

OPERATION OF LINAC AND LIGHT SOURCES AT NIHON UNIVERSITY*

Toshinari Tanaka^{1,A)}, Isamu Sato^{A)}, Ken Hayakawa^{A)}, Yasushi Hayakawa^{A)}, Takao Kuwada^{A)}, Takeshi Sakai^{A)},
Kyoko Nogami^{A)}, Keisuke Nakao^{A)}, Manabu Inagaki^{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 125MeV electron linac at LEBRA in Nihon University has been operated without serious trouble in these 3 years of user's experiments using the free-electron lasers (FEL) and the parametric x-rays (PXR). The total beam acceleration time of the linac for the last year was about 1500hr, which has been increasing every year. The stability of the electron beam energy was improved by precise control of the linac cooling water temperature. The maximum FEL power of 60mJ/pulse was obtained at a wavelength of 1750nm. Damage to the FEL resonator mirrors due to high FEL power, especially around the fringe of the coupling-hole in the out-coupling mirror, is still a serious problem to be solved. The LEBRA PXR has been proved to have a rather high spatial coherence. As a probable application of PXR, the phase contrast imaging technique has been examined for soft and light materials.

日大リニアックと光源の利用状況

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA) では、2000～2004年度の文部科学省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」により125MeV電子リニアックを用いた赤外自由電子レーザー (FEL) とパラメトリックX線 (PXR) の二つの光源の整備が行われ、2003年から学内共同利用が開始された。学術フロンティアは2005～2007年度の3年間の継続が認められ、継続して共同利用が進められている。この間ビーム利用時間は年々増加しつつある。共同利用の開始に到るまでは、クライストロンの長パルス運転とリニアックの安定度向上が大きな課題であったが、主要な不安定要因が克服され^{[1][2]}、この3年間は深刻な障害を生じることなくほぼ定常的に運転されてきた。

これまでの利用研究の結果からFEL、PXRともに高度な利用のためには光源の安定度が不十分であることが明らかとなってきた。光源の安定度は加速電子ビームの品質に強く依存している。このため定常運転を行いながらリニアックの挙動を記録し、細部の不安定要因の特定とその克服のための試みや検討が行われてきたが、十分な結果が得られていないのが現状である。

2005年7月から1年間の共同利用におけるリニアックの運転時間は、クライストロン通電時間が約2000時間、ビーム加速時間が約1500時間である。また1996年のリニアック設置以来、クライストロン高圧

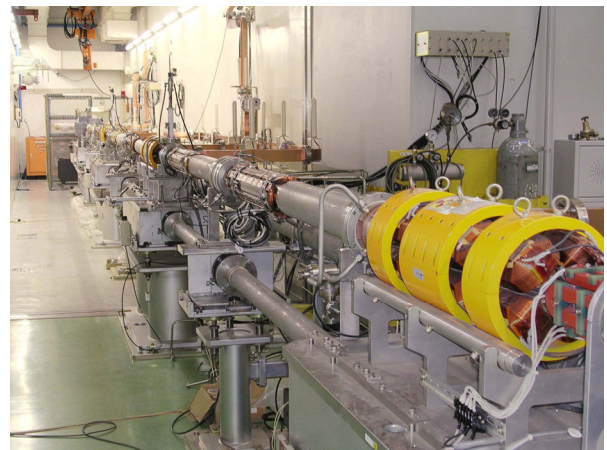


図1. 日大125MeV電子リニアック。

印加時間は2006年になって1万時間を越えた。

この1年間のリニアックの運転・改良と光源の現状及び利用状況等について以下に報告する。

2. リニアック安定化とその現状

日大リニアック (図1) はこれまでビーム安定化と性能向上のためにクライストロン電源をはじめ様々な改善が行われてきたが、FELとPXRの利用において要求される安定度に十分対応できる状態には到っていない^[3]。リニアックの途中とビーム輸送系

