

阪大産研 L バンド電子ライナックの改造

加藤 龍好*・柏木 茂・磯山 悟朗

Remodeling of the L-band Electron Linac at ISIR, Osaka University for Highly Stable Operation

Ryukou KATO*, Shigeru KASHIWAGI and Goro ISOYAMA

Abstract

The L-band linac at the Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University has been renewed and upgraded for higher stability, improved reproducibility of operation modes and easier operation. Almost all the power supplies and peripheral facilities are replaced with new ones and a computer control system is newly introduced. The remodeling and the subsequent commissioning are successfully completed. To evaluate stability of the linac, the beam intensities are measured with time in two operational modes of the linac used in the various experiments. The intensity fluctuations in both the operational modes are reduced to one-tenth of previous values before renewal.

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、最大エネルギーが 40 MeV の電子線形加速器であり、3 段式のサブハーモニックバンチャー（SHB）システムにより、電荷量 90 nC 以上の単バンチ電子ビームを発生できる世界有数の大強度電子加速器である。

そもそも SHB による大電荷単バンチの発生は 1969 年の EG&G の電子ライナックでの単バンチビームの加速に始まる¹⁾。ここでは既存のライナックの入射部を改造して SHB 空洞を取り付け、速度変調による集束効果を加えることで、加速電荷量を 0.02 nC から 1.5 nC まで飛躍的に増加させることに成功した。1973 年にアルゴンヌ国立研究所の電子ライナックに EG&G 製の SHB を追加して、電荷量 7 nC で半値幅 40 ps 以下の単バンチビームの加速を実現した²⁾。両者ともライナックの加速周波数は、L バンド帯の 1300 MHz で、SHB の周波数はその 1/6 の 216 MHz である。日本では 1977 年、東京大学工学部に加速周波数 2856 MHz の 1/6 の 476 MHz SHB 空洞を備えた S バンド電子ライナックが完成し、1 nC の単バンチビームを発生した³⁾。SHB を用いた単バンチ電子ライナック開発の歴史については文献 4 に詳しく紹

介されている。

この様な背景の中、阪大産研の L バンド電子ライナックの建設が 1975 年に開始された。国内の電子ライナックは S バンドが圧倒的多数派であるが、阪大産研のライナックの導入目的が大電流の単一パルスの発生と、高速電子により引き起こされる物理的、化学的な過渡現象の解明であったため、加速周波数 1300 MHz の L バンドライナックと 1/6 SHB (216 MHz) という構成が選択された。建設を請負ったのは米国の Systems Science and Software という会社である。1978 年に電荷量 7.6 nC で半値幅 39.5 ps を持つ単バンチビームの加速に成功し、強力極超短時間パルス放射線発生装置と名づけられたライナックは翌年から利用運転を開始した⁵⁾。

以来このライナックは、パルスラジオリシスによる放射線化学の研究を中心に活発に利用されてきたが、この 4 半世紀の間にビーム利用の形態は大きく変化している。最近では、従来からの利用に加えて、磁気パルス圧縮を利用したサブピコ秒電子ビームの発生や、超短パルス電子ビームとフェムト秒レーザーを同期させたサブピコ秒パルスラジオリシスの実験⁶⁻⁸⁾、テラヘルツ波長領域での自由電子レーザーの開発研究⁹⁻¹³⁾、大強度単バンチビームを用いた単一通過型自由電子レーザーの基礎研究¹⁴⁻¹⁸⁾やコヒーレント放射

* 大阪大学・産業科学研究所 Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University
(E-mail: kato@sanken.osaka-u.ac.jp)

光の発生¹⁹⁻²¹⁾など、安定性や再現性が求められるより高度な利用が増加している。

2002 年度に放射線実験所を発展的に改組拡充して産業科学ナノテクノロジーセンターが発足した。このセンターの設置目的の一つであるトップダウンによるナノテクノロジーの研究を推進するために、L バンドライナックを改修する予算が認められた。改造の主な目的は、サブピコ秒からフェムト秒の超高速現象を解明する実験を行うために加速器の動作を高度に安定化することである。エネルギー増強やビーム電流の増強を目的とした改造ではないので、電子銃や加速管など加速器本体や電磁石等は従来から使用しているものをそのまま利用する。それらを駆動する RF 源や直流電源、冷却水装置、タイミングシステム等を高精度・高安定なものに更新し、全体を統括制御するための計算機制御システムを新たに導入した。本稿では、この改造の概要とそれによる性能向上について紹介する。

2. ライナックの概要

産研 L バンド電子ライナックの概観を図 1 に、概略を図 2 に示す。このライナックは、熱陰極電子銃と、4 分の 1 波長同軸 RF 空洞を用いた 3 段式 SHB システム、多セルの進行波型プレバンチャー、バンチャー、3 m の主加速管により構成される。電子銃は 100 kV の DC 熱陰極型電子銃で陰極は Eimac 製 YU-156 を使用する。SHB 空洞の共振周波数は初段と 2 段目が 108 MHz、3 段目が 216 MHz であり、これらは進行

