

## THE STATUS OF MA LOADED RF SYSTEMS IN THE J-PARC SYNCHROTRONS

M. Yoshii<sup>1\*</sup>, E. Ezura<sup>1</sup>, C. Ohmori<sup>1</sup>, T. Shimada<sup>2</sup>, A. Schnase<sup>2</sup>, K. Takata<sup>1</sup>, F. Tamura<sup>2</sup>, M. Toda<sup>1</sup>,  
M. Nomura<sup>2</sup>, K. Hasegawa<sup>1</sup>, K. Hara<sup>1</sup>, T. Minamikawa<sup>3</sup>, M. Yamamoto<sup>2</sup>  
1 KEK J-PARC center, 2 JAEA J-PARC center, 3 Fukui Univ.

### Abstract

J-PARC is a facility of high intensity proton accelerator, which produces MW-class high power proton beams. To realized compact and/ rapid cycling proton synchrotron, high accelerating field gradient system is required, of which gradient is more than twice higher than that of conventional ferrite loaded system. Hence, the Magnetic Alloy loaded cavity was developed. The J-PARC synchrotrons consist of the Rapid Cycling Synchrotron (RCS) and the 50GeV MR. The beam commissioning of RCS and MR started in 2007 and 2008, respectively. Up to now, 300kW of proton beams are extracted from RCS and 150kW from MR. In RCS, the Q-value of the cavity is set to 2. The bandwidth can cover both the accelerating frequency range ( $h=2$ ) and the second harmonic ( $h=4$ ) for bunch shape manipulation. Dual harmonic operations are initiated by superposing the RF signals. Because of large R/Q cavity, compensation of gap voltage deformed by a beam-induced voltage becomes a big issue. Full digital low level RF and multi-harmonic RF feedforward system are developed to compensate the heavy beam loading. And we successfully suppressed 30dB at maximum of the impedance seen by the beam. In MR, the beam commissioning started with the four RF stations. One system had been added every year and two more systems will be installed in this summer shutdown. Also, the further beam power upgrade is considered in MR. The RF system upgrade is planned. To realize one-second acceleration in MR, a new cavity with high impedance MA cores is designed. The development toward the beam power upgrade is the high-priority issues that recover the delay of the experiment due to the earthquake.

## J-PARCシンクロトロン加速器の金属磁性体を使った高周波加速システムの現状

### 1. はじめに

大強度陽子加速器施設J-PARCは今世紀最大の施設である。取り出される陽子ビームのパワーはメガワットに達し、高分解能かつ高輝度の中性子ビーム生成やニュートリノや中間子により、物質生命科学の研究や素粒子・原子核実験に利用される。

J-PARC加速器は400MeVリニアック、3GeV-RCS (RCS)、50GeVシンクロトロン(MR)で構成される。現在、リニアックは181MeV、MRは30GeVで運転している。RCSは、英国ラザフォード研究所のISISに次ぐ早い繰り返し25Hzのシンクロトロンでビームエネルギーを3GeVまで加速するため、加速周波数が可変で且つ最大450kVの加速電圧が必要になる。さらに、周回するビーム電流は20Aを越え、安定なビーム加速にはビームローディング補償が不可欠になる。これまで加速空洞の周波数を可変にするにはフェライト磁性体が使われた。フェライト磁性体は外部磁場により透磁率を変化させることができ、空洞が短くできると同時にその性質を使って空洞の共振周波数を変化させることができる。フェライト装荷型空洞はQ値が高くまた磁性体の発熱を抑えるためにも高くしなければならない。システムは安定化のためにフィードバックが不可欠である。しかしな

がらフェライト磁性体は、高周波磁場に対する安定度が狭く、J-PARCで求められる空洞の高加速電場勾配化には適さない。そこで我々は金属磁性体の中でも磁歪が小さく、透磁率とQ値積の高い材質に着目し、フェライト空洞と相反する同調のない加速システムの開発と実用化を進めた。

