

レーザーコンプトンガンマ線による非破壊核物質検知システムの開発

NON-DESTRUCTIVE NUCLEAR MATERIAL INSPECTION SYSTEM BY USING LASER-COMPTON SCATTERED GAMMA-RAY

大東出^{#,A)}, 大垣英明^{A)}, 神門正城^{B)}, クリストファー・エンジェル^{B)},
静間俊行^{B)}, 早川岳人^{B)}, 羽島良一^{B)}

^{A)}京都大学エネルギー理工学研究所

^{B)}日本原子力研究開発機構

Izuru Daito^{#,A)}, Hideaki Ohgaki^{A)}, Masaki Kando^{B)}, Christopher Angell^{B)},
Toshiyuki Shizuma^{B)}, Takehito Hayakawa^{B)}, Ryoichi Hajima^{B)}

^{A)} Institute of Advanced Energy, Kyoto University

^{B)} Japan Atomic Energy Agency

Abstract

A non-destructive inspection system of nuclear material hidden in cargo containers is under development. The system is able to detect and identify the nuclide in the container by employing Nuclear Resonance Fluorescence (NRF) triggered by mono-energetic Laser Compton Scattered (LCS) Gamma-ray tuned at the energy of the nuclear resonance. In order to achieve the higher LCS gamma-ray flux without increasing the laser pulse energy, pulse compression system for Nd:YAG laser by using Stimulated Brillouin Scattering is developed. The laser pulse which duration of 10 ns is compressed down to a few hundreds ps. The LCS gamma-ray flux achieved is 50 times higher than the flux without pulse compression. As a demonstration of the inspection of hidden material, a measurement of NRF gamma-rays from silver block hidden in metallic box by using LCS gamma-ray upto 400 keV will be performed by using 150 MeV electron beam from a racetrack Microtron accelerator and the pulse compressed Nd:YAG laser.

1. はじめに

近年核エネルギーの利用が世界的に広がっていくとともに、それら核技術保有国の情勢不安による不法な核拡散、あるいは核テロ等の可能性が危惧されており、海上コンテナ中にかくされた特定核物質の非破壊検知システムの開発が望まれている。核物質からの崩壊ガンマ線を測定する、パッシブなシステムも開発されており、一定の成果をあげているが、崩壊強度が弱く、ガンマ線エネルギーも低いため検知が困難な ^{238}U 等に対しては限界がある。そのため、アクティブな検知の方法としてレーザーコンプトン散乱 (Laser Compton Scattering : LCS) ガンマ線による核共鳴蛍光 (Nuclear Resonance Fluorescence : NRF) を用いた、コンテナ等に隠ぺいされた核物質の非破壊検知装置を提案している[1,2]。本装置では MeV ガンマ線をプローブとして用いるため、物質に対する透過力が高く、数~数十 mm の金属、コンクリート等で遮蔽された核種の検知が可能である[3,4]。また、NRF による検知は、核の共鳴を利用する手法であるため、共鳴ガンマ線のエネルギーを測定することにより核種の同定が可能となる。

本研究に於いては、小型で高効率なレーザーコンプトンガンマ線源を開発、NRF ガンマ線の検出装置を組み合わせ、アクティブな核物質非破壊検知システムの開発を目的としている。過去、マイクロトン加速器と市販のジュール級 Nd:YAG レーザーを用いて、 2.2×10^3 個/秒の強度のガンマ線を生成したが

[5]、装置に必要と見積もられるフラックスまで2桁ほど足りていない。レーザーのパルス幅を交差時間程度に圧縮することにより LCS ガンマ線強度の増強を計り、また発生した LCS ガンマ線を用い、模擬検知実験を行うことによりシステムの実現性を実証、設計に必要な知見を得る。

