

# 阪大産研Lバンドライナックの改造と性能評価

加藤 龍好<sup>1</sup>、磯山 悟朗、柏木 茂、山本 保、末峰 昌二、吉田 陽一、  
菅田 義英、古澤 孝弘、関 修平、田川 精一

大阪大学産業科学研究所

〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘8-1

## 概要

大阪大学産業科学研究所のLバンドライナックは、昨年度、ビームの高安定化と再現性精度の高度化を目的とした改造を行った。この改造ではクライストロン及びクライストロン用モジュレータ、サブハーモニックバンチャー用RF源、冷却水装置、電磁石電源などの機器を更新し、それらを統括する計算機制御システムを導入した。

## 1. はじめに

大阪大学産業科学研究所（以下、阪大産研）のLバンド電子ライナックは、1978年に運転を開始し、高強度の単バンチ電子ビームを加速できるライナックとして稼動してきた。最近では磁気パルス圧縮によるフェムト秒電子ビームの発生とそれを用いたフェムト秒パルスラジオリシスの実験、SASE-FELの原理検証実験、サブミリ波領域でのコヒーレント放射の光源利用など、電子ビームに対して高強度のみならず高品質や長時間にわたる安定性を要求する研究も行われるようになってきた。このような研究内容の変化は、必然的に高精度化・高安定化のための性能向上を求めることになる。昨年12月に、クライストロン及びクライストロン用モジュレータ電源、サブハーモニックバンチャー用RF源、冷却水装置など、加速器の安定化・高精度化を目指した機器更新が行なわれた[1][2]。また、今年3月には電磁石電源など残りの機器の更新と、それらを統括する制御システムの構築を行った。本研究では、Lバンドライナックの改造の概要と、改造後の機器の性能評価について報告する

## 2. 改造の目的と方針

改造の目的は、電子ビームの高安定化と、加速器運転の高精度化と自動化である。従来のLバンドライナックは、遠隔操作盤のヘリポートなどを用いて制御されており、加速器を運転するのに高度な熟練が必要であることに加えて、運転モードを制度良く再現することが困難であった。そこで今回、計算機制御システムを導入し、可能な限り全ての制御対象を計算機に接続できるように機器更新をおこなった。

ライナックの基本要素である電子銃や加速管、偏向電磁石などのについては現状のままとし、そ

れらを駆動・制御する電源、RF源、モーター類を計算機接続が可能で、より安定度の高いもの、再現性の高いものに置き換えた。

また、制御機器への配線距離と配線数を減らして、今後のメンテナンスを容易にするために、ローカルにPLCを配置して、機器をそれに接続し、PLC間はネットワークで通信させることにした。電磁石電源等も、省配線化のためにRS-485などのシリアルI/Oを持った機器への更新を進めた。

## 3. ライナック入射系

### 3.1 電子銃部

電子銃はこれまで安定化電源（BEHLMAN, BL1350）で一定の電圧を供給し、これをスライダックで調整して高圧タンク内の昇圧トランスに供給してきた。今回は、安定化電源をGP-IBで直接制御し、昇圧トランスへの供給電圧を調整することにした。また、Filamentに供給する電圧も安定化電源（高砂製作所、ARH500）から供給するように変更した。電子銃回路のFilament、Bias、Gridの電圧調整は、これまでACサーボモーターを使用していたが、これをパルスモーターに更新した。

### 3.2 サブハーモニックバンチャー

サブハーモニックバンチャー(SHPB)システムは加速周波数の1/12の周波数である108 MHzで動作するリエントラント型加速空洞2台と、1/6の周波数である216 MHzの加速空洞1台より構成される。これらの加速空洞は、それぞれ独立した真空管式RFアンプ(RCA7214&RCA7651)により励振される。今回の改造では励振部には変更を加えず、電源部と制御部を更新した。3台のSHPB空洞は、無酸素銅をステンレス（SUS316）に爆着したクラッド材で作られておりQ値が比較的高い。2台の108 MHz空洞Q値は4400であり、従来のRFパルス幅20  $\mu$ sでは、空洞電圧が一定の値に達しなかった。又、次節で述べる8  $\mu$ sの時間幅を持つLong Pulseモードでも問題が生じないように、SHPB電源のパルス幅を最大100  $\mu$ sまで延長できるようにした。

