

# CONCEPTUAL DESIGN OF THE COMPACT AND INDUSTRIAL ERL-FEL

Eisuke J. Minehara

Advanced Photon Source Development Unit, Quantum Beam Science Directorate,  
Japan Atomic Energy Research Agency  
2-4 Shirakata-shirane, Tokai, Naka, Ibaraki 319-1195 Japan

## Abstract

In order to realize a compact, highly-efficient, and high-powered ERL-FEL (energy recovery linac-based free-electron laser) for industrial uses in many application fields, the JAEA (Japan Atomic Energy Research Agency) ERL research team and I have conceptually designed and developed the beam optical configuration, radiation shielding wall, power distribution systems, cryogenic refrigerators, movable ERL-FEL trailer system, electron multiplication foil experiments, large current thermionic electron gun, hybrid DC high voltage power supply, ERL DC injector, high gradient superconducting accelerator cavities, 180 degree folded ERL optics, vacuum pumping system, hybrid undulator, optical resonator, PC-based remote control systems. Here we would like to report some brief summary of the conceptual design and development, and some activities of the applications in nuclear energy industries.

## 産業用小型ERL-FELの設計検討

### 1. はじめに

「小型超伝導エネルギー回収型リニアック (ERL) 駆動自由電子レーザー (FEL) [1] の産業利用は可能か」という問いかけは、1 kW と 10 kW の達成とジェファソン国研や原研機構の 100 kW や米国海軍の 1 MW の計画から出力レベルからは [可能] と考えられる。つまり ERLFEL の具体的な利用対象に対して、その ERLFEL 自体の能力も十分な性能を確保できる。しかし魅力的な産業応用は、他の競合する装置に打ち勝って本当に可能であるのだろうか？この世の進展に寄与できる産業用 ERLFEL が本当に広く利用されるためには ERLFEL 以外には代わりの装置が見つからない、他をもって代え難き独自の性能、独自の役割、或いは魅力的な応用が無ければならない。

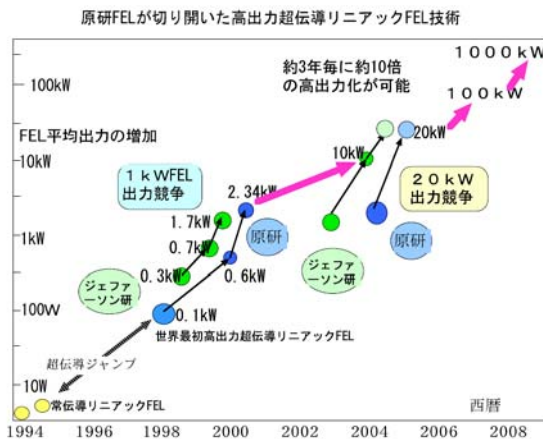


図 1、高平均出力 ERLFEL の進展。

産業用 ERLFEL が実現してない理由は、他にも考えることは容易で、高価な装置、困難な運転、重く

大型、重く厚い遮蔽、非効率であること、また高圧ガス・放射線の法規制があり、特区による規制緩和も期待されるが、困難は多い。

ここでは小型高出力高効率超伝導 ERLFEL を概念設計し、機器外寸、遮蔽外寸、電力設備、電力消費、冷凍機、可搬機構、電子増倍陰極試験、大電流熱電子銃、DC 高圧電源、ERLDC 入射器、高電界加速空洞、折返し光学系、真空系、アンジュレーター、光共振器、制御システム等の主要要素のいくつかを具体的に検討した。本報告では、ERLFEL は安価に製作が可能で、容易に運転が可能で、重量も軽く小型で、軽量で薄い遮蔽、高効率、高圧ガス・放射線の法規制もほとんど無いか、軽微な届出で済む、多くの魅力的な応用が期待されるものが可能となっている。これを実現するための工夫を以下のように議論し、採用した。

1) 安価な装置と容易な運転の具体的工夫として安価な少数光学要素で可能である運転容易な ERL 反転光学系を採用した。バンチを低い繰返しとして、反転光学系行路長を繰返し時間間隔で決まる行路長より短くすることにより、反転光学系での唯一の問題である減速と加速のビームの干渉を避けた。

