

解説

新世代放射光源開発の最前線—XFEL と ERL

羽島 良一

日本原子力研究所光量子科学研究センター*

Status and Perspectives of the Next Generation Light Sources —XFEL and ERL

Ryoichi HAJIMA

Advanced Photon Research Center, Japan Atomic Energy Research Institute

Recent results from the technological challenge towards the next generation light sources, X-ray free-electron laser (XFEL) and energy-recovery linac (ERL), are summarized. An XFEL is able to produce coherent X-ray of extremely high-brightness by using electron bunches from an electron linac. Another novel light source, ERL, is a ring-shaped light source based on an energy-recovery superconducting linac, which generates electron bunches of small emittance close to the diffraction limit and sub-pico second time duration.

1. はじめに

ここ数年、新世代（第4世代）の放射光源としてX線自由電子レーザー（XFEL; X-ray Free-Electron Laser）の研究開発が比較的大きな規模で進められている。XFELはリニアックを使ったSASE (Self-Amplified Spontaneous Emission) 方式のFELで、従来の第3世代放射光源に比べて 10^{10} 倍ものピーク・ブリリアンスが得られるため、これまでには考えられなかった新しい利用研究が期待されている。

XFELとは異なる方式で新世代の放射光源を実現しようというのがERL（エネルギー回収型リニアック; Energy-Recovery Linac）である¹⁾。周回軌道上に配置した偏向磁石、挿入光源を使って放射光を発生する点では従来の放射光施設と同じであるが、蓄積リングの代わりにERLを用いることで、これまでは生成不可能であったフェムト秒、縦横同サイズ、回折限界に近い電子バンチを使って放射光が発生できる。ERLへの関心と期待は、ここ1、2年の間に急速に膨らみつつある。

Figure 1はこれまでの光源とXFEL, ERLの特徴を発生する放射光の時間幅とピーク・ブリリアンスで整理したものである。XFEL, ERLが実現すれば、これまでとは全く違うパラメータ領域の放射光が得られることになる。サブピコ秒の放射光はALSでバンチスライスを使って実現

されているが、ERL, XFELはそれをはるかに超えるブリリアンスを提供する。

本稿では、新世代の放射光源として期待されているXFELとERLについて、構成と特徴、研究開発の現状、将来の展望をまとめる。

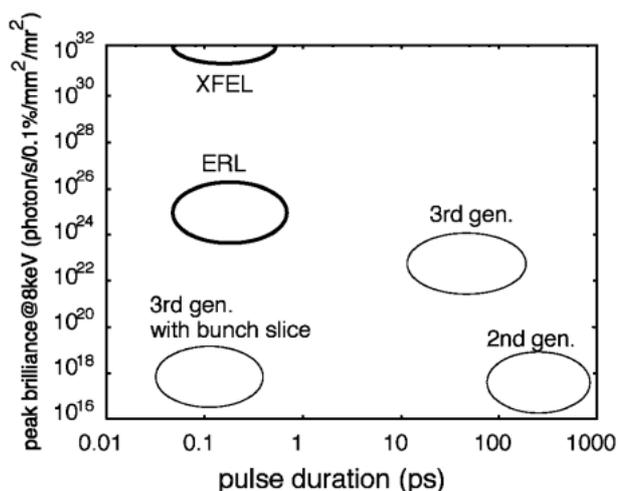


Figure 1. Time duration and peak brilliance of existing and future light sources.

* 日本原子力研究所 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4
TEL: 029-282-6315 FAX: 029-282-6057 E-mail: hajima@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

2. XFEL

XFEL (SASE-FEL) の原理, 特徴, 機器の構成については, すでに詳細な解説^{2,3)}が出ているのでそちらに譲り, ここでは LCLS と TTF における開発の現状を簡単に述べた後, 最近の研究で注目されているトピックスを取り上げる。まずは, 既刊の解説^{2,3)}をご覧になった上で本稿に目を通していただければ幸いである。

2.1 XFEL 開発の現状

LCLS と TESLA-FEL

米国では, SLAC/SSRL グループが提案している LCLS (Linac Coherent Light Source) の建設に向けた R & D が進行中である。LCLS は, SLAC リニアックを用いて, 波長 1.5 \AA の X 線 FEL の実証を行なう装置である⁴⁾。LCLS-R & D は, 1999年から4年間かけて LCLS のための要素技術の実証, 利用研究の展望を行なうもので, SLAC の他に UCLA, LANL, LLNL, ANL, BNL の各研究所が参加している。順調に計画が進めば, 2003年から LCLS の建設, 1.5 \AA の発振実証と先行的な利用研究が行なわれることになっている。これまでの R & D の成果として, ANL/APS で $385\text{--}530 \text{ nm}$ の, BNL/ATF で 830 nm の SASE-FEL 実験が行なわれており, いずれも発振 (飽和) に成功している^{5,6)}。

一方, DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron ; ドイツ) では, リニアコライダ計画 TESLA の一部として X 線 FEL の研究開発が行なわれている。TESLA-FEL は, 複数のアンジュレータを備え, 1 \AA までのコヒーレント X 線をユーザーに供給する施設となる予定である⁷⁾。現在は, Tesla Test Facility (TTF) で TESLA の R & D が進行中であり, FEL の実験 (TTF-FEL) も行なわれている。TTF-FEL では, phase-I (390 MeV) で 40 nm の発振, phase-II (1 GeV , 2003年) で 6 nm の発振を目指している。現時点では 80 nm までの発振に成功している⁸⁾。

