## シンチレーション現象の評価を志向した

# パルスX線ストリークカメラの開発

柳田健之<sup>A</sup>、藤本裕<sup>A</sup>、吉川彰<sup>A</sup>、河口範明<sup>A,B</sup>、横田有為<sup>A</sup>、前尾修司<sup>A</sup>、石津澄人<sup>B</sup>、福田健太郎<sup>A,B</sup>、Jan Pejchal<sup>A</sup>、鎌田圭<sup>A</sup>、阿部直人<sup>A</sup>、田中秀彦<sup>A</sup>、古谷優貴<sup>A</sup>、深堀明博<sup>A</sup>、内山公朗<sup>C</sup>、森邦芳<sup>C</sup>、北野謙<sup>D</sup>

森邦芳<sup>C</sup>、北野謙<sup>D</sup> 東北大学多元物質科学研究所<sup>A</sup>、トクヤマ<sup>B</sup>、浜松ホトニクス<sup>C</sup>、真空光学<sup>D</sup> **Development of Pulse X-ray excitation Streak System for Evaluations for Scintillators**T. Yanagida<sup>A</sup>, Y. Fujimoto<sup>A</sup>, A. Yoshikawa<sup>A</sup> N. Kawaguchi<sup>B</sup>, Y. Yokota<sup>A</sup>, S. Maeo<sup>A</sup>, S. Ishizu<sup>B</sup>, K. Fukuda<sup>B</sup>, J. Pejchal<sup>A</sup>, K. Kamada<sup>A</sup>, N. Abe<sup>A</sup>, H. Tanaka<sup>A</sup>, Y. Furuya<sup>A</sup>, and A. Fukabori<sup>A</sup>, K. Uchiyama<sup>C</sup>, K. Mori<sup>C</sup>, and K. Kitano<sup>D</sup>

IMRAM, Tohoku University<sup>A</sup>, Tokuyama., Co. Ltd<sup>B</sup>, Hamamatsu Photonics Cooperation <sup>C</sup>, Vacuum and Optical Instruments.

Scintillators have been widely used as a main device of radiation detectors for the purpose of applying medicine, security, process facilities, exploring resources, and basic physics. To evaluate the scintillation decay kinetics precisely, Streak camera system equipped with pulsed X-ray source has been developed. The wavelength sensitivity spreads from VUV to near Infrared region (110-900 nm). The timing resolution is below 100 ps which is dominated by that of the excitation source. In the present work, using several famous scintillators, including BaF<sub>2</sub>, KMgF<sub>3</sub>, Nd:LaF<sub>3</sub>, Pr:LuAG,, the first light of the system is demonstrated.

## 1. はじめに

結晶シンチレータは核医学 (PET、X線CT)、資源探査、空港や港湾の荷物検査機などのセキュリティ分野、原子力発電所におけるモニタ、宇宙・素粒子といった基礎物制はなど、広汎な分野で利用されている放射線を出てある。シンチレータレータに放射線を光電吸収などにより電子が上の変換する未入ト物質と、その電子のエネらを発光に変換する発光中心元素から成子を発光に変換する発光中心元素から成る。一般的な開発手法としては、化物性研究者が結晶材料を合成後に、光物性研究者が活品材料を合成後に、光物性研究者が活品材料を合成後に、光物性研究者が活品材料を合成後に、光物性研究者がに対して、実際のユーザーである研究者がに関立といった過程が取られる。

1990年代まではそのような形式で研究が進んできたが、2000年代に入り多くの、特に応用する立場での研究者側から、フォトルミネッセンスなど発光中心元素を直接励起した場合と、放射線照射時におけるホスト材料励起時の応答が異なるという指摘がなされてきた。少し考えれば自明であるが、例えば単結晶シンチレータを考えた場合、完全結晶というものが現実には存在し得ないため、我々の手元にある結晶には少なからず欠陥が存在する。その欠陥も当然ある種の準位を形成するため、発光中心励起では直接観測できなかったエネルギー輸送経路が生じてしまい、フォトルミネッセンス等の結果と齟齬が生じることとなる。

