

原研超伝導リニアック自由電子レーザー施設の現状と将来計画

峰原英介、山内俊彦、杉本昌義、沢村勝、羽島良一、永井良治、菊沢信宏、西森信行、静間俊行
 日本原子力研究所 関西研究所 光量子科学研究センター 自由電子レーザー研究グループ
 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4 東海研究所内

概要

原研超伝導リニアック自由電子レーザー施設は、現在まで約10年間ほぼ連続運転されてきた。2001年4月より、エネルギー回収系改造と同実験を進めており、最初のエネルギー回収実験に2月に成功している。現状と検討中の将来計画を報告する。

1. 施設の運転状況

原研独自の自立式無蒸発型超伝導リニアック(図1参照)は、安定に昨年度運転された。設置以来年間約10日の保守日を除き、ほぼ連続で10年運転された[2]。特に一昨年度は、ほぼ無故障で、17ヶ月安定に連続運転された。昨年

自立式無蒸発型超伝導リニアック

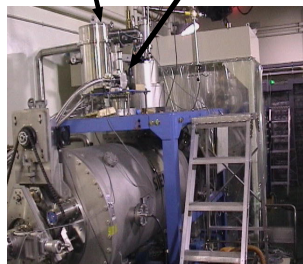
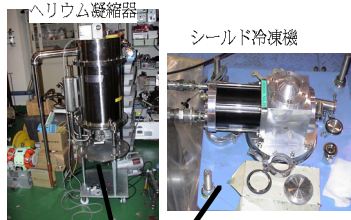


図1. 自立式無蒸発型超伝導リニアック。

年から、極低温状態で冷凍器の交換を行う予定で、一度充填すると10-20年間程度にわたり液化ヘリウムを無蒸発で保持することが可能になる。液体ヘリウム温度を連続して保持することが可能であれば、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可能状態に保持できると期待している。

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安定に発生することが出来た。昨年度、準連続波運転で世界最高出力の2.34kW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昨年度の特性解析実験で明確となった。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サイクル発振光は、自由電子レーザーの元々持っていた優位性を実証し、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。レーザーレサジー無し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

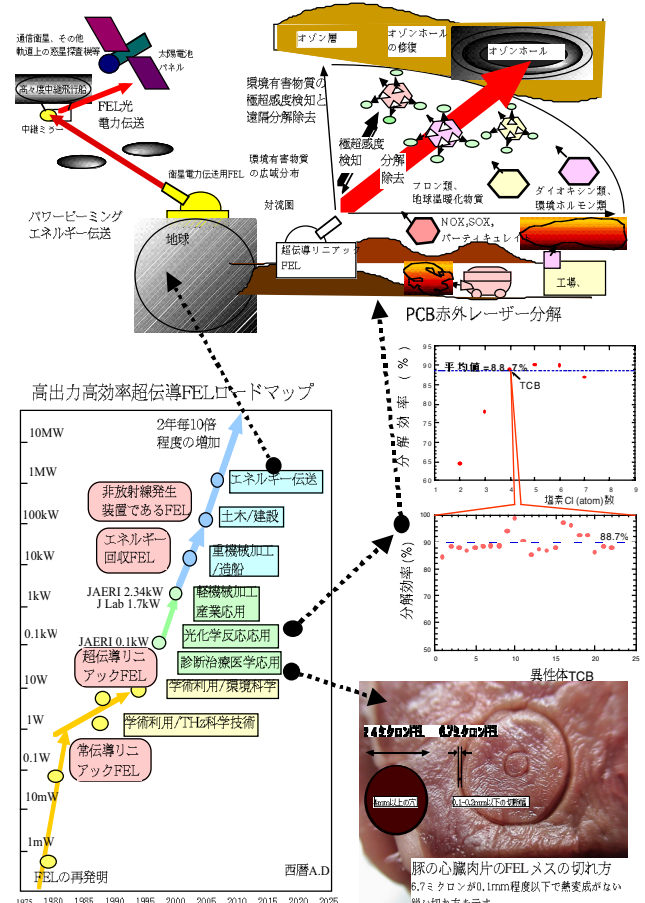


図2. 高平均出力FELのロードマップと応用。

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、大規模産業応用に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、ステンレス薄膜、セラミック板切断、穴あけ、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応用の

