

## 東北大学電子光物理学研究センター加速器施設の現状

### STATUS OF ACCELERATOR FACILITY AT RESEARCH CENTER FOR ELECTRON PHOTON SCIENCE, TOHOKU UNIVERSITY

日出富士雄<sup>#</sup>, 柏木茂, 鹿又健, 柴田晃太郎, 高橋健, 長澤育郎, 南部健一, 武藤俊哉, 濱広幸  
Fujio Hinode <sup>#</sup>, Shigeru Kashiwagi, Ken Kanomata, Kotaro Shibata, Ken Takahashi,  
Ikuro Nagasawa, Kenichi Nanbu, Sadao Miura, Toshiya Muto, Hiroyuki Hama  
Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University

#### Abstract

The Research Center for Electron Photon Science at Tohoku University has a 1.3 GeV electron synchrotron (BST ring) and three linacs, which are used for research on quark and hadron nuclear physics, RI production and radio-/nuclear chemistry, and the development of coherent terahertz light sources and beam monitors by generating ultrashort electron bunches. A new ULQ2 experiment to measure the proton radius by electron elastic scattering with ultralow momentum transfer was started in earnest last year at the 70 MeV high intensity linac, thus the operation time for the 70 MeV linac has been increasing significantly. The operation status of user time and recent improvements are presented.

#### 1. はじめに

東北大学電子光物理学研究センターの淵源は、1967年に完成した300 MeV電子linacを研究基盤として設置された理学部附属施設・原子核物理学研究施設(核理研)に端を発し、現センターへの改組の翌2010年に全国共同利用・共同研究拠点(電子光物理学研究拠点)の認定を受け拠点活動を開始した。その直後に発生した東日本大震災からの復旧を経て2013年後半から共同利用を再開し、Fig. 1に示されるように現在は1.3 GeV電子シンクロトロン(BSTリング)と3台の線形加速器が稼働している[1]。BSTリングや入射用linacでは、クォーク・ハドロン核物理の研究の他、主として検出器開発のための試験用ビームの供給が行われており、70 MeV linacではRI製造や放射・核化学の研究が、また試験加速器t-ACTSでは超短パルス電子ビームの生成によるテラヘルツ光源[2,3]やビームモニターの開発研究[4,5]などが進められている。70 MeV linacでは更に、極低運動量移行の電子

弾性散乱により陽子半径を測定するULQ2実験[6]が昨年度より本格的に開始され、このための稼働時間が大幅に増加している。

以下に共同利用運転や改善作業の現状、今後の予定について報告する。

#### 2. 運転状況

##### 2.1 運転時間と利用の状況

近年の運転時間と利用者数の推移をFig. 2に示す。震災から復旧した2013年度以降、全体としては震災前に近い年間2000時間程度の運転が実施されている。延べ利用者数は、年度ごとのばらつきがあるが1000人を超え増加傾向にある。2021年度の利用者増は、新型コロナウイルス感染拡大の影響により海外の活動が制限された影響で、また昨年度についてはULQ2実験が本格的に稼働し始めたことにより2000人超となっている。2022年度の利用者の内訳は、電子光37%、理学研究科16%、

