

ニュースバルにおける単一サイクル自由電子レーザー原理実証実験計画 PROOF-OF-PRINCIPLE PROJECT FOR MONOCYCLE FELS AT NEWSUBARU

田中隆次 ^{*A)}, 貴田祐一郎 ^{A)}, 金城良太 ^{A)}, 富樫格 ^{B)}, 富澤宏光 ^{B)}, 橋本智 ^{C)}, 宮本修治 ^{C)}, 田中義人 ^{D)}

Takashi Tanaka^{*A)}, Yuichiro Kida^{A)}, Ryota Kinjo^{A)}, Tadashi Togashi^{B)}, Hiromitsu Tomizawa^{B)},
Satoshi Hashimoto^{C)}, Shuji Miyamoto^{C)}, Yoshihito Tanaka^{D)}

^{A)}RIKEN SPring-8 Center, ^{B)}Japan Synchrotron Radiation Research Center,

^{C)}University of Hyogo, LASTI, ^{D)}University of Hyogo, Material Science

Abstract

The pulse length of free electron lasers (FELs) is usually dominated by the bunch length of the electron beam, or more precisely, the length of the region where microbunches are generated. It is thus possible to reduce the FEL pulse length by shortening the microbunched region in the electron beam. It should be noted, however, that monocycle FELs are not theoretically realized, only by shortening the microbunched region, because of the so-called slippage effect. To overcome this difficulty, we have proposed a couple of ideas to counteract the slippage effect and realize the monocycle FEL [1, 2], and are planning to carry out proof-of-principle experiments to demonstrate the fundamental principles, in the storage ring of NewsUBARU synchrotron radiation facility. This paper reviews the fundamental concept to realize the monocycle FELs and describes the outline of the demonstration experiments.

1. はじめに

自由電子レーザー (FEL) におけるパルス長は、電子ビームのバンチ長、より正確には、マイクロバンチが生成された領域 (= 発振領域) の長さとはほぼ等しい。このため、FEL の短パルス化のためには、電子ビームを短バンチ化するか、あるいは、何らかの手法によって発振領域に制限を掛けることが必要である。その一方で、波長よりも短い発振領域、即ち、単一のマイクロバンチが生成された場合でも、FEL のパルス長はその極限 (下限) 値である単一サイクルには到達できない。これは、電子がアンジュレータを通過する際に自身が放出した光から取り残される、いわゆるスリッページと呼ばれる現象によってパルス長が伸びるためであり、単一サイクル FEL を実現するためには、この効果を抑制する必要がある。我々はこれまでにスリッページによるパルス伸長を抑制し、単一サイクル FEL を実現するための新たな原理を提唱してきた [1, 2]。また本原理の実証実験を、兵庫県立大学高度産業技術研究所が SPring-8 キャンパス内で運用するニュースバル放射光施設 [3] の蓄積リングで実施する計画を進めている。本報告では、単一サイクル FEL を実現するための基本原理の概要と、実証実験の概略について述べる。

2. 基本原理の概要

単一サイクル FEL を実現するための基本原理を Fig. 1 に模式的に示す。チャープマイクロバンチ (Chirped Microbunch) は、発振波長 λ よりも短い領域に集群化した電子群 (マイクロバンチ) が不定な間隔で並んだ状態を表し、テーパアンジュレータは磁場振幅が徐々に変化するアンジュレータを意味する。ここで、チャープマイクロバンチの n 番目の間隔を l_n 、テーパアンジュレータにおける n 周期目の基本波長を λ_n とおく。アン

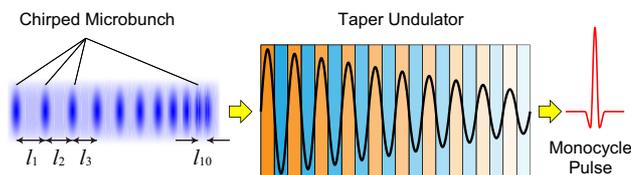


Figure 1: Fundamental mechanism (SC³) to realize the monocycle FELs.

