

# PRESENT STATUS AND UPGRADE OF THE L-BAND LINAC IN 2011 AT ISIR, OSAKA UNIVERSITY

Goro Isoyama<sup>#</sup>, Ryukou Kato, Keigo Kawase, Akinori Irizawa, Kazuya Furukawa, Akira Tokuchi, Shoji Suemine  
Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University  
8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

## Abstract

We report the present status and the upgrade of the 40 MeV, L-band electron linac at the Research Laboratory for Quantum Beam Science attached to the Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University. The linac was operated as usual for 207 days in the fiscal year 2010. The major troubles are malfunctions of one of the three RF amplifiers for sub-harmonic buncher system, a breakdown of the automatic voltage regulator for the klystron modulator owing to breakage of IGBT, and a trouble in the compressor of the cooling water system. We also report the upgrade of the klystron modulator, renewal of one of the three RF amplifiers for SHB system, and development of a 24 MHz high-speed grid-pulsar for the thermionic electron gun.

## 阪大産研 L バンド電子ライナックの現状と性能向上 (2011 年)

### 1. はじめに

L バンド電子ライナックは、大阪大学産業科学研究所附属量子ビーム科学研究施設（平成 21 年 4 月 1 日研究所の改組のより発足）が所有する 3 台の電子ライナックの 1 台であり、熱陰極電子銃と、周波数が 108 MHz の RF 空洞 2 台と 216 MHz の空洞 1 台からなるサブハーモニックバンチャー（SHB）システム、周波数 1.3 GHz のプレバンチャー、バンチャー、長さ 3 m の加速管から構成され、電子ビームの最大加速エネルギーが 40MeV で電荷量が最高記録で 91 nC の大強度単バンチ電子ビームを加速することが出来る。ライナックは、昭和 53 年（1978

年）に完成して以来、大阪大学の共同利用に供されており、マイクロ秒からナノ秒、サブピコ秒に至る広い時間領域のパルスラジオリシスによる放射線化学の研究や赤外自由電子レーザーの開発研究などに利用されている。平成 14 年（2002 年）に大規模な改修を行い、運転の再現性と安定性が格段に向上した。

L バンド電子ライナックの平成 22 年度の運転と保守及び故障の状況、性能向上と開発研究の現状を報告する。

### 2. 運転状況

平成 22 年度の L バンドライナック運転日数を月別、モード別に図 1 に示す。過渡モードは、ナノ秒パルスラジオリシス用の運転モードであり最も利用頻度が高い。単バンチモードは、サブピコ秒パルスラジオリシスや SASE の発生実験、マシンスタディーなどに使用する。マルチバンチモードは、FEL 用の運転モードである。今年度から共同利用の枠が拡大されて、従来から行っている量子ビーム科学研究施設の共同利用 24 研究課題に加えて、物質・デバイス領域共同研究拠点の施設・設備利用の 3 研究課題が採択された。前期は保守作業の 18 シフト（日）を含む 118 シフトが、後期は保守作業の 19 シフトを含む 119 シフトが分配された。保守運転を含む平成 22 年度の運転日数は 207 日であり、運転時間実績は 2,590 時間である

### 3. 保守及び故障の状況

今期は年度初めから多くの故障に見舞われた。サブハーモニックバンチャー(SHB)用高周波増幅器 2 号機の RF 出力が出なくなったため、4 月 1~2 日の単バンチモードと 14~16 日のマルチバンチモードの利用を計 5 日停止した。調査の結果、真空管駆動用の 500W 半導体増幅器から RF が出ないことが判明した。原因は、貫通コンデンサと呼ばれる部

