

## STATUS OF THE ERL PROJECT IN JAPAN

Shogo Sakanaka<sup>A)</sup>, Hiroshi Kawata<sup>A)</sup>, Yukinori Kobayashi<sup>A)</sup>, Ryoichi Hajima<sup>B)</sup>, Norio Nakamura<sup>C)</sup>

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

1-1Oho, 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, University of Tokyo

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

### Abstract

In order to bring innovation to the synchrotron radiation science, our Japanese ERL collaboration team is proposing to construct a 5-GeV Energy Recovery Linac (ERL). Key technologies for this project such as a high-brightness DC photoinjector and high-gradient superconducting cavities are under development. We report our status of R&D effort as well as the construction status of the Compact ERL at KEK.

## ERL 計画の現状

### 1. はじめに

エネルギー回収リニアック<sup>[1]</sup> (ERL) は超低エミッタンス、短パルス、かつ超低エネルギー幅のビームを生成する事ができ、従来の蓄積リング型放射光源では実現困難であった共振器型 X 線自由電子レーザー (X-FELO<sup>[2]</sup>) 等の革新的放射光源を実現できる加速器として期待されている。KEK、JAEA、東大物性研等の研究者を中心とする ERL 研究開発チームは、日本に 5 GeV クラスの ERL 放射光源を実現することを目標とし、そのための基礎開発と、開発した技術を総合的に試験するためのコンパクト ERL (cERL) 加速器の建設を進めている。本稿では、これらの最新の進捗状況について報告する。

### 2. ERL 放射光源計画

5 GeV 放射光源計画では、図 1 に示す 2 重の周回部を持った ERL を検討中である。この案では、高輝度電子銃で生成したビームを 2.5 GeV 超伝導主リニアックで加速し、内側の 2.5 GeV 周回部を通過させた後、再度リニアックで 5 GeV まで加速し、放射光発生に利用する。その後、電子ビームをリニアックを 2 回通過させて減速し、ダンプする。発生した放射光は、高平均輝度や超短パルス光を利用する放射光実験に用いられる。5 GeV ERL で目標とするパラメータを表 1 に示す。

また同じ加速器構成をリサーキュレーティング・リニアックとして動作させる事が出来る。この運転モードでは、外側の 5 GeV 周回部の周長を RF 半波長だけずらし、超伝導リニアックでビームを 3 回加速し、7.5 GeV のビームを得る。これにより、高いビームエネルギーが望ましい X-FELO 用のビームが供給できる。X-FELO では平均ビーム電流は低くて良いため、エネルギー回収は行わない。X-FELO で要求されるビームパラメータの例を表 2 に示す。

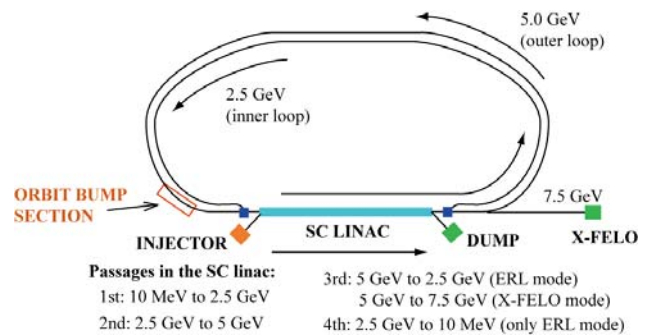


図 1 : 2 ループ ERL の概念図

表 1 : 5 GeV ERL (ERL モード) とコンパクト ERL のパラメータ

パラメータ	5 GeV ERL	cERL
ビームエネルギー	5 GeV	35 - 245 MeV
ビーム電流	10 - 100 mA	10 - 100 mA
規格化エミッタンス	0.1 - 1 mm-mrad	0.1 - 1 mm-mrad
バンチ当たり電荷	7.7 - 77 pC	7.7 - 77 pC
入射エネルギー	10 MeV	5 MeV
RF 周波数	1.3 GHz	1.3 GHz

