97/09/23 日本物理学会

電磁カロリーメータ用 GSO クリスタルの特性 (4)

田中雅士、高野秀明、谷口安洋、原和彦*、金信弘、滝川紘治、
近藤都登、小林正明[A]、石橋俊之[B]、蔵重和央[B]、須佐憲三[B]

筑波大学 物理, KEK[A], 日立化成[B]

内容:

- GSO の特性
- 大型結晶の育成
- 大型結晶の光学特性
  - 放射線源を用いた測定
  - KEK $\pi 2$ ビームでの測定
- まとめ

GSO:Ce は Ce を付活した珪酸ガドリニウム (Gd_2SO_5)

主な結晶シンチレータ性能の比較

	NaI:Tℓ	CsI:Tℓ	CsI	BGO	PWO	GSO:Ce
密度 (g/cc)	3.67	4.53	4.53	7.13	8.2	6.71
放射長 (cm)	2.59	1.86	1.86	1.12	0.92	1.38
発光時間 (ns)	230	1050	∼30/1000	300	10/40	30-60*
発光波長 (nm)	415	550	305/480	480	430	430
相対発光量	1	0.85	0.02/0.1	0.1	0.003	0.2
屈折率	1.85	1.80	1.80	2.15	2.2	1.85
温度依存 (%/°C)				−1.5	−2.0	−0.5
融解点 (°C)	651	621	621	1050	930	1900
放射線耐性 (rad)	10^3	10^3	10^{4-5}	10^{4-5}	$>10^{4-7}$	$>10^8$
へき開性	(100)	none	none	none	(100)	(101)
吸湿性	強	弱	弱	無	無	無
育成長 (X_o)	>20	>20	>20	>20	>25	∼20
単価 (ドル /cc)	1-2	2	2	10-12	–	20-25

*Ce の付活量に依存 (1.5–0.5 mol%)

GSO:Ce の特長

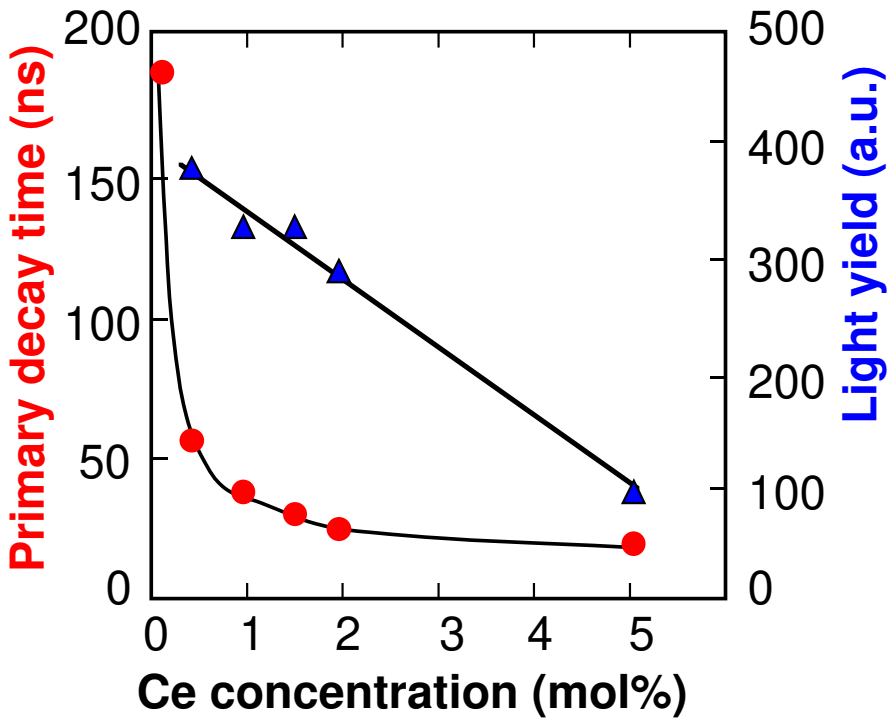
- 放射線耐性に優れている
- 発光時間が短い。特に **Ce** 濃度 **1.5 mol%** では **PWO** や **CsI** に匹敵する。
- 発光量が多い。高速のシンチレータの中では特に優れている。

⇒ 高放射線レベルでも作動し，高速応答性を持った高性能カロリメータへの適用のための開発研究

大型結晶の育成（日立化成）

◇ **0.5 mol%**(発光量が最大) の **GSO** は長さ約 **30cm (22X$_0$)** ×直径 **6cm** の結晶が安定に育成されている。

