

J-PARC 加速器の概要

1. 序

1.1. 全体概略

国内で最大最強の陽子加速器施設である J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) が稼働し始めてから 10 年以上が経過した。既に機器の老朽化が現れて対策が検討されているし、更新が始まった部分もある。それでも加速器の安定度は向上し、ユーザーへ供給する陽子ビームのパワーも増加している。まだ設計値に到達してはいないが、短時間のビーム試験の結果ではあるが、設計値に十分達成できる性能があることを確認している。

J-PARC に関して高エネルギー加速器セミナー（大穂）で取り扱うのは 2010 年以降であるので、本稿では 2010 年以降の経緯を主に報告し、次いで今後の展望について簡単に述べる。J-PARC 加速器全体の基本的な特徴と特性については文献[1]が詳述しているので、本稿ではその後の変更点と「枝葉」を主に説明する。

まず、J-PARC の概略を説明する。J-PARC は高エネルギー加速器研究機構（KEK）と日本原子力研究開発機構（JAEA）が共同で東海村にある JAEA の原子力科学研究所の敷地内に建設し、運営している陽子加速器施設である。図 1 に示すように 3 種の加速器、即ち 40-MeV 線形加速器（リニアック）、3GeV Rapid Cycle Synchrotron (RCS) 及び 30GeV Main Ring Synchrotron (MR) から構成されている。

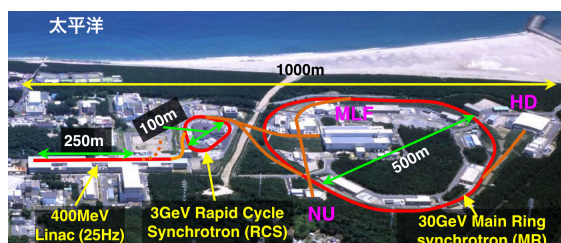


Fig. 1 J-PARC 全景

実験施設は RCS からの 3GeV ビームを用いる物質・生命科学実験施設（Material and Life Science Experimental Facility、MLF）、MR か

らの 30GeV ビームを用いるニュートリノ実験施設とハドロン実験施設がある。全てが KEK と JAEA が共同運営する J-PARC センターに属し、（大学及び民間の）外部研究者への共同利用機関として活動している。

建設は 2001 年に始まり、まず当初 180MeV であったリニアックが 2007 年 1 月にビーム加速を達成し、同年 10 月に RCS が 3GeV 加速に成功した。そして 2008 年 12 月に MR が 30GeV まで加速している。その後、ビーム利用運転を継続し、2014 年にリニアックの増強を行い、エネルギーを設計値である 400MeV まで引き上げている。

J-PARC のユーザーが利用するのは陽子ビームそのものではなく、陽子を原子核標的に当てて発生する各種 2 次粒子である。（図 2 参照）MLF では中性子利用が主であるが、 π 中間子の崩壊から発生するミュオンも利用している。ニュートリノ施設では同様にパイ中間子の崩壊から発生するニュートリノを利用する。ハドロン実験施設ではパイ中間子や K 中間子その物を利用する。

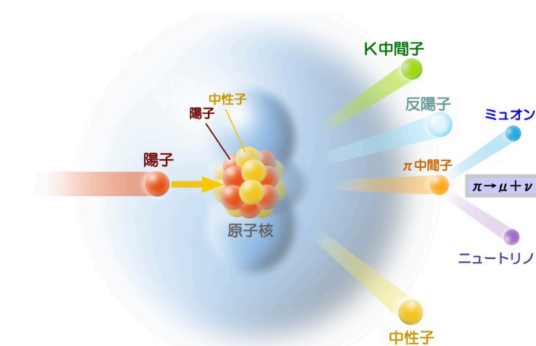


Fig. 2 J-PARC の陽子を作る 2 次粒子

1.2. 加速器の構成

陽子加速器の特徴は電子の場合と比較すると明瞭になる。図 3 に電子及び陽子の運動エネルギーと速度 β ($=v/c$, v : 粒子速度、 c : 光速) の関係を示す。電子は 10 MeV 程度で $\beta \sim 1$ になるが、陽子は数 10GeV でやっと $\beta \sim 1$ になる。陽子の重さが電子の 1800 倍以上あるためであるが、一気に加速するのは無理なので、速度に応じて加速器の構造を変えないと、十分な加速効率を保てなくなる。J-PARC ではリニアックが 4 種類

の加速構造を適当な速度で切り替えて利用している。陽子の速度域に対応する加速構造を示したのが図4である。（図3の陽子の曲線に加速構造を重ねて示している。）

400MeV まで Linac で加速すると $\beta=0.71$ にな

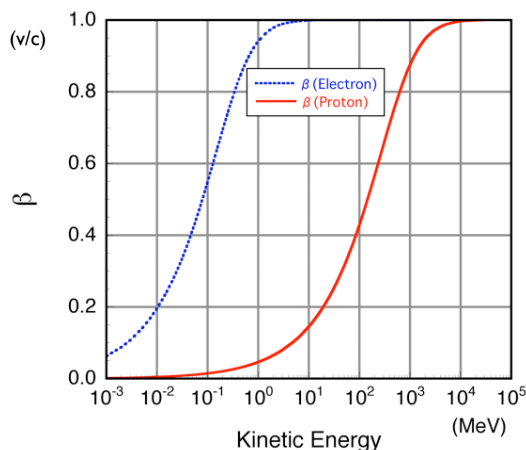


Fig. 3 電子と陽子の速度比較

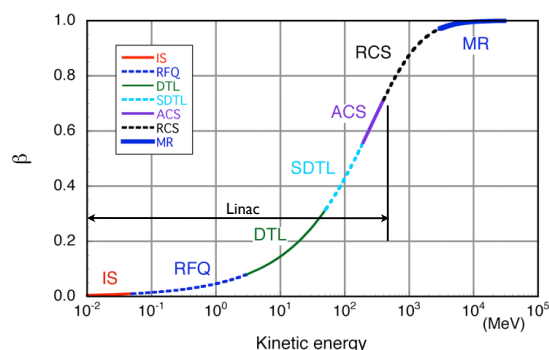


Fig. 4 J-PARC での各加速器構造の担当部分

り、それを RCS が 3GeV ($\beta=0.97$) まで加速する。従って RCS では入射時と出射時で周回に要する時間が約 30%短くなる。従って RCS の RF 空洞は加速期間中に陽子の周回に同期させて周波数を 30%早くしなければならない。（しかし電子シンクロトロンの場合、 $\beta=1$ の状況で入射されるため、その後電子のエネルギーは増加しても周回周期は変化しない。つまり RF 加速空洞の周波数は固定で良い。大きな違いである。）J-PARC の MR でも、30GeV で $\beta \sim 1$ ($=0.9995$) なので、加速で約 3%速度が増加する。

