



研究ノート

阪大産研Lバンド電子ライナックの大規模改造

磯山 悟 朗*

Large-Scale Remodeling of the L-Band Electron Linac at ISIR, Osaka University

Key Words : linac, electron, beam, L-band, stability

1. 序 論

大阪大学産業科学研究所のLバンド電子ライナック(Lバンドライナック)は、附属放射線実験所(当時)の主力装置として建設され、昭和53年(西暦1978年)に運転を開始した。強力極超短時間パルス放射線発生装置と名付けられたLバンドライナックは、エネルギー38 MeVで長さ約20ピコ秒の大強度、単パルス電子ビームを発生することができ、パルスラジオリシス法による放射線化学反応の反応初期過程の研究を中心に様々な研究分野で利用されてきた。最近では、時間分解能がサブピコ秒に達するレーザー同期超高速パルスラジオリシス法の開発とその利用や、遠赤外自由電子レーザー(FEL)の開発研究、第4世代の放射光光源として期待されているSASE(Self-Amplified Spontaneous Emission)の遠赤外領域での基礎研究なども行なわれている。また、その利用も産研だけではなく大阪大学に開放されると共に、産研職員との共同研究という形態で学外からの利用にも一部供されている。

平成14年に放射線実験所と高次インターマテリアル研究センターを中心に改組統合して産業科学ナノテクノロジーセンターが誕生した。その際、Lバンドライナックを改造する予算が認められ、性能を大幅に向上させる大規模な改修を行なった。ライナック

クの建設と立上げ調整が完了した後、平成16年10月1日より利用研究が再開されて、順調に稼働している。阪大産研のLバンド電子ライナックの大規模改修と現状について紹介する。

2. 目的と方針

先端的な量子ビームの発生と利用のためにLバンドライナックに求められる性能は、動作の安定性と再現性である。Lバンドライナックは、昭和53年に建設されて以来、多くの改良がなされてきたとはいえ、電子ライナックとビームラインの電源類や、冷却水などの設備類は、老朽化と性能の陳腐化のために、安定性が十分ではなく、結果として電子ビームの特性が長期・短期的に変動する原因となっていた。また、これらの電源類を制御して運転するための制御系は、入出力装置としてアナログのヘリポートやメーターなどを使用した手動の遠隔操作盤で構成されており、運転状態の再現性に問題があったし、少数の熟練運転者しか運転調整が出来なかった。従って今回の改造では、ライナックの基本構成要素である電子銃や、加速管、偏向磁石や四極磁石などの電磁石類は現状のままとするが、これらの問題を解決するために、Lバンド電子ライナックのほとんど全ての電源類と設備関係の機器を、最新の技術による安定性と再現性の良い機器に更新する。これらの機器を接続して運転する制御系には、デジタル的に設定と読み出しが出来る計算機制御システムを新たに導入して、運転状態の再現性を向上させると共に、加速器の運転モード切替が短時間に且つ容易に出来て、非熟練の利用者にも加速器システムの運転がワンタッチで出来るようにする。

更に、加速器の安定性の改善と、Lバンドライナックを用いて行なわれているレーザー同期の超高速パルスラジオリシス法の時間分解能を向上させるため



* Goro ISOYAMA

1950年5月生

昭和53年東北大学大学院・理学研究科・原子核理学専攻・博士課程修了
現在、大阪大学・産業科学研究所・量子ビーム発生科学研究分野、教授、理学博士、加速器科学

TEL 06-6875-8485

FAX 06-6875-8489

E-Mail isoyama@sanken.osaka-u.ac.jp

に新しいタイミングシステムを導入する。また、更新する高周波電源類の仕様を変更して、遠赤外FELの出力を飽和領域に達するまで高めるために必要不可欠である、ライナック電子ビームの長パルス運転を可能にする。