◇ 高速応答性のために **Ce** 濃度を **0.5** → **1.5 mol%** にして大型結晶化を図る

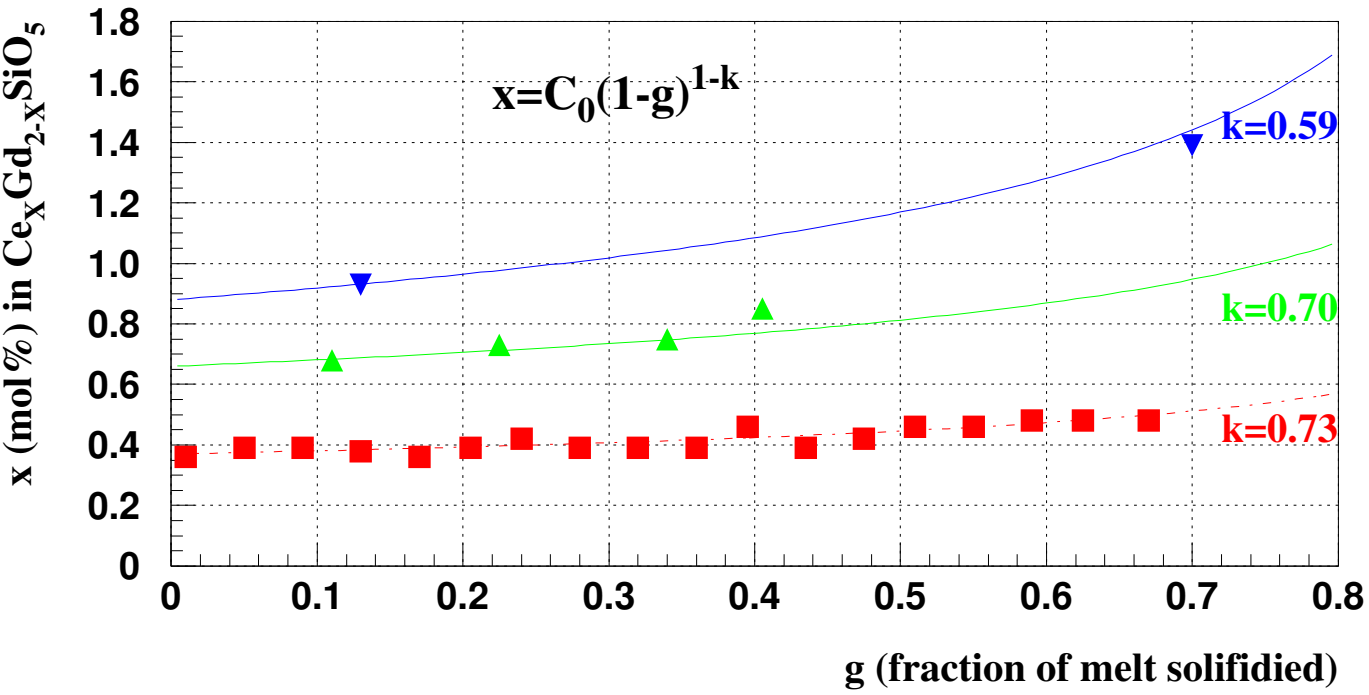


◇ 現在までに **1.5mol%** の **GSO** は，長さ約 **28cm**×直径 **8cm** のものが **4** 本作成された (＋いくつかの失敗)。気泡や割れを避けて
20 × 20 × 200 mm^3 のもの **2** 本 (**+1** 本 **KEK** へ)
25 × 25 × 260 mm^3 のもの **2** 本 (**+1** 本 上海展示用)
を切り出し / 全面研摩し，光学特性を評価した。

1.5 mol% GSO 育成の困難点

高濃度では，Ce の偏析係数が 1 よりかなり小さく，結晶化しにくい。
⇒ メルト中の Ce 濃度が多くなり，単結晶として成長しにくくなる。
⇒ 白濁した多結晶が途中に現れやすい。

◇ 育成された結晶での Ce 濃度の実測値と結晶の長手方向位置の関係
(メルト中の Ce の初期濃度は 0.5, 1.0, 1.5 mol%)



モル濃度 $x=C_o(1-g)^{1-k}$; g 結晶化率, k 偏析係数

⇒ 1.5 mol% については育成条件の最適化がまだ必要

◇ Ce 濃度は結晶の長手方向に異なる

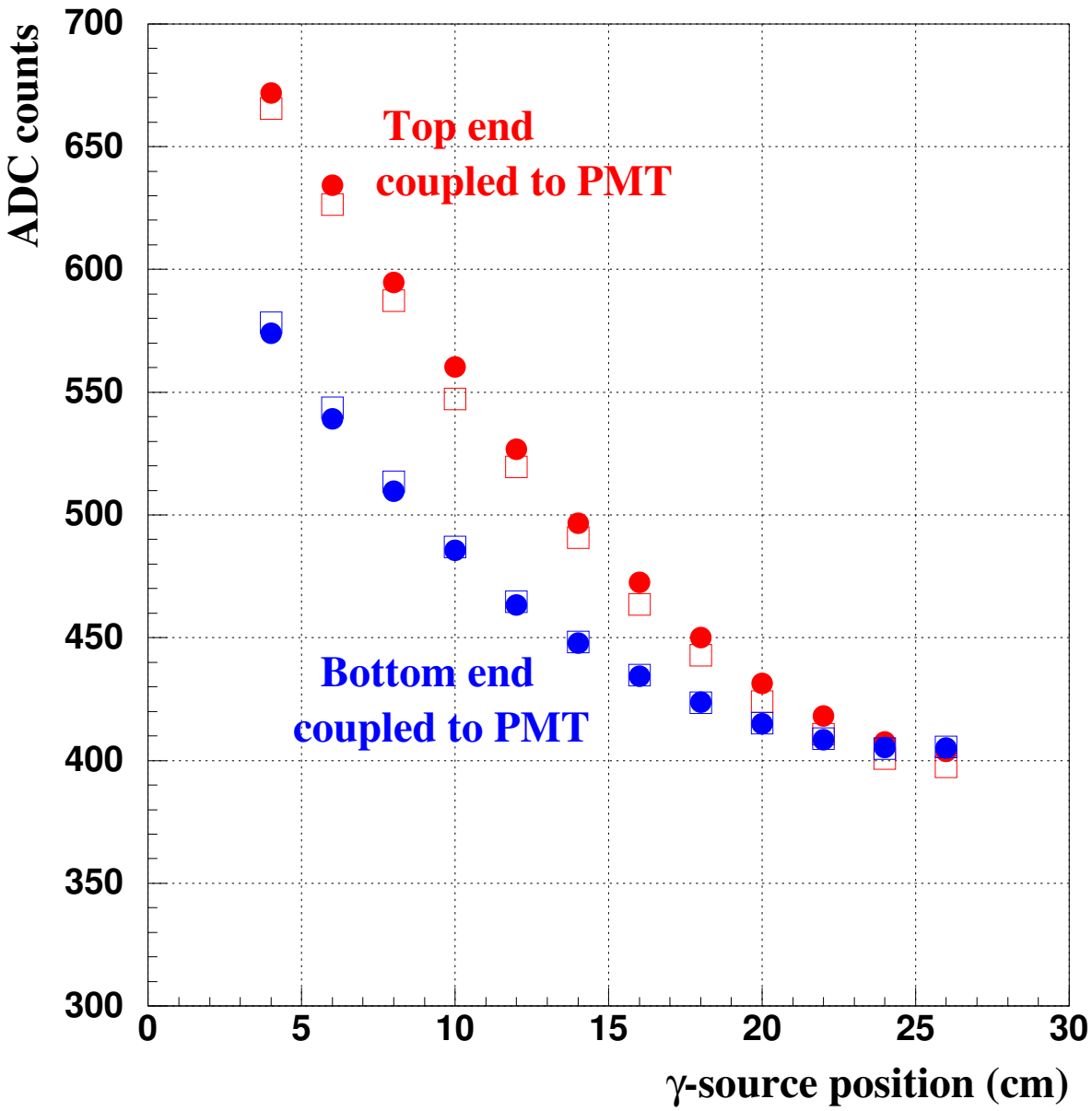
$\Rightarrow$ 0.5 mol% と比較すると発光波長領域での吸収の影響が大きい

