

原研超伝導リニアック自由電子レーザーの現状

峰原英介¹⁾、羽島良一、沢村勝、永井良治、菊澤信宏、西森信行
日本原子力研究所 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2-4

概要

原研超伝導リニアック駆動自由電子レーザー施設及び研究開発の現状について報告する。冷凍機運転状況、産業用高出力レーザー、ERL放射光源の概念設計、要素検討研究、産業応用等について概略報告する。

1. 冷凍機の運転状況

冷凍機本体が加速器に組み込まれた原研独自の自立式無蒸発型超伝導リニアックは、1992年から1年毎の保守により連続運転されてきた、2001年度初めからは、半永久運転を開始し、すでに2年間以上に渡り、蒸発無しに連続無停止低温極保持運転を行ってきた。昨年度と一昨年度に加速度加齢試験として、20年以上の連続運転に相当する低温時シールド冷凍器交換を計10回行い、運転期間短縮や冷凍機劣化等が見られないことから、今後計画通り極低温状態で冷凍器の交換を行う予定である。期待通り一度充填すると半永久的に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少数回の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。

次世代エネルギー回収型超伝導リニアック(ERL)放射光源用2K冷凍機システムの概念設計は、現システムと同様に連続無停止低温保持を前提として設計検討された。

2. FEL光源及び利用実験

原研自由電子レーザーは世界で初めて波長可変、高平均かつ高ピーク出力、高効率であるフェムト秒領域の遠赤外光パルスを安定に発生することが出来た¹⁾。6%最高効率、世界最高平均出力2.34kW、ピーク約1GW高出力、極短パルス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。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、高平均出力かつ高ピーク出力、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。量子制御された

光化学反応、フェムト秒パルス幅カラーゲン吸収波長による生体完全非熱切断、ステンレス薄板、セラミック板切断/穿孔、ダイオキシン類似環境有害物質の除害分解検知、原子力分野での原子炉の廃炉、修理、改質、製作、その他一般産業分野での大規模非熱穿孔切断技術、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、数年毎に1桁の上昇が可能である(ロードマップ)として報告した²⁾。

3. 研究開発

3.1 高出力ERL-IRFELの建設

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におけるエネルギー回収の概念を以下に簡単に説明する。超伝導リニアックの内部の高周波エネルギーは、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が、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空洞内部の高周波エネルギーに同じ空洞で与えられたエネルギー分だけ完全無損失で変換される。このため回収が行われる主加速器ではほぼ完全に加速時に与えたエネルギーが回収される。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、このわずかな分が高周波源から補給され、主加速器系での実損となる。光に変換された実質減少分の電子エネルギーを含めて入射器で投入されたエネルギーは全く回収されない。この入射器で投入するエネルギーを供給するだけで加速及び発振を継続できることになる。またビーム捨て場での放射線発生は回収後の電子ビームエネルギーが中性子発生閾値を大きく下回るためにほぼX線のみであり、ビーム捨て場周辺を適切に遮蔽することにより、非放射線発生装置の要件を満たす0.6 μ Sv/H以下とすることができる。

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、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、同8月に最初の発振に成功した。

主加速器はエネルギー回収技術により増力可能で

¹⁾ E-mail: minehara@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

あるので、入射器の高周波電源2個を夫々6kWの固体素子から50kWの10Tに交換し、増力するため、作業を進めている。併せて、制御系を新しいものに置き換える作業や高周波位相振幅制御回路系を高安定化する改造を進めている。またこの増力に不可欠な電子銃を大電流化するために高繰り返し、連続波動作できるように開発を進めている。高出力化を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。すでに説明したように今後、2年毎に1桁の出力上昇が期待される。

3.2 ERL-UVFEL計画

100MeV程度以上のエネルギー回収型超伝導リニアック（ERL）をUVFELの駆動源として高出力紫外線域自由電子レーザー（UVFEL）開発とその利用、さらに同ERL駆動源を用いた次世代X線放射光源を目的とする要素技術開発を検討している。予算が認められれば、現建屋を一部拡張あるいは新設して100MeV ERL駆動源の建設、UVFELとERL放射光源要素技術開発を行う。

3.3 ERL放射光源計画

エネルギー回収型超伝導リニアック駆動源及び同UVFELは、UVFEL利用施設プロトタイプであり、かつERL放射光源の要素技術開発システムである。将来日本国内に全日本或いはアジア地域共同利用の実用的ERL放射光源が建設される際には、実用的なERL放射光源技術を提案し、主要な技術的貢献を行うことを目的としている。

短波長超伝導リニアックFEL及びERL放射光源は、今後大きな技術的進展が予測される。代表的な応用として、UVFELを用いる半導体露光装置例とERL放射光源を用いる蛋白質の高速立体構造解析がある。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、フェムト秒域のパルス幅と回折限界のx線が同時に得られる。建設費も第3世代の25%程度以下で建設できると期待される。

3.4 ERL小型可搬式FEL

非ERL或いはERLである超伝導リニアック駆動源は、共に高周波電界と高周波デューティが同じなら加速電流によらず、同じ能力の冷凍機が必要でこの冷凍機電力より桁違いに低いFEL出力で十分な応用には超伝導リニアック駆動源は現状では最適な駆動源ではない。しかしながら常伝導FELは十分な出力を提供できない。今までは超伝導FELは大規模応用が中心であったが、医療応用の非熱フェムトFELメスにしてもテラヘルツCTにしてもFEL出力は、常伝導FELでは不足で、かつ冷凍機電力の2-3桁以下で十分で

ある。このような応用には、マイクロトロンのような多数回加速と低加速電界により、高効率の連続波加速を行う小型可搬式超伝導リニアックFELが最適である。このような小出力応用は上記の2例以外にも多くの応用が期待される。

4.まとめ

現在までの日本原子力研究所における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研究開発について、上記のように概略紹介した。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の実証までが最近の確定された成果で、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の実証した。その後、2002年2月にエネルギー回収実験に、同8月に最初のERL発振にも成功した。今後は、3つの方向が計画されている。1番目は既に実績のある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、70%以上の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から将来はMW級にいたる産業用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、0.1-20kWまでを非回収で実証し、5kW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10年の目標である。10keV以上のx線領域は更に10年、従って20年後の目標となる。

原研超伝導リニアック駆動源、同駆動FEL、及びERL放射光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。原研超伝導リニアック駆動源、同駆動FEL、及びERL放射光源に関する、今後10年間の開発と20年間の産業化を展望している。産業化では短期的には、原子力分野での大規模非熱加工応用と医療分野でのテラヘルツCTに用いる小型可搬式FELが最重要であり、長期的には蛋白質医薬品の製造、特性評価に用いる工場設置用ERL放射光源と考えられる。

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).