ための利用実験あるいは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 の出力増加を予想し、図 2 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、高出力試験

図 3 は、現在試験中のエネルギー回収型超伝導自由電子レーザー施設である。

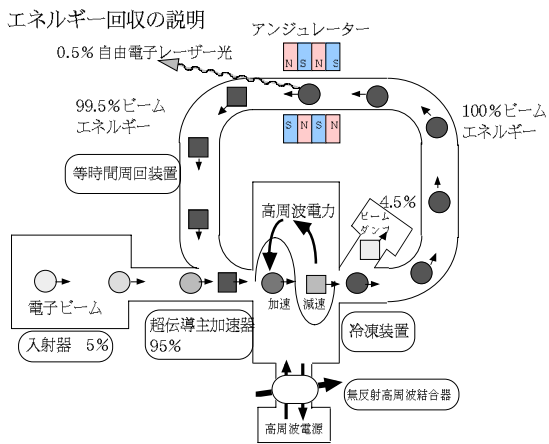
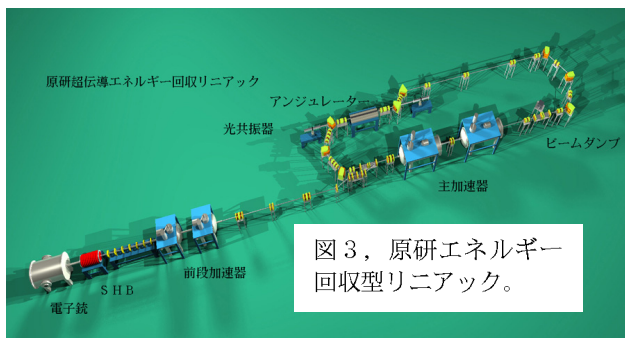


図 4, エネルギー回収の説明。

図 4 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 4 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、加速器の実損となる。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 4 月より、エネルギー回収系組み込みと同準備実験を進めている。同年 10 月変更許可取得後 2002 年 2 月最初のエネルギー回収実験に成功した。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 2 に説明するようにエネルギー回収では今後、2 年毎に 1 桁の出力上昇が期待される。

3.2 エネルギー回収型 UVFEL 計画

高出力紫外線域自由電子レーザー(VUVFEL)開発と利用、さらにこれを用いた X 線 FEL の要素技術開発を計画している。200MeV 程度のエネルギー回収型超伝導リニアックを UVFEL 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 建家を建設し、現在の IRFEL を移設する。平行して VUVFEL の建設と利用研究棟の建設を行う。

最短波長FELとERLロードマップ

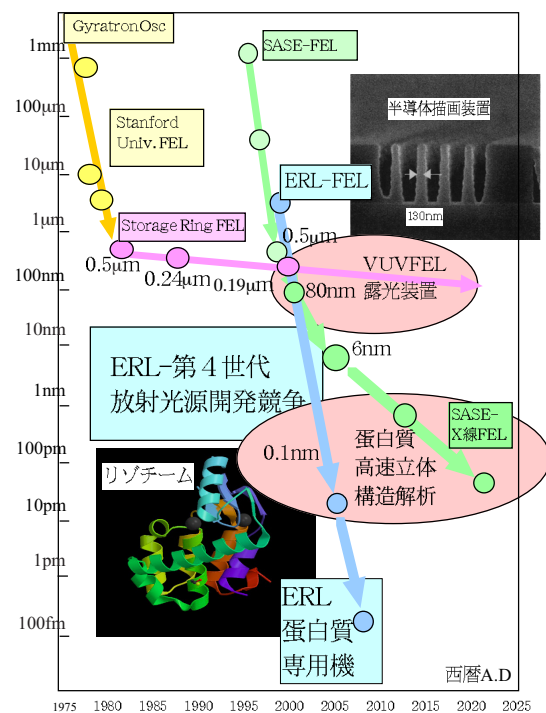


図 5 は、短波長超伝導 FEL 及び ERL 放射光のロードマップ。

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 VUVFEL は、エネルギー回収型リニアック放射光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際には、エネルギー回収型リニアック放射光技術 (ERL 放射光

