

## PROGRESS IN THE ERL PROJECT

Miho Shimada<sup>A)</sup>, for ERL Collaboration Team

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

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

### Abstract

We propose a 3 GeV class energy recovery linac (ERL) as a succession machine of the PF storage ring to provide a high-brightness and short pulse X-ray light. The key components, 500 kV DC electron gun and a superconducting accelerator, are now under a development for the first beam of the end of fiscal year of 2012. The optimization of the optics from the electron gun to the dump is started. This reports the status of the R&D efforts.

## ERL 計画の進捗状況

### 1. はじめに

PF 後継機の次世代光源として、エネルギー回収型線形加速器(ERL)と共振器型 X 線自由電子レーザー(XFEL-O)を提案している<sup>[1-2]</sup>。ERL の仕様は 1 ループの 3 GeV クラスへと変更があり、軟 X 線・硬 X 線領域をしっかりとカバーする超高輝度・短パルス光源を計画している。目標とするパラメータは自然エミッタンス 17 pm-rad、電流 100 mA である。サブピコ秒のパルス長や数 10%の空間コヒーレンス性など、蓄積リングの光源とは異なる特徴を持つが、高輝度電子銃や超伝導加速空洞など、開発要素も多い。そこで、KEK/JAEA を中心とする ERL 開発チームは、200 MeV クラスのコンパクト ERL を立ち上げた。2012 年度末のファーストビームに向けて、KEK サイトの ERL 開発棟 (旧東カウンターホール) で建設が進められている<sup>[3]</sup>。

また、主要コンポーネントの開発も行われている。500kV DC 電子銃は開発要素が多いため、JAEA サイトの 1 号機と KEK サイトの 2 号機の準備が並行して行われている。また、ドライブレザーについて、KEK で cERL のコミッションングに向けたシステム開発を、AIST・ISSP においては実機仕様を目指した各要素開発を行っている。超伝導加速空洞はリニアコライダーのグループと綿密な連携をとりながら進めている。また、低エミッタンスビームを輸送するためのビームダイナミクスの研究や電子ビーム光学系の設計が行われている。本稿では、各主要要素の開発状況について報告する。

### 2. 電子銃・ドライブレザー・ビーム診断

#### 2.1 JAEA 高輝度 DC 電子銃

JAEA の 1 号機<sup>[4]</sup>は昨年度にカソード電極がない状態で 500 kV の高電圧印加に成功していたが、2011 年の 2 月にはカソード電極を取り付けた状態で 466 kV の印加に成功した。3 月に行った再実験は東日本大震災で中断したが、更なる高電圧印加へ向けた試験を継続している。また、300 keV 電子

ビーム取り出しに成功しており、5.7  $\mu\text{A}$  の電流をダンプで観測している。10 mA の電流を引き出すために必要と考えられる  $10^{-10}$  Pa 台の真空度を実現するために、NEG ポンプの増強を行った。全排気速度 18000 リットル/s となり、カソード真空容器内で真空度は  $6 \times 10^{-10}$  Pa に到達した。また、カソード表面の水素洗浄を実施し、GaAs の暗寿命 1000 時間を達成したほか、陰極表面の磁場による磁気エミッタンスの補償についての実験も行った<sup>[5]</sup>。

