

2009年度 修士学位論文

BSO および Pr 添加 LuAG シンチレーターの
基礎特性の測定

奈良女子大学人間文化研究科
物理科学専攻 高エネルギー物理学研究室
岩下友子

平成 22 年 4 月 6 日

目次

第1章 はじめに	2
第2章 Bファクトリー実験の高度化における電磁カロリメーター	3
2.1 Bファクトリー実験高度化の動機	3
2.2 SuperKEKB 加速器	4
2.3 Belle-II 測定器	6
2.4 Belle/Belle-II 実験の電磁カロリメーター	7
第3章 新型シンチレーター BSO シンチレーター及び Pr 添加 LuAG シンチレーター	10
3.1 無機結晶シンチレーターの検討項目	10
3.2 BSO シンチレーター	10
3.2.1 組成と特性	11
3.2.2 シミュレーションによる純 CsI シンチレーターとの比較	11
3.3 Pr 添加 LuAG シンチレーター	16
3.3.1 組成と特性	16
3.4 発光量とその温度依存性	16
3.4.1 測定方法	16
3.4.2 H3167 型および H1161 型光電子増倍管の仕様	17
3.5 発光量とその温度依存性の測定結果	19
3.6 放射線損傷の測定	25
3.6.1 γ 線による損傷試験	25
3.6.2 中性子線による損傷試験	32
第4章 まとめ	38

第1章 はじめに

高エネルギー物理学実験とは、加速器で生成される高エネルギー粒子の衝突反応から、物質の究極の構成要素と、その間に働く相互作用を探索する学問である。そのため、反応の結果生成される粒子のエネルギー、運動量、種類等を高精度で計測できる検出器が必要となる。検出器には役割に応じて様々な種類があり、検出する粒子の種類やその実験目的によって使用する検出器が分けられる。

現在、世界をリードしている高エネルギー物理学実験の一つが我が国における高エネルギー加速器研究機構 (KEK) における KEKB 加速器を使った Belle 実験である。Belle 実験は、 B 中間子の CP 非保存を測定することを主目的としており、2008 年ノーベル物理学賞が小林誠・益川敏英に与えられる上でも決定的な貢献を行った。

KEKB 加速器はクラブ空洞の導入など新しい技術の導入や努力の結果、2009 年には $2.1 \times 10^{34} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ におよぶ世界最高のルミノシティを達成した。しかし、小林・益川理論を越えた物理を探索するための CP 非保存現象の精密測定や、エキゾチックハドロンの探求といった研究テーマの推進には更なるルミノシティの向上が必要である。

これらの研究には高効率かつ高分解能の γ 線検出器が必要なものも多い。 B 中間子の崩壊モードのうち $1/3$ は π^0 を含むので、 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 過程で生じる γ 線の検出は非常に重要である。また、 $\tau^- \rightarrow \mu^- \gamma$ のように非標準的な過程にも γ 線の放出を使うものがある。 γ 線の検出およびエネルギー測定を担っているのが電磁カロリメーターである。現在の Belle 検出器の電磁カロリメーターには Tl 添加 CsI シンチレーターと光検出器として PIN フォトダイオードを用いている。このシンチレーターは発光量は多いが発光の減衰時間が長いという点で、加速器のルミノシティを上げた際には、ビームバックグラウンドによりパイルアップを起こしてエネルギー分解能が低下してしまうことが懸念される。これを回避するため、発光の減衰時間の短い新しいシンチレーターの導入が効果的である。

本研究では新しいシンチレーターの候補として、BSO シンチレーターおよび Pr 添加 LuAG の 2 種類の新型無機結晶シンチレーターの基礎特性について測定した結果について報告する。第 2 章で B ファクトリー実験の高度化と SuperKEKB 加速器および Belle-II 測定器とその電磁カロリメーターについて述べ、第 3 章で新型無機結晶シンチレーターである BSO シンチレーターおよび Pr 添加 LuAG シンチレーターとその基本特性である発光量、温度依存性、放射線耐性の結果について述べる。最後に第 4 章をまとめとする。

第2章 Bファクトリー実験の高度化における 電磁カロリメーター

2.1 Bファクトリー実験高度化の動機

KEKB 加速器および Belle 測定器からなる高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の B ファクトリー実験は、競争相手であるスタンフォード線型加速器センター (SLAC) の B ファクトリー実験とともに、 B 中間子系における CP 非保存の系統的な研究を遂行し、2008 年ノーベル物理学賞が小林誠・益川敏英に与えられる上で決定的な貢献を行った。KEKB 加速器は 2003 年 5 月に設計値のルミノシティ $1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を達成し、2007 年から導入したクラブ空洞、2009 年から導入した電子・陽電子毎切り替え入射とスキュー 6 極電磁石による水平方向・垂直方向カップリングの補正といった努力が実り、2009 年 6 月世界最高のルミノシティ $2.1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を記録し、これまでの蓄積も 1000fb^{-1} に達した。

これまでに、小林・益川理論の予言である各種の CP 非保存を 5% から 30% の相対誤差で測定し、その検証を行ってきた [1]。これには B 中間子の崩壊モードのうち、ツリーダイアグラムと呼ばれる弱い相互作用の最低次の振幅が支配的に寄与するものが用いられてきた。その典型が $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$ 崩壊を用いた $\sin 2\phi_1$ なる CP 非保存パラメーターの測定である [2] [3]。これに対して、ペンギンダイアグラムと呼ばれる弱い相互作用の 1 ループの振幅が支配的な崩壊モードでは、標準理論の振幅が小さくなる。これにより、ループ部分に不確定性原理により高いエネルギースケールの物理の寄与があり、これが小林・益川理論と異なる複素位相を持つ場合は、標準理論の振幅との量子力学的干渉効果が強く出て、 $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$ 過程とは異なる CP 非保存を示す可能性がある [4]。そのような崩壊モードの代表的なものとして、 $B^0 \rightarrow \phi K^0$ 、 $B^0 \rightarrow \eta' K^0$ 、 $B^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0 K_S^0$ などが挙げられる [5] [6]。これらはいずれも稀崩壊過程であるので、 CP 非保存の測定精度はいまだ $\mathcal{O}(0.1)$ にとどまっており、新しい物理の効果を探索する感度は決して十分とは言えない。 $\mathcal{O}(0.01)$ の感度を得るには数十 ab^{-1} * のデータの蓄積が必要であり、これには加速器、測定器とも相当の規模の性能改良工事を実施しなければならない。また $X(3872)$ [7]、 $Z(4430)^\pm$ [8] に代表される、既存のバリオンやメソンの範疇に入らない可能性の高い、エキゾチックハドロンと総称される粒子についても、統計精度が感度を制限しているものが多く、スピンやパリティなどの量子数を決定するに至ったものはほとんどない。したがってエキゾチックハドロンの研究もこれまでよりも一桁多い大量データの蓄積を必要とする。

したがって、本章では、最終的に $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ を目標とする高度化した KEKB 加速器である SuperKEKB 加速器と、それに対応する Belle-II 測定器について概観し、本研究の主題である電磁カロリメーターについて説明する。

* $1000 \text{fb}^{-1} = 1 \text{ab}^{-1}$

2.2 SuperKEKB 加速器

KEKB 加速器は周長 3km のトンネルの中に電子を蓄積する高エネルギーリング (HER) と陽電子を蓄積する低エネルギーリング (LER) の 2 つのリングが横に並べられており、電子と陽電子は各々のリングの中を反対方向に周回し、筑波実験棟内に設けられた衝突点で衝突する。Belle 測定器はこの衝突点を囲んで設置されている。KEKB 加速器の性能向上は既存のトンネル中の加速器コンポーネントの置換により行う計画で、この加速器を SuperKEKB 加速器と呼ぶ。

SuperKEKB 加速器では KEBK 加速器の約 40 倍のルミノシティを目標に設計が進められている。ルミノシティ \mathcal{L} と断面積 σ をもつ場合、反応の発生頻度 R は $R = \mathcal{L}\sigma$ となる。ルミノシティはビームの電流値やサイズから決まる量であり、衝突型加速器においては以下の式が成り立つ。

$$\mathcal{L} = 2.2 \times 10^{34} \xi (1+r) \left(\frac{E \cdot I}{\beta_y^*} \right) \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \quad (2.1)$$

ここで E はビームのエネルギー (単位:GeV)、 I は蓄積電流 (単位:A) また、 ξ はビーム・ビームパラメーターと呼ばれる量であり、 β_y^* は衝突点において垂直方向 (y 方向) のベータ関数値、 r は衝突点における垂直方向のビームサイズを水平方向のビームサイズで割った値である。したがって、ルミノシティを大きくするためには、蓄積電流 I とビーム・ビームパラメーター ξ を大きくし、 β_y^* を小さくする必要がある。

SuperKEKB 加速器の設計は、2009 年 2 月の KEBK 加速器レビュー委員会の勧告以降、ナノビーム方式と呼ばれる技術に基づいて進められている。これまでの KEBK 加速器では、ビーム・ビーム相互作用によるビーム粒子の理想的軌道近傍での運動を安定化させ、大きなビーム・ビームパラメーター ξ を実現するために、ベータトロンチューンを半整数のすぐ上に設定して $x-y$ 相関、クラブ空洞の導入によって $x-z$ 相関をそれぞれ解消するという工夫がされてきた。これにより、互いに相関した 3 次元のビーム粒子の運動を互いに独立な 1 次元運動に転換して非線形力の影響を小さくして、ビームを安定して貯蔵することが指導原理であった。これまでクラブ空洞導入後の KEBK 加速器では世界最高記録である $\xi = 0.09$ を達成している。

SuperKEKB 加速器の目標ルミノシティを狙うと、運転に用いる電力量の制限からビーム電流値は現状の約 2 倍の LER=3.6A、HER=2.6A と見積もられることから、衝突点での垂直ベータ関数 β_y^* を LER で 0.27mm、HER で 0.42mm と KEBK 加速器の 20 倍も小さくしなくてはならない。ヘッドオン衝突またはクラブ衝突ではパンチ長をベータ関数以下にせねばならないが、この場合はコヒーレント放射光の影響でパンチ長がのびてしまい、結局は要求されたルミノシティを実現できないと考えられる。そこで SuperKEKB 加速器では極低エミッタンスのビームを有限角度衝突させることとし、パンチ長を 5mm と KEBK 加速器と同等のまま β_y^* を小さくして目標ルミノシティを狙う方針の検討が進んでいる。これをナノビーム方式と呼ぶ。また、これまでの電子 8GeV・陽電子 3.5GeV の衝突ではビーム光学設計の力学口径が確保できないので、ビームエネルギーは電子 7GeV・陽電子 4GeV に変更する。以上の設計パラメーターを表 2.1 に示す。

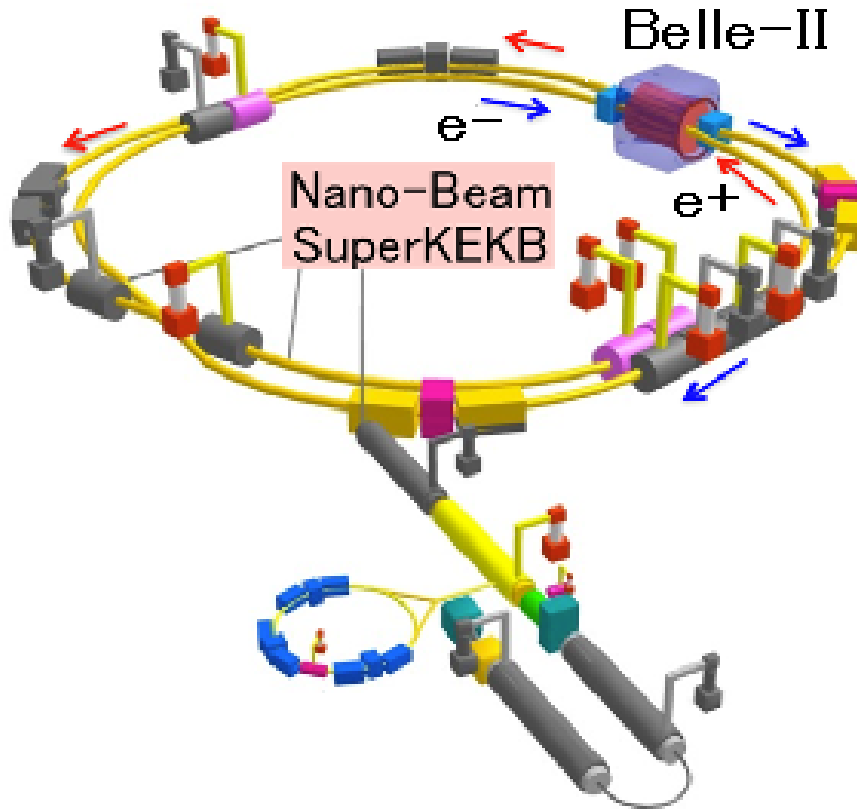


図 2.1: SuperKEKB 加速器の概観

	LER	HER
Energy(GeV)	4.0	7.0
I(A)	3.6	2.6
β_y^* (mm)	0.27	0.42
ξ_y	0.09	0.09
Bunches	2500	
Luminosity($10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	80	

表 2.1: SuperKEKB 加速器のパラメーター

2.3 Belle-II 測定器

加速器のルミノシティを 40 倍に上げるために、衝突点近傍におけるビームバックグラウンドも現在の 5 倍から 10 倍に増加することが予想される。この高いビームバックグラウンドに対処しつつ、高頻度の B 中間子対生成をはじめとした信号事象データを効率よく収集する必要がある。このため現在の Belle 測定器の性能改良が検討されており、これを Belle-II 測定器と呼ぶ。

Belle-II 測定器は SuperKEKB 加速器によって作り出された e^+e^- 衝突のデータを効率よく収集するため、いくつかの検出器により構成される。以下にそれぞれの構造及び機能についてまとめる。

- ピクセル型シリコン半導体検出器 (PXD) 及び両面シリコンストリップ検出器 (SVD)
Belle-II で新たに導入される 2 層構造の PXD と 4 層構造の SVD を用いて B 中間子及びその他の粒子の崩壊点を測定する。粒子の崩壊点の測定は B 中間子のみでなく D 中間子や τ レプトンの物理の研究を行う上で非常に重要である。また、SVD はその外側にある CDC と共に粒子の飛跡を検出し、運動量を精度よく測定する。
- 中央ドリフトチェンバー (CDC)
1.5Tesla の磁場内に設置され、内部を 1 気圧の $\text{He}:\text{C}_2\text{H}_6=50:50$ の混合ガスで満たし、多数の電極ワイヤーが張られている。Belle-II では、高バックグラウンド対策として、陽極ワイヤーを陰極ワイヤーで囲んだセルと呼ばれる単位を小型化する結果、ワイヤーの数が Belle の CDC よりも増加する。CDC は荷電粒子の飛跡を検出し、ローレンツ力により螺旋を描く軌道の曲率半径から運動量を測定する。荷電粒子が通過する際にガスを電離し、そこから生じた電子がワイヤーまで移動する時間から、粒子の通過位置までの距離を知ることができる。さらに、ガス中の電離量 (dE/dx) を検出した荷電粒子ごとに測定して粒子識別の情報を与える。
- 粒子識別システム (PID)
 K 中間子と π 中間子を識別するため、既存の Belle では閾値型のチェレンコフカウンターを用いているが、Belle-II では、バレル部の Time-of-Propagation カウンター (TOP)、エアロジェルの屈折率によるリングイメージの違いを用いたエンドキャップ部のリングイメージチェレンコフカウンター (A-RICH) を用いることで、識別の効率を高く保ったまま、誤認率を低減する。
- 電磁カロリメーター (ECL)
高エネルギーの光子や電子は十分厚い物質に入射すると、制動放射や電子対生成により、電磁シャワーを形成し、そのエネルギーのほとんどを物質中で失う。電磁カロリメーターではこのエネルギー損失を読み出すことで入射粒子のエネルギーを精度よく測定する。既存の Belle では Tl 添加 CsI 結晶を用いているが、発光時間が長いため、ビームバックグラウンドのパイルアップによるエネルギー分解能の悪化が懸念される。この効果はビームパイプにより近いエンドキャップ部でより顕著である。そこで Belle-II ではエンドキャップ部のシンチレーターを短い発光時間の素材に変更することが検討されている。本研究の主題であるので詳しくは次節で述べる。
- K_L^0, μ 粒子検出器 (KLM)
測定器の最も外側に位置するのが K_L^0 及び μ 粒子検出器である。KLM は高抵抗平行板 (RPC) と厚さ 4.7cm の鉄を 11 層重ねた構造になっている。 μ 粒子は貫通力に優れているため鉄を突き抜け明確な信号を残す。したがって CDC で検出した荷電粒子の飛跡を外挿した

