

## STATUS OF ELECTRON LINAC AND LIGHT SOURCES AT LEBRA IN NIHON UNIVERSITY

Toshinari Tanaka<sup>1,A)</sup>, Ken Hayakawa<sup>A)</sup>, Yasushi Hayakawa<sup>A)</sup>, Yumiko Takahashi<sup>A)</sup>, Takao Kuwada<sup>A)</sup>, Takeshi Sakai<sup>\*A)</sup>, Kyoko Nogami<sup>A)</sup>, Keisuke Nakao<sup>A)</sup>, Manabu Inagaki<sup>A)</sup>, Isamu Sato<sup>B)</sup>, Atsushi Enomoto<sup>C)</sup>, Shigeki Fukuda<sup>C)</sup>, Satoshi Ohsawa<sup>C)</sup>, Kazuro Furukawa<sup>C)</sup>, Shinichiro Michizono<sup>C)</sup>, Kimichika Tsuchiya<sup>C)</sup>, Soichi Wakatsuki<sup>D)</sup>, Shigeru Yamamoto<sup>D)</sup>

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

<sup>B)</sup>Advanced Research Institute for the Sciences and Humanities (ARISH), Nihon University  
12-5 Goban-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-8251

<sup>C)</sup>Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>D)</sup>Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

### Abstract

The 125-MeV electron linac at the Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) has been operated about 2000 hr a year for a variety of users' experiments conducted using near-infrared free-electron laser (FEL) and parametric X-ray (PXR). Combination of the fundamental infrared FEL with BBO non-linear optical crystals yielded the higher harmonics with good conversion efficiencies, which has extended the available wavelength range as short as 400 nm. The latest work on the PXR generation using a Si(220) target crystal demonstrated the highest energy of approximately 33.2 keV with sufficient intensity for application. Improvement in the temperature control of the accelerator cooling water system has contributed greatly to stabilization of the electron beam and the light sources. However, there still remain other minor but non-negligible factors causing fluctuation in the properties of the light sources, especially of the PXR beam when used for experiments of diffraction enhanced imaging.

## 日大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) では2003年度後半の学内共同利用開始以後、近赤外自由電子レーザー (FEL) とパラメトリックX線 (PXR) の発生とその供給を主要な目的として125MeV電子線形加速器を年間約2000時間運転してきた。これと平行して加速器の安定動作と光源の性能向上を図るため、加速RF位相安定度の改善、冷却系の改善による温度安定度の向上や振動の影響の除去などに取組み、さらに光源の高度利用のための研究を行ってきた。

以下において、この1年間の加速器と光源の運用状況について詳述する。

### 2. 加速器の動作状況

図1に2008年7月から2009年6月までの1年間の加速器運転状況を示す。2008年度は学術フロンティア推進事業の終了により共同利用の規模が一旦縮小した

ことと、2008年6月に発生したクライストロン1号機の故障による利用停止でビーム利用時間が約500時

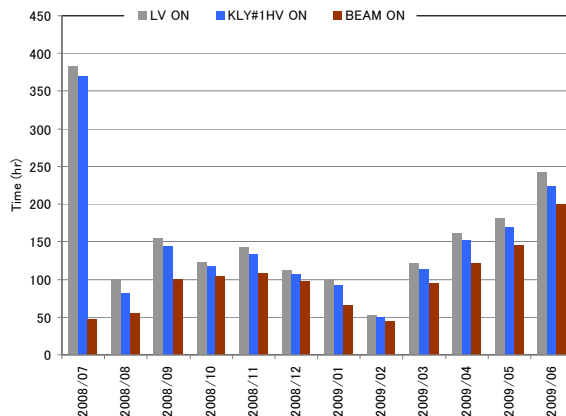


図1. 2008年7月から2009年6月までのLEBRA 125MeV電子線形加速器の稼働状況。各月の左から順にクライストロン・ヒーター通電時間、1号機高圧印加時間、ビーム加速時間を示す。2008年7月の通電時間の大部分はPV3040Nクライストロンのエイジングに費やした。