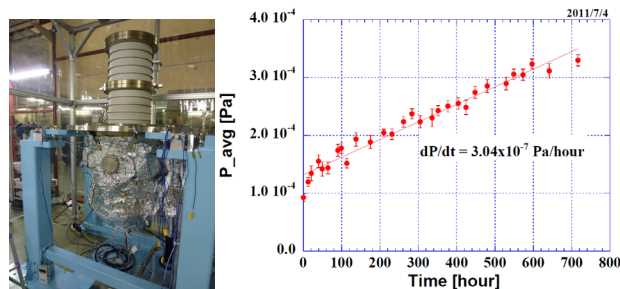


図 1 : (左) 500 kV 第 2 電子銃の現状 (右) ベーキング後の全ガス放出速度の測定結果

#### 2.2 KEK 電子銃の超高真空系の開発

500kV 電子銃 2 号機<sup>[6]</sup>は、各コンポーネントが徐々に整い始め、KEK の AR 南棟で組み立てが行われている。 $1 \times 10^{-10}$  Pa 以下の極高真空を実現するため、ガス放出速度の低いチタン製の電子銃チャンバー、セラミック管を使用しており、これらを組み上げた状態でのベーキング後のスピニングローターゲージを用いて得られた全ガス放出速度は、 $1.05 \times 10^{-10}$  Pa  $\text{m}^3/\text{s}$  であった。図 1 に装置の写真およびビルドアップ測定の結果を示す。また、使用する排気装置も極高真空に対応できるものが必要なため、極高真空環境における排気系の実効排気速度の評価を進めている。

#### 2.3 ドライブレザーの開発

ERL の目標である 100 mA を実現するために、1.3 GHz、パルス幅数 10 ps、平均出力 15 W (量子効率 1.5%の場合) のドライブレザーの開発が ISSP・

AIST と共同で行われている<sup>[7]</sup>。主な開発要素は 1.3 GHz 発振器、フォトニック結晶ファイバーによる増幅器および高効率の波長変換である。現在、Nd:YVO<sub>4</sub> を用いたレーザー発振器で繰り返し周波数 1.2 GHz、波長 1064 nm、パルス幅 27 ps の出力が得られている。ファイバー増幅器のテストは 85 MHz のレーザーを用いて並行して実施され、60 mW の基本光を最大 31 W まで増幅することに成功した。波長変換は、光パラメトリック増幅 (OPA) を利用することを考えている。増幅器出力を LBO 結晶で変換した第 2 高調波 (530 nm) を励起光として、増幅器出力の一部を非線形フォトニック結晶ファイバーで生成したスーパーコンティニューム光 (SC 光) の 800nm 帯域をシード光として用いて、所定のパルス列を発生させる。現段階の変換効率は第 2 高調波が 49%、SC 光が 9.3% を達成している。

一方で、KEK ではコンパクト ERL で 10 mA のビームを生成するためのレーザーシステムを構築している<sup>[8]</sup>。当初の目標は波長 500 nm 帯、平均出力 10W 前後としている。発振器は市販の 1.3 GHz 能動モードロックファイバーレーザーを使用し、フォトニック結晶ファイバーで 10W まで増幅する。第 2 高調波の変換には共振器にパルス光を蓄積する方法を提案しており、高い変換効率を目指している。

#### 2.4 KEK-AR 南棟におけるビーム診断

500kV 第 2 電子銃の開発と同時に、名古屋大学から移設された 200 kV フォトカソード電子銃によるビームテストが行われている<sup>[9]</sup>。診断ラインには偏向空洞、2 つのソレノイド、3 つのビュースクリーン、水平・垂直方向のスリット 2 組が設置されている。ビームエミッタンスの測定はソレノイドで収束するウエストスキャンによる方法を用い、ドライブレザーの波長依存性について確かめた。また、偏向空洞とスクリーンを組み合わせた時間応答試験を実施し、カソードの厚さとの関係について調べている。時間応答はドライブレザーの波長にも依存し、波長 500nm 帯に比べて、進入長の長い 800nm 帯では長いテールを持つことがわかった。その他、カソードの寿命や量子効率分布の測定、カソード表面の粗さとエミッタンスの関係の評価などが行われている。

### 3. 超伝導加速空洞・RF 源

#### 3.1 RF 源

2012 年度末のファーストビームの実現に向けて入射部および主加速器の RF 源の整備が急ピッチで進んでいる<sup>[10-12]</sup>。RF 源で必要な 300kW クライストロン、30kW・RF 源 (30kW・IOT とクライストロン) は調達済みで、バンチャー部のみ残っている。関連する電源は JAEA から移管したものを含め全て揃えた。残るのは試験ベンチ以外の導波管系であり、2011 年度から 2012 年度に調達する予定である。