波型加速管の RF 周波数 1300 MHz の 1/12 と 1/6 である。

このライナックは、電子銃からの電子ビームの長短と SHB システム作動の有無を組み合わせて、過渡モード、定常モード、単バンチモード、マルチバンチモードの 4 種類のモードを作り出している。過渡モードと定常モードでは、SHB システムを使用せず、電子銃からの電子ビームの長さのみを変える。過渡モードでは 5 ns または 8 ns の電子パルスを加速し、定常モードでは最長 4 μ s の電子パルスを加速できる。単バンチモードとマルチバンチモードは共に SHB システムを使用する。バンチあたりの電荷量が大きな単バンチモードでは 3 台の空洞すべてに RF を



図 1 L バンド電子ライナックの概観

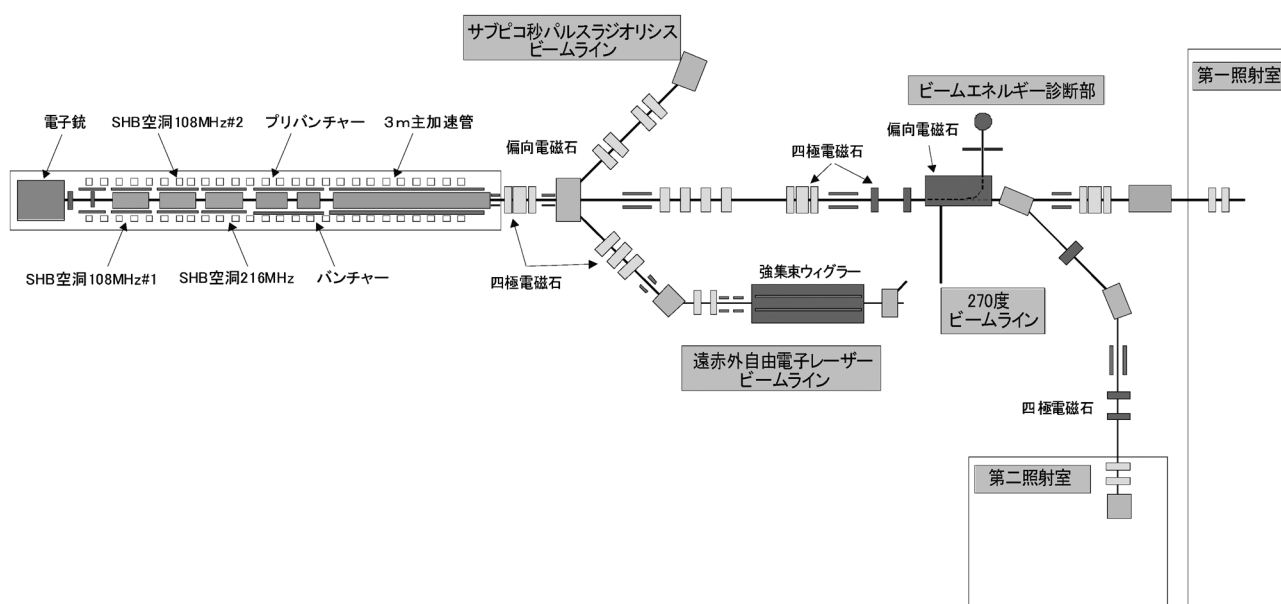


図 2 L バンド電子ライナックとビームラインの概略図

表1 Lバンド電子ライナックのパラメータ

電子銃	熱陰極 (Eimac, YU-156)			
加速電圧	100 kV			
最大入射電流	1.9 A (1~8 μ s) 28 A (5 or 8 ns)			
SHB	108 MHz 空洞×2 台 216 MHz 空洞×1 台 1/4 波長同軸共振空洞			
プリバンチャー	1.3 GHz 進行波型 (10 セル*)			
バンチャー	1.3 GHz 進行波型 (8 セル*)			
加速管	1.3 GHz 進行波定勾配型**			
長さ	3 m (39 セル*)			
モード	$2\pi/3$			
シャントインピーダンス	40 M Ω /m			
Q 値	19,000			
フィリングタイム	1.96 μ s			
減衰定数	0.094 Np/m			
主 RF 源	30 MW クライストロン×1 台 (Thales, TV2022E)			
最大ビーム電圧, 電流	295 kV, 275 A			
放電スイッチ	サイラトロン (L3 Communications, L4888B)			
モード	Normal			Long pulse
PFN 段数	10			16
パルス幅	4 μ s			8 μ s
最大繰返し	60 pps			30 pps
出力	30 MW			25 MW
運転モード	単バンチ	過渡	定常	マルチバンチ
最大エネルギー	40 MeV	40 MeV	40 MeV	37 MeV
パルス幅	20 ps	5 or 8 ns	1~4 μ s	1~8 μ s
全長	10.5 m			

*入出力結合セルを含む。 **一部の資料では準定勾配型となっている。

供給するのに対して, 比較的電荷量の低いマルチバンチモードでは2段目と3段目の空洞にのみRFを供給する。単バンチモードでは, 電子銃から5 nsの電子パルスを入射して, SHBシステムで500 psまで圧縮する。最終的に加速管を出るときの電子ビームのバンチ長は20-30 psである。マルチバンチモードのときには, 電子銃から8 μ sの電子パルスを入射して, バンチ間隔が9.2 nsのバンチ列を形成する。このライナックのパラメータを表1に示す。

