

OPERATIONAL STATUS OF 125-MeV LINAC AT NIHON UNIVERSITY

T.Tanaka^{1,A)}, I.Sato^{A)}, K.Hayakawa^{A)}, Y.Hayakawa^{A)}, K.Yokoyama^{2,A)}, K.Nogami^{A)}, A.Mori^{A)}, K.Kanno^{B)},
T.Sakai^{B)}, K.Ishiwata^{B)}, K.Nakao^{B)}, S.Fukuda^{C)}, A.Enomoto^{C)}, S.Ohsawa^{C)}, T.Suwada^{C)}, K.Furukawa^{C)},
S.Michizono^{C)}

^{A)} Laboratory for Electron Beam Research and Application, Institute of Quantum Science, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

^{B)} Graduate School of Science and Technology, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba 305-0801

Abstract

The pulse-to-pulse fluctuation of the electron beam from the 125-MeV linac has been suppressed by the stabilization of commercial AC power source and the improvement of the klystron DC power supply. Use of silver-coated copper mirrors for the optical resonator allowed us to achieve a saturation of free-electron laser (FEL) in the range of 0.885 - 6.13 μm . As an FEL user's facility, service of 1 - 6 μm FEL started at the laboratory for electron beam research and application (LEBRA) of Nihon University in 2003. The beam line for parametric X-ray (PXR) generation has been successfully operated for preliminary experiments of X-ray extraction and X-ray imaging characteristics.

日大125MeVリニアックの稼働状況

1. はじめに

1996年以来、日本大学と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) との電子線形加速器高度化に関する共同研究に基づき、日本大学に移設されたPF陽電子リニアックの高性能化と、自由電子レーザー (FEL) の実用化を目指した研究が進められてきた^[1]が、2003年10月にFELの共同利用が開始され、加速器の高度化に関する共同研究は新たな段階を迎えた。

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では、2003年3月に施設検査に合格し、それまで試験運転を行っていた電子リニアックの利用が可能になって以来、FELとパラメトリックX線 (PXR) の学内共同利用開始に向けて加速器と光源の性能向上、及び運転のルーチン化が計られてきた。FEL輸送光学系の整備を経てFEL共同利用の開始に伴い、調整・試験運転を含めたリニアックの運転時間は大幅に増加している。

FELの共同利用を開始する上で重要な課題の一つであったリニアックのビーム安定化は、2003年春に行った高精度のAVRの導入及びクライストロン電源の改良等により大きく促進された^[2]。これにより商用電源に起因する変動が抑制され、FELの発振安定度が大幅に向上したことから、共同利用に向けたFEL光強度の増加と波長可変性能向上の試験運転が効率的に進められた。現在まで、リニアックの加速エネルギーを45~100MeVの間から選択することにより、1台の赤外用アンジュレーターを用いて885nm

~6.13 μm の波長範囲でFELの発振が確認されている。

さらに、2004年4月にはPXRの取り出しに成功し、これによりLEBRAではFELとPXRの二種類の光源を持つこととなった。PXRについては、暫定的に5~20keVのX線の取り出しに成功しており、システム全体の性能試験等の基礎実験を繰り返しながらX線イメージング・X線回折への共同利用に向けた準備が進められている^[3]。

以下の章では、この1年間のリニアックの稼働状況とともにFEL、PXR、共同利用状況等施設の現状について報告する。

2. リニアックの現状

2.1 運転時間の推移

図1に2003年4月以来のパルスモジュレーター通電時間、クライストロン高圧印加時間、ビーム加速時間の推移を月単位で示してある。モジュレーター通電時間は、2本使用しているクライストロンに関してほぼ同じで、クライストロンのカソードヒーター通電時間に等しい。クライストロン1号機 (#1) は三菱電機製PV3030A1、2号機 (#2) は同社製PV3030A3を改良したPV3040N^[4]である。この間の積算運転時間は1号機が約1960時間、2号機が約2270時間、ビーム加速時間は1160時間となっている。また、1997年の稼働開始以来モジュレーターの総通

¹ E-mail: tanaka@lebra.nihon-u.ac.jp

² 現在の所属：高エネルギー加速器研究機構

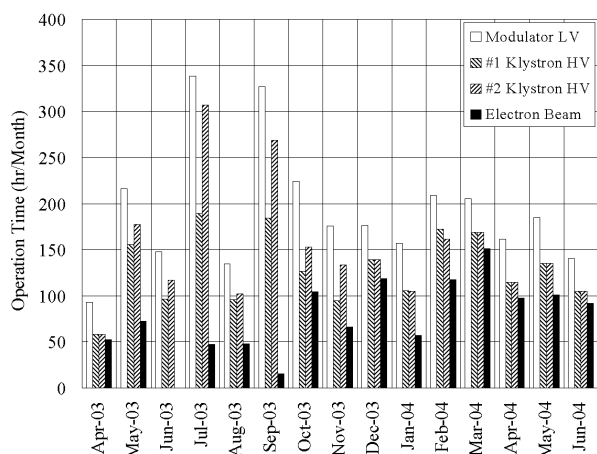


図1. 2003～2004年における日大LEBRAリニアックの月間運転時間の推移。

電時間は2004年4月～5月にかけて1万時間を超えた。通常運転ではリニアックには各クライストロンからそれぞれピーク電力20MW、パルス幅20 μ sのRFを繰り返し2Hzで供給し、リニアック出口での最高エネルギー100MeV、ピークビーム電流最大200mA以上を実現している。加速エネルギーの上限はRF電力の他、加速器の使用許可申請条件による制限に基づいている。

