

STATUS OF THE LABORATORY FOR ELECTRON BEAM RESEARCH AND APPLICATION OF NIHON UNIVERSITY

Toshinari Tanaka^{#,A)}, Ken Hayakawa^{A)}, Yasushi Hayakawa^{A)}, Isamu Sato^{B)}, Yumiko Takahashi^{*,A)}, Takao Kuwada^{**A)}, Kyoko Nogami^{A)}, Keisuke Nakao^{A)}, Manabu Inagaki^{A)}, Atsushi Enomoto^{C)}, Shigeki Fukuda^{C)}, Satoshi Ohsawa^{C)}, Kazuro Furukawa^{C)}, Tsuyoshi Suwada^{C)}, Shinichiro Michizono^{C)}, Masanori Satoh^{C)}

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

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

^{B)} Advanced Research Institute for the Sciences and Humanities (ARISH), Nihon University

12-5 Goban-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-8251

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

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

Abstract

Operation time of the 125-MeV electron linac was approximately 2000 hours in 2010 at the Laboratory for Electron Beam Research and Application in Nihon University, serving total of 1400 hours of beam time for users' experiments. In addition to conventional full-beam acceleration, a burst-beam acceleration mode was implemented in the renewed electron gun system. The x-ray intensity in the parametric x-ray radiation beam has been measured using thin-wall ion chambers developed for in-line monitoring.

日本大学電子線利用研究施設の現状

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では 125MeV 電子線形加速器を基に、近赤外自由電子レーザー (FEL) と非線形素子を用いたその可視光領域高調波、及び 5~34keV の準単色 X 線であるパラメトリック X 線 (PXR) を利用光源として主に学内の共同利用を進めている。2010 年度の加速器運転時間は、クライストロン通電時間で約 2000 時間、ビーム加速は約 1400 時間、それぞれのビームラインの利用時間はほぼ 5:5 となった。この間に生じた故障等として、クライストロン 2 号機パルスモジュレーター直流高圧電源でフィルタ回路の抵抗破損、加速器冷却系で循環冷水中の微生物大量発生、電子銃耐電圧低下による放電の頻発、などがある。一方、FEL 共振器ミラーは 2008 年 1 月以来顕著な劣化の兆候はなく、更新せず使用を続けている。加速器の改良としては、2010 年度に電子銃高圧ターミナルを更新し制御機能の改善を図った。さらに 2856MHz 加速 RF の各周期でバンチを加速する従来のフルビーム取り出しに加え、高速グリッドパルサーと高速パルスカップリング回路を導入し、加速 RF の 64/128 分周に間引いた半値幅 1ns 以下のバーストビーム取り出し・利用が可能となった^{[1][2]}。光源利用に関する進展として、FEL の非線形結晶による高調波発生において本来予定していなかった発光現象が観測され、この現象の詳細を調査中である^[3]。PXR はこれまで実験中の照射 X 線量を実時間で測

定する手段を持っていなかったことから、定量的実験を実現するため、新たに X 線出力ポートに X 線透過型電離箱を設置し常時モニターとして利用すべく基本性能に関するデータの取得を進めている。

以下においてこれら 2010 年度における施設の状況についてその概要を報告する。

2. 加速器稼働時間

2010 年度の加速器稼働時間はクライストロン通電時間で約 2000 時間であり、月別では図 1 のようになっている。短時間の特別な電源動作試験時を除き、使用しているクライストロン 2 台の電源をほぼ同時に ON/OFF しているため、低電圧系の ON 時間は 1 号機のものを示している。クライストロン高圧 ON 時間については、それぞれ毎日の運転開始時以外にもエージングや調整運転を独立に行う場合があ

