

IDENTIFICATION OF MATERIALS IN LASER-COMPTON γ -RAY IMAGING

Sho Amano¹, Ken Horikawa, Kazuki Ishihara, Shuji Miyamoto

LASTI, University of Hyogo

3-1-2 Koto, Kamigori, Ako, Hyogo, 678-1205

Abstract

In a 1-1.5GeV electron storage ring facility "NewSUBARU", laser-Compton gamma-rays with energies of 1-1.5GeV are generated by using a Nd:YVO₄ and a CO₂ laser. As one of applications of the gamma-rays, we have been studying a gamma-ray imaging by using imaging plate (IP). To identify unknown materials in IP imaging, we studied gamma-ray power transmitted through the materials and found that the transmitted power could be explained well by a new simple equation, not an original decay equation. In this report, we propose a method to identify the materials in the IP imaging, by using the new equation.

レーザーコンプトンガンマ線イメージングによる物質同定

1. はじめに

電子蓄積リング「ニュースバル」(1~1.5GeV)では、現在Nd:YVO₄(1 & 0.5 μ m)とCO₂レーザー(10 μ m)を用いて、1~36MeVのレーザーコンプトンガンマ線が発生できる^{[1][2]}。このガンマ線の産業応用として、その強い透過性を生かした光学的に厚い物質のイメージングが挙げられる。例えば、重金属の様に従来のX線では透過出来ない物質に囲まれた物質のイメージングなどである。我々は、このガンマ線イメージングのため、簡便に2次元透過イメージング像を撮れるイメージングプレート(Imaging Plate; IP)を検出器に用いた研究を進めている。

IPは光輝尽発光(PhotoStimulated Luminescence; PSL)を利用した高感度X線検出板である。もともとはX線医用画像診断用に開発されたものであるが、今日、放射光によるX線回折や散乱実験に広く用いられている。我々は、このIPが数MeVのガンマ線領域でも応用できないかと考え、感度特性やフェーディング特性を明らかにし^[3]、ガンマ線イメージングの検出器としても有効である事を実証してきた^[4]。

このイメージング技術において、物質の形状、サイズが求められる。また物質ごとのガンマ線透過率(減衰率)が予め判っていれば、未知の物質の同定が可能となる。そこで我々はいろいろな物質を用いて、IPによるガンマ線透過率を測定し、透過率の原子番号依存性を実際に調べてみた。その結果、各物質の透過強度は単純な減衰式に従わないが、簡単なモデル式に従い、それから得られる減衰係数は原子番号に依存する事が判った。本稿では、この結果を用いて物質同定する方法を提案する。

2. 実験

実験配置図を図1に示す。本実験では16MeVの

レーザーコンプトンガンマ線を用いた。ニュースバル電子蓄積エネルギー974MeVの電子ビーム(200mA)に、1.06 μ mのNd:YVO₄レーザー(4.2W)を衝突させて、フラック 5×10^6 個/secのガンマ線を発生させた。このガンマ線ビームを直径5mm、長さ5cmの試料ロッドを透過させ、透過像をIP(富士フィルム; BAS-SR2025)で撮り、それから強度を読み取る方法で透過率を求めた。用いた試料ロッドは、Acrylate(C₅H₈O₂), Al, Fe, Co, Cu, Ag, Ta, Auの8種類である。図1に示す様に、4種類を一組としてV溝上のホルダーに重ねておいて、一括照射した。それぞれの材料に関して、試料長0cm(即ちロッドが無い状態), 5cm(ロッド1本配置), 10cm(ロッドを2本直列に配置)で、ガンマ線を一時間照射してIP像を取得。このIP像の画像処理により、イメージプロフィールを取り、各ロッドの中心 3×3 mm範囲で積分して、その範囲を透過したガンマ線量に比例したPSL値を求めた。各試料長におけるPSL値を求め、各物質におけるガンマ線透過強度を算出した。尚、このエネルギー領域のガンマ線は、物質において電子対生成も起こすため、発生した電子、陽電子がIPに入射しない様に0.4Tの偏向電磁石をIPの前に設置している。

