

平成 22 年 6 月 22 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007 ~ 2009

課題番号：19540419

研究課題名(和文) レーザコンプトンガンマ線による量子ビーム源の研究

研究課題名(英文) Quantum Beam Source Research by Laser Compton Gamma-ray

研究代表者

宮本 修治 (MIYAMOTO SHUJI)

兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・教授

研究者番号：90135757

研究成果の概要(和文): レーザコンプトン散乱ガンマ線源は、レーザ光を電子蓄積リングの高エネルギー電子で散乱させることで、発生できるユニークなガンマ線ビームである。本研究では、エネルギー1.0-1.7MeV、および6-17MeVのガンマ線光子を毎秒約 $10^7$ 個発生でき、世界最高クラスのガンマ線ビーム源を構成できた。またこのガンマ線の偏光を制御し、直線偏光度および円偏光度が90%以上であることを測定した。このガンマ線を用いて、光核反応中性子発生、電子-陽電子対発生、ガンマ線核変換を調べた。

研究成果の概要(英文): A laser Compton scattering gamma-ray source is a unique light source obtained by scattering a laser photon with a high-energy electron beam. In this research, we have actualized a world class gamma-ray beam source of  $10^7$  gamma-photon/s for 1-1.7 MeV and 6-17 MeV photon energy range. The linear and circular polarization degree of more than 90 % were measured. Using these gamma-ray source, a neutron generation by photo-nuclear reaction, an electron-positron pair creation, and a nuclear transmutation were studied.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ

キーワード：ビーム物理、量子ビーム

## 1. 研究開始当初の背景

(1)レーザ技術の進展は目覚しく、特に高輝度、高出力レーザ光の発生技術は固体レーザ分野で著しい。また短波長化としては、

限られた性能であるがプラズマ励起X線レーザが実用化の入り口に今や至っている。広帯域で使い易いチタンサファイヤレーザにより、波長可変とともに、フェムト秒からアト

秒にわたる極短パルス光の発生を可能にした。これによりPW(ペタワット)に達する超高強度のパワー集中が可能となり、新たな放射光源(電磁波、電子、イオンなど)の可能性を探る研究が始まっている。

(2)X線領域では、広帯域な放射光発生装置として電子蓄積リング技術も進化し、より高輝度な放射光を発生する第3世代放射光の利用、更には第4世代のX線自由電子レーザーが国家プロジェクトとして建設されている。しかし、既存のレーザーは勿論のこと、Spring-8のような大型放射光装置でも発生光子のエネルギーは100 keV程度に限られている。

(3)一方、数MeV~数十MeV領域での光核反応の精密測定は、宇宙核物理、原子核物理工学の分野において極めて重要になりつつある。これら応用研究を進展させるため、国内では産業技術総合研究所(つくば市)で、また米国ではデューク大学(ノースカロライナ)でレーザーコンプトン散乱(LCS)によるガンマ線ビームの発生とその応用実験が始められている。我々も、2000年ころから、レーザー技術と電子蓄積リング(NewSUBARU放射光施設)技術とを組み合わせ、LCSによる「高強度MeVガンマ線ビーム」の発生の実証とその基盤技術を確立するとともに、応用分野への有用性を検証してきた。

(4)従来の制動放射ガンマ線方式や大強度放射性同位体、原子炉の中性子捕獲によるガンマ線発生方法に比べ、LCSガンマ線は準単色発生が可能であり、また電子蓄積リングの高エネルギー電子(=2000-3000)を用いることで、散乱が相対論的に前方に集中するため、レーザー光と同程度の高い指向性を持つ。これを用いることで、光核反応断面積等を直接高精度で測定できる。

## 2. 研究の目的

現在までに、1GeVから1.5GeVの電子エネルギーをもつ電子蓄積リングにおいて、波長 $1\mu\text{m}$ の安定な高出力レーザーをコンプトン散乱させることで、6-40MeVの「ガンマ線ビーム」の発生を確認し、実験用の遮蔽ハッチを完成した。これを用いて、(1)核変換基礎研究、(2)核物理および天体核物理研究、さらに(3)ガンマ線イメージングによる非破壊検査への応用研究などを準備してきた。

この、ユニークなガンマ線光源をさらに発展させることで、「量子ビーム源」として利用することが可能である。高フラックス低エネルギーガンマ線(1-4 MeV)、中性子(1-4 MeV)、ポジトロンビーム(1-40MeV)を含む多重量子ビーム源を実現するために、これらビームを発生し、その特性評価を行うことを目的とする。加えて、これら量子ビームを利用した応用研究も実施する。

