

PRECISE CONTROL OF COOLING WATER TEMPERATURE FOR LEBRA-LINAC*

Takeshi Sakai^{1,A)}, Toshinari Tanaka^{B)}, Ken Hayakawa^{B)}, Yasushi Hayakawa^{B)}, Takao Kuwada^{A)},
Yumiko Takahashi^{B)}, Keisuke Nakao^{B)}, Kyoko Nogami^{B)}, Manabu Inagaki^{A)}, Isamu Sato^{A)}

^{A)} Advanced Research Institute for the Sciences and Humanities (ARISH), Nihon University

12-5, Goban-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8251, Japan

^{B)} Institute of Quantum Science, Nihon University

7-24-1 Narashinodai, Funabashi-shi, 274-8501 Japan

Abstract

Precise experiments using FEL and PXR require a high-stability electron beam from the linac. The cooling water temperature for an accelerator tube and electromagnets has been adjusted with high precision by a refrigerator and improvement of a fine cooling system, and modify of a flow path. The linac cooling water temperature has been controlled to within $\pm 0.01^\circ\text{C}$ by adjustment and the improvement of the fine cooling water system. Fluctuation of the PXR intensity at the output port has been suppressed to $\pm 2\%$ by improvement of the cooling water system.

日本大学リニアックの冷却水温度の精密制御

1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設LEBRAでは、文部科学省学術フロンティア推進事業「可変波長高輝度単色光源の高度利用に関する研究」の支援、及びKEKとの共同研究により、125MeV電子線形加速器をベースとした自由電子レーザー(FEL: Free Electron Laser), パラメトリックX線放射(PXR: Parametric X-ray Radiation)による光源の実用化を進めてきた。現在までに、FELは $0.855\sim 6\mu\text{m}$ の範囲で連続波長可変発振を達成し、PXRにおいては $5\sim 20\text{keV}$ の連続波長可変な単色X線が得られている。現在、各光源を用いた学内共同利用実験を実施するに至っている^{[1][2]}。

現在は、PXRの優れたコヒーレンシーな特徴を利用したイメージングを中心に応用研究を行っており、これまではSPRING-8や高エネルギー加速器研究機構などの大型放射光施設以外では困難であると考えられていたX線吸収微細構造(XAFS: X-ray Absorption Fine Structure)や回折強調型イメージング(DEI: Diffraction Enhanced Imaging)の基礎研究を進めている^{[3][4][5]}。これらイメージング測定では、加速ビームの安定度、加速器側の安定度が非常に重要であり、LEBRAでは冷却系の安定化を進めている。

本稿では精密温調系の改良、調節、改良後の冷却水安定度、PXR強度の安定度に関して報告を行う。

2. LEBRAリニアックと冷却系

LEBRAリニアックの概要図を図1に示す。LEBRAでは加速器上流側と下流側で2つの精密温調をそれぞれ設置し、主に加速管、偏向電磁石などの冷却を

行っている。冷凍機からは2つの流路に分岐し、各精密温調の1次冷却水に使用している。粗温調は主にクライストロン、ダミーロードなどの冷却に使用している。2005~2006年度にかけて冷凍機配管、調節計などの更新、PXR発生用Siターゲット冷却系の低圧冷却系への移行などを行い、冷却水温度安定化からPXRの強度をある程度まで抑えることに成功したが^[6]、アナライザー結晶を用いるDEIの測定ではまだ安定度が不十分であった。

3. 精密温調系の改良と調整

3.1 旧冷却系の問題点

LEBRAの冷却系システムは、旧日本大学原子力研究所(現量子科学研究所)発足時の計画であったマイクロトロン用を流用していた。昨年度の冷凍機系の改良により冷凍機側の温度調整が細かくできるようになったが、冷凍機のコンプレッサー動作時における短時間での大きな水温変化に精密温調側の調節計がうまく追従できず、冷却系全体で見た場合、非常に不安定であった。LEBRAの冷却系流路は精密温調からはリザーバタンクを介さずダイレクトに加速管、電磁石本体へつながっているため、大きな変動が伝わり易いという欠点があった。リザーバタンクは加速管や電磁石の冷却部後に設置しており、さらにタンク容量は120Lと小さく、リザーバへ戻っても約30secで送り出されてしまっていた。そこで昨年度に冷凍機、配管等の改良を行い、冷凍機水温変動幅は広いが、短時間の大きな変動が無いゆっくりとした変化をするパラメーターを選び、

