

STATUS OF 125MeV LINAC AND LIGHT SOURCE AT LEBRA^{*}

Toshinari Tanaka^{1A)}, Isamu Sato^{B)}, Ken Hayakawa^{A)}, Yasushi Hayakawa^{A)}, Akira Mori^{2A)}, Kyoko Nogami^{A)}, Takeshi Sakai^{B)}, Kenichiro Ishiwata^{3C)}, Keisuke Nakao^{C)}, Manabu Inagaki^{B)}, Akio Kidokoro^{4C)}, Hiroshi Takasaki^{5C)}, Shigeki Fukuda^{D)}, Atsushi Enomoto^{D)}, Satoshi Ohsawa^{D)}, Tetsuo Shidara^{D)}, Tsuyoshi Suwada^{D)}, Kazuro Furukawa^{D)}, Shinichiro Michizono^{D)}

^{A)}Institute of Quantum Science, Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

^{B)}Advanced Research Institute for the Sciences and Humanities (ARISH), Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, 274-8501

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

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

Abstract

In the last couple of years, about 300 items of FEL or PXR user experiment were conducted at LEBRA. Total operation time of the 125-MeV linac in the last 1 year was about 1250 hr, most of which was appropriated for user experiments as a result of improvement on the performance of the linac and the stability of the FEL power. Damage to the FEL resonator mirrors due to high laser power was found after application of the mirrors over approximately 1 year, which was significant at around the fringe of the coupling hole for extraction of the FEL power.

日大電子線利用研究施設125MeVリニアックおよび光源の現状

1. はじめに

日本大学量子科学研究所の電子線利用研究施設 (LEBRA) で共同利用が開始されてから約2年が経過した。現在LEBRAでは、125MeV電子リニアックを利用して発生させる自由電子レーザー (FEL) とパラメトリックX線(PXR) を主要な研究用光源として共同利用に提供している。また、これに加えリニアックに依存しないX線利用研究、さらにPXR利用研究の予備実験と研究訓練が行えるよう、試料作成環境の他に通常のX線装置・解析装置が整備されていることも施設の特長である。

FELのユーザーによる利用実験が開始されたのは2003年10月である。一方PXRはビームラインが2004年3月末から使用可能となり、X線の利用開始は同年6月であった。PXRは準単色のコヒーレントなX線源であり、しかもLEBRAにおいては点光源に近いという利点により、これまでX線による透過画像の撮像を主目的として共同利用が行なわれている^[1]。

LEBRAにおけるFELとPXRの共同利用は2000～2004年度にかけて文部科学省の学術フロンティア推進事業に選定された「可変波長高輝度単色光源の高度利用に関する研究」を推進する基盤であり、光源

の実現と整備が急がれたが、実用化が遅れたため利用研究が最終年度である2004年度に集中した。

2. 加速器稼働状況

2.1 運転時間の推移

2004年6月から2005年5月までの最近1年間のリニアック稼働時間の推移を月毎に集計し図1のグラフに示した。図1において各月の棒グラフは、左からそれぞれクライストロンパルスモジュレーター電源投入時間 (LV ON)、1号機クライストロン高圧印加時間 (#1 HV ON)、2号機クライストロン高圧印加時間 (#2 HV ON)、ビーム利用時間 (BEAM ON) を示す。パルスモジュレーターはほとんどの利用で出力RFパルス幅20μs、繰り返し2Hzで運転しており、短時間ではあるが5Hzまで繰り返し数を上げた運転も行っている。電子ビームエネルギーはFELでは利用波長に依存して50～100MeVの範囲で調整し、PXRでは100MeVのみで運転している。

図1の統計におけるBEAM ON時間には、ビーム利用実験の都合によりマシンタイム中に随時ビームを停止している時間は含まれていない。しかしこの間もクライストロン出力RFパルスは停止させていないので、リニアックのオペレーターが席について

^{*} 文部科学省学術フロンティア推進事業 (平成12年度～平成16年度)

¹ E-mail: tanaka@lebra.nihon-u.ac.jp

² Present Address: College of Pharmacy, Nihon University

³ Present Address: College of Humanities and Sciences, Nihon University

⁴ Present Address: Mutoh Co., Ltd.

