

MICRO-PULSE REPETITION DOUBLING OF JAEA ERL-FEL

R. Nagai^{1,A)}, R. Hajima^{A)}, N. Nishimori^{A)}, M. Sawamura^{A)}, N. Kikuzawa^{A)}, H. Iijima^{A)}, T. Nishitani^{A)}, E. Minehara^{B)}

^{A)}Energy Recovery Linac Development Group, Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

^{B)}Advanced Photon Source Development Unit, Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195

Abstract

An energy-recovery linac (ERL) for a high-power free-electron laser (FEL) R&D program is in progress at Japan Atomic Energy Agency (JAEA). The first energy-recovery operation and FEL lasing was demonstrated in 2002 by remodeling the original superconducting linac. In the first demonstration, the accelerated beam current was same as the original linac. One of the benefits of the ERL is that the accelerating beam current can be easily increase by changing micro-pulse repetition rate without increasing the main linac RF source. After the first demonstration, the e-gun, the injector RF source, the low-level RF controller, and the operation system were improved for the beam current doubling. The doubled beam acceleration and FEL lasing have been successfully achieved with 10mA of beam current and 0.7kW of FEL power.

JAEA ERL-FELにおけるマイクロパルス繰返しの二倍化

1. はじめに

FELの高出力化のためにはFEL変換効率の向上とビーム電力の増加の二つが考えられるが、FEL変換効率はせいぜい数%であるので、将来にわたって何桁もFEL出力を上げていくためにはビーム電力を増加する必要がある。しかし、通常のリニアックでビーム電力を増加していくには、大きな高周波源が必要であること、この高周波電力を加速空洞へ導入するための容量の大きなカップラが必要であること、FEL光に変化できなかったビーム電力を何らかの方法でダンプしなければならないというように多くの問題がある。

ERLでは利用されなかった電子ビームのエネルギーを減速・回収することで少ない高周波電力で大

電流のビーム加速が可能である。また、低いエネルギーまで減速した後にダンプされるのでビームダンプ部分での除熱、放射線遮蔽の問題が大きく緩和される。従って、ERLをFELの駆動源とすることで先に挙げた問題の多くは解決され、加速器に投入された高周波電力の殆どがFEL光へ変換されるという非常に効率の良いFELが実現される。

原子力機構では2000年に当時のFELの最高出力での発振に成功した従来型の超伝導リニアック^[1]をERL (JAEA-ERL)に改造しFELの高出力化を行っている。この結果、エネルギー回収とFEL発振に2002年に成功している^[2]。しかし、この際の加速電流は改造前のリニアックと同じであり、ERLの利点を生かしたものではなかった。そこで、マイクロパルス繰



図1 : JAEA-ERL 加速器の構成

¹ E-mail: nagai.ryoji@jaea.go.jp

返しを二倍にし、高周波源の容量を超える電流を加速するための改良を行い加速ビーム電力の増加とFEL光の高出力化に成功した。

2. 加速器の改良

JAEA-ERLは図1に示すように、グリッド制御型の熱陰極をもつ250kV電子銃、主加速器の1/8の周波数の83.3MHz低調波バンチャ(SHB)、周波数499.8MHz、単セルの超伝導前段加速器2台、2段梯子型合流部、周波数499.8MHz、5セルの超伝導主加速器、TBA型ビーム輸送系、アンジュレータおよび光共振器、TBA型回収ビーム輸送系から構成される。JAEA-ERLは通常の超伝導リアック^[2]を改造したものであり、マイクロパルスの繰返しは10.4125MHz、マクロ平均電流は5mAであった。この加速器について、マイクロパルス繰返しを二倍にし、主加速器に供給される高周波電力を上回る電力のビームを加速するために以下の改良を行った。

改造前のグリッドパルサは20.825MHzでの駆動は不可能だったので、パルサの主回路を交換し20.825MHzの駆動を可能にした^[3]。このパルサ回路と周辺機器の調整により、電子銃から出た直後の電子ビームの時間ジッタは12.8ps-rmsまで低減された。

ERLに改造しても前段加速器については、エネルギー回収されないで、前段加速器の高周波源を増強する必要があった。そこで、従来使用していた8kW全半導体型増幅器を50kW-IOTに変更した^[4]。これにより前段加速器ではマクロ平均40mAまで加速可能となった。

改造前の超伝導加速器の高周波制御系は1deg-rmsの位相安定度を目標として製作されたものであり、回路の温度制御もされてなかったために、高い位相安定度が求められるERLにとっては不十分なものであったので、加速電場の安定性向上と再現性確保のためにローレベル高周波制御装置の改造を行った^[5]。この結果、ビーム加速状態でのマクロパルス内での位相および振幅の安定度はそれぞれ0.07%-rms、0.07deg-rmsが得られた。また、高周波信号伝送経路については、気温が変動すると高周波信号伝送路の電気長が変化（主に誘電体の温度特性）するために加速位相が気温の影響により変化してしまう。これを避けるために加速空洞、グリッドパルサ、ローレベル制御装置を結ぶ高周波伝送線路に改良を施した。具体的には、ケーブルを電気長温度係数の小さいものにし、更に温水を流した銅管にケーブルを沿わせ断熱材で保温することで、高周波信号伝送路の位相変動を抑えた^[6]。この結果、高周波系全体として、年間の位相安定度0.1deg-rmsを確保できるようになった。

