

## パルス超伝導線形加速器と従来型蓄積リングを組み合わせた ハイブリッド光源の提案

### CONCEPT OF HYBRID RING LIGHT SOURCE USING ORDINARY STORAGE RING WITH PULSED SUPERCONDUCTING LINAC

原田健太郎<sup>#</sup>, 山本尚人, 本田融, 阪井寛志, 梅森健成

Kentaro Harada<sup>#</sup>, Naoto Yamamoto, Tohru Honda, Hiroshi Sakai, Kensei Umemori  
Accelerator Laboratory, KEK

#### Abstract

LINAC can generate electron beam with short pulse length and/or small emittance. Long-pulsed multi bunch superconducting LINAC (SCL) can generate high beam current of about 0.1 mA with minimum extra construction cost from ordinary normal conducting LINAC (NCL). The capacity of the required cryosystem for pulsed operation is relatively small and the operation cost is also comparable. Using storage ring as single pass beam transport, users can use the beam from SCL. We have three modes; only stored beam mode, only SCL beam mode with on-axis injection/extraction, and the hybrid mode. With hybrid mode, beam from SCL is injected at off-axis with the presence of stored beam. Users can simultaneously use two beams with different photon beam axes. To manage single pass beam, the large flexibility of the beam dynamics and hardware of the ring is essential. The beam quality may be deteriorated in the storage ring with CSR effect. The maximum available current from SCL may be fixed by the radiation safety. There are still many subjects to be solved, but with the hybrid ring, many users can simultaneously use FEL-like beam and diffraction limited storage ring like beam at the same time. The detailed design is recently began and not finished yet. In this paper we just show the idea and tentative progress of the study.

#### 1. はじめに

KEK では PF, PF-AR という 2 つの放射光源蓄積リングが運転中である。AR は常に大電荷シングルバンチ運転を行っており、PF でも、同様の利用実験を可能にする、大電荷孤立バンチのある運転モードを年間で約 1 ヶ月採用している。また、ビームライン装置の水平方向の配置を可能にする垂直ウィグラーや、2 台の挿入光源と高速軌道バンチを組み合わせた 10Hz の偏光スイッチング運転など、世界的にみても極めて特徴的な利用実験を行っている。今回、PF の長期将来計画として、従来の蓄積リング型光源の良さを失うことなく、それらの特徴を更に高度化できるような、線形加速器と蓄積リングとを組み合わせたハイブリッド光源を提案することとした。設計目標は、十分に高性能な蓄積リング型光源を基本とし、輝度以外の様々なパラメータに対しても、高度化や可変性、柔軟性を最大限に確保する、ということである。特に、大電荷の孤立バンチや垂直ウィグラーの利用を可能にした。

蓄積リングでは、様々なパラメータは放射減衰と放射励起の平衡状態で決まり、安定である一方、自由度は限られている。何かを変化させようとするリング全体に影響が及ぶのが普通で、運動の結合や高調波空洞などでエミッタンスやバンチ長を変えられたとしても、非常に苦労してファクター程度がやっとならぬ。時間構造についても、リングの平衡状態ではジッターがほとんどなく、安定である一方、バンチ間隔を RF 周期より短くしたり周回周期より長くしたりすることは不可能である。一方、線形加速器と蓄積リングとを組み合わせると、それらが全て自

由になる。ここでは、長パルスの超伝導線形加速器と従来型の蓄積リングとを組み合わせた、ハイブリッドリングの概念と利点、課題について発表を行う。なお、線形加速器からビームは、直接的な放射光利用だけではなく、もちろん通常の積み上げ、トップアップ入射にも利用される。詳細設計はまだ完了しておらず、今回の発表は設計の途中経過である。

#### 2. 長パルス超伝導線形加速器

EuroXFEL は、現在稼働中の長パルス超伝導線形加速器である。加速勾配 23 MV/m、RF は 1.3 GHz でマクロパルスが 1 ms、10Hz で duty 1%、その中に電荷 1 nC のバンチが 2700 個、220 ns おき(4.5 MHz)に約 0.6 ms 分存在する。平均電流は 27  $\mu$ A である。バンチ長は約 50 fs、1 nC 時の規格化エミッタンスは約 3 mm-mrad[1]とのことである。およそこの 3 GeV までの部分を最適化して入射器として採用しようというのがハイブリッドリングの発想の出発点である。なお、EuroXFEL では規格化エミッタンス 3 mm-mrad は 3GeV で実エミッタンス 0.5 nm-rad である。

