

東北大学電子光物理学研究センター大強度電子線形加速器の電磁石電源の更新と ビーム照射システムの改善

REPLACEMENT OF MAGNET POWER SUPPLIES FOR HIGH INTENSITY ELECTRON LINAC AND IMPROVEMENT OF BEAM IRRADIATION SYSTEM

柴田 晃太郎, 南部 健一[#], 長澤 育郎, 高橋 健, 鹿又 健, 日出 富士雄, 三浦 禎雄, 柏木 茂, 武藤 俊哉,
菊永 英寿, 濱 広幸

Kotaro Shibata, Kenichi Nanbu[#], Ikuro Nagasawa, Ken Takahashi, Ken Kanomata, Fujio Hinode, Sadao Miura,
Shigeru Kashiwagi, Toshiya Muto, Hidetoshi Kikunaga and Hiroyuki Hama
Research Center for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University

Abstract

High-intensity electron linac at ELPH has been utilizing for radioisotope (RI) production, radiochemistry, and experimental nuclear physics. This electron linac was constructed before 55 years ago, nevertheless, last year, its operating time was about 430 hours. Last year, we succeeded to transport the electron beam to a new beamline which was constructed to research a proton radius puzzle and this experiment was started. The electron linac is also used by other research groups to develop irradiation targets, so that the electron linac must continue to operate to conduct this researches. However, the electron linac has been a problem in reliability lately due to decrepit electromagnet power supplies failure and vacuum leak accident at irradiation system. Therefore, to solve these issues, the electromagnet power supply was replaced and the cooling system for the beam irradiation system was partially improved.

1. はじめに

東北大学電子光物理学研究センターの大電流電子線形加速器は、RI 製造、放射・核化学、原子核物理学の研究に使用されており、昨年度はユーザーにビームを430 時間程度供給した。加速器は建設から 55 年余り経過しているため、最新の加速器と比べると、ビーム性能や安定性などは見劣りするが、余裕のある設計から最新の加速器に勝るとも劣らない耐久性を武器に、現在もユーザーにビームを供給し続けている。昨年 9 月には、ULQ2 実験用ビームライン[1, 2]に初めてビームを通すことに成功し、新しい実験が開始されるなど、利用運転の幅が広がっている。一方、電磁石電源の老朽化に伴うトラブルやビームラインと一体化した RI 製造システムで数度にわたり、真空リーク事故が発生するなど、加速器の運転に影響が生じ、信頼性の面で課題があった。そこでこれらの課題を解決するために電磁石電源の更新と RI 製造システムの改修を行ったので、これらについて報告する。

2. 大電流電子線形加速器

1967 年に完成した大電流電子線形加速器からの大電流パルス電子ビームは、原子核物理学、物性物理学、放射化学のほか、世界初のパルス中性子回折実験[3]など幅広い分野の研究に使用されていた。数度の改修・改造を経て、現在は最大エネルギー 70 MeV の大電流電子線形加速器として運転している。現在の加速器の構成は Fig. 1 に示すように、1 m 長の S バンド進行波加速管 8 本とビームトランスポートラインで構成されている。クライストロンモジュレータや加速管、立体回路はほぼ建設当

時のものを使用しているが、ビームラインはここ数年で一新された。

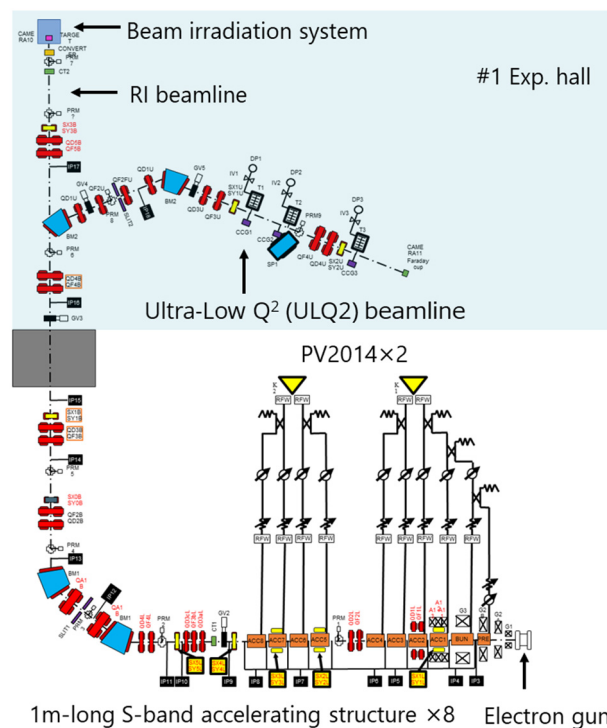


Figure 1: Schematic view of the high-intensity electron linac, and beam transport line.