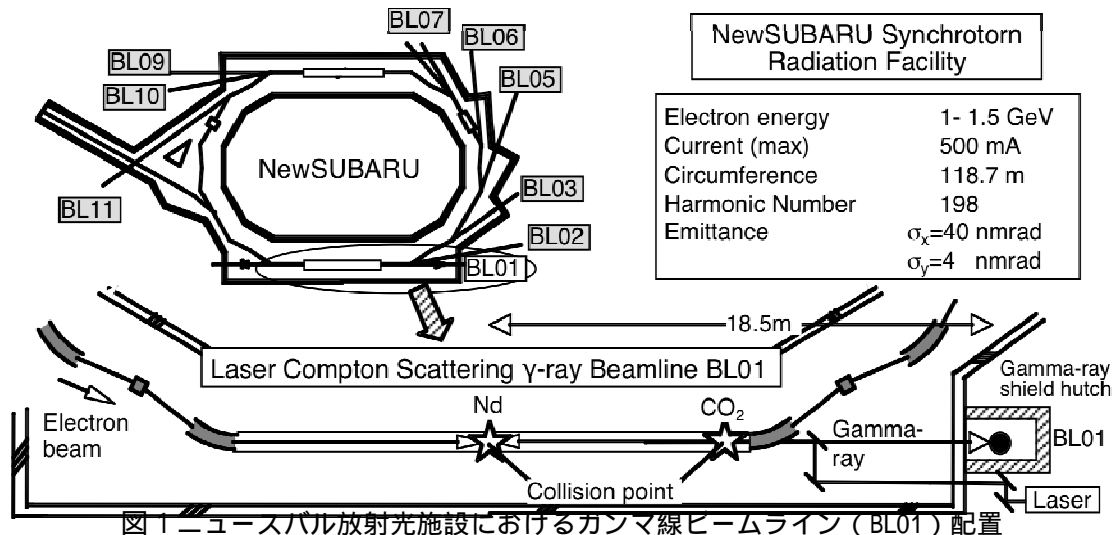
## 3. 研究の方法

(1) Ndレーザーを用いた、ガンマ線発生量の評価と最適化:

実験に用いた、ニュースバル放射光施設のガンマ線ビームライン(BL01)の配置を図1に示す。レーザー光を遮蔽トンネル外部より伝送し、レンズ、真空窓を介して真空ダクト内へ導き、散乱点で収束させる。レンズの焦点距離を変え、散乱点を動かし、ガンマ線フラックスの最適化を行った。

電子エネルギー0.974 GeVと、Ndレーザー(波長1064nm)を用いると、発生できるガンマ線エネルギーは、最大16.7 MeVになる。ガンマ線発生フラックスは、遮蔽ハッチ内で、NaI(75 x75 mm)、LYSO(60 x90 mm)、およびGSO(76 x180 mm)シンチレーション検出器を用いて測定した。

(2) CO<sub>2</sub>レーザーによる、低エネルギー・高フラ



ックスガンマ線発生：

電子エネルギー0.974 GeV で、CO<sub>2</sub> レーザ（波長 10570 nm）を用いると、発生できる線エネルギーは、最大 1.7 MeV になる。CO<sub>2</sub> レーザ導入のための赤外用偏光子、波長板、レンズ、真空窓を用いた。Nd レーザに比べ、CO<sub>2</sub> レーザは収束が困難なため、レンズから電子との散乱点までの距離は、Nd レーザの場合の約半分とした。低エネルギーガンマ線の計測には、Ge 検出器(64 mm x60 mm)を用いた。

(3) ガンマ線直線偏光度の測定：

ガンマ線の偏光は、入射レーザー光の偏光に依存し、また、散乱角度に依存する。電子とレーザーが正面衝突の場合、電子ビーム軸方向に散乱されるガンマ線はレーザー光子の偏光を保存して、直線偏光の場合には、同じ方法に偏光した直線偏光ガンマ線を発生する。直径 3mm の鉛コリメータを用いて、ガンマ線ビームの中央部分のみを取り出すことにより、高い偏極度のガンマ線を得ることができる。このガンマ線の直線偏極度を評価するため、適当な散乱体に照射し、散乱ガンマ線の強度分布を Ge 検出器で測定することで、偏極度を評価した。散乱角度は 90° を用いた。

