

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 17 日現在

機関番号：84502

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24241035

研究課題名(和文) アンジュレータ放射X線を用いた逆コンプトン散乱による準単色GeVガンマ線の生成

研究課題名(英文) Production of Quasi-Monochromatic GeV photons by Compton Scattering using Undulator X-ray radiation

研究代表者

大熊 春夫 (Ohkuma, Haruo)

公益財団法人高輝度光科学研究センター・光源基盤部門・特別囑託

研究者番号：60194106

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,800,000円

研究成果の概要(和文)：蓄積リングに設置したアンジュレータからの放射光X線を反射して、蓄積リングを周回する電子ビームとのコンプトン散乱により、ほぼ蓄積電子ビームのエネルギーと同じフォトンエネルギーの準単色GeVガンマ線を生成する事が出来る。ダイヤモンドC(444)90度垂直入射のBragg反射では94%の反射率が得られた。本研究目的の検証に適したSPring-8の加速器診断ビームラインBL05SSにBragg反射ミラーと高エネルギーガンマ線の検出システムを設置した。高エネルギーガンマ線測定に最適化した、9本のPWOシンチレーターを束ねた新しい検出器を開発した。これらを用いた8GeV準単色ガンマ線の生成を目指した。

研究成果の概要(英文)：Backward Compton scattering (BCS) of X-ray photons emitted from undulator in the electron storage ring and reflected back by a single crystal can produce a quasi-monochromatic gamma-ray beam up to an energy very close to the stored electron beam energy. The SPring-8 beam diagnostics beamline (BL05SS) is used to inject a reflected undulator X-ray radiation against 8 GeV stored electron beam and to extract a quasi-monochromatic 8 GeV gamma-ray produced by BCS. BL05SS has conditions to do a pilot experiment to obtain the gamma-ray beam. Reflectivity measurement of silicon and diamond Bragg mirrors at normal-incidence (90 degree) had been done. We confirmed that the reflectivity of diamond C(444) is 94%. Experimental setup including a Bragg mirror system was constructed. Also, we developed a new detector for high-energy gamma-ray which is comprised of eight PWO scintillators. We have tried to produce an 8GeV quasi-monochromatic gamma-ray beam using our newly developed system.

研究分野：加速器物理

キーワード：コンプトン散乱 高エネルギーガンマ線 量子ビーム 加速器 準単色ガンマ線 レーザー電子光源技術

1. 研究開始当初の背景

(1) GeV 領域ガンマ線を用いた研究

研究開始前年の平成23年では、SPring-8 で紫外領域レーザー光と電子ビームの相互作用(逆コンプトン散乱)により、2.3GeV までのガンマ線を生成してクォーク核物理の研究が行われていた(引用文献)。また、米国ジェファソン研究所では Bremsstrahlung によるガンマ線を用いた同様の研究が行われていた。このような背景の中、本研究がもたらす準単色の8GeV ガンマ線を用いることにより、研究対象となる核反応生成過程が広がり、クォーク核物理の研究は飛躍的に発展することが期待できると考えた。

(2) 入射光子の高エネルギー化による準単色高エネルギーガンマ線の生成

高エネルギー電子ビームと相互作用する入射光子の光子エネルギーが高くなると、逆コンプトン散乱により生成されるガンマ線の光子エネルギーは、ほぼ電子ビームのエネルギーと同じになり、図1に示すように逆コンプトン散乱生成ガンマ線の低エネルギー部分がほとんどない準単色の高エネルギーガンマ線を得ることが出来る。

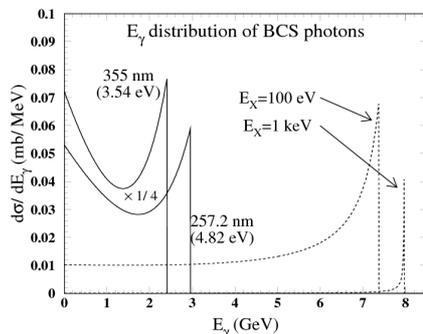


図1. 8GeV電子と紫外レーザー、X線とのコンプトン散乱の断面積。

(3) 装置開発面での学術的背景

2008年にKwang-Je Kim等によって、エネルギー回収型Linac(Energy Recovery Linac)に設置するBragg反射ミラーおよび複合屈折レンズを組み合わせたX線自由電子レーザー共振器(XFEL)が提案された(引用文献)。平成24年当時では、XFELはそれを設置して試験を行うことが出来るERLが存在しないこともあるが、XFEL装置開発のためのR&Dもほとんど行われていない状況にあった。本研究を進める放射光用電子蓄積リングは、そのビーム特性がERLほどの優れた可干渉性はなく、XFELの開発を直接行うことは出来ないが、本研究の遂行により得られた知見はXFEL研究開発に取っても重要なものとなると考えた。

