

平成27年度

文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業

原子力システム研究開発事業

シンチレータスタック型

ガンマ線イメージャに関する研究開発

成果報告書

平成28年3月

学校法人 五島育英会 東京都市大学

本報告書は、文部科学省の原子力システム
研究開発事業による委託業務として、学校法
人五島育英会東京都市大学が実施した平成2
4-27年度「シンチレータスタック型ガン
マ線イメージャに関する研究開発」の成果を
取りまとめたものです。

目次

概略	vii
1. はじめに	1
2. 業務計画	6
2.1 全体計画	6
3. シンチレータ材料の特性評価検討及びシンチレータ側面処理方法の検討	8
3.1 材料評価検討（委託先：名古屋大学）	8
3.1.1 シンチレータ加工性の評価	8
3.1.2 温度特性評価	10
3.1.3 GAGG シンチレータ側面処理方法の検討	13
3.2 側面処理の実施	19
3.2.1 3mm 角 GAGG シンチレータ側面処理	19
3.2.2 1mm 角 GAGG シンチレータ側面処理	30
3.3 最適配置パターンの検討（委託先：名古屋大学）	32
3.3.1 検出器応答計算	32
3.3.2 アルゴリズムの開発	33
3.3.3 ^{131}I からの 365keV ガンマ線に対するアルゴリズムの改良	39
3.3.4 シンチレータ配置の検討	42
3.3.5 高線量率対応配置の検討	45
3.3.6 シンチレータブロックによる検出器応答の実験的検証	49
3.4 光読み出しシステムの構築（委託先：富山高専）	62
3.4.1 8チャンネル MPPC 信号処理回路の設計試作	62
3.4.2 多チャンネル MPPC 信号処理回路の設計試作	65
3.4.3 64本シンチレータブロックの作成と 128チャンネル MPPC 信号処理回路の小型化	73
3.4.4 高線量率場対応版 64本シンチレータブロックの作成と MPPC 信号処理回路の作成	82
3.4.5 バッテリー化	91
3.5 研究推進	92
4. 結言	93
5. 外部発表	94

表一覧

表 3. 1-1	シンチレータ特性一覧	9
表 3. 1-2	加工性調査結果一覧	9
表 3. 1-3	加工法①②③のエネルギー分解能、位置分解能の一覧	18
表 3. 2-1	シンチレータ 64 本分のエネルギー分解能及び位置分解能の表	21
表 3. 2-2	各シンチレータの減衰長とスパッタリング処理時間の一覧	25
表 3. 2-3	スパッタリング後のシンチレータのエネルギー分解能と 位置分解能の一覧	28
表 3. 3-1	^{131}I の放出する主要ガンマ線エネルギーと放出率	39
表 3. 4-1	ロット No. 1、3、5、7 におけるエネルギー分解能測定結果	78
表 3. 4-2	ロット No. 1、3、5、7 における位置分解能測定結果	80
表 3. 4-3	ロット 1~ロット 16 のエネルギー分解能及び位置分解能評価結果	90
表 5. 1-1	外部発表一覧	94

図一覧

図 1-1	飛来放射線の方向情報概念図	3
図 1-2	提案する γ 線イメージャの概念図	4
図 2. 1-1	期間全体の開発計画	7
図 3. 1-1	温度特性評価実験体系図	11
図 3. 1-2	使用した GAGG シンチレータと MPPC、PMT の素子の写真	11
図 3. 1-3	^{137}Cs の全吸収ピークの温度依存性	12
図 3. 1-4	側面特性評価実験体系図	14
図 3. 1-5	中央に照射した場合のエネルギースペクトル	14
図 3. 1-6	シンチレータの位置分布測定結果	15
図 3. 1-7	側面凹面鏡面加工 GAGG シンチレータのエネルギー分解能測定結果	16
図 3. 2-8	側面凹面鏡面加工 GAGG シンチレータの位置分布測定結果	16
図 3. 1-9	GAGG シンチレータと光センサーが密着した場合の、シンチレータ側面、 光センサ結合面での全反射条件	16
図 3. 1-10	スパッタリング前、スパッタリング後の GAGG シンチレータロッド	17
図 3. 1-11	側面金属膜蒸着加工のエネルギー分解能・位置分解能の スパッタリング時間依存性	17
図 3. 1-12	側面金属膜蒸着加工シンチレータの ^{137}Cs のエネルギースペクトル	18
図 3. 1-13	側面金属膜蒸着加工シンチレータの位置分布測定結果	18
図 3. 2-1	1 本ずつ特性評価を実施した際の実験体系図	20
図 3. 2-2	2 本ずつ特性評価を行った際の実験体系図	20
図 3. 2-3	Lot 1 のシンチレータロッドの波高分布図	20
図 3. 2-4	Lot 1 のシンチレータロッドの位置分布のヒストグラム	21
図 3. 2-5	角シンチレータの位置分解能とエネルギー分解能を減衰長の 依存性としてプロットした図	24

図 3. 2-6	スパッタリング時間と減衰長の変化の実験結果	25
図 3. 2-7	スパッタリング後のシンチレータ（ランダムに数本分）の エネルギー分解能と位置分解能をプロットした図	28
図 3. 2-8	スパッタリング前、スパッタリング後のシンチレータの写真	29
図 3. 2-9	平成 27 年度調達した GAGG(Ge) シンチレータの写真	30
図 3. 2-10	シンチレータロッドの波高分布スペクトル	31
図 3. 2-11	シンチレータの長軸方向に 20mm おきに γ 線を照射した場合の 位置分布スペクトル	31
図 3. 3-1	検出器応答計算体系図	32
図 3. 3-2	一般的なコンプトン逆推定の概念図	34
図 3. 3-3	逆投影アルゴリズム	34
図 3. 3-4	逆投影図（発光点間距離閾値なし）	35
図 3. 3-5	輪のようなノイズとなるイベントの例	35
図 3. 3-6	逆投影図（発光点間距離閾値 3mm）	36
図 3. 3-7	逆投影図断面ヒストグラム	36
図 3. 3-8	角度分解能の発光点間距離閾値依存性	37
図 3. 3-9	発光点間距離閾値の変化に対する有効イベント率の変化	37
図 3. 3-10	逆投影図（線源方向 $(\theta, \phi) = (0^\circ, 0^\circ), (90^\circ, 0^\circ)$ 、 発光点間距離閾値 3 mm、プロット数 1000 count）	38
図 3. 3-11	逆投影図（線源方向 $(\theta, \phi) = (0^\circ, 0^\circ), (45^\circ, 0^\circ)$ 、 発光点間距離閾値 3 mm、プロット数 1000 count）	38
図 3. 3-12	^{131}I の 365keV のガンマ線を入射させた場合の方向推定結果	40
図 3. 3-13	二点発光事象のそれぞれの位置における エネルギー付与量の比の頻度分布	40
図 3. 3-14	新アルゴリズム再投影結果	41
図 3. 3-15	新アルゴリズム再投影結果	41
図 3. 3-16	計算体系の概略図	43
図 3. 3-17	パターン 1 の場合の入射方向推定結果。	43
図 3. 3-18	パターン 2 の場合の推定結果	43
図 3. 3-19	パターン 3 の場合の推定結果	44
図 3. 3-20	シミュレーション体系図	45
図 3. 3-21	タイプ A の場合の再構成結果	46
図 3. 3-22	タイプ B の場合の再構成結果	47
図 3. 3-23	タイプ C の場合の再構成結果	48
図 3. 3-24	256 本束ねたシンチレータブロック	49
図 3. 3-25	4 本束ねたシンチレータブロックを MA-PMT の 2 か所の チャンネルに配置した図	49
図 3. 3-26	重心処理結果	50
図 3. 3-27	重心処理後のエネルギースペクトル	50

図 3.3-28	シンチレータ長軸発光分布	50
図 3.3-29	64本バージョンの、 ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{22}Na 線源に対する 応答取得実験体系図	52
図 3.3-30	線源パターンそれぞれの場合の2点発光事象の エネルギースペクトル	52
図 3.3-31	#1の場合の再構成結果	53
図 3.3-32	#2の場合の再構成結果	53
図 3.3-33	#3の場合の再構成結果	53
図 3.3-34	#4の場合の再構成結果	53
図 3.3-35	#5の場合の再構成結果	54
図 3.3-36	#6の場合の再構成結果	54
図 3.3-37	#6の ^{60}Co , ^{137}Cs を同時に設置した場合の、2か所発光イベントのみ 抽出した場合のエネルギースペクトル	54
図 3.3-38	#6のデータから ^{137}Cs 全吸収に対応するイベント(エネ ルギー範囲0.60~0.74MeV)のみ抽出し、再構成した場合の結果	55
図 3.3-39	#6のデータから ^{60}Co 全吸収に対応するイベント(エネルギー 範囲1.07~1.50MeV)のみ抽出し、再構成した場合の結果	55
図 3.3-40	$\phi=90$ 度で、 $\theta=0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315$ 度方向の8パターンの 線源配置図	55
図 3.3-41	ϕ 方向に45度おきに線源を設置した実験体系図	56
図 3.3-42	$\phi=90$ 度、 $\theta=0$ 度方向に ^{137}Cs 線源を設置した場合の再構成結果	56
図 3.3-43	$\phi=90$ 度、 $\theta=45$ 度方向に ^{137}Cs 線源を設置した場合の再構成結果	56
図 3.3-44	$\phi=90$ 度、 $\theta=90$ 度方向に ^{137}Cs 線源を設置した場合の再構成結果	56
図 3.3-45	$\phi=90$ 度、 $\theta=135$ 度方向に ^{137}Cs 線源を設置した場合の再構成結果	56
図 3.3-46	$\phi=90$ 度、 $\theta=180$ 度方向に ^{137}Cs 線源を設置した場合の再構成結果	56
図 3.3-47	$\phi=90$ 度、 $\theta=225$ 度方向に ^{137}Cs 線源を設置した場合の再構成結果	56
図 3.3-48	$\phi=90$ 度、 $\theta=270$ 度方向に ^{137}Cs 線源を設置した場合の再構成結果	57
図 3.3-49	$\phi=90$ 度、 $\theta=315$ 度方向に ^{137}Cs 線源を設置した場合の再構成結果	57
図 3.3-50	$\phi=0$ 度、 $\theta=90$ 度方向に ^{137}Cs 線源を設置した場合の再構成結果	57
図 3.3-51	$\phi=45$ 度、 $\theta=90$ 度方向に ^{137}Cs 線源を設置した場合の再構成結果	57
図 3.3-52	$\phi=90$ 度、 $\theta=90$ 度方向に ^{137}Cs 線源を設置した場合の再構成結果	57
図 3.3-53	$\phi=135$ 度、 $\theta=90$ 度方向に ^{137}Cs 線源を設置した場合の再構成結果	57
図 3.3-54	$\phi=180$ 度、 $\theta=90$ 度方向に ^{137}Cs 線源を設置した場合の再構成結果	57
図 3.3-55	$\phi=90$ 度での断面ヒストグラム	57
図 3.3-56	$\theta=\phi=0^\circ$ での測定体系	58
図 3.3-57	$\theta=\phi=0^\circ$ での再構成結果	59
図 3.3-58	θ 方向変更時の測定体系	59
図 3.3-59	θ 方向変更時の再構成結果(上から $\theta=-135^\circ$ 、 -45° 、 45° 、 135°)	59

図 3.3-60	θ 軸への投影図	60
図 3.3-61	複数線源のイメージング 1	60
図 3.3-62	複数線源のイメージング 2	60
図 3.3-63	イメージング 1 の再構成結果	61
図 3.3-64	イメージング 2 の再構成結果	61
図 3.4-1	一次元位置敏感型放射線検出器の処理システム全体図	62
図 3.4-2	製作したアナログ・デジタル処理部の構成	62
図 3.4-3	同時計数処理による AD 変換までの流れ	63
図 3.4-4	制作したマルチ ch システムの回路システム	63
図 3.4-5	多 ch 読み出しシステムによる測定結果の市販多 ch-ADC との比較	64
図 3.4-6	前置増幅器部	66
図 3.4-7	波形整形部	66
図 3.4-8	ピークホールド部	67
図 3.4-9	SLOW 信号発生部	67
図 3.4-10	FAST 信号発生部	67
図 3.4-11	メモリ・ADC 制御部	68
図 3.4-12	ケース収納の様子	68
図 3.4-13	DIO ボードと PC への接続の様子	69
図 3.4-14	Ch0、Ch1 におけるパルス波高分布 (CAEN 製品による測定との比較)	69
図 3.4-15	Ch2、Ch3 におけるパルス波高分布 (CAEN 製品による測定との比較)	70
図 3.4-16	Ch0、Ch1 における $\ln(\text{ChXA}/\text{ChXB})$ のヒストグラム (CAEN 製品による測定との比較)	71
図 3.4-17	Ch2、Ch3 における $\ln(\text{ChXA}/\text{ChXB})$ のヒストグラム (CAEN 製品による測定との比較)	72
図 3.4-18	シンチレータ及び MPPC の固定に用いたテフロン製治具	73
図 3.4-19	組み立てたシンチレータと MPPC	73
図 3.4-20	システム内のトリガー信号フロー	74
図 3.4-21	検出器&ヘッドアンプ部分 (外形)	75
図 3.4-22	DP 部 (外形)	75
図 3.4-23	検出器&ヘッドアンプ部分 (内部)	76
図 3.4-24	ヘッドアンプ、バイアス電圧調整部分	76
図 3.4-25	γ 線照射実験の体系	77
図 3.4-26	ロット No. 1 のパルス波高分布測定結果	78
図 3.4-27	ロット No. 3 のパルス波高分布測定結果	78
図 3.4-28	ロット No. 5 のパルス波高分布測定結果	79
図 3.4-29	ロット No. 7 のパルス波高分布測定結果	79
図 3.4-30	ロット No. 1 の位置分布測定結果	80
図 3.4-31	ロット No. 3 の位置分布測定結果	80
図 3.4-32	ロット No. 5 の位置分布測定結果	81

図 3.4-33	ロット No. 7 の位置分布測定結果	81
図 3.4-35	シンチレータ固定用プラスチック部品	82
図 3.4-36	シンチレータ固定用プラスチック部品 (端部用)	82
図 3.4-37	シンチレータ固定用プラスチック部品 (全体固定用)	83
図 3.4-38	シンチレータ固定用プラスチック部品 (積み重ね用)	83
図 3.4-39	システムの全体構成と高線量率場対応のための調達部分 (赤枠)	85
図 3.4-40	初段回路モジュール (下の写真の正方形が MPPC)	85
図 3.4-41	ヘッドアンプモジュール	86
図 3.4-42	検出器部分ケース内でのシンチレータの配置	86
図 3.4-43	シンチレータに割り振ったロッド番号	87
図 3.4-44	Delay を変化させた実験の体系	88
図 3.4-45	Delay を変化させた実験の結果	89

略語一覧

- ADC : Analog Digital Converter (アナログデジタル変換器)
- BGO : シンチレータの一種。Bi₄Ge₃O₁₂ (ゲルマニウム酸ビスマス)
- GAGG(Ce) : シンチレータの一種で、活性剤として Ce を添加した Gd₃Al₂Ga₃O₁₂ 単結晶
- MA-PMT : Multi-Anode Photo-Multiplier Tube (マルチアノード光電子増倍管)
- Mainamp : Main Amplifier (主増幅器)
- MPPC : Multi Pixel Photon Counter の略で、浜松ホトニクスが販売している光検出器
- Preamp : Pre-Amplifier (前置増幅器)
- Si-PMT : MPPC の海外での一般的な公称
- Si 系光センサ : MPPC やフォトダイオードなど Si 半導体をベースとしている光検出センサ
- 光電子増倍管 : 光センサーの一種で、真空管形式をしている。微少光の検出に優れる
- コンプトンコーン : コンプトンカメラで、ガンマ線入射毎に推定される γ 線入射方向を表わす円錐
- シンチレータ : 放射線と相互作用をした際に受け取ったエネルギーを光に変換するもの
- シンチレータブロック : 棒状のシンチレータを束ね、ブロック状としたもの。
- 全吸収ピーク : γ 線測定した場合の波高分布で、ガンマ線の全エネルギーを吸収した事象に対応するピーク
- 同時計数時間 : 検出器内の 2 か所で放射線と相互作用があった場合、同時に相互作用したとみなす時間
- パイルアップ : 放射線検出器に短時間に大量の放射線が入射すると、放射線により生成された電気パルスに、他の放射線の電気パルスが積み重なってしまい、正確な波高値が測定できなくなる事象。
- ピークコンプトン比 : γ 線測定した場合の波高分布で、全吸収ピークの事象と全事象の比

概略

既存軽水炉等、原子力発電施設等の大型施設による大規模原子力災害では、施設中あるいは環境中へ放射性物質の放出のリスクが存在する。そのため、作業員や住民の放射線防御の必要があり、放射性物質がどこにどの程度存在するかを迅速に探知できる機器が求められる。特に事故初期の段階において、施設内での放射性物質分布情報は、事態収束にむけた作業を実施するうえで、作業員の被ばく防護のために線量情報の次に重要となる情報である。また、周辺住民にとっては、放射性ヨウ素の情報、及び大気・地表沈着放射性物質から放出されるガンマ線による外部被曝線源情報は、避難経路決定、及びその際の被曝量評価に重要となる。

このためには、核種弁別能力を有し放射線の飛来方向が探知可能であり、かつ可搬な検出器、すなわちエネルギー分解能力を有するコンパクトなガンマカメラが有用であると考えられる。しかし、既存のガンマカメラは、ピンホールガンマカメラ等、鉛コリメータ等で γ 線の入射方向を絞ることが一般的であり、サイズ・重量の増大(30kg 前後)を招くと共に、検出効率の劣化、すなわち迅速なリアルタイム情報収集には不向きであった。さらに視野が狭く、広範囲の領域を一度にモニタするためには複数台のガンマカメラが必要であり、既存のガンマカメラをそのまま上記目的に適用することは困難である。また、大規模原子力災害時には、線源の事前情報は基本的に存在せず、360度(4 π 方向)から γ 線が入射する可能性があり、一般的なコンプトンカメラは後方からのガンマ線の入射を考慮していないため、視野の広い既存のコンプトンガンマカメラを採用しても最低でも2台の検出器を背中合わせにせっちし、それぞれの有効方向からのガンマ線を捉える様にする必要がある。

このような状況下に対応可能な、高検出効率、エネルギー弁別能力を有し、全方向に感度を有するガンマカメラの心臓部である放射線検出部開発として、シンチレータスタック型ガンマイメージャの開発を本研究開発の最終的な目標としている。これは、高効率なガンマ線スペクトロメータとして使用されているシンチレーション検出器内の、放射線相互作用位置とその付与エネルギーを同時に取得し、入射ガンマ線のエネルギーと入射方向を逆計算し推定するものである。特に、棒状シンチレータをスタック状に束ねる構造を採用することで、コリメータを必要とせず、全方向に感度を有し、かつ高検出効率で上記の情報を得るものが実現できると考えている。また、コリメータを必要としないことから軽量コンパクトとなり、可搬型の検出システムが構築可能であると思われる。さらに、コンプトン散乱の式や検出器応答の統計的逆推定により、計数率にも依存するが、数分間隔で飛来放射線のエネルギー及び方向が求められ、その場所の線量の主要因となっている放射性同位体の種類や位置の推定が可能になると期待される。

そこで、万が一事故が起こった際に施設内の核種ごとの位置分布や放射線量を迅速に把握するため、可搬型であり、核種弁別のためのエネルギー分解能力を有し、角度分解能 ± 45 度・検出効率40%程度で360度方向に感度を有するガンマカメラとして、シンチレーション検出器を用いたシンチレータスタック型ガンマ線イメージャの開発を本研究開発課題の目的とする。また、実際の事故時には高線量率場になる可能性を考慮し、数百mSv/h～数Sv/hでの高線量率場での動作が可能な高線量率版イメージャの開発も目的とする。

平成24年度～平成27年度まで研究開発を実施し、試作器ながらも全方向ガンマイメージャの開発に成功し、以下の結果を得た。

①シンチレータ材料の特性評価及び側面処理方法の検討

検出器要素としていくつかのシンチレータ材料を検討し、シンチレータとして棒状の GAGG(Ce) を採用した。棒状形状に加工し両端に光検出器を配し、その光出力の和と比から、放射線との相互作用エネルギー・相互作用位置を算出する構造となっている。形状として、 $3 \times 3 \times 50$ mm、 $1 \times 1 \times 50$ mm の 2 種類を採用し、それぞれ低線量率場対応版、高線量率場対応版とした。高線量率場対応版は、長軸方向位置分解能改善のため、側面金属スパッタリング処理によりシンチレーション光減衰距離の調節を実施した。また、高線量率場対応版は、側面金属スパッタリング処理が必要ないことが判明し、テフロンテープによる被覆のみで十分であることが確認された。

② 最適配置パターンの検討

上記低線量率及び高線量率場対応版のシンチレータを束ねシンチレータブロックを形成し、ガンマイメージャを試作した。その際のシンチレータの配置の検討を実施した結果、均等に配置することが望ましいことが判明したため、 8×8 本（合計 64 本）及び 256 本束ねたシンチレータブロックを作成し、その特性評価を計算及び実験にて実施した。その結果、256 本バージョンで全効率約 90%、64 本バージョンで方向分解能約 60 度を確認し、当初の目的の性能を達成した。

③ 光読み出しシステムの構築

上記①にて加工されたシンチレータを 64 本束ねたシンチレータブロックを作製し、それに合わせた多チャンネル MPPC からの信号取得回路作成とシンチレータブロックからの信号取得性能評価を実施した。すべて当初の見込み通りの性能を発揮したことを確認した。

さらに回路のバッテリー駆動の検討を実施し、8 時間程度のバッテリー動作化可能となる見込みが得られた。

以上の通り、試作機の作製に成功しその評価された特性から、全方向の γ 線入射方向情報の取得が可能であることを示した。

以上のことにより、当初の予定通りの成果を得ることができた。今後は、実際の原子力施設での採用を目指し、コストパフォーマンス面での最適化検討が必要となるであろう。

1. はじめに

既存の軽水炉などの原子力発電施設等の大型施設による大規模原子力災害では、施設中あるいは環境中へ放射性物質の放出を伴うリスクが微少なながらも存在し、作業員や住民の放射線防御のためには、放射性物質がどこにどの程度存在するかを迅速に探知する手段を予め備えておく必要がある。特に初期の段階において、施設内での放射性物質の位置分布は、事態収束にむけた作業を実施するうえで、作業員の防護のために線量情報の次に重要となる情報である。例えば、緊急時の弁手動操作に際して、放射性物質が周辺空間のどこに付着しているかの情報があれば、鉛シート等による遮蔽により、操作時や操作のための施設内移動の際の、作業員の被曝線量の効果的な低減が可能になると考えられる。また、周辺住民にとっては、放射性ヨウ素の情報、及び大気・地表沈着放射性物質から放出される γ 線による外部被曝情報は、避難経路や避難時期の決定、及びその際の被曝量評価に重要となる。例えば、線量上昇時に、放射線が上空のプルームから飛来していれば屋内退避が有効であると判断されるし、地上からが主であれば迅速な避難行動が重要であると判断できる。さらに、避難の際の車両に対する、放射線飛来方向及びその線源核種及び強度情報は、車内の住民配置や鉄板やレンガなどの端材を利用した一時的な遮蔽により被曝量の低減が可能になると共に、不均一方向による被曝線量の不確かさを低減し、詳細な線量評価が可能になると考えられる。

また、初期以降は、沈着放射性物質の核種ごとの分布情報を迅速に得ることは、修復作業環境確保のために重要となる。放射性ヨウ素が主要な核種であれば、時間による減衰が期待されるし、放射性セシウムが主であれば、除染作業に取り掛かる段階にあることが確認できる。しかしながら、既存のサーベイメータやスペクトロメータでは、検出器の存在する場所での放射線線量やエネルギースペクトルしか測定できず、ロボットや車両・航空機に搭載、あるいは徒歩にて、ある程度の空間を移動しながら測定することにより、その検出器有効領域の沈着物質の分布を推定することになる。そのため、サーベイ行為自体に時間を取られたり、あるいはサーベイを実施する作業員の被曝が不可避である欠点がある。一方、放射線飛来方向とそのエネルギー情報が同時に測定可能であれば、その地点に入射する放射線の線源情報が判明することになる。例えば、施設近傍において、その場所に飛来する放射線が、ダクト越しに来ているのか、スカイシャインがメインであるのか、あるいは床上の汚染物からきているのかが判明すれば、より迅速に効果的な対策が可能となる。特に線量率が高く、容易に作業員を投入することがはばかれるような場合でも、装置一台を遠隔操作で設置することのより、上記情報が取得可能となれば、作業員の被ばく線量低減に寄与することとなる。また、施設周辺においては、例えば田畑の地表において、その場所の線量にメインに影響する放射線が、田畑自体から放出されるのか、あるいは近隣の森林から放出されるのかが瞬時に判定することが可能となり、復旧作業あるいは修復作業の効率化に資することができると考えられる。図1-1に概念図を示す。

このためには、核種弁別能力を有し放射線の飛来方向が探知可能であり、かつ可搬な検出器、すなわちエネルギー分解能力を有するコンパクトなガンマカメラが有用であると考えられる。しかし、既存のガンマカメラは、ピンホールガンマカメラ等、鉛コリメータ等で γ 線の入射方向を絞ることが一般的であり、サイズ・重量の増大(30kg前後)を招くと共に、検出効率の劣化、すなわち迅速なリアルタイム情報収集には不向きであった。さらに視野が狭く、広範囲の領域を一度にモニタするためには複数台のガンマカメラが必要であり、既存のガンマカメラをそのまま

上記目的に適用することは困難である。また、コンプトン散乱を用いたガンマカメラが宇宙天文学などの分野で開発されてきているが、その動作原理上視野が 180 度（立体角で 2π 方向）に限られる。

大規模原子力災害が発生して時間が経過した後（数カ月～）の状況では、緊急に放射線入射情報を取得する必要はないため、上記の既存ガンマカメラを用いても、ある程度時間がかかるが、詳細な放射線の入射情報を得ることは可能である。現状では、そのための様々なガンマカメラが開発されつつあり、今後実用が進んでいくものと思われる。

一方、大規模原子力災害直後には、線源の事前情報は基本的に存在せず、360 度（ 4π 方向）から γ 線が入射する可能性があり、既存のコンプトンガンマカメラを採用しても最低でも 2 台の検出器を背中合わせにする必要がある。しかしながら緊急時には、迅速な情報取得が何よりも求められるため、検出器自体が全方向に感度を有することが望ましい。また、状況の変化が不明であるため、可能な限り早くに核種情報が得られる必要がある。

このような状況下に対応可能な、高検出効率、エネルギー弁別能力を有し、全方向に感度を有するガンマカメラの心臓部である放射線検出部開発として、シンチレータスタック型ガンマイメーজァの開発を本研究開発の最終的な目標となる。これは、高効率なガンマ線スペクトロメータとして使用されているシンチレーション検出器内の、放射線相互作用位置とその付与エネルギーを同時に取得し、入射ガンマ線のエネルギーと入射方向を逆計算し推定するものである。特に、棒状シンチレータをスタック状に束ねる構造を採用することで、コリメータを必要とせず、全方向に感度を有し、かつ高検出効率で上記の情報を得るものが実現できると考えている。概略図を図 1-2 に示す。また、コリメータを必要としないことから軽量コンパクトとなり、可搬型の検出システムが構築可能であると思われる。さらに、コンプトン散乱の式や検出器応答の統計的逆推定により、計数率にも依存するが、数十秒～数分間隔で飛来放射線のエネルギー及び方向が求められ、その場所の線量の主要因となっている放射性同位体の種類や位置の推定が可能になると期待される。

そこで、万が一事故が起こった際に施設内の核種ごとの位置分布や放射線量を迅速に把握するため、可搬型であり、核種弁別のためのエネルギー分解能力を有し、角度分解能 ± 45 度・検出効率 40% 程度で 360 度方向に感度を有するガンマカメラとして、シンチレーション検出器を用いたシンチレータスタック型ガンマ線イメージャの開発を本研究開発課題の目的とする。

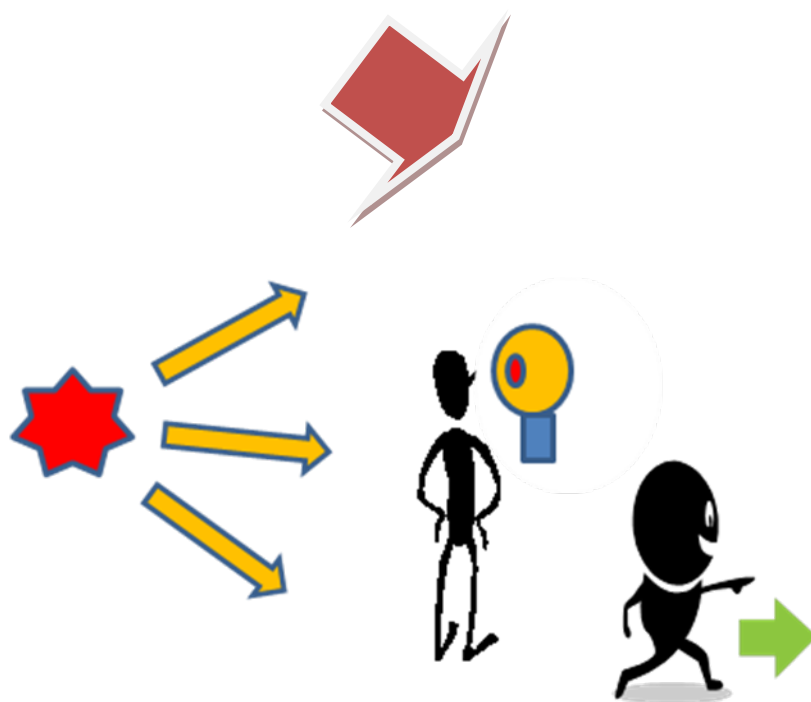
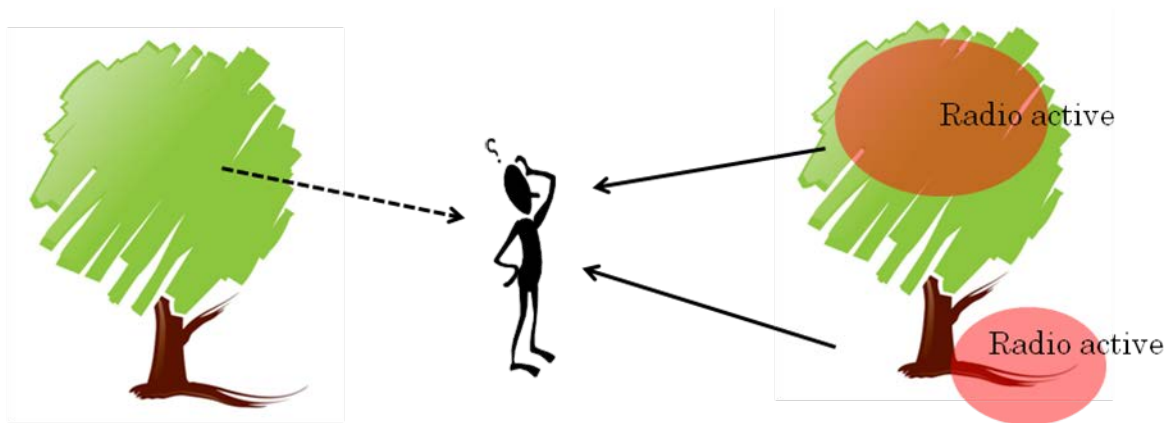


図 1-1 飛来放射線の方向情報概念図。飛来方向情報が無ければ線源となっている場所が分からず、線量計を人が持って周辺を探索する（＝被曝するリスクがある）必要あり、線量率が高ければそれも困難となる。検出器を設置するだけで飛来方向情報が分かれば、線源から距離をとったり遮蔽等の対策をすることが可能となり、線量低下、除染、遮蔽処置等の各種対応が容易となる。

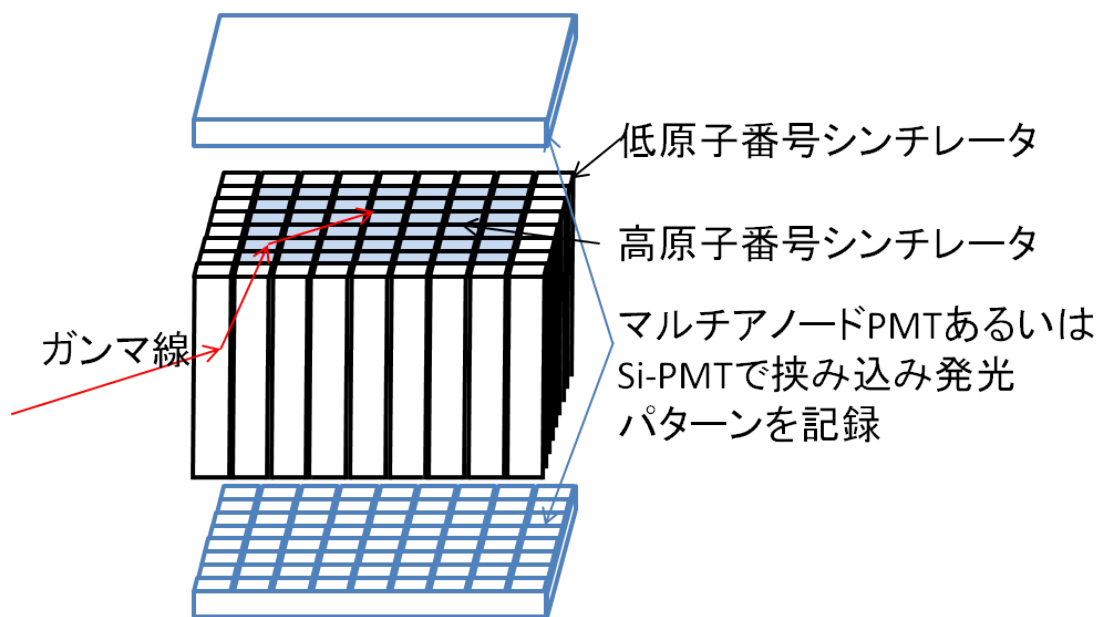


図 1-2 提案する γ 線イメージャの概念図。棒状のシンチレータをスタックし、 γ 線入射時のコンプトン散乱事象を記録・解析して入射方向情報を得る。なお、単純にそれぞれのシンチレータの出力和により、線量計や γ 線スペクトロメータとしても動作可能である。

2. 業務計画

2.1 全体計画

前章にて記述されたシンチレータスタック型ガンマ線イメージャの開発のためには、シンチレータと γ 線との相互作用位置及びその際の付与エネルギー量を同時に取得する必要がある。 γ 線と物質との相互作用には、光電効果・コンプトン散乱・対電子生成の3つの種類が知られているが、本研究開発において特に問題となる ^{137}Cs の放出する γ 線の持つエネルギー近傍では、コンプトン散乱が支配的になる。コンプトン散乱では、 γ 線はそのエネルギーをシンチレータへの付与エネルギー分だけエネルギーを減らして散乱していくことになる。この散乱による電子及び散乱 γ 線のエネルギー・散乱角は、エネルギー保存則と運動量保存則から容易に求めることができる。散乱した後の γ 線は、最終的に光電効果を起こしてシンチレータに吸収されることになるため、結局1本の γ 線入射あたり、シンチレータ内の数か所でエネルギー付与する相互作用が発生することになる。シンチレータは、エネルギー付与量に比例したシンチレーション光子数をランダムな方向へ放出するため、相互作用位置及びそのエネルギーを取得するためには、シンチレーション光子をうまくコントロールし、その発光量及び位置情報を取得する方法が必要となる。我々の採用している手法は、棒状のシンチレータを束ね、各棒からのシンチレーション光を独立に読み出すことにより、棒状シンチレータ自体の位置、及び棒状シンチレータの両端からの光出力の差からシンチレータのどの位置で発光しかたの情報を取得することとしている。各シンチレータ独立に動作させ時間同期を取ることで、複数カ所の発光事象のそれぞれの発光情報を得ることが可能となる。同一の棒状シンチレータで複数点の発光事象があった場合には区別できずに偽情報を与えることになるが、シンチレータロッドを十分細くすれば、その事象率は十分に低く保つことができる。

そのため、ガンマイメージャを開発するための具体的な開発は以下のような要素に分割することができる。

- ①スタックすべきシンチレータの選定
- ②棒状シンチレータから発光点位置情報を取得するためのシンチレータの加工方法
- ③入射 γ 線の方向分解能を向上させるためのシンチレータスタックパターン
- ④棒状シンチレータ両端からの光読み出し装置の開発

の4つがあげられる。即ち、放射線を直接とらえる材料であるシンチレータ材の選定と、そのシンチレータの長軸方向発光位置情報を取得するための加工法、及びその加工された棒状シンチレータのスタック方法の検討が必要である。さらに具体的な検出システムとするためには、入射 γ 線に対して十分な透過特性を有する光読み出しセンサーの開発が必要となる。

これらの開発のために、平成24年度から4年間を2つのフェーズに分けて実施することとした。即ち、前半の平成24年度～25年度を要素技術の開発期間とし、上記①～④の要素それぞれ個別に研究開発を実施することとする。ただし、各要素を個別に開発するとしても、それぞれお互いに影響を及ぼすため、ある程度は情報を共有しつつ実施することとする。また、後半の平成26年度～27年度は、検証フェーズとし、試作機を作成することにより、全体のシステムとしての開発を実施することとする。検証フェーズでは、個々の要素を一つに組み上げて、全体としての整合性や特性評価等を実施し、最終的な検出器システムの開発を目指すものとする。なお、本業務の全体計画図を図2.1-1に示す。

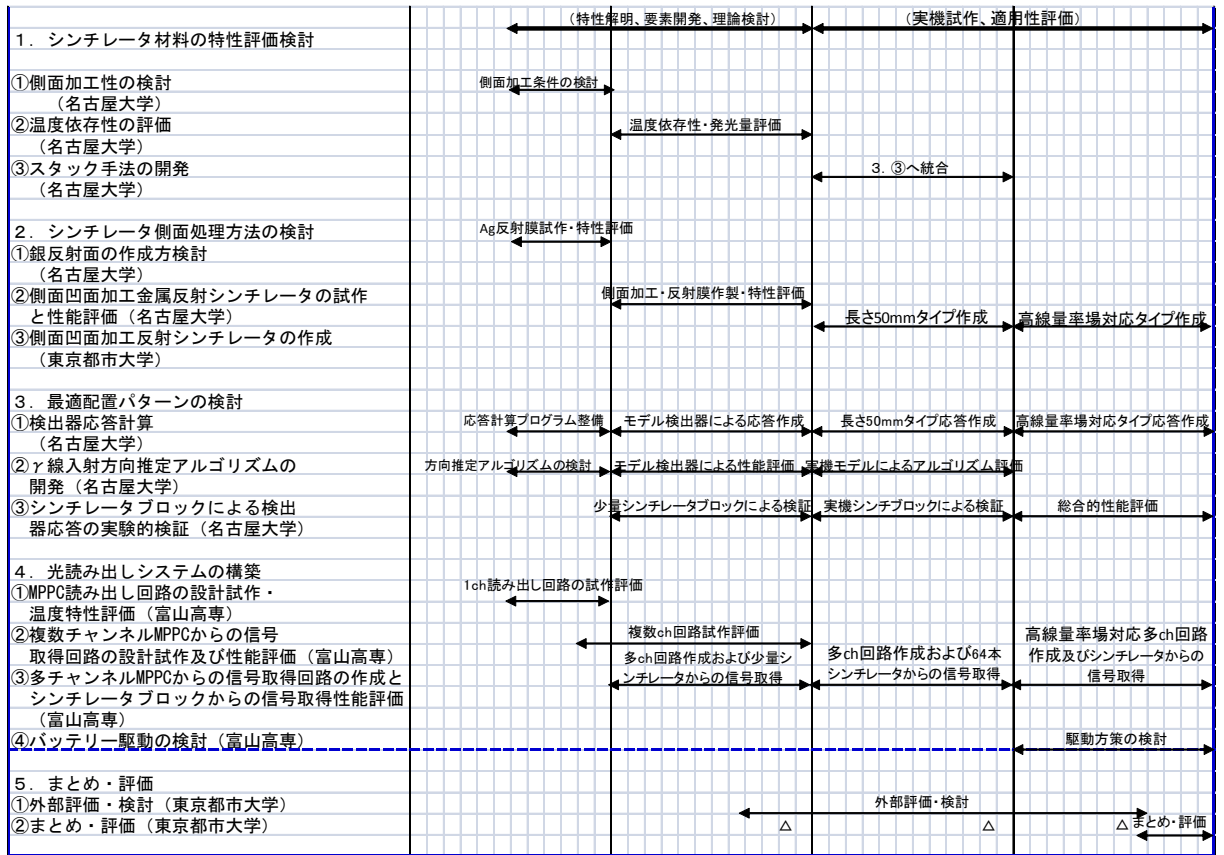


図 2.1-1 期間全体の開発計画

3. シンチレータ材料の特性評価検討及びシンチレータ側面処理方法の検討

3.1 材料評価検討 (H24~H25)