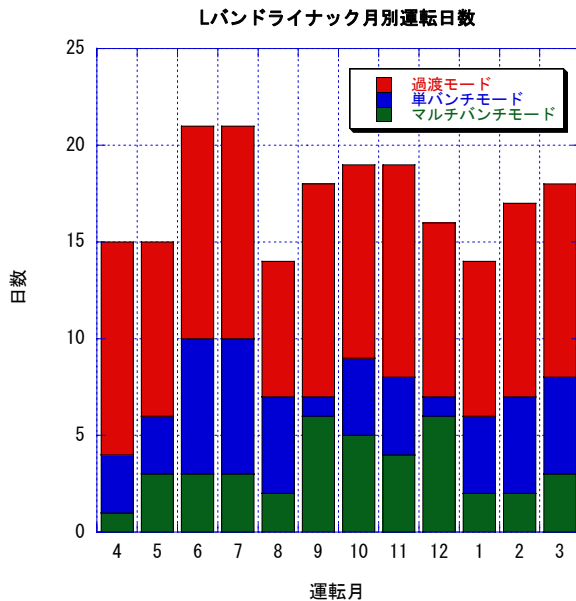


図1:平成 22 年度 L バンドライナック月別運転日数

<sup>#</sup> isoyama@sanken.osaka-u.ac.jp

品が経年変化により故障したものと診断され、同種の部品をすべて交換し、正常動作を確認した。しかし修理を終えたトランジスタアンプを本体に組み込んで試験運転をしたところやはり RF の出力が出ない。その原因を調べたところ、初期の故障調査で真空管アンプの同調が大きすぎていたことが判明した。破損した部品を取り換え再調整することにより正常に復帰した。

この故障の解決に 2 週間以上を要したが、この期間に別のトラブルが発生した。運転中にクライストロン・モジュレータが、インバータ電源の回路保護用速断ヒューズが溶断して停止した。以前の故障で、速断ヒューズが切れた時は、IGBT (絶縁ゲートバイポーラトランジスタ) の 1 個が破損していたので、今回もその可能性が高いと考え、速断ヒューズと共に IGBT を手配したが、その後の調査で IGBT に異常が無いことを確認した。速断ヒューズの入手後に通常の運転に復帰した。この故障による停止は 4 月 7-9 日の 3 日間である。

4 月 26 日の立ち上げ時、修理したばかりの SHB 用高周波増幅器 2 号機で再び RF 出力が無くなった。この時はリセット操作により復帰したが、5 月 17 日の保守運転時に再び RF が出なくなった。故障の原因はトランジスタアンプの前段にある位相制御部の DC カットコンデンサ内部での接触不良であり、コンデンサを交換して正常運転に復帰した。

7 月以降、冷却系のトラブルが続いた。7 月 8 日に冷却塔 CT-3 系のポンプが、分電盤内の制御系ブレーカの接触不良で停止した。8 月 19 日と 8 月 27 日には、CT-3 系冷却送風機が停止したことにより、冷却水装置のコンプレッサーの高圧カットアラームでライナックが停止した。昨年度末に更新した冷却塔送風機の定格電流が、以前のものよりも増加したことにより、マグネットスイッチのサーマルリレーが動作したことが原因と考えられるため、サーマルリレーの設定値を 9A から 11A に変更した。

9 月 6 日の立ち上げ時、クライストロン・モジュレータの高電圧用ブレーカ投入と同時に電源ランプが消灯し、自動電圧安定化装置 (AVR) のブレーカが落ちた。AVR の IGBT とその制御回路基板の破損

が故障の原因である。故障原因の調査中は AVR をバイパスしてクライストロン・モジュレータを立ち上げ、マシンタイムを継続した。図 2 に示すように IGBT は全体にクラックが入り、その一部は飛び散っていた。また、IGBT の短絡時に大電流が流れたことにより速断ヒューズも溶断した。IGBT 破損は、モジュレータ電源のブレーカを投入したときにトランスの突入電流が非常に大きいため IGBT の受けるストレスが蓄積されたためと考えられる。幸い同型の AVR が 2 台あるため、他の AVR から必要な部品を移植してシステムを復旧した。後日部品が入手できた時点で 2 台目の AVR を復旧した。この抜本的な対策については後述する。