### 2. RFシステム

高周波加速システムは、高周波加速空洞と電子管を使った高周波源で構成される。両装置とも加速器トンネルに据え付けられている。電子管増幅器は、陽極損失600kWの四極管 (TH589 or 4CW500,000CB) 2本が使われ、プッシュ・プル動作させている。その陽極電源には半導体素子IGBTを使ったインバータ方式を採用した。整流器と大容量コンデンサーバンクで構成するこれまでの直流電源に比べ、半導体のスイッチングにより、RCSのような早い繰り返しで大容量の電力制御に適し、電圧サグの問題を解決できる利点がある。IGBTの高速遮断性能により、クローバ回路を持たない、電子管保護機能を実現した。また、IGBTインバータユニットの並列化により、故障時の迅速な電源復旧を可能にしている。この他に、電子管増幅器は、フィラメント

\* Masahito.yoshii@kek.jp

電源、コントロールグリッド電源、スクリーニンググリッド電源を有する。これらはRCSとMRで規格を統一し、互換性を持たせ、運転・維持・保守の利便を図っている。また、増幅器を励振する駆動段増幅器にはCERNとの共同研究で開発した半導体増幅器を利用して、加速器運転に対して信頼性の高い。

J-PARCの2つのシンクロトロン加速周波数は、RCSは0.938MHz (181MeV入射)から1.67MHz、MRは1.67MHzから1.72MHz(3GeV取出)に変化する。RCSでは、スペースの問題もあり、空胴は加速だけでなくバンチ波形の整形を目的に2次高調波の高周波が重畳される。そこで、空胴にはトロイダル状の金属磁性体をカットせず使用し、外付けのインダクタンスにより、空胴Q値が $Q=2$ になるように広帯域化した[1]。一方、MRは周波数変化が3%と小さい、RCSからのmulti-batch入射による周期的なトランジェントなビームローディングを避けるため、磁性体にカットコアを用い、空胴Q値が $Q=25$ 程度になるよう調整している。したがって、MRの場合、2次高調波空胴は加速空胴と別のシステムになる。

RCSは11台のシステムで300kWビーム加速に必要な400kVの加速電圧を実現している。平成24年度には、12台目のシステムを追加し、1MWビーム加速に向けた準備を行う予定である。また、MRには6台の加速空胴が現在稼働状態にある。平成23年の秋の運転(実際には震災復旧後の運転)から8台のシステムを稼働させる。

### 3. 空胴のインピーダンス

RCSとMRの加速空胴には、未切断のアンカットコアとカットコアをそれぞれ使用している。金属磁性体コアは、幅35mm、厚み18 $\mu$ mのアモルファスリボン(片面にシリカ2 $\mu$ mの絶縁膜)を巻き上げ、その後の熱処理により加速器に利用できるコアに仕上がる。その後、低粘度樹脂含浸、防錆コーティングを経てアンカットコアは製造され、カットコアの場合、さらにウォータジェット切断、切断面含浸、ダイヤモンド研磨の工程を経る。

低粘度樹脂含浸は、カットコア製造の切断時にリボンの巻き崩れを防止するために行う。樹脂の硬化には収縮が伴うため内部応力が発生する。カットコアは切断により応力は開放されるが、アンカットコアでは内部応力は残存する。また、コアの内径・外径比を考えるとRCSでは内周部の発熱が平均発熱量の3倍程度大きく、運転によりさらに圧縮応力が内周部に加算される。このようにコアを切断しないで使った場合、圧縮応力により、コア内周部の座屈発生メカニズムが明らかになってきた[2]。RCSではこれまで、4回(2009/1月:7号機, 2009/6月:4号機,

2010/1月:7号機, 2010/11月:1号機)の座屈に起因した空胴インピーダンスの低下が観測された。コアの座屈の有無は、空胴の定期的なインピーダンス測定が手がかりとなる。ピックアップコイル型座屈センサーも開発し、座屈箇所の特定制を行っている。空胴のコア交換には4~5日を要するため、夏のshutdownに集中して行う計画を立てている。したがって、運転中に異常が分かった場合、座屈の箇所を特定し、そのコアを含む加速ギャップを高周波的にショートして、その空胴を2-GAPで運転することになる。コアの座屈を回避するため、未切断コア(アンカットコア)製造においては、低粘度樹脂含浸を行わない製造工程に切り替えている。これまでに11台中4台の空胴に対してコア入替を行った、今後も夏期shutdownを利用して空胴2台ずつのコア入替をスケジュールしている。