2. 研究の目的

(1) 放射光用電子蓄積リングに設置されているアンジュレータからの高強度の放射光X線をBragg反射ミラーにより蓄積リング内に

戻して、電子ビームと放射光X線の逆コンプトン散乱を実現する。これにより生成される高エネルギーガンマ線は準単色で、その光子エネルギーは蓄積電子のエネルギーとほぼ同じになる。今までにこのような光源は存在せず、これによりクォーク核物理などの飛躍的な発展を促進する。図2は本研究の手法を示した概念的な図である。

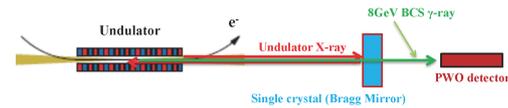


図2. 電子ビームとアンジュレータ放射光X線による高エネルギー準単色ガンマ線の生成手法を示す概念図。

(2) 高強度X線の反射技術の確立により、自由電子レーザー等の開発にも重要な寄与をする。本研究は、この新しく準単色で強力な高エネルギーガンマ線を世界に先駆けて実現することを目的とする。

3. 研究の方法

SPring-8に設置されている加速器ビーム診断用ビームラインの光源として用いられているアンジュレータ(周期数51、周期長76mm)からの放射光X線のBragg反射ミラーと複合屈折レンズによる反射、集光特性を調べ、最終的には、それらをシステム化してアンジュレータが設置されている蓄積リング直線部の上流および下流に設置してキャビティ構造を形成する。ビームライン光学ハッチ内に高エネルギーガンマ線計測システムを設置して、生成ガンマ線の強度を計測する。また、好調に研究が進捗した場合にはガンマ線の偏極度の計測も試みる。

(1) 新たに開発するシステム

Bragg反射ミラーシステム超高真空チェンバ内に完全単結晶をマウントしたシステムを設計、開発する。チェンバ内のミラーには低温冷却系が取り付けることが出来るように設計する必要がある。

(2) 複合屈折レンズシステム

放射光X線と電子ビームの高効率コンプトン散乱を達成するためには、X線の発散を抑え、且つ散乱断面積を大きくするためにX線集光が必要である。複合屈折レンズを超高真空チェンバ内に組み込んだシステムを設計、製作する。

4. 研究成果

(1) 本研究の目的である「蓄積リングに設置したアンジュレータからの放射光を反射して、蓄積リングを周回する電子ビームとのコンプトン散乱により準単色のGeVガンマ線を生成する」ために、まず必要となるBragg反射ミラーマウント機構が組込み可能な超高真空仕様の「GeVガンマ線生成用ブラッグ

ミラーチェンバ」の設計・製作を行った。また、検討の結果、Bragg 反射ミラーとして当初計画していた  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  完全結晶は、多数の背面反射結晶面を持つため、本研究の初期の背面反射面の確立、試験には必ずしも適していないと判断して、Si 単結晶とダイヤモンド結晶を用いた場合の検討を進め、これらの背面反射の実験的検証として、既存の放射光実験用ビームラインにおいて Si(008)面による背面反射実験を行い、60%以上の反射率があることを確認した。このような、試験測定を必要とときに容易に行うことが重要であると考え、本研究を行う SPring-8 の加速器診断ビームライン BL05SS に、分光器出射光を用いて結晶の反射・透過特性を用いる事が出来る測定環境整備を行った。このためにベリリウム窓を真空遮蔽部に取付けた可動式真空遮断バルブの開発を行った。

(2) 加速器診断ビームライン BL05SS に構築した分光器出射光によって結晶の反射・透過特性を測定する事が出来る設備(図3)を用いて、Si(008)および結晶面の異なる Si(555),(333)面の背面反射実験を行った。

