

J-PARC 加速器の概要

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は、日本原子力研究開発機構 (JAEA) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の共同事業として、2001 年に建設が開始された大型加速器計画である。当時、JAEA は 1.5 GeV 大強度リニアックを中心とした中性子科学研究計画を、KEK は 3 GeV、および 50 GeV シンクロトロンを中心とした大型ハドロン計画をそれぞれ推進していたが、2001 年 1 月の省庁再編における文部省と科学技術庁の合併とほぼ時期を同じくして、中性子科学研究計画と大型ハドロン計画との「統合計画」として、J-PARC の建設がスタートすることとなった。

J-PARC では、高エネルギーに加速した陽子を標的に衝突させ、核破砕反応で発生する様々な粒子を利用して、素粒子・原子核物理学と物質・生命科学を中心に、基礎から応用にわたる広範な分野の研究が行われる (図 1)。ビームが標的に照射したときに発生する粒子を二次粒子と呼ぶが、J-PARC では、二次粒子のうち中性子、ミュオン、K 中間子、ニュートリノにおいて世界最大級のビーム強度の実現を目指している。そのためには世界最大級のビーム強度を持つ陽子加速器が必要となる。

J-PARC は、これまでの日本の加速器計画の予算としては最大規模であり、建設計画は二期

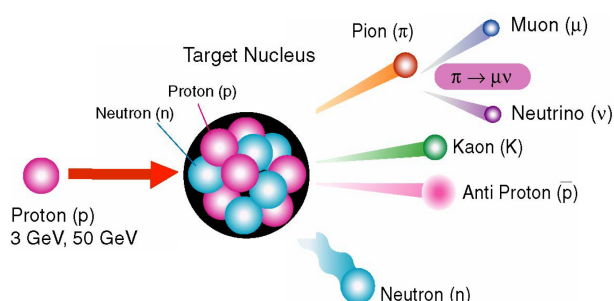


Fig. 1 高エネルギー陽子による核破砕反応で発生する 2 次粒子

に分けて進められている。現在は計画第一期の建設を終了して、実験施設が本格的に稼働を開始したところである。

図 2 に J-PARC 加速器施設のレイアウトを示す。現在、J-PARC 施設は、3 台の加速器と 3 箇所の実験施設からなっている。加速器の構成はビームエネルギー 400 MeV の H⁻リニアック、3 GeV の速い繰り返しのシンクロトロン (Rapid-Cycling Synchrotron, RCS)、50 GeV の主リングシンクロトロン (Slow-Cycling Main Ring Synchrotron, MR) である [1,2,3]。一方、実験施設としては、RCS からの陽子ビームを利用する物質生命科学実験施設 (Material and Life Science Experimental Facility, MLF)、MR からの陽子ビームを利用するハドロン実験施設、およびニュートリノビームラインがある。なお、第一期では MR のエネルギーは 30 GeV である。

将来、第二期分が予算化された際には、受電設備にエネルギー蓄積装置を導入して、MR のビームエネルギーを 50 GeV に増強することが検討されている。また、ハドロン実験施設の拡張や、リニアックの下流側に超伝導リニアックを新たに導入してエネルギーを 600 MeV まで上げ、そのビームを利用す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 (核変換実験施設) を建設することも計画されている。



Fig. 2 J-PARC 施設のレイアウト

図3に2008年1月に撮影されたJ-PARCの航空写真を示す。図3の色つきの線は、各施設がビームコミッションを開始した年度を示す。J-PARCは建設が終了した上流側の施設から順番にビームコミッションを開始しており、2006年11月のリニアックに始まり、2009年4月のニュートリノビームラインに至るまで、全施設が予定していたスケジュール通りにビームコミッションを開始することができた。そして、2009年5月、ニュートリノビームラインの放射線施設としての運転時施設検査終了をもって、J-PARCは本格的な利用運転の段階に入った。

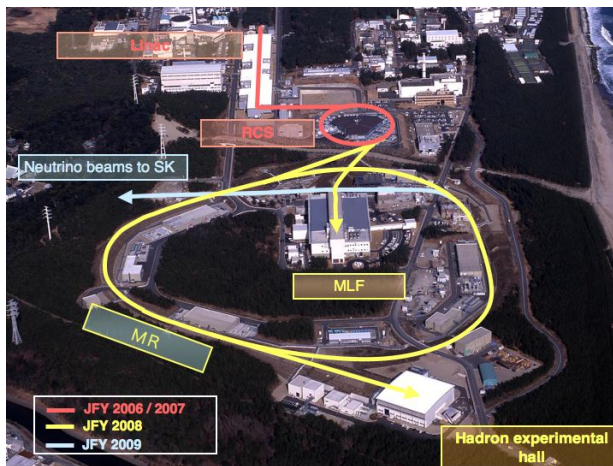


Fig. 3 J-PARC 施設の航空写真

2. J-PARC 加速器の特徴

2.1. Intensity frontier としての J-PARC

J-PARCはビームの強度において世界の最先端、いわゆる intensity frontier を目指す加速器である。衝突型加速器において intensity frontier の性能を示す指標はルミノシティであるが、J-PARCのように固定標的にビームを照射して二次粒子を生成する intensity frontier の指標は一次ビーム（陽子ビーム）の平均ビームパワーである。陽子ビームによって二次粒子を生成するためには二次粒子の種類に応じて閾値を越えるビームエネルギーが必要となるが、閾値を上回るエネルギーがあれば、二次粒子の生成効率は陽子ビームのエネルギーに比例して増大す

る。また、単位時間あたりに生成される二次粒子の数は陽子の数に比例する。したがって、ビームエネルギーと平均ビーム電流の積で与えられる平均ビームパワーが、J-PARCのような intensity frontier において性能の指標となるのである。

図4に世界の代表的な陽子加速器のビーム強度を示す（衝突型加速器をのぞく）。物質・生命科学研究所用の加速器のビームエネルギーは1 GeV前後が多く、素粒子・原子核実験用の加速器には数10 GeV以上のエネルギーが必要となる。一つの施設で物質生命科学と素粒子原子核分野を広くカバーする施設は、J-PARCだけである。

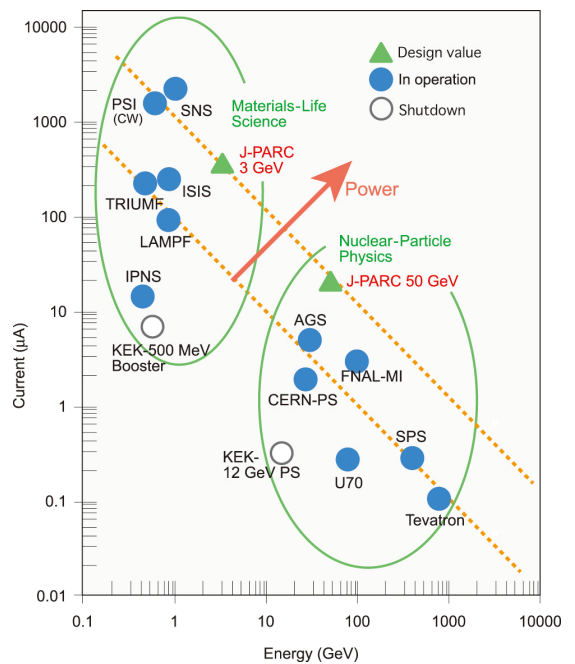


Fig. 4 世界の主な陽子加速器のビーム強度

図中にはビームパワー100 kW、および1 MWのラインを波線で示した。現在、MWクラスの大強度陽子加速器として世界をリードしているのは、米国オークリッジ国立研究所の核破砕中性子源（Spallation Neutron Source, SNS）である。また、スイスポールシェラー研究所（Paul Scherrer Institute, PSI）の陽子加速器施設は陽子サイクロトロンを用いて連続ビームで1MW

を越える出力を得ている。さらに、このほかにも、核破砕中性子源として大強度陽子加速器を建設する計画が進んでいる。例えば、中国核破砕中性子源（Chinese Spallation Neutron Source, CSNS）はビームパワーで 100-200 kW を、欧州核破砕中性子源（European Spallation Neutron Source, ESS）はビームパワーで 5 MW を狙う計画である。

一方、素粒子・原子核実験に用いられている加速器としては、現在、米国フェルミ国立加速器研究所（Fermi National Accelerator Laboratory, FNAL）のメインインジェクター（Main Injector, MI）と欧州原子核研究機構（CERN）のスーパープロトンシンクロトロン（Super Proton Synchrotron, SPS）が、J-PARC と同様に、ニュートリノ振動実験にビームを供給している。また、米国では、MI のビーム強度を 700 kW に増強し、新たに液体シンチレータを用いたニュートリノ検出器を FNAL から 810 km 離れた地点に建設する NOvA 計画が予算化され、2013 年の実験開始にむけて準備が始まっている。

以上のように、J-PARC は素粒子・原子核分野と物質・生命科学分野の両方で *intensity frontier* を目指す世界的にもユニークな存在であるが、極めて熾烈な国際競争の渦中にもある。

2.2. ビーム損失と空間電荷効果

ここでは、大強度陽子加速器を特徴付ける二つのキーワード「ビーム損失」と「空間電荷効果」について述べる。これらは J-PARC にとっても、ビーム強度を上げていく中で常に直面する重要なテーマである。

2.2.1. ビーム損失

陽子加速器のビームパワーを制限する最大の要因は、ビーム損失である。陽子ビームの一部が何らかの理由で安定軌道から外れると、真空ダクトに当たって失われる。ダクトに衝突した陽子は、（陽子ビームをターゲットに照射したときと同様に）核反応によって大量の二次粒子を発

生させる。その結果、ビーム損失が生じた周辺の機器は放射化する。この点がビーム損失が起こっても物質との相互作用が電磁気力に限られる電子の加速器との大きな違いである。どのような加速器においても、安定運転や性能向上のためには、メンテナンスや新しい機器のインストールなどを現場で人間の手を使って行う必要があるが、機器の放射化が激しいと、現場で長時間の作業を行うことができなくなってしまふ。したがって、大強度陽子加速器における最大のビームパワーは、機器の放射化をどこまで許すか、すなわち、残留放射能の許容値で決まると言える。

