

話 題

原研エネルギー回収型線型加速器 (ERL) 自由電子レーザー (FEL) の開発

峰原 英介*

Development of the JAERI Super-conducting Energy Recovery Linac (ERL) Based Free-Electron Lasers (FELs)

Eisuke J. MINEHARA*

Abstract

The JAERI free-electron laser (FEL) driven by a compact, energy recovery superconducting rf linac (ERL) has been developed to realize simultaneously a tunable over the mid-infrared (MIR) and far-infrared (FIR) wavelength regions, ultra-short pulse of 255 fs, highly-efficient of 6-9 percents, high-peak power of 1 GW, and high average power of over 2 kW. Here, we briefly describe the JAERI FEL facility and characteristics of the FEL device and ERL driver, and report the 10kW high average power FEL demonstration under way, industrial applications utilizing the existing and future ERL-FELs, and ERL light source applications near future.

1. はじめに

原研エネルギー回収型超伝導リニアック自由電子レーザー施設 (JAERI ERL-FEL) は、現在まで約12年間ほぼ連続運転されており、特に1993年度最初の加速成功、1995年度に施設竣工、1997年度末に最初の発振と当時世界最高出力の0.1 kWを達成、2000年には6-9%の高効率記録、平均2 kW超、ピーク約1 GW高出力記録の更新、255 フェムト秒/3 サイクル発振の計測確認、これらを実現する完全同期の新発振モードの確認¹⁾等の多くの成果をあげた。更に2001年4月より、エネルギー回収系組み込みとエネルギー回収リニアック (ERL) 実験を開始し、2002年2月最初のエネルギー回収動作、また同年8月 ERL-FEL 発振に成功した。現在さらに10 kW級 ERL-FEL アップグレード、利用試行実験、ERL 放射光源開発等を進めている。

原研独自の自立式無蒸発型超伝導リニアック (図1) は、設置以来、1年に1回クライオスタットの温度を常温まで上げて行われる10日の保守日と停電などを除き、ほぼ連続で9年運転された²⁾。図2参照。特に

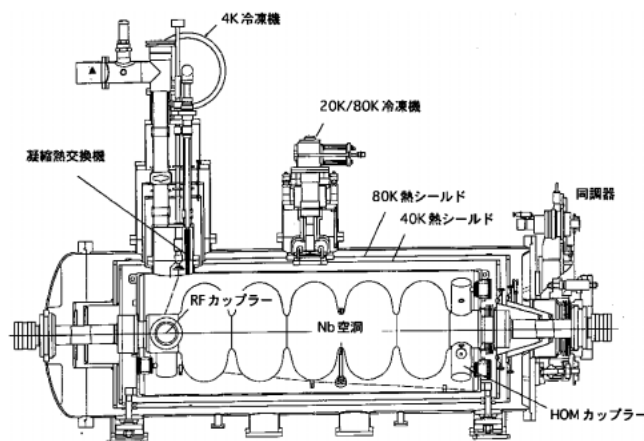


図1 自立式無蒸発型超伝導リニアック

2000年度は、無故障で、17ヶ月安定に連続運転された。ERL 改修後、昇温して行う常温での保守交換は行わずに、現在まで約4年間極低温状態ですべての冷凍器の保守交換作業を行い、1回当たり数十分から数時間の液化冷凍機とシールド冷凍機の交換時間を含めて10から20年間程度にわたり液化ヘリウム温度

* 日本原子力研究所 関西研究所 量子科学センター東海駐在 自由電子レーザー研究グループ
Free-Electron Laser Laboratory at Tokai, Advanced Photon Research Center, Kansai Research Establishment, Japan
Atomic Energy Research Institute
(E-mail: eisuke@jfel.tokai.jaeri.go.jp)