建設当初のRF源は20 MW クライストロン1台のみで, この時の最高エネルギーは35 MeVであった。1981年には, バンチャーとプリバンチャー用に5 MW クライストロンを導入して, 従来の20 MW クライストロンは主加速管専用とした。これにより最高到達エネルギーは38 MeVに増加した。今回の改造

でRF源を30 MW クライストロン1台に変更したことにより, 現在の最高エネルギーは40 MeVである。

このライナックは大電荷量の単バンチビームの発生が最大の特徴である。1978年には216 MHz SHB 空洞1台のみで, 最大電荷量7.6 nCを達成した。1984年には108 MHz SHB 空洞2台を追加する改造を行い, 最大電荷量は67 nCへと飛躍的に増大した²²⁾。1997年に電子銃カソードとウェネルト電極形状を変更し, グリッドパルサー回路を改良することにより, 単バンチモードで, バンチあたりの電荷量91 nCを達成した²³⁾。このときは電子銃からピーク電流28 Aの電子パルスを入射しているが, 通常の実験ではピーク電流16 Aのパルスを入射し30 nC程度の電荷量で運転している。マルチバンチモードでは, 電子銃から600 mAの電子パルスを入射して, 1バンチあたりの

電荷量は最大 2 nC, ピーク電流 50 A となる. 過渡モードではピーク電流 12 A のパルスを入射する. 電荷は複数のバンチに分散されるが, 総電荷量は 8 ns 入射の場合で約 50 nC と高い.

3. ビーム変動要因の解析と改造の目標

ライナックからの電子ビームを安定化するためには, ビーム変動の要因を特定し, それを取り除くことが必要となる. 一般的な利用実験の時に問題となるのは, 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電圧の安定性, SHB 空洞の電圧と位相の安定性が重要と考えられる. 我々はこれまで統計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²⁴⁾. そこで今回の改造ではより高い安定性を実現するために, 電源類を更新すると同時に, それを設置する場所の環境変動も可能な限り抑えることにした.

更新や改造の対象となる機器は, 以下のとおりである. まず RF の安定化のために, クライストロンとクライストロン用モジュレータ電源, RF パワー伝送路を更新すると同時に, そのモジュレータ電源への AC 入力電圧レベルの安定化のために AVR システムの導入, 加速空洞と RF コンポーネントの温度安定化のために高精度冷却水装置への更新, そしてクライストロンが設置される部屋の室温を安定化するためにインバータ方式の空調装置を導入した. また, 電子銃から入射する電子ビーム電流を安定化するために, 電子銃システムの高圧電源をより高安定なものに更新すると同時に, カソード温度の長時間の安定性を確保し, ビーム電流の温度ドリフトを抑制するためにヒーター電源として交流安定化電源を導入した. さらに単バンチモード時の電荷量を安定化するために SHB 用 RF 源を更新した. また, 各 RF 信号と電子ビーム, 実験用レーザーの間で高精度な同期を取るためにタイミングシステムを開発した. これらを統括制御するために計算機制御システムを導入した. 計算機制御系への接続を容易にするためにほとんどすべての電磁石電源を入れ替えた. 次章でこれら主要機器更新について述べる.

4. 更新機器

4.1 入射部

電子銃のカソードとアノード間には常時 100 kV の直流電圧をかけている. このための高圧電源は, 交流安定化電源とスライダック, 高圧タンク内の昇圧トランスより構成され, スライダックで電圧調整を行ってきた. 今回の改造では, 交流安定化電源を GP-IB で計算機制御システムに接続して, 昇圧トランスに供給する電圧を直接調整することにした. また, 安定化電源も従来のもより高安定な電源 (ELGAR, CW801P) に変更した. Filament に供給する電圧も交流安定化電源 (高砂製作所, ARH500) から供給するように変更した. 電子銃回路のフィラメント電圧とバイアス電圧, グリッド電圧は, AC サーボモーターにより, 絶縁ロッドを介して高圧デッキ内のポテンショメータを動かすことにより調整してきたが, 再現精度を高めるために, これもパルスモーター駆動に更新した.

SHB システムの 3 台の加速空洞は, それぞれ独立した真空管式 RF アンプ (RCA7651+RCA7214) により供給する最大パワー 20 kW, パルス時間 20 μ s の RF パルスで励振していた. 単バンチビームの安定度は, これらアンプの出力安定度, 位相安定度に強く依存する. 単バンチビームの安定度を高めるために, 3 台の RF アンプを更新した. また, SHB 空洞は, その共振周波数が低いため, フィリングタイムが長く, これまでは空洞電圧が一定になる前に RF パルスが終了していた. 今回の改造で新たに導入する 8 μ s の時間幅を持つパルスのビームを, SHB 空洞電圧の平坦部で加速できるように, 更新後の SHB 電源のパルス幅を最大 100 μ s まで延長できるようにした.