ところに KLM の信号があれば μ 粒子と同定できる。 K_L^0 は鉄と衝突し強い相互作用によるハドロンシャワーを形成するので、CDC に飛跡を残さず KLM で検出されたハドロンシャワーを候補とする。エンドキャップ部ではビームバックグラウンドの影響が大きくなると予想されるので、RPC に換えてプラスチックシンチレーターにファイバーを通し、高増幅率の半導体光検出器である PPD(Pixelated photon Detector) で読み出す方式が検討されている。

図 2.2 に Belle-II 測定器の概観をのせる。

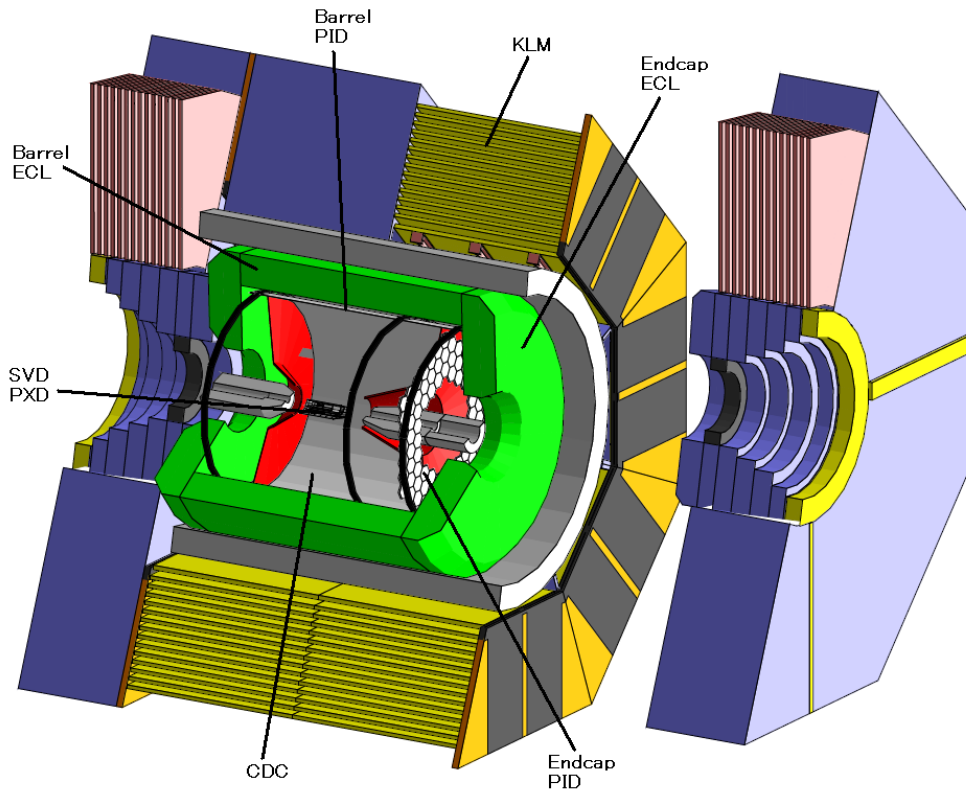


図 2.2: Belle-II 測定器の概観

2.4 Belle/Belle-II 実験の電磁カロリメーター

Belle 実験のカロリメーターの全体像は図 2.3 のようになっており、6624 本の Tl 添加 CsI(以降 CsI(Tl) と記述) 結晶を持つパレル部と前方および後方にそれぞれ 1152 本および 960 本の CsI(Tl) 結晶を持つエンドキャップ部からなる。現在の Belle 実験では発光量の豊富な CsI(Tl) シンチレーターと光検出器として PIN フォトダイオードを組み合わせている。1 本の結晶のサイズは前面が約 $55\text{mm} \times 55\text{mm}$ 、シンチレーション光の読み出し面が約 $65\text{mm} \times 65\text{mm}$ 、長さ 300mm となっている。集光効率を上げるため、結晶表面を厚さ $200\mu\text{m}$ の白色ゴアテックスシートで覆い、その上を厚さ $50\mu\text{m}$ のアルミナイズドマイラー (アルミ蒸着厚 $25\mu\text{m}$ 、PET 樹脂厚 $25\mu\text{m}$) で包んでいる。

この CsI(Tl) カロリメーターでは、シンチレーター中のエネルギー損失 1MeV あたり 5000 個の電子-正孔対を PIN フォトダイオードで得ている。一方、カウンター 1 本あたりの雑音は、前置増幅器 (PreAMP)、波形整形回路、QtoT コンバーター、FASTBUS TDC からなる読み出し回路の総合で約 1000 個の電子、すなわち約 0.2MeV に対応する。最近の実験の状況では、エンドキャップ部においてパイルアップに起因する雑音がこれに加わっている兆候が見られ、0.5MeV から 1MeV に達している。パイプライン方式で波形サンプリング読み出しを行うフラッシュADC(FADC) とデジタル信号処理 (DSP) を組み合わせて対処しても、SuperKEKB 加速器をナノビーム方式で建設したとして、 $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ のルミノシティ達成時のビーム電流の条件ではパイルアップによる雑音の寄与が 1MeV から 2MeV に達すると予想される。その場合、数百 MeV 程度までの比較的低いエネルギーの光子を検出した際のエネルギー分解能に影響があり、ミッシングエネルギーの測定が重要な役割を果たす $B^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau$ 崩壊等の感度に影響がある。バレル部はビームパイプから比較的遠いので、バックグラウンドの増加による悪影響は少ないと考えられる。このためバレル部のシンチレーター及び光検出器については既存のまま Belle-II では波形サンプリング読み出しとデジタル信号処理で、タイミングのずれた信号を排除するとともにパイルアップ雑音の低減をはかる。一方エンドキャップ部はビームパイプに近いのでエネルギー分解能の悪化とオキュパンシーの増加はより顕著である。

これには CsI(Tl) シンチレーターの特性である、発光量は豊富であるが発光が終了するまでの減衰時間が $1\mu\text{sec}$ と長いためにパイルアップを起こしやすい、という性質が大きく寄与している。後段の読み出しエレクトロニクスの改良によるパイルアップ雑音の低減効果は 1.5 から 2 倍であるため、発光が終了するまでの減衰時間が短いシンチレーターの導入が理想的である。

これまで新たなシンチレーターの候補として、大型のブロックの量産技術が確立しており、発光

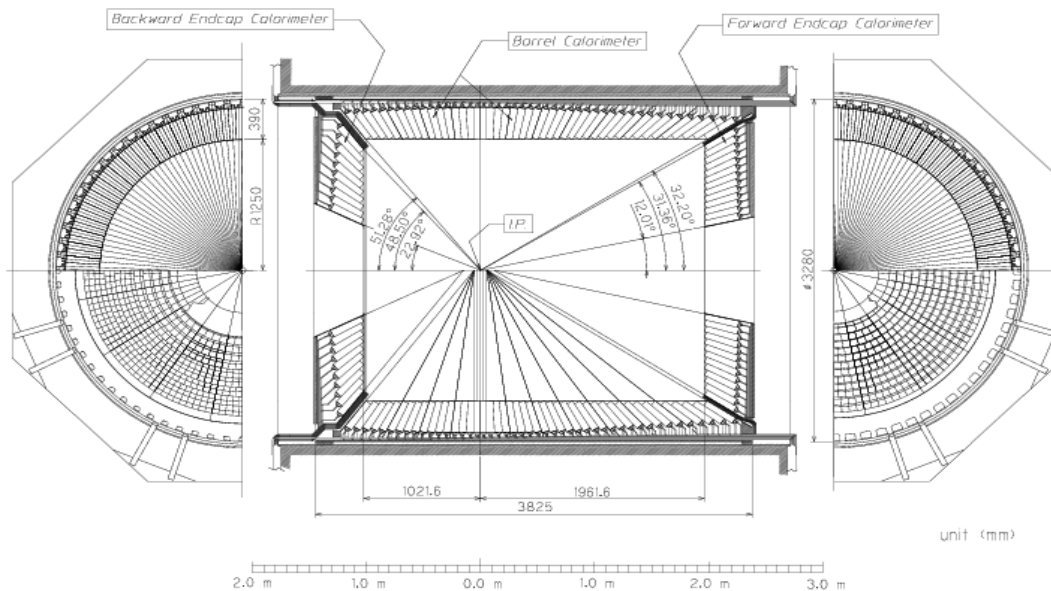


図 2.3: 現在の Belle の電磁カロリメーター

の減衰時間が 10nsec と短い純 CsI 結晶**が主たるオプションとして検討されてきた。一方、発光時間が短いだけでなく、密度が高い、すなわち輻射長とモリエール半径が短いシンチレーターを使えば、高エネルギーの γ 線が入射した際に形成するシャワーの漏れを小さくして、エネルギー分解能を向上するとともに、2つの γ 線が近接して入射した場合の分離が良くなるので、 $B^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ の再構成や $\tau^\pm \rightarrow \mu^\pm \gamma$ の探索などに有利である。こうした特徴を持つシンチレーターとして、BSO シンチレーターと Pr 添加 LuAG シンチレーターの特性を調べた結果について次章に詳しく述べる。

**Fast component。ウクライナ国ハリコフで生産された結晶の場合、減衰時間が $1\mu\text{sec}$ の Slow component が全発光量の 30%程存在する。

第3章 新型シンチレーター BSOシンチレーター及びPr添加LuAGシンチレーター

3.1 無機結晶シンチレーターの検討項目

現在の Belle-II 測定器の設計では、エンドキャップ部カロリメーターは、純 CsI シンチレーターを中心に検討が進められてきた。純 CsI シンチレーターの発光の減衰時間は 10nsec と CsI(Tl) シンチレーターの 1300nsec に比べて短く SuperKEKB 加速器のビームバックグラウンドによるパイラルアップを少なくすることができる。ただし、発光波長が 310nm と短いため、組み合わせる光検出気は光電管ベースのものに限られる。

発光の減衰時間が短い他の材料として、BSO シンチレーターや Pr 添加 LuAG(Pr:LuAG) シンチレーターが挙げられる。これらは密度が高い、すなわち輻射長 (X_0) とモリエール半径 R_M が短いので高エネルギーの γ 線検出が鍵となる $B^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$ の再構成や $\tau \rightarrow \mu\gamma$ の探索に有利となる。BSO シンチレーターは発光波長が 480nm であるため組み合わせる光検出気は光電管ベースのもの、半導体ベースのものいずれも使用可能である。、Pr:LuAG シンチレーターは発光量が純 CsI シンチレーターの約 10 倍と豊富である。また、BSO シンチレーター、Pr:LuAG シンチレーターともに純 CsI シンチレーターと違い潮解性がない。表 3.1 にシンチレーターのパラメーターを示す。さらに BSO シンチレーター及び Pr:LuAG シンチレーターの詳細については次節以降で議論する。

	CsI(Tl)	Pure CsI	BGO	BSO	PWO	Pr:LuAG	Tl:NaI
密度 (g/cm ³)	4.51	4.51	7.13	6.80	8.28	6.68	3.67
発光量	165	3.7	21	2	0.26	33	100
減衰時間 (nsec)	1300	10	300	100	10	25	230
発光波長 (nm)	560	310	480	480	430	310	410
輻射長 (cm)	1.86	1.86	1.12	1.15	0.89	1.47	2.59
モリエール半径 (cm)	3.57	3.57	2.23	2.63	2.00	2.16	4.13
潮解性	若干有	若干有	無	無	無	無	有

表 3.1: シンチレーターのパラメーター

3.2 BSO シンチレーター

本節では BSO シンチレーターについて詳しく記す。

3.2.1 組成と特性

BSO は $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$ の組成を持つ立方晶である。BGO ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) なる無機結晶シンチレーターがこれまでに広く使用されているが、その Ge (ゲルマニウム) を同じ 4 価の元素である Si (シリコン) に置換したものと考えてよい。最初にこのアイデアに至ったのは湘南工科大学の石井満教授 (当時) で、KEK の小林正明教授 (当時)、東北大学原子核理学研究施設の清水肇教授らが加わり、フューテックファーマス (株) と大型結晶育成技術を確立した。現在ではオキサイド (株) が技術移転により製造能力を持つ。発光量は純 CsI と同程度で、波長が 480nm であるため、組み合わせる光検出器は光電管、半導体のいずれであっても量子効率的良好である。これは波長が 310nm と短いため光検出器に制限のある純 CsI シンチレーターに比べて大きな利点である。発光時間は約 100ns で、これは現在 Belle 検出器で使用されている CsI(Tl) の 1/10 以下であり、将来の高輝度実験において、ビームバックグラウンドのピルアップによるエネルギー分解能の悪化を避けるのに十分短い。結晶中のシャワーが発達する領域のサイズを支配する輻射長 (X_0)、モリエール半径 (R_M) 共に 1.15cm、2.63cm と純 CsI ($X_0 = 1.86\text{cm}$ 、 $R_M 3.57\text{cm}$) に比べ短いため、高い運動量の $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊における近接した 2 つのシャワーの分離に有利であるし、長さ 23cm で $20X_0$ 達するので、シャワーの後方の漏れを小さくして $\mathcal{O}(10^2)\text{MeV}$ 以上の γ 線に対するエネルギー分解能の向上が期待できる。また、既述の通り、潮解性がなく扱いやすいので、保管・使用場所の湿度について特別な配慮が不要である。図 3.1 の写真は測定に用いた $1 \times 1 \times 2\text{cm}^3$ の BSO シンチレーターの写真である。

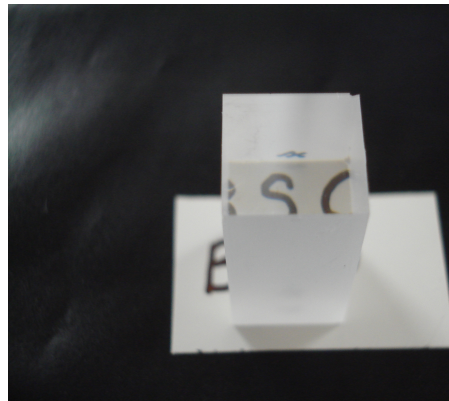


図 3.1: BSO シンチレーター ($1 \times 1 \times 2\text{cm}^3$)

