

# L バンド振り分けシステム開発の全貌

古川 和弥

産業科学研究所 技術室 工作班

furukawa@sanken.osaka-u.ac.jp

## 1. はじめに

阪大産研の L バンドライナックは最大 40 MeV まで加速した電子ビームを各ビームポートに導き、ナノ秒からサブピコ秒領域のパルスラジオリシス実験や自由電子レーザー (FEL) を用いた大強度 THz 波の発生等の種々の実験に利用される。利用時間は年間 2500～3000 時間程度[1]で、運転ライセンス制の導入や冷却水の自動運転システム[2]の導入等により運転時間の拡張を図ってきたが、現状の体制でこれ以上利用時間を増やすことは難しい。また、L バンドライナックは FEL ポートやサブピコ秒ポートを持つ加速器本体室の他に、第 2 照射室と第 1 照射室と呼ばれる 2 つのビームポートを持つが、パルスラジオリシス実験の大部分を行う前者に比べて後者の利用頻度は低い。そこで、偏向電磁石をパルス駆動できるキッカー電磁石電源を開発し、両室に交互にビームを照射できる振り分けシステムを開発することにした。

本稿では電源・電磁石の開発とそれらを用いたビーム試験結果の概説、従来の FL-net を用いた L バンド制御システムと両立を可能とするイーサネット制御システムの開発、承認申請に伴う変更申請書の作成、及び振り分け運転に必要なとなる種々の作業に関して報告を行う。なお、ハードウェア開発の詳細に関しては、参考文献[3]を参照いただきたい。

## 2. ハードウェア開発

### 2.1 キッカー電磁石電源の開発

L バンドライナックにより発生・加速された電子ビームは直進方向に進むと第 1 照射室に達するが、経路上の偏向電磁石を励磁すれば第 2 照射室に導かれる。この偏向電磁石をパルスで励磁して両室に同時に入射を行うために、キッカー電磁石電源を開発した。開発した電源の性能を表 1 に示す。本機は高速な極性切り替えに対応するため IGBT によるチョッパ回路を搭載し、最大  $\pm 300\text{ V} \pm 100\text{ A}$  平均電力 10 kW の台形波を出力する。また偏向電磁石に交番電流を流した際に発生する渦電流による磁場の立ち上がりの遅れと、残留磁化による磁場の変動の対策として、内蔵 DCCT による電流フィードバックと外部ガウスメータによる磁場フィードバック機能を搭載している。これらのフィードバックの制御と TCP/IP プロトコルによるイーサネット制御は内蔵した PWM 制御用のマイコンにより行われる。

表 1: キッカー電磁石電源の性能

Parameter	Value
Maximum output current	$\pm 100\text{ (Ap)}$
Maximum average output	10 (kW)
Output current stability	0.1 (%)
Main power input voltage	300 (VDC)
Control power input voltage	100 (VAC), 50/60 (Hz)

### 2.2 従来の偏向電磁石を用いたビーム振り分け試験

キッカー電磁石電源により従来の偏向電磁石を交番励磁し、第 2 照射室にビームを輸送する試験を行った。電流フィードバックを用いて 1 Hz の繰り返しで運転した際の電流と磁場の波形を図 1(a)に、磁場フィードバック時の波形を図 1(b)に示す。電流フィードバックでは電流の立ち上がりに比べ、磁場の立ち上がりが遅れていることが確認できる。それに対して磁場フィードバックでは電流が設定値の 60 A を超えてオーバーシュートし磁場が一定になった後、設定値に戻ることが確認できる。前者の磁場安定度、第 2 照射室のビーム電流の安定度はそれぞれ 0.17 %、1.71 %

であったが、後者ではそれぞれ 0.15 %、0.27 %と大きく改善していることが確認できた。また磁場フィードバックでは繰り返しを 5 Hz まで上げても磁場とビーム電流の安定度に問題はなく、ビームプロファイルにも問題ないことを確認した。

## 2.3 キッカー電磁石の開発とビーム振り分け試験

従来の直流用電磁石は 5 Hz までのビーム振り分け運転に利用できることが確認できたが、電源の容量の問題で 10 Hz 以上の運転は難しい。それに加え、ヨークの温度上昇、電圧・電流の定格超過、経年劣化等の多数の問題があった。そこでこれらの問題を解決し、高繰り返しに対応するキッカー電磁石を開発した。開発した電磁石の性能を表 2 に示す。本機は渦電流の影響を低減するために 0.35 mm 厚の積層ケイ素鋼板を用いたヨークを使用している。また線材の断面積とターン数を調整して、本機の主要なパラメータである抵抗とインダクタンスをキッカー電磁石電源の最大出力電圧・電流最大値の 50 %未満で 30 Hz 運転が可能となる値に設定した。