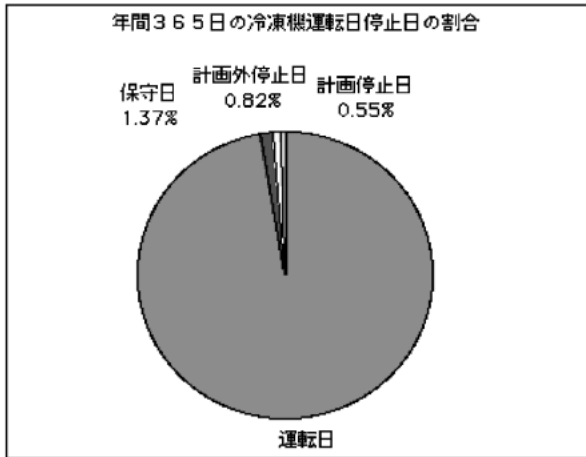


図2 1996年度の運転実績

を連続して保持することが可能になった。今後は研究プログラム終了まで数十年に渡り液体ヘリウムを連続して保持し、蒸発が皆無であるので、超伝導空洞は最初の調整運転乃至コンデショニングのみで高電界を常時発生できるので、システムを常時運転状態に保持できると期待されている。

2. FEL 光源及び利用の実験

自由電子レーザー (FEL) では初めてフェムト秒領域の光パルスを安定に発生することが出来た。2000年2月、準連続波運転で世界最高出力の2.34 kWを達成した。この状態は、高輝度で高効率であり、高縮重度超放射と言うべき発振状態であることが特性解析実験で明確となった。波長可変性を保持したまま、最高6-9%高効率、平均約2kW超、ピーク約1GW高出力、255フェムト秒/3サイクル発振(図3参照)の成功は、自由電子レーザーの元々持っていた原理的優位性を実証し、さらに少数サイクル発振フェムト秒域の極短パルスを新たに実現した。レーザー無しでの完全同期状態でこの性能が得られている。今までのどのレーザーでも実現できなかった同時に高効率、高平均出力且つ高ピーク出力、波長可変、極短パルスが得られており、大規模産業应用到極短パルスによる非熱加工などの新しい手段と可能性を提供するものである。光化学反応、豚心臓の切断、原子炉圧力容器内構造物等のステンレス鋼応力腐食割れ防止、金属やセラミック板切断と穿孔、ダイオキシン、PCB等の環境有害物質の除害分解、エネルギー伝送等に関して産業应用のための利用実験、原理検証、利用試行或いは技術検討を行った。これらの実験結果や技術検討と併せて、今後高出力FELの出力増加を予

