

解 説

エネルギー回収型リニアック次世代放射光源のための
要素技術開発とコンパクト ERL の建設羽島 良一¹・中村 典雄²・坂中 章悟³・小林 幸則³Research and development for future ERL light sources and
construction of the Compact ERLRyoichi HAJIMA¹, Norio NAKAMURA², Shogo SAKANAKA³ and Yukinori KOBAYASHI²

Abstract

Energy-recovery linac (ERL), which produces a small-emittance beam with high-average current, is a promising device for future light sources. In Japan, we have organized a collaboration team toward future ERL light sources and started R&D efforts to establish accelerator technologies for the ERL light sources. In this paper, we describe status of accelerator components R&D's and on-going construction of a test facility, the Compact ERL.

A はじめに

電子線加速器を用いて「光」を発生する技術は、シンクロトロン放射光、自由電子レーザーに代表されるように、今日の科学と産業において重要なツールとなっている。20世紀に花開いたX線放射光、レーザーを中心とした光科学の成果を引き継ぎ、さらなる進歩を促す新しい光源として期待されているのが、次世代放射光源である。

次世代放射光源のひとつとして、SASE (self-amplified spontaneous emission) 方式によるX線自由電子レーザー (XFEL) がある。日米欧の3拠点で硬X線領域のXFELの計画が進められており、米国SLAC LCLSでは波長1.5オングストロームのFEL発振が得られている。

SASE XFELとは異なる方式で新しい光を生み出そうという装置がエネルギー回収型リニアック (Energy-Recovery Linac; ERL) に基づく次世代放射光源である。ERL型X線放射光源 (シンクロトロン放射光, アンジュレータ放射光) は、空間コヒーレンスと輝度において第3世代放射光源を上回るX線、フェムト秒X線パルスの発生を可能にする装置として期待されている¹⁾。

さらに、ERLはX線放射光の発生のみにとどまらず、テラヘルツから γ 線までの広い範囲で既存の光源を上回る輝度、強度を実現できる²⁾。表PにERLに基づく各種光源の一覧を示す。

X線放射光源については、日本放射光学会の「先端的リング型光源計画特別委員会」において議論が行われ、基礎科学から産業利用までの幅広い領域において、放射光利用の量的・質的イノベーションを先導するための先端リング型光源として、ERLが最有力であり、その研究開発を早急に着手すべきであるとの提言がなされた。

このような放射光ユーザの期待を受けて、加速器研究者側では、ERL放射光源の実現に向けた研究開発を日本全体で効率的に進めるためのオールジャパンの共同チームを構成し、組織的な研究活動を開始した。

表 P ERL に基づく各種光源の一覧

テラヘルツ	コヒーレント放射, FEL
赤外	FEL
VUV~X線	アンジュレータ放射, FEL, レーザー・コンプトン散乱
γ 線	レーザー・コンプトン散乱

¹ 日本原子力研究開発機構 JAEA, Japan Atomic Energy Agency (E-mail: hajima.ryoichi@jaea.go.jp)

² 東京大学物性研究所 ISSP, The Institute for Solid State Physics, University of Tokyo

³ 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization

高エネルギー加速器研究機構には ERL 計画推進室が設立され、共同チームとして、日本原子力研究開発機構、東京大学物性研究所が加わり、さらに、分子科学研究所、高輝度光科学研究センター、産業技術総合研究所などからの研究者も参加した。

共同チームの活動は、加速器要素技術の研究開発、ビームダイナミクスの研究、次世代放射光源の利用研究の探訪まで網羅するものである。これまでの活動実績は、ERL 推進室のホームページにまとめられている³⁾。

エネルギー回収型リニアックを用いた次世代 X 線放射光源は、電子エネルギー 5 GeV、ビーム電流 10 100 mA の規模であり、電子ビームの規格化エミッタンスは 0.1 mm-mrad まで小さくすることが求められている。これらのパラメータは、これまでに建設・運転されている ERL 装置の性能を大きく上回るものであり、ERL 加速器を構成する要素機器ごとに新たな性能向上を課すものである。とりわけ、極小エミッタンスと大電流を両立する電子銃、大電流を安定に加速する超伝導空洞は、ERL 放射光源の性能を決定する重要な構成要素であるが、その実現には新技術の導入を含む研究開発が必要である。

共同チームでは、ERL 放射光源の実現に必須のこれら要素技術開発を分担して進めると同時に、全機器の統合的な動作試験を行うための ERL 実証機（コンパクト ERL）を建設することとした⁴⁾。ERL 型次世代放射光源の実現に必要な全ての要素技術を完成し、その性能を実証することがコンパクト ERL 建設の目的である。コンパクト ERL のサイズは X 線放射光源に比べればはるかに小さいが、ERL 型次世代放射光源で新たに必要となる要素技術の全てが含まれている。各要素技術は単独で試験するのみならず、ERL 装置として実際に運転することで機器性能の統合的な

実証が行えると期待できる。

本稿では、コンパクト ERL の概要、各要素技術の研究開発の状況、建設スケジュールなどを報告する。

B コンパクト ERL の概要

コンパクト ERL 建設の目的は、 μ ERL 型次世代放射光源の実現に必要な全ての要素技術を完成し、その性能を実証するための全機器の統合的な動作試験、 μ レーザー・コンプトン散乱で発生する X 線、および、偏向磁石部で発生する大強度テラヘルツ光をユーザ実験に提供することである。

