

レーザー・コンプトン散乱による高輝度ガンマ線の実現とその利用

GENERATION AND APPLICATIONS OF LASER COMPTON SCATTERED GAMMA-RAY BEAMS

羽島良一[#]、沢村勝、永井良治、西森信行、早川岳人、静間俊行、Christopher T. Angell
Ryoichi Hajima, Masaru Sawamura, Ryoji Nagai, Nobuyuki Nishimori,
Takeihito Hayakawa, Toshiyuki Shizuma, Christopher T. Angell
Japan Atomic Energy Agency

Abstract

Generation of energy-tunable narrow-bandwidth gamma-rays via Laser Compton Scattering (LCS) is of great interest for scientific studies and applications of “MeV” photons which interact with nuclei. We are developing technologies relevant to generation of high-brightness LCS gamma-ray beams. One of the promising applications of such gamma-rays is the nondestructive detection and assay of nuclides which are necessary for nuclear security and safeguards. We summarize R&D status of LCS gamma-ray sources and overview future applications.

1. はじめに

相対論的電子ビームとレーザービームの衝突により、高エネルギーの光子（X線、ガンマ線）を発生する手法は、レーザー・コンプトン散乱（Laser Compton Scattering; LCS）として知られている^[1]。最初のLCS実験は、レーザーの発明から間もない1965年に報告されている。ルビーレーザーと6 GeV電子蓄積リングを用いて最大0.85 GeVの光子発生を確認したものであった^[2]。以来、電子加速器、レーザーの技術が進歩するのに伴って、LCSの技術が発展し、現在では、Duke大学HIγS^[3]、兵庫県立大学NewSUBARU^[4]のように、LCS-ガンマ線を定常的にユーザに供給する施設が運転されている。さらに、ヨーロッパ（EU）のプロジェクトとして、ペタワットレーザーとLCSガンマ線を併設した施設であるELI-NP^[5]がルーマニアに建設されるなど、LCSガンマ線への期待が高まっている。本稿では、高輝度LCSガンマ線源としてわれわれが提案する、エネルギー回収型リニアック（Energy-Recovery Linac; ERL）に基づくLCSガンマ線源の特徴、技術開発の現状、核物質の非破壊測定を中心とした利用の展望について述べる。

2. レーザー・コンプトン散乱（LCS）によるガンマ線発生

相対論的電子ビーム（エネルギー= E_e ）とレーザービーム（光子エネルギー= E_L ）の衝突散乱をFig. 1に示す。散乱後の光子エネルギーは、電子およびレーザーのエネルギー、散乱の幾何学的条件により一意に決まり、そのエネルギーは式（1）で与えられる。

$$E_\gamma = \frac{E_L(1 - \beta \cos \theta_1)}{1 - \beta \cos \theta + (E_L/E_e)(1 - \cos \theta_2)} \quad (1)$$

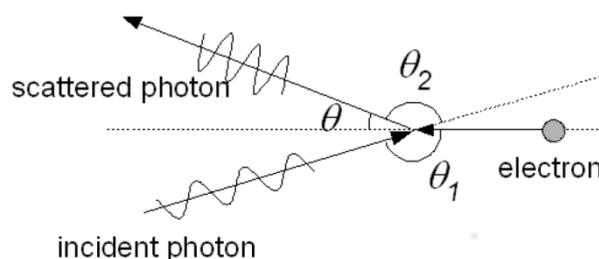


Figure 1: Principle of laser Compton scattering.

X線領域では、シンクロトロン放射光（アンジュレタ放射光）と分光器を組み合わせることで、単色かつエネルギー可変の光子ビームの発生が可能であるが、発生可能な光子エネルギーは、おおむね100 keV以下に限られる。1 MeV以上のエネルギーをもつ光子（ガンマ線）を発生可能な光源として、歴史的には原子炉中性子の捕獲ガンマ線や制動放射ガンマ線が用いられてきた。捕獲ガンマ線は用いる原子核反応ごとに決まったエネルギーのガンマ線しか得られない、また、制動放射は輝度の低い白色ガンマ線である。ガンマ線領域の結晶分光器は、X線の分光器に比べてアクセプタンスが小さい（アクセプタンスは、エネルギーにほぼ反比例する）ために、制動放射と組み合わせる単色化をおこなう場合、わずかなスループットしか得られず実用的でない。これに対して、LCSでは、式（1）からわかるように、散乱角（ θ ）と散乱光子のエネルギーが相関を持つことから、散乱光子のビーム軸上にコリメータ（スリット）を挿入することで、エネルギーの揃った光子ビーム（準単色ビーム）を得ることができる。以上のような背景のもと、エネルギー可変かつ準