表 2 : 光子エネルギー 10 keV 領域の X-FELO に要求されるビームパラメータの例<sup>[3]</sup>

ビームエネルギー	7 GeV
バンチ当たり電荷	50 pC
rms バンチ長	1 ps
規格化エミッタンス	0.2 mm-mrad
バンチ繰り返し周波数	~ 1 MHz
ビームの rms エネルギー幅	1.4 MeV

### 3. R&D の現状

#### 3.1 高輝度 DC 電子銃

ERL 用電子銃では、バンチ当たりの電荷 7.7 - 77 pC、規格化エミッタンス 0.1 - 1 mm-mrad の電子バンチを繰り返し周波数 1.3 GHz で発生させる必要がある。このような大きな平均電流、低エミッタンスの電子源としては、光陰極 DC 電子銃が適していると考えられ、開発を進めている。図 2 は JAEA のグループが中心となって開発中の 500 kV, 10 mA DC 電子銃 1 号機である。この電子銃では、先行しているコーネル大学の DC 電子銃において報告された絶縁セラミックの問題点を解決するため、セラミックを多段分割し、ガードリングを付けた設計を採用した。セラミックおよびサポートロッドを組み立てて高圧印加試験を行った結果、コーネル大学で達成された 350 kV より格段に高い 550 kV までの印加に成功した<sup>[4]</sup>。その後、カソードチェンバーへの NEG ポンプ等の組み込みを行い、超高真空の立ち上げを行っている。また、1 台の電子銃をコンパクト ERL に組み込んだ後も電子銃の開発を継続するため、500 kV 電子銃 2 号機の開発も KEK を中心に進めている。さらに、より低エミッタンス、長寿命のフォトカソードの開発を目指した基礎研究を名古屋大学、広島大学が中心となって進めている。

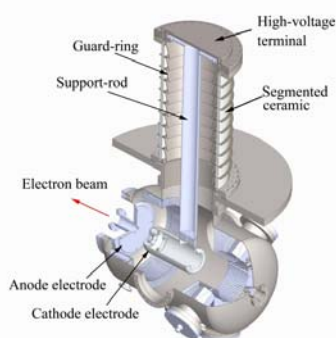


図 2: 500 kV, 10 mA 光陰極 DC 電子銃の概念図

#### 3.2 電子銃用ドライブレーザー

ERL で必要な最大 100 mA の電子ビームを発生するためには、NEA フォトカソードの量子効率を 1.5% と仮定すると、波長約 530 nm、平均電力 15 W、繰り返し周波数 1.3 GHz のレーザーが必要である。最近のファイバーレーザーの技術を延長して開発すれば、この仕様は達成可能と考えられる。我々はレーザー開発を 2 つの道筋で行っている。一つは、電子銃の試験とコンパクト ERL の当初の運転に必要な出力 1.5 W (ビーム電流 10 mA 対応) のレーザーを早期に準備する事である。今のところ、市販の 1.3 GHz レーザー発振器やファイバーアンプ等を組み合わせて出力 100 mW (at 530 nm) のレーザーを用意した。ファイバーアンプを増強して、2010 年内に必要な出力 1.5 W を得る予定である。他方、ビーム電流 100 mA のドライブに必要な 15 W 級の

レーザーを数年間かけて開発する予定である。こちらの開発は東大物性研と産総研が協力して行っている。今のところ、繰り返し 85 MHz、波長 1035 nm で平均出力約 10 W (150 nJ/pulse) のレーザー光が得られ、第 2 高調波光に変換して 4.8 W の出力が得られている<sup>[5]</sup>。

