する。

表7に ^{204}Tl - β 線の吸収線量, 表8に両核種の β 線の吸収係数を示す。

表8に示すように, ^{204}Tl の β 線の吸収係数は ^{42}K よりも大きい。これは, ^{204}Tl の β 線エネルギー (0.763 MeV) が ^{42}K の β 線エネルギー (3.52 MeV) よりも小さく, アルミニウムによって ^{42}K よりも吸収され易いからである。

また, β 線のアルミニウムに対する吸収係数を算出するための経験式⁽⁵⁾ は, μ を吸収係数 (cm²/mg), E を β 線の最大エネルギー (MeV) とすれば次式で示される。

表6 ^{42}K および ^{60}Co のアルミニウムに対する全減衰係数

γ 線全減衰係数 (cm ² /mg)		β 線全減衰係数 (cm ² /mg)	
^{42}K	^{60}Co	^{42}K	^{60}Co
5.352×10^{-5}	5.548×10^{-5}	3.529×10^{-3}	2.309×10^{-2}
$R^2=63.6$	$R^2=81.4$	$R^2=99.5$	$R^2=63.4$

R^2 は分散分析の適合度 (%)

減衰係数を比較すると, ^{60}Co の方が, ^{42}K よりも大きい。これは ^{60}Co から放射される γ 線エネルギー (1.173 MeV, 1.333 MeV) の方が, ^{42}K から放射される γ 線エネルギー (1.525 MeV) よりも相対的に小さいため, アルミニウムに対する吸収が大きくなることに起因する。

この結果から, ^{60}Co の 2.50 MeV sum peak (エネルギー強度比約 10%) は, 全減衰係数に対してほとんど関与していないこともわかる。

文献値⁽⁵⁾ は 1.0 MeV で 6.132×10^{-5} (cm²/mg), 1.5 MeV では 4.995×10^{-5} (cm²/mg) と記載され, 計測されたアルミニウムに対する全減衰係数とほぼ一致する。

分散分析法の適合度 (R^2) は, ^{42}K は制動放射の影響

表7 ²⁰⁴Tl-β線のアルミニウムに対する吸収線量

No.	Al 吸収板 No.	Al 吸収板の厚さ (mg/cm ²)	総計数値 N _c (count)	計測時間 t _c (m)	数落補正計数率 N _r (cpm)	BG 補正計数率 N _{r-BG} (cpm)	標準偏差計数率 ± (cpm)
1	1	0	53753	1	65903.9	65878.3	256.7
2	5	6.955	46987	1	56014.6	55989.1	236.7
3	7	14.25	41687	1	48642.2	48616.6	220.6
4	9	28.75	32446	1	36509.1	36483.6	191.1
5	10	44.35	24592	1	26857.4	26831.9	163.9
6	11	66.4	16365	1	17338.2	17312.7	131.7
7	12	100.6	15754	2	8095.7	8070.2	63.6
8	13	134.95	13512	4	3417.6	3392.1	29.3
9	14	163	13736	9	1534.3	1508.7	13.1
10	15	221.6	10882	60	217.8	192.3	2.5
11	16	277.5	4540	90	50.5	24.9	1.5
12	17	297	3977	90	44.2	18.7	1.5

GM 計数器の分解時間=205.8 (μs), BG 計数率=25.5 (cpm)

する補正法は実用可能であると判断される。

結 語

新たに作成した ⁴²K 試料について、本報を試み良好な結果が得られた。この場合の飛程曲線の n=10 に対応するアルミニウム板の厚さは、計数値がほぼ一定となる γ 線および制動放射領域の厚さを使用した。

β 線に γ 線が混在する核種について、β 線の最大エネルギーを決定するには、Feather 法を拡張したこの γ 線に対する補正法が有効である。

参 考 文 献

- (1) 川口俊郎, 川上弘泰: 九州産業大学教養部紀要, 28巻3号, 203-218, 1992.
- (2) 浜田達二, 大塚 巖: 放射線計測実習, ラジオアイソトープ講義と実習 (3版), 日本アイソトープ協会編, 28, 278, 374, 丸善, 1975.
- (3) N. R. Draper, H. Smith, 中村慶一訳: 応用回帰分析, 14-35, 森北出版, 1973.
- (4) C. E. Crouthamel, 岡田 実, 亀本雄一郎訳: 応用ガンマ線スペクトロメトリー, 173, 181, 産業図書, 1967.
- (5) RI 手帳: 6, 103, 日本アイソトープ協会, 1990.

表8 ⁴²K および ²⁰⁴Tl のアルミニウムに対する β 線の吸収係数

核種	β線吸収係数 (cm ² /mg)	適合度 R ² (%)
⁴² K	4.181 × 10 ⁻³	98.7
²⁰⁴ Tl	2.785 × 10 ⁻²	98.8

$$\mu = 0.017E^{-1.43}$$

上式から算出された、²⁰⁴Tl の吸収係数は 2.503 × 10⁻² (cm²/mg), ⁴²K の吸収係数は 2.811 × 10⁻³ (cm²/mg) となり、表 8 に示した β 線の吸収係数と比較しても大差は認められない。

以上のように両核種について、β 線のアルミニウムに対する吸収係数を比較し、理論的にも肯定できる結果が得られた。したがって、本報で試みた γ 線に対