5 GeV ERL 放射光源とコンパクト ERL の主なパラメータ比較を表 Q に示す。電子エネルギーを除けば、コンパクト ERL の仕様は将来の ERL 放射光源と同一であり、コンパクト ERL を構成する加速器要素の全てが ERL 放射光源と共通である。したがって、コンパクト ERL の建設と設計通りの運転が行われれば、ERL 型次世代放射光源を実現するための技術的な障壁はクリアされることになる。

図 P にコンパクト ERL の装置構成を示す。他の ERL と同様に入射部と周回部からなる。入射部は、フォトカソード DC 電子銃で生成した低エミッタンス大電流電子ビームを、入射用超伝導加速器で 5 10 MeV のエネルギーまで加速する。入射電子は合流部

表 Q コンパクト ERL と 5 GeV ERL のパラメータ

	コンパクト ERL	5 GeV ERL
周回エネルギー	60 <u>85</u> MeV	5 GeV
平均電流	10 <u>100</u> mA	10 <u>100</u> mA
電子バンチ長	0.1 <u>3</u> ps	0.1 <u>3</u> ps
バンチ電荷	7.7 <u>77</u> pC	7.7 <u>77</u> pC
規格化エミッタンス	0.1 <u>1</u> mm-mrad	0.1 <u>1</u> mm-mrad

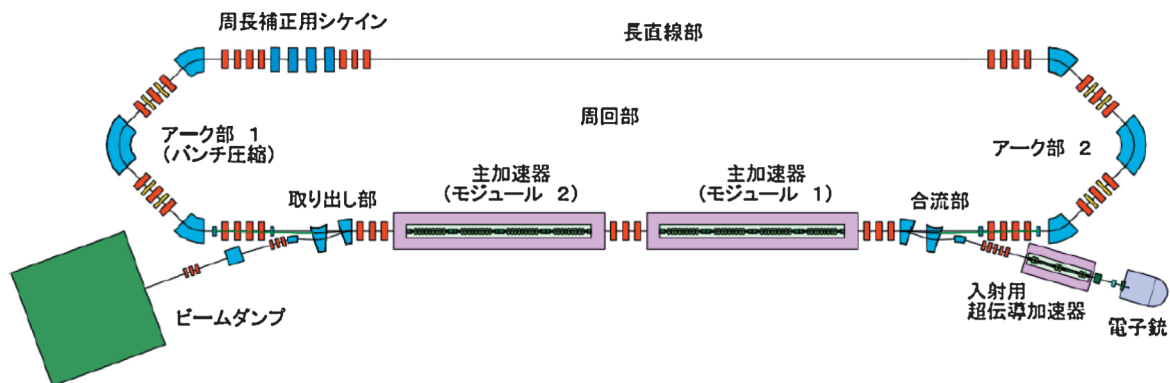


図 P コンパクト ERL の構成

で周回軌道と合流し、主加速器で加速される。アーク部は周回軌道の一部を構成するとともに、バンチ圧縮の役割を備える。周回後の電子ビームは主加速器で減速され、取り出し部を経てビームダンプへ捨てられる。

主加速器では、加速電子と減速電子を RF の逆位相に乗せることで、ビーム負荷が打ち消され、外部からの RF 入力をほとんど必要とせず連続的に大電流電子ビームを加速することができる。これがエネルギー回収である。エネルギー回収を効率よく動作させるためには、周回後の電子を減速位相に正しく乗せる必要があるため、このための周回軌道長の調整機構として、周長補正用シケインが設置されている。

ERL と同様に超伝導加速器が用いられる国際リニアコライダー (ILC) がパルス運転であるのに対して、ERL は CW で運転される。このため ERL では、運転に必要な電力のうち、超伝導空洞のための冷凍機電力が大きな割合を占める。運転に必要な冷凍機電力は加速勾配の 2 乗に比例し、空洞数に比例する。したがって、ERL では加速勾配を大きく取るのは得策でなく、ERL の実用機 (5 GeV 放射光) では、15 20 MV/m で運転される予定である。コンパクト ERL も同様の加速勾配の実現を目標としている。当初運転は空洞 4 台で周回エネルギー 65 85 MeV を予定している。その後、加速空洞の増設、冷凍機の追加、周回軌道の二重化などを経て、エネルギーを 200 MeV 以上まで増大する計画である。

C 主要機器の開発状況

C A ERL を構成する主要機器

加速器を構成する要素のうち、ERL に固有の機器として、p 低エミッタンス大電流電子ビームを生成する電子銃、q 大電流ビームの CW 運転に対応した超伝導加速空洞があげられる。超伝導加速空洞は、さらに、入射部空洞と主加速器空洞の二通りに分けられる。それぞれの機器について、要求される性能、および、開発の状況をまとめる。

C B 電子銃とドライブレーザ

電子銃は、ERL 放射光源の性能 (輝度・フラックス) を決定する重要な機器である。ERL 型次世代放射光源の電子銃に求められる性能は、平均電流 10 100 mA (7.7 pC 77 pC, 1.3 GHz)、規格化エミッタンス 0.1 1 mm-mrad である。コンパクト ERL でも同じ値を目標としている。

