

Demonstration of isotope imaging method by nuclear resonance fluorescence

Nobuhiro Kikuzawa^{1, A)}, Ryoichi Hajima^{A)}, Takehito Hayakawa^{B)}, Toshiyuki Shizuma^{B)},
Hiroyuki Toyokawa^{C)}, Hideaki Ohgaki^{D)}, Eisuke Minehara^{E)}

^{A)} Energy Recovery Linac Development Group, Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Ibaraki, 319-1195

^{B)} Laser Accelerator Group, Japan Atomic Energy Agency
8-1 Umemidai, Kizu-cho, Souraku-gun, Kyoto 619-0215

^{C)} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)
1-1-1 Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8568

^{D)} Institute of Advanced Energy, Kyoto University,
Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

^{E)} Laser Science and Technology Promotion Office at Tsuruga, Japan Atomic Energy Agency
65-20 Kizaki, Tsuruga-shi, Fukui 914-8585

Abstract

Laser-Compton-backscattered photons from an energy-recovery linac (ERL) and a high power laser realize a high-efficiency, high-flux and tunable monochromatic gamma-ray source. A nondestructive assay method by using the monoenergetic gamma-rays and nuclear resonance fluorescence (NRF) make possible to isotope imaging. The purpose of our work is to demonstrate of the NRF-based isotope imaging system. For this evaluation, we are developing a GEANT4-based Monte Carlo simulation code. In the simulation, we assume metal cubes (4×4×4 mm) of U238 and lead are contained in a concrete block of 5 cm thickness. The simulation results indicate that the nondestructive gamma spectrometric method can be applicable in the isotope imaging.

光核共鳴散乱による同位体イメージング法の原理検証

1. はじめに

我々はKEK、東大物性研、UVSOR、SPring-8と共同でエネルギー回収型リニアック(ERL)に関する開発研究を進めている^[1]。このERL技術を応用した大強度準単色 γ 線源による放射性同位体の非破壊検出法を提案し、この γ 線を使った光核共鳴散乱(NRF)による核種検出法を放射性廃棄物の処理処分へ応用することを提案している^[2, 3]。この応用可能性の評価を行うために、GEANT4^[4]をベースにして光核反応

を計算できるシミュレーションコードの開発を進めている。これまでに計算時間の短縮化が大きな課題となっていたため、MPIにより並列化を行った。計算コードの開発および計算コードを使った同位体イメージングのシミュレーション結果について報告する。

2. 大強度 γ 線源

我々が提案しているERL型 γ 線源を図1に示し、表1にそのパラメータの例を示す^[5]。ERLによって加速

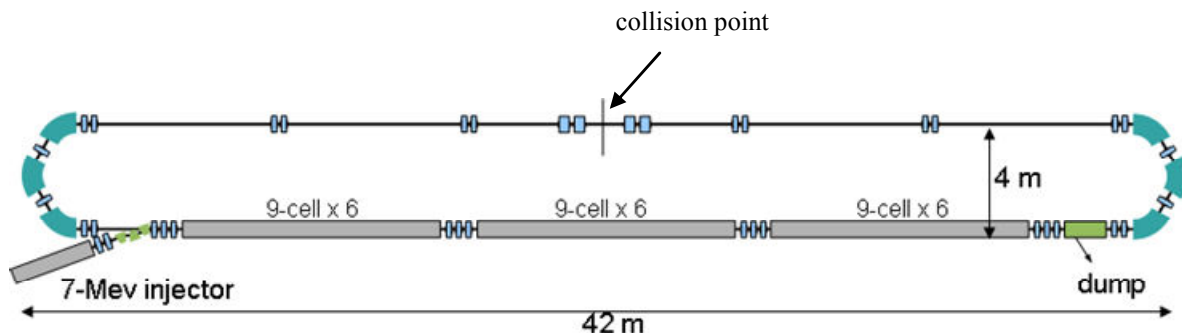


図1 : 350MeV ERL の概念図

¹ E-mail: kikuzawa.nobuhiro@jaea.go.jp

される個々の電子バンチの性質はリニアックによって決まり、超短パルス、極低エミッタンスの電子バンチが生成可能である。さらに、超伝導加速器を用い電子バンチを減速・エネルギー回収することで蓄積リングのような大電流加速が可能となる。

表1. ERL型 γ 線源のパラメータの例

Electron beam	
Repetition	130 MHz
Energy	350 MeV
Bunch charge	100 pC
Normalized RMS emittance (x/y)	2.5 / 1.0 mm-mrad
RMS beam size at the collision (x/y)	37 / 24 μ m
Pulse length (RMS)	3 ps
Energy spread (RMS)	0.03 %
Laser	
Repetition	130 MHz
Wave length	1064
pulse energy	1.8 μ J
RMS size at the collision	30 μ m
pulse length	2 ps (rms)
Enhancement of supercavity	3000

