

## 研究紹介

## J-PARC 3 GeV シンクロトロンでの 1 MW 出力の達成

日本原子力研究開発機構

山本 風海, 發知 英明, 高柳 智弘, 山本 昌亘

kazami.yamamoto@j-parc.jp, hotchi.hideaki@jaea.go.jp, tomohiro.takayanagi@j-parc.jp, masanobu.yamamoto@j-parc.jp

2015年5月13日

## 1 はじめに

2015年1月10日5時55分、大強度陽子加速器施設 Japan Proton Accelerator Research Complex, J-PARC) 3 GeV シンクロトロンは、設計性能の 1 MW に相当するビームを 3 GeV まで加速して、取り出すことに成功した[1]。これは日本原子力研究開発機構(旧日本原子力研究所)と高エネルギー加速器研究機構(KEK)が共同で大強度陽子加速器計画(統合計画、現在の J-PARC)をスタートさせてから 15 年目での快挙であった。ここでは、J-PARC 3 GeV シンクロトロンの概要と 1 MW 達成までの歩みについて述べる。

## 2 J-PARC 3 GeV シンクロトロン

## 2.1 概要

J-PARC 3 GeV シンクロトロンは、中性子実験施設である物質生命科学実験施設 (Materials and Life science experimental Facility, MLF) と、主リングシンクロトロン(Main Ring, MR) に、3 GeV まで加速した陽子ビームを供給することを目的に建設された[2]。3 GeV シンクロトロンではビームの入射から加速、取り出しまでを 25Hz という早い繰り返しでおこなうため、早い繰り返しのシンクロトロンの英語訳である Rapid Cycling Synchrotron の頭文字をとって通称 RCS と呼ばれている。そこで、この通称を用いて以降 RCS と呼ぶことにする。RCS の主要なパラメータを表 1 にまとめる。

RCS のビーム中心軌道の周長は MR の周長の 2/9 倍である 348.333 m である。これは MR と縦方向のマッチングをおこなうため、当初は 2/10 倍の周長で設計が進められていた。RCS リングの形状は 3 つのアーク部と、それに挟まれた 3 つの長直線部からなるおむすび型で、3 つの長直線部はそれぞれ入射とコリメーション、出射、高周波加速のための機器が置かれている。RCS の機器構成を図 1 に示す。オプティクスは、これらアーク部と長直線部のそれぞれ中心を起点とする鏡像対称となっており、直線部は分散関数(エネルギーのずれと、軌道のずれの関係を示す値)が 0、アーク部では途中で大きな分散関数のピークを持つように設計されている。直線部で分散関数を 0 とすると、高周波加速や横方向コリメーション、横方向入射ペインティング(軌道を変化させながら多重入射をおこなうことで、ビームを広げる入射手法)に対する運動量広がり(影響を無くすることができる。またアーク部で分散関数を大きくし、そこに六極電磁石を配置することで、色収差を補正するための磁場の強さを弱くすることができ、六極磁場による共鳴の励起を抑制することができる。さらにトランジションエネルギー(シンクロトロンでの加速中の RF 平衡位相の極性

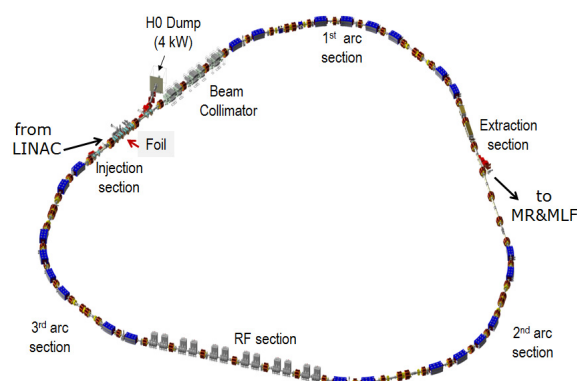


図 1 RCS の機器構成。

が変わるエネルギーで、このエネルギー付近でビームロスを起こしやすい)を 9 GeV 程度と、取り出し時の陽子ビームのエネルギーの 3 GeV よりも、かなり大きくできるため、加速中にトランジションエネルギーに近づくことができなくそれによるビームロスを防ぐことができる。

表 1 RCS の主要なパラメータ

周長	348.333 m
入射ビームエネルギー	400 MeV <sup>i</sup>
取り出しビームエネルギー	3 GeV
繰り返し	25 Hz
設計出力	1 MW
加速粒子数	$8.3 \times 10^{13}$ ppp
物理口径	$> 486\pi$ mm mrad
コリメータ口径	$324\pi$ mm mrad
ハーモニック数	2
周回周波数	0.61-0.84 MHz <sup>ii</sup>

## 2.2 ビームロス対策

RCS のような高エネルギーの陽子シンクロトロンでは、運転中のビームロスが機器の放射化を引き起こす原因になる。ビームロスが大きいと放射線により故障率が上がり、保守作業時の作業者の被ばく線量も上がる。したがって、運転できるビーム強度は、放射化による作業者の被ばく線量が許容値以下でなければならない、という制限を受ける。そのため 1 MW という大出力を達成するためには、ビームロスの対策が必須であり、RCS では設計段階から、そのための手法を検討してきた。大強度陽子ビームにおけるビー

<sup>i</sup> 運転開始より 2014 年 1 月までは 181 MeV。<sup>ii</sup> 入射エネルギーが 400 MeV 時の値。

ムロスの主要な原因の一つは、バンチ内の陽子同士がお互いの電荷で反発しあう空間電荷効果である。RCS では、ペインティングと呼ばれるバンチ内の粒子を縦方向、および、横方向に一様に広げて分布させる入射方式を用いることにより、一部分だけ極端に電荷密度を高くしないようにすることで、空間電荷効果を抑制している。入射の際、横方向に効率よくペインティングをおこなうために、入射点に設置した荷電変換フォイルを用いて H の状態で入ってきたビームから電子 2 個を剥ぎ取り、陽子に変換してリング周回軌道に合流させている[3]。また、加速中にビームが広がってしまい、エミッタンス増大を起こすと、リング内の各所でビームロスが発生する。そのビームロスによって機器が放射化し、トンネル内の空間線量が増加してしまうと、入域するだけでも被ばく線量が増えて、作業時間が大幅に制限されてしまう。そこで、そのような事態を避けるために、ビームロスをも局所化できるようにアパーチャを狭めたコリメータを導入している[4]。RCS のコリメータは、ビームを廃棄するダンプや物理実験で使用されるターゲットに相当するような 4 kW という大容量に設計されている[5]。さらに、このコリメータに効率よくビームロスを集中させるために、コリメータ以外の真空容器の口径は大きくとっており、最も大きな箇所では内径 500 mm もの大きさとなっている(図 2)。このようにビームロスの対策をおこなった上で、さらに各機器の故障頻度を下げるために、使用する材料は高線量下での使用実績のある物を採用し、必要に応じて新規の開発や耐放射線性試験を実施したものを使用している[6]。