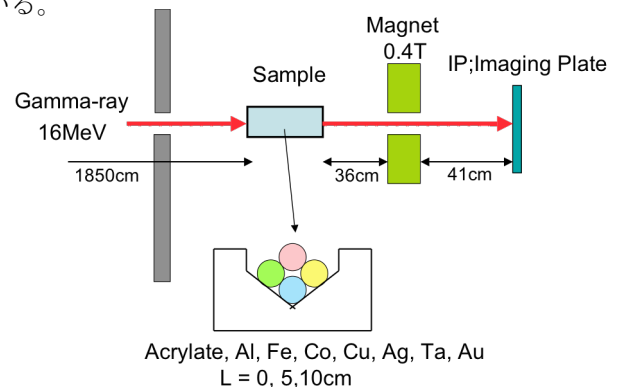


図1 実験配置図

¹ E-mail: sho@lasti.u-hyogo.ac.jp

3. 結果と考察

得られたIP像を図2に示す。軽元素のAcrylateから重元素のAuロッドまで、いずれもその輪郭がはっきりと認められる。

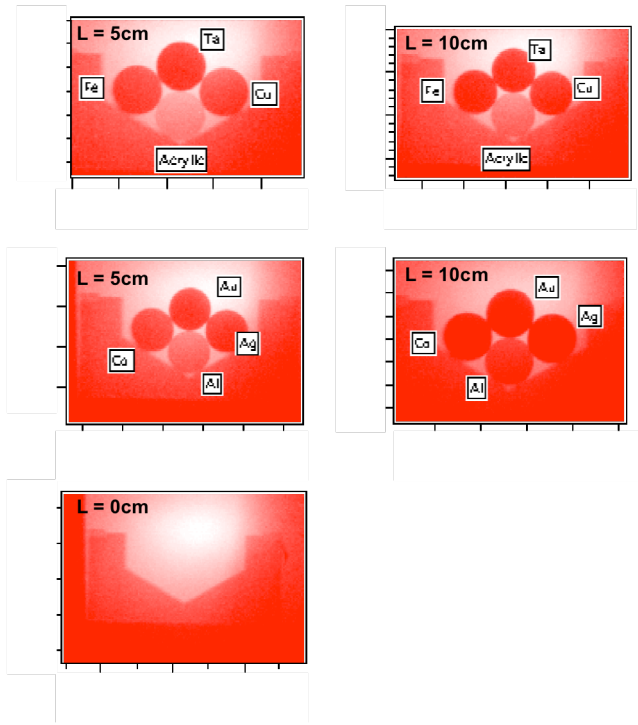


図2 IP透過像。Acrylate, Fe, Cu, Taロッド（上段）, Al, Co, Ag, Auロッド（中段）, ロッド無し（下段）

これらの像を画像処理して得た各ロッド中央部の透過ガンマ線強度を、試料長に対してプロットしたのが図3である。ロッド長0cmの時で規格化してある。図3で四角マーカーが測定値で、ラインはフィッティングカーブである。最初、図の縦軸はガンマ線透過率と考え

$$T = \exp(-k_1 \cdot x) \quad (1)$$

の式でフィッティングした（図3上）。ここで、 T , k_1 , x は、それぞれ透過率、減衰係数、試料長である。図3aを見て判る通り、(1)式では測定値をうまくフィッティングする事が出来なかった。即ち、測定値は(1)式に従わない。図3aのフィッティングカーブから求めた各物質の減衰係数 k_1 を原子番号順にプロットしたのが図4の丸印である。

