

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

Goro Isoyama, Ryukou Kato, Shigeru Kashiwagi, Yutaka Morio,
Yoshikazu Terasawa, Kenichiro Furuhashi, Naoya Sugimoto, Shoji Suemine
Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
8-1 Mihogaoka, Ibaraki Osaka, 567-0047

Abstract

The 40 MeV, L-band electron linac at the Institute of Scientific and Industrial Research (ISIR), Osaka University was operated for 2,400 hours in the fiscal year 2008 with a few troubles. The most serious problem in operation and maintenance of the linac was malfunctions of the thyatron for the klystron modulator. The problem has been solved by replacing it with a more reliable and time-tested model, L-4888B of L3 communications. In order to improve performance of the linac, three RF cavities for the sub-harmonic buncher system have been renewed and commissioned successfully for higher operational stability. Two new power dividers with different coupling ratios have been purchased for operation of the linac at energies lower than 10 MeV and low energy operation of the linac was tested successfully with one of the power dividers.

阪大産研Lバンド電子ライナックの現状と性能向上

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、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）システムと、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40 MeV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20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20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される。マルチバンチモードは、FEL用の運転モードで、定常モードはビーム強度が必要な照射実験用運転モードである。今年度は、24件の研究課題が共同利用に採択された。前期は保守作業の21シフト（日）を含む120シフトが、後期は保守作業の18シフトを含む118シフトが分配された。保守運転を含む平成20年度の運転日数は204日であり、運転時間実績は2,400時間である。

3. 保守及び故障の状況

昨年3月にSHB用RF空洞3台を更新し、4月の第1週もその立ち上げ作業を行った。第2週と第3週は、通常の運転に影響を与えないようにタイミングをずらしてSHB空洞にRFを入力し、過渡モードでビーム利用を行いながら、空洞のエイジングを進めた。新しいSHB空洞を用いる単バンチモードの利用実験は第4週から開始した。

昨年度から引き続き問題となったのはクライストロン・モジュレータ用のサイラトロンである。平成

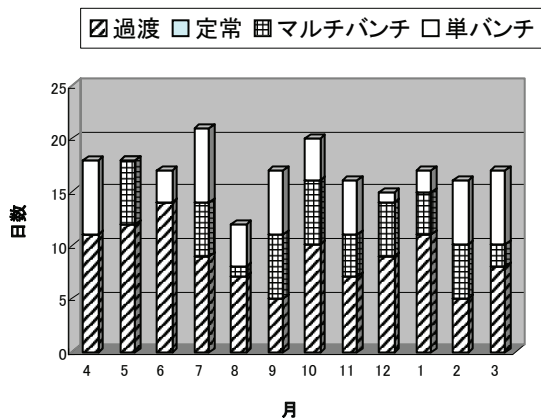


図1 平成20年度Lバンドライナック月別運転日数

20年2月に交換したばかりのサイラトロン（e2v社製CX-1528）が4月の最初のマシンタイムで突然不調になった。前年度はサイラトロン交換を2回行ったため、すでに予備がなくなっており、モジュレータ・メーカーから互換性のあるサイラトロン（e2v社製CX-1171）を借り受けて仮復旧した。抜本的な解決のためにKEKの専門家の助言を得て、実績のあるサイラトロン（L3 communications社製L-4888B）に変更することにした。これはStanfordの線型加速器で長年使用されてきたサイラトロンの互換品で、KEKのKEKB電子・陽電子入射器で採用されているものである。電源仕様の確認の後、取り付け用架台板を準備したうえで、5月にKEKから中古品1台と新品1台を借り受けた。中古品はKEKでの使用電圧40kVを満足できなくなったため取り外して、保管されていたものである。産研での使用電圧は最大25kVであることからまだ十分使用可のであると考へ、最初は中古品を使用した。これまで使用してきたサイラトロンは補助グリッド（G1）にプレトリガーを入力し、1 μ s程度後にコントロールグリッド（G2）にトリガーパルスを加えることでスイッチさせている。これに対し、L4888BはG1グリッドにDC電圧をかけるキープアライブと呼ばれる方式を取る。最初はキープアライブ回路への変更が間に合わなかったため、当初の回路をそのまま用いて電圧調整のみで運転した。サイラトロンの大型化に伴って冷却風量も不足するが、これは横方向に補助FANを取り付けて補った。