1.3. 設計目標と現状

J-PARC 加速器の陽子ビーム出力の最大定格（設計）と現在の運転値は以下の通り：

- MLF：設計 1MW／現在 500kW；
- MR ニュートリノ：設計 750kW／現在 490kW；
- MR ハドロン：設計 100kW／現在 51kW。

今までのビーム供給パワーの履歴を図5と図6に、それぞれ MLF と MR の場合を示す。ビームパワーは着実に増加している事が図から分かる。

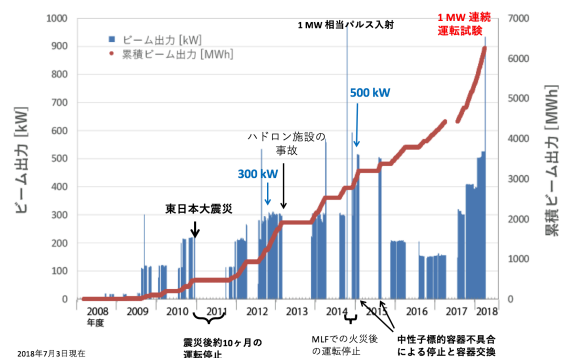


Fig. 5 MLF のビームパワー履歴

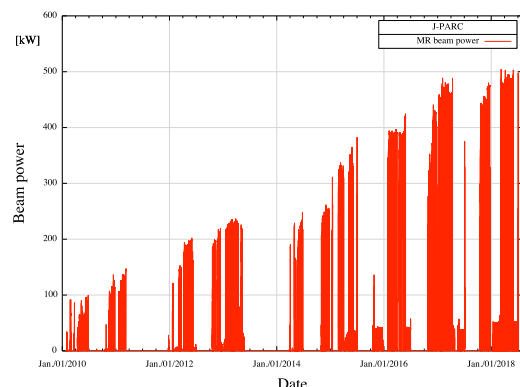
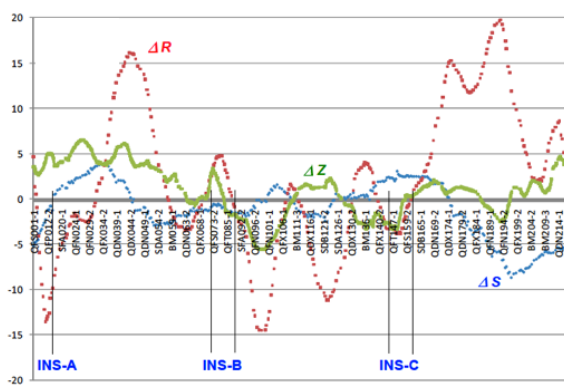


Fig. 6 MR のビームパワー履歴

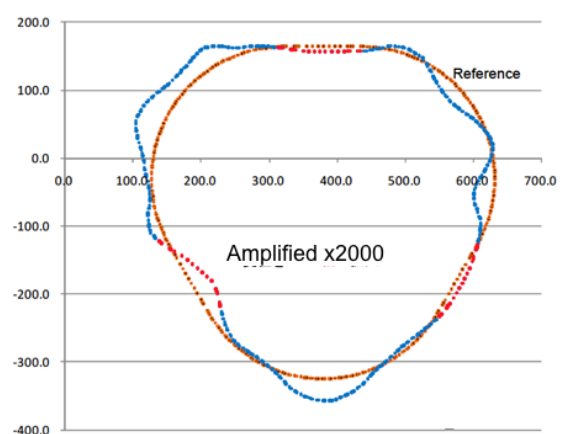
途中、2011 年と 2013 年にビーム供給が無かった期間があるが、前者は東日本大震災、後者はハドロン実験施設での放射線漏洩事故によるビーム運転停止期間である。この2件については次節以降に述べる。MLF では 2015 年にも空白があり、再開後はパワーレベルを下げて運転しているが、これは標的損傷のためである。加速器自体の問題ではないが、影響は大きいので経緯を後述する。

1.4. 震災復旧

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災で、J-PARC も被害を被った。加速器の配置は大きくずれ、機器の真空も破れた。加速器の設置してある地下トンネルには、建物の亀裂から地下水が流れ込んだ。更に J-PARC の設置場所が砂地であるため、地震で建物の周囲で砂が地下へ逃げて陥没が起こった。被害と復旧過程の詳細は省く（[2]を参照）が一例として地震で歪んだ MR の様子を図 7 に示す。地震後の測量結果である。上が垂直方向および進行方向、下が水平面内でのズレである。位置ズレは全て修正された。建物と周回道路等の修理も同時進行で行われた結果、2011 年 12 月からビーム試験を開始できた。そして翌月の 2012 年 1 月にはユーザー向けにビーム供給を再開できた。



垂直方向と進行方向の歪み



水平面内の歪み

Fig. 7 大震災後の MR の磁石のずれ

1.5. 放射線漏洩事故

ハドロン実験施設で放射線漏洩事故が発生したのは、2013 年 5 月 23 日であった。

MR の項で説明するが、ハドロン実験には 30-GeV ビームを約 2 秒間かけて徐々に取り出している。この取り出し中に、取り出し制御系の 1 台の磁石の電源不具合で周回ビームの軌道が急激に変化して瞬間的にほとんどのビームが取り出された。その結果、二次粒子生成用の金標的が溶けてしまった。そして、その際に生成された放射性核種が、標的容器が閉鎖系になっていなかったため実験室に漏出し、更に外部へ出てしまった。[3]

この事故後、ハード面はもちろん、体制の再構築を含むソフト面でも様々な対策が講じられた。その結果、MLF は 2014 年 2 月、ニュートリノ実験は同年 5 月に、ハドロン実験は翌 2015 年 4 月からビーム利用を再開することができた。

事故以降、J-PARC でも原科研内の他施設と同様に各種の事故や火災を想定した非常事態に対応する訓練が毎年行われている。作業の安全面でも、各組織内での確認手順を確立させて、事故を防ぐ対策を取っている。