3.2.2 シミュレーションによる純 CsI シンチレーターとの比較

BSO シンチレーターの導入により純 CsI シンチレーターに対するエネルギー分解能の改善を見積もるため、シミュレーションを行った。シミュレーションには CERN で開発された GEANT4 システムを用いた。

シミュレーションでは純 CsI シンチレーターは現在の Belle で使われているサイズ $55\text{mm} \times 55\text{mm} \times 300\text{mm}$ を用い、BSO シンチレーターは幅をモリエール半径でスケールし、長さは $20X_0$ をとって $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 230\text{mm}$ とした。このブロック 9 本を 3×3 のマトリックスに積み重ねたカロリメーターを定義し、その中心に結晶の軸と平行に γ 線を 1000 事象入射させるシミュレーション

ンを、50MeV、100MeV、200MeV、500MeV、1GeV、2GeV、4GeV、8GeV の8つのエネルギーで行った。これによりシンチレーターのブロックごとのエネルギー損失が求まるので、さらに正規分布乱数を生成することによって2種類のノイズ、インコヒーレントノイズ0.4MeVとコヒーレントノイズ0.05MeVを足しあわせた。ここで、インコヒーレントノイズとは9本の各チャンネルごとに独立に寄与する雑音のことであり、コヒーレントノイズとは全チャンネルに同位相の雑音である。図3.2は40mm×40mm×230mmのBSOシンチレーターを3×3のマトリックスに積んだものに300MeVの γ 線を入射した事象をディスプレイしたものである。

図3.3に雑音の寄与も加味した上で、9本のシンチレーターで検出したエネルギーの総和をとる

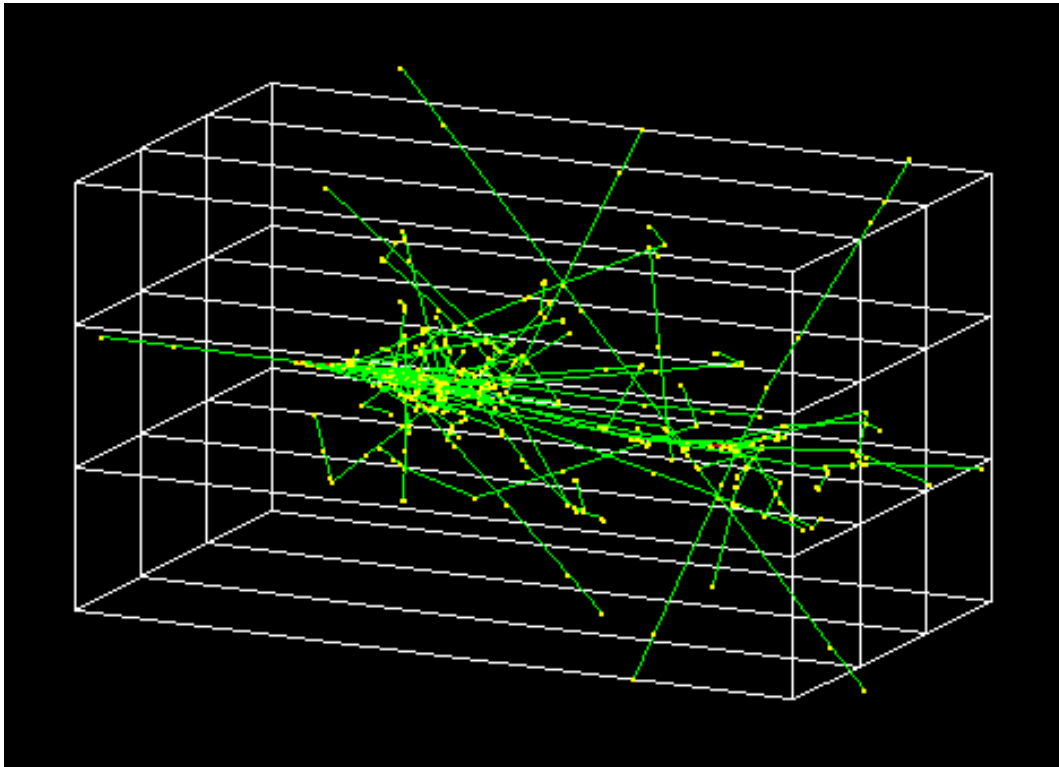


図3.2: 3×3マトリックスに組んだBSOカロリメーターに300MeVの γ を入射したシミュレーション事象のディスプレイ。 γ 線は図中左から入射し、電磁シャワー形成により発生した電子・陽電子・光子が相互作用した点(黄点)とその間の軌跡(緑直線)で示されている。

ことにより再構成した入射 γ 線のエネルギー分布を示す。左がBSOカロリメーター、右が純CsIカロリメーターで、上段から500MeV、1GeV、4GeVの γ 線を入射した場合のエネルギー分布である。フィットはLogarithmic Gaussian[9]、

$$f(x) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}(\epsilon - x)\sigma_0} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{1}{\sigma_0} \ln\left(\frac{\epsilon - x}{(\epsilon - \mu)e^{\sigma_0^2}}\right)\right) \quad (3.1)$$

を用いて行った。ここで

$$\epsilon = \frac{\sigma}{a} + \mu, y = a\sqrt{2\ln 2}, \sigma_0 = \frac{\ln(y + \sqrt{1 + y^2})}{2\ln 2} \quad (3.2)$$

である。また、 N は規格化定数、 μ は平均値、 σ は標準偏差、 a は非対称度である。

図3.4はカロリメーターで検出したエネルギーと入射 γ 線のエネルギーの比をとり、その分布

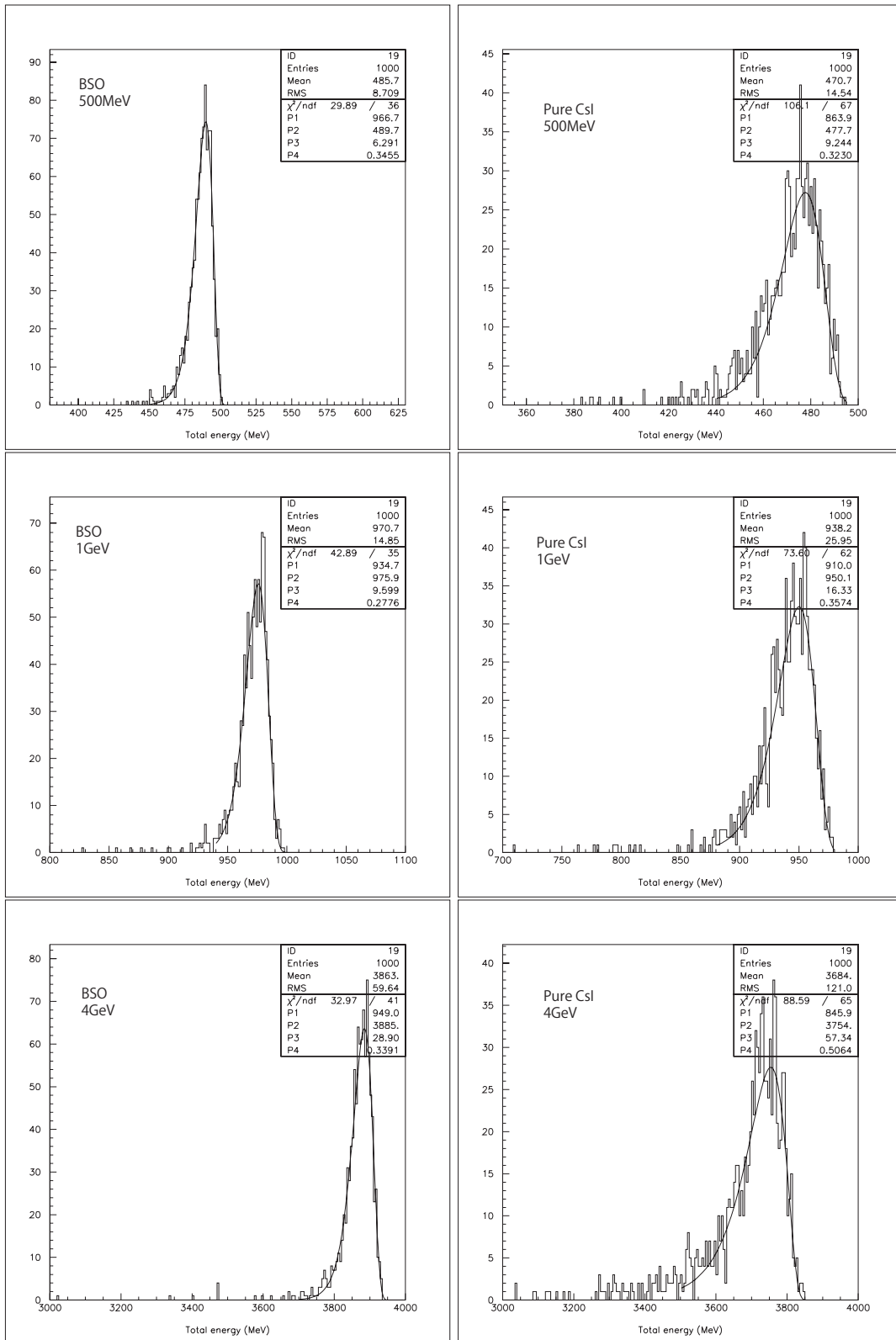


図 3.3: シミュレーションでの BSO カロリメーター (左側) および PureCsI カロリメーター (右側) の再構成エネルギーの分布。上段: γ 線 500MeV 入射時、中段: γ 線 1GeV 入射時、下段: γ 線 4GeV 入射時。

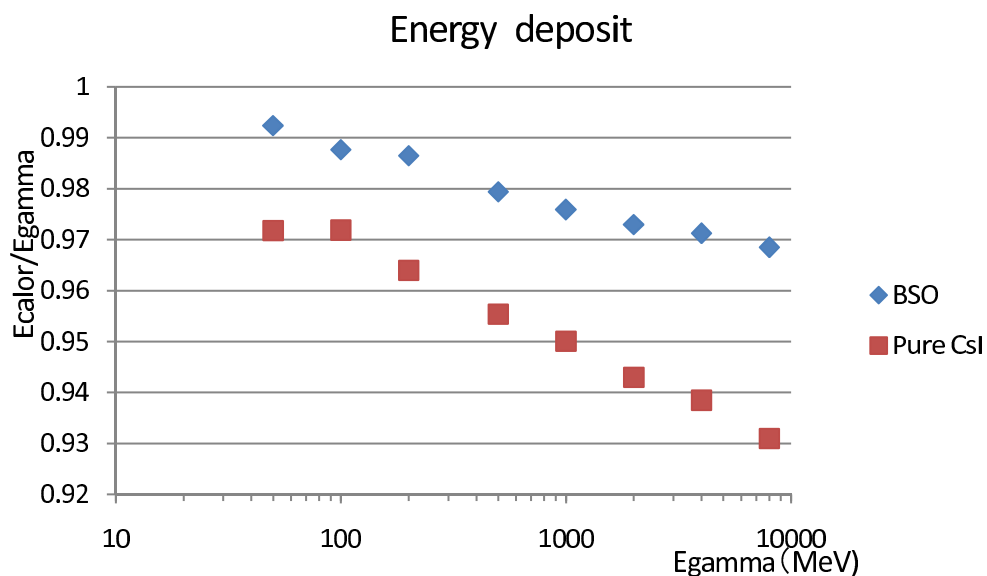


図 3.4: E_{calor}/E_{γ} を E_{γ} の関数で示す。ここで E_{calor} はカロリメーターで検出したエネルギー分布のピークに対応するエネルギー、 E_{γ} は入射 γ 線のエネルギーである。

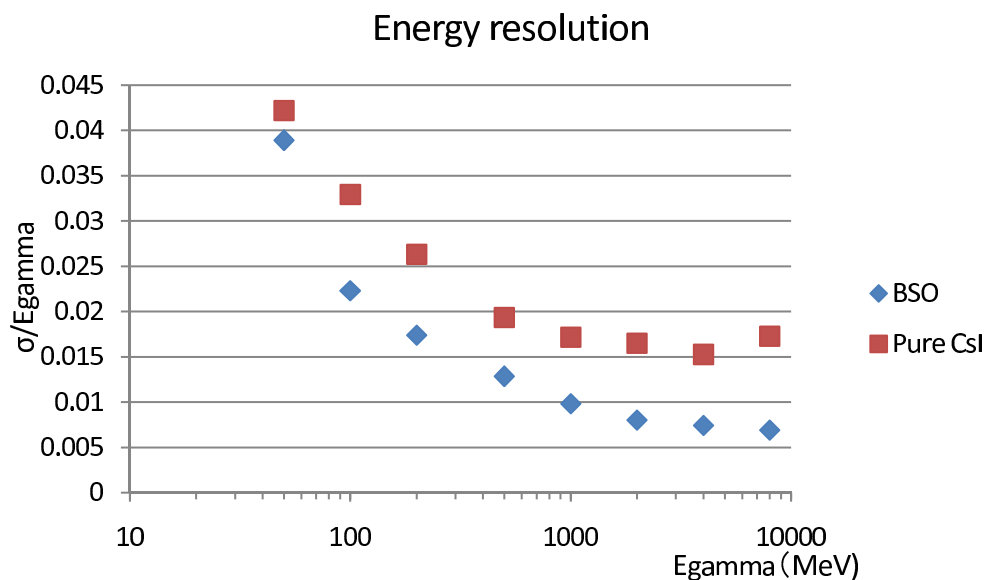


図 3.5: エネルギー分解能 (σ/E_{γ}) を E_{γ} の関数で示す。ここで σ と E_{calor} はカロリメーターで検出したエネルギー分布を Logarithmic Gaussian でフィットした幅とピーク値、 E_{γ} は入射 γ 線のエネルギーである。

のピークを入射 γ 線のエネルギーの関数として示したものである。長さ 30cm の CsI シンチレーターは $16X_0$ に対応するのに対し、長さ 23cm の BSO は $20X_0$ であるので、結晶中で検出されなかった電磁シャワーの中の粒子、すなわちシャワーの漏れが BSO では CsI の半分以下となっている。図 3.5 はエネルギー分解能を入射 γ 線のエネルギーの関数として示したものである。ここではカロリメーターが検出したエネルギーの分布を logarithmic gaussian でフィットした σ とピークの値の比をとった。50MeV ではチャンネル当たりの雑音の寄与が大きいので、BSO と CsI に大きな差はないが、エネルギーが高くなると、シャワーの漏れが小さく、そのふらつきも小さくなる効果により、BSO シンチレーターのエネルギー分解能が劇的に CsI シンチレーターよりも改善する。入射 γ 線のエネルギーが 4GeV の時、CsI カロリメーターでは 1.5% であるのに対し、BSO カロリメーターでは 0.75% と約 2 倍の改善が期待されることが分かった。

3.3 Pr 添加 LuAG シンチレーター

Pr 添加 LuAG(Pr:LuAG) シンチレーターは東北大学多元物質研究所の吉川彰准教授らのグループで開発されたものである。原料のうち Lu(ルテチウム) が比較的高価な上、融点が高いため、結晶成長では素粒子実験や原子核実験に使用可能な大型の結晶を、許容される範囲の金額で得ることは不可能である。また、結晶成長法ではインゴット中に分布する Pr(プラセオジウム) の濃度にばらつきが出てしまう。これらの難点を解決するため、現在セラミック製法による製造技術の開発が行われているが、実用には至っていない。しかし、発光量が純 CsI シンチレーターの 10 倍と豊富でかつ発光時間も短いという魅力的な特徴を持つ。また発光量の温度依存と放射線耐性はまだ調べられていない。次節以降でそれらの測定結果について記すに当たり、本節ではこのシンチレーターの発光原理や組成、開発の現状について述べる。