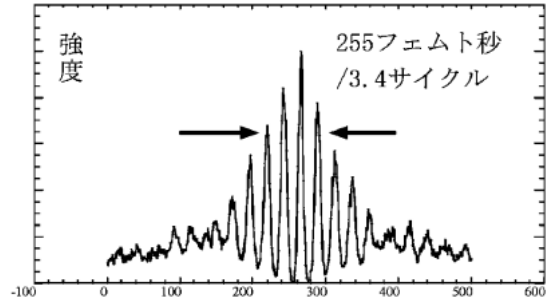


図3 自己相関パルス幅計測

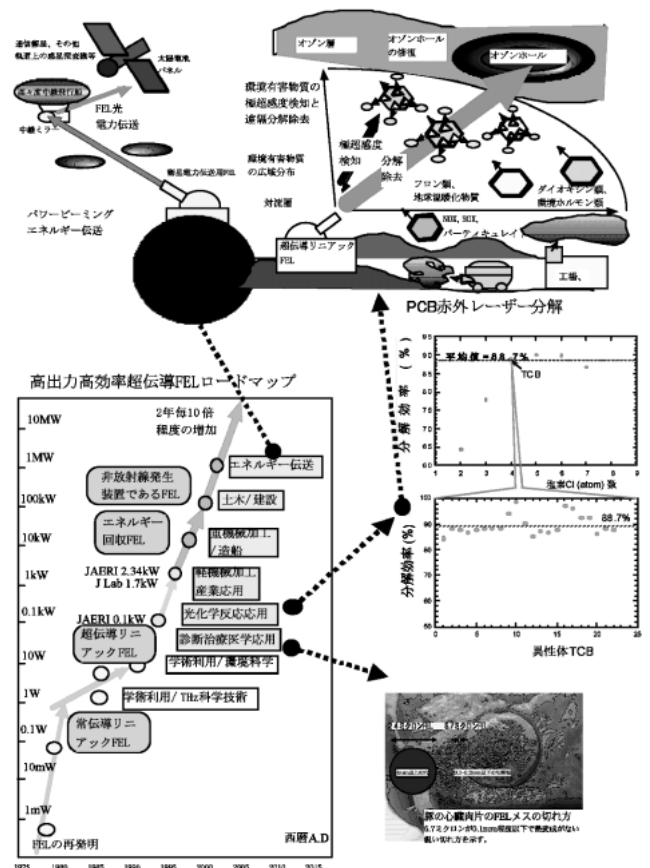


図4 高出力FELのロードマップと応用

想し、図4にロードマップとしてまとめた。

3. 将来計画

3.1 IRFEL エネルギー回収系の建設、出力試験

図5は、現在10kWアップグレード工事中のエネルギー回収型超伝導自由電子レーザー施設の説明図である。図6は、FELにおけるエネルギー回収の概念を簡単に説明している。超伝導リニアックの内部の高周波エネルギーは、図6のように加速位相に電子ビームが入射された時に、無損失で加速ビームのエネル



図5 エネルギー回収型超伝導 FEL

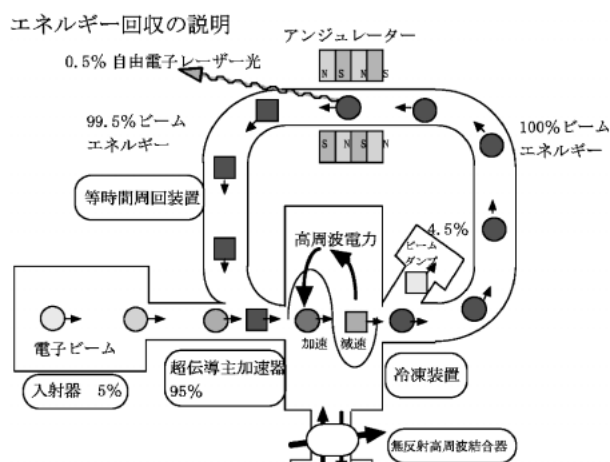


図6 エネルギー回収の説明

ギーに完全変換される。ビームエネルギーは、その一部が FEL 装置で光エネルギーに変換される。大部分のビームエネルギーは、超伝導リニアックの減速位相に再入射された電子ビームから超伝導空洞内部の高周波エネルギーに完全変換される。高周波源は制御に必要なわずかな割合をダミーロードに捨てており、この分が補給され、加速器全系で発生するわずかな実損失追加となる。光に変換された実質減少分の電子エネルギーを入射器側から補給するだけでよいことになる。

2001 年、ERL-FEL のエネルギー回収系組み込み工事を進め、放射性発生装置の変更申請後、エネルギー回収実験に成功、さらに 2002 年 ERL-FEL 発振を達成した。エネルギー回収による高出力化以外に高縮重度超放射を用いた高出力発振実験を計画している。この新しい発振状態は今後さらに高効率、極短パルス、高出力を実現できると期待している。図4に説明するようにエネルギー回収では今後、2-3 年毎に1桁の出力上昇が可能であると期待される。