1.6. 中性子生成標的の損傷

RCS から MLF に供給するビームパワーは 2018 年 6 月時点で 500kW であった。実は加速器側は 1 MW 供給の準備は出来ていて、MLF の中性子生成標的（水銀）の準備待ち状態にある。2014 年に最初の 1 MW 相当のビームを 1-shot ではあるが MLF 標的に打ち込んでおり、その後も何度か同じような試験をしてパラメーターの最適化を既の実施済みであった。しかし、2015 年に初めて 500kW の連続ビーム供給を開始したところ、1MW 対応で設計されていたはずの標的が損傷し、冷却水が外部に漏れてしまった。予備標的に交換して再度 500kW で連続運転を実施したが、今度は標的の外周で冷却水路の内側にある冷却用ヘリウム流路からヘリウム漏れが生じてしまった。ただし、水銀そのものは 2 回とも全く漏れず、漏れた冷媒も密閉容器に閉じ込められてお

り、外部への漏洩はなかった。標的の外観と断

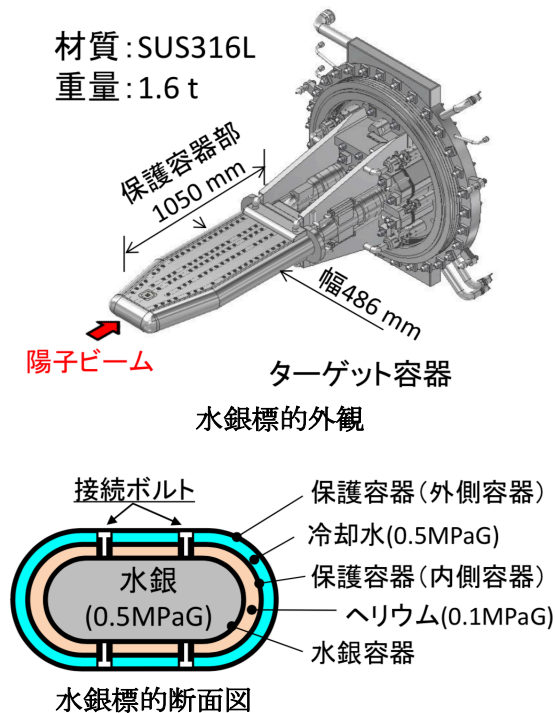


Fig. 8 MLF 中性子生成用水銀標的

面を図 8 に示す。

検討の結果、溶接方法の問題ということが判明し、標的の再設計と再製作が決まった。新標的が完成するまでは、手持ちの定格パワーの低い開発初期の標的を利用しての運転を継続することになった。その後、何度か再製作を経て、最終形となるべき標的を 2017 年夏に設置して、標的の様子を観察しながら徐々に入射ビームパワーを増加させている。そして 2018 年 7 月に 1 MW ビームを連続して 1 時間、標的打ち込む試験を実施した。予備的な解析結果で問題は全く見つからなかった。

次節からは主に各加速器の特徴と 2010 年以降の変遷を概説する。

2. リニアック

2.1. 概要

リニアックの構成を図 9 に示す。イオン源 (IS) 以外は全て高周波加速空洞であり、RFQ から SDTL までは空洞の共振周波数が 324MHz、ACS はその 3 倍の 972MHz である。RF を加速に用いているので、ビームは連続ではなくて 324MHz の周期 3.09ns ごとの塊 (バンチ) 構造を持っている。また、リニアックで加速するのは陽子そのものではなくて、軌道電子を 2 個持った負水素イオン (H^-) である。 H^- を使用する理由は RCS の項で説明する。

図 9 は文献[1]の流用であるが、変更点がある。J-PARC の将来計画に含まれている加速器駆動核廃棄物処理システム (Accelerator Driven Nuclear Waste Transmutation System, ADS) の基礎研究施設である核変換実験施設が、必要とする陽子のエネルギーを 400MeV に下げたため超伝導リニアックで 600MeV まで加速する必要がなくなったことである。この変更により超伝導リニアックの開発が中止された。それから 2010 年時点ではリニアックは SDTL までであり、エネルギーは 181MeV であった。その後 ACS-リニアックの開発が進み、2013 年の夏に地下設置され、2014 年 1 月から 400MeV の運転を開始している。

それ以外ではイオン源がフィラメント型から RF 型に更新された。また RFQ は不調続きであった 1 号機から機械設計を大きく見直した 3 号機に交換している。新規設置した ACS と合わせて、以下の節で要点をまとめる。

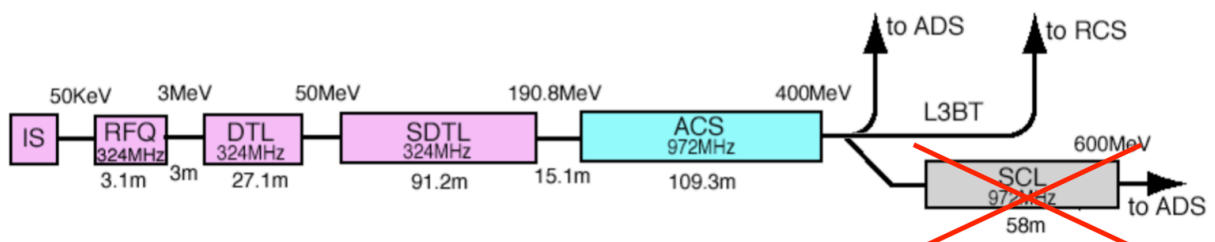


Fig. 9 リニアック構成図

2.2. イオン源

初期のイオン源は水素ガスをプラズマにするのに LaB₆ 製の熱陰極からの熱電子を利用して、(図 10) 熱陰極の利点はプラズマ点火が確実なことであるが、欠点として熱陰極の寿命が

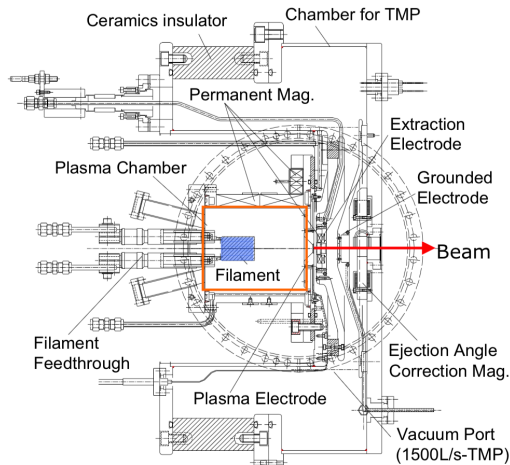


Fig. 10 LaB₆ フィラメント負水素イオン源

比較的短かった (2~3 週間)。また、セシウムを利用していなかったため、プラズマ中の陽子を負水素イオン (H⁻) に変換する効率が低く、最大出力電流が 30mA 程度であり、要求されている 50mA を出せる目処が立っていなかった。[4]