このような低エミッタンスかつ大電流の電子ビームを生成する電子銃として、われわれは、NEA 半導体 (negative electron affinity 負電子親和力) をフォト

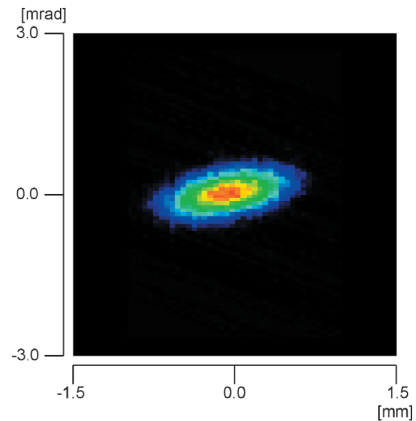


図 9 250 kV 電子銃におけるエミッタンス測定結果の一例。スリットスキャンで測定したビーム位相分布を示す (カソード面のレーザスポットサイズ 160 μm , 規格化エミッタンス 0.054 mm-mrad)。

カソードとする DC 電子銃を採用した。米国ジェファーソン研究所の ERL 型赤外自由電子レーザ (JLAB FEL) では、同様の電子銃で 9.1 mA (120 pC, 74.85 MHz) の電子ビーム発生を行っている⁵⁾。電流の増大は、電子銃の DC 電源の増強と電子バンチ繰り返しの増大を行えばよい。大電流の特長に加えて、NEA カソードは初期エミッタンスの極めて小さな電子ビームを発生することができる利点がある。

われわれは、ERL 型次世代放射光源の要求を満たす低エミッタンス、大電流電子銃の開発を二段階で進めることとした。まず、JAEA FEL の物品を利用して 250 kV 50 mA 電子銃の開発を立ち上げ、フォトカソード DC 電子銃の技術を獲得するとともに、NEA フォトカソードの作成・性能測定を進める。その後、次世代放射光源の入射器に必要な 500 kV 電子銃の開発に進む計画である。

250 kV 電子銃はすでに完成し、電子ビームの引き出しと微小電流でのエミッタンス測定を完了した。図 9 は、エミッタンス測定結果の一例である。ここではドライブレーザとして He Ne レーザ (波長 633 nm) を使い、スリットと YAG スクリーンを使ってエミッタンス計測を行った。スクリーンの破損が起こらない微小電流 (1 μA) の実験データである。カソード面上のレーザスポットサイズ 160 μm (rms) の時、規格化エミッタンス 0.054 mm-mrad が得られ、カソードの実効温度は 54 meV と評価された⁶⁾。

250 kV 電子銃の開発と運転で得た知見を生かして、ERL 放射光源の実機の性能を満たす 500 kV 電子銃の実現に向けた研究を開始した⁷⁾。これまでに運転実績のある DC (CW) 電子銃では、JLAB ERL の 350



図 R フォトカソード電子銃用に新しく製作した 500 kV 用セラミック管 (左) と JAEA FEL で使用した 250 kV 用セラミック管 (右). いずれも高電圧を安定に印加するために多段分割式の構造としている.

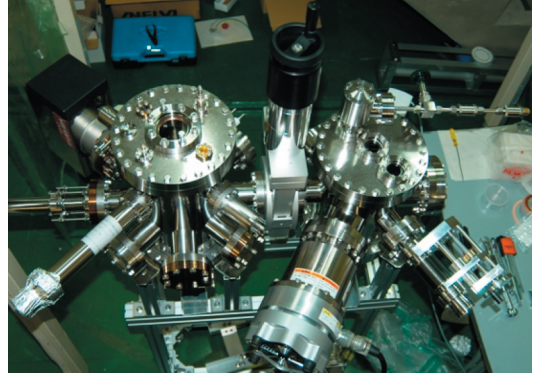


図 S 500 kV 電子銃用のフォトカソードローディングチェンバー (右) と NEA 表面作成のためのプレパレーションチェンバー (左).

kV が最大電圧であり, これを上回る 500 kV 電子銃を実現するにあたっての最大の課題は DC 500 kV を安定に保持できるセラミック管の開発である.

セラミック管に必要な性能は, ①内面からの 2 次電子放出が少ないこと, ②均様な電位分布を実現し, チャージアップを抑止するために適度な電流が流れるだけの抵抗値を有すること, ③極高真空の阻害となるアウトガスが少ないことなどである.

われわれは, 500 kV 用セラミック管として多段分割方式を採用することとした. セラミックを多段分割し段間に高抵抗を接続する方式は, JAEA 250 kV FEL, 名古屋大 200 kV 偏極電子源で十分な実績があるためである. 製作したセラミックを図 R に示す.

多段セラミックに取り付けるガードリングの設計と製作も完了した. ガードリングの形状は, 表面電位 (中心導体含む) が小さな値になるように, また, 中心導体からの放出電子がセラミック表面を直接叩かないような形状を選んだ. ガードリングの材料は真空特性に優れ, 電界放出電子が少ないチタンを採用した.

フォトカソード (GaAs 基板) はローディングチェンバーで真空中に導入した後, 約 550 度の温度で加熱洗浄を行い, 次に隣接したプレパレーションチェンバーに移送し, カソード表面に Cs と O₂ を交互に付着することで NEA 表面を得る. このようにして作成されたフォトカソードをカソード電極に移送し, 電子銃の運転に供する.

