

## The status of J-PARC Ring RF systems

Masahito Yoshii<sup>A)</sup>, Eiji Ezura<sup>A)</sup>, Katsushi Hasegawa<sup>A)</sup>, Masahiro Nomura<sup>A)</sup>, Chihiro Ohmori<sup>A)</sup>, Alexander Schnase<sup>A)</sup>, Taihei Shimada<sup>A)</sup>, Hiromitsu Suzuki<sup>A)</sup>, Akira Takagi<sup>A)</sup>, Fumihiko Tamura<sup>A)</sup>, Makoto Toda<sup>A)</sup>, Masanobu Yamamoto<sup>A)</sup>, Koji Takata<sup>B)</sup>, Koki Horino<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> KEK & JAEA J-PARC Center

2-4 Shirakata Shirane, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

<sup>B)</sup> KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>C)</sup> Nippon Advanced Technology (NAT)

3129-45 Hirahara, Muramatsu, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, 319-1112

### Abstract

J-PARCは1MWの陽子ビーム実現を目的に斬新なアイデアと最先端技術を取り入れた特色ある加速器である。imaginary  $\gamma$ ラティス[1]は加速域から遷移エネルギーを無くすため50GeVシンクロトロンで初めて導入された。金属磁性体による空洞は従来の2倍以上の加速電場勾配を実現し、RCSでは広帯域化により加速とバンチ操作の2つの機能を1台でこなすなど、高精度デジタル高周波制御と共にシンクロトロンには不可欠な機器となった。平成19年開始したビームコミッショニングは10月にRCS3GeV加速、平成20年12月MR30GeV加速とハドロン施設へ遅い取り出し、平成21年6月ニュートリノへ早い取り出しと次々に成功を納めた。リング高周波はキー・コンポーネントの一つであり、それぞれの節目で唯一無比の性能を示してきた。一方でハード面に耐久性に関わる課題が判明し、さらに性能向上に向けた取り組みが必要になってきた。

## J-PARC リング高周波システムの現状

### 1. はじめに

J-PARC陽子シンクロトロンはパルスあたり100テラの陽子ビームを加速する大強度加速器である。ビーム損失の低減が第一に考えられ、遷移エネルギーの加速エネルギー域にない加速器設計や外部クロック導入による加速器サイクルの完全同期、金属磁性体(MA)による高電場勾配型加速空洞とそのローレベル制御のデジタル化など、随所に斬新なアイデアを取り入れたユニークな加速器である。リングの高周波加速空洞は20kV/m以上の高い場勾配を実現し、特に、速い繰り返しのRCSシンクロトロンでは、空洞は、周波数区域 0.9MHzから3.4MHzをカバーし、2次高調波電圧を加速電圧に重畳して加速ギャップに合成電圧を発生させることができる。1台でビーム加速とバンチ分布操作の2つの機能を有するシステムになっている。

J-PARCリング高周波はRCSシステムが2007年8月、MRシステムが2008年3月にトンネル据付けられた。そしてRCSビームコミッションはRFシステム10台で始まり、2007年10月末3GeVビーム加速に予定通り成功している。その後、2009年12月には11台のシステムが据え付けられ、物質生命科学施設への中性子ビームの共用運転の実現及び50GeVシンクロトロンでの30GeVビーム加速、3次共鳴による遅いビーム取りだしに成功した。これまでの運転時間は、RCSシステムは4300時間、MRシステムは3000時間に達している。

### 2. システム現状

RCSでは、2008年12月からシステム11台の運転が開始した。これにより、定常運転での空洞あたりの加速電圧に余裕を見込んで最大加速電圧410kV/turnを得ることが可能になった。これまでのビームスタディーからRCSで300kW相当の運転に対しては、11台運転で対応が可能ながことが分かっている。

一方、MRは2008年5月からの運転を5台のシステムで準備してきたが、最初のビーム加速が30GeVで行われることや主電磁石の準備の関係から加速時間が2.5秒に延長されたことで、dB/dtが設計値に約半分の値になった。そこで、据付を4システムとし、約160kV/turnで30GeVビーム加速を行う事とした。これにより、MRの1システムをテストベンチにのこすことができ、さらに連続通電試験を継続し、金属磁性体カットコアの長期運転が実現できるようになった。

#### 2.1 システムの異常診断

トンネルにインストールしてからの通算運転時間は、RCSで4300時間（インストール前に一部1000時間を除き、全てのシステムは300時間の定格運転を経ている）、MRで3000時間を経ている。これまでに発生した高周波システムの異常発生件数を下にまとめる。