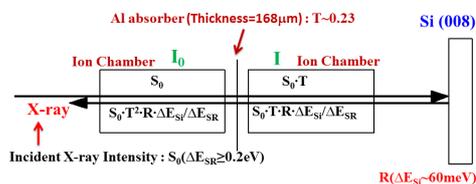


図3. 90度垂直入射光のBragg反射によるSi単結晶の反射率を測定するシステム。2台のイオン・チェンバをタンデムに配置して、その間にAl薄膜の吸収体を置くことにより、各々のイオン・チェンバの出力値からSi単結晶の反射率を評価する事が出来る。

その結果(008)面では光子エネルギー9.13keVにおいて38%、(555)面では光子エネルギー9.89keVにおいて33%、(333)面では光子エネルギー5.93keVにおいて45%の反射率を得る事が出来た。いずれの場合も分光器のエネルギー分解能、結晶格子のBragg反射のエネルギー幅に不確定要素があるため、実質的な反射率はこれよりも高い可能性があることが分かっている。

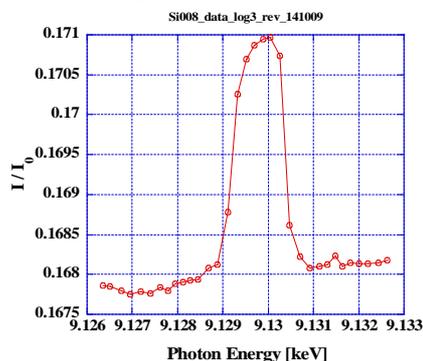


図4. Si(008)面の90度垂直入射光のBragg反射測定の結果。

図4はSi(008)面の90度垂直入射光のBragg反射測定の結果を示したものである。分光器からの入射光のエネルギー幅と結晶の反射光のエネルギー幅を仮定して求めた反射率は38%であったが、反射光のエネルギー幅はもっと狭い可能性があるので、反射率は100%近いと考えている。この測定が90度垂直入射のBragg反射条件を満たしているかを確認した結果が図5である。

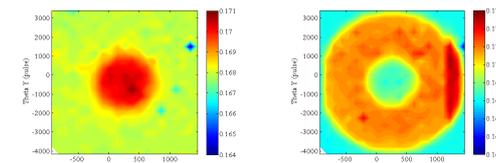


図5. 光軸の周りで2次元スキャンを行った結果。左は90度垂直入射のBragg反射条件を満たしている場合。右は条件からずれている場合。

(3) Si結晶での測定に引き続いて、加速器診断ビームラインBL05SSに構築した分光器出射光を結に照射して反射、透過特性を測定出来るシステムを用いてダイヤモンド結晶の背面反射実験を行った。C(333)面では光子エネルギー9.03keVの入射光に対して63%、C(444)面では12.04keV入射光に対して94%、C(555)面では15.05keV入射光に対して61%、C(777)面では21.07keV入射光に対して22%、C(888)面では24.08keV入射光に対して22%、C(999)面では背面反射光は測定できなかった。これらの結果から、ダイヤモンド結晶を用いる場合には、C(444)面またはC(333)面を用いてガンマ線生成の高効率な実験を行うことが出来ることが分かった。図6はC(444)Bragg面の90度垂直入射光のBragg反射測定の結果を示したものである。

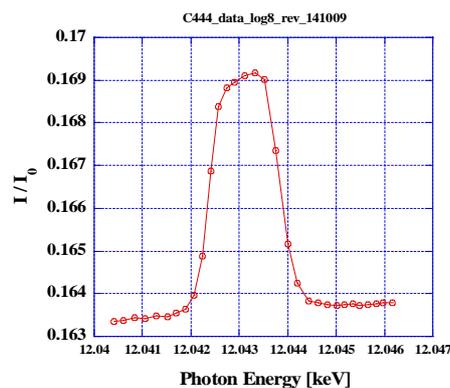


図6. C(444)面の90度垂直入射光のBragg反射測定の結果。

次にミラーマウント機構にミラー冷却系を組み込んだシステムの設計・製作を完了させた。その他のガンマ線生成実験に必要なアンジュレータ放射X線の取り出しとBragg反射光を再び蓄積リング内に戻すために必要となるBe窓、生成されたガンマ線以外のフォトンビームを吸収する銅アブソーバなどの設計製作を完了させた。