*本研究は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)の支援を受けて行った。

¹ E-mail: sakai@nihon-u.ac.jp

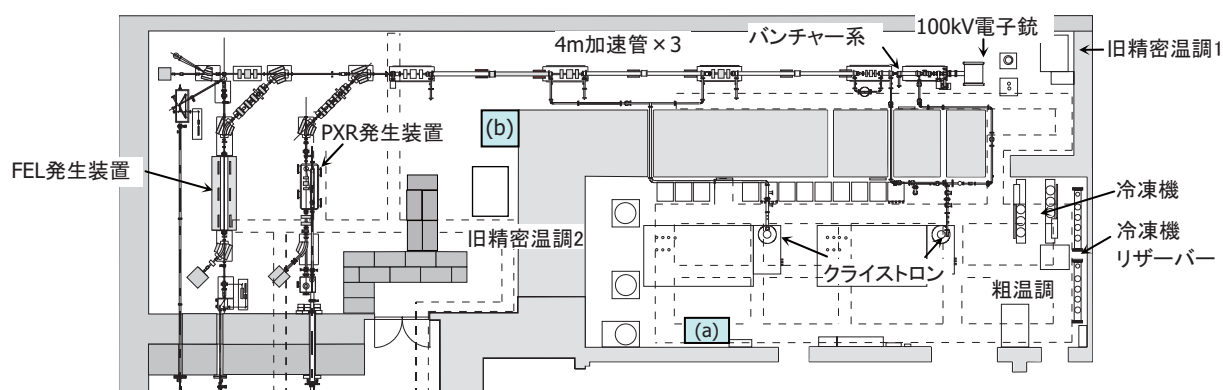


図1: LEBRAリニアック概要図。旧冷却系は2つの精密温調を用いて、上流、下流を分けて冷却。新精密温調系では、1台で全体を冷却し、設置場所の制限から加速器本体室側にリザーバータンク(b)、ポンプ、コントローラ系をクライストロンモジュレーター室(a)へと分けて設置した。

全体が安定になるように対応していた^[6]。

3.2 精密温調系の改良

3-1で述べたように、これまでの冷却系流路は冷凍機の温度変化がそのまま精密温調側へ伝わり、変動が大きくなりやすかった。これは、図2(a)に示すように冷却系配管上変動が伝わりやすい流路のためであった。そこで、昨年度は図2(b)右側のように、冷凍機から精密温調の間に三方弁を付け、冷水循環系へ精密温調側から一部を戻し、精密温調と冷凍機間の水温差を狭くするため25°Cへ上昇させ、さらに、冷凍機からは再度リザーバーを経由することで温度変化を緩やかになるよう改良していた。今年度は昨年度の調整と問題点を踏まえ、精密温調系の更新に加え、図2(b)左側に示すように精密温調から大容量リザーバーを経由して加速管等の冷却部へ送るよう流路の変更を行うことにした。

LEBRAではマシンタイムが順調に増加しており、2006年度は1800時間を越える利用実験が行われた。そのため、改良工事は利用実験に影響を与えない時間帯に行うしかなく、外で組み上げた物を中へ運び込み、現場での据付工事をできるだけ短期間に完了するようにした。また、工事完了後の移行に時間がかかる場合を想定し、他の実験に影響しないように、これまでの精密温調系を予備に残し、すぐに切替えられるよう配慮して行った。

図1に示したように、加速器本体室、モジュレーター室は狭く設置場所が制限されるため、熱交換器はコンパクトで据付面積が小さい日阪製作所製プレート式熱交換器(PHE)を採用した。この熱交換器は、電熱効率が非常によく、軽量であるため、据付工事も容易で、プレート枚数の増減で能力変更が可能であり、これまでの1台分と同程度の面積で2台分以上の能力に対応可能であった(図1(a))。タンクは設置場所の制限や、冷却水放射化を考慮し、加速器本体室へ設置した(図1(b))。場所の制限により700×700×2100mm³の非常に縦長のタンクを採用したが、水量は7倍の800Lを確保できた。熱交換器、調節計などはメンテナンス、調節のしやすさを考慮しモジュレーター室へ設置した。調節計はこれまでの使用経験などから、山武製デジタル指示調節計