4.2 クライストロンとモジュレータ

改造前の RF システムでは, プリバンチャー, バンチャー用 5 MW クライストロン (東芝, E3775A) と主加速管用の 20 MW クライストロン (Thomson-CSF, TV2022A) の 2 台で構成されていた. 新しいシステムでは 30 MW クライストロン (Thales, TV-2022E) 1 台のみで, その RF パワーを 3 分割してプリバンチャー, バンチャー, 加速管に供給する. このクライストロンは, 出力 30 MW でパルス幅 4 μ s の Normal モードと, FEL 発振実験用の 25 MW で 8 μ s の Long Pulse モードの 2 種類のモードで運転することが出来る. このクライストロン駆動用に新たなモジュレータ電源 (ニチコン, LB-300) を製作した. モジュレータの充電電源は IGBT を 2 段 2 並列に用い

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精度の高い充電を可能にしている。最大充電電圧は 25 kV で、最大繰返しは 60 pps である。このインバータ電源で充電するパルスフォーミングネットワーク (PFN) は総数 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、Long Pulse モードでは全 16 段を使用し、平坦部 $4 \mu\text{s}$ と $8 \mu\text{s}$ のパルス幅を切り替えにより実現する。PFN を調整するために、各段のインダクタンスをシンクロナスモーターにより変えることが出来る。この PFN の調整は、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。パルストランスは 1 : 24 の昇圧比を持ち、最大 295 kV、275 A でクライストロンをドライブする。サイラトロンとして、当初は e2v の cx-1753C を使用したが、3 台続けて短寿命であったことから調査した結果、平均電流がサイラトロンの許容最大値の 2 倍に達することが判明した。e2v の推奨により cx-1528 に入れ替えたが、サイラトロンの導通の切れが早過ぎて、パルストランスの絶縁破壊や電圧モニター用の分圧器での放電などのトラブルが多発した。このサイラトロンも 1 年間で 3 台使用不能となった。現在は、KEK で多数使用されて信頼性の高い L3 Communications の L4888B を使用している。

Normal モード時のクライストロン電圧のパルス波形を **図 3** に示す。パルス電圧の平坦度は $3.5 \mu\text{s}$ の範囲で 0.21% (peak-peak) であるが、先頭 $2 \mu\text{s}$ のリップルを除くと 0.1% 以下である。Long Pulse モードでは後半のより平坦度の高い部分が延長され、後半 $5.5 \mu\text{s}$ の範囲で電圧リップルが 0.12% 以下であることを確認した。また、パルス電圧波形の最大値を 4 時間に渡り測定すると、その強度揺らぎは 0.1% (peak-peak) に収まり、その分布の標準偏差は 0.027% と極めて安定であった。

4.3 パワー伝送路

クライストロン 2 台のシステムから、1 台のシステムに変更するため、RF パワー伝送路を変更した。新設した部品は、バンチャー系に 5 MW のパワーを分配するパワー分割器とこの経路に対する可変減衰器である。このパワー分割器と可変減衰器には反射パワーを吸収するために水冷ダミー負荷を使用している。更新した部品はバンチャー系からプリバンチャー系へのパワー分割器、バンチャー系移相器、プリバンチャー系の移相器と可変減衰器である。バンチャー系の可変

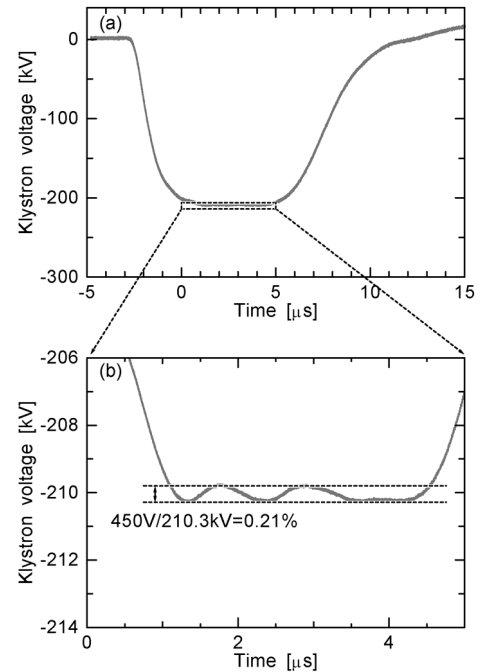


図 3 クライストロン電圧波形(a)とその平坦部の拡大(b)

減衰器と移相器は、温度を ± 0.1 度以内に安定化した冷却水を供給して安定化を図る。この新規部品と更新部品を組み合わせ、新しいパワー伝送路をライナック上部の槽の上に構築した。

4.4 電磁石電源

ライナックとビーム輸送系全体で、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 台の電磁石電源を使用する。今回の改造では容量の大きいヘルムホルツコイル用電源 4 台を除く全ての電磁石電源を更新した。その際、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。我々は更新した 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。この変更により、現場でのケーブル配線の作業や使用する制御モジュールの数を大幅に減らすことができた。

4.5 RF 信号とタイミングシステム

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, PRS10) 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 1300 MHz を直接作り出し、これを分周して SHB 用の 216 MHz (1/6)、108 MHz (1/12)、パルスラジオリシス実験レーザー用の

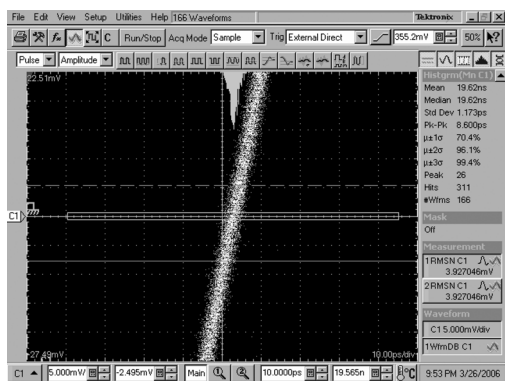


図4 高速のGaAs-RFスイッチを用いた同期回路のジッター. 入力信号のジッター $\sigma=1.03$ ps に対し, RFスイッチの出力は $\sigma=1.17$ ps

