

## 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 IN RESEARCH CENTER FOR ELECTRON PHOTON SCIENCE, TOHOKU UNIVERSITY

日出富士雄<sup>#</sup>, 柏木茂, 柴崎義信, 高橋健, 長澤育郎, 南部健一, 武藤俊哉, 濱広幸  
Fujio Hinode<sup>#</sup>, Shigeru Kashiwagi, Toshiya Muto, Ikuro Nagasawa, Kenichi Nanbu,  
Yoshinobu Shibasaki, Ken Takahashi and Hiroyuki Hama  
Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University

#### Abstract

The accelerator complex in Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University provide electron and photon beams with a wide energy range for various research fields such as nuclear physics, radio chemistry, material and bio-science, etc. The total operating time in FY2015 reached 2000 hours, which is the comparable level to those before the Great East Japan Earthquake in 2011, and the accelerators has been well operating including the 50-year-old linac. The current status of machine operation is reported, together with the recent improvement work.

#### 1. はじめに

東北大学電子光物理学研究センターは、1966年に前身の理学研究科附属原子核物理学研究施設(核理研)が設立されてより、本年で50周年を迎えた。2009年に全学のセンターとして改組され、現在は全国共同利用・共同研究拠点として、1.3 GeV ブースター蓄積リング(BST)からの高エネルギーガンマ線生成を用いたクォーク・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による RI 製造や放射核化学の研究、さらには 50 MeV 試験加速器 (t-ACTS) における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。利用運転の状況や最近の改善項目などについて報告する。

#### 2. 運転の状況

##### 2.1 各加速器のビーム性能

本センターに有する各電子加速器のビーム性能を Table 1 に示す。大強度電子線形加速器では 10 ~ 60 MeV の電子線をタンダステンなどに照射してガンマ線に変換し、光核反応による RI 製造や放射核化学の研究に供している。代表的な運転エネルギー(50 MeV)での平均ビーム電流は 120  $\mu$ A で、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。2011年の東日本大震災の復旧に際して新たに建設された BST 入射用線形加速器は、独立2空洞型の熱陰極高周波電子銃(ITC RF-gun)と $\alpha$ 電磁石、2本の3m長 S-band 加速管、90度偏向の分散部などから構成されており、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  $\pi$ mmmmrad 以下である[1]。BST リングは、同じく大震災を機に最大エネルギーを 1.3 GeV に増強し、また6極磁場入りの機能複合型4極磁石を導入することで色収差補正を可能としている[2]。加速後にストレージ中のビーム軌道にカーボンファイバーのラジエータを挿入して制動放射による高エネルギーのガンマ

線を生成することで、クォーク・ハドロン核物理の研究や陽電子ビームなどのテストビームラインにも利用されている。フラットトップの周回電流は利用者の要求により 1 ~ 30 mA である。また全体のサイクルは契約電力の制約もふまえて、通常は 10 ~ 60 秒程度で運転されている。

Table 1: Beam Performances

High intensity LINAC	
energy	10 ~ 60 MeV
normalized emittance	~ 80 $\pi$ mmmmrad
max. repetition rate	300 Hz
macropulse duration	~ 3 $\mu$ s
current (peak/average)	130 mA / 120 $\mu$ A @ 50 MeV
Injector LINAC	
energy	~ 90 MeV
normalized emittance	< 10 $\pi$ mmmmrad
current (peak)	~ 40 mA
BST ring	
energy	0.8 ~ 1.3 GeV
stored current	~ 30 mA
ramping time	2.4 s (90 MeV to 1.3 GeV)
repetition rate	~ 0.05 Hz (typical)
t-ACTS	
energy	30 ~ 50 MeV
bunch charge	1 ~ 10 pC/bunch
normalized emittance	< 10 $\pi$ mmmmrad
minimum bunch length	< 200 fs (rms, @~ 30 MeV)
macropulse duration	~ 2 $\mu$ s

2013年より稼働を開始した t-ACTS 試験加速器では、入射器と同じく電子銃に ITC RF-gun を使い、これにより生成したエネルギー広がり小さな電子バンチに対して、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を目指している。最大エネル

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

ギーは、加速管のクレストで加速する際には 50 MeV で、短バンチ運転時では ~30 MeV 程度である。また空間電荷効果や高周波電子銃におけるバックボンバードメント現象の抑制のため、ビーム電流もバンチあたり 10 pC 程度以下に制限して運転している。現在は課題採択の対象とはなっていないが、将来的には高品質ビームを用いた加速器・ビーム物理学分野での共同研究も視野に入れて開発を進めている。

