

STATUS OF LINAC AND LIGHT SOURCES OF LEBRA AT NIHON UNIVERSITY

Toshinari Tanaka^{1,A)}, Isamu Sato^{A)}, Ken Hayakawa^{A)}, Yasushi Hayakawa^{A)}, Takao Kuwada^{A)}, Takeshi Sakai^{A)},
Keisuke Nakao^{A)}, Yumiko Takahashi^{A)}, Kyoko Nogami^{A)}, Manabu Inagaki^{A)}, Naoki Sato^{A)}, Hiroshi Okabe^{A)},
Masato Ishii^{A)}, Atsushi Enomoto^{B)}, Shigeki Fukuda^{B)}, Satoshi Ohsawa^{B)}, Kazuro Furukawa^{B)}, Shinichiro Michizono^{B)}

^{A)} Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Nihon University

7-24-1 Narashinodai, Funabashi, Chiba, 274-8501

^{B)} Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

The electron beam from the 125 MeV linac at LEBRA in Nihon University has been provided for generation of the infrared free electron laser (FEL) and the parametric X-ray radiation (PXR). The beam time for the users' experiments exceeded 1700 hr in 2007. In June 2008, the klystron #1 (PV-3030A1) was damaged by the dielectric breakdown along the outer surface of the gun insulator. Then, the users' experiments resumed after 1-month aging of a newly installed PV-3040N klystron.

日本大学LEBRA電子リニアックと光源の現状

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) の 125MeV電子線形加速器とそれを用いた近赤外自由電子レーザー (FEL) とパラメトリックX線 (PXR) の学内共同利用を開始して以来、順調に利用時間が増加し、前年度と同様2007年度の年間加速器稼働時間はクライストロン高圧印加にして約2100時間となった^[1]。電子ビーム加速時間では1700時間以上となり、その多くはFELとPXRを用いた利用研究に割り当てられている。現在LEBRAにおいては近赤外FELは1.3~6 μ m、PXRは5~20keVの範囲で利用可能である。さらに非線形結晶を用いてFELの高調波を発生させることにより、可視~紫外領域への利用範囲の拡張も開始され、高調波の強度向上の研究がなされている^[2]。またPXR強度の向上やコヒーレンス特性の検証などの研究も進められている^[3]。

2007年度においても加速器冷却系の改善による加速ビームと光源の安定化が進められた。まず、前年度の試験に基づき、PXR発生装置の冷却水を配管経路の改善により低水压系に変更した結果、ウォーターハンマー現象によるSiターゲットの振動が除去され、X線強度の変動が抑制された。また、クライストロン冷却系に用いている粗温調冷却装置の温度制御精度の向上により、クライストロン出力RF位相の安定化を図った。

一方、機器の老朽化や劣化に伴い幾つかの新たなトラブルが発生しており、本報告において加速器運転状況の詳細とともに述べる。

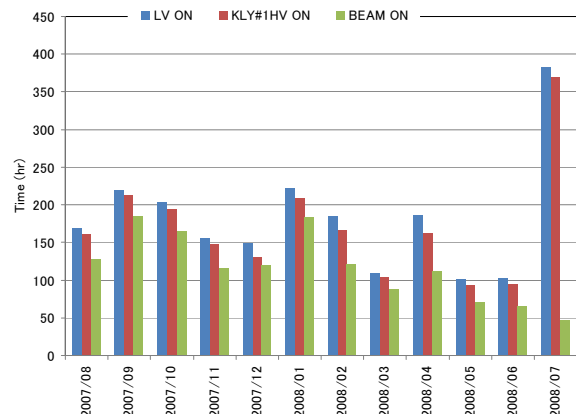


図1. 最近1年間のクライストロン1号機動作時間とビーム加速時間の推移。各月の左から、LV ON: クライストロンヒーター通電時間、HV ON: クライストロン高圧印加時間、BEAM ON: ビーム加速時間、を示す。

2. 加速器運転時間

電子線形加速器には2856MHzのクライストロンが2台使われている。動作条件は、それぞれピーク出力RF電力20MW、パルス幅20 μ s、繰り返しはほとんどの利用において2Hzである。共同利用においては電子ビームエネルギー70~100MeVでの利用がほとんどを占めており、特にPXR利用では100MeVのみである。ビームエネルギーの調整は2台のクライストロン間のRF位相調整の他、2号機からRFを供給す

¹ E-mail: tanaka@lebra.nihon-u.ac.jp

る4m加速管2本の間でのRF位相調整により行っており、通常は加速エネルギーに依らずクライストロンの出力は変更しない。

図1にこの1年間におけるクライストロン1号機の動作時間とビーム加速時間の推移を示す。2号機の動作状況は基本的に1号機とほぼ同じである。ただし、2008年7月については、後述するように1号機が故障したため、交換したクライストロンのエージングを長時間行ったので動作状況が異なる。2007年度1年間でのビーム加速は1769時間、高圧印加時間は2096時間、クライストロンヒーター通電時間は2225時間、また運転日数は188日間である。