NEA 表面の作成と維持には, 極高真空が必要なことから, ロードロック, プレパレーション, 本体チェンバーは, ガス放出速度が一般的なステンレスに比べて 2 3 桁小さいチタン⁸⁾を材料とした. 図 S に 500

kV 電子銃用のローディングチェンバーとプレパレーションチェンバーを示す.

フォトカソード電子銃に用いるドライブレーザに要求される性能は, ①光電子放出に適した波長, ②最大 1.3 GHz のバンチに対応した高繰り返し, ③大電流引き出しのための高平均出力, ④低エミッタンスビーム発生のためのパルス整形が可能なことなどである. NEA GaAs は, バンドギャップが 1.43 eV であることから, 波長 867 nm 以下のレーザで駆動可能である. 小さな初期エミッタンスを得るには, なるべくバンドギャップに近い波長で駆動するのがよいが, 高平均出力を実現可能なレーザ技術を勘案して, われわれは, Yb ドープファイバーレーザの 2 倍波 (530 nm) を利用することとし, これに必要な技術開発をスタートした.

カソードの量子効率を 1 と仮定すると, 100 mA の平均電流を得るのに必要な 530 nm レーザの出力は 23 W である. ファイバーレーザは, オシレータ, プリアンプ, メインアンプの構成とし, オシレータ部の製作から開始した.

ファイバーレーザオシレータでは, 100 MHz のリング共振器に外部共振器を組み合わせて高い繰り返しを得る方式, リニアキャビティを用いる方式を試作し, 後者の方式で 425 MHz の安定な発振が得られている⁹⁾. 1.3 GHz の安定な発振を得るための装置改良を引き続いて行うと同時に, 商用のオシレータを用いた試験も開始する予定である.

c c 入射部用超伝導加速器

ERL の入射部用超伝導加速器は, 電子銃で生成した大電流ビーム (100 mA) を 5 10 MeV 程度まで加速する役割をもつ. 主加速器と異なりエネルギー回収が行われないので, 加速に必要な RF パワーは全て外

部の RF 源から投入しなければならず，このための大電力カップラーの開発が大きな課題である．また，電子ビームが空洞内に誘起する HOM（高次モード）を効率よく外部へ取り出すための HOM カップラー，CW 運転に対応したクライオモジュールなども新規の開発要素である．

L-band (1.3 GHz) の超伝導加速器は，国際リニアコライダー (ILC) に向けた研究開発が KEK で精力的に行われている．われわれは，これらの成果を最大限に活用しながら ERL 入射用超伝導加速器の開発を進めている¹⁰⁾．

ERL 放射光源用入射器の最大仕様を入射エネルギー 10.5 MeV，入射電流 100 mA とする時，500 kV 電子銃と組み合わせて，これを実現するために必要な入射用超伝導加速器の空洞台数と空洞当たりセル数を検討した．加速勾配やカップラー入力パワーに余裕を持たせ，運転の自由度を確保できる構成として，2セル空洞を3台並べることにした．このとき，10.5 MeV 100 mA の入射ビームを得るための加速勾配は 14.7 MV/m，カップラーパワーは 170 kW となる（空洞1台あたり2つのカップラーの構成）．実際の運転では，低エミッタンスビームの最適条件を満たすために空洞ごとの加速電界を増減する可能性があるが，これにも対応可能な構成である．

コンパクト ERL 入射器用の2セル空洞は，ILC に向けた研究開発である KEK STF BL (ベースライン) 用の9セル空洞の基本設計を踏襲して形状を決定した．ビームパイプは直径 88 mm とし，STF BL の9セル空洞 (84 mm) よりもやや大きくしている．大きなビームパイプ径は，入力カップラーのカップリングを大きくするためである．入力カップラー(同軸型)は機械的に取り付け可能な最もセルに近い位置とし，セル端から 65 mm に取り付け設計である．**図 T** は，入射器用2セル空洞の試作機の高周波特性の測定の様子を示したものである．

大電力に対応した入力カップラーは，大きな開発課題である．ERL 入射器の入力カップラーに求められる仕様は， p 100 mA の電子ビームの連続加速に必要な RF パワーを空洞に供給できること， Q 電子ビームのエミッタンスを小さく保つために，空洞内の電場に余分な擾乱を与えないこと， r ビーム電流を可変とするための機構を備えていることなどである．入力カップラーは，空洞(真空)と RF 伝送線(大気，絶縁ガス)を仕切るための RF 窓を持っている．RF 窓には高周波を透過するセラミックが用いられる．同軸管型の入力カップラーに用いられる RF 窓は，形状