クライストロン1号機はRF窓下流に真空排気能力強化の改良を行った2000年以来、RFパルス幅20 μ s、ピーク出力20MWの運転に耐え使用を続けている。2号機は2003年1月に新たに使用を開始し、エージングにより出力20MWが得られた段階でビーム加速を開始したが、RF窓で放電が頻繁に発生し動作が安定しなかったため、特に7～9月に長時間にわたるエージングを繰り返した。1号機に比べ運転時間が約300時間長いのは主にこの事情によるが、この結果長パルスでの安定動作を実現することができた。

ビームの安定加速は共同利用の開始を控えて重要な課題だったが、10月からユーザーにFELの供給を開始して以来、ビーム加速時間が月平均約100時間で推移し、ほぼユーザーの要求通りの日程でFELを供給できている。これには、2号機の集中的な長時間のエージングの効果が大きく寄与している。

2.2 部品更新

2003年度以降、更新した主な加速器構成部品及びその要因として以下の事が挙げられる。

1) パルスモジュレーター出力のパルス幅は半値幅30 μ sと長いため、クライストロンアセンブリを納めたオイルタンク内の、特にヒータートランスの耐電圧が不足し、放電による劣化・破損が生じた。そこで2003年6月にコイル形状を改良したヒータートランスに更新した。また2号機ではヒータートランスの放電による絶縁油の劣化が激しく、その影響がパルストランスにも波及し放電損傷を受けていたため同時に更新した。しかし、オイルタンク内での放

電は依然として1日約1回の頻度で発生している。

2) 1号機のパルストランスに逆バイアス電流を供給していた多芯コネクタが発熱・焼損したため更新するとともに、1号機2号機ともにコネクタの接触抵抗が上昇した場合に備え、電流供給用のコネクタピン数を2回路分使用して発熱を抑制する対策を採った。

3) 2号機の集束コイル冷却配管に漏水が発生し、応急措置としてKEKから代替品を借用して使用している。この間に新しい集束コイルを製作した。

4) 電子銃にはEIMAC Y646Bカソードを用いているが、この間に2回更新している。2003年7月にはカソードグリッド間が短絡したため、短絡部をジュール損失で焼き切る処置を施したが、引き出しビーム電流が低下し更新せざるを得なくなった。更新したカソードはグリッドメッシュに欠陥があったものの代替品がなくそのまま使用していたが2004年1月にやはりカソードグリッド間が短絡した。再び短絡部を焼き切ったが、DC電流が発生したため、グリッドバイアス電圧を60Vから140Vに変更してDC電流を抑制した。しかしDC電流の抑制は不十分で、バンチャー後部の溶接ペローがこの電流により破損し加速器全体の真空が破れた。内径の大きな成形ペローに交換して破損を避けることが出来たが、引き出し電流に不安定化が生じ、4月末に新たなカソードをKEKから借用して更新した。

2.3 ビームポジションモニター増設

ビーム誘起RFをアンテナで検出するタイプのビームポジションモニターはFELビームラインに用いて有用性が確認されたため、2003年9月にリニアック各加速管の前後とFELビーム偏向系に合計7台、さらに2004年4月にPXRビームラインに3台設置した^[5]。ビーム軌道の常時モニターシステムは未完成だが、ビーム軌道調整、ビーム軌道変動の観測に役立っている。

2.4 ビーム軌道安定化

リニアック出口の直線部ビームラインに設置されたビームポジションモニターによりビーム軌道の周期的変動が観測され、これがFEL発振の主要な不安定要因の一つであった。この変動はバンチャー後部に新たに設置したモニターでも観測されたため、入射部で発生している変動であることが確認された。

ビーム軌道の変動は、徐々に水平方向に移動し、10分程度で突然元の位置に戻る、という鋸歯状の周期性を持ち、バンチャー付近のビーム波形モニター用CTの出力信号に放電と思われる雑音が頻繁に観測されていたことから、使用を停止したビームプロファイルモニターの蛍光板、CTのセラミックダクト部、プリバンチャーRF窓の帯電が原因として疑われた。

そこで、不要なプロファイルモニターを取り外し、CTのセラミックダクトをビームから隠すスリーブ

を長くし、さらにプリバンチャーのダミーロード側RF窓の直前にHベンドを取り付けビームラインから遠ざける対策を施したところ、原因の特定には至らなかったものの放電らしき雑音は観測されなくなり、ビーム軌道の鋸歯状の変動が解消しFELの安定度も改善した。

