

J-PARC TIMING SYSTEM

Fumihiko Tamura^{*A)}, Hiroshi Yoshikawa^{A)},
Masahito Yoshii^{B)}, Junsei Chiba^{B)}, Tadahiko Katoh^{B)}, Akira Takagi^{B)}
A) Center for Proton Accelerator Facility, Japan Atomic Energy Research Institute
2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan
B) High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801, Japan

Abstract

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) のタイミングシステムの概要を述べる。J-PARC の加速器は異なる繰り返しを持つリナック、RCS、MR からなり、4つの施設 (核変換施設、物質生命科学実験施設、原子核実験施設、ニュートリノ実験施設) に対して、各加速器の運転パルス毎にビームの行き先が異なる複雑なオペレーションが求められる。これら加速器の運転タイミングを統括する高精度のタイミングシステムについて述べる。

J-PARC のタイミングシステム

1. はじめに

J-PARC (大強度陽子加速器計画) の加速器は、400-MeV のリナック、3-GeV の速い繰り返しシンクロトロン (RCS)、50-GeV のシンクロトロン (MR) から成る。J-PARC は世界最高クラスの大強度陽子ビームの加速器であるため、加速器機器の放射化につながるビームロス是最小に抑えなければならない。高精度のビーム制御が必須であり、タイミングシステムは高安定かつ高精度なものでなければならない。許されるトリガーのジッターは 1-nsec 以下である。

J-PARC では、タイミングの種類をスケジュールドタイミングおよびシンクロナイゼーションタイミングの 2 種類定義している。

スケジュールドタイミングは、中央制御から送られる 50-Hz のトリガーからのディレイとして定義される。このディレイ値はあらかじめプログラムされている。J-PARC のほとんどの機器および電源は、このスケジュールドタイミングに基づいて動作する。

シンクロナイゼーションタイミングは、中央制御以外の、加速器機器または電源により生成されるトリガーに基づいたタイミングである。一例として、RCS の取り出しキッカーと MR の入射キッカーの放電トリガーは、RCS の実際の周回ビームに同期していなければならない。スケジュールドタイミングでは同期できないため、RCS の RF システムによって生成されるトリガーを基準とする。

この発表では、スケジュールドタイミングシステムに絞って詳細を述べる。

リナック、RCS、MR はそれぞれ、50-Hz、25-Hz、0.274-Hz の繰り返しで運転される。特に、リナックおよび RCS は以下に示すように、運転パルスごとに異なるビームの行き先を持つ。(1) リナックは、RCS 行きのビームと核変換施設 (ADS) 行きのビームを交互に加速する。(2) 1 回の MR サイクル中に RCS (25-Hz 運転) は 91 回の運転サイクルを持つが、このうちの

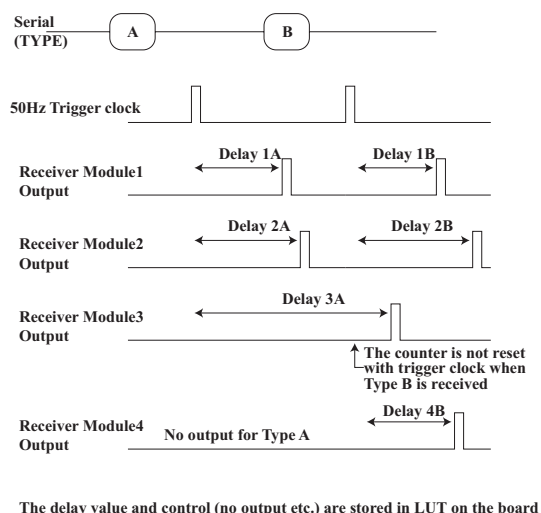


図 1: スケジュールドタイミングの動作原理

4 回は MR 行きのビーム加速サイクルであり、残りは全て中性子施設 (MLF) 行きのビームパルスである。このように、リナックおよび RCS は各運転パルスごとに、異なるモードおよびタイミングで動作しなければならない。この動作をどのように実現するかは次節で述べる。また、ハードウェア、および製作状況についても以下の節で述べる。

2. タイミングシステムの構成

2.1 動作原理

図 1 にスケジュールドタイミングの動作原理を示す。前節でも述べたように、スケジュールドタイミングは中央から各施設に送られる 50Hz のトリガークロックからのディレイとして定義される。トリガークロックを送るに先立ち、「タイプ」と呼ばれる制御ワードが中央から送られる。タイプは、次の 50-Hz