#### 3.3 入射器用超伝導空洞<sup>[6]</sup>

電子銃で発生した 500 keV, 100 mA のビームを約 10 MeV (cERL では 5 MeV) まで加速するために、3 台の 2 セル超伝導空洞が用いられる。この入射器ではエネルギー回収が行われないため、ビームに 1 MW の電力を供給する必要がある。入射器空洞では大電力入力カップラーが重要である。入射器空洞は、加速勾配 14.5 MV/m、カップラー当たりの電力 170 kW を目標として開発が進められている。空洞の性能評価を目的とした 2 台の 2 セル空洞を製作した。最新の 2 号機は、2 つの入力カップラーポートと 5 つのループ型 HOM カップラーを備えている。HOM カップラーは、TESLA 型空洞用の設計を元にして、CW 運転により適した設計に改良したものである。縦測定の結果、HOM ピックアップを接続しない状態で 41 MV/m の加速勾配を達成した。引き続き HOM ピックアップを接続した試験を進めている。また、2 台の入力カップラーを試作し、これらの大電力試験を行った。これまで、ピーク電力 130 kW、パルス幅 1 秒、繰り返し 0.2 Hz (平均電力 26 kW) の大電力試験に成功した。また、2011 年度の完成を目指してクライオモジュールの開発を進めている。

#### 3.4 主加速器用超伝導空洞<sup>[7,8]</sup>

主加速器では、1.3 GHz, 9 セル超伝導空洞を多数用いる。加速勾配 15 - 20 MV/m が必要で、加速管内を合計 200 mA の加・減速ビームが通過するため、高次モードの減衰が重要である。このため、製作や表面処理等については ILC で開発された技術をベースとしながら、大電流に適した ERL 用空洞を設計した。高次モード減衰を効率的に行うため、セルのアイリス径を ILC 用よりも大きな  $\phi 80$  mm とし、ビームパイプの両端に高次モード吸収体を配置した。性能評価用の空洞 2 台を製作し、試験を進めている。1 台目の空洞に対して最近行われた縦測定結果では、加速勾配 25 MV/m を達成した<sup>[8]</sup>。入力カップラーについては、セラミック窓を試作し、CW 27 kW までの定在波試験に成功した。HOM 吸収体アセンブリーの開発も進行中である。これらと並行して、9 セル空洞 2 台を収納するクライオモジュールの開発を進めており、2011 年度末頃に完成する予定である。

#### 3.5 高周波源<sup>[9,10]</sup>

cERL で必要な 1.3 GHz, CW 高周波源の開発を 2007 年から進めている。入射器に必要な CW 300 kW クライストロン (東芝 E37750) が 2009 年度に完成し、大電力試験を行った。カソード電圧 49.5 kV、ビーム電流 9.75 A を印加し、305 kW の RF 出力に成功した。このクライストロンを用いて、入射

器入力カップラーの大電力試験を行った。また、150 kW サーキュレータや他の導波管コンポーネントも開発した。現在、cERL 用に 300 kW クライストロン用高圧電源の立ち上げを行っている。主加速空洞については、加速管 1 本を 30 kW クラスの IOT またはクライストロンでドライブする予定である。cERL に向けて IOT 2 本とクライストロン 1 本を調達し、それらの立ち上げを行っている。

空洞内 RF 電圧の安定度については、光源用 ERL で振幅 0.01%、位相 0.01 度（いずれも rms 値）レベルの安定度が要求される。cERL では、当面の目標として振幅 0.1%、位相 0.1 度の安定度を目指したデジタル・ローレベル RF システムを開発中である。

## 4. コンパクト ERL の建設

### 4.1 cERL の概要

cERL<sup>[1]</sup>では、開発された高輝度電子銃、加速空洞等を用いて高輝度ビームの生成、加速、エネルギー回収を総合的に実証することを計画している。図 3 に cERL の配置案（アップグレード後）を示す。ビーム電流 100 mA を発生できる高輝度電子銃の開発には時間がかかることから、当初のビーム電流は 10 mA を目標とする。入射器出口でのビームエネルギーは 5 MeV とし、主加速器では 9 セル空洞 2 台を収納するクライオモジュール 1 台を用いて加速後のビームエネルギー 35 MeV を目標とする。入射器出口での規格化エミッタンスとして、バンチ電荷 77 pC において 1 mm·mrad を目標とし、低電荷ではより低エミッタンスを目指す。cERL の周回部は当初内側ループのみを建設し、1 ループ ERL の試験が十分行われた段階で 2 ループ目を建設する予定である。