我々は最適化した基本パラメータとして、加速勾配は 30 MV/m、エミッタンス 0.1 nm-rad、1 nC x 10000 バンチ x 10 Hz で平均電流 0.1 mA を目指す。EuroXFEL の加速勾配はどんどん向上しており、初期の設計は原理、技術的な限界ではなく、確実に出せる値として決められており、運転開始後、実際に向上し続けている。KEK では STF[2]で 30 MV/m の加速勾配が達成できている。エミッタンスや 1 nC バンチでの平均大電流についても、現時点でそれほど非現実的ではないだろう。

<sup>#</sup> kentaro.harada@kek.jp

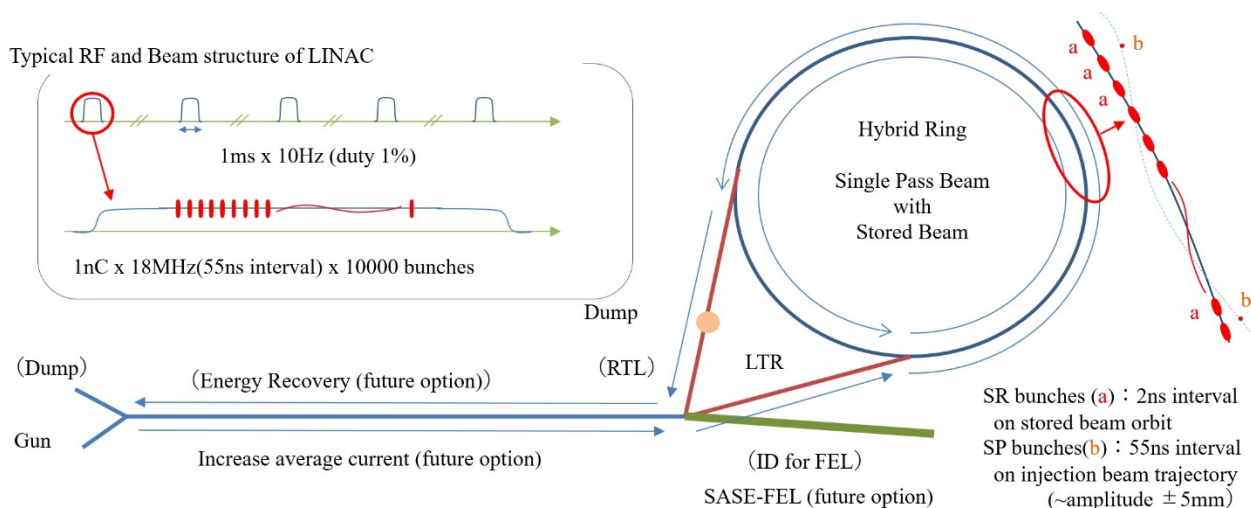


Figure 1: Concept and bunch structure of “hybrid ring” light source.

Duty 100%の運転を Continuous Wave(CW)というが、CW 運転を行うためには、加速勾配を下げ、高次の共鳴モード(HOM)対策を行う必要があり、加速器本体として長くなる。勾配が下がるので、必要な冷凍機容量はそのまま duty 比にはならないが、duty 1%と比較すると、数十倍になることは避けられない。一方、長パルス運転ではマクロパルス内の時間構造しか制御できないのに対し、CW 運転では真に時間構造を自由に制御できる。電力的に問題なければ、平均電流も 100 倍にできるし、バンチ電荷も小さくてよい。CW 運転の利点を活かすかどうかは、コストに見合うかということにつきる。常伝導線形加速器の典型的な電流値を  $1\text{ nC} \times 10\text{ Hz} = 10\text{ nA}$  とするならば、長パルスの超伝導加速器は線形加速器部分だけ考えると、冷凍機まで含めても常伝導加速器の 1.5~2 倍程度の予算で実現できそうである。施設全体の経費からすると、1~2 割の増加といえる。それで平均電流は  $0.1\text{ mA}$  という 10000 倍の値にできる。一方、CW を採用すると、平均電流 100 倍の為に、運転経費も建設費も、施設全体のコストとして数倍必要になる。安価で高性能な長パルスの超伝導線形加速器はコスト的に非常に大きな価値がある。