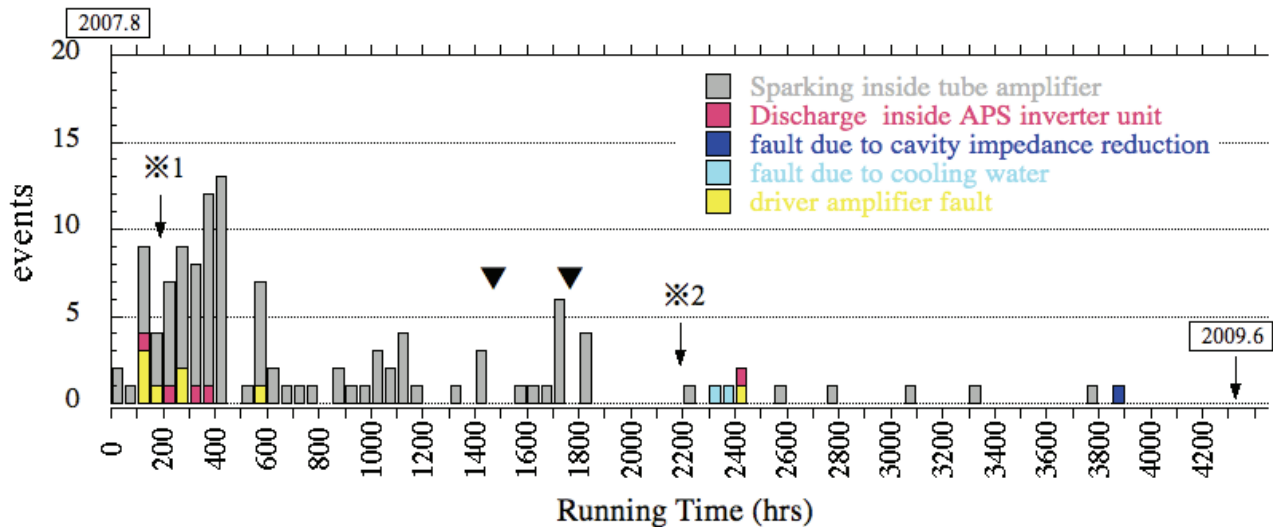


Figure 1: RCSで発生した故障事象の頻度、※1: RCS 3GeVビーム加速 (2007.10)  
 ※2: MR 30GeV ビーム加速 (2008.12)、▼は大掃除を示す。

	RCS	MR
システム数	10~11台	4台
異常停止回数	120回	9回
通算運転時間	4364時間	3066時間

システムのエラーは、異常の内容に応じて、軽故障と重故障に分類できる。軽故障はリセット操作により簡単な手続きで復旧できる場合であり、電子管増幅器電源の過電流、過電圧インターロックが主たる故障にあたる。一方、重故障は、陽極電源インバーターユニットの異常、冷却水異常、ドライバーアンプ異常、陽極電源の過電流など、復旧に30分以上かかる事象としている。全発生件数は129回であり、そのうち84%が比較的復旧に時間を要しない軽故障であった。

RCSで据付以来発生した故障事例の頻度をFigure 1に示す。図中、グレーで示した電子管増幅器内部での放電は、60%強が4極電子管のScreen gridでの放電により、据付当初に頻発している。これらは、トンネル内の埃や結露がトリガーになっていると考えら、より高いScreen grid電圧を運転条件に選んだRCSのシステムで頻発した。実際、定期的な清掃により、その発生頻度は減少している。RCSでは重故障としては、ドライバーアンプ異常が7%の割合を占め統計的には最も多い。2009年6月に空胴インピーダンスの低下による陽極電源過電流異常によるビームを停止させる事象が初めて発生した。

## 2.2 空胴インピーダンスとコアの座屈損傷

空胴の健全性を確認するために、空胴冷却槽（空胴は、6つの冷却槽で構成される、それぞれに3枚のMAコアが配置している）の温度上昇、電子管アンプの出力電流値をモニターし、そのトレンドを監視している。しかしながら実際には、AVCフィードバックやmulti-harmonic運転のために、空胴のインピーダンス変化をトレンドグラフから運転中に読み取るのは難しく、加速器運転の合間に行う、空胴インピーダンスの定期測定が有用かつ不可欠になっている。Figure 2は定期測定で得た各RCS空胴のインピーダンスの推移を示す。空胴インピーダンスは温度依存性を持つため、数%の変動を見極めるのは難しいが、定期的測定により、インピーダンスの低下を事前に知ることができる。図示した例では、赤で示した号機のインピーダンス低下が分り、2009年1,2月のビーム運転への対応を図った。

インピーダンスが低下した空胴の調査の結果、コアの座屈によるMAリボンの亀裂損傷によること分かった。さらに、2009.6月の運転で新たに座屈に起因した空胴インピーダンスの低下事例が発生した。RCS空胴にはカットコアを使っていないために、コア内周部発熱が外周部より高く、この内部応力が座屈発生に関わっているが、コアの製造、樹脂含浸方法に依存することが分かってきた[3]。現在、座屈損傷のメカニズムを解明とその対策を進める一方、夏期シャットダウン中にでき

