

東北大学電子光物理学研究センター加速器群の現状

CURRENT STATUS OF ACCELERATOR COMPLEX IN RESEARCH CENTER FOR ELECTRON PHOTON SCIENCE AT TOHOKU UNIVERSITY

日出 富士雄[#], 柏木 茂, 鹿又 健, 柴崎 義信, 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[#], Shigeru Kashiwagi, Ken Kanomata, Yoshinobu Shibasaki, Kotaro Shibata, Ken Takahashi,
Ikuro Nagasawa, Kenichi Nanbu, Sadao Miura, Toshiya Muto, Hiroyuki Hama
Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University

Abstract

At Research Center for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University, an accelerator complex consisting of three electron linear accelerators and a synchrotron is operating under a program of Joint Usage/Research Center for the electron photon science. Researches on RI production and nuclear/radiation chemistry using the 60 MeV high-intensity electron linac, and also 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 actively performed. In addition, research on ultra-short electron bunch generation with 50 MeV test accelerator (t-ACTS) and development of coherent THz light source have been advanced. Some upgrade works for the accelerator complex have been conducted in this year. We report on the current status and prospects of the accelerator facility.

1. はじめに

東北大学電子光物理学研究センター(ELPH)では、1.3 GeV Booster Storage リング(BST)において制動放射により生成した高エネルギーガンマ線を用いたクォーク・ハドロン核物理の研究をはじめ、60 MeV 大強度電子線形加速器を用いた RI 製造や核・放射化学の研究、さらには 50 MeV 試験加速器(t-ACTS)での超短パルス電子ビーム生成やこれを用いた光源開発の研究などが進められている。昨年から本年にかけての実施事項として、1997年に運転を開始し、その老朽化が懸念されていたBSTリングのクライストロン電源に替えて、新たに半導体アンプを用いた高周波源を導入した。これにより契約電力の低減も可能となり、近年の懸案であった運転経費の節減も図られている。また RI 製造用大強度線形加速器では、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の構築が進められていて、今年度の運転開始を目指している。ここでは、これら加速器群の現状や今後の予定などについて報告する。

2. 運転の現状

本センターで稼働中の加速器には、3台の線形加速器と周長 50 m の BST リングがあり、基本的には各々が独立に運転可能である。しかし大強度 linac と BST の同時運転時には契約電力の制約のため、BST の運転繰り返しを半分程度に下げて運転している。Table 1 に各加速器のビーム性能を示した。大強度 linac では 1 m 長の加速管 8 本に 2 台の 20 MW 級クライストロンで RF を供給する構成となっており、運転エネルギーは 10~60 MeV である。ただし低エネルギー運転時には、クライストロン 1 台で運転している。代表的な運転エネルギー(50

MeV)での平均ビーム電流は 120 μA と、6 kW を超える国内屈指の電子ビームパワーを有している。BST 入射用 linac は、独立 2 空洞型の熱陰極高周波電子銃(ITC RF-gun)と α 電磁石、2 本の 3 m 長 S-band 加速管、90 度偏向の分散部などによるコンパクトな構成となっており、通常運転時のエネルギーは 90 MeV、マクロパルスのピーク電流~40 mA、規格化エミッタンス 10 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 以下である[1]。

Table 1: Beam Performances at ELPH

High intensity linac	
energy	10 ~ 60 MeV
normalized emittance	~ 80 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$
max. repetition rate	300 Hz
macropulse duration	~ 3 μs
current (peak/average)	130 mA / 120 μA @ 50 MeV
Injector linac	
energy	~ 90 MeV
normalized emittance	< 10 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$
current (peak)	~ 40 mA
BST ring	
energy	0.8 ~ 1.3 GeV
stored current	~ 30 mA (typical)
repetition rate	~ 0.06 Hz (typical)
t-ACTS	
energy	20 ~ 50 MeV
bunch charge	1 ~ 10 pC/bunch
normalized emittance	< 10 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$
minimum bunch length	< 100 fs (rms, @~ 20 MeV)
macropulse duration	~ 2 μs

BST リングは、2013 年のエネルギー増強(1.3 GeV)以降、順調に第 2 実験室と GeV- γ 照射室の 2 本のビームラインに高エネルギーガンマ線を供給している。典型的な

[#]hinode@lns.tohoku.ac.jp

運転モードでは周回電流は 30 mA、入射から次の入射までの繰り返しは 16 秒サイクル(フラットトップ 10 秒)である[2]。試験加速器 t-ACTS では入射器と同じく電子銃に ITC RF-gun を用い、加速管中での速度集群を利用することで 100 fs 以下の極短電子バンチの生成が可能であり、これによるコヒーレント放射を用いた光源開発やビームモニターの研究を進めている[3-6]。