図4には参考のためNISTのデータベースXCOM²で計算した、各物質における16MeVガンマ線減衰率を四角印で載せた。XCOMではトムソン散乱、コンプトン散乱、光電効果、電子対生成の各効果による減衰が計算できる。ここではそのすべてを含んだ減衰係数を載せているが、このエネルギー領域ではコンプトン散乱と電子対生成の効果がメインである。

測定値の丸印は、原子番号が大きくなるにつれ減

衰係数の差が小さくなり、これでは物質固有のパラメータとはならず、物質同定は難しい。また、測定値（丸印）はXCOMの値（四角）ともズレが大きい。原子番号の低いところでは測定値（丸印）が計算値（四角）より大きく、原子番号が大きくなると逆に、測定値は計算値より低くなっている。この差について考察してみた。

原子番号が低い領域で測定値（丸印）が高めに出るのは、本来注目している16MeVガンマ線に、バックグラウンドにある減衰率の大きい放射線が被さっているためと考えられる。具体的には周回電子ビームのブレイムスによる低エネルギーガンマが挙げられる。原子番号が高い領域で低めになるのは、本来の透過ガンマ線以外に他の2次発生放射線が混じっているとすると説明がつく。電子対生成により発生した電子、陽電子は偏向電磁石ではねているが、試料内で発生したコンプトンガンマ線や中性子等はIPにそのまま入射される。

以上の効果を考慮して、これらを表す項を(1)式に加えて書き直すと

$$T = A \cdot \exp(-k_1 \cdot x) + (1 - A) \cdot \exp(\pm k_2 \cdot x) \quad (2)$$

のようになる。ここで k_1 は本来の16MeVレーザーコンプトンガンマ線の減衰係数、 A はその全体に占める強度比、 k_2 はその他の放射線による補正係数である。 k_2 のマイナスは他成分の放射線の減衰を表し、プラスは2次放射線発生を表す。実際にはその両方が起こっているの、すべての兼ね合いでプラスマイナス両方取りうるであろう。この(2)式を使って、透過強度をフィッティングし直したのが図3下で、うまくフィッティングできた。この(2)式によるフィッティングカーブより求めた k_1 を図4にプロットしたのが×印である。XCOMの計算値（四角）と良く一致し、原子番号と共に減衰係数が比例しているのが見いだせた。

即ち、簡単な(2)式のモデル式を使う事によって、IPの透過像から物質固有な、原子番号に依存した減衰係数が求められる事が判った。これにより未知の物質の物質同定が可能となる。その具体的手順は以下の通りである。

①データベースの作成；既知の材料の物資を用いて、(2)式に現れる3パラメーター (A , k_1 , k_2) の値を測定してデータベース化しておく。パラメーター数が3なので、精度を上げるため3種類以上の異なる長さ x で測定して算出しておく。

②IPを用いた透過像撮影；異なる試料長 x となる様に3次元、3方向から透過像を撮る。その3枚の像から、 x_1 , x_2 , x_3 に対する透過強度 T_1 , T_2 , T_3 を読み取り、(2)式を使って (A , k_1 , k_2) の3パラメーターを決定する。（もっとも、この方法は3次元対称物、即ち完全球体には使えないが、ほとんど例外的ケースであるため問題無い。）