2) 低デューティ x 大電流 = 中程度の FEL 出力を確保し、これをもって小規模、実験室規模の応用に対応する。大工場や生産設備など大規模応用は冷凍機を換装し、CW (100%) x 大電流 = 大きな FEL 出力を確保する。これは大小両規模とも加速器は冷凍機と総効率異なるが共通仕様とする。図 2 にあるように加速器は大電流電子銃とこれを高圧端に装備した電位差エネルギー回収 (ERL) DC 入射器を安価な大電流加速可能な DC 加速器として用いる。高い効率の加速のために電位差エネルギー回収を行う。冷凍機の容易で安定な運転と電力の節約は、産業用 ERLFEL

の中核となる単純な工夫で、総効率を10%以下として大電荷量大電流を10%以下の小冷凍機負荷＝低消費電力で動作させることが出来る。これ以外に小型無液冷媒クライオスタット、小型GMJTを採用することで、高圧ガスの規制を回避或いは緩和する。

3) 魅力的応用例が不可欠である、例えば原子力エネルギー分野の応用では、原子炉廃止措置のための大出力ERL FELを用いた大規模応用、小出力装置を用いた小規模応用である燃料集合体・燃料棒切断と除染と応力腐食割れ防止 (SCC) 防止等が考えられる。原子力エネルギー分野以外では、アルミニウム合金製航空機降着装置などのSCC防止、内燃機関精密加工・燃料噴射ポンプ、一般産業での類似精密加工その他が考えられる。

## 2. 利用分野

このような小型高出力高効率ERL FELは、科学技術計測分野から軽加工、重加工、建設土木まで多くの分野で利用可能で、これらの応用分野に応じて出力範囲も10Wから100 kW以上まで考えられる。医療、計測、などの低出力応用分野では、低出力冷凍機、低電力DC入射器、低繰返し高周波電源等の組み合わせで安価に超小型に組み上げることが出来る。高出力が必要な建設、土木、原子力エネルギー分野では、高出力冷凍機などの高出力対応構成要素を組み合わせることで実現できる。この小型高出力高効率ERL FELは動力用原子炉の製造、修理、保守、廃止において炉内構成要素を深深度溶接し、髪の毛の幅で肉厚素材を狭幅切断し、表面状態を変えずに完璧に剥ぎ取る除染するなどが可能と考えられる。

## 3. 概念設計・装置構成

### 3.1 大電流DC電子銃

現在、使用している熱電子銃のカソードはEimac製646Bで3極管構造でグリッド径は8mmφカソード径もほぼ同じ直径、エミッタンスは $10\pi$  mmmrad、引き出しパルス幅で1ns弱で電荷量0.6nCから1.2nCを得ている。発散角 $\theta=2.5$  mradはグリッドと引き出し電極で決まり、引き出し半径 $\rho=4$ mmはこのグリッド乃至カソード半径となる。グリッド面が引き出し面でこの面でエミッタンス楕円は直立しており、その位相面積は $\pi\rho\theta$ 、その電流は引き出し面積 $\pi\rho^2$ で増加する。

電子銃カソード面積を大きくして $\rho^2$ 倍の大電荷量大電流を $\rho$ 倍増加した中程度エミッタンスにて得ることができる。たとえば大面積熱電子銃カソードとして、ロシア製カート直径24mmφで電荷量5.4nCから11nCをエミッタンス $30\pi$  mmmradが可能と考えられる。このような熱電子銃で10MHz10nCで0.1Aが可能となる。熱電子銃はさらにバンチング集群が必要でこれを行うSHB(低調波バンチャ)を高電圧端に置くことは困難であるがすでに静電加速器で確立さ

れた技術で克服できる。位相振幅を制御した80MHzKW級の高周波電源を数気圧のSF6ガス中の高電圧端子内で動作させなければならない。

熱電子銃でなく、Cs<sub>2</sub>Teなどの光電子銃を採用するには10MHz10%以上100%総効率まで駆動できる紫外レーザーが必要である。この場合は5-10mmrad低エミッタンスで平均電流0.1A、電荷量も1-10nC以上が可能で高圧端にSHBも不要となる。