2008/4月MRは空胴4台でビーム運転を開始した。その後、空胴は毎年追加され、2009/9月には空胴5台、2010/10月には空胴6台になった。そして、2011/12月から8台運転が予定されている。MRの加速空胴には切断面をダイヤモンド研磨したカットコアが使われている。ダイヤモンド研磨はウォータジェットで切断したコア切断面の層間絶縁を回復させるために行う。切断面の層間絶縁が不十分だと局部的な発熱が発生する。ダイヤモンド研磨された切断面は凹凸が小さく、防錆樹脂含浸には適さない、また、含浸できたとしても密着性など長期的な安定性が課題になる。また、冷却水を脱酸素することで錆の進行が抑制されることがテストベンチの長時間テストにおいて得られていた。

トンネルに据え付けられた空胴は、電磁石系と同じ冷却水で循環冷却される。MR電磁石にはホローコンダクタが使われていて、冷却水に酸化銅、銅のイオン化合物が多く含まれていることが分かってきた。また、SX運転が行われる電磁石のデューティが上がり系の温度が高くなるなど銅物質の溶出が増える傾向が懸念される。

2009年冬頃からMRでは空胴インピーダンスの低下が観測された。当初は明確な原因が分からなかったが、空胴コアの大気や $N_2$ ガスに曝した測定を比較した結果、切断面の酸化還元物により、インピーダンスに変化を生じることが分かってきた。

また運転当初開発を進めていた、切断面の防錆に関してもこのころ見通しが出てきた。ポリシラザンによるコーティングでは、5 $\mu$ m程度のシリカ膜が切断面に形成される。さらに、2011/11月から切断面をポリシラザンによるコーティングした上にFPR板とRTVゴムを使って完全にシールし、できる限り、切断面への水の侵入を防ぐ工程を取り入れている。

#### 4. ローディング補償

シャント抵抗が大きくQ値の低いMA空洞は、R/Q比が高く、ビーム電流の影響を受けやすい。特に、RCSではマルチハーモニックRFのビームローディング補償が安定加速の絶対条件であった。我々はビーム電流が空洞加速ギャップに誘起する電圧をフードフォワードでキャンセルするため、マルチハーモニックRFフィードフォワード法を開発し、実用化のためのビーム調整を行ってきた。

マルチハーモニックRFフィードフォワード法は、壁電流モニター(WCM)で検出したビーム電流を加速周波数をベースにIQ変調し、 $h=2, 4, 6$ の高調波成分を抽出し、加速空洞をビームが通過するときにビーム信号をキャンセルするように高調波それぞれについて、ゲインと位相を最適化される。

RCSでは300kW相当( $2.3 \times 10^{13}$ ppp)のビームを使って、11台の全てのシステムに対して調整を行った。それにより、空洞1号機の場合、ビームが見る空洞インピーダンスの基本波成分が800 $\Omega$ 程度合ったのに対し、フィードフォワードにより25 $\Omega$ 以下まで低下させることに成功した[3]。

#### 5. よりインピーダンスの高い磁性体コアの製造

日立金属製のファインメットコアは透磁率・Q値積が高く、低磁歪な金属磁性体でJ-PARCをはじめ海外の研究施設においても加速器利用がなされている。この磁性体シリーズには外部磁場中で熱処理した製品があり、磁場の方向によりLタイプ(磁路に垂直な外部磁場)、Hタイプ(磁路に平行な外部磁場)に分類されている。この中でLタイプは低損失を実現したモデルでJ-PARCで使用しているコアの約2倍のインピーダンスを得られることが外径300mmの中型コアで分かっている。