*E-mail: ftamura@linac.tokai.jaeri.go.jp

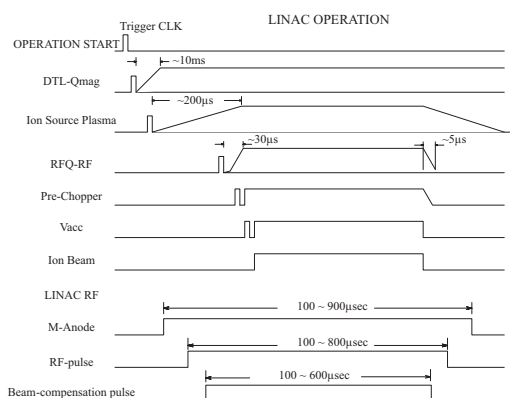


図 2: リナックのタイミングチャート

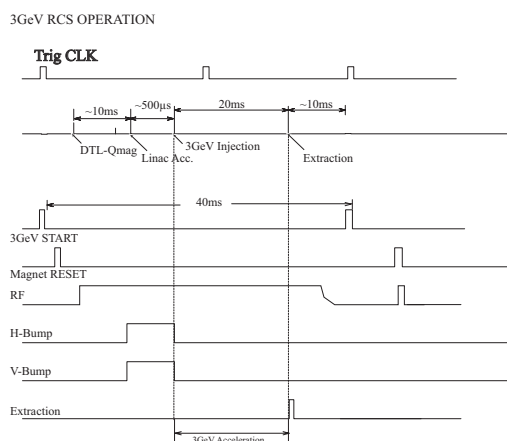


図 3: RCS のタイミングチャート

の周期の加速器の運転の「タイプ」を表わす制御ワードである。加速器機器室・電源室等に置かれたタイミングコントロール受信モジュールは、これらトリガークロックおよびタイプを受信する。各受信モジュールはそれぞれメモリを持ち、タイプに対応するメモリの内容により、次の周期の動作を以下のように決定する。すなわち、(1) 設定されたディレイでパルスを出力する。(2) 次の周期ではパルスを出力しない。(3) トリガークロックを受信してもディレイカウンタをリセットせずに、トリガークロックを越えて数え続ける。

この方法により、50 Hz ごとに違ったタイミングおよびモードで加速器の機器および電源を運転することができる。

J-PARC では、RCS および MR の電磁石電源は AC ラインとは非同期に運転されるため、タイミングシステムは AC ラインに同期する必要がない。このため、J-PARC の全てのタイミングシステムは、高安定・高精度のシンセサイザで生成されたマスタークロックを基準に動作し、50-Hz トリガークロックはマスタークロックをカウントすることにより生成される。リナックの加速周波数が 324-MHz であることを考慮し、マスタークロックの周波数は 12-MHz とした。

2.2 各加速器のタイミングチャート

図 2 に、リナックの主な機器のタイミングを示した。DTL-Q 電磁石電源は 10 msec 程のライズタイムを持つため、最初にトリガーを与えられる。リナックは 50-Hz の繰り返しで運転され、そのうちの半分のパルスではビームは RCS (25-Hz 運転) に導かれる。ビームの入射から取り出しまでの RCS のタイミングチャートを、図 3 に示した。50-GeV の MR の通常運転では、1 回の MR サイクル中には 91 回の RCS の運転サイクルがある。

MR には速い取り出しおよび遅い取り出しのビームオペレーションがある。MR のタイミングチャートを図 4 に示す。図中のマーク、P0 (=P5) から P4 は、MR サイクル開始、MR へのビーム入射開始、加速開始、加速終了、減速をそれぞれ示している。

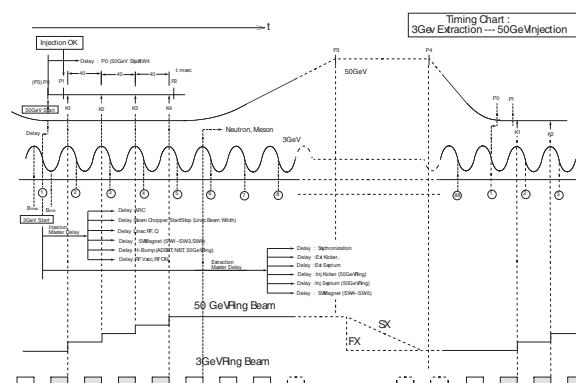


図 4: MR のタイミングチャート

2.3 ハードウェア

中央のタイミング制御室には以下に述べる装置・モジュールが置かれる。高精度シンセサイザおよびクロックジェネレーターにより、12-MHz のマスタークロックが生成される。50-Hz のトリガークロックは、マスタークロックをカウントするトリガークロックジェネレータから出力される。タイミングコントロール送信モジュールは、50-Hz のトリガークロックに先立ちタイプ情報を送信するものである。タイプはシリアル化して送信される。J-PARC 各施設へのこれらの信号の配信のために、ファンナウトと E/O モジュールが使用される。これらの信号は中央から光ケーブルを通じて各施設に配られる。各施設では、必要に応じ O/E、ファンナウト、E/O を組み合わせるリレーステーションを構成することができる。このように信号配信系はスター状の構成になっており、全ての施設では同じ信号および情報(クロック、トリガークロック、タイプ)を受信することになる。

図 5 に電源室等に置かれるタイミング受信設備の概略を示した。各電源室等で、配信された 3 種類の信号は O/E モジュールにより電気信号に変換され、タイミングコントロール受信モジュールに導かれる。受信モジュールは、個別のトリガーを生成する重要なモジュールであり、詳細は次節で述べる。受信モジュールの 8 チャンネルの出力は、トリガーファンナ