フォトカソード RF 電子銃

フォトカソード電子銃は, アルカリ化合物, 半導体, 金属をカソードとし, これにレーザーパルス照射して光電効果で電子を引き出す装置である。カソード面から引き出したパルス状の電子を RF 空洞に蓄積した高電界で一気に加速し, エミッタンスの増大を最小限にしようというのが, フォトカソード RF 電子銃であり, XFEL 構成する重要な装置である。

現在, フォトカソード RF 電子銃は, 大きく分けて二つの流れで研究開発が行なわれている。一つは, Cu, Mg とした金属をカソードにしたもので, ドライブ・レーザーは Nd : YAG の 4 次高調波, または, Ti : Sapphire の 3 次高調波で得られる約 260 nm の UV 光を使用する。カソードの量子効率 (入射光子あたりの発生電子数) は, Cu の場合 10^{-4} のオーダーなので, 1 nC の電子バンチ生

成には $100 \mu\text{J}$ 級のエネルギーをもったレーザーパルスが必要である。ドライブ・レーザーの制約から高繰り返し動作は難しく, $10\text{--}120 \text{ Hz}$ の低繰り返し動作を想定している。このタイプでは, Brookhaven 研究所 (BNL) で開発された S-band (2856 MHz , 1.6 cell) の装置が最も進んでおり, 国内では, 住友重工, 東大原施, KEK, 原研光量子, 早稲田大学などで同型の電子銃を使った研究が行なわれている。フォトカソード RF 電子銃の開発では, 1 mm-mrad の規格化エミッタンスを切る電子バンチ生成が, ここ数年来の目標であったが, 今年になって, 住友重工が 0.5 nC で 0.9 mm-mrad , 1 nC で 1.2 mm-mrad のバンチ生成に成功し⁹⁾, BNL も 0.5 nC で 0.8 mm-mrad の値を達成した¹⁰⁾。LCLS の基本パラメータ (1 nC で 1 mm-mrad), 及び low-charge オプションのパラメータ (0.2 nC で 0.6 mm-mrad) にほぼ到達したと言える。ドライブ・レーザーの波形整形 (横方向および時間方向) と高い安定性が低エミッタンス化には欠かせない技術であるが, これらの技術は着実な進歩を見せており, LCLS の要求を満たす電子バンチが再現性よく安定に得られる日は近いだろう。

フォトカソード RF 電子銃のもう一つの流れは, 高繰り返し ($1\text{--}10 \text{ MHz}$) の電子バンチ生成が可能な装置の開発である。こちらは, DESY-TTF で研究が進んでいる。カソードに Cs_2Te を, ドライブ・レーザーに 260 nm の UV を用いる方式で, TTF では 1.3 GHz , 1.6 セルの L-band 常伝導空洞を採用している。このカソードは比較的高い量子効率 ($\sim 1\%$) が容易に得られるので, $1 \mu\text{J}$ 程度のレーザーパルスエネルギーで 1 nC の電子バンチが生成でき, 高繰り返し動作も可能である。最終的な目標 (TESLA-FEL) は, 1 nC , 2 mm-mrad のバンチを 10 MHz で生成することである。ただし, デューティは 0.4% と低い。現在, TTF で得られているデータは, 1 nC で 3.0 mm-mrad である¹¹⁾。DESY では, フォトカソード RF 電子銃の試験を行なう専用施設を新たに作り, より一層の性能向上を目指している。

バンチ圧縮器

XFEL を発振させるには高いピーク電流の電子バンチが必要なので, 電子バンチを加速中に時間方向に圧縮しなければならない。そのための装置がバンチ圧縮器である。高エネルギー電子では磁気圧縮方式が用いられる。これは, バンチの前後にわずかなエネルギー差を与えた後に Fig. 2 のようなシケイン軌道を通し, 電子エネルギーの違いを行路差に変えて電子バンチを時間方向に圧縮する装置である。

ここで問題になるのが CSR (coherent synchrotron radiation) によるエミッタンスの劣化である。CSR の放射パワーはバンチ電子数の 2 乗に比例し, また, バンチ長が短くなると放射波長も短くなるので導体シールド (真空ダクト) による遮蔽効果が期待できなくなる。XFEL で用いる 1 nC , 1 ps 以下のバンチが圧縮器の偏向磁石を通ると,

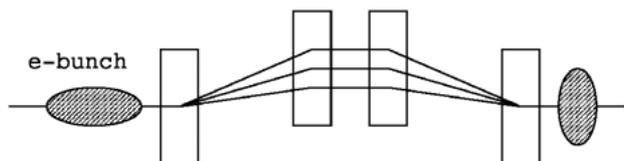


Figure 2. Chicane type bunch compressor. Energy difference within the electron bunch results in arrival time difference after the chicane.

