

SPring-8 高周波加速システムにおける RF 位相の初期化と整列

RF PHASE INITIALIZATION AND ALIGNMENT OF THE RF ACCELERATION SYSTEM AT SPring-8

岩井 瑛人 ^{*,A,B)}, 大島 隆 ^{A,B)}, 前坂 比呂和 ^{B,A)}, 稲垣 隆宏 ^{B,A)}
Eito Iwai ^{*,A,B)}, Takashi Ohshima ^{A,B)}, Hirokazu Maesaka ^{B,A)}
Takahiro Inagaki ^{B,A)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{B)} RIKEN SPring-8 Center (RSC)

Abstract

SPring-8 has transitioned to an MTCA.4-based LLRF system, preceding the SPring-8-II upgrade. This LLRF system measures RF amplitude and phase using undersampling IQ detection with a Numerically Controlled Oscillator (NCO). However, the NCO introduces an indeterminacy in the calculated phase, depending on which sampling clock is used as the starting point relative to the fundamental frequency, thus requiring proper initialization. A systematic initialization method for this NCO reset was described. Additionally, at SPring-8, where each of the four RF stations contains eight accelerating cavities requiring precise inter-station and inter-cavity phase alignment, we report on beam test results. Referencing prior studies, our method efficiently measures these phases using data inherently available during the operationally essential beam accumulation process. By evaluating the increase rate of klystron power and the change rate of cavity voltage, this technique offers robust measurements independent of calibration factors. We successfully measured and aligned inter-station and inter-cavity phase differences to approximately 1 degree and about 0.5 degrees, respectively.

1. はじめに

兵庫県の大型放射光施設 SPring-8 では大型アップグレード SPring-8-II の準備が始まっているが、SPring-8-II アップグレードに先んじて、LLRF 系では建設時当初の NIM/VME ベースのシステムから MTCA.4 ベースへの移行に着手、2018 年から実機展開を始め、全面移行が既に完了している [1,2]。この高周波加速システムにおいて、SPring-8-II 開始時の安定で円滑なコミッションと運転のために次の 2 つの課題について取り組んでいる。一つ目は IQ 検波に用いる数値制御発振器 (NCO; Numerically Controlled Oscillator) のリセットに生じる不定性について、もう一つはステーション、空洞間の位相差の測定についてである。本発表ではこれら 2 つの取り組みについて述べる。

2. SPring-8 高周波システムの概要

現在の SPring-8 蓄積リングの加速周波数は 508.58 MHz、加速電圧は 16 MV、放射損失は偏向電磁石によるものが 8.9 MV、挿入光源によるものが 3—4 MV である。バケット数は 2436 であり、従って周回周波数は 208.78 kHz である。SPring-8 の高周波システム [3—5] は周長 1436 m 上に均等に設置された 4 つのステーションで構成される。各ステーションには 8 つの加速空洞が配置され、1 つの 1.2 MW クライストロンで駆動している。これらのステーションを制御する LLRF システムは、SPring-8-II アップグレードに先んじて 2018 年から MTCA.4 をベースとしたシステムへ移行を進めてきた。

Figure 1 はこの MTCA.4 ベースの LLRF システム概要

図 (RF 部) である。このシステムでは空洞ピックアップなどの信号の振幅, 位相を undersampling 方式で測定している。用いるダイレクトサンプリング用 RTM の測定 RF 入力数は 9 である。加速周波数である 508.58 MHz の 5/7 である 363.27 MHz を ADC クロックとすると、測定されたデータは 2/7 である 145.30 MHz の中間周波数となる。このデータを NCO を用いて IQ 検波することで振幅, 位相を得る。各入力信号の経路上には rotator があり、読み取り位相を回すことができる。

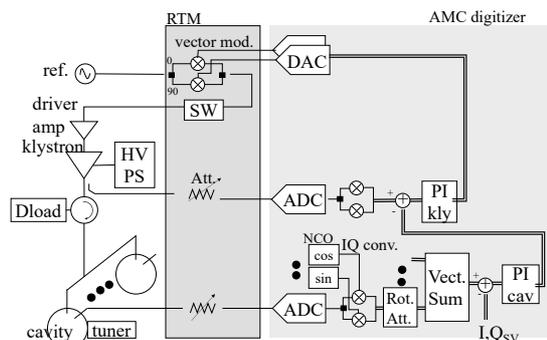


Figure 1: Block diagram of RF part of the MTCA.4 based LLRF system [2].