⁵ Present Address: Fujitsu Support and Service Inc.

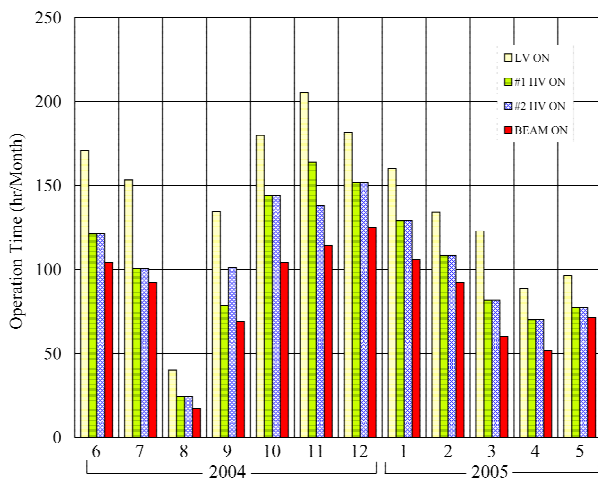


図1. 最近1年間における月間加速器運転時間の推移。各月において左からモジュレーター電源投入時間、1号機および2号機クライストロン高圧印加時間、ビーム利用時間を示す。

ビーム利用可能な状態を維持している時間を事実上リニアックの運転時間と考えると、#1 HV ONかつ#2 HV ONの時間が運転時間にほぼ対応する。

通常の運転では常に2台のクライストロンは同時に高圧を印加しているためHV ON時間はほとんど同じである。2004年8月だけ特に運転時間が短かったのは、大学全体の夏期休暇が集中したことと実験申込がほとんどなかったこと、さらに制御用PCが不調で回復に時間を要し、約1週間運転不能だったことによる。

昨年度の年間運転時間は約1500時間と見込んでいたが、上の基準に従うと最近1年間の運転時間実績は約1250時間である。今年3月で学術フロンティアの研究計画が一旦終了したのに伴いユーザーの実験課題申請が一段落したことで古くなった冷却装置と配管の更新工事を行なったため、3月からの運転時間が減少していることが影響して予想をかなり下回る結果となった。クライストロンの故障等マシントラブルによる長期間の利用停止を招く事態はこの1年間発生していない。

2.2 クライストロンアセンブリタンク内の放電

クライストロンアセンブリタンク内に設置されているパルストランスとヒータートランスにおいて現状で数日の運転に1回程度の割合で放電が発生している。経験的には、この放電により徐々にトランスの絶縁体の炭化が進み耐圧が劣化して、最終的に放電が頻発し使用不能に陥る。LEBRAでは日本電磁工業の協力でこれまでに3回のヒータートランス改良を試みているが、1号機のヒータートランスは一世代前の改良品で耐圧が不十分だったため2004年10月になって放電が頻発し、結局2003年11月から2号機に用いている最新の改良品と同型に更新した。

ヒータートランス更新の際にパルストランスの状態を目視で確認したところ、従来のパルストランスにも共通して生じていた位置に放電痕が見られたことから、近い将来更新するための準備を進めている。

一方、2号機には2003年6月からコイル巻形状と線材を改良したパルストランスを採用していたので、上記作業の際に併せて状態を調べたが、タンク内に設置したまま目視で確認した範囲では約1年半の使用にかかわらず放電痕は見られなかった。

タンク内放電は、リニアックのビームエネルギー増強を実現する上で深刻な問題であり、改良後のパルストランスは信頼性が向上したと期待されるが、ヒータートランスの放電は未だ解消していない可能性があり不安が残る。

