

# STATUS OF R&D EFFORTS TOWARD THE ERL-BASED LIGHT SOURCE

Shogo Sakanaka<sup>1,A)</sup>, Yukinori Kobayashi<sup>A)</sup>, Kotaro Satoh<sup>A)</sup>, Toshio Kasuga<sup>A)</sup>, Hiroshi Kawata<sup>A)</sup>,  
Ryoichi Hajima<sup>B)</sup>, Norio Nakamura<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801

<sup>B)</sup> Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195

<sup>C)</sup> Institute for Solid State Physics (ISSP), University of Tokyo

5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba-ken, 277-8581

## Abstract

Future synchrotron light source based on the Energy Recovery Linac (ERL) is expected to be capable of producing super-brilliant and/or ultra-short pulses of synchrotron radiation. We are conducting R&D efforts for realizing the ERL-based hard X-ray source under the collaboration between KEK, JAEA, ISSP, and other institutes. We report recent progress in our R&D efforts including the developments of an ultra-low emittance electron gun and of superconducting cavities for both the injector and the main linacs.

## ERL放射光源に向けたR&Dの現状

### 1. はじめに

エネルギー回収リニアック(ERL)を利用する新しい放射光源[1]が近年注目を集めている。ERLでは、電子銃で生成した超低エミッタンス・大電流の電子ビームを超伝導リニアックで加速し、ビームを放射光の発生に用いた後、減速してエネルギー回収を行った後にビームをダンプする。この方式は蓄積リングと異なり、ビームのエミッタンスとエネルギー幅が放射励起と放射減衰の平衡で決定されない。したがって、電子銃の性能が進歩し、エミッタンス保存手法が十分機能すれば、蓄積リングの限界に捕らわれずにビーム性能を進化させる事のできる加速器である。ERLは超高輝度光源、超短パルス光源として期待されるのみならず、共振器型X線自由電子レーザー用加速器の可能性[2]についても注目されている。

ERLに基づく放射光源は、米国コーネル大学で精力的に開発が進められており[3]、英国ダラスベリ研究所でも小型ERL試験施設(ALICE)を建設して研究開発が進められている[4]。米国アルゴンヌ国立研究所では、将来計画のオプションの一つとして検討されている[5]。我が国においては、高エネ機構、原子力機構、東大物性研が中心となり、分子研、広島大学、産総研、名古屋大学、JASRIの各機関からの研究者の参加も得て、2006年度から本格的にERL放射光源の開発研究を進めている[6-7]。

ERL放射光源を実現するための要素開発としては、第1にCW運転可能な高輝度フォトカソード電子銃、第2にCWかつ大電流の運転に対応した高電界超伝導加速空洞の開発が重要である。フォトカソード電子

銃を励起するためのCW大電力レーザーの開発も欠かせない。ERL研究開発共同チームでは、これらの要素開発を進めており、近い将来小型のERL試験加速器(コンパクトERL)を建設して、技術実証を行う計画を立案している。本稿では、R&Dの現状、コンパクトERLの設計状況、今後の計画について述べる。

### 2. ERL放射光源の概要

ビームエネルギー5 GeVクラスのERL放射光源を目標とする。主要なパラメータを表1に示す。通常型の挿入光源からの放射光輝度として $10^{21}$ - $10^{23}$  photons/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%bw (at 10 keV)を目標とする。またバンチ圧縮モードにおいて、バンチ長を100 fs (rms)程度まで圧縮し、高い繰り返し周波数(1 MHz程度)のフェムト秒パルスX線光源としても活用する。さらに今後の研究の進展によるが、ERLのビームを用いて共振器型X線FELを実現できる可能性がある[2]。ERL放射光源を活用した最先端の放射光科学の研究テーマが検討されている[8]。

表1: ERL放射光源とコンパクトERLのパラメータ

	ERL 光源	Compact ERL	
Beam energy	5	0.065-0.2	GeV
Injection energy	~ 10	5	MeV
Path length	1253	70	m
Beam current	10 - 100	10 - 100	mA
Emittance (norm.)	0.1 - 1	0.1 - 1	mm-mrad
RF frequency	1.3	1.3	GHz