<sup>1</sup> E-mail: tanaka@lebra.nihon-u.ac.jp

\* Present Address: Accelerator Laboratory, KEK

間減少した<sup>[1]</sup>。しかしクライストロンの故障からは順調に回復し、更新後のPV3040NクライストロンはRF出力パルス幅20 $\mu$ s、ピーク出力電力20MW、繰り返し5Hzでの動作も安定であり、その後の電子ビーム供給に関しては共同利用に大きく影響せずに済んだ。2009年度は再び共同利用の申請が増加しているため、工事等による加速器停止期間を1ヶ月程度見込んでも以前の運転時間に達すると予想される。

## 2.1 加速器冷却系

2007年度までの加速器冷却系の性能改善により、送り出し側での冷却水温度がクライストロン系冷却用の粗温調冷却系では30 $\pm$ 0.05 $^{\circ}$ C、加速管・電磁石系精密温調冷却系では30 $\pm$ 0.01 $^{\circ}$ Cの安定度を達成した<sup>[2]</sup>。これにより加速ビームの安定性が向上し、以前には冷却水温変化に伴い明らかに存在した10数分周期のビーム変動が目立たなくなり、FELの発振強度に関しては $\pm$ 10%程度のパルス間変動があるものの加速器自体は無調整のままでも数時間は強度が維持されるまで安定化された。これは加速器オペレータへの負担の面で大きな改善と言える。

粗温調冷却装置は熱交換器が老朽化して穿孔が発生していることから、2009年度中に更新する予定である。現状ではクライストロン側の負荷が一定の場合、粗温調冷却装置へ戻りリザーバタンク出口に達した冷却水の水温は、タンク内での攪拌効果により $\pm$ 0.02 $^{\circ}$ C以内の安定度が確実に得られている。従って、更新の際には精密温調系と同様リザーバタンクを通してからクライストロン系へ送水する配管経路に変更し、熱負荷に適合した調整能力を持った三方弁と高精度制御ユニットの採用により粗温調冷却系は30 $\pm$ 0.01 $^{\circ}$ Cの安定度を実現できると期待している。

## 2.2 クライストロン・立体回路系

LEBRAのS-バンドクライストロン2台のうち、2号機はすでに2003年1月からPV3040Nに更新しているが、現段階では1号機に比べRF窓での放電の回数が多く安定動作の面で劣っている。この放電でRF窓下流の導波管内真空度が大きく悪化すると、真空インターロックによりパルスモジュレーターのトリガー遮断や高圧電源遮断が発生する。日常的には加速器起動時に約1時間かけてRF窓のガス出しを行いながら徐々にクライストロン高圧を使用電圧まで上げることで頻繁な放電の発生は避けられているが、1日12時間程度の運転時間内でトリガー遮断または高圧電源遮断が数回発生する場合がある。電子銃での放電や特定できない原因を除くと、そのほとんどは2号機RF窓での放電が原因となっている。

立体回路系のうちレギュラー加速管への系統は全て真空仕様となっているが、バンチャー系立体回路には建設コスト削減のため1982年の試験用リニアック導入時以来の可変減衰器と移相器を含む主要部分にSF<sub>6</sub>加圧導波管を用いてきた。この系統は冷却水による温度安定化を行っていないため、モジュレーター室の室温の影響を直接受け易いこと、またSF<sub>6</sub>

はCO<sub>2</sub>に比べ地球温暖化係数が極めて大きいガスであることを初め種々の問題があることから、数年がかりで真空仕様への更新を準備してきた。漸く部品が揃ったため、2009年度内に全ての立体回路系が真空仕様となる予定である。

2009年3月に2号機パルスモジュレーターが電源投入後10数分程度の短時間でOFFとなる問題が発生した。これはモジュレーターのインターロックモジュール内で、本来使用していない入力端子からのインターロック信号を受けるリレーの接点動作不良が原因だったと考えられ、リレーの交換により解決した。しかし、現行のインターロックモジュールのロジックでは潜在的にリレーの誤動作により起こり得る問題であることから、今後対策を検討する必要がある。

## 2.3 加速器本体

電子銃ターミナルのDC-100kV高圧電源が2008年8月に高圧出力が得られなくなり、予備の電源に更新した。ただし、更新後の電源は最高出力電圧が120kVであるため最高値を100kVに制限する必要があり、電源のリモート制御回路から与えるリファレンス信号レベルの修正を行った。