従来の直流用電磁石からキッカー電磁石に置き換えてビーム振り分け試験を行った。印加電圧を 80 V とし、磁場フィードバックを用いて 5 Hz で運転を行った際の電流と磁場の波形を図 2 に示す。電流はオーバーシュートすることなく、磁場と電流が比例して立ち上がることが確認できる。また設定電流の 47 A に達する時間が 17 ms であることが確認できたが、これは計算値と良く一致している。印加電圧 80 V では 20 Hz 運転が限度だが、キッカー電磁石電源の 1 次側に接続する電源を 100 V 以上の出力のものと交換すれば、30 Hz でのビーム振り分け運転が可能である。

表 2: キッカー電磁石の性能

Parameter	Value
Number of coil turns	48 (turn/coil)
Magnetic flux density	0.226 (T)
Current	±60 (A)
Inductance@60 Hz	24.6 (mH)
Resistance	72.8 (mΩ)

## 3. ソフトウェア開発

### 3.1 L バンドライナックの制御システム

L バンドライナックは平成 13 年度から 14 年度にかけて、安定化を目的とした付属機器の改修が行われ、同時に Programmable Logic Controller(PLC)を主体とした計算機制御システムが導入された[4]。L バンドライナックの制御システムの機器構成を図 3 に示す。制御 PC 間はイーサネットによって、PLC 間は FL-net によってそれぞれ接続され、両者は GW-SVR と呼ばれる PC により接続される。制御 PC のプログラムは主に Visual Basic6.0 と Visual C++ 6.0 と

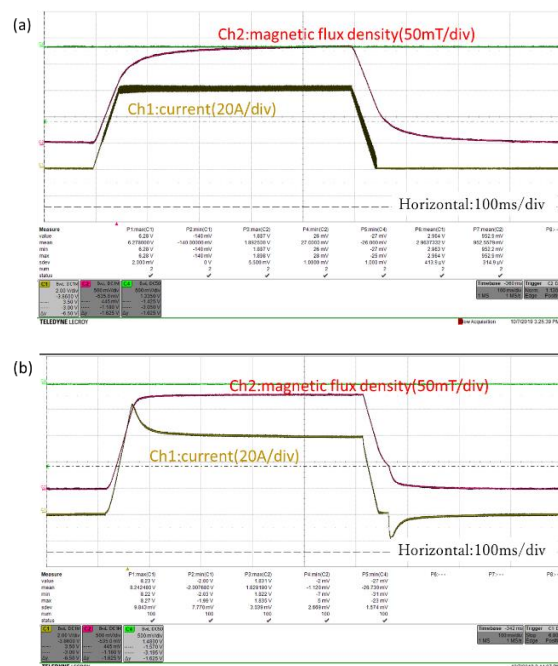


図 1: 偏向電磁石に流れる電流値と発生する磁場の時間波形。(a)電流フィードバック、(b)磁場フィードバック

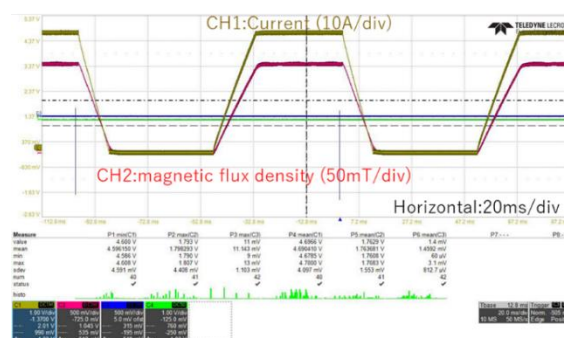


図 2: キッカー電磁石に流れる電流値と発生する磁場の時間波形

う 2 種類のプログラミング言語により記述され、FL-net のバージョンは 1.0 を利用している。これらの言語・環境を現行の OS 上で扱うことはできず、規模も大きいことから自前で更新を行うことは難しい。そこで従来の制御 PC のプログラムには変更を加えず、新しい制御 PC からイーサネット接続によって振り分けシステムに使用する機器と PLC を制御することにした。