加速空洞の入力カップラーの試験のために先行して 2009 年度に入力カップラー試験スタンドが PF 電

源棟で立ち上がった。ここでは 300 kW クライストロンの試験および、入射部加速空洞の入力カップラーの試験が行われた。2010 年度には ERL 開発棟に場所を移して、300 kW クライストロン用高圧電源の立ち上げおよび調整を行い、270 kW までの出力を確認した。ただし、サーキュレータが 150 kW 仕様のため、カップラーテストスタンドの RF 出力は 150 kW に制限されている。また、主加速空洞の入力カップラーの試験のため、30 kW IOT と高圧電源の立ち上げを行い、27 kW の出力を確認した。また、2011 年度には 30 kW クライストロンの立ち上げを開始した。

#### 3.2 入射器用超伝導空洞

入射器用超伝導空洞<sup>[13-14]</sup>のデザインは TESLA 空洞をベースとしており、ビームパイプを大きくした 2 セルの空洞を採用している。一つのクライオスタットに 3 台の 2 セル空洞を設置し、加速勾配 15 MV/m で最終エネルギーに到達するべく、開発を進めている。エネルギー回収無しで 100mA の電子ビームを最大 10 MeV まで (cERL では 5 MeV) 加速する必要があるため、1MW (0.5 MW) を入力する必要がある。ひとつの空洞に 2 本の入力カップラーを用いてパワーを供給するため、最大 167 kW に対応出来るように設計している。高次モード (HOM) の対策にループタイプの HOM カップラーを採用しており、空洞当たり 5 個のカップラーが左右非対称に配置している。周波数の微調整には slide-jack tuner とピエゾチューナーを用いる。

2 台のプロトタイプ空洞を製作して縦測定を実施ところ、どちらも HOM pick-up アンテナのない状態では CW 運転で 40MV/m 以上の加速勾配を達成した。これより、空洞の製作方法に問題が無いことが確認された。次に HOM pick-up アンテナを装着した状態で縦測定を行った。縦測定は通常液体ヘリウムに空洞全体が浸った状態で RF を入力するため、冷却条件が非常に良い状態で試験ができる。しかし、実際の運転では、HOM カップラーは直接液体ヘリウムで冷却されず、伝熱のみで冷却され、かつ断熱真空槽の中に置かれることから、縦測定中に液体ヘリウムの液面レベルを制御して、出来る限り実際の運転に近い冷却状態を再現したところ、HOM pick-up アンテナの発熱により CW 運転で維持可能な加速勾配は 13MV/m に制限されてしまった。そこで、実機に使用する #3 空洞の縦測定では、HOM カップラーおよび Pick-up アンテナ周辺の冷却構造の改良などを行った。結果、25MV/m にまで改善された。瞬間最大の加速電界は 30.3MV/m であり、性能制限の原因はセル赤道部の溶接欠陥である (図 2)。今後、残りの 2 台 (#4、#5) の縦測定を予定しているが、ここではヒーターなどを用いて HOM カップラー・ビームパイプまわりの温度を 5K 程度に制御し、さらに悪い冷却条件において維持可能な加速勾配を評価していく予定である。

2010 年度には 300 kW クライストロンを用いて、入力カップラーの大電力試験を行った。パルス運転では 100 kW で 2 時間維持することができたが、

CW 運転では 50 kW で 30 分後に若干発熱が観測された。ERL 実機の運転にはさらに開発が必要なものの、cERL の初期の運転には対応出来る見通しとなった。