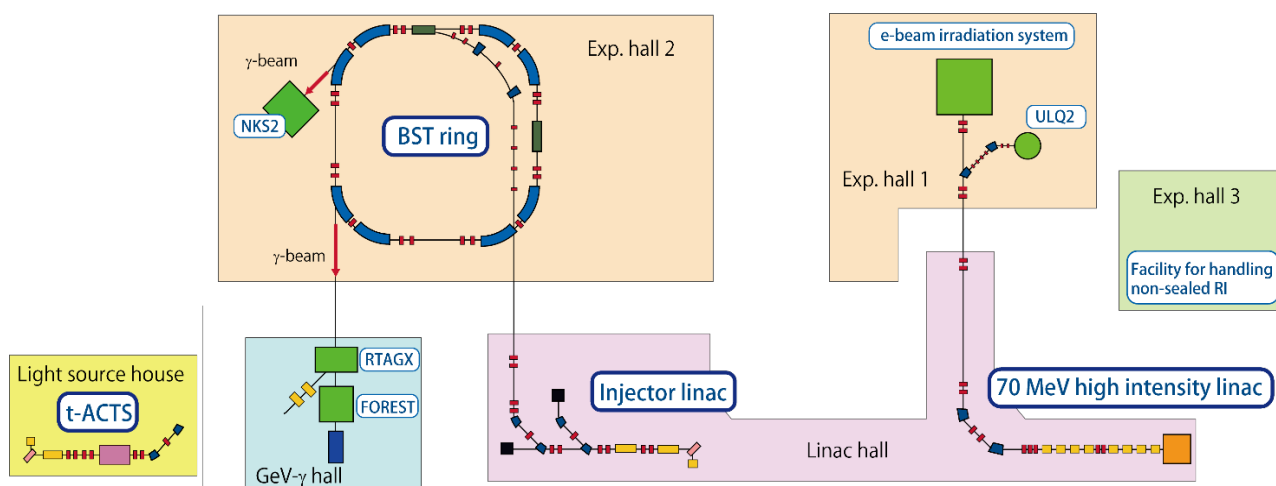


Figure 1: Accelerator complex at ELPH, Tohoku University.

<sup>#</sup> hinode@lms.tohoku.ac.jp

その他学内 6%、他大学・機関 41%となっていて、学外(他大学・研究機関・民間機関)の利用者が増加傾向にある。

Figure 3 には近年の実施シフト数の内訳を示した。電気代の高騰の影響で使用電力の大きな BST リングの稼働が厳しい状況が続いている。今年度前期の BST 運転はわずかに 2 シフトのみであったが、後期の採択課題は 12 件(33 シフト)となっていて年間としては昨年度に近い運転が見込まれている。一方、70 MeV high intensity linac では RI 分野の実施シフト数は少しずつ増加していて、近年は企業との共同研究や RI プラットフォーム事業のための運転も増加傾向にある。特に ULQ2 実験の本格稼働と相まって、極めてタイトな運転スケジュールとなっており、9 月末から本年中はほぼ全ての平日は運転が計画されている状況である。

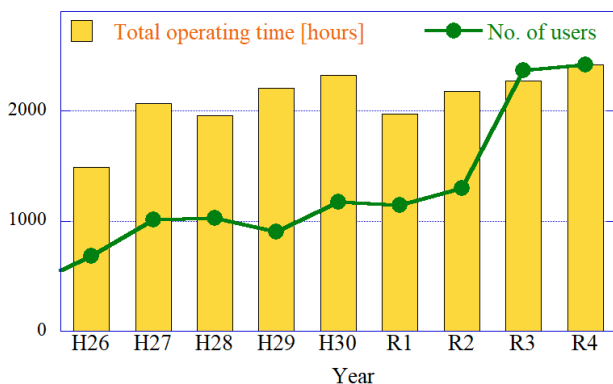


Figure 2: Operating time and number of users.

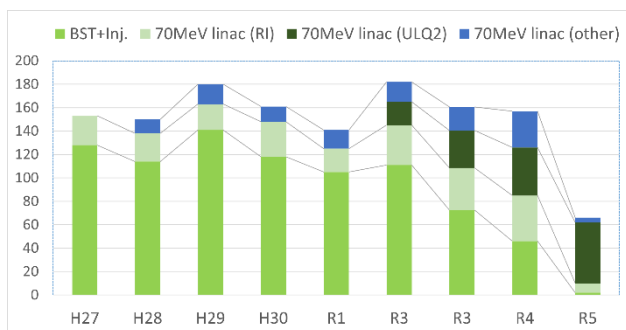


Figure 3: Number of shifts performed. Only the first half is counted in R5.

## 2.2 最近のトラブル

最近のトラブルはほぼ 70 MeV linac で発生しており、その内容は以下の通りで主に老朽化と放射線による機器の損傷が原因となっている。

- 昨年 10 月に 70 MeV linac でモジュレータ 1 号機の IVR が故障。ギアボックス内部にある樹脂製の歯車が摩耗しており、これにより IVR が駆動できずインターロックが作動していた。幸い予備部品があったため半日程度の作業で運転開始できた。
- 昨年 11 月に 70 MeV linac のエネルギー分散部に設置したビームスリットの冷却配管で水漏れが発生

し運転停止。この際にスリットの駆動モーターにも水がかかり故障してしまったため交換した。水漏れの原因は放射線レベルの比較的高い箇所の樹脂製冷却配管の劣化で、後日の本復旧において金属製フレキと交換することで対処した。

