

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

Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA), Institute of Quantum Science, Nihon University
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, Chiba, 274-8501

Abstract

The laboratory for electron beam research and application (LEBRA) has been operated since 2004 as a research facility for faculties of science and technology, medicine, dentistry and other associated researchers in Nihon University. The near-infrared free electron laser (FEL) and the parametric x-rays (PXR) have been generated with the electron beam from the conventional 125-MeV electron linac. The total operation time of the linac in fiscal year 2009 was approximately 2080 hr, including klystron aging and test operation; there has been no serious breakdown in the accelerator elements. The klystron cooling water system was renewed and upgraded to the temperature stability of $\pm 0.01^\circ\text{C}$, which is comparable with the stability of the cooling water system for the accelerating tubes.

日本大学電子線利用研究施設における加速器及び光源の現状

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) では 2004 年以來 125MeV 電子リニアックを用いて発生させた、近赤外自由電子レーザー (FEL) とパラメトリック X 線 (PXR) という二つの波長可変単色光源を主に学内研究者の共同利用に提供し、年間約 2000 時間の運転を行っている。これら二つの光源は同時利用が出来ないため、光源の安定度の点から、ほぼ隔週で利用する光源を交代しているが、実験の性格から PXR の 1 日当たり利用時間が比較的長いため、PXR 利用時間が 6 割程度を占めている。

LEBRA のリニアックは従来型の、DC 電子銃、プリバンチャー・バンチャーで構成された入射部を持ち、現状では FEL、PXR とともに電子ビームの加速 RF 周波数 2856MHz に等しい繰り返しでマイクロパルスが発生している。ビーム加速は通常 2~5Hz の繰り返しで行われており、加速 RF のパルス幅は最大 20 μs 、発生した光のマイクロパルス幅は 1ps 程度かそれ以下である。

以下では 2009 年度における加速器と光源の共同利用状況、また加速器安定度と光源安定度の向上に関連して取り組まれた改善・改良について報告する。

2. 2009 年度の運転・共同利用状況

図 1 に 2009 年度の加速器運転時間の推移を示す。8 月と 1 月に運転時間の顕著な減少が認められるが、これは夏期・冬期休暇による停止と、冷却系等の工事に伴う停止が原因で、マシントラブルによるものではない。通常の加速器運転は日中のみで、徹夜運転は行っていないが、2009 年度途中から加速器を十分ウォーミングアップすることが光源の安定化にどの程度効果があるかを調査するため、朝 7 時~8 時に自動的にクライストロンに通電を開始するシーケンスを採用している。従って、後期からの運転において、高圧投入時間 (HV ON) に比べクライスト

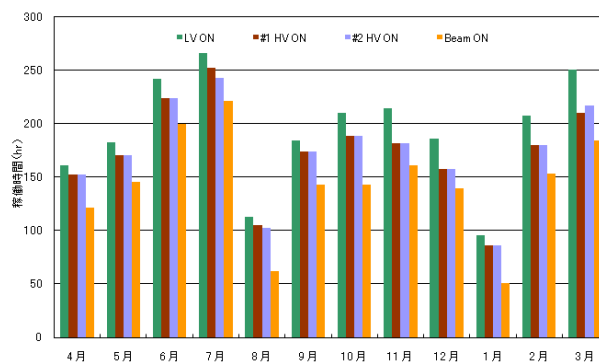


図 1. 2009 年度の月別加速器運転状況。クライストロン通電 (LV ON)、高圧印加 (HV ON)、ビーム加速 (Beam ON) の時間はそれぞれ、約 2300 時間、2080 時間、1720 時間。

ロン通電時間 (LV ON) が長めになっており、年間の LV ON 時間は 2300 時間を超えるが、HV ON 時間はそれより約 220 時間短い約 2080 時間である。ビーム利用時間 (BEAM ON) は約 1720 時間なので、HV ON はそれに比べて約 360 時間長い。これは、LEBRA の大電力 RF 系のパルス幅が 20 μs と長く、毎日の加速器起動時には安全のためクライストロンのエージングを行いながら印加電圧を所定の電圧まで昇圧させているため、ビーム加速開始まで毎回 1 時間以上費やしていることによる。さらに、1 週間程度の加速器停止期間があると、経験的に RF 窓でのガス出しが増加し放電が発生し易くなることから、休止期間の後の運転ではエージングを必ず 1~2 日間実施していることも、この差を大きくしている。