3.3.1 組成と特性

LuAG は $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ に Pr を添加した酸化物シンチレーターで、Pr は $5d \rightarrow 4s$ 遷移で蛍光を発する。発光量は純 CsI の 10 倍と非常に大きく、発光時間も数十 nsec と短い。高密度かつ輻射長およびモリエール半径が 1.5cm、2.2cm と短いため、CsI に対する優位性は BSO の場合と同様である。図 3.6 の写真は測定に用いた $1.5 \times 1.5 \times 1.5\text{cm}^3$ の Pr:LuAG シンチレーターである。

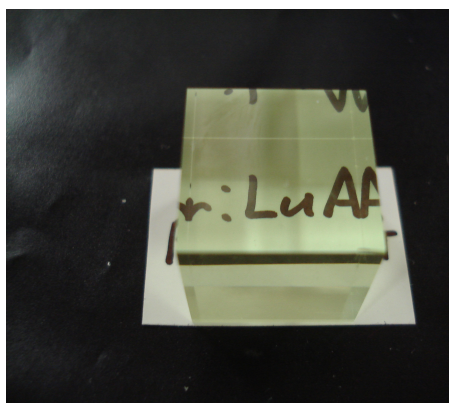


図 3.6: Pr:LuAG シンチレーター ($1.5 \times 1.5 \times 1.5\text{cm}^3$)

3.4 発光量とその温度依存性

本節では、BSO シンチレーターおよび Pr:LuAG シンチレーターについて発光量と温度依存性について測定した結果について述べる。

3.4.1 測定方法

測定には ^{137}Cs 線源が発する 662keV の γ 線がシンチレーターに入射した際、光電効果による波高分布のピークを示すのでこれを用いる。シンチレーション光の読み出しには浜松ホトニクス社

製の光電子増倍管 (PMT)、H3167 および H1161 を用いた。発光量の温度依存性を測定する際には H3167、後述する中性子被曝効果の測定には H1161 を用いた。それらの仕様については次節に詳しく述べる。セットアップは 図 3.7 にしめす。シンチレーターと光電子増倍管の入射窓とは発光量の温度依存性を測定する際にはオプティカルグリースを用いて粘着し、シンチレーターと光電子増倍管を恒温槽 (日本ブローア製 LS-5) 中に置いた。中性子被曝効果の測定の際は、H1161 にエアコンタクト (シンチレーターと光受窓の間にごくわずかな空隙を設ける) とした。

光電子増倍管が出力した信号はディバイダー (Div) で 2 つに分け一方はゲート信号を作り、も

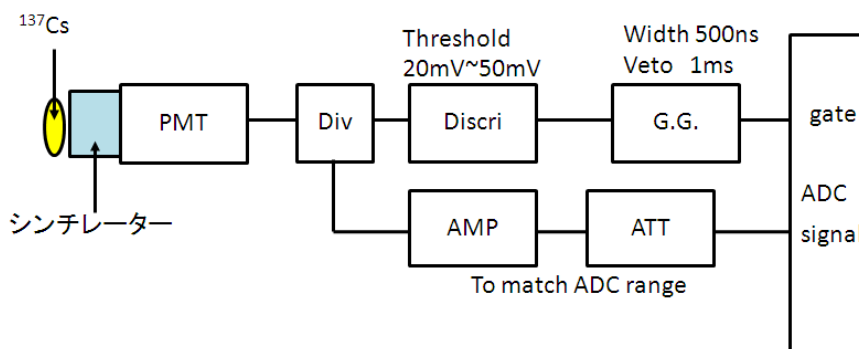


図 3.7: 測定セットアップのブロックダイアグラム

う一方は増幅器 (AMP) およびアッテネーター (ATT) で適切な波高にして LeCroy2249W 電荷積分型 ADC (Analog to Digital Converter) で数値化した。数値化したデータは CAMAC インターフェースを介して LinuxPC に収集した。

発光量は室温 (約 20°C) での測定を行った後、温度依存性を測定した。恒温槽の温度をセットしてから、光電子増倍管に取り付けたサーミスターの抵抗値をデジタルマルチメーター (Agilent34970A) で測ることにより内部の温度をモニターし、3 時間を経て十分内部が温度平衡に達していることを確認したのち、1 回 10000 事象の測定を 9 回行い、その平均値を得た。これを 30°C から 15°C まで 5°C 間隔で 4 回繰り返した。

3.4.2 H3167 型および H1161 型光電子増倍管の仕様

光電子増倍管の受光面に到達した光は、そこで光電子を放出し、内部の複数段にわたるダイノード電極からなる電子増倍部で増倍され信号として取り出される。光電子増倍管の量子効率には主に受光窓の材質と光電陰極の材質で決まり、今回用いた光電子増倍管 H3167 型および H1161 型はホウ珪酸ガラス窓 (Borosilicate glass) にバイアルカリ光電面 (Bialkali) を使用している。純 CsI 及び Pr : LuAG シンチレーターの発光波長である 310nm 付近では約 10%、BSO シンチレーターの発光波長である 480nm では約 20% の量子効率を示す。各光電子増倍管の仕様を表 3.2 にまとめ、ホウ珪酸ガラス窓・バイアルカリ光電面の量子効率の波長依存性を図 3.8 に示す。

	H3167	H1161
Tube Diameter(mm ³)	19	51
Spectral Response Range(nm)	300 to 650	
Dynode structure/No. of Stages	LINE/10	LINE/12
Q.E. at Peak(%)	27	26
Window Material	Borosilicate Glass	
Photocathode	Bialkali	
Overall Voltage(V)	-1800	-2700
Bleeder Current(mA)	0.47	1.23

表 3.2: 光電子増倍管 H3167 型および H1161 型の仕様

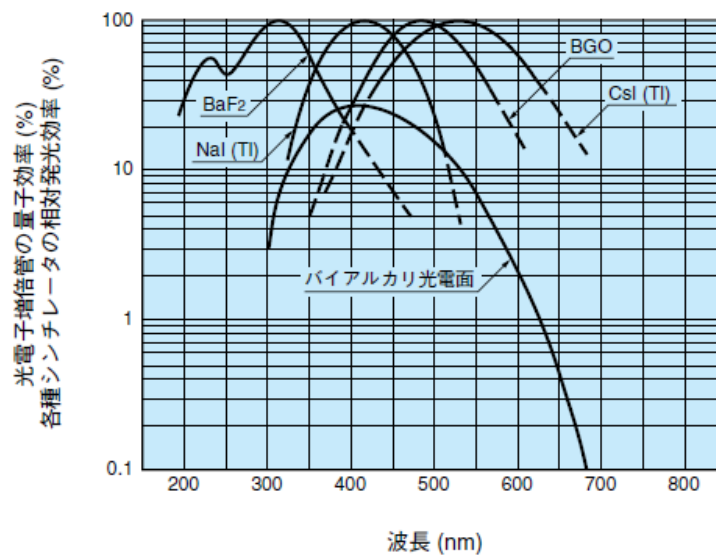


図 3.8: 光電子増倍管の量子効率 (浜松ホトニクス社のカタログより抜粋)

3.5 発光量とその温度依存性の測定結果

発光量の測定は、比較対象の基準とするために純 CsI シンチレーターを 1 個、BSO シンチレーターを 9 個、Pr:LuAG シンチレーターを 6 個のサンプルについて測定を行った。測定した結晶の仕様について表 3.3 にまとめた。BSO(SA) はフュ - テックファーマネス社製 (FFT co.)、BSO(SB) は東北大核理研から供給された上海製、BSO(No.1) から (No.6) は上海製の同一インゴットから切り出したもので、BSO(Oxide co.) は (株) オキサイド社で 2009 年に育成された結晶である。Pr:LuAG の方は全て古河機械金属 (株) から供給されたもので、Pr:LuAG(No.1) から Pr:LuAG(No.4) は同一のインゴットから切り出したもの、Pr:LuAG(シード側) および Pr:LuAG(直胴部) は別のインゴットから切り出したものである。いずれも結晶成長時、るつぼ中に Lu に対し Pr を 2.5mol% 投入し、その結果、結晶格子中に Pr が 0.22mol% から 0.23mol% 分布しているものである。

図 3.9、図 3.10、図 3.11 はそれぞれ純 CsI シンチレーター、BSO シンチレーター、Pr:LuAG

	サイズ (mm)	側面仕上げ	供給元
純 CsI	10 × 10 × 20	2 面鏡面研磨、側面砂ずり	応用光研 (株)
BSO(SA)	10 × 10 × 20	2 面鏡面研磨、側面砂ずり	FFT co.
BSO(SB)	10 × 10 × 20	2 面鏡面研磨、側面砂ずり	東北大核理研
BSO(No.1)	10 × 10 × 20	2 面鏡面研磨、側面砂ずり	東北大核理研
BSO(No.2)	10 × 10 × 20	2 面鏡面研磨、側面砂ずり	東北大核理研
BSO(No.3)	10 × 10 × 20	2 面鏡面研磨、側面砂ずり	東北大核理研
BSO(No.4)	10 × 10 × 20	2 面鏡面研磨、側面砂ずり	東北大核理研
BSO(No.5)	10 × 10 × 20	2 面鏡面研磨、側面砂ずり	東北大核理研
BSO(No.6)	10 × 10 × 20	2 面鏡面研磨、側面砂ずり	東北大核理研
BSO(Oxide co.)	10 × 10 × 20	2 面鏡面研磨、側面砂ずり	Oxide 社
Pr:LuAG(No.1)	15 × 15 × 15	6 面鏡面研磨	古河機械金属 (株)
Pr:LuAG(No.2)	15 × 15 × 15	6 面鏡面研磨	古河機械金属 (株)
Pr:LuAG(No.3)	15 × 15 × 15	6 面鏡面研磨	古河機械金属 (株)
Pr:LuAG(No.4)	15 × 15 × 15	6 面鏡面研磨	古河機械金属 (株)
Pr:LuAG(シード側)	20 × 20 × 20	6 面鏡面研磨	古河機械金属 (株)
Pr:LuAG(直胴部)	20 × 20 × 20	6 面鏡面研磨	古河機械金属 (株)

表 3.3: 測定に用いたシンチレーターの仕様と供給元。東北大核理研提供の BSO のサンプル (No.1) から (No.6) は上海のメーカーで作られた $80 \times 80 \times 80 \text{mm}^3$ のインゴットから切り出したもの。

シンチレーターの 662keV に γ 線が入射した際の波高分布である。波高の定量的評価には光電効果によるピークを正規分布でフィットし、その平均値を用いた。ADC のペDESTAL を引いた後、信号の波高を ADC のレンジに合わせるために用いた増幅器のゲインとアッテネーターの値を補正して、光電子増倍管が読み出した光量の絶対値を求め、純 CsI の光量を 1 として相対値をとったものが図 3.12 および図 3.13 である。純 CsI シンチレーターと BSO シンチレーターでは同程度の波高が得られた。Pr:LuAG シンチレーターの波高は純 CsI シンチレーターの約 5 倍で、約 10 倍という期待よりも低い。側面が砂ずりの他と異なり側面の仕上げが鏡面研磨のため、結晶内で全反射を繰り返して読み出せないシンチレーション光の寄与と考えられる。

温度依存性の結果は図 3.14、図 3.15、図 3.16 の通りである。横軸は温度、縦軸は 662keV の γ 線

が光電効果を起こした際の波高を ADCcount で示したものである。ビーム衝突型実験の実機として室温で動作することを前提に 15°C から 30°C の温度において測定した結果、純 CsI シンチレーターは $-0.5\%/^{\circ}\text{C}$ 、BSO はシンチレーター $-1.0\%/^{\circ}\text{C}$ 、Pr:LuAG シンチレーターは $+0.5\%/^{\circ}\text{C}$ であった。実験室の空調温度安定性を考慮すると、発光量の温度依存性がこの程度であれば、実験データを校正する上でいずれも大きな困難を生じないと考えられる。

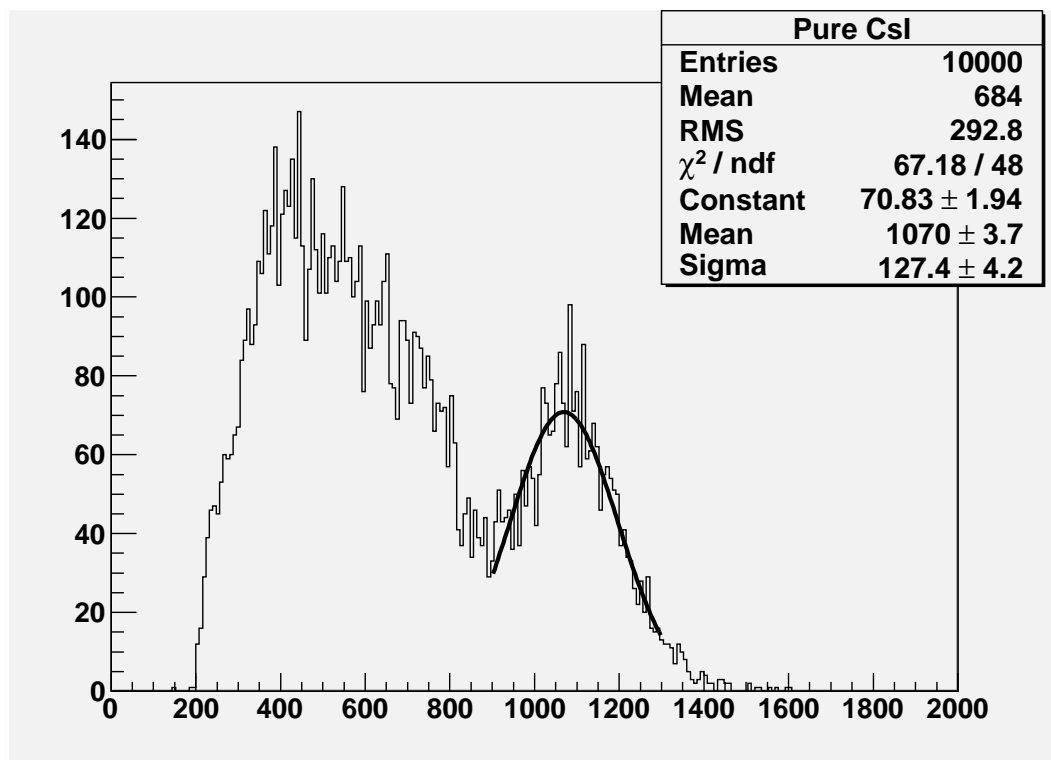


図 3.9: 純 CsI シンチレーターの波高分布 (AMP 有、ATT6dB)