6月に入ってサイラトロンが時々スイッチできない現象が観測されたが、管内の水素圧力を上げるためにリザーバ電圧を規定値から0.1V引き上げることで解消できた。反面、タイミング・ジッターが無視できなくなるので、これをグリッド電圧で調整した。翌日の立ち上げ直後に3回連続で放電音が聞こえたため、運転を中止して調査したところ、付帯電源内で放電痕を確認した。電源内部には特に問題がなかったためサイラトロンの問題と判断し、予備の新品と交換したがこれも動作しない。グリッド電源電圧を調整したが、G2トリガーのタイミングで動作させることは出来なかった。原因を調べたところ、サイラトロンのグリッドG1とG2が共通の高圧電源を使用するために独立に電圧を調整する範囲に限られる。そのためG2のバイアス電圧調整範囲である-200Vから-130Vの範囲では既存のトリガーパルス回路で動作させることが出来ないことが判明した。他方、グリッド電源電圧を上げると、G1トリガーのタイミングから0.6 μ s程度遅れて動作するのが観測された。このときのタイミング・ジッターは5分間測定時のpeak-peakで9.2ns程度であったため、当面G1トリガーで運転することにした。翌週、付帯電源回路の抵抗値を調整してG1とG2のグリッド電圧差を調整し、G2トリガーでの運転に戻した。8月の夏期保守日に、G1のキープアライブ回路への変更とリザーバ電圧用のトランス変更（100VA \rightarrow 200VA）、冷却FANの大型化とアクリル製風洞の取付けを行った。新しいサイラトロンと取付け架台の写真を図2に示す。以降、

サイラトロン周辺でのトラブルは発生していない。

8月の保守日には同時に電子銃カソードも交換した。このカソードは2006年1月から使用しているもので、これまで交換したカソードの中ではもっとも長寿命（2年半）となった。過渡モードでは特に問題となる兆候は見られなかったが、多バンチモードでは4月頃からグリッドエミッションの増加が顕著になり、長パルス運転の障害となっていた。

9月にはモジュレータ内の高周波インバータ電源からPFNに充電するための高圧ケーブルが短絡し運転を中断した。金曜日の夕方であったため、土曜日にケーブルと両端のコネクター式を取り外しメーカーに送り、修理返送してもらうことで、月曜日の午前中のうちに復旧することが出来た。

また9月後半には朝の暖機運転中に瞬間停電があり、クライストロン・モジュレータ用AVRとSHB電源用AVRがアラーム停止した。それに伴って、モジュレータとSHB電源が停止したが、早朝であったため利用には影響がなかった。

11月には冷却水装置の冷凍機No.2の高圧カットで異常停止した。調査の結果、クーリングタワー3号機（CT-3）の冷却FANが動作していないこと、動力盤のマグネットリレーの動作不良がその原因であることが判明した。一時的にこの回路をバイパスして運転を継続した。このマグネットリレーは前年度交換したものであり、使用頻度から考えて初期不良と推測される。12月の保守日にこのマグネットリレーを交換して正常復帰した。

一方、夏くらいから第2照射室ビームポートへのビーム輸送系にある偏向電磁石用の電源BM-PS-3（80A、30V）の設定電流とモニター電流のずれが観測され始め、モニター電流値を参照しながら設定値を比較的高めにすることで対処してきた。しかし、1月に入りこのずれが顕著になり、将来的にインターロックが動作することのより運転が停止する可能性が有るため、メーカーに対して調査を依頼した。原因は制御基板上のオペアンプのゲインを決めるためのフィードバック抵抗切替用アナログスイッチの不良であった。

昨年度から引き続けている主加速管から大気側へ

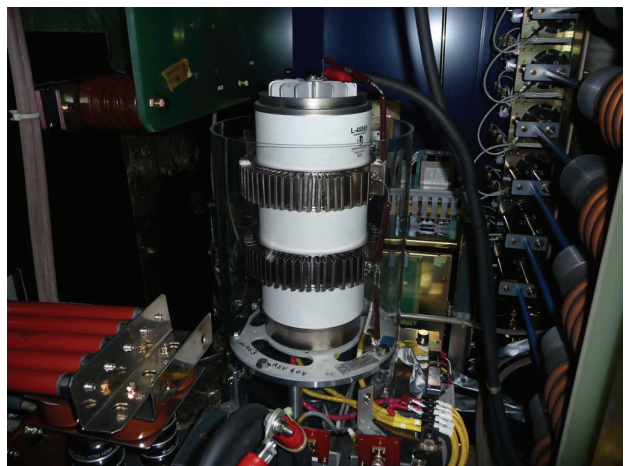


図2 新しいサイラトロン(L-4888B)とその取付け架台

の冷却水漏れはまだ継続観察中である。漏れ量は昨年と比べて増大しており、冷却水タンクへの注水間隔が短くなっている。漏れ箇所の関係で修理がほぼ不可能に近いことから、新規加速管の製作も視野に入れて検討を開始した。