3. 改造の詳細

図1にLバンドライナックが設置されているライナック棟地下2階の平面図を示す。ライナックの改造は、入射系と、RF系、ビーム輸送系、タイミング系、制御系、ならびに設備系にわたるほとんど全ての部分に対して行なった。入射系は、電子ビームを発生する電子銃と、大強度単バンチャーを生成するために使用するサブハーモニックバンチャー(SHB)システムから構成される。電子銃に関しては、高電圧やフィラメント用電源を、安定化電源へ交換し、その他の部分も計算機制御システムへ適合するように改造や交換した。SHBシステムでは、108 MHzで動作する2台のRFアンプと、216 MHzアンプ1台を使用しているが、この3台の増幅器を、計算機制御可能で、長い電子パルス運転に対応した高安定なものに更新した。

RF系は、1.3 GHzのハイパワー高周波を発生して、プリバンチャーやバンチャー、加速管に伝送す

る装置である。RFの発生には、従来、20 MWと5 MWのクライストロンそれぞれ1台を使用していたが、新しいシステムでは、30 MWクライストロン1台を使用する。それに伴い、クライストロン用電源であるモジュレーターを更新し、RF伝送路を一部更新して組み換えた。クライストロンとモジュレーターは、高い精度と安定性を目標に設計・製作したが、従来と同じ4 μ sのパルス幅だけではなく、8 μ sの長パルスモードも回路の切り替えにより実現できる。伝送路では、組み換えのために新しいパワー分配器や可変減衰器を導入する一方、従来から使用している移相器や可変減衰器も計算機制御に対応するために改造した。

ビーム輸送系は、ライナックで加速した電子ビームを、実験用ビームポートまで輸送する装置であるが、ここに使用する偏向磁石や四極磁石などの電磁石用電源の大多数である58台を更新した。これらの電源は、計算機制御に適応するインターフェースを備えると共に、従来の電源より格段に安定である。

新しいタイミングシステムは、高い時間安定性を持つルビジウム原子時計を時間基準とする周波数シンセサイザーで加速周波数の1.3 GHzを発生すると共に、それを直接分周することにより、SHBシステム用RF周波数と、パルスラジオリシスで使用する

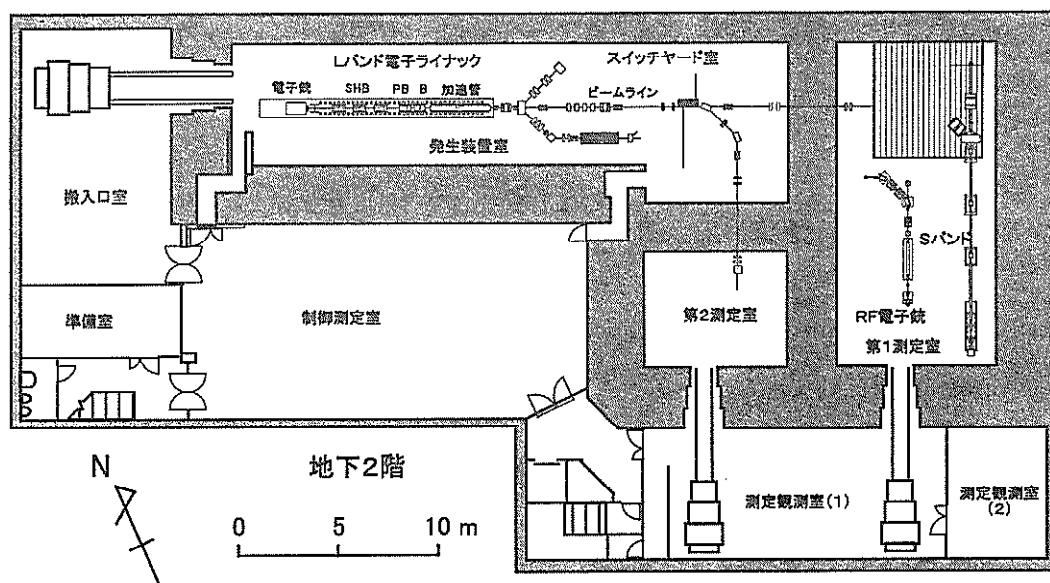


図1. ライナック棟地下2階の平面図

Lバンドライナックは、発生装置室に設置されている。SHBは、サブハーモニックバンチャー、PBはプレバンチャー、Bはバンチャーを意味する。第1照射室には、Sバンド電子ライナックと、RF電子銃ライナックが設置されている。

