

RECENT PROGRESS OF CONSTRUCTION FOR COMPACT ENERGY RECOVER LINAC

Yukinori Kobayashi^{A)}, Shogo Sakanaka^{A)}, Kotaro Satoh^{A)}, Toshio Kasuga^{A)}, Hiroshi Kawata^{A)},
Ryoichi Hajima^{B)}, Norio Nakamura^{C)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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

^{B)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

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

^{C)} 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 with a potential of the oscillating type for x-ray free electron laser. We are constructing the R&D machine which is called the compact ERL including the developments of an ultra-low emittance electron gun and superconducting cavities for both the injector and the main linacs under the collaboration between KEK, JAEA, ISSP, and other institutes. In this paper, we report recent progress of the construction for the compact ERL with a repair of a KEK east counter hall.

コンパクトERL建設の進捗状況

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が、次世代放射光源として近年注目を集めている[1]。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、周回部で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ダンプする。すなわち、ERLは電子ビームの周回部での周回を1回から数回に限定することで、従来の放射光源として用いてきた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分散が物理的な過程(放射励起と放射減衰の平衡状態)で決定されないという特徴を有している。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、放射光源としては、従来蓄積リングでは限界といわれてきた10 pm-radの領域の超低エミッタンスまでビーム性能を進化させる事が可能になる。さらに、最近ではERLが超高輝度光源、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となりうる可能性を有しているということでも放射光ユーザの注目を集めている[2-3]。

ERL放射光源を実現するための加速器要素開発としては、第1にCW運転可能な高輝度大電流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である。超伝導空洞には2種類のタイプがあり、エネルギー回収がない入

射器リニアック用空洞とエネルギー回収がある主リニアック用空洞である。どちらも1.3 GHzの加速周波数で高電界(15~20 MV/m)を目指す。入射器用はエネルギー回収がないため大電力の入力カップラーの開発も重要であり、一方主リニアック用はHOM-BBU対策のためHOMダンパーの開発も同時に行う必要がある。その他、フォトカソード電子銃を励起するための1.3 GHz高繰り返しCW大電力ドライブレーザ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鋭意進めており、さらに小型の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、昨年度後半から本年度にかけて本格的に建設に入ったところである。本稿では、コンパクトERLの進捗状況として、加速器要素開発の現状、コンパクトERLの建設状況とビーム開始までの今後の予定について述べる。

2. 加速器要素開発の現状

2.1 フォトカソードDC電子銃の開発状況

ERL用の電子銃は、平均電流10~100 mAを得ようとする、バンチ当たりの電荷7.7~77 pC、繰り返し1.3 GHz (CW)の電子を発生しなければならない。一方で、規格化エミッタンス0.1~1.0 mm-mradの超低エミッタンスの電子バンチを生成する必要があり、

非常にチャレンジングな要素開発である。これらの性能を実現するため、負の電子親和力(NEA)表面を用いるフォトカソードDC電子銃が現時点で最も有力な候補であると考え、我々はその開発に取り組んできた。すなわち、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て込むことにより、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している。

我々は、この要求を満たす電子銃の開発を二段階に分けて進めてきている。まず、第一段階は、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電子銃の基本的な技術を獲得するとともに、NEAフォトカソードの作成・性能測定をすすめた[4]。そして第二段階として、極低エミッタンス実現に必須と予想している、より高電圧の500 kV電子銃の開発に取り組むこととした。現時点では、250 kV電子銃の開発と運転は概ね順調に進み[5]、開発の中心は500 kV電子銃に移っている[6-8]。しかしながら、これまでに運転実績のあるDC(CW)電子銃は、JLAB-ERLの350 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の一つは、DC 500 kVを安定に保持できるセラミック管である。セラミック管に必要な性能としては、(1)内面からの2次電子放出が少ないこと、(2)一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)極高真空の障害となるアウトガスが少ないことなどである。我々は、このような性能を得るため、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1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既に完了した。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。既に納品が済み、最近サポートロッド無しで550 kVの印加に成功し、安定に電界を保持できることを確認した[6]。

一方で、フォトカソード電子銃に用いるドライブレーザーの開発も進行している。そのレーザー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以下のレーザーで駆動可能で

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ー技術を勘案して、我々は、Ybドープファイバーレーザーの2倍波(530 nm)を利用することとし、これに必要な技術開発に取り組んだ。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レーザーの出力は23 Wである。ファイバーレーザーは、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。ファイバーレーザーオシレータでは、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。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[9]。



図1 : 500 kV-ERL 電子銃 (左) と 250 kV-JAEA-FEL 電子銃 (右) とともに分割型セラミック管

2.2 超伝導加速空洞の開発状況

(1) 入射器用超伝導空洞

入射リニアック用超伝導空洞は、入射器の最大エネルギーを10.5 MeV、ビーム電流値を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空洞台数と空洞当たりセル数の最適化を行って設計した。その結果、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台並べることとした。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に取り付ける設計である。

