

## STABILITY OF RADIO FREQUENCY SYSTEM AT RIBF

Kenji Suda<sup>1, A)</sup>, Ryo Koyama<sup>B)</sup>, Masayuki Kase<sup>A)</sup>, Osamu Kamigaito<sup>A)</sup>, Naruhiko Sakamoto<sup>A)</sup>, Nobuhisa Fukunishi<sup>A)</sup>,  
Masaki Fujimaki<sup>A)</sup>, Kazunari Yamada<sup>A)</sup>, Tamaki Watanabe<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science

2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

<sup>B)</sup> SHI Accelerator Service Ltd.

1-17-6 Osaki, Shinagawa, Tokyo, 141-0032

### Abstract

At RIKEN RI Beam Factory (RIBF), all the accelerating RF systems must be highly stable in order to provide high intensity heavy ion beams up to 1pμA for more than a week. We started to monitor for the stability of the RF systems and beam phases using lock-in amplifiers with high precision. The present degree of stability of the RF systems will be reported.

## RIBFにおける高周波系の安定度

### 1. はじめに

理研RIビームファクトリー(RIBF)では、入射器(線形加速器RILACあるいはAVFサイクロトロン)と4台のサイクロトロン(RRC, fRC, IRC, SRC)を多段式に用いて重イオンを加速する。現在、ビームの大強度化を目指しているが、長期間安定的にビームを供給するために、加速高周波(RF)のこれまでより一段高い安定度が要求されている。目標とする安定度は、電圧変動が±0.1%、位相変動は±0.1度である。この目標を達成するため、昨年度よりロックインアンプを用いてRFの電圧・位相およびビーム位相を長期的に十分良い精度で測定し、それらの間の関係を調べることから始めている。今回の発表では、今年7月のマシンスタディにおけるRFの安定度、およびRFとビーム位相との関係の解析結果について報告する。

### 2. RF安定度のデータ

2008年7月のマシンスタディは1日から9日間行われ、<sup>238</sup>UビームがRILAC、RRC、fRC、IRCにより加速された。SRCは超伝導磁石の冷凍機故障のため使用しなかった。RFの基本周波数(1f)は18.25 MHzで、IRCの下流におけるビームエネルギーは114 MeV/u、ビーム量は約20 enAであった。今回安定度を評価したRF系を以下に示す。上流から、

- A) RILAC入射系(入射バンチャー、RFQ、リバンチャー)
- B) RILAC加速タンク6台
- C) リバンチャー2台(X[2f]、S6[3f])
- D) RRC(共振器2台)
- E) fRC(主共振器2台[3f]、FT 1台[9f])
- F) IRC(主共振器2台[2f]、FT 1台[6f])

である。周波数については、特に記していないものは1f、それ以外の場合は[]の中に示した。これらのRFの電圧・位相を約1分毎に測定した。監視

に用いたシステムの詳細については小山氏の報告<sup>[1]</sup>を参照のこと。評価した測定データは、マシンスタディ中に設けられた安定度測定の期間(8日19時17分から9日9時0分まで)に取得されたもので、この期間は安定度の評価を行いやすくするために加速器の運転パラメータを極力変えていない。

#### 2.1 RILAC入射系

RILAC入射系のRF系は入射バンチャー、RFQ、リバンチャーから構成されている。これらのRF電圧・位相の時間変動を図1に示す。電圧については、入射バンチャーのみが共振器を使用しておらず、電圧の安定度は他の2器と比較して最も良い。ただし、特に調整していないにも関わらず、1.6時間後に+0.06%の急激な変化が見られる。RFQとリバンチャーの電圧間には正相関が見られる。位相安定度は±0.1%の範囲に収まっている。