2.3 早い繰り返し対策

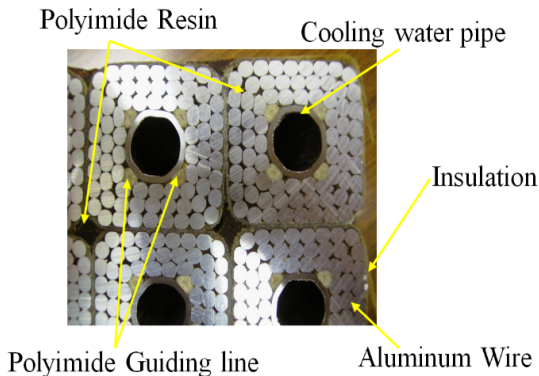
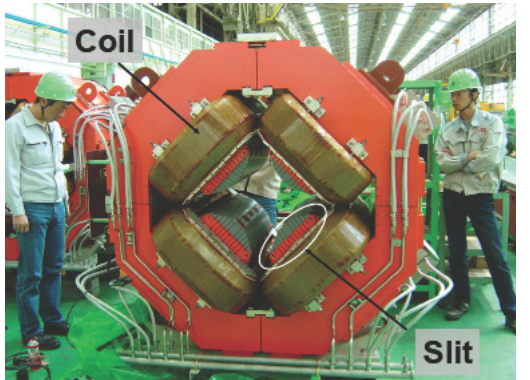


図2 大口径四極電磁石とアルミストランド線の断面。

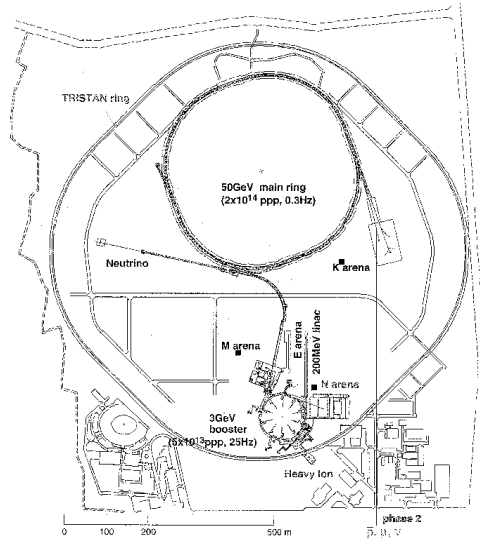
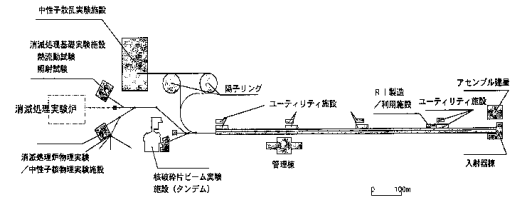


図3 中性子科学研究計画(上)および JHF 計画(下)の概念図。

一方で、RCS はその名の通り 25 Hz という早い繰り返しでビームの入射、加速、出射を繰り返す必要がある。そのため偏向電磁石、四極電磁石、六極電磁石といった主電磁石および入射用のパルス電磁石は 25 Hz で磁場を変動させる必要がある。その変動する磁場の中に金属が存在すると、渦電流が誘起され磁場の乱れや発熱を引き起こすことになる。それを避けるため、これらの磁石の中に入れる真空容器はセラミック製のものを開発し、採用している[7, 8]。主電磁石用コイル導体としては、一般的によく使われる銅製のホローコンダクタではなく、交流損失抑制のためにアルミストランド線導体を用いられている[9]。主電磁石用の共振電源は偏向電磁石用に 1 系統、四極電磁石用に 7 系統の計 8 系統で構成されており、各系統同士の磁場のトラッキング精度向上の目的で、偏向電磁石は磁場強度を最大 1.1 T 程度、四極電磁石は磁場勾配を最大 5 T/m 程度に抑え磁石の飽和を避ける設計としている。磁極端部の渦電流を防ぐ目的で材料は積層鋼板を採用し、ヨークおよび端板にはスリットが入っている。

また RCS では入射から出射まで大きく周回周波数が変動し、さらに 20 kV/m を超える加速電場勾配を必要とするため、大振幅の高周波磁場のもとでも安定した特性を示し、素材そのものが広帯域特性を持っている金属磁性材料を用いた高周波加速空洞を採用している[10]。

3 設計から加速器立ち上げまで

J-PARC の前身である統合計画は、図 3 に示すような旧原研と KEK がそれぞれ独立に提案していた加速器を用いた実験施設の建設計画を一本化するところからスタートした。元々の計画は、原研では中性子科学研究として、超電導リ

ニアックと蓄積リングを建設し、その大強度陽子ビームを中性子散乱実験、RI ビーム生成、核変換技術開発等に利用する予定であった[11]。一方、KEK では当時稼働開始から30年近く経過した12 GeV 陽子シンクロトロンを大強度化するために、既存のトンネルを利用して加速器の入れ替えをする大型ハドロン計画（JHF）の検討が進められていた[12]。JHFは200 MeVのリニアック、早い繰り返し(25 Hz)の3 GeV シンクロトロン、50 GeV シンクロトロンの3つの加速器と、それらのビームを利用する実験施設によって構成されていた。1999年に、これら二つの計画が統合され、現在のJ-PARC施設の検討がスタートした[13]。

RCSの設計検討では、その構成機器にR&Dの要素が多く、仕様が度々変更されるため、加速器の軌道設計はそれら構成機器の開発と並行して進められた。また、概要で触れたように、この検討の過程で、現実的な設計を基に機器配置を成立させるため、周長を伸ばすことになった。加速器の設計が固まり、加速器トンネルを含むRCSの建屋の建設に着手したのが2002年で、建屋の完成後、機器の搬入と据付調整、動作チェックが運転開始までおこなわれた。特に、運転開始直前の半年は、昼間に業者による機器の搬入、据付作業をおこない、夜間に通電やモニタの動作確認等をおこなう、というように連日夜通しで準備をおこなった。この開始直前の準備期間には2つの大きな問題が発生した。1つは荷電変換フォイルを支えるアームがビームラインとフォイル保管用真空容器の間を仕切るゲート弁に挟まって損傷したことで、もう1つは、フランジ締結中に応力がかかって、入射部の四極電磁石で使用しているセラミックダクトが割れたことである。

荷電変換フォイルを支えるアームに関しては、フォイル破損時に遠隔でフォイル交換ができるように設計されていた。しかし動作時の制御シーケンスに問題があり、アームがビームライン側に突き出ているにも関わらず交換容器との仕切りのゲート弁が閉まり、挟まったアームが変形してしまった(図4)。これに関しては、当面ビーム強度が小さくフォイル破損の恐れが小さいため、閉止フランジに仮設アームとフォイルを固定した物に交換した。

割れたセラミックダクトに関しては、入射ビームと周回ビームを合流させる軌道の途中に配置されるため、図5のようにラケット型の特殊な形状をしており予備が存在しなかった。そこで、急きょ入射ビームと周回ビーム双方を通せるようなステンレス製の真空容器を製作し、新しいセラ

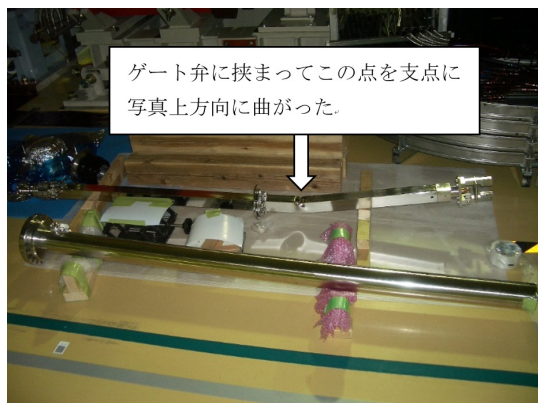


図4 破損し折れた荷電変換フォイルアーム。

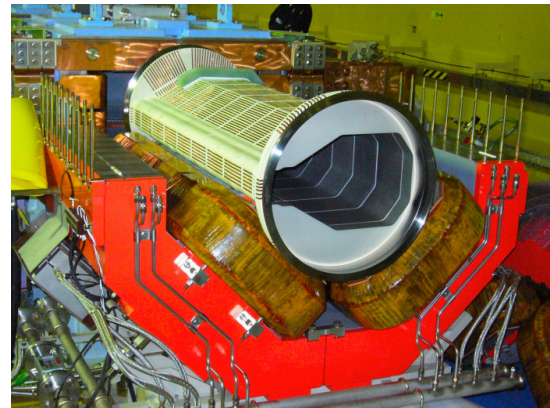


図5 入射部ラケット型セラミックダクト。

ミックダクトを製作する間の繋ぎとして設置した。これらの対処でどうにか2007年の9月にビームコミッショニングをスタートさせることが出来た。ただし、RCSの四極電磁石を25 Hzの加速パターンで励磁すると金属ダクトでは渦電流が発生し磁場の乱れや発熱を引き起こすので、代わりにセラミックダクトができるまでの数週間はビームを加速させず周回させるだけで試験を行い、代わりにセラミックダクトに交換終了後に加速調整を開始した。