各ステーションの加速電圧のベクトル和はフィードバックによって一定に保たれている。このフィードバックを構成する 8 空洞のピックアップとクライストロン出力は 1 組の AMC-RTM ボードでモニター、制御されている。このほか各空洞への入力、各空洞からの反射、その他サーキュレータ入出力などの監視のため、計 4 組の AMC-RTM で構成されている。例えば、各空洞のチューナーフィードバックは、それぞれ別の AMC-RTM 組によってモニターされるピックアップと入力の位相

* iwai@spring8.or.jp

差を一定に保つように動作するため、ボード間の位相差は常に担保されている必要がある。この高周波システムについて、位相の初期化と整列について以降で述べる。

3. NCO リセットの安定化

Figure 2 は各ステーションのクロック、タイミングシステムの概要である。前述したように SPring-8 の MTCA.4 ベース LLRF システムでは加速周波数の 5/7 の ADC クロックによるアンダーサンプリング方式で RF の振幅、位相の測定を行う。この IQ 検波で用いる NCO が基本周波数に対するどのサンプリングクロックを起点にするかにより、位相計算値に 144 度毎/72 度単位の不定性が生ずるため、ボード間の位相差を担保するためには、適切な初期化が必要となる。この NCO のリセットは、各種トリガーを受渡するために全ての MTCA.4 シャーシに設置されている トリガー AMC [6] を用いて行う。

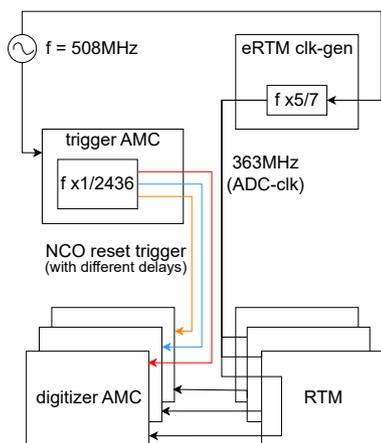


Figure 2: Block diagram of clock and timing system. Sampling clock and NCO reset triggers are distributed through backplane from eRTM clock generator and trigger AMC, respectively.

Figure 3 上は、加速周波数を分周して生成した周回周波数を基準に、NCO のリセットタイミングの遅延量に対する 4 つのボードで観測される reference 信号の位相である。各ボードが異なるタイミングで 144 度毎の位相の飛びを起こしていることがわかる。リセットタイミングの遅延量のスキャンを行い、各ボード毎に適切な遅延量を設定 (し reference 信号の rotator を調整) することで、Fig. 3 下のように全てのボードの NCO リセットトリガーに対する応答を揃えることができる。リセットタイミングの遅延量は、長期的なゆっくりとしたドリフトや jittering など考慮して 144 度毎の位相の飛びの中間の“腹”に設定した。こうすることで、高周波の振幅、位相のモニター、出力を行う ADC/DAC 系の初期化においては、NCO のリセットトリガーを発行するだけで各ボードの位相は適切に初期化されるようになった。作業等による基準信号の中断や MTCA シャーシ

全体の再起動など、トリガーボードの初期化を伴う際には、ここで説明したリセットタイミングのスキャンを行う。この仕組みは高周波システムの初期化シーケンスの一つとして GUI からボタン一つで実行できるよう、自動化され運転に導入されている。

