

UVSOR-FEL の再立上げと Intra-cavity Compton Scattering によるガンマ線発生 REVIVAL OF UVSOR-FEL AND GAMMA-RAY GENERATION VIA INTRACAVITY COMPTON SCATTERING

全炳俊^{#, A)}, 山崎潤一郎^{B)}, 藤本将輝^{B)}, 林憲志^{B)}, 太田紘志^{B)}, 平義隆^{B)}, 加藤政博^{B,C)}
Heishun Zen^{#, A)}, Jun-ichiro Yamazaki^{B)}, Masaki Fujimoto^{B)}, Kenji Hayashi^{B)},
Hiroshi Ota^{B)}, Yoshitaka Taira^{B)}, and Masahiro Katoh^{B,C)}
A) Institute of Advanced Energy, Kyoto University
B) UVSOR, Institute for Molecular Science
C) HiSOR, Hiroshima University

Abstract

UVSOR-FEL is a storage-ring-based oscillator-type free electron laser which covers the wavelength range from 199 to 800 nm. In 2012, the optical cavity of the FEL was moved from S5 section to S1 section of UVSOR. After that, lasing of UVSOR-FEL has not been performed for more than 10 years. In February 2022, we tried to lase the UVSOR-FEL at S1 section and achieved lasing of that. At the same time, we utilized the intra-cavity laser beam of UVSOR-FEL for generation of gamma rays via laser Compton scattering.

1. はじめに

UVSOR-FEL は電子蓄積リングを周回する電子ビームを用いた蓄積リング型自由電子レーザー(SR-FEL)である。1983年にUVSORが初点を迎えた後、1986年からFEL研究が開始され[1]、1992年に初発振が達成されている[2]。その後、SR-FELにおいて重要なミラーダメージやヘリカル光学クライストロンを使ったその低減に関する研究[3,4]や当時の世界最短波長である238 nmでのFEL発振達成[5]等、多くの研究成果を上げてきた。1996年には共振器内FELを用いたレーザーコンプトン散乱(Laser Compton Scattering: LCS)によるガンマ線発生[6]に成功しており、この成果およびSR-FEL開発研究に関する成果で濱広幸氏(現東北大)がFEL PrizeをVladimir Litovinenko氏と共同受賞した[7]。当初はUVSORの直線部S5において光電子分光ビームラインと挿入光源を共有していたが、2008年に採択された量子ビーム基盤技術開発プログラム、高度化ビーム技術開発課題「リング型光源とレーザーを用いた光発生とその応用」において、UVSOR蓄積リングの主加速空洞および入射点の再配置を行い、S1直線部をあげここに光源開発専用挿入光源を設置可能となった。これと同時にFELに関する研究活動もS1直線部に引っ越す事となり、2011年末に光共振器をS5直線部からS1直線部に移設した。それ以降、コヒーレント放射関連研究[8-10]や光渦発生・観測実験[11-15]、ガンマ線利用実験[16-20]等、S1直線部では様々な実験が実施されてきたが、FEL発振とその利用に関しては需要が高くなく、移転後1度も発振することなく10年が経過してしまった。この10年間に産総研のNIJI-IVがシャットダウンするなど、国内でSR-FELが発生可能な施設がUVSORのみになると共に、UVSOR-FELに関して経験豊富なあいちSRの保坂将人氏のHefeiのNSRLへの異動やこれまでUVSOR-FELを支えてきた技術職員の山崎潤一郎氏の定年退職が迫

るなど、記録や記憶の喪失が顕著になりつつある状況となっていた。そろそろ移設先でFELの再立上げを実施しないと取り返しがつかなくなると考え、2021年度後期のUVSOR協力研究の下、UVSOR-FELの再立上げと光共振器内レーザーを用いたガンマ線発生実験を実施することとなった。また、本研究は将来的に超広帯域誘電体多層膜ミラーを用いたFEL発振とその波長可変性を活かした広帯域エネルギー可変ガンマ線源の実現に向けた第一歩という位置づけもある。

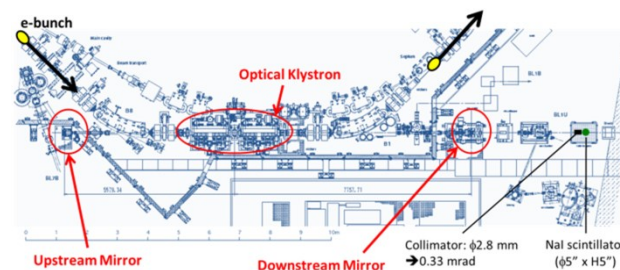


Figure 1: Schematic diagram of experimental setup.

