



次世代型加速器 エネルギー回収ライナック(ERL)の開発

SATテクノロジー・ショーケース2016

■ はじめに

次世代型加速器に必要不可欠な「質の高い大電流連 続(CW)ビーム」を得るためにエネルギー回収型ライナ ック(Energy Recovery Linac:ERL)が世界的に注目を集め 開発がすすめられている。高輝度電子銃で生成された 高品質ビームを前段加速した後、超伝導空洞で構成さ れる主ライナックで3~5 GeVのエネルギーまで加速す る。ビーム周回部に設置するビームライン(多数の挿入 光源を用いてビームからの放射光の利用や高エネルギ ー実験での衝突部)を通過した後、再度主ライナックで ビームのエネルギーを回収し、ビームを捨てる。加速 された電子ビームを一度だけ周回させるため、リング 型加速器のような多数周回での平衡状態のビームより 圧倒的に質の良い大電流ビームを提供できるのが ERL の特徴である。近年の高輝度電子銃と超伝導加速空洞 の急速な進歩により飛躍的に発展中である。

この ERL の実現に向け、2006 年から開発を進め、2009 年から R&D 機として、Compact ERL(cERL)を高エネル ギー加速器研究施設(KEK)敷地内に建設し始め、2013 年 12 月に完成した。ここでは ERL 実現に向けた cERL での開発状況を述べるとともに、2014 年以降に本格的 に始まったビーム運転を通じた高品質ビームのエネル ギー回収実験結果と将来展望について述べる。

■ ERLの特徴とERL試験加速器Compact ERL(cERL)

1. ERLの特徴

- ERLの通常のリニアックに対しての利点:
- ●エネルギー回収を行うので、電力消費が小さく、捨て るビームパワーが格段に小さくなり、それによる放射 化も大幅に減少する。

→ 大電流を加速することが可能になる。 ERLの通常の蓄積リングに対しての利点:

常に新鮮なビームが1回だけ周回するので、多数周回する蓄積リングに対し、放射光の発生(放射平衡)や衝突実験等の利用で生じる品質劣化を生じない。
電子銃で作成された高品質大電流ビームの直接利用が可能。短パルスビーム(fs)生成も可能になる。

またマルチターン加速でビームエネルギーを上げられる可能性があり、放射光利用などでは周回部でより多くのユーザーが今までに得られない極端パルスの高輝度放射光の利用が可能となる次世代型加速器である。

代表発表	表者	阪井	寛志	(さかい	ひろし)
				L _ sele mm	المالية المساحد ويوجعوا

所 属 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 第6系

問合せ先 〒305-0801 つくば市大穂1-1 TEL:029-864-5200(内線 4911) FAX:029-864-3182 hiroshi.sakai.phys(アットマーク)kek.jp

- 2. ERL実現のための最重要技術と課題
 - ●高輝度DC電子銃の開発: 安定かつ継続的な大電流かつ高品質(低エミッタン ス)ビームの生成。
 - ●超伝導加速空洞の開発:
 - 大電流高品質ビームを安定かつ継続的に加速する。 ●ERLのビームダイナミクスの詳細研究:
 - 入射部や周回部での高品質を維持したまま大電流ビ ームを損失なく安定に輸送する。

3. Compact ERL (cERL)

cERLは上記課題を解決すべく、KEKを中心に将来光 源に要求される良質なビーム生成・加速・周回およびエネ ルギー回収の実証を行うために提案された。図1にcERL の概要と建設後の写真を示す。また表1がcERLの設計値 である。具体的にはcERLは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的にエネル ギー回収できるかの実証を目的としている。



図1 Compact ERL の概要と建設後の写真

表	1: cERL	の設計値.

ビームエネルギー	35 MeV
ビーム電流	10 mA(初期)
	→100mA(長期目標値)
規格化エミッタンス	<1 mm mrad
バンチ長	1-3 ps(通常)
	100 fs (バンチ圧縮時)





SATテクノロジー・ショーケース2016

■ Compact ERLでの開発状況

1. 高輝度DC電子銃開発状況と入射部

低エミッタンスビーム生成のためには、低エネルギー領 域でのビーム(バンチ)内の発散を抑えるべくできるだけ 高い電圧、短い距離かつDCで安定的に高エネルギー加 速することが重要である。熱陰極による温度によるビーム の発散を抑えるために陰極にGaAsを設置し、そこにレーザ ーを照射することで光電効果により質のいいビームを生成 する。また、陰極は多段のガードリングによるセラミックで絶 縁し、高電圧による暗電流のセラミックへのダメージを防ぐ とこでJAEAでのテストで世界初の500kVのDC運転を可能 にした。これをcERLへ2013年にインストールしている。

電子ビームは電子銃から出た後、バンチャー空洞によ りバンチ圧縮された後に、すぐに、入射器超伝導加速空 洞で加速される。そこで、ビームエネルギーを高くすること で、空間電荷効果をある程度抑制した輸送が可能になり、 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エネルギー回収が行われる。

2. 主加速部超伝導空洞の開発状況

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。2 台の1.3 GHz のNb 製の9セル超 伝導空洞で構成され、空洞性能としては高Q値(>1x10¹⁰) 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、KEKではERL 用に特化した改良設計 を行った空洞を作成し、最大600 mA までの大電流運転が 可能な設計にしている。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て おり、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。2012年12月には、 cERL に設置された状態で大電力試験を行い、各空洞に 15 MV /m以上の加速勾配をかけることができたが、両空洞 ともに8 MV/m 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性能(Q値)の劣化も観測され た。2013年12月から始ま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 として、ビーム運転を開始 した。

3	. cERLでのビーム	運転とエネルギー	・回収の実現	
	2013年にビーム	運転を開始し、	2015年10月	現在、

20MeVでCWで90 μ Aのビームのエネルギー回収を実現して いる。図2はエネルギー回収をビーム負荷から直接的に証 明するための試験結果である。図の縦軸は空洞への入力 RF パワー(Pin)と反射RF パワー(Pref)の差の変化量 Δ (Pin – Pref)である。ビーム負荷運転" Beam loading test"によると、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 Δ (Pin – Pref)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 Δ (Pin – Pref)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、 Δ (Pin – Pref)に変化が見られない。このことから、エネルギー回 収がうまく行っていることが確認できている。



図2cERL でのエネルギー回収実証結果。

cERLではCW 90 µ Aでの放射線ロスのない低エミッタンス ビーム輸送も実現しており、今後未だ世界で実現していな い初期目標の10mAまでのエネルギー回収を着実に進め、 cERLにて、高輝度電子銃や超伝導空洞の基盤技術の確 立を行いながら、EUV光源などに必要な大規模ERLの実現 を目指していく。また、2014年度末ごろにはLaser Comptonによる7keVのX線ビームイメージングも実現してお り、cERLの特徴を生かしたX線イメージングや短パルス大 強度テラヘルツ光の利用も今後進めていく予定である。