

■ 研究紹介

J-PARC 加速器

a) 日本原子力研究所東海研究所 b) 高エネルギー加速器研究機構

山崎 良成^{a)}、長谷川 和男^{a)}、鈴木 寛光^{a)}、富澤 正人^{b)}

2005 年 6 月 1 日

概要

J-PARC 第一期計画の加速器は 400MeV のリニアック、3GeV の速い繰り返しのシンクロトロン (rapid-cycling synchrotron, RCS)、50GeV 主リング (main ring, MR) シンクロトロンからなる。施設の建設は、2001 年度 (平成 13 年度) から 6 年計画で始められたが、現在は予算の関係から 2008 年度 (平成 20 年度) ビーム利用開始を目指して行われている。J-PARC 加速器では、その高いビーム出力を実現するために、磁性合金 (magnetic alloy, MA) を装着した空洞を備える高周波加速系、 π モード安定化ループ (π -mode stabilizing loops, PISL) を装着した RFQ リニアック、高周波チョッパーなど多くの新しい技術を開発した。これらの新技術を取り入れた加速器の建設状況を報告する。

1 序

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究所 (原研) が東海に共同で建設している大強度陽子加速器施設 [1-8] は、“J-PARC” (Japan Proton Accelerator Research Complex) と呼称されている。計画第一期の加速器建設は、2001 年 (平成 13 年) から開始され、当初は 2007 年 (平成 19 年) に終了する 6 年計画であったが、現在は予算の関係から 2008 年 (平成 20 年) 3 月終了の 7 年計画となっている。J-PARC 加速器複合体は、400MeV のリニアック、3GeV の速い繰り返しのシンクロトロン (Rapid-Cycling Synchrotron, RCS)、50GeV 主リング (Main Ring, MR) シンクロトロンからなる (図 1 参照)。

リニアックにおいては、ピーク電流 50mA でパルス幅 500 μ sec の負水素イオンビームを 400MeV まで加速し、繰り返し 25Hz で RCS に入射する。ここで、平均電流は

$$(\text{平均電流}) = (\text{ピーク電流}) \times (\text{パルス幅}) \times (\text{繰り返し})$$

で与えられ、625 μ A となる。リングへの入射においては、すべてのビームを RCS での加速位相と一致させる必要がある。従来一般的である断熱捕獲法では入射時のビーム損失が避けられないため、あらかじめリニアックでビームの

46% 分だけ間引き (chopping) しておく方法が採られている。間引き後の平均電流は 333 μ A となる。リニアック自身は、最大 50Hz での運転へ増強可能にしてある。すなわち、第二期で加速器駆動核廃棄物処理システム (Accelerator-Driven nuclear waste transmutation System, ADS) の基礎研究の予算が認可された時には、そのために残りの 25Hz が使えるよう増強可能にしてある。したがって、リニアック自身の潜在能力としては、1.25mA の平均電流が可能である。ADS のためには、さらに超伝導リニアックで 400MeV から 600MeV までビームを加速する。

RCS では平均 333 μ A のビームが 3GeV まで加速され、ビーム出力は 1MW となる。加速されたビームの大部分は、物質生命科学実験施設 (Materials and Life Science Experimental Facility, MLF) に送られ、主として中性子生成に使用される。そこでは、中性子のみならずミュー粒子も生成され、物質生命科学実験が行われる。すなわち、中性子源の上流に置かれたミュー粒子生成標的をビームが串刺しに通過し、10% がミュー粒子の生成に使用される。

RCS から取り出されたビームの一部は約 0.3Hz で MR に入射される。MR のビーム強度は、陽子数にして 3.3×10^{14} 個、平均ビーム電流にして 15 μ A となる。MR で加速されたビームは、遅い取り出し法でハドロン実験施設 (Hadron Experimental Facility) に供給される。そこではハイパー核実験 [6] や K 粒子稀崩壊実験などが予定されている。

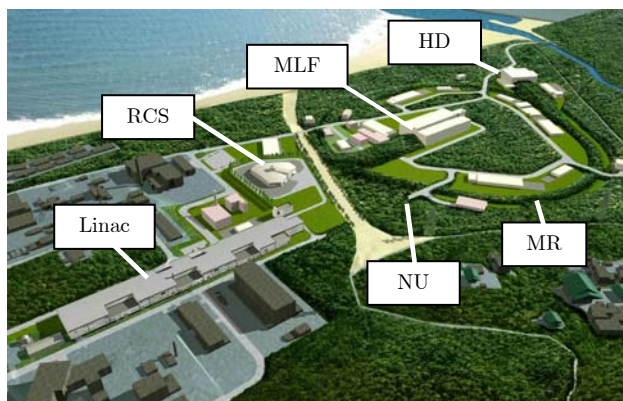


図 1 施設の完成予想図

一方、MR からの速い取り出しビームは、ニュートリノ生成に使用され、そのニュートリノは 300km 離れた SUPER KAMIOKANDE 検出器に送られて、長基線実験が行われる。この部分、ニュートリノ実験施設 (Neutrino Experimental Facility, NU) は、第一期に含まれていなかったが、2004 年度 (平成 16 年度) から 5 年で建設する計画が認可された。ただし、MR のエネルギーについては、第一期ではフライホイールシステムが予算化されなかったため、40GeV で運転される。さらに、HD ビームラインの設備能力の都合で、遅い取り出しビームのエネルギーは 30GeV となる。HD および NU は総称して原子核素粒子実験施設 (Nuclear and Particle Physics Facility, NP) と呼ばれる。

J-PARC 加速器の特徴については文献[7]に、設計については Technical Design Report (TDR) [8]に詳しいので、特筆すべきことのみを次節で述べ、その後、最近の J-PARC 加速器の建設状況を報告する。

リニアックのエネルギーについては、第一期で 400MeV とされていたが、以下のような事情で、当初は 181MeV で運転される。すなわち、RCS の空間電荷効果について十分な余裕を確保するため、RCS のビーム口径を当初の計画よりエミッタンスの値にして 1.5 倍としたのである。ここでエミッタンスとは、ビームのサイズと広がり積で与えられるパラメータで、その値が小さいほどサイズが小さく平行なビームとなる。こうして、空間電荷効果の大きさを表す量であるラスレット・チューン・シフト (Lasslette tune shift) の値が -0.16 という小さな値となった。その上、RCS に将来必要となりうる機器の装着が可能となるよう、その全周を 10/9 倍した。また、RCS へのリニアックからのビームの質を更に向上させ、その点でも余裕度をもたせた (第 3 節参照)。これらに充てる予算を手当てするため、リニアックのエネルギーを下げることにしたのである。それは、リニアックのエネルギーが 400MeV より低くても、RCS へビームを入射することができ、かつリニアックのエネルギーは後に増強することが可能であるが、リングの口径は一旦作ってしまうと増強不可能であるからである。一方、低いエネルギーでの入射では、空間電荷効果が大きく、ビーム強度を低くしてしまう。すなわち、リニアックのエネルギーが 400MeV から 181MeV に下がった結果、RCS、MR ともにそのビーム出力が約 60% に落ちると見積もられている。そのため、リニアックのエネルギーを当初の 400MeV に早急に回復するべく、努力が続けられている。一方、181MeV にリニアックのエネルギーが低下した場合の RCS の出力減少に伴い、RCS から MR へのビーム量を増やす入射方式も考え出され、第 5 節に述べるようにその検討も進められている。このようにリニアックのエネルギ

ーを 400MeV へ回復する努力と、新たな入射方式の検討を併行して進めることは、今年の加速器ならびに全体の国際諮問委員会からも求められている。

予算については、2003 年度 (平成 15 年度) までは、補正予算を加えることにより、ほぼ当初のスケジュール通りであったが、2004 年度 (平成 16 年度) 分から、計画は 1 年延伸となった。リニアックおよび RCS の建物はそれぞれ 2001 年度 (平成 13 年度)、2002 年度 (平成 14 年度) に契約され、ともに 2004 年度 (平成 16 年度) に一部を除いて、竣工した。一方、MR は 4 工区に分割されており、それぞれ各年度に契約され、設備を含めたトンネル・建物の竣工は 2006 年 (平成 18 年) 11 月末の予定となっている。

リニアックでは既に加速器機器の搬入、据付けが開始されており (図 2、図 3)、2006 年 (平成 18 年) 9 月のビーム試験開始を予定している。



図 2 現在のクライストロンギャラリーの状況



図 3 リニアックトンネルに取り付けが始まった導波管

続けて、RCS のビーム試験は 2007 年（平成 19 年）5 月の計画である。一方、MR では建物の全面竣工を待たずに、部分竣工した段階でトンネル床への墨入れや磁石の据え付けが開始される。最初のトンネル内作業を 2006 年（平成 18 年）の 7 月から始め、2007 年（平成 19 年）の 7 月から機器の調整運転を開始する予定である。RCS からのビーム受け入れは 2008 年（平成 20 年）1 月に予定され、その年の 3 月末に加速したビームをダンプに導くことを目標としている。また遅い取り出し開始は 2008 年（平成 20 年）9 月、ニュートリノラインへの速い取り出し開始は 2009 年（平成 21 年）4 月を目標としている。現在の建築状況を図 4 に示す。