3.1.1 シンチレータ加工性の評価

数々のシンチレータ材料が一般に供給されており、本研究開発に最適なシンチレータ材料を選定する必要がある。そのため、棒状シンチレータとして、ルテチウムイットリウムオルソシリケート (LYSO)、フッ化カルシウム (CaF_2)、ガドリニウムアルミニウムガリウムガーネット (GAGG)、プラスチックシンチレータ、ヨウ化セシウム (CsI) の、潮解性を有しない (有しても少ない) シンチレータを用意して加工性の評価を実施した。これらは、シンチレータの長軸方向の位置分解能を向上するために加工を必要とするため、実施するものである。また、各種シンチレータの特性から、本目的に合致するシンチレータの選別を実施した。

今回ターゲットとしたシンチレータの特性を以下に記す。

①セリウム添加 GAGG シンチレータ

本シンチレータは東北大学と古河機械金属の共同で開発された新規シンチレータであり、取扱いの簡便さ、単位エネルギー付与あたりの発光光子数の多さが注目されているシンチレータである。シンチレータそのものは黄色に着色しているが、発光波長が長波長側 (中心波長約 520nm) であり、特に着色していること自体は干渉しないと謳われている。また潮解性が無く、発光時定数が 88nsec と短く、密度も $6.6\text{g}/\text{cm}^3$ と比較的大きいことから、医療用、セキュリティ用、資源探査用等への利用が期待されている。特に発光波長が長波長であることは、Si 系光検出器の光感度特性にマッチングしており、ポータブル機器への応用が見込まれる。

②セリウム添加 LYSO シンチレータ

高密度 ($7.4\text{g}/\text{cm}^3$) を特徴としており、発光時定数も 40nsec. と短く優れた特徴を有するシンチレータである。潮解性が無く、また GAGG と異なり無色透明であり、原子物理学や核医学に適用されているシンチレータである。しかしながら、ルテチウムの自己放射能があり、低レベル放射線測定には向いていないという欠点があるが、他方、その高密度から γ 線の検出効率に優れた特徴を有する。

③タリウム添加 CsI シンチレータ

密度は $4.5\text{g}/\text{cm}^3$ と上記シンチレータより小さいが、単位エネルギー付与あたりの発光光子数が多く、比較的古くから知られているシンチレータ材料である。若干の潮解性を有することが知られているが、シンチレーション発光波長の中心波長が 550nm と長波長側であり、GAGG と同じく Si 系光センサとの光感度マッチングに優れている。しかしながら柔らかく (Mohs 硬度 2) 複雑な形状への加工は困難とされている。

④ユーロピウム添加 CaF_2 シンチレータ

密度は $3.19\text{g}/\text{cm}^3$ と軽いシンチレータである。発光時定数も $0.9\mu\text{sec}$ と比較的長く、 γ 線計測用には向いていないと考えられている材料であるが、光収率が比較的高いため、本研究開発では、入射 γ 線をコンプトン散乱されるための散乱検出器用シンチレータの候補としている。

⑤プラスチックシンチレータ

プラスチックベースであり、密度が $1.03\text{g}/\text{cm}^3$ と軽いシンチレータである。発光時定数が短いため、高速応答の検出器を必要とする場合に良く使用される。 CaF_2 シンチレータと同様に、本研究開発では、入射 γ 線に対するコンプトン散乱検出器用のシンチレータ候補としている。

表 3. 1-1 シンチレータ特性一覧

シンチレータ候補	GAGG (Ce)	LYSO (Ce)	CsI (Tl)	CaF ₂ (Eu)	プラスチック
光収量 (photons/MeV)	60,000	32,000	54,000	24,000	10,500
潮解性	無	無	若干有	無	無(軟化点 70°C)
自己放射能	無	有 (¹⁷⁶ Lu)	無	無	無

表 3. 1-2 加工性調査結果一覧

シンチレータ候補	GAGG (Ce)	LYSO (Ce)	CsI (Tl)	CaF ₂ (Eu)	プラスチック
ラッピング研磨加工	○	○	—	○	○
ワックス固定	○	○	×	○	△
加工時間 (1面あたり)	24分	20分	—	5分	4分

以上のシンチレータに対し、ラッピング装置により側面加工性を評価したところ、表 3. 1-2 の通りとなった。本研究開発のシンチレータとしては、自由な加工が可能であることが必須であり、さらに加工時間がより短いことが求められる。また、自己放射能がある場合、低線量率場でのデータ取得に困難をきたすため、望ましくない。これらの点に注目し、上記加工結果から、本研究開発のシンチレータ候補の順位は、

1位 GAGG

2位 CaF₂

となった。なお、CsI 及びプラスチックシンチレータは、今回の加工法を採用する限り候補から外した方が良いと考えられ、GAGG を本研究開発の候補として以下の研究開発を進めることとした。

3.1.2 温度特性評価

シンチレータからの光を検出する検出器として、光電子増倍管 (PMT) とマルチピクセルカウンタ (MPPC) の 2 種類が本研究開発用の候補に挙げられている。特に MPPC はシングルフォトンの検出が可能であり磁場にも不感であることから、これまで使用してきた PMT の代替として各分野で適用が進みつつある。特に MPPC は 1mm 以下の Si 基板を用いて製造されるため、ガンマ線に対する遮蔽能力が低く、本研究開発の最終目的とするところの、全方向ガンマイメージャには適していると見込まれる。ところが、MPPC は PMT と異なり、温度依存性が大きいことが知られている。そこで、GAGG シンチレータとカップリングした際の温度依存性評価を以下の通りに実施した。

実験体系図を図 3.1-1 に示す。温度依存性は素子ごとの依存性の違いを取り除くため、MPPC、PMT の素子の一つそれぞれシンチレータ片面に光学接続し、検出器全体を温度コントロール可能な暗室内へ設置し、線源からのガンマ線スペクトルを測定した。ガンマ線スペクトルの全吸収ピーク位置により光検出器のゲイン温度依存性評価を実施した。なお、暗室として用いた機器はライトスペック恒温器 LU-113 であり、 $-20\sim 50^{\circ}\text{C}$ の温度コントロール能力を有するため、ほぼ日本の全土の温度範囲に対応することが可能であると見込まれる。

また、使用した GAGG シンチレータと、MPPC、PMT の素子の写真を図 3.1-2 に示す。PMT と比較し、MPPC が非常に小型であることを見て取ることができる。

評価結果を図 3.1-3 に示す。図中横軸は恒温器動作温度であり、縦軸は ^{137}Cs 線源から放出される 662keV の全吸収ピーク位置となっている。このピーク位置は、シンチレータの発光光子数と光検出器のゲインの積に比例する。この評価結果により MPPC 単体の温度依存性の評価は不可能であるが、GAGG シンチレータが第一候補であるため、GAGG シンチレータの温度特性も含めて全体の温度依存性が評価されることとなる。比較として、MPPC の代わりに PMT (浜松ホトニクス社製 H6524) を用いた場合も評価した。

図 3.1-3 に示される通り、PMT の場合、若干低温側の出力が大きくなっている様に見えるものの、ほぼ温度に依存せず一定の位置を保持しており、PMT を光検出器として用いる場合はあまり温度依存性が存在しないことが示された。すなわち、PMT を用いて検出器を構成する場合は、温度補正の必要はないことになる。

一方、MPPC の場合は、図 3.1-3 に示される通り、ファクター 2 以上の変化が確認された。特に低温になるほどゲインが増大する傾向が観察された。一般に、シンチレータ直後の段階で信号増幅を実施することが、S/N の観点から望ましい。そのため、低温で動作させることが望ましいと言える。しかし、結露の問題もあり、屋外で用いる場合の検出部を低温にコントロールすることは困難が予想される。そのため、GAGG シンチレータと MPPC とで検出器を構成する場合は、温度コントロールをすることが最も望ましいが、次善として検出器部の温度をモニターし、それぞれの出力を予め取得していた温度校正曲線により校正することが必要であると結論付けられる。

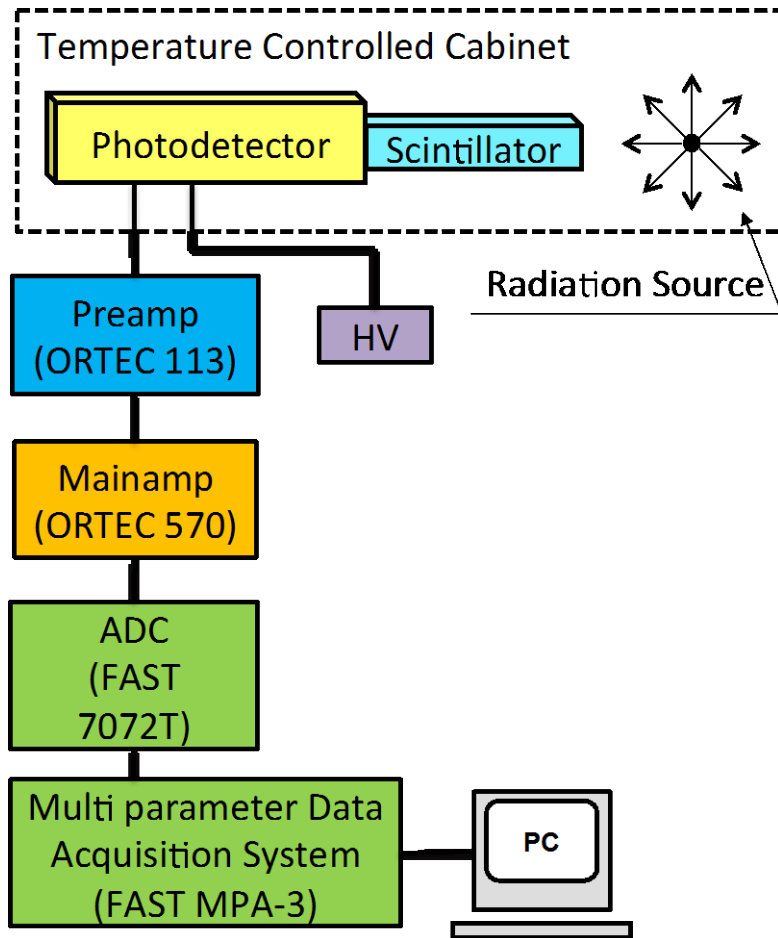


図 3.1-1 温度特性評価実験体系図。シンチレータと、MPPC または PMT が接続され（図中 Photodetector 部分）、それぞれの出力は、ORTEC 社製プリアンプ、メインアンプを通じ、FastComtech 社製 ADC により波高分布が取得された。



図 3.1-2 使用した GAGG シンチレータと MPPC、PMT の素子の写真。比較対象として 10 円玉を並べてある。MPPC の小型化に対する有利さと、外部から飛来するガンマ線に対する透明性が期待される。

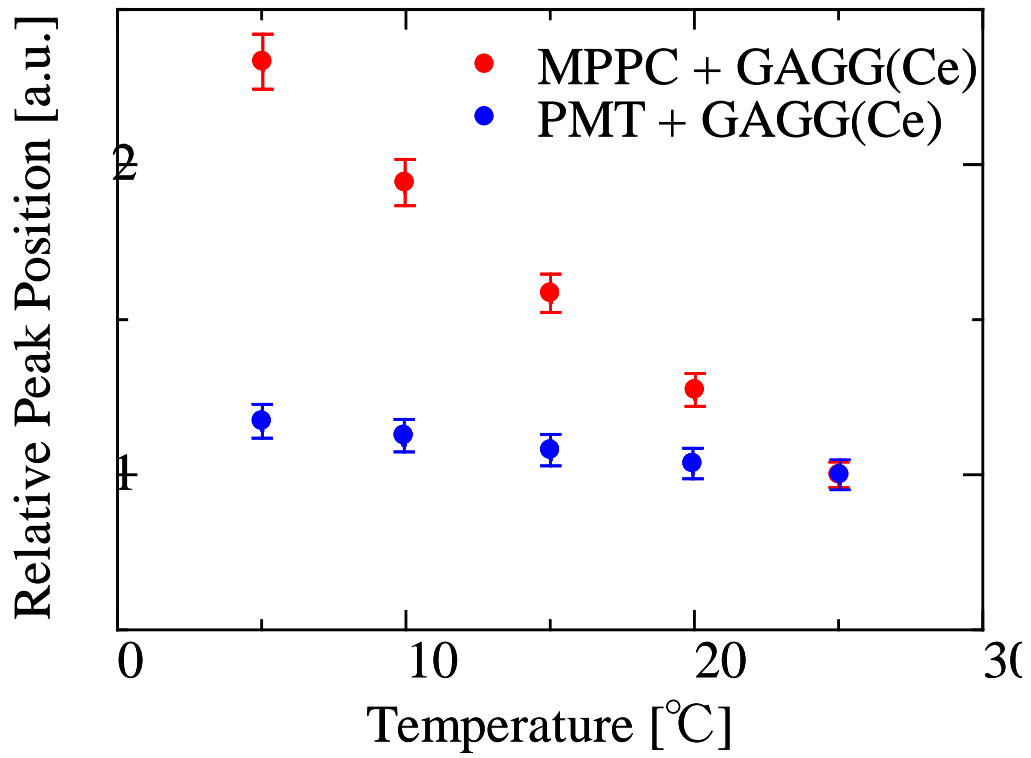


図 3.1-3 ^{137}Cs の全吸収ピークの温度依存性。PMT と比較し、MPPC の温度依存性の大きい。なお、測定温度範囲は 5°C ~ 25°C である。

3.1.3 GAGG シンチレータ側面処理方法の検討

本研究開発では、棒状シンチレータの両端に光検出器を配し、その二つの光検出器の出力の差異から、シンチレータ内での放射線相互作用位置、出力の和から放射線相互作用でのエネルギー付与量を算出する。そのため、最も優れた位置分解能とエネルギー分解能を得るための、棒状シンチレータの側面の処理方法を探索する必要がある。

そこで、試験方法として、以下の三つの加工を施した GAGG シンチレータに対する、 ^{137}Cs 線源に対するエネルギー分解能と位置分解能を測定することにより、評価を実施した。位置分解能、エネルギー分解能の評価は、鉛ブロックにより 3mm にコリメートされたガンマ線をシンチレータに照射することにより実施した。また、光検出器として MPPC を用いた。なお、MPPC は、前節で示された通り温度依存性が大きいいため、25°C の環境下で評価を実施した。

実験体系を図 3.1-4 に示す。シンチレータの両端に MPPC を接続し、2 つの MPPC の出力を、前節の回路系を 2 系統に接続し、それぞれの波高値を記録した。

また、側面の加工方法は

①未加工

側面を加工せず、そのまま両端に光検出器を接続したもの

②1 面凹面鏡面加工

側面の 1 面を、ラッピング装置により曲率半径 2.0m で凹面加工を施し、さらに研磨プレート (@80nm 研磨粒子) にて鏡面加工を実施したもの

③側面金属膜蒸着加工

側面の 1 面に、金属 Ag をスパッタリングしたものの 3 種類である。

この 3 種類のシンチレータ加工に対しエネルギー分解能、位置分解能の取得を行った。その結果を以下に示す。

①未加工

平成 25 年度調達の未加工シンチレータ (サイズ : $5.8 \times 5.8 \times 44\text{mm}^3$) に対し、エネルギー分解能と位置分解能を評価した。図 3.1-5 に ^{137}Cs に対するエネルギースペクトルを示す。また、3 か所に照射した場合の、両端出力の比の自然対数をとった場合の度数分布を図 3.1-6 に示す。得られたエネルギー分解能と位置分解能を表 3.1-3 に示す。

なおこの値は、平成 24 年度に調達した GAGG シンチレータの値 (エネルギー分解能 13%、位置分解能 16mm with PMT) に比べ、エネルギー分解能が改善しているが、位置分解能がかなり悪化している。PMT を光センサーとして使用しているため、その影響とも考えられる。これは、PMT の有効感度波長領域が MPPC に比較すると短波長に偏っており、GAGG は短波長側で自己吸収が報告されているため、PMT で測定した場合、シンチレーション光の自己吸収がより顕著に表れるため、このような傾向を示したと説明付けられる。さらに、平成 25 年度に調達した GAGG シンチレータは、平成 24 年度に購入した GAGG シンチレータと比較し、透明度が改善されていたため自己吸収が減少し、シンチレーション光子がシンチレータ内部を伝搬する際に失われなくなった結果、統計精度の向上に伴うエネルギー分解能の改善、光のロスが減ったことによる位置分解能の劣化 (左右とも常に同量の光子が届く) が表れたものと考えられる。

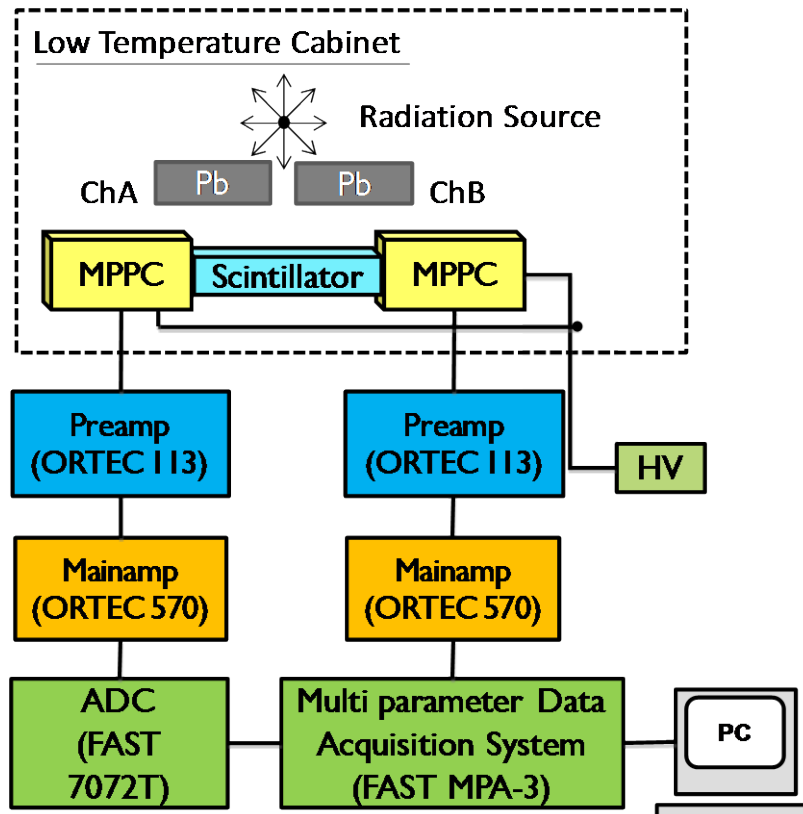


図 3.1-4 側面特性評価実験体系図。シンチレータ両端に MPPC を配し、マルチパラメータデータ収集装置に手両端からの信号を記録する。検出器部は温度コントロール暗箱に納められ、25°C下に置かれた。

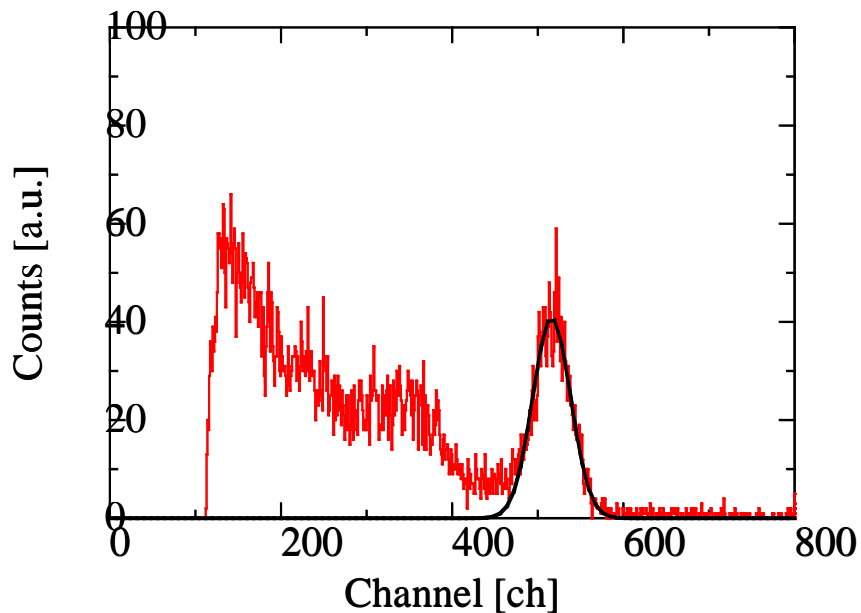


図 3.1-5 中央に照射した場合のエネルギースペクトル。エネルギー分解能はガウス関数をフィッティングし、約10.1%と評価された。

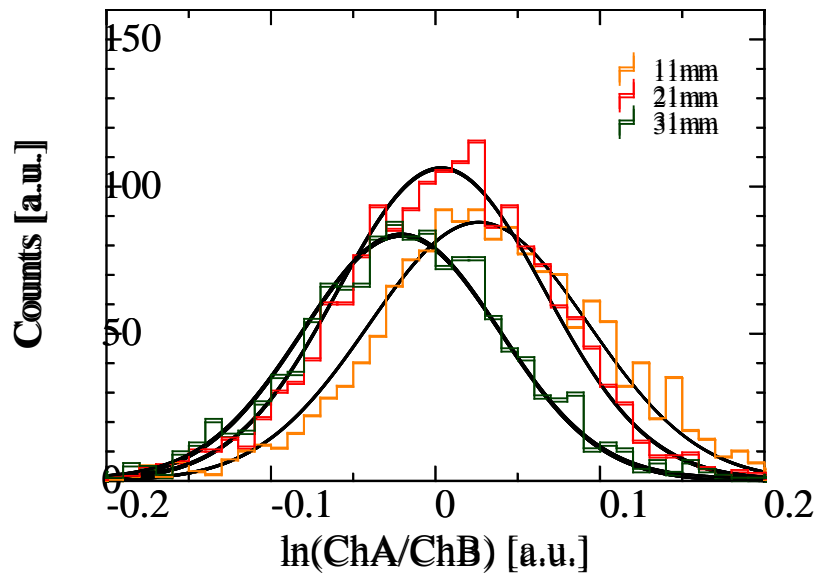


図 3.1-6 シンチレータの位置分布測定結果。位置分解能は 63mm と評価された

このことは、シンチレータのロッド製造時期により、シンチレータ自体の特性が変化する可能性が明らかになったことを示しており、シンチレータの評価を個別に実施する必要性を示している。

②1 面凹面鏡面加工

凹面加工として、ラッピングマシンによる研磨を実施した後に特性評価を実施した。なお、加工最終段階でポリッシングパッドによる鏡面研磨工程を追加している。図 3.1-7、図 3.1-8 にエネルギー分解能、位置分解能評価結果を示す。

③側面金属膜蒸着加工

GAGG シンチレータの屈折率は 1.93 である。図 3.1-9 に示すが、テフロンテープを巻いたとしてもシンチレータ側面は空気と接するため、全反射角度は側面垂線に対して 31.2 度となる。両端面に接続する MPPC の屈折率は 1.6 程度であると考えられるため、シンチレータから MPPC へ光がぬけだすためには、入射角 56 度よりも急な角度で入射する必要がある。そのため、MPPC へ抜けるシンチレーション光は、側面で反射せずダイレクトに届く成分を除くと、側面で全反射した成分でない限り、端面で MPPC へ抜け出すことができない。

以上のことを考慮すると、側面反射率をコントロールすることにより、シンチレーション光子の光センサーへの伝達効率（＝途中での吸収率）の制御が実現できると考えられる。

側面反射率をコントロールするために、側面に金属 Ag をスパッタリングした。金属 Ag 被膜は可視波長領域での光反射率に優れるものの、全反射よりかは反射率が落ちるため、光の伝達効率自体が低下する傾向にある。そこで、スパッタリングコーター（SC-701Mk II）にて、スパッタリング時間を変化させ膜厚を変化させつつエネルギー分解能、位置分解能の測定を実施した。

図 3.1-10 にスパッタリング前の GAGG シンチレータと、30 秒スパッタリングした後の GAGG シンチレータを示す。30 秒のスパッタリング時間でも、向こう側が透けて見える程度の Ag 膜厚である。

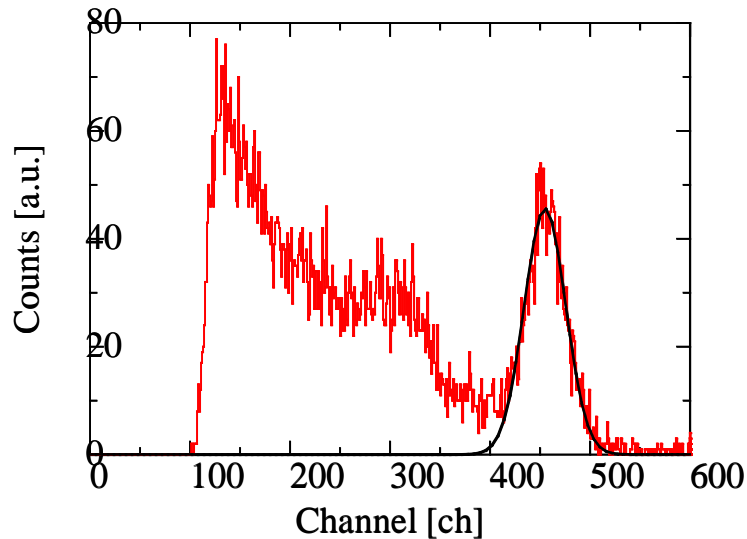


図 3.1-7 側面凹面鏡面加工 GAGG シンチレータのエネルギー分解能測定結果。 ^{137}Cs の全吸収ピークにガウス関数をフィッティングしエネルギー分解能を求めた

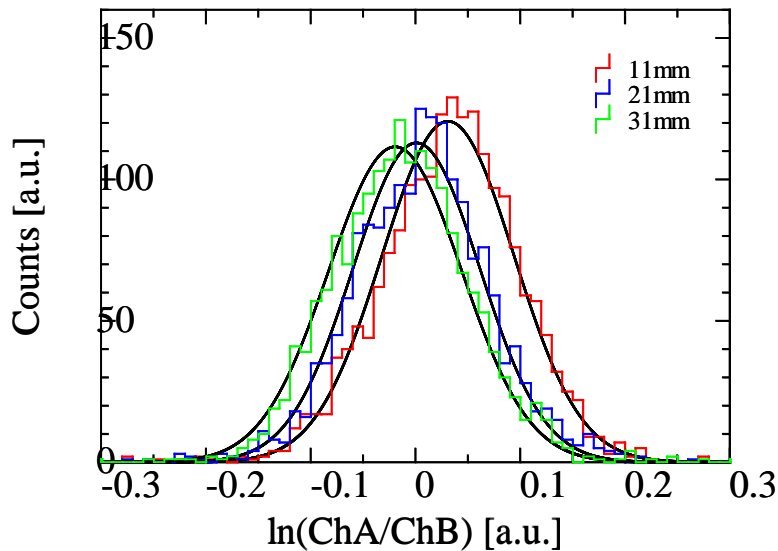


図 3.1-8 側面凹面鏡面加工 GAGG シンチレータの位置分布測定結果。左右の出力の比の自然対数をとったもののヒストグラム。

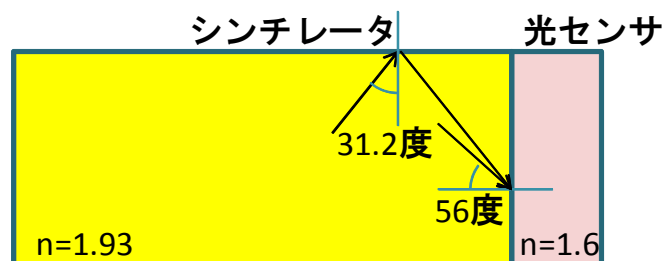


図 3.1-9 GAGG シンチレータ（左部）と光センサが密着した場合の、シンチレータ側面、光センサ結合面での全反射条件。光センサに入射するシンチレーション光は、無反射成分をのぞくと、側面で必ず全反射しなければならない

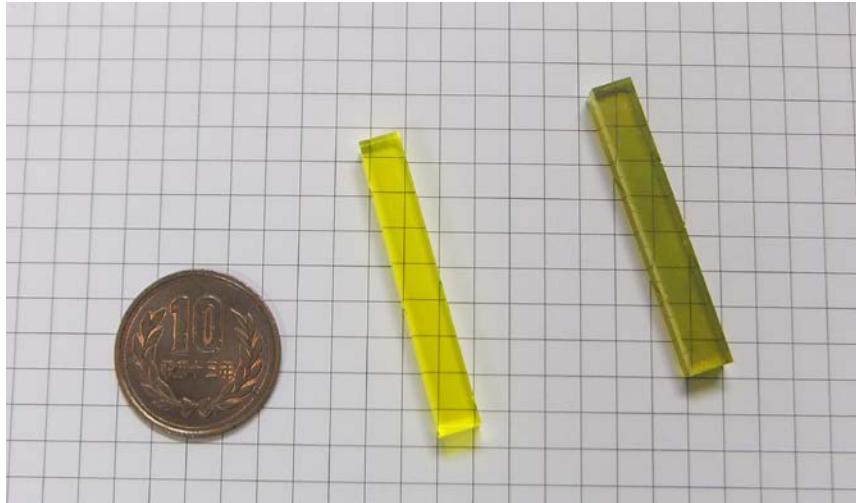


図 3.1-10 スパッタリング前、スパッタリング後の GAGG シンチレータロッド

図 3.1-11 にエネルギー分解能と、位置分解能の、スパッタリング時間依存性を示す。スパッタリング時間が長くなる、即ち Ag 膜厚が厚くなるにつれ、エネルギー分解能は徐々に劣化している。これは、全反射して端面まで伝わるシンチレーション光が減少し、光子統計が劣化したためだと考えられる。一方、位置分解能は 20mm 以下に急激に改善している。これは、側面反射でのシンチレーション光の減弱が導入されたため、左右の端面の MPPC 位置での到達シンチレーション光子数に位置依存が表れ始めたためと考えられる。図 3.1-12、図 3.1-13 に ^{137}Cs のエネルギースペクトル、位置分布測定結果を示す。全吸収ピークが観察されると共に、各入射位置に対応するピークが位置分布測定結果に表れている。この結果から、5.8mm 角の GAGG シンチレータ（平成 25 年度調達ロット）においては、約 30 秒のスパッタリング時間により蒸着される Ag 被膜を側面に持たせた加工が、最も目的に合致した加工方法であると結論付けられる。

なお、加工方法①②③のエネルギー分解能、位置分解能の一覧を表 3.1-3 にまとめて示す。この結果より、側面金属膜蒸着加工が最も本研究開発目的に適したシンチレータを実現可能な加工方法であると結論付けられる。

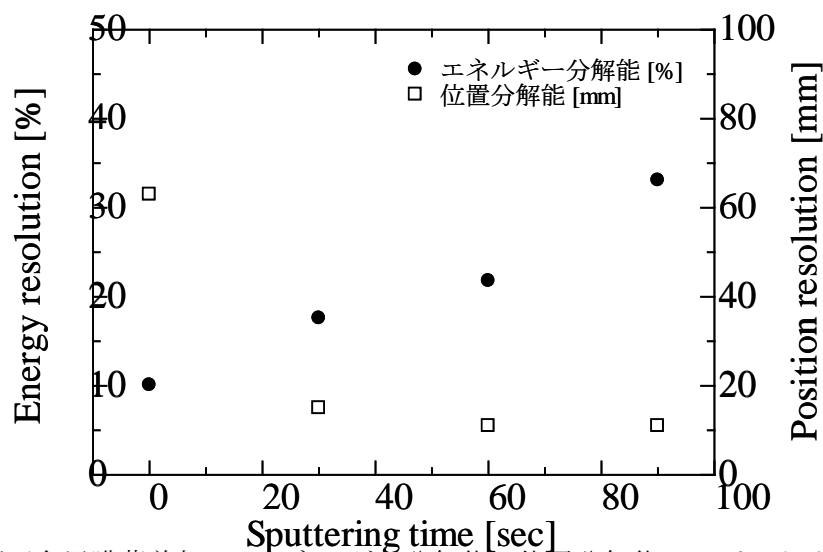


図 3.1-11 側面金属膜蒸着加工のエネルギー分解能・位置分解能のスパッタリング時間依存性。スパッタリング時間 30 秒前後が最適値であると考えられる

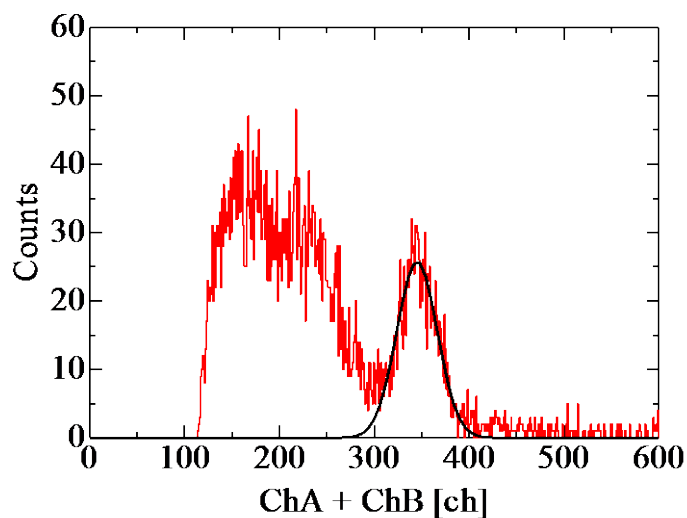


図 3.1-12 側面金属膜蒸着加工シンチレータの ^{137}Cs のエネルギースペクトル

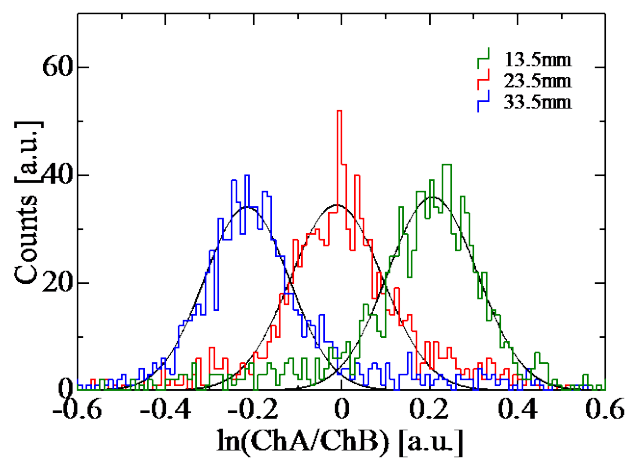


図 3.1-13 側面金属膜蒸着加工シンチレータの位置分布測定結果

表 3.1-3 加工方法①②③のエネルギー分解能、位置分解能の一覧

	エネルギー分解能	位置分解能
未加工	10.1%	63mm
一面凹面鏡面加工	10.7%	56mm
側面金属膜蒸着加工	18%	17mm

3.2 側面処理の実施 (H26~H27)

3.2.1 3mm 角 GAGG シンチレータ側面処理

前節の結果をもとに、平成 26 年度に調達した 3mm 角 GAGG シンチレータの側面金属薄膜スパッタリング処理を行った。ロット一本ごとに特性が異なるため、1 本ずつ個別に特性評価を行う必要がある。図 3.2-1 及び図 3.2-2 に示す実験体系にて γ 線照射実験を行い特性を取得した。図 3.2-1 は 1 本ずつの特性評価、図 3.2-2 は 2 本同時に評価した場合の体系である。シンチレータ両端に MPPC 光センサを配置し、鉛コリメータ(100×100×30 mm³、 ϕ 3.0 or slit 3 mm)を用いてシンチレータ長軸方向 5 mm から 45 mm まで 10 mm 間隔ごとに γ 線を照射した。なお、使用した γ 線源は¹³⁷Cs 線源である。

得られたデータの一例として、Lot.No.1 の中心照射時の波高分布及び、照射位置ごとの比率分布を図 3.2-3 と図 3.2-4 に示す。なお、恒温槽内に検出器を設置し 25°C に維持しながら実験を行った。測定時間は 300 sec とした。照射位置ごとの各分解能の平均を検査データとして使用した。この実験結果より、各シンチレータのエネルギー分解能、位置分解能を評価した。

側面処理前の 64 本の GAGG(Ce) シンチレータの特性評価結果を表 3.2-1、図 3.2-5 に示す。図 3.2-5 を見てわかる様に、今年度購入した GAGG(Ce) シンチレータには同一ロットにもかかわらず個体差があり、減衰長が異なり、それによりエネルギー分解能・位置分解能共に異なっている。しかしながら指数関数的な減衰をする場合の理論曲線に取得データはしたがっており、側面スパッタリング処理にて側面反射率をコントロールすることにより、減衰長さの制御、それにより特性の改善が見込まれることが判明した。なお、減衰長は方端面の MPPC 出力の発光量スペクトルのピーク位置が、照射位置によって異なることを利用して算出した。

次に、シンチレータ側面に Ag スパッタリングを行うことで減衰長の調整を行った。スパッタリング時間と減衰長の関係求めるため、スパッタリング時間を変えて減衰長の依存性を求めた。その結果を図 3.2-6 に示す。この依存性を使用し、減衰長が均一になるようなスパッタリング時間を算出し、その時間でスパッタリング処理を実施した。各シンチレータに対するスパッタリング時間を表 3.2-2 に示す。なお、特性の良いシンチレータ (lot.No.8) に関しては、スパッタリング処理を行わなかった。

スパッタリング処理後のシンチレータ数本に対して、特性評価を行った。特性評価結果を表 3.2-3 に示す。また、減衰長と分解能の関係を図 3.2-7 に青い点として示す。この図から、スパッタリング後の減衰長がコントロールされており、位置分解能の改善が確認された。またほぼ近い値に集中していることが確認でき、特性のばらつきが抑えられていることも判明し、本処理の有効性が示された。なお、図 3.2-8 にスパッタリング前と後の GAGG(Ce) シンチレータの一例の写真を示す。

以上により 64 本の 3mm 角 GAGG(Ce) シンチレータの側面処理が完了した。

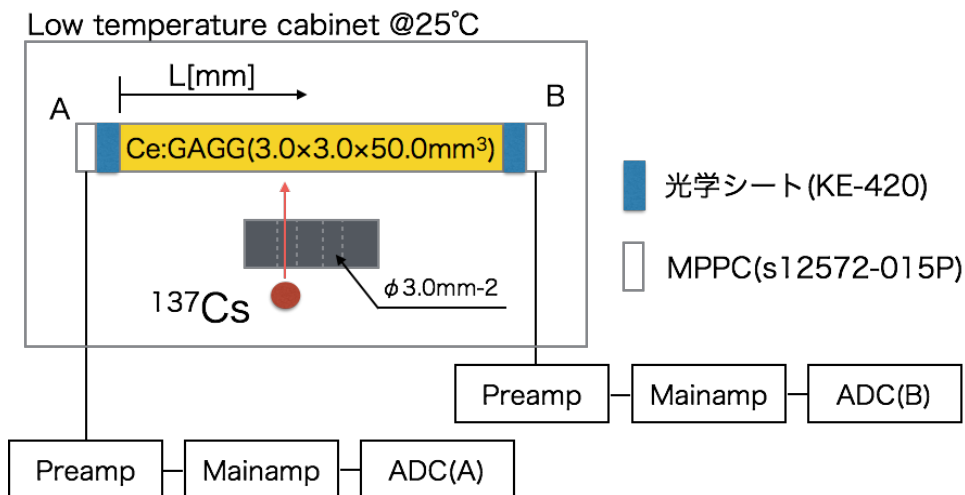


図 3.2-1 1本ずつ特性評価を実施した際の実験体系図。シンチレータとMPPCの間には光カップリングとして信越化学製 KE-420 ジェルシートを挟み、密着性を上げた。