4. ライナックの性能向上と開発研究

4.1) SHB空洞の更新

昨年3月の保守期間中に3台のSHB空洞の更新作業を行ない、平成20年度からその利用を開始した。SHBシステムを利用しない過渡モードでは、朝の加速器立ち上げからユーザーポートに安定なビームを供給できるまでの時間はほぼ1時間程度である。他方、SHBシステムを利用する単バンチモードでは、ビームが安定するまでに4時間以上必要であった。この主たる原因はRFパワーの入力によりSHB空洞の温度が変動するが、この温度変化による周波数変化が安定するまでにかかる時間であり、その要因としてはSHB空洞に用いられている材質とその冷却構造にある。新たに開発したSHB空洞はこれまでと同様1/4波長共振器空洞であるが、材料として肉厚の無酸素銅(C1011)を用いることで熱的な安定性を確保している。また、同軸構造の内導体とその付根の部分に冷却水を循環させることで、発熱の大きな箇所を直接冷却できる構造を採用した。その結果、室温状態から冷却水を流し始めて、空洞温度が一定の状態(38℃)に達するまでの時間は13分と短縮され、空洞の共振周波数も同時に一定周波数に達している。

当初設置した空洞にはモニター結合器としてKEKB電子陽電子入射器で使用されているアンテナ型の結合器を採用していた。これは結合度が 10^{-6} と小さいため、モニター信号を減衰させずにオシロスコープ等で観測できるという利点があった。半面、ヘルム

ホルツコイルを励磁した時に、モニターしている空洞内のRF波形にDC的なノイズが乗ること観測されていた。更新前の空洞ではループ型のモニター結合器を使用していたが、このようなノイズが観測されたことはなかった。そのため、アンテナ型の結合器による不具合と考えられる。12月の保守日にこれをループ型の結合器に変更して以降は、このようなノイズは観測されなくなった。実際にLバンドライナック入射部に組み込んで、入力結合器、モニター結合器、周波数チューナーを取り付けた状態での空洞特性の測定結果を表1に示す。計算コードSUPERFISHを用いた108MHz空洞の無負荷Q値の計算値は約8760であり、実際に製作した108MHz空洞#1と#2の測定値は各々その92.3%、91.4%を実現している。216MHz空洞の計算値は約11640であり、実際に製作した空洞の測定値はその87.8%となる。

4.2) エネルギー可変範囲の拡大

Lバンドライナックは、従来バンチャーとプリバンチャー用の5MWクライストロンと主加速管用の20MWクライストロンの独立した2台のRF源により運転していた。平成14年から16年の改修工事で、これを30MWクライストロン1台に変更した。高い安定性を持つ1台のクライストロンの出力電力をバンチャー・プリバンチャー用と主加速管用に分割することで、加速器全体の高安定化を図った。反面、電力分割比が固定されているため、従来のシステムが持つ広範囲のエネルギー可変性を失うことになった。近年、複数の利用者から、より低エネルギーでのビーム実験の要求がなされている。その要求に応じてエネルギー可変範囲を拡大するために、異なる分配比の電力分割器2台を購入して、低エネルギー運転の試験も成功裏に終えた。

表1. 新SHB空洞の空洞特性

	108MHz空洞#1	108MHz空洞#2	216MHz空洞
中心周波数 (MHz)	108.396	108.395	216.806
最大周波数 (MHz)	108.439	108.435	216.972
最低周波数 (MHz)	108.356	108.363	216.648
周波数可変範囲 (kHz)	83	72	326
負荷Q値 Q_L	1633 ± 6	1619 ± 6	1901 ± 17
無負荷Q値 Q_0	8087 ± 35	8007 ± 34	10224 ± 127
入力結合度 β_1	3.95	3.94	4.36
モニター結合度 β_2	3.37×10^{-3}	3.37×10^{-3}	1.80×10^{-2}
制御温度 (°C)	38.00 ± 0.03	38.00 ± 0.03	38.00 ± 0.03