図 4 現在の施設の航空写真

2 J-PARC 加速器の特色

J-PARC 加速器の加速器としての特色は、GeV エネルギー領域と数十 GeV エネルギー領域の両方で MW 級のビーム出力を実現する、という多目的性から生じている。MLF にビームを供給する RCS が、同時に 50GeV MR の入射器ともなっているのである。一方、米国の SNS (Spallation Neutron Source) 計画では、中性子源という単一目的の施設であるため、リングでは加速しない蓄積リング (Accumulator Ring, AR) とリニアックの組み合わせを採用している。

しかし、J-PARC において RCS 方式を選んだ理由が、その多目的性にあつたにしても、RCS 方式自身 AR 方式と比較して多くの長所を有し、結果として AR 方式の性能をしのごく可能性がある。このことを説明する前に、加速器の性能として重要なビーム出力について説明しておく。粒子を標的に当てることによって出てくる粒子を「二次粒子」と呼ぶ (J-PARC では、これが中性子であったり、 μ 粒子や K 中間子であったり、ニュートリノであったりする) が、これらそれぞれの二次粒子の生成効率 (陽子 1 個当たり出てくる二次粒子の数) は、標的の種類は最善のものを選ぶとして、後は陽子のエネルギーに依存する。一般に、ある

閾値までは、生成効率はまったく 0 であり、それをある程度越えればほぼエネルギーに比例する。1 秒当たりに生成される二次粒子の数は、もちろん陽子の数にも比例するから、ほぼ平均ビーム出力に比例することとなる。ここでビーム出力は、

(平均ビーム電流 W)

$$= (\text{ビームエネルギー } V) \times (\text{平均ビーム電流 } A)$$

で与えられるが、ビームエネルギーを eV でなく、V で表してある。これが加速器の性能をビーム出力の一言で表す理由である。

その上に、パルス中性子源からは、 $1\mu\text{sec}$ 程度のパルス状ビームで、出来るだけ高い瞬間ビーム出力が要請される。しかし、単位時間当たりにイオン源から出てくる陽子の数は限られているので、一周 $1\mu\text{sec}$ 程度のリングに 1msec 程度陽子を貯蔵して、その後一気にビームを取り出し $1\mu\text{sec}$ 程度のパルスビームにする。こうして、ビームを千倍程度濃縮する訳である。

陽子をリングに入射するには、陽子をリングの外からリングの中に蹴り込む必要がある。すると、既に入射されてリングの中を周回している陽子を同時に蹴り出してしまうことになる。それを避けるため、大量の陽子をリングに長時間にわたって入射・蓄積するときには、電荷が陽子と逆の負水素イオン (陽子に電子が 2 個) を入射し、入射した後、荷電変換薄膜を通し、陽子に変換するという方式を採用する。こうすることによって、周回している陽子に影響を与えずに新たに陽子を追加入射することが出来る。

一方、負水素イオンのエネルギーがあまり高くなると、リングに入射するために磁場で偏向させた場合、ローレンツ力で電子が剥ぎ取られてしまうので、せいぜい 1.3GeV 程度がリング入射の最高エネルギーである。したがって、蓄積リング方式の場合、ビーム出力を上げるためには平均ビーム電流を上げるしか方法がない。一方、RCS の場合、加速ができるので、入射エネルギーを低くし $3\sim 4\text{GeV}$ まで加速すれば、 1.3GeV と比べ、同じ電流なら $2\sim 3$ 倍のビーム出力、同じビーム出力ならば、 $1/2$ から $1/3$ のビーム電流で済む。これが RCS 方式の第一の長所である。

一方、陽子加速器の出力を制限する一つの大きな要因は、加速し損なったビームがこぼれて (ビーム損失)、加速器を放射化し、人間が近寄れなくなり、メンテナンスできなくなることである (加速器機器は非常に精緻に作られた多種多様なものからなっており、現在の技術ではロボットによるメンテナンスは不可能、またはコスト的に非現実的である)。この放射化の程度は、二次粒子の時と同様、こぼれたビームの出力に比例する。ところで、ビームは一旦リングに入ると比較的安定に周回するが、上述したように、ビーム入射はかなり無理をする過程であるため、ビーム損失

が避けられない。多くの場合、入射時のビーム損失がビーム出力を決定する。その場合、入射エネルギーが低いと、放射化が少なく、より多くのビーム損失が許され、RCSが有利である。これが RCS 方式の第二の長所である。

このように、RCS 方式に多くの長所がある一方、新しい開発を必要とする要素も存在する。その第一が「速く加速する」、すなわち単位長さ当たりの加速電圧を大きくする必要があるのである。この問題が MW 級の SNS などに採用されなかった大きな理由となっている。これに対し、われわれのリング高周波グループは、すでに磁性合金 (magnetic alloy) を用いた加速空洞 (MA 空洞) を発明しており [9]、従来のフェライトを用いた空洞の数倍の加速電場を実現していた。その結果、ビーム出力 1MW の RCS を採用することが可能になったのである。

第二に、磁石 [10] も真空チェンバーも、ともに速く変化する磁場による渦電流の発生を極力抑制する構造にしなければならない。第三には、低エネルギー入射での空間電荷効果を軽減するために、大きなビーム口径の磁石を使用せねばならず、中でも入射系の設計、製作は多くの困難がある。第四には、多くの磁石ファミリー間の磁場振幅および位相を正確に制御する必要がある。以上述べた技術的課題をどう解決してきたかを第 4 節で紹介する。

RCS 自身の課題に加え、リニアックのビームにも、RCS への入射器として厳しいビーム性能が求められる。ビーム強度の達成とともに、小さい運動量広がり (J-PARC では $\Delta p/p < 0.1\%$) および低エミッタンス (J-PARC では $4\pi \text{ mm mrad}$) が求められるのである。これらは、RCS への入射時や加速時にビーム損失を 1% 以下に留める必要性から要求される。ここでいうエミッタンスは、いわゆる rms 値ではなく、99% のビームが含まれる領域である。また、RCS のビーム口径が大きいかかわらず、このような小さなエミッタンスが要求されるのは、小さなエミッタンスのビームで大きな口径にまんべんなくビームを分布させるためである (ペインティング)。

これらの高品質なビームの供給を考えると、リニアックの低エネルギー部でのビームの質の向上を図ることが重要となる。一度悪化したエミッタンスを改善することは、悪い部分のビームを削る以外は困難であり、またエミッタンス悪化の主因である空間電荷効果はエネルギーが低い程大きいからである。まず RFQ (radio-frequency quadrupole) リニアックに π モード安定化ループ (π -mode stabilizing loop, PISL) [11,12] を考案した (図 5)。また、横方向振動数に融通性を持たせるため、DTL (drift-tube linac) のドリフトチューブ内に装着する四重極磁石には、永久磁石ではなく、電磁石を使用することとした。一般に、低エミッタンスで大電流のビームを、エミッタンスの増大なく輸送し

ていくためには、ビーム進行方向にも横方向にも頻繁にかつ強い収束力を必要とし、そのためには加速周波数はなるべく高いことが望ましい。これは、高周波技術上も、放電限界や高周波機器のサイズの観点から望ましい方向である。しかしながら、その結果、加速管のサイズが小さくなり、ドリフトチューブも小さくなることから、その中に装着される磁石を電磁石にすることは非常に難しくなる。それに対し、電鋳法とワイヤーカッティング技術を組み合わせ、非常に小さく、空間効率のよい、水冷管路を備えたコイルを開発した (図 6) [13]。