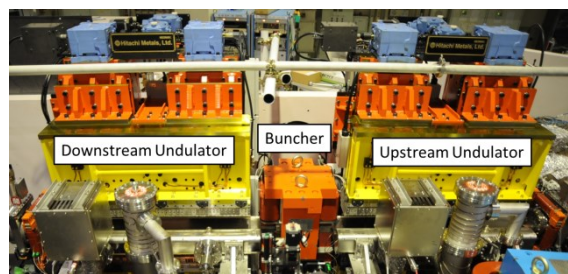


Figure 2: Photo of Optical Klystron.

2. 実験装置

Figure 1に本研究で用いた実験装置の概略図を示す。実験にはUVSORのS1直線部を用いた。図に示す通り、S1直線部にはOptical Klystronおよび1対の光共振器ミラーが設置されている。Optical Klystronは2台のApple-

[#] zen@iae.kyoto-u.ac.jp

II アンジュレータと Buncher 電磁石により構成されている。個々の Apple-II アンジュレータの周期長は 88 mm、周期数は 10 であり、最大 K 値は水平偏光モードで 7.36、垂直偏光モードで 4.93、円偏光モードで 4.06 である。Buncher 電磁石は 3 ポールウィグラー型であり、 R_{56} は励磁電流 23A で約 55 μm である[21]。S1 直線部に設置された Optical Klystron の写真を Fig. 2 に示す。

光共振器ミラーには再立上げということで、S5 直線部にて発振実績のあるミラーを使用することとした。写真を Fig. 3 に示す。設計波長は 520 nm であり、納入当時のスペックはどちらのミラー共に透過率 0.023% である。前回使用時 2000 年 1 月 17 日に実施された FEL 発振実験にて求められた反射率は約 99.92% であった。上流側ミラーの曲率半径は 6000 mm であり、下流側ミラーの曲率半径は 8000 mm である。S1 直線部の配置での共振器内レーザ光のウェスト位置計算により、ほぼバンチャー部の中心でウェストを持つことが分かっており、S1 直線部でも問題なく使用可能であると考えられる。

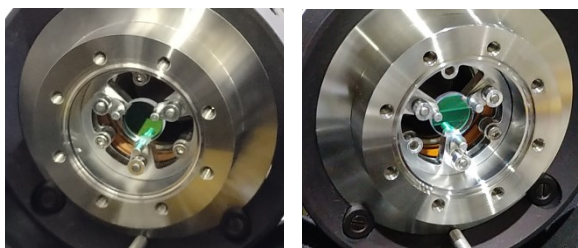


Figure 3: Photo of optical resonator mirrors. Left: upstream mirror with the radius of curvature of 6000 mm. Right: downstream mirror with the radius of curvature of 8000 mm.

SR-FEL の発振調整には浜松ホトニクス社製 Dual Sweep Streak Camera と近赤外-紫外分光器が用いられる。Streak Camera の用途は共振器長調整と反射率(or 共振器損失)計測、FEL 時間プロファイル計測である。また、分光器の用途はアンジュレータギャップ調整および発振スペクトルの計測である。本研究では下流側ミラーを通過した FEL をこれら装置に複数枚のミラーを用いて輸送して計測した。

光共振器のミラー間隔は約 13.34 m であり、この共振

Table 1: Relationship between Relative Bucket Number and Collision Point

Bucket #	Collision Point
0, 8	Electron Bunch for FEL generation
1, 9	No collision
2, 10	No collision
3, 11	Between downstream two quadrupole magnets
4, 12	Inside of downstream undulator
5, 13	Inside of upstream undulator
6, 14	Between upstream two quadrupole magnets
7, 15	No collision