実際、全くビーム損失をすることなく大強度ビームを実現することは不可能である。そこで、安定領域からはずれた粒子が失われる場所を局所化し、それ以外の箇所ではできるかぎりビームが失われることのないよう工夫することが現実的である。たとえば、RCS と MR には、それぞれ入射直線部に横方向（ビームの進行方向に垂直な方向）コリメータが置かれている。これは横方向の物理口径を他の箇所よりも小さくすることにより、ビーム損失につながるビームの裾（テール部分）を積極的に切り落とす役割を持っている。そうすることで、コリメータ以外の場所でのビーム損失を防ぐことができる。当然、コリメータ部分はビーム損失が大きくなるので、あらかじめ十分な放射線シールドを施しておく必要がある。

シンクロトロンにおいて、コリメータ以外にビーム損失が問題になる可能性があるのは、入射、および出射機器である。そこで、コリメータセクションや入出射機器のメンテナンスには、他の箇所よりも残留線量が高くなることを想定して、現場での作業をより短時間で簡便に行うことができるよう周到に用意しておくことが重要である。たとえば、MR の場合は、万が一機器が故障した場合に、機器の取り外しや取り付けが短時間で精度良く行えるように、入出射機器をリニアモーションガイドレールの上に据え付けるなどの工夫を行っている[4]。

2.2.2. 空間電荷効果

加速器においてビーム強度が大きくなると、個々の粒子間に働くクーロン力によってビームの収束力に影響が生じる。この効果を空間電荷効果と呼ぶ。ビームを構成する個々の粒子はクーロン力によって互いに反発して発散力を受けている。また、加速器のビームは荷電粒子群が一方向に進む電流なので、ビーム電流によってできる磁場は収束力として働く。ビームの速度が大きくなると、反発力は一定だが、磁場による収束力は大きくなるため、一般に粒子の速度が大きいきほ発散力の影響が小さくなる。

シンクロトロンにおいて空間電荷効果を評価するためには、発散力によるベータトロン振動数（横方向振動の振動数、ベータトロンチューンと呼ぶ）のずれを指標とすると便利である。水平、および垂直方向のエミッタンス（ビームのサイズと広がり積）を ϵ_x 、および ϵ_y 、全粒子数を N 、陽子の古典半径を r_p 、粒子の速度を βc 、ローレンツファクターを γ とすると、空間電荷効果による垂直方向ベータトロンチューンのずれ Δv_y は次式で与えられる [5]。

$$\Delta v_y = - \frac{N r_p F}{\pi \epsilon_y \left(1 + \sqrt{\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}} \right) \beta^2 \gamma^3} \frac{1}{B_f} \quad (2-1)$$

これをラスレットのインコヒーレントチューンシフト (Laslett incoherent tune shift) と呼ぶ。ここで、 F は形状因子であり真空ダクトに誘起される鏡像電流の影響を表すが、1 GeV 以下では、ほぼ 1 になる。 B_f は、バンチ係数 (bunching factor) と呼ばれ、次式で定義される。

$$B_f = \frac{I_{av}}{I_{peak}} \quad (2-2)$$

ここで、 I_{av} はリングの平均電流値、 I_{peak} はピーク値であり、0 から 1 の間の値をとる。なお、(2-1) は垂直方向のチューンシフトを与えるが、水平方向の場合は、 x と y を入れ替えればよい。チューンのずれは、 $\beta^2 \gamma^3$ やエミッタンスに反比例し、バンチしたビームではピーク電流の大きさに比例する。RCS や MR で大強度ビームを加

速する場合に、空間電荷効果が最も顕著に表れるのは、ビームエネルギーが低い入射時である。また、エミッタンスを上げたり、バンチのピーク電流を下げたりすることによって空間電荷効果の影響を軽減することができる。

2.3. RCS 方式と蓄積リング方式

核破碎中性子源に陽子ビームを供給するためにシンクロトロンのようなリング加速器を用いる理由の一つは、1 μsec 程度のパルス幅を持ち、ピークパワーが高い陽子ビームを作るためである。1 μsec という時間幅は、中性子ビームのエネルギーやド・ブロイ波長を飛行時間法 (time-of-flight method) による速度の測定から求めるのに適している。一方、リニアックではイオン源から得られる単位時間あたりの粒子数は限られている。そこで、周回周波数が 1 μsec 程度のリングに、リニアックから繰り返しビームを入射し、できるだけ多くの粒子をリングに貯め込むことによって高いピークパワーを得ることができる。J-PARC の RCS は周長約 350 m のリングであり、取り出しエネルギー 3 GeV での周回時間は約 1.1 μsec である。

リング型の加速器において膨大な数の陽子を入射・蓄積するためには、陽子とは質量が等しく電荷が逆の H^- (負水素イオン) を入射ビームとして使い、リングに入射する際に炭素フォイルを通して陽子に変換する方法 (荷電変換入射) が採用される。入射点にバンパ電磁石によってバンパ軌道を造ると、周回している陽子と入射してくる H^- とは一つのバンパ電磁石の中でちょうど逆向きに同じ大きさの力を受けるので、入射ビームの軌道を調整すれば、周回している陽子ビームの運動には影響を与えずに、繰り返し粒子を継ぎ足していくことができる。ただし、 H^- の電子束縛エネルギーは 0.775 eV と非常に小さく、ビームエネルギーやバンパ電磁石の磁場強度が大きすぎると、Lorentz stripping と呼ばれる効果により入射点より上流で電子がはぎ取られて H^0 に変換され、ビームはロスしてしまう。したがって、入射する H^- のエネルギー

はあまり高すぎない方が良く、1.3 GeV 程度が上限と考えられている。

J-PARC では、核破砕中性子源へのビーム供給を行う加速器として、H⁻リニアックのビームのエネルギーを 400 MeV とし、リング入射後に 3 GeV まで加速してビームパワーをかせぐ RCS 方式を採用した。これに対して、SNS では、リニアックを用いて full energy injection を行う蓄積リング方式を選択し、ビームエネルギーを 1.0 GeV とした。SNS は目的が中性子散乱実験に特化した施設であるが、J-PARC は、中性子散乱とともに素粒子・原子核実験を行う複合施設である。RCS は、核破砕中性子源への陽子ビームの供給とともに、素粒子・原子核実験のために必要な高エネルギー陽子ビームを作り出す MR の入射器の役割を担う。MR への入射ビームのエネルギーは、前節で述べた空間電荷効果の影響を軽減するためには、なるべく高いことが望ましい。したがって、荷電変換入射で大量の陽子を蓄積したのちにそれを加速する RCS 方式が、複合施設である J-PARC には適しているのである。

さて、ここまで J-PARC 加速器全体の特徴を手短に概観したが、以下では、J-PARC の三つの加速器について、個々に見ていくことにする。

3. リニアック

3.1. リニアックの概要

リニアック (Linac) は、3 段構成となる J-PARC 加速器の最上流に位置する加速器であり、RCS に入射ビームを供給する。リニアックで加速する粒子は H⁻である。図 5 にリニアックの構成を示す。イオン源で発生した H⁻イオンは、高周波 4 重極型リニアック (Radio Frequency

Quadruple Linac, RFQ)、ドリフトチューブリニアック (Drift Tube Linac, DTL)、機能分離型 DTL (Separated-type DTL, SDTL)、環状結合空洞型リニアック (Annular Coupled Structure Linac, ACS) を用いて加速される。このように加速方式を変えるのは、電子と異なり、H⁻イオンの速度が光速になかなか近づかないことによる。粒子の速度によって、加速のための効率 (入力した高周波電力に対する加速エネルギー) が異なり、それぞれの速度で最適な構造に切り替える必要がある。

リニアックの主なパラメータを表 1 に示す。ビーム時間幅は、繰り返し 25Hz で変化する RCS の電磁石磁場のボトムで受けられる時間で制限され、最大 0.5msec としている。エネルギーは、リニアックの定格としては 400 MeV であるが、運転開始当初は 181 MeV でスタートすることとなった。これは、建設の初期段階で、RCS の周長とビームダクトの口径を、当初のデザインよりも周長 10/9 倍、口径 1.5 倍に拡張する変更を行ったことによる。リニアックの建設予算の一部をこの変更に必要な経費に充てたのである。リニアックのエネルギーは後からでも増強できるが、シンクロトロン周長の周長やダクトの口径は一度作ってしまったら変更はできない。実際、結果的にこの判断は正しく、このときに周長とダクト口径を変更したことは、現在の RCS が安定なビーム供給運転を行いながら着実にビーム強度を上げている大きな要因となっている。

181 MeV での入射は、400 MeV での入射と比較して空間電荷の効果が大きくなるため、RCS に蓄積できる粒子数は 400 MeV の場合の 60%程度に制限される。そこで、181 MeV のリ

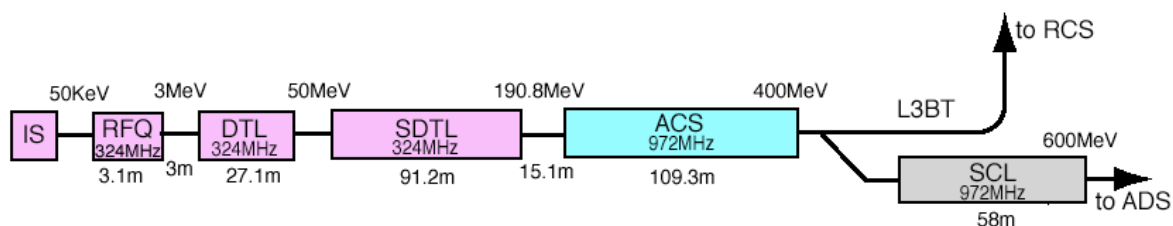


Fig. 5 リニアックの構成

ニアックで加速されるピーク電流値の仕様値を 30 mA に決め、現在のイオン源や RFQ もその仕様で作られている。

なお、すでに 2008 年度の補正予算においてエネルギーを 400 MeV に増強する計画が文科省から認められている。現在は、2013 年度の 400 MeV ビームのコミッショニング開始を目指して、機器製作などの準備が進んでいる。

