

## 東北大学電子光物理学研究センター加速器施設の現状

### CURRENT STATUS OF ACCELERATOR FACILITY IN RESEARCH CENTER FOR ELECTRON PHOTON SCIENCE AT 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,  
三浦 禎雄, 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

An accelerator complex consisting of three electron linear accelerators and a synchrotron is operating at Research Center for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University. In addition to the researches on RI production and nuclear/radiation chemistry using the high-intensity electron linac, studies of quark and hadron nuclear physics using high energy gamma rays generated by bremsstrahlung in the 1.3 GeV Booster Storage ring (BST) are also conducted, as well as research on ultra-short electron bunch generation and development of coherent THz light source at test accelerator (t-ACTS). In the last year, the old electron gun of the high-intensity electron linac was replaced resulting in a significant increase in beam power. The construction of new beam line (ULQ2) in Experimental Hall #1 was also conducted for experiment determining the proton charge radius by low-energy electron scattering. The beam commissioning for ULQ2 will be started soon. The status and prospects of the accelerator facility are reported.

#### 1. はじめに

東北大学電子光物理学研究センターでは、1.3 GeV の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中で、クォーク・ハドロン核物理の研究をはじめ RI 製造や放射核化学の研究、超短パルス電子ビームの生成とこれによるコヒーレントテラヘルツ光源の開発研究などが進められている。RI 製造用大強度 linac では長年の懸案であった熱電子銃を更新し、ターゲット照射システムの改善に取り組むことでビームパワーの更なる増強がなされている。また新たに極低運動量移行の電子弾性散乱による陽子半径測定を実施するためのビームライン (ULQ2) の構築も進められており、間もなくコミッションングが開始される予定となっている。これら加速器群の現状や今後の予定について報告する。

#### 2. 運転の現状

電子光センター加速器群の概要については、昨年度の年会報告を参照されたい [1]。最近の特記事項としては、以下で記載する電子銃の更新に伴い、大強度 linac におけるビーム出力の増強がなされている。

2010 年度以降の運転時間の推移を Fig. 1 に示す。震災後の 2013 年度後半より共同利用を再開したが、運転時間の内の 70 % 程度が BST 利用となっている。延べ利用者数についても、年度ごとのばらつきがあるものの 1000 人程度で推移している。近年は年間 2000 時間を超えた運転が実施され微増傾向にあったが、昨年度は大強度 linac における真空リーク事故が連発してしまい、電子銃の陰極まで交換する事態となり運転時間が制限されてしまった。

2019 年度の採択課題は 26 件 (大強度 linac: 6 件 32

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

シフト、BST: 20 件 177 シフト) であった。採択シフトは 2 年間有効で、これまで次年度繰り越し分も加味して運転予定が立てられていたが、昨年度は例年よりも持ち越しシフト数が幾分多めになってしまった。また、今般の COVID-19 の影響で 5 月に予定されていた外部利用者のマシンタイムが大幅に取り止めとなり、大学本部による BCP レベル4の規制の下、感染予防に十分に配慮した最低限度の運転要員により、急遽、内部利用者の利用運転を優先的に実施することとなった。

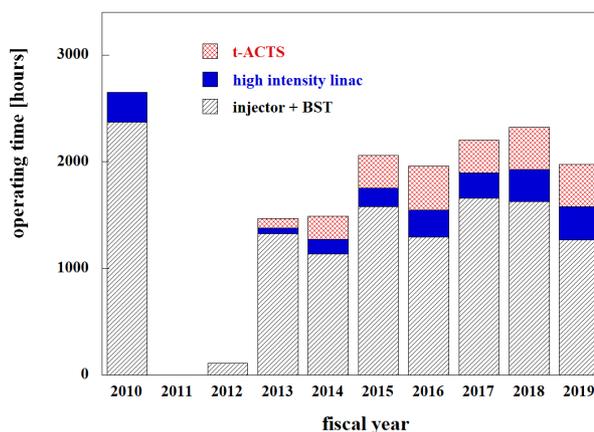


Figure 1: Operating time in recent years.