器ミラー間で光が往復する時間は UVSOR 蓄積リングを電子ビームが半周する時間に相当する。UVSOR 蓄積リングの対角線上に電子バンチを 2 個蓄積すると光共振器中で光が往復する毎週に電子バンチが供給され、効率の良い FEL 発振が実現される。ただ、この条件下では FEL と電子バンチが衝突しないのでガンマ線は発生しない。共振器内で電子バンチと FEL を衝突させるためには、追加で電子バンチを他のバケットに蓄積しておく必要がある。Table 1 に FEL 発生用バンチ後のバケットと S1 直線部での FEL との衝突点との関係を示す。FEL 発生用バンチよりも 3~6 バケット後のバケットに電子を蓄積すると S1 直線部内で FEL と衝突し、それぞれ衝突点異なる。本研究では下流側四重極電磁石の間で衝突が発生する条件(Bucket #3 & 11)に電子バンチを蓄積して FEL と衝突させることでガンマ線を発生させた。発生させたガンマ線は Figure 1 に示す様に下流側に設置したコリメータを通した後、NaI シンチレーション検出器にて測定した。

3. 実験の流れ・結果と考察

今回の実験で使用可能なマシンタイムは 1 週間だったので、事前準備として、共振器ミラー制御系の立ち上げを実施した。そして、マシンタイム前の週末の土曜日に光共振器ミラーをミラーチャンバー中に設置し、真空引きを行った。マシンタイム週初日(月曜日)に電子ビームエネルギー 600 MeV でのシングルバンチ電子ビーム入射調整を行うと共に、アンジュレータ放射の観測およびアンジュレータギャップ・位相の調整を行った。

二日目(火曜日)に低蓄積ビーム電流($< 3 \text{ mA}$)にて下流ミラーの光焼き出しを実施すると共に、光共振器ミラーの調整を行って光蓄積条件を確立した。その後、光共振器長を変化させながら Streak Camera を用いて蓄積光のパルス長が短くなる条件即ち共振器の往復周波数と電子バンチの周回周波数が整数倍の関係を持つ条件を見つけた。また、100 μm 程度共振器長をずらし、FEL パルスが片側にテイルを引くような条件を作り、そのテイルの傾きから光共振器の 1 パス反射率を求めた。結果として、この時点の 1 パス反射率は約 99.83% であり、20 以上前に計測された反射率 99.92% からは少し劣るものの、依然として高い反射率を有していることが確認された。

三日目(水曜日)には蓄積電流を 15 mA/2 bunch 程度まで増やすと共に、Optical Klystron の上下流のアンジュレータを所定のギャップに調整し、バンチャー電磁石を励磁した。この際、アンジュレータを円偏光条件にしていると蓄積電子ビームがダンプしたため、少しアンジュレータ位相を変更して水平偏光条件に近づけると共に、ギャップを少し開いた条件で 520 nm 付近の光が発生出来る様に調整している。そして、分光器で下流側光共振器ミラーを透過した光を観測しながら光共振器ミラーの角度を微調整したところ、FEL が発振した。

四日目(木曜日)の午前中に更に共振器長の微調整も実施したところ、更に FEL 強度が強くなると共にスペクトルも狭線幅化した。Figure 4 にその際の FEL スペクトルおよび下流側光共振器ミラー直後の FEL 光の写真を示す。中心波長は約 524.4 nm であり、TEM₀₀ モードで発振しているのが見て取れる。共振器外の最大パワーは約 2 mW @20 mA/2 bunch であった。ミラーの透過率が納

入時成績の通り 0.023% であるとすると、共振器内の FEL パワーは 8.7 W であると推測される。また、Steak Camera で計測したパルス長は約 70 ps であった。FEL は楕円偏光しており、アンジュレータ設定から想定される偏光比は H:V = 1:0.36 であった。

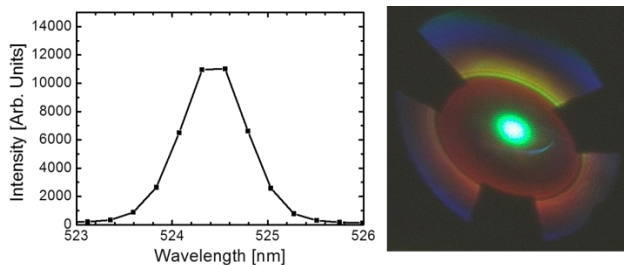


Figure 4: Left: Spectrum of FEL. Right: Photo of FEL beam just after the downstream cavity mirror.