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、近年は年間 2000 時間超の運転が実施されている。その内の 70% 程度が BST の運転である。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。2018 年度の採択課題は 22 件(大強度 linac: 9 件、BST: 13 件)で、この他に短寿命 RI 供給プラットフォーム事業(4 件)と企業との共同研究(1 件)の運転が行われた。本年度も 4 月初めより稼働を再開し、既に 800 時間超の利用運転が実施されている。

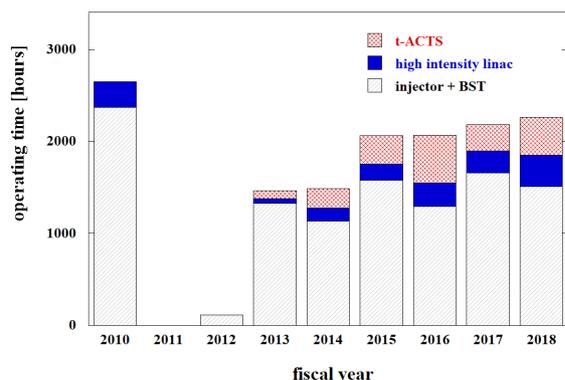


Figure 1: Operating time in recent years.

最近の主なトラブルとしては以下とおりである。

- 大強度 linac のクライストロンで真空リークが発生。クライストロンの収束コイルの電流が流れていない状態で高圧運転をしていたため入力空洞が焼損したものである。電源交換の際の設定ミスと作業時のインターロックがジャンプされていたのを確認し忘れたことが重なり故障に至った。予備のクライストロンと交換し復旧したが、1週間ほど運転停止となった。
- 大強度 linac で、長時間の連続照射中に真空リークが発生。真空ダクトの径が狭くなっているフランジ部でビーム損失が生じたため、発熱し緩んだフランジ部からリークしていた。フランジの増し締めで真空は復帰できたが、対策としてビームロスの生じる可能性の高いフランジ部の温度を常時モニターすることとした。
- 大強度 linac で、スクリーンモニター用の CCD カメラや PLC、流量センサーなどの新たに実験室に設置した電子機器の故障・誤動作が頻発している。放射線による影響を軽減するようにシールドや設置場所の改善を進めている。
- BST リングで DC セプタム電磁石の電源が故障(経年劣化)。手持ちの代替機と交換で対処。
- BST リングでクライストロンのドライバーアンプが故

障(経年劣化)。3 日ほど運転停止したが、代替機を手配して翌週に予定されていた利用運転には間に合わせる事ができた。

- 入射器の RF Gun のカソードセルでの放電。年に 1 回の割合でカソードを交換しているが、長期の運転停止期間中までもたなかったため、本年は 1 週間ほど運転を停止して交換作業を実施した。
- 実験棟近くの市水配管で大きな漏水が発生。緊急の改修工事に伴う断水のため、予定されていた照射を翌日の運転と同日実施とすることで対処した。

3. BST 用高周波源の更新

BST のクライストロン用高圧電源については、製造から 20 年以上が経過し老朽化による影響が懸念されていた。実際に 2017 年 5 月には、運転中に 10 台ある高圧ユニットの一つで IGBT が破損するトラブルがあり、廃版で代替品の入手もできないため 8 ユニットでの運転を余儀なくされる事態となっていた。また昨今の電気代単価と空調設備用重油単価の増加の影響も深刻であり、施設加速器群の運転経費の確保は年々その困難の度合いを増している状況であった。殊に BST で使用していたクライストロン(E3774、東芝電子管製)は、もともとは KEK-PF から移管された大電力が出力可能なものであり、近年の利用運転に要する 10 kW 程度の出力からすると、大変に無駄が多い使用形態となっていた。そこで昨年度、クライストロンに替えてより低消費電力の半導体アンプを導入することを決断した。導入に際して、将来的な周回電流の増強を見込んで、最大出力は 15 kW とした。Table 2 に導入した高周波増幅器(CA500BW1-7272R、アールアンドケー製)の仕様を示す。

Table 2: RF Power Amplifier, CA500BW1-7272R

	Specification @500 MHz	measured
Frequency Range	500±0.5MHz	-
Output Power	15 kW @P2dB/CW	15.5 kW
Gain	+72 dB (min.)	+73.17 dB
Gain Flatness	±0.5dB (max.)	±0.01dB
Harmonics	-30dBc (max.)	-41.83dBc
Spurious	-70dBc (max.)	<-80.00dBc
Return Loss	-14dB (max.) input -10dB (max.) output	-24.21dB -19.84dB
Power Dissipation	38kVA (max.)	31.5kVA