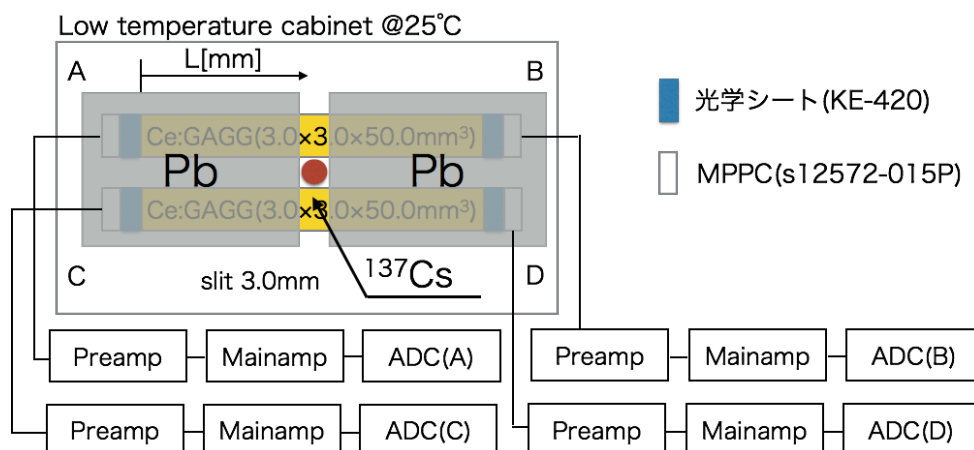


図 3.2-2 2本ずつ特性評価を行った際の実験体系図。γ線はスリット状にコリメートされている

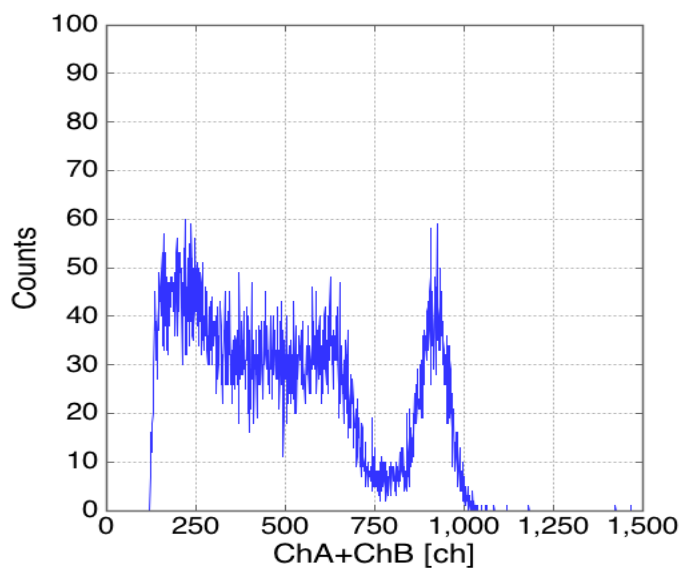


図 3.2-3 Lot 1 のシンチレータロッドの波高分布図。左右のMPPCの出力の和のヒストグラムである。¹³⁷Cs から放出される 662keV のγ線の全吸収ピーク及びコンプトン連続部が観測されている。

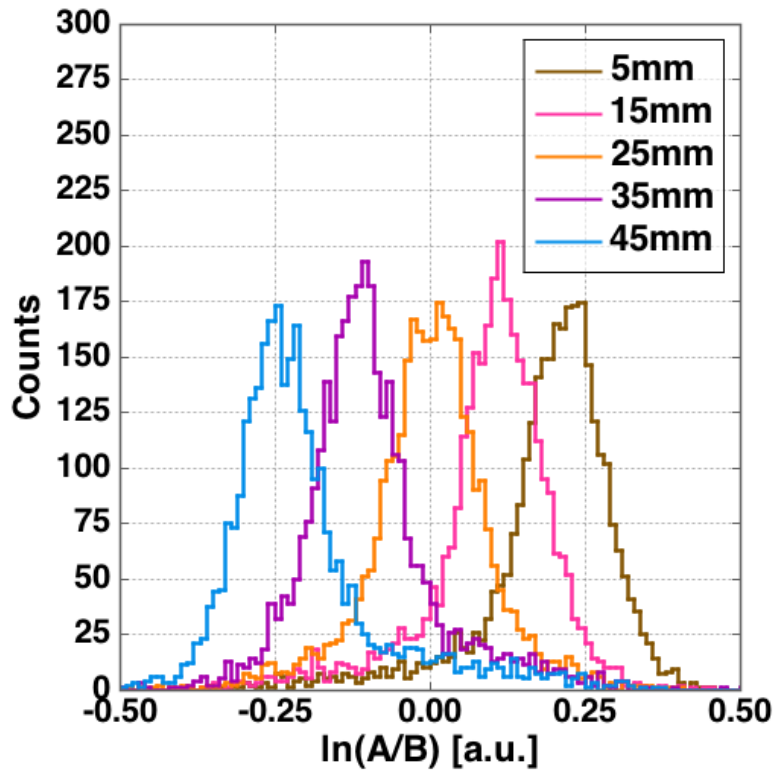


図 3.2-4 Lot 1 のシンチレータロッドの位置分布のヒストグラム。左右の MPPC の出力の比の対数を横軸にして度数分布をプロットしてある。それぞれの照射位置に対しピークが観測され、このピークの位置間隔が 10mm に対応している。ピーク半値幅より位置分解能を評価した

表 3.2-1 シンチレータ 64 本分のエネルギー分解能及び位置分解能の表。なお、各照射位置での片方の MPPC によるエネルギースペクトルデータの全吸収ピークの位置依存性からシンチレータの光減衰長も評価し表に掲載している。

lotNo	エネルギー分解能[%] @662keV	位置分解能[mm] @662keV	減衰長[mm]	備考
1	10.6	13	172.634	
2	10.7	11	140.298	
3	10.3	13	182.942	
4	10.7	15	204.04	
5	10.3	12	146.89	
6	11.0	14	182.078	
7	10.8	14	187.946	
8	10.4	10	136.924	
9	10.6	16	217.28	

10	10.7	11	139.252	
11	11.6	15	177.13	
12	10.3	13	162.518	
13	10.4	11	134.686	
14	10.7	22	292.44	
15	11.7	28	342.54	
16	10.6	18	232.44	
17	11.0	16	200.2	
18	10.7	14	179.094	
19	10.7	11	145.722	
20	11.2	19	251.32	
21	10.9	13	158.88	
22	11.3	20	244.06	
23	10.3	20	262.16	
24	10.7	26	348.8	
25	10.4	28	376.86	
26	10.9	22	290.38	
27	11.4	26	332.62	
28	11.2	27	358.26	
29	11.2	20	258.06	
30	11.4	25	321.9	
31	10.4	22	297.46	
32	10.8	13	173.654	
33	10.7	14	169.97	
34	10.6	12	152.814	
35	10.6	15	190.99	

36	10.8	13	164.18	
37	10.5	15	204.62	
38	10.5	14	180.19	
39	10.6	13	162.24	
40	10.4	15	190.344	
41	11.3	16	216.38	
42	10.6	14	187.236	
43	11.1	16	203.78	
44	10.6	13	167.394	
45	10.3	18	248.36	
46	10.7	15	198.298	
47	11.1	23	311.76	
48	10.4	16	219.28	
49	11.4	15	180.198	
50	10.7	12	144.766	
51	11.0	13	156.21	
52	11.0	13	144.766	
53	10.6	13	173.566	
54	10.9	14	168.588	
55	10.8	14	187.4	
56	10.9	17	223.58	
57	10.7	20	259.9	
58	10.6	12	147.726	
59	11.0	14	185.428	
60	11.0	18	224.62	
61	10.8	11	115.014	

62	Lot No00 で代用			
63	10.9	15	192.316	
64	10.6	11	129.348	

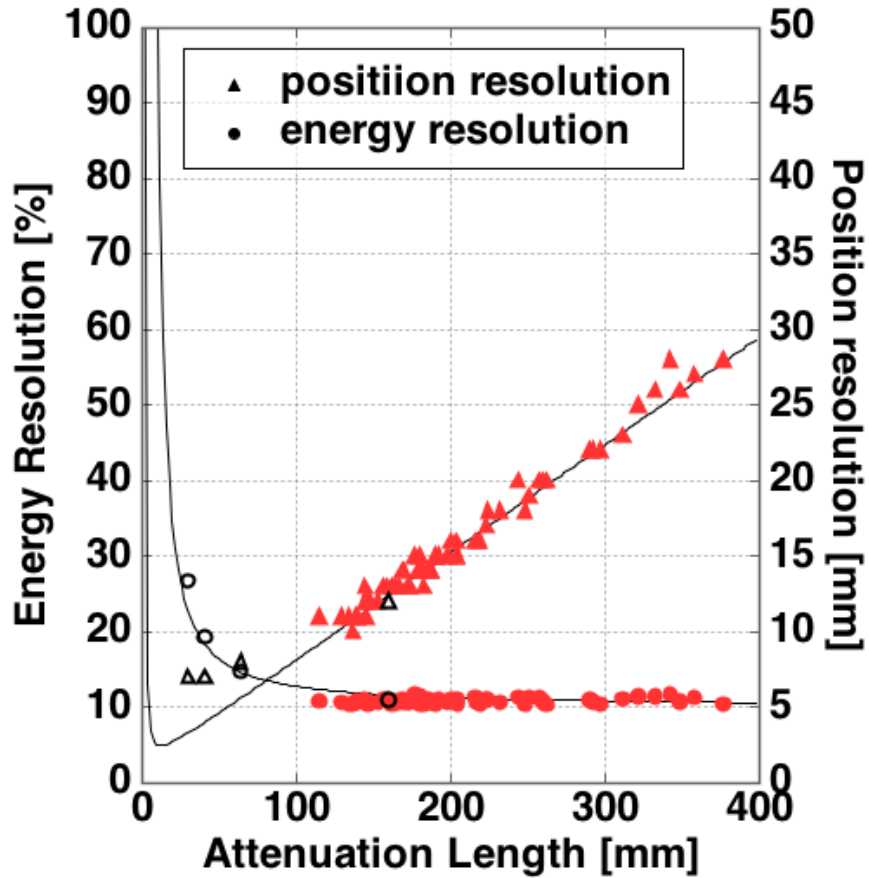


図 3.2-5 各シンチレータの位置分解能とエネルギー分解能を減衰長の依存性としてプロットした図。シンチレータ光の長軸方向減衰が指数関数の場合の理論値を曲線としてプロットしている。なお、図中白抜きのプロットは、Ag をスパッタリングした際の、スパッタリング時間依存性を取得した際のデータである

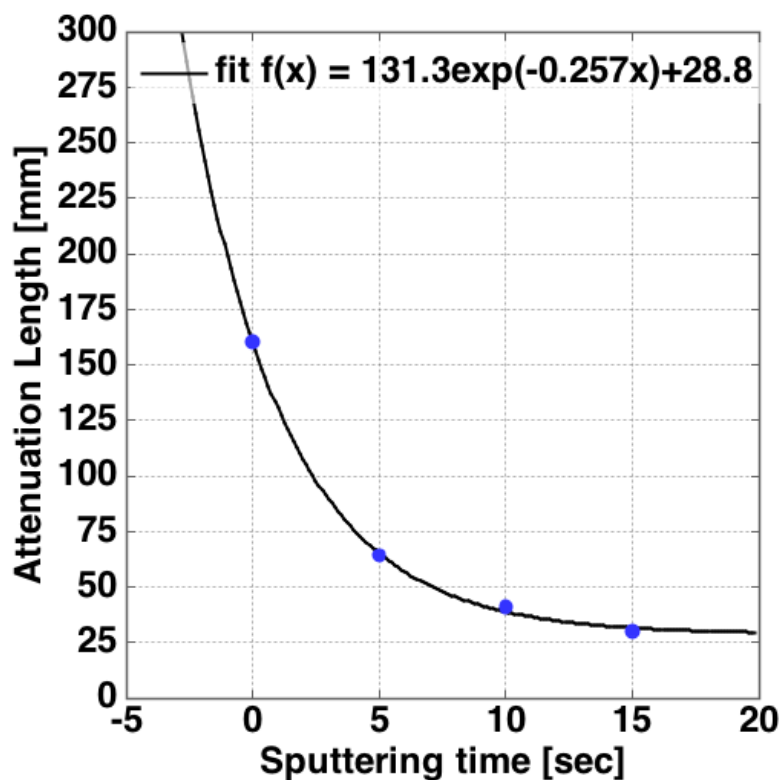


図 3.2-6 スパッタリング時間と減衰長の変化の実験結果。指数関数フィッティング結果より、スパッタリングによる減衰の増加分を予想計算した。

表 3.2-2 各シンチレータの減衰長とスパッタリング処理時間の一覧

lot No.	減衰長	スパッタリング時間[sec]	備考
1	172.634	5	
2	140.298	4	
3	182.942	6	
4	204.04	6	
5	146.89	5	
6	182.078	6	
7	187.946	6	
8	136.924	4	
9	217.28	7	
10	139.252	4	
11	177.13	6	
12	162.518	5	

13	134.686	4	
14	292.44	8	
15	342.54	8	
16	232.44	7	
17	200.2	6	
18	179.094	6	
19	145.722	5	
20	251.32	7	
21	158.88	5	
22	244.06	7	
23	262.16	7	
24	348.8	9	
25	376.86	9	
26	290.38	8	
27	332.62	8	
28	358.26	9	
29	258.06	7	
30	321.9	8	
31	297.46	8	
32	173.654	5	
33	169.97	5	
34	152.814	5	
35	190.99	6	
36	164.18	5	
37	204.62	6	
38	180.19	6	
39	162.24	5	
40	190.344	6	

41	216.38	6	
42	187.236	6	
43	203.78	6	
44	167.394	5	
45	248.36	7	
46	198.298	6	
47	311.76	8	
48	219.28	7	
49	180.198	6	
50	144.766	5	
51	156.21	5	
52	144.766	5	
53	173.566	5	
54	168.588	5	
55	187.4	6	
56	223.58	7	
57	259.9	7	
58	147.726	5	
59	185.428	6	
60	224.62	7	
61	115.014	3	
62	Lot No00 で代用		
63	192.316	6	
64	129.348	4	

表 3.2-3 スパッタリング後のシンチレータのエネルギー分解能と位置分解能の一覧

lotNo	エネルギー分解能[%] @662keV	位置分解能[mm] @662keV	減衰長[mm]	備考
0	12.2	10	99.122	
2	13.2	8	80.286	
8	10.4	10	136.924	
13	12.0	10	103.86	
22	15.7	10	75.908	
28	15.3	10	86.602	
45	15.4	9	64.464	

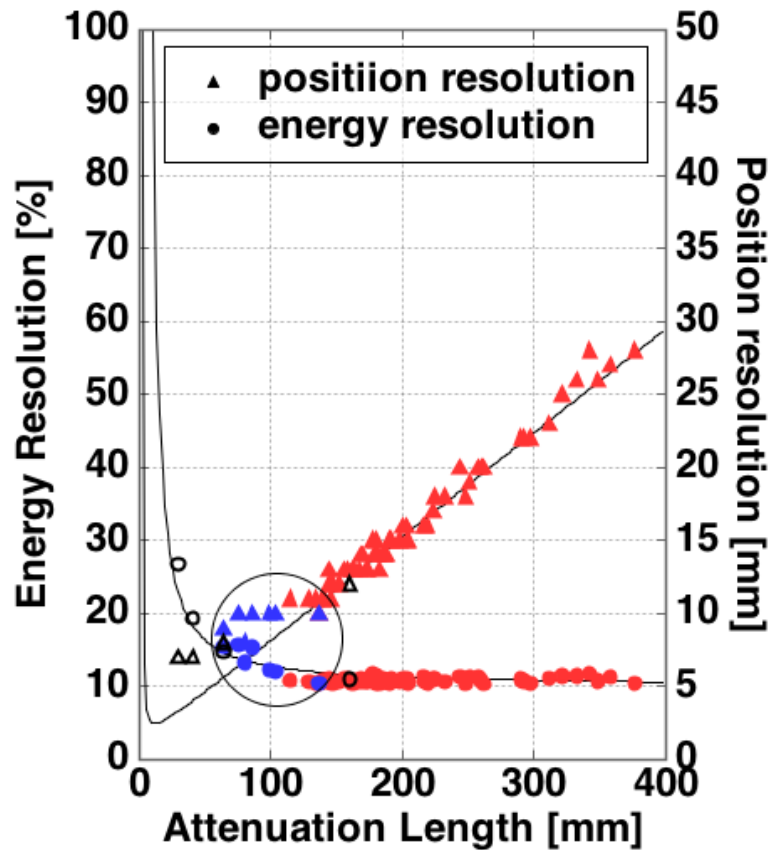


図 3.2-7 スパッタリング後のシンチレータ（ランダムに数本分）のエネルギー分解能と位置分解能をプロット（青い点）した図。スパッタリング前（赤い点）から減衰長が改善され、位置分解能が改善した

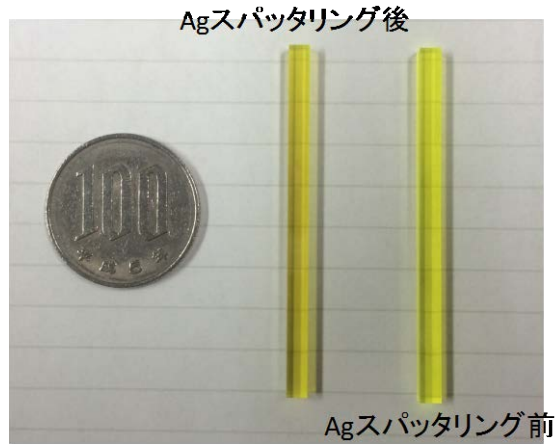


図 3.2-8 スパッタリング前、スパッタリング後のシンチレータの写真

3.2.2 1mm 角 GAGG シンチレータ側面処理

高線量率対応版として、3mm 角よりも細い 1mm 角の GAGG(Ce) シンチレータを調達し、側面処理を施した。サイズが $1 \times 1 \times 50 \text{mm}^3$ と 3mm 角よりも細くなっているため、シンチレータ 1 本当たりの体積が約 1/9 となっており、高線量率場対応に必須となる検出効率の低減が期待できる。なお、調達したシンチレータの写真を図 3.2-9 に示す。

シンチレータの特性評価のため、去年度同様にテフロンテープを側面被覆し、特性評価実験を行ったが、シンチレータが細すぎたのか原因は不明であるが、図 3.2-9 の上側に示されるシンチレータの様に、テフロンテープ被覆作業で破損が生じてしまった。本来、GAGG(Ce) シンチレータはガーネット型結晶であり、機械強度が強く頑丈であることが知られている。しかしながら手作業で実施したテープ被覆作業で破損（折れ）が生じてしまっており、これ以上の細径化はハンドリング上困難であり、より細径化が必要となるのであるならば単純にテフロンテープを被覆するのではなく、別の側面処理方法が必要となると推測される。

1 本のシンチレータロッドに側面テフロン被覆処理を行い、両端に MPPC 光検出器を配置し、シンチレータの特性評価試験を実施した。使用した線源は ^{137}Cs (662keV) である。図 3.2-10 にシンチレータ両端の出力和のスペクトルを、図 3.2-11 に左右の出力比から算出される位置分布スペクトルを示す。エネルギー分解能及び位置分解能を評価したところ、エネルギー分解能約 15%、位置分解能約 5.8mm となった。この結果は、前述の 3mm 角シンチレータの結果（側面スパッタリング処理で減衰長調整後のエネルギー分解能約 10%、位置分解能約 10~15mm）と比較して、特に位置分解能が優れた結果となった。スパッタリング処理を行うと、位置分解能は改善されるもののエネルギー分解能は改善されないため、1mm 角シンチレータに対しては、スパッタリング処理をするべきではないとの結果となった。そのため、側面 Ag 金属スパッタリング処理を行わず、側面テフロン被覆処理のみ実施した。なお、シンチレータが細くなっているため、去年度と比較して全吸収ピークの割合（ピークコンプトン比）は小さくなっていることが確認された。

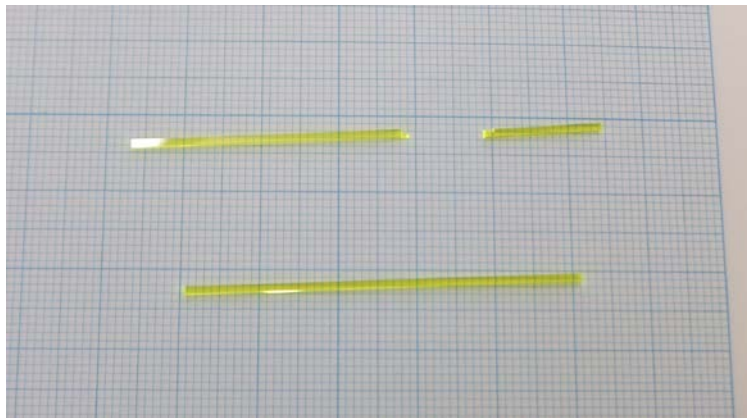


図 3.2-9 平成 27 年度調達した GAGG(Ce) シンチレータの写真（背景：1mm 方眼用紙）。上側はテフロン被覆作業中に折れてしまったシンチレータ。

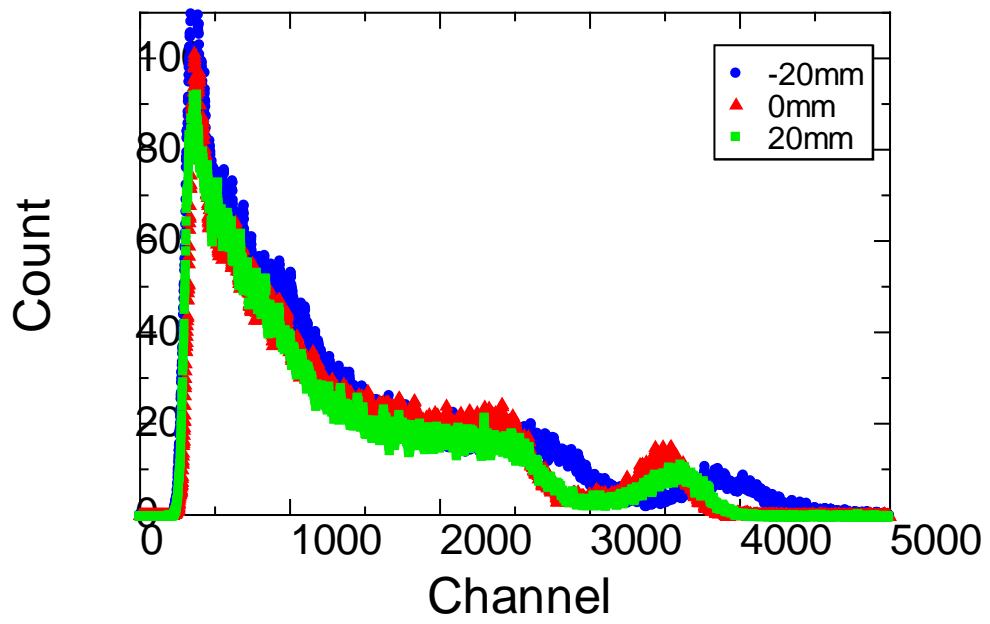


図 3.2-10 シンチレータロッドの波高分布スペクトル。

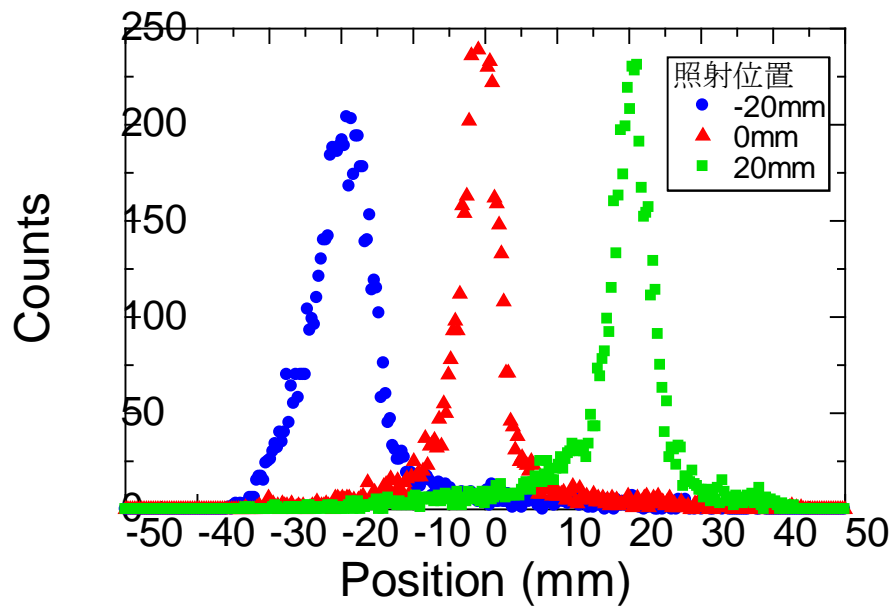


図 3.2-11 シンチレータの長軸方向に 20mm おきにガンマ線を照射した場合の位置分布スペクトル

3.3 最適配置パターンの検討（名古屋大学）（H24～H27）

3.3.1 検出器応答計算

事故時における環境中放射性核種から放出される γ 線の方向情報取得のためにシンチレータスタック型ガンマイメージャを用いた場合に、得られたデータに対してどのような処理をすれば良いか、を検討するために、検出器内における入射 γ 線の挙動及び検出器としての応答を、電磁カスケードモンテカルロ計算コード EGS5 を用いてシミュレーションした。この応答に対し、有効なアルゴリズムを検討し、試作器を模擬した場合の性能評価等を実施した。

検出器応答は、検出器のモデル化、EGS5 による検出器内エネルギー付与の算出、位置分解能・エネルギー分解能を考慮した検出器応答の作成、とのステップを通じ、応答が算出される。検出器のモデル化は、シンチレータ部分のみとし、その外部の MPPC 等はモデル化の対象外とした。MPPC はシリコン半導体であり、薄いウェハ状となっているため、考慮対象から外しても γ 線の透過に関しては問題は少ないと考えられる。EGS5 の出力であるシンチレータ位置とエネルギー付与情報から、発光したシンチレータロッド番号及びエネルギー付与量を算出した。検出器応答としては、1 ガンマ線入射あたりの発光パターン及び発光量を 1 セットの出力とし、必要ヒストリー数の γ 線を入射させた場合を計算するコードを作成した。

図 3.3-1 にシミュレーション体系を示す。 ^{131}I 、 ^{137}Cs の点線源を検出器の中心から一定距離離れた（図では 50 cm）の球面上に設置し応答計算を実施した。なお、出力としては、ガンマ線入射毎に、相互作用位置、付与エネルギーの情報がファイルに書き込まれる。この出力データに対し、アルゴリズムの検討や、計算による検出器応答の評価を実施した。

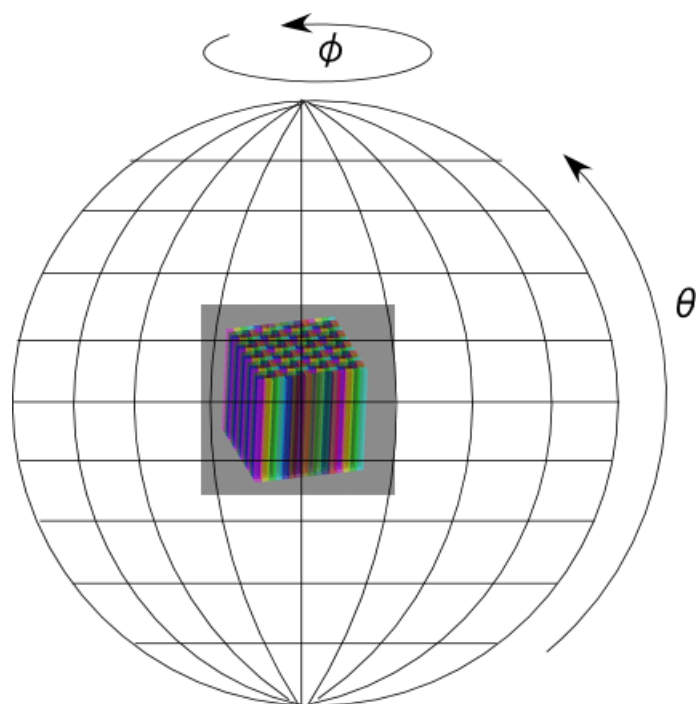


図 3.3-1 検出器応答計算体系図。中心に検出器があり、検出器を中心とする半径 50cm の球殻上に点線源を配置した。

3.3.2 アルゴリズムの開発

上記検出器応答を使用し、検出器の内 2 つの領域で相互作用が起こったイベントのみを抽出した後、コンプトンコーンの逆投影を行うアルゴリズムを作成した。本検出器は棒状のシンチレータを束ねた構造をしているため、これに特化したアルゴリズムを作成した。

本来、コンプトンコーンを計算するには、図 3.3-2 に示される様に、2 つの相互作用点（＝エネルギー付与点＝発光点）のうちどちらが散乱点でどちらが吸収点であるかを識別する必要があるが、本システムでは散乱点・吸収点の区別をすることができない。そこで、相互作用点をそれぞれ A、B とし、A が散乱点で B が吸収点である時と両者が入れ替わった時の両方の場合について次のような計算を行った。

2 つの相互作用点での付与エネルギーから下の式(1)を用いて散乱角 θ を計算し、2 つの相互作用点の座標によって計算されるベクトルを中心としたコンプトンコーンを算出した。ここで、 E_1 は散乱点での付与エネルギー、 E_2 は吸収点での付与エネルギー、 $m_e c^2$ は電子の静止質量である。散乱検出器における相互作用点の位置・付与エネルギーと、吸収検出器における相互作用点の位置・エネルギーにより、散乱角が算出され、入射方向がこの上に存在すると推測されるコンプトンコーンが算出される。

$$\cos\theta = 1 - m_e c^2 \times \frac{E_1}{E_2(E_1 + E_2)} \quad (1)$$

それぞれのコンプトンコーンを検出器を中心とする球面上に同じ重さで逆投影した。ここで、コーン中心のベクトルの始点は検出器の中心の位置とした。この逆推定されるコンプトンコーンを複数の γ 線入射事象それぞれに対して計算、描画し、描画が重なった点が γ 線が入射してきている方向と推定することが可能となる。

アルゴリズムの概要を図 3.3-3 に示す。

また、同じシンチレータロッド内での 2 つの領域での発光(x、y 方向の位置が同じ場合)は実際の信号処理では区別不可能であるため、このようなイベントは除外したが、1%以下の割合であったため問題とならないと考えられる。

球殻上への逆投影の際に、シンチレータのエネルギー分解能を以下の方法で考慮した。一つの発光パターンにつき、その各位置での発光量を半値全幅 8%@662keV でガウス分布となる様に乱数を振り発光量を変化させ、その変化させた発光量に従って 100 パターンのコンプトンコーンを描画した。ただし、1 描画あたりの重さを 1/100 とした。なお、エネルギー分解能はその付与エネルギーの-1/2 乗に比例する様に付与エネルギーに従って変化させている。エネルギー分解能の値は、実際のシンチレータの応答より評価された値を用いている。

また、コンプトンコーンの球殻座標状への投影は、球殻上は極座標系の θ と φ の 2 次元マトリックスとし、コンプトンコーンと球殻の交線（円となるが）が少しでもマトリックスの各領域にかすっていたら、その領域を +1（1 つのコンプトン散乱事象に対し 100 回エネルギーを振りながら描画するため正確には +1/100 であるが）とした。

図 3.3-4 に線源設置方向を $(\theta, \varphi) = (0^\circ, 0^\circ)$ とした場合に、逆投影アルゴリズムにより得られた像を示す。なお、GAGG シンチレータに含まれる Gd は、40～50 keV の領域の蛍光 X 線を放出するため、この X 線が別のシンチレータで計数され、 γ 線のコンプトン散乱が起こらない時にも

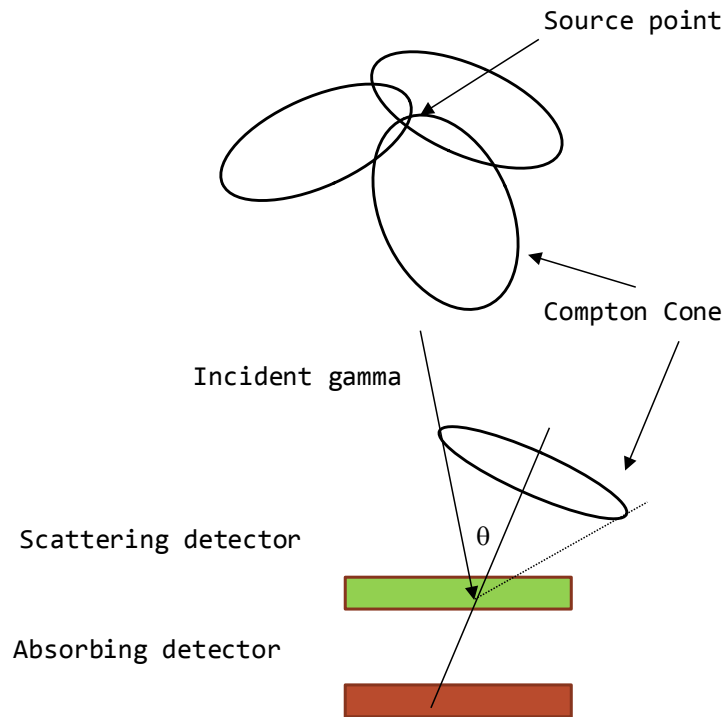


図 3.3-2 一般的なコンプトン逆推推定の概念図

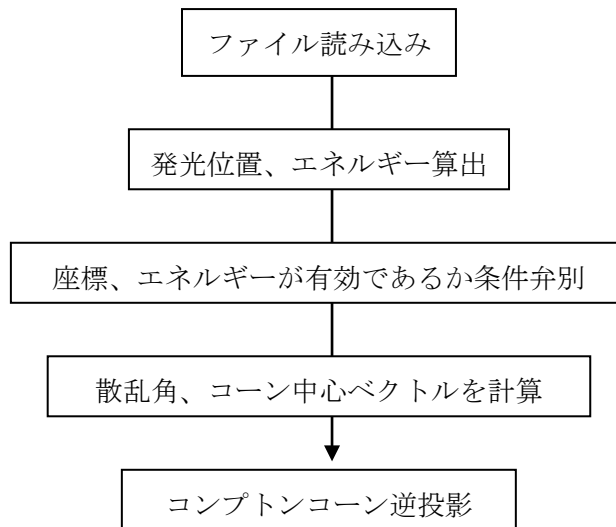


図 3.3-3 逆投影アルゴリズム

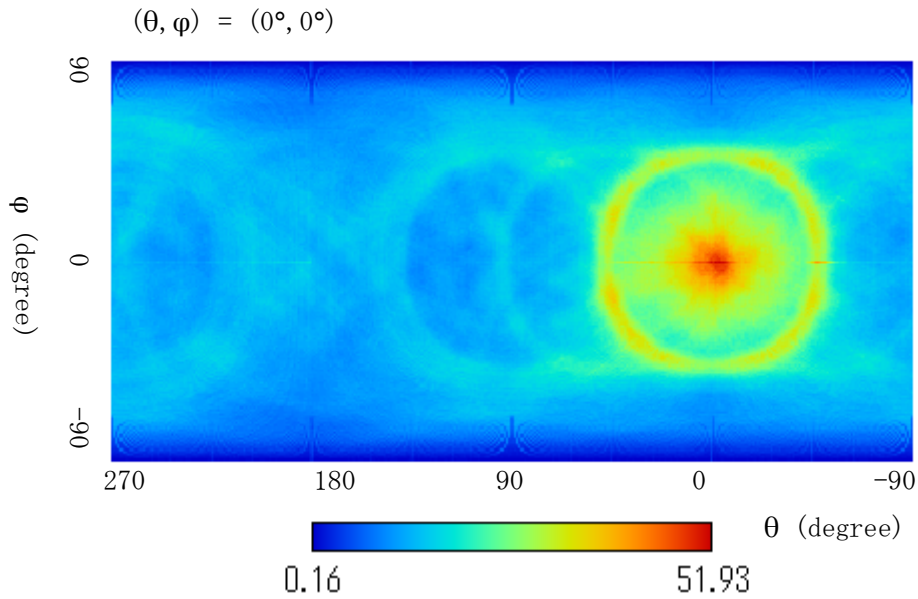


図 3.3-4 逆投影図(発光点間距離閾値なし)

2点での発光が起こることがある。これは偽のコンプトンイベントとして方向推定の際のノイズとなるため、これを除去するために、各点の付与エネルギーが 100 keV 以上であるものに関してのみ有効なイベントとして取り扱った。逆投影像は検出器を中心とする球面を展開したものとなっている。

線源を設置した $(\theta, \varphi) = (0^\circ, 0^\circ)$ の点を中心にカウントが現れたため、線源方向を正確に推定できることが確認された。しかし、線源の周囲に輪のようなノイズカウントが現れることが確認された。これは、コーン中心のベクトルを決定する場合に相互作用点間の距離が近すぎるイベントが多いことが問題であると考えられる。例えば図 3.3-5 に示す様に隣り合うシンチレータが発光するイベントであった場合、ベクトルの傾きが θ 方向、 φ 方向にそれぞれ 45° 刻みでしか決定できないため、限定された領域にカウントが積算され、大きなノイズとなってしまう。これを解消するために、発光点間の距離が 3 mm 以下であるイベントを除いて逆投影を行ったところ図 3.3-6 のような像が得られ、上記の輪になるノイズが除去されることが確認された。この像について、 $\varphi=0^\circ$ の直線上での 1 次元ヒストグラムを図 3.3-7 に示す。この結果より、角度分解能は 65° (FWHM) と評価された。

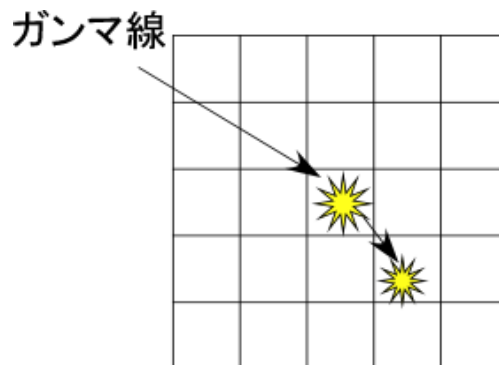


図 3.3-5 輪のようなノイズとなるイベントの例

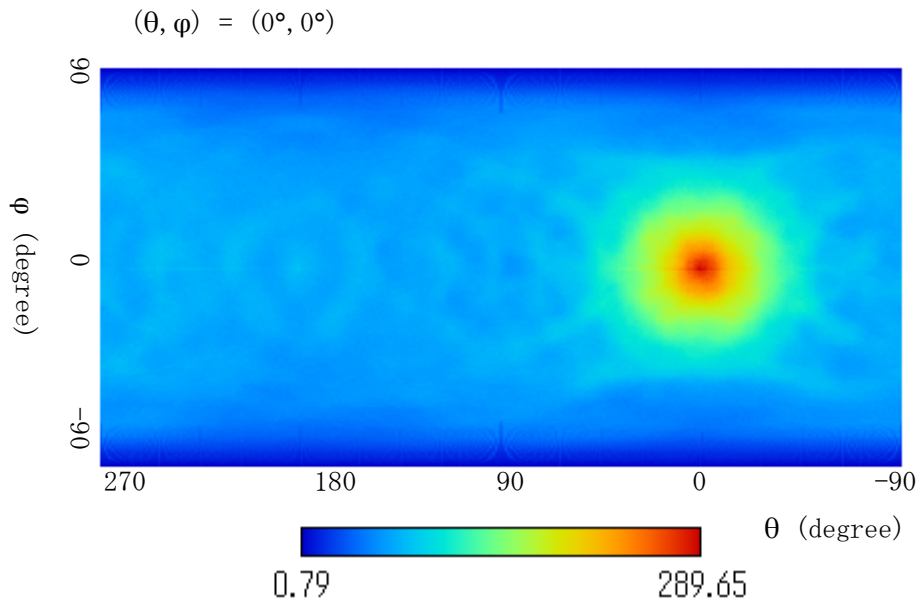


図 3.3-6 逆投影図(発光点間距離閾値 3 mm)

