

# エネルギー回収型リニアック (ERL) の現状

諏訪田 剛<sup>1</sup>

加速器研究施設、高エネルギー加速器研究機構

〒611-0011 茨城県つくば市大穂 1-1

## 概要

現在、大部分の放射光施設は、電子蓄積リング (以下、リング) を基盤加速器として利用している。この場合、放射光の性質は、リング (挿入光源を含む) を周回する電子ビームの性質により決まってしまう。すなわち、ビームエネルギー及びリングの持つラティス構造により決まる放射減衰及び励起の競合の後、電子ビームのエミッタンスとバンチ長は平衡状態に落ち着く。一方、線形加速器 (以下、リニアック) を基盤とする放射光源の場合は、平衡状態という概念に縛られることなく、原理的には、究極の (回折限界) エミッタンス、極短バンチ長を実現できると考えられている。本報告は、次世代放射光源として注目されているエネルギー回収型リニアックの放射光源としての可能性を議論すると共に、幾つかの施設における開発の現状を紹介する。

## 1. はじめに

現在、世界の放射光施設は、運転/建設/計画中のものを含めると約70施設に上る。一方、研究対象は、物理、工学分野のみならず、生物、医学等、極めて広範に研究分野が広がっている。1947年 General Electric 社の 70MeV 電子シンクロトロンからの放射光が世界で初めて観測された。1960年代に入り高エネルギー電子シンクロトロンの開発が始まると同時期に、いわゆる“放射光科学”が誕生したと言われている。その後、KEK-PF に代表されるように、第2世代の放射光源を経て、現在、ESRF/APS/SPring-8 による第3世代の大型の専用リングが活躍中であることは周知のことである。KEK-PF も20年の稼働を迎え、次世代放射光源の建設に向けて議論が始まっている。次世代放射光源としては、フラックス、輝度、コヒーレンス、時間構造、パルス長、サイズ等のパラメータにおいて現世代を効率良く越えるものでなければならない。これを実現する方法として、現在、リニアックを基盤加速器とする計画が精力的に検討されている。その1つは、自発放射光を飽和レベルまで一気に増幅する自由電子レーザー (SASE-XFEL) で、SLAC の LCLS、DESY の TESLA/TTF が現在進行中である。もう1つの方法は、電子ビームのエネルギーを回収する機能を持つエネルギー回収型リニアック (Energy Recovery Linac, ERL) である。前者は、硬 X 線領域においてピーク輝度が後者に比べ桁違いの高輝度光を提供す

ることができ、究極の次世代 (第4世代) 光源といわれている。しかしながら、SASE-XFEL は、光の輝度が余りにも高すぎるため、光学系の放射線損傷、試料自身の損傷といった問題が深刻になり、この光を利用する研究手段及び対象そのものが問われている。一方、ERL は、平均輝度においては、SASE-XFEL に比べ同程度の輝度を持ち、また第3世代光源に比べると2桁 (ピーク輝度では2-3桁) 程度上回ると考えられている。このレベルの輝度では、第3世代の実験手法を引き継ぐことができ、いわゆる3.5世代 (SASE-XFEL を第4世代とするとその中間的な世代に位置する) としての性格をもつと言われている。以下では、後者の ERL を取り上げ、その原理を簡単に説明し、利点及び欠点を上げた後、開発に向けた道筋をまとめることにする。最後に各国で計画中の幾つかの ERL を紹介することにする。

## 2. ERL とは

蓄積リングを利用する光源の利点は、電子ビームを多数回周回させることにより、放射光への変換効率を高めていることにある。一方、リニアックによれば電子ビームは、所定のエネルギーにまで加速すれば再利用されることなく捨て去られる。図1に示すように、リニアックから出射した加速電子ビームを1度のみ周回させ、再びリニアック入口に帰還させ、今度は、電子ビームを逆位相に乗せて減速させた後ダンプに捨てるスキームを考える。

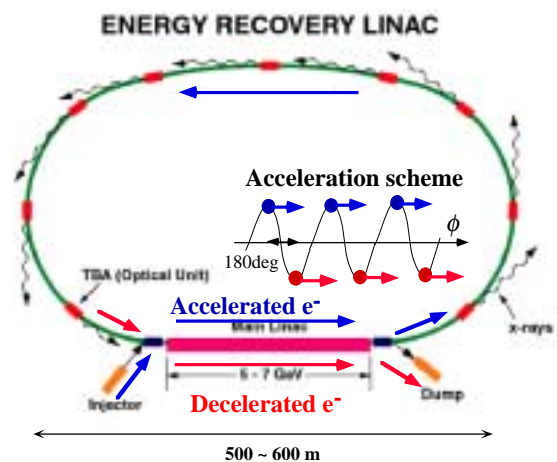


図1：エネルギー回収型リニアックの動作原理図 (この図は同時に Cornell/ERL 計画[1]でもある)