るだけ多くの空胴の座屈調査を行い、秋から運転に備えている。

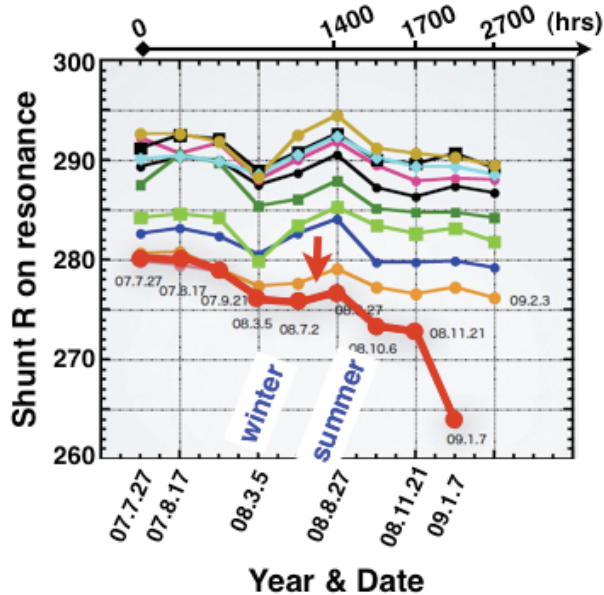


Figure 2: RCS空胴のインピーダンスの推移

### 3. ビームコミッショニング

RCSビームコミッショニングに於ける1MWビーム加速に向けた最大の課題は、横方向のみならず縦方向のペインティングとビームロス起源の研究とその低減にある。縦方向のペインティングでは、空間電荷効果の緩和のため、入射時(~1ms)のbunching 係数(平均電流/ピーク電流)を0.4以上にする事、また、MR入射のために、RCS取り出し時に0.3以上を達成することが目標になっている。一方、MRコミッショニングが始まった2008年5月、6月は、ビーム加速はなく入射エネルギーのみでRF capture, timing調整などが縦方向の主なスタディーであった。そして、同年12月に30GeVビーム加速と3次共鳴を使った遅い取り出し、そして、2009年6月にニュートリノビームラインへの速いビーム取り出しを実施した。

#### 3.1 RCSビームコミッショニング

縦方向ペイントは、運動量オフセット、基本波高周波の位相オフセット、2次高調波の振幅制御を柱に考えてきた<sup>[2]</sup>。2次高調波の位相スイープがバンチング係数を効果的に大きくできることが、トラッキングとビームスタディーの結果から分かってきた<sup>[4]</sup>。High intensityを目指した試行運転では、粒子数で300kW相当のビーム加速が実用的ロスレベルで可能なことを確認した<sup>[5]</sup>。リニアックビームのエネルギーやRCS主電磁石が非常に安定なため、軌道フィードバック(ΔRフィードバック)は実質上必要なく、位相フィードバックについても、100kW以下のビーム運転に用いて

いない。また、タイミング系に高精度外部クロックベースにした基準信号を導入し、加速器運転のサイクルが商用50Hzライン周波数と非同期なため、再現性を含めて、ビーム受け渡し時の時間的な変動が非常に小さいことが、J-PARC加速器の特徴として特筆できる。

#### 3.2 MRビームコミッショニング

MRでのビーム加速及び取り出しの本格的なコミッショニングが2009年12月の運転からスタートした。Flat Topのエネルギーは30GeV、加速時間は2.5秒、これはデザインである50GeV/1.9秒加速の約50%のdB/dtに相当する。MR高周波システム4台で160kV/turnの加速電圧であった。

MRに於いても、RCS同様、磁場の再現性・安定性が良いため加速周波数パターンを一度決定した後は、ビームフィードバックなしで再現良くビーム加速が可能である。今後は、RCS-MRの2次高調波を含めたマッチング、入射時のバンチング係数のコントロール、遅い取り出しビームのための効果的なデバンチ技術などが大強度に向けた取り組みになる。

### 4. まとめ

RCSのビームコミッショニングでは300kW相当のビーム加速、縦方向ペイントなど、1MWビーム加速に向けたLongitudinal制御の手法をトラッキングベースに1つ1つ確立し、2次高調波の位相スイープなど新しい実用的な手法が確立できた。しかしながら、新しく導入した金属磁性体空胴で、コアの座屈や防錆コーティングの剥がれなどハード面に耐久性に関わる課題が生じ、その早期解決に向けた取り組みも開始したところである。一方、MRコミッショニングでは、2008年12月30GeV加速と遅いビーム取り出し成功、2009年6月ニュートリノビームラインへ速いビーム取り出し成功により、2009年秋から本格的な大強度ビームに向けたコミッショニングが期待される。

#### 参考文献

- [1] S. Machida, et al., "Lattice Design of JHF Synchrotrons", APAC98, 1998, KEK Tsukuba, Japan
- [2] M. Yamamoto, et al., "Longitudinal particle simulation for J-PARC RCS", in this conference
- [3] M. Nomura et al, in this conference
- [4] F. Tamura et al., "Longitudinal painting with large amplitude second harmonic rf voltages in the rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator Research Complex", Phys. Rev.ST Accel. Beams, vol.12, 041001 (2009)
- [5] H. Hotchi et al., "Beam commissioning of the 3GeV rapid cycling synchrotron of the Japan Proton Accelerator

Research Complex”, Phys. Rev.ST Accel. Beams, vol.12,  
040402 (2009)