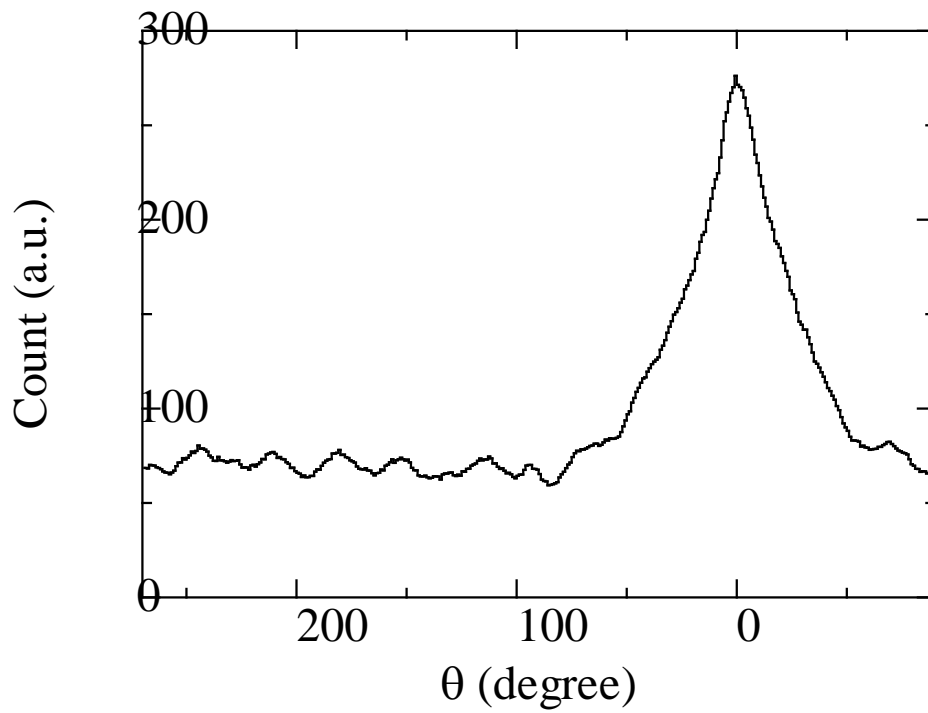


図 3.3-7 逆投影図断面ヒストグラム

発光点間の距離の閾値を広げていくことにより、より精度の高い像が得られることが示唆されたため、発光点間距離の閾値を 3 mm ずつ増加させて像の変化を見たところ、線源方向推定の精度が向上していくことが示された。各条件での角度分解能をまとめたものを図 3.3-8 に示す。これらの結果より、発光点間距離の閾値を 15 mm 以上とすることで、角度分解能を 15° 以下に抑えられることが分かった。但し、発光点間距離の閾値を上げるに伴って、イメージングに有効なイベント数が減少してしまうためにイメージングの効率を同時に考える必要がある。図 3.3-9 はそれぞれの閾値でのイメージング有効イベント率を示したものである

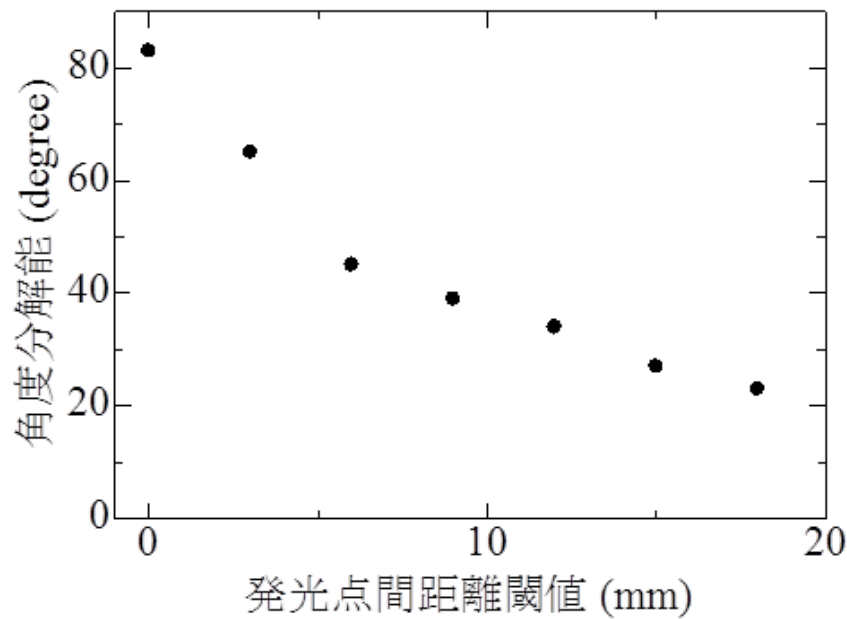


図 3.3-8 角度分解能の発光点間距離閾値依存性

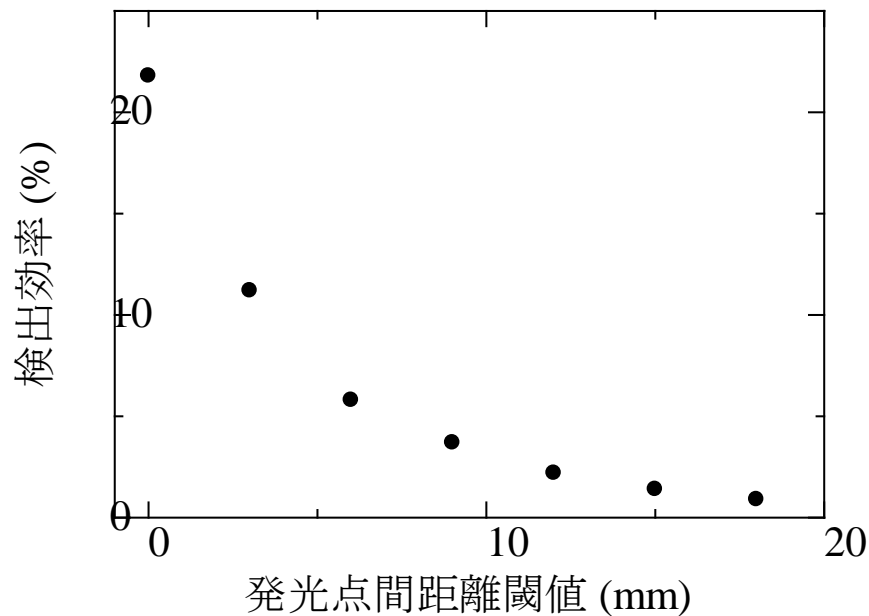


図 3.3-9 発光点間距離閾値の変化に対する有効イベント率の変化

実際の環境では複数の方向からやってくると考えられるため、2 か所に線源がある場合の体系について同様な計算を実施した。その結果を図 3.3-10、3.3-11 に示す。それぞれ線源が 90° 離れていた場合と 45° 離れていた場合に相当する。画像からも分かる通り、二つの点が独立に存在していることを見て取ることが可能である。なお、この計算結果は、発光点間距離閾値 3 mm 、プロット数 1000 count の場合であり、発光点間距離閾値を大きくすればより分かりやすくなることとなる。

以上の結果より、コンプトンコーンを二つ描画する全方向ガンマ線イメージング法が、全方向ガンマイメージャに対し有効であることが示された。

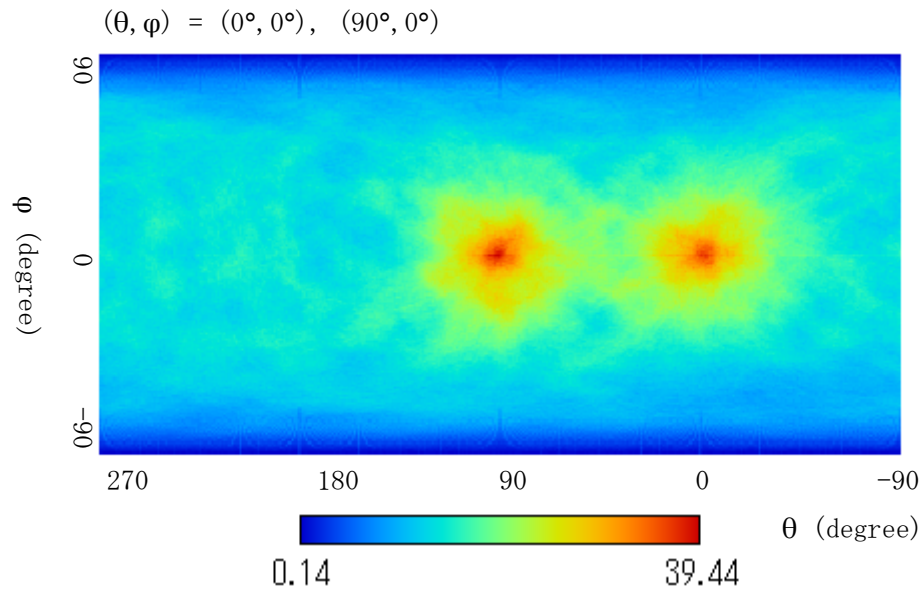


図 3.3-10 逆投影図 (線源方向 $(\theta, \varphi) = (0^\circ, 0^\circ), (90^\circ, 0^\circ)$ 、発光点間距離閾値 3 mm 、プロット数 1000 count)

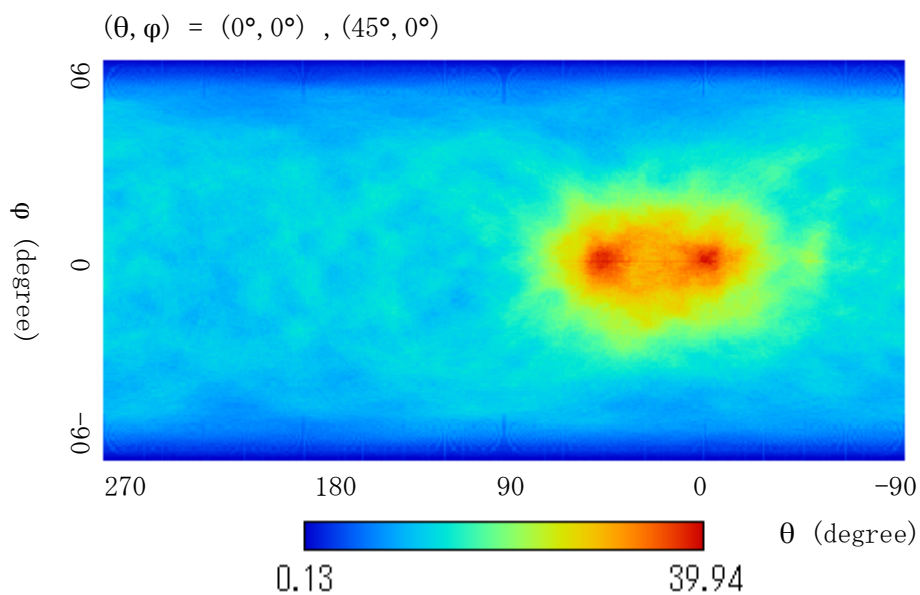


図 3.3-11 逆投影図 (線源方向 $(\theta, \varphi) = (0^\circ, 0^\circ), (45^\circ, 0^\circ)$ 、発光点間距離閾値 3 mm 、プロット数 1000 count)

3.3.3 ^{131}I からの 365keV ガンマ線に対するアルゴリズムの改良

前節では ^{137}Cs の放出する 662keV のガンマ線に対応するアルゴリズムの開発を実施したが、事故直後は放射性セシウムからのガンマ線よりは、放射性ヨウ素からのガンマ線が支配的である。そこで、 ^{131}I をターゲットに 365keV のエネルギーのガンマ線に対するアルゴリズム開発を実施した。前節と同様に、365keV のガンマ線を検出器に入射した場合の応答を EGS5 で算出し、その結果を用いて再投影アルゴリズムの検討を実施した。なお、 ^{131}I から放出される主要ガンマ線を表 3.3-1 に示す。

表 3.3-1 ^{131}I の放出する主要ガンマ線エネルギーと放出率⁽¹⁾

エネルギー	放出率	エネルギー	放出率
80.2 keV	2.62 %	637.0 keV	7.27 %
284.8 keV	6.06 %	722.9 keV	1.80 %
364.5 keV	81.2 %		

^{131}I の放出する代表的なガンマ線エネルギー365keV に対し、全方向ガンマ線イメージング法アルゴリズムを適用した時の推定結果を図 3.3-12 に示す。入射方向 $(\theta, \phi) = (0^\circ, 0^\circ)$ に明確なピークが観察され、本アルゴリズムによって飛来方向の推定が可能であることが確認された。しなしながら、本来の方向の 180 度反対方向にも、低いながらも値が高い領域が描画された。これは ^{137}Cs の 662keV のガンマ線に対しては見られなかった挙動である。

この原因として、 ^{131}I の場合は ^{137}Cs の場合に比較し、散乱点と吸収点でのエネルギー付与量が等しくなる事象が相対的に増えたことがあげられる。図 3.3-13 に、二点発光事象のエネルギー付与量の比の度数分布を示す。 ^{137}Cs の場合は比は 0.2~2 以上まで分布しているが、 ^{131}I の場合は、相対的に比が 1 前後に集中していることが分かる。散乱点と吸収点のエネルギー付与の値が等しい時は、全方向ガンマ線イメージング法アルゴリズムにおいて、散乱点と吸収点を入れ替えて散乱角度を計算しても、入れ替える前と同じ散乱角が算出されることになる。この事象を逆投影する場合は、単純にベクトルの向きが 180 度反対で散乱角が等しくなるため、本来の向きとは反対方向に疑似ピークが発生してしまうこととなる。

これを防ぐためには、散乱点と吸収点のエネルギー付与量が等しくなる事象を除去するか、散乱点と吸収点を入れ替えて描画することをやめる、すなわち散乱点と吸収点を特定する必要がある。ここで、対象エネルギーが 365keV と比較的低いことを考慮すると、アルゴリズムを以下に変更することが有効であると考えられる。

A 二点発光事象かつ両点でのエネルギー付与の和が対象ガンマ線のエネルギーに等しい事象の抽出

変更 B1 二点のうち、より検出器表面に近い方を散乱点、検出器中心に近い方を吸収点と仮定

変更 B2 二点のうち、より低エネルギー付与側を散乱点、高エネルギー付与側を吸収点と仮定

C 散乱点におけるコンプトン散乱角を算出

D 二点を結ぶベクトルに対し、散乱角を頂角とするコンプトンコーンを作製

E 投影仮想球殻にコンプトンコーンを重みを付けて描画

G 以上をデータの数だけ繰り返す

以上の新しいアルゴリズムの変更点は、散乱点・吸収点を推定し、散乱点と吸収点を入れ替えを省いたことである。このことにより、B1、B2の推定が正しければ疑似ピークは消滅するはずである。

新しいアルゴリズムで再投影した結果を図 3.3-14 及び図 3.3-15 に示す。図に示される通り、どちらの散乱点推定方法でも疑似ピークが消滅していることを見て取ることができる。この新アルゴリズムにより、放射性ヨウ素の場合でも入射方向の推定が可能であることが示された。

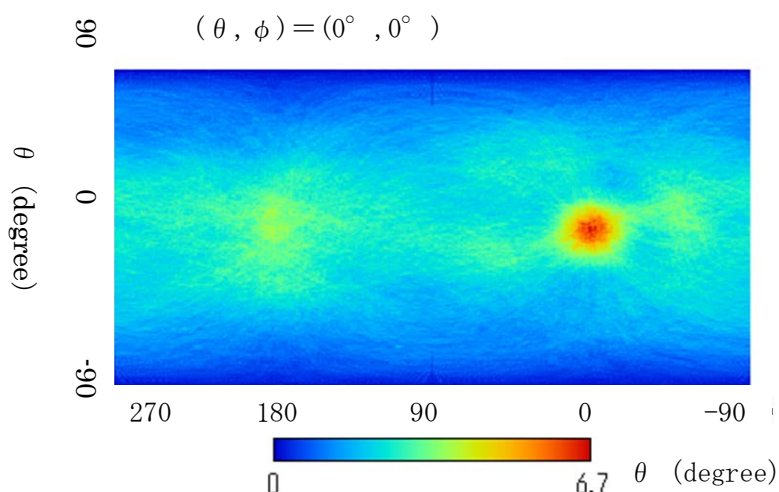


図 3.3-12 ^{131}I の 365keV のガンマ線を入射させた場合の方向推定結果。正解の位置 $(0, 0)$ にピークが観察されるが、180度反対方向にも疑似ピークがみられる。

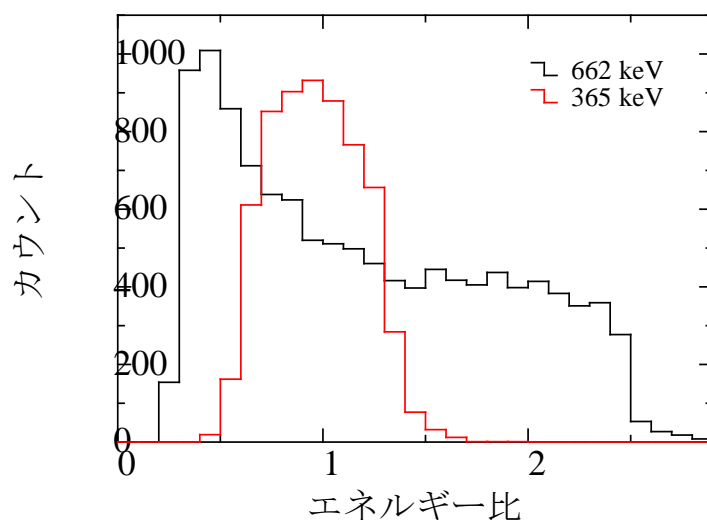


図 3.3-13 二点発光事象のそれぞれの位置におけるエネルギー付与量の比の頻度分布。365keVの方が、662keVの分布に比べエネルギー付与比が1の事象割合が増えている。なお、比を算出する際にどちらが散乱点で吸収点であるかの区別は実施していない。

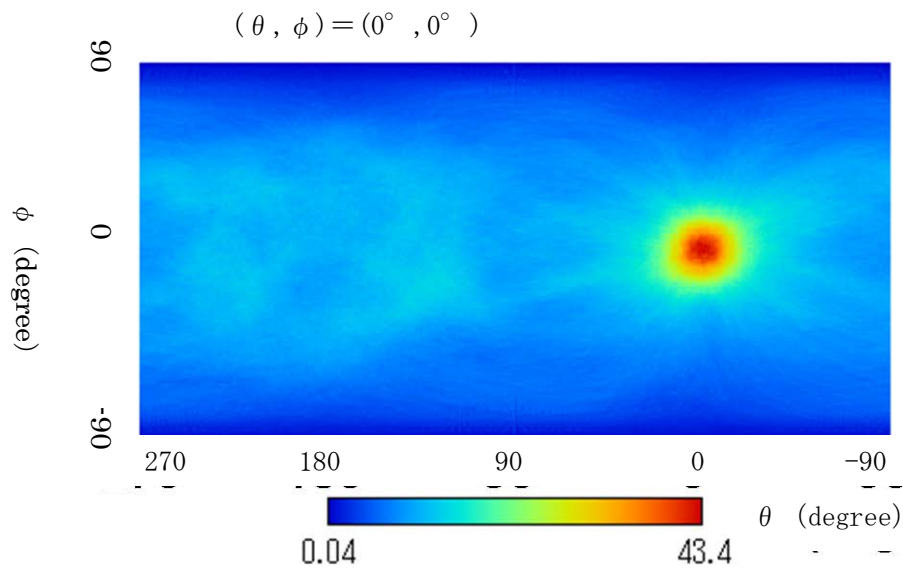


図 3.3-14 新アルゴリズム再投影結果。B1 アルゴリズム、即ち検出器表面からの距離の短い発光点を散乱点に、中心部に近い発光点を吸収点としている。方位分解能は 33 度であった。

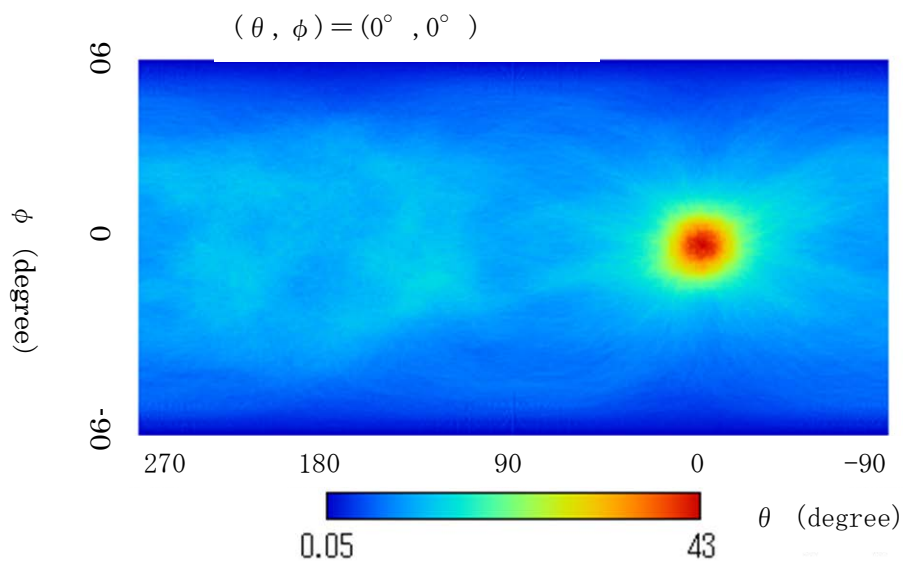


図 3.3-15 新アルゴリズム再投影結果。B2 アルゴリズム、即ちエネルギー付与の多い点を吸収点、少ない点を散乱点としている。方位分解能は 34 度であった。

3.3.4 シンチレータ配置の検討

前節までは、シンチレータを立方体に敷き詰めることを前提としてきたが、高線量率場や、それほど検出効率を必要としない場合は、シンチレータの本数を減らすことが必要となる。そこで、シンチレータの配置を立方体ではない場合の検討を実施した。

シンチレータの本数を減らした配置パターンを3パターン用意し、それぞれについて応答計算を実施した。さらに、求められた応答計算から、全方向ガンマ線イメージング法アルゴリズムに基づき飛来方向の推定を実施した。計算条件及び配置パターンは以下の通りである。

計算条件

シンチレータサイズ：3×3×50mm／本

シンチレータ素材：GAGG シンチレータ

配置パターン

パターン1：4×4本

パターン2：8×4本

パターン3：8×2本

配置ピッチ：8mm

以上の条件で、 ^{137}Cs の点線源からの応答を算出し、飛来方向を算出した。推定方向の θ 、 ϕ の定義を図3.3-16に示す。結果を図3.3-17、3.3-18、3.3-19に示す。なお、線源は $(\theta, \phi) = (0^\circ, 0^\circ)$ 方向に設定されている。

図3.3-17に示されるパターン1の結果は、本数を4×4本に減らした場合であり、これまでと比較して、総本数を1/16に減らした場合となる。この本数でも線源方向の推定が可能であることが示されたが、方位分解能は101度(FWHM)と減らさずに発光点間隔の制限を加えた28度に比較して劣化した。また、若干アーチファクトが観察された。しかしながら、間違った位置にピークは観察されず、数学的逆推定法を活用することにより、方位分解能の改善が見込まれる。

図3.3-18に示されるパターン2の結果は、本数を8×4本と、縦横比1：2の長方形に配置した場合の結果である。図3.3-18に示される通り、線源位置が正しく推定されていることが分かる。方位分解能は97度となり、タイプ1の場合よりも若干改善した。

図3.3-19に示されるパターン3の結果は、本数を8×2本と、縦横比1：4とより細長い長方形に配置した場合の結果となる。図3.3-19より、正しい方向が推測されているものの、180度反対方向にピークが表れている。これは、線源方向がシンチレータが8本並んだ方向に設置したため、奥行き方向へ散乱される事象が記録されなくなり、記録される事象のうち、入射 γ 線の散乱角が90度に近い事象の割合が増えたためと考えられる。即ち、90度散乱事象が増えると、コンプトンコーンの頂角が180度となり、コンプトンコーンが平面となる事象が増えることとなる。コンプトンコーンを投影仮想球殻に描画する際に、コンプトンコーンが平面であれば、その平面は正しい方向も通るが180度反対方向も同時に通ることとなる。これにより、反対方向にピークが表れてしまったと考えられる。

以上の結果より、シンチレータの配置は、可能な限り正方形に近い形が望ましいと結論付けられる。

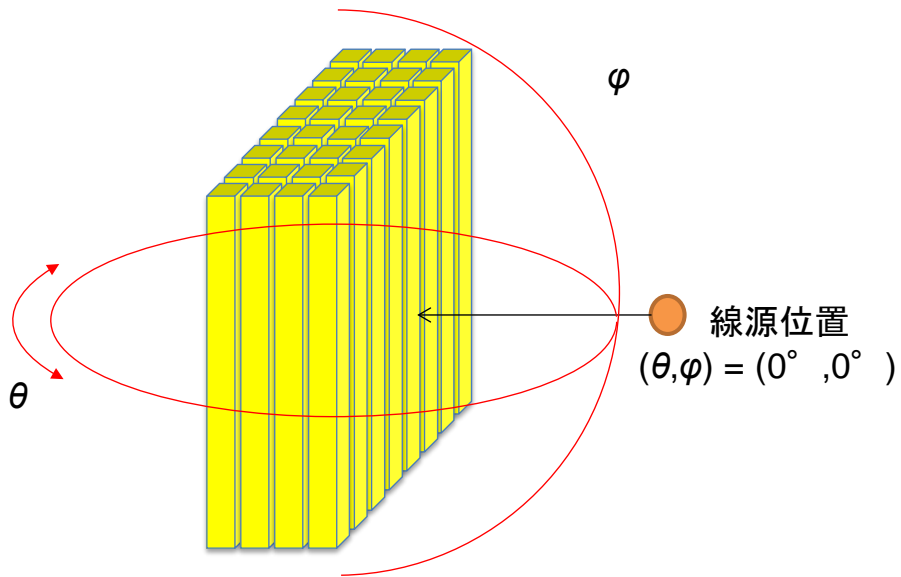


図 3.3-16 計算体系の概略図。θ、φは上手の様に設定し、線源方向を0度方向としている。

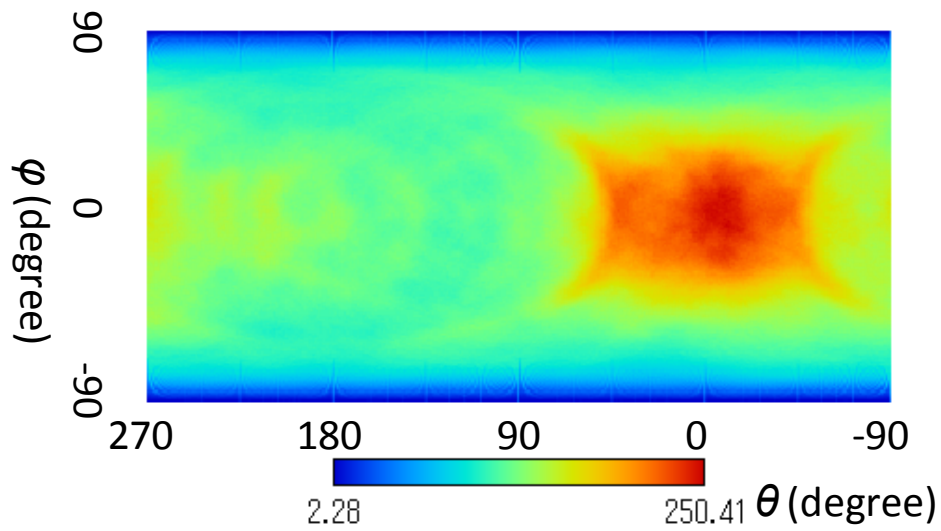


図 3.3-17 パターン1の場合の入射方向推定結果。

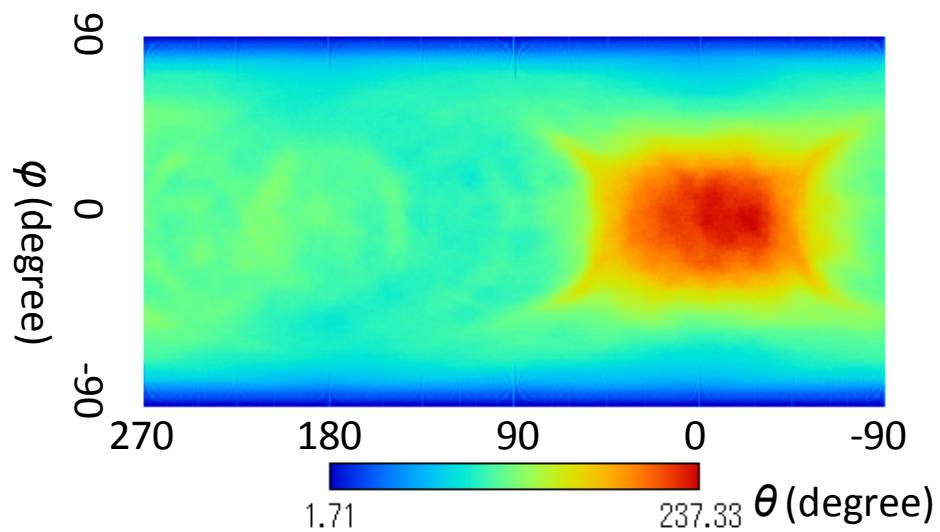


図 3.3-18 パターン2の場合の推定結果

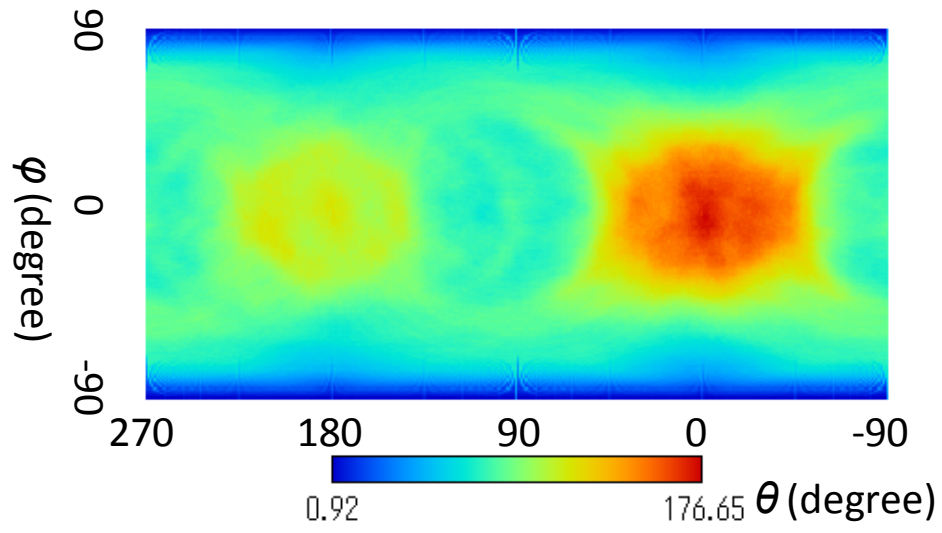


図 3.3-19 パターン 3 の場合の推定結果

3.3.5 高線量率対応配置の検討

検出器の高線量率場対応のため、シンチレータロッドを細くした場合及び本数を減らした場合の特性評価を実施した。EGS5 を用いてシンチレータブロックに対する ^{137}Cs 点線源に対する応答を計算した。シンチレータの配置は

タイプA：立方体形状で $2.8 \times 2.8 \times 50 \text{ mm}$ の GAGG シンチレータを 256 本密に配置したもの

タイプB：本数（256 本）及び配置のピッチがタイプAと同じであるが 1 本のサイズを $1 \times 1 \times 50 \text{ mm}$ と細くしたもの

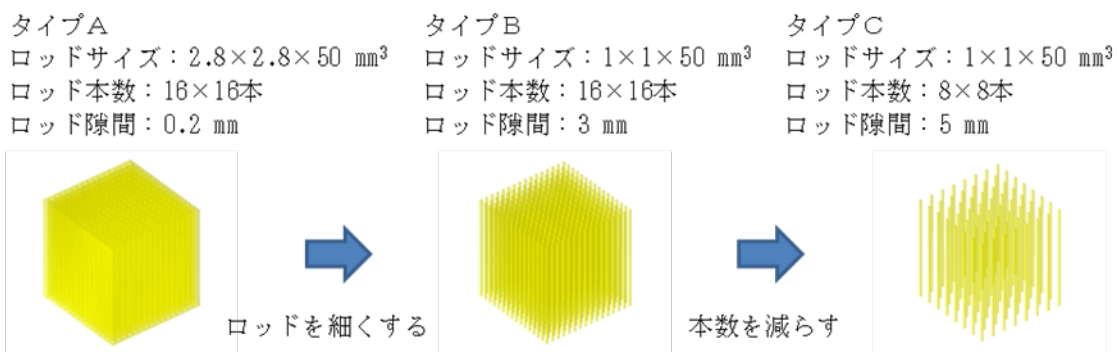
タイプC：タイプBの本数を 64 本と $1/4$ に減らしたもの

とした。得られた応答データに対し、全方向ガンマ線イメージング法アルゴリズムにより再構成を実施した。なお、実際の場合を考慮して、同時計数時間を $1 \mu\text{s}$ とした。即ち、 $1 \mu\text{s}$ 以内に起きた事象は、検出器にとっては区別不可能とした。これにより、2本のガンマ線を同時に数えてしまう高線量率場特有のノイズ事象を取り込むことができることになる。

タイプA、タイプB、タイプCの、計算コード上でのモデル図を、図 3.3-20 に示す。この体系に対し、 $(\phi, \theta) = (90^\circ, 90^\circ)$ の方向、検出器中心から 50 cm 離れた位置に ^{137}Cs 点線源を配置し、検出器位置における線源からの直接ガンマ線による線量率が 1.0×10^{-5} 、 1.0×10^{-4} 、 1.0×10^{-3} 、 1.0×10^{-2} 、 1.0×10^{-1} 、 1.0 Sv/h となる様に光子フラックスを想定しシミュレーションを実施した。

その結果を図 3.3-21（タイプA）、図 3.3-22（タイプB）、図 3.3-23（タイプC）に示す。この結果より、256 本束ねたタイプAでは、低線量率場（ここでは数 mSv/h 以下）では適用が可能であるが、高線量率場への対応は難しいことが判明した。また、シンチレータを細くする（タイプB）、本数を減らす（タイプC）、等の検出効率を減らし、偽同時計数を減らす対策により、1 ケタ高線量率場となる 10 mSv/h でも再構成が可能である見込みが得られた。

しかしながら原子力プラント作業員が作業環境として困難と看做す 100 mSv/h の空間線量率の場では適用が困難であり、より本数を減らす、長軸方向の長さを減らす、等の必要性が明らかとなった。



（シンチレータとしてGAGG(Ce)を使用、線源は ^{137}Cs を仮定、検出器中心より 50 cmの位置に設置）

図 3.3-20 シミュレーション体系図。スタックされたシンチレータ 3 タイプ。タイプAはフルモデルのシンチレータブロックを模擬しており、タイプB、タイプCは検出効率の低い仮想的バージョンである。

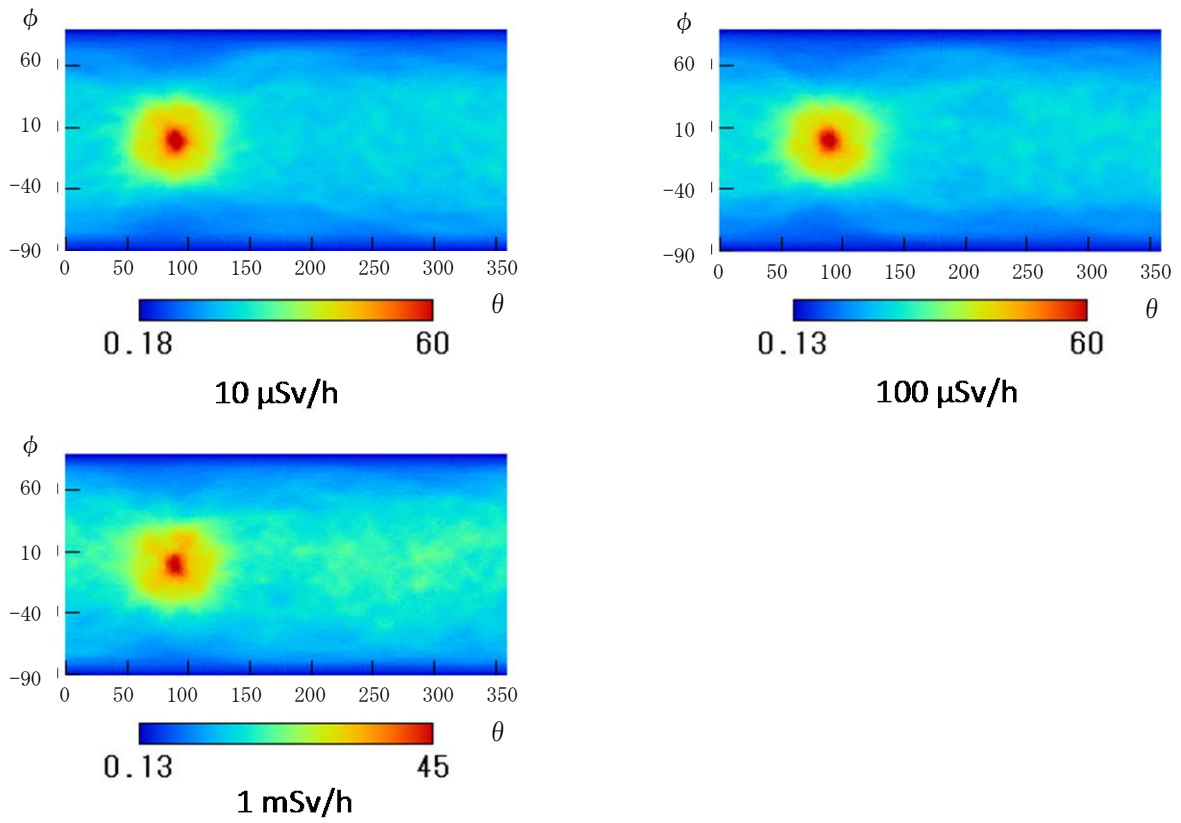


図 3.3-21 タイプAの場合の再構成結果。1mSv/h までは再構成できたが、それ以上の光子フルエンスでは同時発光ノイズが多く（= 2点発光事象が少なく、3点以上の多点の発光事象が支配的）、再構成が不可能であった。

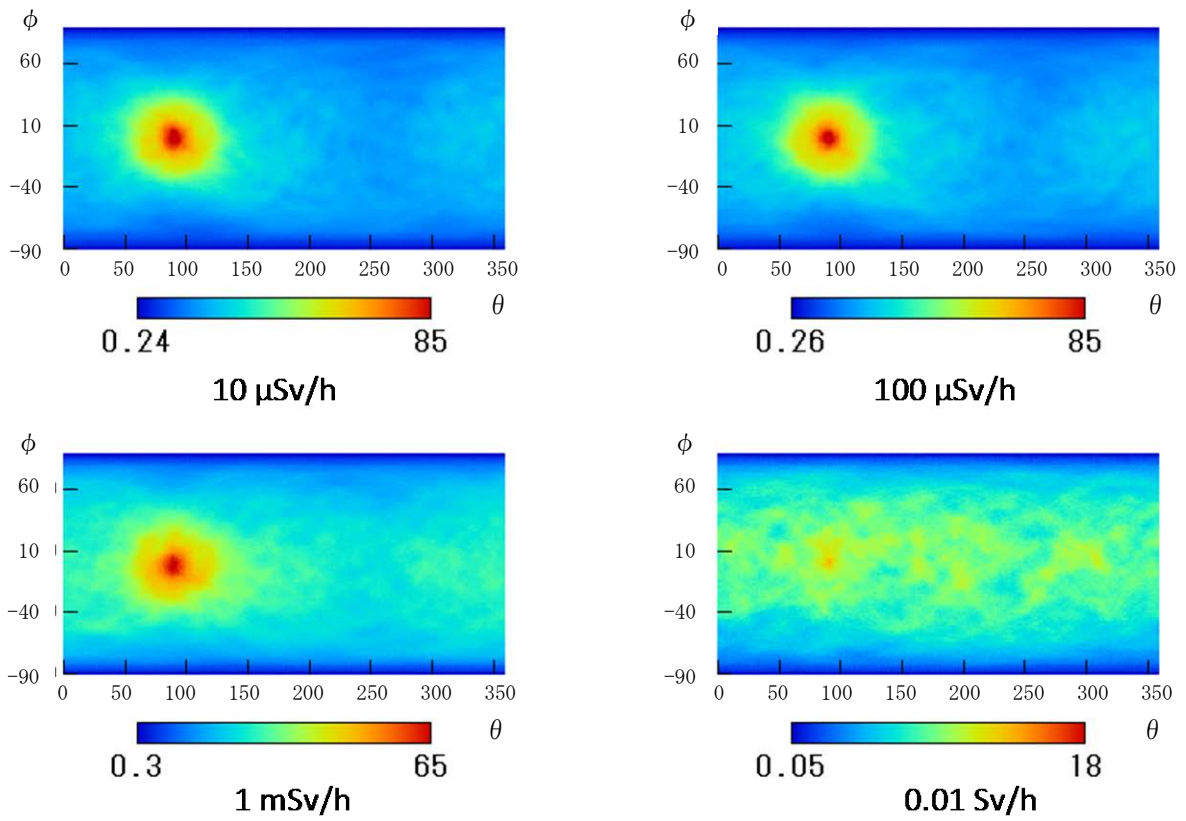


図 3.3-22 タイプBの場合の再構成結果。10mSv/h までのはかろうじて再構成できたが、それ以上の光子フルエンスでは同時発光ノイズが多く、タイプAと同じく再構成が不可能であった

