

## STATUS OF LABORATORY FOR ELECTRON BEAM RESEARCH AND APPLICATION AT NIHON UNIVERSITY\*

Toshinari Tanaka<sup>1,A)</sup>, Ken Hayakawa<sup>A)</sup>, Yasushi Hayakawa<sup>A)</sup>, Yumiko Takahashi<sup>A)</sup>, Kyoko Nogami<sup>A)</sup>,  
Keisuke Nakao<sup>A)</sup>, Isamu Sato<sup>B)</sup>, Takao Kuwada<sup>B)</sup>, Takeshi Sakai<sup>B)</sup>, Manabu Inagaki<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>

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

B) Advanced Research Institute for the Sciences and Humanities, Nihon University  
7-24-1 Narashinodai, Funabashi, Chiba, 274-8501

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

### Abstract

The beam-on time of the 125 MeV linac at Nihon University exceeded 1800 hr in the last 12 months, most of which dedicated to the user experiments. The linac cooling water temperature has been controlled to  $30 \pm 0.01$  °C by the improvement of the fine cooling water system, which resulted in more stable operation of the linac. Fluctuation of the parametric X-ray intensity at the output port has been suppressed to  $\pm 2$  % by reducing the vibration of the Si target crystal.

## 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電子リニアックを用いた自由電子レーザー (FEL) とパラメトリックX線 (PXR) の発生及びそれらの学内共同利用という電子線の高度利用を、文部科学省の学術フロンティア推進事業の支援を受けて進めている。共同利用に着手したのは2003年であるが、加速器の性能向上と利用研究の開拓が進み、年間のビーム利用時間は着実に伸びてきた。

この1年間 (2006年7月~2007年6月) クライストロン通電時間は2300時間を超え、ビーム加速時間は1800時間を超えた。これらは昨年に比べ約300時間上回っており、特にPXRを利用した実験へのビーム提供時間が増加したことが大きく寄与している<sup>[1]</sup>。

この間、加速器運転と並行して冷却装置の更新などにより加速器動作と光源の安定度向上を図り、各部において生じた故障などの問題に取り組んできたので、加速器運転状況とともに報告する。

### 2. 運転時間の推移とクライストロン動作

共同利用開始以来の年間加速器運転時間を表1に示す。電子リニアックはクライストロン2本でRFを供給している。クライストロン2号機は2003年1月にそれまでのPV3030A1からPV3040N (日大仕様のPV3030A3) に換えたが、1号機は2000年4月から交換せず使用しているPV3030A1である。パルス幅

20 $\mu$ sのRFをピーク約20MW出力で使用しているが、1本のクライストロンを長パルス動作でこれほど長期間使用し続けていられるのは、パルス繰り返し数がほとんどの運転で2Hzと低いこともあるが、真空仕様の導波管をクライストロン出力窓のすぐ下流で排気し、窓の放電によるガス放出から迅速に真空を回復するよう改良したことが大きく寄与している。

表1. 年間加速器運転時間の推移

Fiscal Year	LV ON (hr)	#1 HV		#2 HV	
		ON (hr)	ON (hr)	ON (hr)	BEAM ON (hr)
2003	2406	1589	1894	853	
2004	1830	1354	1350	1082	
2005	1763	1529	1510	1326	
2006	2343	2153	2153	1791	
2007	605	568	568	481	
Latest	2356	2193	2193	1856	

2003年は交換後のクライストロン2号機の状態が不安定でエージングに相当な時間を掛けたため運転時間は長い、共同利用開始が遅れたためビーム利用時間は短かった。その後、本格的に共同利用が進められ、多くのマシンタイムがビーム利用に使われるようになった。これに伴いビーム利用時間が年々長くなっていることが表に示されている。2007年度

\*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)

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

は3ヶ月のみであるが、最近1年間の運転時間に匹敵するペースで運転している。

加速器は週4日、日中のみの運転を基本にしており、この1年間では年間運転日数は200日になっている。従って、長期休暇期間以外は毎週運転していることになる。最近ではPXR利用実験において長時間を要するテーマに取り組んでおり、24時間を超える連続運転を行う場合もある。この3月末には加速器の長時間運転における動作安定度の調査を兼ねて約80時間の連続運転も行っている。

クライストロン1号機はKEKで長期間使用し、すでにRF出力窓が十分エージングされた状態となっていたためか、動作は安定している。一方、2号機は日大で使用を開始したものである。2003年1月に定常運転に必要なピークRF出力20MWが得られるまでエージングを行ってからビーム加速に使用しているが、4年以上経た現在でもRF窓からのガス放出による運転中のトラブルが収束しない。特に、年末年始や連休、あるいは工事や故障によりマシンの停止が1週間程度続くと、再起動の際には2号機のRF窓からのガス放出量が多くなる。この場合、RF窓の放電によりシャットダウンを繰り返すため出力を上げられず、定常運転に入るまでエージングに1~2日を要する。通常の運転サイクルでは火曜日から金曜日まで4日間運転し3日間停止するため、週明けの運転開始時にも同様の傾向があり、30分~1時間程度かけてRF出力を徐々に上げている。