小さなサンプル $(1\times1\times4\ \mathrm{cm}^3)$ に対しては:

$$\frac{\text{光量}\ (1.5\ \text{mol}\%)}{\text{光量}\ (0.5\ \text{mol}\%)} \approx 0.94$$

γ線源を用いた大型 1.5 mol% GSO 結晶の評価

◇ 26 cm のサンプルの光量一様性を^{137}Cs γ- 線源を用いて評価:



⇒ (反射材を用いない場合)

Top 端から読みだす → LY(26cm)/LY(4cm) ≈ 0.60

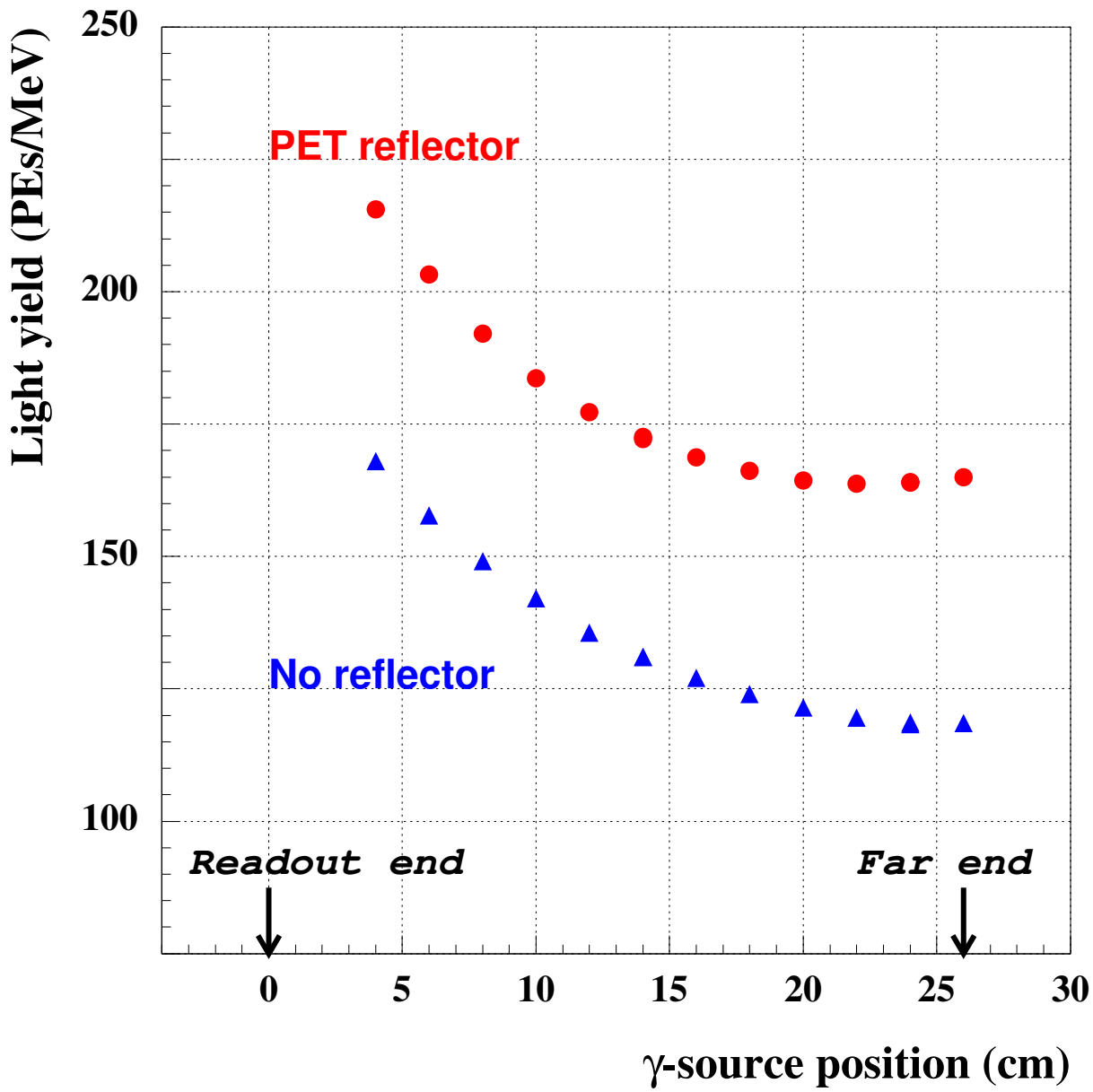
Bottom 端から読みだす → LY(26cm)/LY(4cm) ≈ 0.70