81 MHz (1/16), タイミング信号を発生するためのクロック信号 27 MHz (1/48) を作り出している. ここで使用する分周器の性能が, 加速器全体の安定性を大きく左右する.

一方, 電子銃のグリッドや各実験の測定系などに供給するビームの繰り返しに相当するトリガー信号は, 27 MHz のクロック信号と電源周波数 (60 Hz) に同期した最大 60 Hz のパルス信号を同期させる事により作り出す. この同期回路は, 主に Phillips 社の標準的な NIM モジュール (PS-756, PS794 等) と遅延回路で構成されている. 同期回路出力をトリガーにしてデジタルディレイ (Stanford Research Systems DG535) を動作させ, それより作り出された任意遅延パルスと加速器全体の基準クロックとなる 27 MHz 信号との AND をとることで, 高精度にパルスの分割・遅延を実現する. この遅延システムの時間精度は, 27 MHz の加速器基準信号の安定度と最終段の同期回路の時間精度で決定される. 当初は最終段の同期回路に NIM モジュール (PS-756) を使用していたため, 同期精度は 5.8 ps であった. 後に高速の GaAs-RF スイッチ (MiniCircuit 社 ZASW-2-50DR) を使い 27 MHz のクロックパルスからタイミング信号を切出す回路を開発した. これにより同期精度は約 2 ps 以下まで向上した. このスイッチを用いた同期回路のジッター測定例を図4に示す. 入力信号のジッター $\sigma=1.03$ ps に対し, RF スイッチの出力は $\sigma=1.17$ ps であり, この同期回路自身のジッターは $\sigma=0.55$ ps と見積もられる.

4.6 計算機制御システム

今回, 再現性の向上と加速器立ち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. 従来の制御は, 遠隔操作盤のヘリポットなどを使ったアナロ

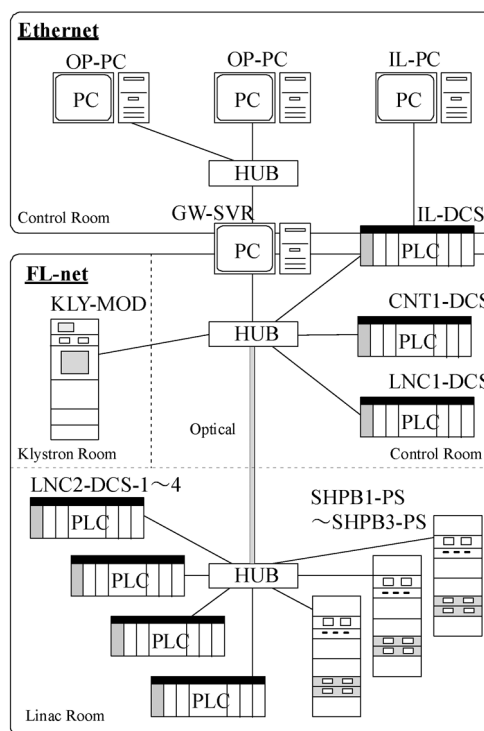


図5 制御系のシステム構成

グ制御であり, 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, 毎日異なる運転モード, 異なるビームポートでの調整となるため, 運転状態を再現することが難しかった. また組織の改組に伴って, ライナックの立ち上げ, ビーム維持, 装置停止を利用者自らが行わなければならなくなったため, ライナックの設定値を記録した運転ファイルを読み込むだけで, 元の運転状態が再現できるような計算機制御システムの導入が必要である. 制御系のシステム構成の概略を図5に示す.

新しい制御系では, 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, 部屋ごとにプログラマブル・ロジック・コントローラ (PLC) を配置して, 機器をそれに接続し, PLC間はFL-netというネットワークで接続する. FL-netは主要制御機器メーカーが仕様策定に参加した次世代FA用標準ネットワークで, 異なるメーカーのFL-net対応製品同士の間でも相互通信可能である. またFL-netは通信プロトコルとしてUDP/IPを使用しているため, 物理層として市販のEthernet用の通信ケーブルやHUBが使用可能である. PLC-PLC間は, 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なう. 他方, PC-PC間の通信には通常のEthernetを用いるため, FL-netとEthernetの間の仲介を行う機器が必要とな

る. そのために1台のPCにFL-netインターフェースソフトをインストールして, Gateway Server (GW-SVR)とした. GW-SVRはFL-net上の共通メモリに保持されたデータを他のOP-PCから利用できる形に変換・提供するサーバーとしての機能を持つ. 使用するPLCとしては, 通信関係のプログラミングが容易という評価の横河電機のPLC (FA-M3)を採用した.