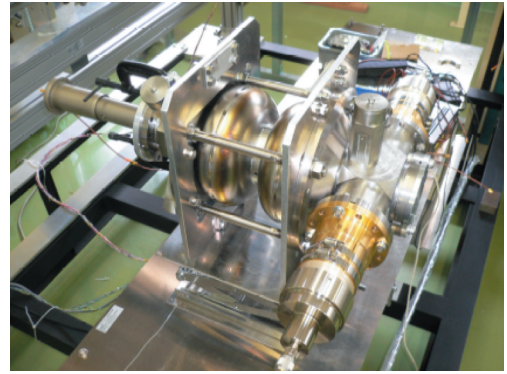


図 T 入射器用超伝導空洞 (2セル空洞) の高周波特性の試験．



図 U 入射器超伝導空洞用の入力カップラーの試作機．同軸型のセラミック窓を備えている．

により二通りに分けられる．一方は，円筒型のセラミックを用いる方式であり，Cornell-ERL (1.3 GHz, 61 kW)，LHC (0.4 GHz, 500 kW) など採用されている．もうひとつは，同軸管の内導体と外導体の間にセラミック板を嵌め込んだ RF 窓 (同軸窓) を用いる方式で，KEK B (0.5 GHz, 800 kW)，SNS (0.8 GHz, 550 kW, 1.3 ms, 60 Hz) で運用実績があり，KEK STF の BL (ベースライン) 空洞 (1.3 GHz, 350 kW, 1.5 ms, 5 Hz) でも採用されている．

われわれは，KEK TRISTAN に始まり多くの経験を積んできた同軸窓方式を採用し，ERL 入射器用の入力カップラーを開発することとした．カップラーが供給できる RF パワーは，セラミック窓の熱負荷で制約される．過去に開発したカップラーの実績を同軸窓の面積でスケールすると，ERL 入射器 (1.3 GHz) の入力カップラーでは最大 500 kW，標準的な運転で 250 kW の RF パワーを供給できる性能が得られる見込みである

図 v は, 試作した ERL 入射器空洞用入力カップラーである. cold window を省略し warm window のみの構造とし, 大電力の RF を CW で投入できるように内導体は水冷構造としている. また, STF BL 空洞と同様にカップリングの値は固定である.

ビームパイプにカップラーを取り付けると, ビーム軌道における電場の軸対称性が崩れるために電子ビーム運動に悪影響を与え, エミッタンス増大, 軌道の偏差をもたらす可能性がある. ERL 入射器では, 2 台の入力カップラーを対向して取り付け, カップラーの作る電場の擾乱の対称性を高めることで, ビームエミッタンスの増大を小さくしている.

C D 主加速器用超伝導加速空洞

ERL の主リニアックは, 1.3 GHz の加速周波数で, 加速勾配として 15 20 MV/m が必要である. 高周波電磁場は連続的 (CW) に励振されるため, 超伝導空洞表面での高周波損失が冷凍機システムへの主要な熱負荷となる. したがって, 主リニアック空洞の無負荷 Q 値 (Q_0) が出来るだけ高いことが望ましく, 絶対温度 2 K において少なくとも 1×10^{10} 以上が必要である. さらに, 多数の加速空洞を用いる ERL が安定に動作するためには, 空洞内およびカップラーでの放電等によるトリップが十分少なく安定に動作する必要がある. また, クライオスタットに組み込んだ状態で微小振動 (マイクロフォニックス) による共鳴周波数のデチューニングが小さいことも重要である.

主リニアックの空洞内には加速ビームと減速ビーム (最大で 100 mA ずつ) が通過する. これらのビームを Beam Breakup (BBU) と呼ばれる不安定性を起こさずに加減速するためには, 空洞内の高次モード (HOM) を適切に減衰させる必要がある. 主加速器空洞の設計では, HOM の効率的な減衰が最大の課題である. われわれは, r 空洞形状の最適化, q ビームパイプ径の最適化, s 偏心フルートの採用, t 低温動作可能な HOM 吸収材を組み合わせることで, HOM の問題を解決する方針である.

われわれは, 当初, 周波数 1.3 GHz (L バンド) における代表的な超伝導空洞である TESLA 空洞をベースに設計を開始した. 空洞形状は TESLA と同じまま, 片側のビームパイプを $\phi 108$ mm に太くし, 高次モードをビームパイプに引き出してマイクロ波吸収体で減衰させる設計 (ERL model-1) をまず検討した. しかしながら, この形状では HOM のインピーダンスが十分に下がらないことがわかったので, 空洞形状を含めて設計の改良を行った (ERL model-2)¹¹⁾.

改良した空洞 (ERL model-2) を図 v に示す. まず

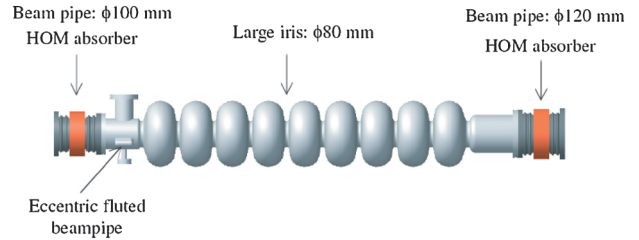


図 v 主加速器超伝導空洞 (9 セル空洞) の形状. HOM の効率的な減衰を得るために, アイリスとビームパイプ径を大きくし, 偏心フルート, HOM 吸収体 (フェライト) を備えている.

セル間のアイリス径を大きくすることで, 問題となっていた dipole modes を有効に減衰できることがわかったので, TESLA 型の $\phi 70$ mm から $\phi 80$ mm まで大きくした. アイリス径をこれ以上大きくすると, 加速モードのシャント・インピーダンスの低下が大きくなり, 好ましくないと判断した. 次にアイリス径を変更したことで, 加速モードの周波数を 1.3 GHz に調整する必要が生ずるが, TESLA 型空洞の形状をそのままスケールすると, TM₀₂₀-like モードのパスバンドがバンチの繰り返し周波数 (2.6 GHz) を横切ることがわかった. このため赤道部付近の形状をやや潰した形に変更し, TM₀₂₀-like モードのパスバンドが 2.6 GHz から 40 MHz 以上離れるように寸法を調整し, 赤道部の直径を 206.6 mm に選んだ.

