

J-PARC 50GeV メインリングにおける遅い取り出し機器製作の現状

Current status of the construction of the devices for the slow extraction from J-PARC 50GeV Main Ring

武藤 亮太郎*
高エネルギー加速器研究機構

R. Muto, KEK

Abstract: We are constructing the devices for the slow extraction from J-PARC 50GeV Main Ring in order to deliver the primary proton beam to the hadron experimental hall. The detailed design was finished, and now we are fabricating the devices. The fabrication will be completed by the end of March 2008, then we will start testing the devices at KEK. During the summer of 2008 the devices will be installed in the slow extraction section of J-PARC 50GeV Main Ring.

はじめに

私は 2007 年の 4 月より、J-PARC 加速器入射グループに加わり、メインリング遅い取り出し部の建設に取り組んでいます。この記事では現在製作中の遅い取り出し機器について、そもそも何のためのものかということから始めて、現状、今後の予定を記述してみました。遅い取り出しについての理解を深めていただくきっかけになれば幸いです。

遅い取り出しとは何か？

リングを周回するビームを“かんな”で削るように少しずつ取り出す手法を「遅い取り出し」と呼ぶ。J-PARC メインリング(MR)からハドロン実験施設へのビーム取り出しは、この遅い取り出しを用いて行われる。(ちなみにニュートリノビームラインへの取り出しは、キッカー電磁石を用いて MR を周回するビームを一度に蹴り出す「速い取り出し」によって行われる。)

図 1 に遅い取り出しの概念図を示す。

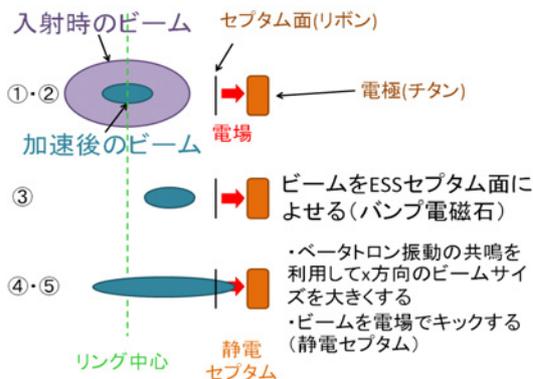


図 1: 遅い取り出しの概念図。図中の番号は本文に対応している。

1. かんなの“刃”にあたる静電セプトラム(ESS)を、セプトラム面が入射ビームに当たらない位置に用意しておく。

2. 入射されたビームのサイズは加速されるにつれて小さくなっていく(断熱収縮と呼ぶ)ため、加速後のビームと ESS のセプトラム面は離れてしまう。
3. そこで、バンブ電磁石(BUMP)によってビームを ESS セプトラム面によせる。
4. ここで水平(x)方向のビームの振動(ベータトロン振動と呼ぶ)を共鳴により発散させ、x方向のビームサイズを大きくしていく。¹⁾この発散の速度を加減することにより、スピル制御をおこなうのである(スピル制御の詳細は清道氏の記事を参照されたい)。
5. ESS のセプトラム面を越えたビームは電場によりキックされ、周回ビームから分離される。

ESS だけではキック力が足りないので、分離された取り出しビームをセプトラム電磁石でさらに曲げて、スイッチャードへと受け渡す。一気に必要な角度まで取り出しビームを曲げることはできないので、3種類・10台の電磁石で少しずつビームを曲げていく。図 2 に遅い取り出し部の全体配置図を示した。

以下に、上で触れた各機器についてもう少し詳しい説明を試みる。

静電セプトラム(ESS)

かんなの“刃”に当たる部分である。原理的にビームロスが避けられないので、なるべく“刃”を薄くする必要がある。コイルは頑張っても 1mm 程度までしか薄くならないため、磁場ではなく電場を用いるのである。セプトラム電極には厚さ 30 μm 、幅 1mm のリボン(リボ