そこで米国 SNS で利用されている高周波駆動のイオン源 (RF イオン源) を開発することになった。開発期間を短縮するため、重要でかつ製作が難しい RF アンテナは SNS と同じ物を米国から輸入して利用することにした。(最近では国産のアンテナに切り替わりつつある。) そして

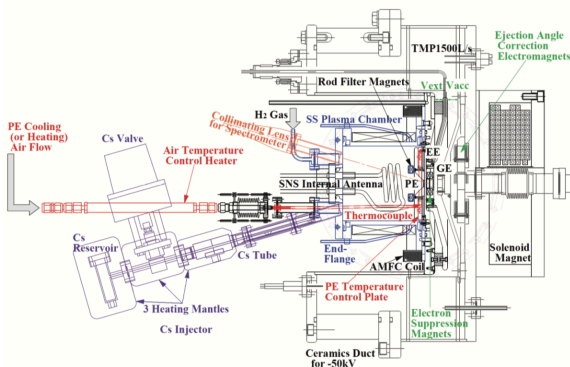


Fig. 11 RF 負水素イオン源

2014 年の夏に RFQ の交換と同時にイオン源も RF イオン源に交換した。(図 11) このイオン源は微量のセシウムを利用して H⁻ の生成効率を上げている。またプラズマの点火を確実にするために基本の 2 MHz の RF パルスだけでなく、30MHz の弱い RF を CW で印加しプラズマの種を持続させている。

最近では安定に 50mA 出力で運転をしており、寿命も 3 ヶ月以上になっている。

(蛇足：私が加速器を始めた頃、負水素イオン源は、負水素生成の機構が色々検討されていて、怪しげな理論が横行し、出てくるビームの量も少なかった。性能は製作担当者の勘と経験で決まり、「魔術的」な要素が強かった。「黒魔術」だと言う人さえいた。最近やっと真つ当な議論に耐える定量的なイオン源研究が始まったように思える。[5])

2.3. RFQ

RFQ は高周波 4 極 (Radio Frequency Quadrupole) の短縮形で、その名の通り、上下左右の 4 枚の電極で電氣的な 4 重極を形成し、ビームを収束する。更に電極先端にうねりをつけ、上下と左右でそのうねりの山・谷の位相をずらすことでビーム進行方向にも電場成分を持たせビーム加速もできるようにした加速空洞である。更に RFQ はイオン源から出てくる連続ビームを 90% 以上の効率でビームの塊 (パンチ) にして、下流の空洞での RF 加速を可能にしている。

ビーム運転開始時に設置されていた RFQ1 号機 (RFQ-1) は、リニアック全体のビーム調整を開始した 2008 年の時点で放電が頻発し、ビーム調整が滞ってしまった。その後、真空排気系の強化等の対策を行い、最終的に定格電力より低めの電力で何とか運転を継続していた。その間に機械構造を全て見直した 2 号機の開発を行った。特に真空の改善を重視して、RFQ-1 で採用されていた大きな真空容器の中に RFQ 本体を収めるという構造 (図 12) から、ベーンをロー付けして大電力 RF に晒される部分のみ真空にする構造 (図 13) に変更した。なお、開発期間の関係

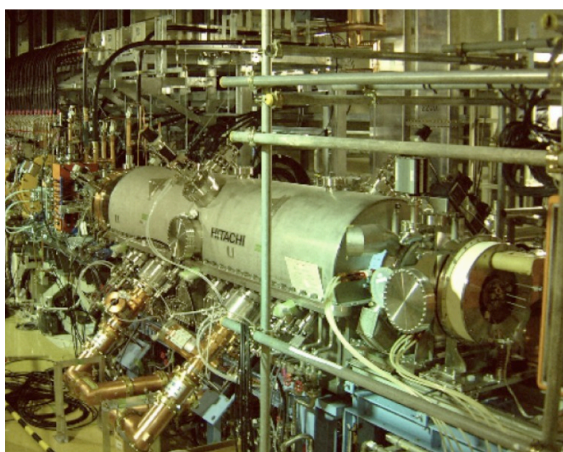


Fig. 12 RFQ-1 全景：見えるのは真空容器

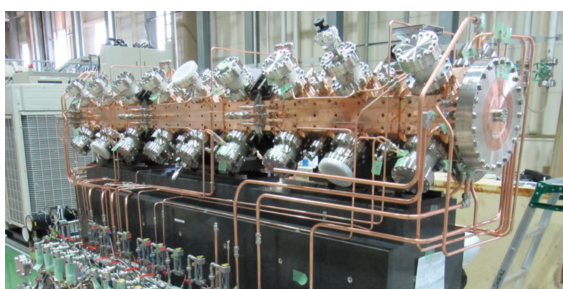


Fig. 13 RFQ-2：地上での組み立て直後の姿

で、RFQ-2のRF設計はピークビーム電流30mAで設計されていたRFQ-1を踏襲した。前節で述べたように50mA出力可能なRFイオン源の開発も並行して進んでおり、RFQ-2の開発終了直後からRF設計も見直した50mA対応のRFQ-3の開発が始まった。そして2014年夏にRFイオン源と共にRFQも交換を行った。(RFQ-2は現在予備機として待機しているが、将来的にはMLFでミューオン加速に利用する予定である。)

2.4. DTL/SDTL

DTLとSDTLはRFQ-1とは異なり、初期から比較的安定に運転を継続していた。問題が起こったのは震災後であった。震災時、空洞間のダクトやモニター部が損傷し、そこから汚れて湿った大気が入り込んだ。排気できたのは1ヶ月後であり、その間に空洞内面に汚れが付着したものと想像される。結果として、2012年頃から運転電力レベルより少し低いレベルにある空洞内のマルチパクター領域が、いくつかのSDTLで広

がって来て、運転時の電力レベルを最適値から上げざるを得ない状況になってしまった。

そこで2015年からSDTL空洞内部のアセトンによる拭き取り洗浄を夏期保守期間に数台ずつ行った。この洗浄は劇的な効果があり、問題であった運転電力レベルに近いマルチパクターはほぼ消滅した。