最短波長 FEL と ERL ロードマップ

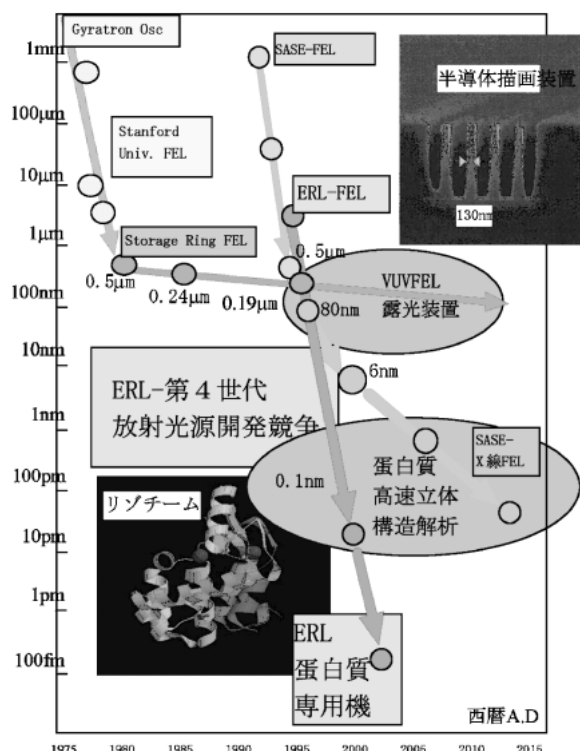


図7 最短波長 FEL ERL 放射光のロードマップ

3.2 エネルギー回収型 VUVFEL 計画

高出力極紫外線域自由電子レーザー (EUVFEL) 開発と利用、さらにこれを用いた次世代放射光源として期待されている X 線領域 ERL 放射光源の要素技術開発を計画している。200 MeV 程度のエネルギー回収型超伝導リニアックを EUVFEL の駆動源として計画している。予算が認められれば、新規に FEL 建家を拡張整備し、現在の IRFEL を移設する。併行して X 線領域の ERL 放射光源要素技術開発のための EUVFEL の建設と関連利用研究棟の建設を行う。

3.3 エネルギー回収型リニアック放射光 (ERL) 計画

エネルギー回収型超伝導リニアック (ERL) 駆動極紫外線域自由電子レーザー (EUVFEL) は、エネルギー回収型リニアック放射光施設のプロトタイプ或いは要素技術開発システムである。将来国内に全日本或いはアジア地域共同利用の実用的エネルギー回収型リニアック放射光が建設されるときには、エネルギー回収型リニアック放射光技術 (ERL 放射光と略称) あるいは計画全体を提案し、主要な役割を担うことを目標としている。

図7は、短波長超伝導 FEL 及び ERL 放射光のロードマップで短波長化の進展を予測している。図中

超伝導リニアックFELの開発ステップ

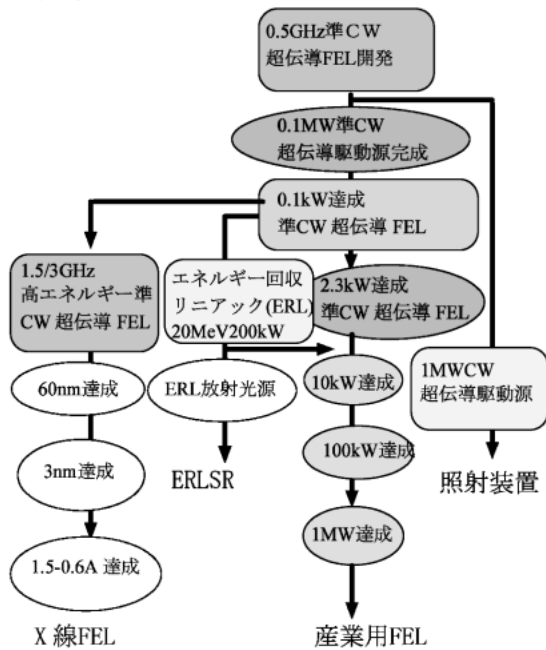


図8 超伝導リニアックとこれを用いたFELの開発と今後のエネルギー回収型超伝導リニアックを用いるFEL及び放射光源の開発に関する将来計画

に代表的な2例の応用を入れた。この図は、EUV-FELを用いる半導体露光装置例とERL放射光を用いる蛋白質の高速立体構造解析例である。ERL放射光源は、第4世代の放射光源で第3世代の千倍の輝度と百倍の強度が可能で、0.1 psのパルス幅と回折限界のX線が得られる。建設費も第3世代の30%程度で建設できると期待される。

3.4 開発ステップまとめ

現在までの超伝導リニアックとこれを用いたFELの開発と今後のエネルギー回収型超伝導リニアック(ERL)を用いるFEL及び放射光源の開発に関する将来計画は、図8のようにまとめることができる。最初の0.5 GHz超伝導リニアックFEL駆動源から準CW超伝導FELによる高出力FELとエネルギー回収型超伝導リニアック(ERL)を用いるERL-FELの実証までが現状で、高平均出力と高ピーク出力が同時に実現できる新しいフェムト秒パルス幅発振を世界で最初に実証した。さらに、エネルギー回収と同発振実験に成功した。今後は、図にもあるように、3つの方向が計画されている。1番目は既にも実績のある100 kWからMW級の超伝導リニアック電子線照射装置、高周波変換ロスのない、高効率の照射装置である。2番目はエネルギー回収と新発振モードを利用するkWからMW級の産業用FEL装置である。既に非回