電子ビームの供給先はほぼ週単位で切り替えているが、利用時間では概ねFELラインに40%、PXRラインに60%の割合で推移している。これは1回当たりPXR利用実験に要する時間が長いことによる。

3. 繰り返し発生するトラブルと対策

日常的な加速器運転中あるいは停止中に繰り返されているトラブルとして、以下のような現象が発生している。

- (1) クライストロンアセンブリタンク内放電
- (2) SF₆加圧導波管内放電
- (3) クライストロン出力窓放電
- (4) 100kV電子銃内部放電
- (5) 導波管排気用イオンポンプ電源遮断
- (6) FEL光ライン排気用イオンポンプ電源遮断

(1)~(4)はビーム加速中に発生しビームの欠落や電流変動を招くため、利用実験のデータに直接影響するので頻発すると実験に支障がある。特に(3)において、真空インターロックによりクライストロン電源遮断が発生する大きな放電では、ビーム回復までに数10分のRFエージングを要する場合がある。この対策はクライストロンのエージング以外にない。クライストロンのパルストランスは、巻き線の線材を太くし表面電界を弱くした最新型では放電痕が見られなくなった。一方、ヒータートランスも巻き線形状・線材を変更したが、まだ放電が発生している。100kV電子銃も電極寸法の変更など改良を行っているが、まだ解決していない。入射部RF系の一部に使われているSF₆加圧導波管は今後真空仕様に更新する予定である。これらのトラブルは数時間に1回またはそれ以上の頻度で発生している。

FEL光ラインの大部分は真空ダクトのフランジにOリングを使っており、休日にイオンポンプ電源遮断が発生すると長時間気付かずに放置されるため真空度の悪化が深刻である。イオンポンプ電源の遮断は突発的なガス出しが原因と考え、一部のイオンポンプについてはエレメントを交換し解決したが、他は電源自体のトラブルによる遮断の可能性があり、発生頻度は数ヶ月に1回程度である。

4. クライストロンの更新

2008年6月にクライストロン1号機アセンブリタンクで大音響を伴う放電が発生した。このとき図2の

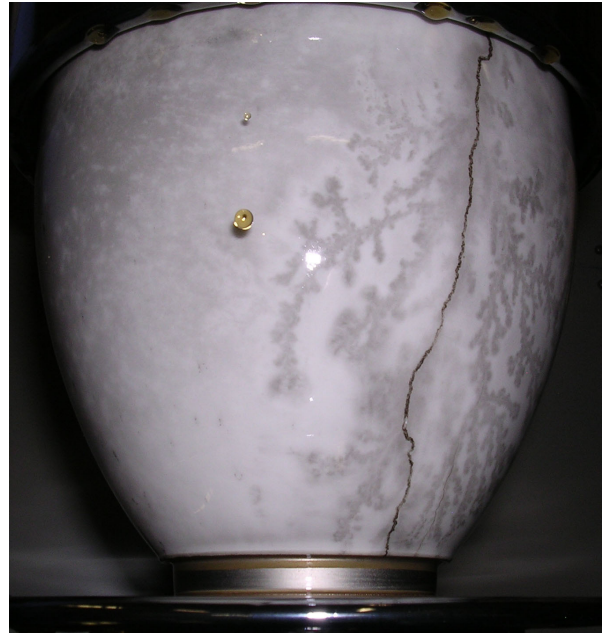


図2. クライストロン1号機電子銃碍子の放電痕の写真。右側に上下の電極間を結ぶ割れ目のような黒い筋が走って見える。

写真のように電子銃碍子に沿って電極間に黒い割れ目のような筋状の放電痕が残った。このクライストロンはKEKで使用後に移設し、2000年4月以来8年間使ってきた1989年三菱電機製PV-3030A1である。この沿面放電は、長期にわたりパルストランスとヒータートランスで起きていた放電で絶縁オイルが劣化し、絶縁碍子表面に大量に付着した炭化物による耐圧低下が原因と考えられる。以後、クライストロンに高圧がかからない状態となったため更新することにした。取り外した後に汚れを拭き落とし確認したところ、碍子自体は割れておらず、黒い筋状の部分は図3のように表面が荒れ、上下の電極と接触している部分の碍子に欠損を生じていた。



図3. 放電によるクライストロン電子銃碍子の欠損の様子。セラミックス表面に付いた筋状の汚れを拭き取ると、筋に沿って荒れた部分が露出した。

交換した新しいクライストロンは三菱電機のPV-3030A3を修理・改良しピーク42MW（平均8.4kW）までのRF出力試験データがあるLEBRA用の改良型クライストロンPV-3040Nである。製作から既に6年を経過していたためエージングを慎重に行い、ダイオード状態では繰り返し2~10Hzで125時間、その後RF出力状態では168時間をかけて、パルス幅20 μ s、繰り返し2Hz、ピーク20MWの出力でほぼ安定に動作する状態に到達した。クライストロンの故障により1ヶ月間共同利用が停止したが、これによりようやく再開した。