* 文部科学省学術フロンティア推進事業 (継続) (平成17～19年度)

¹ E-mail: tanaka@lebra.nihon-u.ac.jp

には、利用中のビーム軌道をモニターするためビームポジションモニター (BPM) を多数配置しており、BPMで長時間にわたり軌道変化を観測した結果、FEL発振強度とPXR強度の変動がリニアック中でのビーム軌道の変動と加速ビームエネルギーの変動に強く依存していることが明らかになっている。

電子ビームエネルギーの変動は15~20分程度の明らかな周期性を持っていたため、冷却系との関係を調べたところ、加速管冷却用精密温調機の冷却水温度変化と強い相関が見られた。このため、冷却水温度の安定化を図ることとした。

精密温調器は加速管冷却水を $30 \pm 0.1^\circ\text{C}$ の安定度で一定温度に保っているが、精密温調器で熱交換を行う冷凍機冷水温度が冷凍機のコンプレッサの動作により $\pm 1^\circ\text{C}$ 変化しているために、実際には冷水温度変化に同期した周期的変動を繰り返していた。これは冷水温度の急激な変化に精密温調器が追従し切れないために、冷水温度変化が加速管冷却水温度に反映してしまうためと考えられた。

加速器冷却系は、装置の老朽化に伴う更新工事を2005年3月から始めており、この中で冷却水温度の安定度改善を図ることとした。従来は冷凍機からの冷水を直接精密温調器との間で循環させていた。このままでは冷水温度変化が急激なもので、これを緩やかにし精密温調器の動作を改善するため、冷水循環系の中に精密温調器からの帰還水の一部を冷凍機を通さずに循環させるよう、途中に三方弁を取り付けた。冷凍機リザーバタンク内の冷水は約 20°C であるが、精密温調器との間の循環冷水温度は 25°C まで上昇させている。この結果、冷水の温度変化を緩やかにすることが出来、図2のように加速管冷却水の温度変化も短時間では $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 以内に抑制され冷水温度変化の顕著な影響は見られなくなった。

また、モジュレーター室内の温度変化が $25 \pm 2^\circ\text{C}$ と変化の幅が大きくRF系に影響を及ぼしていたため、空調機温度モニター動作の改善を行い、変化を $\pm 0.5^\circ\text{C}$ まで抑制することが出来た。

これらの改善により、周期的に生じていたビームエネルギー変動は目立たなくなり、FEL発振とPXRの強度の安定度が改善された。しかし冷却水温度の安定化はまだ改善の余地があると考えられ、今後精密温調器の更新においてリザーバタンクの大容量化などの改良によりさらに安定化を図る予定である。

さらに、リニアック動作開始後1時間以上にあたって、加速中のビーム軌道が、加速器出口で1mm程度漸近的に移動する現象が観測され、原因の調査が行われた。この現象はバンチャー直後のBPMでも観測され、それより上流に原因があると考えられた。これまでの調査で明らかなことは、これが電子銃の100kV DC高圧電源を投入してから経過時間のみ依存し、図3に示すようにこのとき同時に電子銃引き出し電流が漸近的な増加を示すことである。このため、原因は未解明であるがリニアック動作開始より1時間以上前から100kVに昇圧しておくことでこの軌道変動は避けられることが分かった。