(4) 本研究課題の最終年度に当たる平成27年度には、高エネルギーガンマ線計測システムの構築を進め、准単色ガンマ線生成実験を実施する予定で研究計画を進めた。当初の計画では平成27年度の夏期運転停止期間に設置工事を完了する予定であったが、SPring-8大型放射光施設の運転計画の変更により、設置工事は冬期運転停止期間に実施せざるを得なくなり、生成試験の実施などを平成28年度に繰越す計画を申請して認められた。このために、平成26年度までに製作したBraggミラマウント機構（ミラー冷却系組込）、Be窓、銅アブソーバなどを、ガンマ線生成試験を行うSPring-8の加速器診断ビームラインII（BL05SS）に平成27年度1月以降の冬期運転停止期間に設置した。更に平成28年度に断面積20 mm × 20 mm、長さ200 mmのPWO（タングステン酸鉛 $PbWO_4$ 結晶）シンチレータ9本を束ねたバックグランドノイズから目的の信号を検出するためのGeVガンマ検出器を新たに開発した（図7）。

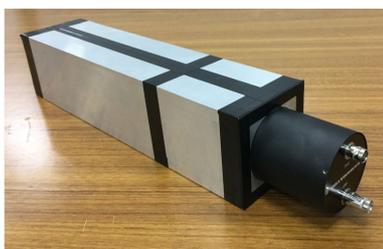
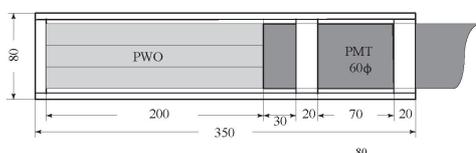


図7. 開発したPWOシンチレータ9本により構成された高エネルギーガンマ線検出器。

これらにより、アンジュレータ光のSi単結晶およびダイヤモンド単結晶によるBragg反射試験を行い、准単色ガンマ線生成試験を行う準備を進めていたが、放射光利用の新たな計画の推進のために、ガンマ線生成試験の実施は保留となってしまった。機会を見て今後実施するつもりであるが、ここまで積み上げた研究実績は1.5 GeV放射光リングであるNewSUBARUのビームラインに適用して実施する計画の策定を進めている。

また、本研究課題の成果は「5. 主な発表論文」に示した他に、関連するガンマ線を用いた核物理研究、ガンマ線検出器開発などの論文発表、国内外の学会、学術会議などでの研究発表も行った。

#### <引用文献>

T. Nakano, J. K. Ahu, M. Fujiwara, H. Kohri, N. Matsuoka, T. Mibe, N. Muramatsu, M. Nomachi, H. Shimizu, K. Yonehara, M. Yosoi, T. Yorita, W. C. Chang, C. W. Wang, S. C. Wang, Y. Asano, T. Hotta, Y. Sugaya, R.

Zegers, S. Date, N. Kumagai, Y. Ohashi, H. Ohkuma, H. Toyokawa, T. Iwata, M. Miyabe, Y. Miyachi, A. Wakai, K. Imai, T. Ishikawa, T. Sasaki, H. Kawai, T. Ooba, Y. Shiino, M. Wada, H. C. Bhang, Z. Y. Kim, A. Sakaguchi, M. Sumihama, K. Hicks, H. Akimune, T. Matsumura, C. Rangacharyulu, S. Makino, Multi-GeV laser-electron photon project at SPring-8, Nucl. Phys. **A684** (2001) pp.71c-79c.

Kwang-Je Kim, et al., A Proposal for an X-Ray Free-Electron Laser Oscillator with an Energy-Recovery Linac, Phys. Rev. Lett. **100**, 244802 (2008).

