

平成 23 年 6 月 15 日現在

機関番号：22401

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008 ~ 2010

課題番号：20560046

研究課題名 (和文) 無機シンチレータの光子収率の系統的研究

研究課題名 (英文) Light yield in various inorganic scintillators

研究代表者

柴村 英道 (SHIBAMURA EIDO)

埼玉県立大学・保健医療福祉学部・教授

研究者番号：30100605

研究成果の概要 (和文) : 無機シンチレータ中においてガンマ線照射により作られる光子数を定量した。これから、CsI(Tl)および CsI(Na)、LSO、BGO、GSO、CWO、PWO、LaBr₃(Ce) に対する光子収率を求めた。今回求めた CsI(Tl)の光子収率は最近の理論ともよく合っていた。このときシンチレータと組み合わせて用いる光電子増倍管についても特性を調査した。また、無機シンチレータの光子収率の温度特性についても予備的な研究を行った。

研究成果の概要 (英文) : The light yield was determined for 662 keV gamma rays in CsI(Tl), CsI(Na), LSO, BGO, GSO, CWO, PWO, and LaBr₃(Ce) crystals from the numbers of photoelectrons measured for the combination of a crystal and a photomultiplier tube (PMT). The value determined for CsI(Tl) in the present study shows good agreement with the theoretical value presented recently.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
21 年度	500,000	150,000	650,000
22 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用物理学一般

キーワード：シンチレータ、光子収率、ガンマ線、電子増倍管、臭化ランタン

1. 研究開始当初の背景

シンチレータはガンマ線検出器として広く使用されている。通常は光電子増倍管 (PMT) と接合し、ガンマ線によりシンチレータ内で発生した光子を PMT で計測する。柴村らは以前 PMT における光電子数の絶対測定に成功している。この方法ですでに NaI(Tl) などいくつかの無機シンチレータに

においてガンマ線照射により生成される光子数を測定し、光子収率あるいは 1 光子を生成するのに必要な平均エネルギー (W_s 値) として報告した。

一方道家らは最近 NaI(Tl) や CsI(Tl) の W_s 値を、ショックレーの半導体モデルに基づいて再度計算した。この理論を確認することにも意義がある。

2. 研究の目的

各種無機シンチレータの光子収率を正確に測定することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) PMT の光ダイオード動作

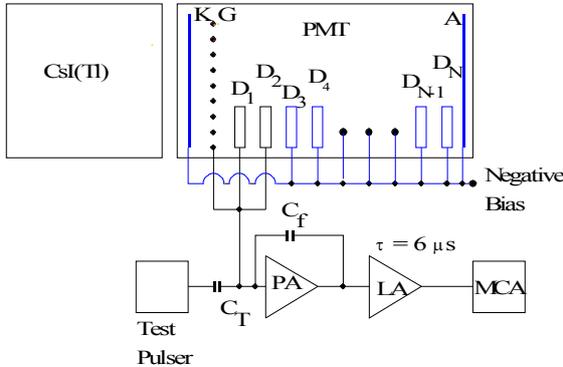


図 1. 光ダイオード結線の光電子増倍管によるシンチレーション測定

PMT を図 1 のように結線し-100 V 程度の電圧を印加すると、PMT は電子増幅率=1 で動作する。これを我々は Photo-Diode Mode と名付けた。適切に校正した電荷有感型の前置増幅器 (PA) を用いることで光電子数 N_{PE} を決めることができる。すると、シンチレータ[ここでは CsI(Tl)] 中で生成した光子数 N_{PH} は $N_{PH} = N_{PE} / (C_f * Q)$ で得られる。ただし、 C_f は光子の PMT による集光率、 Q は PMT の量子効率を表す。この方法で光子数 N_{PH} を決めるためには C_f と Q とを適切に評価する必要がある。シンチレータと接合した場合の PMT に集められる光子の割合を求めるためには、発生した光子を最後まで追跡する必要がある。そのためには、いろいろな角度で PMT 表面に入射する光の反射率が必要になる。また、量子効率 Q についても、メーカーにより提供される値は垂直入射したときのものであるが、実際にはいろいろな角度で入射する光について考慮する必要がある。これらの点は、これまでの文献では十分に示されていない。そこで、次節で述べるような PMT の光学特性の調査を行った。

