

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25600139

研究課題名(和文) 射出方向・エネルギー・エネルギー広がり可変の高輝度X線・ガンマ線ビーム発生法

研究課題名(英文) Control method of direction, energy, energy spread of high-brightness X-ray/Gamma ray

研究代表者

紀井 俊輝(KII, Toshi teru)

京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授

研究者番号：30314280

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー逆コンプトン散乱X線・ガンマ線は、基礎物理学・非破壊検査・医療応用をはじめとして幅広い領域で応用研究が進みつつある。本研究では研究代表者の考案した電子ビーム偏向装置と非球面ミラーを用いるレーザー光学システムを組み合わせることで、レーザー逆コンプトン散乱X線・ガンマ線のスキャンニングや、エネルギー・エネルギー広がり制御が可能であるかの検証を行った。

想定される実機の1/10スケールとなるように非球面鏡の製作を行い、光学特性を評価した。また、いくつかの具体的な実施例の概念設計を行った。

研究成果の概要(英文)：A tunable quasi-monochromatic X-ray/gamma-ray is useful for fundamental nuclear experiments using high energy photon, industrial non-destructive imaging applications, medical angiography, and so on. Especially in such practical applications, reduction of radiation exposure is important. In order to increase the ratio of useful photon quanta to the total photon quanta, the bandwidth of the X-ray/gamma-ray should be narrowed. A laser Compton scattering (LCS) X-ray or gamma ray which is generated through Compton scattering of laser light on high-energy relativistic electron can generate high-flux X-ray/gamma-ray beam with narrow bandwidth. However, the direction of photon beam is limited to the direction of electron beam.

In this work, a new method to control direction of photon beam using non-spherical mirror and multi pole wigglers was tested. An 1/10 scale of non-spherical mirror was fabricated and several real-scale models for specific application were designed.

研究分野：ビーム科学

キーワード：ガンマ線源 コンプトン散乱

1. 研究開始当初の背景

高輝度・狭帯域の X 線・ガンマ線ビームは基礎物理学や非破壊検査・医療応用といった分野をはじめとして幅広い領域で応用研究が進みつつある。近年発展の著しい X 線自由電子レーザーは X 線領域でのレーザー発振を利用することで極めて期待も大きい、その一方で施設が極めて巨大であり、基礎からお用に至る大規模での展開は現時点では期待しにくい。本研究で対象とするレーザー逆コンプトン散乱を利用した X 線・ガンマ線発生方法は、ほぼ光速で運動する電子線にレーザーを衝突させることで電子の運動方向に比較的能量のそろうた高輝度な X 線・ガンマ線を発生させるものである。(図 1)

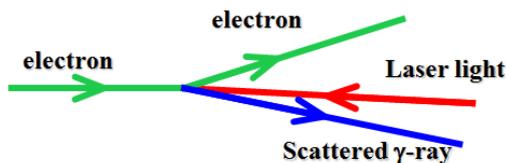


図 1. レーザー逆コンプトン散乱 X 線・ガンマ線発生の様式図

X 線・ガンマ線の発生方向はほぼ電子ビームの進行方向と等しく、ビームの広がり角は電子線エネルギーが高くなるほど小さくなりその大きさは $1/\gamma$ (γ はローレンツ因子で $\gamma = (1 - (v/c)^2)^{-1/2}$) となっている。電子蓄積リングに蓄えられた平均電流 100 mA 程度の電子ビームと市販の高出力 YAG レーザーとの組み合わせで毎秒 10^7 個程度の高輝度 X 線・ガンマ線が実験に利用できる。ところが、X 線・ガンマ線を広帯域で反射しビームの進行方向を変えるための物質がないことから、通常は X 線・ガンマ線を照射する対象物を移動させることでスキャニング照射を実現せざるを得ない。これは、非破壊検査で対象とするような大型対称物や、生体実験などで対象物の特定の位置のスキャンが必要な場合に問題を生じている。