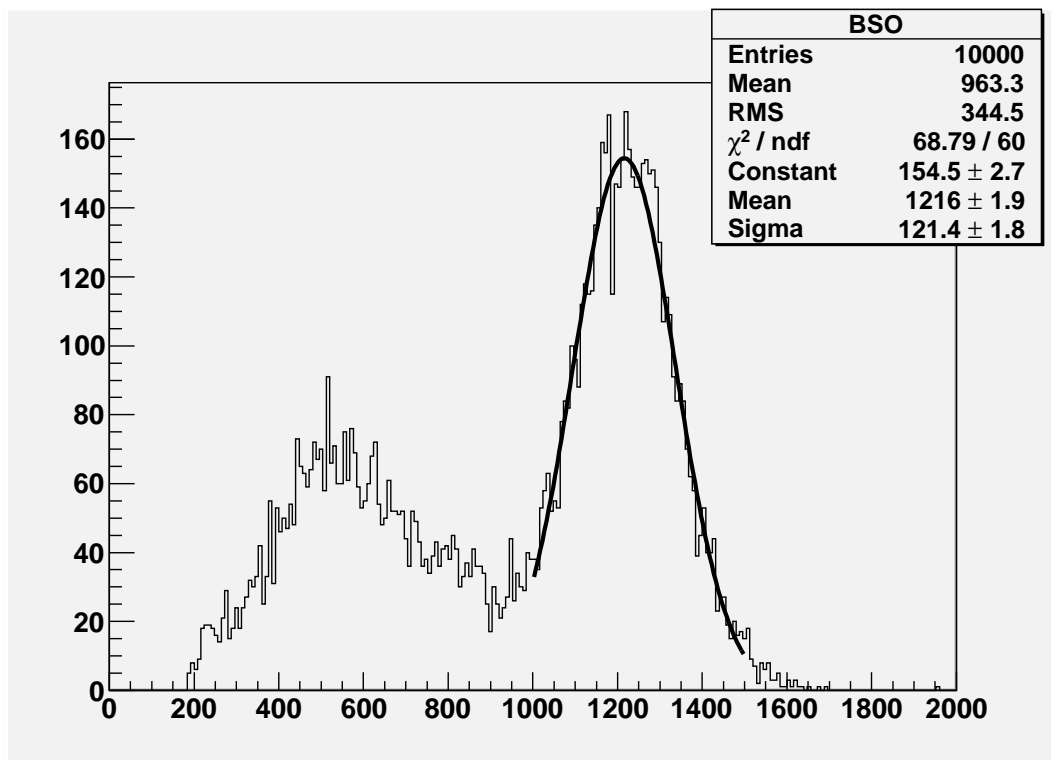


図 3.10: BSO シンチレーターの波高分布 (AMP 有、ATT6dB)

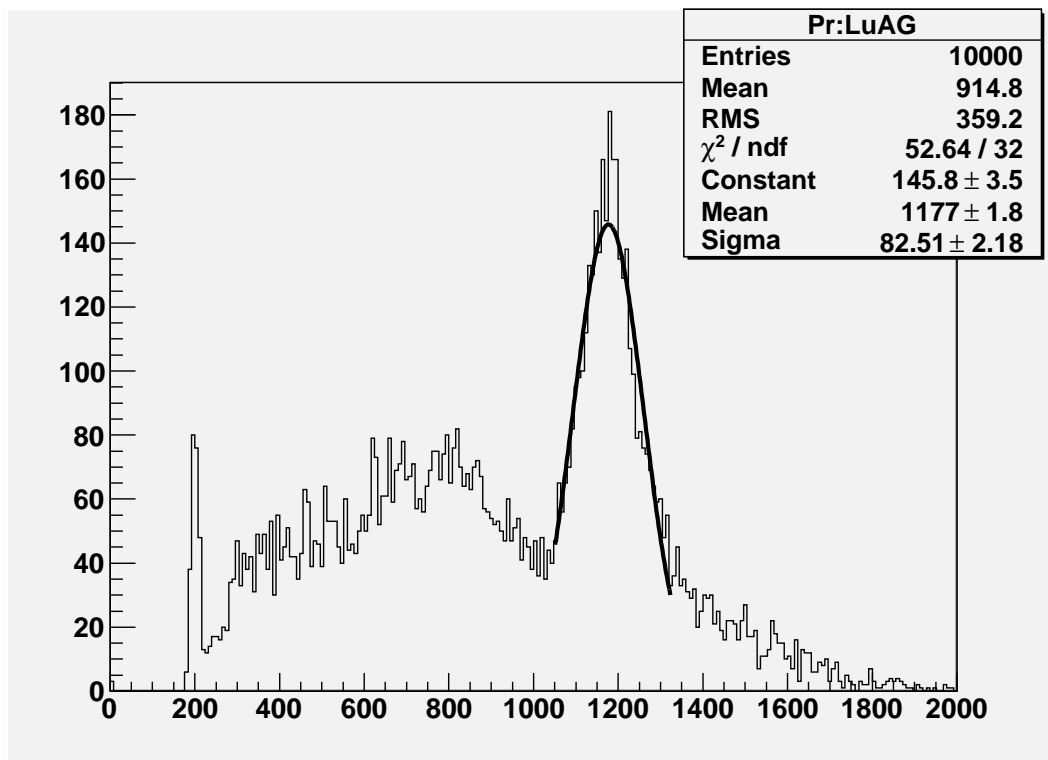


図 3.11: Pr:LuAG シンチレーターの波高分布 (AMP 有、ATT18dB)

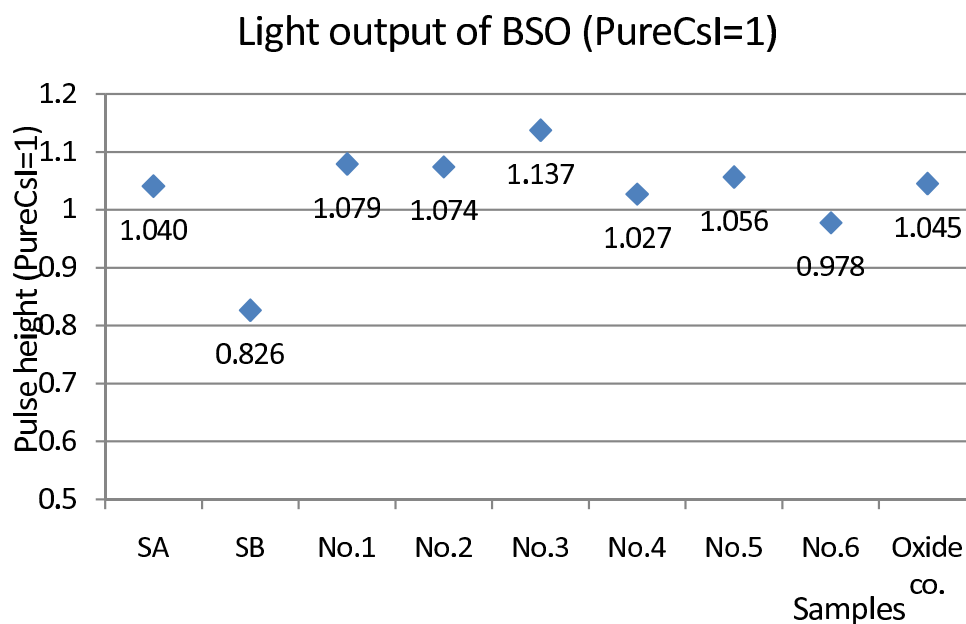


図 3.12: BSO シンチレーターの波高 (PureCsl=1)。AMP および ATT の補正後。

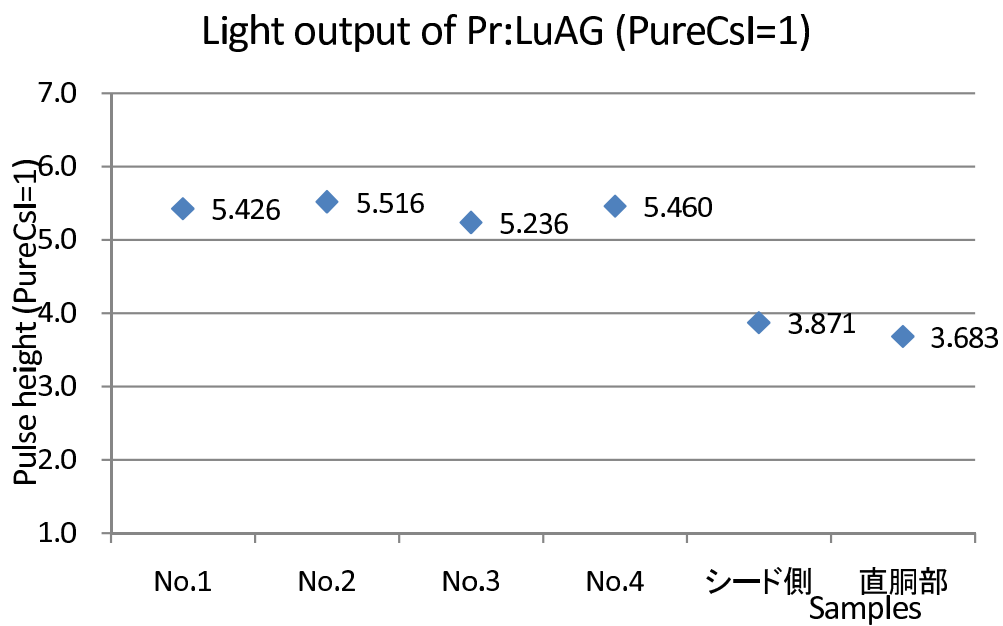


図 3.13: Pr:LuAG シンチレーターの波高 (PureCsI=1)。AMP および ATT の補正後。

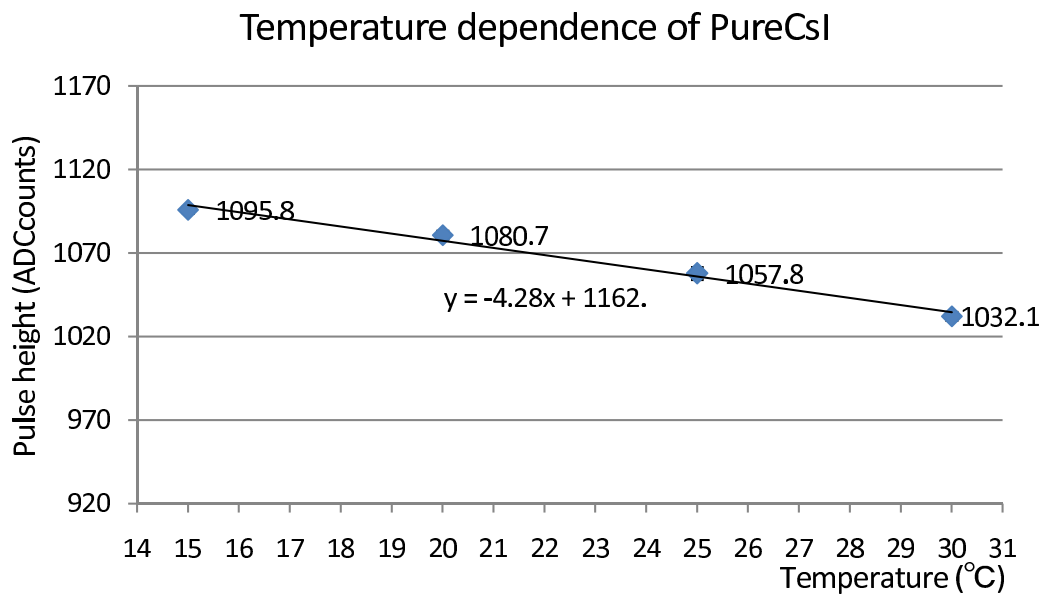


図 3.14: Pure CsI シンチレーターの発光量の温度依存性

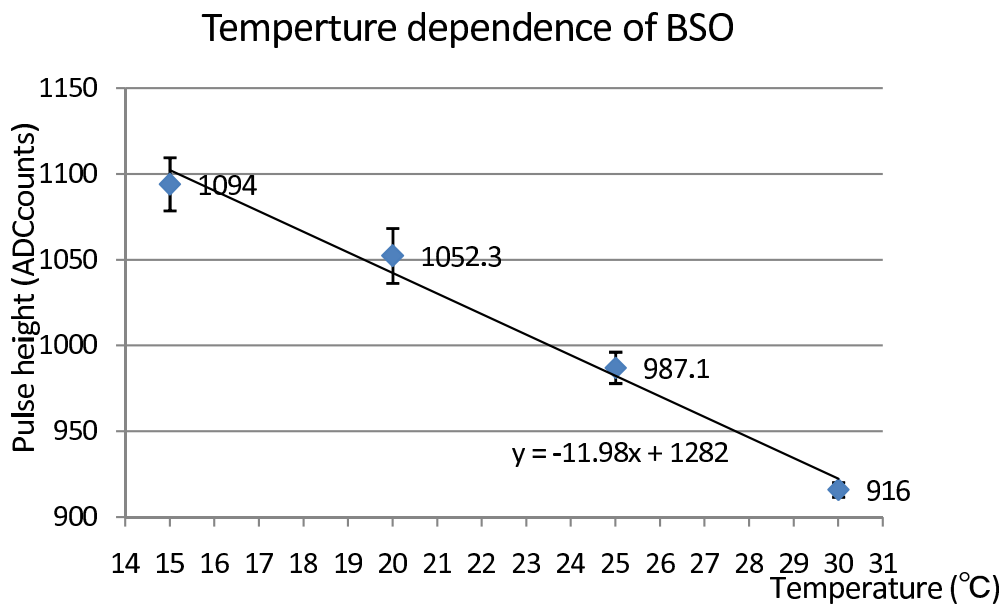


図 3.15: BSO シンチレータの発光量の温度依存性

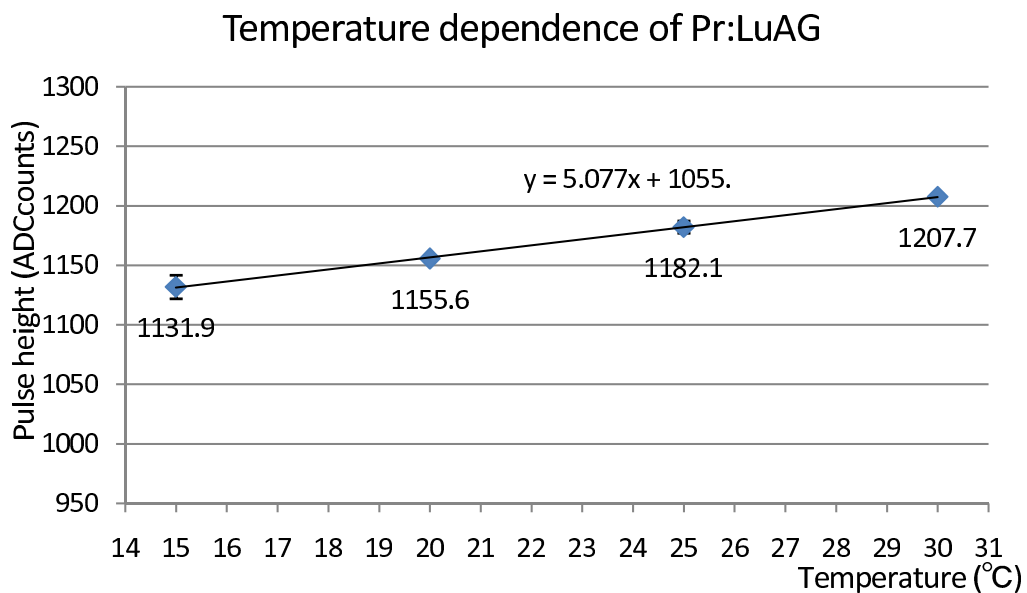


図 3.16: Pr:LuAG シンチレータの発光量の温度依存性

3.6 放射線損傷の測定

Belle 実験のような電子・陽電子衝突型加速器実験において、電磁力ロリメーターのように比較的の外側に位置する測定器コンポーネントでは、衝突点付近から来るビームバックグラウンドの主成分は数 MeV 程度までの低エネルギー γ 線である。さらに世界最高輝度の KEKB 加速器の運転が始まってから明かになったこととして、加速器トンネル内で生成する中性子によるバックグラウンドが無視できない寄与をする。これは、高エネルギー γ 線の放出を伴う Bhabha 散乱、つまり $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$ 過程により生じた γ 線が、加速器トンネル内の物質と相互作用して中性子を発生させる効果のためである。