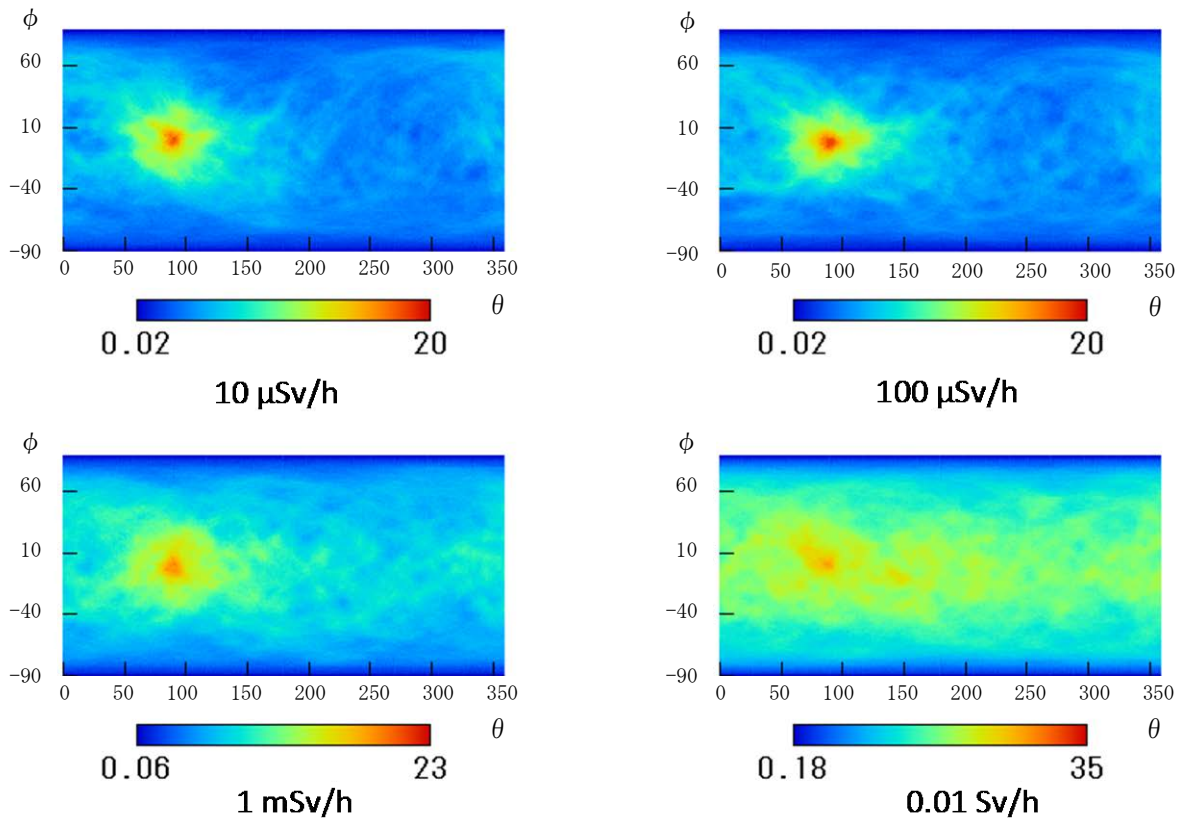


図 3.3-23 タイプCの場合の再構成結果。10mSv/h の再構成結果がタイプBよりまともなものとなっているものの、それ以上の光子フルエンスでは同時発光ノイズが多く、タイプA, Bと同じく再構成が不可能であった。

3.3.6 シンチレータブロックによる検出器応答の実験的検証

(1) 2.8mm 角 256 本バージョン

256 本バージョンは、64 チャンネルの MA-PMT で挟み込むことにより、実験的データの取得を行った。シンチレータブロックの写真を図 3.3-24 に示す。なお、MA-PMT の 64 チャンネルはシンチレータの本数に比べて少ないため、各シンチレータを区別するために重心処理を行う必要がある。そのため、4 本束ねたブロックを MA-PMT の 2 か所に設置し、その 2 ブロックが同時に発光した事象の重心処理を実験データに基づき実施し、その特性評価を実施した。

シンチブロックの配置図を図 3.3-25 に示す。ブロック間は 1 チャンネル強のスペースを空けて設置し、両方のシンチレータブロックが同時に発光した事象を記録した。記録されたデータに対し、設置したチャンネルの上下左右併せて 5 チャンネル分のデータを用いて重心処理を実施した結果を図 3.3-26 に示す。それぞれのチャンネルに設置した 4 本のシンチレータのそれぞれの位置が分離できていることが確認された。

さらに、この分離された情報を使用し、任意の一本のシンチレータでの長軸方向の発光位置分布と中心照射時のエネルギースペクトルを図 3.3-27、図 3.3-28 に示す。位置分解能は半値幅で 10.2mm であり、エネルギー分解能は 15.6%(@662keV)であった。これにより、中心チャンネル+前後左右のチャンネルの 5 チャンネル分の重心処理で必要な情報が得られることが確認された。

また、エネルギースペクトルより、検出効率は固有効率で約 90%となった。

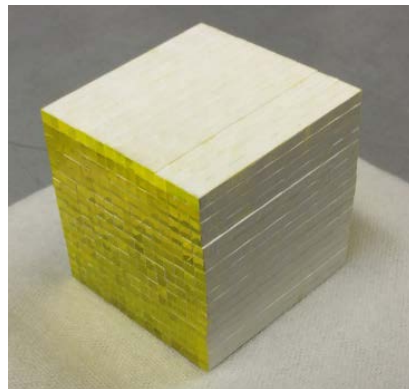


図 3.3-24 256 本束ねたシンチレータブロック

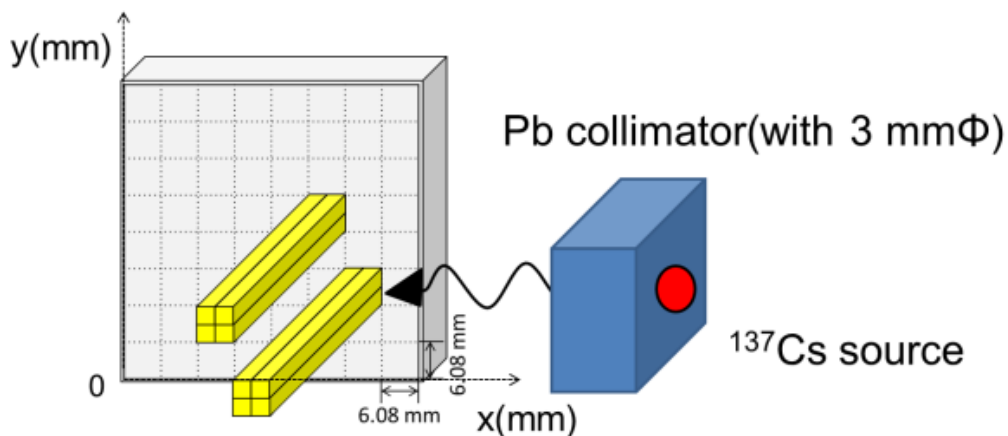


図 3.3-25 4 本束ねたシンチレータブロックを MA-PMT の 2 か所のチャンネルに配置した図。MA-PMT 1 チャンネル強分のスペースを空けている。

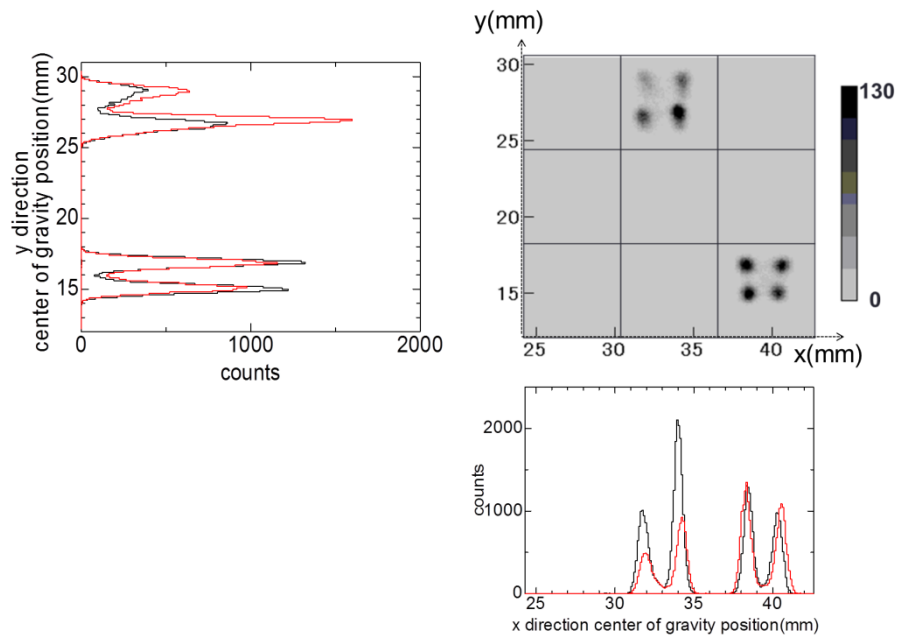


図 3.3-26 重心処理結果。4つのシンチレータそれぞれの発光事象が分離されている。

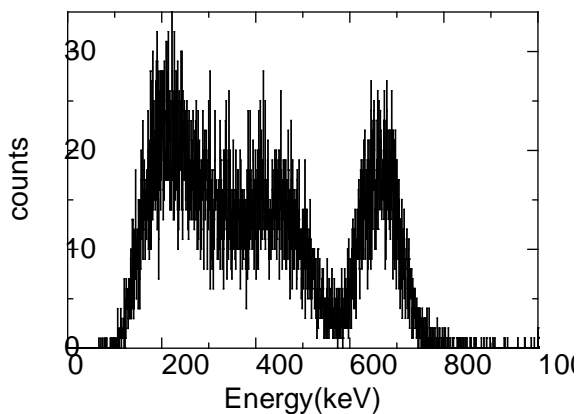


図 3.3-27 重心処理後のエネルギースペクトル

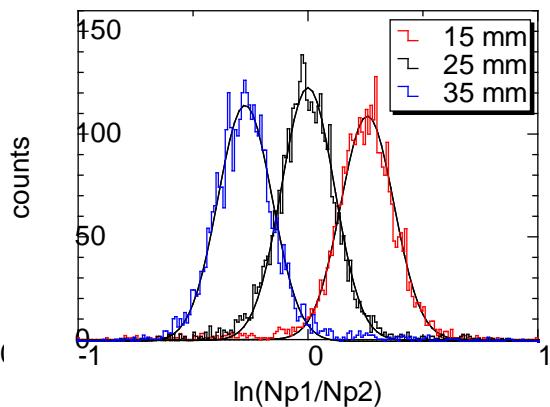


図 3.3-28 シンチレータ長軸発光分布。位置分解能 1 cm が実現されている。

(2) 2.8mm 角 64 本バージョン

64 本バージョンは、側面処理したシンチレータの両端が MPPC に直接接続されるため、重心処理の必要はない。そのため、次章のデータ収集装置と組み合わせ、エネルギー、位置キャリブレーションを実行した後に、 ^{60}Co や ^{137}Cs 等の線源を用いて、ガンマイメージャとしての性能評価を実施した。

図 3.3-29 に ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{22}Na 線源を用いて検出器応答データを取得した際の実験体系、その際の写真（一例）、線源組み合わせを示す。それぞれの線源の場合に取得されたデータの中で、2 点発光事象のイベントをピックアップして作成したエネルギースペクトルを図 3.3-30 に示す。 ^{137}Cs (662keV), ^{60}Co (1.17MeV, 1.33MeV), ^{22}Na (1.27MeV, 511keV) それぞれのガンマ線のピークが観察された。また、取得データから再構成された結果を、図 3.3-31～図 3.3-36 に示す。 ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{22}Na 線源がそれぞれ一個置かれた場合は、正しい方向に再構成がなされている。ただし、 ϕ 方向に 45° だけ線源をずらした場合は、再構成された画像のピーク位置が 20° 程度となっており、若干のずれが存在している。これは、長軸方向の位置分解能が低いことが原因であろうと推測しているが、シミュレーションデータではこのずれは現れなかったため不明である。

また、#6 の ^{137}Cs , ^{60}Co が同時に置かれた場合は、 ^{137}Cs の検出効率が高いためであろうか、 ^{60}Co のピークを観察することはできなかった。しかしながら、図 3.3-37 に示す通りにエネルギー情報を用いて、それぞれの全吸収ピークに対応するイベントのみ抽出して再構成したところ、図 3.3-38、図 3.3-39 に示す結果となった。これにより、エネルギー情報を利用することにより、複数の元素からの放射線が混在している場においても、特定の元素の方向を正確に推定できることが確認された。

さらに、全方向に感度を有することを確認するため、図 3.3-40 に示す様に全方向から 45 度おきに ^{137}Cs 点線源を設置した場合と、図 3.3-41 に示す様に ϕ 方向にも 45 度おきに線源を設置した場合のデータを取得し、再構成を実施した。

その結果を図 3.3-42 から図 3.3-54 に示す。 θ 方向に線源を移動した場合は、すべての再構成結果に置いて正しい位置にピークが表れており、正常に動作していることが確認された。しかしながら、 ϕ 方向に線源を移動した場合は、実際のずらした角度よりも小さな角度しかずれていない再構成結果となった。これは、シンチレータの長軸方向の位置分解能の低さと思われるが、正確な評価のためには今後の解析が必要である。なお、この応答を用いて、統計的手法を用いて再構成することも可能であるので、再構成に余分なプロセスが必要となってしまうが、全方向にそれぞれの応答を有することはこの実験結果より確認された。

θ 方向に線源を移動した場合の、それぞれの角度における再構成結果に対し $\phi = 90$ 度での断面ヒストグラムを図 3.3-55 に示す。どの角度でも同じ応答を示しており、全方向にほぼ同一の応答を有していることが確認された。

また、方位分解能は約 84 度 ($=\pm 42$ 度) であることが確認された。

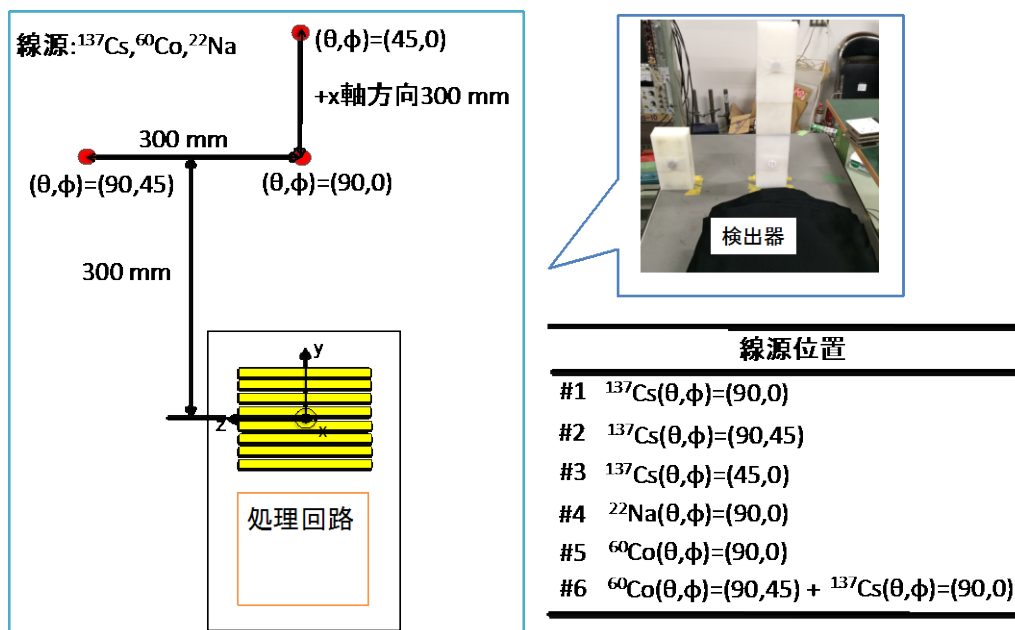


図 3.3-29 6 4 本バージョンの、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{22}Na 線源に対する応答取得実験体系図。線源設置は # 1 ~ # 6 の 6 パターンで実施した。

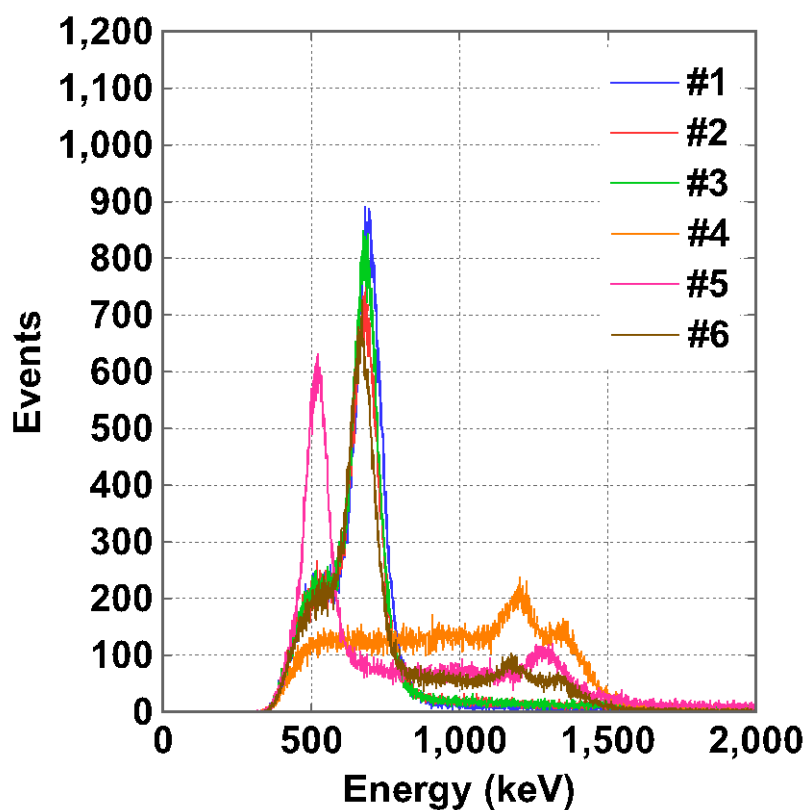


図 3.3-30 線源パターンそれぞれの場合の 2 点発光事象のエネルギースペクトル。

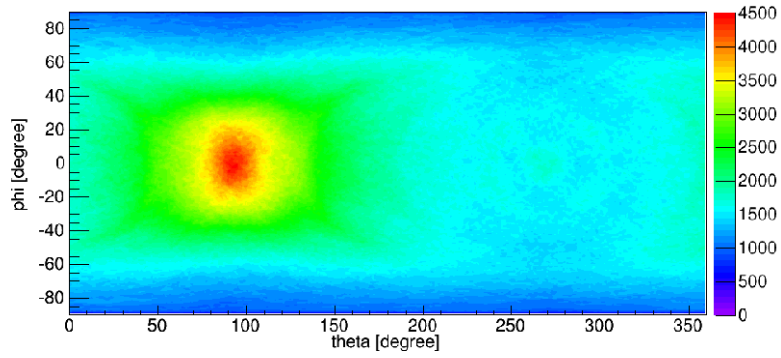


図 3.3-31 # 1 の場合の再構成結果。 ^{137}Cs 点線源が $(\theta, \phi) = (90^\circ, 0^\circ)$ にある。

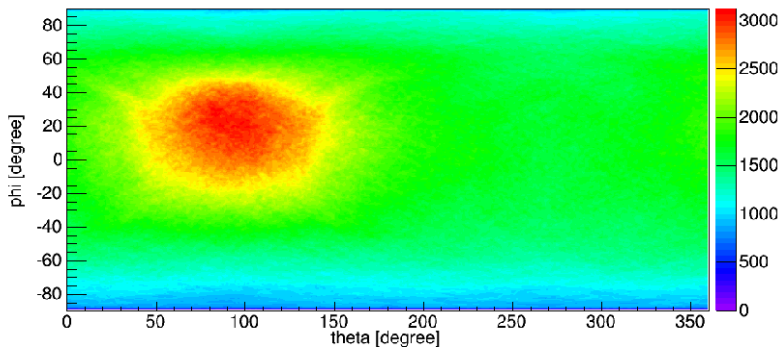


図 3.3-32 # 2 の場合の再構成結果。 ^{137}Cs 点線源が $(\theta, \phi) = (90^\circ, 45^\circ)$ にある。

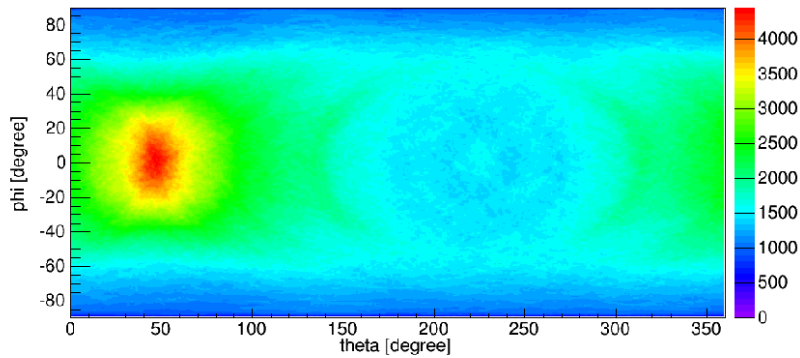


図 3.3-33 # 3 の場合の再構成結果。 ^{137}Cs 点線源が $(\theta, \phi) = (45^\circ, 0^\circ)$ にある。

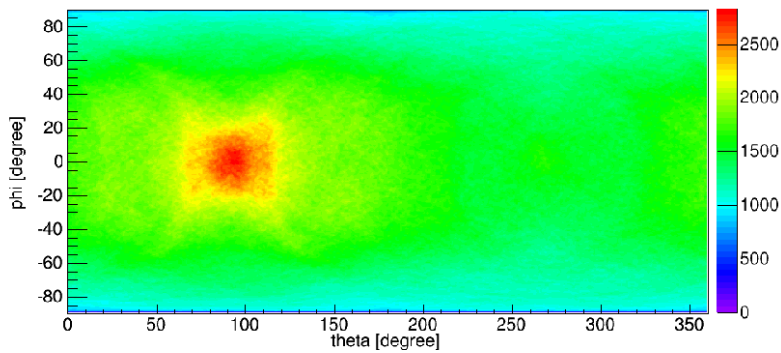


図 3.3-34 # 4 の場合の再構成結果。 ^{22}Na 点線源が $(\theta, \phi) = (90^\circ, 0^\circ)$ にある。

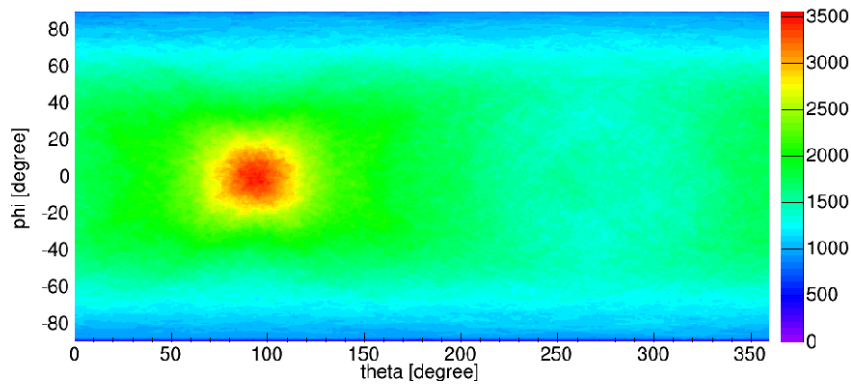


図 3.3-35 # 5 の場合の再構成結果。 ^{60}Co 点線源が $(\theta, \phi) = (90^\circ, 0^\circ)$ にある。

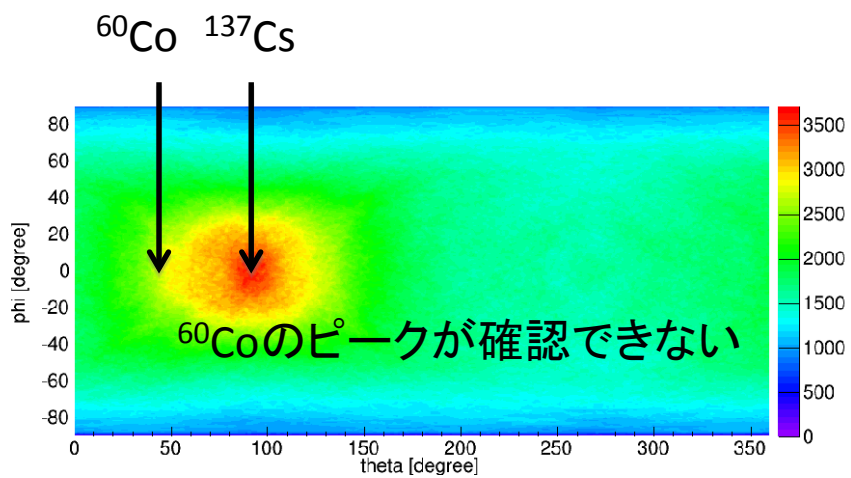


図 3.3-36 # 6 の場合の再構成結果。 ^{60}Co と ^{137}Cs の 2 個の線源が 45 度の角度だけ離れた方向に設置してある。

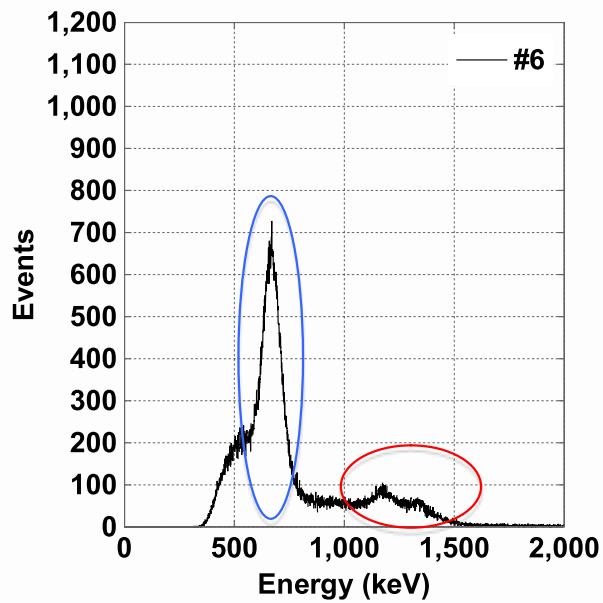


図 3.3-37 # 6 の ^{60}Co , ^{137}Cs を同時に設置した場合の、2 か所発光イベントのみ抽出した場合のエネルギースペクトル。 ^{137}Cs の全吸収ピーク (青丸) と ^{60}Co の全吸収ピーク (赤丸) に分離可能である。

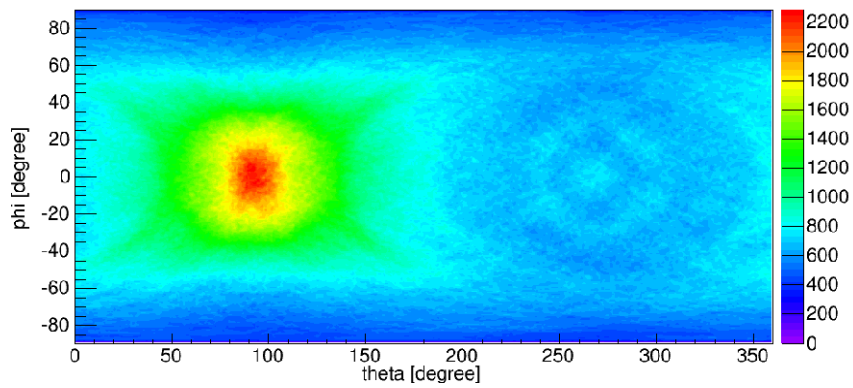


図 3.3-38 # 6 のデータから ^{137}Cs 全吸収に対応するイベント（エネルギー範囲 0.60～0.74MeV）のみ抽出し、再構成した場合の結果。 ^{137}Cs 設置方向にピークが観測される。

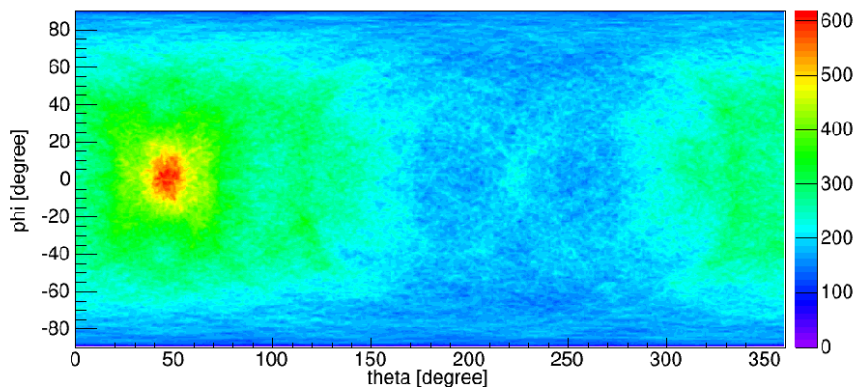


図 3.3-39 # 6 のデータから ^{60}Co 全吸収に対応するイベント（エネルギー範囲 1.07～1.50MeV）のみ抽出し、再構成した場合の結果。 ^{60}Co 設置方向のみにピークが観測される。

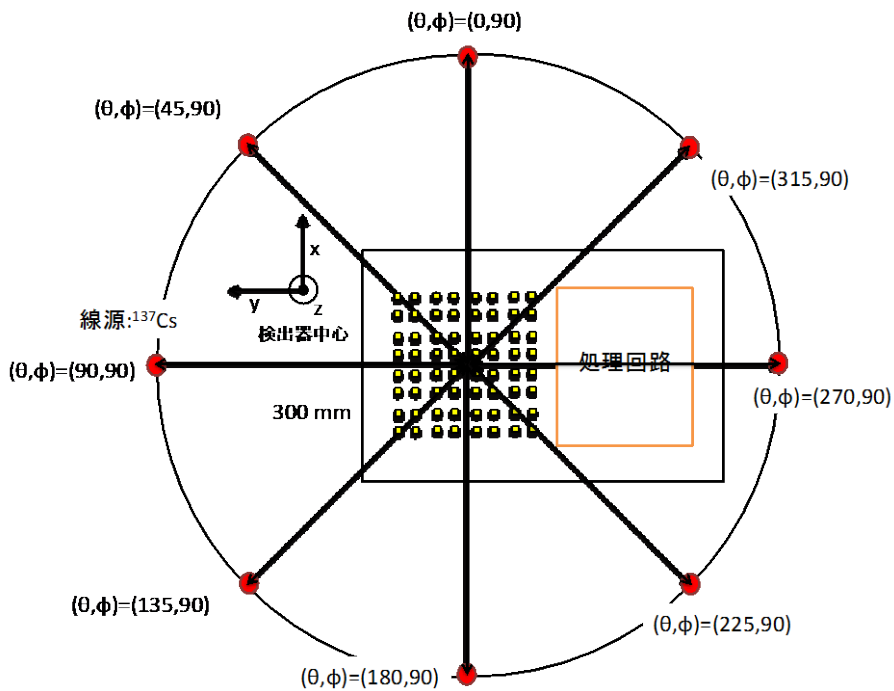


図 3.3-40 $\phi = 90$ 度で、 $\theta = 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315$ 度方向の 8 パターンの線源配置図。

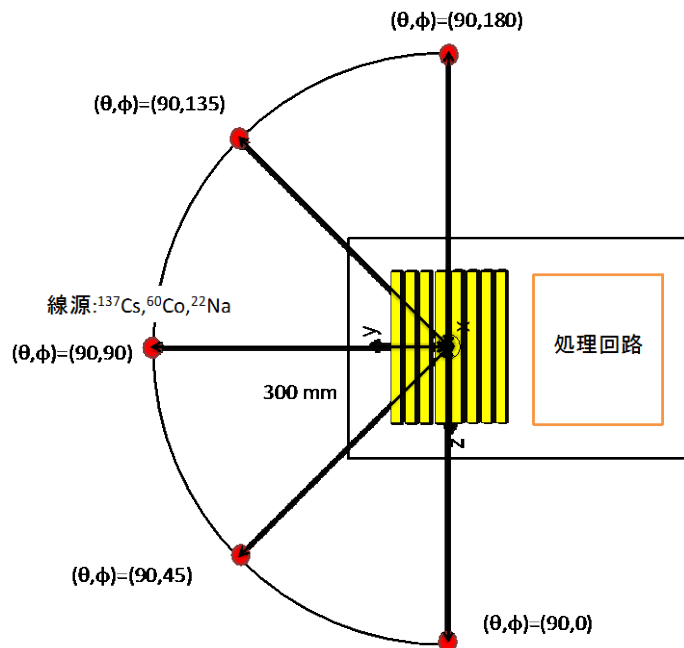


図 3.3-41 ϕ 方向に 45 度おきに線源を設置した実験体系図。

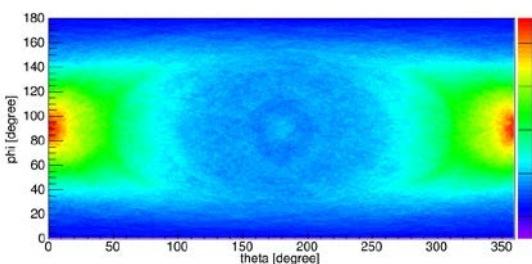


図 3.3-42 $\phi = 90$ 度、 $\theta = 0$ 度方向に ^{137}Cs 線源を設置した場合の再構成結果。

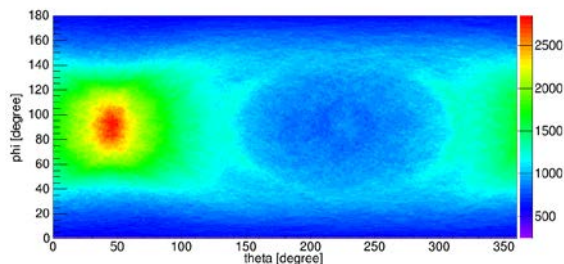


図 3.3-43 $\phi = 90$ 度、 $\theta = 45$ 度方向に ^{137}Cs 線源を設置した場合の再構成結果。

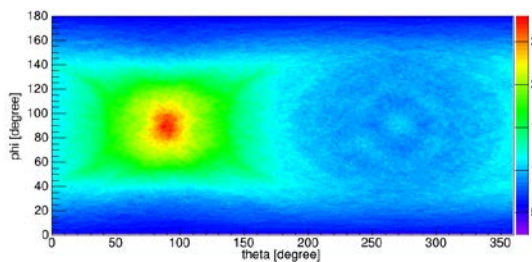


図 3.3-44 $\phi = 90$ 度、 $\theta = 90$ 度方向に ^{137}Cs 線源を設置した場合の再構成結果。

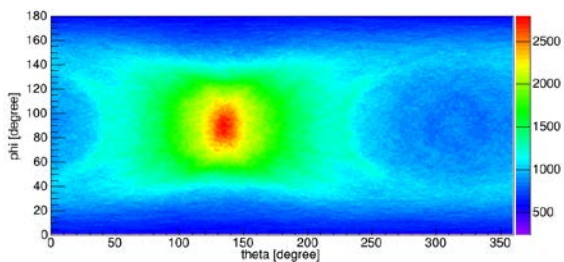


図 3.3-45 $\phi = 90$ 度、 $\theta = 135$ 度方向に ^{137}Cs 線源を設置した場合の再構成結果。

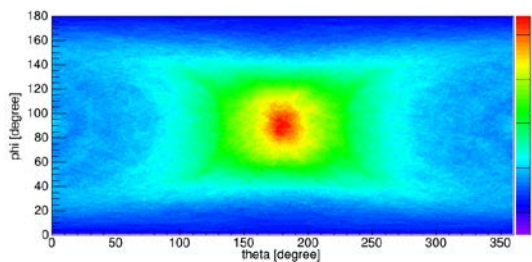


図 3.3-46 $\phi = 90$ 度、 $\theta = 180$ 度方向に ^{137}Cs 線源を設置した場合の再構成結果。

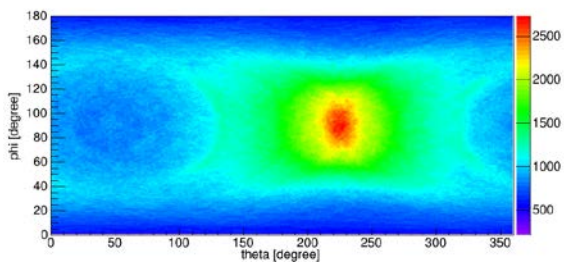


図 3.3-47 $\phi = 90$ 度、 $\theta = 225$ 度方向に ^{137}Cs 線源を設置した場合の再構成結果。

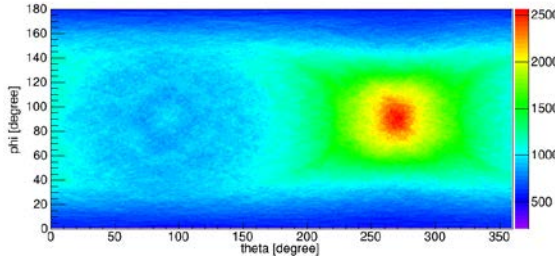


図 3.3-48 $\phi = 90$ 度、 $\theta = 270$ 度方向に¹³⁷Cs 線源を設置した場合の再構成結果。

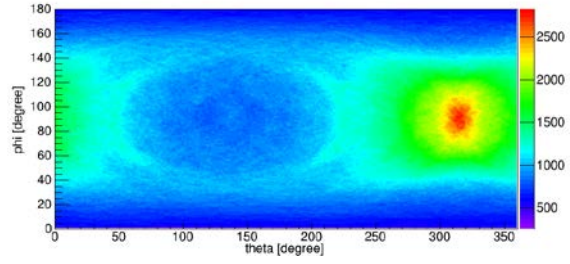


図 3.3-49 $\phi = 90$ 度、 $\theta = 315$ 度方向に¹³⁷Cs 線源を設置した場合の再構成結果。

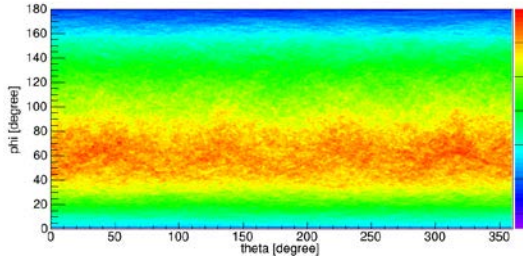


図 3.3-50 $\phi = 0$ 度、 $\theta = 90$ 度方向に¹³⁷Cs 線源を設置した場合の再構成結果。

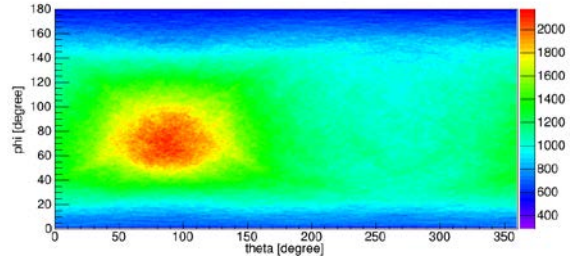


図 3.3-51 $\phi = 45$ 度、 $\theta = 90$ 度方向に¹³⁷Cs 線源を設置した場合の再構成結果。

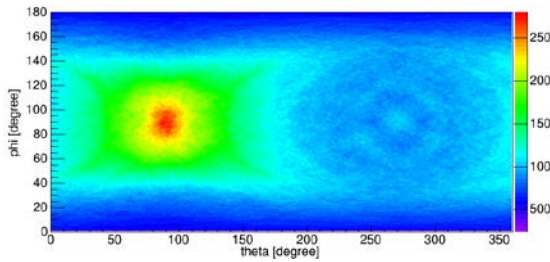


図 3.3-52 $\phi = 90$ 度、 $\theta = 90$ 度方向に¹³⁷Cs 線源を設置した場合の再構成結果。

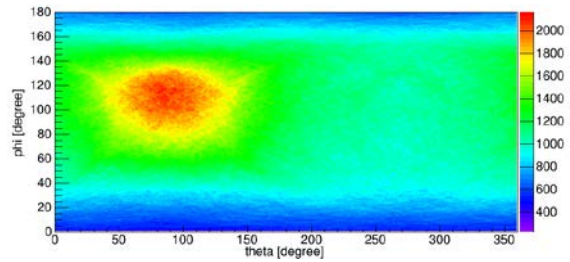


図 3.3-53 $\phi = 135$ 度、 $\theta = 90$ 度方向に¹³⁷Cs 線源を設置した場合の再構成結果。

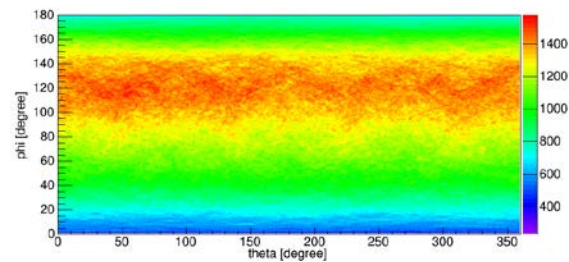


図 3.3-54 $\phi = 180$ 度、 $\theta = 90$ 度方向に¹³⁷Cs 線源を設置した場合の再構成結果。

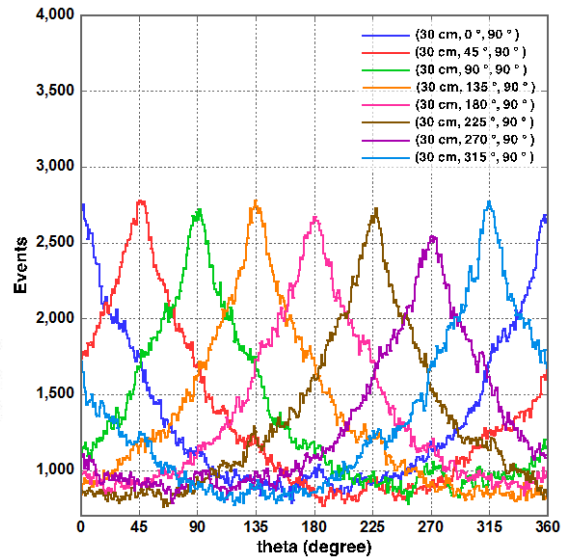


図 3.3-55 $\phi = 90$ 度での断面ヒストグラム。

(3) 1mm 角 64 本バージョン

高計数率場に対応するため $1 \times 1 \times 50 \text{mm}$ の細径 GAGG シンチレータにテフロンテープ被膜処理を行い、 8×8 本束ねたシンチレータブロックを作成し、その実験的特性評価を実施した。なお、ガンマ線入射方向推定の際には、再構成の条件として、