3 GeV の長パルス超伝導線形加速器だが、9 セル 1 m の加速管が 96 本、クライオモジュールとしては 8 本入りが必要となる。運転時 30 MV/m とするが、達成可能な最大勾配は ILC 同様の長パルス運転のため、35 MV/m であり、余裕はある。パルス運転とは言え、HOM カップラーもしくはダンパーが必要であり、詳細検討はまだこれからである。電源としてはピークエネルギー 300 kW で duty 1% である。予算の見積もり時は 10 MW のパルスクライストロン 3 本で全体を駆動することとしたが、空洞の結合と運転モードによっては半導体アンプも利用可能だろうと思われる。必要な冷凍機容量は、RF の負荷(ダイナミックロス)としては duty 1% なので 1 本あたり 1W 程度である。むしろ、カップラーやダクトからの熱流入等の負荷(スタティックロス)の方が大きく、それを 1 本 5W とするか 10W とするかで容量が決まる。ただし、いずれにせよ 2k で数百 W 程度と思われ、それは KEK の cERL

や STF、COI 棟などで現在利用されている冷凍機容量と同程度である。印象としては、30 MeV で 100% duty は 3 GeV で 1% duty とほぼ等しくなるのである。スペックだけで必要な要素のリストを作り、簡単な見積もりを行ったところ、主加速空洞の分だけを比較すると、S バンド常伝導の場合、電源を含めて約 40 億強、超伝導の場合冷凍機と電源を含めて約 60 億程度となった。(詳細な設計に基づく、正確な見積もりではないことに注意。ただし、超伝導に対しては ILC の量産効果は加味せず、現時点の製造実績ベースの見積りとしている。) 第一印象として、差額約 20 億で平均電流  $0.1\text{ mA}$  の極短パルスや極低エミッタンスビームが利用可能になるならば、採用する価値は非常に大きいと思われる。

### 3. 運転モードと目標パラメータ

蓄積リング側の運転モードとしては、線形加速器を積み上げ及びトップアップ入射用として用いながら従来通り蓄積ビームのみを利用するモード(SR モード)、蓄積リングの一部分だけを輸送路的に使い、蓄積ビームなしに、線形加速器からのビームを入射、取り出ししながら使うシングルパス(SP)モード、そして、蓄積ビームの存在下でシングルパスビームを共存させて利用するハイブリッド(HB)モード(Fig. 1)である。現在でもトップアップ入射の際には蓄積ビームの存在下でビームを入射させており、2 ビームが共存すること自体に問題はない。入射ビームの振幅は、一般にセプタム壁を挟んだ蓄積ビームと入射ビームとの間の距離で決まるが、5 mm~1 cm 程度である。HB モード時、ビームライン毎にローカルバンプを立てれば、SR ビームと SP ビームのどちらを使うか選択可能であるし、違う光軸でよければ 2 ビームの同時利用も可能である。直線部に 2 台のアンジュレータを設置し、バンプ軌道を制御すれば、上下流の挿入光源で SP ビームと SR ビームを使い分けることも可能である。最も難しいのは SR ビームと SP ビームの同時利用で、両者の光軸を調整するためには、2 ビームを独立に軌道調整する必要がある。多極磁石を用いればそれは可能であるが、少なくとも局所的な 4 極や 6 極の変化に対して、蓄積リングと

して

問題がない設計にする必要がある。大電荷の孤立バンチや垂直ウィグラーの利用、局所的なバンチや多極などの電磁石パラメータの大きな変化に耐えられるリングの候補としては、恐らく、第四世代の極低エミッタンスリングは不適當で、もう少しパラメータを緩くする必要があるだろうと思われるが、具体的な設計はこれからである。

SP ビームの性能としては、極低エミッタンスモードとして、エミッタンス 100 pm-rad、極短バンチモードとしてバンチ長 50 fs、大電荷モードとしてバンチ電荷 1 nC を目標とする。全ての最高性能が同時に達成できればよいが、まずは、それぞれ目的とするパラメータ優先で最適化し、例えばエミッタンス優先時のバンチ長やバンチ電荷は必ずしも最高性能にならないでもよいものと考えている。