Belle-II 実験の電磁力ロリメーターでは、 γ 線による放射線被曝量は空間線量換算で 10Gy から 100Gy、中性子による被曝量は運動エネルギー 1MeV 中性子換算で 10^{11} neutron/cm² から 10^{12} neutron/cm² と予想される。こうした放射線被曝に対する耐性を調べるため、 γ 線は東京工業大学 γ 線照射施設で、中性子は東京大学原子炉「弥生」で照射し、その前後のシンチレーターの発光量の測定を行った。

3.6.1 γ 線による損傷試験

γ 線の照射は東京工業大学の放射線照射施設において行った。線源には ⁶⁰Co が用いられ、照射は積算照射量が 1Gy、3Gy、10Gy、100Gy となるように照射した。図 3.17 は γ 線照射中の様子で、上部円筒の中に ⁶⁰Co 線源がセットされる。鉛ブロックの上に置かれている白く小さく見えている物体がシンチレーターのサンプルである。表面が白いのは反射材として白色のゴアテックスフィルムで包んでいるからである。

照射前後の発光量測定のセットアップは既に 4 節図 3.7 で示したもので、恒温槽により温度は 25°C に保った。その他の環境の変化 (PMT の増幅率等) をモニターするため、Oxide 社 (株) から試験生産されたサンプルを標準結晶 (Reference Crystal) とし、測定ごとに標準結晶との比をとることとした。シンチレーターと光電子増倍管 (H3167) の受光窓との間をオプティカルグリースで粘着しているので、その接合部の透過率の安定度を評価した。その方法はシンチレーターの取り外し・再粘着による発光量測定を標準結晶で繰り返してその平均二乗誤差をとることとし、その結果は約 3%であった。したがってこれが放射線被曝による光量変化の感度の限界である。

γ 線照射前と照射後の波高分布は図 3.18 から図 3.24 に示す。発光量は照射後徐々に回復する。これを Natural Recovery という。 γ 線照射後の発光量は Natural Recovery が終了して発光量がほぼ一定になったときの値を用いることとした。BSO シンチレーターと Pr:LuAG シンチレーターの発光量を γ 線照射後日数の関数として、それぞれ図 3.25 と 3.26 に示す。BSO シンチレーターは最大 100Gy までの γ 線照射で発光量に顕著な変化は見られなかった。図 3.26 から Pr:LuAG シンチレーターについては 100Gy 被曝した場合は約 20 日でおさまる Natural Recovery がある。照射後の発光量は表 3.5 と図 3.27 にまとめる。



図 3.17: γ 線照射の様子

サンプル	積算照射量 (Gy)
BSO(No.1)	1
BSO(SB)	3
BSO(SB)	10
BSO(No.1)	100
Pr:LuAG(No.1)	3
Pr:LuAG(直胴部)	10
Pr:LuAG(No.1)	100