ジュレータの周期長を λ_u 、 n 周期目の偏向定数を K_n 、電子のローレンツ因子を γ とおけば、よく知られているように、

$$\lambda_n = \frac{\lambda_u(1 + K_n^2/2)}{2\gamma^2}$$

と表される。

マイクロバンチは、その構造時間に応じたコヒーレント放射光を生成する。一般的な FEL (より正確にはシード型 FEL) の場合、マイクロバンチはアンジュレータの基本波長 (= 発振波長) で等間隔に並ぶ。即ち、 $l_1 = l_2 = \dots = \lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda$ であり、個々のマイクロバンチが生成したコヒーレント光パルスは、電子ビームがアンジュレータを 1 周期分だけ進む間に、スリッページによって発振波長 λ に相当する距離だけ前方に送られるが、そこにも別のマイクロバンチが存在しているため、位相が整合した状態で強度が積算され、増幅が継続的に進行する。このように、アンジュレータの全周期で全てのマイクロバンチが光パルスの形成に寄与するため、コヒーレント光のパルス長はマイクロバンチが生成された領域の長さ (にスリッページによる伸長分を加算した長さ) と等しくなる。

一方、チャープマイクロバンチを利用する場合、即ち $l_1 > l_2 > \dots$ である場合、上記の位相整合条件は成立しないため、一般的にはコヒーレント光パルスの強度は抑制される。ただし、 $l_n = \lambda_n$ の条件を満足するように K_n (即ち、 n 周期目に相当する場所におけるギャップ)

* ztanaka@spring8.or.jp

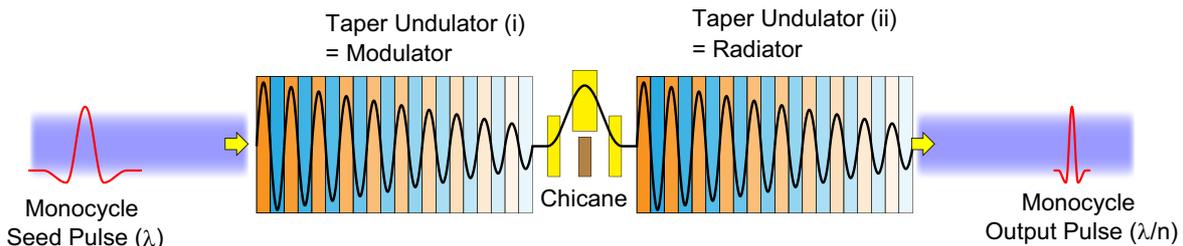


Figure 2: Accelerator layout to realize the MCHG FEL based on the SC³ mechanism.

を調整した場合、マイクロバンチ間隔の変化率 (dl_n/dn) が十分大きい条件下では、ある特定の光パルスのみが継続的にマイクロバンチによって増幅され、この結果、単一サイクルのコヒーレント光パルスが生成される。この原理を Slippage-Controlled Coherent radiation by Chirped microbunching の頭文字をとり、SC³ と称する。

上記で述べた基本原理 (SC³) は極めて単純であるが、これを実際に FEL 加速器へ実装するには工夫が必要である。具体的には、チャープマイクロバンチを如何に生成するかがポイントであり、我々はこれまでに 2 つの異なる手法を提案してきた。いずれも、長波長の単一サイクル光パルスをシード光として利用し、その高調波を生成することによって、短波長の単一サイクルパルス (=出力パルス) を生成する。これは High Gain Harmonic Generation (HG HG) と呼ばれる FEL 手法に類するものであるため、Monocycle Harmonic Generation (MCHG) と名付けられている。

MCHG 型 FEL を実現するために最初に提案された手法 [1] では、

- (1) シード光 (単一サイクルパルス) と電子ビームは単一周期アンジュレータにおいて相互作用を行い、単一マイクロバンチを形成する。
- (2) 単一マイクロバンチはテーパアンジュレータを通過する際にチャープ光パルスを生成する。
- (3) チャープ光パルスと電子ビームは、2 段目の単一周期アンジュレータにおいて相互作用を行い、チャープマイクロバンチを形成する。
- (4) チャープマイクロバンチは、2 段目のテーパアンジュレータを通過する際に短波長の単一サイクルの光パルスを発生する。

