

ZnS(Ag)シンチレーション検出器による α 線波高弁別に関する検討

— 汚染管理用機器への適用の可能性 —

Study on Pulse Height Discrimination of Alpha-ray Using ZnS (Ag) Scintillation Detector
- Adaptability to Contamination Monitoring Equipments -

井崎 賢二 猪野 和生* 水庭 春美

Kenji IZAKI, Kazuo INO* and Harumi MIZUNIWA

東海研究開発センター
核燃料サイクル工学研究所
放射線管理部

Radiation Protection Department
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Tokai Research and Development Center

March 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5901, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

ZnS (Ag) シンチレーション検出器による α 線波高弁別に関する検討
— 汚染管理用機器への適用の可能性 —

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター
核燃料サイクル工学研究所 放射線管理部
井崎 賢二・猪野 和生*¹・水庭 春美

(2008年12月17日受理)

MOX 燃料製造施設や再処理施設などプルトニウムを取り扱う施設においては、 α 線測定を主体とした汚染管理が行われる。 α 線測定の場合、天然放射性核種であるラドン子孫核種による影響を考慮する必要があり、これまで必要に応じて表面障壁型の半導体検出器を用いた波高弁別を活用することにより、ラドン子孫核種の影響低減化を図ってきた。

今回、半導体検出器より耐久性や耐ノイズ性に優れた ZnS (Ag) シンチレーション検出器について、波高弁別の精度を確認し、汚染管理用機器への適用の可能性について検討した。

核燃料サイクル工学研究所：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

*¹ 検査開発株式会社

Study on Pulse Height Discrimination of Alpha-ray Using ZnS (Ag) Scintillation Detector
— Adaptability to Contamination Monitoring Equipments —

Kenji IZAKI, Kazuo INO*¹ and Harumi MIZUNIWA

Radiation Protection Department
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 17, 2008)

The contamination control has been carried out by alpha-ray measurement in facilities where handling plutonium like the MOX fuel manufacturing facility and the reprocessing facility, etc. In case of alpha-ray measurement, it is necessary to consider the influence of radon progeny that is natural radionuclide. The influence of radon progeny has been decreased by pulse height discrimination technique using the semiconductor detector as needed. However, the semiconductor detector has potentially significant problems such as the durability and noise immunity. Therefore the accuracy of pulse height discrimination by the ZnS(Ag) scintillation detector was confirmed as alternative to the semiconductor detector.

This report shows the accuracy of pulse height discrimination technique using the ZnS(Ag) scintillation detector and evaluates the adaptability to contamination control equipments.

Keywords: Contamination Control, Natural Radionuclide, Airborne Radioactive Concentration, Air Monitor, ZnS (Ag) Scintillation Detector, Semiconductor Detector

*¹ Inspection Development Company Ltd.

目 次

1. 緒 言	1
2. ZnS 検出器による波高弁別の可能性	2
2.1 天然放射性核種と核燃料物質の α 線波高弁別	2
2.2 ZnS 検出器の測定原理	2
2.3 ZnS 検出器による α 線の波高弁別の可能性	3
3. 試験準備	4
3.1 シンチレータの厚みの選定	4
3.2 検出器出力の調整	6
3.3 波高弁別精度の評価方法の検討	7
3.4 試験に使用した機器	8
4. 波高スペクトルに大きく影響する因子に関する確認試験	10
4.1 シンチレータの厚みによるスペクトルの変化	10
4.2 検出部位によるスペクトルの変化	12
5. ZnS 検出器への波高弁別技術の適用に関する確認結果	18
5.1 サーベイメータ (TCS-231) への適用に関する評価結果	18
5.1.1 シンチレータの厚みによる除去率の変化(サーベイメータ)	18
5.1.2 シンチレータの厚みによる機器効率の変化(サーベイメータ)	26
5.1.3 検出部位による除去率の変化(サーベイメータ)	27
5.2 ダストモニタ (RZ-361Z) への適用に関する評価結果	27
5.2.1 シンチレータの厚みによる除去率の変化(ダストモニタ)	28
5.2.2 検出部位による除去率の変化(ダストモニタ)	29
5.3 半導体検出器との比較	30
5.4 ウラン線源による除去率の評価	31
5.5 γ 線及び中性子線感度の確認結果	32
5.5.1 γ 線感度試験結果	32
5.5.2 中性子線感度試験結果	34
6. 除去率の向上に関する検討	37
6.1 α 線のエネルギー損失の観点からの検討	37
6.1.1 ろ紙の材質に関する検討	37
6.1.2 アルミマイラ膜に関する検討	38

6.1.3	空気層に関する検討	40
6.2	シンチレーション光の減衰の観点からの検討	41
6.2.1	シンチレータの塗布方法に関する検討	41
6.2.2	粒径及びバインダー量に関する検討	42
7.	まとめ	44
7.1	ZnS 検出器による α 線の波高弁別を行うための最低条件	44
7.2	サーベイメータ及びダストモニタへの適用	44
7.3	今後の除去率向上の見通し	45
	謝辞	46
	参考文献	46

Contents

1. Introduction	1
2. Feasibility of pulse height discrimination with ZnS detector	2
2.1 Pulse height discrimination of alpha-ray between natural radionuclide and nuclear fuel materials	2
2.2 Measurement principle of ZnS detector	2
2.3 Feasibility of alpha-ray pulse height discrimination using ZnS detector	3
3. Preparation for examination	4
3.1 Estimation concerning the thickness of ZnS scintillator	4
3.2 Adjustment of detector output	6
3.3 Definition of evaluation method for pulse height discrimination	7
3.4 Equipment for examination	8
4. Examination concerning factors that greatly influence pulse height spectrum	10
4.1 Changes of spectrum according to thickness of scintillator	10
4.2 Changes of spectrum according to detecting position of detector	12
5. Evaluation concerning adaptability of pulse height discrimination technique to ZnS detector	18
5.1 Evaluation concerning adaptability to survey meter (TCS-231)	18
5.1.1 Changes of elimination factor according to thickness of scintillator (survey meter)	18
5.1.2 Changes of detection efficiency according to thickness of scintillator (survey meter)	26
5.1.3 Changes of elimination factor according to detecting position of detector (survey meter)	27
5.2 Evaluation concerning adaptability to dust monitor (RZ-361Z)	27
5.2.1 Changes of elimination factor according to thickness of scintillator (dust monitor)	28
5.2.2 Changes of elimination factor according to detecting position of detector (dust monitor)	29
5.3 Comparison with semiconductor detector	30
5.4 Evaluation of elimination factor by uranium source	31
5.5 Evaluation of gamma-ray and neutron sensitivity	32
5.5.1 Evaluation of gamma-ray sensitivity	32
5.5.2 Evaluation of neutron sensitivity	34
6. Investigation concerning improvement of elimination factor	37
6.1 Investigation from the viewpoint of alpha-ray energy loss	37
6.1.1 Investigation concerning material of filter	37

6.1.2	Investigation concerning aluminum membrane	38
6.1.3	Investigation concerning air space	40
6.2	Investigation from the viewpoint of attenuation of scintillation light	41
6.2.1	Investigation concerning method of spreading scintillator	41
6.2.2	Investigation concerning particle size and amount of binder	42
7.	Conclusion	44
7.1	Essential requirement to discriminate pulse height by ZnS detector	44
7.2	Adaptability of pulse height discrimination technique to survey meter and dust monitor	44
7.3	The possibility of improvement in elimination factor	45
	Acknowledgements	46
	Reference	46

目 次

図 2.1 ZnS 検出器の構成の例(ダストモニタ用検出器)	3
図 3.1 ZnS シンチレータシート of 構造	5
図 3.2 回路変更前後の検出器出力	7
図 3.3 除去率の概念図	7
図 3.4 波高弁別試験に用いた機器等	8
図 4.1 シンチレータの厚みが α 線の飛程以下の場合の波高スペクトル	11
図 4.2 シンチレータが薄い場合の α 線のエネルギー吸収の概念図	11
図 4.3 シンチレータの厚みが α 線の飛程以上の場合の波高スペクトル	12
図 4.4.1 検出面の分割図(サーベイメータ)	13
図 4.4.2 検出部位による波高スペクトルの変化(サーベイメータ)	13
図 4.5.1 サーベイメータの検出部位の詳細分割図	14
図 4.5.2.1 検出部位のわずかなズレによる波高スペクトルの変化(検出部位①)	15
図 4.5.2.2 検出部位のわずかなズレによる波高スペクトルの変化(検出部位②)	15
図 4.5.2.3 検出部位のわずかなズレによる波高スペクトルの変化(検出部位③)	15
図 4.5.2.4 検出部位のわずかなズレによる波高スペクトルの変化(検出部位④)	16
図 4.5.2.5 検出部位のわずかなズレによる波高スペクトルの変化(検出部位⑤)	16
図 4.6.1 ダストモニタ検出面の有効径の絞り方	17
図 4.6.2 検出面の有効径の違いによる波高スペクトルの変化 (^{241}Am 線源)	17
図 5.1.1 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $3\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	19
図 5.1.2 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $6\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	19
図 5.1.3 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $7\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	20
図 5.1.4 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $8\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	20
図 5.1.5 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $9\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	21
図 5.1.6 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $10\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	21
図 5.1.7 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $11\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	22
図 5.1.8 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $12\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	22
図 5.1.9 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $13\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	23
図 5.1.10 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $14\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	23
図 5.1.11 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $15\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	24
図 5.1.12 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $20\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	24
図 5.1.13 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $25\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	25
図 5.1.14 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $30\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	25
図 5.2 シンチレータ中の ZnS 量と除去率の関係(サーベイメータ)	26
図 5.3 シンチレータ中の ZnS 量と機器効率の関係(サーベイメータ)	26
図 5.4 ダストモニタ用 ZnS 検出器の波高スペクトルの例	28

図 5.5	シンチレータ中の ZnS 量と除去率の関係(ダストモニタ)	28
図 5.6	検出面の有効径の違いによる波高スペクトルの変化(HE-40T ろ紙)	29
図 5.7	ZnS 検出器と半導体検出器の波高スペクトルの比較例	30
図 5.8	ウラン線源を用いた場合の波高スペクトルの例	31
図 5.9.1	^{137}Cs γ 線源照射時の波高スペクトル	33
図 5.9.2	^{241}Am γ 線源照射時の波高スペクトル	33
図 5.10	^{252}Cf 中性子線源照射時の波高スペクトル	35
図 5.11	波高弁別を適用した際の中性子影響の様子 (ZnS 量: $10 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	35
図 6.1	ろ紙の違いによる波高スペクトルの変化	37
図 6.2.1	アルミマイラ膜の厚さの相違による波高スペクトルの変化 ($0.25 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	38
図 6.2.2	アルミマイラ膜の厚さの相違による波高スペクトルの変化 ($0.58 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	39
図 6.2.3	アルミマイラ膜の厚さの相違による波高スペクトルの変化 ($1.16 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	39
図 6.2.4	アルミマイラ膜の厚さの相違による波高スペクトルの変化 ($1.66 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	39
図 6.3	検出面と線源との距離によるスペクトルの変化(ダストモニタ)	41
図 6.4	シンチレータの塗布方法の違いによる波高スペクトルの変化	42
図 6.5	粒径及びバインダー量の異なるシンチレータによる波高スペクトルの例	42

表 目 次

表 2.1	核燃料施設における主な α 線のエネルギー	2
表 3.1	試験に使用したシンチレータ	6
表 4.1	検出部位によるピーク形状の変化(サーベイメータ)	14
表 5.1	試験に用いたサーベイメータとダストモニタの主な相違点	18
表 5.2	検出部位ごとの除去率評価結果(サーベイメータ)	27
表 5.3	ダストモニタの検出面の有効径と除去率の相関	29
表 5.4	ZnS 検出器と半導体検出器の除去率の比較	31
表 5.5	ウラン線源を用いた場合の除去率と機器効率	32
表 5.6	JIS Z 4329-2004 で要求されるサーベイメータの γ 線感度試験	32
表 5.7	JIS Z 4329-2004 に基づく γ 線感度試験結果	34
表 5.8	LLD の設定による中性子感度の変化	36
表 6.1	捕集ろ紙による除去率の変化	38
表 6.2	アルミマイラ膜の厚さによる除去率と機器効率の変化	40
表 6.3	検出面と線源との距離による除去率の変化	40
表 6.4	粒径及びバインダー量による除去率の変化	43
表 7.1	今回の試験で確認された除去率とその測定条件	44

1. 緒 言

MOX 燃料製造施設や再処理施設などプルトニウムを取り扱う施設では、 α 線測定を主体とした汚染管理を行う必要がある。 α 線測定では、天然放射性核種であるラドン子孫核種による影響が無視できないため、必要に応じて表面障壁型半導体検出器（以下、「半導体検出器」という）による波高弁別技術を取り入れることによりその影響を低減させている。半導体検出器は分解能が高く α 線の波高弁別技術に適している一方で、高価であり、耐久性の問題やノイズに弱いといった欠点もある。

これまで、ラドン子孫核種による影響を低減するための測定器の技術開発は数多く行われており、 α 線・ β 線の同時計数法¹⁾や時間間隔解析法²⁾など、一部の技術は実用化が期待できるものがあるが、実用化された場合、従来の汚染管理用モニタに比べてコスト（導入コスト、維持コスト等）がかかり、また、装置が大型化・重量化するなどの問題も懸念される。

本研究は、半導体検出器の代替となる波高弁別技術（検出器）で、かつ、直ちに実用が可能な技術の開発を目的とするものであり、 α 線用の計数率計（カウンタ）として利用されている ZnS (Ag) シンチレーション検出器（以下、「ZnS 検出器」という）について、その波高弁別の精度を確認するとともに現場適用の可能性を検討するものである。ZnS 検出器は、 α 線計測時の信号パルスの波高がノイズのレベルと比較して非常に高いためノイズの影響を受けにくく、また、比較的安価で耐久性に優れているという特長を有することから、これまで、汎用性の高いサーベイメータや、高い信頼性が要求される排気ダストモニタの検出器として一般的に用いられている。

ZnS 検出器による波高弁別が可能となった場合、サーベイメータに適用することで汚染管理上ラドン子孫核種の影響が低減でき、また、室内 α 線ダストモニタに適用することで耐ノイズ性や耐久性に優れたモニタとして利用することが期待できる。

2. ZnS 検出器による波高弁別の可能性

ZnS 検出器は、シンチレーション検出器であるため、原理的には波高弁別が可能である。これまで ZnS 検出器を用いた波高弁別技術としては、エネルギー領域が全く異なる“ α 線 (数 MeV)”と“核分裂片 (数十 MeV)”を弁別する技術について述べられた報告例はあるものの、エネルギー領域が似通った α 線放出核種の波高弁別については、詳細に報告された事例がない。

2.1 天然放射性核種と核燃料物質の α 線波高弁別

α 線による汚染管理では、天然放射性核種であるラドン子孫核種のうち、ウラン系列の ^{218}Po と ^{214}Po 、トリウム系列の ^{212}Bi 及び ^{212}Po をバックグラウンドとして考慮する必要があり、施設内の汚染管理では、特に ^{214}Po の影響が最も大きく現れる³⁾。しかし、これらの天然放射性核種から放出される α 線のエネルギーは、核燃料物質 (U や Pu) から放出される α 線のエネルギーに比べて高いため、放射線計測上ではパルス波高弁別によって核燃料物質とラドン子孫核種を弁別することが可能である。表 2.1 に核燃料施設における主な α 線のエネルギーを示す。

表 2.1 核燃料施設における主な α 線のエネルギー

α 線のエネルギー (MeV)	核種	備考
4.2	U-238	核燃料物質に含まれる核種
4.4	U-235	
4.9	Pu-242	
5.2	Pu-239, Pu-240	
5.5	Pu-238, Am-241	
6.0	Po-218	天然放射性核種 (ラドン子孫核種)
6.1	Bi-212	
7.7	Po-214	
8.8	Po-212	

2.2 ZnS 検出器の測定原理

ZnS 検出器は、 α 線の励起作用によって ZnS (Ag) シンチレータが発した光を、ライドガイドを通じて光電子増倍管 (以下、「PMT」という) に集光し、PMT 内の光電陰極にて発生した光電子を増幅することによって、計数信号 (計数パルス) に変換するものである。ZnS 検出器の構成の例を図 2.1 に示す。

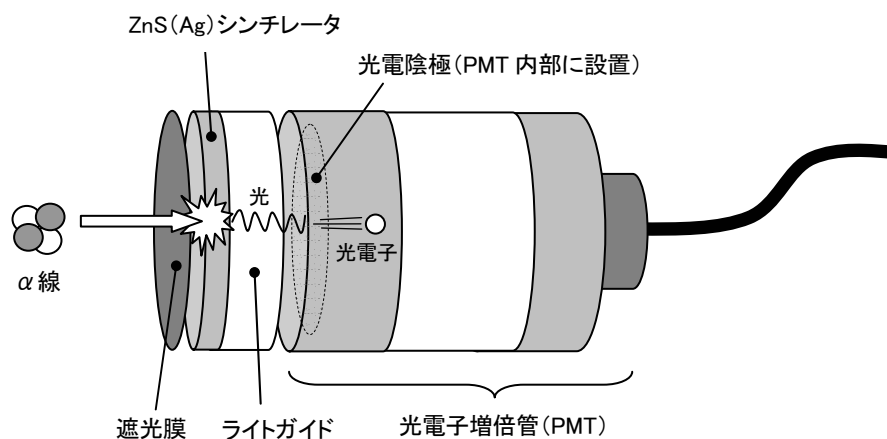


図 2.1 ZnS 検出器の構成の例(ダストモニタ用検出器)

2.3 ZnS 検出器による α 線の波高弁別の可能性

ZnS (Ag) シンチレータは、最も古いシンチレータのひとつであり、非常に高いシンチレーション効率を有している。しかし、ZnS は多結晶の粉末としてしか入手できないため、シンチレータとして使用する場合は、粉末をバインダーに混合し、薄い膜（プラスチックフィルム）に塗布した状態で使用される。また、用途は、 α 線や重イオンの測定器として利用されるのが一般的である。

α 線の波高弁別を行うためには、シンチレータが α 線の全エネルギーを吸収できればよい。そのため、シンチレータの厚みを α 線の飛程以上にすれば可能となる。しかし、シンチレータ自体に多結晶層による不透明さがあり、約 $25\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 以上の厚さでは使用できないとされている⁴⁾。また、一般的にシンチレーション検出器の波高弁別精度を向上させるためには、シンチレータ内での光の自己吸収とシンチレータ表面での損失を抑えることが重要となる⁴⁾。

3. 試験準備

市販されている ZnS 検出器は、一般的に計数率計又はカウンタとして利用されている。したがって、今回の試験（波高弁別試験）に必要な“ α 線のエネルギーに応じた波高のパルス”が得られるような設計にはなっていない。

このため、本試験用の測定器として選定した“ZnS (Ag) シンチレーション式サーベイメータ Aloka 製 TCS-231 (以下、「ZnS サーベイメータ」という)”及び排気モニタに使用している“ダスト用 α 線検出器 東芝製 RD-361Z (以下、「ZnS ダストモニタ」という)”について、波高弁別試験を実施するにあたり必要な測定回路の変更を行った。

3.1 シンチレータの厚みの選定

波高弁別を行うためには、シンチレータ内で α 線のエネルギーを吸収できるようにシンチレータの厚みを α 線の飛程以上にする必要があるため、ここでは α 線の飛程に相当するシンチレータの厚みを検討する。

ZnS 中での α 線の大まかな飛程を、原子量が ZnS の実効分子量と比較的近い Ar 中での飛程を基に、ブラッグ・クレマン則 (Bragg-Kleeman rule) から求める。

文献⁵⁾によると Ar 中での α 線の飛程は、核燃料物質等の α 線の最大エネルギー (5.5MeV : ^{238}Pu 及び ^{241}Am) の場合で約 $7.8 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ であり、また、主たる天然放射性核種の α 線のエネルギー (7.7MeV : ^{214}Po) の場合で約 $13 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ である。

