

低バックグラウンド Ge 検出器の遮蔽性能の改善

静間 清*・横畑憲二**・稲田晋宣***

Background Reduction of Low Level Gamma-Ray Spectrometer

Kiyoshi SHIZUMA, Kenji YOKOHATA and Kuninobu INADA

A new low-background shielding was installed for a Ge detector. Background gamma-ray spectrum was measured and compared with that of old shielding to investigate how improved the background counting rate. Additional improvements for the new shielding was installed to reduce background counting rate. It has been shown that shielding of the neck part of Ge detector cryostat and concrete floor are effective to reduce background contribution. The reduction factor of ^{40}K 1461 keV gamma-ray was much improved from 51 of old shield to 4290 of new shield.

Key words : Ge spectrometer, Shielding, Low-level radioactivity, Reduction factor, Background gamma ray

1. はじめに

人の生活環境には土壌中や建物のコンクリートなどに含まれる天然放射性同位元素のウラン系列、トリウム系列核種、 ^{40}K の他に宇宙線が地球大気上層で生成する 2 次宇宙線 (電子、中性子、 μ 中間子など)、宇宙線と大気中の酸素、窒素原子との核反応生成核 ^7Be などや核実験フォールアウトのような人工的に作られた ^{137}Cs などの人工放射性同位元素が存在している。放射性核種の分析にはアルファ線、ベータ線、ガンマ線を検出する様々の方法がある。Ge 半導体検出器を使用してサンプルのガンマ線を測定して含まれる放射性核種の分析を行う方法はガンマ線スペクトロメトリと呼ばれる。ガンマ線スペクトロメトリにおいて環境試料の測定を行う場合、試料に含まれる放射能は微弱である場合が多いので周囲から検出器に入るバックグラウンド放射線を低減しなければならない。

広島大学自然科学研究支援開発センターの放射性同位元素利用分野 (旧アイソトープ総合センター) では東広島キャンパスの環境試料のモニタリングを定期的に行っている。このために低バックグラウンド Ge 検

出器が備えられている。筆者らは 1992 年この測定器の遮蔽体を製作し、そのバックグラウンド特性について報告¹⁾した。その後、2001 年度に新しく遮蔽体が装備されたので、旧遮蔽体と新しい遮蔽体とのバックグラウンド計数特性を比較した。さらに新遮蔽体に改良を加えて、低バックグラウンド化を図った結果について報告する。

2. 測定装置

2. 1 Ge 検出器と測定系

Ge 半導体検出器の仕様を Table1 に示す。この Ge 検出器は低バックグラウンド仕様であるので、検出器の構成材には低放射能材料が使用されている。測定系は Ge 検出器、主増幅器 (EG&G ORTEC 572)、波高分析器 (EG&G ORTEC MCA7600) から構成される。スペクトル解析は GAMMA studio (セイコー EG&G) を使用した。

2. 2 旧遮蔽体

旧遮蔽体¹⁾の構造を Fig. 2 に示す。この遮蔽体は鉛

* 広島大学大学院工学研究科機械システム工学専攻

** 広島大学工学部 (現、新キャタピラー三菱 (株))

*** 広島大学自然科学研究支援開発センター 放射性同位元素研究支援分野

Table 1 Specifications of Ge detector

Manufacturer	EG&G ORTEC
Detector type	GEM-50195-P
Crystal size	
Diameter x length	64.7 mm x 89.3 mm
Volume	294 cm ³
Relative efficiency	58 %
Resolution	
at 1332 keV ⁶⁰ Co	1.81 keV
at 122 keV ⁵⁷ Co	0.91 keV
Peak/Compton ratio	80
Lineshape	
FWTM/FWHM ratio	1.84
FWFM/FWHM ratio	2.45

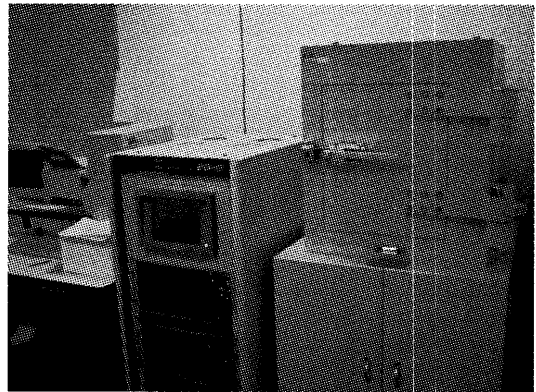


Fig. 2 New low background shielding and MCA system

15cm で構成され、測定室は無酸素銅 5mm の内張りされていた。測定試料の交換は鉛の可動扉を移動させて行った。床のコンクリートからのバックグラウンドガンマ線（主として ⁴⁰K）を低減するために 10cm 厚の鉛が敷かれていた。