Table 1 リニアックの主なパラメータ

Particle	H ⁻
Energy [MeV]	400(181 at present)
Peak current [mA]	50 (30 at present)
Repetition [Hz]	25 (50 at the 2 nd phase)
Pulse width[mA]	0.5

将来、J-PARC の第二期計画に位置付けられている ADS の基礎研究が予算化されたときには、RCS への入射と併行して、ADS へのビーム供給を行う必要がある。そこで、RCS と ADS のそれぞれに 25 Hz のビームを振り分けられるように、リニアックの繰り返しの設計値は 50 Hz としている。なお、ADS のためには 400 MeV リニアックの下流に新たに超伝導リニアック (Super Conducting Linac, SCL) を加えてエネルギーを 600 MeV に上げることになる (図 5)。

3.2. リニアックの主な特徴

RCS の入射器としてのリニアックには、ビーム強度の達成とともに、小さいエネルギーのばらつきと低いエミッタンスが要求される。RCS への入射や加速でのビーム損失を許容範囲内に抑えるためには、エネルギーの幅と変動が 400 MeV ± 0.7 MeV 以内 (運動量で ± 0.1 % 以下) とする必要がある。したがって、リニアックの高周波システムには振幅・位相制御に高い精度が求められる。また、RCS では空間電荷効果を軽減してビーム強度をかせぐために、入射ビームを位相空間内に広く分布させるペインティング入射を行うが、そのためには入射ビームのエミッタンスが 4 π.mm.mrad 以下であることが求められる。

イオン源には体積生成型が用いられ、引き出し電極で H⁻イオンを 50 keV で引き出す。続く RFQ は比較的長い空洞でも電場を安定化するために開発されたパイモード安定化ループを持ち、3 MeV まで加速される。続いて 3 台の DTL で 50 MeV まで、さらに 30 台の SDTL で 181 MeV まで加速される。

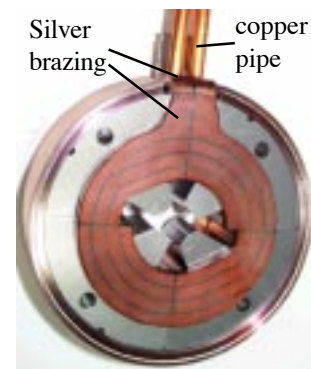


Fig. 6 DTL タンクに内蔵された小型四極電磁石

RFQ、DTL、SDTL の rf 周波数は 324 MHz である。これは DTL の周波数としては従来よりも高いが、加速周波数が高くなることによってバンチ数が増え、同じ電流値に対して空間電荷効果を軽減できるというメリットがある。さらにこの周波数であれば高周波源として信頼性の高いクライストロンを使用することができる。ただし、ドリフトチューブの直径が周波数に反比例して小さくなるため、DTL に内蔵する四極電磁石を小型化する必要がある。J-PARC リニアックでは、銅の円筒ブロックからコイルを削り出しで製作し、周期反転方式 (Periodic Reverse, PR) 電铸というメッキと研磨を交互に行う技術を応用することによりコイル内部を中空にすることに成功した。この技術を利用して、324 MHz の DTL 内部に組み込むことが可能な小型四極電磁石を実用化することができた。文献[6]に示された小型四極電磁石の写真を図 6 に示す。

RFQ と DTL をつなぐ中間エネルギービーム輸送系 (Medium Energy Beam Transport, MEBT) には、バンチャー空洞 2 台とチョッパー空洞 1 台が設置されている。バンチャー空洞は、RFQ と DTL の間の縦方向マッチングに用いられる。チョッパー空洞は、RFQ で加速され

たビームの一部を RCS の加速周波数 (181 MeV 入射では 0.94 MHz) と同期した繰り返しで水平方向に蹴り出して取り除くために用いられる。これによってリニアックのマクロパルス幅 (0.5 msec) の中に、RCS の RF 周波数と同期したパルス構造を形成することができる。このパルス構造は、0.5 msec のマクロパルスと、3.09 nsec 周期 (324 MHz) のマイクロパルスの中間の周期になるので、中間パルス、または中間バンチと呼ばれる。この中間パルス構造を作っておくことにより RCS に入射したビームが RCS の高周波加速システムで RF 捕獲されるときにビーム損失を避けることができる。さらに、チョッパー空洞のデューティーを変えることによって、中間パルスの一部を間引いてビーム強度を変更することもできる。この方法は、イオン源のビーム強度を変えずにリニアックのビーム強度を自由に選ぶことが出来るので、実際の共同利用運転や加速器の調整運転でも日常的に使用されている。

SDTL と RCS の間のビーム輸送系 (Linac to 3 GeV Beam Transport, L3BT) には、2 台のデバンチャー空洞が設置されている。これにより、ビームの運動量広がりや位相広がりに置き換えて RCS 入射に要求される小さい運動量広がりを実現する。

400 MeV へのエネルギー増強のためには、新たに ACS を導入する。DTL や SDTL 型加速構造は、エネルギーが高くなるとドリフトチューブが長くなり、シャントインピーダンスが低下する。このため、従来、常伝導加速構造の場合は、加速する空洞と高周波エネルギーを伝播する結合空洞を組み合わせたもの (これらを結合空洞型加速構造と呼ぶ) に切り替えるのが一般的であった。しかし、J-PARC では、電場の軸対称性が高くエミッタンスの劣化が小さいと期待される ACS を採用することとした。ACS はもともと 1974 年にロシアで提案された方式で、長く実用化されなかったが、1990 年に KEK が世界に先駆けて開発に成功したものである [3]。400 MeV への増強のためには、計 21 台の ACS 空洞を設置する必要がある。現在、2012 年の据え付けを目指して、空洞の量産が進んでいる。図 7 に東海サイトに納入された実機の写真を示す。



Fig. 7 ACS 空洞

4. RCS

4.1. RCS の概要

図 8 に RCS および MLF の平面図を示す。RCS は約 350 m の周長を持つ 3 回対称のおむすび型のリングで、3 箇所、の長直線部を持つ。直線部にはそれぞれ「入射機器、および横方向コリメータ」「取り出し機器」「高周波加速空洞」が置かれている。すでに述べたように、RCS は、MLF における中性子やミュオンの生成標的に MW 級のビームを供給すると同時に、MR のビーム入射のためのブースターとしても用いられる。

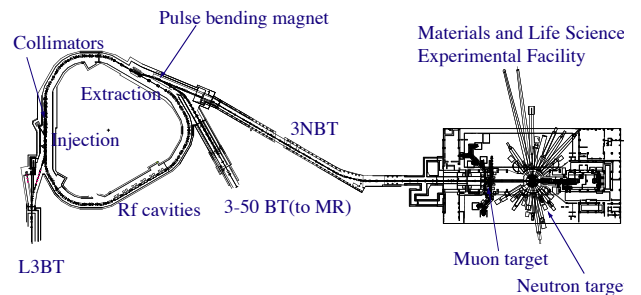


Fig. 8 RCS および MLF の平面図

リニアックで 181 MeV (400 MeV) まで加速された H⁻ビームは L3BT を経て RCS まで輸送され、荷電変換フォイルによって陽子に変換されて入射される。入射された陽子は 3 GeV まで加速されて、取り出される。この入射から出射までのサイクルを、25 Hz という速い繰り返しで行う。RCS の主なパラメータを表 2 にまとめる。ハーモニック数とはビームのバンチが存

在しうる RF バケツの数で、RCS の場合は最大 2 バンチである。

Table 2 RCS の主なパラメータ

Circumference[m]	348.3
Superperiodicity	3
Cycle [Hz]	25
Injection energy [GeV]	0.181/0.4
Extraction energy [GeV]	3.0
Harmonic number	2
Number of bunches	2
Transition energy [GeV]	9.14
RF frequency [MHz]	0.94/1.23-1.67

4.2. RCS の主な特徴

4.2.1. ラティス

RCS のラティス（電磁石の配列）は、陽子加速器で一般的に用いられるシンプルな FODO タイプを基本にしている。これは、収束（F）と発散（D）の機能を持つ四極電磁石をドリフトスペース（O）を挟んで交互に配置するもので、アーク部分では O の部分に偏向電磁石が設置される。

RCS の場合は周長の 1/3 がスーパーピリオド（super period）とよばれる最大の周期的単位であるが、1 つのスーパーピリオドは 2 つの 3-DOFO アークモジュールと運動量分散関数（dispersion）を 0 とした 3-DOFO 直線モジュールからなる。各アークモジュールには、偏向電磁石を抜いたセル（missing-bend cell）が 1 箇所設けられ、運動量分散関数が大きくなる場所に六極電磁石や縦方向のビームコリメータが設置されている。六極電磁石は、ビームが持つ運動量の広がりによってビームのベータatron チューンが変化する効果、いわゆる色収差（chromaticity）を補正するために用いられる。また、このラティスにおいては、トランジションエネルギー（次章参照）が出射エネルギーの 3 倍以上となる 9.14 GeV となっている。このことは、加速中の縦方向のビーム制御を容易にし、ビーム損失の低減につながる。図 9 に RCS 一周のラティスパラメータを示す。ここで上図は β_x