ZnS 中での α 線の飛程は、ブラッグ・クレマン則より、飛程を $R(\text{cm})$ 、密度を $\rho (\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3})$ 、原子量 (又は実効分子量) を A とすると以下の関係式が概ね成り立つ。

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot \sqrt{\frac{A_1}{A_2}} \quad \text{式 2.1}$$

$$R_1 \cdot \rho_1 = R_2 \cdot \rho_2 \sqrt{\frac{A_1}{A_2}} \quad \text{式 2.1'}$$

ここで、Ar の原子量 A_2 を 39.9、ZnS の実効分子量 A_1 を 50.2 とし、先に述べた Ar における飛程を $R_2 \cdot \rho_2 (\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2})$ に代入し、ZnS 中における α 線の飛程 $R_1 \cdot \rho_1 (\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2})$ を求めると、式 2-1' より、ZnS 中での α 線の飛程は 5.5MeV の場合で約 $8.7 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ となり、7.7MeV の場合で約 $15 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ となる。

しかし、ZnS (Ag) シンチレーション検出器として使用する場合、ZnS 粒子以外の遮へい物として、測定対象物と検出器表面までの空気層 (ZnS サーベイメータで約 3 mm、ZnS ダストモニタで約 5 mm)、アルミマイラ膜 (ZnS サーベイメータで約 $0.58 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、ZnS ダストモニタで約 $1.8 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)、ZnS シンチレータシート中に含まれるバインダーなどが存在する。よっ

て今回の試験において準備したシンチレータシートの厚みは、シンチレータシート中の ZnS の含有量が $10\sim 15\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ のものを中心に (7.7MeV の α 線の飛程が約 $15\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ であることを考慮)、 $3\sim 30\text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ とした。図 3.1 に ZnS シンチレータシートの構造を示す。

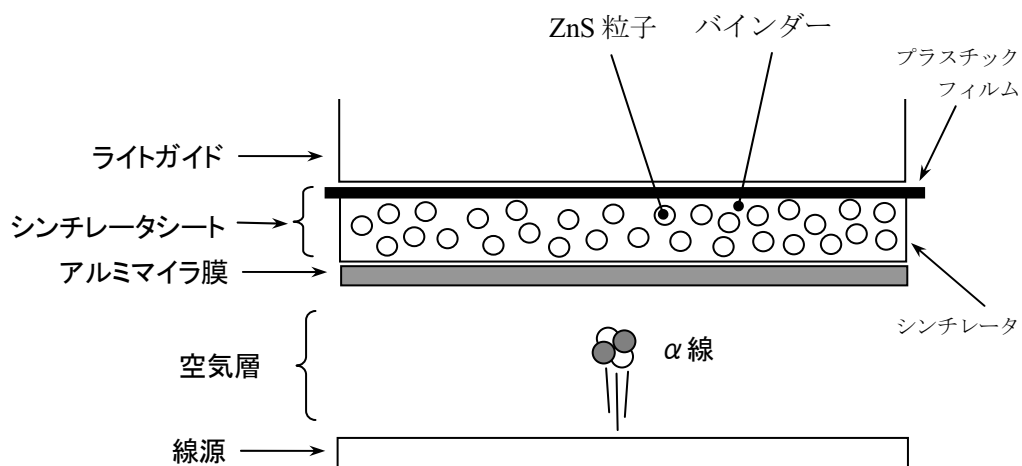


図 3.1 ZnS シンチレータシートの構造

また、ZnS 粒子の粒径による変化を確認するため、既存のサーベイメータに使用されている $5\mu\text{m}$ の ZnS 粒子を用いたシンチレータシートのほかに、 $10\mu\text{m}$ の ZnS 粒子を用いたシンチレータシートも準備し、比較を行うこととした。なお、ダストモニタ用のシンチレータについては製造上、粒径を指定することができなかった。

表 3.1 に試験に使用したシンチレータを示す。

表 3.1 試験に使用したシンチレータ

用途	サーベイメータ用		ダストモニタ用
ZnS 粒子の粒径	5 μ m	10 μ m	不明* ²
シンチレータ中の ZnS 量* ¹	3 mg \cdot cm ⁻² * ³	10 mg \cdot cm ⁻²	3 mg \cdot cm ⁻²
	6 mg \cdot cm ⁻²	15 mg \cdot cm ⁻²	5 mg \cdot cm ⁻² * ⁴
	7 mg \cdot cm ⁻²	20 mg \cdot cm ⁻²	7 mg \cdot cm ⁻²
	8 mg \cdot cm ⁻²	25 mg \cdot cm ⁻²	10 mg \cdot cm ⁻²
	9 mg \cdot cm ⁻²	30 mg \cdot cm ⁻²	12 mg \cdot cm ⁻²
	10 mg \cdot cm ⁻²		
	11 mg \cdot cm ⁻²		
	12 mg \cdot cm ⁻²		
	13 mg \cdot cm ⁻²		
	14 mg \cdot cm ⁻²		
	15 mg \cdot cm ⁻²		
	20 mg \cdot cm ⁻²		
25 mg \cdot cm ⁻²			
30 mg \cdot cm ⁻²			

- *1 ZnS 粒子のみの混在量（厚さ）であり、シンチレータシート全体の厚みではない。
- *2 ダストモニタ用のシンチレータについては、製造メーカーの関係上、粒径の指定はできなかった。
- *3 JAEA 核燃料サイクル工学研究所で使用している既存の ZnS サーベイメータのシンチレータシートは、ZnS 粒子の粒径が 5 μ m で ZnS の厚みが 3 mg \cdot cm⁻² のものを使用している。
- *4 ダストモニタのシンチレータ 5 mg \cdot cm⁻²については、プラスチックフィルムに ZnS 粒子を塗布したものと、ライトガイドに直接 ZnS 粒子を塗布したもの（JAEA 核燃料サイクル工学研究所で使用している標準品）を用意した。

3.2 検出器出力の調整

既存の ZnS 検出器では、 α 線を測定した際のパルスの波高がアンプ出力の上限値を超える設計となっているため、検出器出力としては、見かけ上、矩形波のような形状になっている。このような状態では波高弁別が行えないことから、GAIN の調整を行い、シンチレータの発光量に応じたパルス波高が得られるようにする必要がある。しかし、既存の ZnS サーベイメータについては、十分な調整が行えない設計になっていたことから、製造メーカー（Aloka）にて GAIN を可変とするための回路変更を行った。図 3.2 に回路変更前後の出力波形を示す。

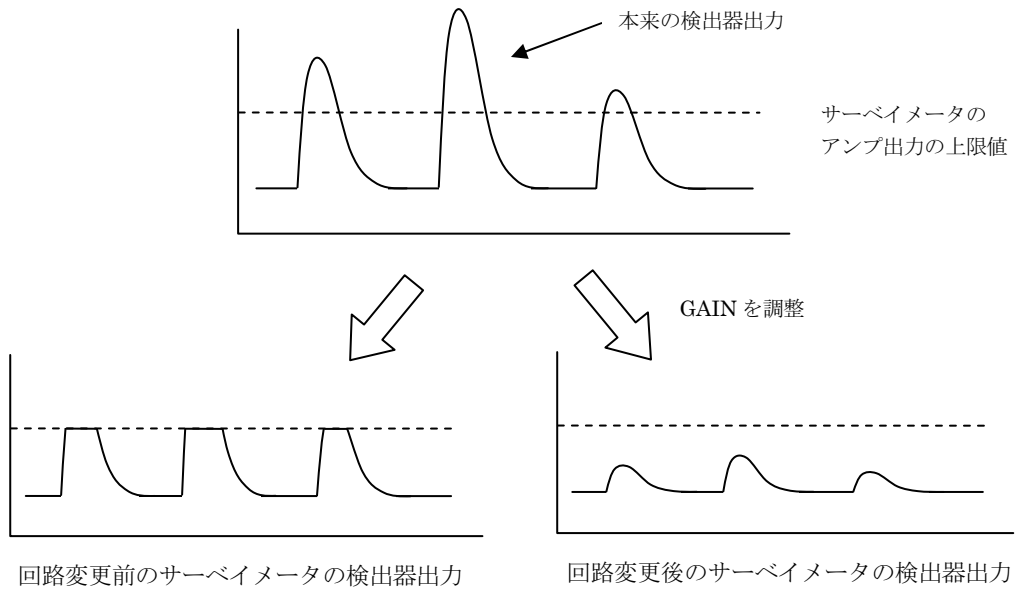


図 3.2 回路変更前後の検出器出力

3.3 波高弁別精度の評価方法の検討

本研究の目的は、ZnS 検出器に波高弁別機能を持たせた場合に、ラドン子孫核種による計数をどの程度排除できるかを確認することである。このため、本研究の評価では、式 3.1 に示す“除去率”を定義し、この除去率を比較することによって波高弁別精度を確認した。図 3.3 に除去率の概念図を示す。

$$\text{除去率 (\%)} = \frac{\text{ULD 以上のラドン子孫核種の計数}}{\text{LLD 以上のラドン子孫核種の計数}} \times 100 \quad \text{式 3.1}$$

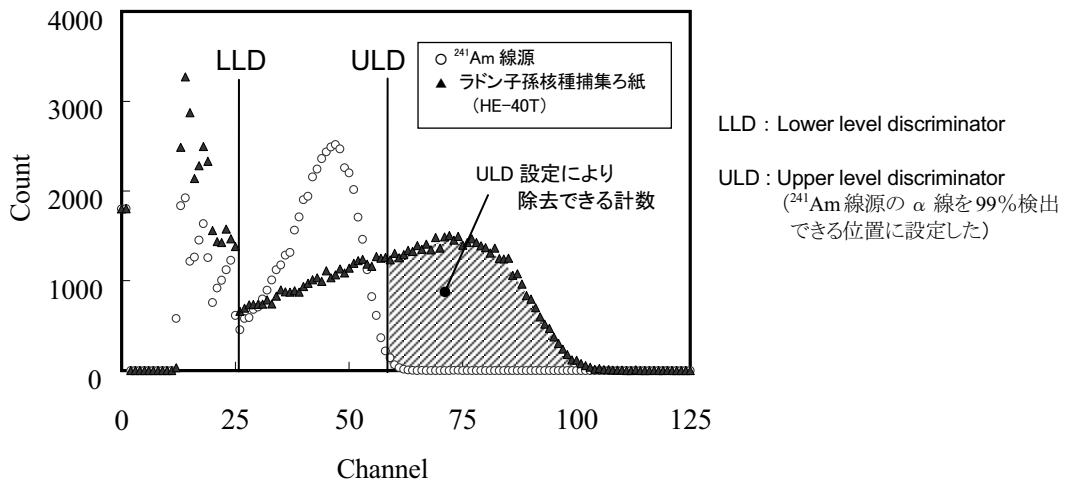


図 3.3 除去率の概念図

3.4 試験に使用した機器

波高弁別試験に用いた機器等を図 3.4 に示すとともに、その仕様を以下に示す。

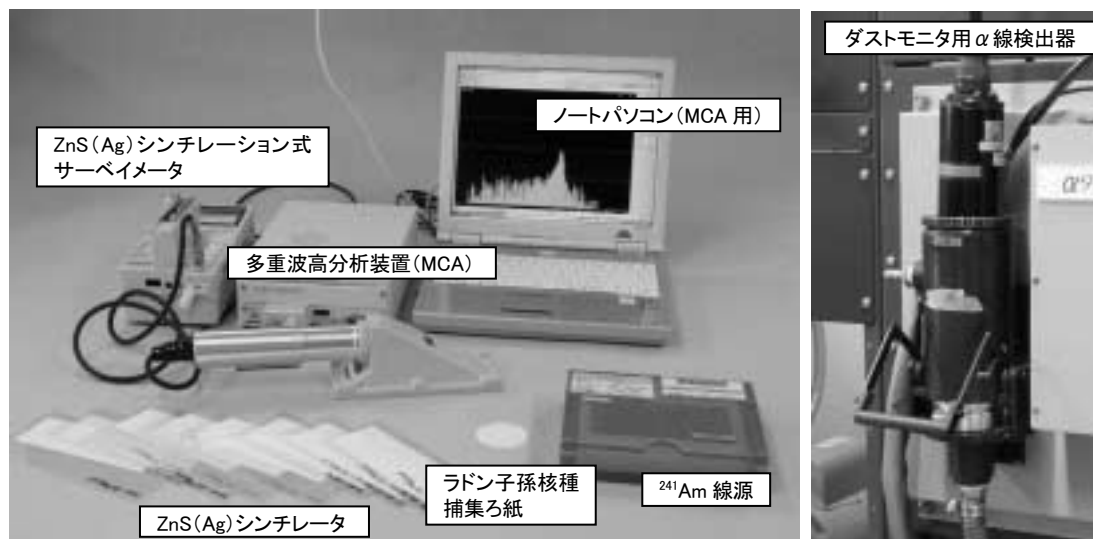


図 3.4 波高弁別試験に用いた機器等

① ZnS(Ag)シンチレーション式サーベイメータ

型名	TCS-231 (アロカ株式会社製)
シンチレータ	ZnS (Ag)
遮光膜	アルミマイラ膜 約 $0.29 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 2枚貼り
検出面有効面積	71.5 cm^2
機器効率	²⁴¹ Am 線源にて 30%/2π 以上
測定範囲	アナログ $0 \sim 2\text{k} \times 1 \text{ min}^{-1}$ $0 \sim 2\text{k} \times 10 \text{ min}^{-1}$ $0 \sim 2\text{k} \times 100 \text{ min}^{-1}$ $0 \sim 2\text{k} \times 1\text{k} \text{ min}^{-1}$ の4段手動切替え デジタル $0.00 \sim 9.99\text{k} \text{ min}^{-1}$ $10.0 \sim 99.9\text{k} \text{ min}^{-1}$ $100 \sim 999\text{k} \text{ min}^{-1}$ $1.00 \sim 1.99\text{k} \text{ min}^{-1}$ の自動切替え
時定数	3 秒, 10 秒, 30 秒
外形寸法	11.3mm(W) × 12.0 mm(H) × 20.8 mm(D)

② ダストモニタ用α線検出器

型名	RD-361Z (株式会社東芝製)
シンチレータ	ZnS (Ag)
遮光膜	アルミマイラ膜 約 1.8 mg・cm ⁻²
検出面有効面積	φ 40mm
機器効率	U ₃ O ₈ 線源にて 10%以上 (線源実装状態)
外形寸法	φ 65mm×300mm

③ 多重波高分析装置

型名	2100C/MCA (株式会社 ラボラトリ・イクイップメン ト・コーポレーション製)
変換方式	ウィルキンソン方式
クロック周波数	150MHz
入力信号	0~10V ユニポーラパルス
変換利得	1K, 2K, 4K, 8K,
外形寸法	252mm(W) × 65 mm(H) × 170 mm(D)

④ 線源

- ・ ²⁴¹Am 線源 (α線源、γ線源)
- ・ 天然ウラン (U₃O₈) 線源 (α線源)
- ・ ¹³⁷Cs 線源 (γ線源)
- ・ ²⁵²Cf 線源 (中性子線源)
- ・ ラドン子孫核種集塵ろ紙 (α線源)
 空気中に含まれるラドン子孫核種をろ紙 (HE-40T, HE-40TA 又はメンブレンろ紙) に集塵したもの

	HE-40T (HE-40TA)				メンブレンろ紙
材質	セルロース繊維、ガラス繊維				セルロース混合エステル
質量 (g/m ²)	145 (120)				460
厚さ (mm)	0.41 (0.40)				0.15
孔径 (μm)	—				0.8
空隙率 (%)	—				80
圧力損失 (kPa)	0.27 (0.32)				—
通気速度 (cm/s)	55	80	135	(20)	—
捕集効率 (%)	99.7	99.8	99.9	(99)	
主な用途	ダストモニタ用ろ紙				微粒子/微生物試験

4. 波高スペクトルに大きく影響する因子に関する確認試験

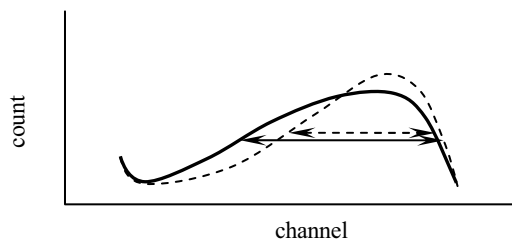
波高スペクトルの形状は波高弁別精度に大きく寄与するため、波高弁別精度の確認試験を実施する前に、波高スペクトルに大きく影響する因子について確認しておく必要がある。

2.3 項で先述したように、ZnS 検出器で波高弁別を行うためには、シンチレータの厚みを α 線の飛程以上にすることが必要で、また、弁別精度を上げるためにはシンチレーション光の減衰を最低限に抑えることが知られている。そこで、波高スペクトルの形状を大きく変化させる因子として、シンチレータの厚みの影響及び検出器の位置依存性（ライトガイドによる減衰の影響）を確認した。

なお、波高スペクトルの形状の変化について、本報告書の中では以下のように表現することとする。

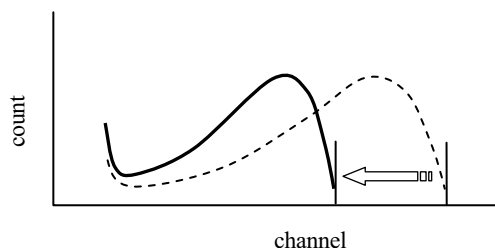
① “スペクトルがなまる”

スペクトルの最大チャンネルは殆ど変わらないが、低いチャンネルのカウントの比率が高くなり、半値幅が大きくなることを本報告書では“スペクトルがなまる”と表現する。



② “スペクトルがずれる”

スペクトルが全体的に低エネルギー側にシフトしたようになることを本報告書では“スペクトルがずれる”と表現する。



4.1 シンチレータの厚みによるスペクトルの変化

波高弁別の可否はシンチレータの厚みに関係することから、シンチレータの厚みによる波高スペクトルの変化を確認した。本試験では、シンチレータの張替えが容易なサーベイメータを用い、スペクトルの測定は 4.2 項で後述するサーベイメータの位置依存性を考慮して、検出面を検出部位①（図 4.5 参照）に制限した状態で行った。また、シンチレータの ZnS 粒子の粒径は $5\mu\text{m}$ とし、線源にはラドン子孫核種の捕集ろ紙（使用ろ紙：メンブレンろ紙）を用いた。なお、ラドン子孫核種は、換気が行われていない場所で採取しているため子孫核種は平衡状態にあると考えられるが、測定の都度捕集しているため捕集ろ紙の放射能強度は一定ではない。

1) シンチレータの厚みが α 線の飛程以下の場合

シンチレータの厚みが α 線の飛程以下の場合、シンチレータが α 線のエネルギーの一部しか吸収できないため、シンチレータの厚みによって波高スペクトルの形状が大きく変化する。図 4.1 にシンチレータの厚みが α 線の飛程以下の場合の波高スペクトルを示す。