るレーザー用RF周波数を作る。同時に1.3GHzを48分周した27 MHz信号をタイミングシステムのクロックとする。このクロックを汎用のデジタルディレーやNIMの論理モジュールと組み合わせて、高精度で、かつ改造や拡張が容易なタイミングシステムを低価格で実現した。

新しい制御系は、パソコン(PC)とプログラマブルコントローラー(PLC)をネットワークで接続した分散制御システムである。制御機器は、各所に配置したPLCに接続して制御するが、これらのPLCと1台のPCはFL-netと呼ばれる通信ネットワークで接続されており、FL-net上のデータ領域を共有することにより相互に通信を行なっている。他方、このPCは通常のイーサネットで、制御卓として使用する複数のPCと接続されている。このような制御システムを新たに構築して、従来のアナログ・手動制御システムに置き換えた。

今回の改造で更新や導入された設備は、冷却水装置とクライストロン室の空調機である。新しい冷却水システムは、旧システムより1桁近く高い安定度を持ち、温度に敏感で重要な装置である加速管などを±0.03度以内に温度制御することが出来る。クライストロン室の温度は従来、3度程度変動して、RF変動の原因になっていた。そこでインバーター方式の空調機を追加した結果、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. 加速器の立上げと性能評価

新たに製造したLバンドライナック用機器の据付調整が平成15年の春に終わり、引き続き計算機制御システムの立上げ調整を開始した。計算機制御システムと制御対象機器の信号の取り合いを一つ一つ点検して、ハードとソフトの不具合を修正する作業を行い、平成15年秋に制御系の立上げ作業が完了した。その後、本格的な加速器の立上げ作業を開始した。大きな問題は、主にRFパワー伝送路で発生した。クライストロンの出力パワーを上げていくと、伝送路で放電が起こり、それ以上出力パワーを上げることが出来なくなった。放電箇所を特定するために、RFパワー伝送路を分解して、各所に模擬負荷を挿入して動作試験を行なった。その結果、ツイスターと呼ばれる導波管の断面形状を90度回転するための

新設部品2箇所と、従来から使用していた加速管用移相器で放電が発生していることが確認できた。ツイスターは、その構造に問題があることが分かったので、放電が起きない構造に改造した。移相器に関しては、修理や変更が不可能であるので、新たな移相器を購入して交換することにした。この結果、大きな放電は無くなったが、RFパワーが細かく変動する原因不明の現象が残った。原因を特定するために、RFパワー伝送路を何度も分解点検を行なって調査を続けてが、クライストロン出口直近でも観測されて、伝送路が原因ではなく、クライストロンまたはその上流に問題があると結論された。この間、従来から使用していたRF発振器とタイミングシステムを使用してきたが、平成16年の春に新しいタイミングシステムの準備が整い、これに交換したところ、RFパワーの細かい変動が無くなった。従来から使用していたRF発信器に問題があることがわかり、原因不明のこの問題がようやく解決できた。

電子ビーム加速用RFの安定性を決める、クライストロン電圧のパルス毎の出力安定度は、仕様値である0.1%を達成した。パルス電圧の平坦度も仕様値の0.2%はすでに満足されているが、これを0.1%以下にするためにPFNの段数を増やすことを計画している。試験的には、回路定数の見直しにより、フラットトップ5.5 μ sで0.1%の平坦度が確認できた。実際のRF出力の時間変動をバンチャー加速管のダミーロード側と主加速管のダミーロード側で測定して、安定度を調べた。RF出力の時間変動は標準偏差でバンチャーが0.14%、主加速管が0.11%であった。