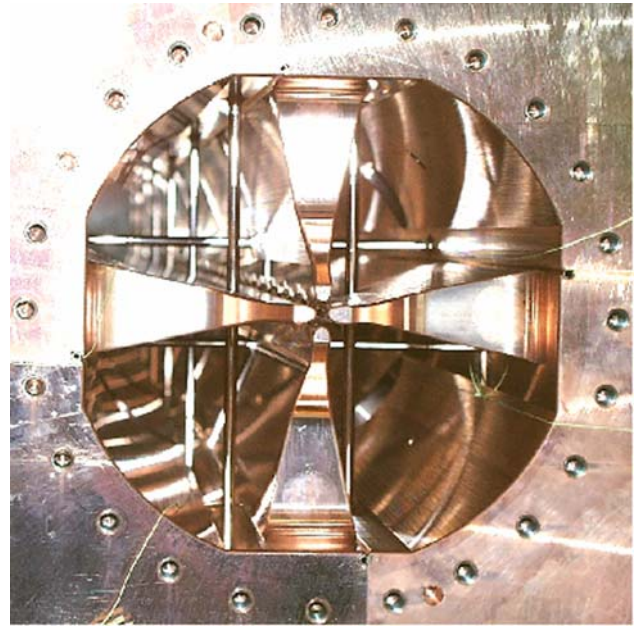


図 5 RFQ 内に装着された π モード安定化ループ 4 個の電極で四重極電場を作る。ロッドのように見えるのが PISL。

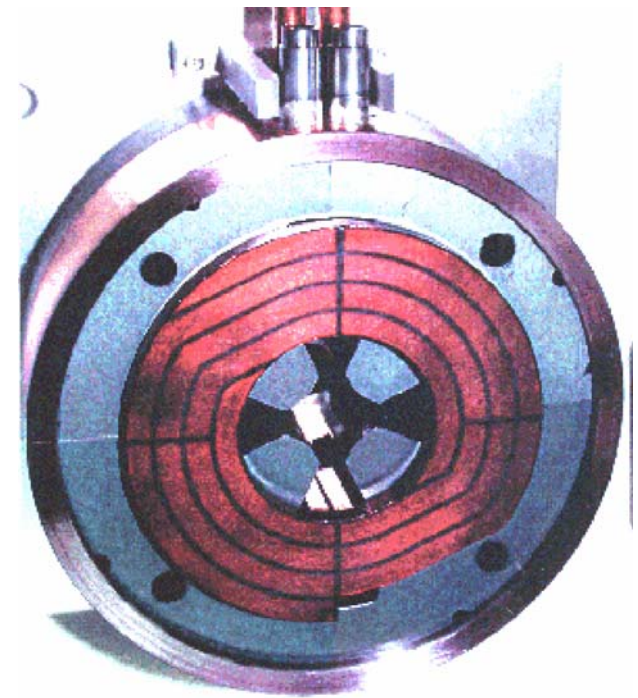


図 6 ドリフトチューブ内の電磁石とコイル

リングのビーム軌道（光学的）設計についていえば、遷移エネルギーを RCS では3GeV 以上の非常に大きい値、MR では虚数の値としてある[14]。普通の標準的なビーム軌道（光学的）設計を行うと、加速の途中でビームのエネルギー振動数がゼロになる点（遷移）を通過することになり、エネルギー振動が不安定になって、ビーム損失が避けられなくなる。したがって、加速途中に遷移エネルギーがないということは、それだけ加速中のビーム損失を低減できるということである。

それ以外にも、MR についていえば、ビーム損失を1% 以下に抑えながら、大電流の遅いビーム取り出しを行うのが最も解決困難な課題であったが、ビーム光学的な工夫と非常に細いワイヤーからなる静電セパタムを開発することにより、めどを得つつある[15]。

3 リニアック

電流やエミッタンスを決めるのは、まず先頭にくるイオン源であることはいうまでもない。J-PARC では体積生成型で、セシウムを添加するタイプと添加しないタイプの両方について開発を行っている。セシウムはプラズマ生成室内面で電子を付着させやすくする作用を持ち、負水素イオンの電流向上を図ることができる。現在のところ電流72mA が得られ、イオン源としての目標性能60mA 以上を達成した。しかしセシウムを添加することは、イオン源引き出し部分やRFQ での放電の可能性を高めることになる。現在までのところ、無添加型の場合でもプラズマ電極温度やプラズマ電極厚さなどの最適化の結果、ピーク電流34mA 以上を達成している。コミショニング時には安定な運転を優先し、セシウム無添加型を用いる予定である。セシウム添加でも安定な運転を実現できるか、あるいは無添加でも更に電流の向上を図れるか、最終目標の実現にいずれを選択するかは今後の開発に依存する。

J-PARC リニアックのスキームを図7 に示す。大電流の陽子を効率よく、かつ高い品質で加速するために、加速されるに従って大きくなる陽子の速度に、正確に構造を合わせる必要がある。イオン源で発生した負水素イオンは、高周波四重極型リニアック（RFQ）、ドリフトチューブリニアック（DTL, drift tube linac）、機能分離型 DTL（SDTL, separated-type DTL）、結合空洞型リニアック（CCL, coupled cavity linac）、超伝導リニアック（SCC, superconducting cavity linac）を用いて加速される。

RFQ は1970 年代に発明された構造で、高周波を使って横方向の収束を行うと同時に、粒子をバンチ（高周波加速に合うように集群すること）して加速を可能としたものである。次のDTL とのエネルギー配分を考えると、エネルギ

ーが高いほど DTL 内蔵の収束用磁石の磁場を弱くすることができ DTL としては望ましいが、RFQ では空洞が長くなり加速電場の安定化が難しくなる。J-PARC 用 RFQ は、KEK で発明したパイモード安定化ループを取り入れている（図5：これは SNS でも採用されている）。これは比較的長い RFQ でも電場を安定化することを可能とする技術であり、DTL で製作可能な電磁石仕様との兼ね合いを考慮したとき、大強度陽子リニアックとして最適なエネルギー配分を可能にした。

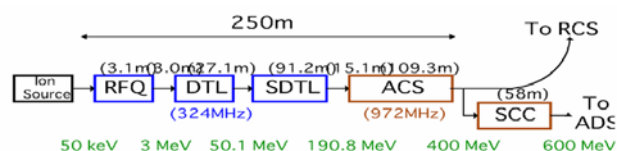


図7 リニアックのスキーム

RFQ (radio frequency quadrupole) 高周波四重極型リニアック

DTL (drift tube linac) ドリフトチューブリニアック

SDTL (separated-type drift tube linac) 機能分離型ドリフトチューブリニアック

ACS (annular coupled structure linac) 環状結合型リニアック

SCC (superconducting cavity linac) 超伝導空洞リニアック

次のDTL は、発明者の名前からアルバレ型と呼ばれることもある。高エネルギー加速器の入射器として多くの加速器で使用されており、高周波の周波数は200MHz がよく用いられてきた。空洞の中にはドリフトチューブと呼ばれる電極が内蔵され、ドリフトチューブの間をバンチされた粒子が通過するときに加速され、反対方向の電場のときにドリフトチューブ内で電場を感じないようにして加速してゆく。ビームはそのままでは発散してしまうため、収束用に、光のレンズに相当する四重極磁石（Q 磁石）がドリフトチューブの中に組み込まれている。ビームの質を落とさずに安定に加速するには、ビームの速度と加速構造の周期、空洞に加える高周波がすべて同期することが重要となる。このために、加速空洞やドリフトチューブの製作や運転時の温度変化などに伴う変形も含めた精度の確保、高周波系の安定性が要求される。

上述したように、陽子用 DTL の加速周波数は、200MHz 付近が一般的であった。しかし、加速周波数を高くすると、単位時間当たりのバンチ数が増え、同じ電流に対してバンチあたりの電荷を低くすることが可能となる。その結果、空間電荷効果（ビーム自身が持つ電荷の反発力）を抑え、エミッタンス増大を抑えることができる。さらに、300MHz を越えると、大電力高周波源として信頼性の高いクライストロンが使用可能となる。これらの点から、加速周波数を300MHz より高めるのが最近の傾向である。しかし、空洞やドリフトチューブの直径は周波数に反比例して

小さくなり、組み込む Q 磁石も小型にする必要が生じる。磁場を調整できる利点を持つ電磁石は、冷却水を通すためにホローコンダクターと呼ばれる銅のパイプを曲げてコイルを作ることが一般的である。パイプの大きさや曲げ半径から小型化には限界があり、周波数を 300MHz より高くすることは非常に困難であった。そのため、事実上、永久磁石しか選択肢がなくなり、前段部や後段部との調整が固定されてしまい、大強度ビームを取り扱うときの品質向上やロス低減に不安を残すこととなる。そこで、電鍍法とワイヤーカッティング技術を組み合わせて、非常に小さく、空間効率のよい、水冷管路を備えたコイルを開発した (図 6)。その結果、加速周波数 324MHz という小型の DTL でありながら、電磁石を使用することを可能にした (図 8)。