（実線）、 β_y （点線）、下図は運動量分散関数を示す。

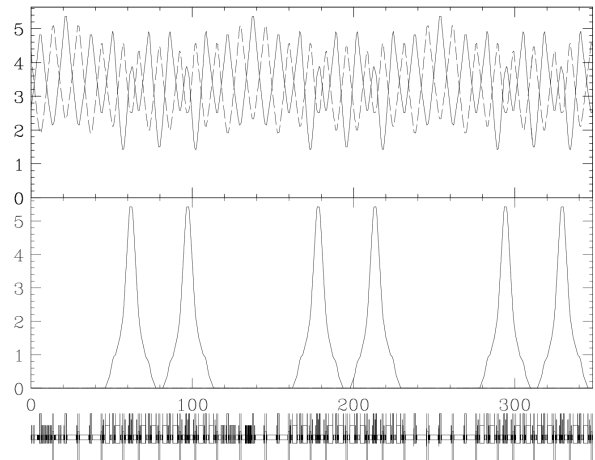


Fig. 9 RCS のラティスパラメータ

4.2.2. RCS の入射

RCS へのビーム入射は、多重入射法（multi-turn injection）によって行われる。これはリングを周回する周期よりも長い時間にわたってビームを積み重ねて入射するもので、バンチ当たりのビーム強度を増すために行われる。RCS では多重入射法のなかでも特に荷電変換入射、およびペインティング入射を採用している。荷電変換入射は、2 章でも述べたように、周回ビームに対して逆符号のビームを入射し、入射点の直前で荷電変換を行う方法である。これにより、位相空間の同じ場所にビームを多重に重ね、リウビルの定理に抵触することなく粒子密度を上げることができる。RCS では、シフトバンブと呼ばれる二極電磁石を用いて周回ビームの軌道に局所的なバンブを作り、バンブ軌道上にリニアックからの H⁻ビームとの合流点を設け、そこに荷電変換用の炭素フォイルを置くことにより H⁻から電子を剥ぎ取って陽子に変換する。入射ビーム（H⁻）と周回ビーム（陽子）は一つの電磁石で逆向きのキックを受けるので、入射ビームの軌道を調整することにより、入射ビームを周回ビームの軌道上にのせることができる。一方で、ビーム強度があがると空間電荷効果の影響

が大きくなるので、その低減のために、ペインティング入射が行われる。これは入射ビームを横方向、および縦方向の位相空間内で実効的に掃引して RCS の有効なアパーチャ、およびアクセプタンス内でビームを適度に広げて入射する方法である。

また、生じるビーム損失を局所化するために、縦・横両方向のコリメータが設置されている。縦方向コリメータは先に述べたようにアーク部の missing-bend-cell 部に置かれ、横方向のコリメータは入射部の下流側に置かれている。

4.2.3. 電磁石システム

RCS の主電磁石システムは、偏向電磁石 24 台、四極電磁石 60 台 (7 ファミリー)、六極電磁石 18 台 (3 ファミリー) からなる。さらに、軌道調整用のステアリング磁石が 54 台設置されている。

大強度のビームを加速するには、空間電荷効果を軽減するためにビームサイズを広げる必要があるため、電磁石の口径 (aperture) も自ずと大きくなる。四極電磁石の中で最も口径の大きな四極電磁石は、ボア径が 410 mm という大口径である。そのためには電磁石だけでなく、電源も大型のものが必要となる。

また、すべての電磁石の磁場が運動量の変化に同期して 25Hz のサイクルで変化しなければならない。したがって、電磁石のコアやコイルにも、当然、渦電流対策を施さなければならない。RCS の偏向、四極、六極電磁石には、コイルにおける渦電流損失を低減するために、従来の無酸素銅中空導体ではなくアルミストランド線導体を開発して採用している。これは、ステンレス鋼製の冷却水配管の周りに多数のアルミニウム素線を撚って角形に成形した導体である (図 10)。コイルの樹脂含浸や導体絶縁には耐放射線性にすぐれたポリイミド樹脂を用いている。電磁石のコアは厚さ 0.5 mm の珪素鋼板を積層して作られており、さらに偏向電磁石と四極電磁石の磁極端部には渦電流の効果を低減するために細い切り込み溝を施している。

RCS の偏向、四極電磁石では、中間のエネルギーに相当する DC 磁場の上に AC 磁場を重畳している。偏向電磁石電源 1 台、四極電磁石電源 7 台すべてが共振電源で、各々チョークトランスとコンデンサーを持つ。偏向電磁石は並列共振回路系、四極電磁石 7 台はそれぞれ異なる直列共振回路系になっており、8 台の電源がタイミングを合わせて正弦波で電磁石を励磁する。特に 3GeV 付近では、電磁石によっては磁極内の飽和の影響が顕著になるため、偏向電磁石の磁場の変化に対し、7 ファミリーの四極電磁石電源それぞれを飽和の程度に応じて電流制御することによって磁場を追随させている。



Fig. 10 アルミストランド線の断面図

4.2.4. 高周波加速空洞

陽子は電子と違って静止質量が大きいため、RCS のエネルギー領域では、加速中の速度の変化に対応して、加速周波数を変える必要がある。RCS で用いられる周波数は、入射エネルギー 181 MeV で 0.94 MHz、取り出しエネルギー 3 GeV で 1.67 MHz となる。従来、陽子やイオンを加速するシンクロトロンでは、加速空洞にフェライトを負荷し、フェライトにバイアス磁場を加えて透磁率を制御することにより、加速に対応して空洞の共振周波数を調整してきた。J-PARC では、計画の比較的初期の段階 (大型ハドロン計画の時代) からフェライトに変わる磁性材料として磁性合金 (Magnetic Alloy, MA) に着目した開発研究を進めてきた [7]。

MA はフェライトと比較して高い飽和磁束密度を持つために、より大きい高周波電力を投入することができる。また、キュリー温度が 500°C 以上と、フェライトの 100-200°C に対してかなり高く、発熱によって特性が変化するリスクも少ない。これらは、フェライトよりも高い加速電場勾配を実現することができることを意味している。従来、フェライトを用いた空洞における加速電場勾配の限界は、10 kV/m 程度とされてきたが、MA を用いた空洞の場合は、短時間では 100 kV/m に相当する磁束密度でも加速効率が変わらないことが確認されている。さらに、MA は Q 値が小さく、広帯域のインピーダンスを持っているため、加速とともに同調周波数を制御する必要がない。これは低電力高周波制御系 (Low Level RF, LLRF) をフェライト空洞と比較して極めて簡素化できることを意味する。

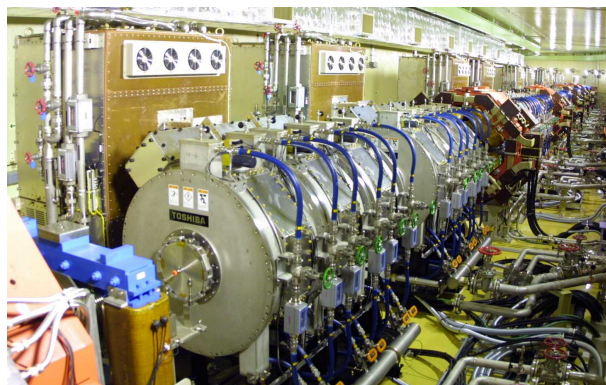


Fig. 11 RCS の加速空洞

現在、RCS には MA 空洞 11 台が設置されている (図 11)。加速電圧は 1 台あたり最大で 45 kV ($> 20\text{kV/m}$)、トータルで約 500 kV の加速電圧を得ることができる [8]。一方、大強度ビームに対しては空間電荷効果の影響を軽減するため、二次高調波電圧を加えてバンチ当たりのピーク電流を下げる操作を行う必要があるが、RCS の MA 空洞の Q 値は 2 と低く、周波数としては 0.9 MHz から 3.4 MHz 程度をカバーしているため、1 台の空洞でビームの加速とバンチ形状の操作の両方が可能なシステムになっている。

4.2.5. セラミックス真空チャンバー

加速器の真空チャンバー材としては、ステンレス鋼、アルミ、銅、チタンなどの金属が採用される場合が多い。RCS では、電磁石がない部分にはチタンが、電磁石が置かれる部分には、アルミナセラミックス材が用いられている。チタンはガス放出が少なく、軽量であるという超高真空用ダクト材料としての利点に加え、ステンレス鋼に比べて放射線による放射化が少ないという特徴がある。一方、電磁石部分にセラミックスダクトを採用した理由は、25 Hz で変化する磁場によって生じる渦電流の影響を避けるためである。金属材を採用すると、渦電流による発熱を防ぐためにダクトを冷却する必要がある。また、渦電流が作る磁場の多極成分がビームに与える影響も問題になる可能性がある。さらに、RCS ではセラミックスダクトの外表面にビームの進行方向に沿って電鍍法でストリップライン状の銅板を取り付けている。これはビームが作る高周波電磁場がダクト外に放出されることを防ぐ RF シールドとして機能するとともに、ビームに伴って流れる鏡像電流 (imaging current) を流れやすくして、ビーム不安定性や発熱の要因となる抵抗壁インピーダンス (resistive wall impedance) を下げる役割を果たす [9]。

セラミックス真空チャンバーは偏向電磁石や四極電磁石などの主電磁石だけでなく、入射部のバンプ電磁石や入射四極電磁石にも用いられている。入射部の四極電磁石に設置中のセラミックスダクトを図 12 に示す。入射部の四極電磁石には、周回ビームと入射ビームのそれぞれに十分なアパーチャを確保するために複雑な断面形状が要求されるが、必要な強度を保ちながらこのような異形断面も実用化している。

4.2.6. RCS のビーム取りだし

RCS からのビームの取り出しは、速い取り出しによって行われる。速い取り出しとは、高速の立ち上がり時間を持つキッカー電磁石を用いて、周回軌道を回っているすべてのバンチ (RCS