(2) PMT の量子効率と反射率の入射光角度依存特性の測定

我々は、図 2 に示すような装置を製作した。RGB-LED は波長赤緑青の三色の発光ダイオードを用いた光源でパルス動作させる。ライトガイドはアクリル製で、24 角形のプリズムをほぼ等分した断面をもっており、PMT の窓材とほぼ同じ屈折率を持っている。したがって図 2 のように入射角 θ_K で PMT に入射した

光は、ライトガイドと PMT 窓の境界を直進し PMT 光陰極に到達する。入射角は 15 度から 75 度まで 15 度刻みで調節することができる。

ある角度で入射した光により PMT-1 で生じた光電子数を測定することにより入射角 θ_K で PMT に入射したときの量子効率を求めることができる。

また、PMT-2 の信号を測定することにより入射角 θ_K で PMT に入射したときの PMT-1 の反射率を求めることができる。

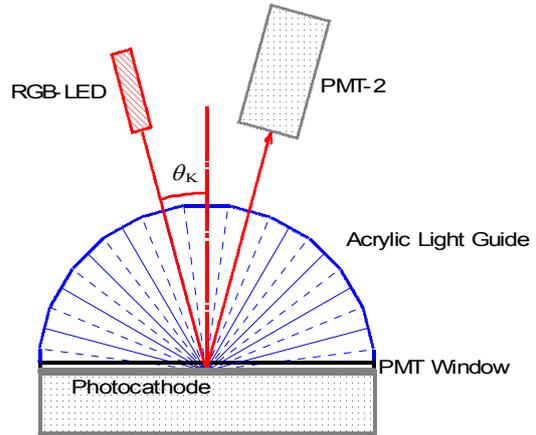


図 2. 光電子増倍管の量子効率と反射率の入射角依存特性計測装置

図 3 に R376PMT の反射率を示す。ただし積分球を用いて垂直入射光に対する反射率を測定し、我々の 15 度入射の場合の反射率とした。この反射率と Chyba と Mandel (J. Opt. Soc. Amer. Vol. B5, 1988, 1305) の式とから R376PMT の光陰極の光学モデル、すなわち厚みと各波長に対する複素屈折率、を決定した。その結果は、厚みは 12.8 ± 1.7 nm で、屈折率は 470 nm 光に対し $3.3 + 0.4i$ 、525 nm 光に対し $4.0 + 0.9i$ 、640 nm 光に対し $4.9 + 1.6i$ となった。この厚みと屈折率とから光陰極の反射率を計算すると図 3 の曲線が得られた。実験値が良く再現されていることが分かる。

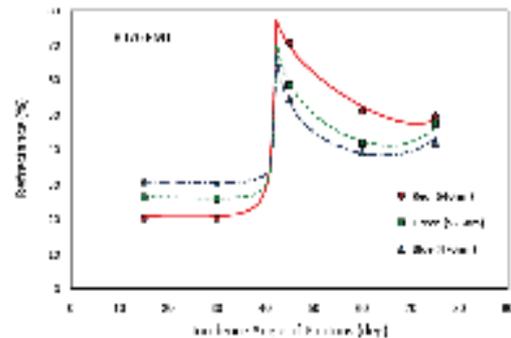


図 3. R376PMT の反射率

図4に見かけの量子効率（光電子数/入射光子数）を示す。図の縦軸はPMTメーカーの測定による量子効率で値付けをした。

PMTをシンチレータと結合した場合、PMT表面で反射した光の相当部分はシンチレータケース内面で反射して再度PMTに達すると考えられる。したがって、PMTはメーカー提供の量子効率より相当高い光-光電子変換効率で動作していると考えられる。