- ① 1 ロッドへの付与エネルギー：100keV 以上、
- ② $562 \text{keV} < \text{両端の付与エネルギーの和} < 762 \text{keV}$
- ③ 発光点間距離の閾値無し

とした。使用した線源は ^{137}Cs (1MBq) 線源である。

$\theta = \phi = 0^\circ$ の位置に線源を設置した場合の測定体系を図 3.3-56 に示す。図 3.3-57 に、再構成結果を示す。 $\theta = \phi = 0^\circ$ の部分にイベントが集まっており、正しくガンマ線入射方向が推定できていることが確認された。また、実験データより今回作成した検出器の固有効率が 3.68 %、ピーク (570~770keV) 効率が 0.338%であることを算出した。この効率は 256 本バージョンのシンチレータスタックシステムよりも検出効率が低く、高計数率場に対応できることを確認した。

θ 方向に $-135^\circ \sim 135^\circ$ まで 90° ずつ変更し、実験を行った。測定体系を図 3.3-58 に示す。再構成結果を図 3.3-59 に示す。照射位置変更に従って再構成結果のピークも移動しており、推定できていることが確認できた。図 3.3-60 に θ 方向への投影図を示す。この投影図から方向分解能を算出すると、約 60 度 ($= \pm 30$ 度) であることが分かった。

複数線源があった場合においてもイメージングが可能かを調べるため、図 3.3-61 及び図 3.3-62 の測定体系で実験を行った。図 3.3-63、図 3.3-64 に再構成結果を示す。線源を配置した 2 箇所周辺にイベントが集まっており、複数線源を配置した場合においても推定できていることが分かる。ただし、 $\phi = -45^\circ$ に照射した際、 $\phi = -30^\circ$ 付近にイベントが集中しており、これは、イメージングの際に ϕ 方向の極に近づくにあたってカウントの積算が正確にできていないためと考えられる

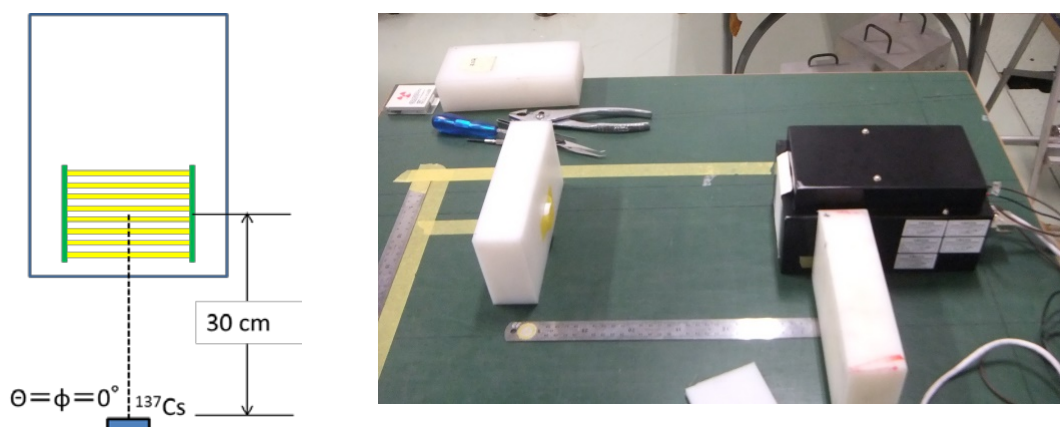


図 3.3-56 $\theta = \phi = 0^\circ$ での測定体系

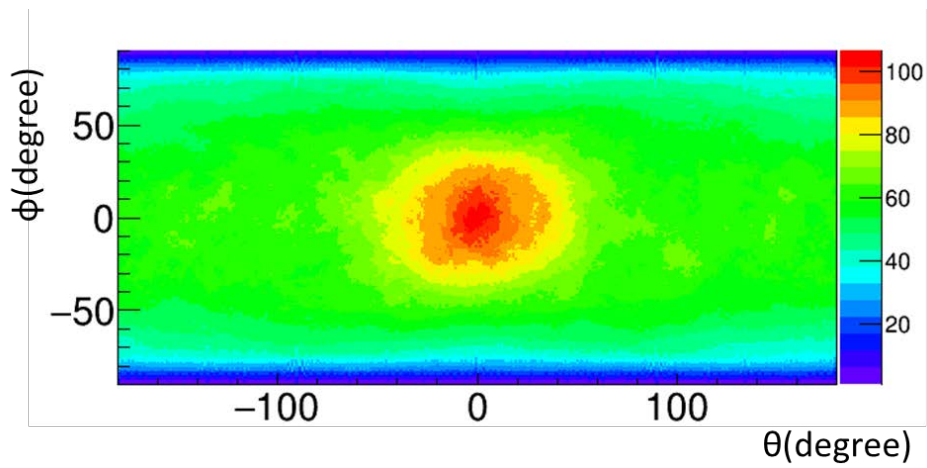


図 3.3-57 $\theta = \phi = 0^\circ$ での再構成結果

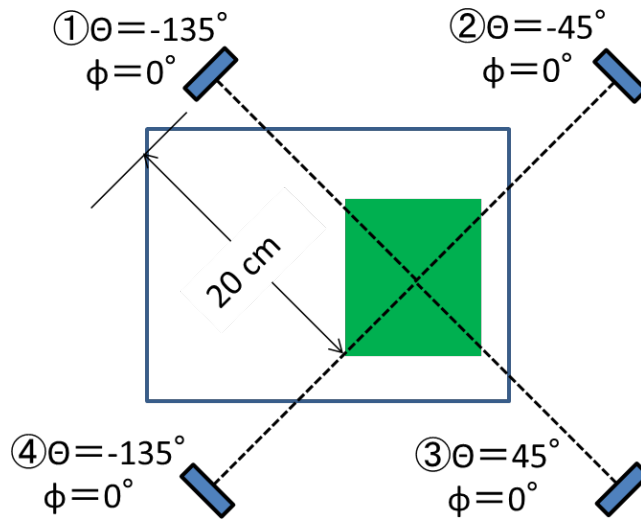


図 3.3-58 θ 方向変更時の測定体系

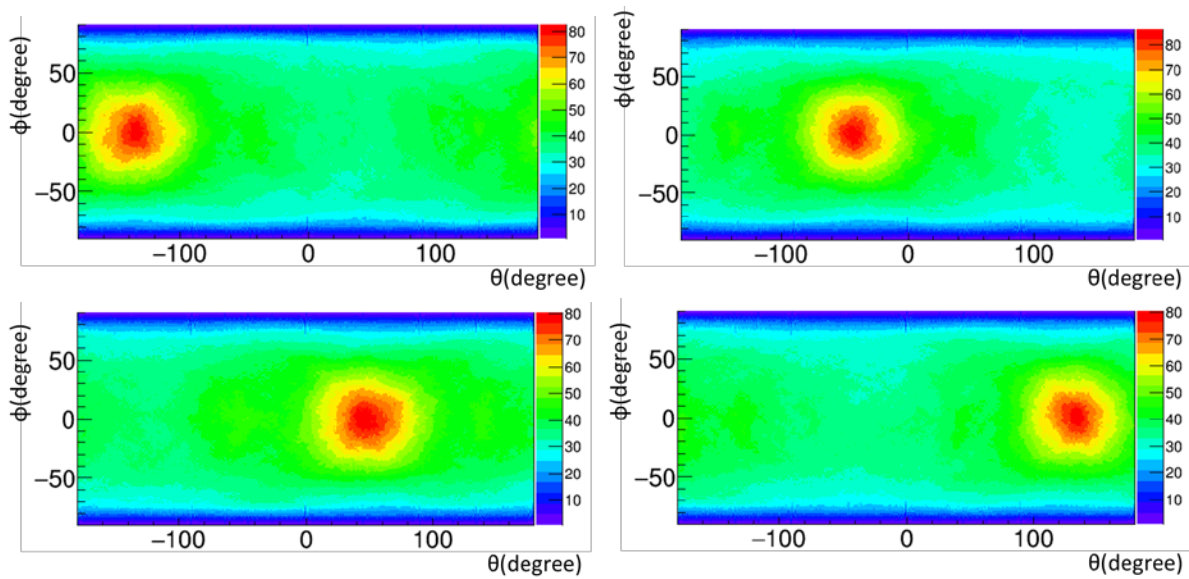
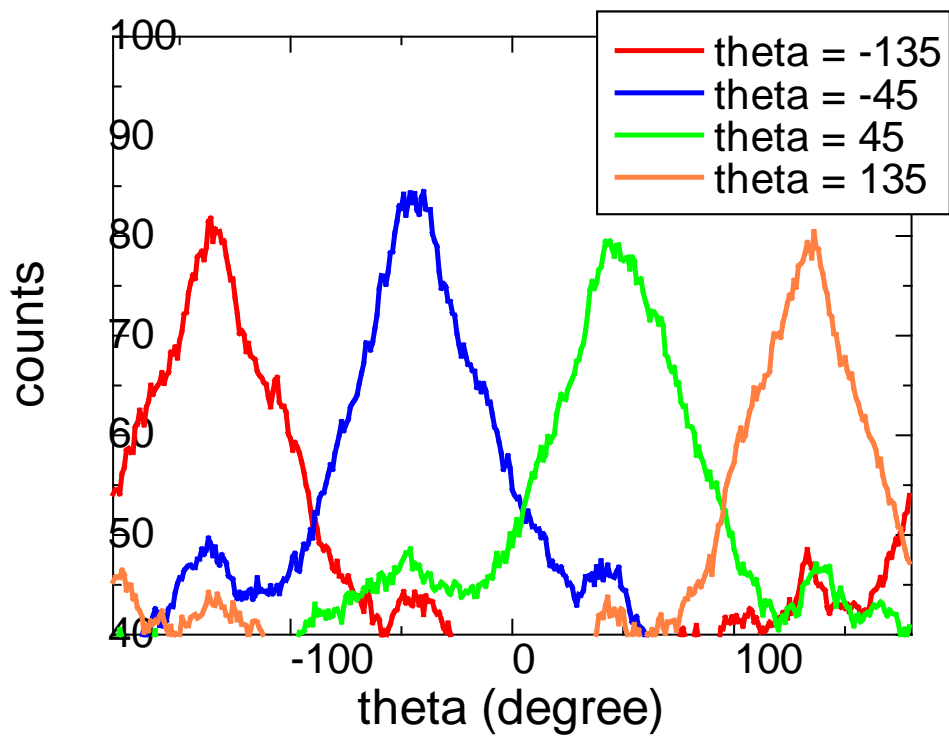


図 3.3-59 θ 方向変更時の再構成結果 (上から $\theta = -135^\circ$ 、 -45° 、 45° 、 135°)



3. 3-60 θ 軸への投影図

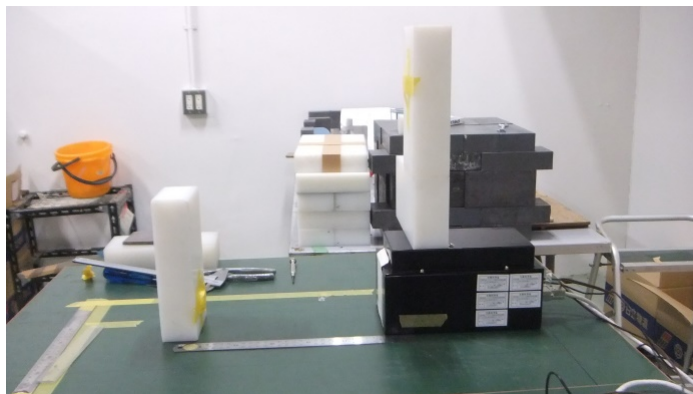
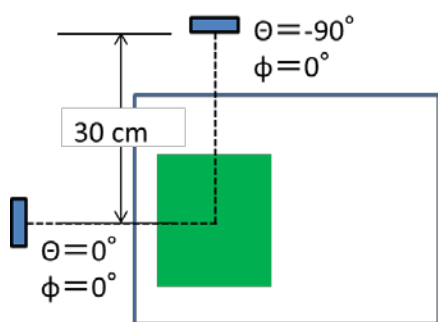


図 3. 3-61 複数線源のイメージング 1

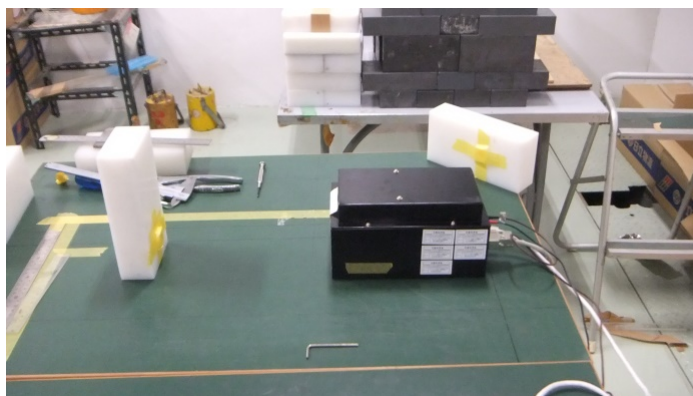
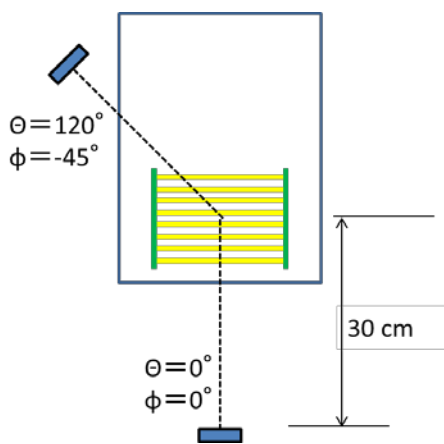


図 3. 3-62 複数線源のイメージング 2

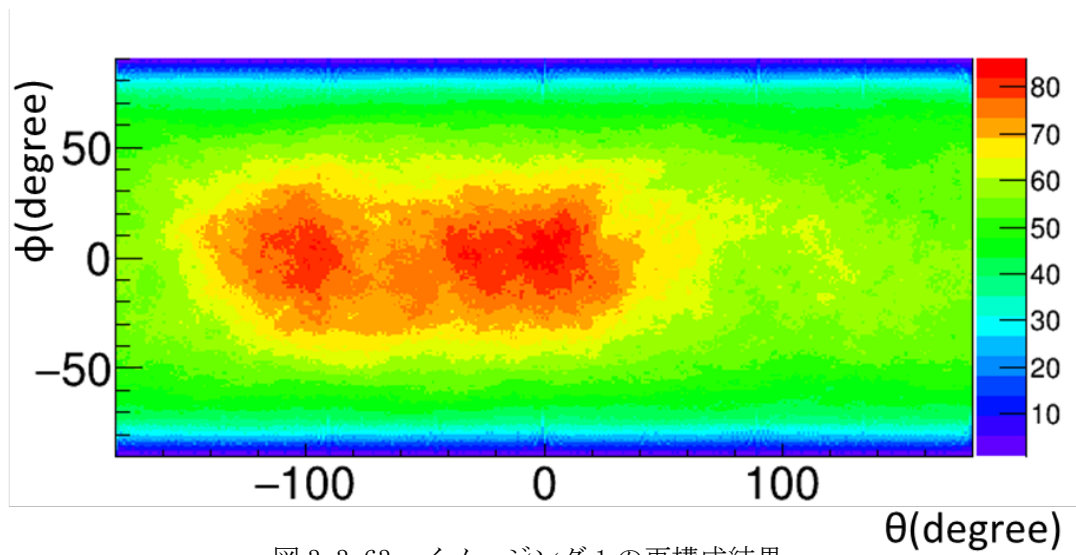


図 3.3-63 イメージング 1 の再構成結果

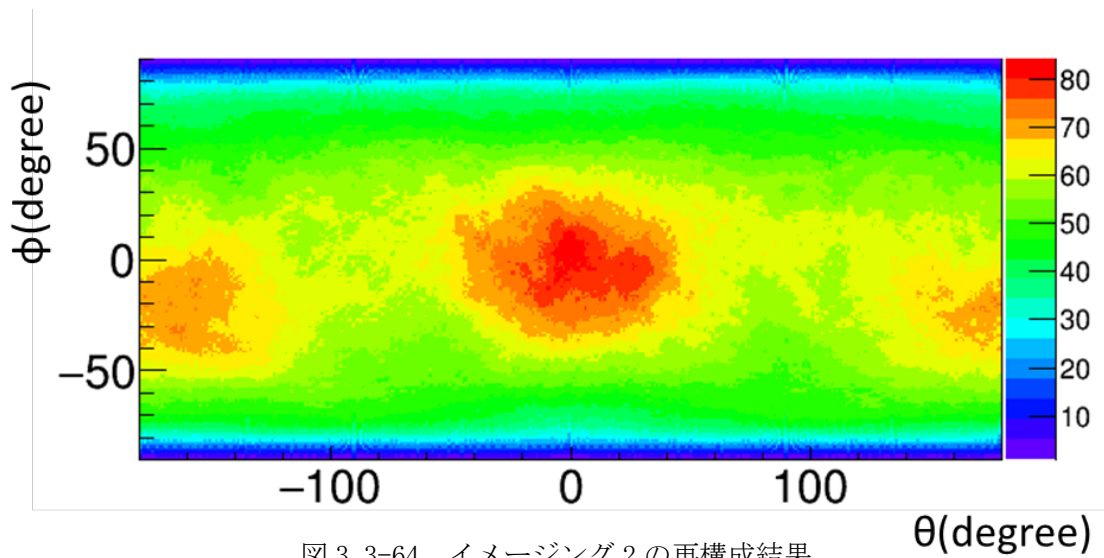


図 3.3-64 イメージング 2 の再構成結果

参考文献

- (1) 村上悠紀雄、圃野皓文、小林昌敏、「放射線データブック」，地人書館（昭和 57 年 4 月）

3.4 光読み出しシステムの構築（富山高専）（H24～H27）

3.4.1 8チャンネルMPPC信号処理回路の設計試作

シンチレータ1本分の光読み出し信号処理回路の設計製作を行った。その処理システムの全体構成を図3.4-1に示す。両端のMPPCでシンチレーション光を電荷信号に変換し、その後、Preampにより電圧信号へと変換した。さらにアナログ・デジタル回路で処理した後、DIO Card(コンテック社製、PIO-32D)を介してPCでデータを取得した。また、MPPCに必要なバイアス電源として、松定プレジジョン社製のAPD用高圧電源(HAPD-0.1PT)を使用した。MPPCに印加されるバイアス電源の出力をPCから制御した。

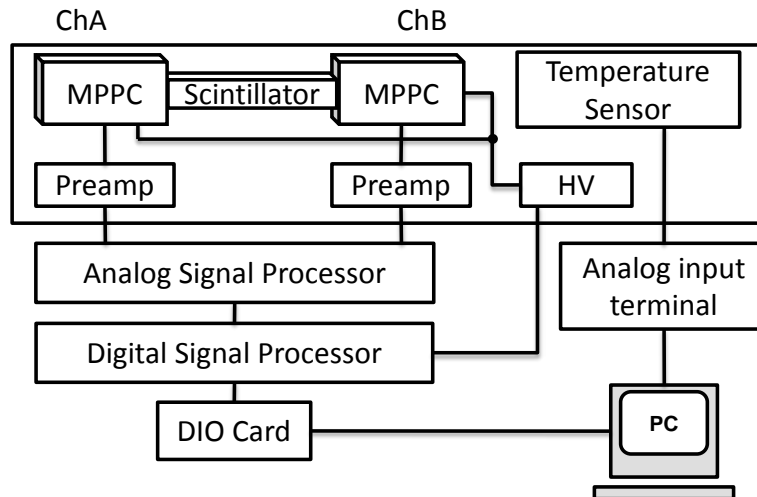


図3.4-1 一次元位置敏感型放射線検出器の処理システム全体図

アナログ処理回路は、A,Bの二系統用意し、それぞれChA、ChBのPreamp出力信号を処理した。1チャンネル分のアナログ信号処理回路は、Preamp出力信号をFAST、SLOWの2つの信号に分けて波形処理を行った。FASTはPreamp出力信号を増幅した信号で同時計数判定用に使用し、SLOWはピークホールド回路で正確に波高値を保持できる様にPreampの出力信号をShaperにより増幅、波形整形した信号である。また、デジタル信号処理回路として、Field Programmable Gate Array (FPGA)を用いた。(図3-70)

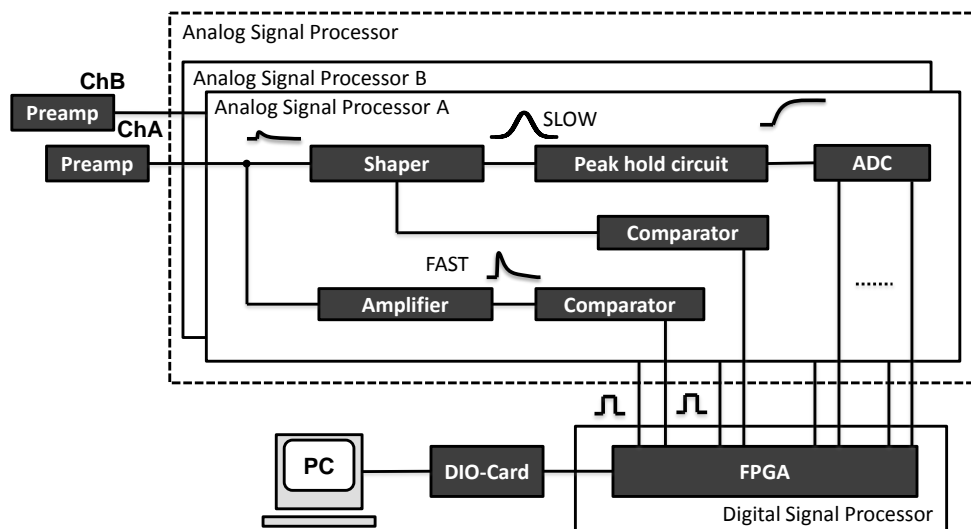


図3.4-2 製作したアナログ・デジタル処理部の構成

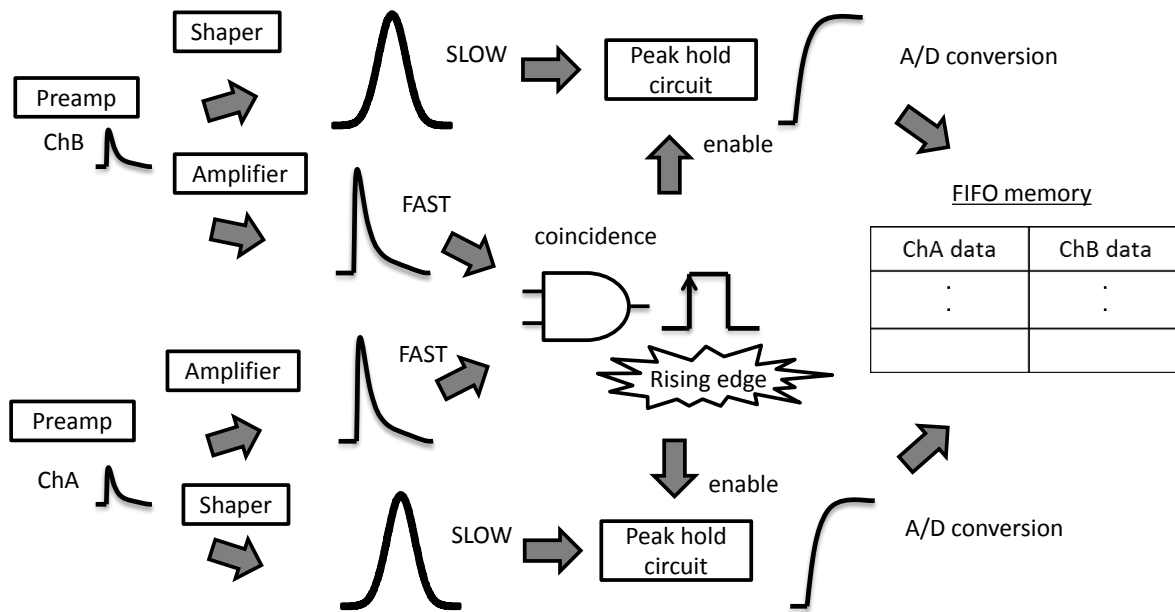


図 3.4-3 同時計数処理による AD 変換までの流れ

同時計数処理による AD 変換までの流れを図 3.4-3 に示す。ChA、ChB の FAST 信号の AND をとったロジック出力信号の立ち上がりを検出することで、データ取得処理を開始する。データ取得処理が開始されると ChA、ChB の SLOW の波高値がピークホールド回路により保持され AD 変換が開始される。AD 変換終了後、FPGA により構築した FIFO メモリに逐次データを格納する。DIO Card を使用し FIFO メモリにアクセスし、同次計数処理をした ChA、ChB の波高値データを PC で取得し、データの解析を行う構成とした。

さらに、2チャンネルを 4 系統作成し、8ch の処理システムを作成した。その写真を図 3.4-4 に示す。回路の動作チェックとして BGO シンチレータを MPPC に接続し、パルス波高分布を取得した。使用した線源は ^{137}Cs 線源である。その測定結果を、比較のため市販の ADC (CAEN 社製 V1785) による測定結果と併せて、図 3.4-5 に示す。この結果より、波高分布がほぼ一致しており、開発した回路システムが正常に動作していることを確認した。

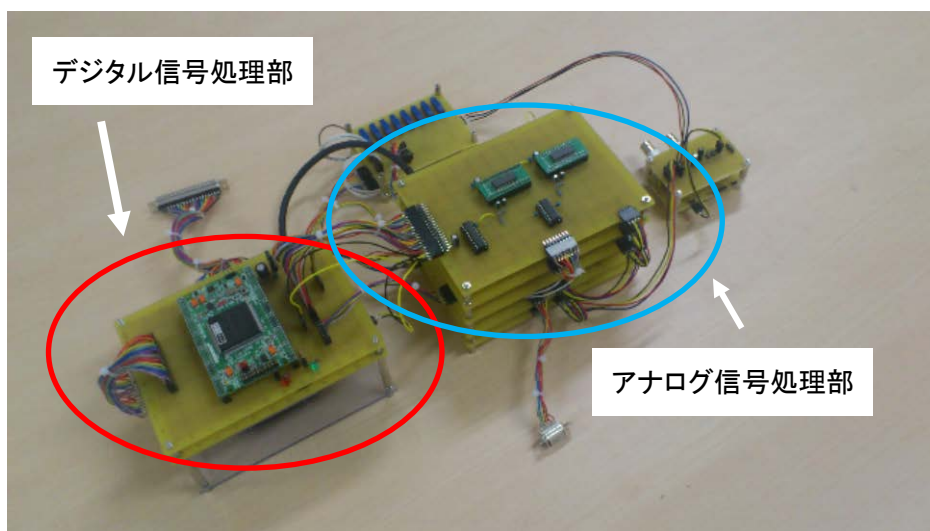


図 3.4-4 制作したマルチ ch システムの回路システム

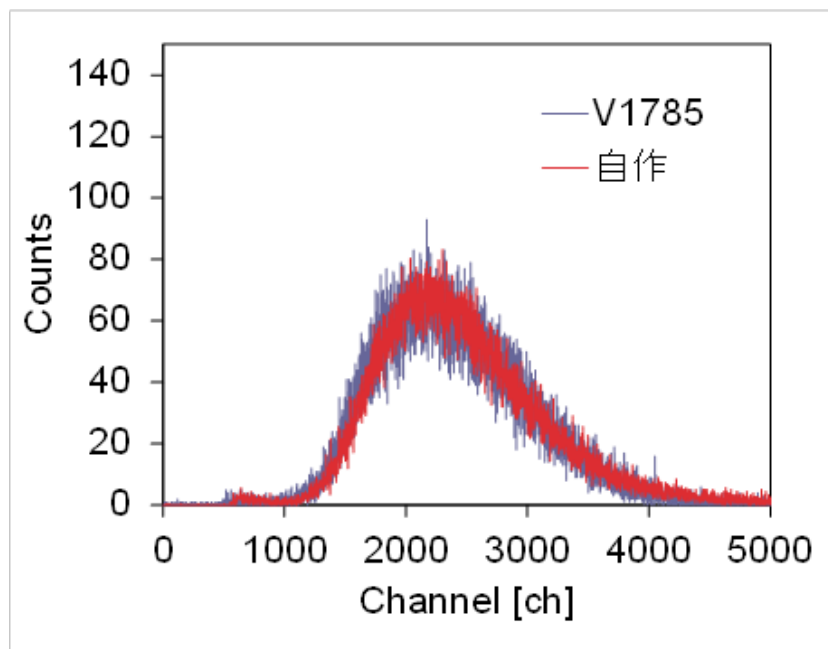


図 3.4-5 多チャンネル読み出しシステムによる測定結果の市販多チャンネル-ADC との比較

3.4.2 多チャンネル MPPC 信号処理回路の設計試作

64 本 GAGG シンチレータの両端からの光出力を処理するために、多チャンネル MPPC からの信号取得回路の作成とシンチレータブロックからの信号取得性能評価を実施した。対象シンチレータが GAGG(Ce)であるため、アンプ時定数等を最適化するとともに、しきい値設定方法の変更を通じて、より均一性の高いシステムにし、ADC、演算増幅器（オペアンプ）等の回路素子を組み合わせることで、両端 64ch、合計で 128ch の信号処理の可能な多チャンネルシステムを試作した。最終的に多数の GAGG シンチレータを用いて製作したシステムの評価を行い、想定通りに動作していることを確認した。また、同等の回路装置である市販マルチチャンネルピークホールドシステムによる測定結果との比較を通じ、本システムの妥当性を評価した。

多数の MPPC から、トリガー信号を作成するために、前節では全チャンネルの和を取った FAST 信号を利用する回路系としていた。しかし、128 個の MPPC の出力となると、個々のゲインの違いによるばらつきが大きくなる。そのため、SLOW 信号に閾値を設定したコンパレータを設置しロジック信号を生成し、シンチレータ両端のロジック AND と、シンチブロック全体の OR によりトリガー信号を生成することとした。

作成したシステムの写真を図 3.4-6～3.4-11 に示す。これらの写真は順に前置増幅器部、波形整形部、ピークホールド部、SLOW 信号発生部、FAST 信号発生部及びメモリ・ADC 制御部を表している。これらをチャンネル数分製作し、図 3.4-12 に示す様にケースに収めた。ケースからは図 3.4-13 に示す様に DIO ボードを介して PC に接続し、測定信号を PC に取り込んだ。また、自作システムによる測定と合わせ、市販ピークホールド ADC（CAEN 社製）による測定を行い、測定結果を比較した。

GAGG(Ce)シンチレータブロックを作成し、MPPC に接続した。上部よりコリメートしたガンマ線 (^{137}Cs , 662keV) を照射し、データの取得に成功した。その結果を、回路系を市販品（CAEN 社製）と組みかえて取得したデータと比較した。Ch0～Ch3 における両端からの信号のパルス波形分布を比較したものを、図 3.4-14、図 3.4-15 に示す。自作回路による測定と CAEN ピークホールド ADC による測定では異なる波形整形回路を用いたため、両者のゲインが若干異なったが、全体の形状はほぼ一致しており、今回開発したシステムが妥当な動作を行っていることが分かった。全てのチャンネルについて同様の比較を行い、これらのチャンネルと同様に自作システム及び CAEN 製品による測定結果が同様の傾向を示すことが示された。

次に、各パルスを用い、シンチレータの両端でパルス波高値比の対数を求め、そのヒストグラムをとった結果を図 3.4-16、図 3.4-17 に示す。ここでも Ch0～Ch3 に関するデータを示した。これらの結果を見ても、自作システムによる測定結果と CAEN システムによる測定結果は同様の傾向を示しており、今回開発したシステムの妥当性が示された。