## 4 ビーム強度増強のための改善

加速器立ち上げ後のコミッショニング手順と結果に関しては、既報[14,15]に詳細があるので、ここでは立ち上げ以降、強度増強のために実施した主な改善について述べる。

### 4.1 入射点下流のビームロス対策

MLFおよびMRへの連続ビーム供用運転が開始されてから最初に高い線量が観測されたのは、入射用荷電変換フォイルより5 m程度下流の、ダンプビームラインと周回軌道を分岐するためのダクト、および、その下流であった[16]。このダンプビームラインは入射時に陽子に変換し損ねた $H^-$ や $H^0$ を、廃棄用のダンプまで輸送するためのものである。周回軌道と、これらの廃棄ビームの分離のために、分岐ダクトにはセプトム電磁石を組み込む必要があるため、この部分の真空容器の口径は、周辺よりも小さくなっている。この口径が狭まった箇所に、入射及び周回ビームのうちフォイルとの相互作用で散乱されたビームが集中して当たっていた。また、比較的散乱角が小さい粒子は、この分岐部を通過して、その下流のビーム位置モニタ(BPM)にあたるのが散乱粒子の軌道計算から判った[17]。この結果を基に、分岐部のダクトにコリメータを組み込むことで、散乱粒子がぶつかる場所を局所化し、さらに分岐ダクトとコリメータを遮蔽体で覆うことで、ビーム損失が大きいところからの残留放射能の影響を抑えることに成功した[18,19]。散乱粒子の軌道とビームロスが起こる地点の評価結果、および、実際に設置したコリメータを図6に示す。

iii 主電磁石電源出力が直流であることから、この運転状態を我々はDCモード運転と呼んでいる。加速する場合の主電磁石の運転パターンはACモードと呼んでいる。

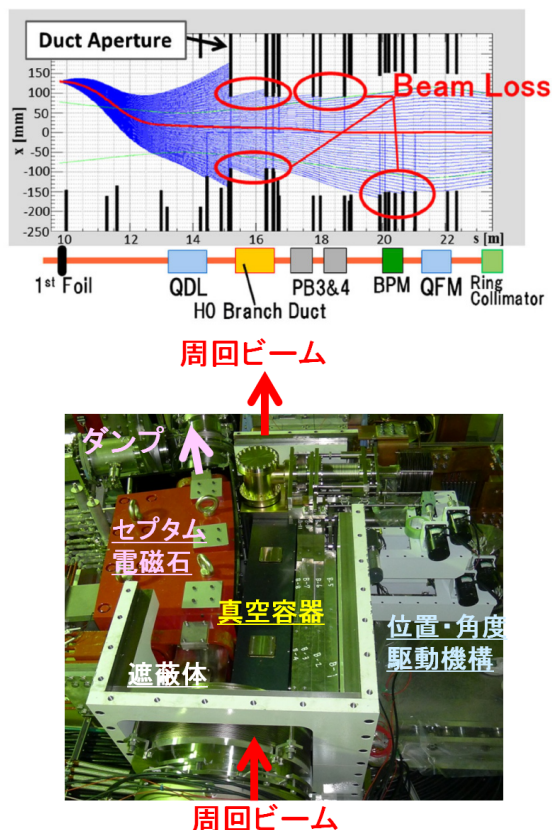


図6 散乱粒子の軌道とロス点の評価結果（上），および，設置したコリメータ（下）。

#### 4.2 入射ビームラインの真空圧力の改善

入射部周辺には，セプタム電磁石出口の磁石で曲げられる方向とは逆側の真空容器表面にスポット的に線量が高い個所がさらに発見された。その原因は，リニアックからRCSへのビーム輸送ライン上の真空圧力が悪く，輸送途中で残留ガスによってH<sup>0</sup>に荷電変換されたビームが，セプタムで曲げられずに直進したことだとつきとめた。そして，ビーム輸送ライン上にターボ分子ポンプを追加設置し，真空圧力を改善することで，ここでのビームロスの低減に成功した[20]。

#### 4.3 出射部直流電磁石の漏れ磁場対策

さらにビーム調整を進めるうちに，直流で励磁している出射部セプタム電磁石，および，取り出しビームライン上の電磁石からの漏れ磁場が，RCS 周回ビームに悪影響を与えていることがわかった。この対策として，当初は周辺の真空ダクトの周りに鉄製の磁気遮蔽体を巻くことで対応しようとしたが[21]，フランジやベローズの部分は膨らみが大きくスペース等の問題で巻くことができず，磁気遮蔽として不十分であった。そこで，真空ダクトとベローズ自体を高透磁率のパーマロイで製作するように方針を変更し，パーマロイ製真空容器からのガス放出を低くおさえる方法確立した。この新規開発したパーマロイ製真空容器に入れ替えることで，ビームラインの真空圧力を悪化させることなく，漏れ磁場の影響を1/10まで低減させることに成功した[22]。



図7 座屈，損傷した高周波加速空洞コア。

#### 4.4 MLFとMRに取り出されるビームの横方向ペインティングエリアの切り替え

ユーザー運転を開始し出力が大強度化していくとともに，MLFとMRに取り出されるビームに要求される特性に違いが出てきた。RCSからMRへ取り出されるビームの割合は全体の10%以下<sup>iv</sup>であり，MRに取り出すビームはMRからの出力が最大になるように，RCSで多少ロスが増えてもMR内でのロスが最小となるようなビーム条件での運転が必要となった。一方，RCSから取り出される残り大部分のビームはMLFへ取り出されるので，これらビームに対するRCS内でのビームロスを減らすことで，RCS内の放射化の進行を抑制することができる。そこで，MLFへ取り出されるビームに対しては，RCS内でのビームロスの低減を優先するように調整がおこなわれるようになった。そのために，MRに取り出されるビームとMLFに取り出されるビームでは，入射時に横方向ペインティングエリアを変更することでエミッタンスを25 Hzの間で切り替えられるように，入射ビームラインにパルス偏向電磁石を追加した[23]。

#### 4.5 高周波空洞コアの座屈対策

運転開始した2007年は，高周波加速空洞は10台で，2008年にさらに1台追加した。そして，これら11台の高周波加速空洞を使い，ビーム調整・ビーム供用を安定におこなうことができていた。ところが，2009年始め頃から空洞インピーダンスが低下する現象が見られるようになった。