Fig. 3 Inside of the shielding

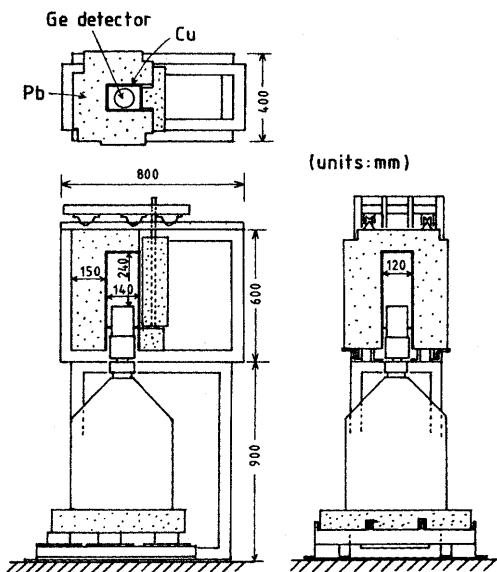


Fig. 1 Cross-sectional view of old shielding system ¹⁾

2. 3 新遮蔽体

新しい遮蔽体（セイコーEG&G 製 LBR-2-2）の写真を Fig. 2 に示す。この遮蔽体は鉛厚 12.5 cm、鉄 5 cm、内張りとして無酸素銅 0.5 cm、アクリル 0.5 cm から構成され、内容積は幅 25 cm × 奥行き 25 cm × 高さ 35 cm

であり、総重量は 1.1 t である（本装置のために床が補強された）。遮蔽体の扉をあけたときの内部の写真を Fig. 3 に示す。この遮蔽体の鉄材はかつての戦艦陸奥の引き上げ材（昭和 47 年頃引き上げ）が使用されている。戦艦「陸奥」は昭和 10 年に完成して当時、長門とともに世界最強戦艦と言われていたが、その後、なぞの爆発により、瀬戸内海の柱島沖（水深約 40 m）に沈んだ。

Ge 検出器の遮蔽材料としては密度が高く、原子番号の大きい材料が適している。このために鉛が使われるが、最近精錬された新しい鉛には ²¹⁰Pb（半減期 22 年）の影響²⁾ があり、特にベータ線がバックグラウンドを高くする。従って、²¹⁰Pb が十分減衰した（約 100 年以上前の）古い鉛が適しているが、古い鉛は入手が困難であるし、高価である。そこで、遮蔽体の外部は通常入手できる鉛で構成し、内部に鉄や銅を用いる多層構造がとられる。戦後、製鉄所の溶鉱炉には耐火レンガの焼食（減厚）を監視するために少量の ⁶⁰Co が埋め込まれた。定期的に外部から ⁶⁰Co のガンマ線を測定すれ

ば耐火煉瓦の監視が可能になる。しかしながら、少量の ^{60}Co が鉄材に溶け出すために戦後の鉄は遮蔽材としては適していない。鉄材中の ^{60}Co の含有量については $1 \times 10^{-8}\text{Ci/ton}$ 程度が報告^{3, 4)}されている。

このため、戦前の鉄材である陸奥の引上げ材は遮蔽材として多用されてきた。しかしながら、鉄や銅を内部に使用すると200~300keVのエネルギー領域で散乱線によるバックグラウンドが高くなること⁵⁾も知られている。

3. 遮蔽体の改善

新遮蔽体の特性をさらに改善するために以下の改良を行った。

Case 1: 新遮蔽体の購入時のままの場合

Case 2: 床からの影響を低減するために、5cm厚の鉛を検出器の下に敷いた。

Case 3: 遮蔽体の内部の測定室空間の空気を排除するために内部に発泡スチロールを詰めた。これは空気中に含まれるラドン子孫核種 (^{214}Pb , ^{214}Bi など) の影響を低減するためである。