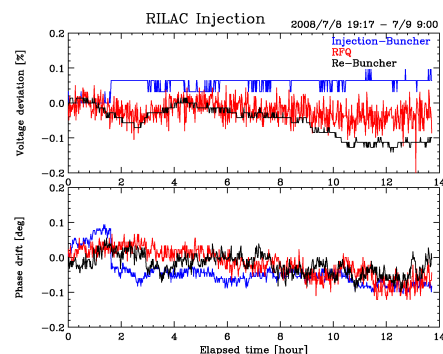


図1: RILAC入射系RFの電圧・位相の変動

#### 2.2 RILAC加速タンク

RILACの加速タンク6台(上流から#1から#6まで)のRF電圧・位相の時間変動を図2に示す。電圧については、#5と#6のそれは他と比べて安定しており、

<sup>1</sup> E-mail: [ksuda@ribf.riken.jp](mailto:ksuda@ribf.riken.jp)

変動量は0.05%である。#1から#4までの電圧は、測定開始から約10時間は $\pm 0.1\%$ の変動に収まっているものの、その後#2がダウンして復旧後に $+0.2\%$ まで値が飛んでしまっている。#4は12時間後から単調に減少し始め、最大で $-0.3\%$ 程度もずれてしまった。位相については、時間と共にタンク間の差が拡大する傾向がみられた。この傾向は、これまでにも頻繁に観測されているが、時間変化の傾きは各タンクによって毎回異なり一定していない。なお、測定中にタンク#2のRFが4回ダウンしているが(それぞれ2.0, 2.5, 4.1, 8.4時間後)、これは位相調整器の不調が原因であり、回路交換により改善した。#2のダウンとともに#3のRFも大きく変動しているが、これはピックアップ信号のスイッチ切り替えが影響して一時的に値が変化したもので、無視できる。

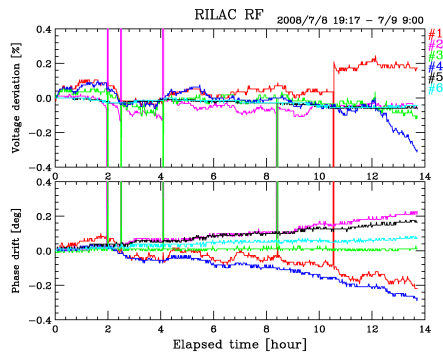


図2: RILAC加速タンクのRF電圧・位相の変動

### 2.3 リバンチャー

RILACからのビームは、RRCへ入射する前に2器のリバンチャー(X/S6)を順に通過する。これらのRF電圧・位相の時間変動を図3に示す。電圧については、3.2, 6.8時間後に明確な変動が見られ、正相関があることがわかる。これらのリバンチャーの電源系統は同一なので、まず受電が影響していると考えられる。現在は、この系統の受電データを測定していないが、今後は測定する必要がある。7時間以降に電圧変動の差が拡大しているのは、受電以外の影響と考えられる。位相については、Xリバンチャーの安定度が $-0.1$ 度と良いのに対し、S6リバンチャーは $\pm 0.8$ 度程度と悪い。ただし、この程度の位相のずれでもビームエネルギーにわずかな影響しか与えないので、リバンチャーの安定度改善の優先順位は加速器と比べて低い。

### 2.4 RRC

図4にRRCのRF電圧・位相の時間変動を示す。2台の共振器(#1, #2)の電圧および#1の位相に、10分周期のスパイク状の変動が見られる。X/S6リバンチャーと同一の時刻に電圧変動が見られることから、RRCも同様の影響を受けていると考えられる。位相については、#2は非常に安定しており、 $+0.1$ 度しか変動していない。一方、#1は#2の逆位相になるようにフィードバックをかけているにも関わらず位相差が最大 $-1.0$ 度まで広がっている。この主な原因は、RRCにおいてRF周波数が18.25 MHzの