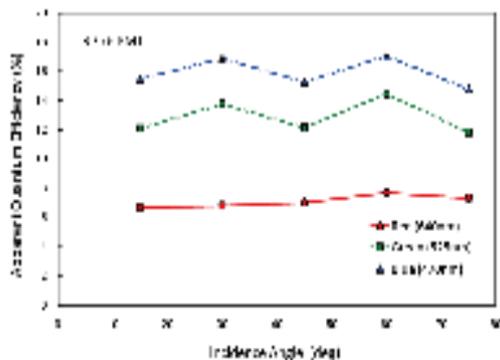


図4. R376PMTの量子効率（見かけの光-光電子変換効率）

図5はシンチレータと接合した場合のPMTの実質的な量子効率を示す。当然ながら、見かけの量子効率より高くなっていることが分かる。特に45度で入射したときの効率が大きい。これは、この角度で入射したときの反射率が50%より大きいにもかかわらず、見かけの量子効率あまり小さくないことによる。なお、PMT窓の屈折率はおおよそ1.5であるので、光陰極内面での全反射の臨界角は約42度である。45度で効率が特に大きいのはこのためと考えられる。

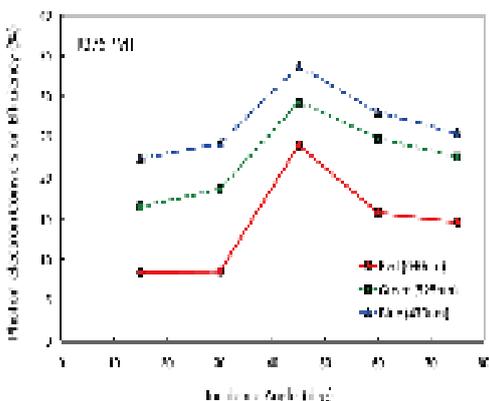


図5. R376PMTの実質的量子効率（PMT陰極に入射しそこで吸収されるか、そこを通過した光が光電子に変換される効率）

LaBr₃シンチレータをR376PMTに接合し取得した¹³⁷Csガンマ線源の波高スペクトルを図6に、⁶⁰Coガンマ線源の波高スペクトルを図7に、²²Naガンマ線源の波高スペクトルを図8に示す。