という、複雑な過程が必要であった。これにより、必要な機器類が多段化するだけでなく、この手法を適用するために必要な電子ビームの特性、特にエネルギー拡がりに厳しい条件が課せられるという欠点があった。この欠点を解決するために提案された手法 [2] では、チャープマイクロバンチを、シード光である単一サイクルパルスとの相互作用によって直接形成するため、機器類のレイアウトが大幅に簡素化される。さらに、「チャープ光パルスとの相互作用」という本来は必要のない中間過程を経る必要が無いため、エネルギー拡がりに対する要求値も大幅に緩和されている。この手法に基づいた MCHG 型 FEL の具体的な機器レイアウトを Fig. 2 に示す。HG HG 型 FEL と殆ど同様のレイアウトであり、相違点は、

- (1) シード光が単一サイクルパルスであること
- (2) モジュレータがテーパアンジュレータであること
- (3) ラディエータがモジュレータと同じ仕様のテーパアンジュレータであること

の 3 点である。モジュレータにおいて誘起される、チャープしたエネルギー変調がシケインで密度変調 (=チャープマイクロバンチ) に変換され、これがラディエータを通過する際に短波長の単一サイクル光パルスが生成される。

3. 光源性能計算例

MCHG 型 FEL で期待される光源性能について具体的に議論するために、数値計算による性能評価を行った。計算で仮定したパラメータのリストを Table 1 に示す。電子ビームのパラメータは、近年世界各国で建設が進められている、若しくは計画されている軟 X 線 FEL 施設で想定されているものと同様であり、また、シード光として赤外領域における単一サイクルレーザーを想定した。

Table 1: Parameters Assumed in the Numerical Simulation to Evaluated the Light Source Performance Expected in the MCHG FEL

Parameter	Value	Unit
Electron Beam		
Energy	1.5	GeV
Normalized Emittance	0.5	mm-mrad
Bunch Charge	0.3	nC
Bunch Length	100	fs
Energy Spread	0.05	%
Taper Undulator		
Period	100	mm
Central K Value	15.83	-
Taper Rate	6.95	%/m
Number of Periods	30	-
Seed Pulse		
Central Wavelength	800	nm
Pulse Length	2.7	fs
Pulse Energy	5	mJ
Rayleigh Length	3.9	m

計算は以下の要領で行った。

- (1) モジュレータにおいて、シード光によって電子ビームに誘起されるエネルギー変調を、エネルギー・時

間の位相空間におけるマクロ粒子の運動方程式を解くことにより求める。

- (2) 上記の結果を元にシケインの強度 (R_{56}) を最適化する。
- (3) エネルギー拡がりを考慮して、バンチ因子 (電流の時間分布) を計算する。
- (4) 上記電流分布で表される電子ビームがラディエータを通過するときのコヒーレント放射の特性をモンテカルロ法で計算する。

Figure 3(a) 及び 3(b) に、出力パルスの時間領域における特性 (電場波形とピークパワー) を、また Fig. 3(c) には軸上で計算されたスペクトルを示す。FWHM で定義し