⇒ 2 つのサンプルは，同様な性能を示す

^{137}Cs γ- 線源による大型 GSO 光量絶対値の評価

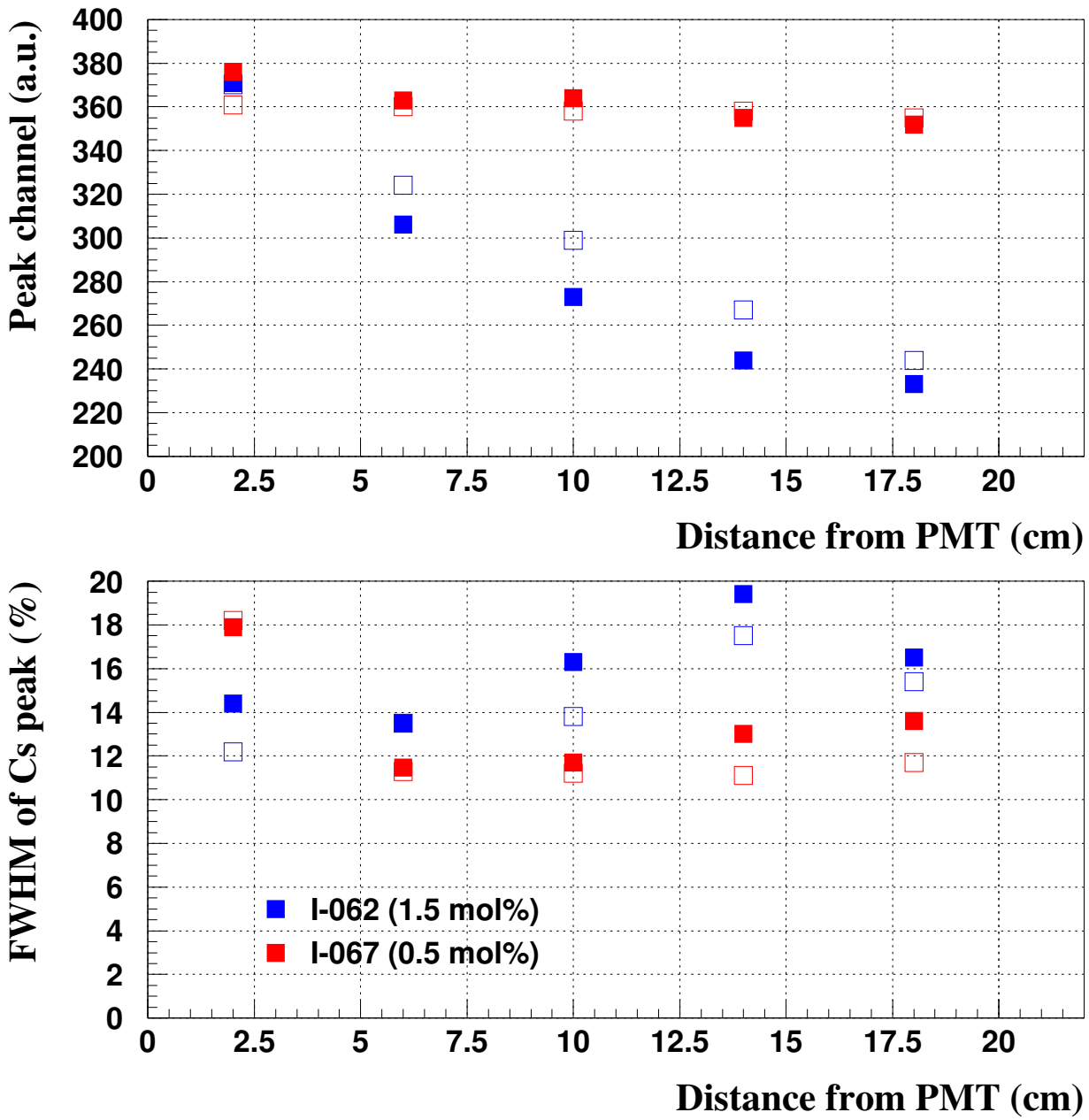
小さなサンプルについて，662 keV 光電ピークの幅から～500 光電子/MeV (QE=20%) と評価されている

→ 大きな 1.5 mol% サンプルの光電ピーク位置は小さなサンプルの 35-44% (PET 反射材を用いた場合)



⇒ 光電子数の統計 $\Delta E/E \sim 0.3\%/\sqrt{E}$ (E in GeV)