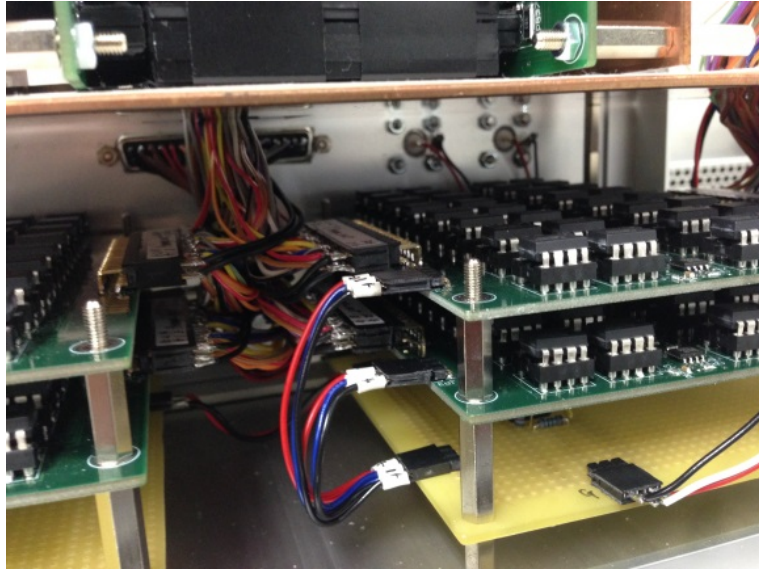


图 3.4-6 前置增幅器部

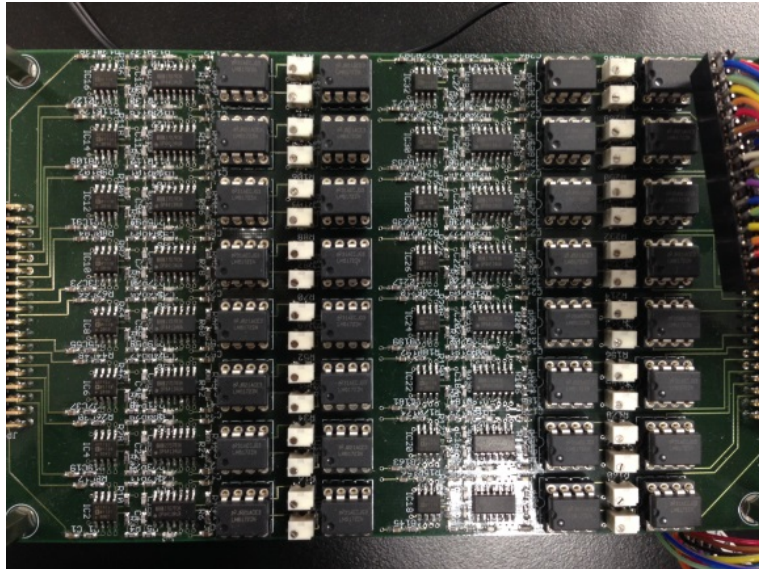


图 3.4-7 波形整形部

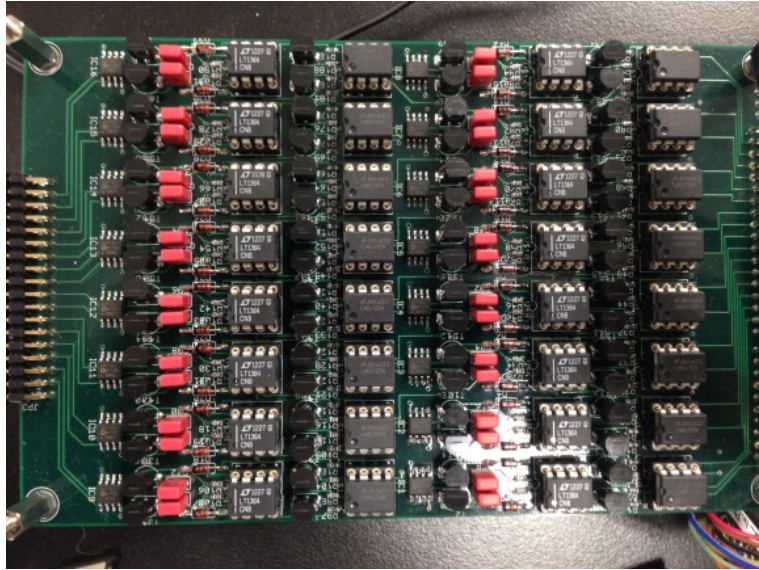


図 3.4-8 ピークホールド部

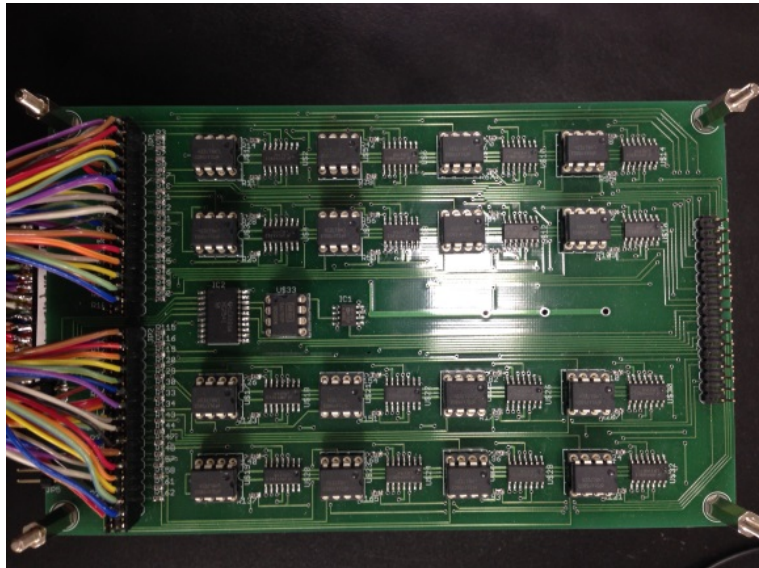


図 3.4-9 SLOW 信号発生部

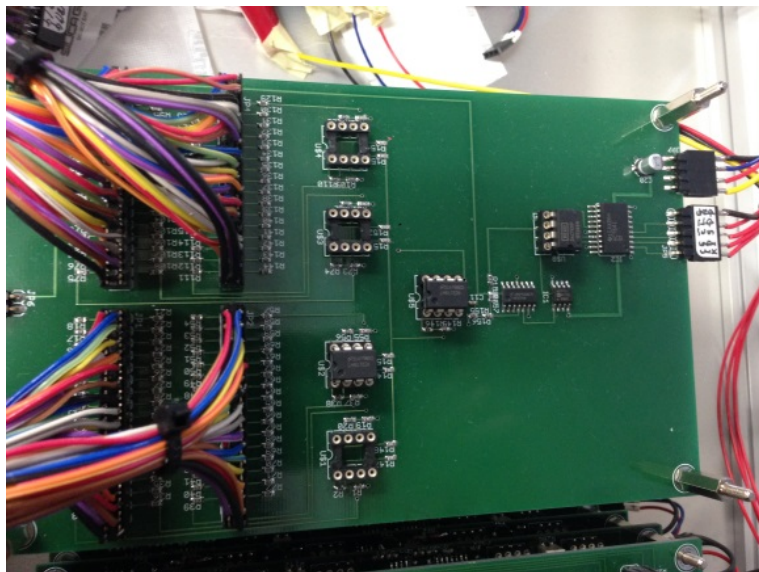


図 3.4-10 FAST 信号発生部

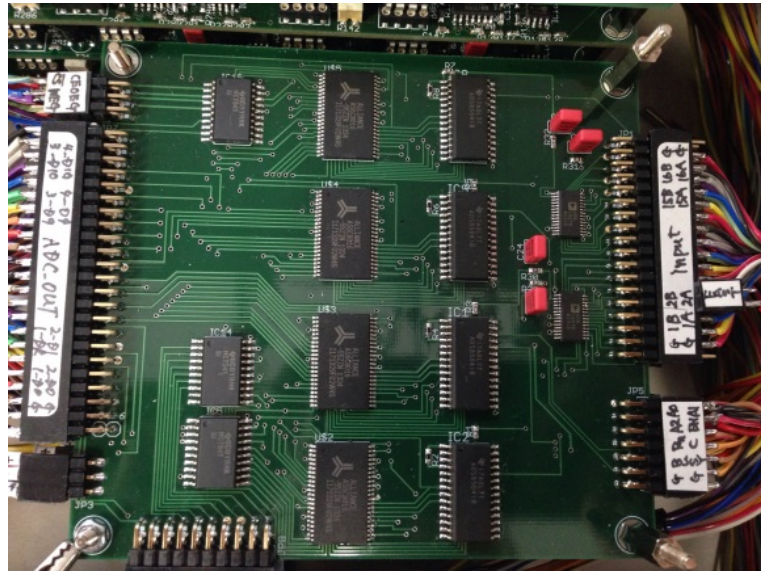


図 3.4-11 メモリ・ADC 制御部

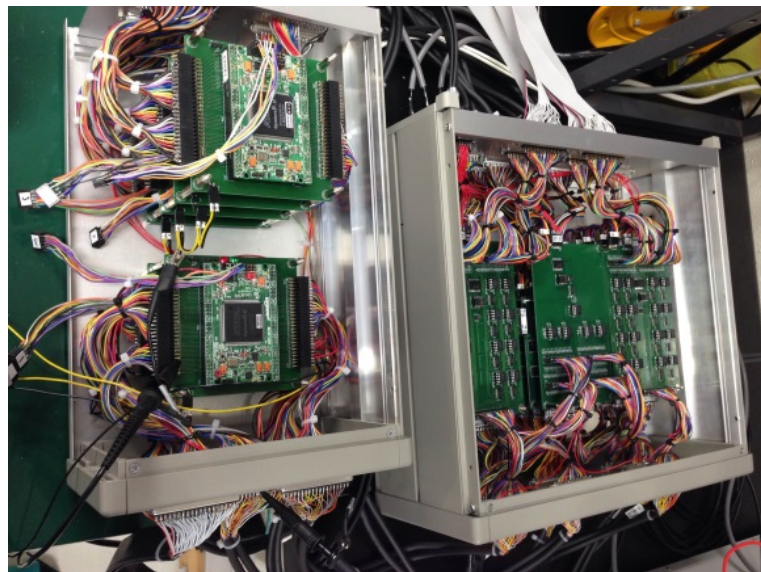
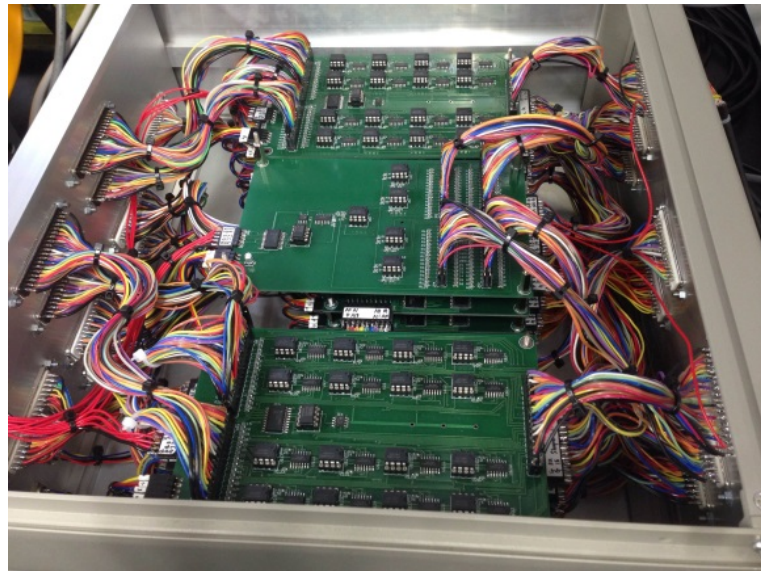


図 3.4-12 ケース収納の様子

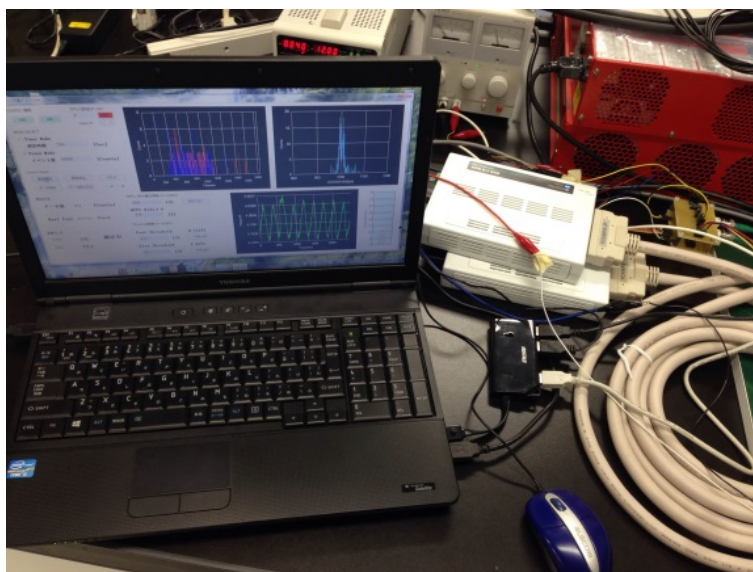


図 3.4-13 DIO ボードと PC への接続の様子

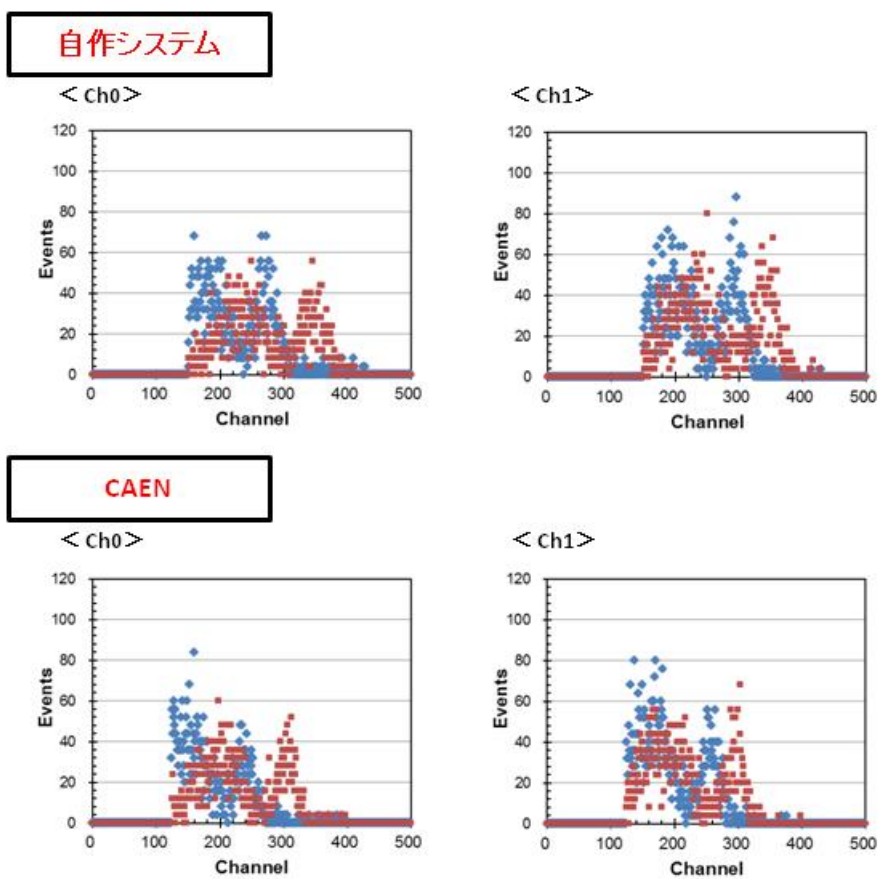
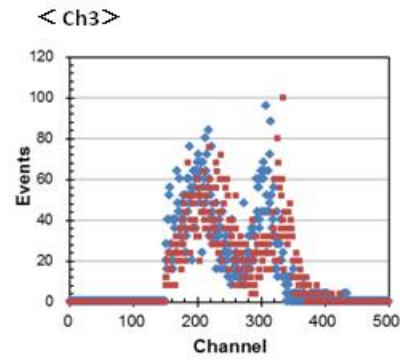
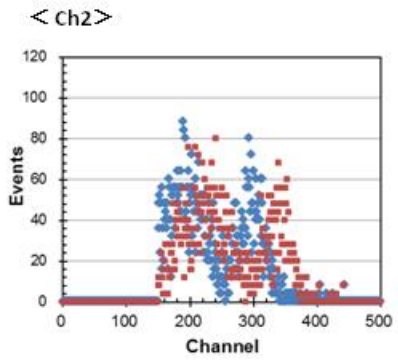


図 3.4-14 Ch0、Ch1 におけるパルス波高分布 (CAEN 製品による測定との比較)

自作システム



CAEN

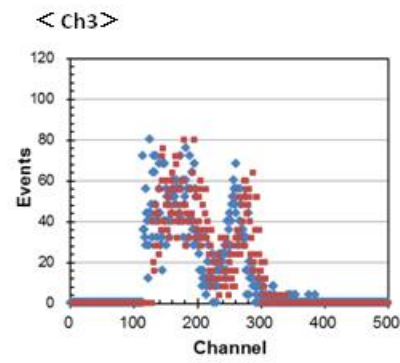
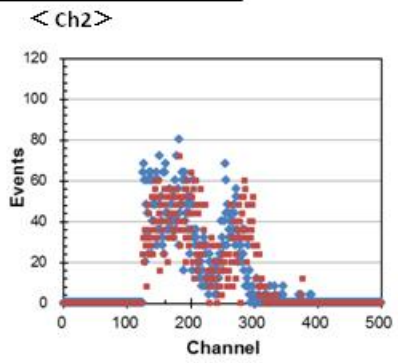


図 3. 4-15 Ch2、Ch3 におけるパルス波高分布 (CAEN 製品による測定との比較)

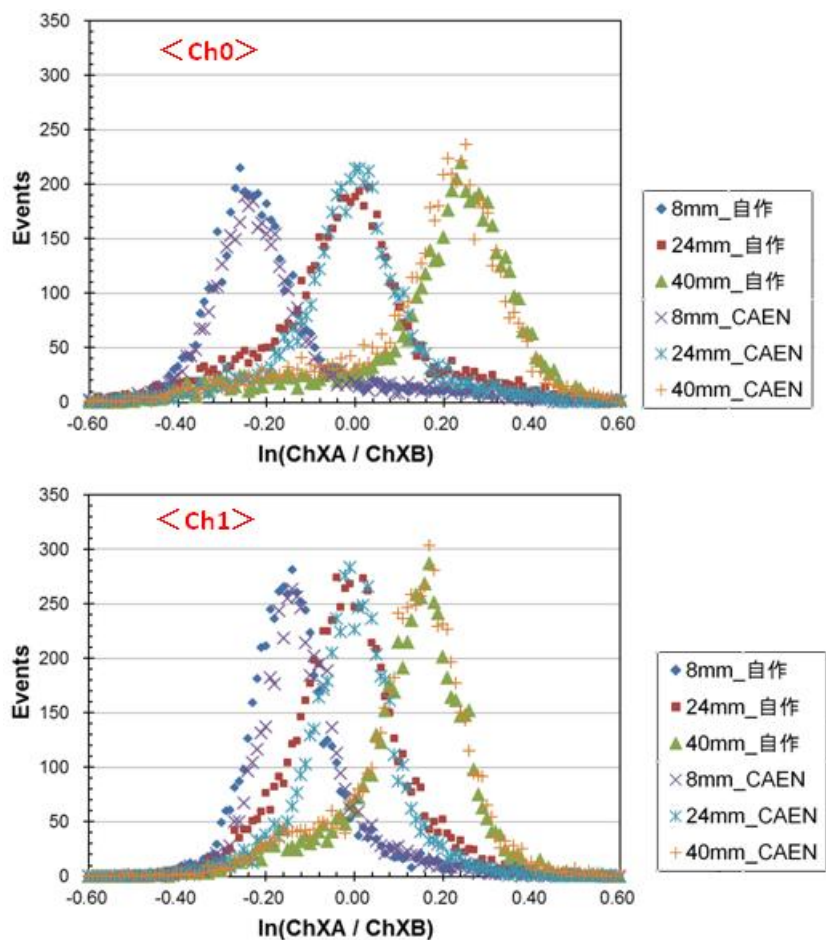


図 3.4-16 Ch0、Ch1 における $\ln(\text{ChXA}/\text{ChXB})$ のヒストグラム (CAEN 製品による測定との比較)

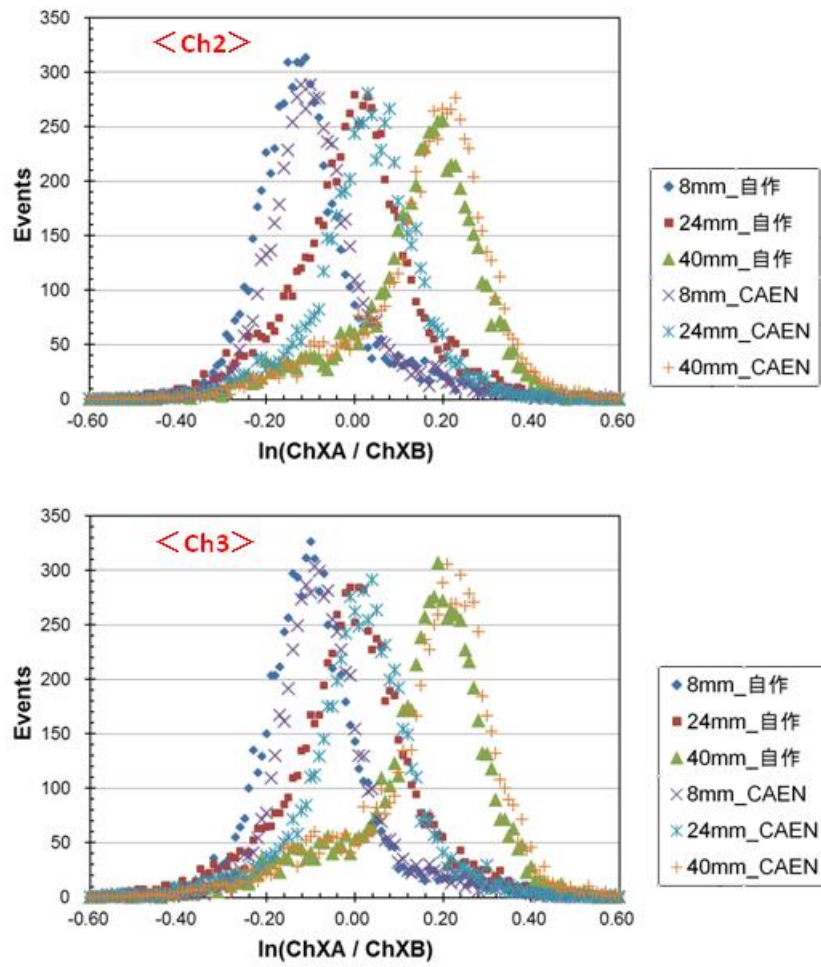


図 3.4-17 Ch2、Ch3 における $\ln(\text{ChXA}/\text{ChXB})$ のヒストグラム (CAEN 製品による測定との比較)

3.4.3 64本シンチレータブロックの作成と128チャンネルMPPC信号処理回路の小型化

本研究開発の最終目的は、ハンディタイプのガンマイメージャの開発であるため、よりコンパクトなデータ取得システムの開発を行うと共に、 $3 \times 3 \times 50\text{mm}$ のシンチレータを64本束ねた。シンチレータブロックの作成を実施し、データが取得できることを確認した。

(1) 64本シンチレータブロックの作成

$3 \times 3 \times 50\text{mm}$ のGAGGシンチレータ64本をスタック化するとともに、両端にそれぞれ1個のMPPCを装着した。図3.4-18に示すようなテフロン製治具によってシンチレータとMPPCを固定した。シンチレータとMPPCの間はジェル型光学シート：KE-420（信越化学工業製）を充填し、光学的な接続効率の均一化を図った。組み立てたシンチレータ及びMPPCの写真を図3.4-19に示す。

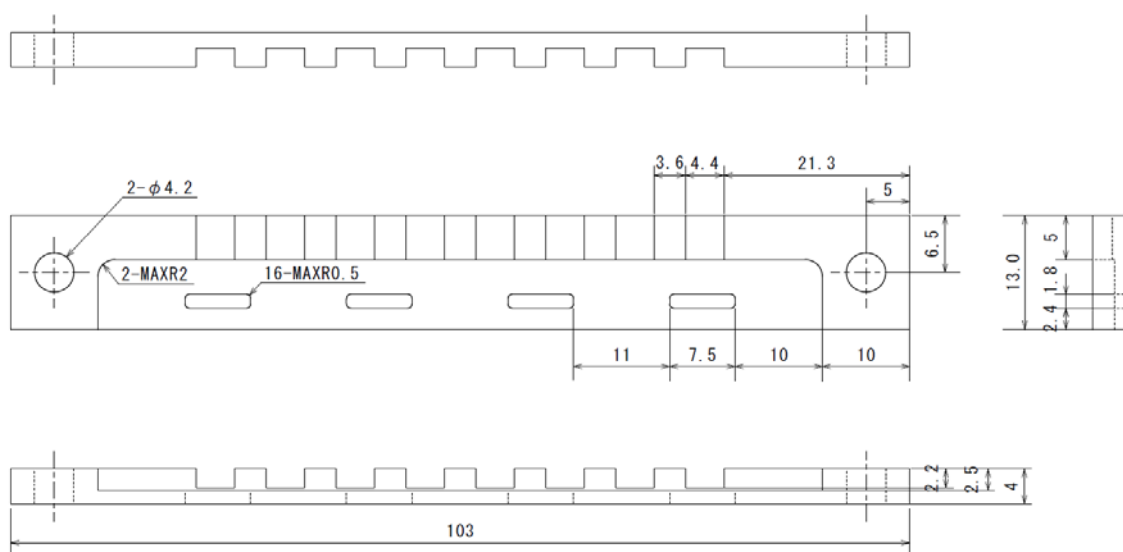


図 3.4-18 シンチレータ及びMPPCの固定に用いたテフロン製治具

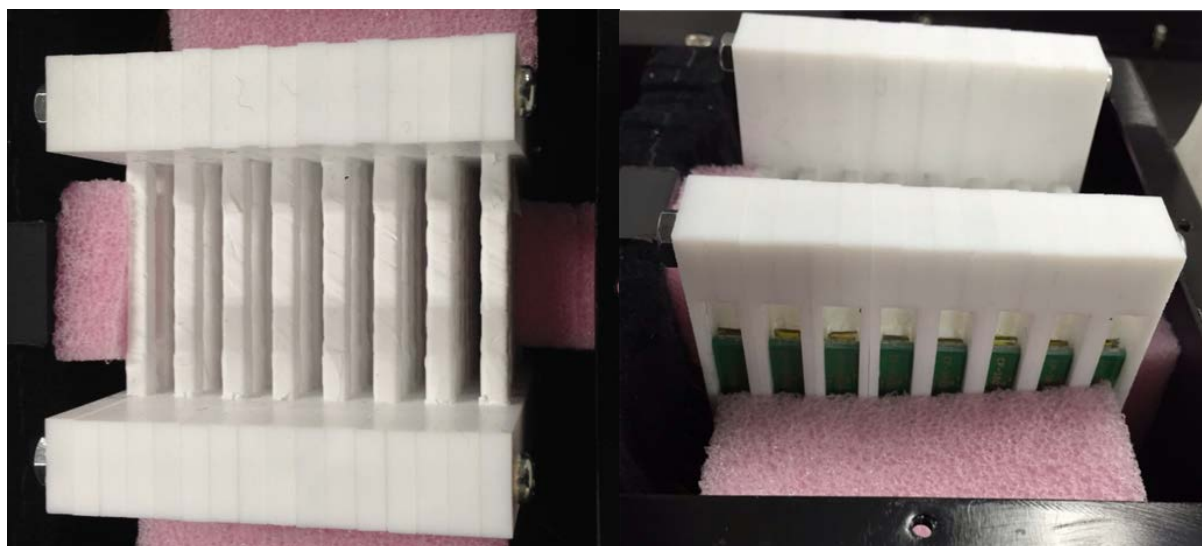


図 3.4-19 組み立てたシンチレータとMPPC

(2) 128 チャンネル MPPC 信号処理回路の作成

128 個の MPPC からの信号を読み取るための信号処理システムを開発した。その仕様は下の通りである。

- 128 チャンネル (以下 ch) (=64ch×両側) の MPPC からの信号積分値を測定可能
- 分解能 : 12bit (全 ch)
- イベントごとに全 ch について独立に積分値が測定・出力可能
- 各 ch 独立にトリガーレベル・バイアス電圧を調整することが可能
- 64ch ごとに 1 個の温度計を設置し、イベントごとに温度情報が出力
- 各 ch の印可電圧を独立に微調整可能
- ソフトウェアから各 ch を独立に有効/無効の設定が可能
- サイズ・重量
- ヘッドアンプ部
- 135mm (W) × 230mm (D) × 120.7mm (H),
- 1.48kg (シンチ・検出器込) 、 0.95kg (シンチ・検出器なし)
- 信号処理部 (DP 部)
- 150mm (W) × 122mm (D) × 32.2mm (H)
- 0.435kg

システム中には波高値情報を得るための slow shaper と、トリガー信号用の fast shaper が内蔵されており、図 3.4-20 に示す様に、fast shaper が閾値 (threshold) を超えた段階で AD 変換のためのトリガー信号が発生する。トリガー信号が発生した時点 (図では event 点) と一定時間 (tHOLD) 後の点 (hold 点) の 2 点で AD 変換が行われ、それらの差分をとって AD 変換結果としている。開発したシステムの写真を図 3.4-21 から図 3.4-24 に示す。

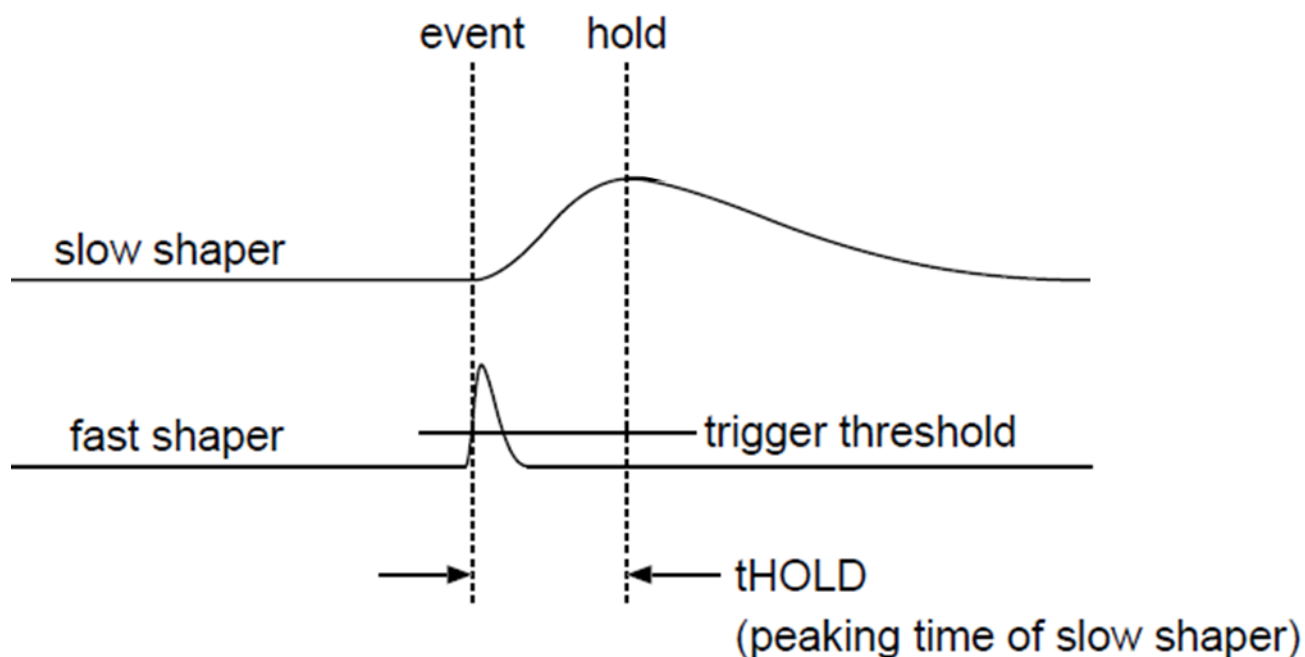


図 3.4-20 システム内のトリガー信号フロー



図 3.4-21 検出器&ヘッドアンプ部分 (外形)



図 3.4-22 DP 部 (外形)

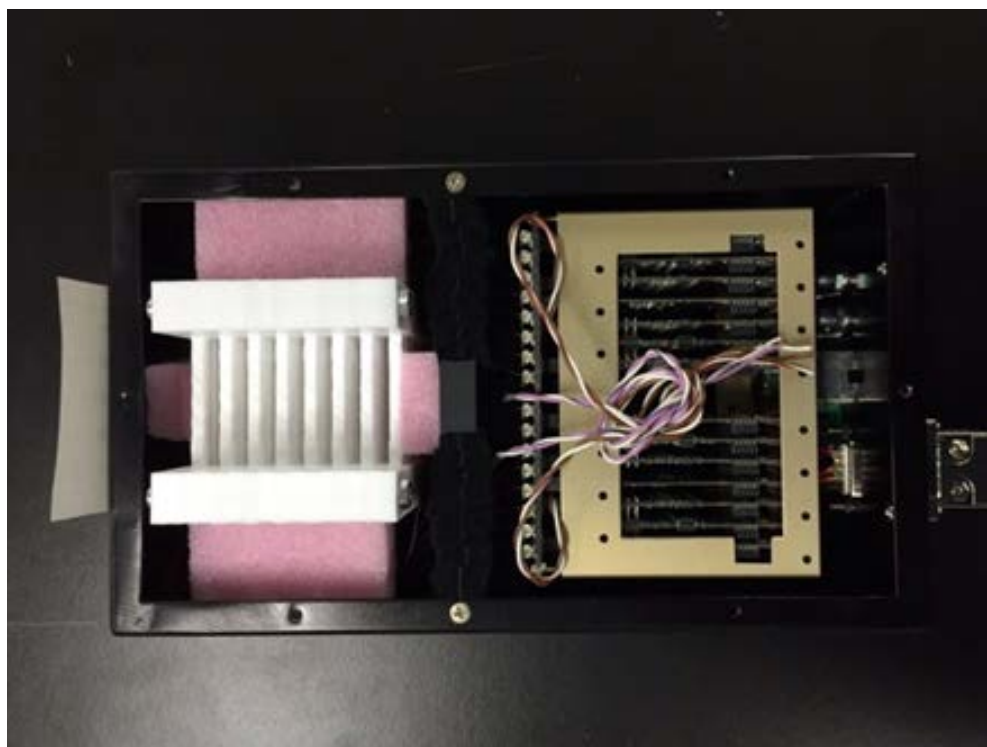


図 3.4-23 検出器&ヘッドアンプ部分（内部）



図 3.4-24 ヘッドアンプ、バイアス電圧調整部分

性能評価のため、 ^{137}Cs 線源による試験を行った。図 3.4-25 に示す様に各シンチレータにロット番号を付け、図に示すような位置 ($Z=5\text{mm}$ 、 15mm 、 25mm 、 35mm 、 45mm) にコリメートした γ 線を照射して測定を行った。

例として、シンチレータのロット No. 1、3、5、7 の中央 ($Z=25\text{mm}$) に γ 線を照射した際に得られたパルス波高分布を以下に図 3.4-26～図 3.4-29 として示す。また、これらの結果から光電ピークのエネルギー分解能を求めたところ、下の表 3.4-1 の結果が得られた。エネルギー分解能については、11%～13%と一様性が確認できた。

各ロットにおける左右の MPPC 信号の比をとることで、入射位置測定精度を評価した。得られた位置ヒストグラムを図 3.4-30～図 3.4-33 に示す。またこれらの各ロットに関する測定結果のうち、中央 $Z=25\text{mm}$ に入射した際のヒストグラムから得られた位置分解能 (半値全幅: FWHM) を表 3.4-2 に示す。位置分解能はロットによって $11\text{mm}\sim 30\text{mm}$ と大きくばらついている。これはシンチレータと MPPC の間の接続効率のばらつき等によるものと考えられる。

以上により、スタックしたシンチレータブロックの片面: 64ch 、両端で 128ch の信号を処理できる回路システムの動作を確認し、 ^{137}Cs 線源によって性能評価を行った。エネルギー分解能は $11\sim 13\%$ でどの ch でもほぼ一定の値を示したが、位置分解能は $10\sim 30\text{mm}$ と、ややばらつきが大きい結果となった。