加速器試験運転も含めた、運転目的別利用件数の比率を図 2 に示す。加速器試験運転にはビームの振る舞いの調査の他にエージングのみが目的の運転も含む。また、FEL 試験運転及び PXR 試験運転は、それぞれの光源の安定度調査や光源装置調整後の確認目的の運転が主である。これらは完全に施設内部の利用である。一方、FEL 利用実験及び PXR 利用

office@lebra.nihon-u.ac.jp

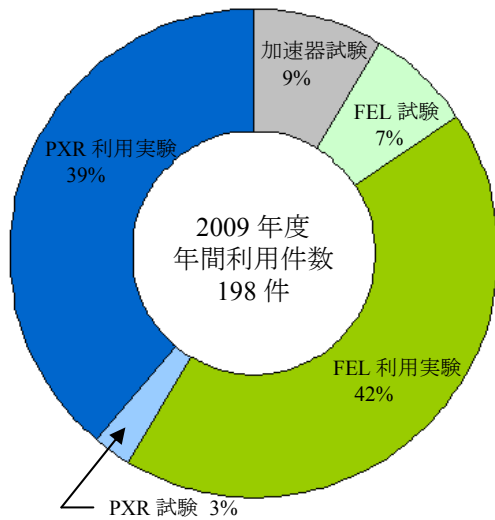


図 2. 2009 年度運転目的別の利用件数比率。

実験には、施設内部の光源開発研究・利用開発研究を含むが、多くは施設外部の利用者による実験が占めている。

FEL は基本波の利用では約 $1.5\sim 6\mu\text{m}$ の範囲が安定に供給でき、また可視領域の要求に対して非線型結晶による高調波光発生とその安定な利用に取り組んだ結果、 $0.5\mu\text{m}$ 付近の可視光までが、マクロパルス幅約 $10\mu\text{s}$ で利用出来る状況になっている^[1]。PXR は従来 Si(111)結晶を発生用標的に用い $5\sim 20\text{keV}$ の範囲が利用可能であったが、特に医学分野への応用においてさらに高エネルギー領域での発生の要求があり、標的結晶を Si(220)に替えた PXR 発生実験が行われた。この際に顕著な発生の難しさや X 線強度の低下のような問題が起きなかったことから、高エネルギー化は容易に成功した。結晶交換と調整が必要となるため、現在は約 3 ヶ月毎に $5\sim 20\text{keV}$ 、 $10\sim 34\text{keV}$ のエネルギー範囲を交互に利用している。ビーム加速の繰り返しは FEL では 2Hz がほとんどであるが、PXR ではイメージングの実験において強度が要求されることから 5Hz での運転が多く行われている。

PXR の強度についてはまだ定量的な測定を行っていないため絶対値が不明であるが、標的結晶の逆格子ベクトルが結晶表面に対して垂直ではない非対称結晶を用い、入射電子ビームに対しては結晶実効厚が大きく放出 X 線に対しては薄くなる幾何条件をとると、明らかに X 線強度が大きくなることが分かっている。現在、強度を最大化する条件の確認の他、さらに楔状断面結晶を用いることによる PXR 性能の改善など、詳細な分析のための実験が行われている^[2]。

3. 入射部立体回路系の更新

LEBRA のリニアック入射部は 100kV の三極管型 DC 電子銃、プリバンチャー及びバンチャー加速管で構成され、特別にビームエミッタンスの改善やバンチ電荷量の増加を図る光陰極 RF 電子銃やサブ