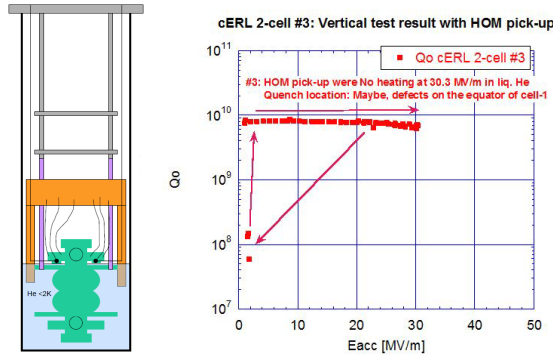


図 2：改良した HOM カップラーを装着した時の縦測定の結果

### 3.3 主加速器用超伝導空洞

主加速空洞<sup>[14-17]</sup>も同様に TESLA 空洞のデザインをベースにしている。HOM による beam breakup (BBU) 不安定性を抑制するために、パイプ径を 80mm と大きくした。この変更によって大きな加速勾配が難しくなったことが懸念されていたが、プロトタイプ 9 セル空洞第 1 号機の縦測定において、25 MV/m の加速勾配を得ることができ、空洞の製作方法が適切であることを確認した。cERL にインストールする実機と同じ形状のプロトタイプ第 2 号機では、28 MV/m に到達した (図 3 青色)。しかし、その後大きな放電が起ると同時に field emission が多くなり、Q 値が劣化と共に加速勾配が 24MV/m まで制限された (図 3 緑三角)。特に低い加速勾配の箇所での Q 値の劣化が問題となっていたが、一度室温に戻したところ Q 値が回復した (図 3 ピンク)。2 号機も cERL の要求を十分満たしており、現在 cERL クライオモジュール用の 3, 4 号機の製作を行っている。

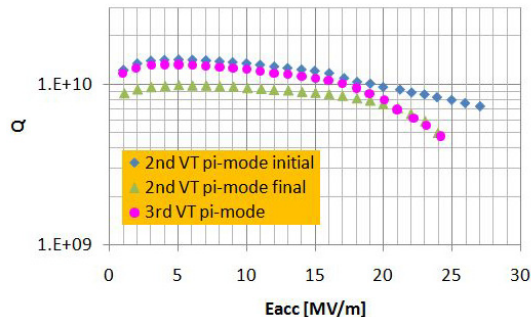


図 3：2 号機 2, 3 回目縦測定結果。

これまで JAEA で行われていた入力カップラーの試験は、ERL 開発棟で立ち上げた 30 kW IOT を用いて行われた。また、ISSP の断熱槽を用いて RF 窓を液体窒素で冷却した上で、大電力・全反射試験を

行った。10 kW でマルチパクトがあったものの、プロセスが進んだ結果 25 kW まで到達し、16 時間維持することに成功した。その結果を図 4 に示す。また、以前の RF 窓は 5 回のヒートサイクルによって真空漏れを起こしたため、窓のろうづけの条件を改良して再度実験を行ったところ、10 回のヒートサイクルに耐えることを確認した。

HOM を減衰させる HOM ダンパーは 80 K で動作する必要がある。フェライトを HIP で接合した HOM ダンパーの試作機を作成し、JAEA にて冷却テストを実施しており、ヒートサイクルに耐えうるか確認中である。

2 台の 9 セル空洞を収納するクライオモジュール、チューナー等の開発も進行中である。

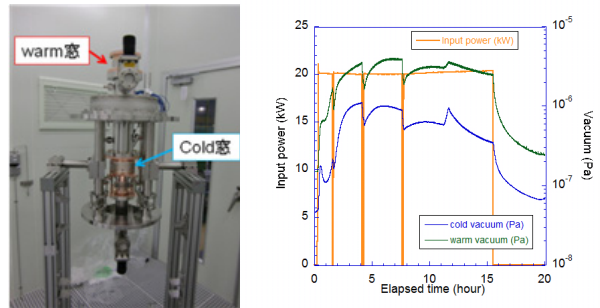


図 4：9 セル加速空洞の入力カップラーの写真および大電力試験の結果

## 4. ラティス・ビーム光学設計・レーザーコンプトン散乱

### 4.1 Start-to-End simulation によるビーム光学設計

2012 年度末の cERL の運転は、入射合流部エネルギー 5MeV、周回部エネルギー 35MeV、平均電流 10mA、規格化エミッタンス 1mm-mrad を目標としている。将来は 200MeV クラスまで電子エネルギーを上げるために、2 ループに拡張する予定である。現在は、初期の 35MeV、7.7pC に合せたオプティクスの詳細設計を進めている<sup>[18]</sup>。

