

## 東北大学電子光物理学研究センターの現状報告

### STATUS REPORT OF RESEARCH CENTER FOR ELECTRON PHOTON SCIENCE AT TOHOKU UNIVERSITY

日出富士雄<sup>#</sup>, 柏木茂, 鹿又健, 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, Ken Kanomata, Yoshinobu Shibasaki, Ken Takahashi, Ikuro Nagasawa,  
Kenichi Nanbu, Toshiya Muto and Hiroyuki Hama  
Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University

#### Abstract

In Research Center for Electron Photon Science (ELPH) at Tohoku University, a lot of research and educational activities, such as the quark/hadron nuclear physics, the nuclear chemistry and RI production, the detector R&Ds at the test beam lines etc., have been conducted as a part of Joint Usage / Research Centers since FY 2011. For the experimental study of nuclear physics as well as the application at the test beam lines, high energy gamma rays generated by the bremsstrahlung in the 1.3 GeV booster storage ring have been actively utilized. Meanwhile, in addition to the joint usage program that has been implemented for many years with the high-intensity linac, we have also started the new business, short-lived nuclear RI supply platform, since April 2016. The current status of machine operation and also recent improvements of the accelerator complex are reported.

#### 1. はじめに

東北大学電子光物理学研究センターは、1966年に理学研究科附属原子核物理学研究施設(核理研)として発足して以来、学外にも開かれた共同利用施設として運用されてきたが、2009年12月に大学附置の研究センターとなり、その後2011年4月からは共同利用・共同研究拠点(電子光物理学研究拠点)として、核物理をはじめ、核・放射化学の研究や検出器開発など、広く利用研究に供されている。Figure 1に共同利用加速器施設を示した。第1実験室では、大強度linacからの電子ビームによって白金などのコンバーターを介して生成したガンマ線を標的試料に照射することで、光核反応によるRI製造を行っている。またブースター蓄積(BST)リングでは2本のガンマ線ビームライン(NKS2とFOREST)を第2実験室とGeV- $\gamma$ 実験棟に有し、震災後に新たに建設された入射専用linacからの電子ビームをBSTリングにて最大1.3 GeVま

で加速した後、制動放射により高エネルギーガンマ線を生成することで、これを用いたクォーク・ハドロン核物理の研究やテストビームラインでの検出器開発などが活発に行われている。その他2010年に竣工された光源加速器棟においては、50 MeV試験加速器(t-ACTS)を建設し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を進めている。また昨年4月からは、新学術領域研究の取り組みとして、阪大核物理研究センターなどとともに短寿命RI供給プラットフォーム事業も展開している。これら加速器群の現状やセンターの利用状況、今後の整備計画などについて、以下に報告する。

#### 2. 運転の現状

##### 2.1 ビーム性能と利用状況

各電子加速器のビーム性能をTable 1に示す。大強

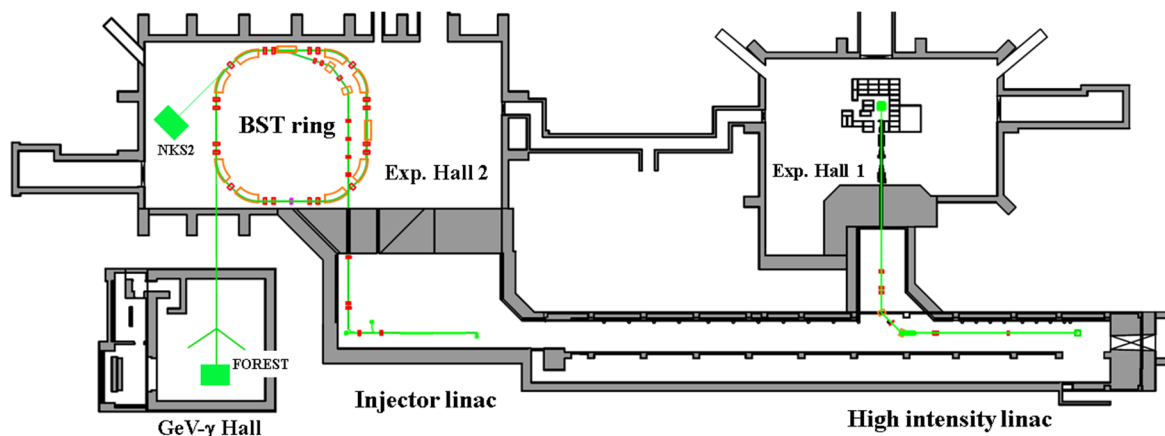


Figure 1: Accelerator complex in ELPH, Tohoku University.