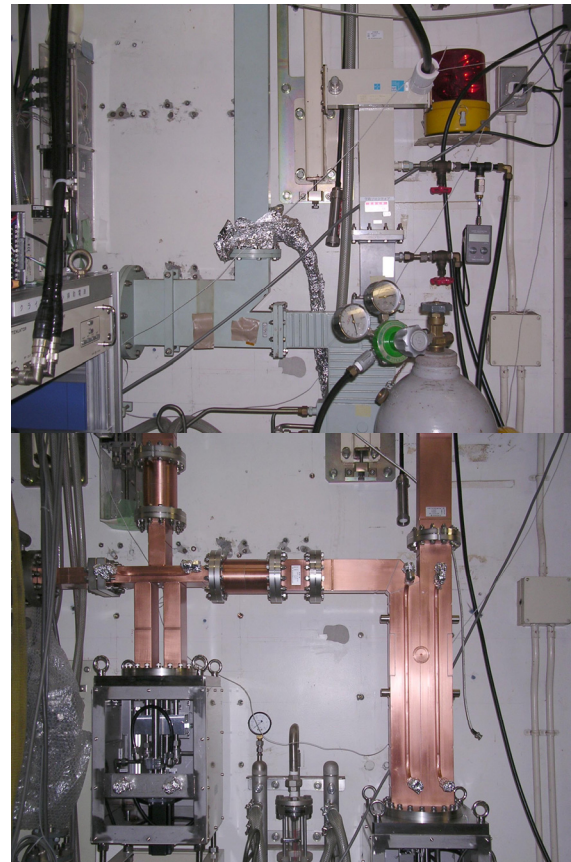


図 3. 入射部 RF 系の SF₆ 加圧仕様立体回路 (上) を真空仕様 (下) に更新。

ハーモニックバンチャーなどの要素を用いずに FEL 発振を実現している。また、リニアック建設費の節約のため DAW 型加速管の開発時に使われた試験加速器の RF 立体回路系の一部を流用してきた。この立体回路系は SF₆ 加圧仕様で、クライストロン 1 号機からプリバンチャー・バンチャー系に RF を分岐した後の減衰器及び移相器部分に採用したため、この系統のみが加圧仕様導波管という構成となっていた (図 3 上の写真)。

これまで使用してきた加圧型導波管はフランジ部分でのガス漏れがあり、さらにフランジ面間での放電がしばしば生じていた。特にスキャンニングを行うような実験の際に途中でこの放電が頻発すると、加速電子ビームが失われ、測定データに欠損が生じるという利用上の深刻な問題があったため、2009 年度にこれらを全て日本高周波製の真空仕様のもので変更した (図 3 下の写真)。加速電子ビームが失われる現象は、これ以外にも電子銃碍子またはウエネルトの放電、RF 窓の放電などが原因となって発生しているが、これらの発生頻度は低いためビーム加速の安定度の点では真空仕様導波管に変更したことで大きく改善した。

4. クライストロン冷却系の更新

加速器の冷却水循環系は 20 年以上前にダブルサ

イデッドマイクロトロンを建設する際に設置されたもので、老朽化が進んできたため数年にわたり順次更新を行ってきた。その中で、クライストロンを冷却する粗温調系は冷却水温度安定度を重視していなかったため更新は後回しとなっていた。その後、他の冷却系の精度が向上した結果、粗温調系の安定度の低さが加速器安定化の上で問題となり、制御系の更新と二次冷却水として冷凍機循環水を使用することによる温度安定化が施された。しかし、熱交換器に腐食穴が発生していることが判明し、結局更新が必要となった。

これまでクライストロン冷却系の冷却水は熱交換器を通った後そのままクライストロンに送られており、冷却水の温度安定化を行った後の安定度は送出側で $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ であったが、リザーバータンクに戻って再び熱交換器に入る直前での温度安定度の方が $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ と良いことが分かっていた。熱交換器を出た冷却水の温度は、三方弁の動作により制御されているものの周期的変動が避けられないが、これがリザーバータンク内で攪拌され平均化されるためである。このことから、粗温調系の更新の際には熱交換器を出た冷却水を直接クライストロンに送出することはせず、一旦リザーバータンクに入れて攪拌された水を送出し、戻り水を再び熱交換器に戻す、という流路に変更することにした。この方法は、すでに

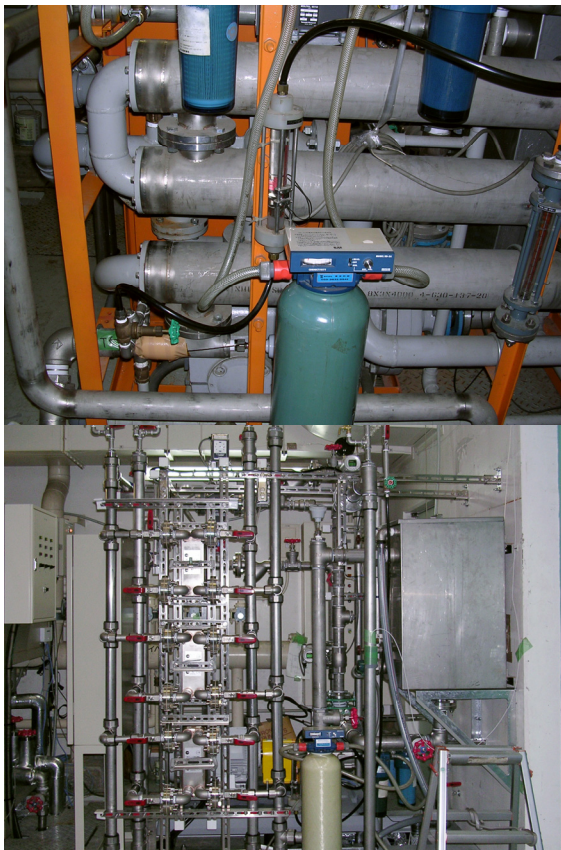


図 4. クライストロン冷却用粗温調冷却水系の更新。上は旧粗温調ユニットの写真、下は更新し置き換えた後の粗温調装置の写真。

加速管冷却用精密温調系において採用し、 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ の安定度を実現した実績がある^[3]。