<sup>1</sup> E-mail: tsuyoshi.suwada@kek.jp

このスキームによれば、電子銃から連続して電子ビームを供給すれば、周回部には、あたかも電子が蓄積されている状態となり、多数の挿入光源を設置し光を取出せば、蓄積リングと同等の実験が可能となる。一方、リニアックには、加速と減速する電子ビームが交互に存在することになり、空洞内では、加速電子による RF パワーの消費、減速電子による RF パワーの回収が連続的に行われ、原理的には、自動的にエネルギー収支の均衡が取られることになる。この機能をエネルギー回収という。このスキームは、電子のエネルギーを回収することにより高効率性を保持すると言える。ERL のアイデア自体は、1965 年コーネル大学の M.Tigner が、リニアークライダーへの応用として提案したことに始まる[2]。現在では、このスキームは、JLAB の ERL-based IR FEL 用のドライバー加速器 (45MeV/5mA) [3]として応用され、99.98%以上のエネルギー回収率を達成している。高い回収率を実現するには、必然的に高周波損失の極めて小さい超伝導空洞を必要とする。このように、ERL の実現には超伝導リニアックが基盤加速器となる。このように、ERL によると、電子ビーム自身は 1 回程度の周回により捨て去られるが、これを連続的に入射することにより蓄積リングと同程度の平均電流を稼ぐことができ、かつ、エネルギー消費の少ない経済的な加速器となる。最大の利点は、高輝度電子銃により低エミッタンス及び極短バンチの電子ビームからの放射光を利用できることにある。以下に、ERL の有する利点を列挙し得られる放射光の特徴をまとめる。

- (1) 低エミッタンス電子銃により高輝度／高コヒーレンス光源が (原理的に) 可能となる。
- (2) バンチ操作が容易なので、バンチ長を短く (又は長く)、ビーム形状を丸く (又は扁平に) できる。
- (3) パルス構造を最大 CW まで比較的自由に変更できる。
- (4) 電流値の時間減衰が無いので常に一定の放射光が得られる。
- (5) エネルギー回収により運転コストを最大限に押さえることができる。
- (6) CW 加速器の比較において超伝導加速器は、常伝導加速器に比べエネルギー勾配が高いので、コンパクトな光源 (~1/5) にすることができる。

当然のことながら、同時に幾つかの困難が存在するが、ERL の開発項目として次節で議論する。

### 3. ERL の開発

#### 3.1 開発項目

ERL の最大の困難は、数 GeV クラスの超伝導 CW-ERL が今のところ世の中に存在しないことである。唯一、Jlab 等による数 10MeV クラスの FEL 用 ドライバー加速器としてエネルギー回収原理の実証が

なされているに過ぎない。GeV クラスの ERL を実現しようとするとその課題の多くは挑戦的である。以下に幾つかの課題をまとめるが、項目としては、ERL のスキームに関わらず共通に開発を要する課題である。

- (1) 低エミッタンス電子銃の開発  
長寿命、低エミッタンス (<1 $\mu$ m) 電子銃が必要である。空間電荷の抑制、加速方式 (RF or DC, DC の場合は高電圧化が必要)、カソード材料 (半導体 or 金属)、高出力レーザー、レーザーオペティクス及びスポット形状の最適化が問題となる。
- (2) 大電流入射部の開発  
DC 電子銃の場合は、入射部で電子ビームをバンチ化する必要がある。空間電荷によるエミッタンス増大の抑制、大電力入力カップラー耐圧が問題となる。
- (3) 超伝導空洞の開発  
超伝導空洞は、どの計画においても TESLA の空洞を参考にしているが、この空洞は、リニアークライダー用に開発されたものである。CW 運転に伴う放電、安定性の問題は試験が必要である。極短バンチによる効率的な HOM 吸収／減衰の方法が確立していない。加速電圧の高電界化に伴う冷凍機システムの最適化。
- (4) 主線形加速器におけるビーム不安定性  
縦／横方向のウエーク場によるビーム不安定性の抑制スキームを確立する必要がある。周回電流の上限値をほぼ決めてしまう。
- (5) アーク部の設計  
エミッタンス劣化の抑制方法。バンチ圧縮の方法、CSR によるエミッタンス劣化の抑制などが課題である。
- (6) ビームロス  
ビームハロー形成に伴うビームロスのメカニズムの解明が必要。放射線防御の観点から、 $10^{-5}$  程度には押さえる必要がある。