SDC36を用いた。この調節計はRS485の通信機能を持っているため、LANへ変換を行い遠隔からのデータ収集、パラメーター調節を容易に行えるようにし、調節時間の短縮を図った。

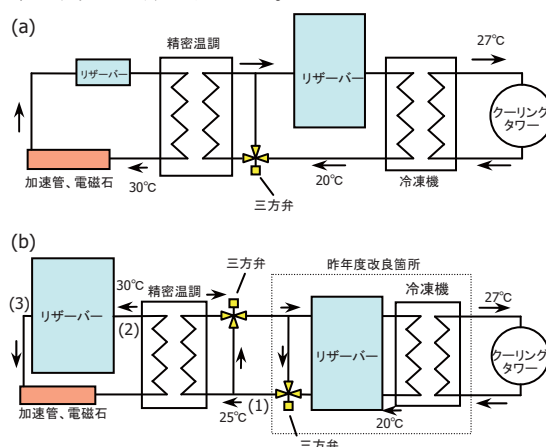


図2: 改良前後冷却系フローシート。冷水循環器系へ精密温調から一部を戻し、温度変化を緩やかにしている。精密温調からリザーバー経由の流路へ変更。

3.3 冷凍機系を含めた全体調整と安定度の比較

精密温調が早い温度変化に対応できるようになったため、冷凍機側の設定から行った。山武製の調節計にはリミットサイクル法による自動調整機能があるため、何度か自動調整を行い大まかなパラメーターを求め、調整のスタート値を決めた。温度測定には、Pt100白金測温抵抗体(3線式)を用いた。冷凍機系調整の結果、図3(1)に示すように、短時間の細かい変動があるが、全体では±0.4°C以内に抑えることができた(図2(b)(1)で測定)。冷凍機の調整を踏まえて、精密温調側の調整を行った。冷凍機の場合と同様に、温度測定にはPt100白金測温抵抗体(3線式)を用い、リミットサイクル法による自動調整で大体のパラメーターを決め、その値を目安に調整を行った。精密温調系調整の結果、図3(2)に示すように、±0.04°C以内に抑えることができた(図2(b)(2)で測定)。冷凍機、精密温調の調整の結果、加速管、偏向電磁石などへ送る直前のリザーバータンク内水温で図

3(3)に示すように、 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 以下を達成した(図2(b)(3)で測定)。温度測定には、ASL社製の高精度デジタル温度計F200を用い、測定プローブには 0°C 、 30°C 、 100°C で校正を受けたPt100白金測温抵抗体(4線式)を用いた。この結果より、冷凍機から精密温調を介して、リザーバタンクまでに徐々に温度変化を吸収し、平均化することで高精度に温度制御ができていたといえる。

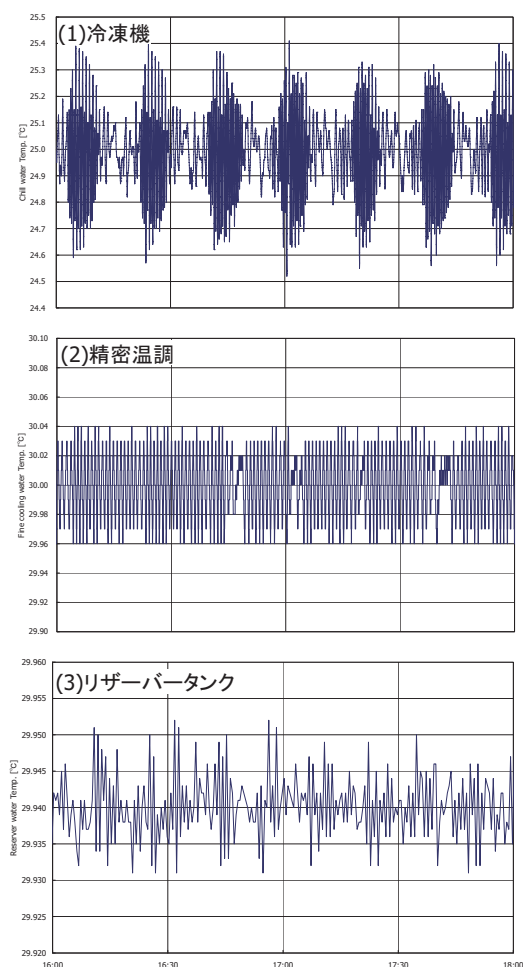


図3：(1)冷凍機、(2)精密温調調整後の温度変化と、(3)リザーバタンク内水温変化。冷凍機 $\pm 0.4^\circ\text{C}$ 以内、精密温調 $\pm 0.04^\circ\text{C}$ 以内に調整の結果、リザーバタンクで $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 以下に抑えることができた。