超伝導エネルギー回収量子源の開発ステップ

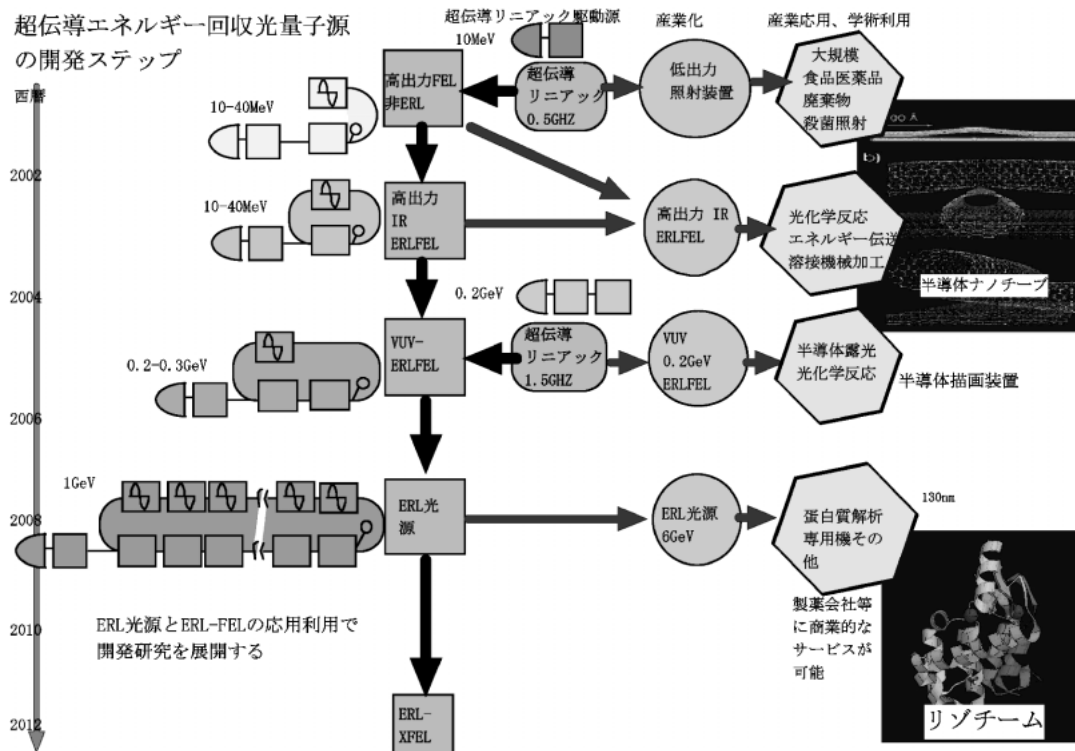


図9 エネルギー回収技術の産業応用学術利用の進展

表1 自由電子レーザー光の利用分野

分野	利用項目	利用例	
原子力研究分野への応用	同位体分離	ウラン濃縮	原子法ウラン濃縮, 分子法ウラン濃縮
		原子力新材料の精製	^{90}Zr , ^{50}Ti , ^{53}Cr , ^{64}Zn などの精製
	再処理, 廃棄物処理		U, Pu その他の元素抽出, 群分離
	原子力技術		放射性材料の加工 (遠隔加工), 冷間加工応用腐食割防止 (防食技術) 燃料の切断 (遠隔操作), 原子炉解体 (遠隔操作)
	核融合		プラズマ加熱 (電流駆動), プラズマ診断 (温度, 密度) レーザー核融合, ミューオン触媒核融合の反応加
	基礎科学		加速器への応用, 電波天文学への応用 (局部発振器) 重力波天文台用レーザー
基礎化学・物性研究分野への応用	光電子分光		バンド構造の決定, 素励起子, 不純物準位, 物質の光電子分光
	遠赤外分光		超伝導体のメカニズム 高温超伝導材料の研究 超伝導ギャップエネルギー
	新材料の精製及び同位体分離によるモノ・アイソトピック材料		H, B, C, O, Si 等の同位体分離, 同位体利用工学技術 物性値 (熱伝導率等) の大幅な改善
	バイオテクノロジー		DNA 構造の解体, DNA 神経繊維などの切断, 高速蛋白質立体解析
	光励起化学反応, 量子制御		メゾスコピック素材 (サブミクロン以下) の開発・研究
	テラヘルツ科学と工学		量子井戸, 量子細線, 量子点等の THz 高速素子, CT 量子素子検出素子/レーザー, 環境有害物質の検出と分解
医療研究分野への応用	光化学反応を用いる場合		癌治療, 動脈硬化部除去, コレステロール分解, 骨切断, 胆石砕石, 近視・角膜の微小切断手術, レーザー蛍光内視鏡, 殺菌, 滅菌
	熱的作用を用いる場合		レーザーメス, 光凝固法, あざ, メラニン沈着性疾患, レーザー内視鏡法
	その他		光刺激利用の機能回復, レーザー麻酔, レーザー鍼, 光 CT, 生体内元素の濃度計測, ドップラー効果を使った血流測定, 代謝異常診断, レーザー歯科 (治療, 虫歯の予防, 加工), 細胞溶接, 遺伝子注入
光表面加工技術・薄セへの膜・半導体	レーザー加工		レーザー非熱加工 (冷間加工応力腐食割れ防止), 穿孔, 切断, 溶接, 表面加工, 変態焼き入れ, アニール, 溶接プロセス (合金化, 肉盛, 表面溶融), レーザーボーリング (石油井戸掘削), プラント建設
	薄膜・表面プロセス		光 CDV (レーザー化学蒸着), レーザー励起エッチング リソグラフィ (精密微小パターンの形成) レーザーアベレーション (均一な薄膜の形成) ドーピング (不純物の制御, 高濃度ドーピング) マーキング (永久変色を利用した核印など) 殺菌 (ウエハー, 洗浄水), アニール (局所加熱など)