<sup>1</sup> E-mail: kato@sanken.osaka-u.ac.jp



図1：30MWクライストロン用モジュレータ電源

## 4．RF系

### 4.1 クライストロン

従来のRF源は、主加速管にRFパワーを供給するトムソン製の20 MWクライストロンと、プリバンチャー、バンチャー系用の東芝製の5 MWクライストロンの2台で構成されていた。今回の改造では、ターレス（旧トムソン）の30 MWクライストロン（TV-2022E）1台を使い、このRFパワーを3系統に分割して各加速管に供給する。このクライストロンの原型となるTV-2022Dの最大定格は30MW、7 $\mu$ sであるが、今回は通常運転用の30MW、4 $\mu$ sのNormalモードと、FEL発振実験用の25MW、8 $\mu$ sのLong Pulseモードの、2モード仕様のクライストロンとして納入された。

### 4.2 クライストロン用モジュレータ電源

30 MWクライストロン用にモジュレータ電源（ニチコン、LB-300）も更新した。この写真を図1に示す。出力パルス幅（フラットトップ）と最大運転繰返しはNormalモードで4 $\mu$ s、60pps、Long Pulseモードで8 $\mu$ s、30ppsである。PFNの総数は16段で、自己修復型コンデンサーを使用している。Normalモードでは前半の10段のみを使用する。この段数切換えとインダクタンス調整は機器のタッチパネルと計算機による遠隔制御の両方から可能である。PFNを含む高圧回路部は電磁ノイズ低減のための2重シールド筐体に収められている。

モジュレータの高圧源はIGBTを用いた高周波インバータ電源であり、設定電圧近傍で充電パルス幅を変えることでより安定度の高い充電を可能にしている。パルス毎の出力変動はフラットトップ部で0.05%以下、パルス内の電圧変動は0.1%（peak - peak）以下を目標として現在調整を進めている。

### 4.3 AVR

これまで行ってきたクライストロンのRF出力と

位相の安定性解析から、モジュレータに供給される商用電源電圧の変動がRF出力の変動の大きな要因になっていることが判っている。電源品質アナライザを用いた測定では、モジュレータへの入力ライン（3相AC200V）で、瞬間変動で4V程度、1日あたりでは6V程度の変動が見られた。

RF出力の安定性を実現するために、この入力ラインにIGBTを使用したパルス幅変調交流チョッパ方式のAVR（三菱電気、MTS-150S）を導入した。入力電圧の変動 $\pm 15\%$ 、出力側負荷変動0~100%に対して、予想される出力安定度は $\pm 0.5\%$ 以内、応答速度は30msである。

### 4.4 RFパワー伝送路

クライストロンシステムの構成変更に伴い、主加速管へのパワー伝送路から、バンチャー・プリバンチャー系のパワーを分配調整しなければならない。そのため、電力分配器と可変減衰器を導入した。既設の位相器は駆動モーターをパルスモーターに、位置読み出し用リニアスケールを更新し、新しい制御系に組み込んだ。またプリバンチャー系の同軸可変減衰器と位相器も更新した。

## 5．ビーム輸送系

### 5.1 電磁石電源

電磁石電源は偏向電磁石用6台、Q電磁石用20台、ステアリングコイル用24台、ヘルムホルツコイル用12台の計62台ある。今回の改造ではヘルムホルツコイルの4台を除く全ての電磁石電源を更新した。合わせて、制御系の入出力点数と敷設ケーブル数を減らすために、電磁石電源の制御インターフェースをRS-485に統一した。RS-485ではひとつのシリアルラインで32台の機器を制御することができる。我々は更新された58台の電源を6台のラックに収納し、一つの電源ラック毎に1本のシリアルラインで制御モジュールと接続する構成とした。

## 6．冷却水装置・空調装置

### 6.1 冷却水装置

今回の改造で導入された冷却水装置（三栄技研、AQW-K80-SPOU）は1段目の装置で変動幅 $\pm 0.1$ 度以内の冷却水を作り、これを加速管系とクライストロン系に供給する。加速管に供給される冷却水は2段目の装置でさらに $\pm 0.03$ 度以内に温度制御される。温度制御の必要のない機器には、従来用いられてきた冷却水装置から供給される。