CSR 放射によってバンチ内に均一でないエネルギー変動が生じ、その結果、圧縮器を通った後にエミッタンスが増大してしまう。これが CSR によるエミッタンス劣化である。

XFEL における CSR の影響は Derbenev らによる問題提起¹²⁾以来、理論解析、数値解析、実験が精力的に行なわれてきた¹³⁾。現象の理解と数値解析コードの整備はほぼ完了した。エミッタンス増大を抑制する方法として、バンチ圧縮器を連結する 2 段階圧縮方式なども提案されている。

最近の研究では、バンチ圧縮器単体ではなく、XFEL 装置全体を通した数値シミュレーション (start-to-end simulation) の必要性が叫ばれている。それぞれの機器が単独で所定の性能を満たしても、全体を通すと不具合が生じることが考えられるためだ。したがって、電子銃、加速器、バンチ圧縮器、FEL を数種類の計算コードを連係して解析しなければならない。M. Borland が行なった start-to-end simulation の結果、現状の LCLS のバンチ圧縮器は、CSR の影響を抑制しきれておらず、設計の再検討が要求されている¹⁴⁾。

これまでの研究から CSR 効果の現象理解とこれを抑制する手法は明らかになったものの、XFEL のパフォーマンスを損なわないようなバンチ圧縮器の最適な設計は得られていない。しかしながら、数値解析コードの整備が進み、研究に勢いがつき始めたところなので、今後の進展には十分な期待ができるだろう。

アンジュレータダクト内壁の表面粗さ

電子バンチとアンジュレータダクトの相互作用は、表面導体の抵抗による“resistive wall”効果がよく知られているが、これはダクト内面に銅メッキを施すことで、問題ないレベルまで影響を小さくできる。ところが、もうひとつ、やっかいな相互作用がある。これが表面粗さの効果である。XFEL では電子バンチを 100 fs 程度まで圧縮しピーク電流をキロアンペア・レベルにする必要がある。このとき電子バンチの長さは、ダクト内面の表面粗さ（微小な凹凸）と同程度のスケールになるので、表面粗さにより生じる wakefield が無視できなくなる。この現象は、XFEL 特有の現象である。SASE-FEL を発振させるには、電子バンチのエネルギー広がりを FEL パラメータ (ρ) 以下にしなければならない。ちなみに、LCLS では $\rho = 4.7 \times 10^{-4}$ を予定している。リニアックで加速された電子バン

チのエネルギー広がりがこの値よりも十分小さくても、アンジュレータダクト中の表面粗さ効果で電子バンチのエネルギーが広がってしまうようなことがあれば、XFEL のゲインが著しく低下してしまう。

表面粗さにより生じるバンチのエネルギー広がり、LCLS design study report¹⁵⁾でも触れられているように XFEL 研究が始まった当初から知られていたが、あまり重大な問題とは認識されておらず、せいぜい resistive wall の効果と同程度と考えられていた。ところが、G. Stupakov の論文¹⁶⁾が発表された頃から、XFEL 設計パラメータを決める上での重要な物理現象のひとつと考えられるようになり、2000 年秋のワークショップ¹⁷⁾では、この問題を重点的に議論するセッションが設けられるに至った。現在、実験と解析が精力的に進められている。

この問題は 3 つに切り分けられる、内壁の表面粗さのスケールはどの程度なのか、表面粗さにより電子バンチに生じるエネルギー広がりとはどの程度なのか、そして、表面粗さの影響を小さくする方策はあるのかである。

G. Stupakov は、“best commercial finish”として入手した円管の内壁面を原子間力顕微鏡で測定し、表面の凹凸の深さとして 125 nm、凹凸の周期として約 $1 \mu\text{m}$ を得ている¹⁶⁾。LCLS では SUS の円管の内面に銅メッキを施したアンジュレータダクトが用いられる予定であり、もう少し滑らかな表面が得られると思われる。

表面粗さによって生じる電子バンチのエネルギー広がりを評価する方法には、いくつかのモデルが提唱されている。主なモデルは、誘電体層モデル (dielectric layer model)¹⁸⁾、インダクティブ・インピーダンスモデル¹⁹⁾、小角近似モデル (small angle approximation)¹⁶⁾である。凹凸の形状 (アスペクト比) と密度により、それぞれのモデルの適用範囲が異なるので、どのモデルを用いるべきかは、表面粗さの状態に依存する。

最後に表面粗さの影響を小さくする方法であるが、最も単純な方法はダクトの内径を大きく (アンジュレータギャップを広く) することである。表面粗さによるウェーク場は、内径の 1 次～2 次に反比例して弱くなっていく (モデルによってスケール則が多少異なる)。しかしながら、アンジュレータギャップを広げるのは FEL 発振にとって不利であり、この方法は得策ではない。ちなみに、LCLS ではギャップを 6 mm (ダクト内径を 5 mm) に選んでいる。

表面粗さの影響を抑えるもうひとつの方法は、バンチの

電荷量を減らすことである。ただし、FELのゲインを減らさないように、相空間の電子密度を保ったまま電荷量を減らさなければならない。つまり、電荷を1/4にするには、エミッタンスを1/2にしなければならない。LCLSでは、表面粗さの影響が大きい場合に備えて、基本パラメータ(1 nC/1 mm-mrad)以外に、low-charge オプションとして0.2 nC/0.6 mm-mradのパラメータも検討している。

最近、TTFで表面粗さの影響を調べる実験が行なわれた。この実験では人為的に表面に深さの異なる傷をつけた数本のダクトを用意し、ダクトを通過した後の電子バンチのエネルギースペクトルを測定した。実験結果は、誘電体層モデルを使った計算結果と一致している²⁰⁾。