電子銃のEIMAC Y646Bカソードアセンブリは2007年1月に更新して以来、2年半に渡り使用を続けている。この間カソードヒーターはほとんど使用時と同じ状態に保たれてきたが、従来の同製品カソードでは使用期間が1年程度であったのに比べ、非常に長く使っている。また交換前のカソードアセンブリでは、バンチャーからの後進ビームによるカソードまたはグリッドのバックボンバードメントによる考えられるパルス内でのエミッションの変化が観測されていたが、現在使用中のカソードアセンブリでは後進ビーム自体は検出されているにもかかわらずその影響はエミッションに現れていないように見える<sup>[3]</sup>。

電子銃部分のイオンポンプ真空度の変化から、電子銃での放電が時々起きていることが分かっている。そのうち明瞭なエミッション変化を伴う放電は1日数回起きており、長時間安定なビームを必要とする利用では深刻な問題となるが、現段階では対策は未検討である。

FEL利用ビームラインにおいてFEL発振の長時間安定度が低下しビーム軌道変動が疑われ、その原因としてビーム輸送系電磁石の電源のうち、90 $^{\circ}$ 偏向系の四極電磁石電源に $\pm$ 1.2mA以内という安定度の仕様を1桁以上超える長時間変動が見つかった。回路の点検で配線不良が見つかり、リファレンス信号に問題が生じていたと考えられる。その後の計測では長時間にわたり仕様内に納まるようになり、ビームの安定度が向上した。

## 3. FELの現状

2008年1月のFEL共振器ミラー更新以来、特に利用に支障を来すような発振強度の顕著な低下は示し

ていない。ミラーは従来と同じ米国社製のCu基板Ag蒸着ミラーで、使用開始から1年以上経過しても、波長2μm台ではFEL輸送途中のモニターによる計測で最大約30J/macropulseの強度が得られている。これは従来3ヶ月から半年でミラーの損傷のため初期の発振強度から大きく低下し発振自体が難しくなっていた状況とは明らかに異なっている。

従来のミラーは曲率半径4.2mまたは4mのものであったが、現状のミラーは3.7mでレーリ長が短く、ミラー面上での光断面積が4mに比べても1.37倍と若干大きくなっていることに加え、反射率が若干低下し始め且つ光断面積も小さくなる1μm付近での発振を避けていることで、ミラー表面の損傷が緩和されている可能性がある<sup>[4]</sup>。

FELの利用では発振波長1μm以上の基本波の利用に加え、可視から紫外領域の要求が共同利用開始当初からあり、3次高調波の利用で対応していた。基本波FELの発振最短波長は1μm以下を実現できたものの、安定かつ大強度で発振できる波長領域は概ね1.3μm以上で、3次高調波の利用可能な最短波長は約450nmであり、基本波より4桁程度低い光強度しか得られなかった。このため非線形結晶に基本波を入射し波長変換方式による高調波発生を試み、2008年からその利用を開始した<sup>[5]</sup>。

非線形結晶(β-BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、BBO)を用いた波長変換ではBBO1段で2次、またはBBO2段で4次の高調波を発生させ、約400nmまでの光が利用可能となっている。変換効率には図2に示すように周期的な波長依存性が見られるが、2次で最大20~30%、4次でも最大10%あり、FELの高調波利用に比べ3桁程度強い光が得られるため明らかな優位性を持っている。

2003年以来FELを共同利用に提供しながら、発振条件の環境温度との関係を記録してきた結果、季節の繰り返しにより加速器本体室床コンクリートの温度が年間±1~2°Cの変化を示し、これとFEL共振器