4.7 冷却水装置

今回の改造ではライナックの運転を安定化するために, 全体を精密温調系, 一般温調系, 非温調系の3系統に分けた. 新たに導入した冷却水装置(三栄技研, AQW-K80-SPOU)は1段目の装置で変動幅 ± 0.1 度以内の冷却水を作り, これを精密温調系と一般温調系に供給する. 集束コイルを除くクライストロン・システムやRFパワー伝送回路の可変減衰器, 移相器, 水冷ダミー負荷には, この温度安定度 ± 0.1 度の一般温調系の冷却水を供給する. 精密温調系では2段目の装置でさらに ± 0.03 度以内に温度制御し, より高安定な冷却水を必要とするSHB空洞やプリバンチャー, バンチャー, 加速管に供給する. ビーム輸送系の電磁石やクライストロン・システムの集束コイル等, 温度制御の必要のない機器には, 非温調系冷却水装置から供給する.

4.8 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この改造の2年前に一度更新したが, コンプレッサのON/OFF動作によりクライストロン近傍での室温が3度程度変動すること, クライストロン室の天井の高さが5m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機として併用することにより, 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.

4.9 AVR装置

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す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た. 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)では, ライナックを運転していない無負荷の状態では1日あたりでは6V程度の変動が見られた. 運転時には高圧系(HV)のON/OFFにより, さらに4V程度の変動を確認した. 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

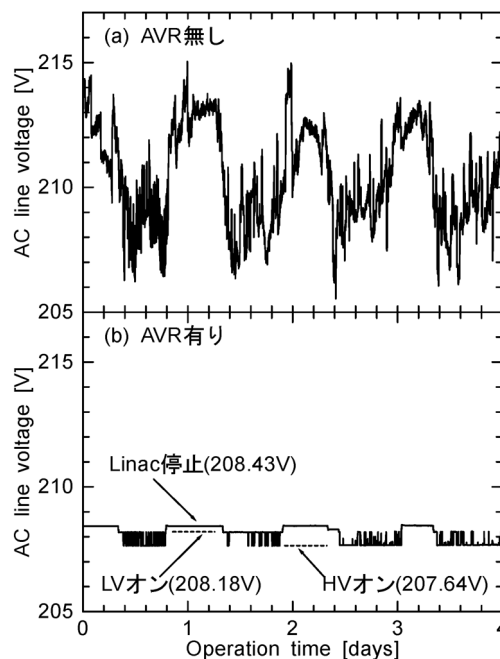


図6 クライストロン・モジュレータの入力ライン電圧の変化. AVR無し(a)とAVR有り(b)

したパルス幅変調交流チョッパー方式の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, 仕様上の出力安定度は $\pm 0.5\%$ 以内, 応答速度は30msである.

AVR装置の有無によるクライストロン・モジュレータの入力ラインでの電圧変化の比較を図6に示す. 測定は火曜日の朝から金曜日の夜まで4日間で, AVR無しとAVR有りの測定で各曜日のユーザーが同じになる週を選択しているため, 測定時期にはほぼ1ヶ月の間隔がある. モジュレータがオフのときの入力電圧は208.43Vであるが, 低電圧系(LV)をオンすることにより, 0.25V低下し, 208.18Vとなる. さらに高圧系(HV)をオンするとさらに0.54V低下し, 207.64Vとなる. 無負荷状態から最大負荷までの電圧変化は0.79Vであるが, これはAVR装置とクライストロン・モジュレータ間のケーブルでの電圧降下によると考えられる. 負荷一定の状態での電圧変動は小さく0.05V以内に抑えられている.

5. 改造の経過とコミッショニング

Lバンド電子ライナックは2002年10月まで運転を行い, 年末から改造工事に入った. 2002年12月に新規に製作した装置と改造した機器の一部, クライストロンとモジュレータ, パワー伝送路, SHB用RFアンプ, 高精度冷却水装置, 計算機制御システムの半

分を据え付け、2003年3月末に計算機制御システムを除く残りすべての機器の設置を完了した。4月には既設の制御システムの一部と更新機器用の仮設制御配線でビーム加速試験を行い、納入された機器に異常が無いことを確認した。5月には旧制御システムと配線をすべて撤去した。最後に計算機制御システムの残りの部分が納入され、6月には全機器を新しい制御システムに接続した。8～9月で初期試験運転と制御ソフトウェアの修正を行い、10月から本格的な試験運転を開始した。

試験運転中に発見した深刻な不具合は主加速管系とバンチャー系立体回路の放電である。放電箇所特定のために立体回路を分解してみたところ、新規に作製したバンチャー系立体回路内の2台の90度ツイストと、以前から使用してきたプリバンチャー用方向性結合器、バンチャー移相器に放電痕を確認した。ツイストとプリバンチャー用方向性結合器には製造会社が放電対策を施した。バンチャー移相器は建設時から使用し続けてきたもので、老朽化のため修理できず、新規に製作してこれと置き換えた。

もう一つの深刻な問題はクライストロン RF 出力の平坦部に見られる微小なパワー変動である。我々は、当初、この原因を主パワー伝送路内での小さな放電と考えていた。加速管 RF 窓の交換や、構成する導波管をひとつひとつ取り外して、その位置にダミーロードを取付け、変動の有無をチェックしたが、原因箇所を特定することができなかった。最終的には新たに納入されたクライストロンが原因ではないかと疑って、以前使用していた 20 MW クライストロンに戻したが、この変動が消えることは無かった。この変動要因追求のために、ほぼ半年近い時間を失った。しかし偶然、開発中の新しいタイミングシステムを試験したときに、この変動が消失した事から、その要因が主発振器ユニットにあることが判明した。現象が微弱な放電に酷似していたため、ローレベルの主発振器ユニットが要因となる可能性を考えていなかったことと、このユニットが改造工事に入る直前まで問題なく動作していたことが問題の解決を遅らせた。