表 3.4: 照射したサンプルと γ 線照射量

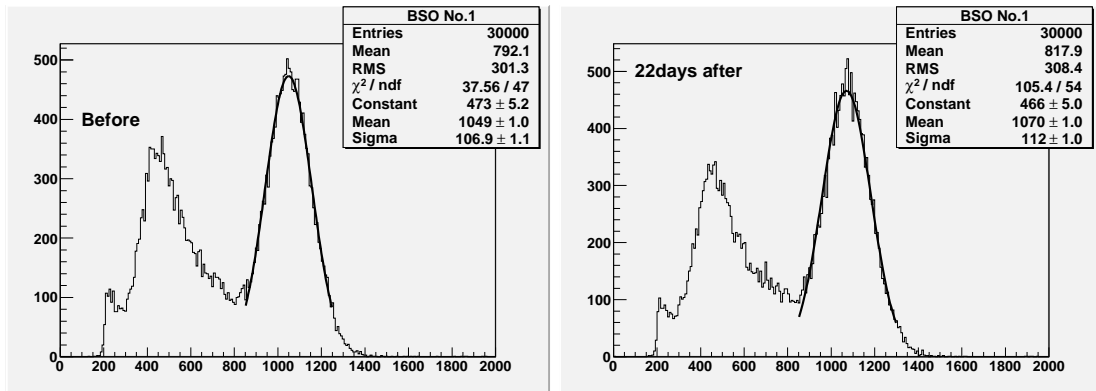


図 3.18: fig:BSO(No.1) γ 線照射前と1Gy照射後

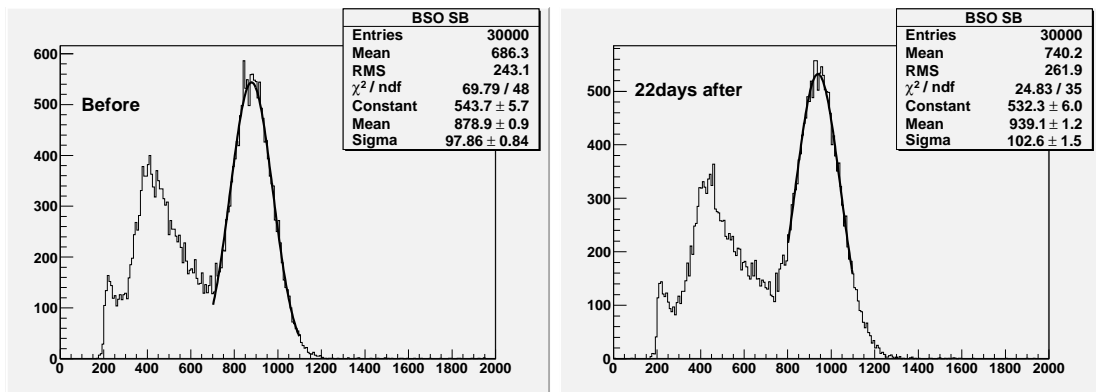


図 3.19: fig:BSO(SB) γ 線照射前と3Gy照射後

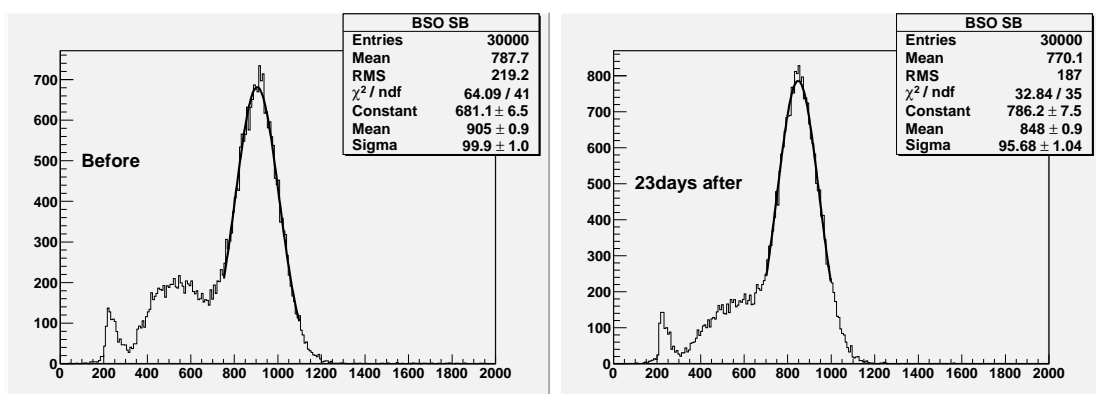


図 3.20: fig:BSO(SB) γ 線照射前と10Gy照射後

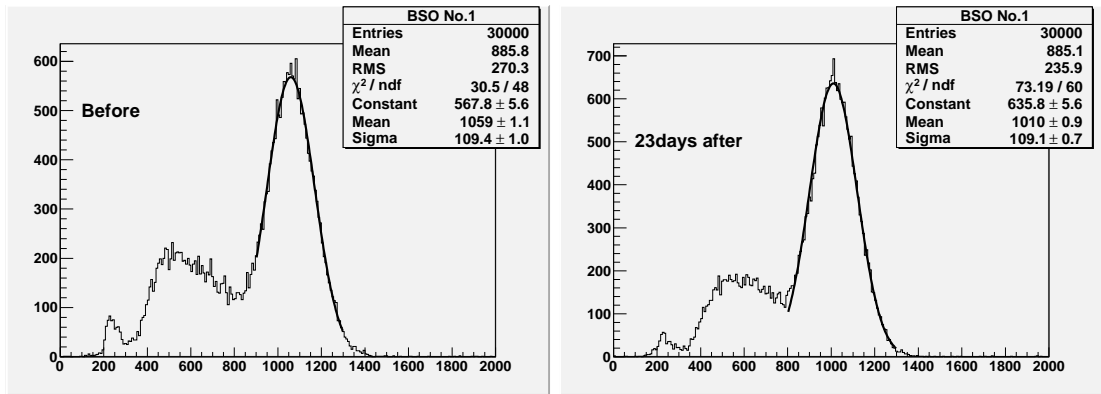


図 3.21: fig:BSO(No.1) γ 線照射前と 100Gy 照射後

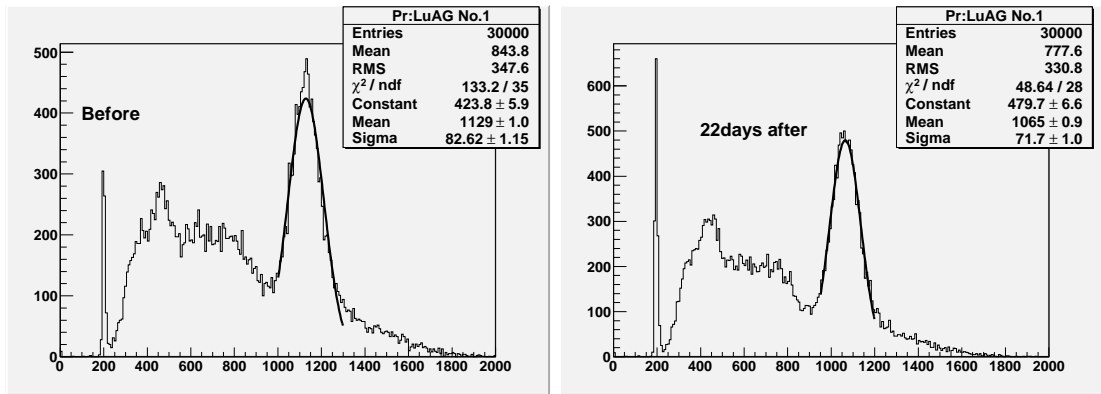


図 3.22: fig:Pr:LuAG(No.1) γ 線照射前と 3Gy 照射後

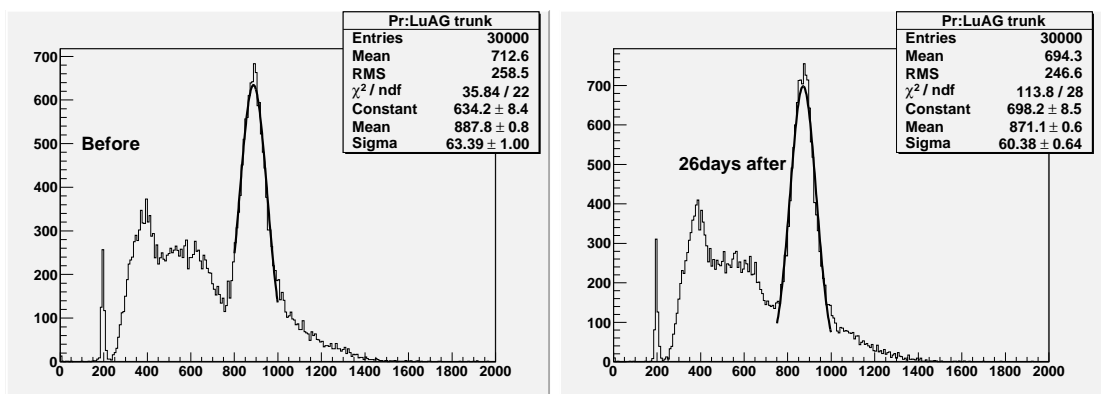


図 3.23: fig:Pr:LuAG(直胴部) γ 線照射前と 10Gy 照射後

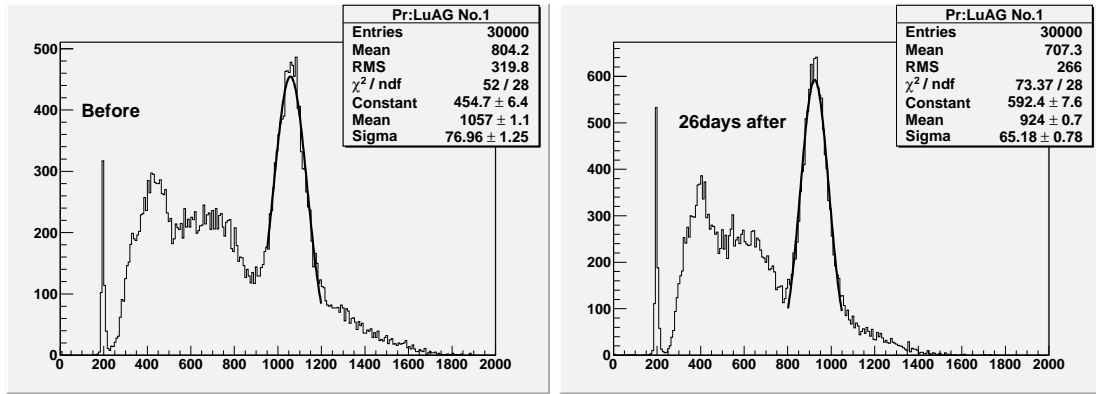


図 3.24: fig:Pr:LuAG(No.1) γ 線照射前と 100Gy 照射後

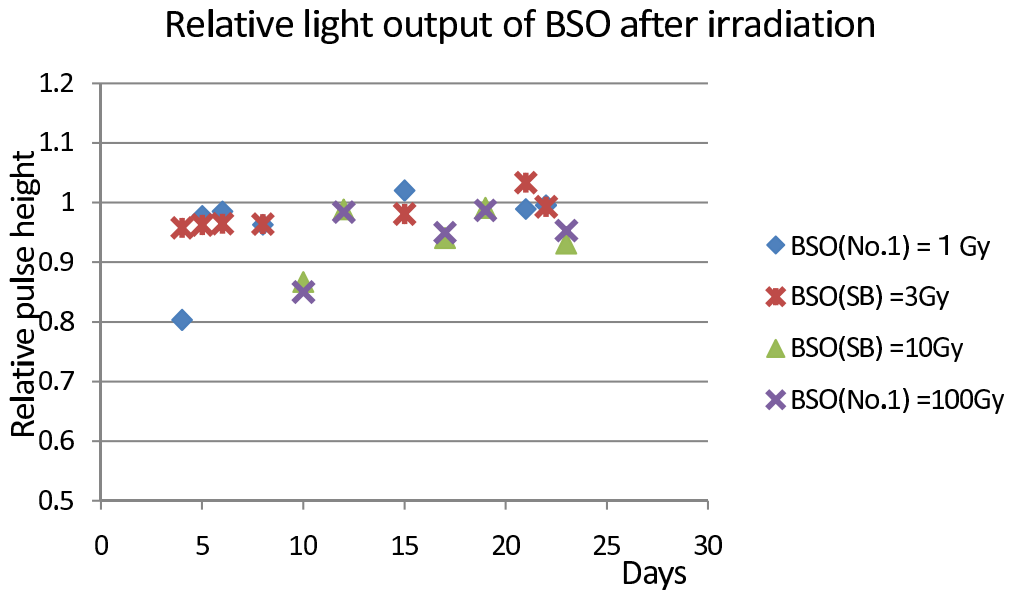


図 3.25: BSO シンチレーターの γ 線照射後 1ヵ月間の波高の変化

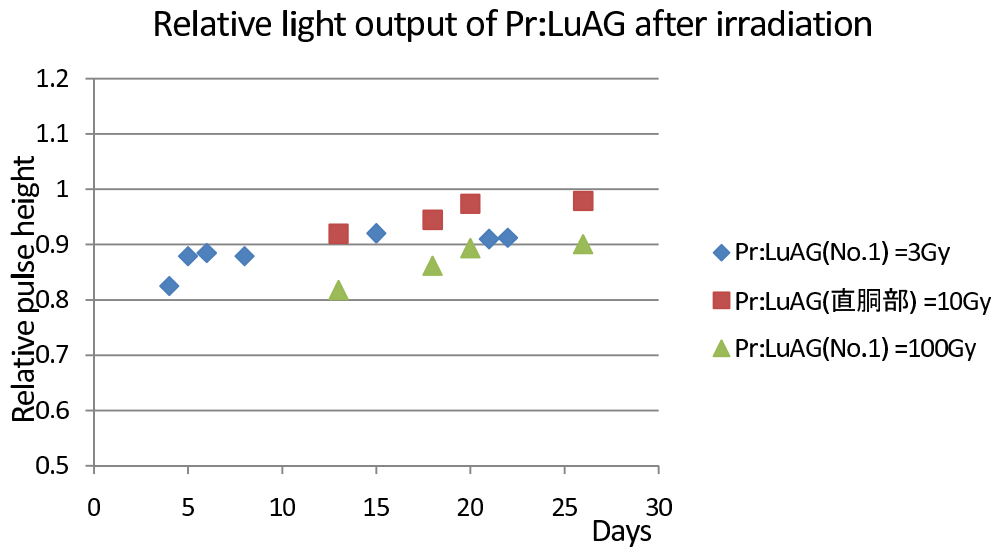


図 3.26: Pr:LuAG のシンチレーターの γ 線照射後 1ヵ月間の波高の変化

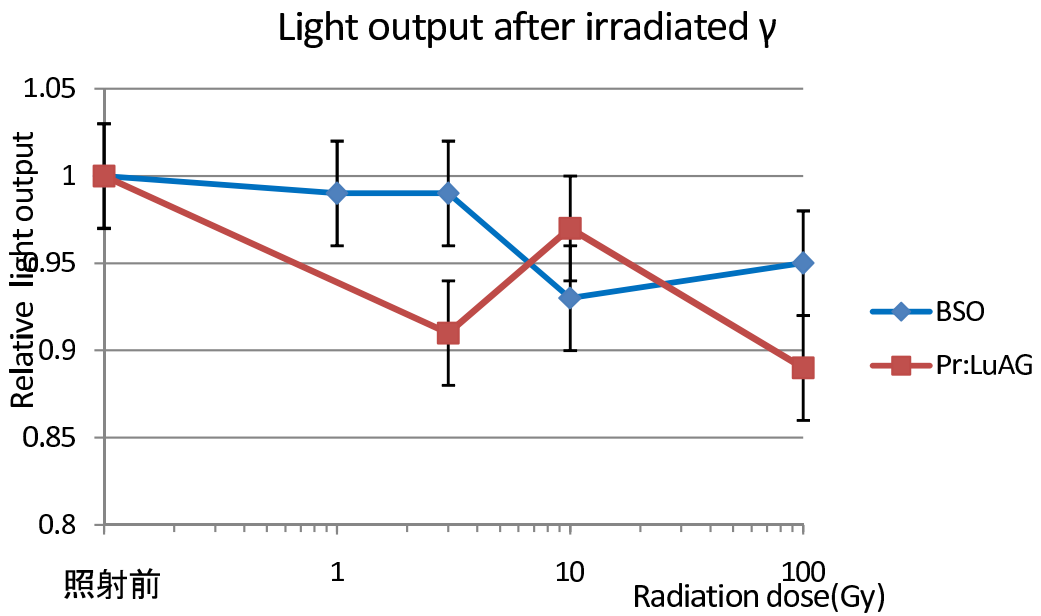


図 3.27: γ 線照射後のシンチレーターの発光量

サンプル	積算照射量 (Gy)	発光量
BSO(No.1)	1	0.99
BSO(SB)	3	0.99
BSO(SB)	10	0.93
BSO(No.1)	100	0.95
Pr:LuAG(No.1)	3	0.91
Pr:LuAG(直胴部)	10	0.97
Pr:LuAG(No.1)	100	0.89

表 3.5: γ 線照射後の発光量

3.6.2 中性子線による損傷試験

中性子照射は茨城県東海村にある東京大学原子炉「弥生」[10]で行った。「弥生」はウラン燃料空気冷却型の高速炉で、最大熱出力は2kWである。照射できる中性子は平均運動エネルギー1MeV程度の高速中性子である。写真に原子炉の様子を示す。右側の建造物が炉心を納めた遮蔽体でこの建造物の上のハッチからサンプルを吊り下げる。



図 3.28: 東大高速中性子源炉「弥生」

弥生の中性子線量フラックス (F) は

$$F = 1.5 \times 10^8 \text{neutrons/cm}^2 \text{Wh} \quad (3.3)$$

である。これは米国ロスアラモス研究所で開発された Monte Carlo N-Particle Transport Code(MCN P-4B) と呼ばれるコードによって計算された値で、Wh は原子炉の積分熱出力である。したがって、1W で 1 時間中性子を照射したときの照射量中性子フルエンス (積分フラックス) は $N = 1.5 \times 10^8 \text{neutrons/cm}^2$ となる。

照射する中性子の積分フラックスは、Belle-II で予想される範囲を考慮し、 $10^{11} \text{neutrons/cm}^2$ および $10^{12} \text{neutrons/cm}^2$ の中性子を照射した。表 3.6 は用いたサンプルと照射した照射量である。中性子を照射した後のサンプルは放射化のため、施設からの持ち出しに制限があるため、測定施

サンプル	照射線量 neutrons/cm ²
BSO(No.5)	10^{11}
BSO(No.6)	10^{12}
Pr:LuAG(No.3)	10^{11}
Pr:LuAG(No.4)	10^{12}

表 3.6: 照射したサンプルと中性子照射量

設内測定室で行った。シンチレーターの発光量変化は ^{137}Cs が発する 662keV の γ 線が光電吸収に

よりつくるピークにより測定した。照射前後の光量を測定し、照射後は10日間隔で発光量の経時変化を測定した。光電子増倍管はH1161型を使用し、恒温槽は用いずに暗箱中に光電子増倍管とシンチレーターをエアコンタクトで設置した以外は測定の設定アップは本章4節の図3.7と同様である。

BSOシンチレーターに 10^{11} neutrons/cm² および 10^{12} neutrons/cm² 照射したときの波高分布の経時変化の様子を図3.29と図3.30に、Pr:LuAGシンチレーターに 10^{11} neutrons/cm² および 10^{12} neutrons/cm² 照射したときの波高分布の経時変化の様子を図3.31と図3.32に示す。中性子照射後図3.33、図3.34のように、光量は減少するがその値は照射後から徐々に回復する Natural Recovery を示す。測定結果として示す光量は Natural Recovery がほぼ終了した後に測定したものである。照射後約45日で Natural Recovery はほぼ終了していると言える。BSOシンチレーターは 10^{11} neutrons/cm²、 10^{12} neutrons/cm² 照射したときもほぼ元の発光量まで回復する。一方、Pr:LuAGシンチレーターは 10^{11} neutrons/cm² 照射した時はほぼ回復するが、 10^{12} neutrons/cm² 照射した時には最終的に中性子照射前の発光量の半分程となる。

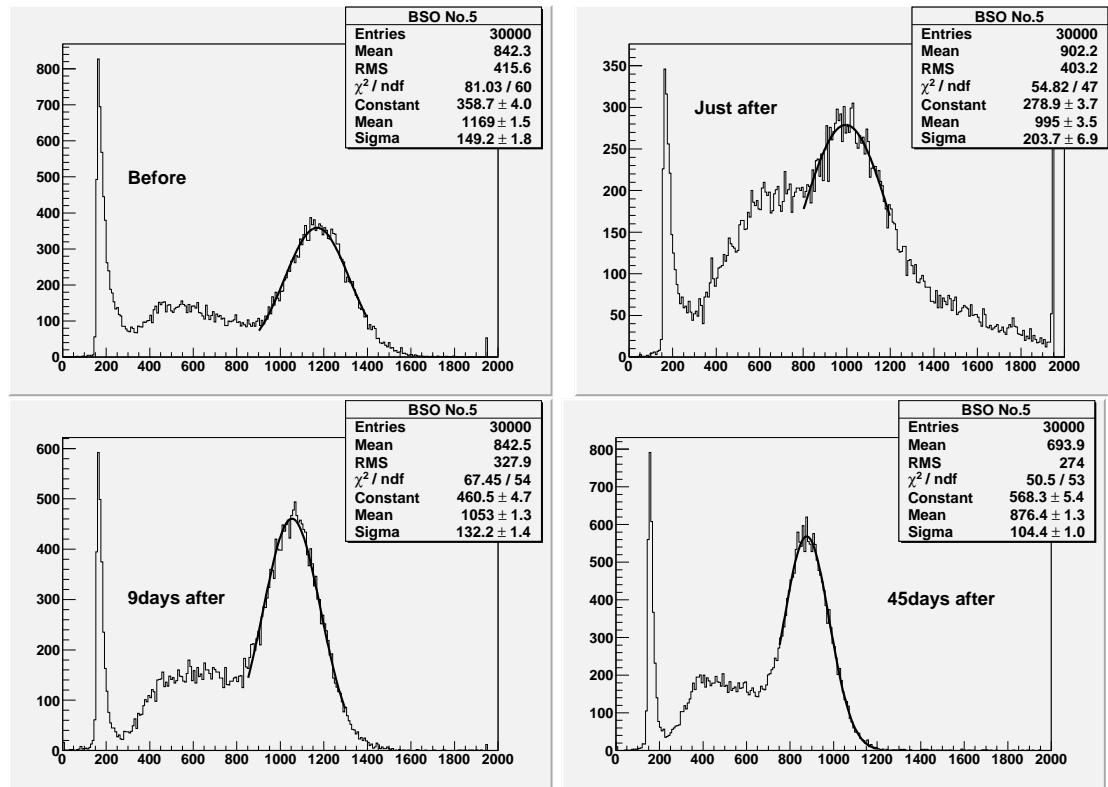


図 3.29: BSO に 10^{11} neutrons/cm² 照射した前後で 662keV γ 線入射時の波高分布の変化 (AMP 有り、ATT4dB)。45 日後の波高が小さくなっているが、これはこの時のみ光電子増倍管の増幅率が低かったためであり、このことは標準結晶シンチレーターの波高を用いて確認済みである。

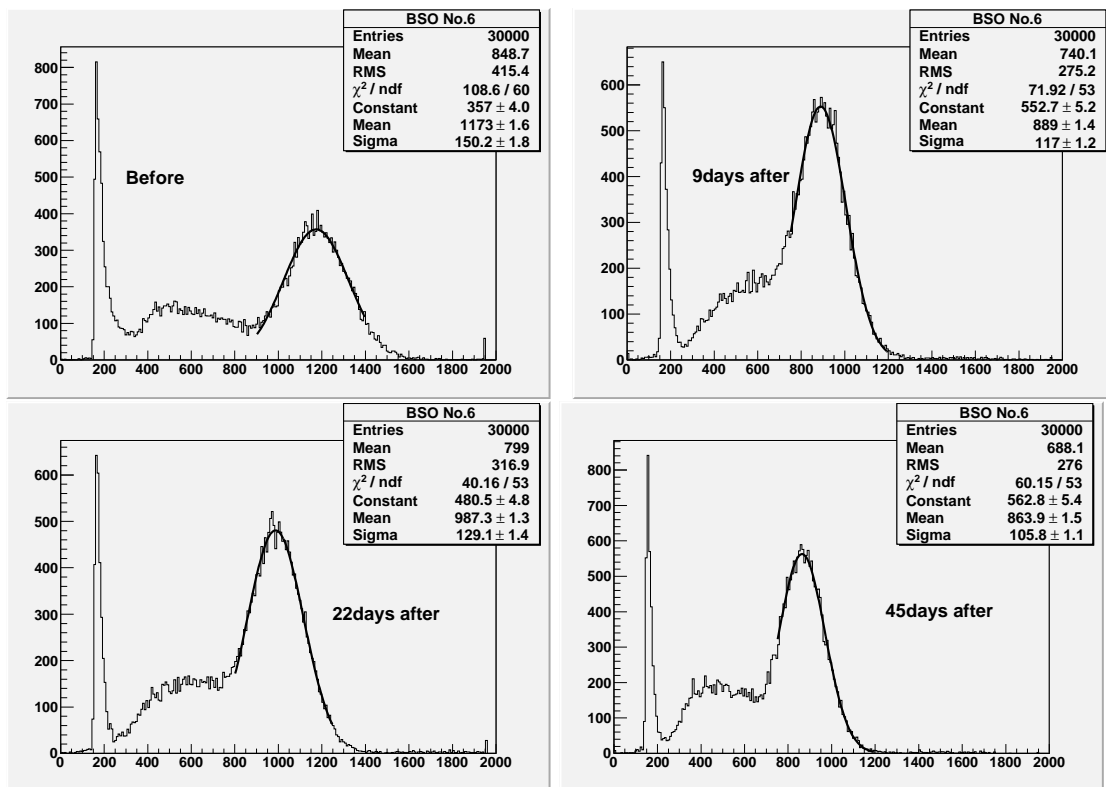


図 3.30: BSO に 10^{12} neutrons/cm² 照射した前後で 662keV γ 線入射時の波高分布の変化 (AMP 有り、ATT4dB)。45 日後の波高が小さくなっているが、これはこの時のみ光電子増倍管の増幅率が低かったためであり、このことは標準結晶シンチレーターの波高を用いて確認済みである。