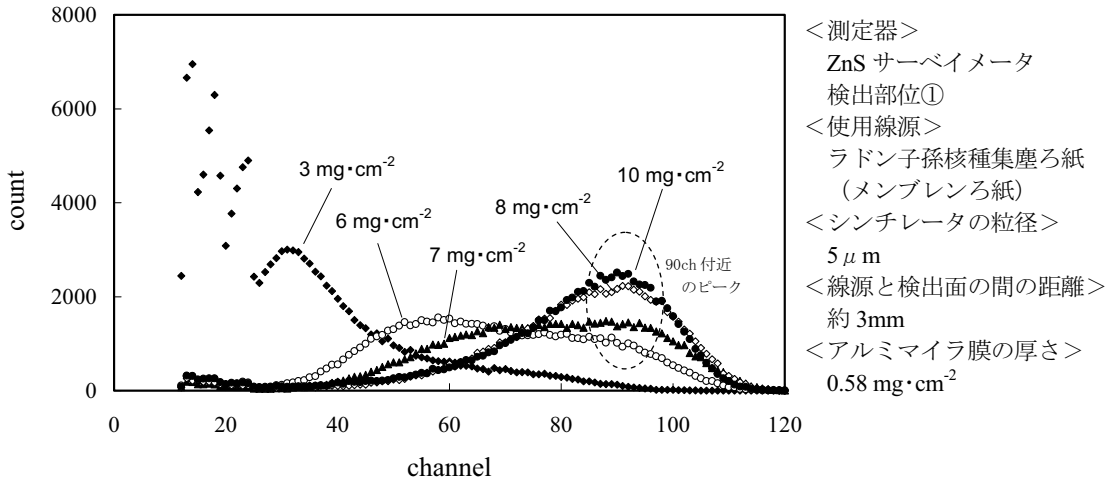


図 4.1 シンチレータの厚みが α 線の飛程以下の場合の波高スペクトル

図 4.1 では、ZnS 量が $8\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 以上のシンチレータでは 90ch 付近にひとつのピークが現れるが、ZnS 量が少なくなるに連れてスペクトルのピークが低エネルギー側に移って行くのが分かる。これは、図 4.2 に示すように、シンチレータの厚みが α 線の飛程に満たない場合（図 4.2 の【a】や【b】の場合）は、エネルギーの一部しかシンチレータに吸収されない α 線が多くなり、その結果、波高スペクトルのピークの位置がシンチレータの厚さに応じて変わってくると考えられる。しかし、シンチレータが薄い場合でもエネルギーの大部分がシンチレータに吸収される α 線も存在するため、スペクトルを良く見ると、90ch 付近にエネルギーの大部分が吸収された α 線によるピークも確認できる。

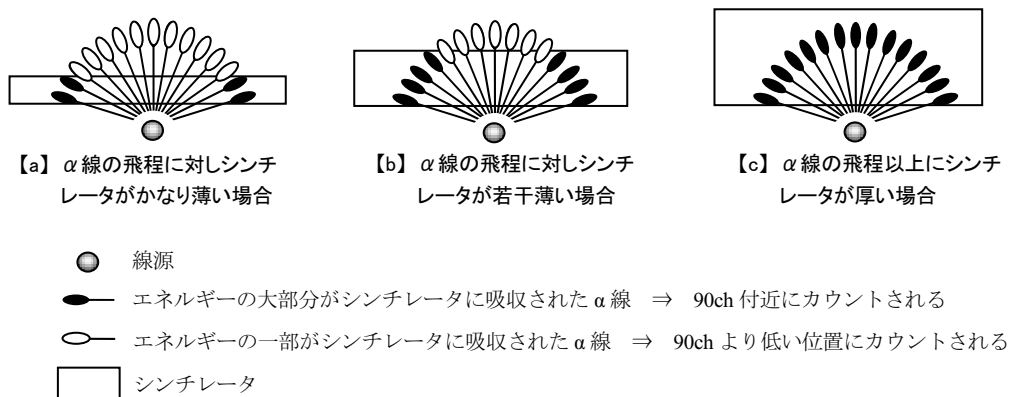


図 4.2 シンチレータが薄い場合の α 線のエネルギー吸収の概念図

2) シンチレータの厚みが α 線の飛程以上の場合

シンチレータの厚みが α 線の飛程以上の場合は、シンチレータ内で α 線のエネルギーをほぼ全て吸収することができるため、波高スペクトル上ではピークがひとつ確認される。しかし、シンチレータが過剰に厚い場合、シンチレーション光がシンチレータ内で減衰し、結果的に光電子増倍管に集光されるシンチレーション光の強度が低下するため、スペクトルが低エネルギー側にずれてくる。図 4.3 にシンチレータの厚みが α 線の飛程以上の場合の波高スペクトルを示す。

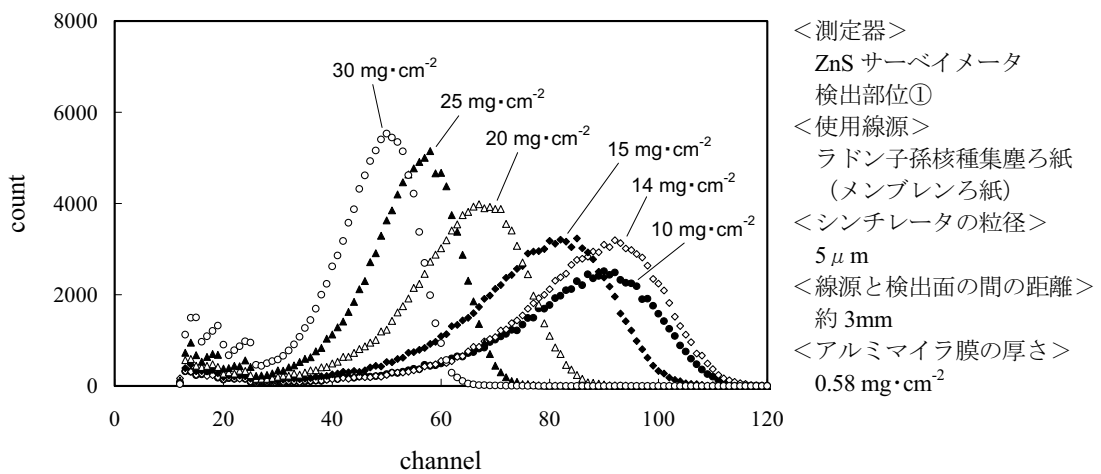


図 4.3 シンチレータの厚みが α 線の飛程以上の場合の波高スペクトル

図 4.3 のように、ZnS 量が $14\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ まではピークの位置が 90ch 付近に現れるが、ZnS 量がそれ以上になると低エネルギー側にスペクトルがずれ、ピークの位置が低チャンネル側に移っていくのが分かる。

4.2 検出部位によるスペクトルの変化

ZnS 検出器では、ライトガイドによって集光されたシンチレーション光を基に計数信号（計数パルス）をつくるため、ライトガイドによる光の減衰や集光率が波高スペクトルに大きく寄与する。従来、サーベイメータはシンチレーションカウンタとして利用しているため、パルス波高の相違は測定値にあまり影響しないが、本研究では波高弁別精度の確認を主目的としているためスペクトルの変化を確認しておく必要がある。そこで、その影響を把握するため、検出面の位置依存性を確認した。

1) ZnS サーベイメータの場合

ZnS サーベイメータは、身体や物品の汚染検査を主目的としているため、一度に広い面積をサーベイできるよう検出面を大きくすることが要求される。このため、今回の試験に使用した ZnS サーベイメータの設計では、広い検出面で発生したシンチレーション光を一箇所（光電子増倍管）に集光する必要があり、ライトガイドにプリズムを使用している。

サーベイメータの検出面の位置依存性の確認は、検出面を5等分し、 ^{241}Am 線源を用いて検出部位ごとの波高スペクトルを測定することにより確認した。図4.4.1に検出面の分割図(サーベイメータ)を、図4.4.2に検出部位による波高スペクトルの変化(サーベイメータ)を、表4.1に検出部位によるピーク形状の変化(サーベイメータ)を示す。なお、ここで使用したシンチレータは、シンチレータ中のZnS量が $10\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、ZnSの粒径が $5\mu\text{m}$ とした。

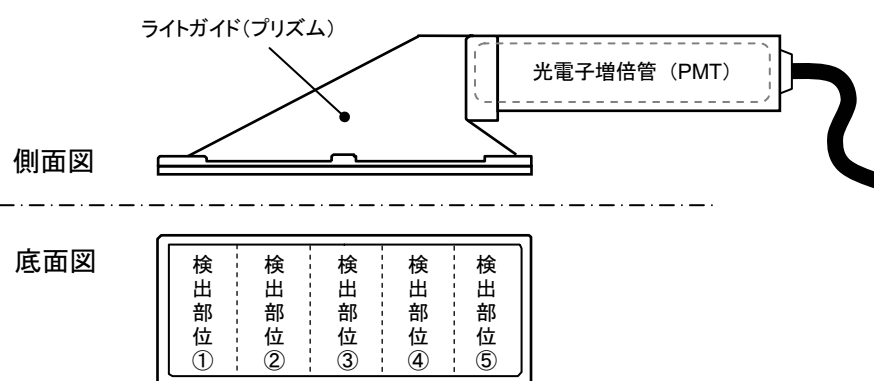


図 4.4.1 検出面の分割図(サーベイメータ)

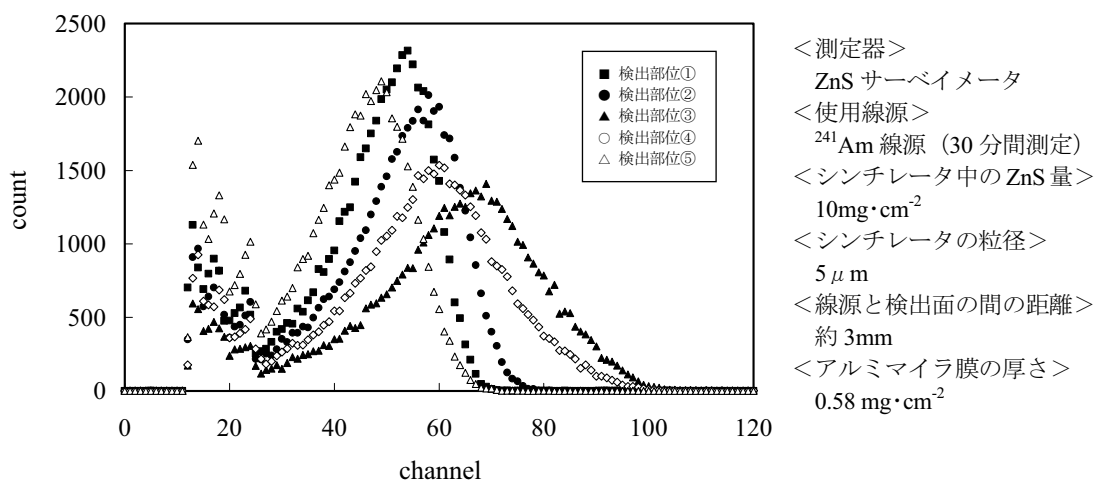


図 4.4.2 検出部位による波高スペクトルの変化(サーベイメータ)

表 4.1 検出部位によるピーク形状の変化(サーベイメータ)

	最大チャンネル (ch)	ピーク位置 (ch)	ピークの高さ (count)	半値幅 (ch)
検出部位①	73	54	2315	20
検出部位②	81	58	2013	22
検出部位③	111	69	1409	30
検出部位④	107	61	1536	28
検出部位⑤	76	49	2107	21

図 4.4.2 及び表 4.1 より、 α 線を測定した際に得られる波高スペクトルは検出部位により変化し、次のような傾向があることが分かる。

- <傾向 1> 発光地点（検出位置）から光電子増倍管までのプリズム内の光の通過距離が長くなるほどスペクトルの最大チャンネルが小さくなる（検出部位①や検出部位⑤）。
- <傾向 2> 検出面の中央部（検出部位③や検出部位④）で測定した場合、得られる波高スペクトルの半値幅が大きくなる。

上記傾向の要因として、<傾向 1>に関してはプリズム内での光の減衰が影響していると考えられ、また、<傾向 2>に関してはシンチレーション光の集光率の相違が影響していると考えられる。

<傾向 2>の原因を明らかにするため、各検出部位を更に 4 分割し、検出部位ごとにスペクトルの変化を確認した。図 4.5.1 にサーベイメータの検出部位の分割図を示し、図 4.5.2.1～図 4.5.2.5 に検出部位のわずかなズレによる波高スペクトルの変化を示す。

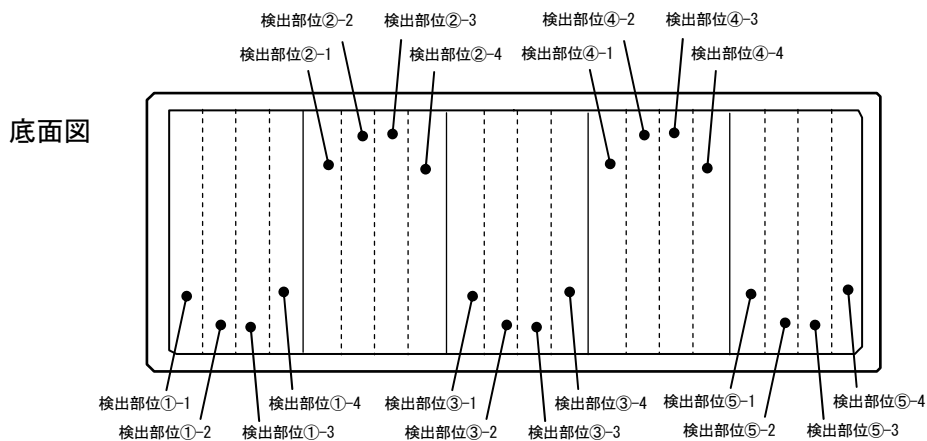


図 4.5.1 サーベイメータの検出部位の詳細分割図

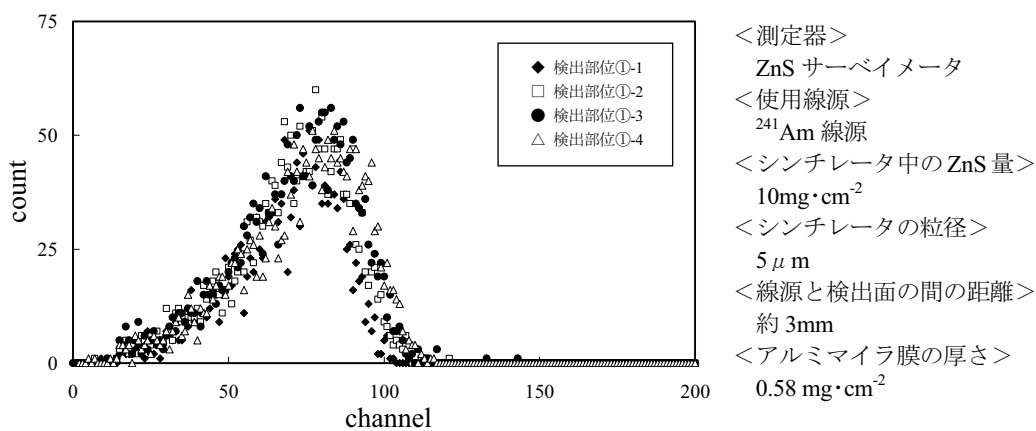


図 4.5.2.1 検出部位のわずかなズレによる波高スペクトルの変化(検出部位①)

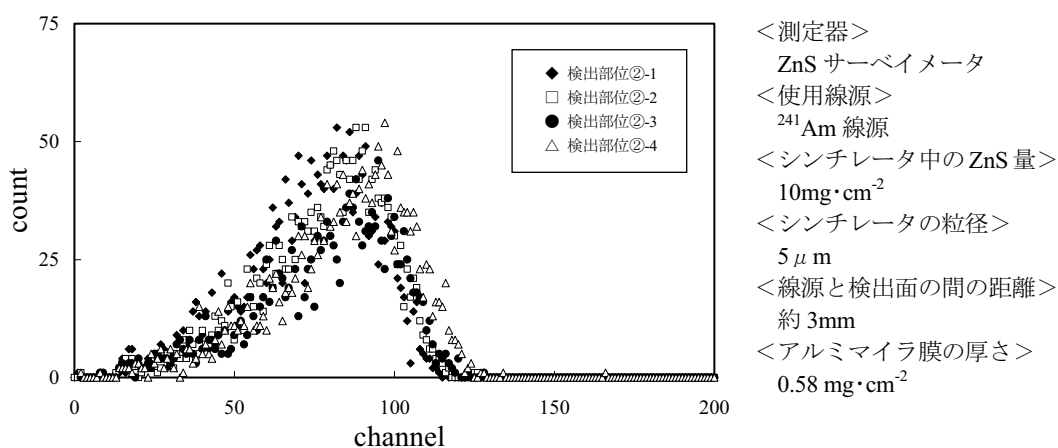


図 4.5.2.2 検出部位のわずかなズレによる波高スペクトルの変化(検出部位②)

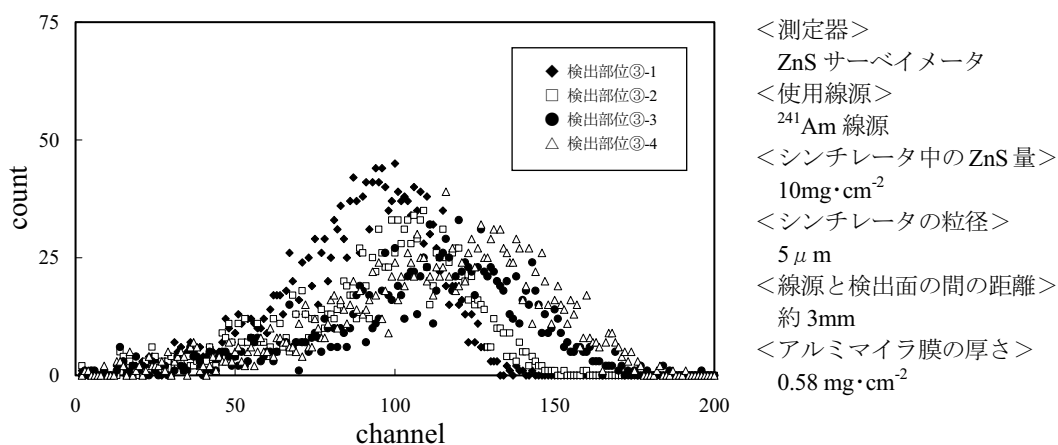


図 4.5.2.3 検出部位のわずかなズレによる波高スペクトルの変化(検出部位③)

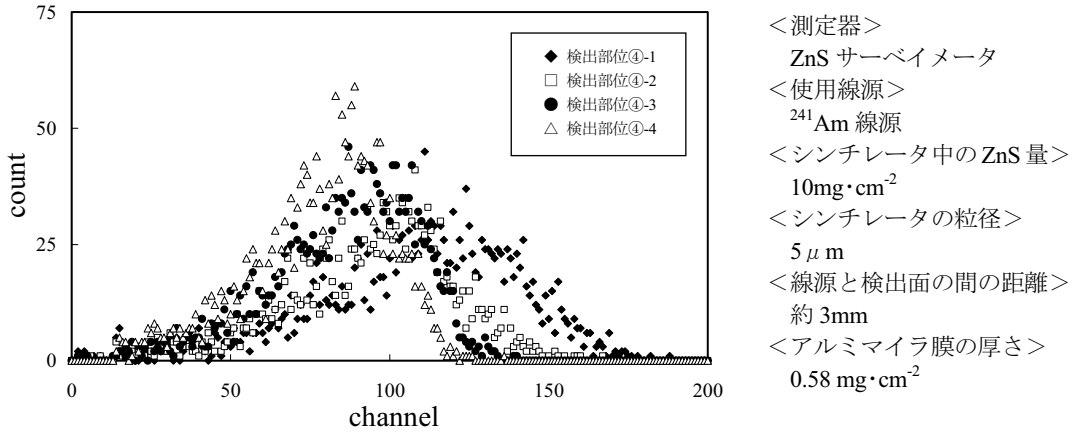


図 4.5.2.4 検出部位のわずかなズレによる波高スペクトルの変化(検出部位④)