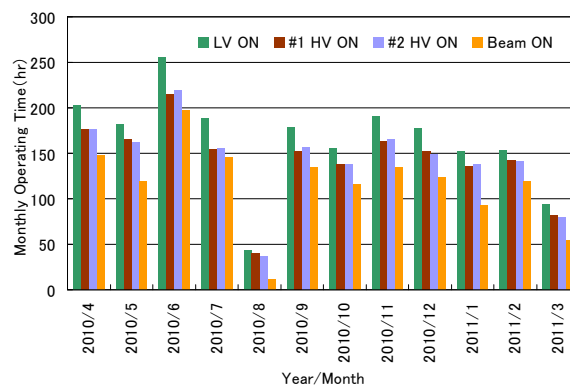


図 1 : 2010 年 4 月から 2011 年 3 月までの月間加速器運転時間の推移。

[#] tanaka@lebra.nihon-u.ac.jp

^{*} Currently: Institute of Materials Structure Science, KEK

^{**} Currently: School of Dentistry at Matsudo, Nihon University

るため、2台で若干 ON 時間が異なるが、約 1720 時間である。

低電圧系 ON からビーム加速開始までに建屋室温・冷却水温度等を定常状態に近づけておくと、安定なビームが得られやすいという経験から、現在は必要に応じて予め低電圧系と冷却水系電源の ON 時間を設定しておき、高圧 ON より 1 時間以上前に無人の状態です自動立ち上げを行えるようにしている。また、クライストロン RF 窓の劣化・破損を避けるため、毎日の運転開始時にはビーム加速開始までに十分時間をかけてエージングを行いながらクライストロン高圧を上げている。このため、実際にビーム加速を行っている時間は低圧及び高圧の ON 時間に比べかなり短くなっている。この点は従来の運転状況とほぼ同様である。共同利用実験への電子ビーム供給時間は全体で約 1400 時間であるが、ビームライン別では、FEL ラインで約 690 時間、PXR ラインで約 710 時間のビーム供給時間となっており、どちらもほぼ同じ利用時間であった。

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では震度 5 弱の揺れが周辺で観測された。当日は FEL ビームラインを利用し運転中であった。大きな揺れの最中でも電子ビームの状態に関しては一見して分かるようなモニター上での異状は見られなかったが、揺れが長く続いたため運転担当者が安全を考慮しビーム加速を中止した。その後の点検でも加速器本体・施設ともに顕著な影響は見られなかった。地震による電力供給不足に配慮し、その後は年度内の運転を中止したため、共同利用に予定していた約 100 時間のビーム利用を取り消すことになった。図 1 における 3 月の稼働時間にはその結果が反映している。

3. 故障等とそれらへの対応

3.1 クライストロン直流高圧電源の故障

2010 年 8 月下旬の運転中にクライストロン 2 号機の直流高圧電源が異常停止した。LEBRA ではクライストロン印加パルスの電圧安定度は基本的に直流高圧電源の安定度に直接依存する回路構成となっている。直流電圧安定化動作のみではパルスモジュレーター-PFN に電力を供給する共振充電の途中で高精度安定化制御範囲を越えて直流電圧が変動するため、安定化が機能せず商用電源変動が PFN 充電電圧に直接反映してしまう。この対策として直流電源から共振充電用チョークまでの途中に RC 回路を挿入し、共振充電時の大電力を、電圧安定化制御が外れない程度に予めコンデンサーに蓄えておく改良がなされている^[4]。直流電源が異常停止した原因は、この RC 回路の抵抗の破損にあった。

図 2 に抵抗破損状況の写真を示す。RC 充電回路の抵抗は 100Ω と 18Ω を交互に 5 本ずつ直列にして 590Ω として使っていたが、破損・溶融が顕著だった物は 100Ω の抵抗が多かった。この状況から抵抗は突然破損したのではなく、徐々に抵抗の温度上昇