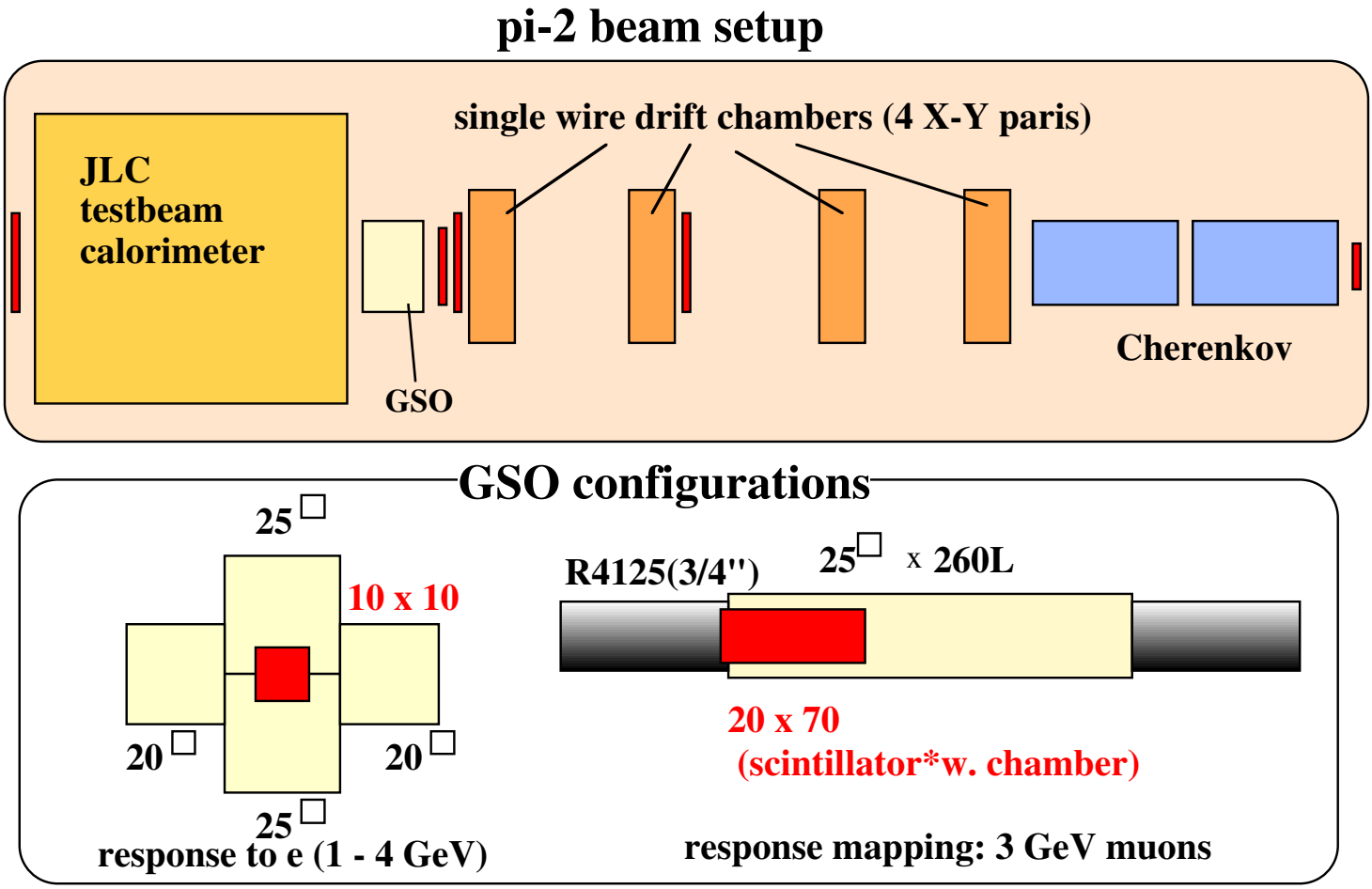
^{137}Cs γ- 線源による 20cmGSO の 0.5, 1.5mol% での比較