RCSの高周波加速空洞では，高周波の電力によって生じる熱を除去するため，純水を流しているタンク内に，金属磁性体コアを装荷する直接水冷方式を採用している。コアは18 μm厚の金属磁性体リボンを巻いて作られているので，そのまま冷却水中で使用すると錆が発生してしまう。そこで，防錆，および，形状保持の観点から樹脂含浸及びコーティングを施していた。インピーダンスが低下した空洞のタンクを解体して中を調べたところ，コアが応力によって座屈，損傷していることが判明した(図7)[24]。そこで，複数の空洞を解体して検分したところ，形状保持のためにリ

<sup>iv</sup> 2015年3月現在，MRは繰り返し周期の短いニュートリノターゲットへ向けたモードでは，2.48秒のサイクルで運転されており，RCSからは4発分=0.16秒間のビームだけMRへ向けて取り出されている。

ボン層間まで積極的に樹脂含浸をおこなったコアが座屈していることがわかった[25]。この含浸工程は当初コアを切断しカットコアとして空洞のQ値を調整するために導入されたものであるが、最終的にはカットコアを使用しない方式に落ち着いたため必要な工程ではなくなっていた。

このため、樹脂含浸はせず、防錆を主眼においた樹脂コーティングのみを施したコアの生産を開始して、メンテナンス期間中に、毎年空洞2台分ずつコアの交換をしていった。幸い座屈による損傷も毎年2台以下で済んだため、ビーム供用を止めるような事態に陥ることはなく、2014年までに11台中10台の空洞についてコアの交換を終えた。以後は、座屈による損傷に煩わされることはなくなり、2013年には新規の空洞を1台加えて現在では空洞12台体制で安定に運転ができるようになった。

このように運転とともに改善を進めていき、途中震災による運転中断と復旧を挟みながら、2012年度末にはMLFに向けて300kWで連続運転できるところまで漕ぎ着けることができた[26]。この時点でのRCSへの入射エネルギーは181 MeVで、この300kWの出力は空間電荷効果によるチューンシフト量を400 MeV入射時に換算すると1MWの出力に相当することになる。このように、1MW出力に目算の立ったところで入射エネルギーの増強が開始された。

## 5 入射エネルギー増強へむけての対応

### 5.1 ハドロン事故

2013年度は、当初の予定では7月までユーザー運転を行い、それ以降半年かけてリニアックに新規に環状結合型(Annular-ring Coupled Structure, ACS)空洞を追加し、加速エネルギーを181 MeVから400 MeVまで増強する予定であった。しかしながら、2013年5月23日にハドロン実験施設において放射性物質漏えい事故を引き起こしてしまった[27](国際原子力事象評価尺度の評価はレベル1で、「事故」ではなく「事象」に分類されるが、ここでは自戒の意味から「事故」と表記する)。この事故を受け、加速器の運転およびリニアックの増強のための準備を中断し、これまで想定していなかった放射線漏洩事故に発展しうるリスクの見直しを図った[28,29]。その検討の結果を受け、対策が一段落したところで、当初予定していた作業を再開した。

### 5.2 入射用パンプ電磁石電源の改造

RCSでは400 MeV入射に向けた大きな改造として、入射時にペインティング軌道を作るシフトパンプ、および、水平ペイントパンプの電磁石用電源の増強工事がおこなわれた[30]。電源は、リニアックの加速エネルギーの増強にあわせ、電流で約1.6倍、電圧で約2倍の増強が必要となる。図8に増強したシフトパンプおよび水平ペイントパンプの配置と入射軌道を、表2に増強前後の定格容量を示す。

表2：電源定格一覧

電源名	181MeV	400MeV
	電流 / 電圧 (kA/kV)	電流 / 電圧 (kA/kV)
シフトパンプ	20.0 / 6.4	32.0 / 12
水平ペイントパンプ 1	17.6 / 0.6	29.0 / 1.2
水平ペイントパンプ 2	14.2 / 0.6	23.4 / 1.2
水平ペイントパンプ 3	12.5 / 0.6	21.0 / 1.2
水平ペイントパンプ 4	12.5 / 0.6	21.0 / 1.2

181MeV入射時におけるパンプ電源は、半導体のIGBT(絶縁ゲートバイポーラトランジスタ, Isolated Gate Bipolar Transistor)モジュールを用いたアセンブリの多重化回路構成によるチョップ方式<sup>v</sup>を用いていた。チョップ方式の利点は、出力する電流と電圧が電源定格の範囲内であれば、任意の波形形成が可能となることである。チョップ方式により、ビーム増強に向けたビームコミッションングにおいて要求されたペインティング軌道用のパンプ波形を形成し、ビーム調整を予定通り進めることができた。その反面、波形を形成する間は常時スイッチングをおこなうため、IGBTアセンブリのスイッチングに起因する電流リップルノイズが出力電流波形に重畳されるという好ましくない状況もあった。そのため、シフトパンプ電磁石では、重畳されたスイッチングノイズと、セラミック真空チャンバーに施した高周波遮蔽用銅箔との間で共振が発生し[31]、磁場がゆがめられ、ビームロスが起る原因にもなっていた[32]。そこで、入射電磁石電源を400 MeV入射に対応させる改造とあわせて、リップルノイズの抑制を目的とした新しい電源を開発した[33]。

この新しいシフトパンプ電源では、回路方式にコンデンサの充放電を利用した転流方式を採用した。その方式とは、入射パンプ波形を形成する場合に、電流波形の立上げ開始時、立ち上げが完了し入射中磁場を一定に保つ必要のあるフラットトップの開始時、そして、フラットトップが終了した立下げ開始時、といったパターンの切り替わり時のみ、コンデンサの充放電のスイッチ操作をおこなうようにすることである。このように、原理的に3回のスイッチ操作でパンプ波形を形成するため、スイッチングに起因する電流リップルノイズは大幅に低減される。新シフトパンプ電源は、12台の立上げ立下げ用ユニットと2台のフラットトップ用ユニットを直列にした回路を1バンクとして構成し、そのバンクを16台並列に接続して1台のシフトパンプ電源

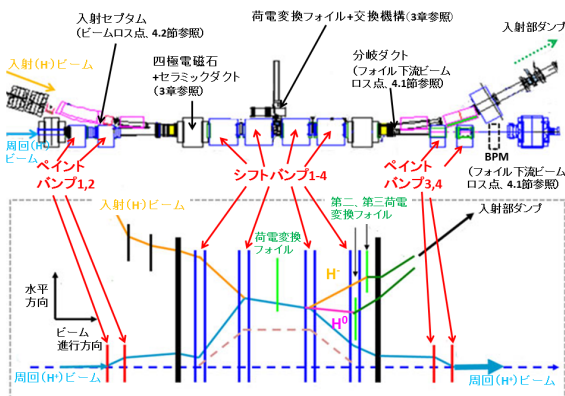


図8 入射部機器配置(上)と入射軌道(下)

<sup>v</sup>半導体であるスイッチング素子のON/OFFの実行タイミングとその時間幅をコントロールして電流の増減をコントロールし、必要とする電流波形を形成する方式。