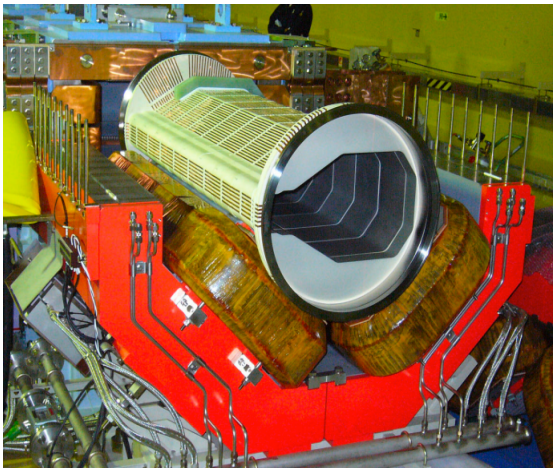


Fig. 12 RCS入射四極電磁石部のセラミック真空チェンバー

の場合は最大 2 バンチ) を一度のキッカーの励磁で一気に取り出す方法である。RCS の取り出しシステムは、8 台のキッカーとその下流におかれた 3 台のセプトム電磁石から成る。キッカーで約 17 mrad 蹴り出されたビームは、その下流に置かれた 3 台の DC セプトム電磁石で 288 mrad 曲げられて RCS の外に取り出される。

5. MR

5.1. MR の概要

MR は、J-PARC 施設を構成する 3 つの加速器のうち、最下流に位置する最大規模の加速器である。陽子を 50 GeV まで加速して取り出すことができる設計になっているが、現在は加速エネルギー 30 GeV で運転している。

図 13 に MR の平面図を示す。MR は約 1.6 km の周長を持つ 3 回対称のリングである。長さ 116 m の直線部が 3 箇所あり、各直線部には「入射機器、およびリングコリメータ」、「遅い取りだし機器」、「高周波加速空洞、および速い取り出し機器」が設置されている。

RCS から 25 Hz で取り出される 3 GeV 陽子ビームは、RCS の取り出し点の下流に置かれたパルス偏向電磁石によって MR と MLF に振り分けられる。通常、RCS から取り出されるビームのうち 95% 以上は MLF に、それ以外が MR に送られる。MR 行きのビームは、長さ 230 m

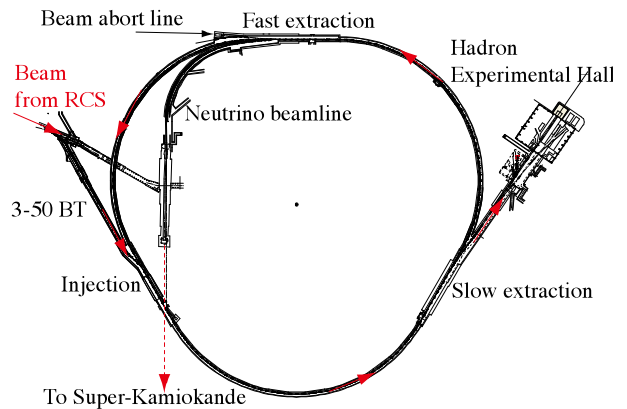


Fig. 13 MR の平面図

のビーム輸送系 (3 GeV to 50 GeV Beam Transport, 3-50 BT) を通って MR に入射される。図 14 に RCS と MR バンチ配置を示す。RCS のハーモニック数は 2、MR のハーモニック数は 9 である。ただし、後に述べるように、速い取り出しキッカーの立ち上がり時間を確保するために、空バケツを入れておく必要があり、MR のバンチ数は 8 を上限としている。従って、RCS から 2 バンチずつ、最大 4 回入射されたビームが 30 GeV まで加速され、実験施設に向けて取り出される。

「遅い取り出し (Slow Extraction, SX)」によって取り出される陽子ビームはハドロン実験施設に送られ、素粒子・原子核実験に用いられる。一方、「速い取り出し (Fast Extraction, FX)」で取り出される陽子ビームはニュートリノビームラインに送られて、ニュートリノビームの生成に用いられる。

表 3 に、MR の主なパラメータを示す。バンチの数としては 2010 年 6 月までは 6 が標準的な運転モードであった。これは、速い取り出しキッカーの立ち上がり時間が 1.6 μsec にかかるためである。2010 年夏に、これまで準備してきた新しいキッカーに入れ替える予定である。新しいシステムは、立ち上がりが 1 μsec 以下に短縮されており、2010 年秋以降の運転ではバンチ数 8 が標準になる予定である。ビームパワーに関しては、MR の設計仕様値は取り出しエネルギー

50 GeV で 750 kW である。ただし、現在はビームエネルギー 30 GeV で繰り返し時間を短くすることによって仕様値 750 kW を可能な限り早期に達成することを検討している。

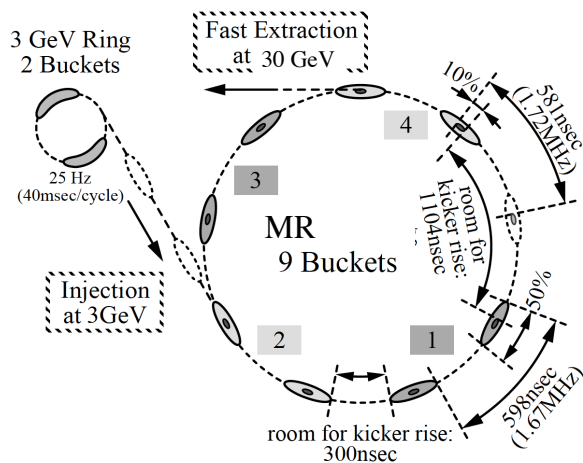


Fig. 14 RCS と MR のバンチ配置

Table 3 MR の主なパラメータ

Circumference[m]	1567.5
Superperiodicity	3
Cycle [Hz]	~0.3
Injection energy [GeV]	3
Extraction energy [GeV]	30 (1st phase)
Harmonic number	9
Number of bunches	6 (~June 2010) 8 (Oct. 2010~)
Transition energy [GeV]	j31.7
RF frequency [MHz]	1.67-1.72

5.2. MR の主な特徴

5.2.1. ラティス

MR のラティスの大きな特徴は、トランジションエネルギーを虚数に選んだことである。通常、数 GeV から数 10 GeV 程度のエネルギーを持つ強収束の陽子シンクロトロンには、加速途中にトランジションエネルギーが存在する。粒子がリングを一周するときの周回時間を T 、運動量 p の粒子に対する中心閉軌道の軌道長を L とすると $T=L/\beta c$ より、以下の関係が成り立つ。

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta \beta}{\beta} = \left(\alpha - \frac{1}{\gamma^2} \right) \frac{\Delta p}{p} = \eta_c \frac{\Delta p}{p} \quad (5-1)$$

ここで、 α はモーメンタムコンパクションファクター (momentum compaction factor) であり、 η_c はスリップファクター (slip factor) と呼ばれる。いま、スリップファクターの符号に着目すると、符号が負の場合 (粒子のエネルギーがある値よりも小さい場合) は、運動量が増加すると速く周回して周期は短くなるが、符号が正の場合 (粒子のエネルギーがある値よりも大きい場合) は、運動量が増加すると速度の増加率よりも軌道長が長くなる効果が優勢になるため周回周期が長くなることがわかる。このスリップファクターの符号が反転する境目のエネルギーがトランジションエネルギー γ_t であり、(5-1) より

$$\gamma_t = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \quad (5-2)$$

で与えられる。さらに α と運動量分散関数 $\eta(s)$ の関係を用いると、

$$\frac{1}{\gamma_t^2} = \alpha = \frac{1}{L} \oint \frac{\eta(s)}{\rho(s)} ds \quad (5-3)$$

となる。ここで $\rho(s)$ は、偏向電磁石での曲率半径である。

さて、加速過程でトランジションエネルギーを通過する際、縦方向ビーム振動 (シンクロトロン振動) の安定位相領域がシフトするため、それに対応して高周波加速電圧の位相をジャンプさせる必要があるが、そのときに生じるビーム損失やエミッタンスの増大は大強度ビームほど深刻になる。先に述べたように RCS ではトランジションエネルギーが取り出しエネルギーの 3 倍以上となるラティスを採用しているが、取り出しエネルギーが 50 GeV の MR では現在の規模で十分に高いトランジションエネルギーを得るラティス設計は難しい。そこで MR では negative α 、すなわちトランジションエネルギーが虚数になるラティス構造を採用することによって、加速過程でトランジションエネルギーを通過しない設計にしている。これは、大型陽子加速器としては世界で初めての試みである。

MR のラティスは、RCS と同様、FODO タイプを基本にしている。1つのアークは3つのFODOセルからなるアークモジュール8つから構成されている。各アークモジュールの中心にmissing-bend cellを設け、その部分で $\eta(s)$ が最大に、その他の偏向電磁石部で $\eta(s)$ が負になるようにしている。その結果、(5-3)で与えられる α をマイナスに、すなわちトランジションエネルギーを虚数にすることができる。また、直線部の運動量分散関数を0 (dispersion free と呼ぶ) にするために、アーク部分の両端で運動量分散関数が0になるようにしている (achromat にしている)。これは、アーク部での位相の進み (phase advance) が 2π の整数倍になるように取ることで与えられるが、MRの場合は、1つのアークモジュールの位相の進みを $3\pi/4$ としているので、1アーク (8モジュール) での位相の進みは 6π となる。

一方、一つの直線部は、3つのFODOセルとその両側に置かれたマッチングセクションから構成されており、長さ116mにわたってdispersion freeになっている。マッチングセクションはアーク部との間で光学パラメータ (Twiss parameter) のマッチングを取るために用いられる。

図15にMR一周のラティスパラメータを示す。

5.2.2. 電磁石システム

MRの主電磁石システムは、96台の偏向電磁石、216台の四極電磁石 (11ファミリー)、72台の六極電磁石 (3ファミリー) から構成されている。さらに軌道調整を行うために186台のステアリング電磁石 (水平方向93台、垂直方向93台) が設置されている。RCSほど速い繰り返しではないものの、数秒周期でパターン運転する必要があるため、いずれの電磁石のヨークも無方向性珪素鋼板を積層して作られている。

