

# 日本大学電子線利用研究施設の現状

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

<sup>A)</sup>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

<sup>B)</sup>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

<sup>C)</sup>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を高性能し、短波長の自由電子レーザー(FEL)発振を試み、更に利用実験を目指して準備を進めてきた。2001年5月、1.5 $\mu\text{m}$ 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。不安定性の要因は、線形加速器以外にも色々な不安定要素が複雑に絡み合っていた。これらの不安定要因がどの様にして除去されたかについて報告する。

## 1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設(LEBRA)<sup>1)</sup>では、1994年度に電子線形加速器とFEL発生装置の建設<sup>2,3)</sup>に着手、1998年3月に完成した。1998年1月には、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。10月入射部集束系を強化し、電子ビーム強度は220mAに達したが、高周波出力電力のパルス持続時間を延ばすと短パルス・クライストロン(PV-3030)の出力窓が破損し、電子ビームのパルス持続時間は10 $\mu\text{s}$ に制限された。又、クライストロンのヒータートランスやパルストランスの放電破壊、バックダイオードの破損等故障が続出していた。更に深刻な事態は、最初に設置されたアンジュレーターの永久磁石は放射線損傷<sup>4)</sup>を受け使用不能になったことであった。永久磁石は可視光用と赤外線用に分けて、赤外線用を新たに製作した。一方、最大の懸案であった短パルスクライストロン(PV-3030)の長パルス化は同年2月に成功し、学術フロンティア推進事業をスタートさせることができた。この推進事業に伴って実験棟が増築することになり、7月から12月まで5ヶ月間、加速器運転を停止した。この期間に、半導体高周波増幅器の位相シフト対策、熱陰極電子銃の低エミッタンス化、非破壊型ビーム位置モニターの開発、FEL用ビーム拡張装置の開発、

長パルス大電力クライストロンの開発、パラメトリックX線源の開発、X線計測装置の開発等が進められた。

2001年1月に加速器運転を再開し、3月には自発放射光蓄積を確認し、5月に1.5 $\mu\text{m}$ のFEL発振に成功した。その後、テスト実験では、FEL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せず、飽和状態に到達しなかった。FEL不安定性の原因は、色々な角度から徹底的に追究しその要因は明確になった。

## 2. FEL 発振の不安定要因

FELは、86.3MeV、90mAで1.5 $\mu\text{m}$ 波長のレーザー発振<sup>5)</sup>に成功したが、しかし、発振状態は極めて不安定であった。FELの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、環境変化等が、不規則に複雑に重なり、その分析作業は単純でなかった。短時間の電気的変動要因としては、パルス内ビーム軌道の変動とパルス毎のビーム電流変動があり、前者は半導体高周波増幅器の高周波位相シフトに、後者はクライストロン・パルサーの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、並びに、PFN電圧が充電中に変動することであった。短時間の機械的変動要因は、光空洞共振器にHeNeレーザーを導入すると、2枚の反射鏡による干渉縞の変化によって明らかになり、この変化は空調機や冷却装置の動作に連携していた。

更に、深刻な要因は、FEL発振が強烈になると発振は瞬時に停止し、再び発振させるには共振器を再調整する必要がある、レーザー飽和は観測できなかった。その要因は、レーザー飽和に達する以前に光空洞共振器の反射鏡が破損するのではと考えたが確証はなかった。反射鏡には1.5 $\mu\text{m}$ 波長で99.5%の反射率をもつ帯域の狭い誘電体多層膜鏡を使用して

いたが、レーザー強度が高まると 3 次高調波 (0.5  $\mu\text{m}$ ) の強度も強くなることが観測されていた。反射鏡を取り出して調べた結果、上流下流とも反射鏡の多層膜が痘痕状に破損していた。破損要因が基本波か 3 次高調波かは定かでない。長時間変動は室温変動や入力交流電圧変動に伴う環境変化に依存していた。これは環境変化により電磁気回路の特性変化や各種装置形状の機械的変形が主な要因であり、対応方法は容易であった。

### 3. 不安定要因の対応策

#### 「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った。この時間帯では自由電子レーザー発振を継続することは不可能であった。

異常電圧変動は金曜日の 21 時から月曜日の 9 時まで継続することが多かった。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。

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。

#### 「高周波位相シフト対策」

半導体高周波増幅器は、パルス動作を開始してから 10  $\mu\text{s}$  を経過する間に位相が約 10 度ずれた。電子ビームを 90 度偏向して FEL 発生装置へ輸送するシステムにとっては、この高周波位相シフトは深刻であった。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ることであった。出力位相シフトを 1 度程度に押さえ込み、90 度偏向ビーム輸送路を通過するビーム損失は改善された。その結果、FEL 発振に成功した。他に、室温変化による遅い緩やかな位相変化もあり、これは位相負帰還回路を付け加えて抑制した。

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、無視できない値であった。そこで、位相シフトの少ない半導体素子を用い長パルスで稼働する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<sup>9)</sup>も改善された。