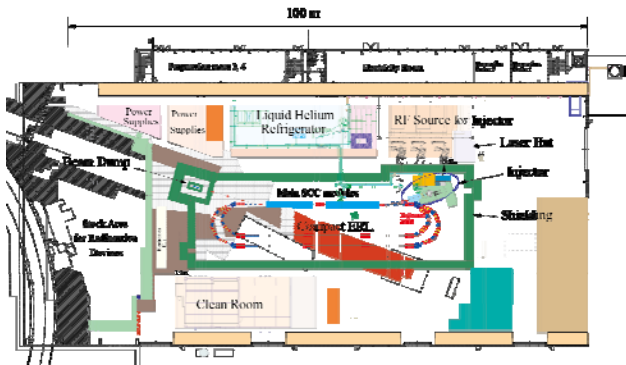


図 3: コンパクト ERL の配置図

### 4.2 東カウンターホールの改修

陽子ビームを用いた素粒子実験を行っていた東カウンターホールの内部を 2009 年度に片付け、建物および設備の改修を行った。ホール内部にあった約 1 万トンのコンクリートシールドや放射化した陽子ビームラインの片付けは、素粒子原子核研究所のスタッフが担当して下さった。建物の耐震補強、塗り床、天井や側室の改修、冷却水・電気・空調設備の更新は KEK 施設部のスタッフが担当された。整備

された冷却水設備は、圧力約 1 MPa、毎分 2600 リットルの純水を供給でき、1.9 MW の冷却能力を持つ。電気設備は、合計約 4.1 MW の電力を供給できる。これらにより、cERL の建設ができる準備が整った。改修後の東カウンターホール内の写真を図 4 に示す。



図 4: 改修後の東カウンターホール内部

### 4.3 ヘリウム冷凍設備の設置と今後の予定

cERL 用のヘリウム冷凍設備を 2009 年度に設置し、立ち上げ作業を行っている。この冷凍設備は、物質・材料研究機構から移管された TCF200 ヘリウム液化冷凍機と循環圧縮機を再利用し、ヘリウム精製器、減圧用排気ユニット、3000L デュワー、トランスファーライン、2K コールドボックスとエンドボックス等を新設したものである。温度 4K で 600 W 程度の冷却能力があると見込まれている。この夏に完成検査を受けた後、試運転がなされる予定である。東カウンターホール内にはこの他、超伝導空洞組み立て用のクリーンルーム等も設置された。

cERL の建設予定は、2011 年度に放射線シールドの建設、2012 年度に cERL 本体の設置を行い、2012 年度末頃にコミッショニングを始める見通しである。

最後に、東カウンターホールの片付け作業を担当して下さった素粒子原子核研究所の家入正治氏、加藤洋二氏、広瀬恵理奈氏、他のスタッフの方々に深く感謝致します。また、ホールの改修工事を担当して頂いた KEK 施設部の皆様にも深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] For example, C.E. Mayes and G.H. Hoffstaetter, IPAC'10, pp. 2356-2358.
- [2] K.-J. Kim, Y. Shvyd'ko, and S. Reiche, Phys. Rev. Lett. **100**, 244802 (2008).
- [3] R.R. Lindberg and K.-J. Kim, PAC09, TU5RFP049.
- [4] R. Nagai et al., Rev. Sci. Instrum. **81** (2010) 033304.
- [5] I. Ito et al., IPAC'10, pp. 2141-2143.
- [6] S. Noguchi et al., IPAC'10, pp. 2944-2946.
- [7] T. Furuya et al., IPAC'10, pp. 2923-2925.
- [8] H. Sakai et al., in these proceedings, WESH04.
- [9] S. Fukuda et al., IPAC'10, pp. 3981-3983.
- [10] T. Miura et al., IPAC'10, pp. 1440-1442.
- [11] R. Hajima et al. (ed.), “コンパクト ERL の設計研究”, KEK Report 2007-7/JAEA-Research 2008-032.