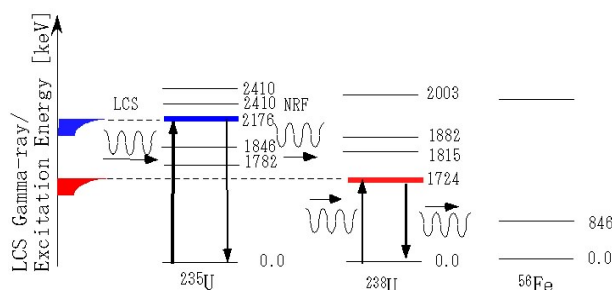


図1:レーザーコンプトンガンマ線による核共鳴蛍光散乱。電子ビームのエネルギー、あるいはレーザー波長を買えることにより、発生するガンマ線のエネルギーを、検知したい核種の共鳴エネルギーに合わせることにより、選択的に励起することが可能であり、散乱されたガンマ線を検出することにより核種の検知、同定が可能となる。

2. レーザーパルス圧縮

本装置開発においては、装置の複雑化を避けるため、LCS ガンマ線発生に用いるレーザー装置として、

市販のジュール級 Nd:YAG レーザーを用いる。マイクロトロン加速器の電子ビームバンチ長は 10 ps 程度であり、また、電子ビーム-レーザー光の相互作用点でのビームウエストの交差長はたかだか数百 ps 程度であるため、典型的なパルス長が 10 ns 程度である市販の Nd:YAG レーザーのパルスではレーザー光子の大部分は電子ビームとの空間的な交差をしないため、LCS ガンマ線発生に寄与しない。LCS ガンマ線の高効率化を達成するため、相互作用点でのレーザー光子密度を高める事を目的として、レーザーパルス圧縮を行った。パルス圧縮は誘導ブリルアン散乱 (SBS) の手法を用いた[6]。SBS 散乱は入射光、散乱光とフォノンとの干渉により生じる。フォノンの寿命は SBS 媒質により決まり、フォノンが減衰すると後方散乱光への変換も減衰していく。このため、得られる圧縮パルス幅はフォノンの寿命により決定される。今回我々の目標とするパルス幅 200-300 ps を達成するために媒質としてフロリナート FC-40 (3M 社製) を用いた[7]。図 2 にパルス圧縮器の模式図を示す。直線偏光のレーザーパルスは 1/4 波長板 (QWP) で円偏光に変換した後、SBS 媒質を封入したセルの中にレンズでされつつ入射される。セル内でレーザー光のフルエンスが SBS 閾値を超えると、後方散乱光が生じ、後方散乱光は入射光と干渉し、さらにフォノンを励起、後方散乱光を増幅させ

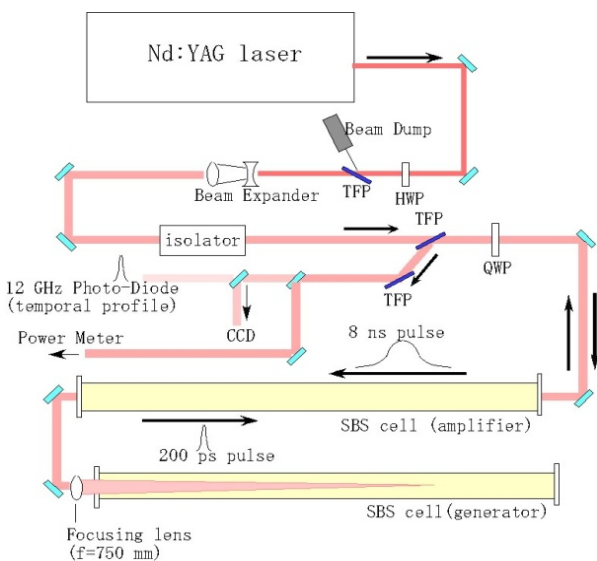


図 2: SBS によるパルス圧縮器のレイアウト図。直線偏光のレーザーパルス (パルス幅 \sim 10 ns) は 1/4 波長板で円偏光に変換され、一本目の SBS セル透過後に 2 本のセルの間に置かれたレンズにより SBS 媒質中に集光される。集光されることにより SBS しきい値を越えたレーザーパルスは SBS 後方散乱を生じ、入射波と干渉することによりフォノンを発生、このフォノンが入射波を散乱することにより後方散乱光が増幅されていく。圧縮された後方散乱光は QWP で入射波とは偏光面が直交する直線偏光に変換後偏光子で入射光軸から分離され電子ビームとの相互作用点に導かれる。