9 月に入りマルチバンチモード時のビーム電流の変動が顕著になった。調査の結果、この変動はプリバンチャー用可変減衰器の減衰率に強く依存することが判明した。RF 伝送線路のプリバンチャー系統を調べたところ、3 台使用している同軸終端器 (ダミーロード) のうち 2 台がショートしており、残る 1 台に接続した同軸ケーブルは、コネクタ取り付け部が焼損していることが分かった。このケーブルの反対側はプリバンチャー用可変減衰器に接続している。同軸終端器は、ライナック建設当初からのもので、どの時点で故障したかは確定できない。他方、接続ケーブルは 2002 年から 2003 年にかけて行ったライナック改造の時に更新しているため、損ケーブルが不良品であったか、昨年度 RF 電力分割器 (ハイブリッド) の分割比を変更したことが原因と考えられる。同軸終端器は、電力容量の大きなものに交換した。

10 月 27 日の立ち上げ時、SHB 用高周波増幅器 1 号機が起動しないトラブルが発生した。制御用 PLC の CPU モジュールで ERROR ランプが点灯していたため、診断ツールで調べるとメモリ異常エラーであることが分かった。CPU モジュールを予備品と交換し、プログラムをロードすることで復旧した。

11 月 10 日には暖機運転中に再び冷却塔送風機の停止が原因で冷却装置が停止した。分電盤内の制御系ブレーカブレーカの再投入で復旧したが、頻度が増えてきたため、交換用のブレーカを準備した。

9 月から 12 月にかけてヘルムホルツ系の電磁石電源が通信異常エラーで停止することが頻発した。HC-PS-S1 で 10 回、HC-PS-S16 で 1 回発生したが、年が明けてからはまだ発生していない。

12 月以降は FEL ビームラインの偏向電磁石電源 BM-PS-F2 にトラブルが生じている。12 月 1 日に出力停止状態から復帰できなかったため予備品と入れ替えたが、それ以降 FEL ビームライン使用時には 1 日に数回出力が停止している。ただし、リモートリセットで復帰しているため、電源の入れ替えは行っていない。

1 月 17 日の立ち上げ時、イオンポンプ電源 IP-PS-7 がエラー表示で停止していた。予備品に入れ替えて立ち上げると放電音が聞こえるため、高圧ケーブルを点検したところ、途中で焼け焦げている箇所を発見した。ケーブルを入れ替えて動作を確認し、



図 2 : 破損した自動電圧安定化装置の IGBT

電源を元に戻した。

## 4. ライナックの性能向上と開発研究

### 4.1 クライストロン・モジュレータの改良

自動電圧安定化装置 (AVR) の IGBT がこれまでに 2 回破損する故障が起きたが、ブレーカ投入時に流れる主回路トランスの過大な突入電流と推定されている。この突入電流が流れるのは、わずか数マイクロ秒程度の時間であるが、IGBT の定格電流値を越えており、このストレスが数年間にわたり蓄積し続けたことで破損にいたったと考えられる。この対策として、突入電流抑制ユニットを製作し、モジュレータに取り付けた。本ユニットは電磁接触機とそのバイパスラインとなる並列抵抗により構成される。AVR 出力がブレーカを介してユニット回路側入力に接続され、ユニット回路出力がモジュレータの主回路トランスに接続される。ブレーカ投入当初は、入力に AC200V が接続されても電磁接触機が OFF 状態なので、並列抵抗を通して出力に電圧が出る。出力に電圧が出ると、主回路トランスの突入電流が流れるが、並列抵抗を通して流れるので突入電流は最大でも 100A (ピーク電流は 141A) に抑制される。この値は IGBT の定格電流 600A 以下である。電磁接触機はブレーカ投入後 40ms で導通し、それ以降主回路電流は電磁接触機を通して流れ、並列抵抗には流れなくなる。取り付け完了後、運転状態でのユニットの出力電流を確認した。また数回のブレーカ投入繰り返しによる並列抵抗の温度上昇も認められていない。本ユニットは正常に動作しており、日々の立ち上げ時に IGBT に流れる突入電流は定格以下押さえ込まれていると考えられる。

