

話 題

コンパクト ERL の概要と開発状況

春日 俊夫*

The outlines of the Compact ERL and the present status of development

Toshio KASUGA*

Abstract

A 5 GeV class Energy Recovery Linac (ERL) is a promising device for future light sources. In order to realize a light source of this kind, it is essential to demonstrate the ERL scheme. We have decided to build a small test facility, the Compact ERL (C-ERL) for this purpose. The C-ERL is outlined and the status of its development is reported.

序

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 物質構造科学研究所放射光科学研究施設においては、1982 年から放射光専用の 2.5 GeV 電子蓄積リング PF を、また 1986 年からは 6.5 GeV 電子蓄積リング PF-AR を運転し、全国の放射光利用者に実験機会を提供してきている。PF が第二世代の放射光源としてスタートしたときのエミッタンスは約 400 nm-rad と大きな値を持っていたが、その後 2 回の改造によりユーザー運転時のエミッタンスは 36 nm-rad まで改善されている。さらに、2005 年の改造により、挿入光源を組み込むための直線部が新たに生み出され、あるいは従来からある直線部のフリースペースが拡張され、より長い挿入光源を組み込むことが出来るようになった¹⁾。AR は、最初は素粒子実験用の TRISTAN 電子・陽電子衝突リングのための 8 GeV ブースターとして建設されたが、“parasitic” に放射光利用が行われてきた。AR は蓄積リングとして建設されたものではなかったため、放射光源としての性能は劣悪なものであった。KEKB においては、ブースターを必要としないデザインがとられたため、2001 年に放射光専用化のための最低限の改造が行われ、愛称も PF-AR と改称されている。このリングはほぼ常時単バンチ運転が行われており、時間分解実験のための有力なマシンとなっているが、エミッタンスは約 300 nm-rad と大きな値を持っている。KEK の線形加速器はこれらの 2 つの放射光源リングと KEBK の 2 つのリング (電子蓄積リ

ング HER と陽電子蓄積リング LER) の計 4 リングに電子あるいは陽電子を供給している。これらのリングへの入射をスムーズに行うための改造が進行中で、PF は KEBK の 2 リングと同時に入射を行う目処がつき、PF も Top-up 運転が行われようとしている²⁾。この様な不断の改良により、PF は第三世代の光源にかなり近くなってきているし、PF-AR は輝度の観点からは最新鋭のマシンに遠く及ばないが、単バンチ専用マシンとして特徴ある地位を占めている。

しかしながら、両光源とも最新鋭の光源とは基本性能上比肩すべくもなく、また運用開始後 20 数年が経過し老朽化が目立ち、且つ建設時には認識されていなかった様々な問題 (例えば建物の変形や振動の問題など) が顕在化してきた。その中には上記の改造・改良作業で克服されたものもあったが、対応が不可能な問題もある。この様な状況の下で 1997 年頃から次期放射光源の建設の可能性を議論してきた。この検討の中では次のようなことが議論された³⁾。

1. 現存する放射光源でできない新たな研究の可能性を切り開く能力を有すること。
 2. 多分野にわたる現在の放射光ユーザーの研究も現状あるいはさらに発展した形で実施できる能力・容量を持つこと。
 3. X 線領域から軟 X 線領域の放射光を供給でき、物質の原子レベルでの構造及び電子状態の研究の両方をサポート出来る能力を持つこと。
- 別の言葉で言えば、物質研究用ツールとしての先端的な性能を要求する研究と、汎用的なツールとして利用

* 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所 Institute of Materials Structure Science, KEK
(E-mail: kasugat@post.kek.jp)

する研究を適切なバランスを持ってサポート出来ることが強く意識されている。これらの条件を満足する光源として 5 GeV クラスのエネルギー回収型線形加速器 (Energy Recovery Linac, ERL) が提案された。これは ERL が蓄積リングの特長“大電流”と線形加速器の特長“低エミッタンス”, “短パルス”を併せ持つ加速器だからである。

一方, 日本放射光学会の「次世代光源検討特別委員会」では, 究極を目指す光源計画として XFEL の重要性を認めると同時に, 先端的基盤設備としてのリング型光源計画の策定と推進を求める報告書を示し, 「先端的リング型光源計画特別委員会」では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 が最有力であると結論し, その研究開発を早急に着手すべきと提言した。これらの議論と並行して, 高エネルギー加速器研究機構 KEK, 日本原子力研究開発機構 JAEA, 東京大学物性研究所 ISSP は ERL 型放射光源の開発研究を推進するための研究協定を締結した。

ERL は加速器技術的には未開拓な分野である。特に想定される 5 GeV クラスの ERL は, 克服すべき種々の加速器物理・技術上の課題があると共に, 建設費用や運用のための費用は極めて大きくなる可能性がある。これらの課題を克服するため, あるいは建設費, 運用費を適正な範囲に収めるための研究が不可欠である。この観点から, 5 GeV クラスの実機を建設する前に 100 MeV 内外のエネルギーを持った ERL 実証機の建設が必要であると判断した。次節以下で述べるが, 種々の制約からこの ERL 実証機の電子エネルギーは最初 60 MeV 程度から出発することになると思われる。ここでは触れないが, この程度の電子エネルギーがあればある種の放射光利用は可能であるものと思われる。実証機を実用光源としても利用しようという観点からこれを“Compact ERL” (C-ERL と略記) と呼ぶことにした。C-ERL 建設を通して要素技術の開発を行い, 運転・マシンスタディを通して, 5 GeV クラス実機的设计・建設につなげていく。

1. で C-ERL の位置付け及び構成を簡単に述べ, 2. から 8. まですべて C-ERL を構成する幾つかの構成要素の仕様と開発状況を概観した。ただし検討は進めているものの触れなかったものも多い。9. で想定される建設場所を, 10. で開発のスケジュールについて述べる。ERL の応用は放射光源のみにとどまらないが⁴⁾, ここでは放射光源としての側面のみを記述し, 他の応用には触れなかった。C-ERL に関する概念設

計の報告書⁵⁾が完成している。詳細については同報告書に委ね, ここでは C-ERL の概要と開発状況を概観するにとどめる。図等は, 同報告書のものを使用している。

上記のように C-ERL の開発は KEK, JAEA, ISSP の間で研究協定を結び推進している。さらに, この研究開発のために, 上記研究機関以外に産業技術総合研究所 AIST, 自然科学研究機構分子科学研究所 IMS, 名古屋大学, 高輝度光科学研究センター, 広島大学の多くの研究者が参加している。

1. C-ERL の位置づけ

将来光源を検討する中で, この光源の持つべき性能として

1. 光子エネルギー 30 eV から 30 keV の領域をカバーし,
2. 光子エネルギー 1-10 keV 領域で 10^{22} - 10^{23} photons/s-mm²-mrad²-0.1% バンド幅の brilliance をもち,
3. 光子エネルギー 10 keV で回折限界となるようにするために, 電子ビームのエミッタンスが 10 pm-rad 程度であり,
4. 100 fs 程度の短い光パルスを利用できる。

ことが挙げられた。前述のように, これらの条件を満足する光源として 5 GeV クラスの ERL が想定された。通常の蓄積リングとは異なり, 仮に途中でのビームの“質”の劣化がなければ, ERL では規格化エミッタンスが保存される。現時点では実現できていないが, 規格化エミッタンスが 0.1 mm-mrad で 10 mA ないし 100 mA の電流を出すことの出来る 500 keV の電子銃が実現できれば, 5 GeV では約 10 pm-rad のエミッタンスが得られ上記の条件を満足することが出来る。さらに, バンチ長 1 ps のバンチが入射できれば, ERL 周回部でバンチ圧縮を行うことにより 100 fs 程度のバンチが得られる。表 1 に, 5 GeV クラスの ERL 実機の基本パラメータを C-ERL のパラメータと共に示す。

表 1 5 GeV クラス ERL 実機と C-ERL の主なパラメータ

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

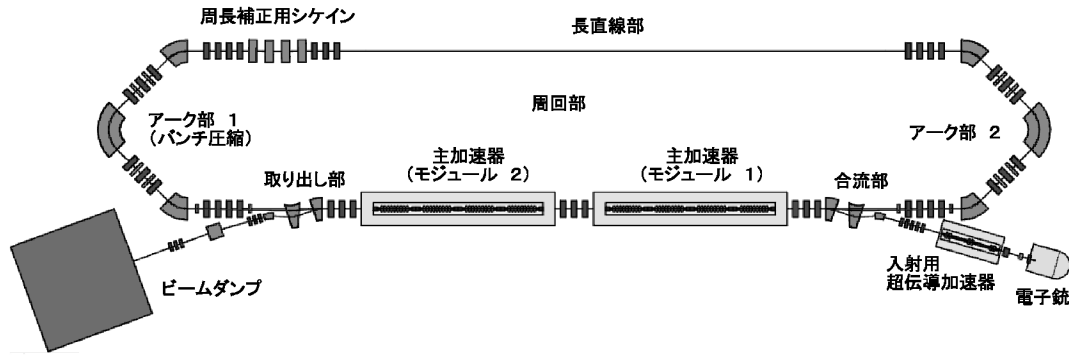


図 1 C-ERL の概念図

表 1 に示すように、電子エネルギーを除けば C-ERL の仕様は、5 GeV クラス ERL 将来光源（以後実機と略記することがある）の仕様と同一であり、C-ERL を構成する加速器要素の全てが実機と共通である。従って、C-ERL の建設と設計どおりの運転が行われれば、実機を実現するための技術的障壁はクリアされたことになる。

図 1 に実証のための C-ERL の概念図を示す。C-ERL は約 40 m × 10 m のサイズであり、電子銃、入射用超伝導加速器、合流部、主超伝導加速器を含む周回部、取り出し部、及びビームダンプ部からなる。電子銃からのビームは入射用超伝導加速器で 5 ないし 10 MeV まで加速され、合流部を通し周回部にはいり主加速部で 60 ないし 85 MeV まで加速される。周回してきたビームは再び主加速部にはいり今度は減速を受け、ここで受け取った全てのエネルギーを加速部に返し、入射時のエネルギーに戻り取り出し部を通過してビームダンプ部に捨てられる。前記のように、周回部のアーク部によりバンチ圧縮を行う。なお、主加速部のモジュールを追加（初期の運転ではモジュール 1 台での運転を考えている）すれば、最大 200 MeV 程度の周回エネルギーも可能である。表 2 に C-ERL を構成する各部のパラメータを示す。

実機開発のための C-ERL を利用してのビーム運動学の実験的研究が一段落すれば、C-ERL の放射光利用も視野に入ってくる。現時点では、レーザーコンプトン散乱によるフェムト秒 X 線、大強度テラヘルツ光の利用などが想定されている。また、将来光源での極短光パルス利用のための技術開発も重要な課題となろう。ここでは、C-ERL の光源としての利用法についてはこれ以上述べない。

表 2 C-ERL のパラメータ

電子ビーム	
周回エネルギー	60–85 MeV
平均電流	10–100 mA
バンチ繰返し	1.3 GHz
規格化エミッタンス	1 mm-mrad (77 pC) 0.1 mm-mrad (7.7 pC)
エネルギー広がり (rms)	$< 3 \times 10^{-4}$
バンチ長 (通常モード)	1–3 ps (rms)
(バンチ圧縮モード)	100 fs (rms)
電子銃	
加速電圧	500 kV
入射用超伝導加速器	
セル数・空洞数	2 セル・3 空洞
加速勾配	7.4 (14.7*) MV/m
加速電圧	5(10*) MV
主超伝導加速器	
セル数・空洞数	9 セル・4 空洞
加速勾配	15–20 MV/m
加速電圧	55–80 MV
周回軌道	
合流部	3 ダイポール型
アーク部	TBA
周長	70 m
冷凍・液化機	
冷凍能力	600 W at 4.4 K

* 50 mA 以下の低電流での運転

2. 電子銃とドライブレザー

2.1 電子銃本体

表 2 に示したように、繰返し 1.3 GHz の運転において、平均電流 100 mA (77 pC バンチ) で規格化エミッタンス 1 mm-mrad、平均電流 10 mA (7.7 pC

バンチ) で規格化エミッタンス 0.1 mm-mrad を達成することを目標とする。電子銃の構成としては負の電子親和力 (Negative Electron Affinity; NEA) フォトカソードと DC 電子銃の組み合わせが大電流、極小エミッタンスを両立する唯一の方法である。上記目標を実現するため多くの課題がある。すなわち、

1. 小さな熱エミッタンス、高量子効率、長寿命を併せ持つカソード材料の開発、
2. 暗電流の低減のための電極材料と表面処理技術の開発、
3. カソードの長寿命化に必要な超高真空技術、
4. ロードロック、加熱洗浄、表面活性化を含むカソードの輸送とハンドリング技術等、寿命がきたカソードを再活性化するためのシステムの開発、
5. 大電流 Cockcroft-Walton 電源における電圧安定化技術、
6. エミッタンス増大を補償するビーム輸送系構築に必要なビームダイナミクスの理解、

などである。

C-ERL の電子銃は以下の開発シナリオに沿って完成を目指す。フォトカソード DC 電子銃の運転に必要な様々な技術を確認するために、JAEA が所有する物品を利用して 250 kV - 50 mA の DC 電子銃の開発を行う。この電子銃を用いてカソード材料の開発を行う。また、ドライブレザーの開発に合わせて大電流試験を行う。次の段階として 250 kV 電子銃開発の成果を引き継ぎ、 500 kV 電子銃の設計製作を行う。この 500 kV 電子銃を C-ERL に組み込む。

現在 JAEA ERL グループが 250 kV 、 50 mA の電子銃を開発している。図 2 に開発中の電子銃の構成を

示す。前記のように電子銃は 10^{-9} Pa 以下の超高真空が必要であるが、一般的な SUS に比べガス放出が 2-3 桁少ないチタン合金製の真空槽を採用している。

これまでに、Cockcroft-Walton 型高電圧発生部の高圧印加試験、プレパレーションチェンバ、ロードロックチェンバの設計・製作・真空試験、カソード/アノード電極の設計・製作、レーザー導入機構の設計・製作、エミッタンス補償用ソレノイドの設計・製作・磁場測定、電圧リップル要求精度の評価と実現方法の検討などが終了している。平成 19 年度末までにビーム引き出し試験を開始する予定である。

2.2 電子銃ドライブレザー

C-ERL 入射器における電子銃ドライブレザーに必要な性能は、

1. 必要な電子ビーム電流 (100 mA) を発生させるために十分なパワーを有すること、
2. 入射部のバンチャー部を含めて、RF 加速に必要な短いパルス幅の電子ビームを発生させるため、短いパルス列 (20 ps , 1.3 GHz 繰り返し) を発生できること、
3. 光電子を発生させるため、光の波長はカソードのバンドギャップに相当する波長より短いこと
4. 初期エミッタンスとして、ビーム径 (rms) 1 mm において 0.1 mm-mrad を達成できるよう、バンドギャップに十分近いエネルギーに相当する波長であること、

などである。現時点では AIST, ISSP, KEK の共同により電子銃ドライブレザーの開発が端緒に付いたところである。

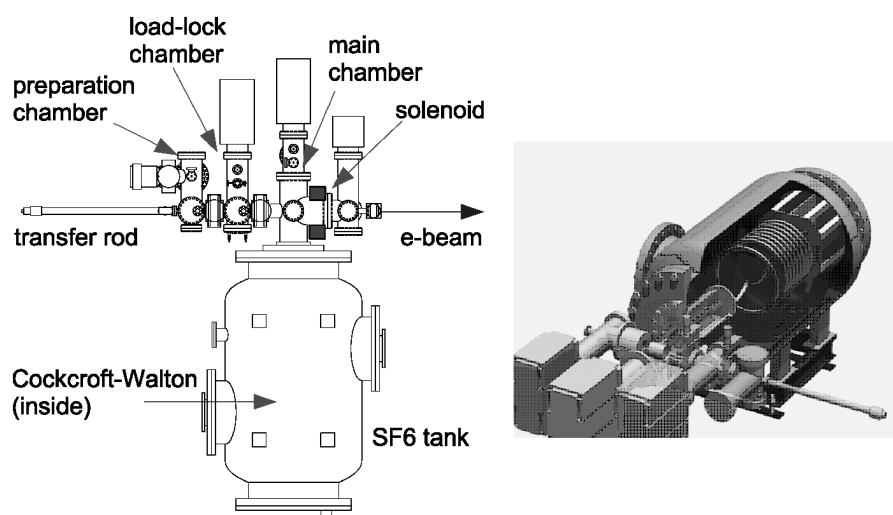


図 2 JAEA で開発中の $250 \text{ kV} \cdot 50 \text{ mA}$ 電子銃

3. 入射用超伝導加速器

入射用超伝導加速器は、電子銃からの電子を5ないし10 MeVまで加速する役割を持つ。主加速器とは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高周波源から供給されなければならない。このための大電力カップラーの開発が課題である。電子ビームが誘起する空洞の“higher order mode (HOM)”を効率よく外部へ取り出すためのHOMカップラーの開発も重要な課題である。また、エミッタンスの増大を起こさない加速器の設計とその実現も重要である。

1.3 GHzの超伝導加速器は、国際Linear Collider (ILC)に向けた開発研究が行われている。これらの成果を最大限に活用しながらC-ERLの開発を進めている。ただし、ERLは基本的には連続運転であり、パルス運転のLinear Colliderとは加速器に要求される仕様と大いに異なる点があり、ERL固有の解決すべき課題も少なくない。

1空洞当たりのセル数及び空洞の数の組み合わせは何種類か想定される。電子銃からの電子は500 KeVのエネルギーで第1空洞に入る。第1空洞では加速と同時にバンチの圧縮が行われる。小さなエミッタンスを得ると同時にバンチ長を制御するためには、第1空洞の加速勾配を適切な値に選ぶ必要がある。第1空洞の加速勾配を低く設定する場合、全体の加速電圧を所定の値に保つためには、第2空洞以下の加速勾

配を高くしなければならない。カップラーパワー、加速勾配に余裕を持ちつつ運転の自由度を確保するためには2空洞よりも3ないし4空洞が望ましい。C-ERLでは2セル空洞を3台用いる。この場合、加速勾配、カップラーパワーは達成可能な値であり、ある程度の運転の自由度も確保できる。

ERL入射器用2セル空洞は、ILCに向けて開発した9セル空洞の基本設計を踏襲して形状を決定した。入力カップラーとしてはKEKで実績のある同軸窓方式のものを用いる。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左右される。過去に開発したカップラーの実績から判断すると、ERLの1.3 GHzの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。

これまで述べた設計に従って、2セル空洞の第1号機を試作中である(図3)。この空洞は2007年度末に納入される予定であり、その後内面検査、プリチューニングを経て、2008年度初頭に縦測定を開始する予定である。

4. 主加速空洞

5 GeVクラスのERL実機の主線形加速器に於いては、長さ約1 mの1.3 GHz帯の超伝導空洞を250-350本使用し、それらを15-20 MV/mの加速勾配で長時間、安定に動作させる必要がある。超伝導空洞技術はERL計画の死命を制する最重要技術の一つであ

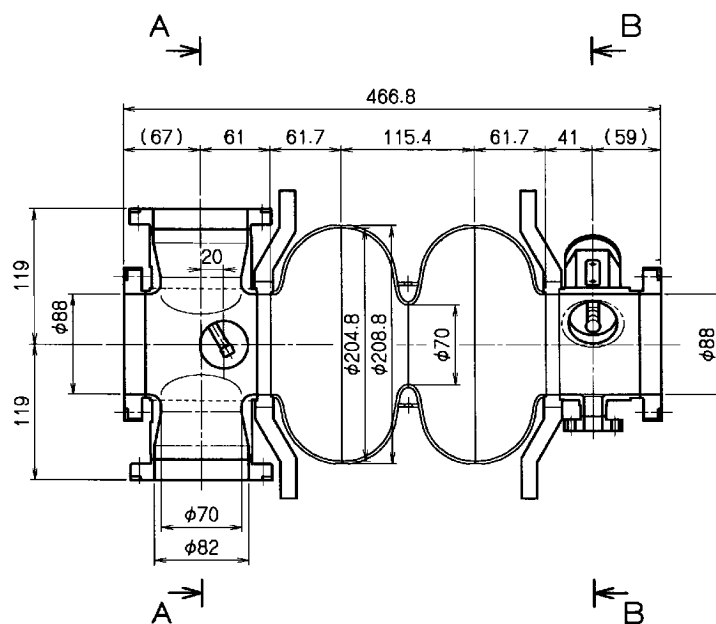


図3 入射用2セル空洞の試作器

る。超伝導主加速空洞の開発課題は

1. CW 運転で加速勾配 15-20 MV/m を安定に発生でき、無負荷 Q 値として 1×10^{10} 以上を達成できる空洞の製造・表面処理技術の確立、
2. HOM の負荷 Q 値を十分に減衰させること、および HOM 吸収体の開発と冷却法の確立、
3. 静的熱侵入が小さく、RF による大きな動的熱負荷に対応したクライオスタットの開発。またマイクロフォニックによる空洞のデチューニングを所定の値以下に抑えるための低振動設計、
4. 入射器用空洞とは異なり大電力は必要ないが、安定かつ結合度を可変にできる入力カップラーの開発、
5. 粗調用の機械式チューナーと高速微調整用のピエゾチューナーの開発、

などである。

TESLA 型空洞に種々の設計上の改良を加えて 9 セルの空洞を設計した。C-ERL の初期の段階ではこの 9 セル空洞を 4 台使用して 55 ないし 80 MeV の電子エネルギーを達成する。

主空洞の製作技術と表面処理技術を確立するために、3 台の超伝導空洞を製作した。1 台目は 9 セルのうちの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である。試験の結果、この空洞は 2 K において 30 MV/m の加速電界を発生させることに成功した。2 台目はエンドセルの形状に偏心フルート (Quadrupole モードの共鳴を減衰させるための方策) 及び入力カップラー用のポート付きのビームパイプを取り付けた単セル空洞であり、これも冷却試験を行っているところである。これらの 2 台の単セル空洞の写真を図 4 に示す。3 台目は 9 セル空洞であり、これについて



図 4 主加速空洞の 2 台の試作空洞

でも表面処理と冷却試験を順次進めてゆく予定である。

5. RF パワーソース

入射器及び主加速部の超伝導空洞を駆動するために 1.3 GHz の RF 電力が必要である。入射器には前述のように 2 セルの空洞を 3 台用いる。必要電力は第 1 空洞で 120 kW 程度、第 2, 第 3 空洞で 190 kW 程度である。安定にこの電力を供給するためには、最大 300 kW 程度の RF 源が必要となる。現時点では 300 kW を単独で出力できる RF 源は無いので、300 kW クラスのクライストロンを開発するのが望ましい。なお、立ち上げ時には小さなビーム電流から試験を始めることになる。例えば 10 mA で試験運転を開始するのであれば、電力は 30 kW で済むことになる。この場合後記の主加速器用の RF 源と同じものを使うことが出来る。ただし、この場合は入力カップラーの大電力試験をどうするかが問題となる。

主加速器では 9 セルの空洞を 4 台用いる。C-ERL では個々の空洞を独立に制御することを考え、各空洞を 1 台の RF 源でドライブする。必要な電力は CW で 1 空洞当たり 25 kW 程度であり、RF 源としてはクライストロンと IOT が候補に挙げられる。コストが同程度であれば、効率が高いこと、入力に対する出力の直線性がよいことなどから IOT が有利である。

6. 冷凍システム

ERL の超伝導空洞は 2 K の超流動液体ヘリウムで冷却されるため、液化したヘリウムを 0.03 気圧まで減圧する排気システムが必要である。空洞には連続的 (CW) に RF が投入されるため、パルス運転を行う超伝導線形加速器に比べて RF による dynamic loss が格段に大きい。すなわち、周回する電子のエネルギー (入射器、主加速部で得るエネルギー) やビーム電流に、必要とされる冷凍負荷が大きく依存する。幾つかの C-ERL の運転条件での冷凍負荷の概算の値を表 3 に示す。出発点として KEK が保有するヘリウム冷凍・液化機 (600 W @ 4.4 K) を活用するシステム

表 3 C-ERL の典型的な運転モードに対する冷凍負荷の概算

運転モード	パラメータ			冷凍負荷		
	ビーム電流	入射器	主加速器	2 K	4.5 K	80 K
A	10 mA	5 MeV	40 MV	59 W	100 W	536 W
B	10 mA	5 MeV	60 MV	114 W	100 W	536 W
C	100 mA	5 MeV	60 MV	120 W	137 W	1337 W

を検討した。A ないし B は、現有の冷凍・液化機で運転の可能性があるが、C の場合は能力を超える可能性が高い。この場合は 2 K の冷凍能力の増強が必要となる。

7. 周 回 部

図 2 に示されているように、周回部はビーム合流部、主加速空洞、アーク部、直線部、ビーム取り出し部より構成される。入射部からのビームは合流部を通して周回軌道に入射され、主加速空洞により所定のエネルギーまで加速される。ビームは第 1 のアーク部を通り直線部にいたる。加速後の周回部では空間電荷効果は小さいが、バンチ長が短いため偏向電磁石で曲げられる際の Coherent Synchrotron Radiation (CSR) の効果が大きく、バンチ長やエミッタンスが増大する可能性がある。このためアーク部においてはバンチ長やエミッタンスの増大を抑制しながらビーム輸送が出来るように、また必要に応じてバンチ圧縮が出来るように、ビームオプティクスの高次の効果までを考慮したラティスの最適化が必要である。

直線部を通過したビームは第 2 のアーク部で曲げられ合流部を通過して主加速部に戻る。主加速空洞では入射されたビームは RF の加速位相に乗り加速されたのに対し、周回部を通過後に戻ってきたビームは減速位相に乗りエネルギー回収が行われる。周回部を回って再び戻ってきたビームを正確に減速位相に乗せるためには、ビームの走行時間を正確に所定の値に制御し

なければならない。これは周長補正用シケインでビームの走行距離を制御することで行われる。

8. ビーム運動学の検討状況

ERL が初期の目標を達成するためには、電子銃で生成したエミッタンスを増大させずに、加速を行い周回部に入射し周回させなければならない。ERL を構成する各部分でエミッタンスの増大を引きおこす様々な現象が予想される。想定される現象および対策を検討しておく必要がある。また入射部でのバンチャー、さらに周回部でのバンチ圧縮により非常に短いバンチを達成しなければならない。ビーム運動学の深い理解に基づいた最適設計が必要となる。さらに極端に短いバンチが走ることによる CSR の効果も考慮しておかなければならない。多くのメンバーが種々のビーム運動学の諸課題に取り組んでいる。

9. サ イ ト

C-ERL の建設場所として、運転を終了した 12 GeV 陽子シンクロトロン (PS) の東カウンターホールを選定した。この建物の面積は 108 m × 50 m ほどであり、床耐荷重は 20 t/m² である。全面積を専有できるわけではないが、高周波源、電磁石電源、ヘリウム冷凍機関連設備等の設置を考慮しても C-ERL の建設には十分な面積を持ち、かつ放射線シールド壁を建設するのに十分な床耐荷重を持っている。なおクレーンも設置されている。