無事に FEL が発振したので、四日目の午後から五日目はガンマ線発生実験を開始した。FEL 発生用電子バンチの 3 バケット後に追加で電子バンチを約 4 mA/2 bunch 蓄積して共振器内 FEL と衝突させ、ガンマ線を発生させた。Figure 5 に直径 2.8 mm のコリメータを通過させた後のガンマ線スペクトルを示す。この際、NaI 検出器のパイルアップを防ぐため、光共振器長を最適条件からずらして共振器外の FEL パワーを約 0.3 mW (推定共振器内パワー約 1.3W) に弱めている。

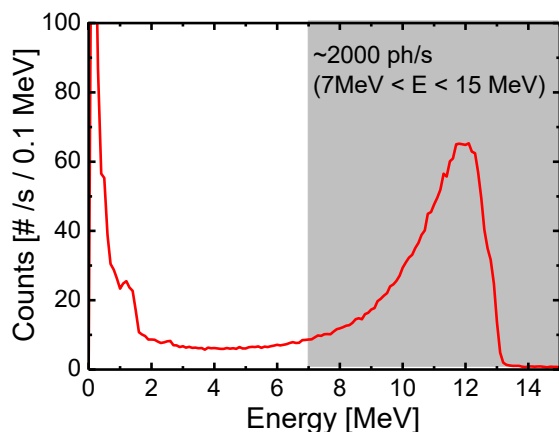


Figure 5: Measured gamma-ray spectrum.

Figure 5 から分かる通り、最大ガンマ線エネルギーは約 13 MeV であり、これは FEL 波長と電子ビームエネルギーから予測される値とほぼ一致している。一方、ガンマ線フラックスは約 2,000 ph/s であり、この条件下で予測されるガンマ線フラックス約 20,000 ph/s の約 10 分の 1 であった。

NaI 検出器で観測されるガンマ線フラックスが最大になる様にコリメータ位置を調整した際のコリメータ上に映る FEL の写真を Figure 6 に示す。FEL の中心とコリメータ穴の中心とは水平に約 16.8 mm、垂直に約 5.6 mm 程ずれている。コリメータと衝突点の距離は約 8.5 m であり、衝突点において FEL とガンマ線の光軸が水平に約 2 mrad、垂直に 0.7 mrad ずれている事を示している。これは衝突点が S1 直線部下流の四重極電磁石間にあり、アンジュレータを通過した電子ビームが垂直および水平

方向に蹴られている事を示唆しており、ガンマ線フラックスが予測よりも 1 桁ほど低い原因の一つであると考えられる。また、他にもコリメータの調整精度が不十分であることや共振器内 FEL パワー推定の不確定性、衝突用電子バンチの電流量の不確定性等、複数の原因が考えられており、今後の更なる検討が必要となっている。

一通りガンマ線発生実験を実施した後、最後に発振実験終了後の共振器ミラー反射率計測を FEL 発振が起こらない低電流条件 (< 3 mA) にて実施した。その結果、光共振器の 1 パス反射率は 99.64% であった。実験の前後で光共振器損失が 0.17% から 0.36% まで約 2 倍増加しており、楕円偏光条件で光軸上に高次の高調波成分が照射されたことが原因であると考えられる。



Figure 6: Photo of FEL beam on the collimator when the collimator position was optimized to have highest flux of gamma ray observed by an NaI scintillation detector.