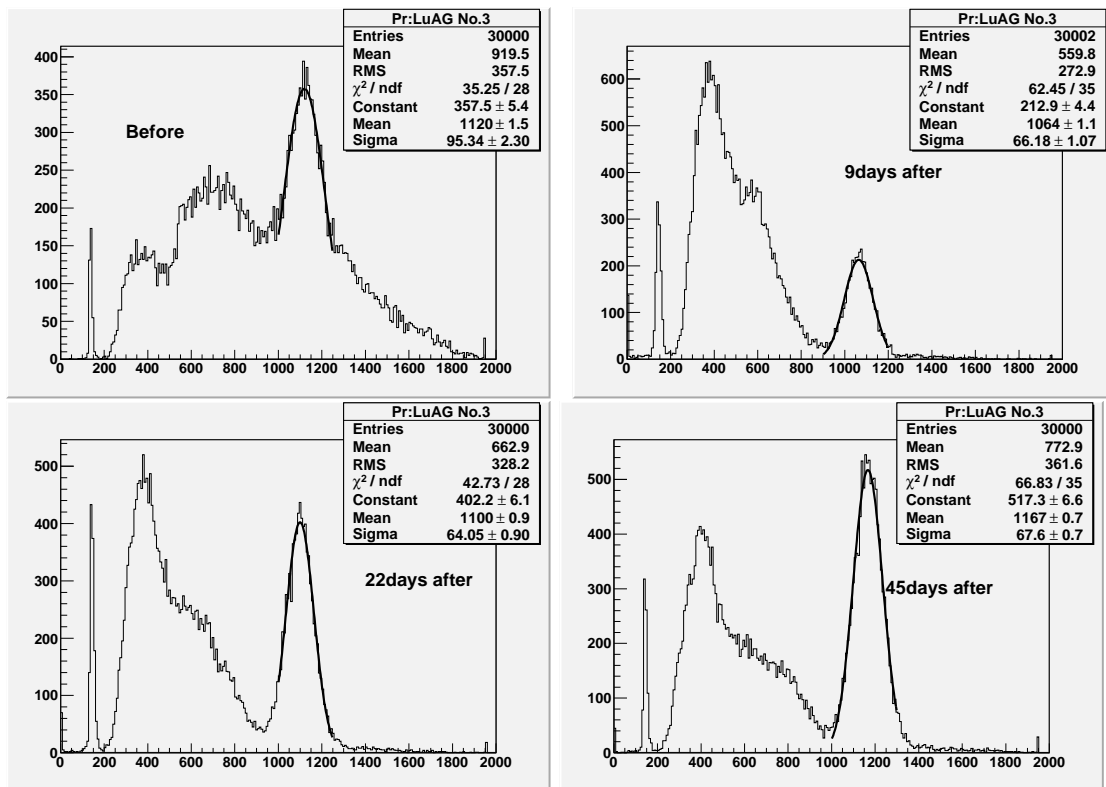


図 3.31: Pr:LuAG に 10^{11} neutrons/cm² 照射した前後で 662keV γ 線入射時の波高分布の変化 (AMP 有り、ATT18dB)。結晶に Natural Activity があるため強度の低い線源を用いた照射前測定ではその寄与が認められる。照射後は Natural Activity が多くなったため、格段に強度の大きい ¹³⁷Cs 線源を用いた。線源の強さは照射前測定では 41.2kBq、照射後は 3.7MBq である。

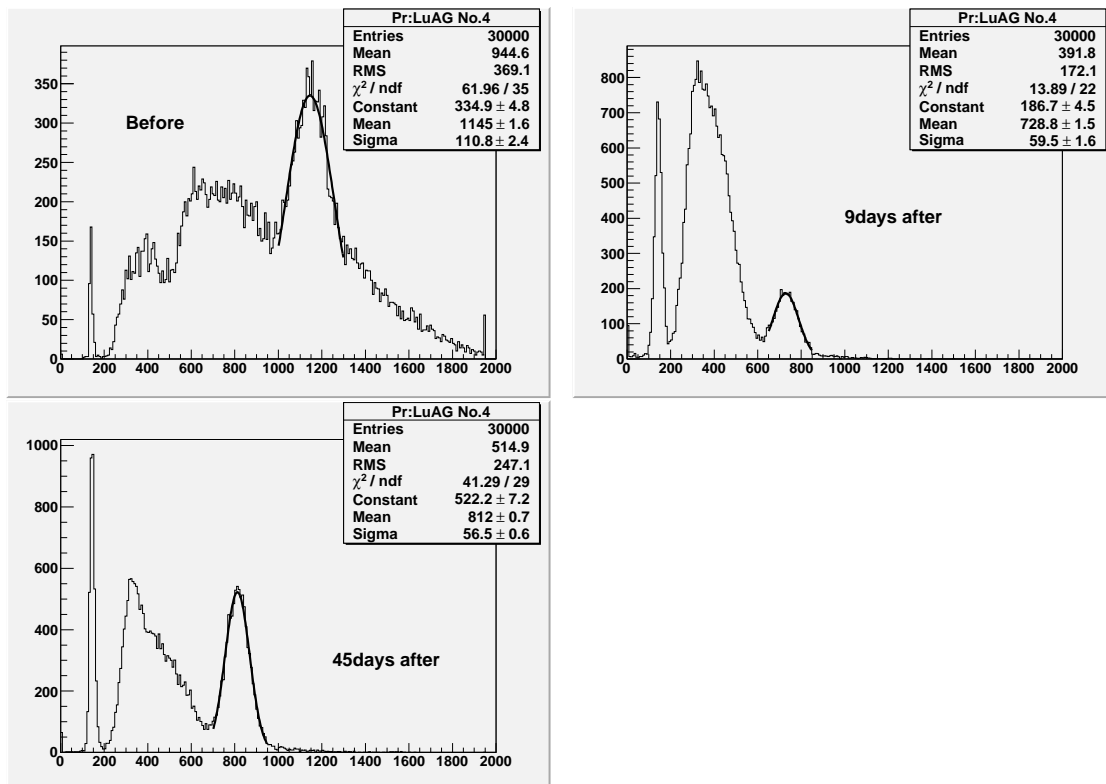


図 3.32: Pr:LuAG に 10^{12} neutrons/cm² 照射した前後で 662keV γ 線入射時の波高分布の変化 (AMP 有り、ATT18dB)。結晶に Natural Activity があるため強度の低い線源を用いた照射前測定ではその寄与が認められる。照射後は Natural Activity が多くなったため、格段に強度の大きい ¹³⁷Cs 線源を用いた。線源の強さは照射前測定では 41.2kBq、照射後は 3.7MBq である。

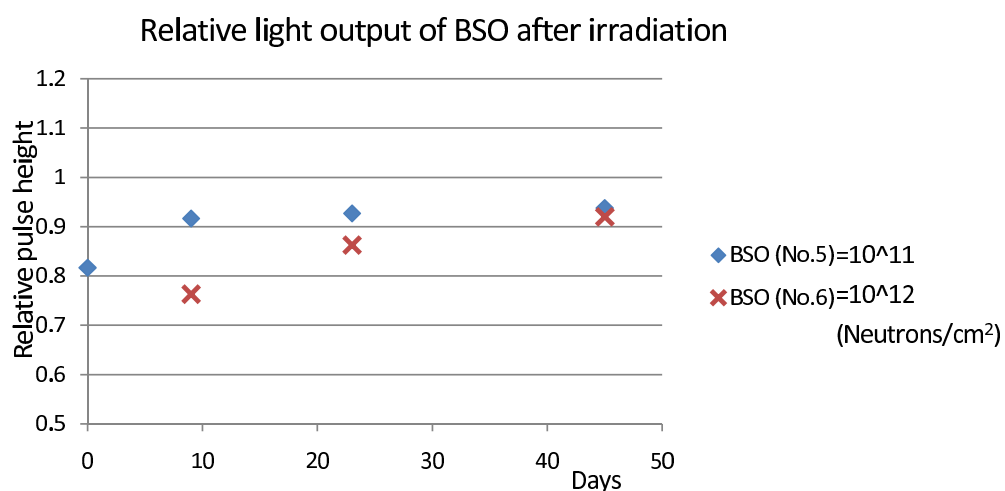


図 3.33: BSO シンチレーターの中性子照射後の時間変化照射前発光量を 1 とする

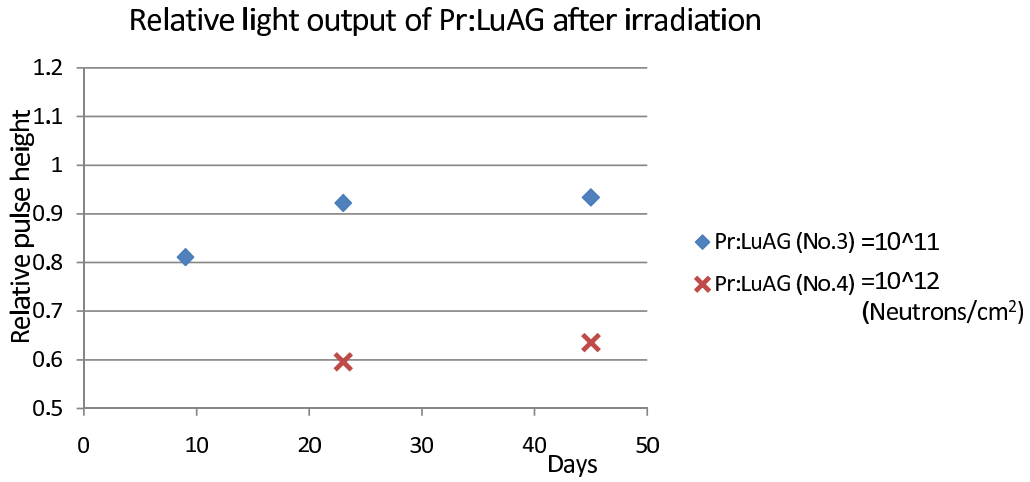


図 3.34: Pr:LuAG シンチレーターの中性子照射後の時間変化照射前発光量を 1 とする

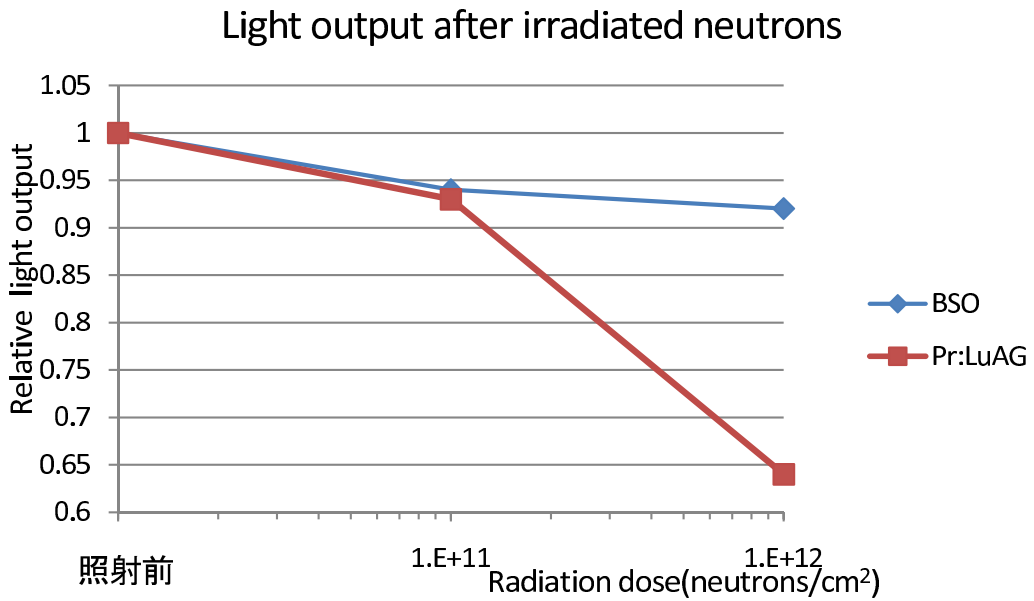


図 3.35: 中性子照射後のシンチレーターの発光量

	照射線量 neutrons/cm ²	発光量
BSO(No.5)	10^{11}	0.94
BSO(No.6)	10^{12}	0.92
Pr:LuAG(No.3)	10^{11}	0.93
Pr:LuAG(No.4)	10^{12}	0.64

表 3.7: 中性子照射後のシンチレーターの発光量

第4章 まとめ

本研究では Belle-II 測定器のエンドキャップカロリメーターに用いるシンチレーター候補として、これまで検討されてきた純 CsI シンチレーターにかえて、の検討項目として、BSO シンチレーターおよび Pr:LuAG シンチレーターが実用に耐えるか検討するために、簡単なモデルによるシミュレーションを行った他、発光量とその温度依存性、さらに放射線耐性を調べた。

シミュレーションにより、長さ 23cm の BSO シンチレーターを用いると、長さ 30cm の純 CsI シンチレーターを用いた場合と比べ、高エネルギーの γ 線に対するエネルギー分解能を著しく改善でき、結果 4GeV の γ 線入射に対して約 2 倍の改善が期待できることがわかった。

発光量および温度依存性については Belle-II 測定器のベースラインである純 CsI シンチレーターを用いて比較を行い、発光量については BSO シンチレーターが純 CsI シンチレーターと同程度であることを確認した。Pr:LuAG シンチレーターが示す波高はで約 5 倍となり、約 10 倍という期待値よりも小さかったが、これは Pr:LuAG シンチレーターのサンプルが 6 面鏡面研磨のため、内部で全反射を繰り返して光電子増倍管で読み出されていないためと考えられる。温度依存性は BSO シンチレーターが $-1\%/^{\circ}\text{C}$ 、Pr:LuAG シンチレーターが $0.5\%/^{\circ}\text{C}$ 、純 CsI シンチレーターが $-0.5\%/^{\circ}\text{C}$ と実験室の空調安定性を考慮すると実用上問題がないレベルであることがわかった。

放射線耐性については γ 線を最大 100Gy、中性子を最大 $10^{12}\text{neutrons}/\text{cm}^2$ 照射して発光量の変化を調べた。その結果、特に BSO は Natural Recovery 終了後の光量は未照射の光量ほぼおなじであり、非常に放射線耐性が高い素材であることが分かった。

謝辞

本研究を行うに当たって多くの人に助けいただきました。この場を借りて皆さんにお礼申し上げます。奈良女子大学理学部高エネルギー研究室の林井久樹教授、宮林謙吉准教授には丁寧なご指導をいただきました。現在は学長となられた野口誠之教授にも昨年度まで研究室ミーティングでは多くの有用な助言をいただきました。

放射線損傷試験ではKEKの中村勇助教、東京工業大学理学部の石塚正基助教、東京大学附属原子炉施設の仲川勉専門職員、安見厚史助手には丁寧なご説明や実験の手助けをしていただきました。

東北大学原子核理学研究施設の清水肇教授にはBSOサンプルやこれまでのノウハウ提供をいただきました。GEANT4シミュレーションではソフトウェアの整備の際に防衛大学松村徹助教にお世話になりました。

そして、同期の高坂玲加さん、辻知佳さん、馳川香菜実さん、M1の前田奈津子さんには実験の手伝いなどをしてもらいました。この研究を行うに当たって支えてくださった皆様に心から感謝致します。

参考文献

- [1] <http://www.slac.stanford.edu/xorg/ckmfitter/>
- [2] B. Aubert *et al.* (BaBar Collab.), Phys. Rev. Lett. **89**, 201802 (2002).
- [3] K. Abe *et al.* (Belle Collab.), Phys. Rev. D **66**, 071102 (2002).
- [4] Y. Grossman and M. P. Worah, Phys. Lett. B **395**, 241 (1997); D. London and A. Soni, Phys. Lett. B **407**, 61 (1997); T. Moroi, Phys. Lett. B **493**, 366 (2000); D. Chang, A. Masiero and H. Murayama, Phys. Rev. D **67**, 075013 (2003); S. Baek, T. Goto, Y. Okada and K. Okumura, Phys. Rev. D **64**, 095001 (2001).
- [5] K. F. Chen *et al.* (Belle Collab.), Phys. Rev. Lett. **98**, 031802 (2007).
- [6] B. Aubert *et al.* (BaBar Collab.), Phys. Rev. Lett. **99**, 161802 (2007); B. Aubert *et al.* (BaBar Collab.), Phys. Rev. D **76**, 091101 (2007).
- [7] S. K. Choi, S. L. Olsen *et al.* (Belle Collab.), Phys. Rev. Lett **91**, 262001 (2003).
- [8] S. K. Choi, S. L. Olsen *et al.* (Belle Collab.), Phys. Rev. Lett **100**, 112001 (2008).
- [9] A Fitting and Platting Package Using MOUNT
- [10] <http://www.nuclear.jp/rokan/>