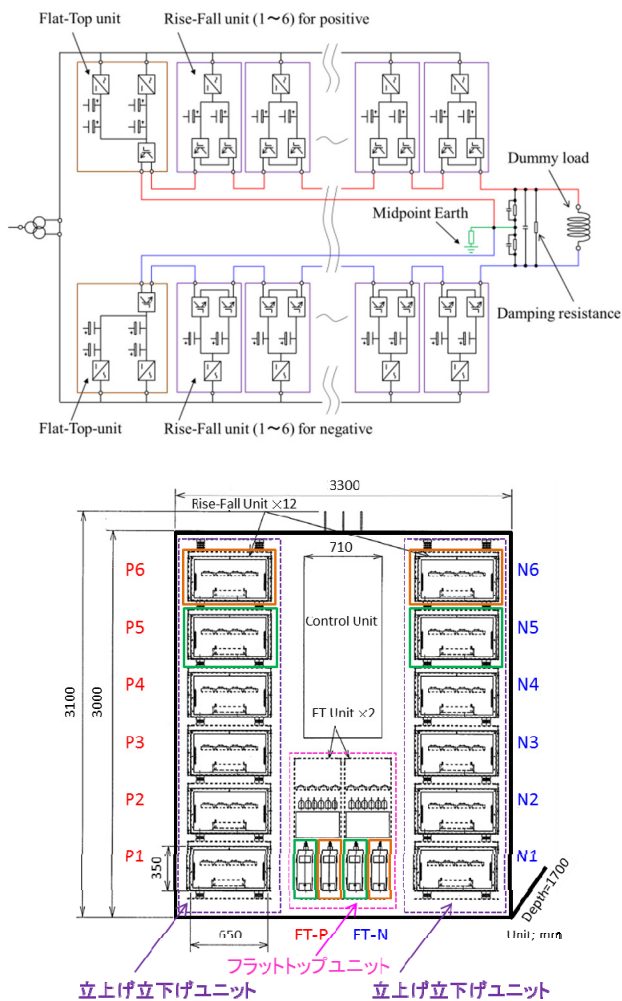


図9 新シフトポンプ電源の1バンク主回路図(上)と電源盤構成(下)。

システムとして構成している。シフトポンプ電源は、最大 32 kA / 12 kV の大電流/高電圧の出力が可能である。図9上に、1バンクの主回路図を示す。また、ユニット毎の転流切り替えを個別に制御することで、ポンプ波形の立上げ・立下げとフラットトップ時間を可変とし、フラットトップ電流値の 25 Hz のショット毎での変更も可能とするなど、励磁波形の波形形成にある程度の任意性を持たせている。さらに、ポンプ波形の立上げ立下げ部分とフラットトップ部分をそれぞれ独立した回路構成とし、各回路を個別に制御できるユニット構造(図9下)としたことで、故障した場合に該当ユニットのみを交換できるため、メンテナンス性にも優れている。

水平ペイントポンプ電源は、ビームコミッション時に使用する台形波形や、 $50\pi$  mm mrad や  $150\pi$  mm mrad などのペインティングエリアに対応したペインティング軌道を形成する必要があるため、任意の波形形成が可能な IGBT によるチョッパ方式を引き続き採用した。増強改造としては、まず水平ペイントポンプ電源1について電源全体を新規に製作し、先行して入換えをおこなった。その後、水平ペイントポンプ電源2~4については、電流と電圧の増加に合わせて IGBT アセンブリを追加する増強とした。あえて

一台だけ先行で一式製作し交換した理由は、その交換した旧水平ペイントポンプ電源1を工場に送り、残りの電源2~4に追加する IGBT アセンブリを組み込んだ整流器盤とチョッパ盤の工場内での組み合わせ動作試験をおこなうためである。既存のチョッパ盤の IGBT アセンブリは、追加チョッパ盤に合わせて内部配線を変更し、全体として直列に2倍、並列に1.6倍となる電源容量とする改造が必要になる。そこで、このように実機1台を工場に持ち込むことで、事前に盤内配線の変更と組立及び運転動作の試験データを取得することができた。これにより、水平ペイントポンプ電源2~4の3台の増強改造は、夏の保守期間内で、かつ、持ち出すことなく現地の3 GeV シンクロトロン棟内でおこなうことができた。新しい水平ペイントポンプ電源1~4は、IGBTの動作周波数を54 kHzとし、アセンブリを12多重化したチョッパ回路のスイッチング合成周波数は648 kHzとなる。出力する電流や電圧が定格値の範囲内であれば、台形波形や減衰関数波形(ペイント波形)を、設定値と出力値の偏差 $\pm 1.0\%$ 以下の精度で任意に形成して出力することが可能である[34]。

### 5.3 再アライメント作業

RCSでは、このリニアックの加速エネルギー増強期間に、もう1つ大きな作業として2011年の東日本大震災の際に動いてしまった主電磁石の再アライメントを実施した[35]。震災からの復旧作業をここまで延期したのは、以下の2点を勘案し、復旧を急ぐあまり慌てて作業することはやめて、確実に半年程度の作業時間が確保できるリニアックのACS空洞インストールのタイミングに再アライメント工事を併せることとしたためである。

- 1) RCSは加速器構成機器以上にインフラ、特に屋外受電設備の被害が大きく、その復旧が終わるまではトンネルの照明も空調も動かすことができず、そのため受電設備の復旧を待つて再アライメント作業を開始すると、運転再開をさらに数か月延ばさざるを得ない状況であったこと[36]。
- 2) 震災後の電磁石の測量結果を入れてシミュレーションをおこなうと、ロスが増えるものの300 kWまでの出力の運転は可能であることが示唆されたこと[37]。

これら作業のうち、再アライメントに関しては予定通りの期間で完了することが出来たが、400 MeV入射用のシフトポンプ電磁石電源については性能仕様が満足されないまま運転再開となった。

## 6 400 MeV入射のコミッションと運転

入射エネルギー400 MeVでのRCSのコミッションは、400 MeVリニアックの調整が終わった2014年1月末より開始された。RCSのビーム調整を開始するにあたって、新規に製作したシフトポンプ電磁石電源に不具合があったため、まずその対応策を検討する必要があった。そもそもこのシフトポンプ電磁石は、入射中に入射軌道と周回軌道をお互いに近づけて合流させるために使用するので、入射中は磁場を一定に保つ必要がある。しかしながら、新たに製作した電源には、出力電流を一定に保つためのフラットトップ用ユニット部分が長時間の運転に耐えられずに故障する状

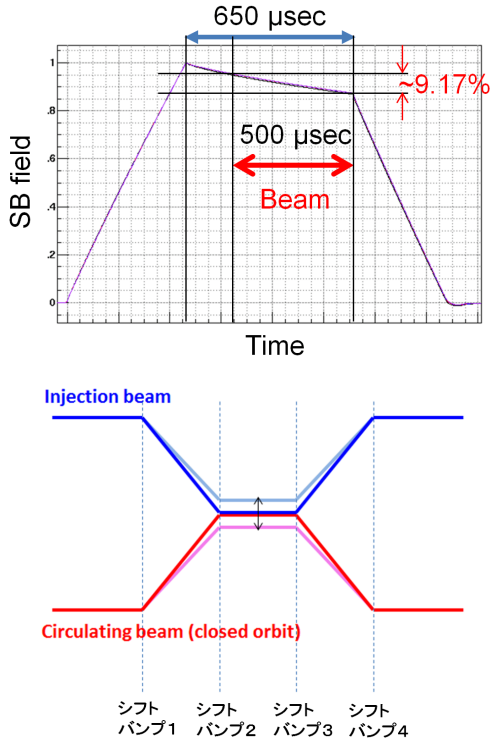


図10 フラットトップユニットを使わずに電源を運転した際の磁場の時間構造(上)と入射中の軌道の変動(下)

態であり、加速器の運転は、このフラットトップ用ユニットを使わずにおこなわねばならなかった。図10にフラットトップ用ユニットを使わずに電源を運転した際の磁場と入射中の軌道の変動を示す。このように、フラットトップ用ユニットが無い場合は磁場強度が入射中に低下していき、入射位置が動いていくことになる。その結果、すべての入射ビームを荷電変換させるには、その入射点の移動量も考慮した大きなフォイルを使用しなければならない。これにより、フォイルと周回ビームの相互作用の確率が上がりビームロスが増加することが想定される。そこで、入射中の入射位置が動かないように、入射用のパルス電磁石で軌道補正をすることにした[38]。この補正をおこなって以降は、181 MeV入射時と同様の手順で調整を進めることができたようになった。