2.5. ACS

リニアックのエネルギーを181MeVから設計値400MeVまで増加させるのに必要な結合セル型リニアック(Coupled Cell Linac, CCL)として環状リング結合型(Annular-ring Coupled Structure, ACS)リニアックをJ-PARCでは採用した。

CCLの候補はACS以外では米国SNSで採用しているSide Coupled Structure(SCS)型リニアックと、ロシアのInstitute for Nuclear Research(INR)で開発されたDisk and Washer(DAW)型リニアックがあった。そして比較検討の結果、加速電場の対称性の良さとモード分離の良さを考慮してJ-PARCではACSを選択した。

共振周波数は上流(RFQ、DTL、SDTL)の周波数324MHzの3倍である972MHzである。その結果、クライストロン寸法が小さくなり、取り扱いが非常に楽になっている。

ACSリニアックは21モジュールを設置したが、図4から分かるようにACSの領域でも速度変化は大きい。従って各モジュール長は陽子速度の増加に合わせて全て異なっている。ただし、1モジュールの加速セル数は34セルあり、理想的にはDTLと同じように全セルの長さを少しずつ増加させる必要があるが、手間(予算)を抑制するため空洞中央部でのビーム速度を代表として1モジュール内のセル寸法は同じにしてある。

(蛇足：見た目はACS型がSCSやDAWより相当大きく(太く)見える。環状型結合空洞が最外部を覆うためである。大きいと加工が大変で価格に跳ね返る。どこまで(手を抜いて)加工工程を簡素化できるかが製造時の要点であった。)

DAW 型は内部構造の冷却が難しいので、デューティの大きい場合には向かないし、加速モードの近傍に他のモードが多数あり、調整が難しいのだが、加速セル間の結合度が ACS や SCS の数倍も大きく、その結果摂動に非常に強いので、根強いファンがいる。世界で唯一の DAW 型営業マシンがモスクワで稼働しているので、私も見てきた。でも開発者の一人から、「DAW は大変だから、勧めない。ACS の方が良い。」と言われたのを覚えている。）

3. RCS

3.1. 概要

RCS の全体を図 14 に示す。お結び（3 箇所の円弧を 3 箇所の直線部が結ぶ）型をしている。直線部は、入射部、出射部及び加速部である。

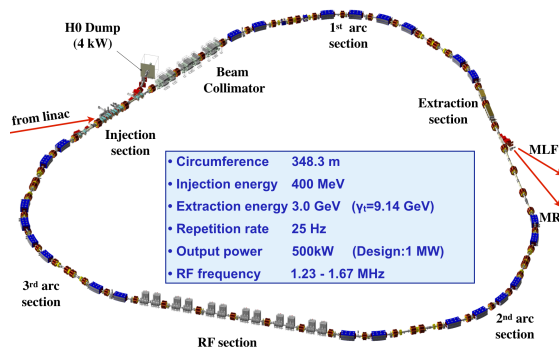


Fig. 14 RCS 模式図

まず入射部では 400MeV の H イオンを入射し、周回している先行のビームバンチに合流させる。その直後に炭素薄膜を通過させて、軌道上の電子 2 個を剥ぎ取り、正電荷の陽子のみにして、周回ビームと一体化させる。

加速部は 12 台の RF 加速空洞が設置しており、ビームを周回毎に加速する。リニアックから 25Hz（40ms 間隔）でビームが来るので、400MeV から 3GeV までの加速と取り出しを同じ 25Hz で行わなければならない。「Rapid Cycle」の名前の由来はその繰り返しの速さにある。実際は磁場を正弦波的な振動パターンで運転しているので、磁場上昇時間は繰り返し周期半分の 20ms であり、その間に加速する。（図 15）

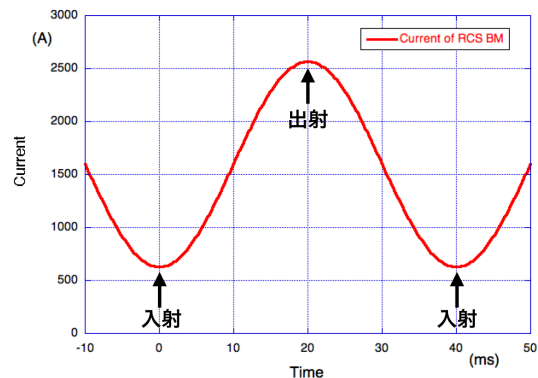


Fig. 15 RCS の偏向電磁石の電流パターン

RCS の周長は 348.3m であり、入射 400MeV ビームの β は 0.713。故にビームは 1 周を 1.63 μ s で回る。よって周回の周波数は 614kHz。RCS は 2 個のバンチを周上に入れるので RF 加速に必要な周波数は 2 倍の 1.23MHz である。加速終盤は 3GeV で $\beta=0.971$ なので周回時間は 1.2 μ s であり、必要な RF 周波数は 1.67MHz である。

加速終了後にバンチはキッカー磁石で外へ蹴り出され、MLF の標的に向かうビームラインに入る。MR に行くバンチはそのビームラインの途中でパルス偏向磁石で MR 側のビームラインに蹴り出される。

3.2. 入射部

入射部は先に述べた様にリニアックからの H ビームを周回ビームと合流し、H から電子を剥ぎ取り、周回ビームのバンチに一体化する機能を持つ部分である。周回ビームを入射ビームと合流する際は加速時の軌道ではなく、部分的に軌道を外側にずらしたバンプ軌道を取る。この際、入射 H は（陽子質量に比べて 2 個の電子の質量分重い、無視できるので）周回する陽子と逆向きに曲がる軌道を通り、両者は合流する。（図 16）図中の SB は Shift Bump 磁石のことで、SB 磁石は入射時だけパルスの励磁される。そのため磁石は機械的に振動し、コイル固定治具の破損問題も生じている。

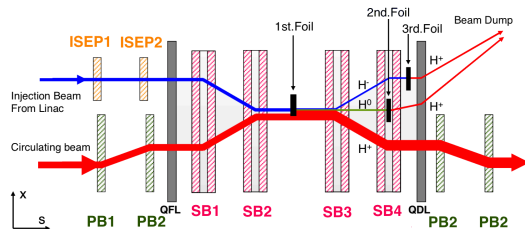


Fig. 16 RCS 入射部の機器配置図

合流した周回ビーム（陽子）と入射ビーム（H）は一緒に軌道上に置かれた炭素薄膜（およそ厚さ $300\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ）を通過する。陽子はエネルギーをわずかに失い、向きもわずかわ変わるが無視できる量である。一方、Hの軌道電子2個は薄膜との接触で陽子から剥ぎ取られ、その後は周回ビームと同じ軌道を取る。ただし、電子が1個だけ取れたり、全く取れなかったりするイオンもある。そのままでは、軌道をそれて周囲を放射化するため、第2、第3の薄膜を各々が進む軌道上に用意し全て陽子に変えて、まとめてビームの回収場所（ビーム・ダンプ）へ導いている。