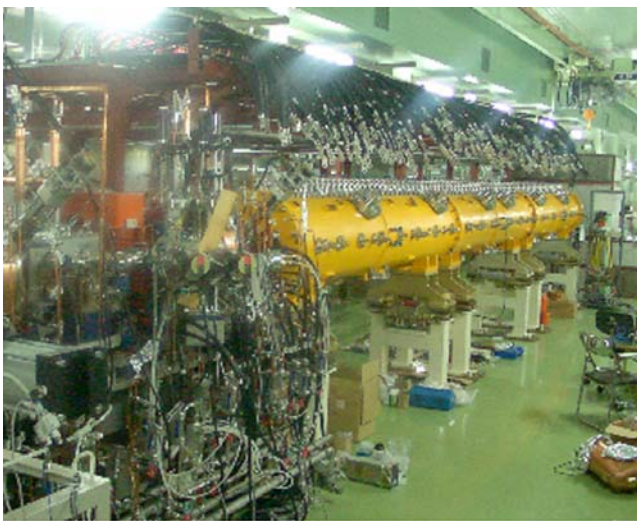


図 8 KEK でのビーム試験のために装着された DTL 第一タンク

SDTL は、加速原理自体は DTL と同じであるが Q 磁石を空洞と空洞の間に設置し、DTL より単純化を図った構造である。DTL と SDTL の空洞内面は、周期的に極性を反転した通電により滑らかな銅の析出を利用した PR (periodic reverse) 電鍍法を採用し、高い電気伝導度、低いガス放出率、熱に対する安定性、高い放電開始電圧など、加速空洞として良好な特性を実現した。SDTL は 32 台の空洞で構成されるが、その内 8 台の大電力試験を終了した。そのうちいくつかは、定格電力の 3 倍以上まで試験を行い、耐電力性能が非常に高いことを実証した。

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、加速効率 (加えた高周波電力に対する加速エネルギー) が低下するため、190MeV 以上では CCL に切り替える。陽子リニアックには普通、加速する空洞と高周波エネルギーが伝播する空洞 (結合空洞と呼ばれる) を組み合わせた CCL が使用され、これまでに多くの構造が提案されてきた。J-PARC では、軸対称性がよく

エミッタンス悪化が小さい環状結合型空洞 (annular coupled structure, ACS) を初めて採用することにした。この構造は、1974 年にロシアで提唱されたが、高周波特性の研究が未熟であったため長く実用化されなかったものを、1990 年に KEK が開発に成功したものである。現在はロシアの核研究所 (Institute for Nuclear Research, INR) との共同研究で更に改良を加えたものを採用している。また、更にエネルギーの高い部分には、空洞による高周波損失が少なく、デューティの高い加速構造が必須となる核変換用の加速器技術開発として超伝導リニアックを採用し技術開発を進めている。

RFQ および DTL の第一空洞 (約 20MeV) までのビーム加速試験は、KEK の陽子リニアック棟において実施した。その結果は、第 6 節で述べる。

4 RCS

ビームを加速するための装置は高周波加速装置と呼び、大電力の高周波源と高周波加速電場を発生する高周波加速空洞からなる。RCS では、10 台の高周波加速空洞を使用し、合計で最大 430kV という加速電圧を発生させる。加速電圧および加速周波数 (1.2MHz から 1.7MHz) は入射時から出射時まで一定のパターンで変化させる必要がある。このように加速電圧および加速周波数を変化させるためには、特殊な加速空洞が必要となる。通常、陽子のようなイオン加速器では、フェライトを使用した加速空洞が採用されることが多いが、RCS では限られたスペースで大きな加速電圧を得る必要があるため、ファインメットという特殊なテープをコイル状に巻いた MA を使用することにしたのである。これで、フェライトに比較して飽和磁束密度が大きく、小さなスペースで大きな高周波電力を入力できるため、高電圧を発生させることが可能となる。従来のフェライト空洞に比較して、10 倍近い高電場勾配を生成することができる。この MA 空洞なくしては、高ビーム出力 RCS は不可能であったと言っても過言ではない。ただし、単位体積当たりの消費電力が大きいため、容器に収め冷却水により直接冷却することが必要である (図 9)。

さらに、その極めて低い Q 値のために (場合によっては 1 以下も可能)、周波数同調系の必要がなく、高周波制御系が著しく簡素化できる。しかしながら、この Q 値が極めて低いにも関わらず、分流抵抗 R が実用になるほど高いということは、 R/Q が極めて高いことを意味し、空洞での蓄積エネルギーが極めて低いこととなる。その上、 Q 値が低いのであるから、極めて広帯域のビーム負荷補償系が必要となる。これは言わば、空洞がほとんど純粋抵抗に近く、ビームの作る逆電場をそのままの形で相殺する必要がある

ということである。その結果、非常に広帯域の大電力高周波源を開発する必要がある。不必要に広帯域の系にすることを避けるため、リングの特性に応じて Q 値と共振周波数を最適化する。そのために MA コアを切断してギャップを設けるのである。RCS では、入射エネルギーを当初 181MeV としたため、 $Q=2$ が必要で、ギャップが 1mm 程度となっている。

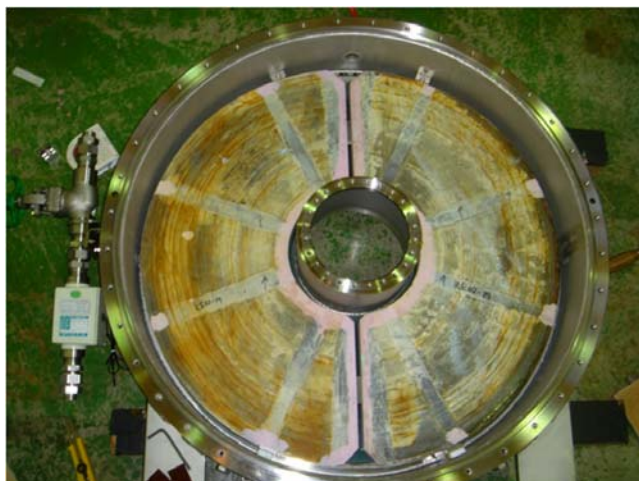


図9 ギャップのあるファインメットコア

加速器において真空ダクトは、ステンレス材、アルミ材を用いることがほとんどであるが、RCS においては電磁石がない通常の区間はチタン材、電磁石の存在する区間はアルミナセラミックス材を使用している。チタンは、アウトガスが小さく超高真空材料として適していること、ステンレス材に比較して放射線による放射化が小さくメンテナンス時の放射線被曝が低減できること、密度が小さいため軽く取り扱いやすいことの利点があり採用することにした。一方、電磁石の部分にアルミナセラミックスを採用したのは以下の理由による。この RCS では 25Hz で磁場が変化するので、金属の場合には、渦電流による発熱のため真空ダクトを冷却する必要が生じるとともに、渦電流による磁場の歪み自身も問題となる。そのため、非金属で耐放射線性に優れ、アウトガスの少ないアルミナセラミックスを採用することとした(図 10、図 11)。渦電流は抑制しなければならない一方、ビームが誘起する電磁波を真空ダクト外に放出させないように、RF シールドと呼ばれるストリップライン状の銅を、セラミックス真空ダクト外面に電鍍法と呼ばれる特殊なメッキ法で取り付けている(図 10)。放射線被曝低減の観点から、真空システムとしてのメンテナンスを極力低減しながら超高真空 (1×10^{-7} Pa 目標) を達成する必要があり、耐放射線性に優れた材料を選定することだけでなく、表面処理、ベーキング処理などに配慮した設計を行っている。

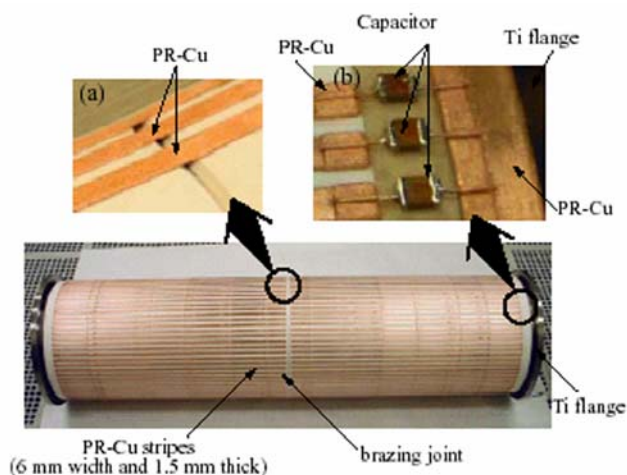


図 10 QM 用セラミックス真空ダクト



図 11 BM 用セラミックス真空ダクト

ビームを入射、周回、出射するために、様々な種類の電磁石が用いられる。まず主電磁石として、24 台の偏向電磁石 (bending magnet, BM) (図 12)、60 台の四極電磁石 (quadrupole magnet, QM) (図 13) がある。BM はビームを偏向させ、リング状の閉軌道を周回させるために使われる。QM はビームを収束、発散させ、閉軌道の周りに安定に振動させる (ベータトロン振動と呼ばれる) ための磁石である。ちなみに、一周当たりのベータトロン振動数をチューンと呼ぶ。第 1 節に述べたラスレット・チューンシフトとは、収束力が空間電荷効果のクーロン反発力で打ち消され、収束が弱くなった結果、振動数が下がる量を表している。