この問題を解決することを目的とし、電子ビームを偏向しレーザーを追随させて衝突させることで X 線・ガンマ線ビームの出射角度を制御するアイデアは提案されてはいるものの[特開 2009-187725:IHI]、容易かつ精密に衝突点、角度の調整が可能な方式とはいえず、これまでに国内・国外において射出方向の制御が可能な X 線・ガンマ線ビームは実用化されていない。

研究代表者は、2010 年から「原子核共鳴散乱を利用したコンテナ等の大型対象物中に隠ぺいされた特定核物質の非破壊探知技術物質探知システム」の開発を進めている。X 線・ガンマ線ビームの走査を実現した場合、大型対象物検査の大幅な高速化が実現され、非破壊検査のブレークスルーにつながる。研究代表者は、2011 年に電子ビーム偏向装置と非球面ミラーを用いたレーザー光学系の組み合わせによる簡便な X 線・ガンマ線の射出

方向・エネルギー・エネルギー広がり制御手法の着想に至り、新方式の提案を行った。[特願 2011-34193:京都大学 紀井] (図 2)

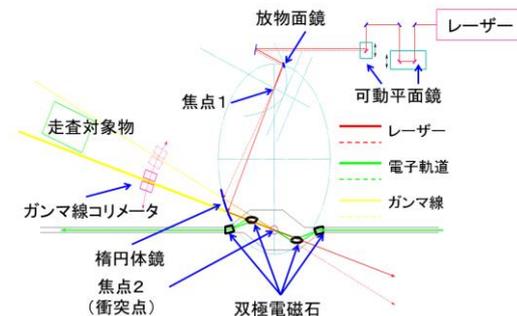


図 2 研究代表者の考案したレーザー逆コンプトン散乱における新方式の様式図

本手法の有効性の検証および、X 線・ガンマ線ビーム走査の技術基盤の確立は、X 線・ガンマ線ビームを用いた生体や大型対象物の診断・検査等、幅広い領域できわめて有用であり、急務である。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者の考案した非球面鏡と電磁石群とを組み合わせた新方式によりガンマ線の射出方向・エネルギー・エネルギー広がりを可変とする照射系が実現できるかどうかを調査し、その具体的な実施例を提案することとした。

(1) X 線・ガンマ線射出方向

X 線・ガンマ線射出方向については、電子線の進行方向と一致するため、電子ビームの進行方向を磁場によって制御することで実現する。ただし、新方式で利用する回転大円体鏡の焦点を常に通過するようなビーム軌道を実現する必要があり、最低 2 個の磁場発生装置を用いる。また、電子ビームの周回また減速・廃棄を行うために衝突点下流側にも同様の磁場発生装置を用意する。

(2) X 線・ガンマ線エネルギー

レーザー逆コンプトン散乱では、レーザービームと電子ビームの衝突角度が 0 度（正面衝突）から外れるにしたがって若干エネルギーが低下する。このことからレーザーの入射角度を若干変化させることで X 線・ガンマ線エネルギーの微調整が可能になる。

(3) X 線・ガンマ線エネルギー広がり

上記(2)の方法の拡張版であり、入射するレーザーの入射角度に広がりを与えることでガンマ線エネルギー幅の微調整が可能になる。特性 X 線吸収や、原子核共鳴散乱(NRF)のように、物質固有の共鳴ピークをカバーするエネルギー幅を持つ X 線・ガンマ線を照射することで、明確なピークをとらえることが

可能になり、特に X 線・ガンマ線を利用した非破壊検査で、高い物質判別能力を得つつ不要な X 線・ガンマ線照射を提言することが可能になる。

3. 研究の方法

まず、上記(1)~(3)を実現するための光学系の設計を行い、複雑な表面形状を持つ鏡の製作をおこなった。その後、性能評価を行ったのち、光学シミュレーションを用いて X 線・ガンマ線の射出方向・エネルギー・エネルギー広がりを変変とする照射が可能であるかを調査した。