図11に550 kW出力での運転条件毎のビーム生存率の測定結果を示す。181 MeV入射での運転時(図青三角)には、縦横のペインティングを行わないと(Painting parameter ID=1のデータ)空間電荷効果の影響が強く30%のビームロスが発生していたが、400 MeV入射(図赤丸)になったことでペインティングをおこなわなくても1%以下に抑えられ(枠内拡大図)、入射エネルギー増強の効果を確認することができた[32]。実際に、供用運転開始後の300 kW出力運転時と、同じ300 kW出力運転での入射エネルギー増強前の線量を比べると、荷電変換フォイル真空容器を除き、残留線量も低く抑えられていることが確認できた[39]。荷電変換フォイル真空容器の線量は上昇したが、これは入射ビームのエネルギーが上がったことで、フォイルと入射および周回ビームとの相互作用で生成される二次粒子が増えたことが原因である[40]。

入射エネルギー400 MeVでのビーム調整後、300 kWでの供用運転を開始したところ、再度シフトパンプ電源でトラブルが発生した。今度の問題点は、電源の冷却が不十分なため温度異常が多発し、トリップを繰り返すというものであった。この問題に関しては、仮設の空冷ファンを電源周辺に多数設置することで温度上昇を防ぎ、次の長期メンテナンスである2014年の夏まで運転を継続することができた[41]。

## 7 イオン源増強と1 MW 試験

### 7.1 2014年夏季作業と1回目の1 MW 試験

2014年の夏季シャットダウン中に、リニアックでは1 MWに必要な最後の増強である高ピーク電流対応のフロントエンドへの交換がおこなわれた[42]。RCSにおいては、前章で述べたシフトパンプ電磁石電源の不具合修正がおこなわれ、磁場のフラットトップが維持できるようになるとともに、本設のファンを電源筐体に取り付けることで仮設ファンでの冷却よりも効率的に電源内の温度を下げられるようになった。これにより、1 MW相当のビーム入射・加速、および、取り出し試験時には安定して設計性能を發揮することができるようになった。図12に、1 MW相当のビーム加速に成功した時のパンプ波形を示す。電流リップルの発

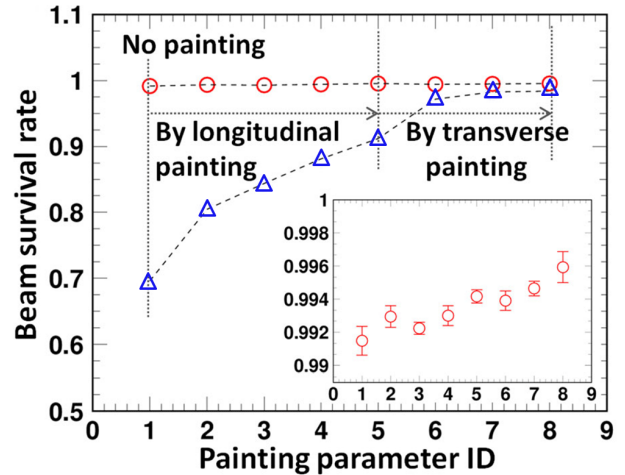


図11 550 kW出力での運転条件毎のビーム生存率。400 MeV入射条件ではペインティングを行わなくても1%以下の生存率のため、枠内に拡大して表示している。

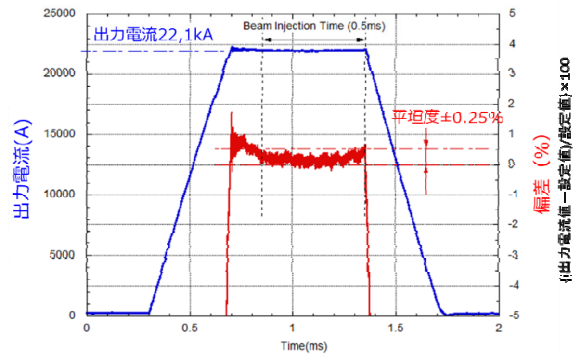


図12 1MW相当のビーム加速に成功した時のシフトパンプ電磁石用電源の励磁波形。

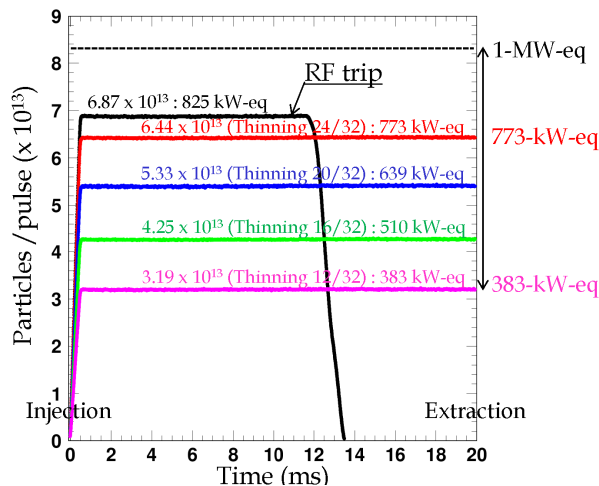


図 13 1 MW 試験（一回目）の加速中の電流。

生は抑制され、高いフラットトップの平坦度を実現している。

夏季作業終了後の 2014 年 9 月末から、新たなフロントエンドを使ったりニアックの調整を開始し、10 月半ばには RCS での 1 MW 試験に必要なピーク電流 50 mA のビームが入射できる状態になった。そこから RCS の大強度出力のための調整を開始した。試験時の運転パラメータは基本的に供用運転時と同じとし、ベータトロンチューンは (6.45, 6.42)、縦方向はセカンドハーモニックと運動量オフセットを入れたフルペインティングと呼んでいる条件、横方向のペインティング範囲は  $100\pi$  mm mrad をそれぞれ選択した。この条件で入射粒子数を 380 kW 相当から徐々に増やしていくと、770 kW 相当の粒子数までは、ビームロスが殆ど無い状態で加速することができた。しかしながら、820 kW 相当まで加速粒子を増やすと、加速中盤の 10 ms 付近で空胴電源(真空管増幅器に直流電力を供給している陽極電源)がトリップしてビームが全てロスしてしまった(図 13 参照)。

この原因について調査を進めたところ、高周波空胴を駆動するのに必要なアノード電流が出力とともに増加し、その増加量が想定より大きかったため、電流超過インターロック(設定値 110 A)になったことが判明した[43]。

## 7.2 空胴トリップ対策と 2 回目の 1 MW 試験

一般に、陽極電源が供給するアノード電流は、フェーザダイアグラムをもちいた空胴の高周波電流の計算をもとに真空管の動作解析をおこなって求められる。しかし、RCS の場合は、それぞれの空胴で基本波のみでなく高調波も同時に扱っているため、動作解析からアノード電流値を精度よく求められるところまで至っていない。このため、1 回目の 1 MW 試験時に得られたアノード電流値の外挿によって、10 月時点の空胴パラメータで 1 MW ビームを加速するために必要な電源出力(140 A)を求めた(図 14 赤丸参照)。

このままでは 1 MW の運転をおこなうことが出来ないので、必要なアノード電流を下げるために、空胴のフェーザダイアグラムを再度検討しなおして、1.7 MHz 付近に設定している空胴共振点を上げることにした。これは、ビームが見る空胴インピーダンスをよりインダクティブな性質の強いものとして、ビームが作るウェイク電圧が空胴電圧を