#### 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3件）

H. Ohkuma, A. Mochihashi, K. Tamura, S. Suzuki, M. Oishi, T. Nakano, N. Muramatsu, H. Shimizu, Production of Quasi-Monochromatic GeV Photons by Compton Scattering using Undulator X-ray Radiation at SPring-8, Proceedings of IPAC2014, 査読無, 2014, pp.941-943, <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/papers/tuoca03.pdf>

N. Muramatsu, Y. Kon, S. Date, Y. Ohashi, H. Akimune, J. Y. Chen, M. Fujiwara, S. Hasegawa, T. Hotta, T. Ishikawa, T. Iwata, Y. Kato, H. Kohri, T. Matsumura, T. Mibe, Y. Miyachi, Y. Morino, T. Nakano, Y. Nakatsugawa, H. Ohkuma, T. Ohta, M. Oka, T. Sawada, A. Wakai, K. Yonehara, C. J. Yoon, T. Yorita, M. Yosoi, Development of high intensity laser-electron photon beams up to 2.9GeV at the SPring-8 LEPS Beamline, Nuclear Instrument Method A, 査読有, Vol.737, 2014, pp.184-194,

DOI:10.1016/j.nima.2013.11.03

Y. Geerebaert, Ph. Gros, S. Amano, D. Attie, D. Bernard, P. Bruel, D. Calvet, P. Colas, S. Date, A. Delbart, M. Fortin, B. Giebels, D. Gotz, S. Hashimoto, D. Horan, T. Kotaka, M. Louzir, Y. Minemiya, S. Miyamoto, H. Ohkuma, P. Poilleux, I. Semeniouk, P. Sizun, A. Takemoto, M. Yamaguchi, S. Wang, Measurement of 1.7 to 74 MeV polarised gamma rays with the HARPO TPC, Nuclear Instrument Method A, 査読有, Vol.845,

2017, pp.228-232,  
DOI:10.1016/j.nima.2016.06.031

[学会発表](計5件)

H. Ohkuma, Quasi-Monochromatic GeV-Photon Production at SPring-8 by Undulator Compton Scattering, International Workshop on Science and Technology with MeV Photons at CLS, 招待講演, 2013年01月18日~19日, University of Saskatchewan, Canada.

H. Ohkuma, A. Mochihashi, K. Tamura, S. Suzuki, M. Oishi, T. Nakano, N. Muramatsu, H. Shimizu, Production of Quasi-Monochromatic GeV Photons by Compton Scattering using Undulator X-ray Radiation at SPring-8, 5th International Particle Accelerator Conference, 2014年06月15日~2014年06月20日, International Congress Center Dresden, Germany.

H. Ohkuma, Construction Experience of LEPS and LEPS2 and X-ray Compton Scattering at SPring-8, International Workshop of Laser Compton Scatter Gamma Rays at Electron Storage Rings, 招待講演, 2014年11月07日~11日, University of Saskatchewan and Canadian Light Source, Saskatoon, SK, Canada.

H. Ohkuma, Gamma-ray Source by Backward Compton Scattering at SPring-8, 9th DAE Symposium on Nuclear Physics, 招待講演, 2014年12月08日~12日, Banaras Hindu University, Varanasi, India.

大熊春夫, 田村和宏, 大石真也, 持箸晃, 小路正純, 鈴木伸介, 村松憲仁, 清水肇, 中野貴志, アンジュレータ放射X線の逆コンプトン散乱による準単色ガンマ線の生成, 日本物理学会第70回年次大会, 2015年03月21日~24日, 早稲田大学キャンパス、東京都新宿区.

[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]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大熊 春夫 (OHKUMA, Haruo)  
公益財団法人高輝度光科学研究センター・光源基盤部門・特別囑託  
研究者番号: 60194106

(2) 研究分担者

清水 肇 (SHIMIZU, Hajime)  
東北大学・電子光物理学研究センター・教授  
研究者番号: 20178982

中野 貴志 (NAKANO, Takashi)  
大阪大学核物理研究センター・教授  
研究者番号: 80212091

大石 真也 (OISHI, Masaya)  
公益財団法人高輝度光科学研究センター・光源基盤部門・主幹研究員  
研究者番号: 30426522

鈴木 伸介 (SUZUKI, Shinsuke)  
公益財団法人高輝度光科学研究センター・光源基盤部門・主幹研究員  
研究者番号: 00416380

持箸 晃 (MOCHIHASHI, Akira)  
名古屋大学・シンクロトロン光研究センター・助教  
研究者番号: 10342635

田村 和宏 (TAMURA, Kazuhiro)  
公益財団法人高輝度光科学研究センター・光源基盤部門・副主幹研究員  
研究者番号: 10360835

小路 正純 (SHOJI, Masazumi)  
公益財団法人高輝度光科学研究センター・光源基盤部門・副主幹研究員  
研究者番号: 70416379

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし