

ERL 試験加速器のビームコミッショニング

KEK 加速器研究施設

阪井 寛志

tzsakai@post.kek.jp

本田 洋介

yosuke@post.kek.jp

2014 年 (平成 26 年) 11 月 26 日

1 はじめに

KEK では、将来の大規模 ERL 型加速器のための試験加速器である、コンパクト ERL (cERL) が建設され、2013 年度よりビームコミッショニングを行っている。2014 年 2 月にはビームが周回するようになり、現在は目標のビーム性能を実証するべく、調整運転を続けている。

本稿では、ビーム運転の現場の立場から、コンパクト ERL のビームコミッショニングの様子について報告する。はじめに、加速器の構成について解説したあと、入射器と周回部のコミッショニングについて述べる。

1.1 ERL とは

加速器の歴史の中で、電子線形加速器は進化を続けてきた。電子蓄積リングでは、放射過程によるリングの定常状態を扱うのに対して、線形加速器では、粒子源の特性がそのままビーム性能を決める。従来の電子源は性能が悪く、線形加速器は蓄積リングへの入射器という位置づけであった。しかし、近年の電子銃の飛躍的な性能向上の結果、特に時間方向と水平方向については、線形加速器で蓄積リングを上回る性能が得られるようになった。X 線自由電子レーザー (XFEL) は、線形加速器の最先端の応用例と言えよう。

高加速勾配の線形加速器は、常伝導加速管をパルス RF で駆動するものが主流であった。しかし、平均ビーム電流への要求が高まってくると、連続 (CW) 運転が有利になる。このため、熱損失が無い超伝導加速空洞による線形加速器が開発されるようになった。CEBAF (JLab) は、超伝導加速空洞による連続運転線形加速器の例で、原子核実験に高エネルギー電子ビームを供給している。

蓄積リングに迫る大電流ビームを線形加速器に要求するとなると、エネルギーの収支で原理的な限界に行き当たる。蓄積リングでは、放射損失を補うだけのエネルギー

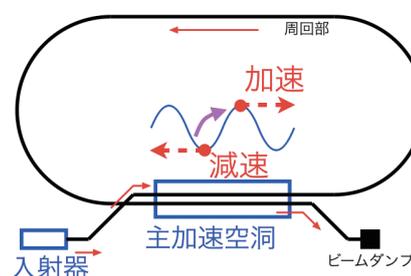


図 1: ERL の原理図

ギーを供給すればビームを維持できるのにたいして、線形加速器では、ビームをゼロから最大エネルギーまで加速し、使い捨てにするため、ビームパワーに相当する RF パワーを常に供給する必要がある。10 GeV で 1 A とするとビームパワーは 10 GW、効率も考慮するとそれ以上の電力が必要で、これは現実的には不可能である。この問題を解決するのが、エネルギー回収の方式である。

図 1 に、エネルギー回収型線形加速器 (Energy Recovery Linac; ERL) の原理を示す。低エネルギーの入射器からビームを打ち込み、主加速空洞で最大エネルギーまで加速する。一周したビームは再び主加速空洞を、今度は 180 度ずれた減速位相になるように通過する。ビームは入射時のエネルギーまで減速されて、ダンプに捨てられる。ビームのエネルギーはそのまま捨てられるのではなく、RF のエネルギーとして空洞に回収され、次のビームを加速するために再利用される。特に、空洞壁での熱損失が無視できる超伝導空洞の場合、空洞に外部から供給する RF 源は小さなもので十分である。エネルギーは回収される一方で、ビーム粒子は一周で使い捨てにする。粒子源は定常的に大電流を供給しなければならず、最大の開発要素の一つである。

1.2 世界の ERL 開発の現状

実は ERL がはじめて提案されたのは、高エネルギー実験におけるコライダーとしてであった [1]。ただし、現時点で実用化されている ERL は、いずれも比較的小規模の、長波長の自由電子レーザー (FEL) 施設としての応用である。ロシアのブドカー研究所 (BINP) の NovoFEL [2] は、常伝導加速空洞の施設であるが、12 MeV で 30 mA のビームを運転しており、世界最高出力のテラヘルツ FEL 光源である。また、マルチループの運転を実証した唯一の例でもある。アメリカのジェファーソン研究所 (JLab) の IR-FEL [3] は、150 MeV で 9 mA のビームを運転し、世界最高出力の赤外 FEL 施設である。

1 GeV クラスの極短紫外 (EUV) 領域 FEL 施設も提案されている。この波長領域の高出力光源は、特に半導体産業からの強い要求があり、昨今世界各地で精力的に検討がなされている。蓄積リング型放射光施設に代わる将来光源としての ERL の提案もある [4][5]。蓄積リングでは実現できない、短パルスで高輝度の X 線源を、線形加速器で実現しようというものであるが、いずれもまだ計画段階である。高エネルギーハドロンリングに偏極電子ビームの ERL を併設して、コライダー実験を行う計画も提案されている。CERN の LHeC 計画 [6] や BNL の eRHIC 計画 [7] などである。

このような状況を受けて、世界のいくつかの加速器の研究所では、最近、小型の ERL 試験加速器が建設されている。ALICE (Cockcroft Lab), R&D ERL (BNL), bERLinPro (HZB), cERL (KEK) などである。なお国内では、既に運転終了した JAERI-FEL [8] で ERL 運転の試験が行われており、17 MeV で 1 ms 幅 20 mA のマクロパルス運転で、2 kW の赤外 FEL 出力を得ている。

国内では、放射光の将来計画としての提案があったためか、ERL=放射光と捉えられがちで、開発研究への参加者や、学会のセッションの構成を見ても、視野が限定しているように思う。大平均電流を可能にする線形加速器の一つの方式として、多方面への検討を積極的に行うべきであろう。

1.3 コンパクト ERL

KEK では、将来の大規模 ERL のための試験加速器として、コンパクト ERL (cERL) を建設した [9]。最小限の規模ではあるが、ERL の構成要素を一通り備え、実際に加速器として動作させる試験装置である。

そもそも既存の ERL-FEL 施設が運転していることから、エネルギー回収の原理自体はここで実証を必要とするものではなく無い。その先で、大電流かつ低エミッタンスのビームを、高加速勾配の超伝導空洞で安定にエネルギー回収運転できるか、の実証を目的としている。例

えば、ビームによって空洞に誘起される高調波がビーム不安定現象を引き起こすことが知られており、JLab ではビーム電流を制限する要因になっている。cERL では、新しい超伝導空洞を設計し、この制限を超える試みを行っている。また、cERL を建設し運転していく過程で、国内の ERL 開発の体制を、実際に新しい方式の加速器を設計建設し、短期間に目標の性能を実現できるものとすることも、大きな使命である。

表 1 に cERL で目標として設定したパラメータを示す。超伝導加速空洞が高い加速勾配で安定運転し、エネルギー回収の必然性があるだけのビーム電流を周回すること、またそのとき線形加速器ならではのビーム性能を達成すること、である。つまり一言で言うと、ERL の特長を示すことである。

表 1: cERL の目標パラメータ

最大周回部エネルギー	35 MeV
最大入射部エネルギー	6 MeV
ビーム電流	10 mA (長期目標 100 mA)
規格化エミッタンス	0.3 μm (7.7 pC/bunch)
バンチ長	1~3 ps (バンチ圧縮 100 fs)

旧陽子シンクロトロン (KEK-PS) の東カウンターホールを改修して ERL 開発棟と改名し、ホールを更地とした状態から新たに加速器を建設した (図 2)。2008~2010 年 4 月に建物の改修と更地化がされ、2012 年 10 月までに加速器の放射線シールドが建設された。2013 年 4 月までに入射器を建設し、2ヶ月間の入射器のコミッショニングを行った後、周回部の建設を続け、2013 年 12 月から周回部を含めた全システムでコミッショニングを開始した。



図 2: cERL 加速器室内部の写真 (第 2 アークと電子銃から主加速空洞を望む)

2 cERLの概要

図3はcERLのビームライン機器の全体構成を示す。cERLの主な構成要素について、設計と立ち上げまでの様子を解説する。

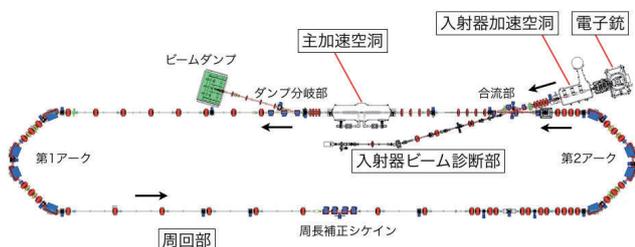


図3: コンパクト ERL 加速器部のレイアウト

2.1 電子銃

ERLは大電流の線形加速器であることから、電子銃の選択は極めて重要である。低エネルギー領域では、バンチが自身の電荷で発散しようとする力(空間電荷効果)が大きく、性能を保って輸送することが難しい。出来るだけ高い電圧で、短い距離で相対論的エネルギーに達することが重要である。

現在最も広く使用されている電子銃は、SバンドあるいはLバンドの常伝導RF電子銃であるが、十分な加速電圧では熱負荷が大きすぎて連続運転が出来ない。そこで、VHF帯まで周波数を下げることで壁損失を抑える、あるいは壁損失の無い超伝導空洞を使う、というRF電子銃の開発も行われているが、まだ開発段階の印象である。加速電場と到達エネルギーで不利ではあるが、任意の繰り返しに対応できることと、カソードの選択肢が広いことを理由に、cERLではDC電子銃を選択した。図4に電子銃の構造を示す。セラミック絶縁管で支えられたカソード電極に、高電圧を印可する。電極にはフォトカソードが備えられており、レーザー光を照射して電子を発生させる。

電子銃の開発を開始した時点で、運用中のDC電子銃の電圧は、JLabの350kVが最大で、コーネル大学が700kVを目標に掲げて開発を行っていたが、400kV以上で放電のトラブルが頻発し、難航していた。(ちなみに、XFELのSACLAではパルス運転の500kVのDC電子銃を使用しているが、ここでは連続運転なので放電のリスクはずっと大きい。)cERLでは、多段のセラミック絶縁管を用い、ガードリングと呼ばれる金属板でセラミック内壁を保護し放電による損傷を防ぐ設計とし、500kVの連続運転ができる電子銃を開発した[10]。(電子銃はJAEAで開発を行った後、KEKに移設したが、その前後にセラミック管の一部に不具合が発生し、現在は390kVで運転している。)

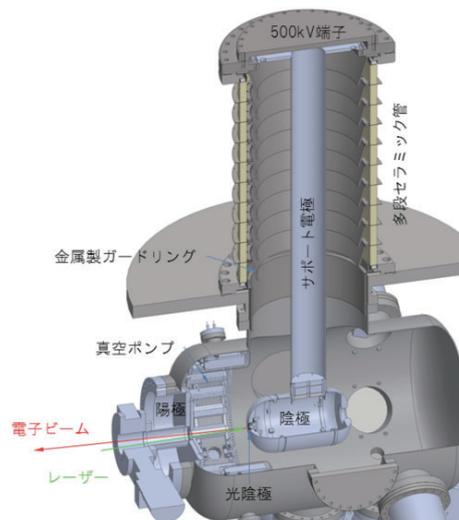


図4: JAEAで開発されたDC電子銃の構造

究極的にはカソードの特性がビーム性能を決める。カソードから真空中に電子が放出される際に、横方向に持つ運動エネルギーが小さければ、良く揃った(低エミッタンス)ビームになる。熱電子銃であればカソードの温度が、金属フォトカソードであれば仕事関数にたいする励起光エネルギーの余剰分が、横方向の運動エネルギーの起源である。いずれの場合も1000K以上に熱運動に相当する。cERLでは、半導体フォトカソードを使用している。電子生成の仕組みを図5に示す。バンドギャップ以上のエネルギーの励起光を照射することによって、半導体内部に伝導電子-正孔ペアが生成する。伝導電子は半導体内部を移動中に緩和過程によって、余剰の運動エネルギーを失う。表面まで拡散した伝導電子は、表面のポテンシャル障壁を抜けて真空中に放出される。緩和過程があるおかげで、室温相当の運動エネルギーの電子が放出されることが利点である。また、GaAs型の半導体カソードの場合、可視光で励起することが可能で、紫外光を必要とする金属カソードと比べて高平均出力の励起レーザーの設計が容易である。一方、最大の難点は、量子効率の劣化である。伝導帯の底まで緩和した伝導電子が真空中に放出されるためには、NEA(Negative Electron Affinity)と呼ばれる、負の仕事関数を持つ表面でなければならない。これは、GaAs表面に単層のCsを形成して作るのであるが、非常に脆い。電子ビームが残留ガスをイオン化して生じたイオンが、カソードに向かって逆流し、カソード表面を劣化させてしまう。電子銃の真空をできる限り良くする、劣化が激しい中央部を避けて使う、といった対策をとりつつカソードを頻りに交換しながら運転する、というのが一つの解と考えられている。現実的に大電流の安定運転が可能かを見極めることは、cERLの課題の一つである。今の所はGaAsカソードで運転しているが、エミッタンスではやや劣るものの、劣

化の点では有利な CsNaSb や CsKSb などのマルチアルカリカソードの検討も進んでいる。

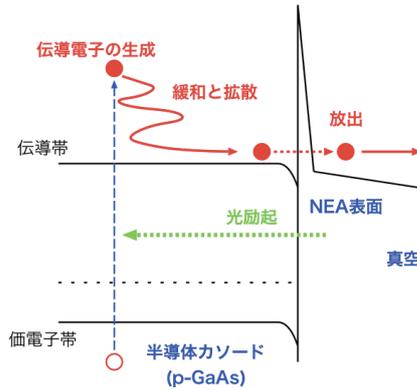


図 5: 半導体カソードの原理。光励起により伝導電子を生成し、負の仕事関数を持つ表面から取り出す。

2.2 超伝導加速空洞

電子ビームは電子銃から出た後、バンチャー空洞によりバンチ圧縮しつつ、入射器加速空洞で加速される。相対論的速度まで加速することで、空間電荷効果を抑えて輸送できる。その後、合流部を通り、エネルギー回収が行われる主加速部にビームが送られる。

2.2.1 入射器加速空洞

入射加速部ではエネルギーの回収が行われないので、大平均電力の RF パワーを機器への負担なく空洞に送り込む必要がある。最終目標 100 mA を 10 MeV まで加速することを想定すると、全体で 1 MW 相当の RF パワーを供給することが目標である。図 6 に入射器加速空洞のクライオモジュールの構造を示す。1 台のクライオモジュールに Nb 製の 1.3 GHz の 2 セル空洞が 3 つ配置され、1 空洞あたりの加速勾配は 15 MV/m の設計である。各空洞には 2 つの入力カプラーでパワーを入力し、カップラあたりの負荷を抑えている。また、電場の対称性を良くし、低エネルギービームがキックされないようにしている。空洞前後に 5 つの改良型 HOM カプラーを配置し、コンパクトながらもビームによって誘起される高調波を吸収する構造としている。(主空洞に比べ、高調波の制限は比較的緩い。)

2012 年に単体テスト(縦測定)にて加速勾配 50 MV/m の性能を達成した。その後、クライオモジュールとして組立て、2013 年 2 月にビームラインに設置し、15 MV/m の加速勾配が安定に確保できることを確認した。現在、入力カプラーが 40 kW で温度上昇してしまうことと、HOM カプラーが加速モードで発熱してしまうことが課

題となっているものの、初期の目標である 10 mA のビーム運転には十分な能力を有している。

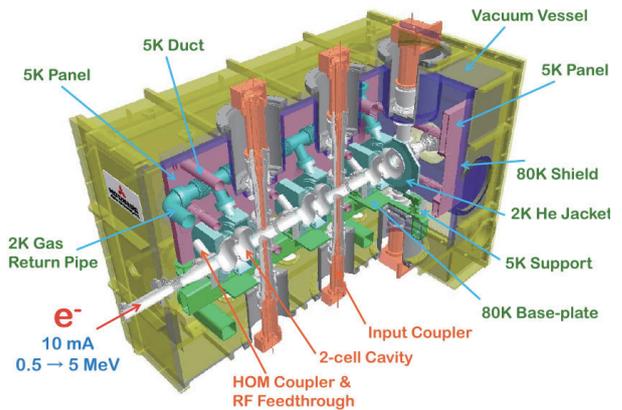


図 6: 入射器加速空洞。3 台の 2 セル空洞がクライオモジュールに収められている。

2.2.2 主加速空洞

主加速部の超伝導空洞はエネルギー回収を行う本加速器の心臓部である。2012 年夏から秋にかけて、クライオモジュールの組み立てを行い、加速器室に設置した(図 7)。2 台の 1.3 GHz の 9 セルの Nb 製超伝導空洞で構成され、高 Q 値 ($> 1 \times 10^{10}$) で 15 MV/m の加速勾配で 35 MeV まで加速することを想定している。特に、最終目標である 100 mA もの大電流ビームを周回できるように、ERL 用に特化した改良設計を行った空洞を作成した。空洞のくびれ部分の径および空洞両端のビームパイプ径が大きく、高次の共振モード(Higher Order Mode(HOM))がビームパイプから外に出て、空洞両脇の HOM ダンパーと呼ばれるところに吸収する設計になっていることが特徴である。通常的设计では空洞から出にくい四極の高次モードも、偏心フルートと呼ばれる構造で取り出す設計にしている。大電流運転時に問題となる HOM を大幅削減したことで、最大 600 mA までの大電流運転が設計上可能である [12]。(同じ 9 セル空洞である、ILC に用いられる空洞では 20 mA が限界である。) まず、この空洞の単体性能評価試験(縦測定)にて、25 MV/m 以上の加速勾配を確認したうえで、入力カプラー、高次モード減衰器(HOM ダンパー)、周波数チューナー等の組込みを行い、クライオモジュールとしてビームライン上に設置された。

2012 年 12 月には、cERL に設置された状態で大電力試験を行った [13]。各空洞に 15 MV 以上の加速電圧をかけることができたが、両空洞ともに 8 MV からフィールドエミッションによる放射線が発生し、またそれに伴い空洞 Q 値の劣化も観測された(図 8)。フィールドエミッションの原因は、空洞内への (0.1 μm 程度の) 埃やごみ

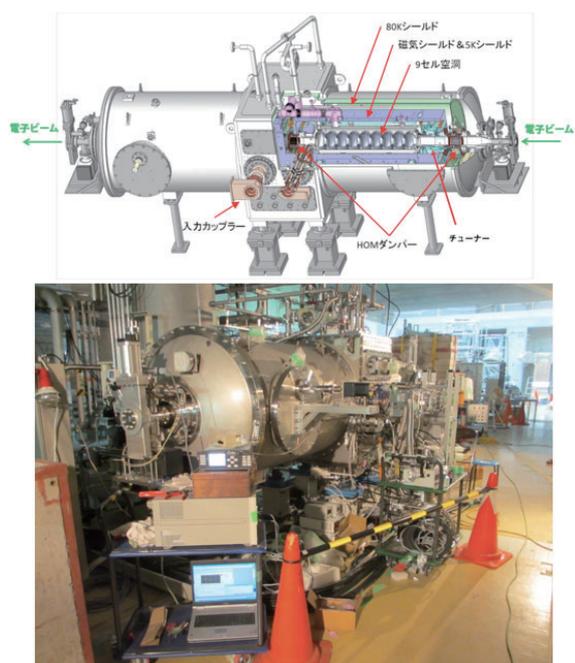


図 7: (上) 主加速部クライオモジュール概念図。(下)cERL 加速器室に設置された様子。

の混入によるものが主である。空洞内面の電界の強い場所に付着した埃から電子が発生し、空洞に蓄えられたパワーを奪い、その結果、Q 値の劣化が起こる。モジュールアセンブリ作業においてゴミの混入等があり、縦測定で出ていた性能が劣化してしまった可能性がある。ビーム運転では慎重を期し、主空洞の運転電圧を 8.5 MV/cav とした。

大電力試験の後、クライオモジュールは、室温まで昇温された。2013 年冬に入射器空洞とともに再冷却され、今度はビーム運転に向けての調整、具体的にはデジタルフィードバック系の立ち上げを行い、加速電圧の振幅・位相制御およびピエゾ周波数チューナーによる周波数制御を確立。空洞電圧が高安定に立つことを確認し、ビーム運転に備えた。

2.3 ビームオプティクス

cERL 周回部の特徴的な要素である、合流部、周長補正、アーク部、について述べる。

ERL では、入射器からの低エネルギービームと、周回してきた高エネルギービームを同一の軌道に合わせて、主加速空洞を通過させる(合流部)。また、主加速空洞を通過したあと、空洞で加速された高エネルギービームと、減速された低エネルギービームを分離する(ダンプ分岐部)。これら合流部と分岐部は、運動量比による軌道の違いを利用した静磁場によるものである(図 9)。運動量比は 1:7 として設計した。入射ビームは角度を持って合流するが、合流部中央の偏向電磁石に収束作用を持たせ

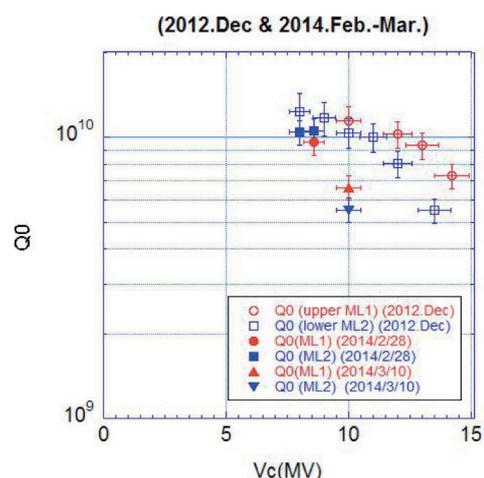


図 8: 空洞 Q 値 vs 加速電圧。2012 年冬と 2014 年の運転時の測定結果。ML1 が上流空洞、ML2 が下流空洞を示す。

て分散をキャンセルし、劣化無くビームを輸送できる設計にしている。

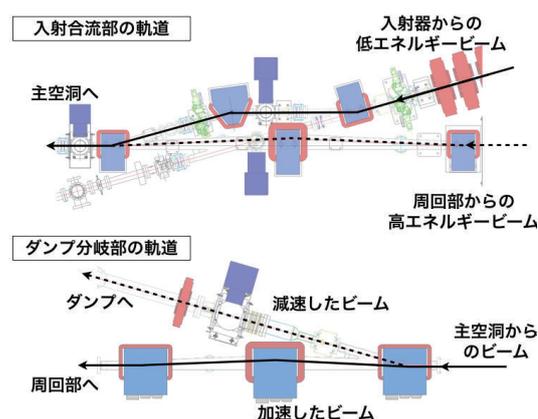


図 9: 入射合流部とダンプ分岐部。運動量の異なる 2 つのビームを、静磁場で合流/分岐する。

ERL では、主加速空洞を加速位相で通過したビームが、周回後には減速位相で戻ってくる必要がある。つまり、周長は RF 波長の半整数倍でなければならない。これが正しく合っていないと、エネルギー回収率が悪化してしまう。これを微調整できるノブが必要である。

図 10 に示す 2 つの周長調整機構が備えられている。周回部の直線部には周長補正シケインがある。4 台の偏向電磁石で閉バンプ軌道を構成する。バンプ軌道の調整しろの中程を設計中心とし、バンプ高さを変えることで ± 5 mm の周長の調整が可能である。もう一つは、アーク頂点の軌道である。これは、アーク頂点の 2 つの偏向電磁石およびその隣の軌道補正コイルを使用して閉軌道バンプを構成し、折り返し点を遠回り/近道させて、周長を調整するものである。 ± 10 mm の調整が可能である。

ERL のビームダイナミクスを考える際、アーク部は見

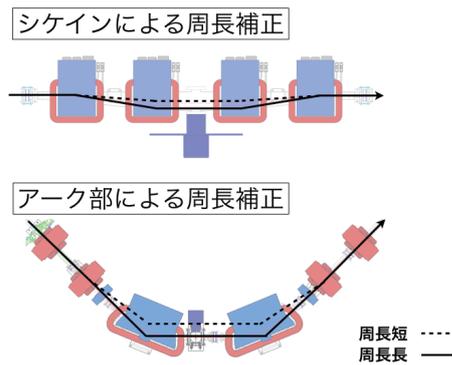


図 10: 周長補正の方法。直線部のシケインバンパによるものと、アーク部頂点バンパによるものがある。

えないことが望ましい。つまり、アークを通過した後で、ビームに何らかの影響を残さないような設計が良い。これは、アクロマートかつアイソクロナスの条件にすることである。通常、ビームを曲げると運動量による軌道のずれ、つまり分散が生じるが、アクロマートとは途中で分散関数を収束し、アーク出口において分散とその変化率をゼロにするオプティクス設計である。また、偏向電磁石中の分散は、運動量に依存した軌道長の差を生じる。これをアーク全体で積分すると運動量に依存した到達時間のずれになる。エネルギー拡がりがあると、到達時間のずれによって、バンチ長が変化してしまう。アイソクロナスとは、アーク部途中で分散の符号を反転させ、アーク出口での到達時間差をゼロとするオプティクス設計である。

偏向電磁石 1 台あたりの曲げ角を 45 度とし、4 台の偏向電磁石で 180 度のアークを構成した (図 11)。偏向電磁石間に対称に 3 台づつの四極電磁石を入れる設計とした。アクロマートかつアイソクロナスを満たすため、独立な 2 つの条件を与えることになるが、対称性を仮定して四極電磁石の調整ノブは 3 つなので、自由になるパラメータは残り 1 つである。

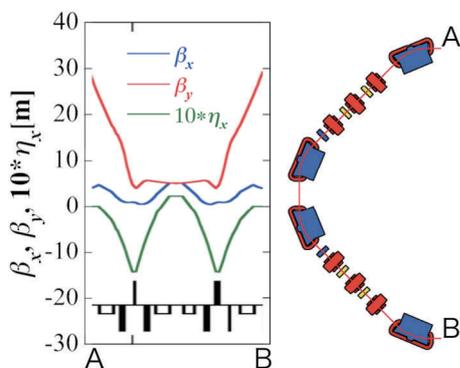


図 11: アーク部の設計。偏向電磁石間の 3 台の四極電磁石でアクロマートかつアイソクロナスの条件にする。

2.4 ビーム診断

ビームを調整し、目標の性能を実現するためには、ビームの様々な特性の測定が不可欠である。特に入射器は空間電荷効果の下に最適化調整が必要であることから、専用のビーム診断部を設けている。合流部をオフし、入射器から直進させるビームラインである (図 3)。

ビーム性能は、水平垂直および前後方向の 6 次元位相空間におけるバンチの体積で評価される。これをできるだけ小さくするのが望ましい。実際には、ある決まったビームパラメータにおいて、3 種類の 2 次元位相空間をそれぞれ評価する。水平あるいは垂直方向の、位置と角度の分布 (2 次元位相空間の面積) をエミッタンスと呼ぶ。エミッタンスの測定を行う為に、スリットスキャナと呼ばれる装置が設置されている。これは、細いスリットの入った標的をビームラインに挿入して、ビームの一部だけを切り取るものである。切り取られたビームの下流での拡がりを測定することで、角度分布が分かる。スリットの位置をスキャンして測定すると、バンチを構成する電子の位置と角度の分布が測定できる。

バンチの時間分布は、偏向空洞と呼ばれる装置で測定する。これは、ビームを横方向にキックする RF 空洞である。時間的に変化するキック力でバンチを長手方向に傾け、下流のスクリーンモニタにおいて時間分布が空間分布として測定できる。また、診断ラインの後半部は、偏向電磁石で軌道を曲げて大きな分散を作っており、エネルギーの分布を測定することができる。

3 入射器のビームコミッショニング

3.1 ビーム運転の概要

2013 年 3 月までに、まず入射器およびビーム診断ラインの建設が完了した。2014 年 4 月 22~26 日、途中で連休を挟み 5 月 13 日~6 月 28 日の計 8 週間で、入射器ビームコミッショニング運転を行った。この期間は、週末および深夜は冷凍機を停止する運用形態としたため、月曜日終日と、火~金曜日の午前中は空洞を再冷却する時間となる。運転日は午後から空洞の立ち上げを行い、夕方から午後 10 時までが実際のビーム運転となった。

ここでの目標は、まずビームを使って一通りの装置の動作確認を行うこと、次に入射器のビーム性能を測定し調整すること、である。

電子銃が 390 kV、入射器空洞が 7 MV/m (実効加速長 0.23 m×3 台) なので、入射器のビームエネルギーは 5.5 MeV (申請上 6 MeV) である。

ビーム調整は、基本的にビームラインに沿って配置されているスクリーンモニタを使って行った。大電流連続ビームを損失させて測定することはできないので、バーストモードと呼ぶ、調整用のビーム構造で運転を行った。

これは、電子銃や加速空洞は CW 運転で、電子銃フォトカソードの励起レーザーだけをマクロパルスに切り出して間欠運転し、バースト状のバンチ列とするものである。具体的には、バンチの基本繰り返しは 1.3 GHz、マクロパルスは時間幅 1 μ s (1300 バンチ) で繰り返しは 5 Hz、の構造とした。はじめは、典型的にバンチ電荷を 10 fC/bunch 程度の低電荷運転で行った。この条件では空間電荷効果が無視できるので、ビームの応答を予想し易く、最初の段階での機器の確認に適している。

運転 1 週目は、電子銃からビームを取り出し、入射器加速空洞の加速位相を調整して、ビームダンプまでの輸送を確立した。連休後の 2 週目に、もう一度輸送調整のおさらいをし、マクロパルス時間幅を伸ばして平均電流を上げる試験を行った。3 週目には、この平均電流を上げた運転で放射線施設検査を受け、規定のビームパワーで安全上問題無く運転できることを示して検査に合格することができた (2013 年 5 月 23 日)。4,5 週目に、スリットスキャナや偏向空洞などの、ビーム診断装置を立ち上げ、また、それまではパワーを入れていなかったバンチャー空洞の使用も開始した。運転期間の最後の 3 週間では、バンチ電荷を段階的に 7.7 pC まで上げ、ビームオプティクスもそれに対応するものに調整し、空間電荷効果の影響下でのビーム輸送の試験を行った。

3.2 ビーム調整

電子銃で生成されるビーム分布は、フォトカソードに照射される励起レーザーによって決まる。レーザーパルス空間的にも時間的にも整形して、電子銃の初期ビームを一様な密度分布になるようにしている。これは最大電子密度を下げ、空間電荷力を抑えると同時に、発散力を一様化、線形化して、エミッタンスの悪化を抑えるためである。レーザーのパラメータは、空間電荷効果を入れた計算機シミュレーションによる最適化計算によって決めた。

電子銃から加速空洞までの低エネルギー部には、2 台のソレノイド電磁石と、バンチャー空洞がある。ソレノイドは、電子銃から発散ぎみに出射されるビームに収束力を与えて輸送する役割である。ビームを収束して位相空間上での分布を一度反転させることで、輸送路全体としての空間電荷効果を相殺することができ、エミッタンスを保った輸送の為に重要な役割を持つ。バンチャー空洞は、1.3 GHz の常伝導空洞である。ゼロクロス位相で使用し、電子バンチ内に時間に依存したエネルギー勾配を与える。引き続き加速空洞までの輸送のあいだにバンチ後半が前半に追いついて、バンチ圧縮される。

入射器加速空洞の 3 台の独立な空洞それぞれの位相を調整する必要がある。この段階では簡単のため 3 台とも最大加速位相 (オンクレスト) に合わせる方針とした。こ

の領域ではまだ光速に達しておらず、エネルギーと同時に到達時間が変化するので、上流から順に位相調整をする必要がある。加速空洞下流の空芯ステアリング電磁石を変調動作させ、その下流でのビーム位置をスクリーンモニターで測定し、ビームエネルギーの指標とした。空洞位相をスキャンし、ステアリング電磁石でのキックが最小となる点から最大加速位相が決定できる。この手続きを上流空洞から順に行い、3 台の空洞をオンクレスト条件に調整した。実は、2 台目と 3 台目の空洞は共通の RF 源で駆動する、ベクトル和方式の構成にしていることから、個別の位相調整に手間取ってしまったが、最終的にはうまく条件を合わせることができた。ビームエネルギーは 5.6 MeV と評価され、予定通りの加速が出来ていることが確認できた。

バンチャー空洞は、平均のエネルギーは変えずにバンチ内でのエネルギー勾配をつけるため、ゼロクロス位相に調整する必要がある。バンチ圧縮の位相では発散の、反対側では収束の、効果があるので、これを指標に位相の調整を行った。その後、偏向空洞によるバンチ長測定を行い、正しくバンチ圧縮位相になっていることを確認した。

ビーム軌道の調整は、全てビーム応答から行った。ソレノイドと四極電磁石については、磁場強度を変調してもビーム位置が変動しないよう、軌道調整を行った。これによって、磁場分布の中心に軌道を合わせることが出来る。バンチャーと 1 台目の加速空洞についても、RF 位相を変調し、下流のビーム位置が変動しないよう、軌道調整を行った。(ただし、バンチャーと 2 台目のソレノイドについては、ステアリング電磁石が共通のものしか無く、バンチャーを優先で軌道を決めた。) ビーム応答から軌道調整することで、誰が調整を行っても再現性良くダンプまでビームを輸送できる手順が確立している。

3.3 ビーム性能の測定

入射器コミッションの最後の 1 週間までに全ての機器が立ち上がり、診断ラインにおいて目標のバンチ電荷 (7.7 pC/bunch) でビーム性能を測定できる状態になった。ある決まったビーム調整パラメータにおいて、エミッタンスとバンチ長とエネルギー拡がりの測定を行った。最初の目標とした、1 μ m を下回る規格化エミッタンスを確認することはできたが、シミュレーションによる数値に比べて、電荷依存性が強く測定値が大きい。また、バンチ電荷を上げるにつれてプロファイルが歪む現象が観測されており、空間電荷効果がまだ良く制御できていないと思われる。

この期間の運転はここで時間切れとなり、再開後は周回部のコミッションに集中することになって、現在に至っている。今後、入射器の精密調整を続けて行く。

4 周回部のビームコミッショニング

4.1 ビーム運転の概要

周回部の建設が完了し、2013年12月からcERL加速器の全体運転を開始した。この時点では機器が完全に整備できた状態では無かったが、年末休止の前に12月16日からの1週間だけまずビーム運転を行った。年明け後は2014年1月30日～3月14日の6週間、そして、5月19日～6月20日までの5週間で運転を行った。この期間は、冷凍機を24時間運転したおかげで日々の再冷却の時間が節約できた為、週5日で13時から22時頃までをビーム運転することができた。

現状では主加速空洞の加速勾配は8.5 MV/cavで運転している。合流部の運動量比は固定なので、周回部のビームエネルギーに対応して入射ビームエネルギーを再設定する必要がある。入射ビームは運動エネルギー2.4 MeV、周回ビームの運動エネルギーを19.5 MeVと決めた。ビームエネルギーが低くなると、残留磁場などの影響を受け易くなるし、空間電荷効果の影響も大きくなり、ビーム性能の面でも不利である。また、速度が変わってタイミングが変わるので、入射器の位相調整をやり直す必要もある。

12月の1週間の運転は、出来るだけ先までビームを通してバグ出しをする、というつもりで行った。最初の2日間で入射器から合流部までの調整を行い、3日目からは主加速空洞を通過させた。すぐに、加速が確認され、設計のエネルギーでアークを通過した。プロフィールは酷い状態ではあったが、第2アークの出口までビームを確認することが出来た。残りの2日で、減速してダンプラインでビームを確認するところまで行きたかったが、2ビーム共通のラインでの調整が難航し、年内は時間切れに終わった。ともかく、電磁石の結線ミス、合流部での漏れ磁場の問題、などのバグが出て、年明けからのコミッショニングに備えることが出来た。

1月から再開したビーム運転は、やはり最初の3日間で入射器を調整した。合流部の運動量比の開口に出来るだけ余裕をもつため、入射エネルギーをより正確に調整するようにした(設計で1:7のところを、12月は1:6でやっていた)。低エネルギー部で、真空計起因の漏れ磁場がビームプロフィールを歪ませる原因となっていたので、次の2日間でその対策を行った(真空計の磁石部を取り外した)。ようやく、2月6日に主加速空洞の位相調整から行い、一周の軌道調整をすると、そのままダンプラインで減速されたビームが確認できた。

1ヶ月かけて、オプティクスの確認とマッチングの調整が進み、小さなビームサイズで損失を抑えて輸送できるようになった。3月7日に規定の電流で放射線施設検査を受け、今回の申請である最大10 μ Aで施設として安全上問題が無いことを示すことができた。

5～6月のビーム運転では、今後のレーザーコンプトン光源(Laser Compton Scattering Source; LCSS)の試験に向けたビーム調整などにも手を付けている。最後の1週間には、バンチ電荷を上げた運転も行った。

4.2 ビーム輸送の確立

4.2.1 軌道の確立

周回部の電磁石の電流値を設計に従ってセットし、ビームの輸送を開始した。ビームエネルギーが低い為、環境磁場によって簡単に数10 mmも軌道が変わってしまう。このような条件では、密にビーム位置モニタが無ければビームを見失ってしまう。最初のビームコミッショニングにおいて最も信頼できるビーム位置モニタは、電磁石である。任意の四極電磁石の変調によってビーム位置が動かないように軌道を調整するのが確実である。この手順で、上流から順に電磁石をつなぐことで、自然に最後まで軌道が確立する。

合流部と分岐部間の、2つのビームが共通に通過する領域の調整は注意を要する。電磁石の効果はビームエネルギーに依存するので、この領域の電磁石は原則的に低エネルギービーム調整用のものとして扱う。このため、一周したあと主加速空洞に向かうビームの調整は、低エネルギービームに影響しないよう、合流部よりも上流から行った。

減速後のビームは、主加速空洞を発散ぎみに出てくる。これは空洞の端部電場が、加速時には収束力として、減速時には発散力として働く為である。加速の場合は、エネルギーが上がると同時に自然に絞られたビームになるので扱い易い。しかし、減速の場合は発散するので、主加速空洞直下の4連の四極電磁石で収束効果を与えるように設計されている。ただし、周回し減速後にこれらを調整すると、周回前のビームにも影響してしまう。周回後に微調整しても周回前のビームへの影響が少ないように、周回前のビーム軌道を磁石中心に合わせておくことが、調整上重要である。

4.2.2 位相の調整

今回の運転では、主加速空洞は最大加速位相(オンクレスト)で使用した。第1アーク最初の偏向電磁石後のビーム位置をスクリーンモニタで見てエネルギーの測定を行った。2台の加速空洞の位相をそれぞれ微調整し、最大エネルギーになる条件に決めた。

周長が正しく調整されると、最大減速位相でビームが再通過し、エネルギーが最小になってダンプに向かう。ダンプ分岐部の下流のスクリーンモニタでは、エネルギーによって軌道が変化する。ビーム位置を測定しながら、周長調整を行った。図12は第2アーク頂点軌道による

周長調整ノブをスキャンした結果である。減速後のエネルギー極小点を確認され、ERL型加速器として動作していることが示された。

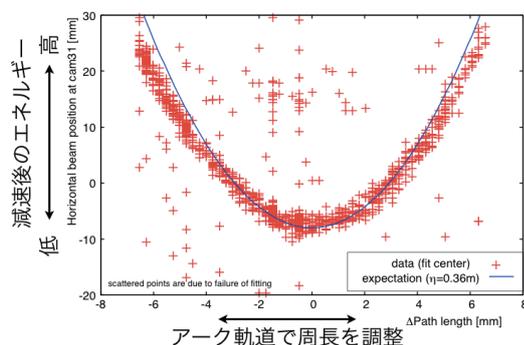


図 12: 周長の微調整と減速の確認。周長を変えながら、減速後のエネルギーを測定した。極小点においてエネルギー回収が最適化されている。

4.3 周回部ビーム光学の確認

4.3.1 オプティクスマッチング

ひとまずビームを一周させてダンプまで輸送することは出来た。しかし、この段階では輸送途中のビームプロファイルは設計のものとは大きく異なっており、周回部後半になるとダクトの開口ぎりぎりでなんとか通しているという状態であった。電磁石の強さの誤差や環境磁場の影響が積み重なり、設計からずれていった結果である。ビームが大きく広がった箇所が出来てしまうと、非様な環境磁場の影響を受け易く、ガウシアンとは似ても似つかないプロファイルを作ってしまう。そうなってしまうと、下流でビームをまとめるよう調整しようとしてもどうにもならない。

上流から順番にオプティクスマッチングと呼ばれる手順を行った。これは、ある四極電磁石の強さをスキャンして、その下流でのビームサイズの応答を測定し、設計のものに一致させようとするものである。調整にはその上流の4台の四極電磁石を用いる。それぞれについて、その強さの微小変化から測定点への線形応答を実測しておき、その組み合わせでビーム応答を設計のものに調整する。水平と垂直についてサイズと発散の計4つのパラメータを4つのノブで合わせられる。ただし、これはあくまでも線形モデルなので、現状と設計値のずれが微調整で済む範囲でなければうまく行かない。上流から順番に補正をかけていった結果、次第にビームサイズが小さく、またプロファイルもガウシアンに近づいて行った。

4.3.2 周回部ビーム光学の確認

アーク部では、分散の調整が最初の課題である。各アークはアクロマトに設計されており、直線部には分散が

漏れださないはずである。ビームが輸送できるようになってまず確認したのは、アーク下流での分散関数の様子である。第1アークを通過してから下流に向けて、分散が発散していき、非常に大きな値になっていることが分かったので、アーク内部の四極電磁石を微調整した。

アーク部のオプティクスでもう一つ重要な点は、アイソクロナスの設計である。アーク内部で分散を反転する設計になっていることから、アーク頂点での分散の値がこれを反映することになる。分散を測定し、四極を対称に微調整して、設計値に合わせた。

運転の後半では、BPMによりビーム軌道がモニターできるようになり、オプティクスの診断が効率的に行えるようになった。任意の位置でビーム軌道にキックを与えて、下流での軌道振動を測定し、設計と比較することができる。概ね理解されてきたが、周回部後半で誤差が蓄積してくること、水平垂直の混ざり込みが見られること、などまだ解決する必要がある。

4.4 周回部ビーム性能の確認

ERLでビームを実際に使う(衝突させる、放射光を出す、など)のは、周回部である。周回部におけるエミッタンスやバンチ長などのビーム性能を確認することは、重要である。エミッタンスの評価は、四極電磁石でビームを絞りながらスクリーンモニターでサイズを測定する、ウェストスキャンの手法で行った。低バンチ電荷運転時には、入射器のエミッタンスを維持して輸送できていることが確認できている。ただし、高バンチ電荷(7.7 pC/bunch, 1.3 GHzで10 mA相当)運転時には、まだビーム調整ができておらず、明らかなエミッタンスの劣化が見られている。高バンチ電荷では空間電荷効果によって条件が変わるため、まだオプティクスマッチングが十分にできていないと思われる。