ERLの入射部および合流部では複雑なビーム輸送を行っているので、加速器の運転パラメータの最適化は容易ではない。そこで、加速器運転パラメータの系統的探索のためにデータロギングシステムと連動した加速器制御システムを導入した^[7]。また、この際の初期パラメータとしては数値計算により求めた最適パラメータ^[8]を用いた。この結果、アンジュ

レータ部分で10ps程度のパンチ長を持つビームを得ることが出来た。

マイクロパルス繰返しが従来の10.4125MHzから20.825MHzとなったことで、光共振器の長さを14.4mから7.2mへと短くすることが可能となった。光共振器の長さを短くすることで、アライメントが容易になりかつ光共振器の振動などの影響も受けにくくなる。共振器長を短くした際の光共振器の形状についても最大の効率が得られるよう最適化を行い、ミスアライメントについての評価も行った^[9]。

3. 回収加速および発振実験

マイクロパルス繰返しを二倍にして加速を行う前に従来の繰返し周波数10.4125MHzでエネルギー回収の調整を行った。これはエネルギー回収が十分に出来ない状態で繰返しを二倍に増やしてしまうと、主加速器の高周波電力が不足してしまいビームを加速出来なくなるからである。この調整の後に繰返しを二倍に切り換えることで従来の二倍の繰返しである20.825MHzでの加速に成功した。このときの主加速器直前の電流モニタの信号を図2に示す。20.825MHzで主加速器に入射されるビームの信号と回収ビーム輸送系を通過して一周し再入射されるビームの信号がほぼ同じ振幅で見られる。

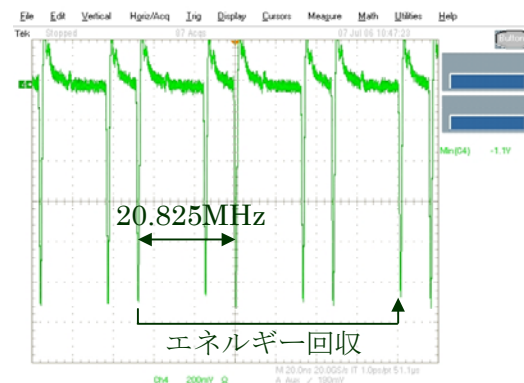


図2：電流モニタによるマイクロパルス信号

図3に主加速器の高周波源の出力波形を示す。JAEA-ERLでは10ppsのパルスモードで運転しており高周波を投入しているのは2msで後半の1msでビームを加速している。図の場合はビームのマクロパルス幅230μsで運転している。ビームが入った時と切れた時にはフィードバック回路により加速空洞内の電場を一定に保つために高周波源の出力波形にスパイクが生じている。マクロパルス内とビームが無い部分での高周波出力がほぼ等しくなっていることから、エネルギー回収により高周波電力はビームの無い時とほぼ同程度の高周波出力で済んでいるが分かる。このことからERLでは加速空洞に加速電場を励起する分だけの高周波電力さえあれば大きな電流のビームを加速できることが分かる。ただし、図からも分かるようにパルスモードの運転ではビームのOn/Offなどの擾乱を補うための高周波電力が必要となる。

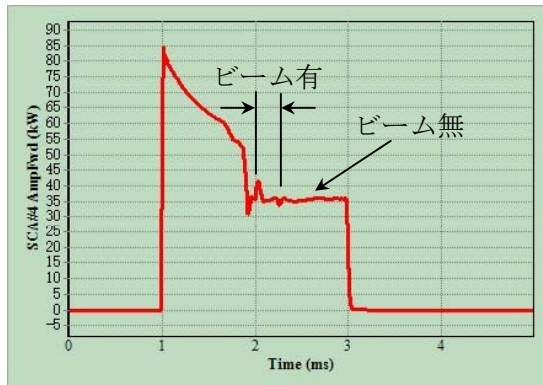


図3：主加速器用高周波電力の出力波形

ビームを回収加速後、自発放射光をMCTでモニタしながら光共振器の傾きと長さを調整することでFELの発振に至っている。発振後の電子ビームのエネルギー損失を偏向電磁石後に設置したワイヤモニタで計測することでFEL変換効率を求めた。ワイヤモニタで失う電荷量は電子ビーム全体の一部だけであり、この量は高周波電力の余剰分の範囲内なので、エネルギー回収運転に支障なく使うことが出来る。共振器長を変えたときのFEL変換効率を図4に示す。最大の変換効率、出力はそれぞれ2.7%と0.7kWであった。また、光共振器の出力効率は約30%でありほぼ設計値^[9]どおりであった。