更に運転経費の縮減や電気料金の高騰による影響も大きく、今後の採択可能シフト数の維持は厳しい状況となっていて、今年度より採択シフトの有効期間についても 1 年間への短縮が余儀なくされている。2020 年度の採択課題は 19 件 (大強度 linac: 10 件 34 シフト、BST: 9 件 18 シフト) で、この他に短寿命 RI 供給プラットフォーム事業と企業との共同研究の運転が行われる。今年度の BST の新規採択シフト数は 18 シフトと少ないが、これま

で、繰り越し分を含めた 94 シフト 1070 時間近い運転が既になされている。50 MeV 試験加速器 t-ACTS においては、超短パルス電子ビームの生成やこれを用いた光源・ビームモニターの開発研究 [2-5]、および挿入光源の試験[6]など現在は主に加速器・ビーム物理分野での共同研究を行っている。

加速器群の最近の主なトラブルは以下とおりである。

- 大強度 linac のサイクロトロン故障。  
熱でヒーター端子が焼損したものである。予備(中古)のサイクロトロンと交換し復旧。しかし 3 か月後に故障し、再度、別の予備品(中古)と交換。
- 大強度 linac で真空リークが発生。  
新電子銃の導入後の調整運転中に、偏向電磁石下流のアルミ製真空ダクトにビームを当ててしまいフランジ部よりリークした。ビームライン上流部の GV が閉じない不具合も重なり、電子銃陰極の交換が必要となった。このため運転予定を組み替えて、2 か月弱は BST の利用のみを実施した。
- 大強度 linac で再び真空リーク発生。  
35 MeV で運転中にビーム取り出し用チタン窓に穴が開いたことによる。冷却水インターロックの故障が重なり冷却のないままビーム照射が行われてしまった。この結果、熱負荷でコンバータに穴が開きチタン窓のヘリウム冷却系に水が混入したことにより、チタン窓が劣化したものと考えられる。後述する冷却システムの改善を行い対処した。
- 大強度 linac 電子銃電源の放電。  
新電子銃導入後の調整運転中に、電子銃の高圧電源のインターロックが頻発し運転できない状態になった。調査の結果、アイソレーショントランスの接続端子部で放電していたことが判明した。経年変化で耐圧の劣化が進んだものと思われる。コロナシールドによる耐圧改善や、合わせて劣化していた整流ダイオードの交換等が行われた。
- 電磁石電源の焼損。  
BST リング運転中にビームが入射しなくなったため現場を確認すると、入射用セプタム電磁石電源が焼損していた。設置から 1 年未満であることから初期不良と思われる。予備の電源との交換で対処したが、半日程度の運転停止となった。
- BST リングで純水冷却配管に多量のエア混入。  
市水から加速器冷却系に純水を供給している純水製造装置が異常停止し、負圧部から冷却配管内に多量のエアが混入したもので、これにより予定より 3 日早い運転停止となってしまった。純水製造装置の前段に追加で 3 重のフィルターを設置しているが、フィルターの定期交換前に目詰まりを起こし異常停止してしまっ。折り悪く COVID-19 の影響で、リモート監視による最低限度の要員により運転されていたため、発見が遅れてエアが混入する事態に至った。現在は、早期に対応できるように異常時の警報処理の改善がなされている。なお、フィルター目詰まりの原因となっている供給水の水质改善については、後述するように今年度の施設整備が採択されたことで解消される見込みである。

### 3. 改善作業

#### 3.1 大強度 linac 用電子銃の更新

1967 年の建設から 50 年以上が経過した大強度 linac では、メーカーからの部品供給が終了した熱電子銃陰極に対する代替品 (EIMAC Y646B) の準備を進めていた [7]。昨年の夏季停止期間にその更新作業を実施し、ビーム電流の増量を実現した。この間、電子銃高圧電源の故障や 2 度の真空リーク事故があったが、本年 2 月中旬から利用運転に供されている。