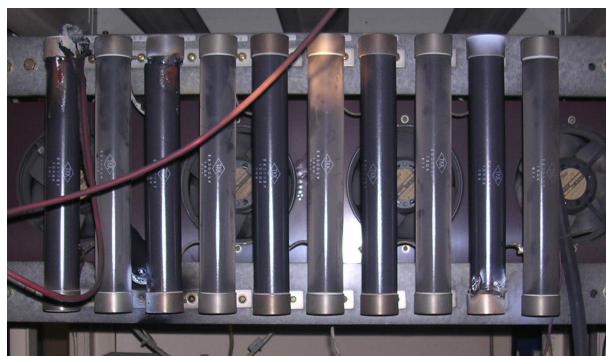


図 2 : クライストロン 2 号機直流高圧電源充電抵抗の破損時写真。左から 100Ω と 18Ω が交互に直列接続されている。

等により劣化が進んだ結果抵抗値が上がり、最終的に異常な高温状態となって破損・放電・溶融に至ったことが示唆される。

幸い、手持ちの大容量抵抗のうち 18Ω の抵抗が 30 本あったことから、速やかに修理に取りかかることができた。電源を製造した IDX の整備担当者による点検の後、抵抗設置絶縁基板の改造を施して代替抵抗を取り付けた結果、故障から 1 週間で加速器の通常運転に復帰した。実はこの故障の数ヶ月前から、2 号機は従来の安定化制御が十分機能せず、直流電圧安定度の悪化とそれに伴う加速ビームの不安定が問題となっていたが、修理の後、これらが解消し以前と同様の状態に戻ったことから、充電抵抗の不具合がこれらの問題を引き起こした原因と推測される。

3.2 冷凍機循環水の水質悪化

LEBRA の加速器冷却系には、クライストロン冷却粗温調系と加速管及び電磁石冷却精密温調系の 2 系統に冷水を供給し熱除去する冷凍機循環冷水系がある。冷凍機循環冷水はさらに屋外に設置された冷却塔との間を循環する冷却水によって熱除去がなされる。現状の制御系において精密温調系の温度安定度を高めるためには、冷凍機循環冷水温が加速管冷却水温度に近いことが好ましいため、循環冷水の温度が 25°C に設定されている^[5]。

2011 年 3 月に循環冷水内にガスが溜まり冷水系ポンプが空回りした結果、冷水系が機能しない事態が発生した。冷水を調べたところ、外部から光が当たった可能性がほとんどない冷凍機冷水内部において微生物の 1 種であるフナムシが大量に発生し、冷水が緑色に変色していることが判明した。図 3 の写真に示すように、このときには冷水循環系のリザーバタンク水面には大量の泡が見られ異臭が発生していた。クライストロン冷却系の改造前に冷却塔から直接粗温調系に冷却水を供給していた配管を、冷凍機経由に変更する際に洗浄後そのまま利用したことから、配管中に入り込んでいたフナムシが、水温が高いため微生物にとって増殖しやすい環境の中であって何らかのきっかけで急激に増殖した可能性が考えられる。



図3：微生物が異常に増殖した際の冷凍機循環冷水リザーバータンク内の様子。大量の泡が発生し冷水が緑色に変化。

冷水系の水質悪化は配管内部の洗浄を行うことで正常化したが、微生物増殖対策として殺菌用薬剤の投入を行っている。急激な増殖らしき現象はその後確認されていないが、冷水に着色が認められるため完全に排除できていないことから今後リザーバータンク内に殺菌灯を設置することも検討している。

3.3 電子銃放電の頻発への対応

電子銃の真空側で放電が発生すると、イオンポンプ電流の突発的上昇と電子銃直流高圧電源の出力電圧低下あるいは変動、さらに直下流にあるCTで雑音信号の発生が観測される。そして真空度の悪化により電子銃引き出し電流が低下するため、加速の不安定化が顕著となり、ビーム利用の上で大きな障害となる。

現在使用している電子銃においては2006年にも放電が頻発した。この時には絶縁碍子の変色が顕著になっていたため、碍子を交換し、さらにアノード表面に付着したカソード物質と放電痕らしき汚れの除去・清浄化を行い解決した。2010年末頃から、再び放電の頻度が高まったため、2011年2月に電子銃を取り外しアノードの放電痕を探したが、今回は見当たらず、アノード表面の同心状に付着したカソード物質の除去のみを行った。図4に清浄化した前後のアノードの写真を示す。結局、この措置だけで放電の頻発は解決し現在に至っている。