Case 4: Ge 検出器のクライオスタットを5cm上昇させてネック部分を鉛で遮蔽した。

Case 5: Case 3と同じ目的で空気を排除するために液体窒素の蒸発ガスを測定室内に引き込んだ。

Case 2~5の改善点をFig. 4に示す。これらの改善を順次行い、遮蔽性能が改善されるかどうかについて検討した。

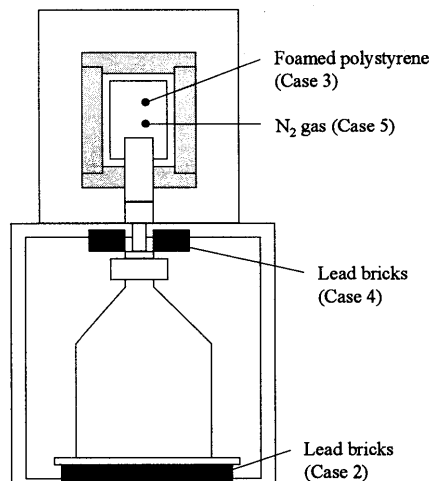


Fig.4 Additional improvement of new shielding

4. バックグラウンドの測定

4. 1 遮蔽体外部でのバックグラウンドスペクトル

Ge 検出器を遮蔽の外において測定時間 10^5 s で測定したガンマ線スペクトルをFig.5に示す。バックグラウンドガンマ線スペクトルはピーク部分とピーク以外の連続部分から成る。ピーク部分は土壌、コンクリートに含まれるウラン系列核種 ^{226}Ra , ^{214}Pb , ^{214}Bi 、トリウム系列核種 ^{228}Ac , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{208}Tl および壊変系列をつくらない ^{40}K 、宇宙線起源の陽電子消滅ガンマ線 (511keV) などである。Fig.5に示されるように ^{40}K 1461keV と ^{208}Tl 2614keV ガンマ線が主要なピークである。連続部分は ^{40}K と ^{208}Tl のコンプトンプラトーと2次宇宙線のバックグラウンドからなる。

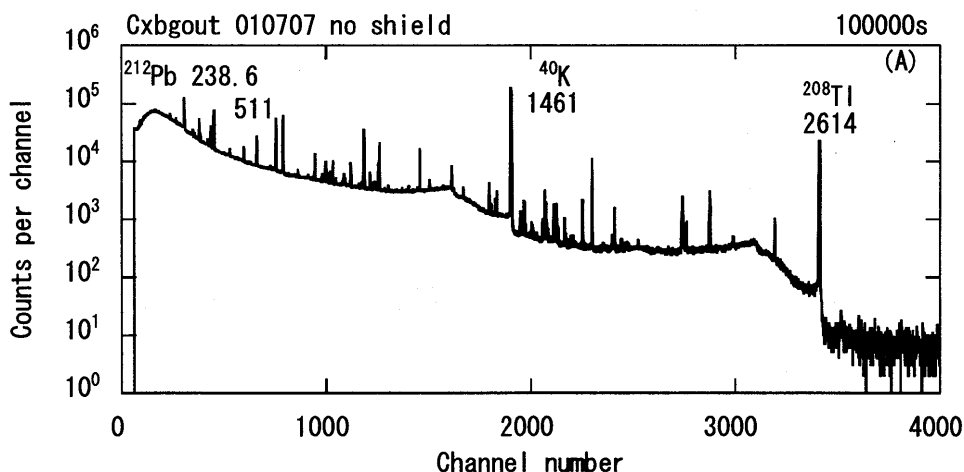


Fig.5 Background gamma-ray spectrum measured with a Ge detector without shielding

4. 2 遮蔽体内部でのバックグラウンド

Ge 検出器を遮蔽体に入れて、遮蔽体の改善を行いバックグラウンド測定したスペクトルを Fig.6 に示す。Fig.6 (A) は新遮蔽体に追加遮蔽を行う前の Case1 の測定結果であり、Fig.6 (B) は追加遮蔽を行った Case5 の結果である。

遮蔽性能の改善を表す指標として、各ピークおよび連続部分の計数率がどのように減少したかを表す減衰ファクター R_f を次のように定義した。

$$R_f = \frac{\text{その遮蔽体を使用する前の計数率}}{\text{遮蔽体を使用した場合の計数率}}$$

従って、その遮蔽体を用いることにより、計数率は $1/R_f$ に減少することになるので、 R_f が大きいほど遮蔽性能が高いといえる。遮蔽条件を変えた場合の連続部分の計数率の変化と減衰ファクターを Table2 に示し、