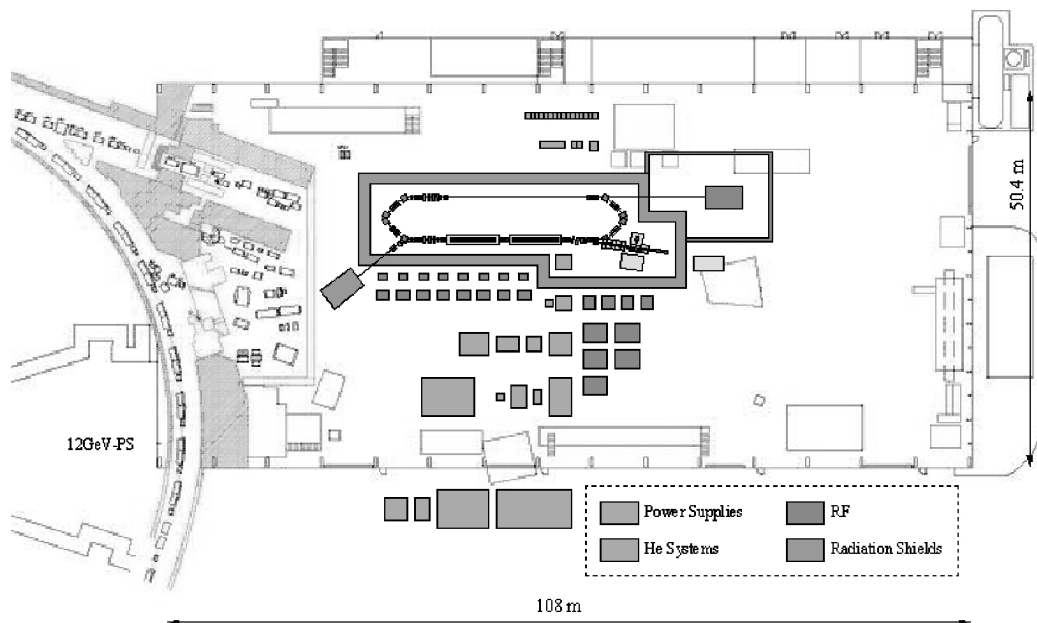


図 5 東カウンターホールでの C-ERL 配置の概念図

最大の問題はホール全体としての空調設備がないことである。加速器本体，あるいは実験エリアを覆いその部分だけの空調を行う必要がある。東カウンターホールでの C-ERL 配置の概念図を図 5 に示す。

10. スケジュール

これまでに述べてきたように，C-ERL を構成する機器のなかには開発が開始されているものもあるし，至急開発を開始しなければならないものもある。いずれにせよ，次年度以降各コンポーネントの開発・製作を行う。東カウンターホールの片づけ，あるいは同ホールでの現アクティビティの東海キャンパスへの移転終了は 2009 年度を予定している。それ以前にも，同ホールでの建設準備作業はできるものと思われる

が，本格的な機器の設置は 2010 年度から開始できるものと思われる。全ての機器の設置を 2011 年度に終了して 2012 年度からビーム試験に入りたい。

参考文献

参考文献として以下の 5 報のみを挙げておく。これらの中の参考文献も参照のこと。

- 1) 本田 融他，日本加速器学会誌，**2**(4)，p. 494 (2006)
- 2) 佐藤政則他，日本加速器学会誌，**3**(2)，p. 171 (2006)
- 3) 放射光将来計画検討会—ERL 光源と利用研究—，諏訪田剛，飯田厚夫 (編集)，2003 年 3 月
- 4) 峰原英介，日本加速器学会誌，**2**(1)，p. 48 (2005)
- 5) コンパクト ERL の設計研究，羽島良一，中村典夫，坂中章悟，小林幸則 (編集)，KEK Report 2007-7/JAEA-Research 2008-032, February 2008