図 12 RCS の BM

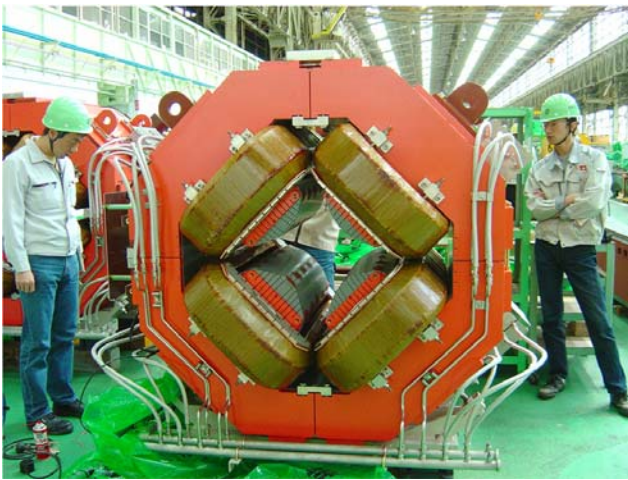


図 13 RCS の QM

これに加えて、色収差（クロマチシティ）補正のための 18 台の六極電磁石が、軌道補正のために 54 台のステアリング電磁石が用いられる。前者は、ビームのエネルギーの広がりによって、QM の収束、発散力がわずかに異なり、チューンが異なることとなるので、エネルギーによらず一定のチューンにするためのものである。BM、QM、六極電磁石は、渦電流およびヒステリシス損を抑制するために、厚さ 0.5mm の無方向性珪素鋼板という特殊な鉄材をヨークに使用している。

その上、BM、QM の渦電流低減のために、以下の手立てを行っている。まず、コイルにはアルミ・ストランド線を使用して、渦電流による温度上昇および熱損失の低減と、回路網の Q 値の劣化を抑制している。次に、鉄芯には厚さ 0.5mm の積層シリコン鋼を使用し、芯縁および縁板には細い溝を加工してある。さらに、磁場の集中と飽和を避けるため、ロゴスキー状の外縁処理を施してある。渦電流効果の低減に関しては、計算機による解析に加え、BM および QM の試験機を製作しての実験を通じ、最適化を行ってきた。このような渦電流低減による交流損失の低減は、電磁

石系の安定な運転にとって特に重要である。電磁石系は BM の 1 個を含め全体で 8 個の回路網から成り立っており、その間の位相安定性の確保には回路網の Q 値を出来るだけ高く保持する必要があるからである。

コイルの含浸材には、通常エポキシレジンが使用されるが、ここでは放射線による劣化を低減するため、100MGy 以上の耐放射線性を持つ BT レジンというポリイミド系樹脂を用いることにした。しかしながら、アルミ・ストランド線へのポリイミド樹脂含浸は困難を極めた。それは、ポリイミド樹脂は非常に流れ難い性質を持っているからである。多くの試験の結果、真空含浸した上に圧入して、最終的には図 14 に示すごとく、ポリイミド含浸アルミ・ストランド線コイルの製作に成功した。



図 14 ポリイミド樹脂を含浸してコイルに成形されたストランド線の断面図

ビーム入射には、セプタム電磁石、パンプ電磁石が必要である。セプタム電磁石は、リニアックからのビームを RCS の周回軌道に近づけるための電磁石でヨークには電磁軟鉄、コイルにはホローコンダクターに BT レジンを含浸したものを使用する。パンプ電磁石は RCS の入射方式の特徴であるペインティング入射を行うための電磁石である。ペインティング入射とは、上述したように、リニアックからのエミッタンスの小さいビームを RCS の有効アパーチャー全体に様に分布させ、空間電荷効果によりビームが広がる力とを極力抑えるための入射方式である。この結果、ビーム損失が低減できることになる。

ビーム出射用には、キッカー電磁石とセプタム電磁石を用いている。キッカー電磁石は、RCS を周回しているビームに小さなキック力を与えて、軌道を外側へずらし、次のセプタム電磁石でビームを取り出しやすくするために使用される。キッカー電磁石は、300nsec 以下の磁場の立ち上がりが要求されるため、ヨークとしてフェライトを使用している。

第2節で述べたように、これらすべての電磁石に共通して言えることは、大電流陽子ビームの損失を抑えて輸送するために、極めて大きな口径となっていることである。たとえば、四極電磁石の最大口径は410mmで、通常の加速器と比較して数倍から十倍程度大きなものとなっている。そのため、フリンジングフィールドと呼ばれる磁石の両端の磁場の効果が従来の加速器と比べて極めて大きく、慎重な取り扱いが必要である。現在、これらの効果を取り入れたビームシミュレーションを行っている。

以上の電磁石を励磁するための電磁石電源は、通常DC電源とパルス電源に大別されるが、RCSの主電磁石電源は正弦波ACとDCを重畳するという特殊な電源になっている。リニアックから入射されたビームは3GeVへと加速されるにしたがって速度が増し、必要な励磁電流も4倍程度まで増加する。このように最大数千アンペアにも及ぶ励磁電流を25Hzで変化させるために、共振電源を採用することとした。LC共振回路により発生したAC電流をDC電流に重畳して、このような電流制御を行う。

一方、入射用セプタム電磁石、出射用セプタム電磁石はそれぞれ一定エネルギーのビームを偏向させるため、DC励磁でよい。しかし、バンパ電源は、入射時の荷電変換薄膜の温度上昇を低減するために、ビームの薄膜通過回数を極力減らす必要があり、入射終了後直ちに磁場を下げねばならない。その上、入射系が大口徑の電磁石に対応せねばならないので、非常に大掛かりな電源になってしまう。最大励磁電流は30kAを超え、電圧も数kVになるため、スイッチング素子としてはIGBTを多段かつ並列に接続している。キッカー電磁石においては、電流の立ち上がりとして100nsec以下、最大電流4000A、パルス幅1.2 μ sec、インピーダンス10 Ω という特殊な電流波形を発生させるため、同軸ケーブルに充電した電荷をサイクロトロンという高速のスイッチング素子で一気に放電させる方式を採用している。

大強度陽子ビームの特徴として、装置の放射化は不可避の問題であるが、できるだけ放射化を少なくすることと、ビーム損失箇所を局在化して局所遮蔽を行うことが重要となる。そのための装置がビームコリメータである。ビームコリメータの部分では、ビームの通過する領域を他の箇所よりも小さくし、ビーム損失の原因となるハロービーム部分を吸収するように設計している。許容設計値をはずれたエネルギーをもつビームの損失と、ビームサイズが設計値よりも大きくなるのが原因で発生するビーム損失を機能的に分離して、それぞれに対応するコリメータを配置している。この装置により、ビーム損失の98%はビームコリメータで損失し、わずか2%だけがRCSの全周での損失になる。ビームコリメータの部分は放射化が大きいため鉄やコ

ンクリートの遮蔽体で覆い、他の装置および近くを通る作業員への放射線被曝が少なくなるよう設計している。

ビーム位置を測定するためのモニタはビーム位置モニタ(BPMと略す)と呼ばれ、全周に54箇所配置されている。ビームの通過する位置は各電磁石の中心でレファレンス軌道上であるが、電磁石の磁場誤差、設置誤差などによりレファレンス軌道からずれた位置を通る。これをBPMで測定し、補正電磁石の励磁量を調整することにより、設計軌道上に近づける。もっとも影響を受ける誤差としては四極電磁石の設置誤差であることが計算上わかっているため、BPMも補正電磁石も四極電磁石の近傍に配置される設計となっている。モニタとしては、この他にマルチワイヤモニタ、残留ガスとの相互作用を用いたモニタ、ストリップラインモニタなどがあり、使用条件・目的で台数や設置場所が定められている。ビームの強度を測定するモニタとしては直流電流値を測定するDCCT(current transformer)、パルス電流値を測定する高速CTがある。大強度陽子加速器のビームモニタとして、どこでビームが損失したかを特定し、ビーム損失の原因追求用ビーム損失モニタの役割も重要である。RCSではビーム損失モニタを全周に60台程度設置している。

5 MR

RCSから取り出されたビームはパルス偏向電磁石によって、MRとMLFへ振り分けられる。この磁石はMR行きのビームのときに励磁され、MLF行きのときは磁場がゼロになる。