コストを抑えるために周波数帯域は 500±0.5 MHz 程度で良いこととし、LDMOS を用いたアンプユニットのモジュールを組み合わせて定格電力を出力する構成となっている。ドライバーアンプの出力を 6 分割して 4 チャンネルのアンプユニットに入力してチャンネル当たり約 700 W まで増幅した後、アンプユニットの出力 6 台分(計 24 チャンネル)をラディアルコンパイナで結合して、15 kW を出力している。最終段からは WX-77D 同軸管で出力し、WR-1500 導波管に変換したのち、既存の立体回路系にて加速空洞に電力を供給している。各アンプ回路は反射電力からの保護のため個別にサーキュレータを備えている。また終段のアンプのみが故障した場合には、冗長性の範囲内で運転継続も可能となっている。

Figure 2 に本年 3 月に設置した高周波増幅器を示す。高さ 2 m のラックに全てが収まっていて極めてコンパクトである。設置から 3 か月が経過したが安定に稼働しており、運転所用電力も当初の見込み通りに契約電力を 180 kW 下げることができた。これは、従来の契約電力の 15 %弱に相当する電力量である。



Figure 2: RF power amplifier.

4. 高分解能電子ビームラインの建設

μ 水素原子分光で測定された陽子荷電半径と電子分光や電子散乱で測定された荷電半径が一致しないという、いわゆる陽子半径パズルの解明を目的とした高精度の電子散乱実験(Ultra-Low Q^2 : ULQ2 実験)のために、新たなビームラインの建設が進められている[7]。これは、 $E_e = 20 \sim 60$ MeV 程度のエネルギー可変でかつ運動量広がり $\Delta p/p = 0.1$ %以下の高運動量分解能の電子ビームを用いて、電子・陽子弾性散乱断面積を精度よく測定することを目指した実験である。Figure 3 は建設中のビームラインの様子である。今年度中に実験開始の予定で準備が進められている。



Figure 3: ULQ2 beam line under construction.

更に昨年夏の長期停止期間には、ULQ2ビームラインの建設と並行して RI 製造のための照射システムの改良及びビーム輸送系の整備・改修作業なども進められた。照射システムの改良では、従来は照射サンプルと一体で

照射用プール内に設置されていたガンマ線用コンバータを分離した構造とし、電子ビームの取り出し窓に近づけることでガンマ線の収量を増加させるとともに、ターゲット交換作業時の被ばくの低減も図られている[8]。ビーム輸送系の整備・改修作業については、これまで適切な場所にスクリーンモニターや収束及び軌道補正用の磁石が無かったためにビーム調整が不十分であったことの改善や、更に ULQ2 用に一部のダクト内径が狭くなったことへの対応を図ったものである。これらの改良作業の結果、電子ビームの輸送効率の改善と合わせて、20 MeV での実験では RI の生成量において従来の 6.5 倍の増加が確認されている。

5. まとめ

本センターの電子加速群は、昨年度も共同利用に例年並みの 2000 時間超のビームタイムを供してきた。ULQ2 ビームラインの建設作業と並行して、昨年の夏季停止期間には大強度 linac のビーム輸送系や照射システムを改善し、従来比 6.5 倍の RI 生成量の増強が実現されている。また近年の懸案となっていた運転経費の確保への取り組みの一つとして、これまで進めてきた節電と運転効率化に加えて、非効率であった BST 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への転換を実施し、契約電力を当初の見込み通りに 180 kW 低減することができた。これにより電気代単価や空調設備用重油単価の増加により、本来なら運転時間の大幅な短縮を余儀なくされるところであったが、今年度も例年並みの運転時間の確保が見込まれている。これからの課題として、センターの加速器群の運用を今後どのようにしていくべきか議論を進めているところである。特に運転開始から 50 年以上が経過している大強度 linac については、どこで重大な故障が発生しても不思議が無い状況であり、施設の将来計画とも関連し、長期的な運用方針の策定が急がれている。しかしながら当面は、可能な範囲で地道に保守・改修作業を進めるとともに、計画的に要素更新の準備を進めている。今年度の予定として、劣化の懸念されている古いモジュール内部の絶縁オイルや素子の交換、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) の準備などが進められており、間もなく新しい電子銃単体でのビーム試験を実施する運びとなっている。

参考文献

- [1] S. Kashiwagi *et al.*, Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.23, 2015.
- [2] F. Hinode *et al.*, Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.146, 2015.
- [3] H. Saito *et al.*, Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, WEPI011, 2019.
- [4] N. Morita *et al.*, Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, THOI10, 2019.
- [5] K. Nanbu *et al.*, Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, FRPI037, 2019.
- [6] H. Yamada *et al.*, Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, WEOI01, 2019.
- [7] T. Muto *et al.*, Proc. of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.284, 2018.
- [8] K. Takahashi *et al.*, Proc. of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.688, 2018.