ERLで加速した電子とレーザー光を用い逆コンプトン散乱により γ 線を発生させることで、高効率・大強度の準単色 γ 線を発生させることができる。電子とレーザーがhead-on衝突する場合に発生する γ 線フラックスを表1で与えられるパラメータを使って計算すると、 $F=2.7 \times 10^{10}$ /sec/keVとなる^[5,6]。

実際には、スーパーキャビティの配置などから衝突角度を持ち、電子ビームのエミッタンスやエネルギー広がりなども考慮する必要がある。このため、モンテカルロシミュレーションコードであるCAIN^[7]によって計算を行った結果、衝突角度3.5°の場合、 $F=0.9 \times 10^{10}$ /sec/keVとなる。350MeV-ERL、モードロックファイバーレーザ、スーパーキャビティの技術を組み合わせることで、既存の γ 線源を6-8桁上回るフラックスが実現できることがわかった。コリ

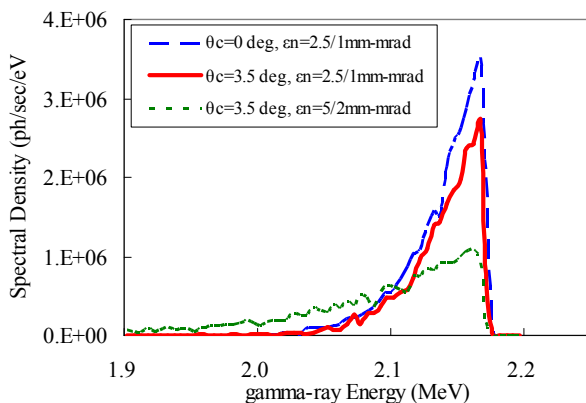


図2. γ 線スペクトル

メータで半角0.1mradに切った場合に得られる γ 線スペクトルを図2に示す。

3. 光核共鳴散乱による同位体イメージング

3.1 計算コードの開発

NRFによる核種検出の可能性の評価を行うために、GEANT4をベースにして光核共鳴散乱反応を計算できるコードを開発し、シミュレーションコードを開発した。GEANT4はC++によって開発されているため、弾性散乱オブジェクトを継承してNRFオブジェクトを追加した。このため、GEANT4の他の機能を一切制限することなくNRFの計算が行えるようになっている。

NRFは反応断面積が小さいため、多くの γ 線について計算を行わなければならない、計算には多くの時間が必要となっていた。例えば、放射性廃棄物容器中のU-238の検出シミュレーションでは、PentiumM、1.7GHzのPCで56時間を要していた。この問題を解決するため、計算時間の短縮化のため、MPIによる並列化を行い、原子力機構のPCクラスターAに移植した。ベンチマーク結果を図3に示す。この結果では64CPUで46倍の高速化を実現した。

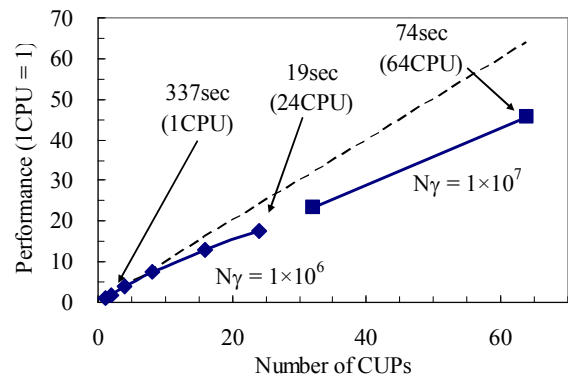


図3. 並列化ベンチマーク結果

3.2 同位体イメージングシミュレーション

厚さ5cmのコンクリート中に、4×4×4mmの金属ウラン(U-238)と鉛が存在する被測定対象に γ 線を照射した場合のシミュレーション計算を行った。そのモデルを図4に示す。ターゲットの後方には、2台のGe検出器を配置し、透過位置にも検出器を配置している。ここで、U-238の光核共鳴散乱断面積は2.176MeVの励起準位において1keV幅で100mbを仮定し、中心エネルギー2.176MeVで1keV幅の γ 線を1mm ϕ のビームサイズで 1×10^6 個照射した場合について計算を行った。これは、我々の提案している γ