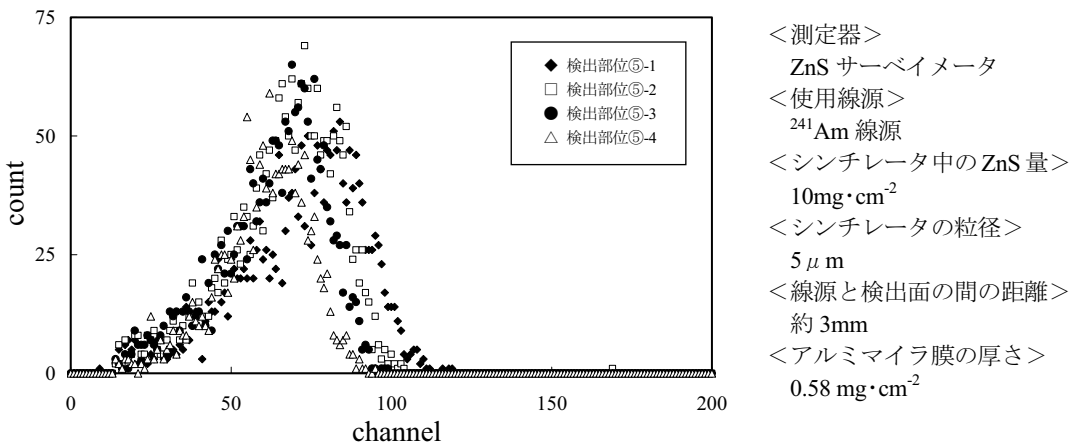


図 4.5.2.5 検出部位のわずかなズレによる波高スペクトルの変化(検出部位⑤)

図 4.5.2.1～図 4.5.2.5 より、検出部位③及び検出部位④においては、検出部位のわずかなズレでスペクトルが大きく変化しているのが確認できる。これは当該部分ではプリズム（ライトガイド）の形状が複雑で検出位置によってシンチレーション光の集光率がばらつくためと考えられる。一方でプリズムの形状が複雑ではない検出部位①では、検出部位を細分化してもスペクトルに変化があまり見られないことが分かる。この結果は、波高弁別精度に大きな影響を与えるものと考えられる。

2) ZnS ダストモニタの場合

ダストモニタのライトガイドは円状の平板であるため、サーベイメータほど位置依存性は大きくはないと予想されたが、ライトガイドの形状以外にも検出器の有効径（φ40mm）やPMTの光電陰極の大きさ（φ46mm）の影響等も考えられることから、ダストモニタについても検出面の位置依存性を確認した。ただし、ダストモニタの場合は線源及び検出面が円状であるこ

とから、検出面を細分化するのではなく、中心部をくりぬいた HE-40T ろ紙を検出面に貼り付けることにより検出面の有効径を狭め、検出器の有効径の違いによるスペクトルの変化を確認した。図 4.6.1 にダストモニタ検出面の有効径の絞り方を示し、図 4.6.2 に検出面の有効径の違いによる波高スペクトルの変化 (^{241}Am 線源) を示す。

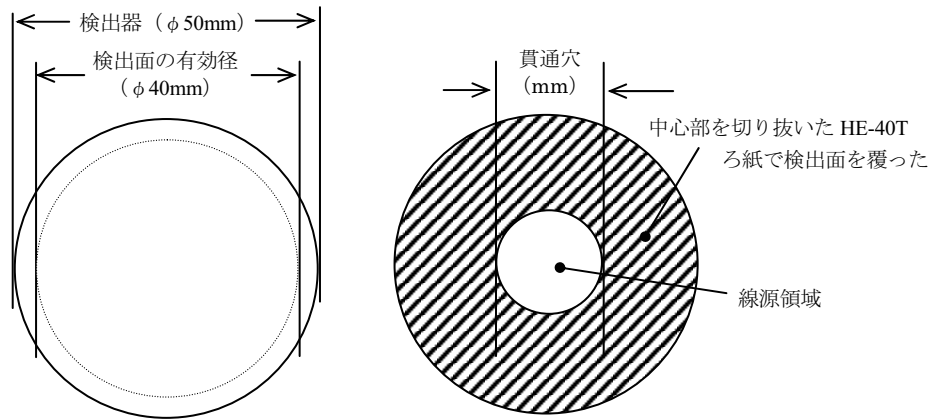


図 4.6.1 ダストモニタ検出面の有効径の絞り方

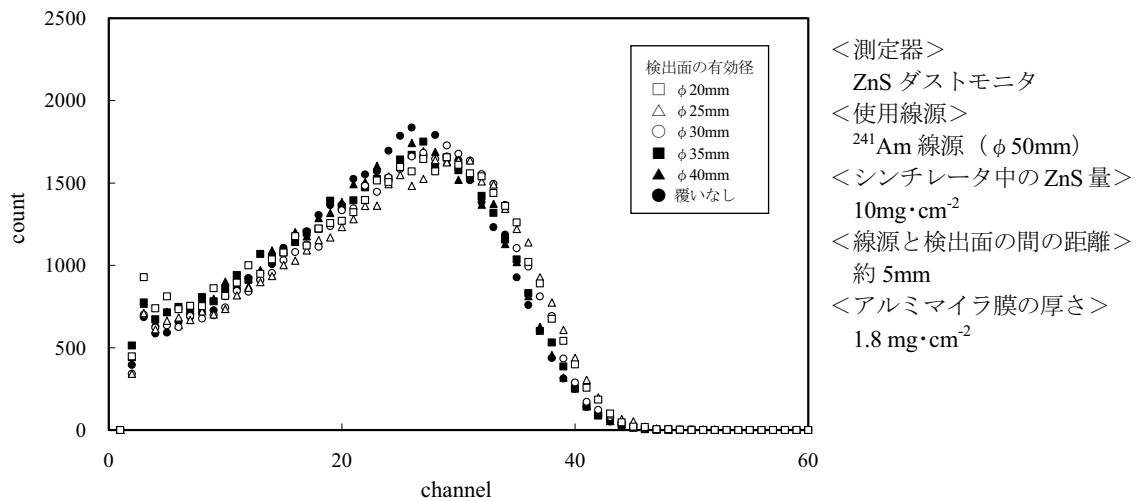


図 4.6.2 検出面の有効径の違いによる波高スペクトルの変化 (^{241}Am 線源)

図 4.6.2 より線源領域の直径が $\phi 35\text{mm}$ 以上のスペクトルは低エネルギー側に若干ずれているのが分かる。これは、ライドガイドの縁の部分の影響や幾何学的なものの影響 (光陰極、ライドガイド、線源領域の関係) によりシンチレーション光の集光率に変化が現れていると推測されるが、スペクトルの変化がわずかであったことから、サーベイメータほど検出面の位置依存性はないといえる。

5. ZnS 検出器への波高弁別技術の適用に関する確認結果

これまでの波高スペクトル測定結果から、シンチレータの厚みを α 線の飛程以上にすることによって波高弁別が可能となり、また、サーベイメータにあつては、検出面をある程度制限することによって波高弁別精度の向上が期待できることが分かった。ここでは、実際に ZnS サーベイメータ及び ZnS ダストモニタに波高弁別技術を適用した場合の除去率を求めることにより波高弁別技術の適用の効果について確認する。また、シンチレータを厚くすることによって、検出器の性能が変わることも予想されるため、JIS 規格に関連した試験を実施する。

なお、ダストモニタとサーベイメータでは、製造メーカーの関係上、シンチレータやライトガイドの仕様が異なっており全く同じ条件ではないが、これらの相違は波高弁別精度に大きく寄与するものではない(6章で後述する)。表 5.1 に試験に用いたサーベイメータとダストモニタの相違点を示す。

表 5.1 試験に用いたサーベイメータとダストモニタの主な相違点

	サーベイメータ (TCS-231)	ダストモニタ (RD-361Z)
シンチレータの粒径	5 μ m 又は 10 μ m	不明
ライトガイドの形状	図 4-1 に示すような複雑な形状	図 2-1 に示すような円形の平板状のもの
アルミマイラ膜の厚さ	0.58 mg \cdot cm ⁻²	1.8 mg \cdot cm ⁻²
検出器と線源までの距離	3 mm	5 mm

5.1 サーベイメータ (TCS-231) への適用に関する評価結果

サーベイメータを適用した場合の効果を確認するため、シンチレータの厚みを変更した場合の除去率の変化、機器効率の変化及び検出部位による除去率の変化を確認した。

5.1.1 シンチレータの厚みによる除去率の変化 (サーベイメータ)

サーベイメータのシンチレータの厚みとして最適な厚さを求めるため、厚さの異なるシンチレータを用いて除去率を求めた。図 5.1.1～図 5.1.14 にシンチレータの厚みごとの波高スペクトルを示し、図 5.2 にシンチレータ中の ZnS 量と除去率の関係を示す。

なお、これ以降、図中の凡例における“HE-40T ろ紙”、“HE-40TA ろ紙”、“メンブレンろ紙”とは、ラドン子孫核種を集塵したろ紙を意味しており、これらは、ラドン子孫核種の線源として扱っている。

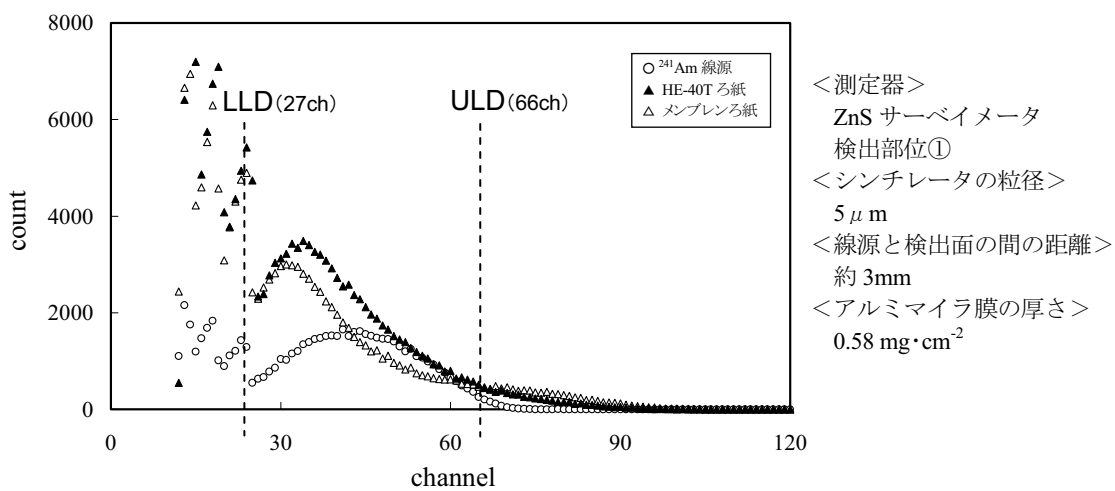


図 5.1.1 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $3\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)

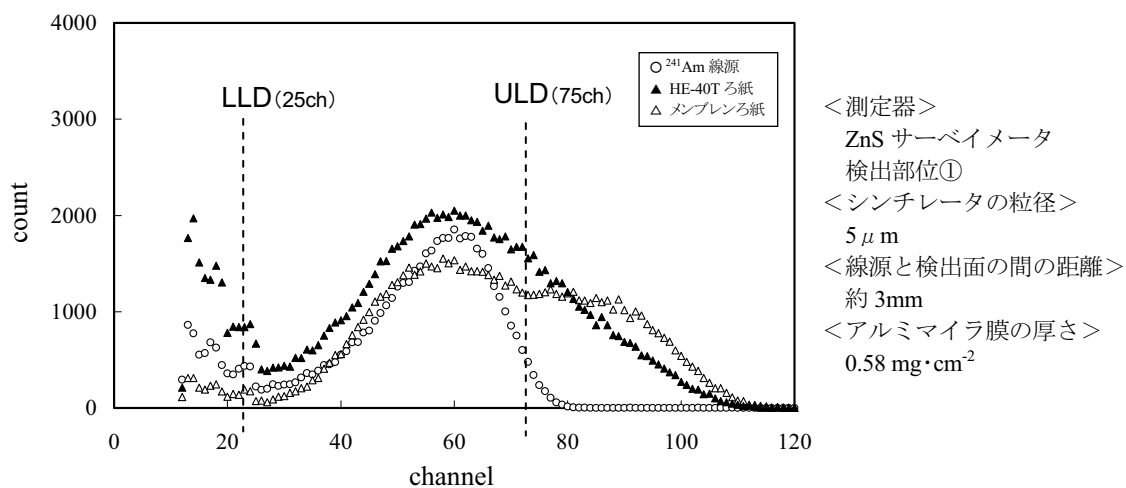


図 5.1.2 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $6\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)

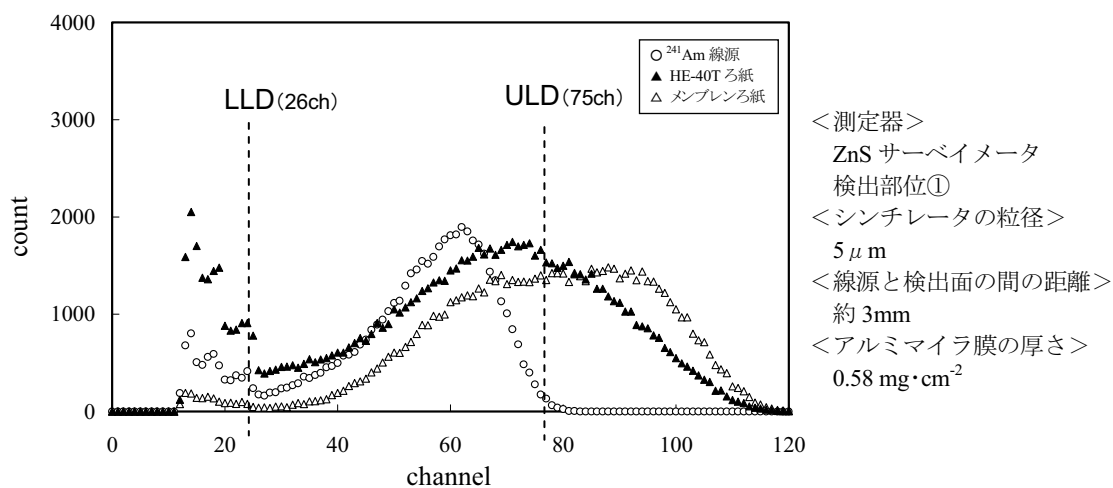


図 5.1.3 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $7\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)

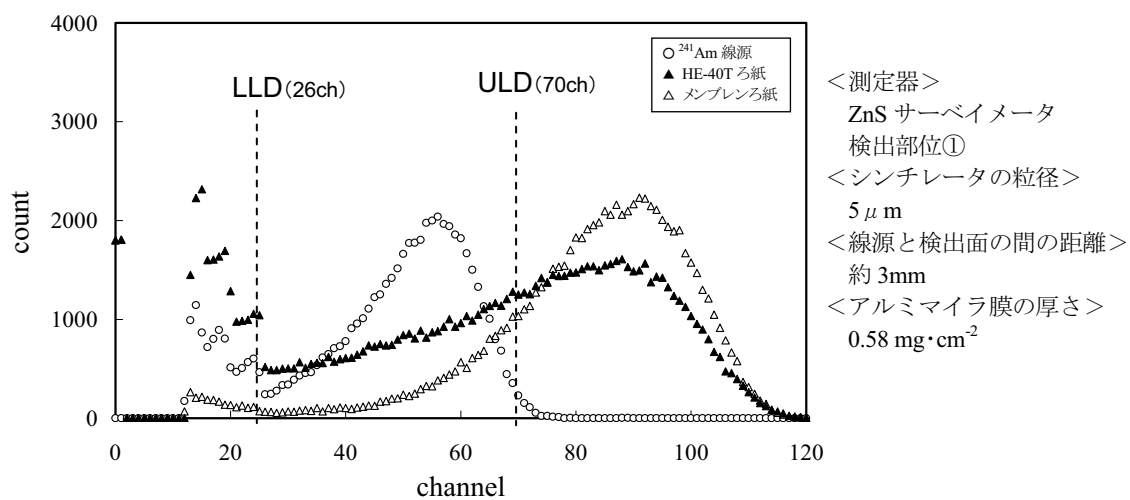


図 5.1.4 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $8\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)

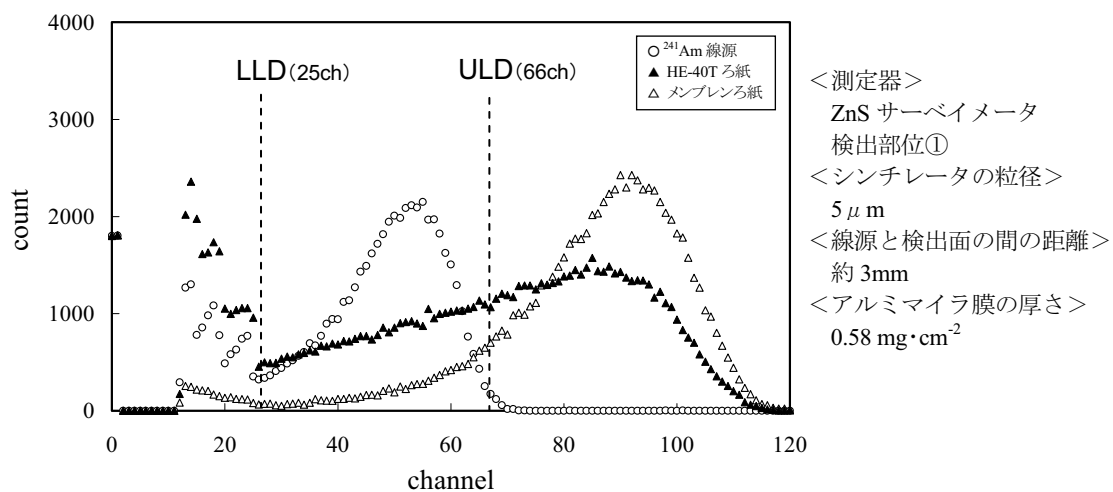


図 5.1.5 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $9\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)

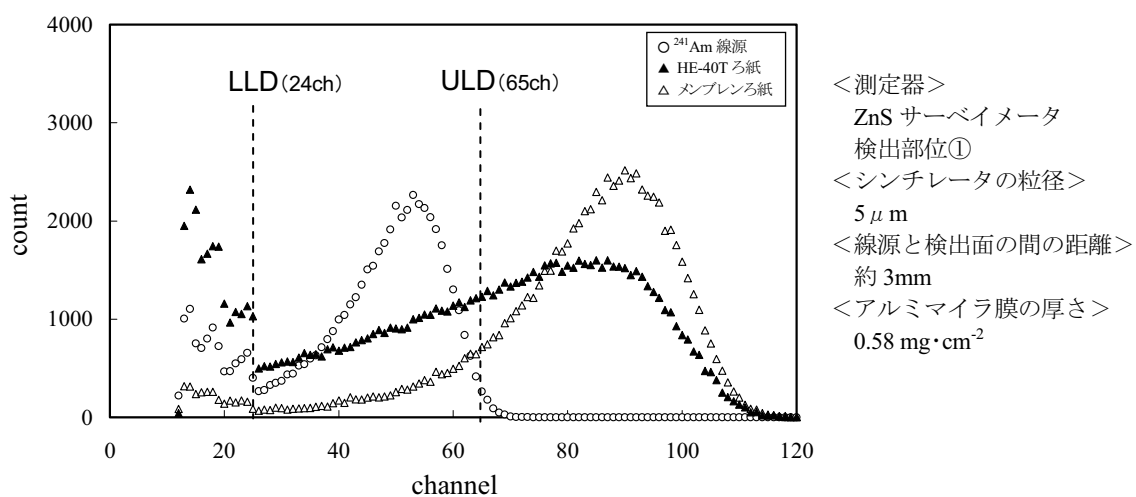


図 5.1.6 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $10\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)