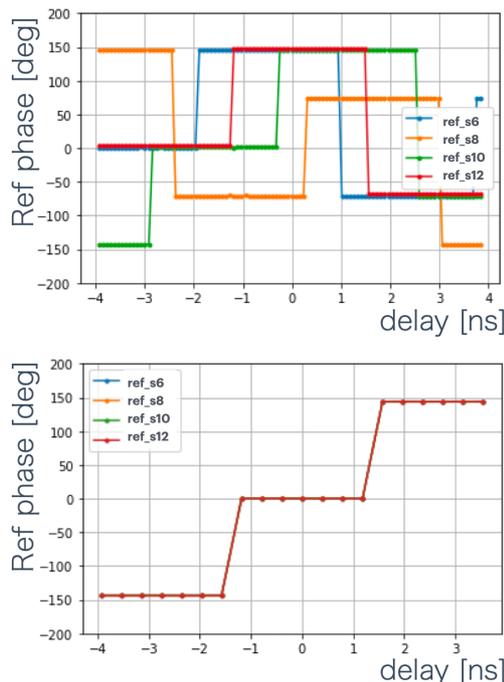


Figure 3: Observed reference phase on each slot as a function of NCO reset timing before(top) and after(bottom) the timing alignment.

この仕組みは概ね問題なく動作しているが、稀にボード間で位相差が見られることが確認されている。これはボード内の後半のチャンネルで稀に位相ズレを起こすことに関係していると考えている。各ボード 2 ch の ADC チップを 5 つ内蔵しているが、ボード内で各 ADC チップに ADC クロックを配る配線長が異なるため、ADC チップ単位で位相差が発生する問題が以前あった。この問題を抑制するために各 ADC チップに渡すクロックを最後に FPGA 内の DFF でたたき直すように改修して、チャンネル間の位相差発生頻度を改善したという経緯がある。各 reference 信号は各ボードの ch9 に入力していることもあり、この問題については調査中である。

4. ステーション間、空洞間の位相差の測定

前述のように SPring-8 には 4 つの RF ステーションがあり、また各ステーションには 8 台の高周波加速空洞が配置されている。これらの位相関係がずれると、蓄積ビームに対する加速電場が低下し、ビーム寿命の低下などの問題が生じ、また低下した電場を補うために無駄な電力が必要となる。これまでは各ステーションの RF の振幅と位相を大きく振って、それらのシンクロトロン振動周波数を測定し、その応答をフィットすることで各ステーションの振幅と位相を測定してきた。

この測定には通常運転では使用しない高周波の振幅や位相に対するビームの応答が必要なので、調整時間を割いてそれらのデータを取得する必要がある。空洞間の位相差は SPring-8 建設時に導波管位相器を調整しており、その調整結果に多少の差があることはわかっている。SPring-8-II では導波管の組替や同軸ケーブルの張り替えを行うため、空洞間の位相差や減衰係数などは再較正する必要がある。円滑に安定してコミッショニングと運転を再開するために、運転を停めることなく位相差の測定や確認ができる方法を検討し、現 SPring-8 にて実証試験を行なった。

- なるべく測定値や物理量の絶対値に直接依存しない評価方法にする。
- なるべく調整や運転に必要な操作、コンディションのみで評価できるようにする。

測定手法の検討にあたっては先行研究 [7] を参考にした。

4.1 ステーション間位相差の測定

ステーション間位相差は、蓄積電流増加に伴う各ステーションのクライストロン電力増加率のバランスから評価する。各ステーション 8 空洞の加速電場のベクトル和がフィードバックにより一定に保たれている時、加速高周波に対するビームのシンクロナス位相が小さいステーションでは大きくエネルギーを失うためクライストロン電力は大きく増加し、シンクロナス位相が大きいステーションではエネルギー降下が少ないため、クライストロン電力の増加は小さくなり、全てのステーションのシンクロナス位相が揃っている時はクライストロン電力増加率は等しくなる。Figure 4 はビーム試験においてステーション A、D の位相をそれぞれ +20 度、-20 度振った時の蓄積ビーム電流に対する各ステーションのクライストロン出力電力の増加率である。空洞の β は 100 mA 蓄積した運転時に合わせており、蓄積電流が低い時には反射電力の影響が見られる。そのため、Fig. 4 の破線のように高蓄積電流値側のデータを直線フィットして外挿することでビーム蓄積前の実効電力を推定した。プロットを見るとステーション位相を変更した A、D のクライストロン電力増加率がそれぞれ大きく低下、増加していることがわかる。この傾きからベクトル計算で各ステーションの相対位相を求め、変更前後の差を取ると、位相を変更した A、D はそれぞれ +23.1 度、-24.3 度で概ね設定した ± 20 度を得ることができ、また変更していない B、C はそれぞれ +0.8 度、+0.3 度で有意な差は見られなかった。設定した既知の位相差を各ステーションのクライストロン電力増加率から導出できることが確認できたので、始状態に戻してこの時得られた位相差を補正すると Fig. 5 のようにステーションの位相を整列することができた。始状態からの最大補正值 3.5 度で有意な改善が見られたので、ステーション間位相差をおよそ 1 度以内の精度で補正できたと考えられる。このことは、試験時に位相を変更していないステーション B、C について変更前後の差が +0.8 度、+0.3 度に収まっていたことも無矛盾である。