2004年4月に新しいタイミングシステムに移行し、大きな不具合はすべて解決された。6月からは主だったユーザーに試験的に利用してもらいながら、長時間の運転での問題点の洗い出しと解決を繰り返し、2004年10月に共同利用運転を再開した。

6. 安定性の評価

共同利用運転再開後は、数少ない保守日は機器の更

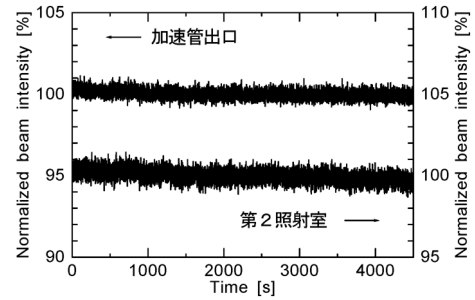


図7 過渡モードでのビーム電流の時間変動。測定箇所は加速管出口（上）と第2照射室のビームポート（下）

新とトラブルの解決に使用しているため、電子ビームと機器の安定性を系統的に測定した例が少ない。ここでは共同利用開始の直前に測定した過渡モード時のビーム電流の時間変化を測定した例を示す。図7は過渡モードでのビーム電流の時間変化で、測定は加速管出口（図中上）と第2照射室ビームポート（図中下）のコアモニターで行った。両者ともサンプリングは0.5秒に1回で、測定時間は4,500秒である。それぞれ平均値を100%として規格化してある。この9,000点の時間変動のデータから得られる加速管出口でのビーム電流の揺らぎの標準偏差は0.27%で、第2照射室ビームポートのそれは0.39%であった。

基本的に加速管出口でビーム電流を観測したときには、ビームエネルギーの変動による影響はほとんど無視できると考えられる。他方、第2照射室ビームポートで観測した場合、ビーム輸送系の分散があるため、エネルギー変動の影響が出てくる。したがって、この0.27%と0.39%の差はRFの変動によりビームエネルギーが変動したことに起因すると考えられる。また、第2照射室ビームポートでみると、全変動は±1%以内に入っており、ライナック改造前と比較してビーム電流変動幅は10分の1に減じられたことになる。

単バンチモードについても同様の測定を行ない、同様にビーム電流変動幅が10分の1に減じられたことを確認した。ただし、単バンチモードでは電流値の時間ドリフトが過渡モードに比べて1桁大きいことがわかった。この要因は、真空管式RF源の出力ドリフトに加えて、SHB空洞の熱的な不安定性が寄与していると考えられる。これ以外にも、SHB空洞にRFをフィードし始めてから共振周波数が安定するまでに4時間以上の時間がかかり、単バンチモードのマシンの利用効率を悪化させていた。そこで、KEKの大学等連携支援事業の援助により、新規に216

MHz SHB 空洞を開発した. さらにそれをベースに 108 MHz 空洞 2 台を製作し, 今年 3 月に 3 台の設置を完了した.

7. ま と め

大阪大学産業科学研究所の L バンド電子ライナックは電子ビームの高安定化とビーム状態の良好な再現性, そして加速器の専門家ではないユーザーが運転可能なシステムを実現するために, 建設以来のもっとも大規模な改造を行った. この改造により, 加速器本体とビーム輸送系の電磁石, 真空ダクトを除く, ほとんどすべての機器を更新した. 改造後のビーム電流の変動は改造前に比べて 10 分の 1 程度に改善された. SHB システムを用いない過渡モードでは, 運転ファイル読み込み後のビーム状態の再現性が極めて高く, ライナック立ち上げ時のビーム調整が不要になり, 装置の稼働時間は大きく変わっていないが, 実質的な利用時間が増加した.

また, この大規模改造の後も, 本文内で一部紹介したサイラトロンシステムの変更や SHB 空洞の更新に加えて, ローレベルでの RF 振幅位相制御など, 安定化と性能向上のための努力を日々続けている. 現在はこれらを含めた総合的な性能評価を行うための指標作りと測定環境の準備をしている.

謝辞

今回の改造は平成 13 年度補正予算「時間分解量子ビームナノ加工解析システム」, 平成 14 年度予算「強力極短時間パルス放射線発生装置」により実現した. また, SHB 空洞の開発は, 高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の大学等連携支援事業「長波長 SASE-FEL 技術開発とその応用に関する研究」(平成 17~18 年度) による.