押し上げる方向(電圧を一定に保つためには、電源から供給する電流は減る方向)へと向けるためである。

図 15 に空胴共振点とアノード電流の関係を示した。この図からは 2.3 MHz くらいに共振点を持ってくると、アノード電流が最小化されることが分かる。一方、実際の空胴は加速ギャップに設けた真空コンデンサで共振点の調整をしており、空胴から真空コンデンサを取り外した状態の 2.1 MHz が共振点の上限になる。しかし、図 15 から共振点を 2.1 MHz にあげるだけでも、アノード電流を大幅に低減できることがわかるので、全空胴から真空コンデンサを取り外して共振点を 2.1 MHz にあげて、再度ビーム試験に臨むことにした。ただし、共振点を変更したとしても、1 MW ビームを加速するのに必要なアノード電流は 124 A 程度と予想され(図 14 の青四角)、10 月時点の電源ではいまだインターロックにかかる値である。そこで、次の 1 MW 試験においては連続してビームを加速することはせず、ショットバイショット限定でビームを加速することで、陽極電源のデューティを下げることが条件に、インターロックの値

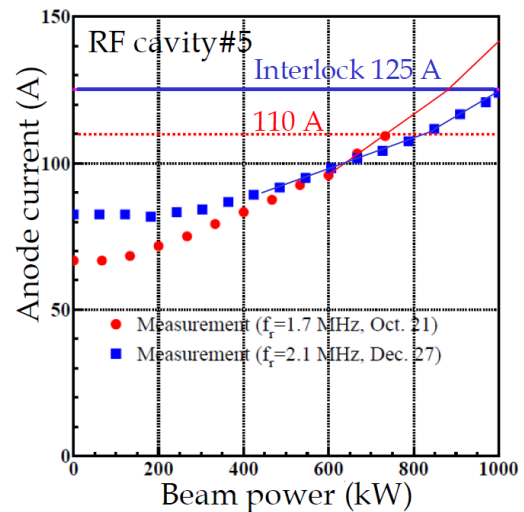


図 14 アノード電流の出力依存性。

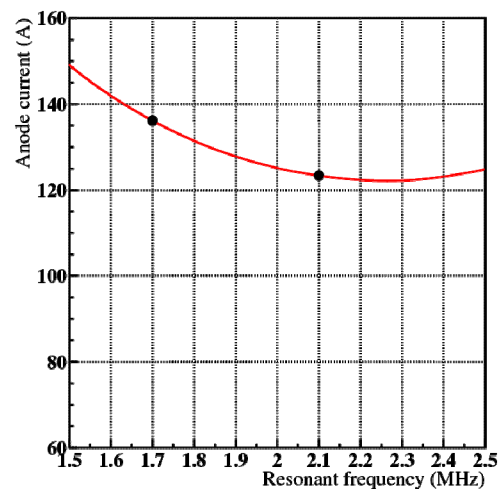


図 15 空胴共振点とアノード電流の関係。



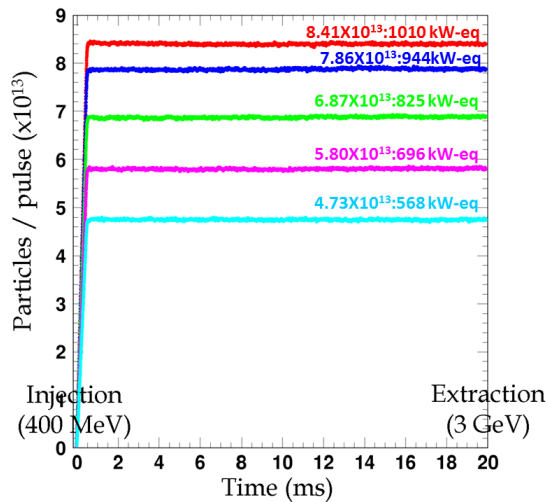


図 16 1 MW 試験 (2 回目) の加速中の電流。

を引き上げた。

これらの対策を 2014 年の年末に実施して、年末最後の運転日、および、年初の調整期間に空胴の調整をおこない、はじめに述べたように 1 MW を達成することが出来た。その際の電流モニタ出力を図 16 に示す。

## 8 まとめと今後

RCS は 2007 年の運転開始以降、比較的順調に出力を伸ばすことができ、本稿で述べてきた改善、調整を経て、ついに単発ではあるが設計出力である 1 MW 相当の運転に成功した。しかしながら、1 MW 出力運転では、なお加速途中で通常運転の数十倍のビームロスがアーク部分散関数のピーク付近で発生しており、連続運転を開始するためには空胴運転パラメータのさらなる調整が必要である。現状は空胴アノード電流出力に余裕がないので、電源の容量自体を増強する方向で検討が進んでいる。それとは別に、フォイル容器の放射化抑制のための周回ビームのフォイル衝突回数の低減も重要な課題である。この問題については、ペインティングエリアを現在の  $100\pi$  mm mrad から  $200\pi$  mm mrad 以上に拡幅させることで、周回ビームのフォイル衝突回数を低減する予定であるが、その実現のためには入射ビームの低エミッタンス化が必須である。そこで、そのために必要とされる入射ビームラインへのプロファイルモニタの追加、ビームハローを削るためのスクレーパシステムの改良を進める予定である。また、入射バンブ電磁石のエッジ収束によるベータ関数変調が共鳴を引き起こし、ビームロスが増加するという評価結果も出ている[44]。その対策として、ベータ関数変調を補正する補正四極電磁石がすでに準備されており、近日中に調整をおこなう見込みである。さらにハードウェア側の対策として、入射部の作業手順の見直し、遮蔽体等の設計、保守性を高めた機器への改造を今後進めていく必要がある。MR へ向けたビームとしては、現状よりさらにビームハローを低減した低エミッタンスビームの要求があるが、現在の目算ではより共鳴線の少ないベータトロンチューンでの運転で達成できると見込んでおり、その試験も予定されている。これらの目標達成に向けて研

究開発を進めつつ、設計出力である 1 MW を超えたさらなる大強度化を目指して今後も調整をおこなっていく所存である。

## 9 謝辞

最後に、RCS における 1 MW 相当の運転は、RCS に直接携わるメンバーの努力はもちろんのこと、前段のリニアック、後段の MLF、MR といった全ての J-PARC メンバーの準備と助力なくしては達成できませんでした。また、J-PARC センター以外の様々な研究施設や企業の皆様にも研究開発に御協力頂いております。この場をお借りして、それら全ての方々に感謝致します。