4.5 エネルギー回収動作の確認と空洞性能

エネルギー回収をビーム負荷から直接的に証明するための試験を行った(図13)。“ビーム負荷運転 (beam loading test)”は、2つある主加速空洞のうち、上流空洞で加速し下流空洞で減速するスキームで、ビームを周回せずにビームダンプへ導く。つまり、それぞれの空洞についてエネルギー回収無しの運転時の空洞の振る舞いを測定する。図の縦軸は空洞への入力RFパワー(P_{in})と反射RFパワー(P_{ref})の差の変化量 $\Delta(P_{in} - P_{ref})$ である。ビーム負荷運転では、ビーム加速を行う上流空洞ではビームにRFパワーを与えるため $\Delta(P_{in} - P_{ref})$ が正に、ビームを減速する下流空洞ではビームからRFパワーをもらうため $\Delta(P_{in} - P_{ref})$ が負になる。一方で“エネルギー回収運転”では、ビーム有り/無しにかかわ

らず、 $\Delta(P_{in} - P_{ref})$ に変化が見られない。このことから、エネルギー回収がなされていることが確認できる。

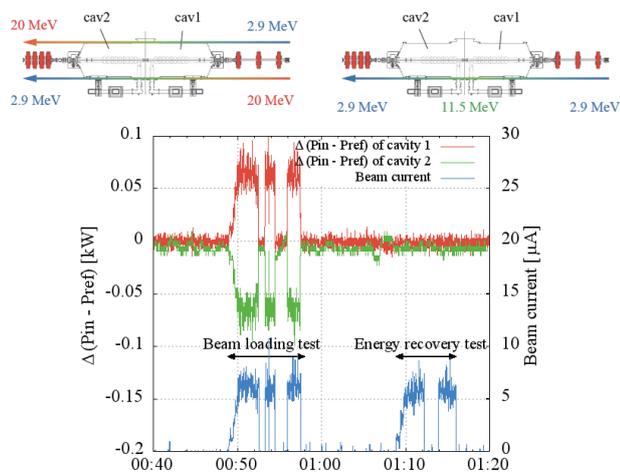


図 13: (上)「エネルギー回収運転 (Energy recovery test)」および「ビーム負荷運転 (beam loading test)」のスキーム。(下) 主空洞の入力 RF パワーと反射 RF パワーの差の変化量 $\Delta(P_{in} - P_{ref})$ 。cavity1 および cavity2 はそれぞれ上流および下流の超伝導空洞を示す。

主加速空洞では、ビーム運転中にも時折、フィールドエミッションによって放射線量が増加することがあった。その場合には、パルスエイジングと呼ばれる対策で、放射線量を半減させる手段が確立し、cERL の安定運転を実現している。

5 おわりに

5.1 今後の展望

cERL は建設期を終えようやく加速器の体を成し、施設検査を通過した段階で、これから本来の試験が開始できる。今後のビーム試験を通して、大規模 ERL に向けた課題が明らかにされていくことであろう。

もちろん試験加速器としての目的が第一であるが、建設にあたっては利用施設としての可能性も検討してきた。一つは、レーザーコンプトン散乱による光源 (LCSS) としての利用である。単なる実証試験で終わるのではなく、短パルス性と点光源性を活かして、KEK 敷地内の放射光リングと差別化し、真に利用価値のある光源に成り得るか検討する必要がある。もう一つは、バンチ圧縮運転で実現できる短パルスビームからコヒーレント放射を発生させるテラヘルツ光源である。将来の FEL 施設に向けての試験やバンチ長の診断を進める過程で、光源の開発も進められる予定である。

周回部を 2 ループ構成とし、主加速空洞を 2 回加速の 2 回減速で使用する、マルチループ ERL の試験も検討されている。運転が複雑になるが、同じ主加速空洞で 2 倍

のエネルギーに達することができ、将来の大規模施設を小型化できる可能性がある。

ERL は大電流化して始めて意味を持つ。プロジェクトは 100 mA の運転を掲げて開始したものの、様々な制約から現状の機器構成は必ずしも対応できるものになっていない。段階的にビーム電流を増強しながら、改良を続けて行く。

5.2 謝辞

cERL は 2006 年からプロジェクトがスタートし、具体的には 2009 年から建設を開始したが、設計から建設に至り、今回のビームコミッショニングにて、無事エネルギー回収の成功に至るまでに、国内外から多くの共同研究者が携わっている (KEK, JAEA, 東大, 広島大, 名古屋大, 総研大, 分子研, 産総研, 山口大, JASRI, KNU, CERN)。携わった多くの皆様に感謝したい。

超伝導空洞の設置に至るまで KEK 内の超伝導リニアック試験施設棟 (STF) にて、空洞の表面処理, 組立及び性能評価試験を STF の方々に手伝って頂いた。また、「量子ビーム基盤技術開発」のサポートを頂き、無事ビーム運転まで可能になりました。サポート頂いた方々にここに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] M. Tigner, Nuovo Cimento 37 (1965) 1228.
- [2] O.A. Shevchenko, *et al.*, Proceedings of FEL2012, Nara, Japan
- [3] D. Douglas, *et al.*, Proceedings of IPAC2012, New Orleans, USA.
- [4] www.classe.cornel.edu/Research/ERL/PDDR.html
- [5] KEK Report 2012-4
- [6] O. Bruening and M. Klein, Mod. Phys. Lett. A 28 (2013) 1330011
- [7] V. Ptitsyn *et al.*, Proceedings of IPAC2011, San Sebastian, Spain
- [8] R. Hajima *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A 507 (2003) 115-119
- [9] 羽島良一, 中村典雄, 坂中章悟, 小林幸則 編集, KEK Report 2007-7/JAEA-Research 2008-032.
- [10] R. Nagai *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 81, 033304 (2010).
- [11] E. Kako *et al.*, Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China (2013) 2340-2342
- [12] M. Sawamura *et al.*, Phys. Rev. Special Topics - Accel. and Beams, Vol. 13 022003 (2010)
- [13] K. Umemori *et al.*, Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China (2013) 2349-2351