オプティクス設計の方針は以下の 2 つである。一つは、コンプトン散乱などの光源の位置まで、低エミッタンスを維持しながら電子バンチを輸送することである。もうひとつは、エネルギー回収後からダンプまでの間にビームサイズがチャンバーを超える大きさにならないように抑えることである。エミッタンスが増加する主な原因は非相対論的なエネルギーの空間電荷効果および周回部の CSR wake である。理想的には、電子銃出口からこれらの要素を全て取り入れてダンプまで最適化すべきだが、空間電荷効果のシミュレーションには膨大な CPU が必要であり、時間もかかる。そのため、相対論的なエネルギーでは空間電荷効果を入れない方法で最適化した。このように、エネルギーや場所によって異なる方法で最適化して繋げる手法を Start-to-End simulation と呼ぶ。cERL では、非相対論的なエネル



ギーでは General Particle Tracer (GPT)、相対論的なエネルギーでは elegant を用いて計算を行った。35 MeV まで加速した直後で計算コードの受け渡しを行った。

電子銃直後から順に最適化を行ったところ、周回部で CSR wake によるエミッタンス増加が無視できないものになったため、先に周回部を最適化した。ここで、受け渡し点で取り得る twiss parameter の範囲を求め、GPT の最適化の条件とした。このシミュレーションの結果、規格化エミッタンス 0.5 mm-mrad、rms バンチ長 0.74 mm が得られている。この結果を受けて、周回部の光学系の最適化を行った。この  $\beta$  関数と分散関数を図 5 に載せる。光源点までのエミッタンス増加は 0.4%以下に抑えることができ、エネルギー回収後のビームサイズの最大値は rms で 3.4mm まで抑えることができた。

しかし、周回エネルギー 35MeV は空間電荷効果による  $\beta$  関数の歪みが無視できないことが予想されており、今後詳細設計をさらに進めていく予定である。

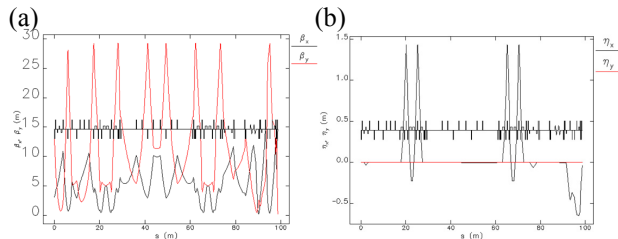


図 5 : Start-to-End simulation による周回部のビーム光学関数。(a) ベータatron関数、(b) 分散関数。

#### 4.2 レーザー逆コンプトン $\gamma$ 線による核種非破壊測定

cERL では ERL 放射光源のテスト機としての役割だけでなく、レーザー逆コンプトン散乱(LCS)やコヒーレント放射光光源としても期待されている<sup>[19]</sup>。現在、JAEA のグループを中心に LCS- $\gamma$ 線による核種非破壊測定の計画が進められている。これは、原子炉使用済みの燃料中のプルトニウムを測定することによって、不正な抜き取りを監視することが目的である。本手法はすでに AIST の蓄積リング TERAS で実証されている。ERL は、LCS によって質の劣化した電子ビームが新しいビームに置き換わること、比較的小さいエネルギーでも低エミッタンスビームが可能であるという特徴を持つため、さらに高いフラックス・狭帯域の $\gamma$ 線が期待されている。