周回ビームとの合流はリニアックからのマクロバンチ（ $500\mu\text{s}$ ）が終わるまで何回も行われる。この時に、入射ビームの位相空間上での位置を少しずつ変えて、特定の範囲を塗り潰すように打ち込むことができる。この手法により、任意の位相空間分布を持つバンチを形成できるのが Hビーム入射の特徴である。

もし入射ビームがHではなくて陽子（正電荷）の場合は、磁石で入射ビームと周回ビームが同じ方向に曲がってしまうため、両者を理想的に合流させることは無理である。従って大強度のビームを少ない損失で打ち込むにはH入射が必須となる。

3.3. 高周波加速空洞

RCS でビーム加速をする高周波（Radio Frequency: RF）加速空洞は12台あり、各々3つの加速ギャップを持っている。そして全ての空洞が同じ大きさである。リニアックの場合は空洞の共振周波数が固定なので、空洞の寸法を粒

子速度の増加に合わせてこまめに長くする必要があるが、リングの高周波加速空洞は共振周波数を粒子速度に合わせるので、寸法は同一で構わない。ただし周波数を前述のように1.23MHzから1.67MHzまで変化させる。

リニアックのような中身が空の本当の意味での空洞で例えば共振周波数1.23MHz（波長247m）の1/4波長共振器を作ろうとすると長さ60m位のアンテナが必要になり、非現実的になる。そこで、空洞内部に透磁率の高い物質を充填する。磁場にとって内部の空間を広く感じさせるわけである。J-PARCのRCS及びMRのRF空洞は内部に金属磁性材料「ファインメット」[6]を内蔵している。J-PARCのRF空洞のもう一つの特色は空洞のQ値を低く（RCSで $Q\sim 2$ 、MRで $Q\sim 26$ ）してあることである。[7]これで広い周波数帯域で（無調整で）共振が可能になる。

3.4. ビームの間引き

本来はリニアックのところで説明すべき項目だが、RCSの説明をした後の方が理解し易いだろうと考え、ここに持ってきた話である。

RCSにリニアックから25Hzで入射されるビームパルスの長さは $500\mu\text{s}$ である。前述したように、 $\beta=0.713$ のビームはRCS1周を $1.63\mu\text{s}$ で回る。従って、 $500\mu\text{s}$ は300周分以上の長さであり、RCSの周上全体に入射ビームが分布してしまう。しかし、RF空洞の加速電場が正弦波的に時間変化するため、実際に加速できるのは半分程度である。残りは加速されず、リング全体にばらまかれることになる。これを避けるため、実はリニアックの最上部、RFQとDTLの間にあるチョッパー空洞がビームを間引き、RCSのRF加速空洞が受け入れられる部分のみ残す。図17に間引いたビームパルス（中間バンチ）の様子を示す。チョッパーは不要ビームを横方向に蹴り出して、スクレーパーと呼ばれる炭素製のブロックに打ち込んで間引き処理をしている。

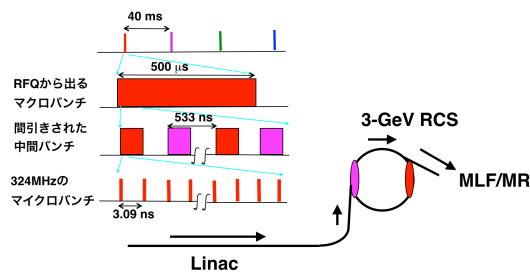


Fig. 17 チョッパーによる中間バンチ形成

リニアックは 25Hz なので、40ms ごとにビームパルス（マクロバンチ）がある。マクロバンチ長は短い場合もあるが、典型的には 500 μ s。それを図のようにチョッパーで間引く。ピンクと赤は RCS 中の 2 つのバンチに対応している。リニアック上流部の共振周波数が 324MHz なのでもっとも細かいバンチ構造は 3.09ns 毎のマイクロバンチ。

（蛇足：このチョッパーは優れもので、ビーム強度の調整に非常に重宝している。中間バンチの長さを変えたり、中間バンチそのものをいくつか間引いたり（例えば、RCS を 1 バンチにするため図の中間バンチでピンクの部分全てを省いたり）することも可能である。またはピンクと赤を特定の比率で省くこともできる。リニアックの加速電流のピークやマクロパルスの長さを固定したままビーム強度の調整ができるのが重要なのである。使い勝手が良いので、少し役割を増やし過ぎではないかと心配している。）

4. MR

4.1. 概要

MR の形状は RCS と似たお結び型である。（図 18）最初の直線部が入射区間、次がハドロン実験施設への取り出し区間、3 目が加速、ニュートリノ及びビームダンプへの取り出し区間である。

RCS で 3GeV まで加速された陽子の大半は MLF へ供給されるが、数秒に 1 回、8 バンチずつが MR へ入射する。（現時点でニュートリノ実験用は 2.48 秒間隔、ハドロン実験用には 5.2 秒間隔で RCS からビームを打ち込んでいる。）

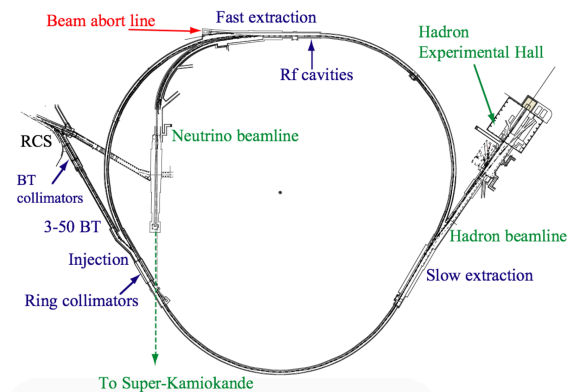


Fig. 18 MR 全景模式図

RCS は 25Hz 運転なので 40ms 毎に 2 バンチずつ計 4 回 MR に 3 GeV のビームが入射されるので

（図 19 参照）、その間は MR の磁場は 3GeV の周回なので一定である。入射終了後、1.4 秒かけて 30GeV まで加速する。リングの周長が 1567.5m なので、陽子ビームバンチの周回時間は 3GeV で 5.4 μ s (186kHz) であり、30GeV で 5.2 μ s (151kHz) である。従って加速中にリングを約 26 万周するわけである。MR では周上に 9 つのバンチが入れるように、RF の周波数を決める。（この内の 8 個を使う）従って RF の周波数は先の周波数の 9 倍の 1.67MHz から 1.72MHz まで変化させる。