図 4 に更新前の粗温調冷却系ユニットと更新後の粗温調装置の写真を示す。以前の冷却系はユニット化してあったが、更新費用と将来的なメンテナンス等の容易さを考えてユニット化はせず、配置した部品間をパイプで繋ぐ構成とした。また、これまで二次冷却水側配管が全て鉄だったため錆の発生と冷却水の汚れが深刻であったことから、これらも含めて全てステンレス配管とした。

5. FEL ミラーの状況

FEL 共振器ミラーを納めている真空チェンバーは、従来ミラーの表面を外部から目視できる構造にはなっていなかったため、損傷の有無や程度の確認にはチェンバーを開けなければならず、事実上ミラー交換時までは不可能であった。そこで、図 5 の写真のように、ミラーの前方斜め 45° 方向からミラー表面を観察することの出来るビューポートを取り付けることにした。このポートから覗いても表面の視認性は十分とは言えないが、観察することは可能であり、共同利用の妨げにならないよう、ビューポート付きの別のミラーチェンバーを新たに製作し交換することにした。

FEL 共振器ミラーは、それまで発振に伴うミラー面の損傷・劣化により 3~6 ヶ月程度で交換する必要があったが、2008 年 1 月に上下流側とも曲率半径 4m から 3.7m のものに交換してからは 2 年半以上にわたって発振強度の顕著な低下が生じていないため、交換せず使用を続けている。2010 年 1 月にミラーチェンバーの交換を行ったので、この際にミラー表面を直に目視で確認した。図 6 にこのとき撮影した上下流それぞれのミラー表面と、従来損傷が生じて交換した際に明確なキズ状のものが見られたミラー表面の例との比較を示す。それぞれミラーマウントに取り付けたままの状態撮影してある。損傷を受けた過去のミラーでは、多くの場合 FEL 取り出し用の結合孔がある上流側ミラーでは結合孔の周囲と周辺のミラー表面の数カ所にキズが生じていたが、現行の上流側ミラーでは、結合孔周辺に若干の

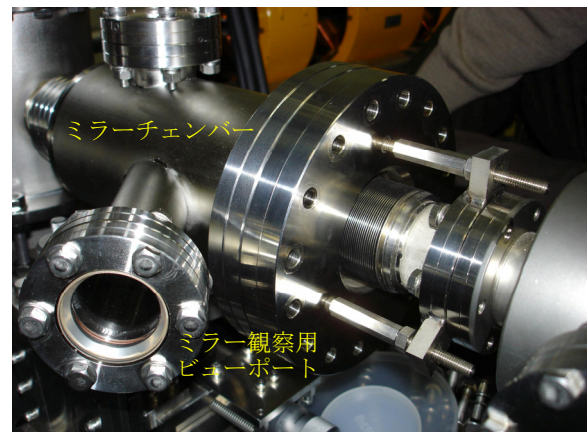


図 5. ミラー観察用ビューポートを取り付けたミラーチェンバー。



図 6. 顕著な性能劣化が生じていない現行 FEL ミラー（上）と過去に損傷を受けたミラー（下）の例との比較。ミラーマウントに取付けたまま撮影。それぞれ左が FEL 取り出し用結合孔のある上流側、右が下流側ミラー。

変色が見られるものの、目視の限りではキズ状のものは認められない。下流側については、現行のミラーでは全く変色も見られず、取付け時の状態をほぼ維持しているように見える。ただし、現行のミ

ラーが、従来に比べ顕著に長く使用に耐えてきた原因については、まだ詳細な分析を行っていない。

6. まとめ

2009 年度の LEBRA における FEL と PXR の日本大学学内共同利用は、加速器等に深刻な故障がなく約 2000 時間の運転が実施され、1700 時間以上のビーム利用が行われた。老朽化したクライストロン冷却系の更新が行われ、精密温調並みの $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ の冷却水温度安定度を達成した。リニアック入射部 RF 立体回路系に用いていた加圧導波管部分を真空仕様に更新し、頻発していた導波管フランジでの放電がなくなりビーム加速の安定度向上が図られた。FEL は非線形素子を用いた高調波発生システムが整備され、可視光領域での利用実験が進められている。PXR では最大エネルギー 34keV までエネルギー範囲が広がり、特徴的な準単色光源の利用分野の拡大が進んだ。現在、PXR 強度と特性の改善に関する実験が進行中である。

参考文献

- [1] K.Hayakawa et al., Proceedings of this meeting.
- [2] Y.Hayakawa et al., Proceedings of this meeting.
- [3] T.Sakai et al., Proc. LINAC08 (Sep. 29 - Oct. 3, 2008, Victoria, Canada) 331.