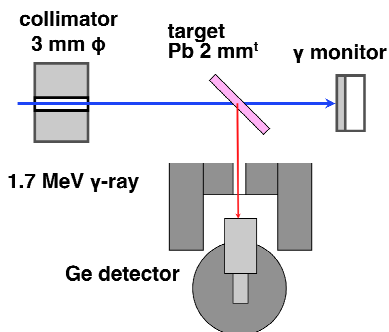


図2 ガンマ線のコンプトン散乱計測配置。直線偏光ガンマ線を 2mm 厚さの鉛ターゲットに照射し、90° 方向に散乱されるガンマ線を計測する。入射レーザー偏光方向を回転させることで、のガンマ線の偏光方向を変え測定した。

(4) ガンマ線円偏光度の測定：

円偏光レーザーを高エネルギー電子で散乱させると、円偏光ガンマ線を発生する。磁気コンプトン散乱を用いて、この円偏光偏極度を測定した。CO<sub>2</sub> レーザで発生した 1.7MeV ガンマ線の円偏光度を測定した。図3に計測配置を示す。磁化させた鉄ターゲットに磁化方向近傍の角度でガンマ線を入射し、後方散乱ガンマ線を Ge 検出器で計測した。散乱角度は、後方散乱ガンマ線

エネルギーが 250 keV 程度になるよう調整した。磁場方向と、円偏光ガンマ線の回転方向を変化させることにより、散乱強度の変化分を計測して、円偏極度を評価した。

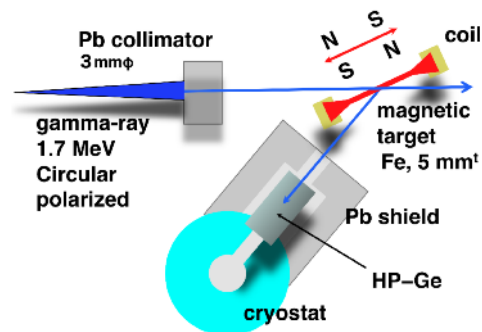


図3 磁気コンプトン散乱実験配置。コイルで磁化した、5mm 厚さの鉄ターゲットにコリメートしたガンマ線を照射し、約 130° 方向に後方散乱するガンマ線を、Ge 検出器で計測した。

(5) 光核反応による中性子スペクトル計測：

ピークエネルギー 16.7 MeV のガンマ線を光核反応ターゲット（金、鉛、NaI）に照射し、ガンマ線軸に対して、90° 方向から、発生中性子スペクトルを測定した。電子ビームにシングルバンチモードを用いることで、電子蓄積リング中を、400ns 毎に 1 回電子バンチが回転し、電子バンチに同期したガンマ線を発生させた。電子バンチ同期の電気信号を利用して、ガンマ線がターゲットに到達した時間から、中性子が検出器で計測された時間までの中性子飛行時間を測定し、中性子スペクトルを評価した。

(6) 陽電子発生とスペクトル計測：

ピークエネルギー 16.7 MeV のガンマ線を薄いターゲットに照射した後、ガンマ線進行方向に発生する電子・陽電子対を磁場で分離する。ターゲット直後に電磁石を置き、電子と陽電子を反対方向へ偏向させる。偏向した電子、陽電子はイメージングプレートで位置を測定し、そのスペクトルを評価した。別途イメージングプレートの電子及び陽電子感度データを取得して、陽電子発生率の評価も行った。

(7) 放射性核廃棄物の核変換基礎研究：

ガンマ線による核変換の基礎研究として、放射化法を用いて、金 (197-Au)、ヨウ素 (127-I) 等の核種に最大 16.7MeV のガンマ線を照射し、光核反応で生成する放射性核種崩壊で発生するガンマ線を、Ge 検出器、およびウェル型 NaI 検出器で計測した。この結果より、1GeV 電子でのレーザーコンプトン散乱ガン

マ線による核変換効率を評価した。

#### 4. 研究成果

(1) Nd レーザを用いた、ガンマ線発生量の評価と最適化：[論文 ]

図4に、GSO 検出器で計測したガンマ線スペクトル例を示す。

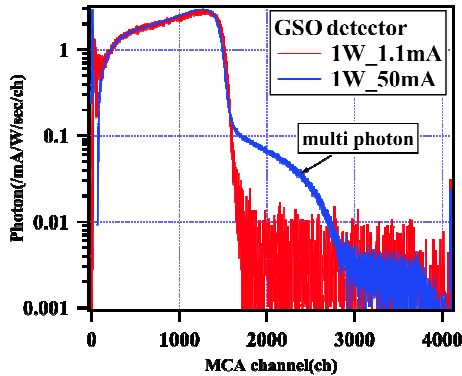


図4 GSO 検出器によるガンマ線スペクトル例

図4において、横軸のMCAチャンネルはY-88線源からのガンマ線で校正した。1640 chが16.7 MeVに対応している。電子電流50 mAの計測では、ガンマ線フラックスが高すぎるため、検出器に同時入射したガンマ線の和のエネルギーに信号が現れている。(図中、multi photon)。