ビームパイプの直径もより太くし, 片側を $\phi 120$ mm, 反対側を $\phi 100$ mm に選んだ. 直径 120 mm のビームパイプの遮断周波数を全ての monopole と dipole 高次モードのパスバンドより低く選んであり, 高次モードを有効に引き出して減衰させることができる.

電磁場の固有モード計算で評価された高次モードインピーダンスを用いて BBU の閾値をシミュレーションで予測した¹²⁾. シミュレーションでは, 入射エネルギー 10 MeV, 周回エネルギー 5 GeV, 空洞数を 248 台とし, 主加速器中に 30 台の四極磁石 (トリプレット) を配置した. BBU の閾値電流が大きくなるように四極磁石の強さを決定した後, 周回のベータatron位相進みを変えながら BBU の閾値電流を計算した. 図 w に示すように, ERL-model-2 空洞では 600 mA 以上の BBU 閾値電流が得られ, 5 GeV 100 mA の次世代 X 線放射光源の仕様を十分に満たすことが確認された.

つぎに, 主加速器用の入力カップラーについて述べる. ERL の主加速器ではエネルギー回収が行われる

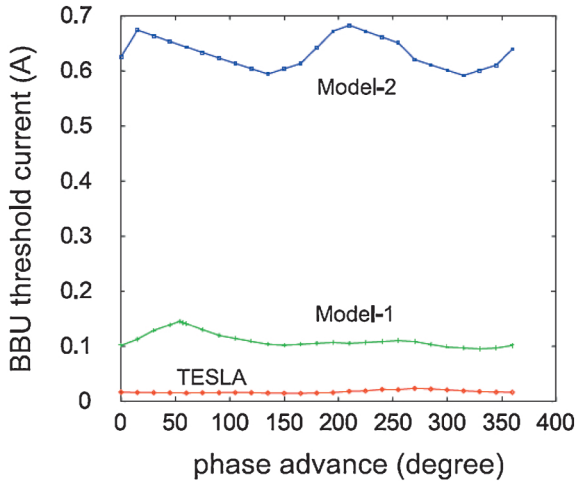


図 W 5 GeV ERL 放射光源における BBU 閾値電流の計算結果。横軸は周回軌道のベータatron位相進みである。ERL に開発した Model-2 空洞では、運転電流 (100 mA) に比べて十分に大きな閾値電流が得られている。

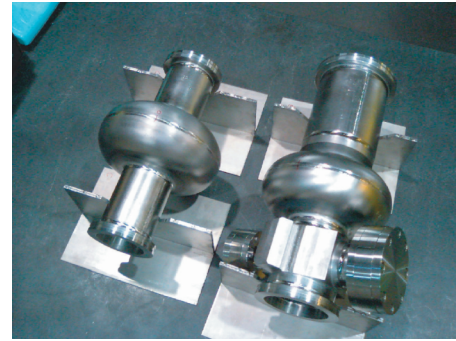


図 X 主加速器用超伝導空洞の試作機。センターセル空洞 (左) とエンドセル空洞 (右)



図 A@ 主加速器用超伝導空洞 (9セル) の試作機

ためビーム負荷はほぼゼロであり、空洞に入力する RF 電力は原理的にはほぼ不要となる。しかし、超伝導空洞ではマイクロフォニックスと呼ばれる現象により空洞の共鳴周波数がデチューニングされるため、それによる RF 電圧の変動を補正するために電力が必要である。負荷 Q 値 (Q_L) を大きく設定すると、デチューニングのない空洞の励振に必要な RF 電力は小さくなるが、共鳴帯域が狭くなるのでマイクロフォニックスによるデチューニングの影響を受けやすくなる。つまり、デチューニングを補償するのに大きな RF 電力が必要になる。したがって、実際の設計では、デチューニング量のピーク値を見極めた上で、余裕をもってカップラーの外部 Q 値を設定することが、多数の空洞を使用する実用機では重要である。

コンパクト ERL では、空洞当たり最大 20 kW の入力電力で、50 Hz ピークまでのデチューニングに耐えられるように、外部 Q 値を 2×10^7 に選んだ。もし想定した値よりもマイクロフォニックスが小さければ、より高い外部 Q 値に設定し、RF 電力を節約することも検討する。また、空洞用のクライオスタットの開発では、できるだけマイクロフォニックスを減らす工夫が重要である。

KEK ではリニアコライダー (ILC) 向けに入力カップラーを開発しており、既にピーク電力 1 MW (パルス幅 1.5 ms, 5 Hz) までの試験に成功している¹³⁾。この設計を元に 20 kW 以上の CW 通過電力に対応できるよう変更を加え、ERL 用の入力カップラーを設計した。主要な変更点は、同軸部の特性イン