③同定；②で求めた3パラメーターを①で求めておいたデータベースと比較して未知物質の同定を行なう。

² <http://www.nist.gov/physlab/data/xcom/index.cfm>

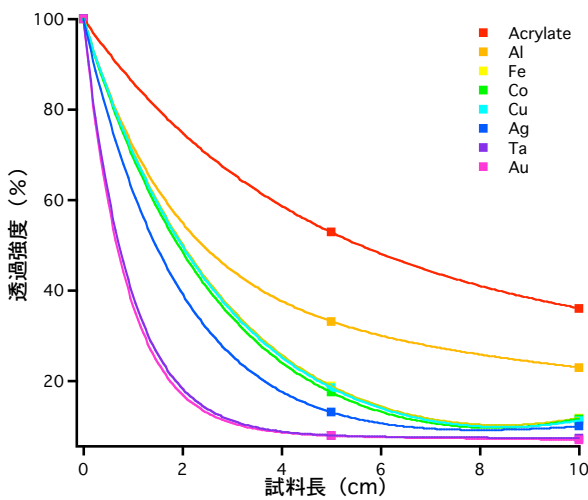
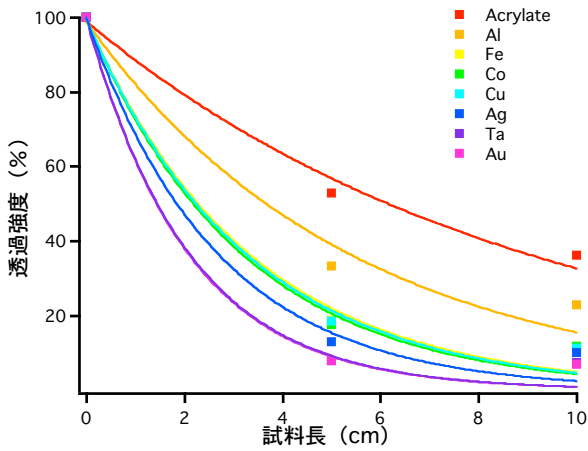


図3 IP像より求めた透過強度と(1)式によるフッティングカーブ(上)と(2)式によるフッティングカーブ(下)

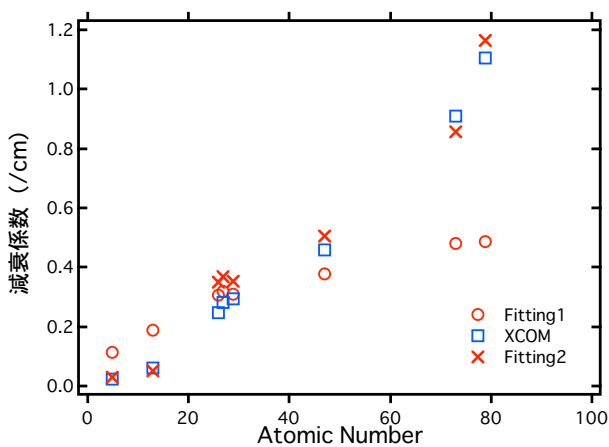


図4 ガンマ線減衰係数の原子番号依存性

4. まとめ

IPを用いたガンマ線イメージング技術において、物質同定するために、各物質の透過率(減衰率)測定を試みた。その結果、単純な減衰関係は成り立たず、背景放射線や2次放射線を考慮しなければならない事が判った。これらを考慮した簡単なモデル式を導入して、原子番号に依存した、即ち物質固有の減衰係数が求められる事を明らかにした。これらの結果を用い、物質固有の(原子番号に対応した)透過率(減衰率)データベースを作り、未知の物質同定を行なう方法を提案した。今後、さらに測定点を増やして精度を上げたり、空間分解能等検討すべき点もあるが、この研究を進めて、従来透過が困難であった物質を測定できる新しいガンマ線イメージング技術の確立を目指していきたい。

参考文献

- [1] S.Amano, et al., "Several-MeV γ -ray generation at NewSUBARU by laser Compton backscattering", Nucl. Instr. and Meth. A 602 (2009) 337-341.
- [2] K.Horikawa, et al., "Measurements for the energy and flux of laser Compton scattering γ -ray photons generated in an electron storage ring: New SUBARU", Nucl. Instr. and Meth. A 618 (2010) 209-215.
- [3] 堀川賢他、「コンプトン散乱ガンマ線の特性測定と応用研究2」、日本物理学会講演概要集、第62巻、第2号、第一分冊(2007)122, 21pZG-5.
- [4] S.Miyamoto, et al., "Laser Compton back-scattering gamma-ray beamline on NewSUBARU", Rad. Meas. 41 (2007) S179-S185.