[#] hajima.ryoichi@jaea.go.jp

単色のガンマ線を実用的に発生できる唯一の光源が LCS ガンマ線源であり、これまで、主に原子核物理研究のために建設され、運転されてきた。国内では産総研の TERAS (0.8-GeV 電子蓄積リング)^[6]、兵庫県立大学の NewSUBARU (1.5-GeV 電子蓄積リング)^[4]、国外では米国 Duke 大学の HIγS (1.2-GeV 電子蓄積リング)^[3]がその代表である。残念ながら、TERAS は東日本大震災の後にシャットダウンしてしまったが、NewSUBARU、HIγS は、定常的に運転され、ガンマ線ビームをユーザに供給している。

3. LCS ガンマ線のフラックス、輝度、エネルギー幅

LCS 光源のフラックス (F) は、電子とレーザーの衝突密度と頻度、コンプトン散乱の断面積で決まり、次式で表される。

$$F = \frac{\sigma_c f N_e N_L}{2\pi(\sigma_e^2 + \sigma_L^2)} \quad (2)$$

ここで、 σ_c はコンプトン散乱の断面積、 f は衝突頻度、 N_e 、 N_L はパルスあたりの電子数とレーザー光子数、 σ_e 、 σ_L は電子とレーザーの衝突サイズ (rms) である。簡単のため、正面衝突 ($\theta_L = \pi$) を仮定した。

発生ガンマ線のフラックスを大きくするためには、大電流の電子ビームが必要であることから、これまでの LCS ガンマ線源では、電子蓄積リングが利用されてきた。しかしながら、電子蓄積リングに基づく LCS ガンマ線源は、その性能に原理的な限界がある。これは、電子ビームのエミッタンスの限界、量子励起にともなう電子ビームのエネルギー広がり限界に由来するものである。

LCS で発生するガンマ線の輝度は、シンクロトロン放射光 X 線と同様に、単位面積、単位立体角、単位エネルギー幅あたりの発生光子フラックスとして定義できる。この輝度は、電子ビームとレーザー、それぞれのサイズと角度広がり依存するが、通常のパラメータでは、レーザーのエミッタンス (波長で決まる角度発散) は電子ビームの規格化エミッタンスよりも十分小さいので、LCS ガンマ線の輝度 (B) は電子ビームの規格化エミッタンスに支配され、次式のようにあらわされる。

$$B(\text{ph/mm}^2 \text{ mrad}^2 \text{ s } 0.1\% \text{ BW}) \approx \frac{F}{\varepsilon_n^2} \times 0.1\% \quad (3)$$

シリコンやゲルマニウムを使った結晶分光器を用いれば、1 MeV 以上のガンマ線についても X 線と同様に単色化することができ、フランスのラウエ・ランジュヴァン研究所 (ILL) では原子炉中性子捕獲ガンマ線 (数百 keV-6 MeV) を 10^{-5} - 10^{-6} のエネルギー分解能で単色化するための結晶分光器が開発されている^[7]。このような分光器のスループットは、結晶のアクセプタンスに入射するガンマ線のフラックス、すなわち、輝度に左右される。10-keV X 線を

Si 結晶 (111) 面で回折する時のアクセプタンス (Darwin curve の幅) は $26 \mu\text{rad}$ である。アンジュレータ放射の角度広がりはこの値よりも小さく、アンジュレータ放射光は分光器のスループットを損なわないだけの輝度を有している^[8]。結晶回折のアクセプタンスは、光子エネルギーにほぼ反比例するので、ILL の結晶分光器のアクセプタンスは 2 MeV で 10 nrad と非常に小さな値である。これまでの LCS ガンマ線源は輝度が不十分であったため、結晶分光器と組み合わせた利用は行われず、もっぱら、コリメータによる単色化が行われてきた。