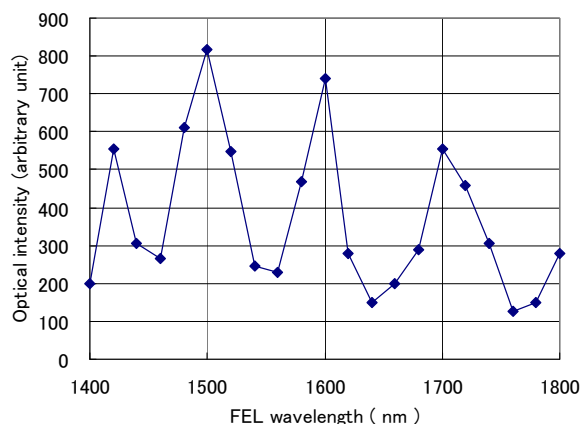


図2. BBOを用いた基本波FELからの第2高調波発生効率の波長依存性測定結果。入射FELパワーを一定値に規格化した時の相対出力強度を示す。

長に対してモーターとピエゾ素子により行った調整量との相関を求めたところ、概ね-60~100μm/°Cの調整を行ってきたことが分かった。これを、共振器長6.7mにわたる床の伸縮に起因するとして膨張率を求めると9~15×10<sup>-6</sup>/°Cとなり、コンクリートと鉄の線膨張率に良く一致する。

また、最近では24時間を超えるFELビームラインの利用が多くなったことから、その間に長時間運転におけるFEL発振の振る舞いを調べている。発振強度に関しては、これまでの加速器安定度向上の結果、前述したクライストロンRF窓や電子銃の放電という突発現象によりビーム加速が途絶えることがない時には、FEL発振開始から数時間以内にはその後少なくとも5時間以上ビーム調整の必要が全くないほど電子ビームが十分安定になっていることが分かった。このとき、発振強度を維持するために行った操作は、ほとんどピエゾ素子による共振器長の調整のみであった。

この場合にも加速器本体室床コンクリートの温度と共振器長調整量との相関をとると、加速器運転開始後床の温度は24時間以上にわたりほぼ直線的に上がり続け、最初の数時間は共振器長の調整量が大きかったが、その後は概ね33μm/°Cの直線的な関係となった。この値は年間を通した床温度変化と共振器長調整量との関係よりも明らかに小さいが、最近の相関を見ると数値が低くなってきていることから、この違い及び他の要因との相関を検討するには、さらにデータの蓄積が必要である。

#### 4. PXRの現状

PXRは2004年の共同利用開始以来、標的結晶としてSi(111)を使用して発生させ、X線エネルギー範囲5~20keVの単色X線を供給してきた。このエネルギー範囲のX線は軽元素物質中でも比較的屈折が大きいいため、吸収コントラストとともに屈折コントラストによるX線透過画像を得やすいという利点があり、LEBRAにおいても回折強調画像取得に関する研究を精力的に進めている<sup>[6]</sup>。また、線幅が狭く水平方向に直線的な分散を持つLEBRAのPXRの特性を生かして波長分散型XAFSへの応用も試みられている<sup>[7]</sup>。一方、生物試料、特に動物の骨などCaを多く含む生体組織の透過画像を得るにはエネルギーが低すぎて試料に対する制限が厳しく、また将来的に100MeV程度の電子線加速器により発生したPXRの医療を初めとした広範囲な分野への利用開拓を考えると、さらに高エネルギーの単色X線発生が求められるのは必至である<sup>[8]</sup>。このため、LEBRAでは従来のSi(111)結晶に加え、Si(220)結晶の使用によりPXRの高エネルギー化を実現し、既に利用研究に提供している<sup>[9]</sup>。図3に試験的に行った撮像の例を示す。

当初、Si(220)結晶の使用は発生X線強度が低下す

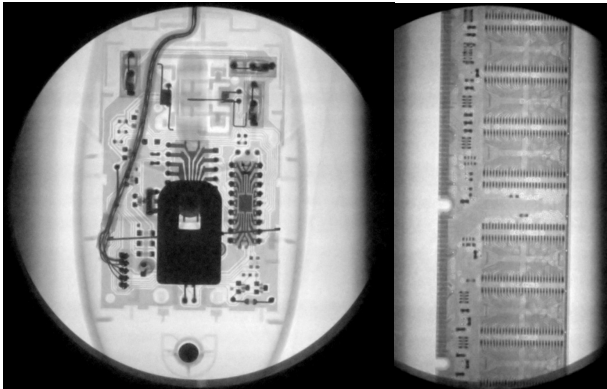


図3. PXR高エネルギー化による、25.5keV撮像5分のマウスデバイス（左）と33keV撮像7分のメモリーモジュールの例。

ることと、X線回折幅が狭くなるためPXR発生装置の制御を初めとして実験が難しくなる懸念があったが、実際にはSi(111)結晶による発生と比べても遜色ない強度と制御性が得られることが分かった。これは電子ビームの高い安定度とPXR発生装置が十分な高精度で結晶を制御できていることによると考えられる。Si(220)の使用でLEBRAの発生装置から得られるX線エネルギー範囲はおおよそ6~33keVとなる。

