

## 安定化を目指した阪大産研 L バンドライナックの改造

加藤龍好、磯山悟朗、柏木 茂、山本 保、末峰昌二、吉田陽一、  
誉田義英、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、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、冷却水システム、電磁石電源などの機器更新と、それらを統括する制御システムの改造が行なわれた。この改造により電子ビームの安定化と、実験結果の再現性の向上が期待できる。また、加速器制御が単純化され、立ち上げ手順が大きく簡素化される。

### 1 はじめに

大阪大学産業科学研究所（以下、阪大産研）附属放射線実験所の L バンド電子ライナック[1]は、1978 年の運転開始以来、パルスラジオリシスによる放射線化学の研究を中心に利用されてきた。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に成功し、それを用いたフェムト秒パルスラジオリシスの実験[2]を主体として利用されているが、世界でもトップクラスの高強度の単バンチ電子ビームを加速できるという特徴を生かして、SASE-FEL の原理検証実験[3]や、テラヘルツ～ミリ波領域でのコヒーレント放射の光源利用[4]など広範囲な研究に利用されている。

平成 14 年度の放射線実験所の改組、産業科学ナノテクノロジーセンターの発足に伴い、2 台の加速器は加速器量子ビーム実験室の管理化下で、ナノテクノロジー研究を推進するために利用されることになった。電子ビームを用いたナノ微細加工で問題となるナノスケールの現象を解明するためには、サブピコ秒からフェムト秒の超高速現象を捕らえることが出来るシステムが必要となる。L バンドライナックのフェムト秒パルスラジオリシス・システムはこの現象解明が可能な、世界でも屈指の装置であるが、加速器本体は 4 半世紀前に建設されたものであるため、加速器の安定性と操作性、ビーム状態の再現性を高める必要がある。この目的のために、昨年度、加速器システムの大掛かりな改修工事を行った。本研究では、L バンドライナックの改造の概要と現状について報告する。

### 2 ビーム変動要因の解析と改造の方針

ライナックからの電子ビームを安定化するためには、ビーム変動の要因となる因子を特定し、それを取り除くことが必要となる。実験時に特に問題となるのはターゲット位置での電子ビームの位置変動と電荷量変動である。電子ビームの位置変動は、基本的にはビームのエネルギー変動に起因し、これには加速管での RF パワーと位相が関係する。また、電荷量の安定性には、電子銃のカソード温度と電子銃高圧の安定性、サブハーモニック・バンチャー空洞の電

圧と位相の安定性が重要と考えられる。我々はこれまでシステム解析の手法を用いて、加速器の変動要因解析の研究を行ってきた。その結果、RF パワーと位相の変動には、その発生源となるクライストロン・システムが影響を与えることは当然として、それが設置された部屋の室温や冷却水温度、商用電源電圧など加速器施設のユーティリティも複合的に影響を及ぼしていることが明らかになった[5]。そこで今回の改造ではより高度な安定性を実現するために、機器を更新すると同時に、それが設置されている環境の変動も可能な限り抑えることを目標とした。具体的な更新、改造の対象となる機器は、クライストロンと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、RF パワー伝送路、AVR、冷却水装置、空調装置、電磁石電源、電子銃のヒーター電源、タイミング・システムとそれらを統括する制御システムである。次章でこれら主要機器更新の概略について述べる。

### 3 更新機器

#### 3.1 クライストロン

従来のクライストロン・システムは、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、プリバンチャー、バンチャー、主加速管に供給する。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。



図 1 : 30MW クライストロン用モジュレータ電源。

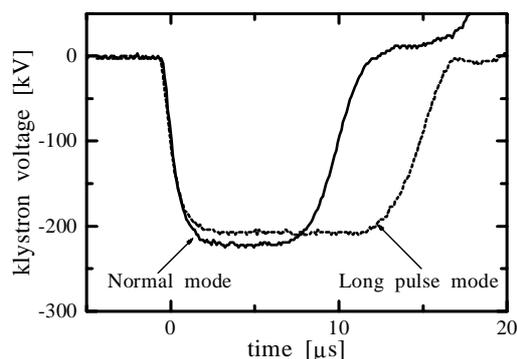


図2：調整中のクライストロン電圧波形。実線、点線は各々Normalモード、Long Pulseモードのもので、両者は計算機制御システムから遠隔での切り替えが可能である。

### 3.2 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。

### 3.3 サブハーモニック・バンチャー用 RF 源

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、先に述べた 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。

### 3.4 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

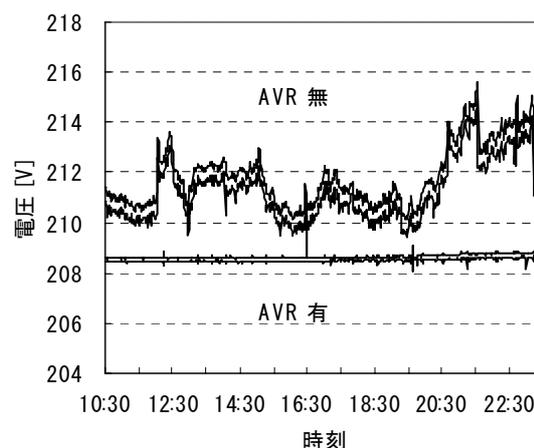


図3：無負荷状態での 200V 系の電圧変動。上が AVR 無しでの測定、下が AVR 有りでの測定。それぞれ線が 2 本づつあるのはサンプリング時間内での最大・最小振幅を示す。200V 系電圧は 1 日あたり 6V 程度変動しているが、AVR の下流ではそれが 0.2V に抑えられている。