## 2.2 運転時間

最近の運転時間の推移を Figure 1 に示す。震災後 2 年間は復旧作業のため共同利用は中断されていたが、2013 年度後半より再開した。震災後の電気料の高騰により、運転経費を十分に確保することが困難な状況が続いているが、昨年度は施設全体で徹底的な節電に努めることで、震災前に近い 2000 時間の運転を実現することができた。また運転時間の増加に伴い、延べ利用者数も順調に増加傾向にあり、昨年度は 1000 人を超えるまでに至っている。昨年度の採択課題の件数は大強度線形加速器が 7 件、BST が 21 件で、本年度も順調に共同利用が進められており、昨年度並みの運転時間が見込まれている。

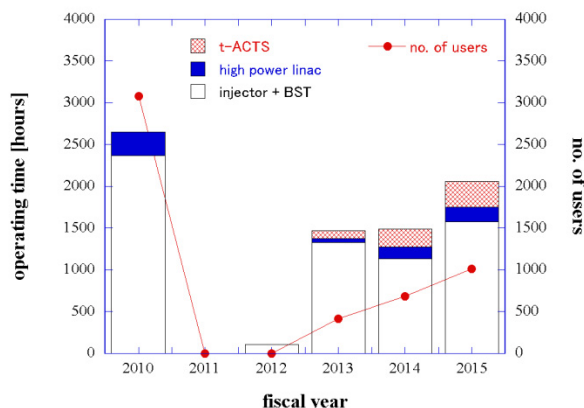


Figure 1: Operating time and number of users.

## 3. トラブル対処と改善事項

主に昨年度にあったトラブルや改修項目、現在の状況などについて、加速器ごとに以下に列記する。

### 3.1 大強度線形加速器

現在使用している熱電子銃は、50 年前に製作されたもので、既にメーカーからカソードなどの部品供給が終了されており、予備もなくなくなってきたため、代替品の準備を進めている。全く新たな電子銃を導入することは、予算的な制約から困難であり、現状ではカソード及びその周辺のみ最小限の変更での対応を予定している。また、現在使用している直径 16.5 mm のディスペンサーカソードは大電流運転用として設計されたもので、現状の放出電流 (300 mA) での運転では電子銃部で過収束となっており、ビーム透過率を悪くしている要因となっている。Figure 2 に新たに構築したカソード部を示す。カソードには直径 8 mm の EIMAC Y646B を用い、電子銃のハウ

ジング部はそのまま現在の物を使用する予定である。E-GUN と PARMELA を用いた評価の結果では、現状より 2 倍多い 200 mA 以上のピーク電流が加速管下流で得られると見込まれている[3]。既にカソードの組み立てを終え、実際に高圧を印加してのビーム試験の準備が進められている。

目下の問題としては、長時間の運転中に真空悪化により電子銃下流部のイオンポンプがダウンしてしまい、運転中断を余儀なくされることがしばしばあり、新たな電子銃の準備が終了した時点で、経年劣化により排気能力の低下したイオンポンプの交換を行う予定である。

この他、運転開始から 50 年が経過するモジュレータ内部のインターロック回路の更新など、加速器を安定に運転するための地道な改修作業も継続して行っている。また利用運転の更なる高度化を目指して、コンバーターからの制動放射ガンマ線の空間分布測定やその最適化などにも取り組んでいる[4]。

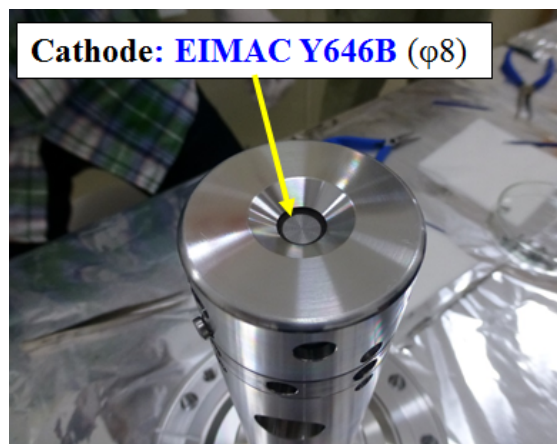


Figure 2: Newly prepared cathode for electron gun.

### 3.2 入射用線形加速器

昨年度末になって、電子銃からの放出電流が不安定になる現象が散発するようになり、運転に支障をきたし始めていた。ITC RF-gun のカソードセルの反射電力波形に異常が見られており、カソード近傍での放電が疑われたため、年度末の停止期間のタイミングでカソードの交換作業を行った。取り外したカソードを確認したところ、直径 3 mm の CeB<sub>6</sub> カソードの外周側に、ひげ状の析出物が生成されているのが確認され、これが放電の原因となっていたことが判明した。このカソードは取り付けから 13 か月しか経過しておらず、同じ電子銃で長期間の運転をしている t-ACTS では、このような現象は発生していないため、原因はまだ特定できていない。違いの一つとして、入射器の電子銃では真空度が 10 倍程度悪いことがあり、カソード近傍の残留ガスが影響を与えていることも考えられるため、今回の作業にあわせてイオンポンプの増設を行った。