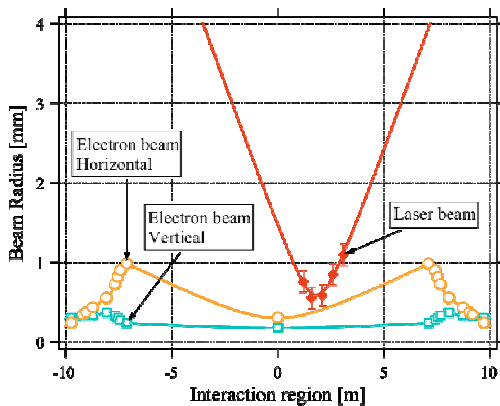


図5 電子-レーザー光子散乱点付近のビームサイズ。

図5は、電子蓄積リング内の、散乱点近傍での電子ビーム半径(水平、垂直)とレーザービーム半径( )を示す。電子ビームは左から右へ、レーザービームは、右から左へ入射している。レーザー収束位置を電子ビーム収束位置から約1.5m右にずらすことで取り出し可能全ガンマ線フラックスの最大化を図り、1GeV電子エネルギーモード(最大ガンマ線エネルギー約16.7 MeV)

において、ガンマ線規格化フラックス 6500 ガンマ光子/s/mA/Wを得た。レーザ出力5 W、電子ビーム電流500 mAの場合、 $1.6 \times 10^7$  ガンマ/秒のフラックスで発生することができる。また通常運転時(蓄積リングトップアップ。電流250mA一定で運転)では $8 \times 10^6$  ガンマ/秒を利用でき、レーザーコンプトン散乱ガンマ線ビームとしては、世界最高クラスの線源を実現できた。

(2) CO<sub>2</sub> レーザによる、低エネルギー・高フラックスガンマ線発生:[論文 ]

CO<sub>2</sub> レーザを用いて、規格化ガンマ線発生率、7300 /s/mA/Wを得た。

図6に、電子エネルギーを974 MeV, 1220 MeV, 1460 MeVに変化させたときの、3mm コリメーターを用いた場合の、ガンマ線のスペクトルを示す。横軸の光子エネルギーは、自然放射性核種K-40およびTl-208からのガンマ線で校正した。各スペクトルの右端の山が全エネルギーピークで、低エネルギー側のなだらかな山は、検出器内での応答関数による。検出器シミュレーションで評価すると、実際のスペクトルは最大エネルギー付近の10%程度のエネルギー広がりである。

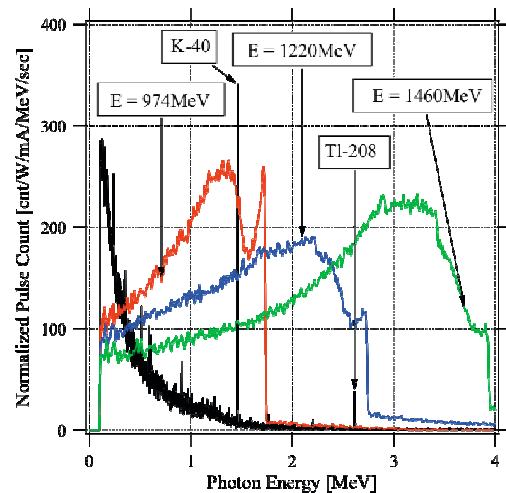


図6 CO<sub>2</sub> レーザコンプトン散乱ガンマ線スペクトル。

CO<sub>2</sub> レーザによるガンマ線発生では、散乱した電子のエネルギー変化は、 $1.7 \text{ MeV}/974 \text{ MeV} = 0.17\%$  以下であり、電子蓄積リング加速空洞の加速許容エネルギー幅より十分小さいため、蓄積リングの電子寿命にほとんど影響を与えない。このため、レーザ出力をあげることで、比例的にガンマ線フラックスを上昇できる。市販されている10 kWのCO<sub>2</sub> レーザを用いることで、 $10^{10}$  ガンマ光子/秒程度のガンマ線源が可能と評価できる。