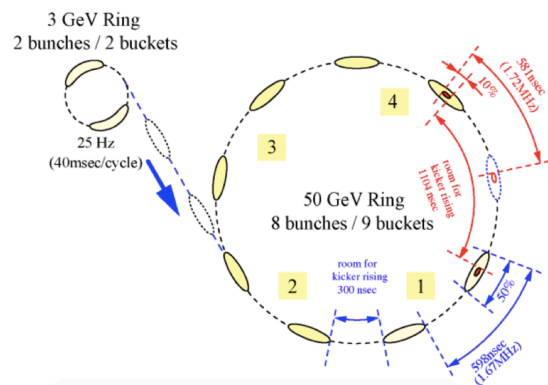


Fig. 19 RCS と MR のビームバンチ

前述したように MR がビームを供給する施設は 2 箇所ある。どちらも 30GeV ビームを利用するが、ビームの取り出し方が全く異なる。

（1）ニュートリノ実験用 FX モード

ニュートリノ実験時の電磁石の電流パターンを図 20 に示す。繰り返しは 2.48 秒であり、早

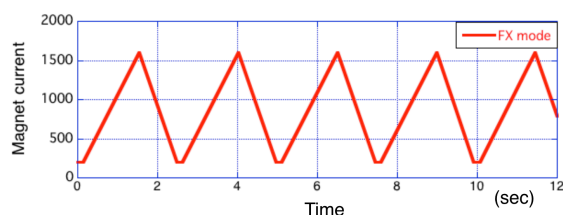


Fig. 20 FX モードの偏向電磁石電流パターン

い取り出し (Fast extraction: 以下 FX) モードと呼ばれる。30GeV まで加速した直後に全 8 バunch を 1 周でニュートリノビームラインに取り出す。炭素標的に衝突し生成されたパイ中間子が崩壊してできたニュートリノは地中を通り抜け、岐阜県神岡の地下にあるスーパーカミオカンデもすり抜けて日本海から韓国周辺を通過し宇宙へと広がりながら出て行ってしまう。ただし、時々スーパーカミオカンデの中で反応を起こす。その反応の時間分布を J-PARC からの信号

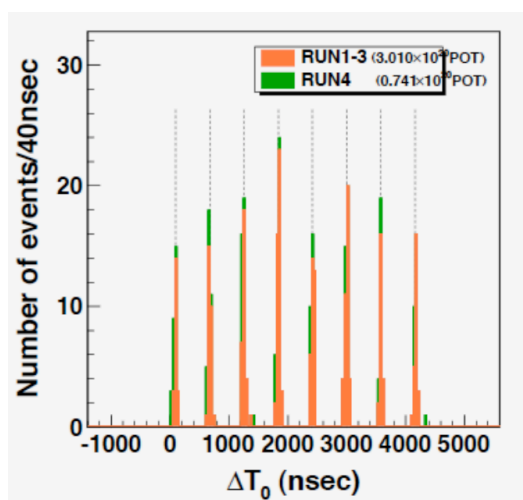


Fig. 21 スーパーカミオカンデで捉えた J-PARC 起因のニュートリノ反応の時間構造

を基準に見ると図 21 に示す様に 8 本のパルス (8 個のバunch に相当) が分かる。

(2) ハドロン実験用 SX モード

MR のもう一つの運転モードはハドロン実験用であり、繰り返し周期は 5.20 秒である。ビームの取り出し方がニュートリノの場合と全く異なる。ニュートリノ実験用には 1 周で全ビームを取り出したが、ハドロン実験用には 30GeV のビ

ームを約 2 秒間かけて少しずつ取り出す必要がある。そのため、遅い取り出し (Slow extraction: 以下 SX) モードと呼ばれる。SX モードでの偏向電磁石の通電パターンを図 22 に示す。

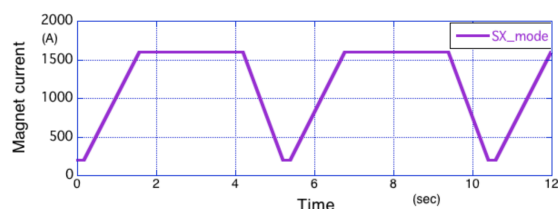


Fig. 22 S X モードの偏向電磁石電流パターン

FX と SX のモードの同時運転はできないので、数ヶ月毎にモードを切り替えて運転をしている。

4.2. ビームパワー増強のシナリオ

前述したように FX モードのビームパワーは現在 490kW であり、SX モードは 51kW を達成している。目標は FX が 750kW、SX は 100kW であり、今後数年で我々はこの目標値を達成する予定である。

MR の正式名称は「50GeV シンクロトロン」であり、最初の計画では第 2 期で電磁石電源を増強し、ビームを 50GeV まで加速する予定であった。しかし、ニュートリノ実験グループからは、エネルギー増加よりも、単位時間当たりの陽子数の増加を要求されている。一方ハドロン実験からも 50GeV ビームよりは、もっと安定な SX ビームを要望されていた。そこで我々はビーム加速の繰り返し周期を短く (2.48s → 1.32s) して、ビームパワーの増強を行う方針に変更した。しかし現行の電磁石電源ではより早い繰り返しは無理なので、新電源が必要であった。更にハドロン実験の要望に関しては、SX ビームの変動の原因が電磁石電源の安定性不足にあり、現行電源の改造ではやはり達成が難しいことも分かって来た。結果として、繰り返しが早く、より安定な電磁石電源を開発することになった。ただし、ビーム加速の繰り返しを早くするにはリングの周回用の電磁石だけでなく、

入出射に関するパルス電磁石も早い繰り返しに対応させなければならない。RF 加速空洞も同様である。

4.3. 入射部

RCS から来たバンチを MR の中に 2 個ずつ 4 回蹴り込むのが入射部である。まず 2 台のセプタム磁石で周回軌道に近づけ、その後キッカー磁石で蹴って周回軌道に載せる。

入射セプタム磁石はパルス駆動であるが、早い繰り返しに 1 号機が対応できないので、再開発した。そして 2016 年夏に、入射セプタム磁石 1 は地下トンネルで古いセプタム磁石と交換し、その電源は地上の電源棟に設置した。いずれも事前に試験区画で十分な定格運転を行い、性能確認が済んだ機器であり、早い繰り返しに対応している。