表面粗さの効果に最終的な結論を出すには、もうすこし詳細な実験を繰り返さなければならないだろう。しばらくは、low-charge オプションの選択肢を残したままXFELの設計を進める必要がありそうだ。

2.2 XFELの展望

XFELの研究開発は、この数年のあいだにめざましい進展をとげた。とりわけ、フォトカソードRF電子銃の最近の成果は素晴らしいと言える。XFEL実現のために解決すべき課題は、かなり集約されつつある。本稿で取り上げた「バンチ圧縮器」と「表面粗さ効果」がその双壁と言えるが、これらの問題も着実に理解と対策が進んでいる。4年間が年限のLCLS R & Dが終わる2002年度までには、まとまった結論が出ることを期待してよいだろう。

3. ERL

3.1 ERLの原理と構成

高周波空洞を用いた電子のRF加速では、電子をRFの加速位相に乗せることで、空洞に蓄えられたRFエネルギーの一部が電子のエネルギーに連続的に変換され、電子の加速が行なわれる。もし、加速された電子を高周波空洞に再入射するとどうなるであろうか。再入射する電子が減速位相に乗るようなタイミングを選んでやると、電子は連続的に減速され、電子の持っていたエネルギーは空洞に再び蓄えられる。これがエネルギー回収の原理である。エネルギー回収は、超伝導リニアックと組み合わせることで、さらに効率的なシステムとなる。超伝導空洞では空洞自身の熱損失が無視できる程度に小さく、RF入力のほぼ100%が電子ビームパワーに変換される。したがって、超伝導リニアックとエネルギー回収を組み合わせれば、空洞に電界を保持するのに必要なわずかのRF入力だけで、高エネルギー、大電流の電子ビームを連続的に生成することが可能になる。

X線領域の放射光源に必要なパラメータとして、エネルギー6 GeV、平均電流100 mAの電子ビーム(ビームパワー600 MW)を考える。蓄積リングでこの電子ビームを維持するには、每周毎に放射で失われるエネルギーを補っ

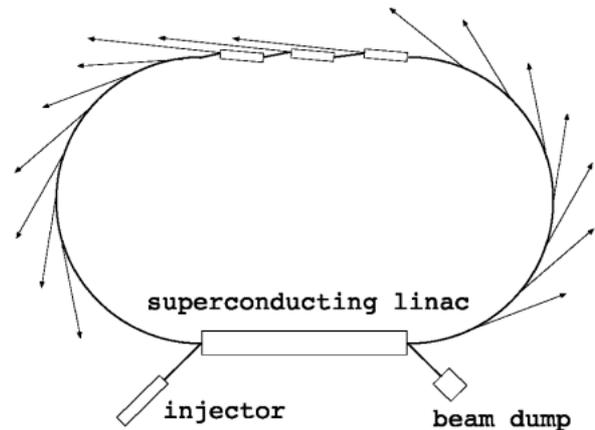


Figure 3. Energy-recovery linac light source. An electron bunch from the injector is accelerated by superconducting linac and transported through the ring and then re-injected to the linac for deceleration. The electron bunch is finally dumped at the same energy as the injection.

てやればよいので、数 MW の RF パワーで運転できる。この電子ビームをリニアックで生成するには、超伝導リニアックを使ったとしても600 MW の RF パワーが最低限必要であり、実用的な装置とはなり得ない。ところが、ERL を用いれば、蓄積リングと同程度、あるいは、それ以下のわずかの RF パワーでこの電子ビームを連続的に生成することが可能になる。Figure 3 は ERL 放射光源の構成を示したものである。

ERL という語は、もともとは、エネルギー回収型リニアックを指すものであるが、「ERL を使った放射光源」を指して用いられる場合も多いので、本稿では後者の意味も含めて ERL という語を用いる。

3.2 ERLの特徴

蓄積リングと ERL の放射光源としての特徴(光源のサイズ、時間構造、輝度など)は、それぞれの加速方式における電子の運動と密接に関係している。

蓄積リングでは、入射器から入射した電子が周回を繰り返しながら放射減衰を経て平衡状態へ到達する。平衡状態における電子ビームの横方向エミッタンスと時間分布は、入射電子の素性には依存せず、リングの設計のみで決まる。第3世代放射光源の代表的なパラメータでは、 $\epsilon_x > 1$ nm、バンチ長 > 10 ps である。

一方、ERL では電子は周回軌道を1度回るだけなので、放射減衰は起こらない。したがって、電子ビームの横方向エミッタンス、時間分布は入射器とリニアックの特性で決まる。入射器の規格化エミッタンスを $1 \mu\text{m}$ (= 1 mm-mrad)、加速エネルギーを 6 GeV ($\gamma = 12000$) とすると、加速後のエミッタンスは $1 \mu\text{m}/12000 = 0.08$ nm となる。さらに、1 ps 以下の短い電子バンチも加速できるので、蓄積リング放射光では不可能なフェムト秒の放射光

が発生できる。

また、光源の特性が入射器で決まるという ERL の特徴は、放射光源のアップグレードを容易にする。すなわち、より性能の良い入射器が開発できた時点で入射器のみを交換すれば、放射光源のエミッタンスを小さくしたり、平均電流を増大したり、時間幅を短くすることができる。蓄積リング型放射光源のアップグレードが、リングの大幅な改造を必要とするのとは対照的である。