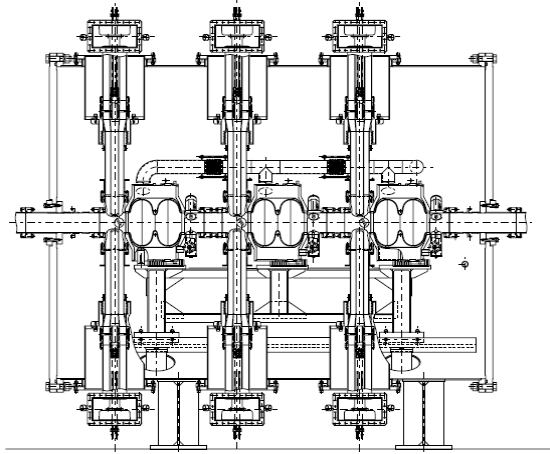


図2：入射リニアック用クライオモジュールの概念図

本年度から、クライオモジュールの設計・製造に入り、3年後の完成を目指す(図2) [10]。一方で、入力カップラーのハイパワー用テンストベンチを放射光施設電源棟に用意し、9月後半から試験を開始する。そのための準備として、クライストロン、RF電源、サーキュレータ、冷却水、電力系統の整備などを進めている[11]。

(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(図3)。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。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[12]。さらに、入力カップラーの開発[13]および9セル空洞を2台収納できるクライオモジュールを設計と製作に着手しているところである。2012年までにモジュールが完成することを予定している。



図3：主リニアック用超伝導加速空洞（9セル）

3. コンパクトERLの建設状況

我々は、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[14]。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4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[15]。

4. 今後の予定

繰り返しになるが、本年度から本格的にコンパクトERL建設の段階に入った。今後2~3年間をかけて主要な機器の製造を行い、2010年3月に加速器を設置する東カウンターホールの改修が終了する。入射器の加速器要素および主リニアックの9セル2空洞のクライオモジュールの製作も本格的に開始し、後は周回部の電磁石・真空系、ビーム診断系、放射線シールド等が用意できれば、2012年頃からコンパクトERLのビーム運転を開始することが可能となる。実機のERL放射光源については、ビーム試験がある程度順調にいった2014年前後を、建設開始の目標としている。

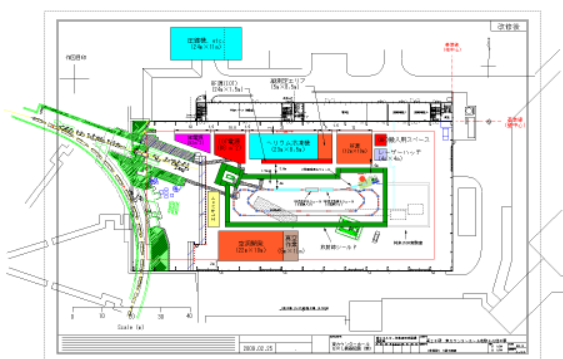


図4：コンパクトERLの東カウンターホール配置図

5. 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”, CHESSTechnical Memo 01-003/JLAB-ACT-01-04 (2001).
- [2] K.-J. Kim et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 244802 (2008).
- [3] 羽島良一、他、“ERL放射光源における共振器型XFELの発振特性”、本プロシーディングス、WPLSA05.
- [4] 桑原真人、“ERL放射光源用電子銃のためのフォトカソード開発”、本プロシーディングス、WOPSB03.
- [5] 飯島北斗、“JAEA250kV電子銃におけるNEA-GaAsからの初期エミッタンス計測”、本プロシーディングス、FPPSA16.
- [6] 永井良治、他、“ERL放射光源用500kVDC電子銃の高電圧印加試験”、本プロシーディングス、FPPSA09.
- [7] 西森信行、他、“ERL放射光源用500kVDC電子銃の光陰極準備システムと高電圧真空容器の開発”、本プロシーディングス、FPPSA10.
- [8] 山本将博、他、“KEKにおけるERL放射光源用500kVDC電子銃の開発”、本プロシーディングス、FPPSA08.
- [9] 伊藤功、他、“ERL電子銃励起用リニアキャビティ型Ybファイバーレーザーオシレータの開発”、本プロシーディングス、WPLSA04.
- [10] 渡辺謙、他、“ERL入射器用超伝導空洞システムの開発”、本プロシーディングス、WOACB04.
- [11] 福田茂樹、他、“KEKにおけるcERLシステムのRF源”、本プロシーディングス、TOACC05.
- [12] 沢村勝、他、“ERL用HOMダンパーの開発”、本プロシーディングス、FPACA03.
- [13] 阪井寛志、他、“ERL主リニアックのための1.3 GHz入力カプラーの開発”、本プロシーディングス、FPACA01.
- [14] 坂中章悟、他、“コンパクトERL建設に向けた東カウンターホールの改修の現状”、本プロシーディングス、WPCEA06.
- [15] 島田美帆、他、“コンパクトERLのラティス設計”、本プロシーディングス、WPLSA03.