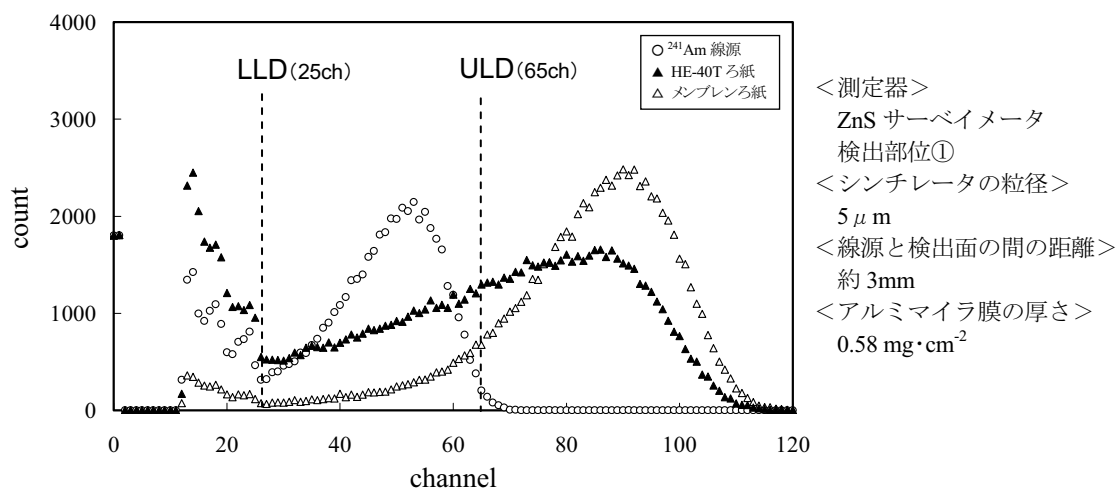


図 5.1.7 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $11\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)

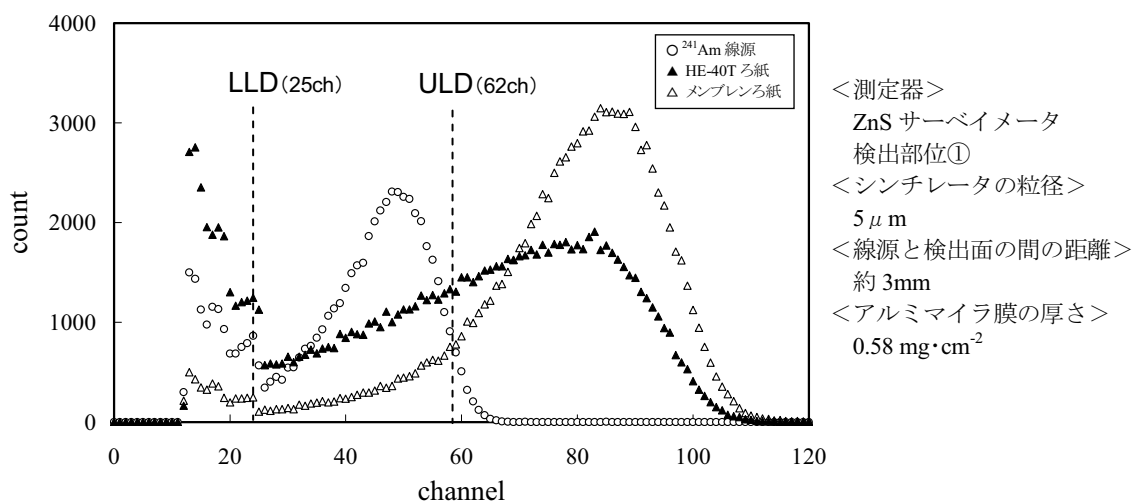


図 5.1.8 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $12\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)

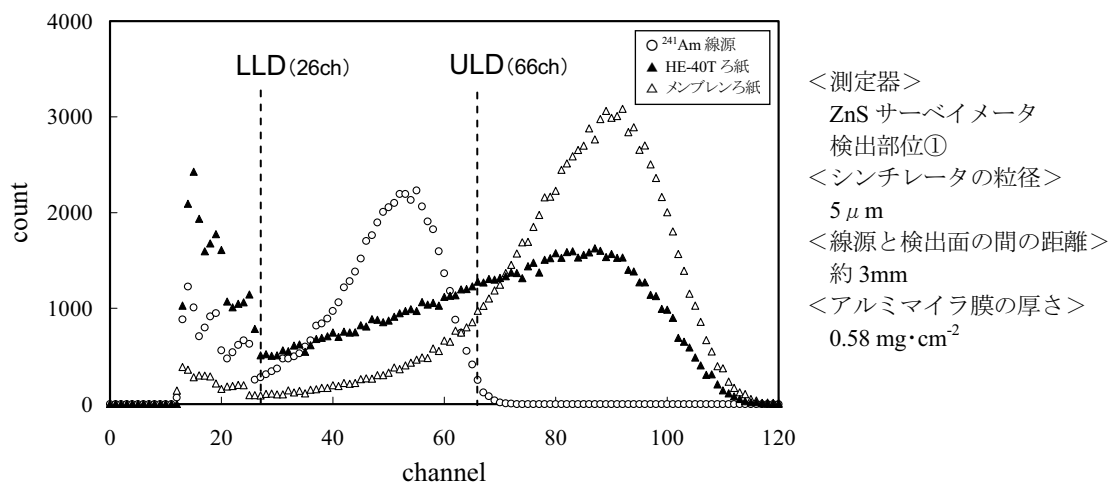


図 5.1.9 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $13\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)

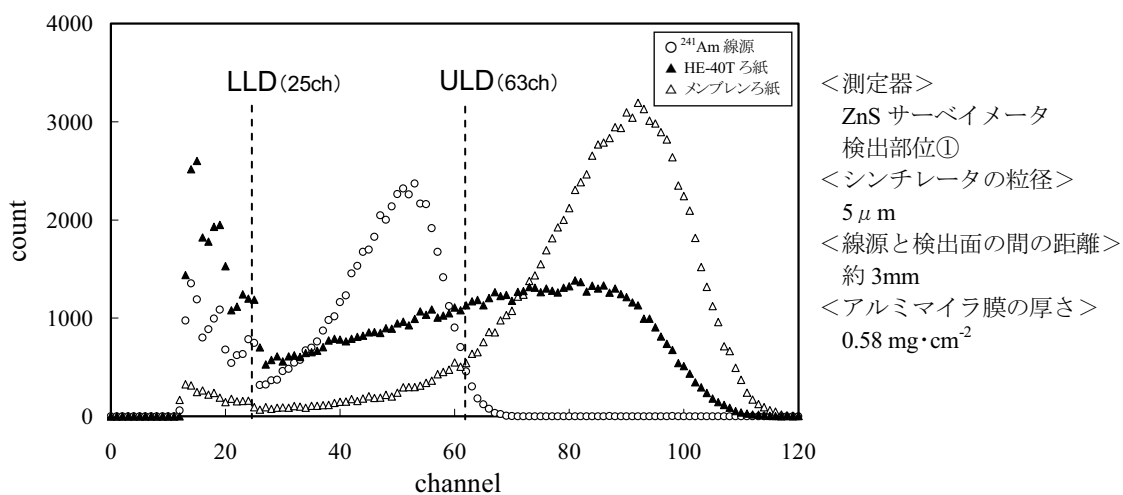


図 5.1.10 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: $14\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)

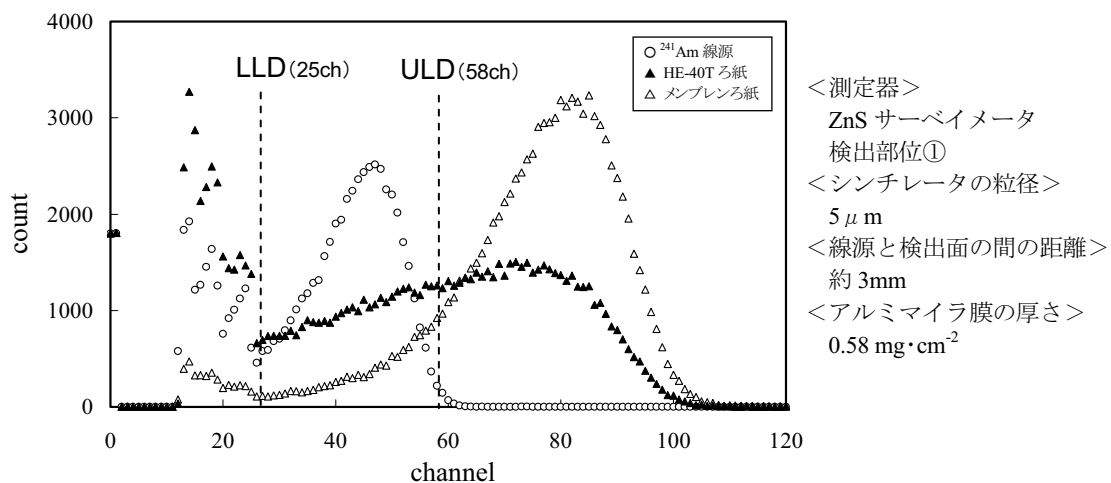


図 5.1.11 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: 15mg·cm⁻²)

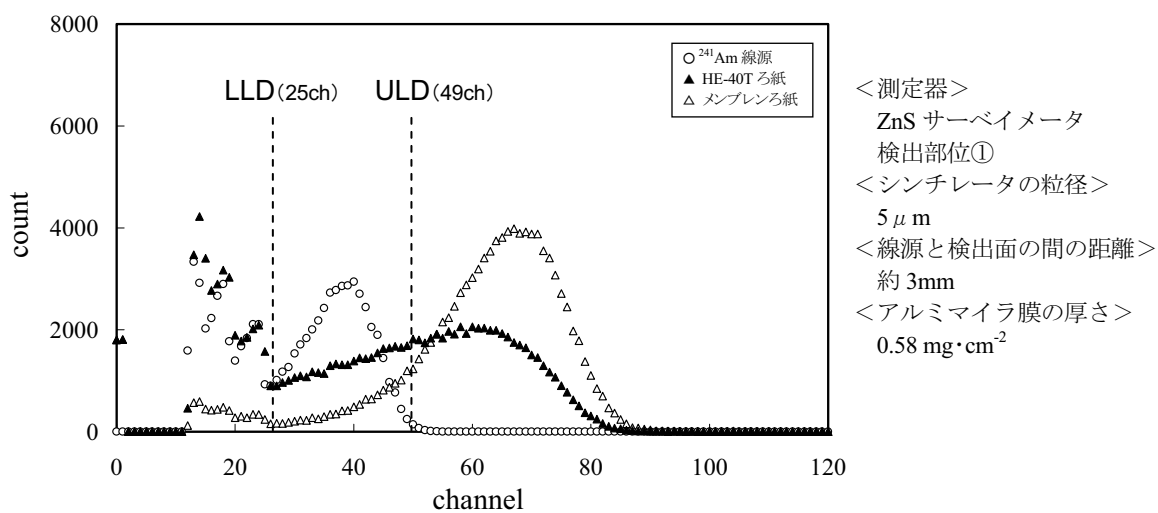


図 5.1.12 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: 20mg·cm⁻²)

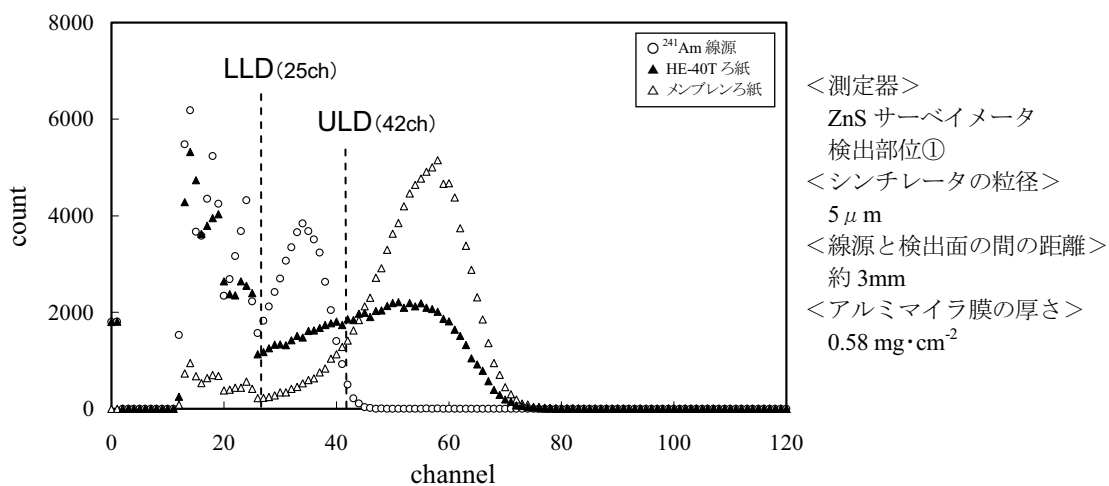


図 5.1.13 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: 25mg·cm⁻²)

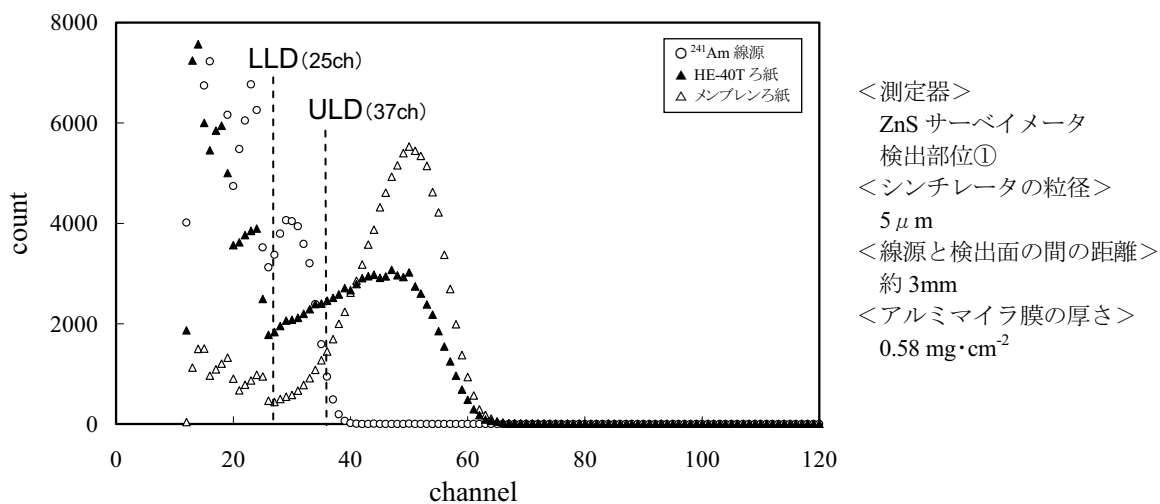


図 5.1.14 厚みの異なるシンチレータの波高スペクトル (ZnS 量: 30mg·cm⁻²)

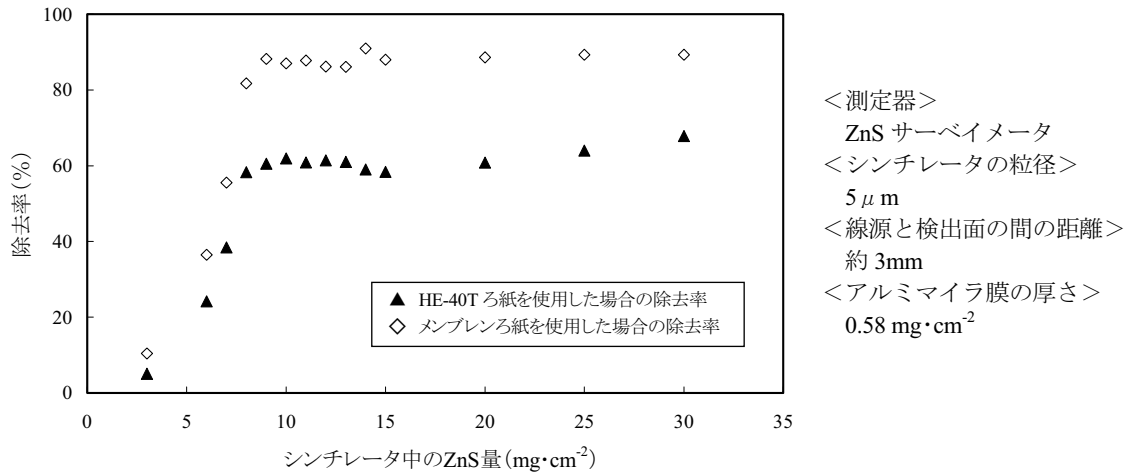


図 5.2 シンチレータ中の ZnS 量と除去率の関係(サーベイメータ)

図 5.1 より、今回の試験に用いたサーベイメータの場合、シンチレータ中で α 線のエネルギーをほぼ全て吸収するために必要な ZnS 量は、 ^{241}Am (α 線のエネルギー：5.5MeV) の場合で $7\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 以上、ラドン子孫核種 (α 線のエネルギー：7.7MeV) の場合で $9\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 以上であることが分かる。この結果、図 5.2 に示すように、波高弁別精度 (除去率) も $9\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 以上になると高い値で安定し、そのときの除去率は、捕集ろ紙に HE-40T ろ紙を使用した場合で 60%前後、メンブレンろ紙を使用した場合で 85%前後であった。

5.1.2 シンチレータの厚みによる機器効率の変化 (サーベイメータ)

放射線測定器として利用する場合、機器効率を確認する必要があることから、 ^{241}Am 線源を用いてシンチレータの厚みによる機器効率の変化を確認した。図 5.3 にシンチレータ中の ZnS 量と機器効率の関係 (サーベイメータ) を示す。

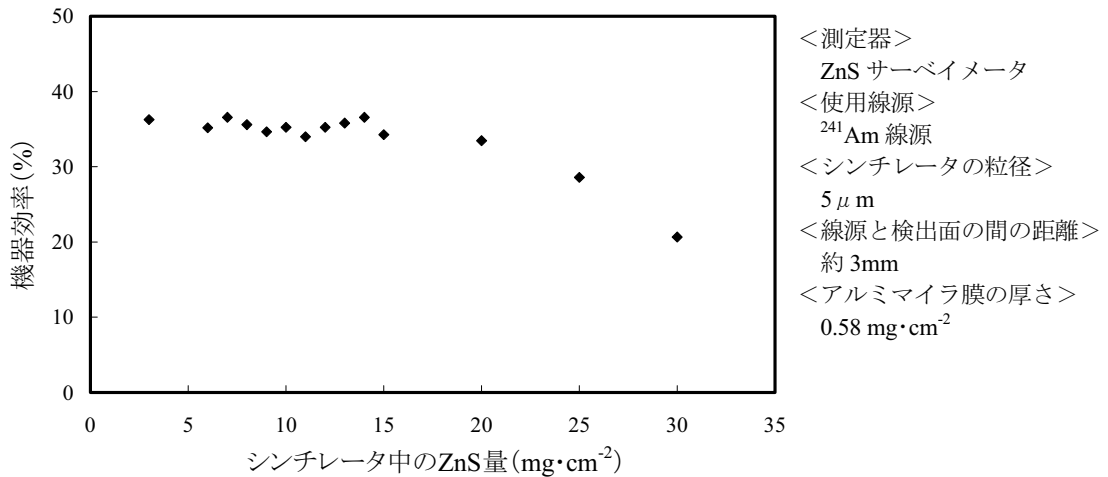


図 5.3 シンチレータ中の ZnS 量と機器効率の関係(サーベイメータ)

図 5.3 より、 ^{241}Am 線源を測定した場合、シンチレータ中の ZnS 量が $15\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 程度までは機器効率が 35%程度であるが、それ以上の含有量になると機器効率は下がり、ZnS 量が $30\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ では約 20%に落ち込んでいる。これは、4.1 2) で述べたとおり、 α 線の飛程以上にシンチレータが厚い場合は、シンチレータ内での光の減衰により波高スペクトルが低エネルギー側にずれ、 α 線計測パルスの一部が LLD によって排除されるためである(図 5.1 参照)。

5.1.3 検出部位による除去率の変化 (サーベイメータ)

サーベイメータの場合、ライドガイド (プリズム) の形状が複雑であることから検出面の位置依存性が大きくなるのがこれまでに確認されている。ここでは、位置依存性の影響を確認するため、検出部位ごとに除去率を求める。使用したシンチレータは、5.1.1 及び 5.1.2 の結果を踏まえ、 $9\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 以上で、かつ、厚すぎないシンチレータとして、ZnS 量が $10\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ のものを選定した。表 5.2 に検出部位ごとの除去率評価結果 (サーベイメータ) を示す。