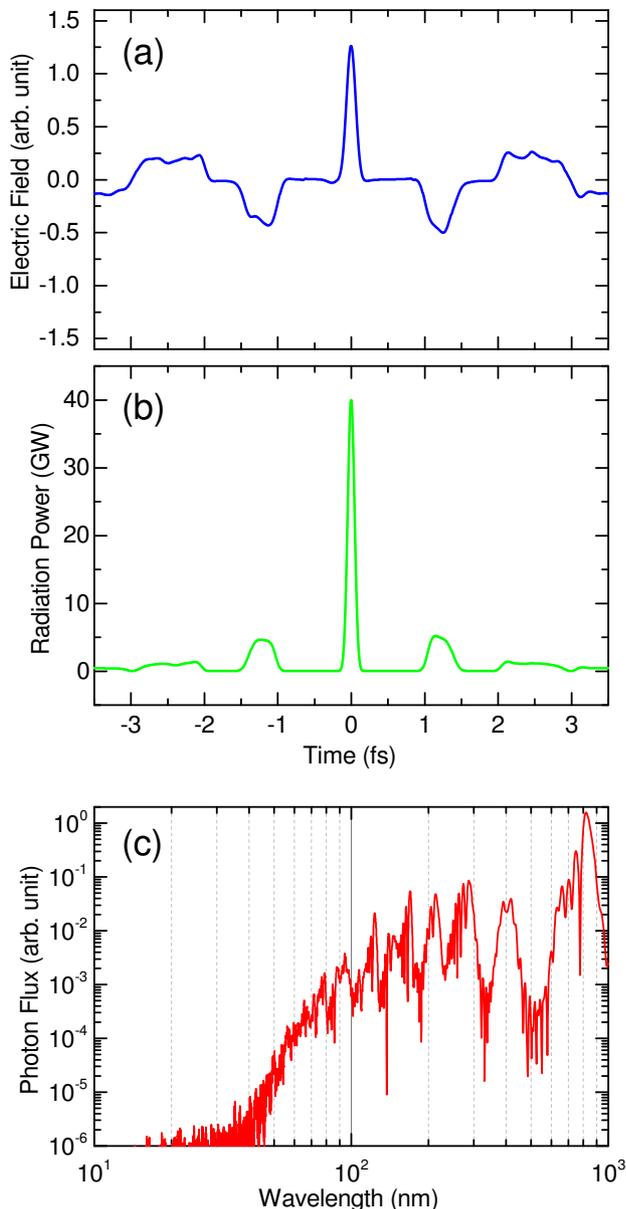


Figure 3: Evaluated performances of the MCHG FEL: (a,b) temporal profiles of the on-axis electric field and total power of radiation, (c) spectrum of the photon flux.

たパルス長はおよそ 0.1 fs であり、シード光のパルス長が 2.7 fs であることから、およそ 1/30 という高い圧縮率が得られていることがわかる。また、長波長側が 800 nm (シード光の中心波長)、短波長側が 40 nm にも及ぶ広帯域光が得られている。尚、Fig. 3(a) 及び 3(b) で確認される通り、主パルスに加えて無視できない強度のサテライトパルスが含まれている。これはポンプ・プローブ実験などのアプリケーションにおいて測定精度を劣化させる要因になり得るため、何らかの手法によって除去することが好ましく、そのための理論的な検討も進められている。

4. 実証実験の概略と到達目標

我々のグループでは、これまで述べてきた単一サイクル FEL を実現するための基本原理 (SC³) を実証するため、ニュースバル放射光施設の蓄積リングにおいて原理実証実験計画を進めている。同蓄積リングを SC³ 原理実証の場として選んだ理由は以下の通りである。

- (1) レーザー導入用のポートが備えられており、真空系に大規模な改造を必要としない。
- (2) エネルギー拡がり比較的小さく、チャープマイクロバンチを生成するために必要なシード光のパワーを軽減できる。
- (3) シード光として想定している、短パルスの赤外レーザー (中心波長 800 nm) に整合する基本波長を得るという観点で、電子エネルギーが (若干高いものの) 十分に許容範囲にある。
- (4) 長直線部に設置されているオプティカルライストロン (運用休止中) をモジュレータ・ラディエータ対に交換することが可能であるとともに、中央のシケインを流用することが可能である。

Table 2: Parameters Supposed in the Proof-of-Principle Experiments in NewSUBARU

Parameter	Value	Unit
Electron Beam		
Energy	1	GeV
Natural Emittance	37	nm-rad
Coupling Constant	1	%
Energy Spread	0.04	%
Taper Undulator		
Period	150	mm
Central K Value	8.93	-
Taper Rate	TBD	
Number of Periods	24	-
Seed Pulse		
Central Wavelength	800	nm
Pulse Length	TBD	
Pulse Energy	TBD	
Rayleigh Length	3.9	m