LCS ガンマ線はコリメータで単色化することができるが、その単色度には限界がある。単色性を損なう要因としては、電子ビームとレーザービームが完全に単色でなくエネルギー広がりをもっていること、衝突点において電子とレーザーが有限の角度広がりを持つために生じる衝突角度と散乱角度の混合がある。これらの効果を含んだ LCS ガンマ線のエネルギー広がり次式で表される^[9]。

$$\frac{\Delta E_\gamma}{E_\gamma} = \sqrt{(\gamma\theta)^2 + 4\left(\frac{\Delta E_e}{E_e}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_n}{\sigma_e}\right)^4 + \left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2 + \left(\frac{M^2\lambda}{4\pi\sigma_L}\right)^4} \quad (4)$$

ここで、 γ は電子の相対論因子、 θ はコリメータの開口、 $\Delta v/v$ はレーザー光子のエネルギー広がり (帯域)、 M^2 はレーザーの集光性能の指標 (単一の横モードで $M^2=1$)、 λ はレーザーの波長である。

電子蓄積リングでは、レーザーとの衝突散乱による電子の反跳 (量子励起) が周回ごとに蓄積する効果が加わることで、電子のエネルギー広がりが大きくなることが知られており、これによるガンマ線エネルギーの広がりも無視できない。HIγS では、通常、5% (FWHM) 程度の準単色ガンマ線が利用されている。

一方、ERL-LCS では電子ビームパラメータとして、規格化 rms エミッタンス $\varepsilon_n=1 \text{ mm-mrad}$ 、衝突点のビームサイズ $\sigma_e=20 \mu\text{m}$ 、エネルギー広がり $\Delta E_e/E_e=0.03\%$ (rms) を仮定すると、エミッタンスの効果で生じるエネルギー広がり (右辺第 3 項) は 0.25% (rms)、電子のエネルギー広がり寄与 (右辺第 2 項) は 0.06% (rms) と求められ、狭帯域のレーザーと組み合わせれば、エネルギー幅 0.5% 以下の狭帯域 LCS ガンマ線生成が可能であることがわかる。

4. ERL に基づく LCS ガンマ線源の提案

前節で示した加速器に課せられる条件をまとめると、LCS ガンマ線のフラックスを大きくするには大電流が必要、高輝度と単色性の向上には電子ビームのエミッタンスと電子のエネルギー広がりを小さくする必要があることがわかる。このような条件を満たす加速器として、ERL は最適な装置である^[10]。われわれは、ERL に基づく LCS ガンマ線源が、従来

の装置をはるかに上回るフラックス、 $10^{13}/s$ 、を実現し、核物質の非破壊測定をはじめとした様々な分野に応用できることを提案してきた^[11,12]。

Figure 2に ERL-LCS ガンマ線源の概念図を示す。ERL は LCS 発生に使われた電子のエネルギーを回収し、このエネルギーを新しい電子の加速に再利用することで、大電流と低エミッタンスを両立する。LCS のフラックス増大には、衝突点におけるレーザー光子の密度も大きくしなければならないが、このために、レーザー蓄積装置を用いる。レーザー蓄積 (laser enhancement cavity) は、高反射率の鏡で構成される光共振器である。外部のモードロックレーザーで発生したパルス列をレーザー蓄積装置に入射する時、レーザーの繰り返しと光共振器の往復時間を精密に一致させれば、レーザーパルス列を重ね合わせて大強度に蓄積することができる。レーザー共振器の設計と制御方法を工夫することで、増倍率 (入射レーザーパワーと蓄積レーザーパワーの比) が 1000 を超える装置も実現している^[13]。

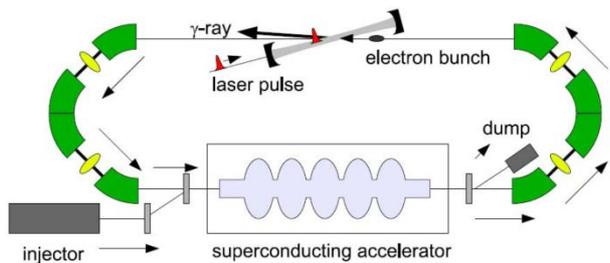


Figure 2: A schematic view of Compton gamma-ray source utilizing an energy-recovery linac (ERL).