4. まとめと今後の課題

精密温調～冷凍機間の水温差を狭く、且つ冷水循環系の一部を戻し、精密温調～加速管・電磁石系の間に大容量のリザーバーを介すことで冷凍機からの温度変化を平均化し吸収することができ、精密温調水温度を $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 以下で高精度調整できた。

精密温調安定化の結果、加速器側の安定化から加速ビームも安定化され、図4に示すように、PXR光源強度の変動は、冷凍機、精密温調改良前の $\pm 15\%$ 、冷凍機改良後の $\pm 10\%$ に比べ、 $\pm 2\%$ 以下まで抑えることができた。また、PXRを用いたDEIによる測定では、撮影像が鮮明になり安定化による大きな効果

があった^[7]。

今後の課題としては、リザーバタンクから冷却箇所までの間の配管には断熱材を巻いているが、若干温度変化が発生している可能性がある。そこで冷却部入力直前、直後での温度モニターを行い、温度を微調整することでさらに安定化が可能かどうか検討を行う予定である。PXR発生用ターゲット結晶冷却系は、水温変動、高水圧による配管振動の影響から精密温調系から切り離し、簡易的な低压冷却装置へ置換えているが、精密温調冷却系からの流路を確保次第、再度置換える予定である。また、クライストロンや、ダミーロードの冷却には粗温調を用いているが、今回の冷却系安定化を踏まえ、粗温調を精密温調化しRF源系の水温安定化も検討中である。

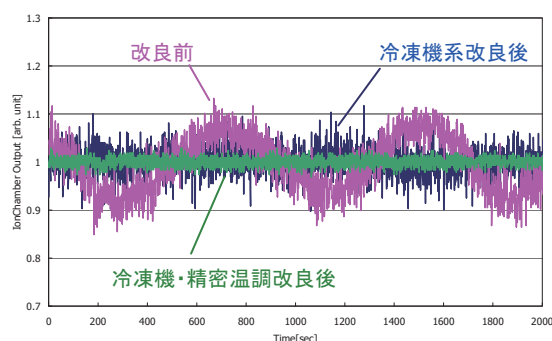


図4：精密温調改良後のPXR光源強度の比較。安定化後は変動幅を $\pm 2\%$ 以下に抑えている。

本研究は、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)「可変波長高輝度単色光源の高度利用に関する研究」の支援を受けて行った。

参考文献

- [1] T.Tanaka, et al., "日本大学電子線利用研究施設の現状", in these proceedings.
- [2] Y.Hayakawa, et al., "Tunable Monochromatic X-ray Source Based on Parametric X-ray radiation at LEBRA, nihon University", AIP Conf. Proc. 879,123(2007).
- [3] Y.Hayakawa, et al., "Status of the parametric X-ray generator at LEBRA, Nihon University" Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 252(2006) 102-110.
- [4] T.Kuwada, et al., "Phase Contrast Imaging of Biological Materials using LEBRA-PXR", AIP Conf. Proc.879,1968(2007)
- [5] M.Inagaki, "PERFORMANCE EVALUATION OF DXAFS MEASUREMENT USING PARAMETRIC X-RAY RADIATION", Proc. 31st Linear Accel. Meeting in Japan, (August 2-4, 2006, Sendai Japan), p526-528.
- [6] T.Sakai, et al., "IMPROVEMENT OF WATER COOLING SYSTEM FOR LEBRA LINAC", Proc. 31st Linear Accel. Meeting in Japan, (August 2-4, 2006, Sendai Japan), p765-767.
- [7] T.Sakai, et al., "Diffraction-Enhanced-Imaging Using Parametric X-ray Radiation Generated by Medium Size Linac", JSNDI Spring Conference 2007, (May 22-23, Tokyo, Japan), p101-104.