

RECENT PROGRESS OF LASER-COMPTON X-RAY SOURCE USING LASER STORAGE SUPER-CAVITY*

Kazuyuki Sakaue^{1A)}, Sakae Araki^{B)}, Masafumi Fukuda^{B)}, Yasuo Higashi^{B)}, Yosuke Honda^{B)}, Noboru Sasao^{C)},
Takashi Taniguchi^{B)}, Nobuhiro Terunuma^{B)}, Junji Urakawa^{B)}, Masakazu Washio^{A)}

^{A)} Reserch Institute for Science and Engineering, Waseda University
3-4-1 Okubo, Shinjuku, Tokyo, 169-8555

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{C)} Research Core for Extreme Quantum World, Okayama University
3-1-1 Tsushimanaka, Okayama, Okayama, 700-8530

Abstract

We are performing a laser-Compton X-ray generation experiment using multi-bunch electron accelerator and pulse laser storage cavity at KEK LUCX. Pulse train laser-Compton X-rays have been successfully detected and characterized in X-ray intensity, X-ray energy and X-ray time structure, which show good agreement with prediction. As a next step of laser-Compton X-ray source, we will upgrade both accelerator and laser super-cavity system in order to achieve a high flux X-ray source with which enough X-ray flux for practical use. In this paper, recent results of X-ray generation experiments and forward planning of high flux X-ray source will be presented.

レーザー蓄積装置を用いた レーザーコンプトン散乱X線生成試験及び今後の展望

1. はじめに

現在、医学・生物学・物性など様々な分野で高エネルギーの電子ビームから得られる放射光が利用され、多大な成果をあげている。しかしながらこのような放射光はSpring-8などに代表されるように大規模な施設が必要であり、一般的に高価かつ使用できる場所が限られる。このような背景から、1大学・1研究所に設置できるようなコンパクトかつ高品質な高品質X線源の開発が叫ばれてきた。

レーザーコンプトン散乱(LCS Laser-Compton Scattering)は高エネルギーの電子によってレーザー光を散乱することによって高エネルギーの光子を生成する手法であり、放射光などに比べ低エネルギーの電子ビームによって高エネルギーなX線が生成できるため、将来の小型X線源候補として挙げられる。このLCSを用いた小型X線源として電子ビームを小型蓄積リングに、レーザーを光共振器に蓄積し連続的に衝突を繰り返すことによって高強度なX線を生成するという方法^{[1][2]}や線形加速器をベースとしたX線源^{[3][4]}などが多数提案されている。

我々はマルチバンチ電子ビームとパルスレーザー共振器を用いたX線生成を行っている。本実験により、単位時間あたりの衝突回数100倍を達成してお

り、線形加速器ベースでの小型X線源の可能性示唆した。^[5]この原理実証試験を我々はLUCX(Laser Undulator Compact X-ray source)実験と名づけている。本講演では、パルスレーザー共振器とマルチバンチ電子ビームを用いたX線生成試験の現状及び将来の実用に堪える強度を持ったX線源計画について報告する。

2. 光蓄積装置を用いたX線生成試験

現在までに我々はパルスレーザー光蓄積装置を用いたレーザーコンプトン散乱を実現させており、X線の検出及び計測に成功している。レーザー光としては1064nmのピコ秒パルスレーザーをバースト状に増幅し、かつ共振器に蓄積したバースト蓄積レーザーを、電子ビームとしては100bunches/trainのマルチバンチビームを43MeVまで加速し、衝突角度20度にて相互作用させている。システムの詳細は^[5]を参照されたい。これまでにX線強度・X線エネルギー

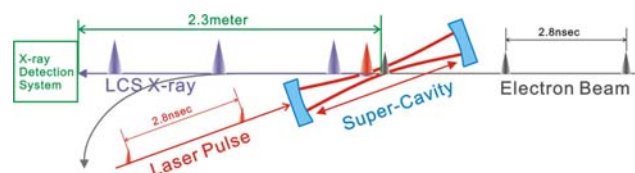


図1: X線生成試験システム概念図

* Work supported by a Grant-In-Aid for Creative Scientific Research of JSPS (KAKENHI 17GS0210) and a Quantum Beam Technology Program of JST

¹ E-mail: kazuyuki.sakaue@aoni.waseda.jp

ギー・X線の時間構造をそれぞれの検出器によって行い、全て予想値と一致する結果を得ている。

まずX線強度としてはLYSOシンチレーション検出器を用いて行った。高エネルギーのバックグラウンドへの感度を減らすために極力薄いシンチレータを用いて行った結果、 0.93×10^4 Photons/trainのX線の生成・検出に成功した。測定された電子ビーム・レーザーのパラメータから予想される値は 1.13×10^4 Photons/trainであるため、ほぼ一致していることがわかる。

次にX線のエネルギー測定の結果を示す。(図2(A))X線のエネルギーはブラッグ反射板であるHOPG(Highly Oriented Pyrolytic Graphite)を用いて、最大の反射率が得られる反射角から測定した。図2(A)は横軸に電子ビームエネルギーを、縦軸に生成されたX線のエネルギーを示している。プロットは測定結果、実線は計算によって予想されるX線エネルギーを示している。図を見てわかるように計算結果との良い一致が見られる。