ERL で得られる放射光の特徴は、回折限界に近い電子バンチがもたらす、高いブリリアンスと大きなボーズ縮重度である。Cornell 大学と TJNAF (Thomas Jefferson National Accelerator Facility) が共同で提案している ERL 放射光源では、 $\epsilon = 0.015$ nm, 5.3 GeV, 10 mA の電子バンチパラメータで 25 m のアンジュレータを用いた場合、10 keV における平均ブリリアンス 5×10^{22} 、ボーズ縮重度 (peak photon degeneracy) 200 が得られるとしている。これらの値は、SPring-8 25 m アンジュレータの、それぞれ 20 倍、800 倍の値である²¹⁾。ピーク・ブリリアンスでは、XFEL にはかなわないものの、同じく Cornell/TJNAF のパラメータで 10 keV において 1×10^{26} と第 3 世代放射光より 3 桁以上高い値が得られる計算である。計画中の ERL のスペクトル域にわたる放射光の諸特性については、文献²¹⁾, ²²⁾中の図を参照されたい。

ERL は、光源の縦横サイズが同程度である点もこれまでの放射光と大きく異なる特徴である。蓄積リングでは、電子バンチの縦横のエミッタンス比が 100 程度 (横が大きい) なので、発生する放射光も横に広がったものになる。ERL では、電子バンチのエミッタンスは放射減衰ではなく入射器で決まるので、縦と横のエミッタンスを同程度に保つことが可能で、放射光は真円に近い分布を持つ。このような放射光は、ゾーンプレートとのマッチングがよく、微小領域への集光が効率良く行なえる。利用側の要請によっては、光源サイズの縦横比を変化させることも可能である。その場合は、フォトカソード電子銃のドライブ・レーザーの横方向分布を制御し、縦横非対称のエミッタンスを実現すればよい。

もう一点、ERL は連続入射の周回リングであるからビーム寿命という概念は存在せず、最大のパフォーマンスを定常的に維持できるのも大きな魅力である。

3.3 ERL 開発の現状

リニアックにおけるエネルギー回収のアイデアは 1965 年まで遡ることができる²³⁾。1980 年代には実証実験も試みられたが不安定性を克服することができず実用には至らなかった²⁴⁾。その後、超伝導空洞の技術が進歩し、また、不安定現象への理解が深まったために、ERL は一気に実用化へと向かった。TJNAF は、ERL を使った高出力自由電子レーザー (IR-demo) の開発を行ない、1999 年にエネルギー回収を実証し、1.7 kW 出力 FEL を完成し

た²⁵⁾。日本原子力研究所でも高出力自由電子レーザー研究の一環として ERL の建設が進んでいる²⁶⁾。

ERL を用いて蓄積リングに代わる放射光装置を実現しようというアイデアは、1998 年に提案された MARS が最初である²⁷⁾。1999 年の TJNAF におけるエネルギー回収の成功を受けて、2000 年になると Cornell 大学と TJNAF の共同チーム、Brookhaven 研究所 (BNL) が、それぞれほぼ同時期に ERL 放射光源を目指したプロジェクトを立ち上げた。Cornell/TJNAF では、2000 年 8 月に装置設計のワークショップを、2000 年 12 月に利用研究のワークショップを開催している。BNL は NSLS (National Synchrotron Light Source) のアップグレード計画として ERL 放射光源の PERL (Photoinjected Energy Recovery Linac) を提案している。2001 年 1 月には PERL 用入射器のワークショップを開催している。すでに、設計研究の予算が所内で手当され、本格的な研究がスタートしている。両プロジェクトとも、2001 年 6 月に開催された会議 (Particle Accelerator Conference) でいくつかの論文が発表されい

他、WEB 上でも関連文書を公開している^{28,29)}。ERL 放射光源の研究は、まだ始まったばかりであるが、すでに様々な問題点、開発課題が明らかになっている。以下に、ERL 放射光源を構成する要素ごとにこれらの点を整理する。

電子銃/入射器

すでに述べたように、ERL の光源特性は入射器 (電子銃) に大きく依存する。ERL が第 3 世代放射光源よりも魅力的な光源となるには、加速後の電子ビームエミッタンスを回折限界に近づける、あるいはそれ以下としなければならない。そのためには、電子銃の規格化エミッタンスとして $1 \sim 2$ mm-mrad 以下の値が要求される。このエミッタンスは、FEL 用に研究開発が進められているフォトカソード電子銃で既の実現されているレベルである。また、バンチ当たりの電荷量は、100 mA/1.3 GHz とすると 77 pC となり、XFEL (1 nC 程度) に比べると小さくても低エミッタンスの実現を容易にするだろう。

しかし、電子銃・入射器には、安定性のさらなる向上と CW 運転による大電流化への対応が大きな課題として残されている。ERL 放射光源を利用に耐える装置とするには、光源位置の安定度が極めて重要であるが、放射減衰による緩和作用がない ERL では、入射器の安定性がそのまま光源の安定性に反映される。XFEL 用のフォトカソード電子銃でも、ドライブ・レーザーの揺らぎ (タイミングジッター、パワージッター) が問題となっているが、ERL ではさらに一段高い安定度が要求されるであろう。レーザーの安定化が大きな課題である。