#### 4. 課題

蓄積ビームの全電荷ということを考えると、1 nC のバンチが 500 MHz で来ると、500 mA となる。蓄積リングに貯められるバンチ数は周長(ハーモニクス)によって変化するが、およそ数百である。従って、1 nC のバンチが数百個失われることは、500 mA の蓄積ビームが一気に失われることに等しい。マクロパルスあたり 10000 バンチとするなら、SPビーム 10 Hz のうちの 1 発分が失われるだけで、リングの全ビームのダンプ数十回分となる。ただし、バンチ周期を 1.3 GHz としても、全長数百メートルに存在するバンチの総数は限られており、ハードの不具合やビーム損失を検知する高速インターロックとリングへの入射をやめる入射路途中のアボートキッカーが安全対策となり得る。それらによる安全性が確立するまでは、平均電流は小さく抑えておく必要があるだろう。もちろん、全損失に耐えられる遮蔽を作れば最も安全だが、例えば、厚さ 10 m のコンクリートで囲った上に加速器は地下に、というイメージになり、コスト的に恐らく現実的ではないだろう。

極短バンチや極低エミッタンスのビームは、空間電荷効果や Coherent Synchrotron Radiation(CSR)の効果、真空ダクトや挿入光源のインピーダンス(航跡場)の効果でバンチ伸長、エミッタンス増大が起き、性能を維持したまま輸送することは難しい。曲げなければ現在の XFEL でビーム性能を達成することができているが、リングでの利用を前提とするので、曲げないわけにはゆかない。前述の通り、バンチや多極磁場の変化に対して柔軟性を確保しつつ、CSR や空間電荷、真空のインピーダンスの影響を受けにくい蓄積リングの設計が今後の課題である。

#### 5. 短バンチビームの輸送例

超高品質ビームを性能維持したまま輸送できることと、蓄積リングとしてのアパーチャや安定性とを両立させた新しいラティスを開発する必要がある。ただし、いきなり新リングは難しかったため、まずは既存のリングや過去に検討したリングに対して、極短バンチを輸送した際の CSR の影響について計算を行ってみた。ここでは、検討の途中経過として、3 GeV ERL 計画の周回部[3,4]、PF リング、KEK-LS 計画のリング[5]の 3 通りに対して計算を行った例を紹介する。

3 GeV ERL 計画の周回部のラティスは TBA 構造で、セル中央の偏向電磁石で分散が負になっており、運動

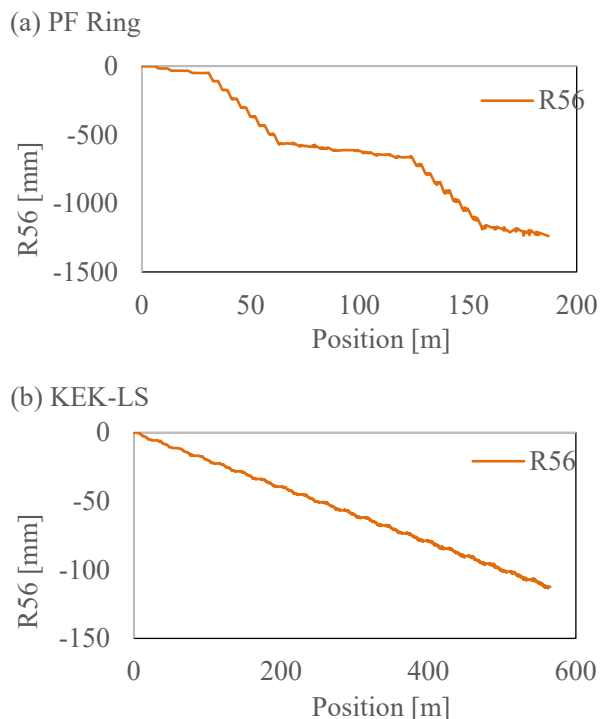


Figure 2:  $R_{56}$  of PF ring and KEK-LS.

量偏差に対する線形の軌道長偏差  $R_{56}$  がゼロになっている。典型的なセル長は 7m の直線部をもつセルで約 24 m、偏向電磁石の磁場強さは 0.97 T で、その長さは 1.5 m(直線部側の 2 台)と 3 m(セル中央の 1 台)である。分散関数の最大値はおおよそ 0.3 m である。一方、PF リングはエネルギー 2.5 GeV で周長 187 m、南北の対称点を DBA 構造 1 セルずつの合計 4 セルではさみ、その間を FODO セルの弧部で繋いだ楕円形のラティスである。偏向電磁石は 1 種類で、長さ約 2 m、磁場強さは 0.96 T である。分散関数の最大値はおおよそ 0.6 m である。3 GeV ERL、PF リングの偏向電磁石に共通する特徴は、磁場が強く、コア長が長く、偏向電磁石 1 台あたりの曲げ角が大きいということである。一方で KEK-LS 計画のラティスは Hybrid Multi Bend Achromat (HMBA) 構造で 1 セルあたり偏向電磁石 8 台、磁場強さは弱く、コア長も短い。分散関数の最大値はおおよそ 0.12 m である。