4. まとめと今後の予定

2011 年末の光共振器移設以降、10 年以上に渡って発振が停止していた UVSOR-FEL を S1 直線部に於て初めて発振させた。発振波長は 524.4 nm であり、光共振器外の最大パワーは約 2 mW であった。共振器内 FEL と電子バンチを衝突させ、LCS によりガンマ線を発生させた。最大ガンマ線エネルギーは予測通り約 13 MeV であったが、ガンマ線フラックスは予測よりも約 1 桁低かった。FEL と電子ビームとの空間的なミスマッチや衝突バンチの電流値・共振器内 FEL パワーの不確定性等、様々な原因が考えられる。

本研究では 11 年ぶりの発振および移設先での初発振という事で過去に発振実績のある狭帯域誘電体多層膜ミラーを用いたが、次回の実験では超広帯域誘電体多層膜ミラーを用いる予定である。このミラーは波長 500 nm から 1100 nm で高い反射率を有している。SR-FEL を使った LCS ガンマ線源では一般にミラーを交換して発振波長を変えるか、電子ビームエネルギーを変えるかしてガンマ線エネルギーを変化させているが、超広帯域多層膜ミラーを用いて FEL 発振が出来れば真空を破ることなく広範囲でエネルギー可変なガンマ線源が実現可能となる。

謝辞

本研究の一部は分子科学研究所協力研究 2015、2016、2017、2021 および科学研究費補助金基盤研究(B)課題番号 26289363、基盤研究(B)課題番号 21H01859 の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] 春日俊夫、放射光 第9巻第4号(1996).
<http://www.jssrr.jp/journal/pdf/09-4/p344.pdf>
- [2] S. Takano *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A331 pp.20-26 (1993).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900293900075>
- [3] H. Hama *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A341 pp.12-16 (1994).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900294903077>
- [4] H. Hama *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A393 pp.23-27 (1997).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900297004221>
- [5] H. Hama *et al.*, Proc. of AFEL97, pp.17-24 (1997).
- [6] M. Hosaka *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A393, pp.525-529 (1997).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900297005639>
- [7] FEL Prize of FEL2004, Trieste, Italy.
http://www.elettra.trieste.it/fel2004/fel_prize.html
- [8] M. Hosaka *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 16, 020701 (2013).
<https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevSTAB.16.020701>
- [9] E. Roussel *et al.*, New J. Phys. 16, 063027 (2014).
https://www.uvsor.ims.ac.jp/paper/2014/1367-2630_16_6_063027.pdf
- [10] E. Roussel *et al.*, Phys. Rev. Lett. 113, 094801 (2014).
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.113.094801>
- [11] M. Katoh *et al.*, Phys. Rev. Lett. 118, 094801 (2017).
<https://www.uvsor.ims.ac.jp/paper/2016/PhysRevLett.118.094801.pdf>
- [12] M. Katoh *et al.*, Sci. Rep. 7, 6130 (2017).
<https://www.nature.com/articles/s41598-017-06442-2>
- [13] T. Kaneyasu *et al.*, Phys. Rev. A 95, 023413 (2017).
<https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevA.95.023413>
- [14] T. Kaneyasu *et al.*, J. Synchrotron Radiat. 24, pp.934-938 (2017).
<https://onlinelibrary.wiley.com/iucr/doi/10.1107/S1600577517009626>
- [15] Y. Taira *et al.*, New J. Phys. 22, 093061 (2020).
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/abb54a>
- [16] H. Zen *et al.*, Energy Procedia, 89, 335 (2016).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216300522>
- [17] H. Zen *et al.*, AIP Advances 9, 035101 (2019).
<https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.5064866>
- [18] K. Fujimori *et al.*, Appl. Phys. Express 13, 085505 (2020).
<https://iopscience.iop.org/article/10.35848/1882-0786/aba0dd/meta>
- [19] K. Ali *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. 67, pp.1976-1984 (2020).
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9123968>
- [20] K. Ali *et al.*, Applied Sciences 11, 3415 (2021).
<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/8/3415>
- [21] Y. Uematsu *et al.*, Proc. of PASJ9, WEPS066 (2012).
https://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/WEPS/WEPS066.pdf