10~100 mA の平均電流を安定に得るためのカソードには、Cs₂Te, CsKTe, Cs₃Sb, K₂CsSb, GaAs, LaB₆ などが候補として上がっているが、どれも一長一短で決定的な材料とはなっていない。ドライブ・レーザーとともに、今後も

開発努力が必要であろう。

BNL-PERLはフォトカソード RF 電子銃を、Cornell/TJNAFはフォトカソード DC 電子銃を候補にしている。RF 電子銃では CW 運転時の熱除去が問題になる。これまでに実現されているフォトカソード RF 電子銃では、ボーイングが開発した平均電流32 mA、デューティー25%のものが最大である。これは466 MHzの常伝導空洞を使った RF 電子銃である。熱設計を改善すれば、CW (100%デューティー)の実現も不可能ではない。

フォトカソード DC 電子銃は、TJNAFのIR-demoで実績があり、パンチあたり電荷60 pCで規格化エミッタンス1.6 mm-mrad、平均電流5 mAのCW運転がすでに実現されている。カソードはGaAsを用いている。

ERL入射器の開発では大電流化が大きな課題である。しかしながら、平均電流が10 mA程度でもエミッタンス次第では第3世代放射光源を上回る平均ブリリアンスとピーク・ブリリアンスが得られる。まずは、10 mAクラスの入射器を開発し、その後、逐次的に入射器のアップグレードを図る戦略も有効であろう。

超伝導リニアック

超伝導リニアックでは、超伝導空洞の開発とともに、平均電流の上限を決める不安定性の理解と克服も必要である。

ERLでは、3~7 GeVの電子エネルギーが必要であるが、これを実用的な空間サイズで実現するには、高加速勾配を持った超伝導空洞が必要となる。これまでに開発された電子リニアック用の超伝導空洞では、TJNAFの1.5 GHz/7 cell空洞で15 MV/m、DESY (TESLA)の1.3 GHz/9 cell空洞で25 MV/mの加速勾配が実現されているが、Cornell, BNLともに、より高い加速勾配の得られるTESLA空洞³⁰⁾を前提に設計を進めている。

理想的なERLでは加速ビームと減速ビームのエネルギー収支が完全に相殺され、外部からのRF供給が不要となるはずだが、実際の運転では、空洞内の電場を維持するために、わずかのパワーであるがRFの供給が外部から必要となる(エネルギー収支の上では空洞からの反射パワーと供給パワーが釣り合う)。ERLにおけるRF供給パワーの最小必要値(P_g)は、マイクロフォニクスによる空洞のデチューニングの大きさ(空洞の微小な振動変形による共振周波数の揺らぎ)で決まる。

$$P_g \approx \frac{V_c^2 \delta f_m}{(R/Q) f_0}$$

V_c は加速勾配、 δf_m はマイクロフォニクスによるデチューニングの大きさ、 (R/Q) は空洞の形状で決まるパラメータ、 f_0 は共振周波数である。例として、TESLA空洞の値を代入すると、 $V_c=20$ MV/m、 $\delta f_m=10$ Hz、 $(R/Q)=998 \Omega/m$ 、 $f_0=1.3$ GHzから $P_g \approx 3$ kW/mが得られる。3 GeVのビームを加速するのに必要なRFパワーはトータ

ルで450 kWとなる。これは加速電流の大きさに依存しないが、これに加えて制御マージンが必要である。

ERLでは、加速できる平均電流の上限がRF容量に依存しないことは既に述べた通りである。ERLにおける平均電流の上限は、マルチバンチ・マルチパスBBU不安性(Beam Break Up)によって決定される。ERLにおけるBBU不安定性には横方向と縦方向(時間方向)があるが、問題になるのは横方向(transverse)のBBUである。加速(または減速)中の電子バンチになんらかの擾乱が加わり電子の軌道が中心から外れると、超伝導空洞にHOM(higher order mode)が励起される。HOMは加速に寄与する電磁場(基本モード)とは異なる共振モードであり、電界に横方向の成分をもつ。このHOMにより横方向にキックを受けた加速電子バンチが周回後に、さらにHOMを増幅する位置(中心からずれた軌道)に戻って来ると、HOMが指数的に増幅されビームの加速が行なえなくなる。これがERLにおけるBBUである。

この種のBBUを抑制するためには、リニアックにおいて横方向に強い外部収束力を与え、ベータatron振幅を小さくしてやればよい。通常の高エネルギーリニアックでは、加速管を適当な長さのセクションに分割し、各セクションの間に四極磁石を設置し、FODOラティスを構成して横方向の収束を得ている。

ERLでは、加速・減速ビームがリニアック中の各位置で異なるエネルギーを持つために、両者を同様に収束するようなFODOラティスを構成することは原理的に不可能である。D. Douglasは、リニアック中の各位置でエネルギーが低い方のビームに合わせて四重極磁石のパラメータを決める方法(graded-gradient focusing)を提案し、横方向の収束が得られることを示した³¹⁾。また、I. Bazarovは、より洗練されたアルゴリズムを提案し、HOM randomization(隣接する空洞のHOM周波数を少しずつずらす手法)と組み合わせ、Cornell/TJNAF-ERLの構成で200 mAまでの加速が可能であることを示した³²⁾。