### 3.2 大電流エネルギー回収型DC電子入射器

この小型高出力高効率ERL FELは入射器として大電流高効率2MV電子入射器(図2参照)が必要である。大電流高効率2MV電子入射器としてエネルギー回収型大電流2MVDC加速器を用いる。加速管と減速管は独立して各1本とし、ビームダンプの排気負荷を電子銃側へもたささないように、加速と減速の真空系を分ける。炭素鋼製圧力タンク内はフロンガスかSF6で絶縁する。図2はその具体例で2段階の Cockroft 電源で構成され、初段0.2MVは20kWから10%総効率で2kWの出力を2段目は1.8MVで180W同様にその10%18Wである。1.8MV電源は、ほぼ100%エネルギー回収されるので微弱電流量で良く、Cockroft 以外の安価なバンデグラフ発電機やその親類であるディスクトロン発電機で可能である。

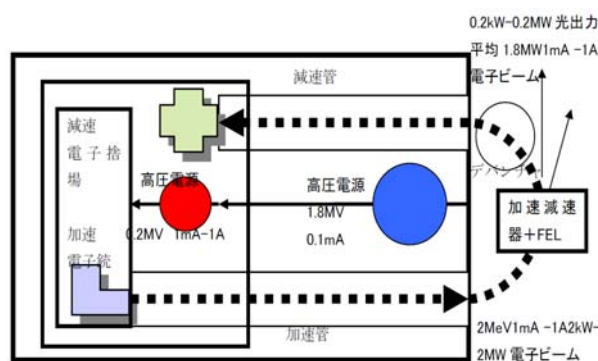


図2、大電流エネルギー回収型2MVDC電子入射器。

### 3.3 加速器

超伝導加速器の運転は、主に冷凍機の運転であり、超伝導加速器の製作・建設は、主に冷凍機と冷凍装置(クライオスタットの製作・建設である。もちろんビーム発生(電子銃、イオン源)、ビームハンドリング(ビーム輸送、加速、FEL発振、減速、ビーム捨て)も運転の一部であるが、超伝導加速器の運転と製作・建設の特殊性と困難は極低温から由来しており、極低温機器の適切な製作・建設と無故障の運転が前提となっている。産業用ERL FELは、すでに実用化され、世界で10万台規模で毎年無停止運転し

ている超伝導MRIと数台しかないが同様の運転を行っている超伝導サイクロトロンを考えると同じ種類の冷凍機やクライオスタットを用いることが前提となると考えられる。従ってすでに15年にわたって無蒸発型クライオスタットとして実績がある原子力機構の現在のシステムか、さらに簡素化し、改良した小型無液冷媒クライオスタットシステムを小型GMJT冷凍機で冷却する方式を採用することになる。図3にその超伝導加速器クライオスタットと小型4KGMJT冷凍機と10K/50KGMJT冷凍機の説明図を示す。

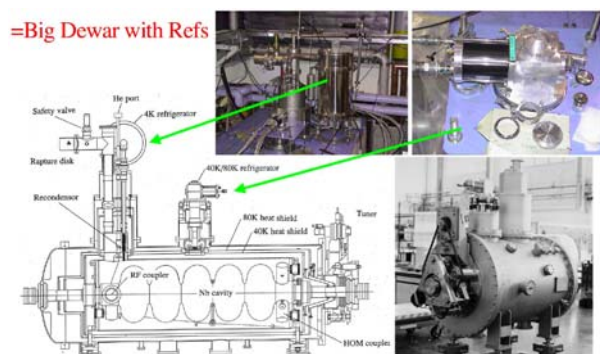


図3、JAEA（原子力機構）無蒸発型クライオスタット。自由電子レーザー駆動用超伝導（高周波線型加速器）リニアックとして15年間の運転実績がある。

低デューティで大電流の動作によって中程度のFEL出力を確保するために、低電界6MV/m程度で3mの加速長を確保する。これは低デューティにすることによって必要冷却能力を低デューティ程度に少なくすることにより安定で安価で電力消費の少ない冷凍機による運転を可能としている。これにより6年以上の無人連続無停止運転実績が小型冷凍機のみで軽加工可能な2kW級の遠赤外から中赤外波長領域において可能である20MeV最終エネルギーを得ることができる。