ニュースバルにおける主要なパラメータと、実証実験で想定されているアンジュレータ及びシード光のパラメータを Table 2 に示す。ニュースバルでは電子エネル

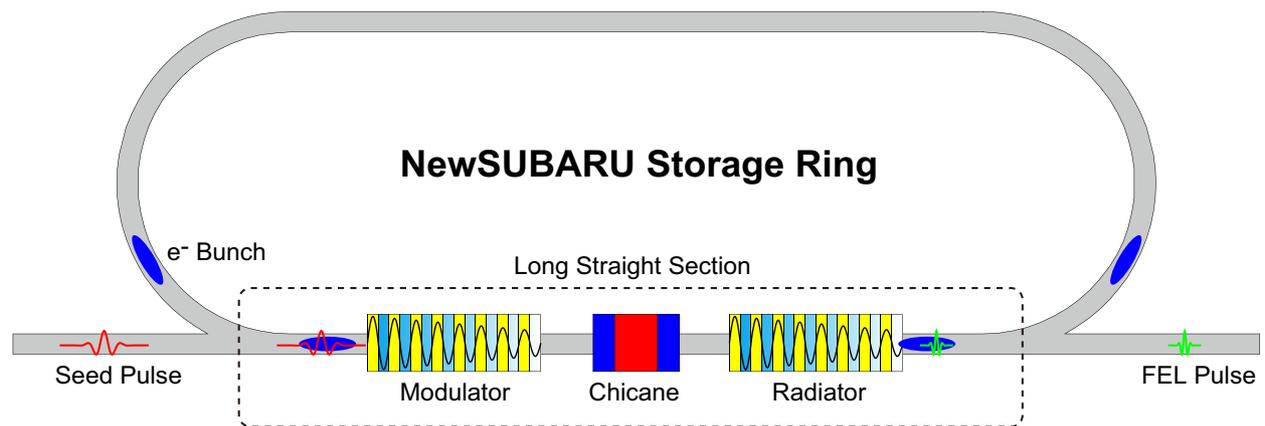


Figure 4: Outline of the proof-of-principle experiments planned in NewSUBARU storage ring.

ギーを 0.5 GeV まで下げて運転することが可能であり、その場合はエネルギー変調の増強 (=シード光の条件緩和) が期待できる。ただし、エネルギー低下によるビーム寿命などへの影響が無視できないため、安定に運転が可能な最低エネルギーを見極める必要がある。

Figure 4 に実証実験のための機器レイアウトの概要を示す。レーストラック型のニュースバル蓄積リングには全長 11 m の挿入光源が設置可能な長直線部が 2 か所存在し、その一方に電磁石型のオプティカルクライストロン [4] が設置されている。中央の電磁石シケインはそのまま残し、上下流の電磁石アンジュレータを永久磁石型のテーパーアンジュレータ (モジュレータ・ラディエータ対) と交換する。同直線部上流側に備えられている真空ポートから短パルスレーザーを導入し、シード光として利用する。

本実験では、単一サイクル FEL の実用化という最終目標に向けて、以下の原理を段階的に実証することを目標とする。

- (1) チャープマイクロバンチの生成とスリッページ制御
- (2) シード光 (数サイクルパルス) の短波長・短パルス化

第一段階で目指すのは SC³ 原理自体の実証である。この段階では短波長化 (高調波) には拘らず、計測手法が確立している赤外領域 (=シード光の波長領域) において各種計測を行い、基本原理を実証する。具体的には、モジュレータ・ラディエータにおけるテーパーの有無によって生ずる、コヒーレント放射光の特性 (スペクトルバンド幅やパルス長) の差を測定し、SC³ 原理を適用した場合の出力パルスが、通常のそれに比べて短パルス化 (広帯域化) されていることを確認する。ちなみに、パルス長の差が顕著に現れるためには、通常の状態 (テーパー無し) で生成されるコヒーレント光のパルス長が、シード光のパルス長ではなくラディエータにおけるスリッページ長 (波長と周期数の積) で決まる条件の下で実験を行う必要がある。このためには、シード光を可能な限り短パルス化する必要がある。