線源ではおよそ0.1msに相当する照射時間である。また、光核共鳴散乱 γ 線は等方的に散乱されると仮定している。

計算の結果、透過位置にある検出器に入射した γ

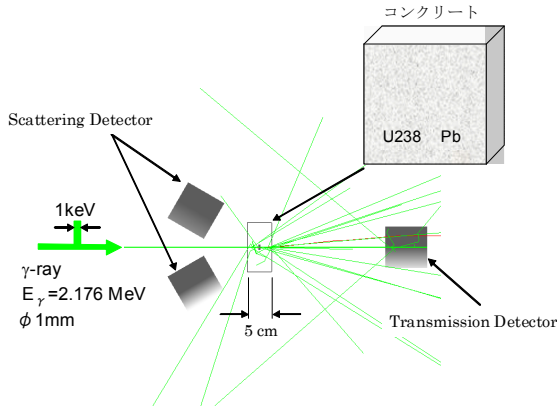
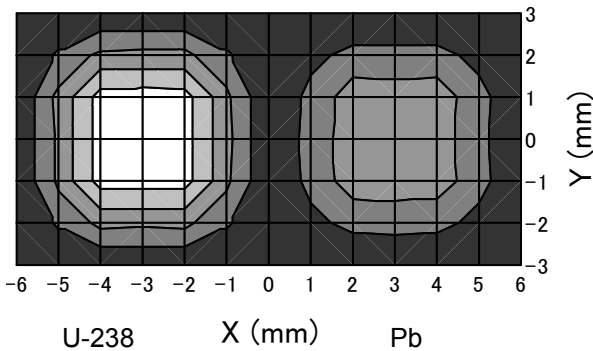


図 4. 計算モデル

線の全個数を2次元的にプロットした結果を図5(a)に、後方にある検出器に入射した γ 線のうちU238の共鳴散乱エネルギーを持った γ 線の個数を2次元プロットした結果を図5(b)に示す。ただし、ここでは検出器内部の反応は考慮していない。図5(a)ではU-238と鉛の存在を検知できるが、それらは密度の違いとしてしか認識できない。一方、NRFによるイメージングではコンクリート中に含まれるU-238のみを検出で

(a) Transmission detection



(b) Scattering detection

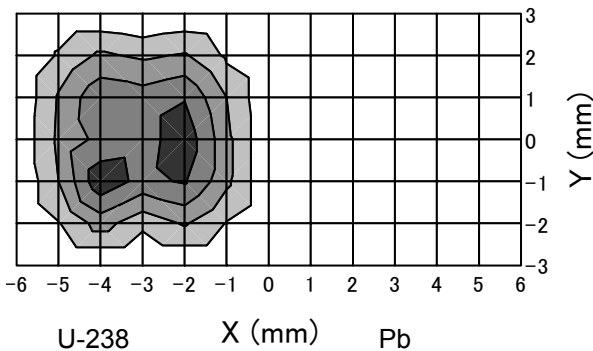


図 5. シミュレーション結果。(a)透過型イメージング、(b)NRF イメージング

き、その位置を2次元イメージングとして得ることができた。この結果から、従来の透過型イメージングでは不可能であった同位体の同定まで可能であることがわかった。

4. まとめ

γ 線源の概念設計を行い、発生する γ 線量の推定を行った。得られるフラックスは $10^{10}/\text{sec}/\text{keV}$ となり、既存の γ 線源を6-8桁上回るフラックスが実現できることがわかった。

GEANT4をベースにシミュレーションコードの開発を行った。この結果、NRFによる同位体イメージングは十分可能であることがわかった。

今後、システムの設計を進め、検出器や遮蔽の効率的な配置などについて検討していく予定である。

本研究の一部は科研費基盤(C) 20612014の成果である。

参考文献

- [1] 河田、他、“ERL計画の現状”、Proc. of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan (August 1-3, 2007, Wako Japan).
- [2] R. Hajima et. al., “Nondestructive assay of radionuclides using a high-flux gamma-ray source and nuclear resonance fluorescence”, J. Nucl. Sci. and Technol., Vol. 45, No. 5, p.441-451(2008).
- [3] 菊澤、他、“ERL型大強度 γ 線源による放射性廃棄物中の核種検出”、Proc. of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan (August 1-3, 2007, Wako Japan).
- [4] S. Agostinelli et. al., “GEANT4 – a simulation toolkit,” Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 506, 250 (2003).
- [5] R. Hajima et. al., “Energy-Recovery Linac for a High-Flux Quasi-Monochromatic Gamma-ray Source”, Proc. the Eighth International Topical Meeting on Nuclear Applications and utilization of Accelerators (AccApp07), Pocatello, Idaho, Jul. 30- Aug. 2, 2007.
- [6] H. Ohgaki et. al., “Generation and application of Laser-Compton gamma-ray at ETL,” Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 455, 54 (2000).
- [7] P. Chen et. al., “CAIN: Conglomerat d’ABEL et d’Interactions Non-linéaires”, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 355, 107(1995).