表 5.2 検出部位ごとの除去率評価結果(サーベイメータ)

検出部位*	除去率評価結果	
	HE-40T ろ紙を使用	メンブレンろ紙を使用
検出部位①	62 %	89 %
検出部位②	61 %	88 %
検出部位③	53 %	79 %
検出部位④	48 %	73 %
検出部位⑤	55 %	82 %

* 検出部位の分割図については、図 4.4.1 を参照

表 5.1 より最も除去率が高くなっているのは検出部位①であるが、これは、4.2 で述べたように、検出部位①で測定したスペクトルは半値幅が最も小さく、かつ、検出部位のわずかなズレによる波高スペクトルの変化(プリズムによる集光率の変化)が小さいためである。よって、サーベイメータで波高弁別を行う場合は、現実的ではないが、検出部位を制限した状態で使用する必要がある。なお、検出面を制限しない場合は、検出器全体の機器効率を維持するため ULD を高く設定する必要があり、この場合は除去率がかなり低い値となり、波高弁別技術の取り入れ効果がほとんど期待できなくなる。

5.2 ダストモニタ (RZ-361Z) への適用に関する評価結果

サーベイメータ場合と同様に、シンチレータの厚みを変更した場合の除去率の変化、機器効率の変化及び検出部位による除去率の変化を確認した。なお、機器効率の変化については、極端に厚い/薄いシンチレータを用意できなかったため、ほとんど変わらない値(約 39%)となり、詳細な変化を確認することはできなかった。

5.2.1 シンチレータの厚みによる除去率の変化（ダストモニタ）

図 5.4 にダストモニタ用 ZnS 検出器の波高スペクトルの例を示し、図 5-5 にシンチレータ中の ZnS 量と除去率の関係を示す。

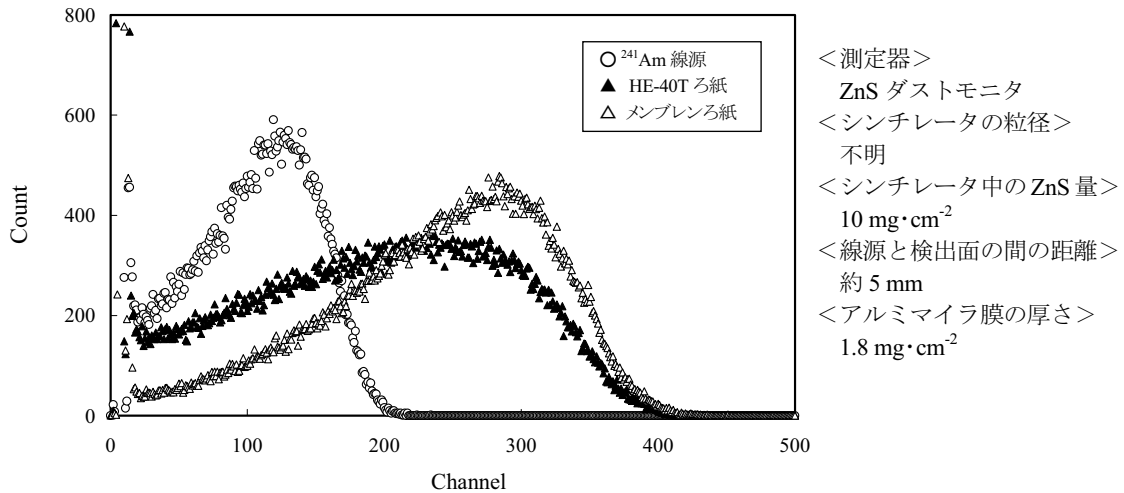


図 5.4 ダストモニタ用 ZnS 検出器の波高スペクトルの例

図 5.4 をサーベイメータの波高スペクトル図 5.1.6 と比較すると、全体的に低エネルギー側になまっていた。主な原因としては、ダストモニタに比べてマイラ膜が厚く（約 3 倍＝約 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 厚い）、検出面までの距離も長いこと（約 1.7 倍）が考えられ、その他にもシンチレータの相違（バインダー量、粒径等）の影響もあると考えられる。

シンチレータの厚みによる除去率の変化の傾向に関しては、サーベイメータによる試験の結果と同様に、シンチレータ中の ZnS 量が増えるにつれて除去率が徐々に上がりやがて一定になる傾向が確認されたが、サーベイメータと比較してアルミマイラ膜や空気層が厚いため、より薄いシンチレータで除去率が一定になり、また、除去率そのものの値も全体的に若干低くなっていた。図 5.5 にシンチレータ中の ZnS 量と除去率の関係（ダストモニタ）を示す。

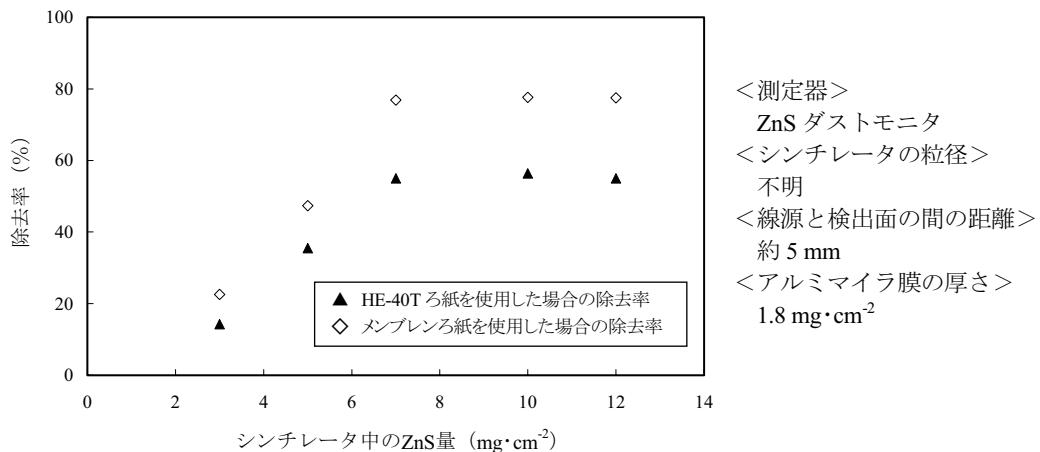


図 5.5 シンチレータ中の ZnS 量と除去率の関係(ダストモニタ)

5.2.2 検出部位による除去率の変化（ダストモニタ）

ダストモニタの場合、検出器の有効径を絞ることで若干ではあるが波形が変化することが確認されている（図 4.6.2）。ここでは検出面の有効径と除去率の相関を確認する。表 5.3 にダストモニタの検出面の有効径と除去率の相関を示す。また、図 5.6 に検出面の有効径の違いによる波高スペクトルの変化（HE-40T ろ紙）を示す。なお、測定に用いたシンチレータの ZnS 量は $10 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ とした。

表 5.3 ダストモニタの検出面の有効径と除去率の相関

検出器の有効径*	除去率（使用ろ紙：HE-40T）
φ 40mm	56%
φ 35mm*	58%
φ 30mm*	59%
φ 25mm*	56%
φ 20mm*	55%

*有効径の絞り方については図 4.6.1 を参照のこと

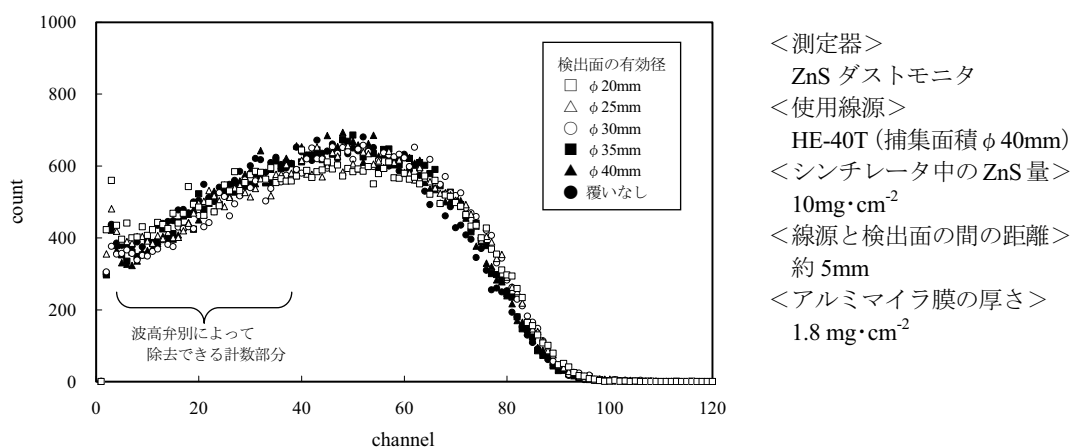


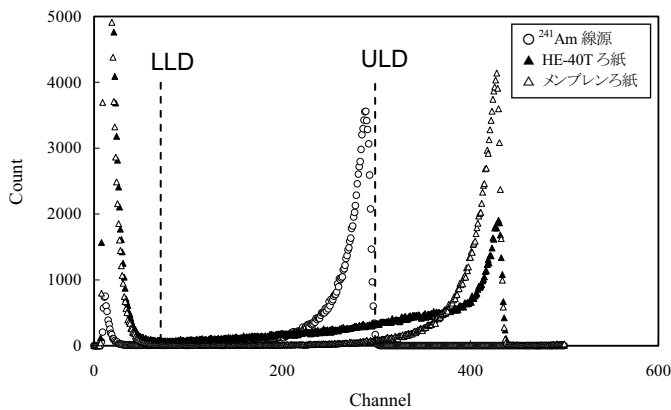
図 5.6 検出面の有効径の違いによる波高スペクトルの変化(HE-40T ろ紙)

表 5.3 より、有効面積を絞った場合の除去率の評価結果は、数%以内の相違であり、有効径を絞ることによる効果はそれほど期待できないことが分かった。これは、有効径を絞ることによって HE-40T ろ紙の波高スペクトルのピークは高エネルギー側に若干動くものの、低エネルギー部分の計数には大きな変化が見られないためであると考えられる。

このスペクトルの変化の原因については、波高スペクトルのピークの位置や形状は主に検出器の特性（シンチレータの発光強度や分解能）に左右されるが、低エネルギー部分の計数は主にろ紙上での α 線の自己吸収が原因となって生じているためと考えられる。この結果、有効径を絞っても除去できる計数（低エネルギー部分の計数）の変化が小さいため、除去率はあまり変わらない結果となったと考えられる。

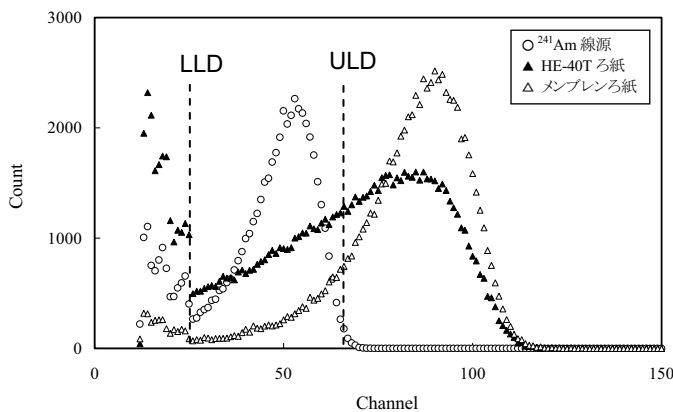
5.3 半導体検出器との比較

本研究の目的は、ZnS 検出器を半導体検出器の代替として使用した場合の適正評価であることから、これまでの試験結果から波高弁別に最適と思われる条件（シンチレータ ZnS 量が $10 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、サーベイメータの場合は検出面を検出部位①に制限）での除去率を半導体検出器の場合と比較した。図 5.7 に ZnS 検出器と半導体検出器の波高スペクトルの比較例を、また、表 5.4 に ZnS 検出器と半導体検出器の除去率の比較を示す。なお、半導体検出器による測定時には、線源と検出器表面の距離を実際の使用状態と同じにするため、サーベイメータと比較する場合は 3mm、ダストモニタと比較する場合は 5mm とした。



<測定器>
半導体検出器
<線源と検出面の間の距離>
約 3 mm

<半導体検出器の波高スペクトル>



<測定器>
ZnS サーベイメータ
<測定部位>
測定部位①
<シンチレータの粒径>
 $5 \mu\text{m}$
<シンチレータ中の ZnS 量>
 $10 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$
<線源と検出面の間の距離>
約 3 mm
<アルミマイラ膜の厚さ>
 $0.58 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$

<ZnS サーベイメータの波高スペクトル>

図 5.7 ZnS 検出器と半導体検出器の波高スペクトルの比較例

表 5.4 ZnS 検出器と半導体検出器の除去率の比較

測定器 捕集ろ紙	サーバイメータを模擬した試験		ダストモニタを模擬した試験	
	ZnS 検出器*1	半導体検出器*2	ZnS 検出器*3	半導体検出器*4
HE-40T ろ紙	62%	70%	56%	68%
メンブレンろ紙	87%	97%	75%	97%

- *1 ZnS シンチレータの粒径 $5\mu\text{m}$ 、シンチレータ内の ZnS 量 $10\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、
検出器と線源の距離 3mm、マイラ膜の厚さ $0.58\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$
- *2 検出器と線源の距離 3mm
- *3 ZnS シンチレータの粒径不明、シンチレータ内の ZnS 量 $10\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、
検出器と線源の距離 5mm、マイラ膜の厚さ $1.8\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$
- *4 検出器と線源の距離 5mm

波高スペクトルを比較すると、半導体検出器の場合は ZnS 検出器の場合に比べて半値幅が極めて小さいスペクトルとなり、低エネルギー側へのなまりが少ないことが分かる。

除去率に関しては、放射線管理に使用している HE-40T ろ紙をラドン子孫核種の捕集ろ紙(線源)とした場合で比較すると、ZnS 検出器の除去率が 60%程度であるのに対し半導体検出器では 70%程度であり、それほど大きな違いが生じなかった。しかしこれは、グラフ上で ULD の位置を正確に(可能な限り低エネルギー側に)決定することができたためであり、仮に ULD の位置が高エネルギーに少しずれると ZnS 検出器の場合は除去率が大きく減ってしまう。実際の計測機器の校正においては、ある程度余裕を持った ULD の設定を行うことから、半導体検出器の除去率は概ね表 5.4 の値であると解釈してよいが、ZnS 検出器を現場機器に適用した場合の除去率は 50%程度になると解釈しておくことが妥当と考える。

5.4 ウラン線源による除去率の評価

ウラン線源からの α 線のエネルギーは 4.2 MeV (^{238}U) 及び 4.8 MeV (^{234}U) が主であり、Am 線源からの α 線よりもエネルギーが低い。よって、ウランとラドン子孫核種の波高弁別の精度は Am 線源を用いた場合よりも向上する。図 5.8 にウラン線源を用いた場合の波高スペクトルの例を示し、表 5.5 にウラン線源を用いた場合の除去率と機器効率を示す。

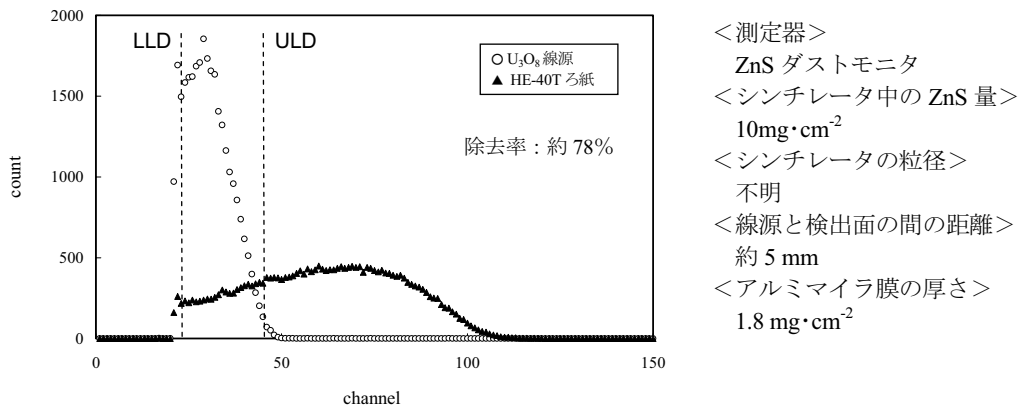


図 5.8 ウラン線源を用いた場合の波高スペクトルの例

表 5.5 ウラン線源を用いた場合の除去率と機器効率

項目	サーベイメータ	ダストモニタ
HE-40T ろ紙を使用した場合の除去率	81% (62%)	78% (56%)
機器効率	26% (36%)	20% (38%)

() 内は ^{241}Am 線源を用いた場合の値を示す

ウラン線源を用いた場合、 ^{241}Am 線源を使用した場合に比べて除去率がかなり大きくなり、波高弁別技術の適用の効果が大きい。しかし、図 5.8 に示すように、ウランの計数のうち LLD によって除去される計数が大きくなり、機器効率の低下をもたらすため注意が必要である。

5.5 γ 線及び中性子線感度の確認結果

ZnS サーベイメータについては、以前から γ 線感度及び中性子感度があることが知られており、一方で、過去に中性子感度を下げるためシンチレータを薄くし現在の $3 \text{ mg} \cdot \text{cm}^2$ にした経緯もある。特に、サーベイメータとして使用する場合には、JIS 規格に基づく γ 線照射試験を実施する必要があり、また、MOX 燃料施設など中性子混在場での使用を考慮すると、参考として中性子感度を確認しておくことも重要である。

なお、ダストモニタについては γ 線感度や中性子線感度の確認が要求されておらず、また、ダストモニタを照射試験場所に移動することが困難なため照射試験は実施しないが、サーベイメータによる試験と同等な性能を有していると考えられる。

5.5.1 γ 線感度試験結果

γ 線感度は、JIS 規格に基づき ^{137}Cs γ 線源で行う必要があるが、MOX 燃料施設での使用を考慮し、 ^{241}Am γ 線源での感度試験も実施した。表 5.6 に JIS Z 4329-2004 で要求されるサーベイメータの γ 線感度試験を示す。

表 5.6 JIS Z 4329-2004 で要求されるサーベイメータの γ 線感度試験

項目	内容
試験方法	サーベイメータの場合は、直線目盛の場合には最高感度レンジ、対数目盛の場合には最低デガード、デジタル表示の場合には 2 けた目の表示をするように α 線を照射し、このときの指示値を基準値とする。次に、 α 線を照射した状態で ^{137}Cs γ 線線源を用いて 10 mGy/h 以上の γ 線を照射し、このときの指示値から基準値を差し引いた値の基準値に対する百分率を求める。
判定基準	指示値の変化が $\pm 25\%$ 以内であること。

1) 試験方法

計測機器校正室において、 ^{137}Cs 及び ^{241}Am を線源とし、ZnS サーベイメータのシンチレータの厚みを変えながら検出面に垂直になるように γ 線を照射し、波高スペクトルを測定した。また、照射によって生じた計数がシンチレータの影響によるものかを判断するため、シンチレータを取り外した状態でも照射を行った。なお、検出面における線量率は、 ^{137}Cs の場合は JIS 規格に基づき 12 mSv/h ($\approx 10\text{mGy/h}$) とし、 ^{241}Am の場合は作業環境での高線量場を想定し 1 mSv/h とした。また、Cs 照射時に限り、JIS 規格に基づく評価も実施した。