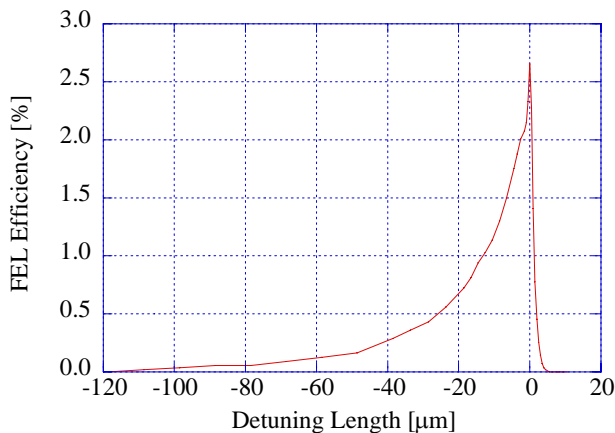


図4：光共振器長に対するFEL変換効率の変化

発振した後の電子ビームはエネルギー広がりが大きくなるので、この電子ビームを回収するためにはエネルギーアクセプタンスの大きいビーム輸送系が必要である。図5にFEL変換効率の変化に対するビームダンプでの回収率の変化の様子を示す。変換効率1%程度まではほぼ全量を回収できているが、その先ではビームを失っている。現状では高周波電力の余剰分でこれを補うことができるが、今後更にビーム電流を大きくしていくには、この損失をなくさなければならない。アンジュレータ後のアークのエネルギーアクセプタンスは計算では約16%であり、ほぼ通過できると思われる。実際にアーク部分での放射線発生は殆どない。従って、減速していく際にビームを失っているものと思われる。アンジュレー

タ直後でのエネルギー広がり減速後ダのエネルギーに対して大きすぎるので全量を減速、回収するにはエネルギー圧縮をする必要がある^[10]。これにはアーク部分のR56と周長の調整による減速位相の最適化が必要である。今後、回収率を向上するために、このようなパラメータの最適化を行っていく。

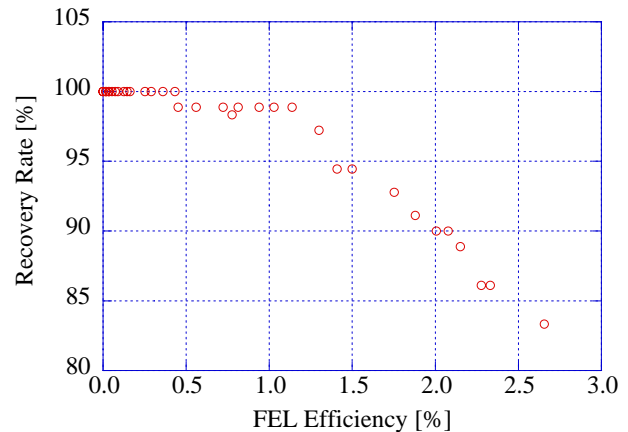


図5：FEL変換効率に対するビーム回収率の変化

4. まとめ

ERLでは高周波源の容量を超えるビーム電力の加速が行えることが最大の利点であり、マイクロパルス繰返しを増やすだけで容易にビーム電力を増やすことが出来ることが実証できた。今後、回収率の問題を解決し、低調波バンチャの周波数83.3MHzまでマイクロパルスの繰返しを増やすことでビーム電力を増加させFELの高出力化を進めていく。

参考文献

- [1] N. Nishimori, et al., Nucl. Instr. and Meth. **A475** (2001) 266-269.
- [2] R. Hajima, et al., Nucl. Instr. and Meth. **A507** (2003) 115-119.
- [3] N. Nishimori, et al., Proc. of the APAC2004 (2004) 625-627.
- [4] M. Sawamura, et al., Nucl. Instr. and Meth. **A557** (2006) 287-289.
- [5] R. Nagai, et al., Proc. of the Annual Meeting of Part. Acc. Soc. (2004) 293-295.
- [6] R. Nagai, et al., Proc. of the 14th Symposium on Acc. Sci. and Tech. (2003) 362-363.
- [7] N. Kikuzawa, Proc of the FEL2003 (2004) II-5.
- [8] R. Nagai, et al., Proc. of the Annual Meeting of Part. Acc. Soc. (2004) 420-422.
- [9] R. Nagai, et al., Nucl. Instr. and Meth. **A528** (2004) 231-234, R. Nagai, et al., Proc. of the FEL2004 (2004) 255-257.
- [10] R. Hajima, E. Minehara, Nucl. Instr. and Meth. **A507** (2003) 141-145.