3. FELの現状

加速器本体室からユーザー実験室までのFEL輸送光学系は2003年6月に設置が完了した。これに伴う2ヶ月の中断を挟み、4月末から8月中旬までガラス基板金蒸着ミラーを用いてFEL発振実験を行っていたが、ミラーの耐性不足が明らかだったため、8月後半からは高耐電力・高反射率の銅基板銀蒸着ミラーに切り替えて、FELの飽和状態を実現し現在まで全く支障なく使用している。

現在LEBRAで実現しているFEL発振波長は、電子ビームエネルギー45~100MeV、アンジュレーター間隙24~36mmで調整を行ない、885nm~6.13 μ mの範囲に渡っている。

FELは電子ビームに対し上流側に位置するミラーに開けた直径0.3mmの結合穴を通して光共振器から取り出され、エキスパンダー光学系により平行ビームに変換された後、最長約50mの輸送光学系を通過して実験室まで導かれている。

この輸送光学系は、真空ダクト内径の最小が約50mmであり、さらに途中には ϕ 50mmのCaF₂ビームサンプラーを用いたFELパワーモニターポートがあるため、水平方向透過幅が30mmに制限されている。単純に幾何学的に考えて実験室に到達するFELビームは短径30mm×長径50mmの楕円形の断面となり、光共振器ミラーの結合穴からエキスパンダーまでの間の回折によるFELの拡がりやを考慮すると、6 μ m付近で70%以上の輸送損失が見込まれている。

このように長波長側での損失が大きい輸送系となっているのは、元々共振器ミラーの結合穴径として0.5~1mmを想定し光の広がりやを小さく見積もっていたことと、長波長側を最長でも5 μ m以下と想定しむしろ短波長FELの利用を目標としていたことによる。

モニターポートから取り出した光をパワーメータで測定した結果では、2~2.5 μ mで光強度が最大となりマクロパルス当たり最大25mJ以上の光が実験室に導かれている。FELのマクロパルス波形は、安定に発振している状態で半値幅10~12 μ sが得られている。FEL強度に対する制限は輸送光学系での損失の他、結合穴径による取り出しパワーおよび発振強度の波長依存性、さらには電子ビームのバンチ特性に基づくと考えられるが、実験結果からはこれより短波長でも長波長でも強度が落ち、マクロパルス幅も狭くなる傾向が顕著に現れている。発振強度は電子ビームと共振器ミラーの調整に強く依存し、運転条件によって数倍のパワーの差がある。

4. PXRの現状

PXR発生用のビームラインは、FELとは独立のラインとなっているため、新たにビームダンプを必要とした。使用に当たっては施設検査に合格する必要があったが、X線を隣の実験室に導くための放射線遮へい壁貫通ダクトを抜けてくる放射線量の問題から管理区域内の立ち入り可能領域を変更し、2004年3月に合格した。

この間に電子ビームの集束調整に起因すると思われる、電子ビーム照射用第1シリコン結晶に貫通穴が発生する現象が一回起き、シリコン結晶の交換を行なっている。

4月にはシリコンの2結晶光学系によって実験室に取り出されたX線がイオンチェンバーによって初めて観測され、その後X線強度の結晶方向依存性、X線エネルギー選択性及び単色性、X線イメージング特性の測定などが行なわれている。これまでの実験では取り出しX線のエネルギーはほぼ5~20keVの範囲で選択でき、水平方向にエネルギー勾配を持ち、それらの特性は理論的予測と良く一致している。

PXRはX線回折に利用するため、現在X線集束用グレーディングミラーの調整を行っている。

5. まとめ

日大の赤外FELは加速器の安定化等様々な改善を計り漸く安定に飽和状態を維持するようになり、2003年度後半から1~6 μ mのFELとその高調波アンジュレーター光を共同利用に提供できるようになった。また、2004年4月には初めて隣の実験室へのPXRの取り出しに成功した。

現在までに医学、歯学、理工学分野の実験に利用されたマシンタイムの日数は40日以上になり、それ以外のマシンタイムが主にFELとPXRの試験・調整運転に使われている^{[6][7]}。電子ビームの使用時間は共同利用開始後ほぼ100時間/月となっている。

FELに関しては今後RFパワーの増強により電子ビームエネルギーを125MeVまで上げ、バンチ特性の改善を計ることで、より短波長での発振・利用とFEL出力の増強を目指している。

参考文献

- [1] I.Sato et al., Proc. of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, Jul. 30 - Aug. 1, 2003 (2003) p1.
- [2] K.Hayakawa et al., Proc. of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, Jul. 30 - Aug. 1, 2003 (2003) p90.
- [3] Y.Hayakawa et al., "Present Status of the Parametric X-ray Generator at LEBRA", in these proceedings.
- [4] T.Sakai et al., Proc. of the 21st International Linear Accelerator Conference (LINAC2002, Gyeongju, Korea, Aug. 2002) 712-714.
- [5] K.Ishiwata et al., "Development of Beam Position Measurement System at LEBRA", in these proceedings.
- [6] K.Hayakawa et al., "Measurements of the pulse length of the FEL nonlinear harmonic radiation at LEBRA", in these proceedings.
- [7] A.Mori et al., "Measurement of FEL output fluctuation at LEBRA", in these proceedings.