2.3 加圧導波管内放電

LEBRAのリニアックRF立体回路のうち、バンチャー系のΦAを含む一部にSF₆加圧仕様（最大1.5気圧で使用）の導波管が使われており、2004年12月から放電が多発し始めた。このため立体回路を分解したところΦA前後の複数のフランジ面に多くの放電痕が見られた。フランジの損傷は深刻ではなかったためフランジ面を磨き、導波管断面の長辺に沿ってフランジ表面に粘着銅テープを貼ることで電氣的接触の改善を図った結果、これらのフランジにおける放電は抑えられた。

しかしその後ΦAのさらに下流において放電が発生するようになり、放電が激しくなった2005年2月初めに立体回路を分解したところ、導波管フランジの1ヶ所にO-リングとともに使われるはずのRFコンタクターが無いことが判明した。このためRFコンタクターを付けフランジ面をやはり銅テープで補修した結果放電の頻度は極端に減少した。そして3月中旬に一度だけ放電が激しく繰り返された後、ほとんど加圧導波管部での放電は観測されていない。立体回路組立の記録から、問題のフランジはこの約4年間RFコンタクター無しであったと思われる。

2.4 真空度の変動

クライストロンを長パルスで安定動作させRF窓の破損を避けるには、動作中のRF窓付近の真空を良好に保つことが極めて重要である。このためLEBRAではクライストロンRF窓下流側の真空度を常時監視し動作の目安としている。最近リニアック停止中でもRF窓下流と加速管のイオンポンプ電流の悪化・自然回復が数回観測された。Heリークディテクターによる真空リークの調査を試みたが、リークは見つかっていない。

加速管に関しては、マニホールドで接続された2台のイオンポンプの振舞が連動していないことから、真空リークの他にイオンポンプ本体の劣化による暗電流増加の可能性も考えられるが、まだ原因は特定されていない。

3. 光源の利用状況

3.1 共同利用の状況

LEBRAではFELとPXRを同時に利用することは現在不可能であるため、それぞれの利用は別々にマシ

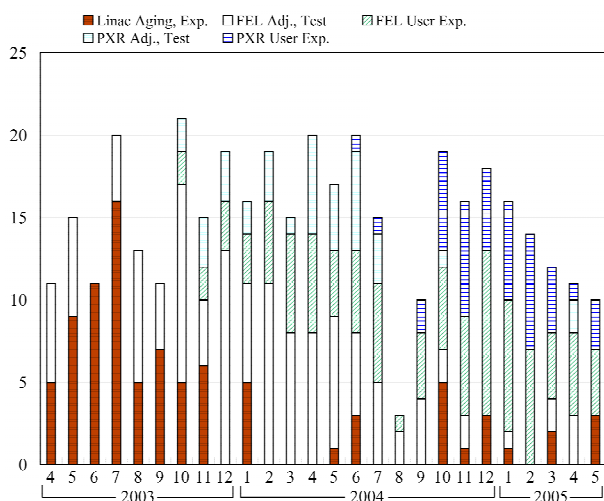


図2. リニアックのビーム利用開始からの月間マシンタイム割当件数の推移。縦軸は割当件数である。ユーザーによる共同利用実験は2003年10月から開始している。

ンタイムを割り当てて行われている。また、利用実験以外にリニアックや光源装置の調整運転・性能試験等も独立にマシンタイムを割り当てている。リニアックの調整にかかる時間を節約するため、昨年度は概ね隔週でFELとPXRの利用実験を交代で行うようマシンタイムの調整を行った。