ピーダンスを 50Ω から 60Ω に変更して内導体での電力損失を減らしたこと、誘電体損失が小さい 99.7 純度のアルミナセラミックスを窓材に採用した事が挙げられる。大気中から真空中に RF を導入するセラミック窓は低温部と高温部の 2 段構成とし、作りやすさの点から 2 つを同一寸法とした。内導体は冷たいガスを流して冷却される。外部 Q 値を $5 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7$ の範囲で変更できるように外導体にベローズを備え、内導体を ± 5 mm の範囲で可動にする。現在カップラーの試作を進めており、テストスタンドで CW 30 kW までの大電力試験を行う準備を進めている。

これまでに、主加速空洞の試作機を 3 台製作した。1 台目は中央部のセル形状にビームパイプを取り付けた単セル空洞 (センターセル空洞) である。2 台目の空洞は、エンドセルの形状に偏心フルートやカップラー用ポート付きのビームパイプを取り付けた単セル空洞 (エンドセル空洞) である。これは主に複雑なビームパイプ部分の製造技術の確立と性能試験が目的である。3 台目は 9 セル空洞である。これら 3 台について表面処理、冷却試験、電界測定 (縦測定) を進めてきた。

センターセル空洞、エンドセル空洞の縦測定では、温度 2 K において、それぞれ 37 MV/m, 30 MV/m の加速電界を発生することができた。また、20 MV/m において 1×10^{10} の Q 値を得た。これらの結果は、ERL 主加速器の仕様を満たすものである。この結果から、空洞形状を TESLA 空洞から変更したにもか

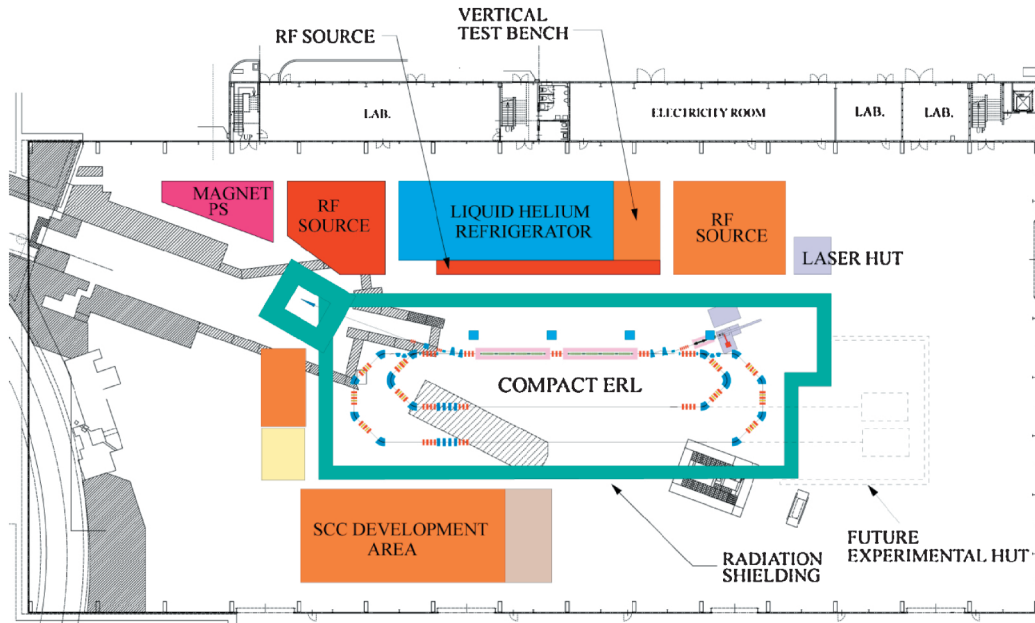


図 AA 東カウンターホールにおけるコンパクト ERL のレイアウト (検討図).

かわらず、マルチパクタ等の深刻な問題はない事がわかった。

一方、9セル空洞の縦測定では、17 MV/m を超える電界でフィールドエミッションによる Q 値の低下が見られた。フィールドエミッションの箇所として、アイリス部の微小な突起が特定されたので、この突起を削り取った後に再測定を予定している。また、アイリス部の電界が小さくなるような形状の修正も検討している¹⁴⁾。

また、HOM 減衰用のマイクロ波吸収体（フェライト）については、低温下における複数の材料の特性測定を行い、所要の性能が得られる見込みを得た¹⁵⁾。さらに、9セル空洞を2台収納できるクライオモジュールの設計と製作に既に着手しており、2012年までに主加速器モジュールの完成を予定している。

D コンパクト ERL の建設

われわれは、ERL 型次世代放射光源の要素技術の統合的な動作試験を目的として、コンパクト ERL (実証機) の建設を行うこととした。コンパクト ERL の建設場所として、高エネルギー加速器研究機構の 12 GeV 陽子シンクロトロンの実験ホール（東カウンターホール）を選定した。現在、旧機器の撤去とインフラ（受電系統、冷却水、ヘリウム冷凍機）の整備を進めている。

東カウンターホールにおけるコンパクト ERL および周辺機器のレイアウトを図 AA に示す。ここでは、

周回軌道を二重にして最大エネルギーを 240 MeV とする例を示している。レイアウトは検討途中のものであり、最終的に変更する可能性もある。

コンパクト ERL の建設工程は、主要機器の設置を 2011～2012 年に行い、その後、コミッションングに入る予定としている。コンパクト ERL の建設と運転の主たる目的は、ERL 放射光源の実現に向けた加速器技術の実証であるが、これに加えて、将来的には、コンパクト ERL を光源として利用することも計画している。レーザ・コンプトン散乱による X 線の発生、コヒーレント放射によるテラヘルツ光の発生が可能である。また、二重周回でエネルギーを増大すればアンジュレータによる VUV の発生も視野に入る。