る。SBS 後方散乱光は厳密に 180°散乱であるため、入射光と圧縮光の分離のため、再度 QWP で直線偏光に変換され入射光とは直交する偏光面を持つ直線偏光に変換され、偏光子 (TFP) のより入射光から分離される。

図 3 にパルス圧縮後のレーザーパルスの時間プロファイルと、SBS セルの反射率の結果を示す。レーザーパルスの強度が一定値を越えると反射率は約 80 %で一定となり、パルス幅は 300 ps まで圧縮された。

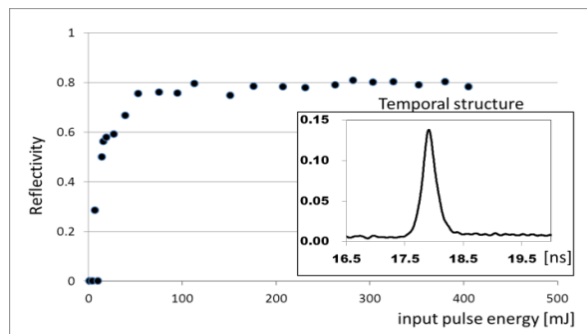


図 3: SBS パルス圧縮における反射率 (圧縮後パルスエネルギー/入射パルスエネルギー) の入射エネルギー依存性と圧縮後のレーザーパルス時間波形。測定はビーム径 12mm、レンズ焦点距離 750 mm で行った。パルスエネルギー 80 mJ 以上で SBS 反射率約 80 %が選られており、また、パルス幅も 300 ps まで圧縮されている。

3. レーザーコンプトンガンマ線発生

圧縮パルスによる LCS ガンマ線発生実験は日本原子力機構関西光科学研究所 (KPSI) にあるマイクロトロン電子加速器[8]を用いて行った。 ^{235}U 、 ^{239}Pu の検知に必要なガンマ線エネルギーは 1.7~2.5 MeV であるが、マイクロトロン電子ビームのエネルギーが 150MeV という制約のため、波長 1064 nm の Nd:YAG レーザー基本波を用いて最大エネルギー 400 keV の LCS ガンマ線を生成した。マイクロトロンからの電子ビームは繰返し 10 Hz、バンチあたりの電荷は 48 pC である。Nd:YAG レーザーは電子ビームバンチと同期した信号をもとに分周し 5 Hz で駆動、1 ショットごとにレーザー+電子ビーム、電子ビームのみの測定を行った。この方法で、電子ビームからの制動放射ガンマ線の影響を評価する。

マイクロトロンからの電子ビームは真空槽内で集束、一方圧縮されたレーザー光は焦点距離 2.3 m の平凸レンズにより集光、電子ビームとの相互作用点 (電子ビーム集束点) に交差角 1.5°で対向入射される。相互作用点下流には電子ビーム偏向電磁石が設置され、電子ビームと LCS ガンマ線との分離を行う。

LCS ガンマ線の検出は、偏向電磁石下流、電子ビーム 0 度方向に設置した LYSO シンチレータ、及びガンマ線ビーム軸上に設置した Al 板によりコンプ

トン散乱されたガンマ線を検出するための GSO シンチレータによりなされた。LYSO シンチレータは、結晶と光電子増倍管 (PMT) との間に Neutral Density (ND) フィルターを挿入することによりシンチレーション光を減光し、ショットあたりのガンマ線によるエネルギー損失が最大 3.7 GeV まで測定が可能となるよう調整した。得られた LSC ガンマ線収量は、レーザーパルス圧縮しない時に比して約 50 倍に増加した。