この手法は、クライストロン電力増加率に着目する

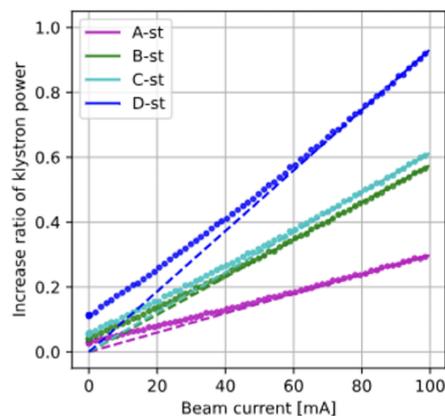


Figure 4: Normalized increase in klystron power as a function of stored beam current after shifting phases by +20 degrees at A station and -20 degrees at D station.

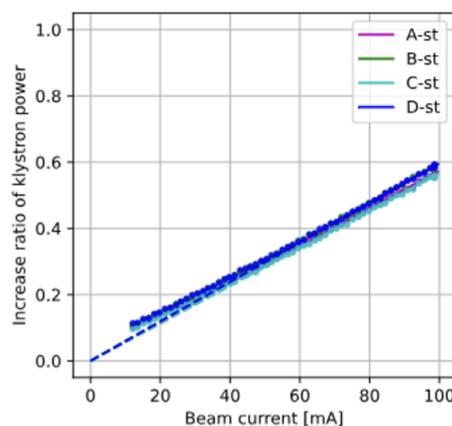


Figure 5: Normalized increase in klystron power as a function of stored beam current after phase adjustment.

ことで、各ステーションの電力較正係数には依存しないため、仮に較正係数がずれていても、同じ結果を得ることができる。補正すべき位相差の絶対値は、比較的まとまな値が得やすい $\cos \phi_s$ (ϕ_s : シンクロナス位相) によってのみ決まり、またこれらの値は後述の空洞位相の測定においても評価することができるため、調整手法としてロバストである。また、リングにビームを蓄積する過程で付随的に取得することができるデータのみから評価することができ、調整のためのデータ取得の時間も不要であるため効率的である。

4.2 空洞間位相差の決定

空洞間の位相差についても、同様にビーム入射時の電流増加に伴う各空洞電圧増減率に着目する。Figure 6 はビーム試験開始時に電流積み上げた際の各空洞の加速電圧増減率である。空洞電圧でも先と同様にビームローディングとの関係に応じてビーム蓄積時の応答に差が現れる。

このビーム蓄積時に見られる空洞電圧の変化の表式について考える。空洞 i のシンクロナス位相を ϕ_{si} として先行研究 [7] に倣うと空洞電圧 V_{ci} はビーム電流 I_b

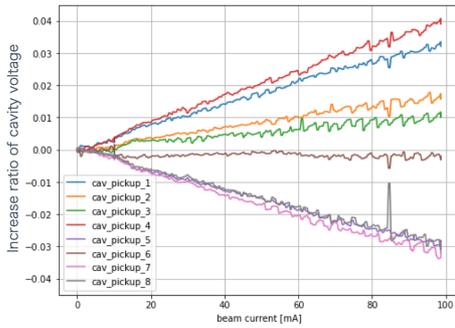


Figure 6: Change ratio of cavity voltage as a function of stored beam current.