なお、電子銃を取り外した際に、Y646Bカソード

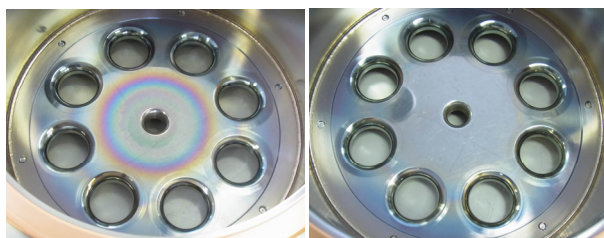


図4：電子銃放電頻度増加のため、汚れたアノード（左）表面をサンドペーパーで磨き付着したカソード物質を取り除いた前後の様子。

は1気圧に曝されたが、そのまま再使用した。再活性化後の引き出し電流波形には、バンチャーから戻って来た電子ビームによるバックボンバードメントが原因であると示唆されている顕著な電流増加波形が観測されるようになった。しかし、この波形はその後1ヶ月以内に徐々に目立たなくなり、やがて観測されなくなった。2005年から2006年にかけて起きていた同様の現象では、カソードの使用中に観測にかかるようになり、徐々に電流増加波形が顕著になっていったが、今回は似た現象ではあるが明らかに異なる経過を辿っている^[6]。

4. 2010年度における進展

4.1 電子銃高圧ターミナル更新とバーストモード加速

従来の電子銃高圧ターミナルは20年以上前に製作した物で、グリッドバイアス電圧とグリッドパルス電圧はACを単純に整流して印加していた。これで得られた電圧安定度はFELの安定発振には不十分であったため、代わりにこれらの電源として市販の安定化電源を搭載して用いていた。ただし、この際に電圧の遠隔制御機能を失ったことから、機能の回復は高圧ターミナルの更新時に併せて実現することにした。

電子銃高圧ターミナル更新では、グリッドバイアス、グリッドパルス、ヒーター電力（直流化）の高安定化を図ることに加え、従来は加速RFの各周期でビームバンチを加速するフルビームモードでの加速のみであったが、佐賀LSの電子銃システム^[7]を参考にKentech社の高速グリッドパルサーを搭載することにより64分周(44.6MHz)または128分周(22.3MHz)のバーストモード加速の機能を付加することにした。この際に、LEBRAにおける通常のパルス幅50 μ sのグリッドパルス（マクロパルス）と、高速グリッドパルサー出力半値幅0.6nsのパルス列を同時にあるいは選択的に印加し利用できるよう、これらのパルスのカップラーを電子銃に組み込むことにした。この様子を図5に示す。

ターミナルとカップラーの製作は日本高周波に依頼した。カップラーは同軸構造ではなくストリップライン型である。2010年8月にこれらの更新作業を行い、通常グリッドパルスにおいて予定通りFELの安定発振を行うのに十分な電圧安定度が確保

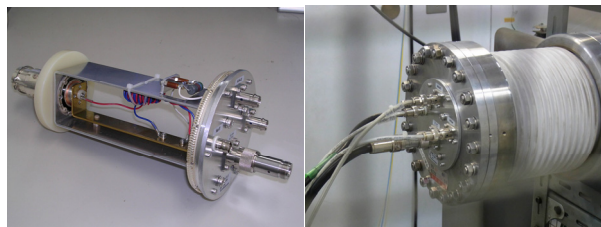


図5：通常グリッドパルスと高速グリッドパルスを重畳させるカップラー（左）とそれを電子銃に組み込んだ状態。

できていることを確認した。一方、高速グリッドパルスは実機での動作試験の際に不具合が発生し、修理で試験が遅れた。2011年4月に漸くバーストモード加速試験が始まったが、手持ちの高速オシロスコープが故障したため、KEK 加速器研究施設から急ぎょ借りて電流波形等の測定を継続している。

高速グリッドパルサーの出力パルス半値幅は加速RF 1周期より長い、パルサーのトリガー遅延時間とグリッドバイアス電圧を調整することで、サテライトバンチを無くし、パルス当り加速バンチ数を最小で1個にまで制限できることが電流波形のモニターにより確かめられた。現在、正確にバーストモードでの加速ビーム電流を測定するには至っておらず、定量的な議論は今後の課題であるが、ビーム調整時におけるマクロパルスと高速パルスの重畳効果など、ビーム加速の特性と FEL 発振強度の振る舞いを調べている。