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

Table 1: Beam Performances

High intensity LINAC	
energy	10 ~ 60 MeV
normalized emittance	~ 80 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$
max. repetition rate	300 Hz
macropulse duration	~ 3 $\mu\text{s}$
current (peak/average)	130 mA / 120 $\mu\text{A}$ @ 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	30 ~ 50 MeV
bunch charge	1 ~ 10 pC/bunch
normalized emittance	< 10 $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$
minimum bunch length	< 100 fs (rms, @~ 30 MeV)
macropulse duration	~ 2 $\mu\text{s}$

度 linac の代表的な運転エネルギー (50 MeV) での平均ビーム電流は 120  $\mu\text{A}$  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。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  $\alpha$  電磁石、2 本の 3 m 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  $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$  以下である[1]。BST リングは、大震災からの復旧の際に最大エネルギーを 1.3 GeV に増強するとともに、6 極磁場を重畳した複合型 4 極磁石を導入することで色収差補正を可能とした[2]。典型的な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。大強度 linac との同時運転時には、契約電力の制約によりデューティーサイクルを更に半分程度に下げることがあり、このためマシンタイムの調整に苦慮している。t-ACTS 試験加速器では、入射器と同じく電子銃に ITC RF-gun を用い、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生成と光源開発の研究をしている[3, 4]。現在は、ImPACT プログラム (「ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿社会の実現」佐野雄二プログラムマネージャー) の一部として、高エネルギー加速器研究機構の山本樹教授が開発しているマイクロアンジュレータの評価試験を実施している[5]。その他、低屈折率のシリカエアロゲル薄膜から発生するチェレンコフ光を用いたビームモニターの開発研究なども行っており[6]、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利用も視野に入れて開発を進めている。

## 2.2 稼働状況

最近の運転時間の推移を Figure 2 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 年度後半より利用運転を再開した。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、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 時間の運転を実現している。また延べ利用者数も 2 年続けて 1000 人を超えるまでに回復してきている。昨年度の採択課題数は大強度線形加速器が 6 件、BST が 21 件で、本年度も順調に共同利用が進められている。その他、2016 年度より、新学術領域研究「学術研究支援基盤形成」リソース支援プログラムとして、短寿命 RI 供給プラットフォーム事業を大阪大学核物理研究センター、理化学研究所仁科加速器研究センター、東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターとともに展開している[7]。特に電子光センターでは、サイクロトロンで作りにくい中性子過剰側の RI が製造できる利点を踏まえ、( $\gamma$ , p) 反応により生命科学分野で需要のある無担体  $^{42}$ ,  $^{43}\text{K}$  の製造などが行われている。

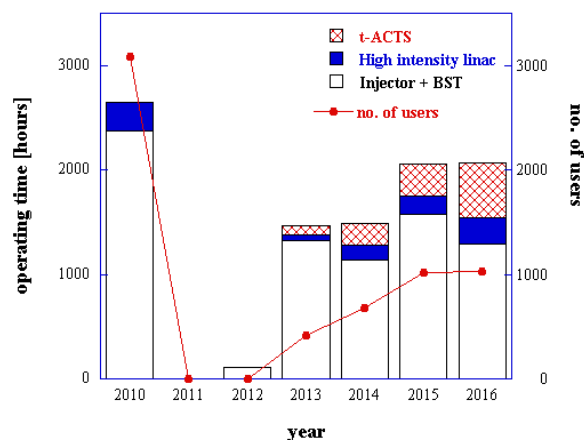


Figure 2: Operating time and number of users.

## 3. トラブルと更新計画

### 3.1 トラブルと改善作業

以下に最近の主要なトラブル事例と改善作業の概要を列記する。

- 熱陰極高周波電子銃での放電  
入射器で使用している高周波電子銃において、陰極空洞で放電が発生し、ビームが取り出されなくなる現象が約 1 年の間隔で発生している。放電の原因は CeB<sub>6</sub> 熱陰極と空洞壁の間に炭化物状の物が析出するためであるが、t-ACTS で使用している同一モデルの電子銃においてはみられないため、なぜ入射器で発生するのか未だ明確になっていない。入射器用電子銃においては真空度が若干高い (~5E-6 Pa) ことが原因と推測されたため、電子銃近傍にイオンポンプを増設したが、改善は見られなかった。陰極自体が使用不能と判断された訳ではないが、現在は放電が生じ始めたら陰極を交換することで対処している。
- BST 用クライストロン高圧電源の故障

クライストロン電源のインバーター回路(IGBT)が故障し、利用運転が中断するトラブルがあった。故障したIGBTは既に廃番になっており、同等品も存在しないため修理には設計変更が必要となり、時間と費用の面から容易ではない。幸いにも、最大定格は利用運転時の出力より十分に余裕があったため、10台ある高圧ユニットから故障した回路を含めて2台を外した8台で運転を行うことで、1週間を経ずに運転を再開することができた。この電源は年頭にメーカーによる定期点検を実施した際には異常は認められなかったが、既に製造後20年が経過しており、経年劣化が原因と推測されるため樂觀は許されない。これまでクライストロン電源を半導体アンブ化するための予算要求を続けてきたが、いよいよ深刻さが増している状況である。