E まとめ

エネルギー回収型リニアックによる次世代放射光源の実現を目指した取り組みは、2005年10月のキックオフミーティング、2006年4月の KEK ERL 計画推進室の設立に始まった。その後、国内研究機関から多くの研究者が共同チームに加わり、多岐にわたる要素技術の研究開発を精力的に展開してきた。これら技術の統合的な動作試験を行う実証機として、コンパクト ERL の建設が始まろうとしている。

本稿では、要素技術の中心的な課題である電子銃と超伝導空洞について、ERL 放射光源の要求、これを達成するための取り組み、開発の現状を述べた。紙幅の都合で書ききれなかったが、ビームダイナミクスの

諸問題として、低エミッタンスを実現する ERL 入射器の最適設計、二重周回を含む軌道設計、バンチ圧縮方式の検討なども進めている。

共同チームには 50 名を超えるメンバーが参加しているとはいえ、世界に例のない 100 mA 級の ERL 装置の実現には解決すべき課題も多く残されており、検討の足りない部分もあるだろう。加速器学会員諸氏からの助言と力添えをお願いしたい。

ERL 次世代放射光源の研究開発は、複数の研究機関に所属する多くの研究者からなる共同チームにより実施されている。共同チームの取りまとめ役として研究の推進に尽力されている ERL 計画推進室長の河田洋教授、推進室コーディネーターの佐藤康太郎教授、春日俊夫教授に感謝を申し上げる。

本稿では共同チームを代表して全体設計を担当する 4 名が共著者となったが、個々の要素技術開発は以下のメンバーによるものである。

電子銃 永井良治、西森信行、飯島北斗、羽島良一 (JAEA)、山本将博、本田洋介、武藤俊哉、宮島司 (KEK)、栗木雅夫 (広島大)、中西疆、奥見正治、桑原真人、宇治原徹、竹田美和 (名古屋大)

ドライブレーザ 中村典雄、伊藤功、小林洋平 (東大)、吉富大、鳥塚健二 (AIST)

入射器超伝導空洞 野口修一、加古永治、宍戸寿郎、佐藤昌史、渡辺謙、山本康史 (KEK)

主加速器超伝導空洞 古屋貴章、梅森健成、阪井寛志 (KEK)、沢村勝 (JAEA)、篠江憲治 (東大)

参考文献

- 1) Sol M. Gruner et al., "Energy recovery linacs as synchrotron radiation sources", *Rev. Sci. Instr.* **73**, 1402 (2002).
- 2) R. Hajima, "Current status and future perspectives of energy-recovery linacs", Proc. of 2009 Particle accelerator Conference, May 4 8, 2009, Vancouver, Canada.
- 3) ERL 計画推進室ホームページ <http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/index.html>
- 4) 羽島, 中村, 坂中, 小林(編集). "コンパクト ERL の設計研究", KEK Report 2007 7/JAEA-Research 2008 032 (2008).
- 5) C. Hernandez-Garcia et al., "Performance and modeling of the JLAB IR FEL upgrade injector", Proc. of the 26th International FEL Conf., Aug. 29 Sep. 3, 2004, Trieste, Italy, pp. 558 561.
- 6) H. Iijima et al., "Initial emittance measurements from the JAEA 250kV DC gun with a NEA-GaAs cathode", Proc. of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 5 7, 2009, Tokai, Ibaraki, Japan. (to be published)
- 7) R. Hajima et al., "Design and fabrication of a 500-kV photocathode DC gun for ERL light sources", Proc. of 2009 Particle accelerator Conference, May 4 8, 2009, Vancouver, Canada.
- 8) H. Kurisu et al., "Titanium alloy material with very low outgassing", *J. Vac. Sci. Technol.* A21, pp. L10 L12 (2003).
- 9) T. Kawasaki et al., "Development of a Yb-doped fiber laser oscillator for driving an ERL photocathode gun", Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan (August 6 8, 2008, Higashihiroshima, Japan)
- 10) S. Noguchi et al., "Development of 2-cell SC cavity system for ERL injector linac at KEK", Proc. of 2009 Particle accelerator Conference, May 4 8, 2009, Vancouver, Canada.
- 11) K. Umemori et al., "Design of L-Band Superconducting Cavity for the Energy Recovery Linacs", Proc. of 2007 Asian Particle Accelerator Conference, Jan. 29 Feb. 2, 2007, Indore, India.
- 12) R. Hajima et al., "Analysis of HOM BBU with Newly Designed Cavities for a Multi-GeV ERL Light Source", Proceedings of ERL 07 Workshop, May 21 25, 2007, Daresbury, UK.
- 13) E. Kako et al., "Construction of the Baseline SC Cavity System for STF at KEK", Proc. of 2007 Particle Accelerator Conference, June 25 29, 2007, Albuquerque, USA.
- 14) H. Sakai et al., Proc. of ERL 09 Workshop, June 8 12, 2009, Ithaca, USA. (to be published)
- 15) M. Sawamura et al., Proc. of the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 5 7, 2009, Tokai, Ibaraki, Japan. (to be published)