タイミングシステムに関しても格段の性能向上が実現できた。旧システムでは回路上の問題から、電子銃とクライストロンとの間にタイミング遅延1 digit分(36 ns)のジッターが存在していた。最も多く使用される運転モードの一つである過度モードでは、このジッターはそのままエネルギージッターとなっていたが、新システムではこれがなくなった。また1.3 GHzの基準RF信号と電子銃トリガーとの間の時間ジッターはおよそ5 ps程度、分周された各RF信号と1.3 GHz基準RF信号との位相ジッターは2 ps程度であった。

過度モードでビームの安定性を測定した。このモードではSHBシステムは使用せず、プリバンチャー、

バンチャー、主加速管のみを励振する。改造後のシステムではこの3台の加速管は同じクライストロンにより駆動されるので、以前に存在した2つのRF源間の位相ジッターはなくなる。結果的に、短周期的なビームの安定性は、クライストロンRF出力の振幅変動に強く依存すると考えられる。長周期的なビームの安定性には、これ以外に電子銃のカソード温度のドリフト、冷却水温度や空調温度の周期変動が関わってくる。

図2に第2照射室ビームポート(図中下)のコアモニターで測定したビーム電流強度分布を示す。ビーム電流の標準偏差は0.39%であった。このビーム強度変動は、改造前の10分の1程度の値である。

5. ま と め

阪大産研のLバンドライナックは、今回の改造により、ビーム電流やエネルギーの安定性が格段に向上した。また、新たに導入した計算機制御システムにより、熟練者でなくとも、加速器の立上げや停止を含む運転を容易に行なえるようになった。立上げ調整が短時間で行なえるようになり、利用時間が実質的に増える。さらに、Lバンドライナックのマシントイムは、従来1日単位で配分使用されていたが、今後、1日の利用を前半、後半に分けて別のグループが使用したり、夜間の利用を可能にする基盤も整

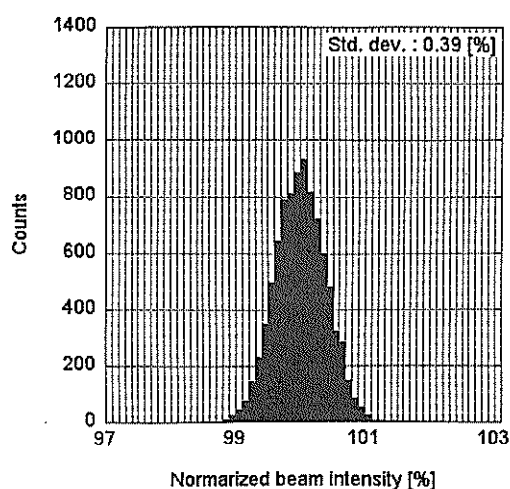


図2. 第2測定室で計測した電子ビーム強度分布
測定は0.5秒に1回で、4500秒間行なった。
変動幅は、標準偏差で0.39%であり、改造前の10分の1程度に減少した。

いつつある。また、Lバンドライナックの安定性が格段に向上したことにより、先端的な量子ビームの発生と利用も大いに進展することが期待できる。加速器の安定性が向上したことにより、今まで見ることが出来なかった小さな不安定性を引き起こす要因も観測できるようになった。今後、これらの現象を研究することにより、更にLバンドライナックの安定性と性能の向上を目指す。

この記事をお読みになり、著者の研究室の訪問見学をご希望の方は、当協会事務局へご連絡ください。事務局で著者と日程を調整して、おしらせいたします。

申し込み期限：本誌発行から2か月後の月末日

申し込み先：生産技術振興協会 tel 06-6395-4895 E-mail seisan@maple.ocn.ne.jp

必要事項：お名前、ご所属、希望日時(選択の幅をもたせてください)、複数人の場合はそれぞれのお名前、ご所属、代表者の連絡先

著者の都合でご希望に沿えない場合もありますので、予めご了承ください。