#### 3.2 試験加速器の提案

加速器研究施設では、これらの開発項目を実証するための試験加速器の建設を提案している。表 1 に現在提案されている試験加速器の主なビームパラメータとその模式図 (図 2) を示す。

表 1 KEK-ERL 試験加速器のビームパラメータ

|                                    |                    |
|------------------------------------|--------------------|
| Energy [MeV]                       | 100-300            |
| Current [mA]                       | 100                |
| Bunch charge [pC]                  | 77                 |
| Rep. rate [GHz]                    | Max 1.3@CW         |
| Transverse $\epsilon_n$ [ $\mu$ m] | <1                 |
| Energy spread                      | $\sim 10^{-4}$     |
| Bunch length [ps]                  | 2/0.1              |
| in Linac/after compression         |                    |
| No. of SC cavity unit              | 10 (1.3GHz 9-cell) |

主加速部は、超伝導リニアックとし、10 台の超伝導 9 セル空洞 (1.3GHz) を用いて、最大ビームエネルギーが 300MeV 程度 (空洞の加速勾配及び冷凍機能力に依存) の試験加速器を検討している。この加速器により、前述した全ての開発項目についてその試験を行い、フルスケールに向けた原理実証を行うことを目的としている。3 年程度の開発期間を想定している。特に、電子銃の開発に向けては、カーボンナノチューブをカソード材料とした電界電子放出による極小エミッタンスの実現といった新しいアイデアが提案されている。

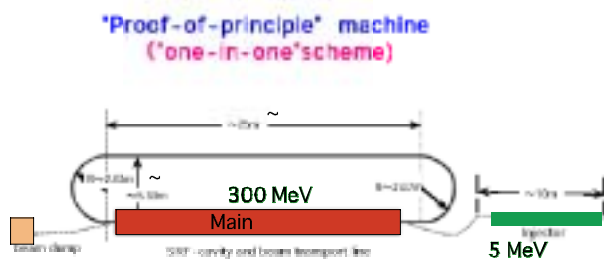


図 2 : KEK-ERL の試験加速器

#### 4. 各国の ERL 開発の現状

表 2 に、現在提案されている幾つかの ERL 計画をまとめる。以下の計画は、いずれも進行中であるが、その実現には時間を要すると思われる。

##### (1) コーネル大学の ERL 計画[4]

この計画は、図 1 に示すように 1 パスで電子ビームを周回させるスキームである。周回スキームが単純なので、高平均電流が可能になると考えられる。現在、100MeV の試験加速器の建設に着手している。

##### (2) ブロックヘブン研究所の PERL 計画[5]

この計画は (図 3)、お家芸である RF 光カソード電子銃に特徴を持ち、高電流電子ビームを高電界 RF により一気に加速して極小エミッタンスの実現を狙う。

##### (3) ローレンスバークレー研究所の ERL 計画[6]

この計画は (図 4)、他の ERL 計画と 1 線を描き ERL はあくまでオプションとして用意されている。特徴は、パルス運転を行うことによりバンチ電荷を高め、高フラックスで極短 X 線の生成 (~60fs) を狙う。ERL は、ビームパワーを増やしたときに導入するらしい。

##### (4) ブドカー研究所の MARS 計画[7]

この計画は (図 5)、クリパノフ氏を中心に、5GeV の ERL 計画が検討されている。電子ビームを超伝導リニアックに何度も帰還させる (マルチパス方式) ことにより、エネルギーの違ったアンジュレー

ター光が利用できる特徴をもつ。このスキームでは、エネルギーの違う幾つかのビームが同時にリニアックを通過することになり、平均電流を上げることが困難と考えられる。しかしながら、エミッタンスを最小化することで高輝度光の生成を狙うようである。

##### (5) ダーズベリー研究所の ERL 計画[8]

この研究所では、現在 DIAMOND 放射光施設が建設中であるが、同時に相補的な役割を担うと言われている 600MeV の 4GLS 計画 (図 6) が進行中である。XUV まで発生可能な 3 種類の FEL が主光源となり、FEL のドライバー加速器に ERL スキームを応用することを検討している。