レーザーコンプトン散乱X線の時間構造としては、マルチバンチ電子ビームによって生成しているため、電子ビームと同じ時間構造が予想される。LUCXで生成している電子ビームは2.8nsec間隔に100bunches/trainであり、280nsecにわたりパルス状のX線が生成される。以下の図2(B)にX線の時間構造測定の結果を示す。時間構造測定には時間分解能の高いMCP(Micro-Channel Plate)を用いた。使用したMCPの時間分解能は0.5nsec(FWHM)程度である。測定波形には電子ビームや暗電流によるバックグラウンドが影響するため、衝突用レーザーのONとOFFの差を取ることでX線信号のみの波形を取得したのが図2(B)である。図を見て明らかのように2.8nsec間隔に280nsecの間パルス状のX線が生成されていることがわかる。実際にはピコ秒オーダーのパルス幅

であるがMCPの時間分解能でパルスは広がって見えている。実際にはパルスタイミングをずらす測定によって間接的にピコ秒のX線パルスが得られていることを確認している。

3. 今後のX線源計画

3.1 加速器アップグレードによるビームの大強度化

今後、実用に堪えるX線源を構築していく上で電子ビーム・レーザー光の両方をアップグレードする必要がある。電子ビームに関する詳細は^[6]を参照いただきたい。最終的な装置構成は長いマルチバンチトレインを生成できる超伝導リニアックによって生成される電子ビームを用いて10~30keVのエネルギーのX線を生成することであるが、まずは5MeV常伝導線形加速器で軟X線領域のX線生成を行い、レーザー装置の試験やシステムの最適化を行う。以下にX線生成に係る電子ビームパラメータを示しておく。

表1: アップグレード後の電子ビームパラメータ(計算値)

Energy	N. of Bunch	N. of Train	Charge
5MeV	8000/train	12.5/sec	0.5nC/bunch
e ⁻ Size(H/V)	Emit. (H/V)	Bunch Lng.	Ene. Spread
200/80 μm	5/5 π 10 ⁻⁶ mrad	10psec	1%

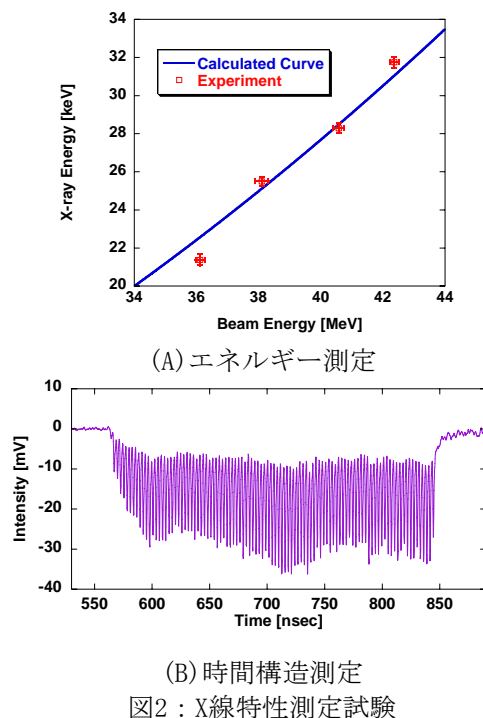
表1に示されているように、電子ビームエネルギーをこれまでの40MeVから5MeVまで下げることによって大電流を加速できる放射線発生装置として運転する予定である。

3.2 光蓄積装置のアップグレード計画

これまでの研究では光蓄積装置として2枚の向かい合わせの凹面鏡で構成した共振器を用いていた。その研究の過程において光蓄積装置に関する限界点が判明した。その点を考慮し、実用に堪えるX線源用の光蓄積装置を設計・開発している。光蓄積装置の限界点として判明しているのは『ミラー上のレーザーによるダメージ閾値』と『共振器の安定性』である。

前述のように線形加速器の電子ビームと最大限相互作用するようにバースト状に増幅したレーザーパルスを共振器内に蓄積している。ここで問題として現れたのが『ミラーのダメージ閾値』である。ミラーのダメージ閾値として一般に平均パワーで10MW/cm²、ピークパワーで10GW/cm²という値が挙げられる。我々のバースト運転では後者のピークパワー閾値を超え、レーザーによって誘起される放電による誘電体多層膜へのダメージを確認した。現状はミラー上でのサイズを比較的大きくするような共振器を構成することによって0.1mJのパルスを蓄積しているが、こちらも限界が近いため、よりダメージ閾値を考慮した共振器設計が求められる。

そこで問題となるのが『共振器の安定性』である。ミラー上でのサイズの広い共振器を構成するために



は共振器のウェストを極限まで小さくする必要がある。現状の2枚鏡共振器では共振器が共中心型であるため小さなウェストの共振器構成は不安定である。我々は共振器を共焦点型にした4枚ミラー共振器を新たな蓄積装置として採用する予定である。共焦点型共振器にすることによって安定度が約100程度増し、(つまり100倍程度ミラーの設置精度に対する要求がゆるくなる)極小ウェスト・ミラー上サイズの大きな共振器が実現可能である。