シミュレーション結果に対する印象であり、定量的に式で証明したわけではないが、CSR の効果に対し、偏向電磁石のパラメータと分散関数が重要な影響を及ぼしている様である。偏向電磁石のパラメータは CSR による航跡場の強さの指標となり、曲げ角が大きく、コア長が長いほど CSR の影響は強くなる。一方、航跡場によって生じたバンチ内のエネルギー偏差が、エミッタンスやバンチ長にどう効くかは分散関数が良い指標となり、分散関数が小さいほど、その影響が小さくなる。

Figure 2 に PF リング、KEK-LS の入射点から 1 周分の、リング中心軌道に沿った 1 周分の  $R_{56}$  の変化を示す。1 周後の  $R_{56}$  が 1 m まで増大するという事は、入り口で 0.1% のエネルギー偏差を持つ粒子を 1 周回させると、設計粒子に対して 1 mm の軌道長偏差、3 ps の時間差が



生じるということである。PF リングに比べ、KEK-LS は  $R_{56}$  が一桁以上小さいことが分かる。

CSR の効果の見積りとしては、初期パラメータとして電荷 1 nC、バンチ長 50 fs、エネルギー拡がり 0.5%、水平垂直方向の実エミッタンス 100 pm-rad とした。分布はガウス分布で、LINAC や輸送路は考えず、いきなりリング中

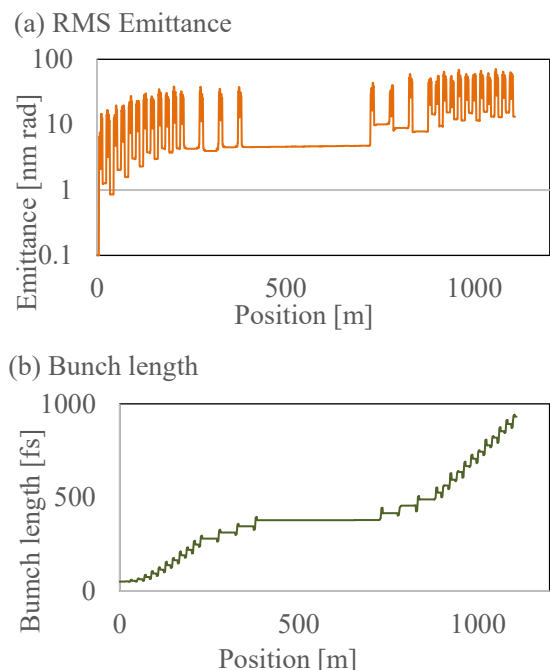


Figure 3: Horizontal emittance growth and bunch lengthening due to CSR for 3GeV ERL recirculation path.

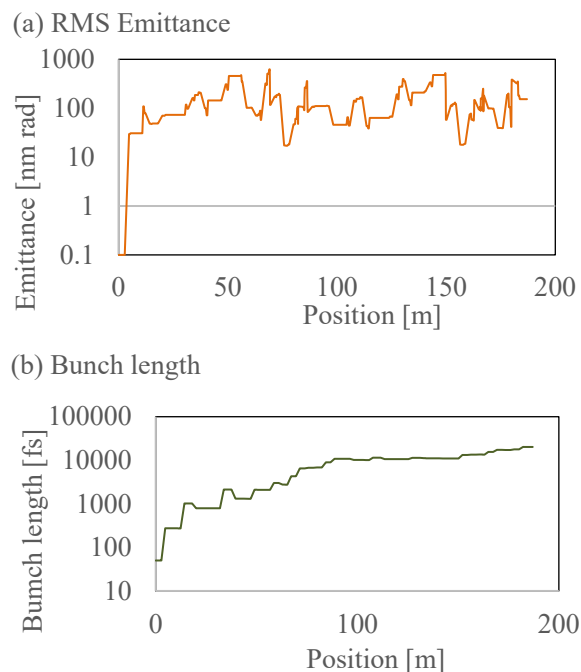


Figure 4: Horizontal emittance growth and bunch lengthening due to CSR for PF ring.