### 5. まとめ

将来放射光源として提案している ERL 計画の実現に向けた各コンポーネントの開発が精力的に行われている。500 kV の印加に成功した JAEA の 1 号機電子銃では、300 kV のビームの引き出しや、 $10^{-10}$  Pa 台の真空度を達成している。それに引き続いて、KEK サイトの 2 号機も、各要素の開発が目標に向かって着実に進んでいる。超伝導加速空洞では、入

射器・主加速器共に加速勾配 15MV/m を達成できる見込みとなり、入力カップラーなどのコンポーネントも cERL の要求する仕様を満たす見込みである。初期の運転モードである 35MeV・7.7pC の光学系の設計も進み、今後さらに詳細を検討する予定である。

### 参考文献

- [1] See, for example, D. Bilderback et al., New J. Phys. 12 (2010) 035011
- [2] K.-J. Kim, Y. Shvyd'ko, S. Reiche, Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 244802
- [3] 坂中章悟, "コンパクト ERL の建設状況", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, TUPS079, Tsukuba, 2011
- [4] 西森信行 他, "500-kV 光陰極 DC 電子銃の開発", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, MOPL05, Tsukuba, 2011
- [5] 永井良治 他, "JAEA-250kV 光陰極電子銃における磁気エミッタンス補償", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, TUPS106, Tsukuba, 2011
- [6] 山本将博 他, "ERL 高輝度電子源のための極高真空系の開発と評価", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, TUPS160, Tsukuba, 2011
- [7] 笠原亮 他, "ERL 光陰極電子銃励起用 Yb ファイバーレーザーシステムの進捗状況", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, TUPS064, Tsukuba, 2011
- [8] 本田洋介 他, "高輝度電子銃関係の進捗状況", 第 28 回 PF シンポジウム, ポスターFE-03, Tsukuba, Jul. 12-13, 2011
- [9] 松葉俊哉 他, "NEA-GaAs フォトカソードのエミッタンス及び時間応答測定", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, MOPS073, Tsukuba, 2011
- [10] S. Fukuda et al., "RF Source of Compact ERL in KEK", IPAC10, pp. 3981-3983, Kyoto, May 23-28, 2010
- [11] T. Miura et al., "Low-Level RF System for cERL", IPAC10, pp. 1440-1442, Kyoto, May 23-28, 2010
- [12] 三浦孝子 他, "KEK における cERL の高周波源", 第 7 回加速器学会年会プロシーディングス, pp. 927-929, Himeji, Aug. 4-6, 2010
- [13] K. Watanabe, E. Kako, S. Noguchi, M. Satoh, T. Shishido, Y. Yamamoto, "Status of Development of the cERL Superconducting Injector Linac", LINAC10, pp. 401-403, Tsukuba, Sep. 12-17, 2011
- [14] K. Umemori et al., "Construction of cERL Cryomodules for Injector and Main Linac", Proceedings of SRF2011, FRIOA06, Chicago, Jul. 25-29, 2011 (to be published)
- [15] H. Sakai et al., "High Power Tests of KEK-ERL Input Coupler for Main Linac Under LN2 Condition", Proceedings of SRF2011, TUPO005, Chicago, Jul. 25-29, 2011 (to be published)
- [16] E. Cenni et al., "Vertical Test Results on KEK-ERL 9-Cell L-Band Superconducting Cavity", Proceedings of SRF2011, THPO034, Chicago, Jul. 25-29, 2011 (to be published)
- [17] M. Sawamura et al., "Cooling Properties of HOM Absorber Model for cERL in Japan", Proceedings of SRF2011, TUPO003, Chicago, Jul. 25-29, 2011 (to be published)
- [18] 島田美帆 他, "cERL のラディスおよび CSR による逆コンプトン軟 X 線源", 第 28 回 PF シンポジウム, 口頭発表, およびポスターFE-09, Tsukuba, Jul. 12-13, 2011
- [19] 羽島良一 他, "コンパクト ERL におけるレーザーコンプトン $\gamma$ 線の発生と核種非破壊測定実証実験の計画", 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, TUPS040, Tsukuba, 2011