ピーク計数率の測定結果を Table3 に示す。また、バックグラウンド連続部分の計数率の変化を Fig.7 に示し、ピーク部分については系列を作らない ^{40}K 、陽電子消滅について Fig.8 に、ウラン系列およびトリウム系列核種について Fig.9 に示す。

5. 考 察

5. 1 旧遮蔽と新遮蔽の比較

Ge 検出器を遮蔽体の外部において 1992 年と 2001 年に測定されたバックグラウンドガンマ線スペクトルを比較すると Table2 および 3 の比 X/A に示されたように連続部分、ピーク部分ともに計数率が約 60% 程度に減少していることが示された。Ge 検出器の置かれている分析室 I に変更は加えられていない。Ge(Li) 検出器で Th 系列の学区グラウンドガンマ線計数率が経年変化することが報告⁶⁾ がされている。U 系列、Th 系列ともそれぞれの親核種、 ^{238}U (半減期 $4.4 \times 10^9 \text{y}$) および ^{232}Th

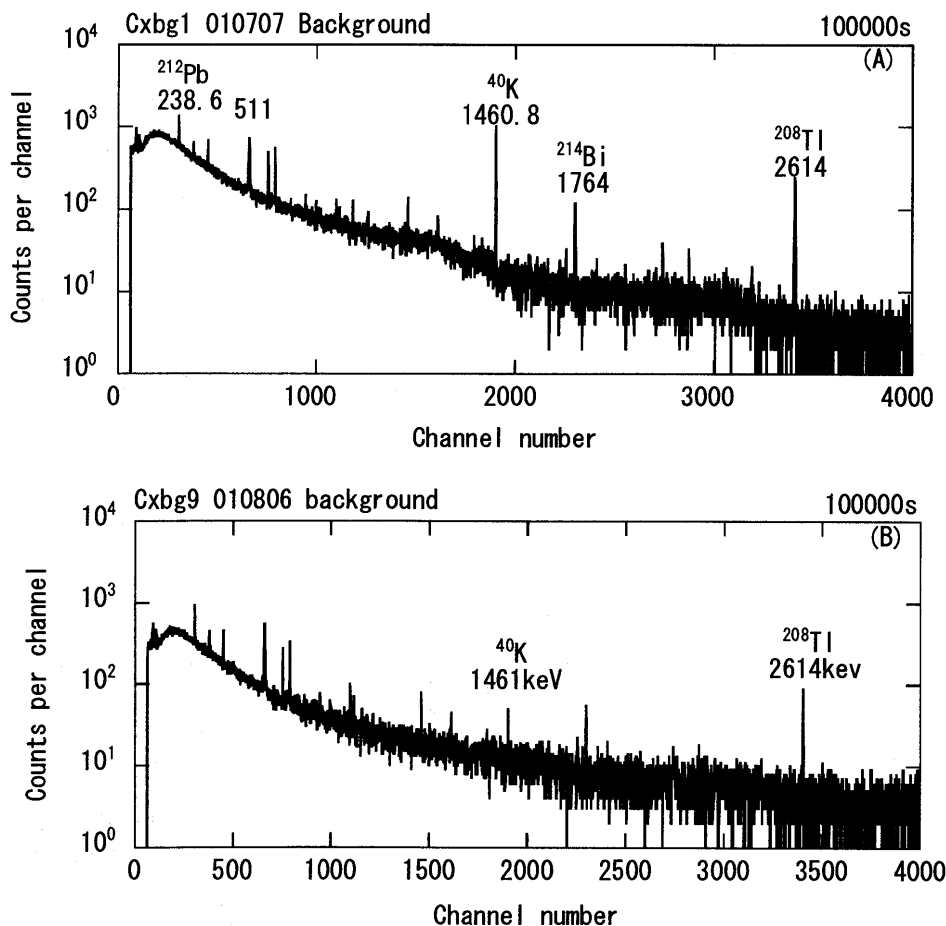


Fig.6 Background gamma-ray spectra measured with a Ge detector within the shielding . A: case 1 , B: case 5 .