を用いて、

$$V_{ci}(I_b) = \frac{2\sqrt{\beta R_{sh} P_{in}(I_b)}}{\beta + 1} - V_{br}(I_b) \cos \phi_{si} \quad (1)$$

と書ける。 β は結合度、 R_{sh} はシャントインピーダンス、 $P_{in}(I_b)$ は空洞への入力電力、 $V_{br}(I_b) = R_{sh} I_b / (\beta + 1)$ である。この空洞についてビーム蓄積前 ($I_b = 0$) に対する蓄積後 (I_b) の増減率を考えると、

$$\begin{aligned} \frac{\delta V_{ci}(I_b)}{V_{ci}(0)} &\equiv \frac{V_{ci}(I_b) - V_{ci}(0)}{V_{ci}(0)} \\ &= \left(\sqrt{\frac{P_{in}(I_b)}{P_{in}(0)}} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_{sh}}{\beta P_{in}(0)}} \cos \phi_{si} I_b \right) - 1 \\ &= \left(\sqrt{\frac{P_{in}(I_b)}{P_{in}(0)}} - k \cos \phi_{si} I_b \right) - 1 \end{aligned} \quad (2)$$

となる。括弧内第二項の $\cos \phi_{si} I_b$ の係数を k とした。一方、式 (1) をステーションの空洞数 N 全てについて足し合わせると、

$$P_{in}(I_b) = \frac{(\beta + 1)^2 \left\{ \sum_i^N V_{ci}(I_b) + V_{br}(I_b) \sum_i^N \cos \phi_{si} \right\}^2}{4N^2 \beta R_{sh}} \quad (3)$$

となる。この第一項の $\sum_i^N V_{ci}(I_b)$ はステーションの加速電圧 V_{st} であり (たとえ空洞間に位相差があったとしても) フィードバックで保たれているため一定である。またこの式 (3) について $I_b = 0$ を考えると、先ほど定義した k は次のようになる。

$$k \equiv \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_{sh}}{\beta P_{in}(0)}} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{NR_{sh}}{(\beta + 1)V_{st}} \\ &= \text{const.} \end{aligned} \quad (5)$$

式 (2) を改めて見ると、蓄積前後の空洞電圧比の初項は入力電力比で、電力換算係数などに依らず、ある蓄積

電流 I_b 時の電圧比から各空洞のシンクロナス位相 ϕ_{si} (つまり、空洞間位相差のスケール) を決めるのは、この係数 k だけになっていることがわかる。式 (5) は、比較的値が定かな空洞数 N 、結合度 β 、シャントインピーダンス R_{sh} 、ステーション加速電圧 V_{st} だけで表現されている。また式 (4) については、前述の β, R_{sh} に加えて蓄積前の空洞入力電力という測定値が入っているものの、平方根の中なので ($\pm 10\%$ のずれが結果に $\pm 5\%$ でしか効かないなど) 影響は抑制される。SPring-8 では各ステーション 8 台の空洞を 1 台のクライストロンでドライブしているので、計算ではクライストロン電力 P_{kly} の $1/8$ を平均値として用いた。SPring-8 の設計値は $R_{sh} = 6 \text{ M}\Omega$ 、 $\beta = 2$ 、 $V_{st} = 4 \text{ MV}$ であり、設計値で決まる値 (5) は 4.00 A^{-1} 、ビーム試験時の測定値を含む計算値 (4) は 3.97 A^{-1} ($P_{kly} \sim 380 \text{ kW}$) であった。

ビーム試験時は A ステーションにおいて空洞 #4、#7 をそれぞれ -5 度、 $+5$ 度ずつ位相をずらして変化を調べた。なお、各空洞への位相器は放射線管理区域内の地下ピットにあり遠隔では制御できないので、試験時はチューナー位置をずらしてピックアップ位相を変更¹した。位相変更前後の差を取ると、変更した #4、#7 はそれぞれ -4.8 度、 $+4.1$ 度で概ね設定した ± 5 度を得ることができ、また変更していない残りについては $0.3\text{--}0.5$ 度程度で有意な差は見られなかった。また、当該ステーションの空洞 8 台のシンクロナス位相 $\phi_{s,st}$ は 56 度程度であり、これは偏向電磁石による放射損失 9 MV と加速電圧 16 MV の 2 つの設計値による計算値 $\phi_s = \arccos(9/16) \sim 56$ 度とよく合致している。