パルス電磁石の下流には、ビームの x/y 方向のハローを削るためのコリメータセクションがある。このセクションではベータトロン振動の位相の進みが120度のセルが6つ続く。このセクションでは、規格化された位相空間上でビームを正六角形に削るだけでなく、正六角形の角の部分も削り落とす設計となっている。コリメータの下流には、放射線遮蔽とRCS側とMR側の空気の流れを遮断するための隔壁がある。隔壁の下流でビームラインはMRのレベルに合わせるために約80mかけて4.3m下側に下げられる。RCSからMRへのビーム輸送系(3-50BTと呼んでいる)の全長はおよそ230mである。

一般にビームが加速されると、そのエミッタンスは断熱減衰する。RCSの入射時にペインティングによって広げたエミッタンスが3GeVまでの加速によって $36\pi\mu\text{rad}$ となる。1.5倍のエミッタンス増加を予想し、取り出しビームのエミッタンスは $54\pi\mu\text{rad}$ と仮定し、3-50BTのコリメータでそれ以上に分布したハローを削り落とす。3-50BT自身はコリメータの前でこの4倍、コリメータの下流では2倍程度のア

クセプタンス（通過しうるビームの最大エミッタンス）を持たし、コリメータ以外でのビーム損失を最小化している。リングのアクセプタンスは入射軌道も含めて $81\pi\mu\text{rad}$ 以上が確保されている。ちなみにダイナミックアパーチャ（真空ダクト径などで制限される物理的なアクセプタンスでなく、軌道安定性から計算される、安定に周回しうるビームのエミッタンス）はアクセプタンスの2倍程度確保されている。空間電荷効果などによるMR入射後に発生するハローはリング内のコリメータで削り落とす。

MRは周長1567.5mの3回対称性をもつおむすび型のリングで、一つの曲線部、直線部の長さはそれぞれ406.4m、116.1mである（図15）。RCSからMRへのビームの入射方式を図16に示す。

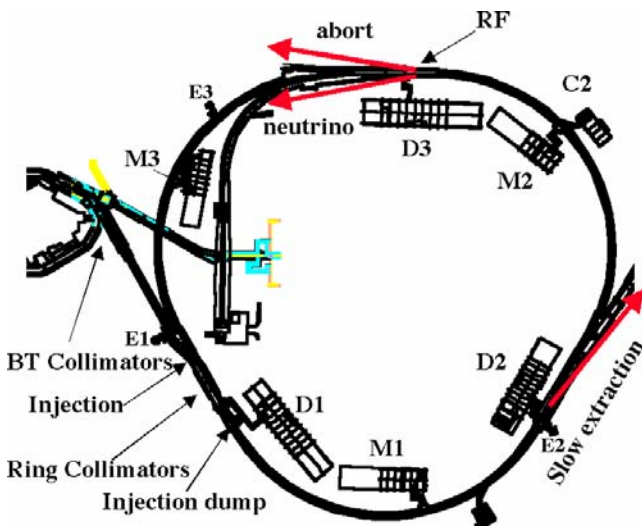


図15 MRの構成図

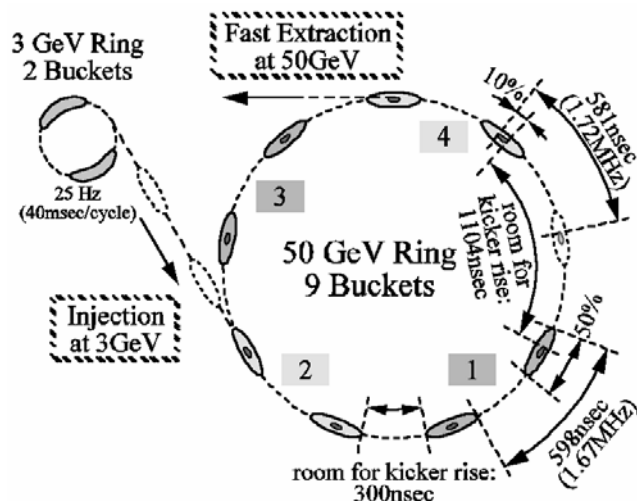
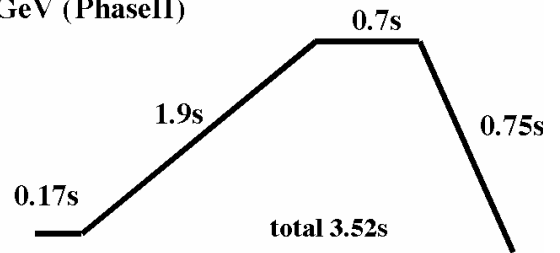


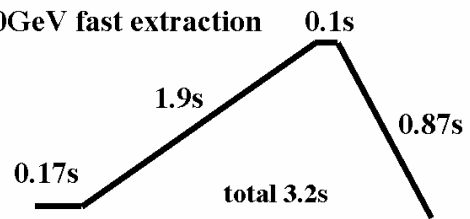
図16 RCSからMRへの入射とMRからの速い取り出し

40 msecごとにRCSで加速された二つのビームバンチを4回繰り返して入射し、8つのバンチをMRに蓄積する。残りの一つのバケツは取り出しキッカーの立ち上がりのために空けてある（図16）。図17にMRの運転パターンを示す。（a）は50 GeV加速の場合の標準パターン、（b）は40 GeV加速の速い取り出し運転のパターンで、ここでは製作済みの電磁石電源トランス負荷への余裕を配慮して周期を3.2秒としている。（c）は30 GeVの遅い取り出し運転のパターンである。（c）の場合にフラットトップ時間を2〜3秒延ばすことができる見込みである。

(a) 50 GeV (Phase II)



(b) 40 GeV fast extraction



(c) 30 GeV slow extraction

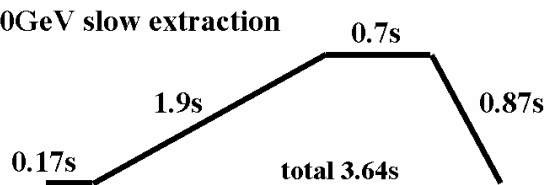


図17 MRの運転パターン

偏向電磁石は、89.381mの曲率を持つ全長5.85mの電磁石であり、最大磁場1.9Tが可能で、全部で96台ある。四極電磁石は11ファミリーから構成され、磁極長は0.86〜1.86m、口径は130〜150mmまであり、全台数は216台である。六極電磁石は三つのファミリーからなり、全台数は72台で、加速後のエネルギーでもクロマチシティをゼロにすることが可能である。ステアリング電磁石は四極電磁石の隣に置かれ、加速中・加速後の補正も可能となっている。図18にアーク部の一セルのすべての電磁石が並んでいるモックアップを示す。二次・三次の共鳴補正のために、四極電磁石の補正コイルやクロマチシティ補正用六極電磁石の補正コイルを利用することが計画されてい

る。また $x-y$ カップリング補正のためのスキュー四極電磁石や四次の共鳴を補正する八極電磁石の導入も計画されている。電磁石のコイルの含浸材には、ここでも BT レジンが使われている。電磁石電源は、IGBT/IEGT 素子を用いた力率制御型パターン電源で、無効電力がほとんど発生しない。またこの電源ではリップルを極めて小さくできるのが特徴である ($\leq 1 \times 10^{-6}$)。



図 18 アーク部のモックアップ
—セルのすべての電磁石が並んでいる。

加速空洞と電源 (図 19) の構成の大部分は RCS と共通となっている。MR では 6 台の MA 空洞で 280kV の電圧を発生させ加速を行う。基本波の周波数範囲は 1.67 ~ 1.72 MHz であり、RCS と比較して変化量が少ないので、空洞の Q 値はビーム負荷を考慮して、10 ~ 20 が選ばれている。この場合 MA のカットコアのギャップ間隔はおよそ 10mm 程度となり、RCS のものと比べると冷却水の流路は確保し易い。



図 19 MR 用加速空洞と最終段増幅器

RCS からのビームバンチを MR の RF バケツに捕獲する際は、四重極振動を起こさないためのバケツマッチングの他にも以下のような大強度ビームへの対策が施されている。設計値のビーム強度においては、MR の入射時の空間電荷チューンシフトを 0.17 程度まで抑えるために、入射ビームのバンチ長を長くしておく必要がある (バンチングファクターにして 0.3 程度)。このために RCS の出射時に RCS の高周波空洞に二次の高調波を加えバンチ長を長くする。また加速後のビーム不安定性を起こさないために、縦方向のエミッタンス (エネルギーの広がり とバンチ長の積) が $10 \text{ eV} \cdot \text{sec}$ 程度にする必要がある。この三倍程度のエミッタンス増加は位相・電圧のパターン制御や変調によって行う。MR の主な真空ダクトには SUS316L 材が採用されている。内面は電解研磨の後、酸化膜処理を行いプリベーキングがなされている。その結果ガス放出量を $1 \times 10^{-8} \text{ Pa m}^3 \text{ sec}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 程度まで抑えることが可能となり、イオンポンプを 25m 程度の間隔に設置した場合に真空は 10^{-6} Pa 以下まで到達することが期待される。ベローには伸縮性のよさからチタン材が用いられている。排気ポートは両端にベローを直結させる構造を持ち、材料はチタン材を用いる。真空ダクトの両端部で断面形状を変える必要がある場合は、ビーム方向にスムーズに形状を変換する部分を設けビーム不安定性の原因となるインピーダンスを抑える対策をとっている。また同じ理由でベローの内側には RF コンタクトが取り付けられている。真空フランジは、短時間で着脱できるクランプチェーンで締める方式を採用している。また軽量化チェーンのコマはアルミ製である。真空シールには、ヘリコフレックスのデルタタイプを使用する。このシールは金属 C リングの中にスプリングの芯が入っている。当たり面にはアルミの突起がついており、必要な締め付け力を低く抑える役目を果たしている。