- 昨年 11 月に 70 MeV linac でモジュレータ 1 号機のサイラトロンが故障。中古の予備と交換し翌日から運転再開した。
- 本年 1 月に入射器の電磁石電源の制御系で CPU モジュールが故障し運転中断。CPU モジュールは廃版となったマイコンで構築されていて代替が無いため、制御系を更新するまでは、当面、当該の偏向電磁石電源はローカル運転にて対応している。
- 本年 1 月に 70 MeV linac で加速器室に設置していた GV 制御用電源が故障。電源を室外に移設することで対応の予定。
- 本年 6 月に 70 MeV linac でモジュレータ 2 号機のサイラトロンに放電が発生し運転停止。アノード部放電と思われる。中古の予備品と交換し復旧するがサイラトロンはほぼ予備が無い状態。
- 本年 6 月に 70 MeV linac のビーム取り出し窓が破れ真空リーク。これまで経験したピンホール状のリークと異なり、チタン窓に大きな穴が開きコンバーター冷却用の水も一緒に吸い込んでしまったため、第 1 実験室内の真空ダクトを全て解体し、洗浄とベーキングを行ってから再度組立を行った。加速器本体部にも懸念された水の混入については、幸い RF のコンディショニングを実施するだけで真空を復旧することができたが、全ての復旧のため 7 月中の全ての運転(合計 29 シフト)を停止せざるを得なかった。今回は人為的なミスが重なってインターロックが動作しない状況で冷却水が流れないまま運転されたことにより起きた事故で、再発防止としてインターロックの強化と現場作業時の情報共有の徹底を図ることとした。また現在組み込まれている GV の動作が遅いため、真空リーク時の保護用に高速動作の遮断バルブの導入も予定しているが、高い放射線環境下での使用に対する懸念があるため設置場所や放射線防御について検討が必要である。

## 3. 改善・改修作業と今後の予定

### 3.1 70 MeV linac のビーム出力の増強

70 MeV high intensity linac に関しては、これまでも国内有数の大強度電子ビームの利用が可能であったが、今後の更なる利用の展開を図って、ビーム出力を増強することとなった。この増強に伴い放射線安全インターロックシステムに安全性向上のための新機能追加[7]や、加速器室系空調設備に高性能 HEPA フィルターを導入するなどの整備が行われている。昨年 11 月には原子力規制庁から変更が承認され、この申請により、ビーム出力がこれまでの 9 kW から 15 kW に大幅に増強され、運転時間も 96 時間/週から 120 時間/週に増加されている。また併せて非密封放射性同位元素の種類及び数量の変更もなされ、新たに第 6 群核種(Ra-225 など)の追加や群別最大仕様数量の変更が行われている。今後、非密封放射性同位元素の取り扱いが可能な第 3 実験室の

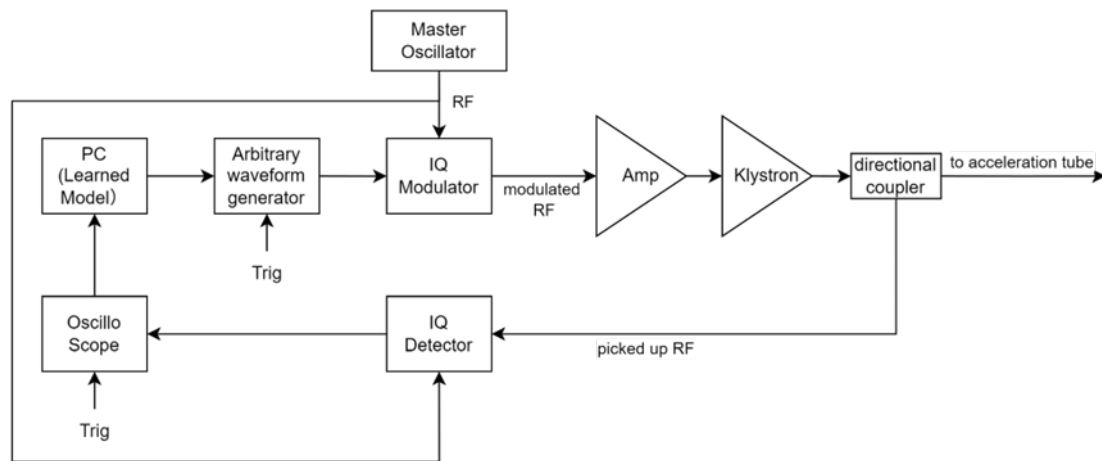


Figure 4: Basic configuration of klystron output stabilization control by machine learning. Replacement of IQ modulator/detector and AWG to RFSoc is under consideration.