## 参考文献

- [1] “J-PARC の 3 GeV シンクロトロン加速器が性能を大幅に向上-1 MW 相当のビーム加速に成功-”, 日本原子力研究開発機構プレス発表, <http://www.jaea.go.jp/02/press2014/p15020602/>, (参照 2015-02-06) .
- [2] Y. Yamazaki ed., “Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Project, J-PARC”, KEK Report 2002-13 and JAERI-Tech 2003-44.
- [3] H. Harada, “Painting-injection Study Using a Virtual Accelerator in a High-intensity Proton Accelerator”, KEK Report No. 2009-7.
- [4] K. Yamamoto, “Efficiency simulations for the beam collimation system of the Japan Proton Accelerator Research Complex rapid-cycling synchrotron” *Phys. Rev. ST-AB* **11**, 123501 (2008).
- [5] K. Yamamoto, “The beam collimator system of J-PARC rapid cycling synchrotron”, Proc. of the 42<sup>nd</sup> ICFA Advanced beam dynamics workshop, HB2008, WGC10 (2008).
- [6] 草野讓 編, “J-PARC 使用予定材料・機器の耐放射線特性試験報告集”, JAEA-Review 208-022
- [7] M. Kinsho, *et al.*, “Vacuum system design for the 3 GeV-proton synchrotron of JAERI-KEK joint project”, *J. Vac. Sci. Technol.* **A20**, 829-832 (2002).
- [8] M. Kinsho, *et al.*, “Development of alumina ceramics vacuum duct for the 3 GeV-RCS of the J-PARC project”, *Vacuum*, **73** 187-193 (2004).
- [9] N.Tani *et al.*, “Design and Fabrication of an RCS Magnet Coil Using a Stranded Conductor of J-PARC 3-GeV Synchrotron”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **18**, 314-317 (2008).
- [10] M. Yamamoto, *et al.*, “High Power Test of MA Cavity for J-PARC RCS”, Proc. of PAC’07, TUPAN063 (2007).
- [11] 中性子科学研究計画施設検討グループ, “中性子科学研究計画における研究施設 (第 1 次案)”, JAERI-Tech 99-030.
- [12] JHF Project office, “JHF Accelerator Design Study Report”, KEK Report No. 97-16.
- [13] The Joint Project Team of JAERI and KEK, “The Joint Project for High-intensity Proton Accelerators”, KEK Report 99-4 and JAERI-Tech 99-056.
- [14] 發知英明, “J-PARC 3 GeV RCS のビームコミッショニング”, 加速器, **5**, 1, 50-63(2008).
- [15] H. Hotchi *et al.*, “Beam commissioning and operation of the Japan Proton Accelerator Research Complex 3-GeV rapid

- cycling synchrotron”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 02B003 (2012).
- [16] K. Yamamoto *et al.*, “Radiation Level in the J-PARC Rapid Cycling Synchrotron After First Study”, *Proc. of IPAC10, WEPEB065* (2010).
- [17] P. K. Saha, “Operational Experience with J-PARC Injection and Extraction Systems” *Proc. of the 46<sup>th</sup> ICFA Advanced beam dynamics workshop, HB2010, Morschach, Switzerland, TUO2B01* (2010).
- [18] S. Kato *et al.*, “Localization of the large-angle foil-scattering beam loss caused by the multiturn charge-exchange injection”, *Phys. Rev. ST-AB* **16**, 071003 (2013).
- [19] K. Yamamoto *et al.*, “Comparison of the Residual Doses Before and After Resumption of User Operation in J-PARC RCS”, *Proc. of IPAC’12, THPPP070* (2012).
- [20] J. Kamiya *et al.*, “Beam Loss Suppression by Improvement of Vacuum System in J-PARC RCS”, *Proc. of IPAC’14, WEPME035* (2014).
- [21] M. Yoshimoto *et al.*, “Suppression of Leakage Fields from DC Magnets in J-PARC 3 GeV RCS”, *Proc. of IPAC’11, WEPO006* (2011).
- [22] J. Kamiya *et al.*, “Vacuum chamber made of soft magnetic material with high permeability”, *Vacuum*, **98**, 12-17 (2013).
- [23] T. Takayanagi *et al.*, “Power Supply of the Pulse Steering Magnet for Changing the Painting Area between the MLF and the MR at J-PARC 3 GeV RCS”, *Proc. of IPAC’13, MOPWA008* (2013).
- [24] M. Nomura *et al.*, “Condition of MA Cores in the RF Cavities of J-PARC Synchrotrons After Several Years of Operation”, *Proc. of IPAC’10, THPEA022* (2010).
- [25] M. Nomura *et al.*, “The Origin of Magnetic Alloy Core Buckling in J-PARC 3 GeV RCS”, *Nucl. Inst. and Mes. A* **623**, vol. 3, (2010).
- [26] K. Hasegawa *et al.*, “Status of J-PARC Accelerators”, *Proc. of IPAC’13, THPWO031* (2013).
- [27] T. Koseki *et al.*, “Present Status of J-PARC - After the Shutdown Due to the Radioactive Material Leak Accident-”, *Proc. of IPAC’14, THPME061* (2014).
- [28] N. Kamikubota *et al.*, “New Surveillance System to Enhance Safety of J-PARC Accelerators”, *Proc. of the 11<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, PASJ2014-MOOL11* (2014).
- [29] K. Yamamoto *et al.*, “Increment of the Machine Protection System in J-PARC Rapid Cycling Synchrotron”, *Proc. of the 11<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, PASJ2014-SAP096* (2014).
- [30] N. Hayashi *et al.*, “Progress of Injection Energy Upgrade Project for J-PARC RCS”, *Proc. of IPAC’13, THPWO032* (2013).
- [31] Y. Shobuda *et al.*, “Analytical method for the evaluation of field modulation inside the rf-shielded chamber with a time-dependent dipole magnetic field”, *PRST-AB* **12**, 032401 (2009).
- [32] H. Hotchi *et al.*, “Commissioning the 400 MeV Linac at J-PARC and High Intensity Operation of the J-PARC RCS”, *Proc. of IPAC’14, TUXA01* (2014).
- [33] T. Takayanagi *et al.*, “Development and Present Status of New Horizontal Shift Bump Power Supply for Injection Bump at the J-PARC RCS”, *Proc. of the 11<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, PASJ2014-SUP059* (2014).
- [34] T. Ueno *et al.*, “Status of the horizontal paint bump power supply of the J-PARC RCS”, *Proc. of the 11<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, PASJ2014-SUP058* (2014).
- [35] N. Tani *et al.*, “Alignment Plan and Survey Results of the Equipment for J-PARC 3 GeV RCS”, *Proc. of IPAC’13, WEPME020* (2013).
- [36] 小関忠他, “東日本大震災後の J-PARC”, *加速器*, **8**, 2, 74-80(2011).
- [37] K. Yamamoto, “J-PARC Recovery Status”, *Proc. of the 52<sup>nd</sup> ICFA Advanced beam dynamics workshop, HB2012, MO11A02* (2012).
- [38] K. Yamamoto, “J-PARC: The path to 1 MW at J-PARC, including 400 MeV linac improvement, RCS improvements and front-end upgrades”, *Proc. of ICANS XXI, ABT-01*, in printing.
- [39] K. Yamamoto *et al.*, “Residual Dose with 400 MeV Injection Energy at J-PARC Rapid Cycling Synchrotron”, *Proc. of IPAC’14, TUXA01* (2014).
- [40] E. Yamakawa *et al.*, “Measurements and PHITS Monte Carlo estimations of residual activities induced by the 181 MeV proton beam in the injection area at J-PARC RCS ring”, *Proc. of the 2<sup>nd</sup> international symposium on science at J-PARC*, in printing.
- [41] K. Horino *et al.*, “Report of the Temperature Problem of New Horizontal Shift Bump Power Supply at the J-PARC RCS”, *Proc. of the 11<sup>th</sup> Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, PASJ2014-SUP060* (2014).
- [42] 森下卓俊他, “J-PARC リニアックのアップグレード”, *加速器, 高エネルギーニュース*, **33**(4), (2015).
- [43] H. Hotchi, “Lessons from 1-MW Proton RCS Beam Tuning”, *Proc. of the 54<sup>th</sup> ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop, HB2014, MOXLR02* (2014).
- [44] H. Hotchi *et al.*, “Numerical study for beam loss occurring for wide-ranging transverse injection painting and its mitigation scenario in the J-PARC 3-GeV RCS”, *NIM, Sect. A* **778**, 102-114 (2015).