第二段階では、SC³ 原理に基づく MCHG 型 FEL の原理検証を行う。即ち、長波長のシード光から短波長かつ短パルスの出力光 (高調波) を生成することを目標とする。エネルギー変調 (即ちシード光のパワー) に関する

条件を緩和するため、かつ、計測系の複雑化を避けるため、3 次高調波 (紫外領域) をターゲットとする。

5. 各機器の準備状況

本実証実験では使用できる予算が限られているため、可能な限り既存品を改造・改修して再利用する。これまでに検討されてきた必要要素・機器類の準備状況について報告する。

5.1 シード光

SPring-8 で稼働中の XFEL 施設 SACL A のプロトタイプ機である SCSS 試験加速器 (EUV 領域における FEL 施設として 2013 年まで稼働) において、ユーザー実験に供されていたチタンサファイアレーザーを整備して利用する。パルス長は 40 fs 程度 (15 サイクル) であるが、中空ファイバーによるスペクトル拡大とチャープミラーによる分散補償によって、5 サイクル程度までパルス長を圧縮して利用する予定である。またチャープ光を圧縮せずに、直接シード光として利用することも理論上は可能であり (ただしこの場合は、モジュレータ周期数を減らす必要がある)、最適なシード光の形態やこれに伴う機器の調整手法について検討を進めているところである。

5.2 テーパーアンジュレータ

電子エネルギー 1 GeV に対して、シード光の中心波長 800 nm を基本波長にもつアンジュレータが必要である。既存の真空槽で制限される最小ギャップや、利用可能な永久磁石材料を考慮した上で、周期長を 150 mm と決定した。また、テーパー形状や周期数を任意に調整できるように、周期毎にギャップが変更可能な機械構造の設計を進めている。

5.3 タイミング系

5.1 節で述べたレーザーシステムは、SCSS 試験加速器における RF のマスターオシレータ (基準周波数 238 MHz) に同期するように設計されているため、そのままではニュースバルの電子バンチに同期することができない。レーザーの共振器長を大幅に変更することなく、ニュースバルにおけるマスターオシレータ (基準周波数 500 MHz) と同期するための手法について検討を進めて

いる。これまでに、市販の逡倍器や分周器などを組み合わせることで精度の良いトリガー信号が生成可能であることを確認している。

5.4 蓄積リング

5.2 節で述べたアンジュレータは、ピーク磁場が比較的高くかつ全長も長い場合、いわゆる自然収束の効果、具体的に言うとベータ関数の歪みやチューンシフトが顕著であり、そのままでは加速器の運転に支障をきたす可能性がある。このため、アンジュレータのギャップや周期数に応じて4極磁石の電流量を補正する必要があり、その最適な手法について検討を進めている。

6. まとめ

単一サイクル FEL を実現するための基本原理と、その実証実験の概要について報告した。実験計画では、2018年度内に必要となる基本機器の設計を完了し、2019年度内にはこれらの機器を製造し、ニュースバルへ移設すると共に調整運転を行う。本格的な実証実験は2020年度に開始する予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18H03691 の助成を受けています。

参考文献

- [1] T. Tanaka, "Proposal to generate an isolated monocycle x-ray pulse by counteracting the slippage effect in free-electron lasers", *Phys. Rev. Lett.* **114**, 044801 (2015).
- [2] Y. Kida, R. Kinjo, and T. Tanaka, "Synthesizing high-order harmonics to generate a sub-cycle pulse in free-electron lasers", *Applied Physics Letters* **109**, 151107 (2016).
- [3] A. Ando, S. Amano, S. Hashimoto, H. Kinoshita, S. Miyamoto, T. Mochizuki, M. Niibe, Y. Shoji, M. Terasawa, T. Watanabe, and N. Kumagai, "Isochronous storage ring of the New SUBARU project", *Journal of Synchrotron Radiation* **5**, 342–344 (1998).
- [4] S. Amano, S. Miyamoto, T. Inoue, Y. Shoji, and T. Mochizuki, "Study of free electron laser and ultra-short pulse x-ray generation on New SUBARU", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **528**, II–85 (2004).