(3) ガンマ線直線偏光度の測定:[論文 ]

CO<sub>2</sub> レーザコンプトン散乱による 1.7MeV ガンマ線の偏極特性を測定した。図7に、ガンマ線照射ターゲットからのコンプトン散乱強度の変化を、入射レーザ偏光角度の関数としてプロットしたものを示す。グラフにプロットした曲線は、入射レーザ偏光角が 90° のとき、取り出したガンマ線の偏光が 100%垂直偏光していると仮定して計算した、散乱強度分布である。

レーザ偏光方向を変化させたときの、散乱ガンマ線強度変化は、計算曲線とよく一致しており、3mm コリメータを用いると、ガンマ線の偏極度 90%以上が得られていると評価できた。各計測点は、1時間の照射で得られている。

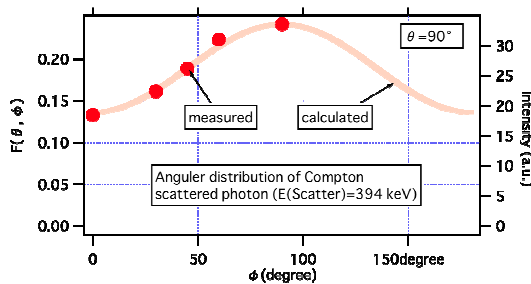


図7 コンプトン散乱強度の、ガンマ線偏光方向依存性。縦軸が水平方向散乱強度、横軸は、入射レーザ光の偏光角度。0° が水平偏光。

(4) ガンマ線円偏光度の測定:

磁気コンプトン散乱を用いて、1.7MeV ガンマ線の円偏光度評価を試験した。磁気コンプトン散乱では、磁場反転、あるいは円偏光の向きを反転することで、電子の軌道角運動量の効果を打ち消し、スピンによる効果のみを取り出すことができる。

図8に、散乱ガンマ線スペクトルを示す。右端のピークは、電子-陽電子消滅の 511keV ガンマ線。250keV 付近のピークが、130° 後方散乱ガンマ線である。ターゲットの磁場を反転させて計測した例で、後方散乱ガンマ線のピーク付近に少し差が見える。この差分を求めると、最大 3-4%程度の散乱強度の変化があり、レーザ円偏光度を切り替えると、散乱強度の差分も反転する。

この結果を、磁気コンプトン散乱効率比として、理論計算と比較して、ガンマ線の円偏極度を評価した。磁場ヒステリシスにそって計測し、さらに統計精度を向上したデータを取得した。円偏光度評価の精度向上を図っているが、現在のところ 90-100%の円偏極度と評価できている。

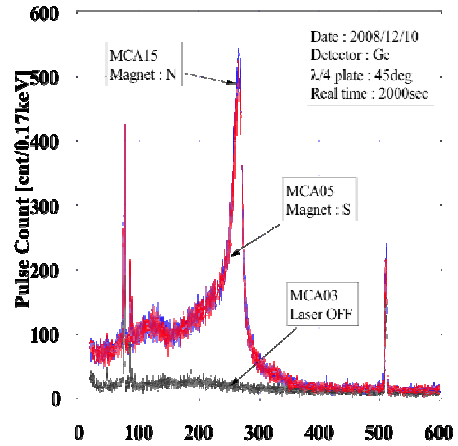


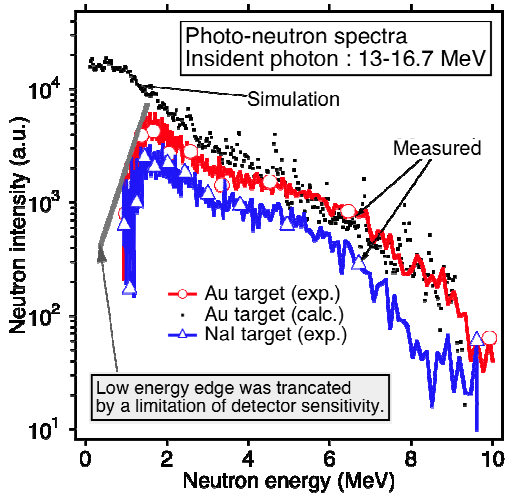
図8 磁気コンプトン散乱スペクトル。

(5) 光核反応による中性子スペクトル計測:[論文 ]