##### (6) エルランゲン大学の ERL 計画[9]

現在 3.5GeV の蓄積リングによる放射光施設が計画されている。ERL は、第 2 期計画として組み込まれ、既設リングに ERL を接続することにより、リング側で高輝度光を発生させようとするものである (図 7 に 1 例を示した)。このスキームによると、リニアックは、リングへの入射の必要性からパルス運転となり CW 運転に比べて負担が軽減される。一方、リングはビームを N ターンさせた後 (蓄積はしない) すぐに取り出し、リニアックへ帰還させエネルギー回収を行う。この時、リングへの入射/取出用キッカーの繰り返しに高速動作 (数 100kHz) が要求される。

#### 5. まとめ

KEK の加速器研究施設では、次世代放射光源としての ERL の検討会を立ち上げ、机上ではあるが検討を始めている。現在、計算機シミュレーションにより、エミッタンス劣化なく周回可能な最大電流値の上限を決める要因を精力的に評価している。残念ながら、予算とマンパワーの点からハードウェアの開発には至っていないが、電子銃や超伝導空洞などのカギを握るコンポーネントの設計検討は進行中である。フルスケール ERL の実現には、試験加速器による原理実証を早期に行う必要があり、その建設/立ち上げの早急実現を要望している。

#### 参考文献

- [1] I.Bazarov, et al., CHESS Technical Memo 01-003; JLAB-ACT-01-04 (2001).
- [2] M.Tigner, Nuovo Cimento 37, 1228 (1965).
- [3] G.R.Neil, et al., Phys. Rev. Lett. 84 (4), 662 (2000).
- [4] S.M.Gruner, et al., Rev. Sci. Instrum. 73 (3), 1402 (2002).
- [5] I.Ben-Zvi, et al., Proc. 2001 Part. Accel. Conf., Chicago, p.350.
- [6] J.N.Corlett, et al., Proc. 2002 European Part. Accel. Conf., Paris, France, p.668.
- [7] G.N.Kulipanov, et al., J. of Synchrotron Rad. 5, 176 (1998).
- [8] M.W.Poole, et al., Proc. 2002 European Part. Accel. Conf., Paris, France, p.733.
- [9] D.E.Berkaev, et al., Proc. 2002 European Part. Accel. Conf., Paris, France, p.724.

表2 各国の ERL 計画 (提案) の比較

| Operation/<br>Undulator length                                    | Cornell<br>ERL       |                      | BNL<br>PERL            | LBL                  | BINP<br>MARS       | Daresbury<br>4GLS | Erlangen<br>Univ.    |      |
|---|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|--------------------|-------------------|----------------------|------|
|   | hi-flux/<br>25m      | hi-coh./<br>25m      | 5m                     | 2m                   | 150m               | 15m               |                      |      |
| $E$ [GeV]   | 5.3                  | 3-7                  | 2.5-3.1                | 5.4                  | 0.6                | 3.5               |                      |      |
| $I_{av}$ [mA]   | 100                  | 10                   | 200                    | 40 $\mu$ A           | 1                  | 100               | 100                  | 10   |
| $\epsilon_x / \epsilon_y$ [nm]                                    | 0.15                 | 0.015                | 0.04-0.1               | 4/0.08               | 0.003              | <1                | 0.3                  | 0.03 |
| Bunch length [ps]   | 0.3                  | 0.3                  | 0.1-0.4                | 0.05                 | <1                 | 0.05-5            | 2                    | 0.1  |
| Flux av.<br>[p/s/0.1% bw]   | $1.5 \times 10^{16}$ | $1.5 \times 10^{15}$ |                        | $\sim 10^{22}$       |                    |                   |                      |      |
| Brightness av.<br>[p/s/0.1% bw/mm <sup>2</sup> /mr <sup>2</sup> ] | $1.3 \times 10^{22}$ | $5.2 \times 10^{22}$ | $10^{21} \sim 10^{22}$ | $1.3 \times 10^{22}$ | $3 \times 10^{23}$ | $\sim 10^{19}$    | $1.3 \times 10^{22}$ |      |
| Brightness pk.<br>[p/s/0.1% bw/mm <sup>2</sup> /mr <sup>2</sup> ] | $3.0 \times 10^{25}$ | $1.2 \times 10^{26}$ |                        |                      | $3 \times 10^{26}$ | $\sim 10^{22}$    |                      |      |
| Source size [ $\mu$ m]  | 103                  | 24.5                 |                        |                      | 10                 |                   |                      |      |
| Source div. [ $\mu$ rad]  | 9.1                  | 6.2                  |                        |                      | 1                  |                   |                      |      |