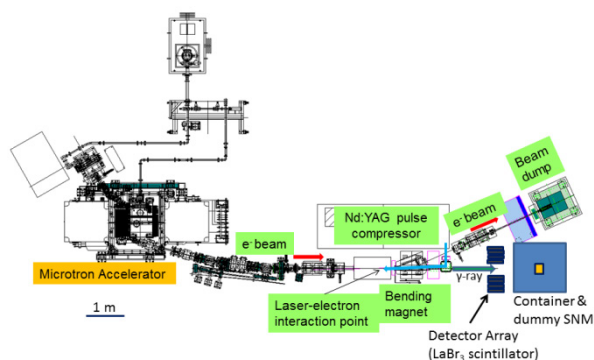


図 4：日本原子力研究開発機構関西光科学研究所に置くレーザーコンプトンガンマ線システム。マイクロトロン加速器からの電子ビームは interaction point で集束され、電子ビーム集束点上に集光された Nd:YAG レーザー光とのレーザーコンプトン散乱によりガンマ線を発生する。LCS ガンマ線は Bending Magnet により電子ビームから分離され、計測、あるいは利用される。

4. 模擬標的検知実証試験

電子ビームエネルギーの制限、あるいは核物質取扱に関する法的な問題により、KPSI に於いて ^{238}U を標的とした検知試験を行うことは困難である。最大エネルギー 400 keV の LCS ガンマ線による励起可能な核である ^{107}Ag (励起エネルギー 311 keV: ^{109}Ag , 324 keV: ^{107}Ag) を模擬標的として NRF による検知実験を行う。NRF ガンマ線の検出器はゲルマニウム検出器と検知システム実機においての使用を考えてい

る LaBr_3 シンチレータを用いる。

模擬標的による検知実験により得られた知見を元にモンテカルロシミュレーションを行い、実機に必要な検出システムの設計を行う予定である。

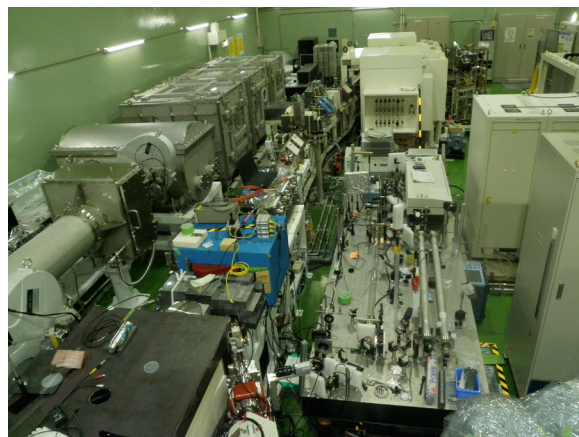


図 5：日本原子力研究開発機構関西光科学研究所に置くレーザーコンプトンガンマ線システム。奥に見える白い箱型のものがマイクロトロン加速器、手前右の光学定盤がパルス圧縮器。圧縮器左の青色が Bending Magnet で、その上流に電子-レーザーの interaction point がある。

5. 謝辞

本研究は文部科学省「安全・安心な社会のための犯罪・テロ対策技術等を実用化するプログラム“ガンマ線による核物質非破壊検知システム”」の支援により行われた。

参考文献

- [1] H. Ohgaki *et al.* Proc. 2010 IEEE Int. Conf. on Technologies for Homeland Security, 525(2010).[2] R. Hajima *et al.*, THPS098, proc. of IPAC2011.
- [3] R. Hajima *et al.*, J. Nucl. Sci. Tech. 45(2008) 441.
- [4] N. Kikuzawa *et al.*, Appl. Phys. Express 2(2009)036502.
- [5] K. Kawase *et al.*, Nucl. Instr. Meth A637 (2011) S141.
- [6] C. Brent Dane *et al.*, IEEE J. Quantum. Electron. Vol. 30 pp. 1907-1915,1994.
- [7] H. Yoshida *et al.*, Opt. Exp. 17(2009) 13655.
- [8] M. Kando *et al.*, Proc. PAC-1999, 3702(1999).