2) 試験結果

図 5.9.1 に ^{137}Cs γ 線源照射時の波高スペクトルを示し、図 5.9.2 に ^{241}Am γ 線源照射時の波高スペクトルを示す。

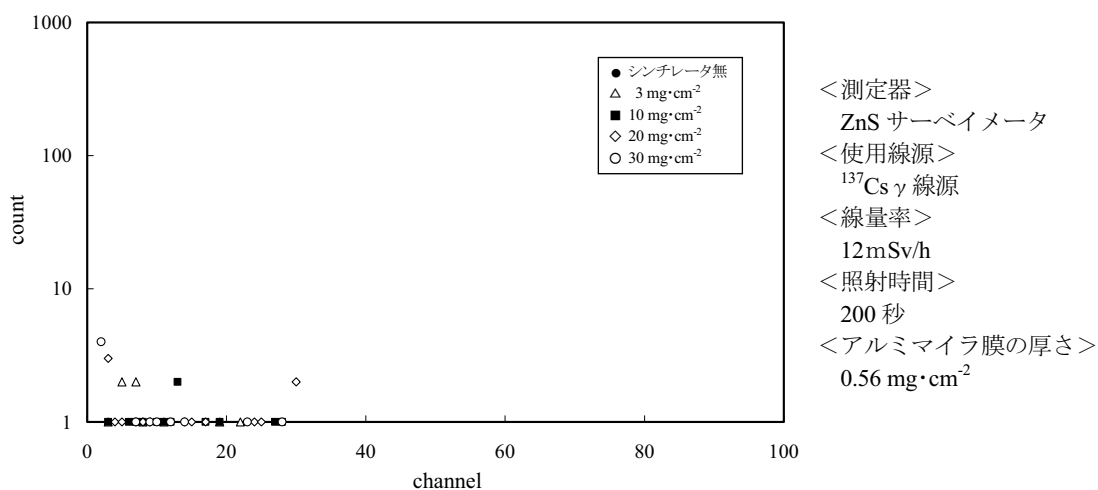


図 5.9.1 ^{137}Cs γ 線源照射時の波高スペクトル

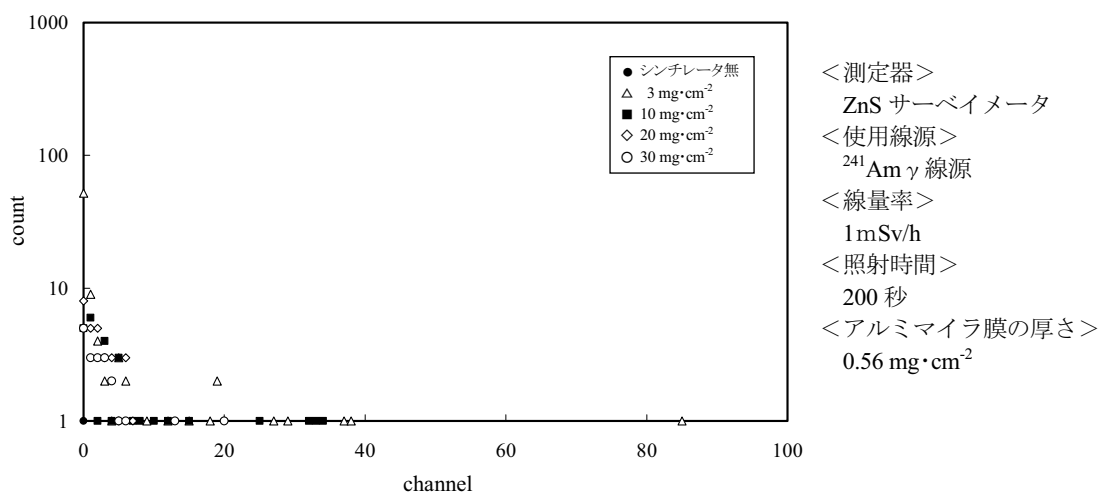


図 5.9.2 ^{241}Am γ 線源照射時の波高スペクトル

図 5.9 より、 γ 線を照射した場合、波高スペクトル上では低チャンネルに計数が現れたものの、LLDを設定(約 11ch)することによって容易に無視できるレベルに減らすことができる。また、 γ 感度にはシンチレータの厚みとの相関が確認されなかったものの、シンチレータを外した場合には計数が現れなかったことから、 γ 線の照射によって生じた計数はシンチレータ内の物質が少なからず関与していると考えられる。

JIS規格との整合については、 ^{137}Cs γ 線を照射しつつ、 ^{241}Am α 線源を検出面に当てた状態と当てない状態でサーベイメータの指示値を読むことによって行った。表 5.7 に JIS Z 4329-2004 に基づく γ 線感度試験結果を示す。

表 5.7 JIS Z 4329-2004 に基づく γ 線感度試験結果

	α 線源装着時における計数 A	γ 線照射+ α 線源装着時における計数 B	γ 線感度評価結果 (B-A)÷A×100
指示値 (読み取り値)	約 1100 min ⁻¹	約 1100 min ⁻¹	< ±25%

※ 本試験結果は、サーベイメータによる試験結果であり、シンチレータ中の ZnS 量は 10 mg・cm⁻²、ZnS の粒径は 5 μ m である

表 5.7 より、シンチレータの厚みを 10 mg・cm⁻²に厚くした場合でも γ 感度に変化はなく、JIS 規格 (γ 感度評価結果が±25%以内)を十分満足することを確認した。

以上の結果から、ZnS 検出器のシンチレータを厚くし、波高弁別技術を適用しても問題ないと考える。

5.5.2 中性子線感度試験結果

中性子線感度試験は、JIS 規格には求められていないが、MOX 燃料施設等での使用を考慮し、 ^{252}Cf 線源を用いた中性子照射試験を実施した。

1) 試験方法

^{252}Cf を線源とし、ZnS サーベイメータのシンチレータの厚みを変えながら検出面に垂直になるように中性子線を照射し、波高スペクトルを測定した。また、照射によって生じた計数がシンチレータの影響によるものかを判断するため、シンチレータを取り外した状態でも照射を行った。なお、検出面における線量率は、作業環境での高線量場を想定し 1 mSv/h とした。

2) 試験結果

図 5.10 に ^{252}Cf 中性子線源照射時の波高スペクトルを示す。

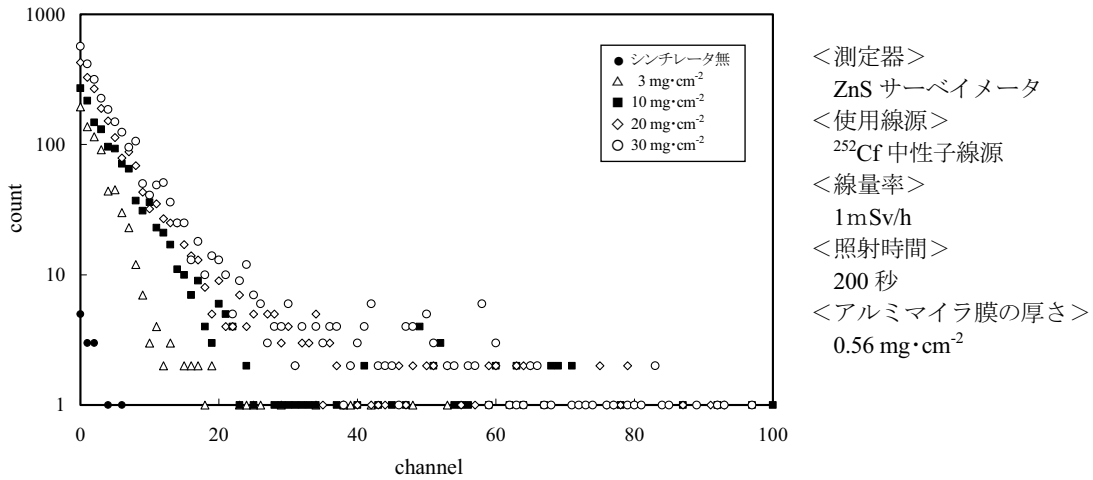


図 5.10 ²⁵²Cf 中性子線源照射時の波高スペクトル

中性子線を照射した場合は、 γ 線を照射した場合と異なり、シンチレータを厚くすると中性子感度が大きくなり、高エネルギー部分での計数も存在することが確認された。また、シンチレータを外した場合には極端に計数が減るため、中性子感度はシンチレータ内の物質によるものが主であると考えられる。特にシンチレータの厚みと関係していることから、厚くすることによって増える物質（ZnS 量やバインダー量）が影響していると考えられる。

照射結果よりシンチレータを厚くした場合は中性子感度が問題になることから、波高弁別に最も適したシンチレータを用いて中性子線の影響のレベルを調査した。図 5.11 に波高弁別を適用した際の中性子影響の様子（ZnS 量： $10 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ ）を示し、表 5.8 に LLD の設定による中性子感度の変化を示す。

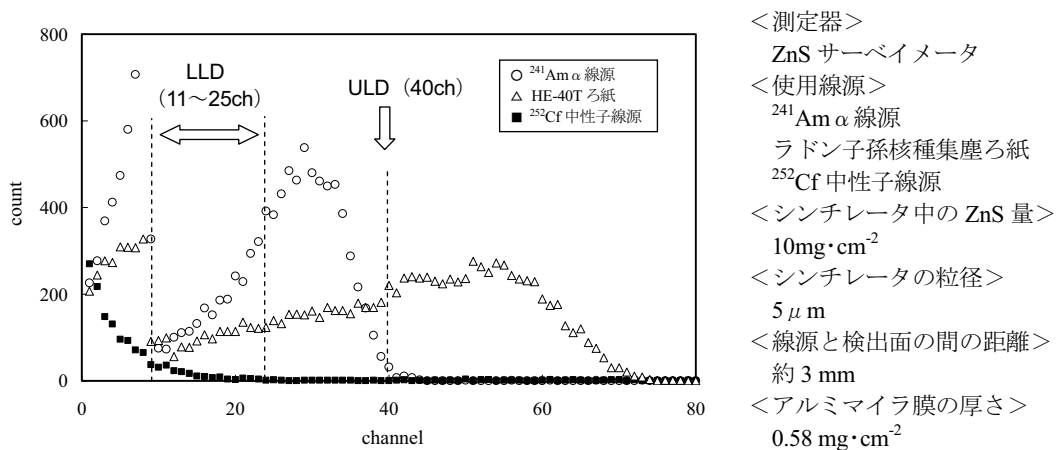


図 5.11 波高弁別を適用した際の中性子影響の様子 (ZnS 量: $10 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)

表 5.8 LLD の設定による中性子感度の変化

LLD の設定	機器効率* ¹	除去率 * ²	²⁵² Cf 中性子照射時における計数率 * ³
11 ch	37 %	61 %	205 min ⁻¹
18 ch	34 %	65 %	80 min ⁻¹
25 ch	26 %	72 %	48 min ⁻¹
30 ch	17 %	78 %	44 min ⁻¹

*1 Am α 線源を使用した場合の機器効率を示す

*2 HE-40T ろ紙を使用した場合の除去率を示す

*3 検出面に向けて 1 mSv/h を照射したときの計数率を示す

表 5.8 より LLD を上げれば中性感度が下がり除去率も向上することが分かる。しかし、除去率の向上は、²⁴¹Am の α 線の計数が下がることにより（機器効率が下がることにより）、見かけ上、除去率が向上しているだけであり、好ましい設定状態とはいえない。よって、使用環境における中性子線量率を把握し、適切な値に LLD を設定値する必要がある。

6. 除去率の向上に関する検討

ZnS 検出器のシンチレータを厚くすることで α 線の波高弁別が可能となり、除去率はサーベイメータの場合で62%（検出部位を制限した場合の値）、ダストモニタで56%となることを確認した。ここでは、除去率の向上の可能性を追求する。

6.1 α 線のエネルギー損失の観点からの検討

α 線がシンチレータに入るまでにエネルギーの一部を損失すると、スペクトルが低エネルギー側になり、半値幅の大きなスペクトルとなる。ここでは α 線のエネルギーを低下させる要因として、ろ紙の材質、アルミマイラ膜の厚み及び空気層の厚みの影響について検討する。

6.1.1 ろ紙の材質に関する検討

現在、核燃料サイクル工学研究所では取り扱いやすさや経済性の観点から放射線管理には HE-40T ろ紙を使用している。しかし、これまでの試験結果からも分かるように、メンブレンろ紙のように目が細かいろ紙にすることによって波高弁別の精度が上がるのが一般的に知られている⁶⁾。

そこで、放射線管理用のろ紙として最近市販されており、国内での使用実績のある“HE-40TA ろ紙”を入手し、HE-40T ろ紙との比較を行った。図 6.1 にろ紙の違いによる波高スペクトルの変化を示し、表 6.1 に捕集ろ紙による除去率の変化を示す。

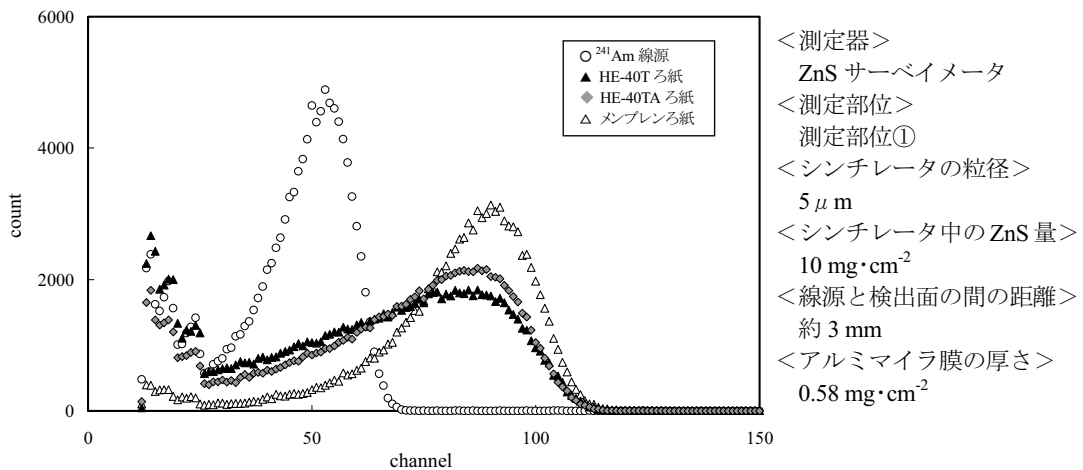


図 6.1 ろ紙の違いによる波高スペクトルの変化

表 6.1 捕集ろ紙による除去率の変化

ラドン子孫核種 捕集ろ紙	除去率	
	サーバイメータ	ダストモニタ
HE-40T ろ紙	62 %	56 %
HE-40TA ろ紙	69 %	63 %
メンブレンろ紙	87 %	75 %

ZnS サーバイメータのデータは、(測定部位①)による測定結果であり、シンチレータの粒径は $5\mu\text{m}$ 、ZnS量 $10\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、線源と検出器の距離 3mm 、マイラ膜の厚さ $0.58\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ で測定した結果ある。また、ダストモニタのデータは、ZnS量 $10\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、線源と検出器の距離 5mm 、マイラ膜の厚さ $1.8\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ で測定した結果ある。

図 6.1 より、HE-40TA ろ紙を使用した場合、HE-40T ろ紙を使用した場合に比べて若干ではあるが半値幅の小さい波高スペクトルとなることが分かる。この結果、除去率が 1 割程度大きくなり、波高弁別精度が上がることを確認された。よって、ZnS 検出器のダストモニタで α 線の波高弁別を行わせる場合には、使用ろ紙を HE-40T から HE-40TA に変更することが有効であると考えられる。ただし、HE-40T と比較した場合、HE-40TA は目詰まりが起りやすいことから、事前にサンプリング流量率の変化等を確認しておく必要がある。

6.1.2 アルミマイラ膜に関する検討

アルミマイラ膜はシンチレータの遮光に使用されるため必要不可欠なものであるが、アルミマイラ膜自体は α 線のエネルギーを減衰させるため、波高スペクトルに少なからず影響を与える。そこで、サーバイメータを用い、アルミマイラ膜の厚さを変えて波高スペクトル及び除去率を求めた。図 6.2.1～図 6.2.4 にアルミマイラ膜の厚さの相違による波高スペクトルの変化を示し、表 6.2 にアルミマイラ膜の厚さごとの除去率と機器効率を示す。

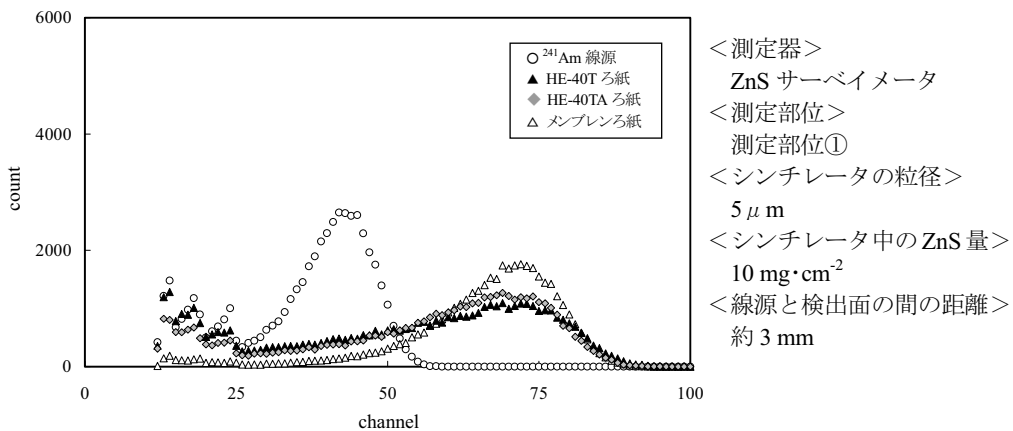


図 6.2.1 アルミマイラ膜の厚さの相違による波高スペクトルの変化($0.25\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)

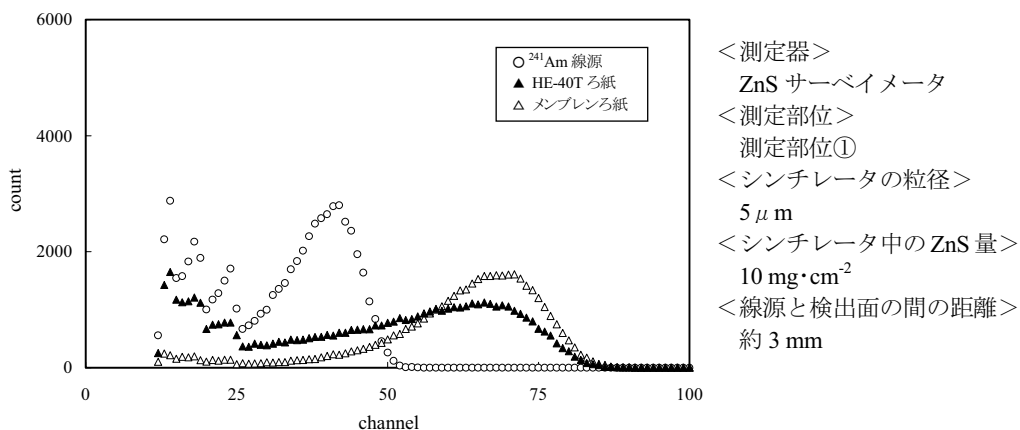


図 6.2.2 アルミイラ膜の厚さの相違による波高スペクトルの変化($0.58\ \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)

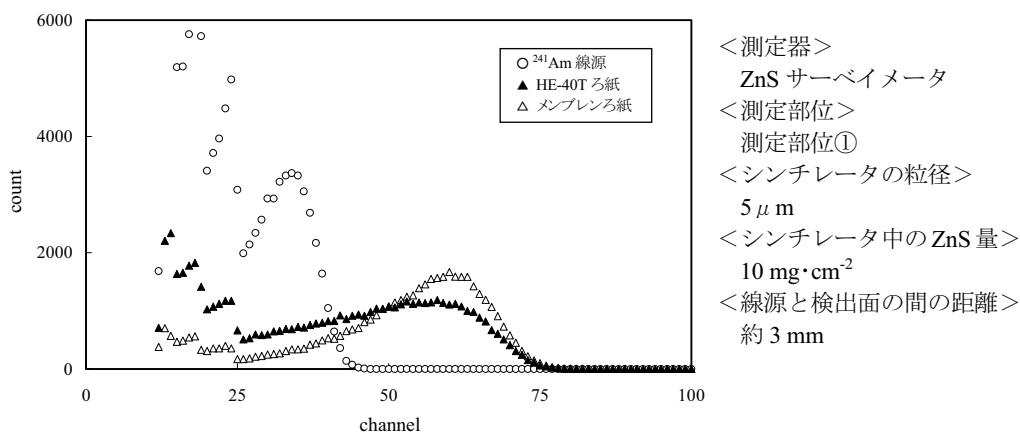


図 6.2.3 アルミイラ膜の厚さの相違による波高スペクトルの変化($1.16\ \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)