### 3.2 PLC プログラムの改修

従来の FL-net で接続された PLC 間のデータのやり取りは主にラダープログラム上の共有リレー・共有レジスタを用いて行われるが、イーサネット通信で共有リレー・レジスタの情報を書き換えると共有データに齟齬が生じて動作に支障を来すという問題があった。そこで振り分け制御に必要な PLC に関しては、ラダープログラム上にイーサネット通信で書き換えを行うための専用の内部リレー・内部レジスタを追加した。また振り分け運転に対応したインターロックを構築するため、主に重量扉と放射線遮蔽用のビームシャッターの論理を変更した。さらに制御 PC との通信が一定時間途切れたら運転許可を取り消す通信監視機能を搭載した。

### 3.3 GUI プログラムの制作

振り分け用の機器と PLC をイーサネット通信で制御するために、Windows10 を搭載した新しい制御 PC 上で動作可能なプログラムを制作することにした。開発には Graphical User Interface(GUI)を持つプログラムが制作可能な Microsoft 製の統合開発環境である Visual studio community と、同じく Microsoft が開発した C#言語を用いた。

振り分け制御システムに関する部分を抜粋した制御システムの機器構成を図 4 に示す。新しい制御 PC から 3 台の PLC、キッカー電磁石電源、4 台の四極電磁石電源、ディレイジェネレータに対してイーサネット通信を行う。通常イーサネット通信の速度は 10 Mbps であるが、RS-485 で接続された四極電磁石電源のマスター-スレーブ間の速度は最大で 38400 bps と遅い。通信速度を維持するために、四極電磁石電源の通信は Task クラスを用いた並列処理により別スレッドで行うことにした。またユーザーが遠隔で操作を行うために、制作したプログラムの機能に一部制限を加えた簡易プログラムも同時に制作した。

制作したプログラムには全体的な制御を行うメイン画面の他に、振り分け電源、四極電磁石電源、デジタルディレイ、運転モード変更の 5 つの制御画面を設けた。また一部の機器を除き、制御画面を記述するクラスとは別にイーサネット通信用のクラスを設けた。メイン画面から各機器のイーサネット通信用のクラスにアクセスすることで一括設定や状態確認が可能で、詳細な設定や状態確認を行う際に各画面を表示するという構成にした。なお、本稿ではセキュリティ上の問題を考慮して運転画面や詳細なシーケンスの記述は省略する。