しかしながらJ-PARCで使われているような大型(外径850mm:RCS, 800mm:MR)のコアを製造するには、大型の電磁石とオープンが必要になる。

J-PARC MRではさらにそのビーム強度を増強するために2015年をターゲットに1Hz運転を目指し、電磁石電源、RFなどのハードウェアの開発を進めている。RFシステムの増強にはよりインピーダンスの高い磁性体コアが必要であり、それにより既存の高周波源を利用して、より高い加速電圧を得ることができる。

2010年度末～2011/6月にかけて我々はKEK素粒子原子核研究所の協力を得て、J-PARC ハドロンホールにてFM電磁石を使い、大型磁性体の製造に着手した。途中、地震による中断を余儀なくされたが、磁場中で熱処理した大型コアの製造に成功した[4]。ま

た、ここで製造したコアはハイパワー試験を2012年夏に予定している。

#### 6. 震災

平成23年3月11日(金)50GeVシンクロトロンはメンテナンス日にあたっていた。この日はMR高周波システムの定期的なインピーダンス測定の日であり、幸いにも我々は全ての作業を午前中には終了し、夕方からの立ち上げに備えていた。一方、RCSでは昼頃からビームスタディーが行われていた。RCSの高周波システムは全11台が稼働していて、通電時に地震が発生したことになる。システムが停止した原因は明らかでないが、殆どが冷却水の異常による。また、後の調査で陽極電源のインバータユニットのフューズが断線し、IGBT破損が確認された電源が2台見つかった。

システムの復旧作業は、一般的な手順通りの手法で行ってきた。具体的には、目視検査、端子のゆるみ調査、絶縁抵抗測定、TDR測定、耐電圧試験である。中でも、同軸ケーブルのTDR測定はケーブルの変形も観測できるため有効であった。このようにして、MRでは比較的早い時期にすべてのシステムについて調査を終了し、6月の段階で試験通電を実施し、MR高周波システムは地震の被害を受けなかったことを確認した。一方、3GeV-RCSは加速器建家の周りの被害が大きかった。そこに位置する電磁石電源、高周波電源の受電盤・変圧器ヤードや空調機器設備が、土台となる基礎が沈下したために使用できなくなった。そのために、実験系の電力の供給が大幅に遅れている。機器の本格的な通電試験は9月後半から予定している。

ヘンデル実験棟にはRCS及びMRの高周波システムをフル定格で試験ができるテストベンチがあるが、建家の天井クレーンが壊れるなど、震災による被害が甚大でその復旧の見込みは立っていない。

#### 7. まとめ

RCSではマルチハーモニックRFフィードフォワードを11台全てのシステムに対して実装し、通常運転で使用している。これにより300kW運転時のアーク部のロスの低減が可能になった。MRでは、繰り返しを3.3秒まで縮めることにより、150kWのビーム運転が始まっていた。

平成23年は震災によりビーム運転再開が12月になる見込みである。それまでに、RCSでは、空洞1,3号機の磁性体コアの入れ替え予定している。MRでは、新規の7,8号機のシステムの増設および空洞1,3号機のコアの入れ替えを行う予定である。また、高周波加速空洞用冷却水を分離する工事が進行して、12月からの復興に向けて万全を期する準備を整えつつある。

## 参考文献

- [1] M. Yoshii *et al.*, "PRESENT STATUS OF J-PARC RING RF SYSTEMS" *Proceedings of PAC07, Albuquerque, USA* (2007).
- [2] M. Nomura *et al.*, " The origin of Magnetic Alloy core buckling in J-PARC 3GeV RCS ", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 623 (2010) 903–909.
- [3] F. Tamura, *et al.*: "Multi-harmonic rf feedforward system for beam loading compensation in wide-band cavities of a rapid cycling synchrotron", *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **14**,051004 (2011).
- [4] C. Ohmori *et al.*, DEVELOPMENTS OF MAGNETIC ALLOY CORES WITH HIGHER IMPEDANCE FOR J-PARC UPGRADE *Proceedings of IPAC10, Kyoto, Japan, p3711-3713* (2010).