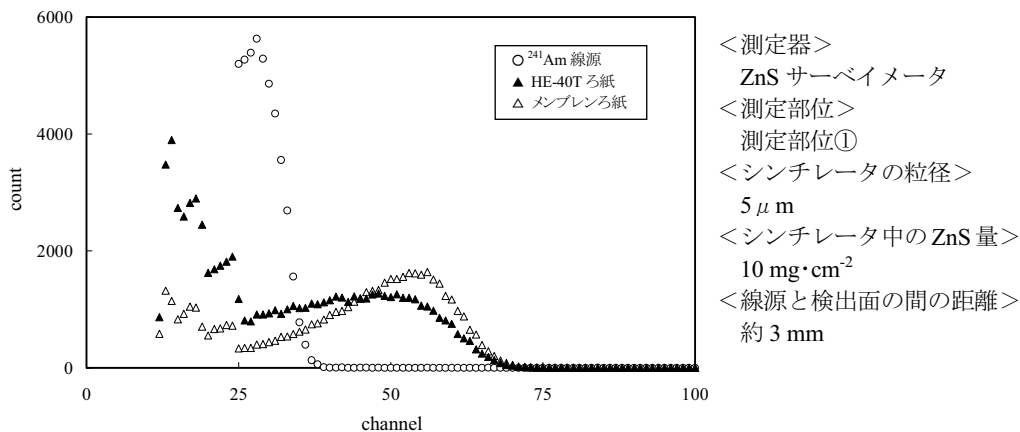


図 6.2.4 アルミイラ膜の厚さの相違による波高スペクトルの変化($1.66\ \text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)

表 6.2 アルミマイラ膜の厚さによる除去率と機器効率の変化

マイラ膜の厚さ	除去率		^{241}Am の機器効率
	HE-40T ろ紙	メンブレンろ紙	
0.25 mg \cdot cm $^{-2}$	68 % (73 %) *3	88 %	37.0 %
0.58 mg \cdot cm $^{-2}$ *1	62 %	87 %	35.4 %
1.16 mg \cdot cm $^{-2}$	67 %	87 %	28.9 %
1.66 mg \cdot cm $^{-2}$ *2	73 %	90 %	17.6 %

上記はサーベイメータ（測定部位①）による測定結果であり、シンチレータの粒径は 5 μ m、ZnS 量は 10 mg \cdot cm $^{-2}$ 、線源と検出器の距離は約 3mm である。

*1 サーベイメータのマイラ膜の厚さ

*2 ダストモニタのマイラ膜の厚さに概ね相当する厚さ

*3 HE-40TA ろ紙を使用した場合の除去率

図 6.2 よりマイラ膜を厚くした場合は、波高スペクトルの形状が低エネルギー側になまるとともにスペクトル全体が低エネルギー側にずれる傾向にあることが分かる。除去率への影響については、ラドン子孫核種のスペクトルがなまることによって ULD によって除去される計数（除去率の定義でいう分子）が減り除去率が低くなる方向に働く一方で、同時に LLD によって除去される計数も増えることから、計数值そのものの値（除去率の定義でいう分母）も減り除去率が高くなる方向にも働くことになる。この結果、表 6.2 のように、マイラ膜が薄い場合と厚い場合で除去率が向上する傾向にある。しかし、マイラ膜が厚い場合は ^{241}Am の機器効率が低下し、放射線計測上は好ましい状態とはいえない。よって、除去率を上げるためには、マイラ膜を可能な限り薄くし、スペクトルのなまりを小さくし（スペクトルの半値幅を小さくし）、波高弁別がしやすい状態にすることが望ましいと考える。

6.1.3 空気層に関する検討

検出面と線源の距離が広がると空気層が厚くなり α 線の減衰が見られる。そこで、ダストモニタを用い、検出面を線源に密着させた状態と 5mm 離れた状態（ダストモニタの使用状態）で波高スペクトルの変化を確認するとともに、除去率を評価した。表 6.3 に検出面と線源との距離による除去率の変化を示し、図 6.3 に検出面と線源との距離によるスペクトルの変化を示す。

表 6.3 検出面と線源との距離による除去率の変化

検出面と線源との距離	除去率
0 mm（べた付け）	50%
5 mm（通常状態）	56%

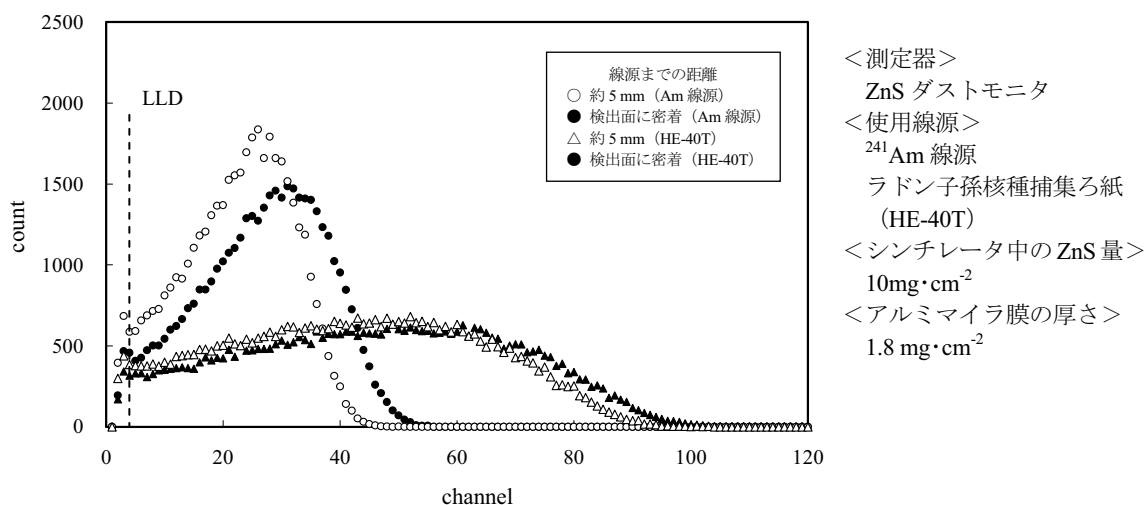


図 6.3 検出面と線源との距離によるスペクトルの変化(ダストモニタ)

表 6.3 より及び図 6.3 より、線源を検出面から離すと、マイラ膜を厚くしたときと同様に、波高スペクトルが全体的に低エネルギー側にずれ、見かけ上、除去率が高くなる。しかし、あまり離すと機器効率が下がるため、放射線計測上は好ましい状態ではない。よって、集塵に必要な距離以上に間隔をとらないようにすべきと考える。

6.2 シンチレーション光の減衰の観点からの検討

サーベイメータの検出部位の位置依存性に見られるように、PMT にシンチレーション光が到達するまでに光の減衰が生じると、光の減衰の大きさに応じてスペクトルが低エネルギー側にずれ、また、光の減衰の度合いがばらつくと、半値幅の大きなスペクトルとなる。ここではシンチレーション光が減衰する要因として、シンチレータの塗布方法（プラスチックフィルムの影響）や、ZnS 粒子の粒径とバインダーの量について検討する。

6.2.1 シンチレータの塗布方法に関する検討

ZnS シンチレータシートは、通常プラスチックフィルムにシンチレータを塗布したものとなっている（図 3.1 参照）。今回の試験に用いたダストモニタ用のシンチレータシートも同様な方法で製作されたものであるが、実際に現場に設置されているダストモニタのシンチレータはライトガイドに直接塗布されている。

そこで、プラスチックフィルムに塗布したシンチレータシートを使用した場合の波高スペクトルと、ライトガイドにシンチレータを直接塗布したものを使用した場合の波高スペクトルとを比較し、プラスチックフィルムの影響を確認した。ただし、ライトガイドに直接塗布したシンチレータは、現在ダストモニタに使用されているもの（シンチレータ中の ZnS 量： $5 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ ）しか用意できなかったため、放出される α 線がシンチレータを突き抜けない ^{241}Am 線源のみを用いて波高スペクトルの形状を比較し、除去率への影響を推測した。図 6.4 にシンチレータの塗布方法の違いによる波高スペクトルの変化を示す。

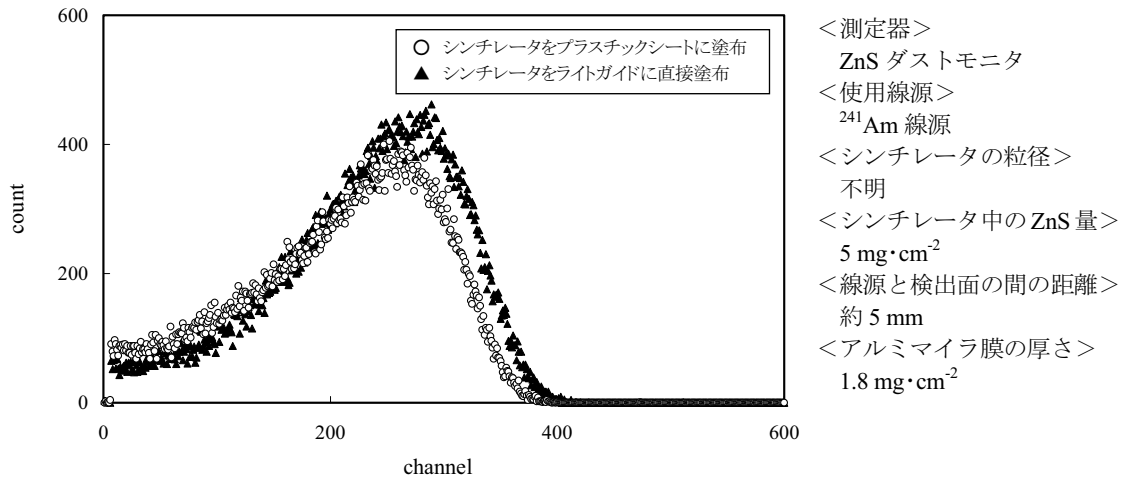


図 6.4 シンチレータの塗布方法の違いによる波高スペクトルの変化

図 6.4 より、シンチレータをライトガイドに直接塗布したほうが、波高スペクトルの低エネルギー側へのなまりが小さいことが分かる。除去率を上げるためにはシンチレーション光が減衰することなく効率よく PMT に集光する必要があるため、集光の妨げとなるプラスチックフィルムを取り除くことで、波高弁別に適した波形に近づくと考えられる。この事象は、より光の伝達率が高いライトガイドに変更した場合でもみられると推測できる。

6.2.2 粒径及びバインダー量に関する検討

ZnS の発光量は粒径に関係するとの報告例もあることから、粒径による除去率の相違を確認した。しかし、シンチレータの製造上の問題（塗りやすさ等）により粒径に応じてバインダーの混在量も変わることから、粒径のみの影響は確認できなかった。図 6.5 に粒径及びバインダー量の異なるシンチレータによる波高スペクトルの例を示し、表 6.4 に粒径及びバインダー量の違いによる除去率の変化を示す。なお、10 μm のシートのバインダー量は 5 μm のシートのバインダー量の約半分となっている。

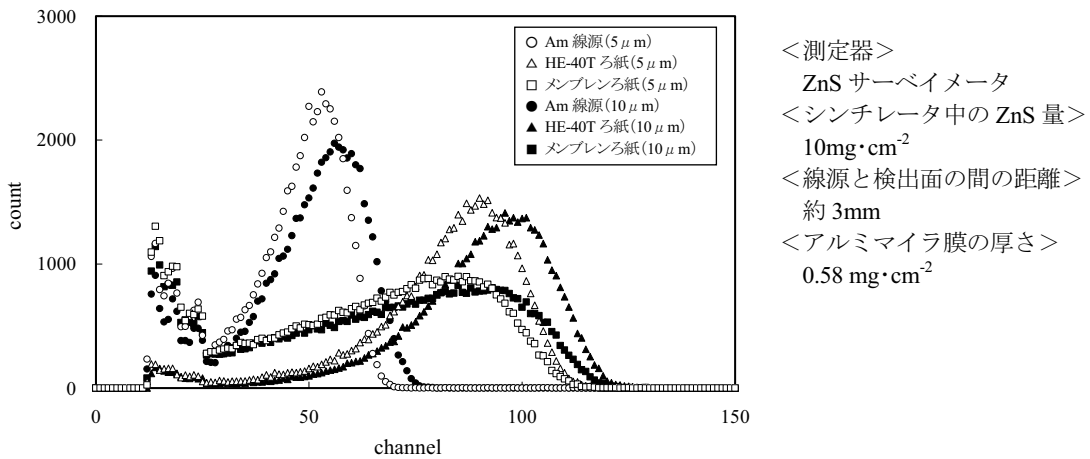


図 6.5 粒径及びバインダー量の異なるシンチレータによる波高スペクトルの例

表 6.4 粒径及びバインダー量による除去率の変化

シンチレータ中 の ZnS 量	除去率			
	粒径が 5 μm のシート		粒径が 10 μm のシート	
	HE-40T ろ紙	メンブレンろ紙	HE-40T ろ紙	メンブレンろ紙
10 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$	62%	87%	57%	86%
15 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$	58%	88%	57%	84%
20 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$	61%	89%	58%	85%
25 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$	64%	89%	57%	85%
30 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$	68%	89%	59%	84%

※ ZnS 量と同じシンチレータの場合、粒径が 10 μm のシンチレータ中のバインダー量は、粒径が 5 μm のときの約半分である。

表 6.4 より、除去率は粒径が 5 μm のほうが若干高くなる傾向にあった。また、10 μm のシンチレータのほうが全体的に波高の高いスペクトルになっていたが、これは、バインダー量が少なく、シンチレータ内での光の減衰が小さいためと推測する。

今回の試験では、粒径やバインダー量の影響は十分把握できなかったため、今後、粒径のみ粒径による影響や、バインダー量のみ影響を調査し、除去率への影響を評価する必要があると考える。

7. まとめ

本研究により、現在現場で用いられている ZnS 検出器でも単にシンチレータの厚さを変更するだけで、半導体検出器には劣るものの、 α 線の波高弁別がある程度可能であることが確認された。また、シンチレータの厚さを変更しても JIS 規格を満足しており運用に問題がないと考える。

以下に本研究の成果をまとめる。

7.1 ZnS 検出器による α 線の波高弁別を行うための最低条件

ZnS 検出器で α 線の波高弁別を行うためには以下の条件が最低限必要であり、本条件を満足した場合、ラドン子孫核種による計数を少なくとも 50%程度除去できることが分かった。

- ・ ZnS シンチレータの厚みを α 線の飛程以上にする（ただし、過剰に厚くしない）
- ・ 検出面の位置依存性をなくす（ライトガイド内での光の減衰が無視できるように設計するか、ライトガイド内で光が一律に減衰するように設計する）

7.2 サーベイメータ及びダストモニタへの適用

サーベイメータはライトガイドの形状が複雑であるため検出面の位置依存性が大きく、波高弁別機能を付加するためには検出面を先端部分のみに制限する（狭める）必要がある。よって、現状の形状を変えないとすれば、現実的ではないが、通常の汚染検査ではカウンタとして用い、異常な計数が見つかった場合にのみ検出面を制限し、波高弁別機能を利用する（ラドン子孫核種であるかの判定を行う）ようになると考える。

ダストモニタの場合はライトガイドの形状が円形状の平板であり位置依存性がそれほど大きくなく、また、線源と検出面の位置が固定されているため、シンチレータを適切な厚さにするだけで波高弁別が可能となる。仮に半導体検出器の代わりに ZnS 検出器を用いた場合、除去率は半導体使用時の 70%程度（HE-40T ろ紙を使用したときの値）と比較すると 50%程度に落ちると考えられるが、ダストモニタのバックグラウンドがそれほど高くない施設で利用するのであれば大きな問題にはならないレベルであると考え。むしろ、検出器故障やノイズ対策として有効であり、また、機器効率も向上することから、長所と短所を踏まえて選択できるレベルにあると考える。表 7.1 に今回の試験で確認された除去率とその測定条件を示す。

表 7.1 今回の試験で確認された除去率とその測定条件

測定器	サーベイメータ	ダストモニタ
除去率*	62% (69%)	56% (63%)
測定条件	シンチレータ中の ZnS 量：10mg・cm ² シンチレータの粒径：5 μ m 線源と検出器の距離：3mm 検出部位：検出部位①	シンチレータ中の ZnS 量：10mg・cm ² シンチレータの粒径：不明 線源と検出器の距離：5mm

* HE-40T ろ紙を使用した場合の数値であり、また、() 内は HE-40TA ろ紙を使用した場合の数値である。

ZnS 検出器での波高弁別技術を適用するにあたって唯一考慮すべき事項は、JIS 規格に要求のない中性子感度の問題である。この中性子感度は、一般的な作業環境（中性子線量率が 1mSv/h 未満）ではさほど問題のないレベルであるが、高線量率の作業環境で使用する場合は、必要に応じて LLD の設定値を上げるなどの対策が必要となる。

7.3 今後の除去率向上の見通し

シンチレーション検出器による波高弁別精度を向上させるためには、シンチレータに入射するまでの α 線エネルギーの減衰を抑え、また、シンチレータで発生したシンチレーション光を減衰させることなく PMT の光電陰極に送ることが重要である。今回の試験において、 α 線エネルギーの減衰に対する対策については、ろ紙を HE-40T から HE-40TA に変更するとともに、マイラ膜を薄くすることが有効であることが確認されたが、シンチレーション光の減衰に対する対策については十分な検討が行えなかった。

シンチレーション光を減衰させないためには、特にライトガイドを光伝導率の高い物質にすることや、余計な物質（シンチレータを塗布しているフィルムなど）を取り除くことなどが有効と考えられるが、シンチレータ自体をより透明度の高いものに変えることも有効であると考ええる。

今回の試験において、ZnS 検出器で得られた最も高い除去率は、HE-40T ろ紙を用いた場合で約 62%（HE-40TA ろ紙に変更した場合で 69%）であり、さらに遮光膜を薄くすると約 68%（HE-40TA ろ紙に変更した場合で 72%）となった。今後、シンチレータの材質、ライトガイド、PMT 等の改良まで含めて研究を進めていけば、更に除去率の向上が期待できると考える。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、ご指導、ご協力いただいた放射線管理部内の関係者の方々に心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 石田順一郎, 高崎浩司, 根本和彦, 小池雄二, 「私信」 (1994)
- 2) 植頭康裕, 橋本哲夫, “時間間隔解析技術を用いた短寿命核種の定量”, RADIOISOTOPES, 51, P.229-236 (2002)
- 3) 井崎賢二, 岩田克弘, 樫村義雄, 野田喜美雄, “自然放射能の挙動解析に基づく排気モニタリング技術の向上”, JNC TN8410 2001-005, P.24 (2001)
- 4) グレンF.ノル, “放射線計測ハンドブック (第2版)”, 日刊工業新聞社 (1982)
- 5) 村上悠紀雄, 團野皓文, 小林昌敏, “放射線データブック”, P.348 【1.2】 b), 地人書館 (1982)
- 6) 中田啓, 福田整司 他, “作業環境の放射線モニタリングー計画立案から評価までー”, P.90, 日本アイソトープ協会 (1978)

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
質量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) とよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	s ⁻¹	s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	K	K
光束流	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	lm/m ²	m ⁻² cd s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の 1 は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周波数に関するみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程に関するみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で「radioactivity」と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70.205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘り度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デカ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ²	ヘクタ	h
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリア	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=11.1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI 単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フォト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3 元系の CGS 単位系と SI では直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 f=エルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.1868 J (「15°C」カロリー), 4.1868 J (「IT」カロリー), 4.184 J (「熱化学」カロリー)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