Table2 Counting rate of background continuum for different shielding

Energy (keV)	Counting rate (cpm/keV)										Reduction Factor R_f					
	No shielding			In the shielding												
	1992y	2001y	Ratio	Old	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5							
X	A	X/A	Y	B	C	D	E	F	A/B	A/C	A/D	A/E	A/F	Y/E		
55	52.9	31	1.71	1.1	0.462	0.294	0.321	0.275	0.258	67	105	97	113	120	4	
100	112.5	55.6	2.02	1.51	0.504	0.355	0.353	0.287	0.292	110	157	158	194	190	5	
200	68.2	42.9	1.59	1.72	0.635	0.403	0.443	0.371	0.355	68	106	97	116	121	5	
300	29.3	19.2	1.53	0.97	0.353	0.226	0.231	0.203	0.198	54	85	83	95	97	5	
500	12.0	7.7	1.56	0.41	0.155	0.093	0.096	0.080	0.082	50	83	80	96	94	5	
700	7.4	4.6	1.61	0.25	0.086	0.055	0.058	0.046	0.045	53	84	79	100	102	5	
1000	4.6	2.7	1.70	0.15	0.043	0.024	0.027	0.018	0.019	63	113	100	150	142	8	
1500	0.71	0.48	1.48	0.032	0.013	0.0096	0.011	0.010	0.0091	37	50	44	48	53	3	
2000	0.36	0.24	1.50	0.015	0.0073	0.0071	0.0064	0.0043	0.0058	33	34	38	56	41	3	
2500	0.13	0.1	1.30	0.0063	0.0051	0.0035	0.0043	0.0043	0.0041	20	29	23	23	24	1.5	
3000	0.011	0.0058	1.90	0.0027	0.0021	0.0025	0.0026	0.0027	0.0029	2.8	2.3	2.2	2.1	2.0	1.0	
55keV - 3MeV		15730			230	145	155	128	127	68	108	101	122	123		

Table 3 Background peak counting rate for different shielding

Nuclide	Energy (keV)	No shielding			In the shielding						Reduction Factor R_f						
		Counting rate(cpm)			Counting rate(cpm)												
		1992y	2001y	X/A	1992y	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	X/Y	Y/B	A/B	A/C	A/D	A/E	A/F
		X	A		Y	B	C	D	E	F							
[U-series]																	
²¹⁴ Pb	351.9	102	54.7	1.86	0.57	0.43	0.30	0.526	0.47	0.360	179	1.3	127	182	104	116	152
²¹⁴ Bi	609.3	108	65.2	1.66	0.92	0.51	0.36	0.391	0.41	0.380	117	1.8	128	181	167	159	172
	1764.5	20.2	17.5	1.15	0.50	0.17	0.07	0.146	0.092	0.082	40.4	2.9	103	240	120	190	213
[Th-series]																	
²¹² Pb	238.6	131	84.4	1.55	0.77	0.97	0.36	0.100	0.64	0.780	170	0.79	87	234	844	132	108
²⁰⁸ Tl	583.2	89	54.1	1.65	0.77	0.47	0.10	0.130	0.28	0.260	116	1.6	115	541	417	193	208
	2614.5	75	65.2	1.15	1.77	0.49	0.10	0.056	0.17	0.140	42.4	3.6	133	652	1154	384	466
[Other lines]																	
Annih.	511	47	32.1	1.46	2.7	1.36	1.2	0.430	1.22	1.190	17.4	2.0	24	27.7	74.7	26.3	27.0
⁴⁰ K	1460.8	582	296	1.97	11.3	0.29	0.29	0.026	0.082	0.069	51.5	39.0	1021	1021	11534	3610	4290