- 瞬停による冷却塔ファンの異常停止

東北電力の事故により比較的長い瞬停が発生し、この影響により加速器系冷却塔の空冷ファンが異常停止した。しかし異常検知系の誤動作と重なり、空冷ファンの停止が認識されないまま熱負荷がかかってしまい、通常25°C程度の冷却水温が40°C超まで上昇するトラブルがあった。この水温上昇による被害はなかったが、近年は年に1~2回の頻度で異常を伴う瞬停が発生しているため、今後に備えて加速器オペレーターが迅速に異常を把握できるように冷却水温のモニターを整備した。

- 大強度 linac 用モジュレータの絶縁油交換

10年以上にわたって交換していなかったモジュレータ内部にあるチャージングチョークやシャントダイオード等のオイルタンクの大半で耐圧劣化が認められたため、長期停止期間中に特に劣化の著しいタンク内の絶縁油を交換した(Figure 3 参照)。また、この際にタンク内のシャント回路素子(キャパシタ、ダイオード、抵抗)の半数程度が破損していることも判明し、交換した。本年度末に残りの絶縁油交換と素子の健全性確認を予定している。

- BSTリングの真空度改善

BSTリングのイオンポンプの経年劣化による排気能力低下も顕著で、運転時の真空度(~E-5 Pa)が

あまり改善しない状況であった。幸い使用していたイオンポンプの交換用セルがまだ入手可能であったため、建設当初から運転している16台のイオンポンプの内12台までの交換を終了した。今年度の停止期間中に残りの交換が終了する予定である。

- 制御システムの改善・更新

制御システムは概ね順調に稼働している。古い電磁石電源の更新と合わせて、システムの改善・更新も地道に進めている[8]。

## 3.2 更新計画

電気設備の更新は、特高変電所のガス遮断機(H19)以降、特高変電所変圧器更新と電気室非常用発電設備更新(H21)、電気室高圧操作盤と変圧器の一部更新(H25-26)と実施されてきたが、最終となる電気室変圧器と低圧配電盤の更新が本年度末に実施されることとなった。また非密封 RI 取扱いに関連した第1実験室の床・壁面の改良工事も学内の予算措置を得ることができたため同時期に実施することとなり、本年度は例年よりも運転期間を大幅に縮小せざるを得ない状況である。

大強度 linac においては、メーカーからの部品供給が終了した熱電子銃陰極について、代替品(EIMAC Y646B)の準備が進められており、間もなく単体でのビーム試験を実施する予定である[9]。また性能改善に向けた照射システムの評価や更新も進行中である[10]。

## 4. まとめ

大震災後の運転再開から4年が経過し、順調に利用運転を継続している。建設から50年が経過した大強度 linac では、モジュレータや電子銃などについて地道に更新・改修作業を進めている。入射器やBSTリングについても概ね順調に稼働している。連続運転時の運転要員の確保が問題となっているが、施設管理の業務委託会社との間で、従来業務に加え平日の日中に対して一部の運転監視業務も担うことで契約ができた。しかし長期にわたる昼夜連続運転の際の要員確保は、運転経費の問題と共に今後の課題として残っている。

## 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] S. Kashiwagi *et al.*, Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, WEOM03, 2017.
- [4] H. Saito *et al.*, Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, WEP013, 2017.
- [5] S. Yamamoto *et al.*, Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, THOL11, 2017.
- [6] Y. Saito *et al.*, Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, WEOM04, 2017.
- [7] <https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~ripf/>
- [8] I. Nagasawa *et al.*, Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, TUP103, 2017.
- [9] S. Miura *et al.*, Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, WEP109, 2017.
- [10] K. Takahashi *et al.*, Proc. of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, TUP008, 2017.

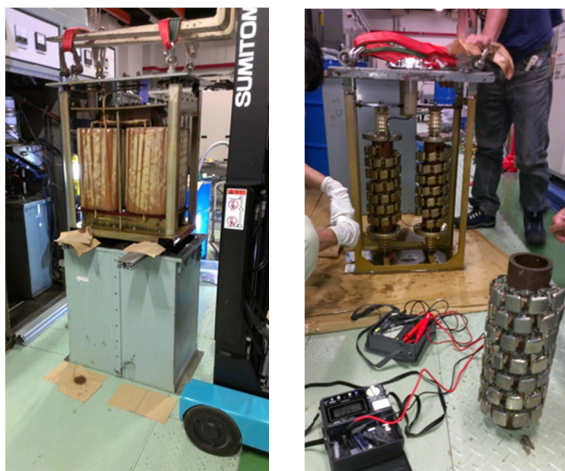


Figure 3: Oil tanks for charging choke (left) and shunt diodes (right).