場合、キャビティの特性のためRF電圧が小さく、フィードバック回路に入力しているピックアップ信号が小さいことにある。

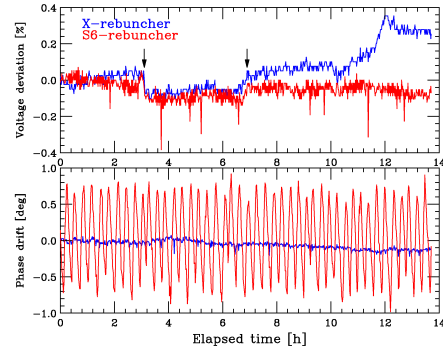


図3: リバンチャーのRF電圧・位相の変動

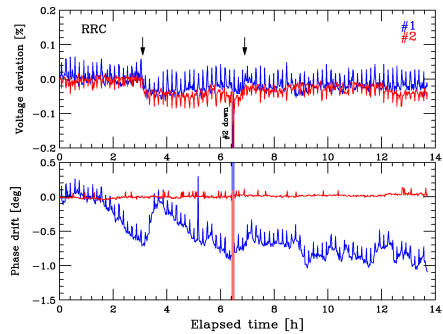


図4: RRCのRF電圧・位相の変動

### 2.5 fRC

fRCのRFの時間変動を図5に示す。主共振器(E, W)の電圧安定度は $\pm 0.1$ 度と良いが、FT電圧が1.2~2時間のゆっくりとした周期で $\pm 0.5$ 度の範囲を変動している。FT電圧の変動は、安定度測定を開始する約4時間前までは $\pm 0.15$ 度以内であったが、その後、ほぼ直線的にずれ始め、最終的に図5に見られる振動パターンとなった。また、FT電圧と主共振器Eの電圧との間に正相関がみられる。位相については、主共振器2台の間に約20分周期の正相関の変動があるが、変動幅はFTも含めて約 $0.2$ 度であり、全体としての安定度は悪くない。

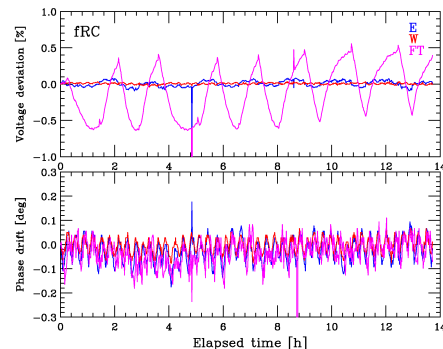


図5: fRCのRF電圧・位相の変動

### 2.6 IRC

IRCの電圧安定度(図6)は非常に良く見えるが、これは、他と違ってループ外のピックアップ信号を直接観測するのではなく、振幅調整器のフィード

バック出力をモニターしたためである。また、取り出しビームの電流量が減少したため、運転パラメータの調整が3回行われた。

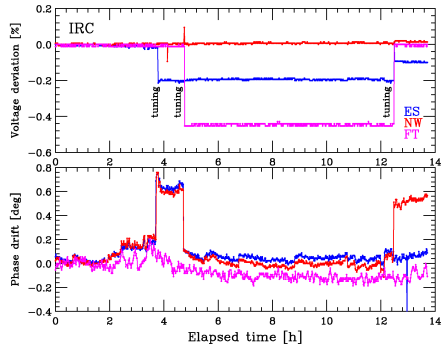


図6: IRCのRF電圧・位相の変動

### 3. RILAC加速タンクのRFとビーム位相

RILACの加速タンクでは、RF電圧・位相の変動がビーム位相に与える影響がタンクによって異なることが経験的にわかっていた。この影響は、RFの変動が十分小さい場合、RFの一次の変動で表わすことができるはずである。そこで、ビーム位相に対するRF変動の比例係数を以下の2種類の方法により求めた。

- 1) 人為的に各タンクの電圧・位相を変化させて求める。(パラメータ変動試験)
- 2) 安定度測定データをフィッティング。

1)については、RF電圧を30~70  $\mu\text{V}$  (0.01~0.03%)、位相を0.21~0.53度変化させた。2)において解析に用いたデータは、RILAC加速タンクのRFについては§2.2に示したものの、ビーム位相については、誘導電場型フェーズプローブ(PP)によりRILAC下流の2箇所(e11および、Xリバンチャー直前のX51)において測定されたもの<sup>[1]</sup>である(図7)。フィッティングで当てはめた関数は以下のとおりである。

$$\phi^{\text{beam}} = \sum_{i=1}^6 (a_i V_i^{\text{RF}} + b_i \phi_i^{\text{RF}}) + c$$