<sup>1</sup> E-mail: [shogo.sakanaka@kek.jp](mailto:shogo.sakanaka@kek.jp)

### 3. フォトカソードDC電子銃の開発状況

ERL用の電子銃は、パンチ当たりの電荷7.7-77 pC、繰り返し1.3 GHz (CW)、規格化エミッタンス0.1-1 mm-mradの電子パンチを生成する必要があり、チャレンジングな要素である。これらを実現するため、負の電子親和力 (NEA) 表面を用いるフォトカソードDC電子銃を開発中である。励起レーザーの波長をフォトカソード材料 (GaAsないし類似の材料) のバンドギャップエネルギーに合わせ込むことにより、35 meV程度の熱エミッタンスを持つ電子ビームを引き出す事が出来ると期待される。現在JAEAにおいて、高電圧250 kV、最大ビーム電流50 mAの電子銃 (図1) を開発中である[9]。これまでに150 kVの高電圧を印加し、2.7 mWのHe-Neレーザーでの励起により、約1  $\mu$ Aの電子ビームの引き出しに成功した。2008年9月以降に、電子ビーム評価用のビームラインの組み立てと、本格的なビーム試験を行う予定である。より進んだ500 kV電子銃も設計中である。

フォトカソードの励起用には、波長800 nm付近で波長可変、かつ繰り返し1.3 GHz、平均電力15 Wの出力が可能なレーザーが必要であり、その開発も重要である。このため、ファイバー・レーザーをベースとしたレーザーシステムを4段階で開発する計画である。その第1段階として、繰り返し1.3 GHzのファイバーレーザー発振器を産総研と物性研とが共同で開発中で、既に周波数118 MHzでの発振に成功している[7]。

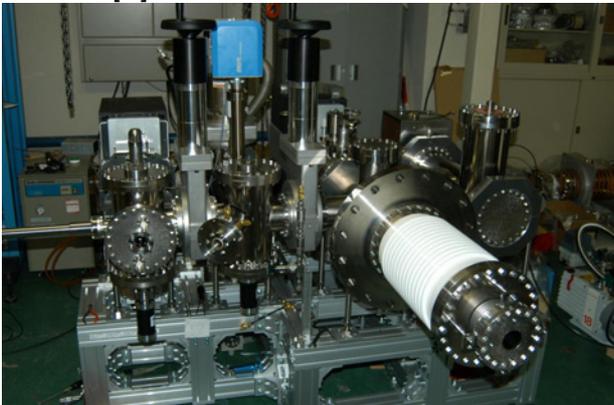


図1: 250 kVフォトカソードDC電子銃。

### 4. 超伝導加速空洞の開発状況

#### 4.1 入射器用超伝導空洞

ERL用の入射器では平均電流100 mAのビームをエネルギー回収なしで約500 keVから5-10 MeVまで加速する必要がある。低エネルギーでビームエミッタンスを保存するためには、出来るだけ少ないセル数で高電界加速を行うことが望ましい。このため、2セル超伝導空洞を3台用いる設計を採用する。ERL光源で必要な10 MeVまでビームを加速するためには、空洞当たり333 kWのRF電力を供給する必要がある。入力カップラー当たりの通過電力を減らすためと、カップラーを鏡面对称に配置するため、1台の空洞

を2個の入力カップラーでドライブする設計を採用した。入力カップラーの定格電力は、余裕を見て最大250 kWまで耐えられる物を開発する。空洞の高次モードカップラーについては、TESLA空洞用に開発されたものをCW動作に適するように改良を施した設計を行った。これらの基本設計を取り入れた2セル空洞を1台試作し、その性能試験を準備中である。詳しい情報は[10, 11]で報告される。