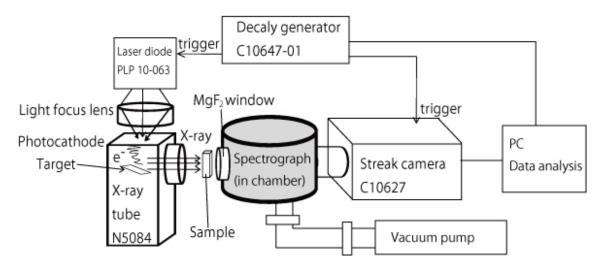


図 1 開発したパルス X 線励起型ストリークカメラシステムの概観。

	BaF <sub>2</sub>	KMgF <sub>3</sub>	Nd:LaF <sub>3</sub>	Pr:LuAG
発光機構	内殻準位	内殻準位	添加物	添加物
発光波長	195 nm	150 nm	175 nm	315 nm

表1 用いた結晶シンチレータサンプル群の発光機構と中心発光波長。

従来の研究においては、発光中心を直接 励起して波長分解して蛍光寿命等を調査す るフォトルミネッセンス型の測定と、ホストを 直接励起するが波長情報は完全に無視し て蛍光寿命や絶対発光量を測定する放射 線計測型の測定 [1] が独立に存在し、これ らを繋ぐ情報というのは観測されてこなかっ た。我々は、このような光物性物理学(数 eV ) と高エネルギー物理学 (数 MeV) の 融合を試みるべく、パルスX線源で励起し、 なおかつ波長分解した蛍光寿命を測定する パルスX線ストリークシステムの開発を行い、 その性能を検証するため、BaF2、KMgF3と いった自己発光型シンチレータ、Nd:LaF3や Pr:LuAGといった発光中心添加型の既存材 料を評価した。特に前者の材料は高エネル ギー光子により内殻準位を励起せねば発光 しないことが知られており、従来の低エネル

ギー光子励起 (フォトルミネッセンス) 型の ストリークシステム [2] などでは発光を得る ことが出来ない。

#### 2. システムの概要

我々の開発したシステムの概要を図1に示す。光源として用いたのは、浜松ホトニクス社製 N5084 型 X 線管である[3]。本 X 線源はレーザーダイオードによって生じた光子が X 線管の光電面にて光電吸収され、そこから飛び出した光電子がタングステンターゲットに衝突することによって X 線を発生する。そのためスタートのトリガー情報をレーザーダイオードのタイミングで規定することが可能となる。

X 線発生源の近傍にはサンプルがセットされており、サンプルから生じたシンチレーション光は分光器によって波長分解され、

ストリーク管に入射し、最後に CCD によって検出される。従来の光物性的な観点からの計測装置では真空紫外域まで測定する場合、真空状態にサンプルを置くためのチャンバー等が装備されているが、ここは高エネルギー物理学の形式に従い、分光器の入射窓とサンプルは光学グリースを用いて接着した。試験段階では、従来のチャンバーと光学系を用いる検出法よりも数倍検出効率が向上することを確認している。

### 3. 実験方法

表 1 には本実験で測定したサンプルを 示す。BaF₂、KMgF₃は共にX線やγ線の照 射を受けた際、オージェフリー発光を示すこ とが知られている。これらは共に高エネルギ 一光子や電子による励起時にしか発光を示 さないため、開発した機器の検証には極め て適している。フォトルミネッセンスにおいて も蛍光を示すものとし、Nd:LaFa結晶および Pr:LuAG結晶を選択した。これらの結晶は希 土類元素の 5d-4f 遷移に伴う速く、かつ蛍 光波長の短い発光が特徴である。本装置は 波長範囲として 110-900 nm、時間軸として 数百ピコから数ミリ秒まで対応可能である が、装置の能力を評価すべく従来の高エネ ルギー物理学の領域では一般に検出が困 難であるとされている、真空紫外、近紫外域 の発光を呈するものを意識的に選択した。