#### 「サイラトロン動作の揺らぎ対策」

モジュレーターのサイラトロンは動作停止時に揺らぎがあった。サイラトロン・ヒーターの安定化に

よって、揺らぎ頻度が縮小された。モジュレーターの出力パルス変動はサイラトロン動作停止時に揺らぎが要因と思われていたが、PFN インピーダンスを微調整した結果、サイラトロンの遮断揺らぎは解消した。

#### 「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ことから、クライストロン・モジュレーターには DeQ 回路を採用しなかった。

モジュレーターのサイラトロンが動作する直前の充電コンデンサー電圧が常に一定であった。しかし、PFN 電圧は入力交流電圧変動に依存していた。

PFN の充電電圧変動と入力交流電圧変動の相関を徹底的に調査した結果、負荷の電圧降下が大きい時、高圧直流電源は制御不能になり、交流入力電圧変動に対応しないことが明らかになった。

充電コンデンサーを補充し負荷電圧降下を小さくするとともに、高圧直流電源とパルス発生装置間の抵抗を大きくする対応策を講じた。その結果、パルス毎のビーム・エネルギー変動は大幅に改善された。

#### 「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 8 Hz 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 発振に寄与したが、不規則なビーム電流変動以外にビーム電流が約 40~50 分周期で 10~20% 鋸歯状波的に減少する現象が観測され、電子銃の絶縁耐圧不足を示唆していた。

絶縁ガイシの支持フランジ構造と電子銃の支持パイプを細くし放電耐圧を上げた結果、ビーム電流の鋸歯状変化は消滅した。又、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、電子銃のヒーター電流を空間電荷制限領域に設定した結果、不規則なビーム電流変動は改善された。

### 4. 研究施設の現状

本研究施設の懸案事項であった放射線施設検査は 2002 年 12 月 10 日に実施され、2003 年 3 月に合格した。

2002 年度に於ける電子線利用研究施設の保守・改

善を要約すると次の如くであった。

#### 1) 30MWクライストロン(PV-3040N)テスト実験

放射線施設検査の実施中に2号機クライストロン(PV-3030A1)が破損し、2003年1月に新クライストロン(PV-3040N)に交換し、テスト運転をした結果、20MW×20μS×5Hzの耐久テストはクリアした。

#### 2) ビーム位置モニター

電子ビームの中心位置を±0.1mmの精度で常時電子ビームの位置観測が可能であり、電子線形加速器の終端、アンジュレーターの上流と下流にそれぞれ3台設置され、FEL発振にその威力を遺憾なく発揮している。このモニターは、レーザー発振の不安定要因探索には不可欠な計測装置であり、2003年度には電子線形加速器の入射部、各集束電磁石の前に設置する予定である。

#### 3) 制御室の整備

研究者の実験室入出を簡便にするために、制御ラックの配置替えを行い、新たに制御卓を設けて、その背後に通り抜ける通路を確保した。制御室と各装置を結ぶケーブルが乱雑になったので整理し、ビームモニター用オシロスコープを増強した。加速器運転を容易にするためにディスプレイを増強する予定である。

#### 4) レーザービーム輸送システム

ビーム・エ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ビームレーザーラインが完成した。ビーム・エクスパンダーは、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る。

#### 5) 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線ビームラインの使用許可は、現研究施設の放射線施設検査に合格後に、申請書を提出し合格後可能になる。

#### 6) 直流電流安定化電源の整備

ビーム輸送系に使用している直流電流安定化電源は、マイクロトロン用ビーム集束電磁石用として導入した直流電流安定化電源である。最大定格で性能仕様が補償されているが、電流量は10Aと5Aの2種類に統一される。しかし、電子線形加速器入射部の大多数ステアリング電磁石は0.5A以下の低電流で制御されており、ステアリング電源としては電流容量が大きすぎ、ビーム制御に整合性を欠いていた。電子線形加速器では、入射部(電子銃、プレバンチャー、バンチャー)の集束コイルやステア

リング電磁石の磁束密度が低く励磁電流も小さい。更に、4極電磁石用直流電流安定化電源は最大定格が10Aであるが、既に耐用年数を超えており、電源が時々不安定な動作をするようになってきた。短波長FEL用電子線形加速器では、パルス持続時間が長い電子ビームを加速するために、加速管の中心軸から外れた電子ビームは、加速管に横波成分を持つ電磁場を誘起し、加速管の周期構造によって共鳴増幅され、エミッタンスが増大する可能性がある。

2002年度は、低電流高安定化電源を導入し、近々開始される共同利用実験に対応できるように、ビーム輸送系を整備した。

## 5. おわりに

日本大学に於ける短波長FEL計画は、FELの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。特に短パルス・クライストロンの長パルス化は糸口が見えない無謀な挑戦に挑んでいるように思われた。

続発する故障や立ち塞がる性能限界に悩まされたが、これらの問題を一つ一つ克服し、短波長FELの実用化に耐えうる加速器が実現しつつある。残された最大の課題は、赤外線から可視光領域で反射率(99.5%以上)が高く、尖頭電力が0.5GW、負荷率が4000分の1に耐える金属反射鏡の開発にある。

## 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