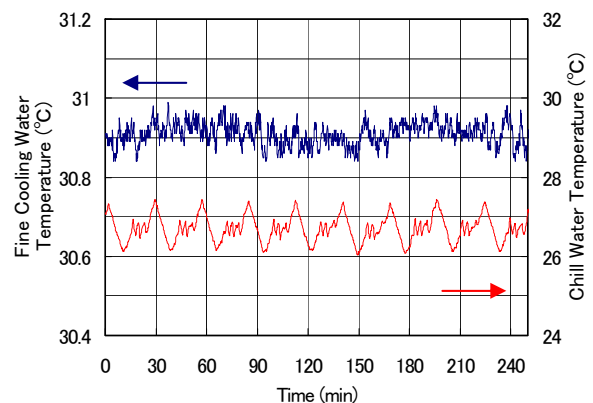


図2. 冷凍機冷水循環系に三方弁を挿入し冷水温度変化を緩やかにしたときの、冷水温度と冷却水温度の相関。

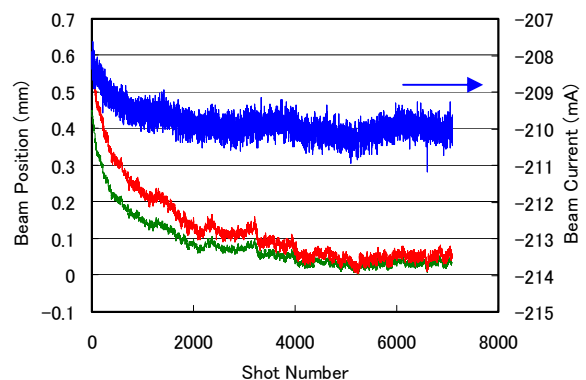


図3. 100kV電子銃高圧電源投入直後からのビーム軌道（水平及び鉛直方向）と引き出しビームのピーク電流に生じる変動。軌道はバンチャー直後のBPMで、電流は電子銃直後のCTで測定。

また、より詳細なビーム安定化策がFELとPXRの安定化に不可欠であると考えられ、現在リニアック内でのビーム軌道自動補正と、エネルギー分析電磁石系でのビームエネルギーモニタリングによるエネルギーフィードバック制御の試験が行われている。

3. FELの現状

LEBRAではFEL共振器用鏡として広帯域で高い反射率が得られる銀蒸着（銅基板）鏡を使用し、これまで約860nmから6750nmまでの波長範囲で発振の実績が得られている。2005年12月にはFELモニターポート位置での取出し光強度が、波長1725nmでマクロパルスエネルギー60mJと、これまでの最高値を記録した。このときの電子ビームからFELへのエネルギー変換効率はおよそ 4×10^{-4} と見積もられる。FEL発振時には同時に強い高調波アンジュレーター光が得られるため、ユーザーによってはFELの他に3次や5次の高調波光が利用されている。

銀蒸着銅基板鏡は、共同利用開始時には光強度に対する十分な耐性が期待されたが、使用中に鏡表面

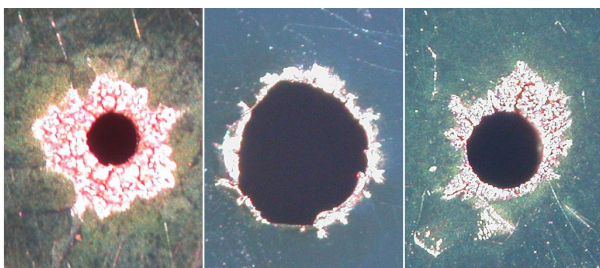


図4. 損傷した3枚のFEL共振器鏡の取出し用結合孔付近の写真。結合孔の直径は左からそれぞれ0.3mm, 0.8mm, 0.45mmである。

の損傷が進み発振強度が低下するため、これまでに3回交換されている。FELは電子ビーム上流側の鏡に開けた結合孔から取り出されているが、共通していることとして、孔のない下流側の鏡に対して上流側の鏡の損傷が大きく、図4の写真にあるように特に結合孔の周囲が激しく損傷を受けている。2006年7月の最新の鏡交換では、表面研磨精度の高いシリコン基板の銀蒸着鏡を採用したので、銅基板との耐性の違いを検証する予定である。