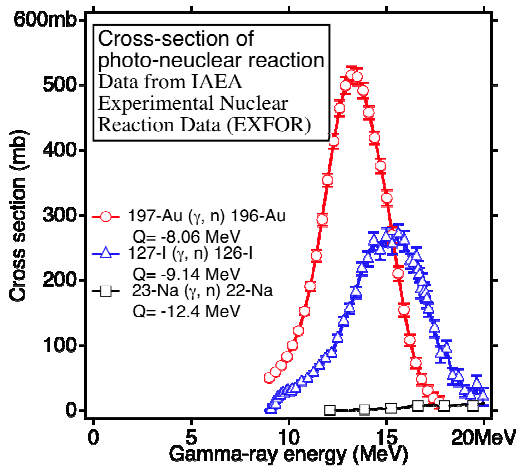
16.7MeVのガンマ線を元素ターゲット(鉛、金、ヨウ素)に照射し、光核反応で発生する中性子スペクトルを計測する手法を開発した。ガンマ線が電子バンチと完全に同期して発生することを利用して、電子蓄積リングを単バンチ電子で運転する。この運転モードでは、全周 118.7 m のリング内を 1 個の電子バンチが、396 ns 毎に周回している。周回は、加速器クライストロンの RF 周波数に同期しているため、数十ピコ秒程度の精度があり、ここで想定している中性子飛行時間(TOF、数十ナノ秒)に比べ十分短い。電子がパルスであるため、レーザもパルス動作させ、ガンマ線発生効率を改善している。発生するガンマ線は、電子バンチに同期しており、ターゲット照射時間すなわち光核反応の反応時間も高精度で確定することが出来る。ガンマ線入射タイミングと、そこから発生した、中性子が約 1 m はなれた中性子検出器で検出されるまでの時間差を時間振幅変換機(TAC)を通して多重信号分析器で積算し、中性子の TOF 信号を得る。

中性子 TOF 信号から、中性子エネルギースペクトルに書き直したものを図9(a)に示す。線は金ターゲット、線は NaI ターゲットの例である。図9(b)は、金-197、ヨウ素-127、ナトリウム-23 の光核反応断面積データである。ナトリウムの断面積は、ヨウ素に比べ 1/10 以下で、反応のピークエネルギーも 20 MeV 以上にあるため、今回の NaI ターゲットの結果は、ほぼヨウ素の光核反応と考えられる。計測結果の中性子最大エネルギーが金ターゲットの場合の方が約 1 MeV 高い。これは、核反応 Q 値の差で説明できる。レーザ・コンプトン散乱ガンマ線のスペクトルと光核反応断面積を用いた、シミュレーション(MCNP)による金ターゲットからの中性子スペクトル(図9(a)の点線)は高エネルギー側では測定値とほぼ一致している。しかしシミュレーションでは 2 MeV 以下でピークをもつが、計測値は大きく下回っている。

る。これは、低いエネルギーの中性子に対して、検出効率が低下しているためと考えている。低エネルギー中性子の計測には、エネルギー弁別型検出器の使用が適当と思われる。



(a)



(b)

図9 (a) 16.7MeVガンマ線で照射した、金-197、およびNaI-127ターゲットからの中性子スペクトル。(b)金-197 およびヨウ素-127の(γ,n)光核反応断面積。

(6) 陽電子発生とスペクトル計測: [論文]

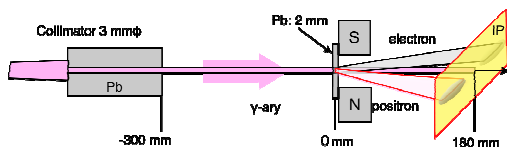


図10 電子対スペクトル計測配置

図10に実験配置を示す。16.7 MeVのコンプトン散乱ガンマ線ビームを鉛コリメーターで

直径 3 mm の細いビームとし、鉛ターゲット(厚さ 0.5 mm、2 mm)に入射し、後方に放射される電子対及び透過ガンマ線を磁場で分離した。分離した電子、ガンマ線はイメージングプレート(IP)を用いて計測した。電磁石は、5 cm の長さで、下から上向きに0.1-0.4 Tの磁場を印可した。計測は大気中で行った。ターゲットからIPまでの間の空気との相互作用で電子対生成が起る確率は、2 mm 厚さの鉛ターゲット中での相互作用の約1/300程度であるため、磁場で偏向された電子対は、ほぼすべてターゲットで発生したと考えてよい。図11(a)、(b)に磁極間の磁束密度を0.2 Tと0.1 Tにした場合の、電子陽電子分離像を示す。また、図11(c)は、鉛ターゲットの厚さを0.5mmとした場合の像である。これら強度分布を図11(d)に示す。磁場による偏向角度から、電子陽電子のピークエネルギーは10MeV付近で、ピークが磁束密度に依存して移動しているのわかる。中央のピークは透過ガンマ線による像