Table 1 に電子銃更新前後での利用運転時の典型的なビーム電流をまとめてある。これまでビーム輸送の効率が 30 %程度と低かったものが、電子銃交換により 50 %強に改善し、これによりビーム強度も運転エネルギーによっては最大で 30 %程度の増強がなされている。Table 1 には、調整運転時に得られた最大ビーム強度も記してあるが、50 MeV 運転時には供給できる RF 電力の最大値により、また 40 MeV 運転時には放射線申請上の上限により制限されている。

Table 1: Beam Power Before/After Gun Replacement

| E <sub>b</sub><br>[MeV] | I <sub>b</sub> [μA] |       | P <sub>b,max</sub> [kW] |
|-------------------------|---------------------|-------|-------------------------|
|                         | before              | after | after                   |
| 20                      | ~ 100               | ~ 125 | —                       |
| 30                      | ~ 100               | ~ 135 | —                       |
| 35                      | ~ 105               | ~ 115 | ~ 8                     |
| 40                      | —                   | —     | ~ 9                     |
| 50                      | ~ 125               | ~ 135 | ~ 7                     |

#### 3.2 RI 製造用照射部の冷却システムの改善

大強度 linac においては、2018 年に RI 製造のための照射システムの改良が行われている[8]。これにより従来の 6 倍以上のガンマ線収量の増強がなされているが、電子銃更新によるビーム電流の増加により、コンバータやビーム取り出し窓への負荷が増大している。照射システムの改良に伴って冷却システムも更新されているが、放射線の影響によりフロースイッチが動作しなくなるなど不具合が生じていて、真空リーク事故の原因ともなっていた。そこで、冷却システムの改善を行い、重要な系統の流量監視を2重化するなどの処置を施した。また、ビーム取り出し用のチタン窓については水の混入による脆化が懸念されるため、冷却用のヘリウム循環ラインにモレキュラーシーブを設けて水分子の除去を行うとともに、露点計を設置して運転中は常に水分量をモニターするように対策を行った。

#### 3.3 RTAG-X 磁石の漏れ磁場の影響

BST リングから取り出された光子ビームラインの下流にある RTAG-X 磁石では、テストビームラインに供給する荷電粒子の選別を行っているが、この RTAG-X を励磁すると BST の周回電流が減少する影響がみられていた。調査の結果、コンクリートや土の壁を含めて約 13 m 隔てて設置されていた RTAG-X の漏れ磁場が BST への入

射ビームラインの軌道に作用していたことが判明した。蹴り角としては約 0.1 mrad で、漏れ磁場が 3 m の長さに渡って作用しているとすると、その強さは 0.1 G 程度である。磁気シールドを施したいところではあるが、当面の対処として、ユーザーが RTAG-X の励磁電流を変更する都度、入射軌道を補正することとしている。

#### 3.4 ガンマ線強度の安定度の改善

BST リングの真空度の改善やビーム調整の進展につれて周回電流が増加し、最近では 30 mA 超のビームが定常的に周回している。これに伴いビーム電流に依存してガンマ線の強度が時間的に一定にできないことが問題になってきた。BST では、高エネルギーのガンマ線を生成するのに、加速後の周回軌道上に直径 10  $\mu\text{m}$  の細いカーボンファイバーをラジエーターとして挿入し制動放射を発生させているが、時間的に一定の割合でガンマ線を発生させるようにラジエーター挿入の速度や位置を制御している。しかし、ある電流閾値付近でガンマ線強度が急激に増加しピークを持つような時間構造を持ち、ラジエーターの制御ではこれに対応できないことが問題とされるようになった。予備的な調査の結果、ビーム不安定性によりビーム電流に依存してスピルの途中で水平方向ビームサイズが変化するためにガンマ線強度がピークを持つ現象を生じていると考えられる。現在は、チューンの動作点を調整することで強度の変動を回避しているが、詳細は今後調査する予定である。