クライストロン交換の際、集束コイル下部の内側からコイル冷却水の漏水が見つかった。予備のコイルを用意してあったので同時に交換した。

さらに、この機会に1号機のパルストランスを改良型に更新したが、2003年6月に2号機で採用した改良型パルストランスでは、現在も目立った放電痕を生ぜず良好な状態であることから、残るヒータートランスの放電対策が今後の課題である^[4]。

5. 冷却系の改良

加速管及び電磁石系冷却用の精密温調冷却装置は2007年春の改良により $30 \pm 0.01^\circ\text{C}$ の温度安定度を達成した。このとき明らかになっていた問題として、高圧冷却水で冷却していたPXR発生用Si標的結晶がウォーターハンマー現象により振動を起しX線強度が $\pm 10\%$ 程度変動していたこと、またFELビームライン使用時に冷却水の放射化が顕著であり、放射線管理上無視できないこと、があった。

PXR標的結晶の振動の問題は、精密温調装置のリザーバタンク出口からPXR用に分岐を設け、ポンプを追加しPXRから戻った水を直接リザーバタンクに戻す配管を行い対応した。これにより水圧の低下が図られ、他の系統で発生したウォーターハンマーの影響を受けないため、X線強度変動を数%以下に抑えることが出来た。また、FELビームライン使用時の冷却水の顕著な放射化については、電磁石真空チェンバー冷却系とスリット冷却系で強く発生していることが確かめられた。純水を循環させているため、ここで発生する放射性核種は半減期2分の¹⁵Oのみを考慮すれば良いので、この系統を冷却している流量1l/min程度の冷却水を、戻りの際に一旦容積20lの密閉容器内を通過させその間に放射線レベルを下げた後に戻す対策を行った。この結果、モジュレーター室内の精密温調装置に戻る冷却水配管表面での放射線レベルは、自然放射線レベル近くまで下がった。

その後、クライストロン冷却用粗温調冷却装置の古い温度制御回路を最新のものに更新した。また、粗温調冷却装置は熱除去に冷却塔からの冷却水を用いており、この冷却水温度が精密温調用冷凍機のON/OFFや冷却塔ファンのON/OFFにより短時間で

数 $^\circ\text{C}$ 変動すると粗温調装置で変動を十分吸収できず、結果としてクライストロン冷却水の温度が追従して $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 程度変動し、出力RFの位相が $\pm 0.1^\circ$ 程度変動する原因となっていた。クライストロン出力RFの位相はフィードバックにより変動が補正されているため、冷却水温度変動は現状で大きな問題ではないが、フィードバック無しでも変動が小さければより高い安定度が期待できる。そこで粗温調冷却装置の冷却水を冷却塔ではなく、冷凍機からの $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$ という安定度の高い冷水に切り替える改良を行った。これにより、現状ではクライストロン冷却水温度安定度は熱交換器通過後で $30 \pm 0.05^\circ\text{C}$ 程度に改善されている^[5]。

粗温調冷却装置の冷却水循環系を変更した後、粗温調冷却装置の劣化により熱交換器で一次側と二次側の水系統の間に漏水が発生していることが分かった。この問題は運転中の粗温調冷却系純水の減少として現れており、現在対策を進めている。

また現状の粗温調装置でもクライストロンからリザーバタンクに戻している冷却水の温度安定度は、リザーバタンク出口で $\pm 0.01^\circ\text{C}$ と非常に良いため、精密温調装置の場合と同様にリザーバタンク出口からクライストロンに冷却水を送出するよう配管を変更することでさらに高い安定度の実現を検討中である。

6. まとめ

LEBRAの近赤外FELとPXRを利用した学内共同利用は、FEL共振器ミラーとPXR標的結晶の強度の問題はあるものの順調に進められている。しかし、クライストロンの長パルス運転を実現して以来、8年間利用したPV-3030A1が故障した結果、クライストロンの予備が底をついたため今後の運用に不安がある。アセンブリタンク内では主にヒータートランスの放電が絶縁オイルの劣化と汚れを招き、電子銃碍子が汚れ耐圧が低下したことが今回の大放電の原因と考えられる。従って、クライストロンを長持ちさせるためにはタンク内の放電を抑える対策とともに、随時碍子表面の汚れを除くことが重要である。加速器全体の動作安定度は冷却系の改良・更新によりこの数年間で大きく改善された。室温の安定化対策も含めてさらに安定度の改善を検討中である。

参考文献

- [1] T.Tanaka et al., Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan (Aug. 1-3, 2007, Wako) 22.
- [2] K.Hayakawa et al., Proceedings of this meeting.
- [3] Y.Hayakawa et al., Proceedings of this meeting.
- [4] T.Tanaka et al., Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan (Jul. 20-22, 2005, Tosu) 28.
- [5] T.Sakai et al., Proceedings of this meeting.