### 4.2 SHB 用トランジスタアンプ

SHB システムの 108 MHz 空洞 2 台と 216 MHz 空洞 1 台のそれぞれに RF パワーを供給する真空管アンプは、平成 14 年 (2002 年) の大規模改修では更

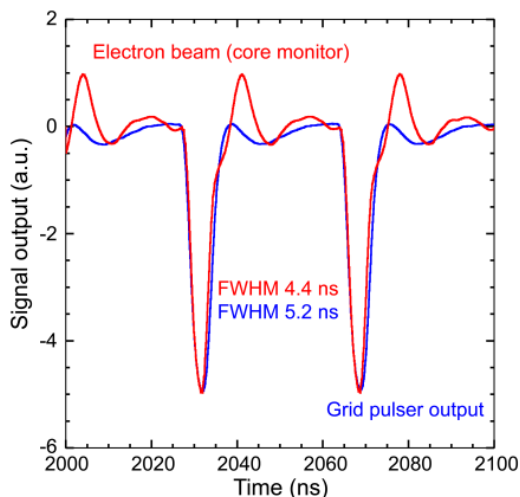


図 3 : グリッドパルサーの波形と電子ビームの波形の比較

新ではなく改造するに止めて現在に至っている。前述のように老朽化による SHB 用 RF アンプの故障が頻発している一方、各アンプに 2 種類 2 個使用している真空管の価格が上昇していること、注文を受けて製造するために納期が長いことや 1 個単位で購入することが出来ないために高額になること、信頼性が低下して性能や寿命に不確実があることなどの問題がある。他方、半導体アンプにはこれらの問題はないが、高額で導入することが出来なかった。しかし近年、暗胴体アンプに使用する FET の技術開発が進み、従来 25V の最大電圧が 50 V で動作する素子が利用可能になり、出力パワーあたりの価格が低下した。この機会を捉えて、3 台の SHB アンプを順次更新する事にした。

最初の 1 台に上流から 2 番目の 108 MHz 空洞用パワーアンプを更新することにした。アンプの仕様はパルス幅 100  $\mu$ s で繰返し最大 60 pps と従来のものと同じであるが、最大出力は、費用の低減と運転に必要な最大値を考慮して 20 kW から 15 kW に減らした。現有の位相制御用回路は引続き使用する。制御方式の変更を最小限にするため、入出力インターフェースとして使用している FL-net 用をそのまま利用できる PLC を導入する。

半導体アンプは年度末に納入される予定であったが東日本大震災の影響を受けて 1 影湯ほど納期が遅れた。現在は、アンプの性能試験と不具合を修正しながら制御用ソフトの製作を進める立ち上げ作業を行っている。近日中に、真空管アンプと置きかえる予定である。

### 4.3 高繰返しグリッドパルサーの開発

L バンドライナックは、熱陰極電子銃のグリッドに様々な長さの単一パルス電圧を印加して、SHB システムと組み合わせることにより 4 種類の運転モードを実現する。FEL に使用する多バンチモードは、最長 8  $\mu$ s のパルスを電子銃で発生した後、SHB システムで電子バンチを 12 分の 1 に減らすことによりバンチ間隔を 9.2 ns に拡大するが、それ以上のバンチ間隔を実現することはできない。FEL では、バンチ間隔を 4 倍に拡大すると、平均電流を変えずにバンチ当たりの電荷量、あるいはピーク電流を 4 倍に増大することが出来る。これを実現するために繰返し 27 MHz でパルス幅 5 ns を 8  $\mu$ s 以上発生することが出来るグリッドパルサーを開発している。

最大 180 V の使用が可能で動作が比較的速い FET (Hitachi, 2SK408) を使い 27 MHz グリッドパルサーを製作した。電子銃テストベンチで実際に電子を取り出しこの性能を評価した。図 3 にグリッドパルサーの波形と電子ビーム波形の測定値を示す。電子ビーム波形はコアモニターを用いて測定した。グリッドパルサーのパルスは間隔が 37 ns で半値幅 4.4 ns であり、電子ビームの半値幅は 5.2 ns と目標値の 5 ns に近い値である。現在、実用化に向けた開発を進めている。