4. PXRの現状

LEBRAのPXRは、直径1mm以下に集束された電子ビームをSi単結晶（第1結晶）に入射し発生するX線を、第2結晶によりBragg反射を利用して分光し電子ビームに平行な方向に取り出している。したがって光源の大きさは直径1mm以下と見做すことができ、光源位置から約7m飛行した後取り出されることから、優れた単色性に加え高い空間コヒーレンスを有することが分かって来た。これらの特長を利用して、画像的手法によるXAFS測定や、位相コントラストイメージングの一種である屈折コントラストイメージングを初めとした、PXRによる生体軟組織のX線イメージングなどの応用が試みられている。現行のSi(111)面を利用したX線取り出しでは、エネルギー範囲6~20keVのX線が得られている。

図5に取り出された14keVのPXRに対し第3分光結晶を用い微小回転させて測定されたロッキング曲線の例を示す。屈折コントラストイメージングでは、試料中で僅かに特定の角度だけ屈折したX線のみを試料の下流に置かれた第3結晶でブラッグ反射させて捕らえることで透過画像を得る。高分解能で屈折コントラスト画像を得るには、照射中にX線の入射角を10 μ rad程度以下の誤差で一定に保つ必要がある。この場合、電子ビー

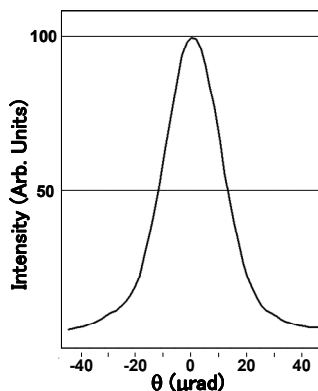


図5. 第3分光結晶回転による14keV X線のロッキング曲線の測定例。

ム軌道の変動は0.1mm程度しか許されないが、取得される透過画像の質と電子ビームの安定度との関係は今後の検討課題である。

また、PXR発生装置内のSi単結晶は電子ビーム照射による発熱を考慮し、銅製のSi固定治具を電磁石系の精密温調器で水冷しているが、高圧水流により薄いSi結晶板に振動が生じてPXRの特性を損ねている可能性があり、流量を減少させ振動を抑制するための改良を検討中である。

5. 共同利用状況およびまとめ

2005年7月以来1年間のクライストロン通電時間は約2000時間、ビーム利用時間は1500時間を越え、電子リニアックの利用時間は年々増加する傾向にある。リニアックを用いた光源として1~6 μ mの赤外FELと、6~20keVのPXRが共同利用実験に提供され、これらの利用促進のため行われている光源研究と加速器性能向上のためのマシンスタディを含めて2005年度の総利用件数は147件である。その内訳を図6に示す。FELは共振器鏡に問題があるが、十分な耐性が得られればさらに大きな光強度とエネルギー変換効率が期待でき、ユーザーからの大強度光の要求もある。

従来日本大学には正式な共同利用の受け入れ等の規定が存在しないが、LEBRAでは利用の増加への対応と学内のみならず学外からの利用希望に応じる必要から、全国共同利用にも対応できる体制の確立が必要となりつつある。

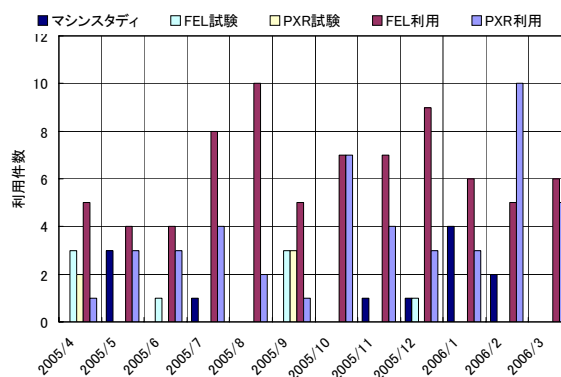


図6. 2005年度のリニアック利用件数の推移と内訳。総利用件数は147件である。

参考文献

- [1] 境武志他, Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan (Jul. 30-Aug 1, 2003, Tokai) 351.
- [2] 早川建他, Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan (Jul. 30-Aug 1, 2003, Tokai) 90.
- [3] 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.