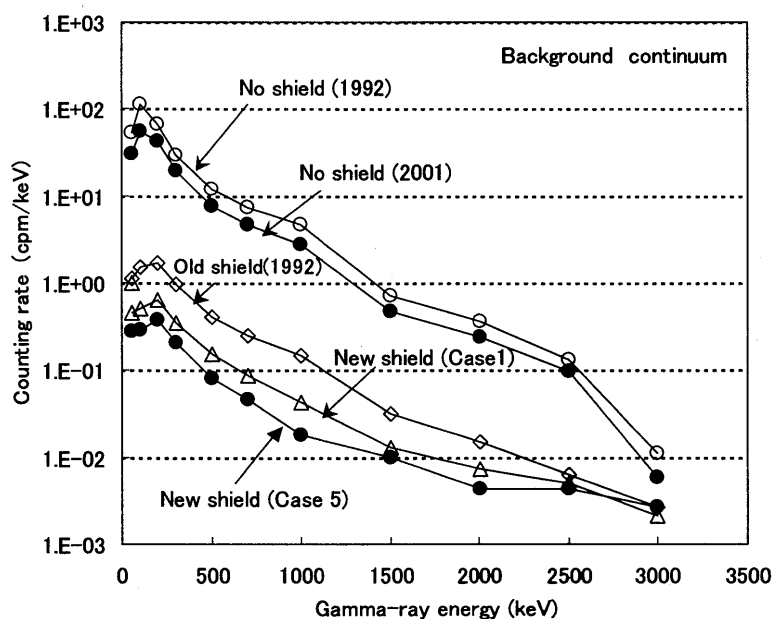


Fig.7 Background continuum counting rate for different shielding conditions.

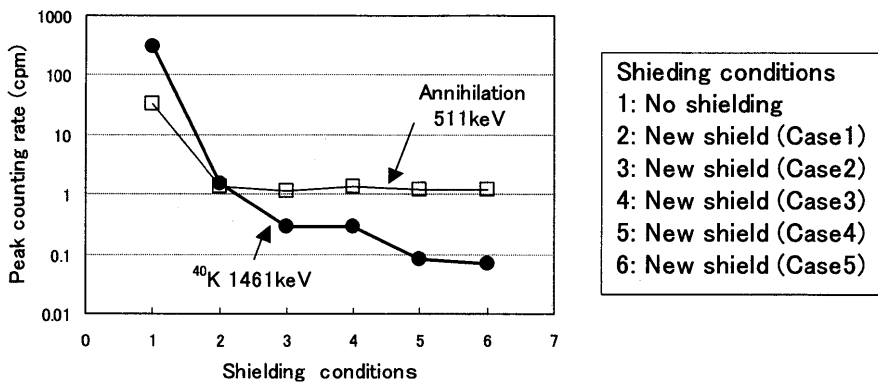


Fig. 8 Background peak counting rate of ⁴⁰K 1461 keV and annihilation gamma-ray peaks.

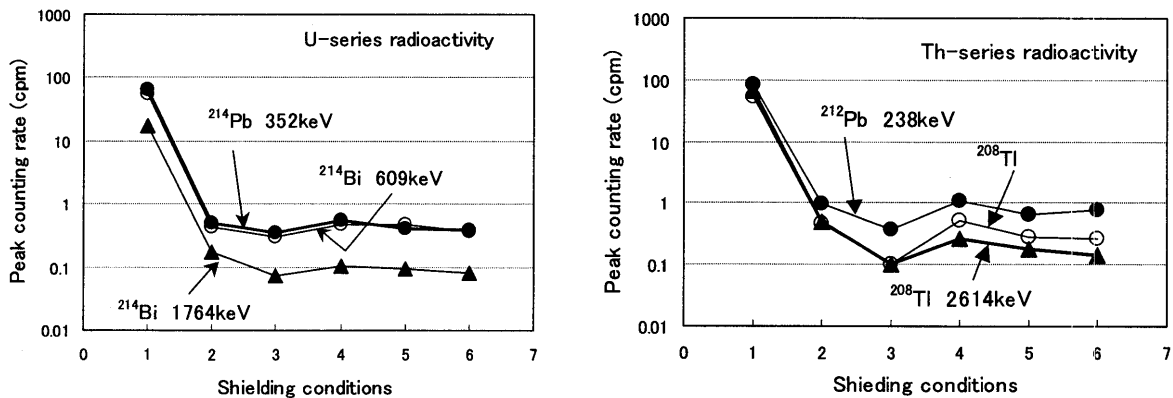


Fig.9 Background peak counting rate of U-series and Th-series natural radioactivity for different shielding conditions

(半減期 1.4×10^{10} y) と放射平衡に達していればガンマ線計数率の減少は起こらないはずである。Th 系列でガンマ線計数率の減少が起こる理由としては ²²⁸Ra (半減期 5.7y) が検出器の構成材に含まれるために放射平衡成り立っていないためと考えられる。本研究の結果からは Fig.7 に示されたように遮蔽体外においてガンマ線ピーク計数率のみでなく連続部分の計数率も減少している。このことは、バックグラウンド計数率の経年変化ではなく、測定回路系の変更が原因と考えられる。