[#] nanbu@lms.tohoku.co.jp

3. 電磁石電源の更新

大電流線形加速器のビーム輸送に用いている電磁石電源の殆どは設置から 25 年以上経過し、電源やその外部コントローラの故障による通信異常等のトラブルが多発し加速器調整に要する時間が増大したため、これらの問題解消に向け 2020 年度に老朽化した電磁石電源の更新を行った。更新した電源の総数は 27 台である。ULQ2 ビームライン建設時に、ビームラインの電磁石はボア径の小さなものに更新していたため、電源更新に際しては、過去 5 年間の運転パラメータを調査し、電源に要求される定格出力の最適化を図った。ステアリング電磁石電源に関しては、従来はバイポーラ電源を用いていたが、予算の制約から、ユニポーラ電源に極性切替器を併用する形式とした。極性切替器は PLC で制御している。従来は 19 インチラック 5 架に電磁石電源をマウントしていたが、電源の外部コントローラが不要になったことや電源小型化により、極性切替器を含めて 3 架に集約できた。更新後の電源ラックの写真を Fig. 2 に示す。更新した電磁石電源の制御はすべて Ethernet 経由で行われ、EPICS-CA による制御が可能な構成となっている。



Figure 2: Photograph of new power supplies for magnets.

4. ビーム照射システムの改修

4.1 ビームモニターシステムの改善

RI 製造システムには、プロファイルモニターが設置され、運転中のビーム位置確認などに使用していた。RI 製造運転を行っているときの実験室内の放射線量は、照射点から 10.4 m 離れた実験室入り口近傍でも 1 Sv/h 程度と比較的高く、ビームライン近傍にカメラを設置すると数十秒程度で機能しなくなるため、照射点とカメラを直線距離で 5.2 m 離し、その間にコンクリートの遮蔽体を 2.7 m 設けるような配置で運用していた。しかしながら RI 製造運転時のカメラの積算稼働時間が 50 時間を超えると、カメラの動作が不安定になり、CCD の損傷による白点も多くなることから、交換を余儀なくされ、その都度光軸調整などを行う必要があった。そこでカメラ交換の頻度を下げるために、線量が低い場所にカメラを移動することにした。Figure 3 にカメラの配置図を示す。スクリーンとカメラの距離が離れたことから、光学系の調整はガイドレーザーを用いて行っている。光学系の改善によりビームプロファイル測定時の空間分解能は 160 μm 程度で

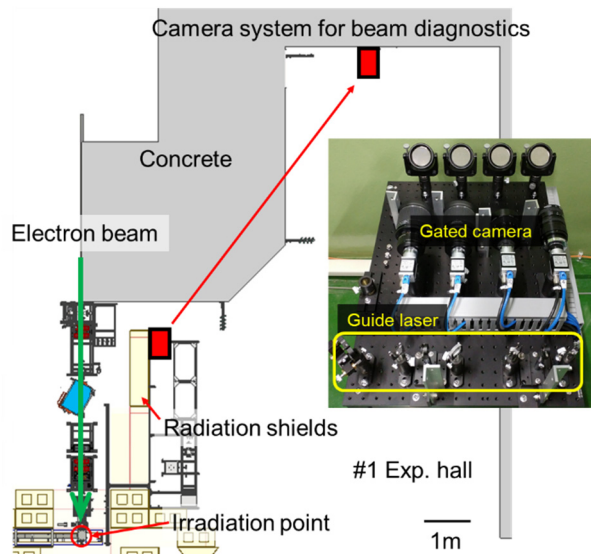


Figure 3: Layout of the camera system for beam diagnostics. The distance from the irradiation point to the camera system is 14.2 m, including 5.3 m thickness of concrete shield.

Table 1: Specification of Cooling Systems

	Helium cooling system	Convertor cooling system	Target cooling system
Thermal load [kW]	< 0.01	< 1	< 2.5
Flow rate [L/min]	50	15	10
Coolant	Helium gas	Pure water	Pure water
Main tube materials	Copper, SUS316	SUS316L, Nylon	SUS316L, Nylon, Flexible PVC
Interlock for machine protection	helium purity error, flow rate error, temperature error, pressure error, dew point error	flow rate error, water level error	flow rate error, water level error

あったものが、80 μm 程度となり、従来の約 2 倍の分解能が得られている。一方カメラを移設したことによる課題としては、実験室内の空調稼働時に、スクリーン像が揺らぎ測定精度が悪化する点が挙げられる。現在スクリーン上の基準を、ビームと同時に計測することで位置精度を確保することができるか検討している。スクリーン像の揺らぎに関しては、光学系をパイプなどで囲い、外気の影響を低減させる手法が有効と思われるが、空間的な制約が大きく、導入は困難である。高精度な撮影が必要などときのみ、スクリーンの位置に近い場所に、別のカメラを設置して撮影するなどして対応する予定である。