⇒ 光量一様性も分解能 (集光効率) の一様性も 0.5mol% の方が確かに優れている…

π-2 ビームを用いた大型 1.5mol%GSO の評価

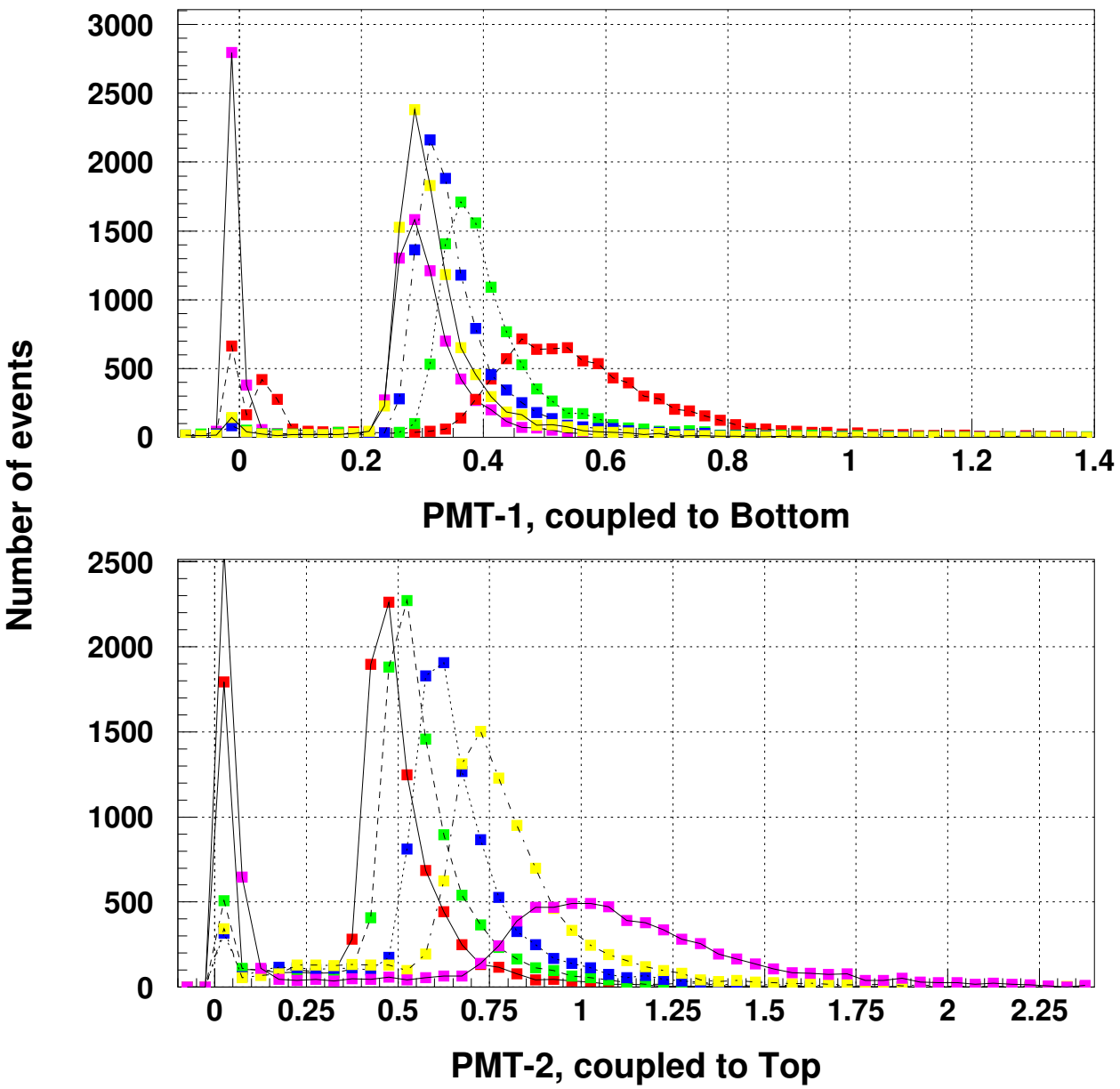
◇ 測定セットアップと測定データ



- ミュー粒子 3 GeV を横から入射する。ビーム位置はワイヤーチェンバーから求める。
- 電子 (1, 2, 3 GeV) を中央部に入射し，応答をみる。ただしシャワーの漏れのために正確な分解能の評価はできない。

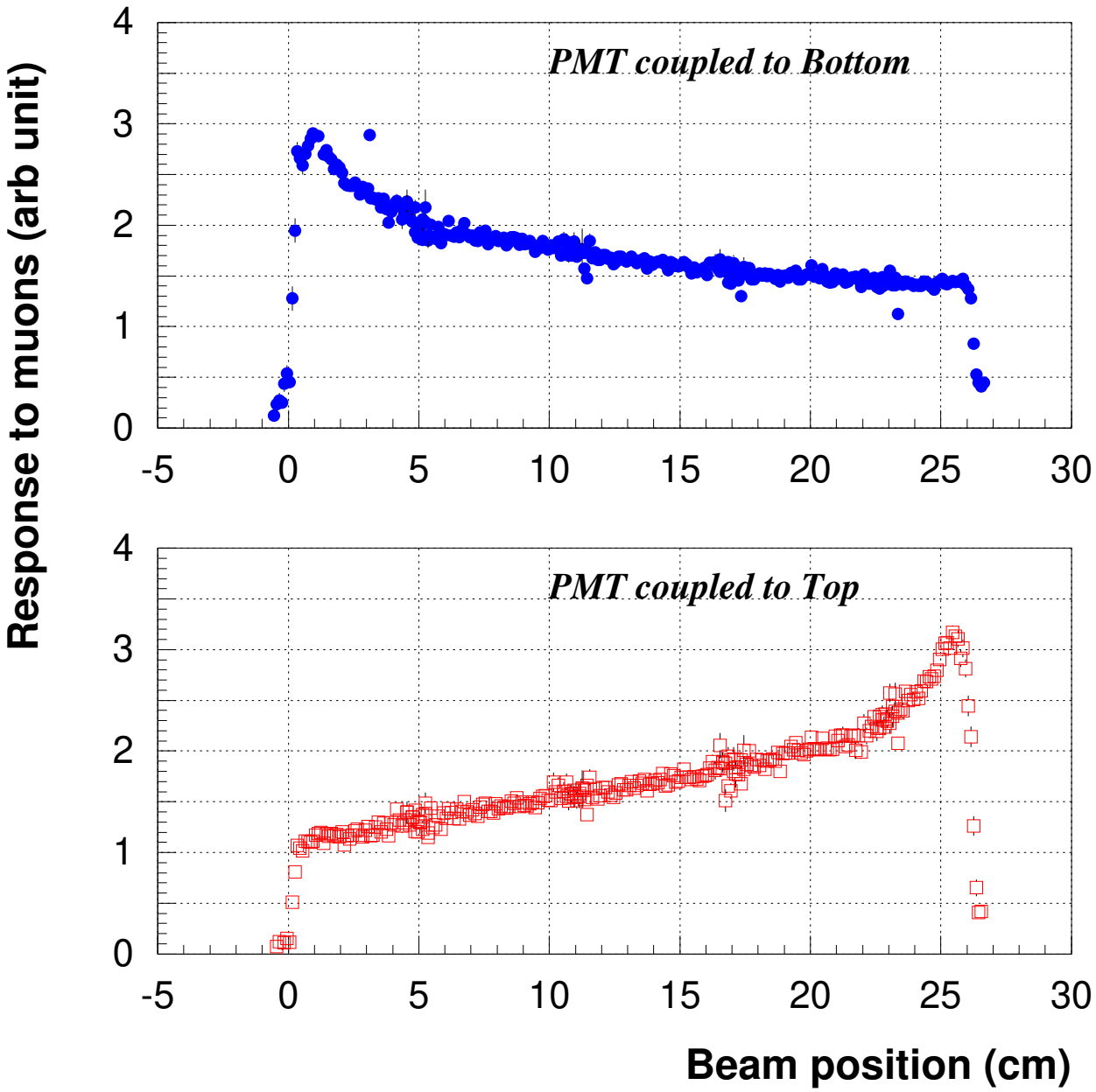
π-2 ミュー粒子ビームを用いた評価

◇ 3 GeV ミュー粒子に対する応答。6 cm ずつ GSO を移動し，全領域での応答一様性を評価。



π-2 ミュー粒子ビームを用いた評価

◇ 26 cm のサンプルの光量一様性をミュー粒子に対する平均発光量を用いて評価:

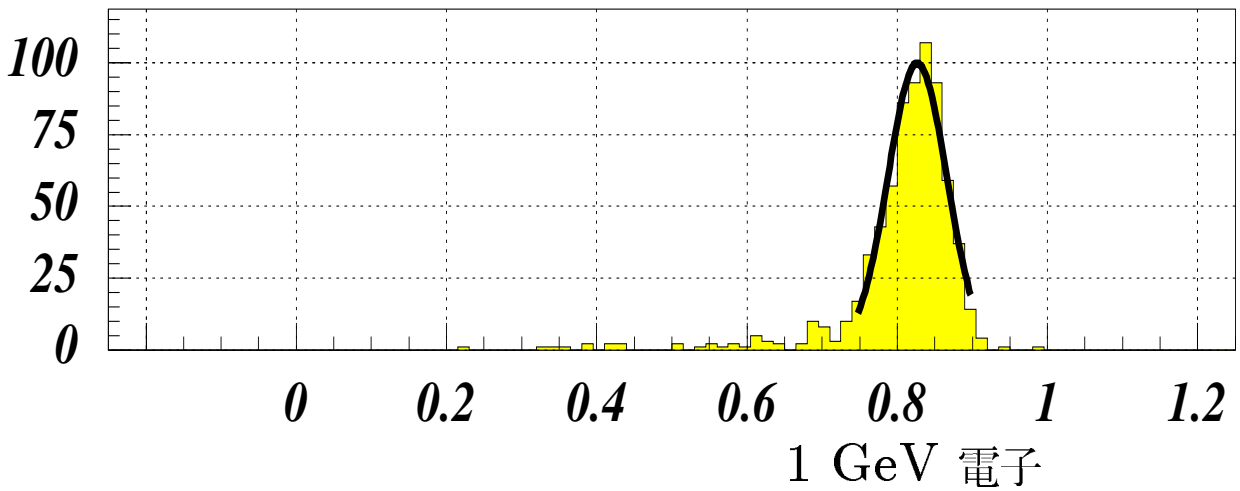


Top 端から読出 $\rightarrow$ LY(26cm)/LY(4cm) $\approx$ 0.55 (0.60 γ)

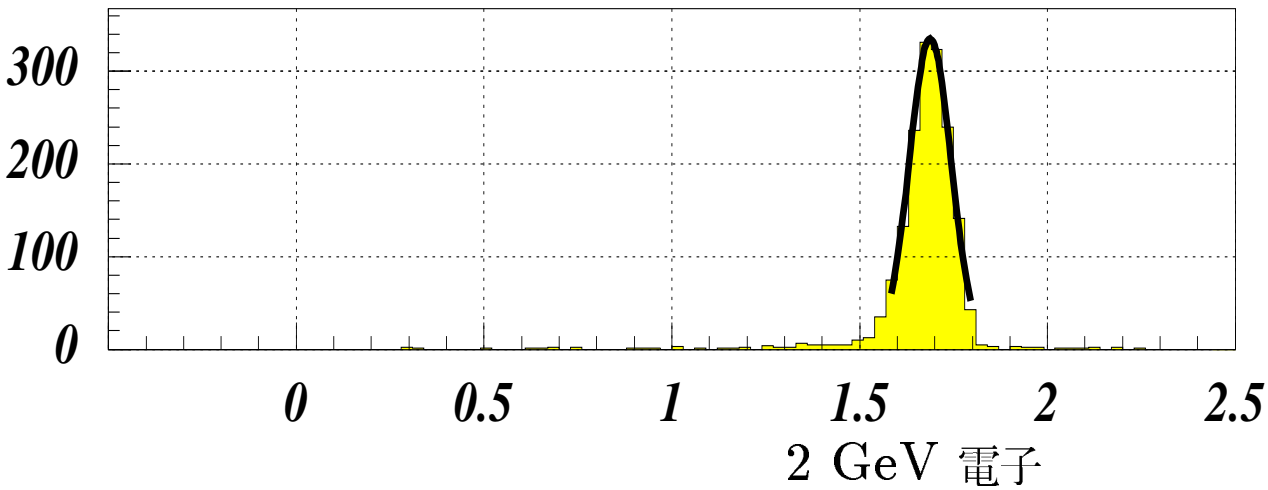
Bottom 端から $\rightarrow$ LY(26cm)/LY(4cm) $\approx$ 0.68 (0.70 γ)