4枚ミラー共振器を構成する際に様々な構造が候補として挙げられるが、我々は以下の図に示すような3次元型の共振器を採用した。このようなねじれ

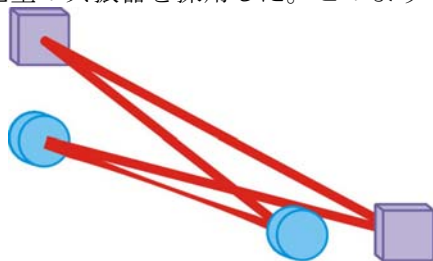


図3：3次元4枚ミラー光共振器概念図

た共振器にすることにより右回りと左回りの円偏光を分離して選択的に蓄積することが出来る。^[7]レーザーコンプトン散乱によって生成されたX線はレーザーの偏光を保存するため、右回りと左回りの円偏光X線を選択的に生成することが可能かつ高速にスイッチできる点で非常に有効な線源が構築可能であると考えている。

以下の表2にアップグレード光蓄積装置の設計パラメータを示す。

表2：アップグレード後の衝突レーザーパラメータ(計算値)

Wavelength	Pulse Rep.	Burst Rep.	Pulse Energy
1064nm	357MHz	12.5Hz	10mJ/pulse
Waist (2σ)	Pulse Lng.	Cav. Lng.	
16μm	7psec	1680mm	

パルスあたりのエネルギーとして10mJ/pulseを目標としてミラー上でのピークパワーが10GW/cm²を超えないよう設計した。本パラメータから計算されるミラー上のピークパワーは9GW/cm²である。

3.3 予想されるX線源スペック

表1と表2に示した電子ビーム・レーザーの設計パ

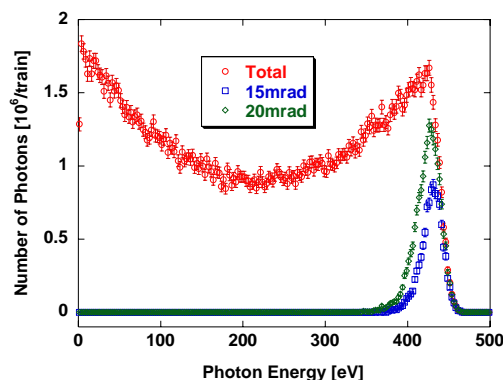


図4：予想される生成X線スペクトル

ラメータから予想されるX線のスペックを計算機コードCAINによって計算した。衝突角度としては10度を採用している。図4はトレインあたりの生成X線スペクトルを示しており、赤プロットが全てのX線を、緑プロットがビームラインの設計上取り出せる20mrad内のスペクトルを、青プロットが現在所持しているMCP検出器で検出可能なX線のスペクトルを示している。20mrad内のX線のスペクトルを拡大したのが以下の図5である。取り出されたX線の

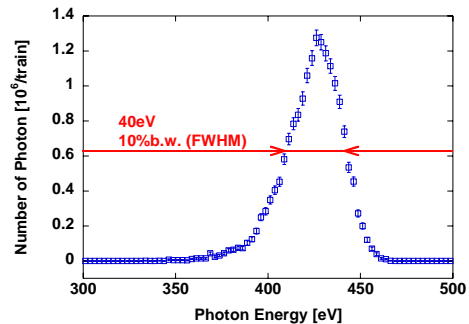


図5：20mrad内の生成X線スペクトル(計算値)

平均エネルギーは425eVで、エネルギー幅は約10% (FWHM)である。上記スペクトルを積分することによって20mrad内に生成されるX線強度は 1.8×10^7 photons/train/10%b.w.、トレインの繰り返しを乗じることによって 2.3×10^8 photos/sec/10%b.w.の強度のX線が予想されることが分かる。

4. まとめと今後の展望

我々はこれまで光蓄積装置とマルチバンチ電子ビームを用いたレーザーコンプトン散乱X線生成試験を行い、X線の検出及びその特性測定を行ってきた。これらの結果は全て計算によって予想される値と一致しており、有意義な成果が得られたとともに、これまでのシステムの問題点や改良点を洗い出すことができた。これに基づいて実用に堪えるX線源の設計を行った。予想されるX線はエネルギー425eV、 2.3×10^8 photons/sec/10%b.w.である。今後、加速器及びレーザー蓄積装置のアップグレードを順次行い、本設計パラメータの実現及びX線源の実現を試みる。

参考文献

- [1] Zh. Huang, R. D. Ruth, Phys. Rev. Lett. 80 (5) (1998) 976.
- [2] J. Urakawa, et al., Nucl. Instr. and Meth. A532, (2005) 388
- [3] R. Kuroda, et al, Proceedings of EPAC'08, (2007)
- [4] F. Ebina et al., Nucl. Instr. and Meth. B, 241 (2005) 905
- [5] K. Sakaue, Doctral Thesis submitted to Waseda University, 2009
- [6] 福田将史他, 本研究会Proceedings, TPOPA30, 2009
- [7] Y. Honda et al., Opt. Comm., 282 (2009) 3108