主電磁石電源は、変換器のスイッチング素子として IEGT/IGBT を採用したパターン電源である。三相22 kVの交流を電源トランスで降圧

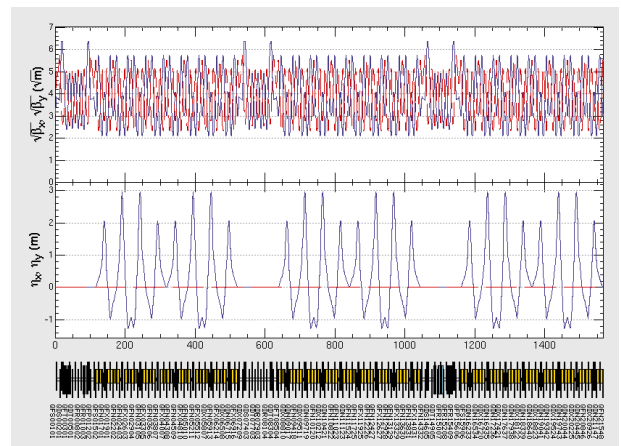


Fig. 15 MR のラティスパラメータ

し、直接、変換器に入力する方式をとることで小型化が図られている。ただし、2008年5月のビームコミショニング開始当初から主電磁石電源の電流リップルに起因するビーム軌道やチューンの変動が確認され、それが大きな問題になっている[10]。現在も夏期停止期間などを利用して、リップルの原因の解析と対策を重点的に続けている状況である。これまでに、電源のフィルター構成の大幅な見直しや、負荷配線の対称化 (ノーマルモードとコモンモードの分離) を行い、コミショニング開始当初に比べると電流リップルは大幅に改善し、典型的には入射エネルギーで 10^{-3} 台、取り出しエネルギーで 10^{-4} 台になっている[11]。しかし、たとえばハドロン実験施設への安定なビーム供給のためには、リップルをさらに1/10以下に改善する必要がある。

5.2.3. 高周波加速システム

高周波加速空洞にはRCSと同様、MA空洞が採用されている。陽子ビームを3 GeVから30 GeVまで加速する場合の β の変化は3%程度であり、対応する高周波加速空洞の周波数範囲は1.67 MHzから1.72 MHzである。周波数の変化量としてはRCSと比較すると少なく、その分、空洞のQ値を上げることができる (過渡的なビーム負荷によって生じる加速電圧のゆがみを考慮すると、Q値は必要以上に下げない方が望ましい)。ドーナツ型のMAコアを径方向に切断し

て 2 等分し、切断面間の距離を適当に選ぶことによって空洞のインダクタンスやQ値を調整することができる（カットコア配置）が、MR ではこのカットコアを採用して、Q値を 26 程度にしている。

現在、MR には 5 台の空洞が設置されており加速電圧としては 230 kV 程度を得ることが出来る。また、空間電荷効果の影響を抑制するための 2 倍高調波高調波空洞 1 台が 2010 年の秋以降稼働を開始する予定である。

5.2.4. 入射・コリメータ

MR の入射直線部を図 16 に示す。MR の入射直線部は、入射部、リングコリメータ部、入射ダンプ部から構成されている。

MR へのビーム入射には 1 ターン入射法が用いられる。3-50BT を通って入射されたバンチは、2 台のセプタム電磁石によってリングの周回軌道と平行近くなるまで軌道を曲げられ、入射軌道と周回軌道の交点付近に設置された入射キッカー電磁石によって周回軌道上にのせられる。図に示されている 3 台のバンプ電磁石は、横方向のサイズが大きい大強度ビームに対してアパーチャを確保する目的でバンプ軌道を作るために用いられる。

入射キッカーの下流側にはビームコリメータが置かれている。すでに述べたように、コリメータは物理的口径を他の場所よりも狭くすることによって、ビームのハロー成分を削り落とし、ビームロスを局所化するために用いられる。MR の物理口径は、コリメータをのぞき、位相空間で $81 \pi \text{ mmmrad}$ 以上を確保するよう設計されている。それに対して、コリメータの口径を $54 \cdot 60 \pi \text{ mmmrad}$ に狭くすることにより、コリメータ以外の箇所では生じるビームロスを極力抑える設計になっている。

ビームコリメータは 3-50BT にも設置されている。3-50BT のコリメータで RCS から取り出されたビームのハロー成分を取り除き、MR に入射された後に空間電荷効果などの影響で発生

するハロー成分をリングコリメータで取り除くというシナリオである。

一方、リングコリメータ部の下流には、入射ダンプラインが設置されている。ダンプキッカー電磁石とダンプセプタム電磁石により、3 GeV の陽子ビームを、容量 3.5 kW を持つ入射ダンプラインに捨てることができる。このダンプラインは、2008 年 5 月の MR のビームコミッショニング開始時に使用可能であった当時 MR で唯一のダンプラインであり、初期のビーム調整においては重要な役割を果たした。

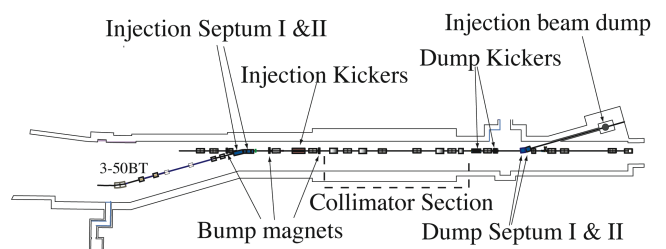


Fig. 16 MR の入射直線部

5.2.5. 速い取り出し

ニュートリノビームラインへのビーム取り出しには速い取り出しが用いられる。速い取り出しシステムは、5 台のキッカー電磁石とその下流に置かれた 6 式のセプタム電磁石から構成されている。陽子ビームが 30 GeV まで加速された後、キッカー磁石を励磁して、周回しているすべてのビームを一周する時間内 ($\sim 5 \mu\text{sec}$) で取り出す。

MR の速い取り出しは、両極性のシステムになっており、図 13 に示したようにビームをリングの内側、または外側のどちらにも蹴り出すことができる。図 17 に速い取り出しの分岐部を示す。ビームの進行方向は写真奥から手前である。中央のダクトが周回ビーム、向かって右側はリングの内側で、ニュートリノ施設の一次ビームラインである。左側はリングの外側で、アポートビームラインである。

ニュートリノビームラインに取り出された陽子ビームは、超伝導磁石を含むアーク部を通過して標的に衝突し、パイ中間子を生成する。このパイ中間子がミュオンに崩壊するとき発生するニュートリノがSKに送られる。

一方、リングの外側に蹴り出されるビームはビームアポートラインに導かれ、容量 7.5 kW のビームダンプに捨てられる。このビームアポートラインは、主に加速器の調整運転に用いられるが、実験施設にビームを供給する運転モードにおいても、機器に異常が生じた場合にビームを実験施設に取り出すことなく捨てるために用いられる。

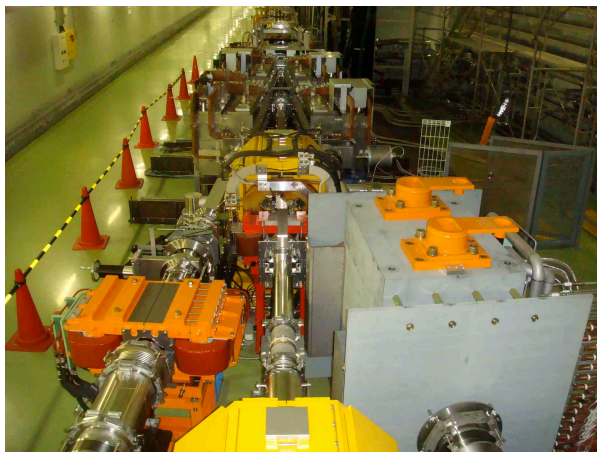


Fig. 17 速い取り出しの分岐部

5.2.6. 遅い取り出し

遅い取り出しは、ハドロン実験施設にビームを供給する。MR から取り出された陽子ビームはビーム輸送系を通過してハドロン実験施設の最上流部に設置された標的に衝突し、K 中間子や π 中間子などの二次粒子を生成する。ハドロン実験施設ではこれらの二次粒子を用いて素粒子・原子核実験が行われるが、粒子の識別やエネルギーの測定には同時計測法 (coincidence 法) が使われる。その際、同時に検出器に入る粒子の数が多すぎると同時計測の結果が目的とする物理反応の同一事象に起因するものかどうかの判別が困難になるため、周回する陽子ビームを秒単位の長い時間をかけて均一なビーム強度で取り出して標的に照射することが重要である。ハ

ドロン実験施設へのビーム供給に遅い取り出しが用いられるのはこのためである。

遅い取り出しは、ビーム軌道上に非線形磁場があるときに、特定のベータatron振動においてビームが不安定になり振幅が増大することを利用して取り出し法で、共鳴取りだし (resonance extraction) とも呼ばれる。非線形磁場が存在する場合、ビームの水平方向、垂直方向のベータatron振動数 (ν_x, ν_y) が次の条件をみたすと共鳴を起こしてビームは不安定になる。

$$k\nu_x + l\nu_y = n \quad (5-4)$$

ここで、 k, l, n は整数である。 $|k|+|l|=m$ のとき、 m を共鳴の次数と呼ぶ。

MR では、遅い取り出しに 3 次共鳴が利用される。MR のアーク部には、遅い取り出しのために 3 次共鳴を励起する六極電磁石 (共鳴六極) が 8 台設置されている。また、遅い取り出しの直線部には、2 台の静電セプタム、10 台のセプタム磁石、4 台のバンブ電磁石が配置されている。ビームが 30 GeV まで加速されると、共鳴六極によって 3 次共鳴 $3\nu_x = 67$ を励起し、さらに四極電磁石のうち QFN と呼んでいるアーク部におかれた 48 台のファミリーの磁場強度をゆっくり上げて、 ν_x を徐々に励起した 3 次共鳴線に近づけていく。その結果、リングを周回する陽子ビームは次第に振動が不安定な領域に入って振幅が増大し、静電セプタムを通過する際にその静電場によってリングの皮剥きのようにベータatron振動の振幅の大きな粒子から周回軌道はずれていく。周回軌道はずれた陽子は、下流に位置するセプタム磁石群によってハドロン実験施設に通じるビーム輸送路 (スイッチャードと呼ばれる) に導かれる。4 台のバンブ電磁石はこの取り出しが最も効率よく行われるバンブ軌道を作るために用いられる。また、利用実験のためには、取り出されたビーム (スピン) の強度を一定にすることが必要である。そのために、2009 年の秋以降は、高速応答を有する 3 台の四極電磁石と DSP を用いた制御系