4.2 ビーム照射システムの冷却系の改修

ビーム照射システムは 2017 年に改修され[4]、RI 製造に利用されてきた。ビーム照射システムの冷却系は主としてチタン製のビーム取り出し窓を冷却するヘリウム冷却系、ガンマ線コンバーターを冷却するコンバーター冷却系、そしてターゲットを冷却するターゲット冷却系から構成され、RI 製造運転時に電子ビームによって発熱する部分を冷却している。ビーム取り出し窓の冷却にヘリウムを用いたのは、化学的に安定であり、ビーム取り出し窓材であるチタンと反応しないことと、熱伝導率が空気のおよそ 6 倍で熱効率が高いからである。冷却系の仕様を Table 1 に示す。

改修から 2 年ほどは、ほぼトラブル無しで運用していたが、近年、ビーム取り出し窓が破損し、たびたび真空リーク事故が発生するトラブルに見舞われた。破損したチタン製のビーム取り出し窓 (Fig. 4) の EDS 分析を行ったところ、酸素原子の存在が示唆され (Table 2)、系統内への水の混入が疑われた。ヘリウム冷却系は、純ヘリウムをフローさせてから、バルブを閉めて閉鎖系で運用している。ヘリウム冷却系は大気圧よりも高い圧力で運用しているため配管や継手からの水の混入は考えにくい。最も可能性が高いと考えたのは、コンバーター冷却系からの冷却水の混入である。コンバーター冷却系とヘリウム冷却系は O リングで気密がとられているが、コンバーター冷却系の冷却水の圧力 0.5 MPa に対して、ヘリウム冷却系の圧力は 0.05 MPa であるため、O リングが劣化し気密性能が低下すると徐々にコンバーター系冷却水がヘリウム冷却系に漏れてしまう。ヘリウム冷却系の圧力

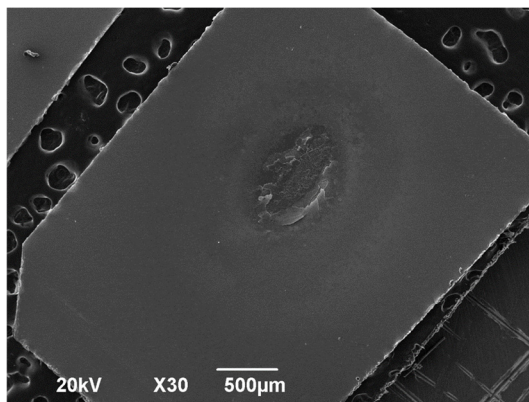


Figure 4: Scanning electron microscope image at 30x magnification of damaged titanium foil.

Table 2: Quantitative Analytical Result

	Element	X-ray energy [KeV]	wt.%
Damaged titanium foil	O-k	0.525	53.56
	Ti-k	4.508	46.44
Undamaged titanium foil	O-k	0.525	6.77
	Ti-k	4.508	93.23

をコンバーター冷却系より大きくすればヘリウム冷却系側に冷却水が漏れなくなると考えられるが、これはビーム取り出し窓の機械的強度の点から不可能である。O リングの劣化に伴うコンバーター冷却系からの冷却水漏洩量の評価は困難であるが、ヘリウム冷却系統内に存在する水分量を常時監視すれば、漏洩の有無を把握できると考え、水分量を測定するための露点計 (テクネ計測製 TK-100) を新たに追加した。

追加した露点計はビーム取り出し窓の還り側配管に設置し、基準値を超過すると加速器のビームが停止するようにインターロックを構成した。先ほど述べたように、ヘリウム冷却系は基本的に閉鎖系のため、コンバーターの脱着等により、ヘリウム冷却系が大気開放された場合は、経路内を純ヘリウムでフローし、置換してから運用していたため、系内の水分量はそれほど多くないと考えていた。しかしながら露点計を取り付けて露点温度を測定したところ、1 L/min で 20 分間フローしても、露点が -10°C 程度までしか下がらないことが判明した。そこで露点を下げるために、系統内にモレキュラーシーブを充填した乾燥器を追加することとした。モレキュラーシーブは化学工業や化学実験などで多用されている吸着材で、水分濃度を 0.1 ppm 以下まで下げることが可能であり、自重の 20% 以上の水分を吸着可能なほか、再生可能であるという特徴を有している[5]。乾燥器は、モレキュラーシーブの再生のため、 $200\sim 250^{\circ}\text{C}$ で 1 時間程度ベーキングすること