回折強調型屈折コントラスト画像を取得する際には、試料中で10 $\mu$ rad程度の一定角度だけ屈折したX線のみを、その下流に置いた第3結晶を用いて回折させ検出するため、画像の質を大きく左右する電子ビームを初めとした実験装置全体の長時間にわたる高い安定度が特に重要である。LEBRAではそれを如何に実現するかを模索している段階である。その一環として、Si(111)で17.5keVのPXRを発生させ、20時間以上にわたり第3結晶におけるロッキング曲線を繰り返し測定することで、PXRの長時間運転における変化とその傾向を調べた。結果を図4に示す。黒丸はロッキング曲線のピーク角度、茶色の四角はピーク強度を示す。時間の経過とともに全体としてPXR強度が安定化し、ロッキング曲線のピーク角度の変動も小さくなる傾向が示されたが、十分な安定

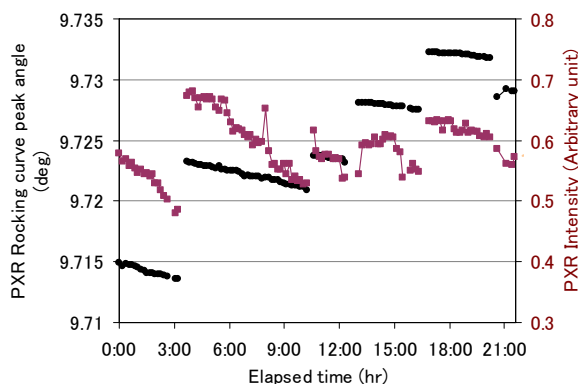


図4. 第3結晶におけるロッキング曲線の振る舞いに基づく、PXRの長時間にわたる変動の測定。

度に達するには24時間以上を要することが推測される。今回の測定で得られた限りでは、ロッキング曲線のピーク角度の変化は最大でも6 $\mu$ rad/hr程度であるが、このピーク角度変化を生ずる直接の原因は必ずしも明確ではない。これらの変動の原因としては、標的結晶の発熱による歪みとゴニオなど架台への影響、電子ビームの入射角度の変化、PXR発生装置全体の歪み、さらには第3結晶架台の歪み、建て屋の伸縮・歪みなどの可能性があり、多くの変動要因が複雑に影響していると考えられる。電子ビームとの関連では、現在90°偏向電磁石系の電磁石電源の長時間変動、及び電子ビーム軌道変動との関連の有無を調べるため、データを蓄積している。しかし基本的には電子ビーム照射による第1結晶の発熱が大きく寄与していると考えられるが、詳細な分析は今後の課題である。

## 5. まとめ

電子線形加速器冷却系の温度安定度改善により電子ビームが非常に安定になった。これにより、長時間運転におけるFELとPXRの変動を起こす他の要因を探る新たな段階に到達し、現在様々なデータを蓄積している。光源開発では、FELは非線形結晶による波長変換で約400nmまで、またPXRではSi(220)結晶を使うと最大エネルギー約33keVまでの単色X線を、それぞれ共同利用に供給出来るようになった。

## 参考文献

- [1] T.Tanaka, et al., Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan (Aug. 6-8, 2008 Higashihiroshima, Japan) 46.
- [2] T.Sakai, et al., Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan (Aug. 6-8, 2008 Higashihiroshima, Japan) 815.
- [3] 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, Japan) 694.
- [4] H.Kogelnik and T.Li, Applied Optics 5 (1966) 1550.
- [5] K.Hayakawa, et al., Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan (Aug. 6-8, 2008 Higashihiroshima, Japan) 803.
- [6] Y.Takahashi, et al., Adv. X-ray Chem. Anal. Japan (2009) 269.
- [7] M.Inagaki, et al., Proceedings of this meeting.
- [8] I.Sato, et al., Proceedings of this meeting.
- [9] Y.Hayakawa, et al., Proceedings of this meeting.