ビーム位置モニタ (BPM) はほぼすべての四極電磁石に隣接するステアリング磁石の磁極中に置かれる。四極電磁石の真空ダクトに直結する方式のため、位置調整に関して制限が厳しいので、BPM の精密位置出しは行わず、ビームを使って直接、四極電磁石の中心からのずれを測定する。ビーム損失の低減が重要な加速器にとって、ビーム損失がどこでどの程度発生しているかを知るためのビーム損失モニタの役割はここでも重要である。高速反応性と高いゲインを持つ比例計数管型を約 300 台、一般的に用いられる電離箱型も 40 台程度設置する予定である。強度モニタは DCCT やバンチごとの強度を測定するための CT が用意される。また RF の $\Delta\phi$ フィードバックやキッカータイミング用の壁電流モニタが必要となる。ビームプロファイルモニタはいくつかのタイプが検討されている。現在ビーム試験中のシートビームモニタは、製作コストが高いという難点をもつが、数バンチごとのプロファイルを測定でき空間

電荷の影響を受けないという特徴を持っている。低いビーム強度にたいしてはフライイングワイヤ型や残留ガス型も有効と考えられる。3-50BT 入射軌道には、ワンパスビームのプロファイルを測定するための極薄フォイルを用いた SEEM 型が使われる予定である。

MR への入射装置は、セプタム磁石とキッカーそして入射軌道と反対側にバンパ軌道を作るためのバンパ電磁石から構成される。バンパ軌道を作ることとセプタム磁石とキッカー磁石の間にある四極電磁石のボア径を他より大きくとることにより、セプタムの位置で入射ビームと周回ビームの間のセパレーションを大きくとることが可能となり、ビーム損失の減少が期待される。キッカー磁石は分布定数型を採用しダミーロードで整合終端させる。セプタム磁石は KEK で新たに開発された大きな垂直方向ギャップでセプタム厚を薄くできる対向磁場型セプタム磁石を使用する。

入射セクションに引き続いてリングコリメーターセクションがあり、その下流側に、必要であれば入射エネルギーでビームを捨てるのが可能なように、ダンプリーンが用意されている。三台のキッカーと二組のセプタム磁石でビームをダンプへ導く。スタディービームを捨てるのが主な目的であるため、あらかじめ決められたタイミングでビームを蹴り出す設計となっている。

MR の遅い取り出しは三次共鳴を利用する。共鳴を励起するための六極電磁石はリングのアーク部に置かれる。静電セプタム、セプタム磁石、バンパ軌道をつくるバンパ電磁石のすべては 116m の遅い取り出し直線部に配置される。この直線部はディスパージョンがゼロであり、クロマチシティをゼロもしくは小さい値に保つことで、ビームの運動量に依存しない取り出しが可能となる。さらに静電セプタムは水平方向の β 関数が大きく α 関数が小さい場所に置かれる。以上の設計により、取り出し時のビーム損失を1%より小さく抑えることが可能である。ただし静電セプタム自身でのビーム損失や静電セプタムで散乱したビームが下流の機器でビーム損失するプロセスは避けることができない。これらのビーム損失量は機器の放射化の観点から言うと決して小さいものではなく、高放射化場での機器のメンテナンスが重要な課題である。

ニュートリノ実験施設へのビームラインは MR の内側から接続され、その反対側にはビームアポートラインがある。取り出し方式はキッカーとセプタム磁石による 1 ターン(約 $5\mu\text{sec}$)取り出し(速い取り出し方式)である。キッカーは反射波を利用したラインタイプである。キッカーへの電流の向きは二つの IGBT スイッチのうちのどちらを ON にするかで選ぶことができる。セプタム磁石は中心軌道に対して二つの独立した磁石が両側に置かれるものと、両極性で一体の新しい型のもが使われる。キッカーはある充電

電圧以上で電圧のパターン運転ができ、セプタム磁石の電流は加速パターンに従って励磁される。従って装置やビームに何らかの異常があった場合には、加速途中であってもビームを捨てることが可能である。

第 1 節でも述べたように、リニアックのエネルギーを 400MeV へ回復させることは、最優先事項として努力されている。一方、181MeV リニアックによるような RCS ビーム出力低下の場合にも、MR のビーム出力を当初の値に回復する方法として、以下の提案がなされている。それは、MR 行きのビームのみ RCS で 1 バンチ加速を行い、MR は加速周波数を二倍にしてバケツの数を 18 とし、そこへ 1 バンチずつ最大 15 回入射する方法である。この方法では、RCS からやってくるバンチ当たりの粒子数が少なくても入射回数を増やすことで、MR の設計ビーム強度を減らさないうえに可能性もある。一方では入射時間が 0.56sec と長くなることによる入射時のビームロス増加の懸念もあり、その評価・解決法も含め、技術的検討が行われている。

6 制御、メンテナンス

制御は、すべての加速器を中央制御棟からの集中制御方式で行う。しかし、それ以外に、装置単体の制御試験、リニアック、RCS、MR の各加速器としての総合試験が行いやすいように、それぞれにローカル制御室を設置している。大きなシステムである MR では、三つの電源棟内に、電源を設置する電源室の他に、電源室に置かれた電源との信号のやりとりや中央制御室との通信を行うためのローカル制御室が置かれている。

J-PARC の制御では、法的に規制を受ける人的安全保護系 PPS (Personnel Protection System)、機器を保護する目的でマイクロ秒オーダーの高速性を持ってビームを遮断する機器保護系 MPS (Machine Protection System) が特に重要視されている。人の安全を確保するためのインターロックである PPS に極めて高い信頼性をもたせることによって、たとえば、MLF にビームを供給する場合でも、MR リング内に立ち入ることが可能となる。具体的には、3-50BT の途中にある隔壁の上流側に、ビームを止めるためのビームプラグを二台設置する。これに、二台の偏向電磁石を安全マグネットとして PPS のインターロックに組み込む。ビームプラグが挿入されていることと、安全マグネットが OFF になっていることを条件に、MR トンネルへの立ち入りを可能とするのである(ただし 3-50BT は下流側も含めて全域に立ち入ることはできない)。MPS は、装置やビーム損失の異常が起こった場合にリニアックのビームを止めるものである。さらに MPS とは別に MR ではビームアポート信号を発生させるシステム(BAS)も用意されている。

J-PARC は大電流の陽子ビームを加速する装置であるので、運転中はもちろん、停止中の残留放射線による放射線被曝も考慮したシステムでなければならない。その意味で、安全のためのインターロックシステムが他の加速器施設に比較して重要度が大きくなっている。また、大電流のビームが予想外の場所で失われた場合の装置への影響も懸念されるため、ビーム損失を未然に防ぐ方法および最小限の影響に留めるための高速で動作するインターロック (MPS) を構築しており、そのための設計検討や試作などを行っている。

J-PARC のような大強度陽子加速器の場合、運転時のビーム損失を減らすとともに、放射化した装置をメンテナンスする際の被曝量を減らす工夫をすることが極めて重要となる。機器の重大故障時には機器自体を交換する必要性が生じるため、交換作業のシナリオはあらかじめ十分検討されている必要がある。高放射化領域でのメンテナンスは hands-on を基本とするが、作業時間の短縮化、作業距離をとる、ローカル遮蔽を有効利用する、ということによってできるだけ被曝量を減らすことを目指す。以上の方針のもとにビーム損失が大きいと想定される場所の装置の具体的メンテナンスシナリオが検討されている。たとえば、MR の速い取り出しに用いるセプタム磁石の大口徑の真空フランジを想定した遠隔着脱装置の R&D 機が製作され、動作確認・真空試験が行われ良好な結果が得られている。また水や電気の遠隔着脱機構の開発も進められている。