#### 4.2 主リニアック用超伝導空洞

主リニアックでは、エネルギー回収を行いながら100 mAのビームの加速と100 mAのビームの減速を同時に行う。CW動作において、加速勾配15-20 MV/m、無負荷Q値 $10^{10}$ 以上 (温度2 K) が必要である。また合計200 mAのビームをBeam Breakup (BBU)不安定性を起こす事無く周回させる必要があり、高次モード (HOM)の減衰が極めて重要である。

リニアック全長での平均加速勾配を上げるためには1空洞当たりのセル数は多いほど良いが、有効にHOMを減衰するためには少数セルが望ましい。数値計算による検討を重ねた上で、空洞当たりのセル数として9セルを採用することにした。空洞の両端のセルに絞りを入れた上で直径120 mmと100 mmの太いビームパイプを取り付け、monopoleおよびdipoleの高次モードを引き出し、ビームパイプ上に配置するRF吸収体で減衰させる方式を採用した。また、特に横方向インピーダンスが高い高次モードのインピーダンスを下げるため、空洞のセル形状をTESLA型空洞で採用されている形状から、赤道部をやや扁平にした形状に変更した。さらに、quadrupoleモードのBBU不安定性を起こす可能性のあるquadrupoleモードを減衰させるため、偏心フルート型ビームパイプを考案した。これは、quadrupoleモードの一部をdipoleモードに変換する機構で、変換されたdipoleモードはビームパイプ中を遠くまで伝搬し、吸収体で吸収させることができる。これらの基本設計を取り入れた空洞 (KEK-ERL model-2, 図2) の試作を進めている。

まずTESLA空洞から形状を変更した空洞中央部のセルを試験するための単セル空洞 (C-single) と、偏心フルートを含む複雑なビームパイプ構造が付属した単セル空洞 (E-single) の2台を試作し、縦測定試験を行った[12]。その結果、どちらの空洞でもERLで要求される20 MV/mの加速電界において、 $10^{10}$ 以上の無負荷Q値 (温度2 K) を達成出来た。次に9セル空洞の試作を行い、一連の表面処理工程を終えて、縦測定の準備を行っている (図3)。主リニアック用空洞の開発状況については[13]で詳しく報告される。また、主リニアック用の可変カップリング機構を備えた20 kW入力カップラーの開発も進行中である[14]。



図2: 主リニアック用9セル空洞の基本設計。



図3：試作した9セル空洞のアセンブリ作業。

## 5．コンパクトERLの設計

開発中の高輝度電子銃、CW動作可能な超伝導加速空洞等の重要コンポーネントを実際のビーム運転で動作実証するため、入射器から周回部まで一通りのERL要素を備えたコンパクトERL[15]（図4）をKEK内に建設する計画である。コンパクトERLでは、理論およびシミュレーションによるビームの性能予測の実証、エミッタンス補償手法の実験的な検証、シミュレーションによる予測が難しい現象（ビーム損失等）の調査も進める。また加速器の実証試験の目処がついた段階で、レーザー・コンプトン散乱を用いたフェムト秒X線源や大強度テラヘルツ光源としても活用する計画である。主要なパラメータを表1に示す。

ERLのビーム光学系の設計では、まず電子銃から合流部までの低エネルギー部において、パンチ長を約20 ps（電子銃出口）から1-3 psまで圧縮しつつ、投影エミッタンスの増大を如何に防ぐかが重要なポイントである。投影エミッタンスを増大させる要因として、パンチ内で線電荷密度が異なる（中央部が高い）ことによる空間電荷発散力の違い（これは補償することが可能）、加速空洞のRFによる時間依存収束力、合流部の分散関数の存在する場所における縦方向空間電荷力とコヒーレント放射光（CSR）放出によるエミッタンス増大、等がある。上記の要因によるエミッタンス増大は、ソレノイドによる収束パラメータや機器の位置等に複雑に依存するため、複数パラメータの組み合わせにより最適解を探す手法で設計を進めている。現時点での入射器設計は、[16]に述べた手法で設計されている。遺伝的アルゴリズムを用いてより進んだ最適化を進めている。