4.2 PXR 強度常時測定用電離箱の製作

従来 LEBRA で発生させた PXR の X 線強度は、照射実験を開始する前に電子ビーム調整を行っている間だけ Ar ガスを用いた電離箱で観測していた。この電離箱はエネルギーが最大でも 34keV 程度の PXR を遮へいしてしまう構造のため、試料への X 線照射時には X 線ビームライン上から外す必要があり、照射中の強度は不明なままであった。

定量的な実験を行うには試料に照射中も PXR 強度を測定する必要がある、このために PXR 出力ポート直後に設置して常時用いることのできる電離箱が不可欠であった。このために、厚さ $6\mu\text{m}$ の両面アルミナイズドマイラーを X 線の入射窓及び電極に用い、X 線が接地入射窓、高圧印加電極、接地出射窓を透過する構造とすることで、X 線の吸収損失の少ない薄壁透過型電離箱を開発した。ただし、PXR はパルス光源であるため電離箱から得られる信号のうち速い信号として現れる電子の電荷量のみを検出するパルス電離箱型の使用とした。

PXR 出力ポートには直径 100mm の X 線束が得られるため、マイラーの薄い窓は直径 120mm、高圧側電極は直径 156mm を確保し、接地電極と高圧電極間は表側と裏側でそれぞれ 25mm 離してある。従って電離箱有感層の厚さは 50mm ある。使用材料とガスの X 線吸収係数から求められた電離箱の透過損失は、 N_2 ガスを充填した場合、6keV で約 10%

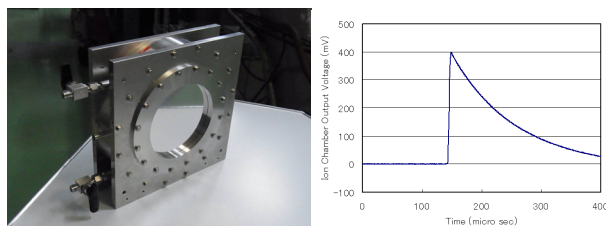


図 6 : PXR 常時モニター用に製作した電離箱 (左) と、 N_2 充填でパルス幅 $5\mu\text{s}$ 、12keV PXR 入射時に得られた電荷有感型アンプ出力波形。

である。

図 6 に製作した電離箱の外観を示す。印加電圧 200V 以上で十分平坦なプラトーが得られ問題なく動作している。PXR のエネルギー領域によって検出信号が大きく変化し、また電離箱中での X 線損失も使用ガスにより大きく異なる。5keV~34keV 程度の領域に渡り適度なレベルの検出信号を得、かつ損失を抑えるため、電離箱に充填するガスとして N_2 か Ar のどちらかを選択使用することにした。実際には、同一寸法の物を 2 台製作しそれぞれ充填ガスを別にし、エネルギーにより使い分けることにした。この電離箱を用いて PXR 強度の測定を行った結果、X 線エネルギー領域により異なるものの、概ね電子ビームパルス当り $10^5\sim 10^6$ 個の準単色 X 線が得られていることが確認された。

5. まとめ

日本大学電子線利用研究施設は少数のスタッフで運用されている。細かな点も含めると様々な故障等の問題があったものの、幸い深刻な事態には至らずに加速器運転を再開でき、2010 年度も従来とほぼ同様約 2000 時間の加速器運転と約 1400 時間の光源共同利用を維持することが出来た。電子銃周りの改良により引き続き FEL を安定に発振させるとともに 64 分周または 128 分周のバーストモード加速を可能にし、また X 線照射中の強度をモニターする電離箱を製作した。LEBRA の FEL と PXR という二つの特色ある光源を用いた今後の共同利用の進展と新たな研究テーマの開拓に寄与することを期待している。

参考文献

- [1] T.Tanaka et al., Proceeding of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011.
- [2] K.Nakao et al., Proceeding of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011.
- [3] K.Hayakawa et al., Proceeding of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011.
- [4] K.Hayakawa et al., Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan (Jul. 30-Aug.1,2003,Tokai) pp.90-92.
- [5] T.Sakai et al., Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan (August 6-8, 2008, Higashihiroshima Japan) pp.815-817.
- [6] T.Tanaka et al., Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan (August 1-3, 2007, Wako Japan) pp.694-696.
- [7] K.Hanakawa et al., Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan (August 4-6, 2004, Funabashi Japan) pp.444-446.