からなるスピルフィールドバックシステムが稼働している。

6. 実験施設

6.1. MLF

MLFの全体構造図を図18に示す。MLFには、二次粒子としてのミュオンを利用するミュオン実験エリアと、中性子を利用する中性子実験エ

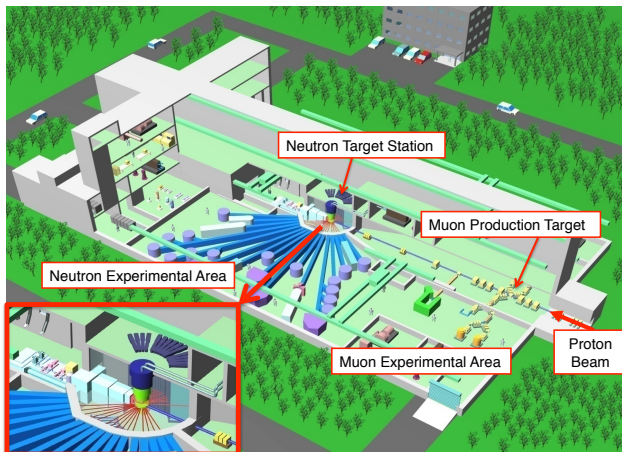


Fig. 18 MLFの模式図

リアがあり、物質・生命科学を中心に広い分野の研究が行われる。

RCSから取り出された陽子ビームは、約300mのビーム輸送系(3 GeV to Neutron Target Beam Transport, 3NBT)を通してMLFまで輸送され、まずミュオンを発生する厚さ20mmのグラファイトターゲットに入射する。これにより生成した π 中間子が崩壊して得られるミュオンは四方に配置される二次ビームラインで取り出され、実験エリアに導かれる。ミュオン生成ターゲットを通過した陽子はさらに30m下流に設置された水銀ターゲットに入射され、水銀原子核の核破砕反応によって中性子を発生する。発生した中性子は、液体水素で冷却されたモデレータによって中性子散乱実験に利用できるエネルギーまで減速された後、合計23本の中性子ビームラインを通して中性子実験エリアの各種実験装置群に導かれる。

ビームラインの整備は順次進んでおり、2010年夏前の運転では、中性子ビームライン12本、ミュオンビームライン1本が稼働している。

6.2. ハドロン実験施設

ハドロン実験施設の構成図を図19に示す。陽子ビームがT1標的に照射して生成されるK中間子、 π 中間子、反陽子などの二次粒子は、各二次ビームラインを通して実験エリアに導き出され、素粒子・原子核実験に用いられる。T1標的には、二次粒子の発生効率や標的の冷却性能などを考慮して、ニッケル、またはプラチナが用いられている。T1標的の下流には容量750kWのビームダンプが置かれ、標的物質と相互作用しなかった陽子が吸収される。

図19に示されたビームラインのうち、K1.8BRは2009年2月から、K1.8とKLは2009

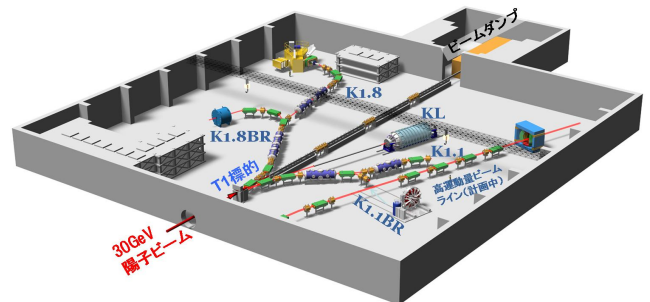


Fig. 19 ハドロン実験施設の模式図

年秋から実験を開始している。K1.1BRは2010年10月からビームコミッショニングを開始する予定である。

6.3. ニュートリノビームライン

ニュートリノビームライン(図20)は、長基線ニュートリノ振動実験であるT2K(Tokai-to-Kamioka)実験のためのビームラインである。MRから取り出された陽子ビームは、超伝導電磁石を含む一次ビームライン(neutrino primary beamline)を通してターゲットステーションに導かれ、グラファイトのターゲットに衝突する。これによって生成された大量の π 中間子は電磁ホーン3台によって並行

に収束された後、崩壊トンネル (decay volume) と呼ばれる長さ約 100 m の空間の中を飛行中にミュオンとニュートリノに崩壊する。このニュートリノが、約 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡の地下 1000 m にある水チェレンコフ検出装置スーパーカミオカンデ (Super-Kamiokande, SK) に送られる。崩壊トンネルの下流には、ビームダンプが置かれる。

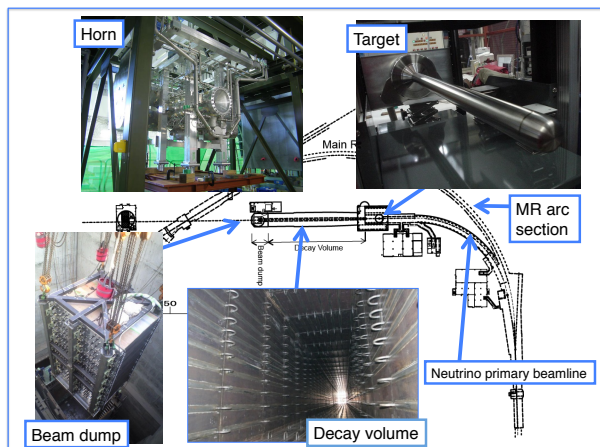


Fig. 20 ニュートリノビームラインの構成

MR の偏向電磁石では 50 GeV 運転のときに必要となる励磁量が 1.9 T となり、大型シンクロトロンに用いられる常伝導電磁石としては、ほぼ限界に近い磁場強度である。ニュートリノビームラインは、ニュートリノビームを SK に向けて送り出す必要があるが、MR から取り出された陽子ビームを SK の方角に合わせるには、約 100 m の曲率半径で 90° という、MR のアーク部よりもさらに大きい曲率で曲げなければならない。ニュートリノビームラインのアーク部分に超伝導電磁石が採用されているのはこのためである。ニュートリノビームラインの超伝導電磁石システムは、二極磁場 2.6 T と四極磁場 19 T/m を同時に発生することができる二極・四極複合磁場型 (combined function 型) 超伝導電磁石 28 台と 4.5 K で 2 kW の冷凍能力を持つヘリウム冷凍機から構成されている [12]。加速器用超伝導磁石で複合磁場型を実現している例は世界的にもめずらしい。図 21 にニュートリノビームラインのアーク部の一部を示す。



Fig. 21 ニュートリノビームラインの複合磁場型超伝導磁石

7. ビームコミッショニングと利用運転の現状

この章では、J-PARC 加速器のビームコミッショニング、および利用運転の現状について述べる。

リニアックは 2006 年 11 月から、RCS は 2007 年 9 月からビームコミッショニングを開始した。その後、2008 年 5 月から MR と MLF がビームコミッショニングを開始した。最も下流になるハドロン実験施設、ニュートリノビームラインのビームコミッショニングはそれぞれ 2009 年 1 月、2009 年 4 月に開始された。コミッショニング開始当初は、機器の放射化を防ぐために、調整はごく低いビーム強度で行った。すなわち RCS および MR は単バンチ運転で、バンチ当たりの粒子数は定格の 1 % である 4×10^{11} ppb (particles per bunch)、繰り返しも連続ではなくシングルショットを基本とした。その後、ビーム損失や残留線量に注意しながら、徐々にビーム強度を上げ、現在に至っている。

7.1. Linac/RCS の現状

Linac および RCS はスタディの進捗とともに、ビーム強度を増やし、2008 年の秋からは MLF が試験的な利用運転を開始した。ところが 24 時間の連続運転を開始した直後から、リニアックの

RFQで運転中に放電が多発して連続運転を継続できなくなるという問題が顕在化した。そこでRFQにおけるRFコンディショニング方法の見直しやイオン源からRFQまでの真空排気系の大幅な増強を行った。RFQは常時水素ガスが供給されるイオン源の直下流に位置し、差動排気系になってはいるものの運転中はイオン源からの水素ガスの流入が続いている。そこで、差動排気系の強化、イオンポンプの増設、クライオポンプの導入、in-situ bakingによる脱ガスの促進など、真空に関する対策は特に重点的に実施した[13]。2008年の共同利用運転開始以降、RFQの放電問題のためにRCSからMLFに供給するビーム強度は長らく20 kW（リニアックビームとしてはピーク電流5 mA、パルス幅0.1 msec）に制限されてきたが、真空系の改善とともに放電頻度は徐々に下がり、2009年11月には120 kWの連続運転を開始できるようになった。これはリニアックビームとしてはピーク電流15 mA、パルス幅0.2 msecである。

図22にMLFのコミショニング開始から2010年6月までにRCSからMLFに供給されたビーム強度の履歴を示す。2009年11月以降は積分ビームパワーが大幅にのびていることがわかる。共同利用運転開始当初は、2日ないし3日の連続運転の後にビーム運転を1日停止して、RFQに溜まったガスを取り除くとともに短パルスのRF電力を投入して空洞表面のコンディショニングを実施していたが、RFQの回復とともに少しずつ連続ビーム運転の日数を増やし、2010年6月の時点では2～3週間程度の連続運転が可能となっている。