### 4. 施設更新状況

#### 4.1 高分解能電子ビームラインの建設

陽子荷電半径の精密測定のための電子散乱実験 (Ultra-Low  $Q^2$ : ULQ2 実験) にむけて、新たなビームラインの建設が進められてきた[9]。Figure 2 は建設されたビームラインの様子である。ビームラインの構築や機器の制御プログラムの準備、放射線インターロックの変更といった作業はほぼ終了しており、放射線変更申請の許可が得られ次第、運転を開始する予定である。

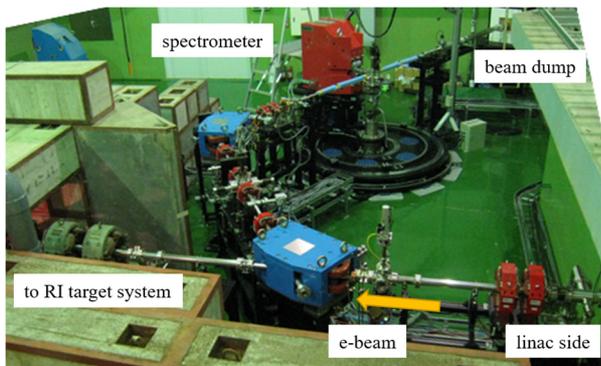


Figure 2: ULQ2 beam line.

#### 4.2 施設給排水設備の更新

施設敷地内にある加速器建屋の周りの主要な給排水管は、そのほとんどが 1966 年の施設建設当時のままで、特に加速器冷却系に供給されている配管内の水質は劣悪で、常に赤茶色に濁っている状態であった。今年度、

幸いにも施設内の給排水設備の更新の概算要求が承認され、9 月より本格的な工事が開始の予定となっている。現在、工事前の埋文調査が始まったところであり、年度内には全ての作業が完了の予定である。

### 5. 大強度 linac のエネルギーの訂正

ごく最近になって、2013 年以降の利用運転に対して大強度 linac でのビームエネルギーが公称値より約 11% 高かったことが判明した。震災後の改修作業にあって、偏向電磁石のフリンジ磁場のデータを制御系で反映し忘れていたものである。既に影響のある利用者には報告と謝罪の連絡がされているが、ご迷惑をおかけした関係者にはここに改めてお詫び申し上げる次第である。

### 6. まとめと今後の課題

近年は震災前に近い 2000 時間超の運転を実施し微増傾向にあったが、昨年度は真空トラブルでやや減少してしまった。本年度は COVID-19 の影響の中、内部の利用実験を先に対応することで既に 1200 時間超の利用運転を実施している。懸案となっていた大強度 linac の古い電子銃については昨年夏の停止期間に更新し、引き出し電流とビーム輸送効率の向上で、ビーム強度が従来の 6 kW から最大 9 kW に増強できた。BST については昨年初めに加速空洞の高周波源をクライストロンから半導体アンプに転換することで契約電力を低減できたが、もはやこれ以上の電気代縮減は困難であり、今年度からは電力消費の大きい BST の利用運転に制限をかけざるを得ない状況となっている。同じく深刻な問題として、運転開始から 50 年以上が経過している大強度 linac のモジュレータについては、PCB が含有されているため PCB 特措法により 2027 年度までに処理する必要がある。多量の古いコンデンサーなど他の低濃度 PCB の処理の問題も、大学本部の支援なしに部局独自で対応するのは極めて困難である。センターの加速器群の今後の運用方針含めて、将来計画の議論を進めているところである。

### 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] K. Nanbu *et al.*, Proc. of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, THPP16, 2020.
- [3] H. Yamada *et al.*, Proc. of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, FRPP62, 2020.
- [4] S. Kashiwagi *et al.*, Proc. of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, THOT05, 2020.
- [5] K. Terada *et al.*, Proc. of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, THOT08, 2020.
- [6] S. Yamamoto *et al.*, J. Synchrotron Rad., 26, 1902-1910, 2019.
- [7] S. Miura *et al.*, Proc. of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.688, 2018.
- [8] K. Takahashi *et al.*, Proc. of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.688, 2018.
- [9] T. Muto *et al.*, Proc. of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.284, 2018.