### 3.3 BSTリング

昨年度は比較的順調に共同利用が実施できていたが、半日程度の中断を要したトラブルが 5 回ほど発生した。原因は主に 1997 年の運転開始当初から使用していた

古い電源の故障に起因するものであり、現在、計画的に更新作業を進めているところである。またイオンポンプの経年劣化による排気能力の低下も深刻であり、リングの周回電流を制限している要因の一つとなっている。24 台あるイオンポンプの内、建設当初から運転している 16 台のイオンポンプについて、セル交換したイオンポンプとの入れ替え作業を順次進めており、今夏の停止期間中に大半の入れ替えが終了する予定である。この他、真空容器での渦電流による加速途中のダイナミックなビーム軌道変化を補正しているステアリング電磁石の制御方式を、より追随性の高いシステムに更新することで加速中のビーム損失の抑制もなされており、更に応答速度の速い電源への更新作業も今夏に予定されている[5]。

### 3.4 t-ACTS

現在、主として短バンチ生成実験やコヒーレント遷移放射を用いたビーム診断システムの構築、アンジュレータからの超放射発生実験の準備などが進められている[6, 7]。またシリカエアロゲルからのチェレンコフ放射を用いることで、高周波電子銃で生成した電子バンチの縦方向位相空間分布をシングルショットで測定できるユニークなモニターの開発なども進められている[8]。

### 3.5 制御・ユーティリティ関連

逼迫する運転経費の節減のために、種々の対策を行っている。冷却系の運転に負担の大きい夏場は運転を完全に停止しているが、それ以外にも連続する所内ユーザーのマシントイムは昼夜連続で運転し、週末だけでなく平日も完全停止できる期間を長くとするなどの運転管理を行っている。また大学側からの支援を得て、部分的に実験室の照明を水銀灯から LED 電灯に交換できたことも、経費節減への寄与は少なくない。

施設関連のトラブルとしては、加速器の運転中に東北電力の特高送電ラインの事故により瞬停が発生し、その際に生じたインターロック系の不具合により、加速器系冷却塔ファンが異常停止しているにもかかわらず異常が表示されないまま加速器の運転が再開されたことがあった。この時は負荷側の装置のインターロックにより早い段階で異常に気付いたが、ハードワイヤでのインターロックが構築しにくい場合には特に、制御系が正常に動作しないことも想定した安全対策が大切である。

この他、本センターに特有な状況の一つとして、夜間や休日の加速器の運転状態維持を、加速器担当以外のセンター職員が担っていることがある。このためビーム運転の開始や中断・停止といった基本的な操作はもちろん、ビーム電流量の調整といったことも簡単でかつミスを生じにくいようなユーザーインターフェースの構築を心がけている。更にユーザーが実験の進捗を容易に把握できるように、立ち上げから照射までの加速器の状態遷移や照射時間を表示するコンソールを新たに用意するなど、細かな改善も継続して進めている。

## 4. まとめ

大震災後の運転再開から3年を経過し、利用運転もようやく軌道に乗ってきたように思われる。建設から50年を経過する大強度線形加速器では、致命的な故障が何時どこで起きていても不思議はないかもしれないが、モジュレー

タや電子銃などについても少しずつでも着実に更新作業を進めている。入射器や BST リングについては、概ね順調に稼働しているが、長期にわたる連続運転時の運転要員の確保が問題となっている。これまでは外部ユーザーの場合は平日の日中のマシントイムが割り当てられ、夜間や週末は一時中断状態で保持されてきたが、電気代の節減のためには可能な限り昼夜連続で運転し、完全停止できる時間をまとめて作る必要があり、限られた運転経費のもとで夜間や休日の運転要員を如何にして確保するかが課題である。

## 謝辞

本年、前身の核理研が設立されてより50周年という大きな節目を迎えることができました。ひとえに偉大な先人たちの努力とともに、多くの方々のご支援やご協力によるものと、この場を借りて深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] S. Kashiwagi *et al.*, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.23, 2015.
- [2] F. Hinode *et al.*, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.146, 2015.
- [3] S. Miura, private communication.
- [4] K. Takahashi *et al.*, Proceedings of IPAC2016, Korea, p.1766, 2016.
- [5] F. Hinode *et al.*, Proceedings of IPAC2016, Korea, p.701, 2016.
- [6] H. Saito *et al.*, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, MOP067, 2016.  
T. Abe *et al.*, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, MOOL01, 2016.
- [7] S. Kashiwagi *et al.*, Proceedings of IPAC2016, Korea, p.1760, 2016.
- [8] K. Nanbu *et al.*, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, TUP085, 2016.