5. 核セキュリティ技術としての LCS ガンマ線

米国オバマ大統領のイニシアティブにより、2010年から隔年で核セキュリティサミットが開催されている。2010年4月に開催された第1回のサミットでは、事前協議において日本のコミットメントが求められることとなり、それまでに米国では実施されておらず、日本として世界最先端の技術で貢献できるテーマのひとつとして、われわれグループが提案していた、大強度単色ガンマ線を使った核共鳴蛍光散乱 (Nuclear Resonance Fluorescence: NRF) を利用する非破壊測定 (NDA: Non-Destructive Assay) 技術の基礎開発が取り上げられることとなった。

NRF は、原子核とガンマ線の反応の一種であり、ガンマ線を共鳴的に吸収した原子核が、その直後に、吸収ガンマ線と同じエネルギーのガンマ線を放出する現象である (Fig. 3 参照)。原子核の共鳴状態は核種に固有のエネルギー準位をもつので、この共鳴散乱ガンマ線 (NRF) を測定することで、核種を同定したうえで、その核種を非破壊で検知、または定量することができる^[11]。

この手法は、安定同位体、不安定同位体のいずれも測定可能であること、透過力の大きな 2-5MeV の

ガンマ線を用いるため数 cm 程度の金属遮蔽や数十 cm 程度の水遮蔽を含んだ非破壊測定が可能であること、化学形態によらずに核種分析が可能であることなどの利点がある。

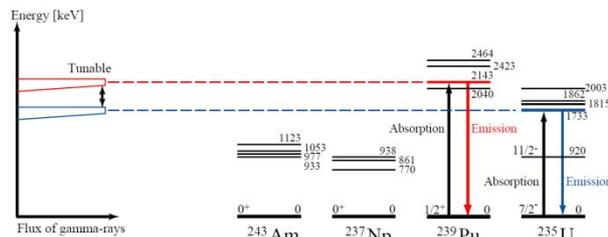


Figure 3: Principle of nondestructive assay using nuclear resonance fluorescence with mono-energetic gamma-ray beams.

このような非破壊測定は、例えば、貨物中に隠ぺいされた核物質の港湾における検査、使用済燃料中に含まれる Pu-239 などの核物質を測定し、これら核物質が核兵器に転用されていないことの確認 (保障措置) など、広く応用できる。

2010年核セキュリティサミットにおける日本の公約 (ナショナルステートメント) に沿った予算措置として、われわれは、平成 23 年度から 26 年度まで「レーザー・コンプトン散乱 NDA 技術開発」の補助金交付をうけ、核セキュリティを目的とした LCS ガンマ線の発生と利用に関連した技術開発を行った。このプログラムは、(1)大強度 LCS 発生のための基盤技術、(2)高レベルの放射能を有する試料にも適用可能な測定手法の開発 (評価用のシミュレーション技術を含む) から構成された。

大強度 LCS 発生のための基盤技術として、KEK の協力のもとコンパクト ERL (cERL) における LCS 発生実験を行った。cERL の周回軌道、LCS 関連装置 (レーザー蓄積装置、LCS ビームライン、LCS 実験室など) の建設と整備を行った後、平成 26 年 3 月に LCS 発生実験を行い、20 MeV 電子ビームと 1064 nm レーザーの衝突散乱により 7 keV の X 線発生に成功した^[14,15]。ERL とレーザー蓄積装置の組み合わせは、将来の高輝度ガンマ線源と同じ構成であることから、本実験の成果によって大強度 LCS 発生のための基盤技術が確立したと見てよい。

高レベルの放射能を有する試料にも適用可能な測定手法として、われわれは、共鳴透過法に着目した。Figure 4 に共鳴透過法概念を示す。共鳴透過法では、入射ガンマ線の測定対象物中における共鳴吸収量 (特定同位体固有のエネルギーでの核共鳴蛍光反応量) を、計測したい物質 (例えば、プルトニウム 239 を計測した場合には、プルトニウム 239) を既知量含んだ試料 (witness plate、あるいはノッチフォイル) からの共鳴散乱の減少量として測定する。

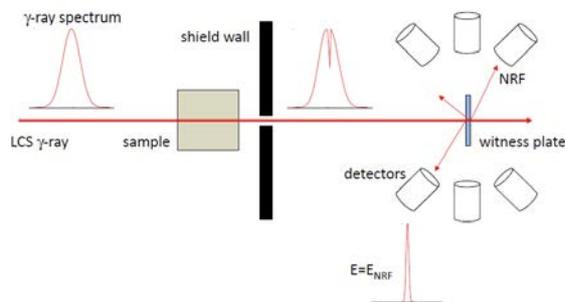


Figure 4: Nondestructive measurement of a specific nuclide in a sample by collecting nuclear resonance fluorescence gamma-ray scattered from a witness plate placed downstream of a sample.