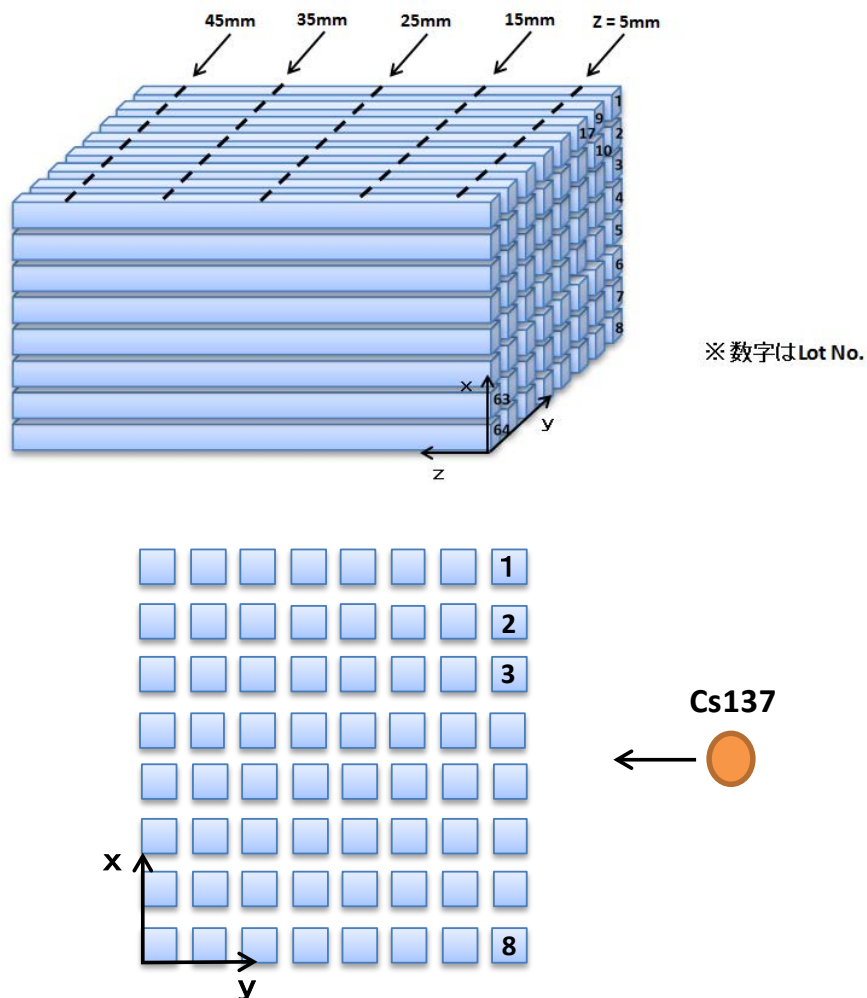


図 3.4-25 γ 線照射実験の体系

表 3.4-1 ロット No. 1、3、5、7 におけるエネルギー分解能測定結果

Lot No.	エネルギー分解能 [%]
1	11.2
3	12.0
5	12.7
7	12.9

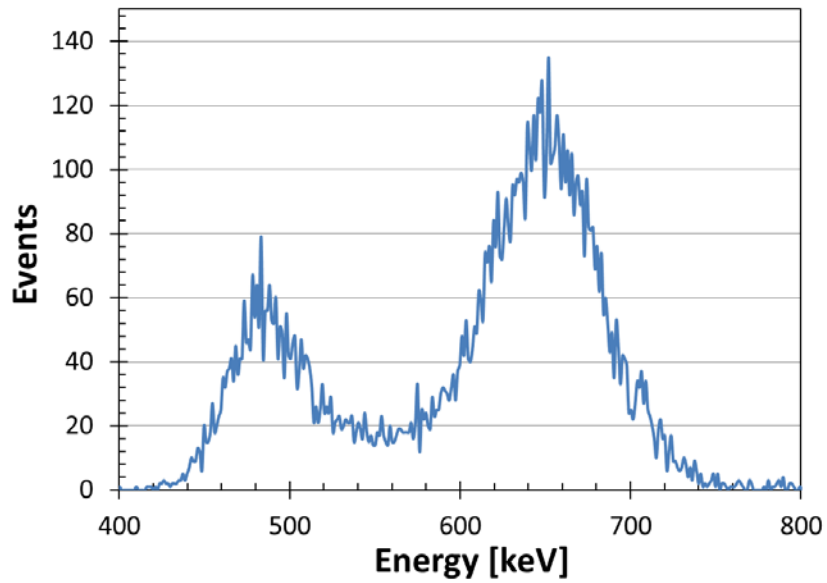


図 3.4-26 ロット No. 1 のパルス波高分布測定結果

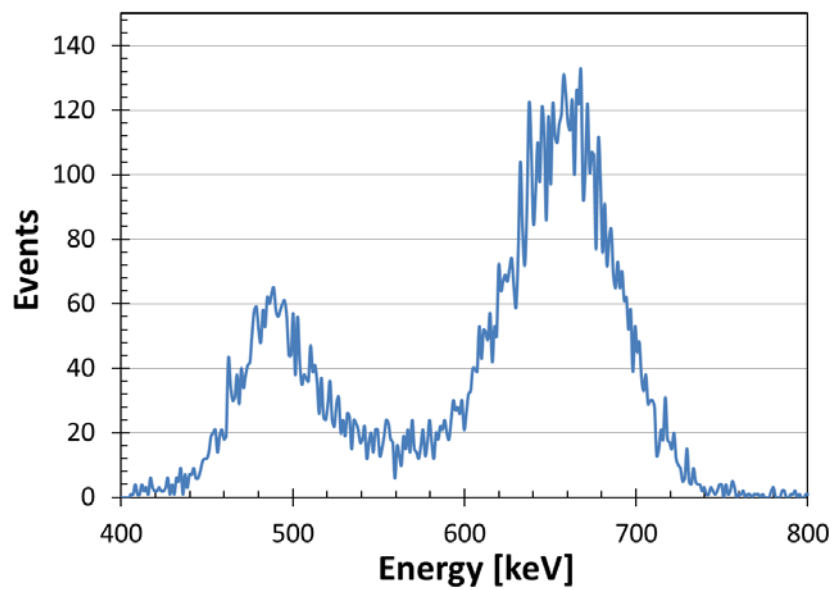


図 3.4-27 ロット No. 3 のパルス波高分布測定結果

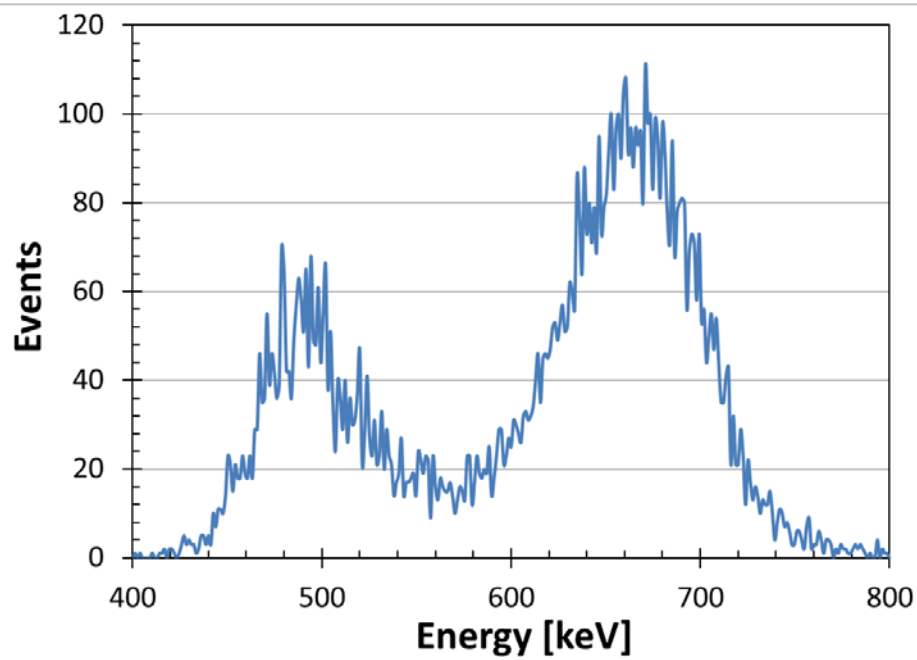


図 3.4-28 ロット No. 5 のパルス波高分布測定結果

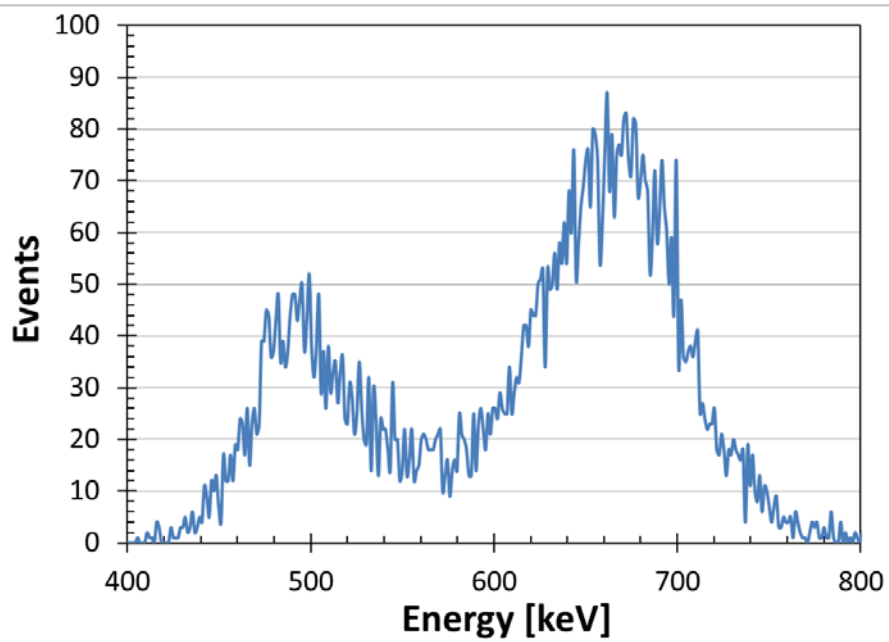


図 3.4-29 ロット No. 7 のパルス波高分布測定結果

表 3.4-2 ロット No. 1、3、5、7 における位置分解能測定結果

Lot No.	位置分解能 [mm]
1	30
3	11
5	26
7	20

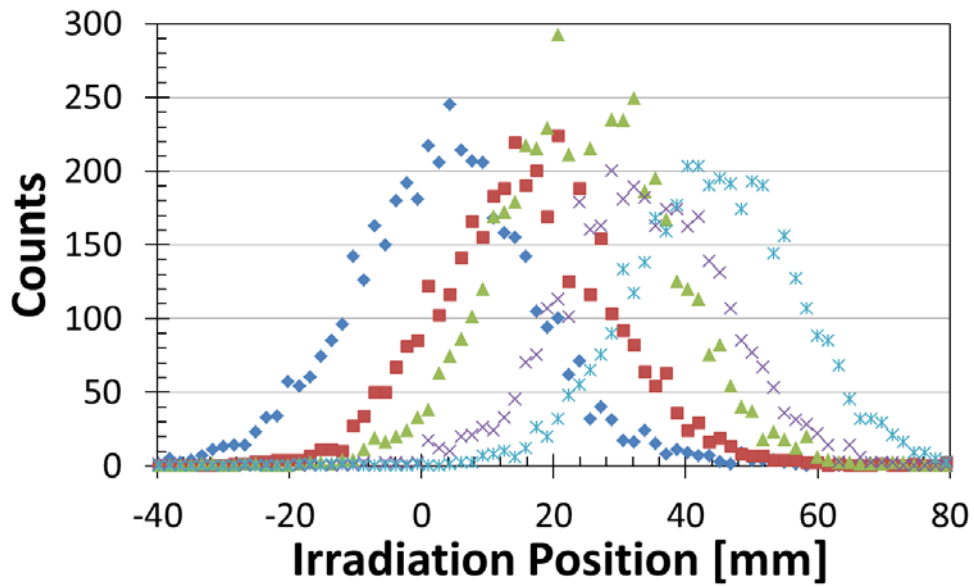


図 3.4-30 ロット No. 1 の位置分布測定結果

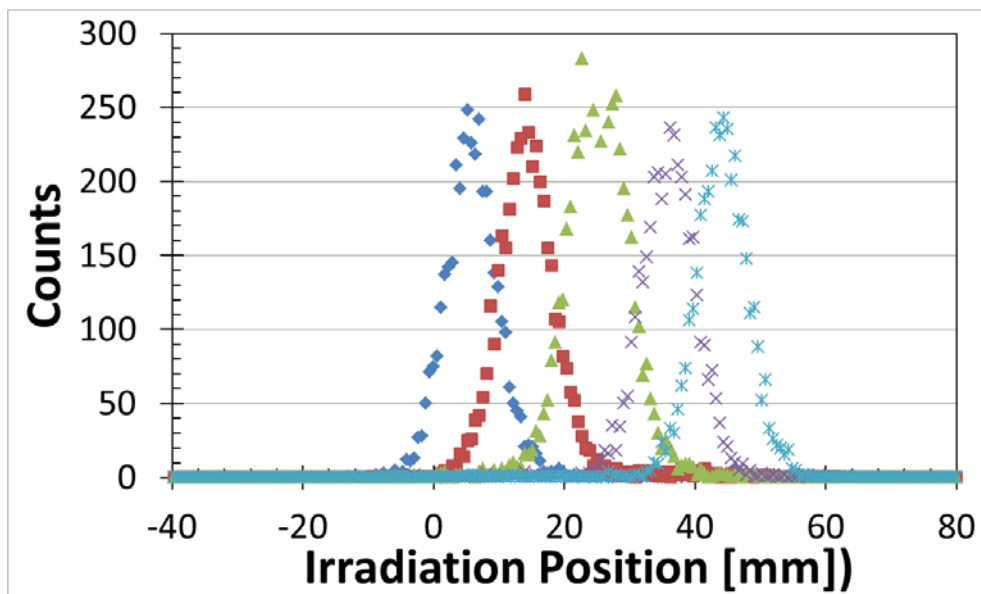


図 3.4-31 ロット No. 3 の位置分布測定結果

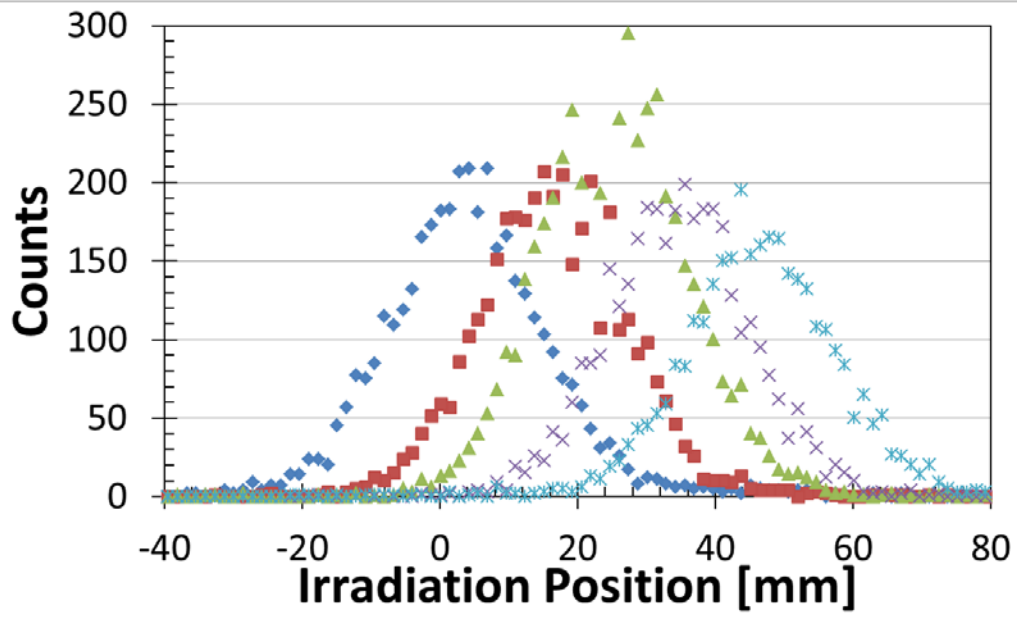


図 3.4-32 ロット No. 5 の位置分布測定結果

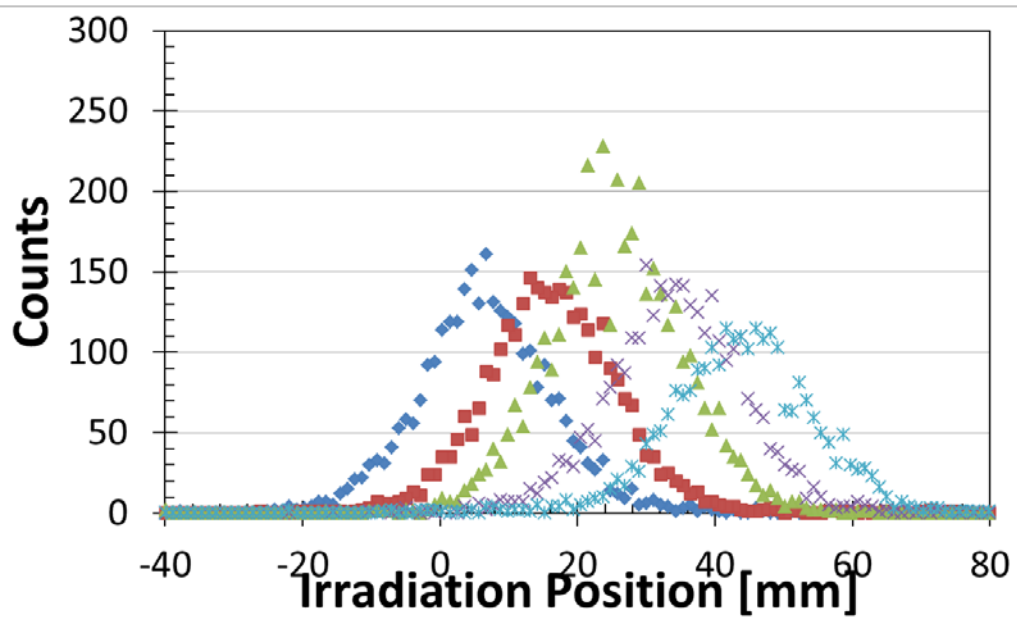


図 3.4-33 ロット No. 7 の位置分布測定結果

3.4.4 高線量率場対応版 64 本シンチレータブロックの作成と MPPC 信号処理回路の作成

高線量率場対応のため、細くしたシンチレータ（1mm 角）を 64 本束ねたシンチレータブロックを作成するとともに、それに適合した信号処理回路の作成を実施した。

(1) 高線量率場対応版シンチレータブロックの作成

細径 GAGG シンチレータ（太さ 1mm 角）を固定し、光検出器（マルチピクセルフォトンカウンタ：MPPC）にそれぞれを接続するため、下に示すような固定用部品を調達した。各シンチレータの両端を部品の溝に挿入し、部品で挟み込むことで固定した。その構造を積み重ね、全体として 64 本のシンチレータからなる高線量率場対応版シンチレータブロックを作製した。

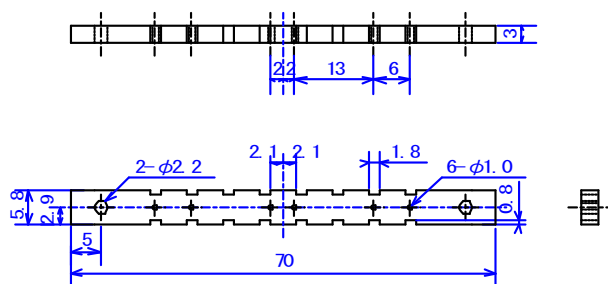


図 3.4-35 シンチレータ固定用プラスチック部品

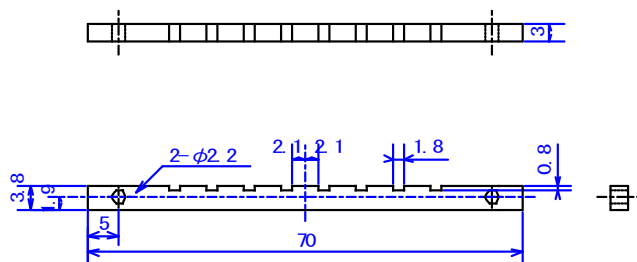


図 3.4-36 シンチレータ固定用プラスチック部品（端部用）

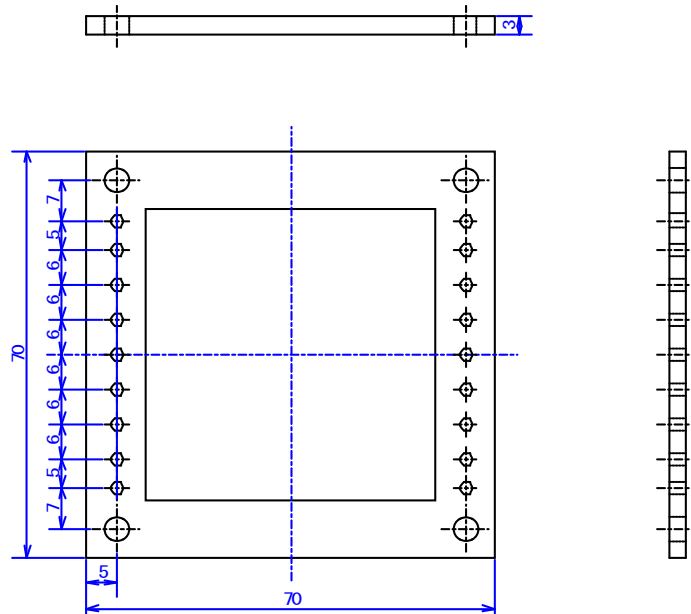


図 3.4-37 シンチレータ固定用プラスチック部品（全体固定用）

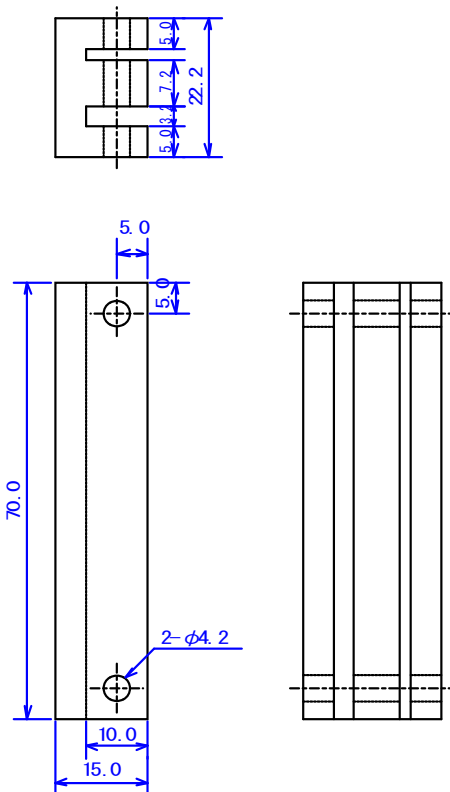


図 3.4-38 シンチレータ固定用プラスチック部品（積み重ね用）

(2) 高線量率場対応版 MPPC 信号処理回路の作成

高線量率場にも対応可能な、MPPC からの信号を読み出すシステムを開発した。開発したシステムの全体構成及び仕様は以下のようなものである。なお、前節で開発した回路システムに変更を加えることにより開発をおこなった。図 3.4-39 に示す全体構成のうち、赤で囲った部分のモジュール（初段回路モジュール及びヘッドアンプモジュール）が対象である

① ハードウェア部仕様

- ・前節に記述した 64ch×64ch のシステムのうち、イ) MPPC 及び MPPC と接続する初段回路モジュール、ロ) ヘッドアンプモジュールを新規開発した。初段回路モジュール、ヘッドアンプモジュールともに 1 台で 16ch の処理を可能とし、それぞれ 8 台を開発した。
- ・断面 1mm×1mm の GAGG シンチレータ 64 本の両端に各 1 個の MPPC (浜松ホトニクス : S12572-015P) を接続し、各 MPPC からの信号を独立に処理する機能を有する。
- ・50mm、30mm、20mm の 3 種類の長さのシンチレータに対応できるように、ケース及び基板が配置され、どの場合にもケーブルに接続ができる。
- ・128ch (64ch×両側) の MPPC からの信号について、信号の最大値、最大値前の 1 点及び最大値後の 1 点の値を測定する機能を有す。
- ・分解能は全ての ch において 12bit である。
- ・イベントごとに全 ch について MPPC 毎に 3 つの測定値が測定され、各 ch の 3 測定値データとタイムスタンプを出力する。
- ・64ch ごとに 1 個の温度計が設置され、測定時には 2 秒よりも短い間隔で測定された温度データがタイムスタンプとともに出力される。
- ・全ての ch の測定・読出しに要する時間が 1 イベントあたり 50 μ s 以下である。
- ・各 ch に印可する電圧が独立に 1mV 以下の単位で微調整できる。
- ・ソフトウェアから各 ch のトリガーレベルを独立に設定する機能を有す。
- ・高線量率場対応版シンチレータブロックに組み込み、一体として動作する。
- ・センサー部と回路は遮光されたケース内で接続されている。
- ・検出器部と回路部は熱的・光学的に分離されているとともに、コネクタにより着脱可能である。
- ・USB 接続により PC にデータを転送、保存する機能を有す。
- ・単相 100V 電源 (50Hz/60Hz) により操作可能である。

② ソフトウェア部仕様

- ・Windows7 以降で動作する。
 - ・ハードウェアから送られるデータを 1 イベントごとに読出し、保存及び処理できる。
 - ・使用者がソフトウェアに機能を追加し、保存されたデータを処理・表示することができる。また、使用者が機能の追加を行うことも可能である。
 - ・測定時間 (プリセット時間) 及び繰り返し回数を指定したバッチ処理が可能であること
- 以下に各部分の実際の写真を示す。

また、特性評価にあたり、64 本のシンチレータに図 3.4-42、3.4-43 の様に番号付けを行った。

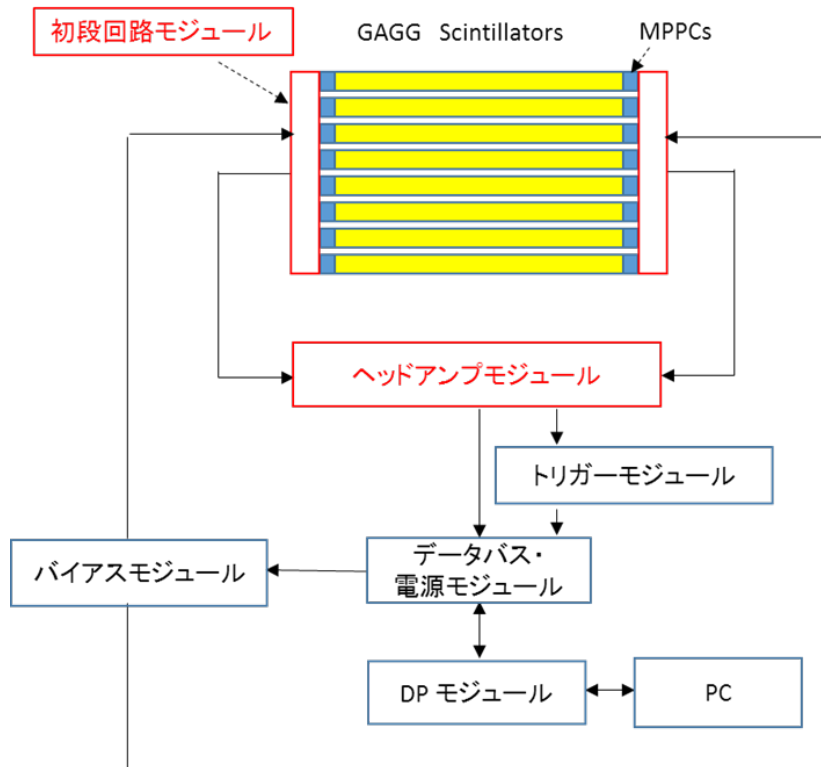


図 3. 4-39 システムの全体構成と高線量率場対応のための調達部分（赤枠）

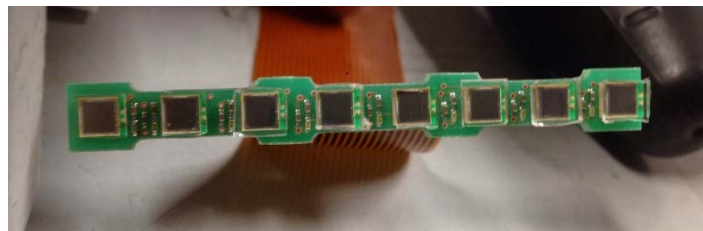
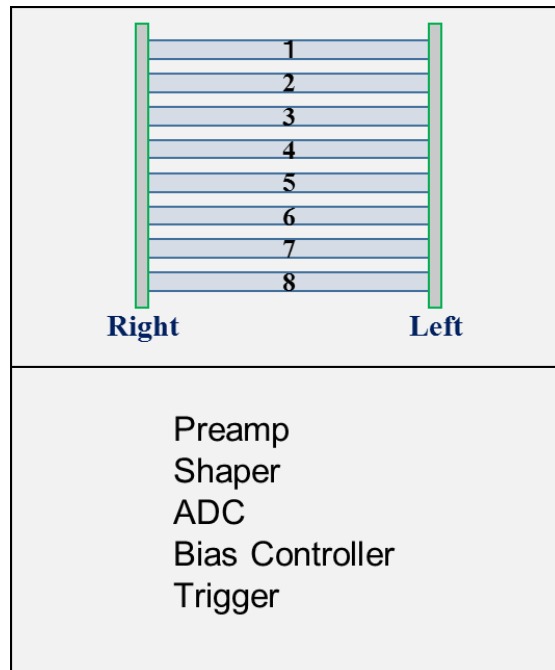


図 3. 4-40 初段回路モジュール（下の写真の正方形が MPPC）



図 3. 4-41 ヘッドアンプモジュール



検出器部分ケース

図 3. 4-42 検出器部分ケース内でのシンチレータの配置

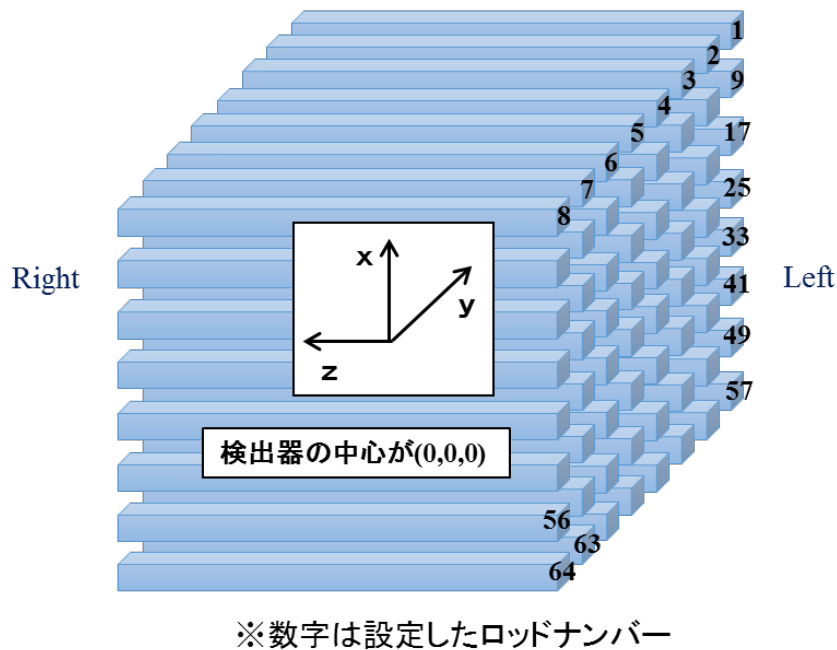


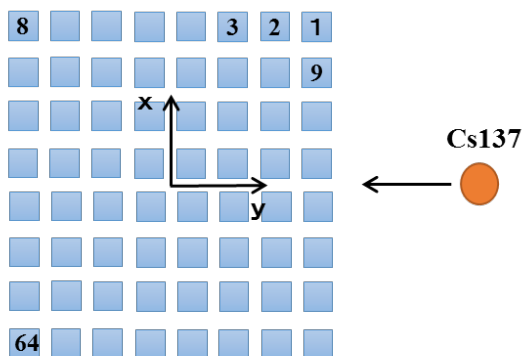
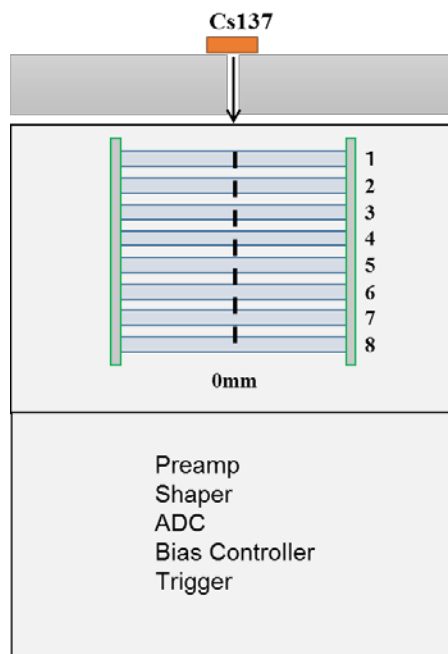
図 3. 4-43 シンチレータに割り振ったロッド番号

(3) 特性試験

① Delay 時間変更による光電吸収ピーク位置の変化

本システムにおいては、放射線入射に起因するパルスがある閾値を超えた時点でトリガー信号を発生させ、その後、設定した Delay 時間の後に AD 変換を $1\mu\text{s}$ おきに 3 回行う様に設定されている。システムの特性を評価するに当たり、まず Delay 時間を変化させて、 ^{137}Cs からの γ 線による光電吸収ピークの位置の変化を観測した。実験の配置を図 3. 4-44 に、測定結果を図 3. 4-45 に示す。測定結果より、Delay を概ね $2\mu\text{s}$ 程度とした際に光電ピークを最もよく捕らえていることが分かる。そこで、実験では $2\mu\text{s}$ を Delay として設定し、その位置及びその $1\mu\text{s}$ 前後の AD 変換値を取得する設定とした。

これにより、パイルアップ事象の判別が可能となる。すなわち、3 つの AD 変換値の相対的な比が、図 3. 4-45 の $1\mu\text{s}$, $2\mu\text{s}$, $3\mu\text{s}$ の時の比と大きく異なる場合は、本来の波形が崩れてしまっているということが示唆されるため、パイルアップ事象として除去の対象として判別可能となる。



測定条件

- 照射位置 : $x = 0$ [mm] , $y =$ [mm] (一定)
 $z = 0$ [mm] (一定)
- コリメータ : スリット幅: 2[mm], 厚さ: 50[mm]
- 室内温度 : 16 [°C]
- MPPC周辺温度 : 約28.5 [°C]

図 3. 4-44 Delay を変化させた実験の体系

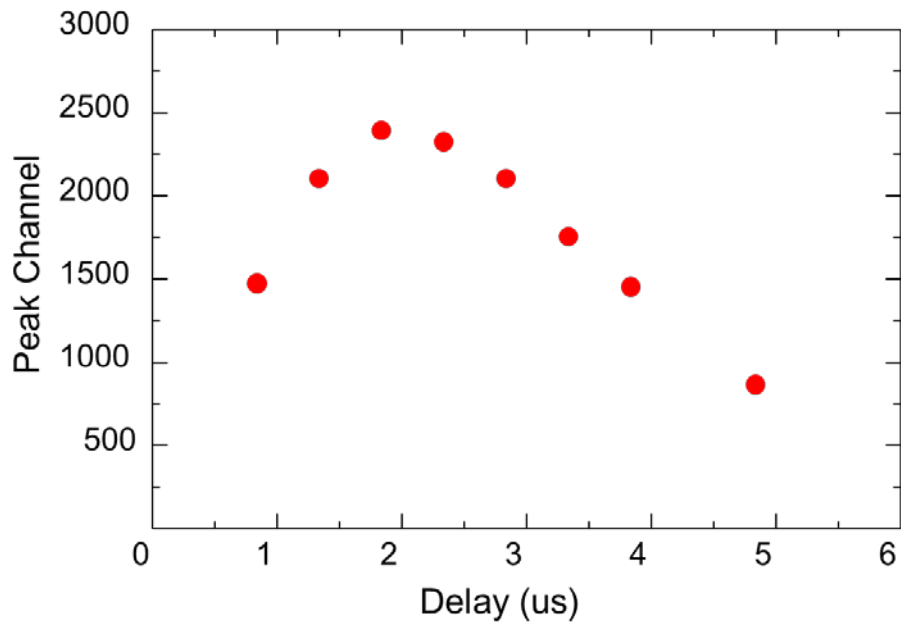


図 3.4-45 Delay を変化させた実験の結果

② 各シンチレータ両端からの信号取得実験

各シンチレータの両端に設置した MPPC からの信号を処理し、パルス波高分布を求めるとともに、その結果を用いて信号比分布を求める実験を行った。その結果から各ロットにおけるエネルギー分解能、位置分解能を評価した。代表として、ロット 1～ロット 16 の結果を表 3.4-3 に示す。すべてのロットのデータから、本システムのエネルギー分解能は概ね 12%～15%程度、位置分解能は 4.6mm～6.4mm 程度であり、ばらつきも小さく、良好な特性を示していることが確認された。

表 3.4-3 ロッド1～ロッド16 のエネルギー分解能及び位置分解能評価結果

ロッド番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
エネルギー分解能 (%)	-20 mm	13.8	16.9	16.6	13.8	16.1	17.5	12.7	14.6	12.4	12.7	17.9	17.5	18.5	14.2	14.0	18.1
	-10 mm	12.8	13.8	12.1	12.0	13.4	11.6	14.1	13.0	11.8	11.7	12.2	17.8	14.5	13.9	11.3	16.1
	0 mm	12.5	15.4	12.8	15.3	11.4	12.3	11.6	11.8	11.8	11.7	12.8	16.0	14.0	13.4	14.5	13.9
	10 mm	12.2	13.5	11.6	11.6	11.8	11.7	11.1	11.6	12.9	11.3	12.0	14.6	15.3	11.4	12.6	15.5
	20 mm	12.6	15.3	13.1	12.1	11.4	12.8	14.7	12.1	10.9	14.9	12.0	13.6	18.6	15.9	13.9	11.9
	Average	12.8	15.0	13.2	13.0	12.8	13.2	12.8	12.6	11.9	12.5	13.4	15.9	16.2	13.8	13.3	15.1
位置分解能 (mm)	-20 mm	4.9	5.8	5.0	5.2	5.2	5.2	5.0	5.1	4.9	5.4	4.8	5.4	6.0	5.6	5.4	5.3
	-10 mm	4.7	5.5	4.8	5.0	4.9	4.6	5.0	5.2	4.5	5.1	5.0	5.5	5.3	4.9	4.7	6.0
	0 mm	4.8	5.7	4.9	5.2	4.8	5.2	5.4	5.4	4.9	5.0	5.0	5.2	5.5	5.3	4.9	5.6
	10 mm	4.5	5.6	5.2	5.0	5.0	5.0	5.2	5.2	4.8	4.9	5.0	5.4	5.5	5.2	4.9	5.6
	20 mm	4.9	5.8	5.0	5.2	5.2	5.2	5.0	5.1	4.9	5.4	4.8	5.4	6.0	5.6	5.4	5.3
	Average	4.8	5.7	5.0	5.1	5.0	5.1	5.1	5.2	4.8	5.2	4.9	5.4	5.6	5.3	5.1	5.5

以上により、高線量率場対応版の信号取得システムが動作することを確認した。

3.4.5 バッテリー化

除染等の現場等での使用を念頭に置き、システムのバッテリー化を行った。図3.4-5のシステム構成のうち、DP モジュール部について下のような改造を行い、バッテリー動作を実現した。

- ・交換可能なバッテリーを内蔵し、バッテリーのみでも 8 時間(2 個使用時)、連続測定が可能である。
- ・バッテリーはノート PC 用のモバイルバッテリーが使用可能であり、重量は 1 個当たり 300g 以下である。
- ・バッテリーは取り外し可能で、取り外した状態で単相 100V (50Hz/60Hz) により充電が可能である。
- ・2 台のバッテリーを並列で装着し、動作中に一方のバッテリーの交換が可能である
- ・バッテリー駆動と同時に、単相 100V (50Hz/60Hz) での動作も可能である。

3.5 研究推進 (H25～H27)

より広範囲な視点を確保し柔軟な研究開発方向を担保するために、外部有識者による委員会を組織し研究開発の方向性に関する助言を導入することとした。研究開発担当者の所属機関外の原子炉関連の技術者 2 名に外部有識者を依頼し、名古屋大学にて有識者委員会を開催し、研究開発内容の説明、今後の開発の方向性等について議論を実施した。

以下の日時、場所において委員会を開催した。

第 1 回

日時 平成 26 年 2 月 20 日 (木) 9:00～10:30

場所 名古屋大学工学部 5 号館 550 室

出席者 伊藤主税 (日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター高速実験炉部課長代理)、渡邊将人 (中部電力株式会社原子力部環グループ副長)、河原林順 (名古屋大学)、高田英治 (富山高等専門学校)

第 2 回

日時 平成 27 年 2 月 18 日 (水) 9:00～10:30

場所 名古屋大学工学部 5 号館 570 室

出席者 伊藤主税 (日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター高速実験炉部課長代理)、渡邊将人 (中部電力株式会社原子力部環グループ副長)、河原林順 (名古屋大学)、高田英治 (富山高等専門学校)

第 3 回

日時 : 平成 28 年 3 月 18 日 13:00～14:30

場所 : 名古屋大学工学部 5 号館 570 室

出席者 : 渡邊将人 (中部電力株式会社原子力部環グループ副長)、伊藤主税 (日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター高速実験炉部課長代理)、河原林 (東京都市大学)、松井 (名古屋大学)、高橋 (名古屋大学)

各委員会に置いて、当該年度の開発内容を説明するとともに、数々のアドバイス・意見をいただいた。特に、高線量率場対応の重要性を認識するにいたった。

4. 結言

この研究開発では、万が一事故が起こった際に施設内の核種ごとの位置分布や放射線量を迅速に把握するため、可搬型であり、核種弁別のためのエネルギー分解能力を有し、360 度方向に感度を有するガンマカメラとして、シンチレーション検出器を用いたシンチレータスタック型ガンマ線イメージャの開発を実施した。その結果を以下にまとめる。

①シンチレータ材料の特性評価及び側面処理方法の検討

検出器要素としていくつかのシンチレータ材料を検討し、シンチレータとして棒状の GAGG(Ce)を採用した。棒状形状に加工し両端に光検出器を配し、その光出力の和と比から、放射線との相互作用エネルギー・相互作用位置を算出する構造となっている。形状として、 $3\times 3\times 50$ mm、 $1\times 1\times 50$ mm の 2 種類を採用し、それぞれ低線量率場対応版、高線量率場対応版とした。低線量率場対応版は、長軸方向位置分解能改善のため、側面金属スパッタリング処理によりシンチレーション光減衰距離の調節を実施した。また、高線量率場対応版は、側面金属スパッタリング処理が必要ないことが判明し、テフロンテープによる被覆のみで十分であることが確認された。

② 最適配置パターンの検討

上記低線量率及び高線量率場対応版のシンチレータを束ねシンチレータブロックを形成し、ガンマイメージャを試作した。その際のシンチレータの配置の検討を実施した結果、均等に配置することが望ましいことが判明したため、 8×8 本（合計 64 本）及び 16×16 本（合計 256 本）束ねたシンチレータブロックに対し、その特性評価を計算及び実験にて実施した。その結果、256 本バージョンで全効率約 90%、64 本バージョンで方向分解能約 60 度を確認し、当初の目的の性能を達成した。

③ 光読み出しシステムの構築

上記①にて加工されたシンチレータを 64 本束ねたシンチレータブロックを作成し、それに合わせた多チャンネル MPPC からの信号取得回路作成とシンチレータブロックからの信号取得性能評価を実施した。すべて当初の見込み通りの性能を発揮したことを確認した。

さらに回路のバッテリー駆動の検討を実施し、8 時間程度のバッテリー動作化可能となる見込みが得られた。

以上の通り、試作機の作製に成功しその評価された特性から、全方向の γ 線入射方向情報の取得が可能であることを示した。

以上のことにより、当初の予定通りの成果を得ることができた。今後は、実際の原子力施設での採用を目指し、コストパフォーマンス面での最適化検討が必要となるであろう。

5. 外部発表

外部発表を表 5. 1-1 に示す。

表 5. 1-1 外部発表一覧

発表した成果（発表 題目、口頭・ポスター 発表の別）	発表者氏名	発表した場所 （学会等名）	発表した 時期	国内 外
シンチレータスタック型全方向ガンマイメージャの開発検討	河原林順、高橋時音、富田英生、井口哲夫、高田英治	日本原子力学会 2013 年春の年会	2013 年 3 月 28 日	国内
Development of Omnidirectional Gamma-imager with Stacked Scintillators	Tone Takahashi, Jun Kawarabayashi, Hideki Tomita, Iguchi Tetsuo, Eiji Takada	2013 3rd International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA)	2013 年 6 月	国外
全方向有感型ガンマ線カメラの開発	河原林順	テクノフェア名大 2013	2013 年 9 月 6 日	国内
全方向に対するガンマ線イメージングのためのスタックシンチレータ型検出器の開発(1)シミュレーションによる性能予測とシンチレータ要素の性能評価	高橋時音、河原林順、富田英生、井口哲夫、高田英治	2013 年日本原子力学会秋の大会	2013 年 9 月 4 日	国内
Development of Gamma-Ray Imager with Stacked Scintillation Detectors Sensitive in All Directions	J. Kawarabayashi, T. Takahashi, H. Tomita, T. Iguchi, E. Takada	IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference and Workshop on Room-Temperature Semiconductor X-Ray and Gamma-Ray Detectors, 2013	2013 年 10 月 29 日	国外
スタックシンチレータ型検出器を用いた無指向性ガンマ線イメージャの開発	高橋時音、河原林順、富田英生、井口哲夫、高田英治、松井大樹	日本原子力学会 2014 年春の年会	2014 年 3 月 28 日	国内
環境中放射性物質分布測定のための全方位性ガンマ線イメージャの開発	河原林順、高橋時音、富田英生、井口哲夫、高田英治、松井大樹	日本原子力学会 2014 年秋の大会	2014 年 9 月 8 日	国内
高アスペクト比シンチレータ信号読み出しにおける光検出器配置の最適化	菅野裕章、高橋時音、河原林順、富田英生、井口哲夫	第 75 回応用物理学会秋季学術講演会	2014 年 9 月 20 日	国内
Development of Gamma-ray Imager with Stacked Bar-Type Scintillators	J. Kawarabayashi, T. Takahashi, H. Sugano, H. Tomita, T. Iguchi, D. Matsui,	2014 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging	2014 年 11 月 10 日	国外

	E. Takada			
Development of Bar-type Scintillator for Energy and Position Measurement	J. Kawarabayashi, H. Sugano, T. Takahashi, H. Tomita, T. Iguchi, E. Takada	2014 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging	2014年11月11日	国外
狭隘空間表面汚染検査用の高アスペクト比角柱状シンチレーション検出器の光検出器配置に関する検討	河原林順 菅野裕章 富田英生 井口哲夫	日本原子力学会 2015 年春の年会	2015年3月21日	国内
放射性物質分布測定のための全方向ガンマ線イメージャの開発	河原林順、松井大樹、高橋時音、不破裕太、富田英生、井口哲夫、上堀博之、高崎 雅志、高田英治	日本原子力学会、静岡大学	2015年9月10日	国内
Development of Prototype Gamma-Ray Imager with Stacked Bar-type Scintillators Sensitive for All Directions	J. Kawarabayashi, D. Matsui, H. Sugano, Y. Fuwa, T. Takahashi, H. Tomita, T. Iguchi, E. Takada	IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference 2015, サンディエゴ (米国)	2015年10月5日	国外
Development of Portable Gamma-ray Imager based on Stacked GAGG Scintillators with 4pi Sensitivity	Y. Fuwa, T. Takahashi, J. Kawarabayashi, H. Tomita, D. Matsui, E. Takada, T. Iguchi	ISRD 2016, KEK	2016年1月19日	国内
Development of omnidirectional gamma-imager with stacked scintillators	T. Takahashi, J. Kawarabayashi, H. Tomita, T. Iguchi, E. Takada	DOI:10.1109/ANIMMA.2013.6728078		