次に、具体的な設計のために基本となる 4 つの双極電磁石の配置等のデザインを行ったのち、衝突点におけるビーム特性を調整するための補償電磁石系の概念設計を行った。これに基づき、X 線領域からガンマ線領域のいくつかのエネルギーにおいて有用性が期待できる応用事例に向けたレーザー照射系・電子ビーム制御系の概念設計を実施した。

4. 研究成果

(1) 非球面鏡の設計

複雑な表面形状を持つ鏡であることに起因し製造可能なパラメータを検討した結果、以下の仕様の鏡とした。光学 CAD でのイメージ図を図 3 に光学トラッキングシミュレーションの結果を図 4 に示す。また鏡の写真を図 5 に示す。鏡の形状としては切削可能な曲率との兼ね合いにより当初想定したものより球に近いものとなった。

回転楕円体：長半径 275 mm 短半径 250 mm

鏡の形状：矩形型 70mm x 30 mm

材質：Zerodur

厚さ：15 mm，低反射コーティング(1064 nm)



図 3 光学 CAD による回転楕円体鏡の模式図

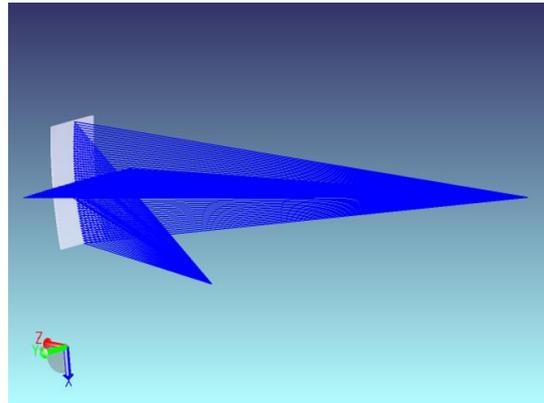


図 4 光学トラッキング例 奥側が光源（第一焦点）、手前が衝突点（第二焦点）を表す。

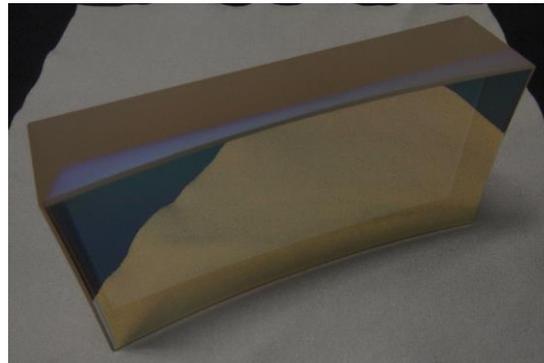


図 5 回転楕円体鏡の写真（横向き）

製作後の測定では長半径 274.94 mm 短半径 249.95 mm となり高精度の非球面鏡の製作が行われた。

切削容易軸と加工サイズの制約により、走査可能な衝突角度はおおよそ 7.7 度となった。

(2) 具体的な設計例

① X 線血管造影用スキャニング装置

33~40 keV の高輝度・準単色 X 線装置に X 線射出方向・エネルギー制御性を付与すると、血管造影によく用いられるヨード造影剤（K 吸収端 53I 33.16 keV）、硫酸バリウム（56Ba 37.41 keV）、キセノンガス（54Xe 34.56 keV）といった造影剤固有の K 吸収端を含む狭帯域の X 線を照射することで、生体に対する放射線照射の影響を最小限に抑制しつつ明確な血管画像を取得することが期待できる。

本システムでは、レーザーに波長 1 μm 近傍のものを用いると、40~48 MeV の電子線との正面衝突が血管造影に適した X 線の発生条件となる。電子・レーザー衝突点から 5 m 程度離れた場所を照射位置とすると、8 度のスキャニングで 60 cm 程度のスキャンが可能になる。図 6 に具体例を示す。