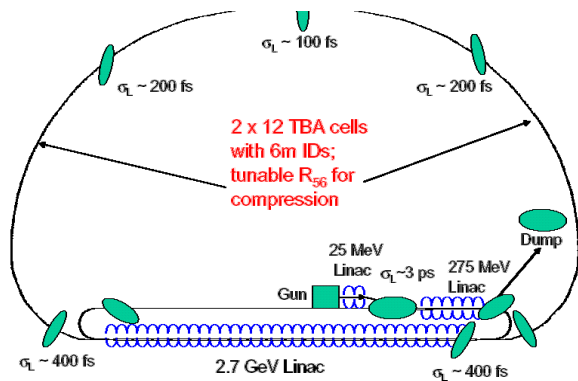


図3 : BNL/PERL 計画

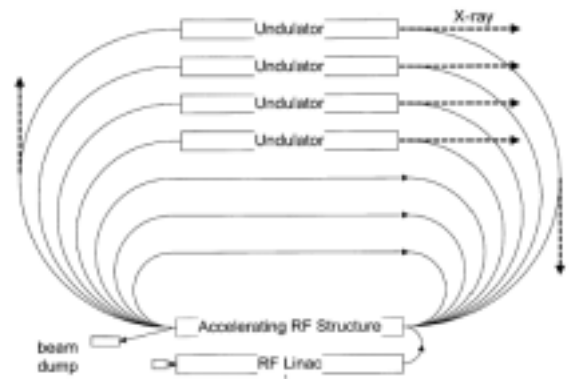


図5 : BINP/MARS 計画

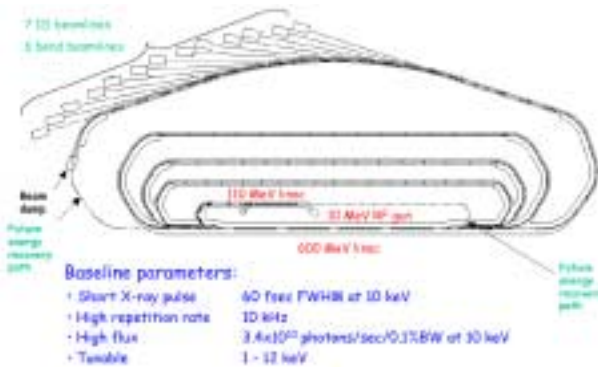


図4 : LBL/ERL 計画

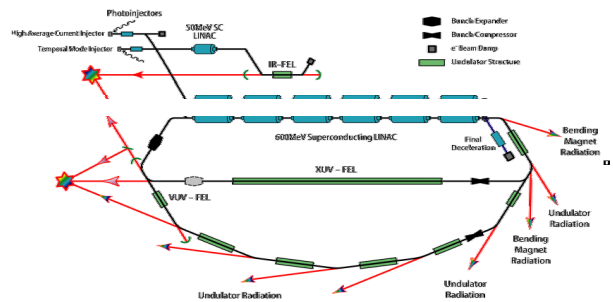


図6 : Daresbury/4GLS 計画

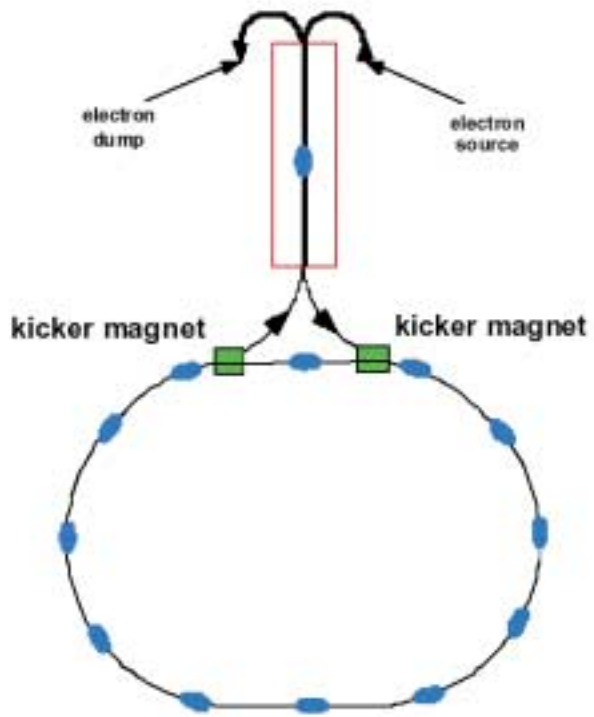


図 7 : Erlangen/ERL 計画