ここで、 $\phi^{\text{beam}}$ はビーム位相、 $V_i^{\text{RF}}$ と $\phi_i^{\text{RF}}$ はそれぞれRFの電圧偏差[%]と位相差[度]の実測値、 $a_i, b_i, c$ はパラメータで、 $i=1\sim 6$ である。フィッティングでは時間範囲を変えて、2-a) 14時間分全て、2-b) 最初の6時間分について行った。フィッティングで得られたビーム位相を図8に示す。実測値と比較して2-a)の場合が最も再現性が良く、2-b)では7時間後から実測値からの差が拡大している。1)の結果を上記の式に代入して得られた値は、微細な構造のみしか再現していない。したがって、時間とともに比例係数が変化しているか、ビーム位相がRFの変動以外の影響を受けている可能性がある。図9は、得られたパラメータを比較したものである。タンク#2の電圧変動がビーム位相に最も大きな影響を与えることがわかる。#5および#6の電圧の係数は、1)の結果は正の値をとり直感的に正しいのに対し、2-a)、2-b)の結果は負の値となっている。これは、#5、#6の電圧変動がフラットな分布をしていて線形独立性が悪

いため、フィッティング誤差が大きいためと考えられる。位相の係数についても全体的な傾向は一致しているものの、フィッティングの値2-a)、2-b)のばらつきが大きい。これも、既に述べたような線形独立性の悪さが原因と考えられ、フィッティングの方法が不十分であることを示している。1)のパラメータ変動試験の方法は、ある時刻での比例係数を求めるのに有用である。しかし、測定に時間がかかりビームタイム中に頻繁に行えないため、効率的な測定方法を考える必要がある。

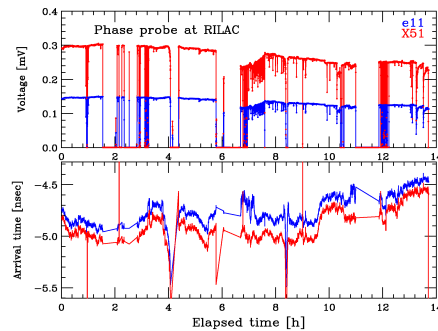


図7: PP-e11/X51の出力電圧(上)とタイミング(下)(ビーム位相)。安定度測定中に取得したもの。

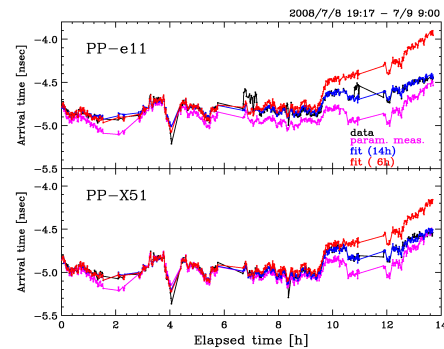


図8: ビーム位相のフィッティング結果とパラメータ変動試験で得られた結果を用いて計算した値。

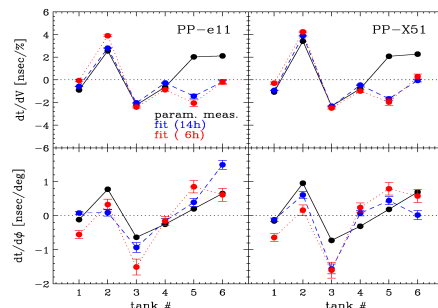


図9: ビーム位相に対するRF変動の一次のパラメータ参考文献

[1] R. Koyama, et al., “理研RIビームファクトリーにおけるロックインアンプを用いたビーム位相及び加速RF監視システム”, in this proceedings.