周回部のビーム光学系の設計では、パンチ圧縮モードにおいて、パンチ長を100 fs程度まで圧縮することが課題である。パンチ電荷としては77 pCないしそれ以上が目標である。アーク部におけるCSR放射の効果を考慮した場合のパンチ圧縮が、シミュレーション上で出来つつある。周回部のビーム光学に関する設計研究については[17]で報告される。また、抵抗壁ウェーク場によるBBUの可能性[18]、空洞HOMによるBBUの予測、イオン捕獲とその対策、等のビーム力学上の諸問題についても研究が進んでいる。以上の設計研究をコンパクトERLの概念設計レポート[15]にまとめ、さらに精度の高い設計を進めている。

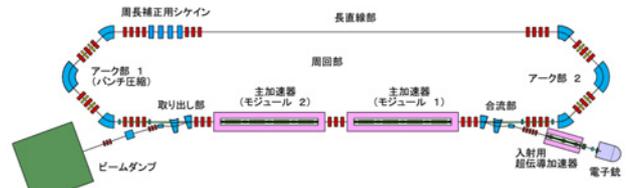


図4：コンパクトERLの機器配置。

## 6．今後の予定

今後2-3年間をかけて主要な機器の開発の目処をつけ、2010-2011年度頃に建家（放射線遮蔽）も含めてコンパクトERLを建設し、2012年頃からコンパクトERLのビーム運転を開始する計画を立案している。5 GeV級ERL放射光源については、2014年頃から建設を開始できることを目標と考えている。ERL光源の実現に向けた道筋は、最近策定されたKEKロードマップにも盛り込まれた。

## 7．謝辞

ERL放射光源の研究開発は、KEK、JAEA、東大物性研、分子研、広島大学、産総研、名古屋大学、JASRI/SPRING-8の研究者から成る研究開発チームによって推進されている。研究開発に貢献されているメンバーに深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] Sol M. Gruner and M. Tigner (ed.), "Study for a proposed Phase I Energy Recovery Linac (ERL) Synchrotron Light Source at Cornell University", CHESS Technical Memo 01-003/JLAB-ACT-01-04 (2001).
- [2] K.-J. Kim et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 244802 (2008).
- [3] G.H. Hoffstaetter et al., EPAC08, pp. 190-192.
- [4] D.J. Holder et al., EPAC08, pp. 1001-1003.
- [5] M. Borland et al., PAC07, pp. 1121-1123.
- [6] 春日俊夫, "コンパクトERLの概要と開発状況", 加速器, 5巻1号 (2008), pp. 13-20.
- [7] S. Sakanaka et al., EPAC08, pp. 205-207.
- [8] "ERLサイエンス研究会 1", 2008年3月16-17日, KEK, <http://pfwww.kek.jp/pf-seminar/ERL/ERLScience1/index.html>
- [9] N. Nishimori et al., Proc. ERL07 (to be published).
- [10] 野口修一, 他, "cERL入射器用2セル超伝導空洞システムの開発", 本プロシーディングス, F022.
- [11] 渡辺謙, 他, "KEKにおけるERL入射器用HOMカブラの開発", 本プロシーディングス, TP080.
- [12] K. Umemori et al., EPAC08, pp. 925-927.
- [13] 沢村勝, 他, "ERL用超伝導主加速器開発の現状", 本プロシーディングス, WP126.
- [14] 阪井寛志, 他, "ERL主ライナックのための入力カプラーの開発現状", 本プロシーディングス, WP120.
- [15] 羽島良一, 他(編), "コンパクトERLの設計研究", KEK Report 2007-7/JAEA-Research 2008-032 (2008).
- [16] 羽島良一, 他, 第3回加速器学会年会プロシーディングス, 2006, pp. 753-755.
- [17] 白神剛志, 他, "コンパクトERL電子ビーム光学系の設計研究", 本プロシーディングス, WP119.
- [18] N. Nakamura et al., PAC07, pp. 1010-1012.