この手法では、測定対象物を直接計測しないため、測定対象物が多量の放射性同位体を含んでいる（非常に強いバックグラウンド・ガンマ線を有する）場合であっても非常に有効である。また、原理的に内部構造に関係なく、測定したい同位体の計測することができるので複雑な構造を有する測定対象物の定量的な測定にも適している。

われわれは、共鳴透過法の実証として、Duke 大学 HIγS において、TMI-2 キャニスターに収納された Pu の測定を模擬する実験をおこなった。TMI-2 キャニスターは、米国スリーマイル島原子力発電所事故の廃止措置において、原子炉から取り出した熔融燃料などの高放射能物質の収納に用いられた容器であり、構造体、遮蔽体としてステンレスやコンクリートを含んでいる。実験では、Pu の模擬物質として Al を、U の模擬物質として Pb を用いて共鳴透過法による測定を試み、Al の測定が定量的に正しく行えることを確認した^[16]。

NRF を用いた核種の非破壊測定において、測定時間の短縮、測定精度の向上には、ERL-LCS からの大フラックスかつ狭帯域のガンマ線が本質的に有用である。NRF の共鳴幅は 1 eV 程度であり、この共鳴幅に含まれない入射ガンマ線は、すべて、バックグラウンドの原因となるからである。また、エネルギー幅 1% 以下の狭帯域ガンマ線を用いれば、コヒーレント散乱（バックグラウンド）と NRF を識別して測定できる手法としてわれわれが考案した「分岐 NRF 法^[17]」が適用できるようになる。

われわれは、共鳴透過法の測定時間の短縮、測定精度の向上を目指して、共鳴透過法を改良した「積分共鳴透過法^[18]」を考案し、その原理実証も行った。福島第一原子力発電所の廃止措置において想定されている熔融燃料の取り出しに合わせて、Pu-239 などの核物質の非破壊測定に適用できる技術として提案している。

5. LCS ガンマ線の基礎科学への応用

LCS ガンマ線は、前節で紹介した核物質の非破壊測定といった産業利用の他にも、基礎科学においても有用なプローブとなる。

LCS では、入射レーザーの偏光を制御することで、

直線偏光、円偏向のガンマ線を発生することができる。直線偏光ガンマ線と核共鳴蛍光散乱を組み合わせることで、原子核の微細構造を探ることができる。直線偏光ガンマ線を入射した時、NRF で放出されるガンマ線の角度分布に非対称性が現れる場合がある。このような非対称性の測定は、原子核の励起状態のパリティを決める上で非常に強力な手段であり、直線偏光ガンマ線を用いた研究は、TERAS や HIγS においてなされてきたが、今後も原子核物理の重要な研究テーマである。

宇宙で MeV 領域のガンマ線が直接的な役割を果たしている例として、超新星爆発における光核反応による元素の生成があげられる。太陽より 8 倍以上大きな質量を持つ恒星は、その寿命の最後に超新星爆発と呼ばれる大爆発を引き起こしてその進化を終えるが、その超新星爆発において様々な元素が合成されることがわかっており、元素合成の過程にはガンマ線が関与する光核反応も含まれる。大強度の LCS ガンマ線が実現すれば、これまで測定されていない核種を含めて、光核反応断面積のデータを整備することができ、超新星爆発における元素合成の精密なモデル化がはじめて可能になる。

その他、超新星爆発のニュートリノ元素合成過程とニュートリノ・原子核相互作用、直線偏光ガンマ線による (γ, n) 反応、円偏光ガンマ線によるパリティ非保存の物理、Delbrück 散乱の精密測定による QED の非線形効果の検証など、LCS ガンマ線を利用した基礎科学の研究テーマが多数提案されている^[19,20]。