エエネルギー	遠隔エネルギー伝送		スペースデブリ軌道偏向, 高々度無人飛行船, 飛行機, 惑星探査機, 通信衛星へのエネルギー伝送, 電力, 熱源光伝送
環境科学	高感度検出		フラン, ダイオキソンの広域高感度検出, 遠赤外ライダー, トリチウム遠隔検知, 選択除去, 分離/分解処理 振動励起準位經由の熱分解, 環境ホルモン等有害物質, オゾン層有害物質, 地球温暖化物質等の広領域広帯域モニター

収で回折損を含めると 5 kW 以上電子ビームから光へ変換しており, 1-20 kW までを非エネルギー回収で実証し, 10 kW から 1 MW 以上をエネルギー回収で実現する. 3 番目は ERL 放射光源 (ERLSR) で近い将来の第 4 世代の放射光源の研究開発は, この形式で進展すると考えられる. 4 番目の X 線 FEL は, 技

術的ハードルが高すぎるため, 現在は基礎的な要素技術開発か, 低いエネルギーの真空紫外線域であり, 水の窓領域から 1 keV が次の 5-10 年の目標である. 10 keV 以上の X 線領域は更に 10 年から 20 年後の目標となる. この X 線 FEL をエネルギー回収型リニアックを駆動源として実現するアイデアは, すでに 2000

年に ICFA の次世代光源の会議で原研が提案している。

4. ま と め

原研は、計画から起算すると、現在まで 18 年に渡り超伝導リニアックを用いた自由電子レーザーの開発を続けてきた。この間に国際 FEL 賞、原子力学会賞、文部科学大臣賞、西川賞、加速器科学技術研究会論文賞等を受賞する多くの成果と高い評価を得てきた。この成果をまとめると、

- 1) 誰にでも運転保守が可能でほぼ半永久的に極低温運転が可能な超高性能の超伝導リニアック FEL 駆動源を開発できた。この駆動源を用いて、
- 2) レーザー/FEL の常識を打ち破る極短パルス、

高効率、高平均出力、高ピーク出力、波長可変を同時実現できる、全く新規な「高縮重度超放射」発振を発見した。この新規で類例の無い発振により、いわば、万能のレーザーを実現した。

3) 今後、現在開発中のエネルギー回収技術を実用化することにより、更に多くの産業応用/学術利用が期待され、多くの新しい産業を創出するものと考えられる。図 9 参照。表 1 参照。

参 考 文 献

- 1) N. Nishimori et al., Phys.Rev. Lett., Vol 86, no. 25 pp. 5707-5710 (2001).
- 2) E. J. Minehara et. al., Nucl. Instr. and Meth. A429, 9-11 (1999).