ライナックの改造では多くの人々の指導と協力を得て初めて成し遂げられた. 高精度タイミングシステムの開発では, 高輝度光科学研究センターの川島祥孝氏, 花木博文氏, 安積隆夫氏, サイラトロンシステムの更新では, KEK の設楽哲夫氏, 明本光生氏, SHB 空洞の開発では KEK の大沢哲氏, 伊澤正陽氏, 早野仁司氏の指導を受けた. 前述の大学等連携支援事業では KEK の浦川順治氏の協力を得た. 仕様策定では, 大阪大学産業科学研究所の田川精一教授, 吉田陽一教授, 誉田義英氏, 古澤孝弘氏, 関修平氏 (現在, 工学研究科) の協力を得た. また, 工事に付随する作業では大阪大学産業科学研究所の山本保技術職員とユニコンシステムの末峰昌二氏の協力を得た. 実際の改造工

事では, 機器納入の全体統括をニコンインスティック, モジュレータ部をニチコン草津, 計算機制御を東芝, RF パワー伝送路と SHB 用 RF 源を日本高周波, 冷却水装置を三栄技研, 電磁石電源を IDX と高砂製作所 (エクレア) が担当した. この改造と工事に参加・協力されたすべての皆様に, この場を借りて御礼申し上げます.

参考文献

- 1) N. J. Norris and R. K. Hanst, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-16**, No. 3, 323 (1969).
- 2) G. Mavrogenes, W. Ramler, W. Wesolwski, K. Johnson and G. Clift, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-20**, No. 3, 919 (1973).
- 3) H. Kobayashi, T. Ueda, T. Kobayashi, S. Tagawa and Y. Tabata, *Nucl. Instr. and Meth.*, **179**, 223 (1981).
- 4) 竹田誠之, 核理研次期計画電子ライナック・ストレッチャー・ワークショップ報文集, 核理研研究報告 特集号 3 第 18 巻, pp. 102-118 (1985).
- 5) S. Takeda, M. Kawanishi, K. Hayashi and H. Sakurai, *Nucl. Instr. and Meth.*, **180**, 1 (1981).
- 6) T. Kozawa, Y. Mizutani, K. Yokoyama, S. Okuda, Y. Yoshida and S. Tagawa, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, **A 429**, 471 (1999).
- 7) T. Kozawa, Y. Mizutani, M. Miki, T. Yamamoto, S. Suemine, Y. Yoshida and S. Tagawa, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, **A 440**, 251 (2000).
- 8) A. Mozumder and Y. Hatano, "Charged Particle and Photon Interactions with Matter", Marcel Dekker, Inc., New York, N.Y., 2004, p. 259.
- 9) S. Okuda, Y. Honda, N. Kimura, J. Ohkuma, T. Yamamoto, S. Suemine, T. Okada, S. Takeda, K. Tsumori and T. Hori, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, **A 358**, 248 (1995).
- 10) S. Okuda, S. Ishida, G. Isoyama, Y. Honda and R. Kato, *Nucl. Instr. and Meth.*, **A 375**, 329 (1996).
- 11) R. Kato, S. Okuda, Y. Nakajima, G. Kondo, Y. Iwase, H. Kobayashi, S. Suemine and G. Isoyama, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, **A 407**, 157 (1998).
- 12) R. Kato, S. Okuda, G. Kondo, S. Kondo, H. Kobayashi, T. Igo, S. Suemine and G. Isoyama, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, **A 429**, 146 (1999).
- 13) R. Kato, S. Kondo, T. Igo, T. Okita, T. Konishi, S. Suemine, S. Okuda and G. Isoyama, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, **A 445**, 169 (2000).
- 14) S. Okuda, J. Ohkuma, N. Kimura, Y. Honda, T. Okada, S. Takamuku, T. Yamamoto and K. Tsumori, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, **A331**, 76 (1993).
- 15) R. Kato, R. A. V. Kumar, T. Okita, S. Kondo, T. Igo, T. Konishi, S. Okuda, S. Suemine and G. Isoyama, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, **A445**, 164 (2000).
- 16) R. Kato, T. Okita, R. A. V. Kumar, T. Igo, T. Konishi, M. Kuwahara, M. Fujimoto, S. Mitani, S. Okuda, S. Suemine and G. Isoyama, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, **A 475**, 334 (2001).

- 17) R. Kato, R. A. V. Kumar, M. Kuwahara, M. Fujimoto, Y. Nakamura, T. Igo, T. Konishi, S. Isaka, S. Mitani, S. Okuda, S. Suemine and G. Isoyama, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, **A483**, 46 (2002).
- 18) R. Kato, M. Fujimoto, T. Igo, S. Isaka, T. Onishi, S. Furukawa, S. Okuda, S. Suemine and G. Isoyama, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, **A507**, 409 (2003).
- 19) J. Ohkuma, S. Okuda and K. Tsumori, *Phys. Rev. Lett.*, **66**, 1967 (1991).
- 20) S. Okuda, K. Yokoyama, Y. Miyauchi, R. Kato and T. Takahashi, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, **A 407**, 116 (1998).
- 21) S. Okuda, M. Nakamura, K. Yokoyama, R. Kato and T. Takahashi, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, **A 445**, 267 (2000).
- 22) S. Takeda, K. Tsumori, N. Kimura, T. Yamamoto, T. Hori, T. Sawai, J. Ohkuma, S. Takamuku, T. Okada, K. Hayashi and M. Kawanishi, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-32**, 3219 (1985).
- 23) S. Okuda, T. Yamamoto, S. Suemine and S. Tagawa, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, **A417**, 210 (1998).
- 24) R. Kato, S. Isaka, H. Sakaki, S. Kashiwagi and G. Isoyama, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res.*, **A528**, 244 (2004).