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変更、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同軸位相器も更新した。

### 3.5 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 4 V 程度、1 日あたりでは 6 V 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。図3に無負荷状態での 200V 系の電圧変動の測定結果を示す。

### 3.6 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。

### 3.7 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、室温はクライストロン出力空洞の近傍で、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。

### 3.8 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 & Schwarz, 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 N I M 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。

### 3.9 制御系

従来の L バンドライナックは、遠隔操作盤のヘリポットなどを用いたアナログ制御であり、またビームモニターの数も少なく、ビーム状態を精度良く再現することが困難であった。とくに単バンチャーモードのビーム調整では、3 台の SHPB とバンチャー、プリバンチャー、主加速管のパワー

と位相を最適化する必要があるために、高度な熟練が必要であった。そこで今回、再現性の向上と加速器立上げ手順の簡素化を目的として計算機制御システムを導入した。新しい制御系は、パーソナル・コンピュータ (PC) とプログラマブル・ロジックコントローラー (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。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。制御室と加速器本体室にこの PLC ユニットにより構成される Device Control Station (DCS) 盤を設置して、ここに制御対象機器を接続する。この制御系のシステム構成の概略を図 4 に示す。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オペレータ PC (OP-PC) を置くが、この中の 1 台が PC ネットワークと PLC の仲立ちをする Gateway Server (GW-SVR) となる。PLC-PLC 間および GW-SVR 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。

## 4 経過と今後の予定

昨年度末までに機器が納入され、今年 6~7 月で制御系の構築が終了した。8 月からは機器のエージングと不具合の修正を行いながら、現在ビーム調整の段階に入っている。今後はビーム調整を進めながら、残された不具合の解決と操作性の向上を目的とした制御プログラムの修正、そして今回の改造の目的である加速器の安定化がどこまで実現できたのか評価を行う予定である。

## 参考文献

- [1] Y. Yoshida, et al., Proceedings of the 13th Symposium on Accelerator Science and Technology, Suita, Osaka, Oct. 29-31, 2001, pp.74-76.
- [2] T. Kozawa, et al., Proceedings of the 13th Symposium on Accelerator Science and Technology, Suita, Osaka, Oct. 29-31, 2001, pp.440-442.
- [3] R. Kato, et al., Proceedings of the 13th Symposium on Accelerator Science and Technology, Suita, Osaka, Oct. 29-31, 2001, pp.111-113.
- [4] M. Takanaka, et al., Proceedings of the 13th Symposium on Accelerator Science and Technology, Suita, Osaka, Oct. 29-31, 2001, pp.443-445.
- [5] S. Isaka, et al., Proceedings of the Second Asian Particle Accelerator Conference, Beijing, China, 2001, pp.660-662.

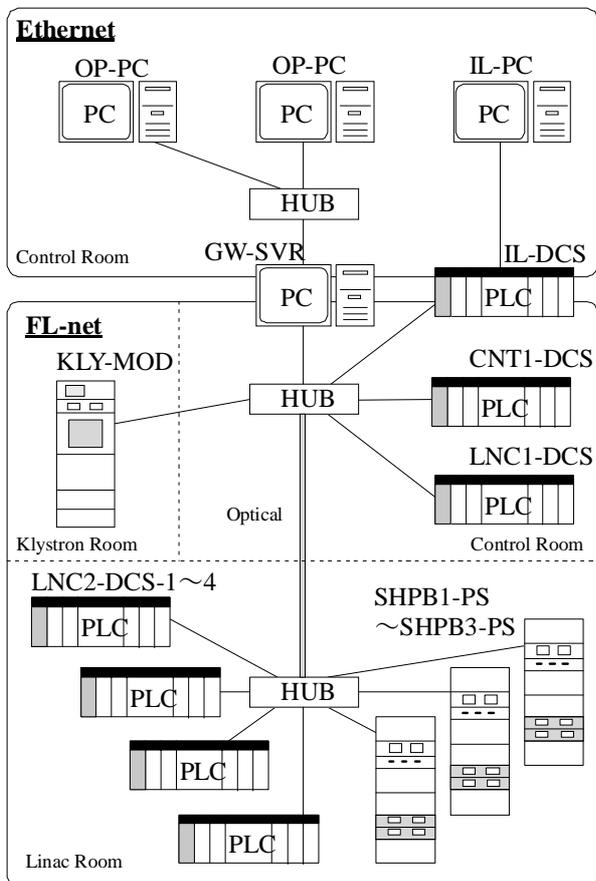


図 4 : 制御系のシステム構成