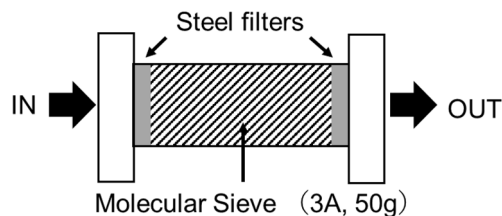
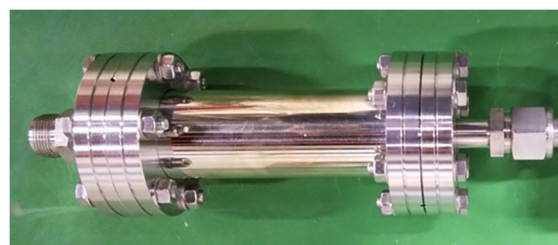


Figure 5: (Upper) Photograph of assembled helium dryer. (Lower) Schematic view of helium dryer which is composed of stainless steel straight pipe, steel filters and molecular sieve.

が要求されたため Fig. 5 のような構造とした。ヘリウム冷却系に乾燥器を設置した後の露点の時間変化を Fig. 6 に示す。冷却系が稼働すると急激に露点が低下し、運転からわずか 10 分程度で -60°C まで達する。その後も露点は徐々に低下し運転中は -70°C 程度を保持していることがわかる。これらの対策に加えて加速器制御系で照射システム冷却系の運転状態の監視し、正常な状態から逸脱する兆候が見られた場合は、オペレーターに通知するようにシステムを改修したほか、流量計などを二重化するなどして安全対策を強化した結果、現時点において通常の RI 製造運転での不具合は発生していない。

コンバーター冷却系からの冷却水漏洩量に関しては、モレキュラーシーブの再生前後での重量変化から、約 2 cm^3 であることが判明した。このときの冷却系の運転時間は 154.4 時間であった。先ほど述べたように、冷却水漏洩の原因は、O リングの劣化による気密不良に起因すると思われるが、劣化を抑制するためには、O リングとコンバーターの位置関係を見直す必要があると思われる。

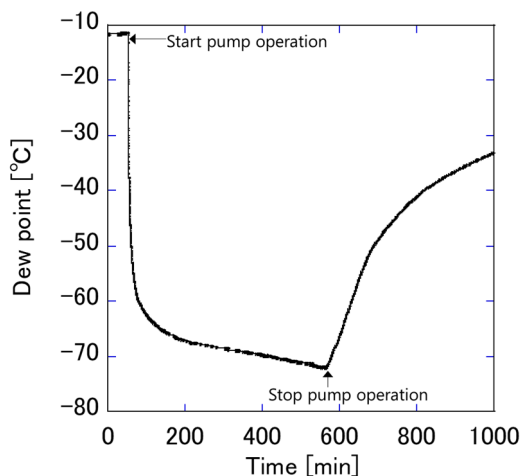


Figure 6: Variation of dew point during RI production.

5. まとめ

東北大学電子光理学研究センターの大電流線形加速器は、RI 製造、放射・核化学、原子核物理学の研究に使用されている。加速器本体は設置から 55 年を経ているが、数度の改修を経て現在も現役でユーザーにビームを供給している。今回電磁石電源の更新を行ったことで、加速器システム全体の信頼性を高めることができた。ビーム照射システムに関しては、ビームモニターの空間分解能の向上と、ビーム取り出し窓を冷却するヘリウム冷却系の改善により、RI 製造運転時の安全性を高めることができた。その一方で、最近ビーム照射システムメンテナンスに伴う被ばく線量の増加が目立ち、現在その低減が課題となっている。被ばく線量を減らすためには、メンテナンスに要する時間を短縮するとともに、ビーム照射システムの放射化を低減する必要がある。今後、作業時間を短縮するために作業手順の最適化などを検討する予定である。ビーム照射システムの放射化低減に関しては、コンバーター固定位置の変更も視野に入れた検討を進める予定である。

謝辞

チタン窓の EDS 分析は、東北大学金属材料研究所アルファ放射体実験室の白崎室長にご協力頂きました。

参考文献

- [1] Toshimi SUDA *et al.*, “Measurement of Proton Charge Radius by Low-Energy Electron Scattering”, 「加速器」, Vol. 15, No. 2, 2018 (52-59).
- [2] T. Muto *et al.*, “極低運動量移行電子弾性散乱による陽子半径測定のための電子ビームラインの構築”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Aug. 7-10, 2018, pp. 284-288.
- [3] 新村 信雄, “新しい中性子実験(TOF 法)はこうして始まった”, 日本中性子科学会誌「波紋」, Vol.28, No.1, 2018, pp3-6.
- [4] K. Takahashi *et al.*, “電子光理学研究センターにおける電子加速器を用いた RI 製造照射システムの開発”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Aug. 7-10, 2018, pp. 688-691.
- [5] <http://www.uskk.co.jp/products/molecularsieve/property/>