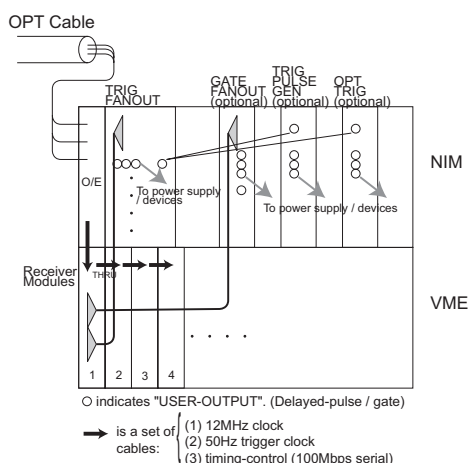


図 5: タイミング受信設備

ウトおよびゲートファンアウトで、加速器機器の要求する電圧レベルに変換される。必要に応じ、トリガーパルスジェネレータによりパルス幅の変更が行なわれる。光トリガーが必要な機器のためには、E/Oモジュールが用いられる。

2.4 タイミングコントロール送信・受信モジュール

送信モジュールは、タイプ列を記憶する「タイプメモリ」を基板上に持っている。毎回のトリガークロックに先立ち、タイプメモリから取り出されたタイプがひとつずつ送信される。タイプ列の長さは最長1024個までの範囲で任意に決めことができ、タイプ列の終わりはエンドワードによって示される。ひとつのタイプ列は、1回のMRサイクルに相当する。毎回のMRサイクルに先立ち、「S」と呼ばれる特別なワードが送信され、MRサイクルの始まりを示す。タイプおよび「S」のビット幅は32ビットである。タイプはシリアル化して送信される。タイプのMSBは、「S」を表わす特別なビットである。以下、タイプは「A」(7ビット)「B」「C」「D」(各8ビット)の4つのセクションに分割される。受信モジュールは設定により、どのセクションを受信するかを決めることができる。

受信モジュールは基板上にルックアップテーブル(LUT)を持ち、LUTには「ディレイワード」(ディレイ値と制御ビットから成る)が記憶される。LUTの内容はボード上に計算機からダウンロードされる。受信モジュールは、タイプを受信すると、タイプに対応したディレイワードをLUTから取り出す。トリガークロックを受信すると、受信モジュールは基板上のディレイカウンタをスタートさせ、ディレイワードに応じたタイミングでトリガーパルスを出力する。ディレイ値は24ビットで、ディレイカウンタは96-MHzで動作する。96-MHzの内部クロックはPLLにより、12-MHzのマスタクロックから生成される。最大約170-msecまでカウントすることができる。LUTから読み出されたディレイワード中の制御ビットにより、各チャンネルのカウンタは、以下のどれかの動作をする。(1)トリガークロックによりカウンタをリセッ

トし、カウントを開始する。ディレイワード中の指定のディレイ値でパルスを出力する。(2)トリガークロックから先の50-Hzピリオドではパルスを出力しない。(3)トリガークロックを受信してもディレイカウンタをリセットせずにカウントを継続し、指定のディレイ値でパルスを出力する。(3)の機能は、RCSおよびMRといった50Hzと異なる周期の施設のタイミングを設定するために必要な機能である。また、制御ビットの設定により、VMEインタラプトを発生させることができる。

受信モジュールはカスケード接続ができるように入力信号のスルー出力を備えている。ひとつの受信モジュールは独立な8チャンネルのカウンタを持つ。主な出力ポートを以下に示す。このうち、ディレイパルス出力およびゲート出力からの信号は、ドライバーモジュールを通じ適切な電圧レベルに変換されたうえで機器・電源に導かれる。

- ディレイパルス出力: 独立な8チャンネル。上に示した通り。
- ゲート出力: 4チャンネル。ディレイパルス出力のうち1つによりリセットされ、別な出力によりリセットされる。
- タイプ出力: 受信したタイプは、VMEレジスタに保持されるとともにモジュール前面パネルからパラレル出力される。
- トリガーカウント: MRサイクル中で、開始から何回のトリガークロックを受信したかを示す。

3. 製作状況

量産機の製作に入っており、基本特性は良好である。GUIまで含めたソフトウェアについての検討をしている。

4. まとめ

- J-PARCは、スケジュールドタイミングおよびシンクロナイゼーションタイミングの2種類のタイミングをもとに動作する。
- スケジュールドタイミングは、50Hzごとに異なるビームオペレーションに対応できるようにデザインされた。このシステムにより、異なる繰り返しを持つリナック、RCS、MRのタイミングを総合的に統轄することができる。

5. 謝辞

KEKの田中真伸、島崎昇一、門倉英一の各氏には助言および協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] "Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Facility Project", KEK-Report, 2003
- [2] E. Kadokura, "Timing System for the JHF", 2000
- [3] F. Tamura et al., "J-PARC Timing System", in the proceedings of ICALEPCS 2003, 2003