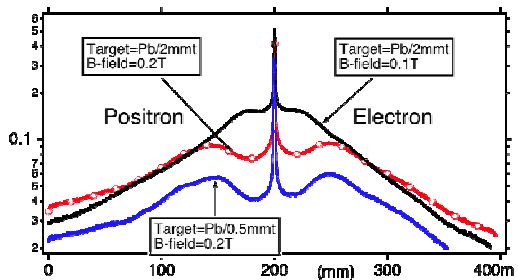
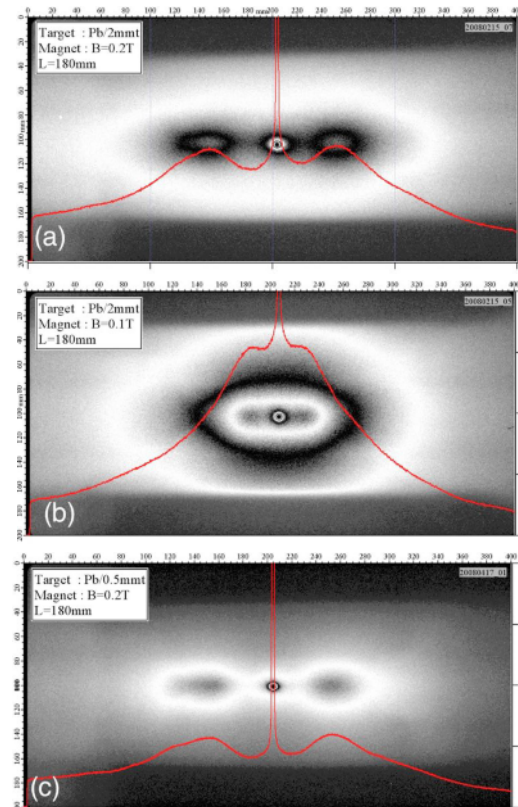


図11 電子用電子対の磁場偏向イメージ。中心のガンマ線軸からはなれるほど、エネルギーが低い

である。磁場の印可が無い場合は、このガンマ線軸を中心に、鉛ターゲット内で散乱した電子が円形像を描く。磁場印可した計測データにおける上下方向への広がり、主にターゲット中での電子散乱に起因する。

イメージングプレートの電子対象より、電子、陽電子の収量を評価した。電子と陽電子の比較では、電子のほうが22%程度多い結果となった。これは、ガンマ線のコンプトン散乱により高速電子が発生しているためと考えられる。鉛ターゲットの厚さを変化させて、陽電子取り出し効率を最適化した。実験的には、3mmの厚さの鉛ターゲットで陽電子取り出し率約4%を得た。ここで、取り出し効率は、16.7MeV近傍のガンマ線1光子当たりの、取り出し可能な陽電子個数で定義した。

#### (7)核変換基礎研究:[論文、図書]

##### 放射化法

ヨウ素-129などの長寿命放射性核廃棄物の処理を目的として、ガンマ線による核変換試験を行った。ヨウ素-129は寿命が1570万年であり、国内原子力発電所から年間約200kg排出されている。しかし、15MeV近傍のガンマ線を照射することにより、 $(\gamma, n)$ 光核反応で、ヨウ素128に変換でき、これは寿命約25分で崩壊し、安定なキセノンに変わる。

放射性同位元素ヨウ素129を大量に実験に用いることは困難なため、化学的形態がほぼ同じ、ヨウ素-127を用いて試験を行った。16.7MeVのガンマ線を、ヨウ素-127に照射し、核変換したヨウ素-126の崩壊ガンマ線を測定することで、ヨウ素-127の核変換効率を測定した。ターゲットとしては、化学的に安定で常温固体のNaI(10mm x 50mm)を用いた。Naとの化合物であるため、ヨウ素密度は半分になるが、Naの $(\gamma, n)$ 反応断面積のピークエネルギーは25MeV当たりで、ヨウ素に比べ断面積も小さい、生成物であるNa-22の寿命も長い、核反応生成物からの崩壊ガンマ線はヨウ素のみを考慮すれば良い。

ヨウ素-126は半減期13日で、Te(56%)あるいはXe(44%)に崩壊し、388keV(34%)および666keV(33.1%)のガンマ線を放出する。この崩壊ガンマ線を計測することにより、半減期を確認した。ガンマ線照射料は、MCNPシミュレーションによれば、放出されるガンマ線の72%がターゲット内で再吸収されるため、これを考慮して核変換収量を評価した。