### 3. 冷却系の改良

加速器冷却装置は老朽化が進んでいたため、2005年から部分的な更新を重ねてきた。2006年3月までの工事において冷却水配管の更新、冷凍機の更新、さらに精密温調装置へ送る冷水の温度安定化を行い、加速管冷却水の送り出し温度を $30 \pm 0.05^\circ\text{C}$ まで安定化することが出来た。さらに2006年末から2007年2月にかけてパネル熱交換器を採用した精密温調装置の設置工事を行った。設置空間の制限から、全体を1カ所にまとめることが出来ず、機器分散型装置とした。

従来の精密温調装置では、加速管から戻った冷却水を一旦リザーバタンクに蓄えた後に熱交換器に通して熱除去を行い温度安定化して再び加速管に送り出す、という流路を形成していた。この方法では、熱交換器を通る際に三方弁の動作速度と精度によって冷却水温度の安定度が決まり、冷凍機からの冷水の速い温度変化が冷却水温度に伝わり易いという問題があった。そこで更新に際しては、加速管から戻った冷却水を先に熱交換器に通して温度安定化を行い、新たに製作した容量800リットルのリザーバタンクに入れてから再び加速管に送る流路に変更した。変更した現状の冷却系の概念図を図1に示す。

2006年の冷凍機冷水温度改善によって、冷水温度は15~20分周期の冷凍機ON/OFFによる変動に加え三方弁動作速度による約50秒周期の変動があり最大 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 程度の周期的変動が生じている。熱交換器出口での加速器冷却水温度も同じ周期で $30 \pm 0.05^\circ\text{C}$

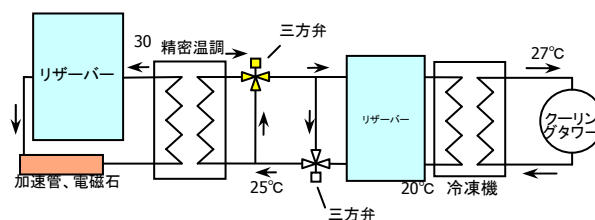


図1. 2007年に改良後の冷却系概念図。

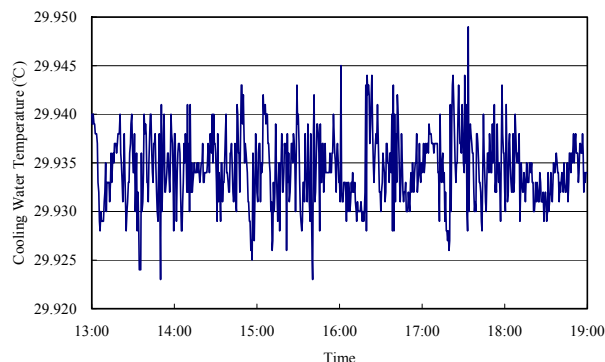


図2. 精密温調冷却装置改良後の加速管送り出し冷却水温度変化を6時間に渡って測定した結果の例。ほぼ $\pm 0.01^\circ\text{C}$ まで安定化された。

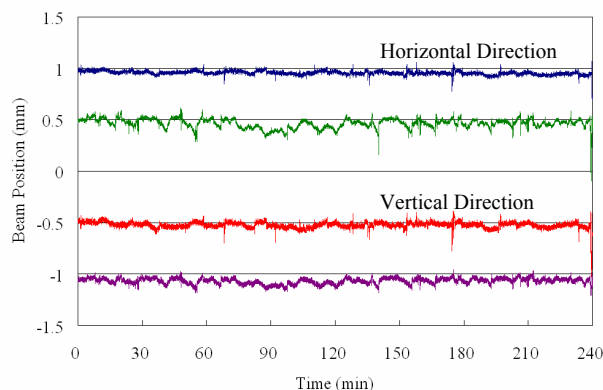


図3. 冷却水安定度改善前後のFELビームライン入口においてビーム位置モニターを用いて測定したビーム軌道変動の比較。水平、鉛直とも上側が $\pm 0.01^\circ\text{C}$ に安定度を改善後の軌道変動。

の変化がある。冷却水流量は毎分250リットルなので、容量800リットルのリザーバタンク内の冷却水が完全に入れ替わるまで3分以上かかる。そのためこの間に約4周期の温度変化を繰り返した冷却水がリザーバタンク内で混合されることになり、結果としてリザーバタンク出口の冷却水温度は平均化され、温度安定度の改善が期待されると考えられた。