#### 4. 実験結果と考察

図 2 には $KMgF_3$ のストリーク像を示す。  $KMgF_3$ は 140-190 nm において内殻発光による、サブナノ秒レベルの高速な発光を示すことが知られているが、本図に示すように、明確に検出されている。図 3 は白枠で括っ

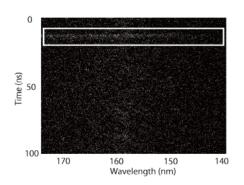


図 2 KMgF $_3$  シンチレータのストリークイメージ。

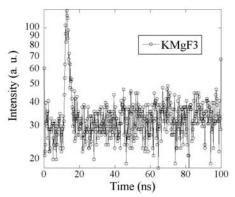


図 3 KMgF<sub>3</sub> の蛍光寿命。

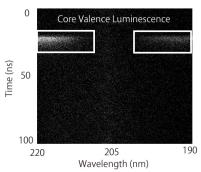


図  $4 \text{ BaF}_2$  のストリークイメージ。

た部分を時間軸に射影した蛍光寿命である。 過去の結果と同様に、約 1 ナノ秒程度の 蛍光減衰時定数が得られている。

図 4-6 にはそれぞれ  $BaF_2$ 、 $Nd:LaF_3$ 、 Pr:LuAG のストリークイメージを掲載した。  $BaF_2$  では195、220 nm のオージェフリー発光が、 $Nd:LaF_3$  では 180 nm の $Nd^{3+}$  の 5d-4f 遷移による発光が、Pr:LuAG では 315 nm 近辺の  $Pr^{3+}$  の 5d-4f 遷移に伴う発光はそれぞれ検出されている。KMgF3 と

同様に蛍光寿命を求めたところ、過去の結果とほぼ一致しており、開発した検出器が正しく動作していることが確認された。

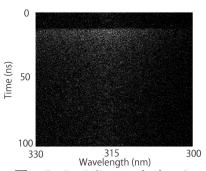


図 6 Pr:LuAG のストリーク

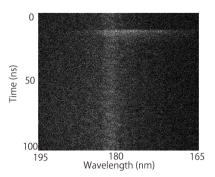


図  $5 \text{ Nd:LaF}_3$  のストリークイメージ。

### 5. まとめと今後の課題

本研究では世界初となるパルスX線励起型ストリークカメラの開発を行った。装置の性能を検証するため、我々は既存物質として有名な  $KMgF_3$ 、 $BaF_2$ 、 $Nd:LaF_3$ 、Pr:LuAGといったシンチレータの測定を行った。その結果、当該装置は我々の当初の目論見通りの動作を示すことが確認された。特に真空紫外領域においては、従来のチャンバーと集光系を用いるシステムに比べ、大幅な

省スペース化と高感度化を達成した。これはまさに光物性物理学と高エネルギー物理学の技術を融合した成果であると言える。

実験を行う過程で問題となったことは、励起源である X 線の出力があまり大きくないことであった。この点に関しては、今後より高電圧を印加可能な X 線管を開発するなどして改良を加えたいと考えている。また、高エネルギー宇宙物理学などで一般に用いられている X 線望遠鏡の原理を利用することも検討していきたい。

集光系に関しても、我々はサンプルの合成から研究を開始するため、得られた千差万別の大きさのサンプルに対応するシステムの構築が必要である。この点に関しては、今後は材料に応じたライトガイドを開発するなどで改良を加えていきたいと考えている。加えて、荷電粒子励起型など、ほかの励起源の開発も行っていきたいと考えている。

#### 参考文献

- [1] S. E. Derenzo et al., IEEE Nucl. Trans. Sci., 41 (1994) 698
- [2] N. Sarukura et al., RSI., submitted (2009).
- [3]森、阿井、稲垣ほか、Proceedings of Symposium on High Speed Photography and Photonics 2003 (2003)
- [4] C. Shi., et al., Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, 79 (1996) 87