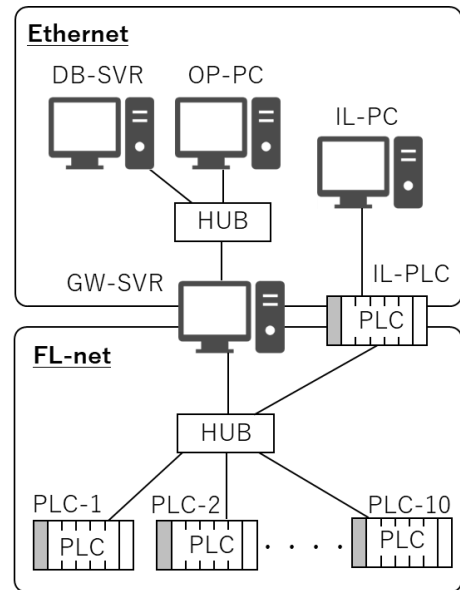


図 3. L バンドライナック制御システムの機器構成

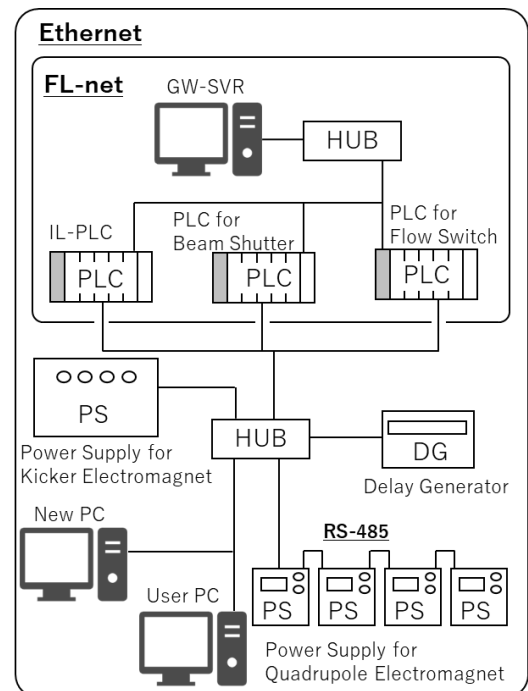


図 4. 振り分け制御システムの機器構成

#### 4. 放射線に関する変更申請

振り分けシステムの使用許可を得るためには放射性同位元素等の規制に関する法律に則り、原子力規制庁への変更承認申請書の提出が必要となる。施行規則第 2 条に規定された、自動表示装置とインターロックに係る書面が今回の主な変更点である。自動表示装置はライナック棟の線形加速器の運転状態を表示する役割を担い、各階に設けた簡易版と制御室等に設けた詳細版の 2 種類がある。従来の制御システム導入時に作られた状態表示画面に変更を加えることは難しかったので、Visual C#を用いて新たな運転表示画面の制作を行った。またインターロックに関しては振り分け運転に伴い変更した PLC のロジックの中で、放射線安全管理に関する部分を抜粋して申請書に記載した。これらの変更と振り分け運転に合わせた申請書全体の構成の変更を行い、原子力規制庁に申請書を提出し、審査を依頼している。

#### 5. その他の作業

本章では振り分けシステム導入に伴い実施した種々の作業に関して報告する。

最初にキッカー電磁石の設置作業に関して述べる。通常は重量物である電磁石を設置するには床上操作式クレーンを用いるが、ポールピースと真空ダクトのクリアランスが極めて小さい偏向電磁石の移動には精密な調整が必要となる。そこで、クレーンの梁を利用して水平移動のためのトロリーを取り付け、その下に垂直移動のためのチェーンブロックを取り付けることで手動による微調整を可能として交換を行った。その後、電磁石を支える 4 本のビスの回転数を微調整して、ビーム強度が最大値となる角度になるよう固定した。また従来の偏向電磁石はコイルに用いるホローコンダクタに電流と冷却水を供給する銅パイプを直結して複数台のコイルと直列に接続していたので、キッカー電磁石を設置する際には銅配管をポリウレタンチューブに交換することで絶縁して冷却水のみを従来のラインから供給し、独立にキッカー電磁石電源から電流を供給できるようにした。

次にタイミングシステム[5]の改修に関して述べる。キッカー電磁石の交互出力を可能とするため、商用周波数と同期した最大 60 Hz の基本信号を 1/2 に分周して Duty 比 50 %にした矩形波をキッカー電磁石に印加できるようにした。さらにその矩形波と矩形波を反転させた信号をそれぞれ第 2 照射室からのトリガーと第 1 照射室からのトリガーと論理積を取ることで、両室で独立に使用できるトリガー信号を供給できるようにした。

最後に照射室の整備状況に関して述べる。第 1 照射室にパルスラジオリシス計測システムを構築するために、光学系、計測系の機器の購入と設置、同軸ケーブルと LAN ケーブルの敷設といった機器整備を進めている。これらの機器の放射線防護のために加速器運転時の照射室内の線量を測定することにした。1 Sv/h の高線量まで測定可能で、アナログ出力端子にオシロスコープと接続することで簡易的にパルス放射線が測定できる応用技研社の AE-133V/Λ2+を用いて、発生点との距離や遮蔽厚を変えながら測定を続けている。

#### 6. おわりに

L バンドライナックの電子ビームを 2 つの照射室で同時に利用可能にするビーム振り分けシステムの開発を行った。ハードウェアに関しては、キッカー電磁石電源とキッカー電磁石を開発することにより 30 Hz まで対応可能なものとした。また従来の FL-net を用いた制御システムと共存するために、PLC プログラムの改修と Visual C#を用いた GUI プログラムを制作して、イーサネット経由で振り分けに必要な機器を制御できるようにした。さらに承認使用に係る変更承認申請書を原子力規制庁に提出し、審査を待ちながら、振り分け運転導入に向けた種々の作業を進めている。

#### 謝辞

振り分けシステム構築に関する作業全般にご協力・分担いただきました菅田准教授、福井技術職員、電源と電磁

石の設計にご助言をいただきました徳地特任研究員、キッカー電磁石電源の開発をご担当いただきましたパルスパワー技術研究所の皆様、キッカー電磁石の開発をご担当いただきました株式会社トーキンの皆様にはこの場をお借りして深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- [1] K. Furukawa *et al.*, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, September. 2-4, 2020, pp. 177-180.
- [2] K. Furukawa *et al.*, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, August. 7-10, 2018, pp. 1099-1101.
- [3] K. Furukawa *et al.*, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, September. 2-4, 2020, pp. 901-904.
- [4] R. Kato *et al.*, “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, Japan, July. 30 -Aug. 1, 2003.
- [5] K. Kashiwagi *et al.*, “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, Japan, July. 30 -Aug. 1, 2003.

本稿は大阪大学技術職員研修の技術職員講演の報告書をレイアウトのみ変更し転載したものです。