準備が終了し次第、利用開始となる予定である。

### 3.2 RFSoc や機械学習を利用したクライストロン出力の振幅・位相制御システムの開発 (推進中)

70 MeV linac については、これまで主として RF 製造に利用されており、そこでは出力のビーム強度が重要な指標であって、標的でのビームエネルギー広がり等の性能については、必ずしも厳しく要求されてこなかった。最近になって、ULQ2 実験の要請から、より狭いエネルギー広がりビームが求められるようになった ( $\delta p/p < 0.1\%$ ,  $\sigma_{x,y} < 1\text{ mm}$ ,  $\sigma_{x',y'} < 5\text{ mrad}$ , @target)。ビームのエネルギー広がりにも影響を及ぼす要因の一つとしてビームを加速するクライストロン出力 RF の振幅・位相の平坦度が挙げられ、その出力の平坦度は電源および増幅対象の RF 入力の影響を受ける。当センター内のクライストロン電源出力の平坦度は老朽化の影響で数%と改善の余地は十分にあるが、予算等の問題で電源自体の更新は難しい。そのため増幅対象の RF 入力波形を制御することで平坦度の改善を検討している。

この RF 入力波形の制御に機械学習や RFSoc (RF System On Chip) の活用が考えられている。機械学習を利用したアプローチでは、RF 入力とクライストロン出力を主な学習データとして利用し、事前に最適な入力条件を算出・実行することで目標平坦度達成を目指している。機械学習アプローチにおける基本構成を Fig. 4 に示す。このアプローチでは、IQ 変調器・復調器内で 2856 MHz の RF をダウンコンバートして測定を行い、任意波形生成器からの出力を 2856 MHz にアップコンバートした信号をクライストロンへの入力として利用する。試験加速器 t-ACTS における IQ 変調の導入試験では、クライストロン出口の高周波パルスの振幅位相平坦化により、振幅のパルス内変動を peak to peak で 9.6% から 0.8% に、位相のパルス内変動を約 7.9° から約 0.89° まで小さくすることに成功した[8]。また RFSoc はサンプリングレートが数 GSPS の ADC と DAC を搭載しており、ADC に入力されたアナログ信号の値に基づいた演算を行い即座にその演算結果を利用した値を DAC から出力可能で、演算部分のプログラムも可能であるため、様々な高速

フィードバック制御の構築が期待されている。RF SoC 内部でも IQ 変復調が行えるため、機械学習同様の構成を RFSoc 単体で実現できるか検討を進めていて、将来的には一つの RF パルス内での高速のフィードバック制御を目指している。

### 3.3 実験室建屋の改修に向けた準備

本センターの実験室は 1966 年に竣工されてから間もなく 60 年を迎える。この間、東日本大震災からの復旧工事で部分的な改修はあったものの、建屋の老朽化の問題が顕在化している。かつてない大規模な改修を実施するための前準備として、本年度、本格的な作業計画の策定を進めているところである。

## 4. まとめ

当センターは昨年 4 月に文部科学省より全国共同利用・共同研究拠点 (電子光物理学研究拠点) の再度の認定を受けて、拠点活動を推進中であり、昨年度も例年並みの 2000 時間超の運転が実施され、利用者数も順調に増加傾向にある。また 70 MeV linac に関してはビーム出力を増強し、今後の更なる利用の展開を図っている。

## 参考文献

- [1] F. Hinode *et al.*, Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.1279, 2019.
- [2] F. Hinode *et al.*, Proc. of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.1138, 2022.
- [3] T. Muto *et al.*, Proc. of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.316, 2022.
- [4] H. Saito *et al.*, Proc. of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.123, 2022.
- [5] K. Kumagai *et al.*, Proc. of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, WEOA3, 2022.
- [6] H. Yamada *et al.*, Proc. of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, WEOA4, 2022.
- [7] T. Suda *et al.*, 加速器 Vol. 15, No. 2, p.52-59, 2018.
- [8] K. Nanbu *et al.*, Proc. of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, THP50, 2022.
- [9] S. Yamada *et al.*, Proc. of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.42, 2022.