ERLにおけるBBU不安定性の閾値電流は、現在のところ、数値シミュレーションによってのみ予測可能である。TJNAFではBBU計算コードの開発を行なうとともに、ERL(IR-demo)を使った実験を行ない、計算コードの検証を進めている³³⁾。

超伝導リニアックにおける課題の最後は冷凍機である。L-band(1.3 GHz~1.5 GHz)の超伝導空洞を運転するには2 Kの冷凍機が必要である。要求される冷凍機能力は、

$$P_c = \frac{V_c^2}{(R/Q) Q_0}$$

で与えられる。HOMパワーは基本モードに比べて十分小さいので、冷凍機能力は基本モードで決まると考えてよい。TESLA空洞($Q_0=1.5 \times 10^{10}$)を20 MV/mで運転する場

合 $P_c = 25 \text{ W/m}$ となるので、3 GeV リニアックで 4 kW、6 GeV リニアックで 8 kW の 2 K 冷凍機が必要となる。TJANF の CEBAF (Continuous Electron Beam Accelerator Facility) では 5 kW の冷凍機が定常的に運転されており、このクラスの冷凍機は十分に実績がある。

周回リング

ERL の周回リングは、リニアックと対向側に長直線部を持つレストラック型のリングが基本となる。長直線部は saw tooth の構成にして複数の挿入光源を設置することも可能である。アーク部では、アクロマティック・セルで区切られた短直線部に挿入光源が設置できる。BNL-PERL (3 GeV) の設計では、長直線部が 50 m、短直線部 (6 m) が 23 箇所となっている³⁴⁾。

ERL の特徴であるフェムト秒の電子バンチを使った放射光を実現するには二つの方法が考えられる。あらかじめ入射器で短い電子バンチを生成し、リニアックで加速し周回リングに導く方法と、加速後にアークでバンチ圧縮を行なう方法である。これまでの研究から二つの点で後者の方法が有利と考えられている。つまり、加速するバンチが短くなるほど、リニアック中のウェーク場の影響が大きくなり、エミッタンス劣化やエネルギー広がりが大きくなる点、さらに、アーク部で生じるコヒーレント・シンクロトロン放射 (CSR) によるエミッタンス劣化も短いバンチほど顕著になる点である。BNL-PERL では 400 fs のバンチをリニアックで加速した後、前半のアークで 100 fs まで圧縮し長直線部に導き、後半のアークで再び 400 fs までバンチを伸長しリニアックに再入射する構成を検討している。アーク部における CSR によるエミッタンス劣化を低減する手法としては、アクロマティック・セル毎に水平方向のベータatron位相を $(2n+1)\pi$ 進ませる方法が提案されている^{35,36)}。いずれにしても、詳細な検討には真空ダクトによるシールド効果を考慮した CSR 計算を取り込んだビームダイナミクスの解析が必要であり、今後の大きな課題である。

ERL と蓄積リングには電子バンチの入射方法にも違いがある。蓄積リングでは平衡軌道の外側から電子バンチを入射し放射減衰作用で電子バンチを平衡軌道に収束させるのに対して、ERL では平衡軌道 (中心軌道) に直接入射する。したがって、ERL では周回リングの横方向アクセプタンスを大きくとる必要がないので、周回リングを構成する真空ダクトの内径を小さくし、磁石もコンパクトにできる可能性がある。ダクト内径は resistive wall の効果等を考慮して決めなければならないが、詳細な検討はまだなされていない。

FEL との組み合わせ

ERL 放射光源に FEL を組み合わせることも可能である。70 pC/100 fs の電子バンチではピーク電流が 1 kA 近くなるので、長直線部を利用して軟 X 線領域の SASE-FEL が可能になる。ただし、エネルギー 3 GeV、平均電流 100

mA の電子ビームを使った FEL が飽和強度に達すると発生 X 線の平均出力は数十 kW にもなるので取り扱いが容易でない。また、FEL によって電子バンチのエネルギー広がりが大きくなるのは ERL の運転を難しくする。したがって、やや短めのアンジュレータを用いて、飽和強度以下のレベルで FEL を動作させるのが現実的な解であろう。

また、周回リングとは独立に FEL を設置することも考えられ、この場合は、SASE, HGHG (high-gain harmonic generation) とともに可能である。リニアックは共有し、リニアック直後でリングと FEL の電子軌道を分離するのである。この組み合わせでは、リングと FEL を同時に動かすこともできる。ただし FEL 側の電子ビームはエネルギー回収されないので、平均電流を大きくすることはできない。

3.4 ERL の展望

ERL を使えば、回折限界に近いエミッタンスを持つサブピコ秒の電子バンチによる放射光源を実現できる。これは、従来の蓄積リング型放射光源の限界を打ち破るものであり、極めて有用な放射光施設となり得る。ERL 放射光源の研究はまだ始まったばかりであり、成否を問うにはもう少しばかり動向を見守る必要がある。成功の鍵を握る技術としては、電子銃の安定化、超伝導リニアックにおける HOM 不安定性の克服を挙げておきたい。

4. 最後に

新世代放射光源として XFEL と ERL を取り上げ、研究開発の現状を紹介し、問題点の整理を行なった。本来であれば、新しい光源は利用研究の新しい展開と切り離して議論することができないのであるが、筆者の力不足から利用研究に言及することができなかった。本稿をきっかけにして、放射光ユーザーの間に新世代光源に対する議論が盛り上げられれば幸いである。