π-2 電子ビームを用いた評価

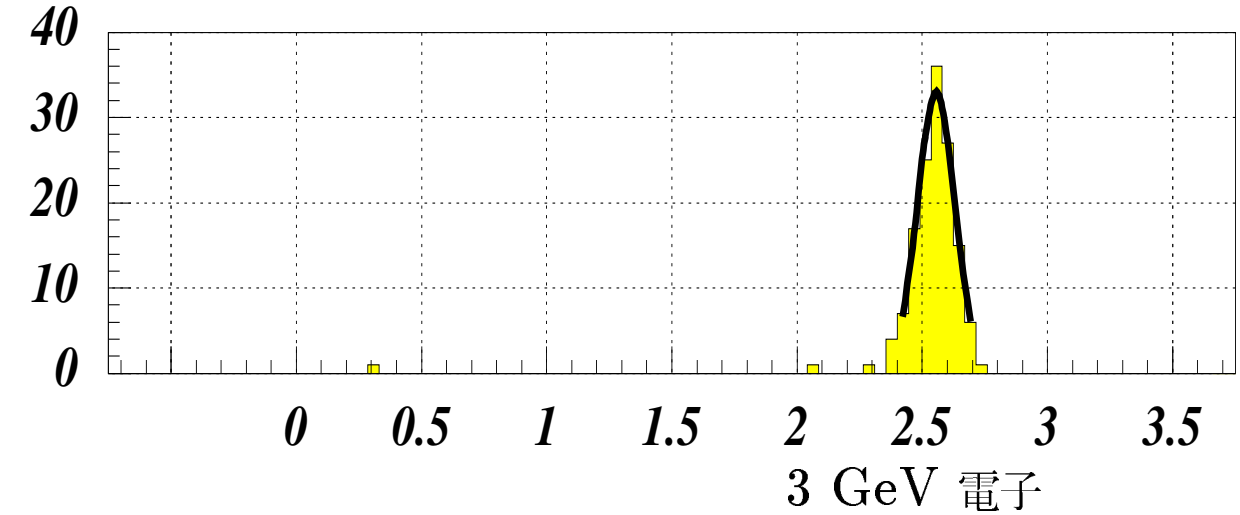
◇ 4 つの GSO 信号の和



1 GeV 電子



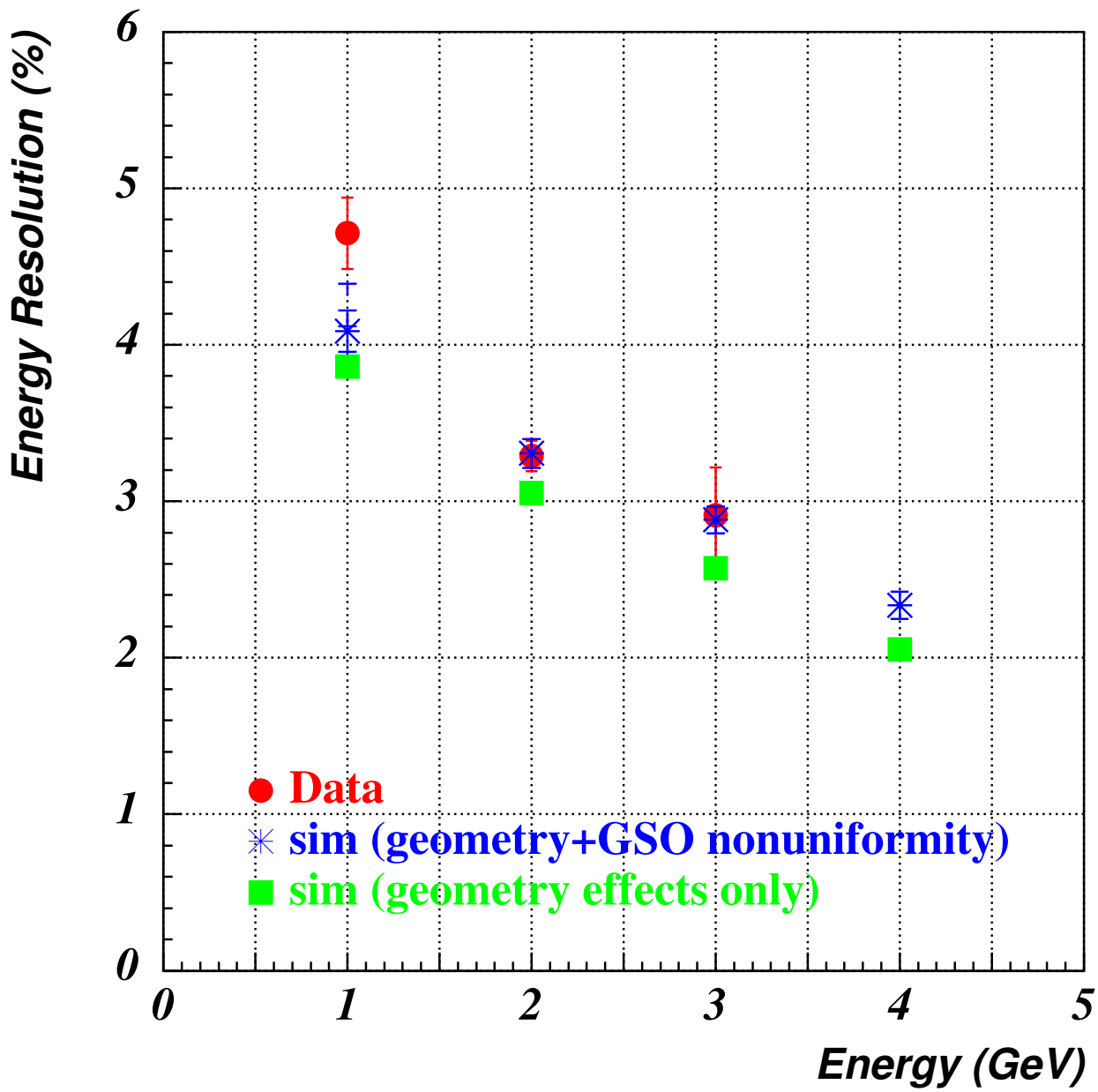
2 GeV 電子



3 GeV 電子

π-2 電子ビームを用いた評価

◇ 電子のエネルギー分解能



結果: $\Delta E/E \sim 4.5\%/\sqrt{E}$ が得られた。

分解能劣化には，横への漏れによる効果がほとんどで，GSO の奥行き方向の応答不均一性の効果は小さい。

まとめ

◇ Ce を付活した Gd_2SiO_5 シンチレータは高速応答性，発光量ともに優れ，高性能な電磁カロリメータへの応用が期待される。

◇ GSO の大型化は 0.5mol% については $20X_0$ まで可能である。1.5mol% では現在のところ 20cm（約 $15X_0$）まではほぼ可能であるが，より大型化には育成条件の最適化が必要である。

◇ 26cm の大型 GSO について光学特性を γ 線源と π-2 ビームで評価した。

- 1.5mol% ではシンチレータ光の吸収のために PMT から遠いほど検出できる光量は徐々に減少し，26cm の位置からは 4cm の位置からの約 70%。4cm より近くでは立体角のために急増し，PMT の近くでは 5 割程度増加する。
- 大型 1.5mol%GSO の光量は小型の 35%(26cm)-44%(4cm) である。発光量は 1MeV 当たり 26cm の位置でも 170 光電子と推定される。(QE=20% の場合)
- 25mm 角 (26cm 長) 2 本 と 20mm 角 (20cm 長) 2 本を組み合わせて，電子ビームでエネルギー分解能を測定したところ，約 $4.5\%/\sqrt{E}$ の分解能を得た。この結果を GEANT シミュレーションと比較したところ，劣化の原因はシャワーの漏れでほぼ説明でき，GSO 奥行き方向の非一様性の影響は小さいことが示された。