2003年のビーム使用開始以来、月毎のマシンタイム割り当て結果は図2のようになっている。ここで、利用目的を1)リニアックのエイジング・実験・調整運転、2)FEL装置の調整・試験、3)FEL利用実験、4)PXR装置の調整・試験、5)PXRの利用実験、の5項目に分類しマシンタイムを割り当てた件数を集計してある。2年間におけるビーム利用のマシンタイム割当は約300件に上る。使用開始から現在に至るまでの推移として、初期の頃は電子ビームの安定化のためクライストロンのエイジングとクライストロン電源の調整に多くの時間を割いたが、その後FELの発振安定化に向けた調整運転が多くを占め、最近1年間はFELとPXRの利用実験に大部分のマシンタイムを割り当てられるようになった。

これまでのところ、マシンタイムは概ねユーザーの希望通りに割り当てることができ、利用実験も予定通り行われてきた。FELの利用可能波長範囲は、後述のように共振器ミラーの更新があり発振範囲が狭くなったため、現在のところ $1.3\mu\text{m}\sim 6\mu\text{m}$ で可能である。FELの利用は実験内容毎に専用の実験室まで光を導いて行われている。一方PXRについては低エネルギー側でカプトンの取り出し窓による吸収が大きいものの、加速器本体室内のPXR発生装置から隣接する大実験室に取り出され、点光源に近い準単色X線の特長を利用して主に透過画像撮像への応用と集光ミラーによる集光実験が行われている。PXRは $6\text{keV}\sim 20\text{keV}$ の範囲での利用実績がある。

PXR用電子ビームラインの利用開始以来 90° 偏向系に用いている四極電磁石の励磁電流極性を間違えていたことが2004年12月になって判明し、修正してからは電子ビームとX線強度の安定度が改善された。

3.2 FEL共振器ミラーの劣化

FELの共振器には2003年8月以来、銀蒸着銅基板ミラーを使用しているが、2004年9月にFEL光輸送部工事の際に共振器ミラーの状態を調べたところ、共振器上流下流ともにミラーの一部に破損が見られたため、更新した。FEL取り出し用結合孔のある上流ミラーの破損の様子を図3の顕微鏡写真に示す。このミラーの結合孔は直径 0.3mm である。銀蒸着が特に結合孔周辺で集中的に変色・剥離し銅基板表面が露出している。

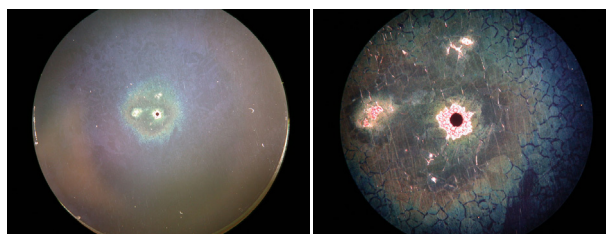


図3. FEL共振器の取り出し用結合孔のあるミラーの破損を示す写真。左はミラー全体、右は中心部の拡大写真。結合孔付近では銀蒸着部分が変色・剥離し、銅基板が露出している。

代替用には結合孔直径 0.4mm で同一曲率のミラーがあったので現在はこれを使用している。結合係数が大きくなったため約 $1\mu\text{m}$ 以下の短波長側では発振が難しい状態である。また、FEL取り出し直後に置かれているAl蒸着ミラーにも劣化が生じ、実験室に導かれるFELパワーが一時低下していたが、平面ミラーで位置調整が可能のため劣化部分を避けて使用している。

4. まとめ

リニアックとFELの安定化、さらにPXRの実用化により、約2年間の共同利用で約300件のマシンタイムをユーザー利用実験に提供することが出来た。現在FELは $1.3\sim 6\mu\text{m}$ 、またPXRは $6\sim 20\text{keV}$ の範囲で利用可能である。この1年間、リニアックに関しては長期間ビーム停止を要する故障は起きていない。FEL共振器ミラーを銀蒸着に換えて以来約1年間使用した結果、実用にはなるものの依然として耐久性に問題があることが分かり今後の課題となっている。

参考文献

- [1] T.Tanaka et al., Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan (Aug. 4-6, 2004, Funabashi) p22.