また、国内の XFEL プロジェクトとして理研グループが研究を開始している。先行する LCLS, TESLA-FEL の模倣ではなく、独自のアイデアを入れたユニークな装置であるが、まとまった資料が手元になかったため今回の原稿に含めることができなかった。ぜひ、本誌上で紹介の機会が得られることを期待する。

なお、本稿をまとめるにあたっては、たくさんの方々との議論を通じて得た貴重な情報が大いに役立った。とりわけ L. Merminga, I. Ben-Zvi 両氏には ERL に関して多くのコメントをいただいたことを記しておく。

参考文献

- 1) D. Bilderback et al.: Synchrotron Radiation News, **vol. 14, No. 3**, 12 (2001).
- 2) 木原:放射光 第9巻3号, 220 (1996).
- 3) 磯山, 加藤:放射光 第14巻3号, 163 (2001).
- 4) <http://www-ssrl.slac.stanford.edu/lcls/>

- 5) S. V. Milton et al.: *Science* **292**, 2037 (2001).
- 6) A. Murokh et al.: "Measuring VISA-FEL radiation and electron beam properties inside the undulator", in Proc. the 23rd FEL Conf. (2001).
- 7) B. H. Wiik: *Nucl. Instr. Meth. A* **398**, 1 (1997); <http://tesla.desy.de/>
- 8) J. Andruszkow et al.: *Phys. Rev. Lett.* **85**, 3825 (2000).
- 9) F. Sakai et al.: "High brightness electron source with a photocathode RF gun", in Proc. 2001 Asian Particle Accelerator Conference (2001).
- 10) V. Yakimenko et al.: "Submicron emittance and ultra small beam size measurements at ATF", in Proc. the 23rd FEL Conference (2001).
- 11) Ph. Piot et al.: "Emittance Measurements at the TTF Photoinjector", in Proc. 2001 Particle Accelerator Conference (2001).
- 12) Ya. S. Derbenev et al.: DESY Report No. TESLA-FEL-95-05 (1995).
- 13) R. Li: in Proc. 1999 Particle Accelerator Conference, pp. 118-122 (1999); M. Borland, *Phys. Rev. ST-AB* **4**, 070701 (2001); H. H. Braun et al.: "Recent experiments on the effect of coherent synchrotron radiation on the electron beam of CTF II", in Proc. 2001 Particle Accelerator Conference (2001).
- 14) M. Borland et al.: "Start-to-End Simulation of SASE FELs from the Gun through the Undulator", in Proc. the 23rd FEL Conf. (2001).
- 15) LCLS Design Study Report, SLAC-R-521 (1998).
- 16) G. Stupakov et al.: *Phys. Rev. ST-AB* **2**, 060701 (1999).
- 17) 羽島, 上坂, 松下: *放射光* 第13卷第5号, 412 (2000).
- 18) K. L. F. Bane and A. Novokhatskii: SLAC-AP-117 (1999).
- 19) K. L. F. Bane, C. K. Ng and A. W. Chao: SLAC-PUB-7514 (1997).
- 20) M. Hüning and P. Schmüser: "Wake Fields Excited by a Rough Surface", in Proc. the 23rd FEL Conference (2001).
- 21) Q. Shen, CHSS Technical Memo 01-002 (2001). available from the web page: <http://erl.chess.cornell.edu/>
- 22) I. Ben-Zvi et al.: "Photoinjected energy recovery linac upgrade for the National Synchrotron Light Source", in Proc. 2001 Particle Accelerator Conference (2001).
- 23) M. Tigner: *Nuovo Cimento*, **37**, 1228 (1965).
- 24) T. I. Smith et al.: *Nucl. Instr. Meth. A* **259**, 1 (1987); D. W. Feldman et al.: *Nucl. Instr. Meth. A* **259**, 26 (1987).
- 25) G. R. Neil et al.: *Phys. Rev. Lett.* **84**, 662 (2000).
- 26) R. Hajima et al.: *Nucl. Instr. and Meth. A* **445**, 384 (2000); R. Hajima et al.: in Proc. EPAC-2000, pp. 1033-1035; T. Shizuma et al.: in Proc. EPAC-2000, pp. 1074-1076.
- 27) D. A. Kayran et al.: "MARS-A project of the diffraction limited fourth generation X-ray source", in Proc. 1998 Asian Particle Accelerator Conference (1998).
- 28) <http://erl.chess.cornell.edu/>
- 29) <http://nslsweb.nsls.bnl.gov/nsls/org/PERL/>
- 30) B. Aune et al.: *Phys. Rev. ST-AB* **3**, 092001 (2000).
- 31) D. Douglas: JLAB-TN-00-027 (2000).
- 32) I. V. Bazarov et al.: "Linac Optics for Energy Recovery Linac", in Proc. 2001 Particle Accelerator Conference (2001).
- 33) L. Merminga et al.: "High Average Current Effects in Energy Recovery Linacs", *ibid.*
- 34) V. Yakimenko et al.: "Optics for a photoinjected energy recovery linac at the NSLS", *ibid.*
- 35) D. Douglas: JLAB-TN-98-012 (1998).
- 36) J. H. Wu et al.: "Coherent synchrotron radiation analysis for the photoinjected energy recovery linac and UVFEL projects at the NSLS", in Proc. 2001 Particle Accelerator Conference (2001).