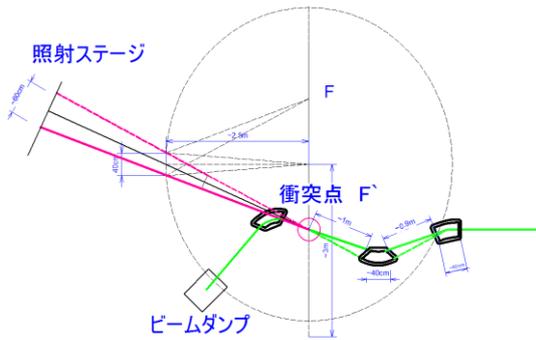


図6 血管造影への応用例

②コンテナ中の特定核物質非破壊検査用装置

2MeV 近傍の原子核共鳴散乱ピークを活用した非破壊検査を想定した場合、①と同様レーザー波長を1マイクロメートル程度に設定すると電子ビームエネルギーは350 MeV が条件を満たす。(1064 nm:1.16 eV, 350 MeV でおよそ2.2 MeV のガンマ線が発生できる。) 幅2m をガンマ線スキャンによりカバーするためには、衝突点からの距離を10m としたときに、10度のスキャンが必要となる。図7にコンテナを対象とした実施例を示す。

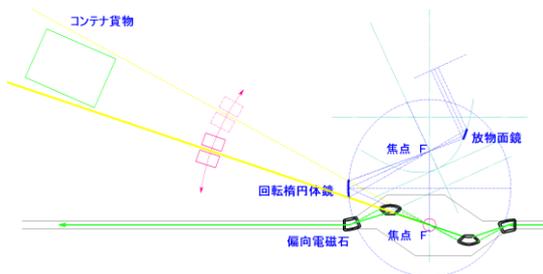


図7 コンテナ検査への応用例

③次世代蓄積リング用超高輝度ガンマ線走査装置

10 MeV を超えるエネルギー領域での基礎研究を想定し、次世代3 GeV 級の電子蓄積リングと高出力CO2レーザーや高出力ファイバーレーザーなどの組み合わせを想定する。上記②のコンテナ対象と同じ磁石配置を想定すると、4つの双極磁石の距離すなわち光源挿入のための直線部の長さはおおよそ5mとなる。しかしおおよそ10度の角度スキャンを行うことで軌道長が30cm近く変化してしまうため、同じ磁石構成のものを直列に2台組み合わせ軌道長を補償する必要が生じる。その結果必要な長直線部の長さは10mとなってしまう、コンパクトな次世代蓄積リングの要件を満たしにくくなる。また、双極電磁石も大型化が必須であり、実現性が低くなってしまふ。これを補うためには、超伝導電磁石による変更電磁石群の置き換えといった小型

化対策が必須であると考えられる。

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0件)

[学会発表] (計3件)

- ① T. Kii、Application of Shielding Current in Bulk HTS to Control Magnetic Field Distribution、The 9th International Workshop on Processing and Application of Superconducting (RE)BCO Large Grain Materials、2015年9月3～4日、Academic Hall of the University of Liege
- ② 全炳俊、平義隆、許斐太郎、早川岳人、静間俊行、山崎潤一郎、紀井俊輝、豊川弘之、加藤政博、大垣英明、UVSOR における1.94μメートルファイバーレーザーを用いたレーザーコンプトン散乱ガンマ線発生、12回日本加速器学会年会、2015年8月5～7日、プラザ萬象・アイアイプラザ
- ③ H. Zen, Y. Taira, T. Konomi, Hayakawa, T. Shizuma, J. Yamazaki, T. Kii, H. Toyokawa, M. Katoh, H Ohgaki, Generation of High Energy Gamma-ray by Laser Compton Scattering of 1.94-micron Fiber Laser in UVSOR-III Electron Storage Ring、12th Eco-Energy and Materials Science and Engineering、2015. 5. 12 PEACE LAGUNA RESORT SPA

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

6. 研究組織

(1)研究代表者

紀井 俊輝(KII, Toshiteru)

京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授

研究者番号：30314280

(2)研究分担者

(3)連携研究者