さてビームバンチを周回軌道に蹴り込むのに使用するパルス電磁石の立ち上がり立ち下がりにはバンチ間隔以下でなければ、入射の 2 回目以降は先行して周回しているバンチの軌道に悪影響を与えてしまう。MR の入射キッカーはパルスの立ち下がり後に回路内での反射による小さなコブが残り、それが周回ビームの軌道をずらしていた。そこで小型の補正キッカーを導入し、ずれた軌道を戻すようにした。

周回軌道に乗ったビームは入射コリメーター区画を通る。入射コリメーターの役割は入射ビームの広がった裾を削り、リング内でのビーム損失をコリメーター区画に限定することである。

初期は軌道に平行な面を持った垂直と水平方向のタンタル製ブロックを使ったコリメーターであったが、その後のビーム調整の経験やシミュレーションの進展から、コリメーターのビーム軌道に沿った面はビームの包絡線に接するように傾けた方が良くことが分かってきた。そこで上下左右だけでなく回転もできる機構を備えたタングステン製ブロックを持つコリメーターを新規製作し、入れ替え作業を進めている。2018 年時点で、4 台の新しいコリメーターが設置されており、最大 2 kW のビームを受けられる

状況にある。（実際のビーム損失量は MR 全体で 1 kW 未満に抑制している。これは保守作業者の被ばく量を可能な限り下げたための現時点での基準である。）最終的には 7 台設置して最大許容量を 3.5 kW にする予定である。

4.4. 高周波加速空洞

RCS の RF 空洞と比較して、MR での速度変化が少ないため、変化させるべき周波数の範囲も狭い（1.67 MHz～1.72 MHz）。従って、RCS よりも空洞の Q 値を高めに設定してある。

MR では 9 台の空洞を使っているが、現時点ではその内の 7 台を加速に、残り 2 台を 2 倍の周波数で共振させ、ビームバンチの縦方向分布のピークを下げて、なるべく分布を一様にするために利用している。その結果陽子の密度が下がり、空間電荷効果によるビーム不安定性が抑制できるからである。

4.5. 遅い取り出し(SX)

FX モードは加速後に一気に全ビームをバンチのまま取り出すが、SX モードでは加速後に RF を切り、バンチ形状を崩し、リングの周上全体に広がって分布するようにする。次いで約 2 秒かけて可能な限り一様にビームを実験施設に引き出す。J-PARC ではバンプ軌道でバンチを静電セプタムにまず近づけ、水平方向の振動を 3 次共鳴に近づけて振動振幅を大きくしビームを水平に広げ、広がった端部がビーム用の鉋である静電セプタムで周回軌道から削り取られるようにする。[8] この間に主に偏向電磁石の電流が十分に安定（ $\sim 10^{-5}$ 以下か?）でないと、取り出されるビームの量が変化して、実験の測定に支障を来す。前述した開発中の新電磁石電源はこの SX の要件も十分満たす性能を持っている。

5. 今後の展望

リニアックは RCS で 1 MW 加速に必要なピーク電流 50 mA の運転が可能になっている。しかし将来的には、繰り返しを 25 から 50 Hz に上げて ADS にビームを供給すること、後述するように RCS

で 1.5MW のビーム加速ができるようにすることが必要である。今後は 50Hz 運転とピーク電流 > 60mA の加速が安定にできるよう開発を継続しなければならない。

RCS は MLF への 1 MW ビームの 1 時間供給の試験を行い、安定供給が可能なのは実証済みであることは先に述べた。今後 MLF に更に強いビーム (1.5MW を想定している) を供給できるように各種の改善を実施する。

MR ではビーム加速の繰り返しを上げて、まず設計値を達成することが最優先である。その後、更なら繰り返し周期の短縮、RF 空洞増強、入出射機器改良、シールドやモニター等の増強を行い、FX モードでの出力で 1.3MW を目指す。これはニュートリノ実験が要求する統計量を十分満たす陽子数を供給するためである。

6. まとめ

J-PARC の加速器全体をかなり「手抜き」して説明した。セミナーの教科書というよりも学会などでの現状報告みたいになってしまった。でも加速器の基本的なところは大穂 2010 の時から大きく変わっていないので、文献[1]を参照して欲しい。

2010 年以降、J-PARC センターは多くの経験 (良いことも悪いことも) を積んで、それなりのパワーで陽子ビームをユーザーに提供できるようになった。しかし設計ビームパワーを常時ユーザーに供給できる状況をできる限り早く達成できるように、開発を継続中である。

7. 謝辞

大穂の加速器セミナーを担当せずに停年を迎えられると考えていたのだが、甘かった。でも、この機会を割り振ってくれた小関忠さんと小林幸則さんに感謝いたします。

文中で使用した図の多くは J-PARC の各種報告で使われていたものが多く、参考文献として具体的に引用元を提示できていません。この場を借りてお詫びとお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] 小関忠、「1. J-PARC 加速器の概要: イントロダクション」OH0' 10 テキスト (2010)
- [2] 内藤富士雄、「J-PARC 加速器の現状と今後」高エネルギーニュース Vol.31 No.3 p193 (2012)
- [3] J-PARC センター、J-PARC ハドロン実験施設における放射性物質漏えい事故関連情報 (<http://www.j-parc.jp/HDAccident/HDAccident-j.html#HDA141029>)
- [4] 小栗英知、他、「J-PARC 負水素イオン源の状況」、日本加速学会年会 Proceedings, (2011) p1201, つくば (http://www.pas.j.jp/web_publish/pas.j8/proceedings/poster/TUPS115.pdf)
- [5] T. Shibata, et al, “High density plasma calculation of J-PARC RF negative ion source”, 5th Inter. Sympo. on NIBS, Oxford UK (2016) (<http://nibs2016.org/sites/nibs2016.org/files/Tue011.pdf>)
- [6] 日立金属のカタログ (<https://www.hitachi-metals.co.jp/products/elec/tel/pdf/hl-fm3-k.pdf>)
- [7] 田村文彦、「3. 大強度陽子リングのビーム力学 2: J-PARC シンクロトロン RF 調整」OH0' 10 テキスト (2010)
- [8] 武藤亮太郎、「9. ビームの入射・取り出し 2: J-PARC メインリングにおける遅い取り出し」OH0' 10 テキスト (2010)