

日本大学電子線利用研究施設の現状

佐藤 勇^{A)}、早川 建^{A)}、田中俊成^{A)}、早川恭史^{A)}、横山和枝^{A)}、
菅野浩一^{B)}、境 武志^{B)}、石渡謙一郎^{B)}、中尾圭佐^{B)}、長谷川 崇^{B)}、宮崎慎也^{B)}、
福田茂樹^{C)}、榎本收志^{C)}、大沢 哲^{C)}、設楽哲夫^{C)}、諏訪田 剛^{C)}、古川和朗^{C)}、道園真一郎^{C)}

^{A)}日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

^{B)}日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻

〒274-8501 千葉県船橋市習志野台 7-24-1 日本大学理工学部船橋校舎

^{C)}高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

日本大学では、普通の電子線形加速器の高度化を進め、2001年5月、1.5 μm 波長の FEL 発振に成功したが、FEL 発振は非常に不安定であった。加速器と FEL システムの不安定要素が複雑に絡み合っていたが、これらの要因の1つ1つを克服し、2003年9月には、1.2~5 μm 波長の FEL 発振安定化に成功し、10月には、共同利用実験を開始する。

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)¹⁾では、1994年度に電子線形加速器とFEL発生装置の建設^{2,3)}を開始し、1998年1月90MeV、20mAの電子ビーム加速に成功、同年2月、自発放射光を観測した。更に同年10月入射部集束系を強化し、電子ビームは220mAに達した。しかしながら、短パルス用クライストロン(PV-3030)を長パルスで使用する試みは出力窓が破損するために困難を極めた。又、故障が多発し、電子ビームも不安定であった。そこで、KEKの協力を得て、電子ビームの高性能化と高安定化を目的とする加速器の高度化を進めることになった。更に、1999年9月、アンジュレーターの永久磁石が放射線損傷⁴⁾を受け、使用が不可能になり、赤外線用永久磁石の製作を開始した。一方、同年11月には、加速器運転中でも実験室で準備作業ができるように加速器室と実験室の間の放射線シールドを強化した。2000年3月に赤外線用アンジュレーター永久磁石が納入され、1.5 μm の赤外線FELの基礎実験を再開した。

同年4月、学術フロンティア推進事業が認められ、新実験棟(1320 m^2)、レーザービームライン、パラメトリックX線源、X線計測装置等の建設を開始し、2001年4月に完成した。

この工事期間、加速器運転を一時停止したが、同年4月に再開し、同年5月には1.5 μm のFEL発振に成功した。その後、FELの強度は蓄積光の約 10^8 を越えたが、FEL発振は不安定で継続できず、又、飽和には到らなかった。FELの不安定要因を、色々な角度から徹底的に追究し、2003年9月には、1.2~5 μm 波長領域でFEL発振が実現し、そのエネルギーは最大30mJ/パルスに達し、且つ、発振も安定になった。念願の共同利用実験も間近に迫っていることを実感している。

2. 電子線形加速器の高度化

短波長FELでは、低エミッタンス、高輝度、低分散で長パルスの電子ビームが安定に供給されなければ、その目的は達成できない。電子加速器を有する多くの研究機関が短波長FELに挑戦し、大多数の研究機関が未だにその目的を達成できない状態にあり、或いは早々に撤退したのはこの理由による。

既設の電子加速器施設と普通の電子線形加速器を活用し短波長FELに挑戦する日本大学計画は、建設費やマンパワーも少なく、その実現化は困難を極めた。専門家の間では、無謀で実現不可能であろうとの世評もあった。

本研究施設では、寄せ集めの部品で構成された電子加速器で、どのようにしたら、高品質の電子ビームを加速できるかが最大の研究課題であり、事実、多くの故障や予想外の障害に遭遇した。

特に、クライストロン(PV-3030)は短パルス(2.5 μs)用であり、パルス持続時間が10 μs を超えると出力窓は確実に破損し、このクライストロンで短波長FELに必要な20 μs を確保する見通しは絶望的であった。その上、クライストロンのヒーター絶縁トランス、パルストランス、バックダイオード等の構成部品に故障が続出し次々に破損した。更に、加速器の動作が不安定でFEL発振に必要な基礎実験

すらできない惨憺たる状態であった。

しかしながら、1999年2月にクライストロン(PV-3030)を長パルスで稼働させる方法をメス化に成功した。一方、同年4月、学術フロンティア推進事業が5年計画でスタートし、同年7月から12月まで5ヶ月間、実験棟増築工事のため、加速器運転を停止した。この期間に、懸案の加速器高度化が積極的に進められ、短波長FEL実現の障害になっていた半導体高周波増幅器の位相シフト化、熱陰極電子銃の低エミッタンス化、電子ビームの簡易エネルギー昇降化、ビーム位置モニター非破壊化等の改善作業を実施した。更に、学術フロンティア推進事業のFELビームライン、パラメトリックX線源、X線計測装置等の開発作業、並びに、長パルス大電力クライストロンの開発、FEL用ビーム拡張装置の開発、バンチ計測システムの整備等をKEKの協力の下に平行して進められた。

2001年1月に加速器運転を再開し、クライストロンは懸案の出力電力×パルス持続時間×繰り返し数=20MW×20μS×12.5Hzを達成し、パルス持続時間内の位相シフト量を縮小することは達成できたが、依然として、電子ビームは不安定であった。

3. 加速器の不安定要因

線形加速器の直線部では加速器の不安定要因は出現しにくい、この電子ビームを電磁石で大きく偏向し軌道を厳しく制限すると、加速器の不安定性の要因は、ビーム軌道変動やビーム電流変動となって計測される。特に、日本大学のFEL装置には電子線形加速器の加速電子ビームが90度偏向後に入射されるので、加速器の不安定要因が如実に現れる。

不安定性を詳細に分析すると、短時間変動と長時間変動に分類され、変動要因としては、電気的変動、機械的変動、室温や冷却水温度の変化等が、複雑に絡んでいた。特に、マクロパルス内の変動は半導体高周波増幅器の高周波位相変動、パルス毎の変動はPFNとクライストロンのインピーダンス不整合(ミスマッチ)に加えてクライストロン・パルサーのPFNへ充電中の直流高電圧変動が変動を更に増長させていたが、その他、色々な要因も含まれていた。

電気的変動「交流入力電圧変動」

交流入力電圧変動は全装置に共通する課題であり、FEL発振以降は特に丹念に調査した。その結果、夜の21時から翌朝の9時まで約12時間は、変動周期が早いことが明らかになり、この時間帯で自由電

子レーザー発振の安定性を継続することは不可能であった。この異常電圧変動を東京電力と共同で調査したが、その原因の出所を突き止めることは出来なかった。又、全電源変動を同時に監視することは不可能であり、ビーム不安定に最も影響力の大きい装置を選択して、連続測定を行った。特に異常な電源は見付からなかった。

「高周波位相シフト」

クライストロンの前置増幅器である半導体高周波増幅器はパルスで動作するが、稼働して10μSを経過すると位相が約10度ずれた。当面の対応策は、単位時間当たりの位相ずれを計測し、入力高周波位相を逆にシフトさせ、位相シフトを1度程度に押さえ込み、90度偏向ビーム輸送路によるビーム損失は大幅に改善され、最初のFEL発振を可能にした。室温変動による遅い位相変化は位相負帰還回路を付け加えて抑制した。しかし、不規則であるが、パルス内とパルス毎の位相シフトは観測され、位相シフトの少ない半導体素子を用い長パルスでも位相シフト小さい高周波増幅器を開発し導入した。その結果、パルス内の高周波位相シフトは更に抑制され、パルス持続時間内のビーム・エネルギー変動⁶⁾も改善された。

「サイラトロン動作の揺らぎ対策」

クライストロンパルサーのサイラトロンは動作停止時刻に揺らぎがあり、これがパルス電圧の要因と思われていたが、PFNインピーダンスとクライストロンインピーダンスのミスマッチと直流高電圧変動が主要因であり、微調整した結果、サイラトロンの遮断時刻の揺らぎは解消した。

「高圧直流電源の改造」

モジュレーターの高圧直流電源は3極真空管を使って高精度に制御されるので、パルサーにはDeQ回路を採用しなかった。しかし、サイラトロンが動作する直前の充電コンデンサー電圧は常に一定であったが、PFN電圧は入力交流電圧変動に依存していた。負荷の電圧降下が大きいPFN充電中は、高圧直流電源の電圧制御が不能になり、交流入力電圧変動に対応していなかった。充電コンデンサーを補充し負荷電圧降下を小さくし、高圧直流電源とパルス発生装置間のシリーズ抵抗を大きくした結果、パルス毎のビーム・エネルギー変動は大幅に改善された。

4. FEL 発振の不安定要因

最初のFEL発振は、電子ビームのエネルギーが86.3MeV、ビーム電流が90mAで達成された。しかし、発振状態は極めて不安定であった。

機械的変動の主要因は、光空洞共振器架台の脆性にあり振動は空調機や冷却装置に起因していた。

反射鏡には $1.5\mu\text{m}$ 波長で反射率が99.5%の狭い帯域の誘電体多層膜を使用していたが、基本波レーザー強度が高まると3次高調波強度も高くなる現象が観測されていた。最も深刻な要因は、FEL発振が強烈になった瞬時に発振が停止することであった。光空洞共振器のパラメーターを少しずらす再び発振するが、しかし、レーザーが飽和状態は観測できなかった。この一過性発振の要因は、光空洞共振器の反射鏡面が瞬時に破損するのではないかと推定したが、これは蓄積光の減衰から算出した反射率が時間経過と共に次第に低下する事実と矛盾していた。そこで、反射鏡を取り出して調べることになった。反射鏡は、上流下流ともに多層膜が痘痕状に破損していた。これは強いレーザー発振が継続できない大きな要因であった。

「光空洞共振器架台の強化」

電磁石等の冷却水を循環させるとその振動が光空洞共振器反射鏡架台に伝達し、架台は最大振幅が $0.6\mu\text{m}$ 固有振動数が約8Hzで振動していた。これは架台の剛性不足が原因であり、FEL発振の不安定要因の1つになっていた。光空洞共振器架台に鉄板を貼り付けた結果、最大振幅は20nm、固有振動数は約30Hzになり、剛性は大幅に改善された。

「ビーム電流の変動対策」

小径熱陰極の活用とウエーネルト構造の最適化によって、電子銃低エミッタンス化に成功しFEL発振に寄与した。しかし、不規則なビーム電流変動が観測され、電子銃の絶縁耐圧不足を示唆していた。電子銃の支持パイプを細くし放電耐圧を上げ、グリッド制御の応答時間を早まるように回路構成を改良し、ヒーター電流を空間電荷制限領域に設定し、更に、電子銃、イオンポンプを交換した結果、ビーム電流の鋸歯状変化は消滅し不規則なビーム電流変動は大幅に改善された。

「FEL発振の一過性対策」

光空洞共振器の反射鏡を大電力に耐性の高く可視光領域でも反射率が高い銀蒸着金属鏡に交換した結果、一過性のFEL発振現象は消失し、波長領域も $1.3\sim 5\mu\text{m}$ に広がり、飽和と思われる現象も観測されており、発振は比較的安定になった。

5. 研究施設の現状

1) 30MWクライストロン(PV-3040N)テスト実験

クライストロンが破損し、新クライストロンに交換した。20MW \times 20 μS \times 5Hzの耐久テスト

をクリアした。

2) ビーム位置モニター

電子ビームの中心位置を $\pm 0.1\text{mm}$ の精度で常時電子ビームの位置観測が可能である。電子線形加速器に4台、FELシステムに4台が設置され、FEL発振にその威力を遺憾なく発揮している。

3) レーザービーム輸送システム

ビーム・エックスパンダーが加速器室に設置され、FEL発生装置と新実験棟のレーザー照射室を結ぶレーザービームラインが貫通した。特にビーム・エックスパンダーは、楕円鏡と放物線鏡の組み合わせ、レーザービームを平行ビームにする装置であり、優れた性能を発揮している。

4) パラメトリックX線源の整備

パラメトリックX線発生装置は既に完成し、加速器室に設置されており、このX線源を使う蛋白質X線構造解析装置やX線回折装置も既に導入された。X線ビームラインの放射線施設検査に合格後に、本格的テスト実験を行う予定である。

6. おわりに

日本大学に於ける短波長FEL計画は、高度利用研究を目的としており、FEL実用化は必須条件であった。又、短波長FELの実用化には電子ビームの高性能、超安定、長パルス化が要求されるために、特に通常電子線形加速器の高度化による短波長FEL実用化は、予想以上に実現の壁が高かった。更に、通常の電子線形加速器性能限度を超え、これまでの加速器技術の常識が通用しない世界に踏み込んだ思いであった。

続発する故障や立ち塞がる性能限界に悩まされたが、これらの問題を1つ1つ克服し、短波長FELの実用化に耐えうる加速器が実現しつつある。

参考文献

- 1) I.Sato, et al., Proc. of 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan, 104-106 (1997).
- 2) K.Hayakawa, et al., Nucl.Instr.and Meth. A375, ABS25-26(1996).
- 3) T.Tanaka, et al., Nucl.Instr.and Meth. A407, II103-104 (1998).
- 4) I.Sato, et al., The 12th Sym. on Accel. Sci. and Tech., Riken, Japan, 37-39(1999).
- 5) Y.Hayakawa, et al., Nucl.Instr.and Meth. A82002, Vol 483, 1-2, pp.29-33.
- 6) K.Yokoyama, et al., Jpn.J.Appl.Phys. 41(2002)pp.47-58-4759