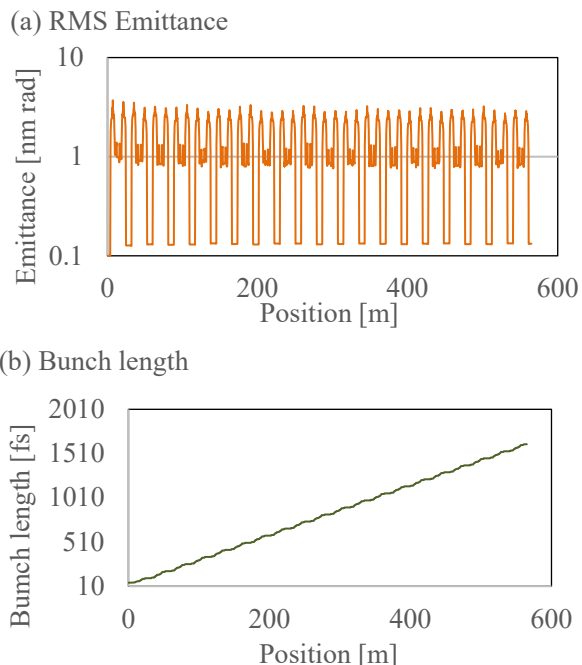


Figure 5: Horizontal emittance growth and bunch lengthening due to CSR for KEK-LS ring.

心軌道から計算を始めている。計算は ELEGANT で CSR の効果を入れて行った。なお、空間電荷効果については、縦横方向とも考慮しておらず、それは次の課題である。参考と確認のために、Fig. 3 に、3GeV ERL の場合のエミッタンスとバンチ長変化を示す。デザイン時の検討結果はきちんと再現できている。CSR の効果でエミッタンスは急速に 1 nm-rad を越え、1 周で数 nm-rad まで増大、バンチ長は 1 周通して徐々に約 1 ps まで増大しているのが分かる。 $R_{56}$  はゼロであるが、高次の  $T_{566}$  の効果は残っており、極小電荷でもバンチ長は約 200 fs まで増大する。Figure 4 は PF リングに対する同様の計算である。バンチ長は 1 ps 程度まで急速に伸び、リング 1 周で約 20 ps となる。蓄積ビームの平衡状態の値が約 32 ps なので、それに近い。エミッタンスについても急速に 10 nm-rad を越え、蓄積ビームの平衡状態での値よりも悪化してしまうことが分かる。Figure 5 に、KEK-LS の場合を示す。偏向電磁石が短く、磁場が弱く、さらに蓄積ビームの平衡状態のパラメータとしてエミッタンスが小さいため、エミッタンス増大の効果は非常に小さく、バンチ伸長の効果もほぼ  $R_{56}$  による分に抑えられていることが分かる。

これらの結果から、ハイブリッド光源の蓄積リング設計の最適化としては、偏向電磁石のコア長を短く、それぞれの曲げ角を小さく抑えること、磁場を弱くすること、分散関数を小さくすること、蓄積ビームのパラメータとしての自然エミッタンスを小さくすること、が指針となりそうであることが分かった。これから、その方針に従い、柔軟性をもち、多極磁場の変化に強い蓄積リングを設計、同時に CSR と空間電荷の効果の影響の計算と検証を進めてゆく予定である。より現実的なシミュレーションやシミュレーションの正しさの検証も今後の課題である。また、3 GeV ERL の検討では、挿入光源が発生する  $R_{56}$  も無視できな

## PASJ2020 THPP62

い大きさだったとのことである。それらに対する対策も今後の課題である。

### 謝辞

RF 源や冷凍機のスペック、見積もり等に関して、KEK の三浦孝子氏、松本利弘氏、仲井浩孝氏に相談に乗って頂きました。どうもありがとうございました。

### 参考文献

- [1] B.Beutner, “EUROPEAN XFEL INJECTOR COMMISSIONING RESULTS”, Proc. Of FEL2017, WEA01, pp.381-385.
- [2] 山本康史 *et al.*, “ILC に向けた STF-2 加速器のビームコミッショニング”, Proc. Of PASJ2019, FROH05, pp.187-192.
- [3] 島田美帆 *et al.*, “3GeV ERL およびコンパクト ERL のオプティクス設計の進捗状況”, Proc. Of PASJ2012, THPS036, pp.959-962.
- [4] 中村典雄, private communications.
- [5] 原田健太郎 *et al.*, “短直線部のある HMBA 型 3GeV 放射光源の設計”, Proc of PASJ2016, WEOM16, pp.296-299.