7 リニアック初段のビーム試験

リニアック棟が 2005 年度 (平成 17 年度) 竣工であることから、今まで KEK の陽子リニアック棟でリニアック最上流部のビーム試験を行ってきた。このシステムは、負水素イオン源、LEBT、3MeV RFQ リニアック、MEBT、DTL 第一タンクからなる。ここで装着されている RFQ は大型ハドロン (Japan Hadron Facility, JHF) 計画用に製作されたものである。フルスペックの 1MW 用 (リニアック・ピーク電流 50mA) ではなく、JHF の仕様 30mA 用である (J-PARC 用フルスペックの RFQ は現在開発中である)。MEBT の出口で 28.5mA のピーク電流に対し、水平エミッタンスおよび垂直エミッタンスとしてそれぞれ 0.252π mm mrad および 0.214π mm mrad (規格化 rms) が得られており、当初の仕様をほぼ満足する結果が得られている。

MEBT に装着されたビーム・チョッパー (図 20) のビーム試験も行われた。これは、JHF、J-PARC 用に考案された極めて速い立ち上がり、立ち下がり的高周波チョッパーであり、ビーム試験の結果、所期の 10nsec のビーム立ち上

がり、立ち下がりが実現され、RCS でのビーム損失の低減から来る仕様を満足する結果が SNS に先駆け得られている。

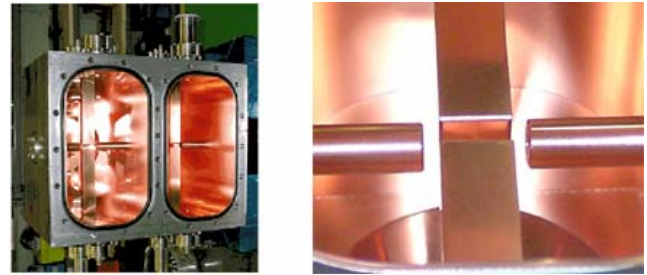


図 20 MEBT に装着された高周波チョッパー

左は二個の偏向チョッパー空洞を示す。右は偏向電場電極の拡大写真である。ここで、ビームは左から右へ通過する。

ビーム出力が最大に近づいた場合には、チョップすべきすべてのビームを 3MeV の MEBT で偏向させると、ビームのストッパーがもたないで、あらかじめ低エネルギーの LEBT でかなりの分は止めておく計画である。このプリチョッパー [8] は MA を使用した小型インダクション・リニアックであり、RFQ への入射エネルギーより 9keV だけエネルギーを低くする。ここでは、RFQ がビーム・エネルギーの濾過効果を持つよう、RFQ 自身も特殊な設計にしてあり、エネルギーの低くなったビームは透過してこない。このプリチョッパー系単独のビーム試験は終了している。プリチョッパーとチョッパーの組み合わせ試験を行ったところ、プリチョッパーがビームモニタへの大きなノイズ源となることが判明した。このシステムを最大ビーム出力で運転するためには、ノイズ対策が必要である。

次に、DTL 第一タンク (20MeV) のビーム試験を行い、2003 年 (平成 15 年) 11 月に当初の目標であるピーク電流 30mA の加速に成功した。その後、エミッタンスの測定など詳細なビーム試験を続けた。最初は、エミッタンスの測定値が計算値 (設計値) の 1.5~2 倍程度あり、その原因の究明にかなりの時間を費やしたが、最終的には、25mA のピーク電流に対し水平エミッタンスおよび垂直エミッタンスともに 0.3π mm mrad (規格化 rms) となった。計算値はそれぞれ 0.25π mm mrad および 0.26π mm mrad であり、ほぼ誤差の範囲に入ってきている。

8 まとめと課題

上述したように、400MeV のリニアック、3GeV の RCS、50GeV の MR からなる J-PARC 加速器は、多くの新しく考案、開発された技術をもとに建設が進められている。特に開発と同時進行している部分は、まさに白兵戦の最中といったところである。

リニアックについていえば、KEK、原研ともに計画以前から開発がなされており、早くから人材も育てていたことから、加速器機器のほとんどの製作が終わり、最も困難な最上流部のビーム試験も完了していることから、ほぼ順調に進んでいるとあってよい。ただ、予算の関係から、SDTLの部分は、職員を中心に組み立て、アラインメント、調整をする必要があり、人員不足と工程との整合性について工夫を重ねているところである。また、最大ビーム出力に向けては、前節で述べたプリチョッパーのノイズ低減、イオン源の長期安定性などの課題を克服する必要がある。

RCSの電磁石、電磁石電源は、ハードとしては今までのところほぼ順調に仕様通り製作が進んでいる。ただし、8個もの回路網について、互いの位相、振幅（電流ではなく、磁場）を正しく同期を取りながら運転するという運転上の大きな課題が残されている。QM用セラミックスダクトは順調に量産されているが、BM用については、その断面形状がレーストラック型であることもあり、研磨後の表面処理の問題を解決するために、半年程度初号機の製作が遅れた。現在、この遅れを取り戻すべく、工程を見直しているところである。

リング高周波系についても、防水およびカットコア加工の課題の解決に多くの時日を要したが、ほぼ課題は克服しつつあり、量産に向けての工程回復に努力している。

RCS入出射系は、セプタム、キッカーなどの主たる機器は現在製作中であるが、それらをまとめ上げるこまごました機器の契約が今年度残っており、最後の大きな契約であることから、その仕様策定に力を傾注している。

MRは主たる機器の量産は順調に推移しているが、ここでも入出射機器の製作が最後の大きな課題である。また、何と言っても全周1.6kmの大きな系であり、加速器機器の据え付け、調整のための人員確保と工程順守が最も工夫を要するところである。

このようにJ-PARC加速器の建設は、多くの困難な課題を克服しつつ進められており、今まさに胸突き八丁に差し掛かっているところである。また、2008年（平成20年）3月の時点では、MRでビームを加速してビームダンプへ取り出すところまでであり、それから約一年かけての約10%のビーム出力達成という目標をクリアしなければならない。これらは、ハードが設計通り動けば必ず達成される目標であるが、多くの開発要素を含み、かつ複雑、精緻にして、大規模なシステムであるJ-PARC加速器の場合、まずそこが第一の関門である。その後、本格的な大出力への挑戦が待っている。また、リニアックのエネルギーを400MeVに回復する努力もある。技術上も、予算面でも、本当の困難はこれからであり、したがって、更に多くの支援が必要である。

参考文献

- [1] "The Joint Project for High-Intensity Proton Accelerators," KEK Report 99-4, JHF-99-3 and JAERI-Tech 99-056 (1999).
- [2] Y. Yamazaki, *et al.*, "Accelerator Complex for the Joint Project of KEK/JHF and JAERI/NSP," Proc. 1999 Part. Acceler. Conf., THDL1 (1999).
- [3] Y. Yamazaki, *et al.*, "High Intensity Proton Accelerators for the JAERI/KEK Joint Project," Proc. 2000 European Acceler. Conf., THOAF201 (2000).
- [4] Y. Yamazaki, *et al.*, "The Construction of the Low-Energy Front 60-MeV Linac for the JAERI/KEK Joint Project", Proc. 2000 Linac Conf., TUD07 (2000).
- [5] Y. Yamazaki, "The Present Status of the JAERI/KEK Joint Project for High-Intensity Proton Accelerators," Proc. 2001 Part. Acceler. Conf., W0AA007 (2001).
- [6] T. Nagae, Nuclear Physics **A754** (2005) 443.
- [7] Y. Yamazaki, "The JAERI/KEK Joint Project for High-Intensity Proton Accelerators", Proc. 2002 European Part. Acceler. Conf., TUZGB003, p.163 (2002).
- [8] "Accelerator Technical Design Report for High-Intensity Proton Accelerator Project, J-PARC," KEK Report 2002-13 and JAERI-Tech 2003-44.
- [9] C. Ohmori, *et al.*, "High-Field Gradient Cavity for JAERI-KEK Joint Project," Proc. 2002 European Part. Acceler. Conf., WEALA001, p. 257 (2002).
- [10] N. Tani, *et al.*, "Design of a Dipole Magnet for the 3 GeV Synchrotron of the JAERI/KEK Joint Project," Proc. 2002 European Part. Acceler. Conf., TUPD0028, p. 2376 (2002).
- [11] A. Ueno and Y. Yamazaki, Nucl. Instr. Meth. **A300**, 15 (1990).
- [12] A. Ueno, *et al.*, Proc. 2002 Linac Conf., TU423 (2002).
- [13] F. Yoshino, *et al.*, Proc. 2000 Linac Conf., TUD10 (2000).
- [14] S. Machida, *et al.*, Proc. 1997 Part. Accel. Conf., p. 1962 (1997).
- [15] M. Tomizawa, *et al.*, "Design of Slow Extraction from 50 GeV Proton Synchrotron," Proc. 2002 European Part. Acceler. Conf., THPLE009, p. 1058 (2002).