実際にこの流路に改良した結果、図2に示すように加速管に送り出す冷却水温度はほぼ $\pm 0.01^\circ\text{C}$ まで安定化された。FELビームラインのアンジュレータ入口でビーム位置モニターにより水平方向と鉛直方向の軌道の変動を測定し、冷却水温度の安定度改善前後を比較した結果を図3に示す。スパイク状

の軌道変動はリニアック入射部やクライストロン窓の放電によるが、冷凍機のON/OFF動作が関連していたと考えられるビーム軌道の変動は見られなくなり、全体的にビーム軌道の安定度が若干改善されている。

PXRの出力ポートにおけるX線強度変動は、PXR発生装置の電子ビーム照射Siターゲット結晶の冷却水温度改善により小さくなったが、短時間での±10%程度の変動が残っていた。これはターゲット結晶の冷却に精密温調装置の高水圧冷却水を供給していたためウォーターハンマーによる振動の影響が疑われていた。そこで、PCのCPU水冷クーラーを応用した低水圧冷却装置を組み込んで振動抑制効果を試した。PXR出力ポートに置いた電離箱で測定した結果では図4のようにそれまでの±10%から±2%程度まで変動幅が小さくなった。CPUクーラーでは温度安定化を行う構造にはなっていないため、精密温調装置のリザーバタンクを循環する低水圧流路を新たに1系統作りターゲット冷却専用にする予定である。

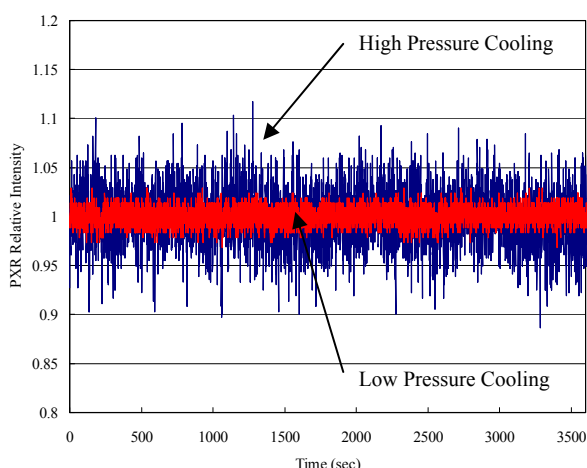


図4. PXRのSiターゲット結晶冷却を精密温調装置の高水圧系からPCのCPUクーラーを用いた低水圧系に変更したことによるPXR強度の安定化。PXR出力ポートにおいて電離箱で測定。

#### 4. 電子銃における放電

2006年11月から電子銃碍子の内側で大きな放電が頻発するようになった。この放電が起きるとその後ビーム電流値が安定するまで時間がかかり、エネルギー変動によるビーム不安定化を招いたため利用実験に支障を来す状況になった。変動しセラミクス碍子の耐圧低下が疑われ、2007年1月に碍子の交換とアノード電極の確認を行った。電子銃碍子は9年間使い続け一度も交換していなかったため、図5の写真に見られるように内壁は黄色く変色が進んでいた。また、アノード電極は中心部付近がカソードから蒸散した物質でコーティングされていた上に、多数の放電痕が確認された。このため、目の細かいサンドペーパーでアノード電極表面を磨きコーティングを



図5. 電子銃セラミクス碍子の写真。左は放電の頻発で取り外した直後のもので、セラミクス内面が黄色く変色している。右は代わりに取り付けた予備の碍子。

除去した。交換した碍子は内壁から放出するガス量が多いためか、電子銃の真空度が以前に比べて不安定になっているが、現状ではビーム安定度を大きく損なうほど深刻ではない。

#### 5. FEL共振器と光輸送ラインの変動

FEL共振器にSi基板銀蒸着ミラーを試した結果、耐久性が低いことが判明し、結局銅基板銀蒸着ミラーに戻した。現在は従来と異なるメーカーの銅基板銀蒸着ミラーを使っている。耐久性については今後使用時間を蓄積して判断する必要があるが、明確に従来品より劣る兆候を示す出力の差は見られない。

2006年以来FEL光輸送ラインで、途中の真空チェンバー内の平面ミラーの向きがずれ、実験室にFELが届かず実験が出来ない問題が数回発生した。ミラー固定構造とアライメント用微調整構造に問題があることが判明し、今後改良の必要がある。

#### 6. まとめ

この1年間でリニアック電子ビームの共同利用時間は1800時間を超え、今後も増加が予想される。加速器と利用光源の安定化により高度な利用に対応するため冷却系の改良を行い、加速管冷却水温度をほぼ±0.01℃まで安定化し、またPXR出力の安定化を実現した。FEL共振器ミラーはまだ十分耐久性の高いものが得られてはいない。加速器の安定度は数年前に比べ格段に向上したが、FELの安定した発振と供給を実現するにはさらに改善が必要である。

#### 参考文献

- [1] T.Tanaka et al., Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan (Sendai, Aug. 2-4, 2006) 12.