大出力運転時の冷凍機は常温排気ポンプと熱交換器を用いた4K 600W級He冷凍機を用いて1.8K数十から100Wを確保する。これに磁性蓄冷材を用いた4K級保持用GM冷凍機を持つ。保持進入熱は4K1W/80K50W程度以下に設計する。500MHz加速器空洞 $R/Q = 330\Omega$ 、 $Q_0 = 2 \times 10^{10}$ 、100%総効率で最大平均電流は0.1A、電子ビーム繰り返しは10MHz、入射器を除く全ビーム行程を30m以内とする。装置全長さは7.5mから8.5m程度に収める。加速空洞はダクトからの光による入熱を避けるためにまた真空事故時のコンダクタンス制限のためにチョーク構造とする。加速周波数は、IOT高周波電源を用いれば400-900MHzまで可能である。最適な周波数が可能ならば変更も可能である。熱シールドは、50Kと10K、一部4Kとする。1.8K部分は冷凍機と加速器を直結して構成する。長さは5m程度で設計製作可能と考えている。UHF帯の周波数の加速空洞共振器で1.8kでの電界は33-20MV/mが可能との議論がある。JAEAではまだ確認し

ていないがこの範囲の電界が出ると考えて設計を行う。この電界で低デューティで大電流の動作と同じ加速器クライオスタットで3mの加速長であるので100MeVから60MeV程度の最終エネルギーを得ることができる。これにより近赤外1 $\mu\text{m}$ 程度以下から可視光の発振が可能となる。

真空ダクトにおいてはビームラインバルブを極力入れ無しの構造とする。超伝導加速部分のみ間仕切りバルブをおく。ダクト径はウェイクやBBUなどビームに悪い影響を与えない最小径として設計する。マグネットはその値段は重さに比例すると考えられている。ところがビーム最小径は通常のダクト径と比べて小さく、これに余裕を持って大きなダクト径を考えてもビーム輸送系の光学要素は安くなり、軽量となる。排気ダクトのコンダクタンスの確保はスパッター非蒸発ゲッターポンプ(SNEG)を採用すれば解決する。DC加速器と電子銃とダクトとチャンバーなどは、SNEGポンプ、自然クライオ排気、荒引はTMPを用いる。パージガスは高純度窒素を分留して用いる。SNEGを形成したダクトは直接電流を流して温度を自動調整しながら活性化を行なう。冷却運転は動作温1.8K、保持温4K-10K程度、連続無停止無昇温とする。FEL発振に用いる使用する永久磁石ハイブリッド型アンジュレーターを整備する。共振器は水冷し、一部を装置側から対象物付近まで伸ばし、光輸送として利用する。出力は2kW程度から最大10kW-100kW級とする。

電子銃からは、すでに述べたように $30\pi\text{ mmmrad}$ の横エミッタンス、10nC電荷量、1-2ns全幅で10MHz繰り返し、0.1%エネルギー全幅の縦エミッタンスを想定している。200keVでの低調波集群を計画している。アンジュレーター通過後の平均エネルギー損失とエネルギー拡がりを夫々1%と5%、また時間幅は変化せずに5-10ps程度と仮定して、逆位相で10%まで減速回収とドリフトによりビーム進行方向（時間軸）に広がったバンチをエネルギー圧縮して、5%のエネルギー拡がりを1-2%程度に圧縮する。これによりDC加速器の特性を生かして電位差エネルギー回収の効率を上げる。縦エミッタンスは偏向電磁石がアンジュレーター以降に無いので素直な形状で回収率は高くできると期待される。

今後産業用ERL FELの全体構成、主要要素、部品の見積と詳細設計を進める。また原子力エネルギー分野を中心とする応用検討、具体的な試行実験を進める予定である。

## 参考文献

- [1] Eisuke J. Minehara, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 483A(2002)8-13.