と略称する。)を提案し、主要な役割を担うことを目標としている。

図5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。図中に代表的な2例の応用を入れた。VUVFEL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、回折限界のx線が得られる。建設費も第3世代の20%程度以下で建設できると期待される。

4.まとめ

超伝導リニアックFELの開発ステップ

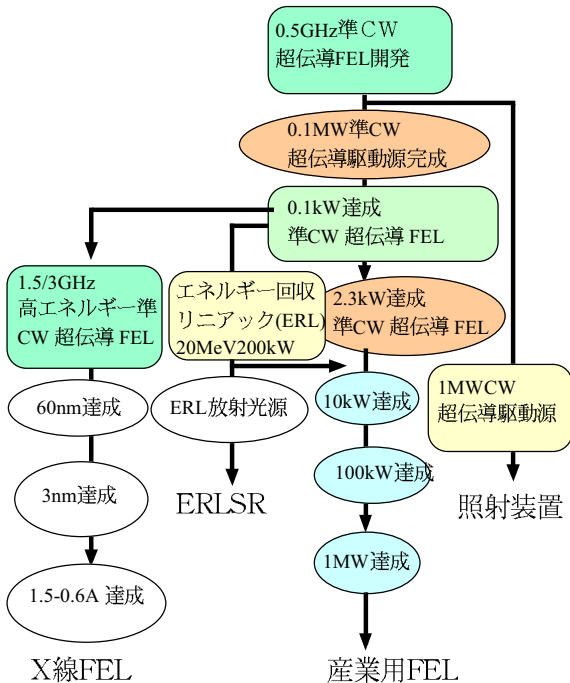


図7, 原研FELの開発ステップと目標。

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を用いるFEL及び放射光源の開発に関する将来計画は、図6のようにまとめることができる。最初の0.5GHz超伝導リニアックFEL駆動源から準CW超伝導FELに寄る高出力FELの実証までが現状で、高平均出力と高ピーク出力の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。その後、2002年2月にエネルギー回収の実験に成功した。今後は、図にもあるように、またこの報告の題目にもあるように、3つの方向が計画されてい

る。1番目は既の実績のあるkWからMW級の超伝導リニアック照射装置、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。既に非回収で回折損を含めると5kW以上電子ビームから光へ変換しており、1-20kWまでを非回収で実証し、kWからMW以上を回収で実現する。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1keVが次の5-10年の目標である。10keV以上のx線領域は更に10年から20年後の目標となる。

図8は、原研超伝導リニアック及びエネルギー回収光量子源の開発ステップと産業化目標及び応用分野を説明している。今後、10年間の開発と20年間の産業化を展望している。

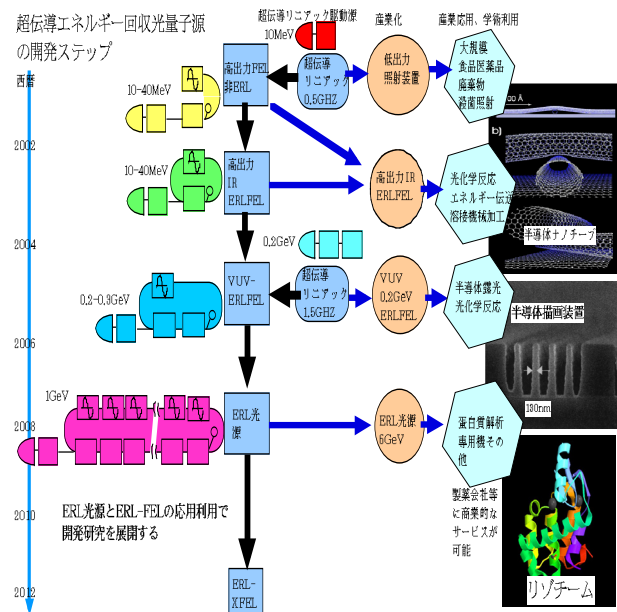


図8, 原研超伝導リニアック及びエネルギー回収光量子源の開発ステップと産業化目標及び応用分野。

参考文献

- [1] N. Nishimori et al, Phys.Rev. Lett., Vol86, no. 25 pp. 5707-5710(2001).
- [2] E.J.Minehara et. al., Nucl.Instr.and Meth. A429,9-11(1999)