遮蔽体内での測定においては連続部分について Table 2 の Y および B の計数率、あるいは Fig.7 に示されたように <500keV の領域では 30~50%に減少し、500~2MeV では約 50%に減少した。2MeV 以上ではほとんど違いは見られない。このことは外部から Ge 検出器に入射する高エネルギーのガンマ線は遮蔽体を通すためにあまり効果がないことを示している。ピーク領

域については Table3 の Y および B の計数率を比較するとほぼ 60%程度に減少した。⁴⁰K 1461keV については 3%程度にまで大幅に減少し $R_p=39$ であった。

新遮蔽体に陸奥の鉄材が使用されていることから、⁶⁰Co のガンマ線領域 (1173keV および 1332keV) に注目してガンマ線スペクトルを検討したところ、⁶⁰Co は検出されなかった。

5. 2 新遮蔽体の改善の効果

遮蔽体について Case 2 から 5 の改善を行った結果を Table2 および 3 に示した。また、ピーク部分の計数率についての結果は Fig. 8 および 9 に示した。

連続部分については床に鉛を敷いた Case 2 の改善と Ge 検出器のネック部分を鉛で遮蔽した Case 4 の改善において計数率の減少が見られた。いずれも床面からのバックグラウンド放射線の影響を遮蔽するのに役立ったと考えられる。発泡スチロールを詰めた Case 3 で

はあまり変化は見られなかった。また、液体窒素の蒸発ガスを引き込んだ Case 5 についても効果は見られなかった。これは遮蔽体内の測定室自体が気密な構造になっていないためと考えられる。

ピーク部分については Table 3 および Fig. 8 に示された ^{40}K 1461keV の計数率の変化をみると上述と同様の計数率の減少が Case 2 と Case 4 で減少がみられた。陽電子消滅ガンマ線 511keV については遮蔽の改善の効果はほとんど見られなかった。これは陽電子の発生が透過力の高い宇宙線に起因していることを表している。ウラン系列、トリウム系列についても遮蔽の改善による効果はあまり見られなかった。これらの核種は遮蔽体の外部からだけでなく、空気中や検出器の構成材にも含まれており床からの影響を低減してもそれほど計数率の低減につながらないことがわかった。

6. まとめ

Ge 検出器用の新遮蔽体の装備により、測定用試料交換が容易になった。また、旧遮蔽体に比べてバックグラウンド計数率も低減した。この遮蔽体にさらに追加改善として床、および Ge 検出器のネック部分の遮蔽を行うことはバックグラウンドを低減することに効果があった。この結果、 ^{40}K で減衰ファクターを旧遮蔽の $R_f=51$ から追加改善を行わない場合で 1021、追加改善を行った結果として 4290 に改善することができた。この減衰ファクターは工学部低バックグラウンドスペクトロメーターの $R_f=3704^{2)}$ よりやや良好であるといえる。

参考文献

- 1) 静間 清、春名芳郎、深見健司、岩谷和夫、葉佐井博巳：“アイソトープ中央実験施設の Ge 半導体検出器の遮蔽と低バックグラウンドγ線スペクトロメータによる水中ラドン濃度の測定法の開発”、広島大学工学部研究報告、41 (1993) 117-125.
- 2) 静間 清、岩谷和夫、葉佐井博巳：“広島大学工学部の低バックグラウンドγ線スペクトロメータ” RADIOISOTOPES、34 (1987) 682-685
- 3) 広瀬妙子、佐藤 純、佐藤和郎：“本邦で生産された新しい鉄材に含まれるガンマ線放射核種” RADIOISOTOPES、28 (1979) 194-196. 同じく“新しい鉄材を遮蔽に用いたガンマ線スペクトロメータ”：RADIOISOTOPES、28 (1979) 163-165.
- 4) 鈴木章悟、平井昭司：“Ge(Li)検出器用ローバックグラウンドシールドの製作” RADIOISOTOPES、26 (1977) 799-802.
- 5) 静間 清、岩谷和夫、葉佐井博巳：“ゲルマニウム検出器用低バックグラウンド遮蔽体における散乱γ線” RADIOISOTOPES、36 (1987) 465-468.
- 6) 桜井次郎、小村和久：“Ge(Li)検出器のバックグラウンドの経年変化” RADIOISOTOPES、30(1981)471-474.

平成 16 年 9 月 30 日受理