6. まとめ

加速器、レーザーの技術が進歩するにしたがって、これら技術の組み合わせとして、レーザー・コンプトン散乱ガンマ線源（LCS ガンマ線源）の性能向上が可能になりつつある。とくに、エネルギー回収型リニアック（ERL）に基づく LCS ガンマ線源は、原理的に、高フラックス、高輝度、狭帯域のガンマ線の発生が可能であることから、核種の非破壊測定をはじめとした産業利用、光核反応研究などの基礎科学に大きく貢献することが期待されている。われわれは、ERL-LCS における大強度 LCS 発生の実証試験をコンパクト ERL にて行った。また、LCS ガンマ線の特長を生かした核種の非破壊測定手法の提案と実証実験を行った。

今後は、LCS ガンマ線を一層効率的に発生する技術として、超伝導加速器として従来の楕円空洞に代わるスポーク空洞の開発、FFAG 型を含む多重周回 ERL の検討などを進めていく予定である。

本研究の一部は、核セキュリティ強化等推進事業費補助金、量子ビーム基盤技術開発プログラム、光・量子融合連携研究開発プログラムの支援を受けた。これらプログラムの実施にあたっては、JAEA の瀬谷道夫氏、森道昭氏、KEK の浦川順治教授、照沼信浩教授に協力いただいた。cERL の実験では、

KEK の河田洋教授、小林幸則教授をはじめとした cERL 建設チームに大きな力添えをいただいた。あらためて感謝を申し上げる。

[20] 早川岳人, 藤原守, “レーザー・コンプトン散乱 γ 線ビームによる原子核研究の新しい潮流”, 原子核研究 (2015).

参考文献

- [1] G.A. Krafft, and Gerd Priebe, "Compton sources of electromagnetic radiation", *Reviews of Accelerator Science and Technology* **3**, 147-163 (2010).
- [2] C. Bemporad, R.H. Milburn, N. Tanaka, M. Fotino, "High-Energy Photons from Compton Scattering of Light on 6.0-GeV Electrons", *Physical Review* **138**, B1546-B1549 (1965).
- [3] H.R. Weller et al., "Research opportunities at the upgraded HI γ S facility", *Progress in Particle and Nuclear Physics*, **62**, 257 (2009).
- [4] S. Miyamoto et al. "Laser Compton back-scattering gamma-ray beamline on NewSUBARU." *Radiation measurements* **41**, S179-S185 (2006).
- [5] O. Teşileanu et al., "Extreme light infrastructure–nuclear physics". *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, **420**, p. 012157 (2013).
- [6] H. Ohgaki et al., "Generation and application of Laser-Compton gamma-ray at ETL." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **455**, 54-59 (2000).
- [7] E.G. Kessler et al., "The GAMS4 flat crystal facility." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **457**, 187-202 (2001).
- [8] T. Matsushita, "X-ray monochromator", *Cheiron School 2010* (2010).
- [9] V. Petrillo, et al. "Photon flux and spectrum of γ -rays Compton sources." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **693**, 109-116 (2012).
- [10] R. Hajima, "Energy Recovery Linacs for Light Sources." *Reviews of Accelerator Science and Technology* **3**, 121-146 (2010).
- [11] R. Hajima et al., "Proposal of nondestructive radionuclide assay using a high-flux gamma-ray source and nuclear resonance fluorescence." *Journal of Nuclear Science and Technology* **45**, 441-451 (2008).
- [12] R. Hajima et al., "Detection of radioactive isotopes by using laser Compton scattered γ -ray beams." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **608**, S57-S61 (2009).
- [13] H. Carstens et al., "Megawatt-scale average-power ultrashort pulses in an enhancement cavity." *Opt. Lett* **39**, 2595-2598 (2014).
- [14] 永井良治他, 「コンパクト ERL でのレーザーコンプトン散乱光源実証実験」, 第 12 回日本加速器学会年会論文集(2015).
- [15] 赤木智哉他, 「レーザーコンプトン散乱による小型高輝度 X 線源開発」, 第 12 回日本加速器学会年会論文集(2015).
- [16] C.T. Angell et al., "Demonstration of a transmission nuclear resonance fluorescence measurement for a realistic radioactive waste canister scenario." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B* **347**, 11-19, (2015).
- [17] T. Shizuma et al., "Statistical uncertainties of nondestructive assay for spent nuclear fuel by using nuclear resonance fluorescence." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **737**, 170-175 (2014).
- [18] C.T. Angell et al., to be submitted.
- [19] 「次世代レーザーコンプトン散乱ガンマ線源とその応用」, 京都大学エネルギー理工学研究所, IAE-RR-2013 No.101 (2013), ISSN 1342-3185.