RCSはMLFとMRに対して安定な連続ビーム供給を行っているが、その一方で、ビーム強度の増強に向けたスタディも継続している。2009年12月には、MLFに対して試験的に300 kWで1時間の連続ビーム供給に成功した[14]。これはRCSビームとしては 2×10^{13} ppp (particles per pulse)、リニアックのビームとしてはピーク電流15 mA、パルス幅0.5 msecである。この300 kW連続運転試験では、今後の課

題も一層明らかになっている。ビーム損失の低減は300 kWで24時間連続の本格的な利用運転を開始する前に実施すべき重要な課題である。特に入射部でビーム損失が大きいことが問題だが、これは荷電変換フォイルにおける周回陽子ビームの散乱が原因と考えられている。そこで、2010年の夏期停止期間中に、荷電変換フォイルを垂直方向のサイズが小さいものに交換する。ペインティング入射を行っている間のフォイルでの散乱回数を減らすことがねらいである。また、RCSの六極電磁石電源はシャットダウンされたKEKの12 GeV陽子シンクロトロン(KEK-PS)からリサイクルしたDC電源を使用しているため、色収差補正が完全に行われているのは入射エネルギーだけであり、加速とともに色収差が大きくなってベータトロンチューンのずれを引き起こしビーム損失が生じている。こちら、2010年の夏に六極電磁石電源を新しいパターン電源に交換する予定であり、秋の運転以降は入射から取り出しまでのすべてのビームエネルギーで色収差補正が可能となる。

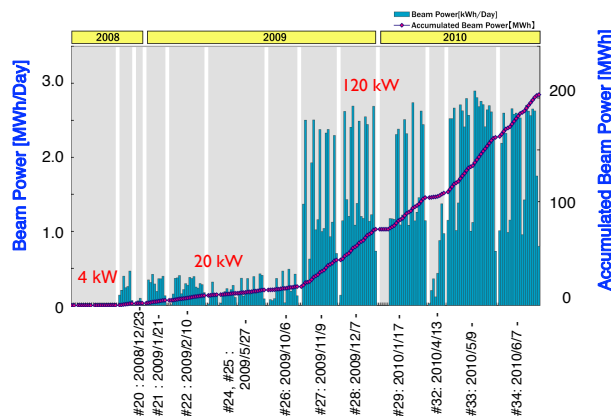


Fig. 22 MLFに供給された積分ビーム強度

7.2. MRの現状

7.2.1. 速い取り出し

2009年の4月にニュートリノビームラインのビームコミショニングが開始されて以来、MRの加速器スタディと並行してニュートリノビームラインの調整を進めてきたが、2010年1月からはT2Kグループが本格的な物理運転を開始し

た。夏期停止期間に入る直前の6月末までの間にニュートリノターゲットに供給された陽子数は 3.3×10^{19} である。この間のビームパワーは24時間の連続運転では最大50 kWで、これはKEK-PSの10倍以上の強度である。また、短時間のデモンストレーションとしては、100 kWで3分間程度の連続運転にも成功している。図23に100 kW運転における1サイクル(3.52秒)の陽子ビームの運動量変化、およびDCCTで測定された周回ビームの強度変化を示す。ニュートリノビームラインに取り出されたパルスあたりの陽子数は 7.5×10^{13} pppで、陽子シンクロトンにおける加速粒子数としては米国ブルックヘブン国立研究所(Brookhaven National

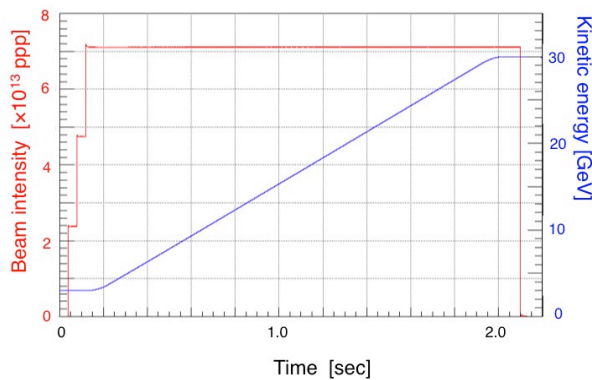


Fig. 23 速い取り出しの100 kW運転における周回ビーム強度と運動量変化

Laboratory, BNL)のAGS(Alternative Gradient Synchrotron)が持つ世界記録と同等である。入射時のビームロスの総量は100~200 Wで、ロスの場所はリングコリメータにほぼ集中している[15]。

2010年6月現在、100 kWで長時間の連続運転を行っていない理由は、速い取り出しキッカーのフェライトコアが大強度ビームの航路場(wake field)によって発熱し、コアの透磁率が変化することで蹴り角にドリフトが生じるためである。もともと2010年夏に速い取り出しキッカーを立ち上がりの速い新型キッカーに入れ替える計画であったが、新型キッカーにおいては、

ダンピング抵抗を用いたビーム結合インピーダンスの低減とコアの水冷システムを導入することにより、ビームパワーの設計仕様値750 kWまでは蹴り角のドリフトが生じないデザインになっている

7.2.2. 遅い取り出し

現在、MRの遅い取り出しにおける最大の課題は、取り出されたビームのスパイル構造をいかにして改善できるかである。MRでは5章で述べた主電磁石電源の電流リプルに起因して、30 GeVビームに対し ± 0.003 という大きなチューン変動が確認されている。このチューン変動のために、取り出されたビームスパイルにはスパイク状の強度変化が生じ、利用実験において大きな障害となっている。この問題の解決策については、現在も検討が続いているが、2009年秋以降、3台の四極電磁石を用いたスパイルフィードバックシステムが稼働を開始するとともに[16]、四極電磁石に取り付けられた補助コイルを短絡して磁場リプルを低減する試み等が成果を上げており[17]、スパイル構造は着実に改善してきている。

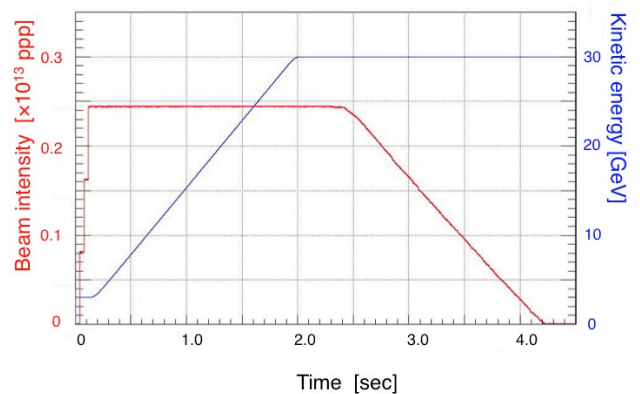


Fig. 24 遅い取り出しの1.9 kW運転における周回ビーム強度と運動量変化

図24に遅い取り出しによってビーム強度1.9 kWの利用運転を行った際の1サイクル(6秒)の運動量、および周回ビーム強度の時間変化を

示す。ビームは加速終了後、1.7 秒間をかけて取り出される。利用運転では、リップル対策として先に述べたスピルフィードバック、および四極電磁石 117 台の補助コイルショートを併用している。

8. おわりに

J-PARC 加速器のイントロダクションとして、施設の概要と現状を駆け足で述べた。

J-PARC の全体像と、各加速器のおおまかな特徴をつかんでいただき、以降の講義の理解に役立てていただければ幸いである。

JAEA の二川正敏氏、KEK の田中万博氏、小林隆氏、荻津透氏から図を提供していただいた。謝意を表したい。

参考文献

- [1] “Accelerator Technical Design Report for J-PARC”, KEK-Report 2002-13 and JAERI-Tech 2003-044.
- [2] 「大強度陽子加速器技術」OHO 01.
- [3] 山崎良成ほか「J-PARC 加速器」高エネルギーニュース, Vol. 24, No. 1 (2005) 11.
- [4] T. Koseki *et al.*, “Status of J-PARC Main Ring Synchrotron”, Proc. PAC07, p. 736.
- [5] 町田慎二 「空間電荷効果」OHO 2000.
- [6] K. Yoshino *et al.*, “Development of a DTL Quadrupole Magnet with a New Electroformed Hollow Coil for the JAERI/KRK Joint Project”, Proc. LINAC2000, p. 569.
- [7] Y. Mori *et al.*, “A New Type of RF Cavity for High Intensity Proton Synchrotron Using High Permeability Magnetic Alloy”, Proc. EPAC98, p. 299.
- [8] M. Yoshii *et al.*, “Recent Status and Future Plan of J-PARC MA Loaded RF Systems”, Proc. IPAC10, p. 615.
- [9] M. Kinsho *et al.*, Vacuum, Vol. 73, No. 2 (2004) 187.
- [10] 小関忠 「ビームコミッショニングを開始した J-PARC MR」高エネルギーニュース, Vol. 27, No. 2 (2008) 63.
- [11] 中村衆ほか「J-PARC MR における電磁石電源の問題点と対策」加速器 Vol. 6, No. 4 (2009) 292.
- [12] 荻津透ほか「J-PARC ニュートリノビームライン超伝導磁石システム」加速器 Vol. 6, No. 4 (2009) 335.
- [13] K. Hasegawa *et al.*, “Status of the J-PARC RFQ”, Proc. IPAC10, p. 621.
- [14] M. Kinsho “Status and Progress of the J-PARC 3-GeV RCS”, Proc. IPAC10, p. 627.
- [15] T. Koseki *et al.*, “Challenges and Solutions for the J-PARC Commissioning and Early Operation”, Proc. IPAC10, p. 1304.
- [16] M. Tomizawa *et al.*, “Status and Upgrade Plan of Slow Extraction from the J-PARC Main Ring”, Proc. IPAC10, p. 3912.
- [17] S. Igarashi *et al.*, “Magnetic Field Reduction of Main Magnets of the J-PARC Main Ring”, Proc. IPAC10, p. 301.