一方ガンマ線照射量は以下のように評価した。直径10mmのターゲットに対して、約 $3 \times 10^6$ 光子/秒で、8時間照射したため、照射全線光子数は約 $8.6 \times 10^{10}$ と評価でき、ガンマ線モニタによる評価値と一

致している。これらの値から計算した核変換効率は、1.37%と評価され、シミュレーション結果1.33%とほぼ一致した。ヨウ素-127単体であれば、ほぼこの倍の核変換効率が得られると期待できる。

この結果から、放射性核種ヨウ素-129の核変換試験に必要なヨウ素-129ターゲット量を評価すると、3.7kBq( $5.7 \times 10^{-4}$ g)となり、使用可能な量であるため、今後ヨウ素-129を用いた試験を行う。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計8件)

K.Horikawa, S.Miyamoto, S.Amano and T.Mochizuki, "Measurements for the energy and flux of laser Compton scattering  $\gamma$ -ray photons generated in an electron storage ring: NewSUBARU", Nuclear Instrum. and Methods in Phys.Res.(査読あり)A618 (2010)209-215.

D.Li, K.Imasaki, S.Miyamoto, K.Horikawa, S.Amano, and T.Mochizuki, "Positron generation through laser Compton scattering gamma ray", Appl.Phys.Lett., (査読あり)94, (2009)091112.

S.Amano, K.Horikawa, K.Ishihara, S.Miyamoto, T.Hayakawa, T.Shizuma, and T.Mochizuki, "Several-MeV  $\gamma$ -ray generation in NewSUBARU by laser Compton backscattering", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, (査読あり) 602(2009)337-341.

D.Li, K.Imasaki, K.Horikawa, S.Miyamoto, S.Amano and T.Mochizuki, "Iodine Transmutation through Laser Compton Scattering Gamma Rays", J. Nuclear Science and Technology, (査読あり)46 (2009) 831-835.

S.Miyamoto, "Laser Compton Gamma-ray Generation", ICFA Panel on Advanced and Novel Accelerators Newsletter(査読なし), Dec.(2009) 17-22.

T.Hayakawa, T.Shizuma, S.Miyamoto, S.Amano, K.Horikawa, K.Ishihara, M.Mori, K.Kawase, M.Kando, N.Kikuzawa, S.Chiba, T.Mochizuki, T.Kajino, M.Fujiwara "Half-life of  $^{164}\text{Ho}$  isomer populated in  $(\gamma, n)$  reactions with laser Compton

scattering -rays at NewSUBARU", Phys. Rev. (査読あり), C77(2008)068801-1-4.

宮本修治、堀川賢、「ニュースバルガンマ線源性能と利用研究」レーザー学会誌「レーザー研究」(査読あり)第36巻(2008)798-805.

〔学会発表〕(計25件)

〔図書〕(計1件)

D.Li, K.Imasaki, S.Miyamoto, S.Amano, and Takayasu Mochizuki, "Nuclear Transmutation through Laser Compton Scattering Gamma-ray", "Nuclear Waste Research: Siting, Technology and Treatment", Nova Science Publication, Inc., New York, ISBN 978-1-60456-184-5, pp., (2008) 189-205.

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

[http://www.lasti.u-hyogo.ac.jp/beam\\_physics/BPResearch/GAMMA.html](http://www.lasti.u-hyogo.ac.jp/beam_physics/BPResearch/GAMMA.html)

[http://www.lasti.u-hyogo.ac.jp/beam\\_physics/BPResearch/BL01.html](http://www.lasti.u-hyogo.ac.jp/beam_physics/BPResearch/BL01.html)

<http://www.lasti.u-hyogo.ac.jp/NS/facility/bl01/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮本 修治 (MIYAMOTO SHUJI)  
兵庫県立大学・高度産業科学技術研究

所・教授

研究者番号：90135757

### (2) 研究分担者

天野 壯 (AMANO SHO)

兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・助教

研究者番号：50271200

### (3) 連携研究者

李 大治 (LI DAZHI)

レーザー技術総合研究所・研究員

研究者番号：00373209

藤原 守 (FUJIWARA MAMORU)

大阪大学・核物理研究センター・准教授

研究者番号：00030031

早川 岳人 (HAYAKAWA TAKEHITI)

(独)日本原子力研究開発機構・量子ビーム  
応用研究部門・主任研究員

研究者番号：70343944