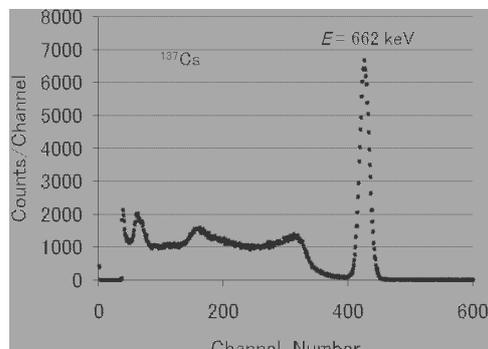


図6. LaBr₃シンチレータとR376PMTによる¹³⁷Csガンマ線の波高スペクトル

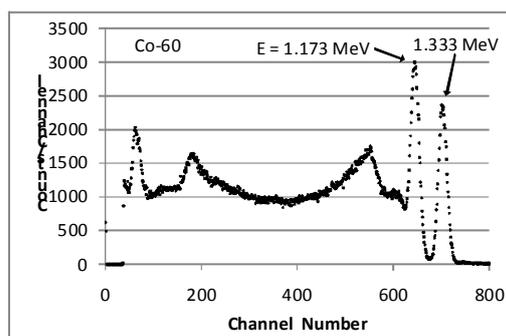


図7. LaBr₃シンチレータとR376PMTによる⁶⁰Coガンマ線の波高スペクトル

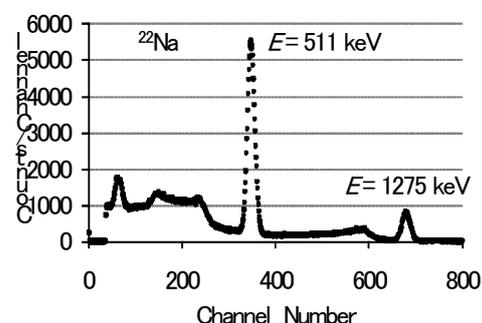


図8. LaBr₃シンチレータとR376PMTによる²²Naガンマ線の波高スペクトル

図9に各種無機シンチレータの蛍光波長とメーカー提供のR376PMTの（見かけの）量子効率を示す。シンチレータごとの蛍光波長を考慮し、図3、図5に示した反射率と光電子変換効率とから(1) C_f と Q を求め、各シンチレータの光子収率を求めた。

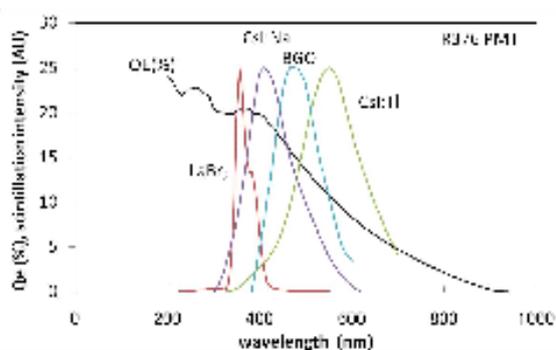


図9. R376PMTの量子効率と各種無機シンチレータの蛍光波長

4. 研究成果

各種無機シンチレータの光子収率は表1のようになった。LaBr₃は分解能が良いことで注目されているが、光子収率も大きいことが分かった。

表1 各種無機シンチレータの光子収率

シンチレータ	光子収率 (10 ⁴ 光子/MeV)
CsI(Tl)	6.76
CsI(Na)	7.36
PWO	0.334
BGO	1.19
YAP(Ce)	2.52
LSO(Ce)	4.58
GSO(Ce)	1.56
CWO	2.63
LaBr ₃ (Ce)	8.02

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Shinichi Sasaki, Hiroko Tawara, Kiwamu Saito, and Eido Shibamura, Ws values in Several Inorganic Scintillation Crystals, for Gamma Rays, IEEE transactions on Nuclear Science, 査読有, Vol. 57, 2010, 1282 - 1286

[学会発表] (計4件)

- ① Shinichi Sasaki, Hiroko Tawara, Kiwamu Saito, Eido Shibamura, Ws-values in

Several Inorganic Scintillation Crystals for Gamma-rays, Scint 2009 国際会議, 2009年6月8日, 韓国, 済州島

- ② Eido Shibamura, Kiwamu Saito, Shinichi Sasaki, Hiroko Tawara, Measurement of quantum efficiency and gain of PMT as a function of temperature from 150 K to 300 K to determine the temperature dependence of absolute photon yield of inorganic scintillators, Scint 2009 国際会議, 2009年6月9日, 韓国, 済州島
- ③ 齋藤 究, 佐々木 慎一, 俵 裕子, 柴村 英道, 混合希ガスにおける電離・励起原子のエネルギー移行過程, 応用物理学会, 2010年9月16日, 長崎市
- ④ 柴村英道, 佐々木慎一, 俵裕子, 齋藤究, ウルトラバイアルカリ PMT(浜松ホトニクス)の特性について, 研究会 放射線検出器とその応用, 2011年2月2日, つくば市

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴村 英道 (SHIBAMURA EIDO)

埼玉県立大学・保健医療福祉学部・教授

研究者番号: 30100605

(2) 研究分担者

佐々木 慎一 (SASAKI SHINICHI)

高エネ研・放射線科学センター・教授

研究者番号: 80178649

(3)連携研究者
該当なし ()

研究者番号：