設定した既知の空洞位相差を空洞電圧増減率から導出できることが確認できたので、始状態に戻してこの時得られた位相差を補正すると Fig. 7 のように空洞間の位相差を抑制することができた。補正前におよそ $\pm 4\%$ あった電圧増減率が、最大 ± 5 度程度の補正後に $\pm 0.5\%$ 以内に収まっているので、空洞間位相差を約 0.5 度程度の精度で補正できたと考えられる。このことは、先の試験で位相を変更していない #4、#7 以外の空洞について変更前後で $0.3\text{--}0.5$ 度程度の差に収まっていたこととも無矛盾である。この手法では空洞間位相差だけでなく、当該ステーションのシンクロナス位相が求まるので、ステーション間位相についても今後評価を行いたい。

前述のステーション間位相の手法と同様、各空洞電圧の増減率を評価することで、個々の空洞電圧換算係数には依存せず、またリングにビームを蓄積する過程で付随的に取得することができるデータのみから評価することができるという点で、この手法もロバストで効率的な手法である。

5. まとめ

大型放射光施設 SPring-8 では SPring-8-II アップグレードに先んじて、MTCA.4 ベースの LLRF に移行を完了している。本稿では SPring-8-II 開始時の安定で円滑

¹ 実際には digitizer AMC にある当該空洞ピックアップの rotator をそれぞれ ± 5 度回して、それをチューナーフィードバックに追いかけることで空洞を少しデチューンして位相をずらした。

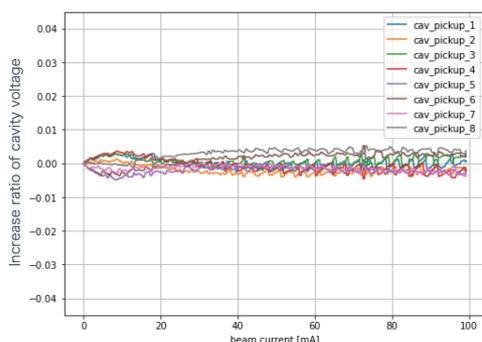


Figure 7: Change ratio of cavity voltage as a function of stored beam current after phase adjustment.

なコミッショニングと運転のために、複数のボード間の位相を固定するための NCO リセットの安定化と、ステーション間、空洞間の位相について、ビーム蓄積時に付随的に取得できるデータを用いた測定値の換算係数に依存しない導出方法について報告した。ステーション間位相については 1 度以内、空洞間位相については 0.5 度程度の精度で求めることができると考えられる。

参考文献

- [1] T. Ohshima *et al.*, “Development of a New LLRF System Based on MicroTCA.4 for the SPring-8 Storage Ring”, in Proc. 8th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC’17), Copenhagen, Denmark, May 2017, paper THPAB117, pp. 3996–3999. doi:10.18429/JACoW-IPAC2017-THPAB117
- [2] T. Ohshima *et al.*, “MTCA.4 規格低電力高周波システムの SPring-8 蓄積リング A ステーションへの導入”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan, WEOL10.
- [3] M. Hara *et al.*, “RF Stations of the SPring-8 Storage Ring”, in Proc. PAC’ 97, Vancouver, Canada, May 1997, paper 4P028, pp. 2971-2973.
- [4] H. Ego *et al.*, “RF system of the SPring-8 storage ring”, J. Synchrotron Rad. (1998), 5, 379-381.
- [5] H. Ohkuma *et al.*, “Operation Status of the SPring-8 Storage Ring”, in Proc. EPAC2000, Vienna, Austria, WEP5A05.
- [6] H. Maesaka *et al.*, “Development of a Trigger Distribution System Based on MicroTCA.4”, in Proc. 13th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC’22), Bangkok, Thailand, July 2022, paper TUPOPT067, pp. 1171-1173. doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-TUPOPT067
- [7] T. Kobayashi *et al.*, “SuperKEKB での大電力 RF 分配系におけるビーム負荷差異による空洞間位相調整”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, September 2-4, 2020, Online, WEPP38.