### 6.2 クライストロン室空調装置

クライストロン室の空調装置は2年前に更新されているが、コンプレッサーのON/OFF動作により

クライストロン近傍での室温が3度程度変動する。また、クライストロン室の天井の高さが5 m程度あるため、空気の循環が不十分であることが判っていた。今回、インバータ方式の空調ユニットを天井に追加し、これまでの空調装置を送風状態で併用することで、室温は短時間変動で0.3度程度、長時間変動でもほぼ1度以下に抑えられることが確認できた。

## 7. タイミング系

新しいタイミングシステムは、高安定なルビジウム原子時計 (Stanford Research System, SR625) をタイムベースとして、信号発生器 (Rohde&Shwarz, SMIQ04B) で加速周波数の1.3GHzを直接作り出し、これを分周して SHPB用の216MHz (1/6)、108MHz (1/12)、レーザー用の81MHz (1/16)、そして電子ビームとレーザーの同期のための27MHz (1/48)を作り出す。また、スタンダードなNIMモジュールやデジタルディレイを組み合わせて用いる事で、高精度なシステムを安価に構築する。今回のLバンドライナック改造の中でも開発要素が大きな部分であるため、改造後の試験運転は従来のタイミングシステムを用いて行い、これと平行して開発を進める。このタイミング系開発の詳細については本研究会で別途報告する[3]。

## 8. 制御系

新しい制御系は、パソコン (PC) とプログラムブルロジックコントローラ (PLC) をネットワーク接続した分散制御システムである。PLCはプログラム内蔵方式でシーケンス制御を行う工業用電子装置であり、Factory Automation (FA) の分野では広く用いられている。制御室と加速器本体室にPLCを取り付けたDevice Control Station (DCS) 盤を設置して、ここに制御対象機器を接続する。図2は加速器本体室に設置されたDCSの筐体である。制御卓には、マンマシンインターフェースとして使用する複数台のPCを置くが、この中の1台がPC



図2 電子銃高圧タンクの脇に置かれた加速器本体室のDCS筐体(左)。RFパワー伝送路の制御盤(中央)、サブハーモニックバンチャー用RF源(右)。

ネットワークとPLCの仲立ちをするGateway Serverとなる。PLC - PLC間およびGateway ServerとなるPCとPLC間は、FA用に標準化されたFL-netと呼ばれる通信ネットワークで接続され、このFL-net上のデータ領域 (コモンメモリ) を共有することで相互に通信を行っている。PLCは今回の制御システムの中核となる重要な構成要素であるが、様々な点から検討した結果、今回は横河電機のFA-M3を採用した。制御系の詳細については別途報告する[4]。

## 謝辞

今回のLバンドライナックの改造では、制御系を東芝、クライストロン用モジュレータをニチコン、SHB用RF源とRFパワー伝送路を日本高周波、電磁石電源を高砂製作所と東京電子が、全体のマネジメントをコーカスが担当されました。阪大産研側の厳しい要求を受け入れて努力していただいた各社の担当の方々に御礼申し上げます。

またタイミングシステムの開発ではSPring-8の川島先生と安積先生に御指導、御協力を、モジュレータ回路の安定化では日大の早川先生に御助言をいただいております。この場を借りまして各先生方に御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] G. Isoyama, R. Kato, Y. Honda, T. Yamamoto, Y. Yoshida, T. Kozawa, S. Suemine, S. Seki and S. Tagawa, "Remodeling of the L-band Linac at ISIR, Osaka University", Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, Aug. 7-9, 2002, pp.115-117.
- [2] R. Kato, G. Isoyama, Y. Yoshida, Y. Honda, T. Kozawa, T. Yamamoto, S. Suemine, S. Seki and S. Tagawa, "Modification of the L-band linac control system at ISIR, Osaka University", Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, Aug. 7-9, 2002, pp.365-367.
- [3] 柏木茂、磯山悟朗、加藤龍好、三原彰仁、山本保、末峰昌二、川島祥孝、安積隆夫、"阪大産研Lバンド電子ライナックのタイミングシステム", Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, Jul. 30 -Aug. 1, 2003, TP-53.
- [4] 加藤龍好、磯山悟朗、柏木茂、山本保、末峰昌二、吉田陽一、菅田義英、古澤孝弘、関修平、田川精一、"FL-net上に構築されたPLCベースの加速器制御システム", Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, Jul. 30 -Aug. 1, 2003, TP-54.