¹⁾ 偏向電磁石や Q 磁石の磁場が完全に理想的であれば、ベータトロン振動は理想ビーム中心軌道のまわりを単振動的にふるまう。しかし当然ながら現実の磁場は理想的な値からずれており、この磁場ずれが単振動に対する外力のようにベータトロン振動に働く。ここで、リング 1 周当たりのベータトロン振動の回数(チューンと呼び、記号 ν で表す)がぴったり整数($\nu = n$) になると、磁場のずれによる外力が常にベータトロン振動の同じ位相で働くことになり、ベータトロン振動が発散してしまう。このためビームを安定に周回させるためには、チューンをこのような共鳴点からずらしておかなければならない。遅い取り出しを行う際には、逆にこのベータトロン振動を発散させる方向に持っていく。共鳴 6 極電磁石によって 3 次の共鳴点($\nu = n \pm 1/3$)をつくりだし、チューンをその共鳴点に近づけていくのである。

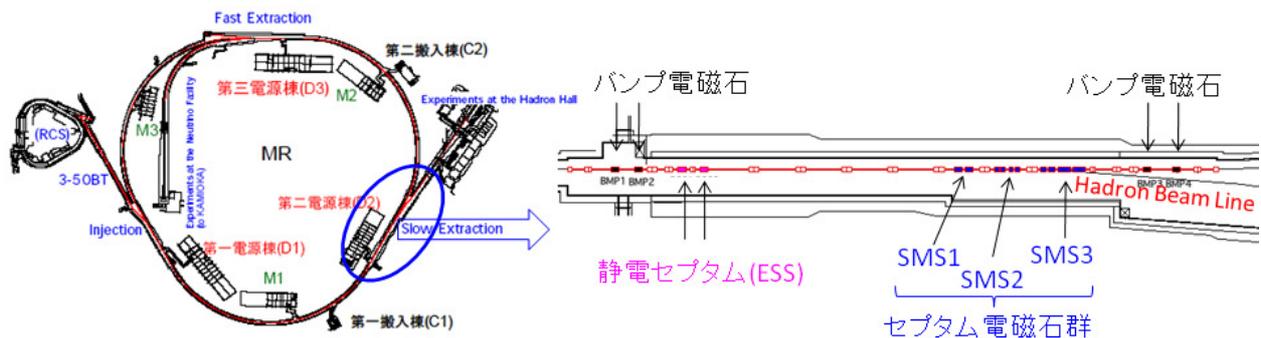


図 2: 遅い取り出し機器の全体配置図。

ンのほうがワイヤーよりも強度を保ったまま薄くできる)を用い、このリボンとチタン電極の間の 25mm のギャップに 170kV(50GeV 時)の電圧を印加する。図 3 は ESS の R&D 機である。このような断面をした、長さ 1.5m の ESS を 2 台使用する。リボンは長手方向に

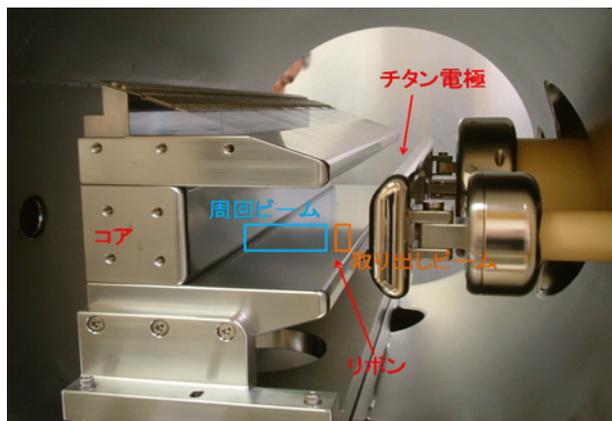


図 3: ESS の R&D 機。下流側からみた写真。

495 本、3mm ピッチで並べて張ってあるため、単にリボン 1 本 1 本を薄くするだけではだめで、リボンの位置を決めているコアの端面の精度を研磨により高めることが重要になる。実機のコア製作は終了しており、端面の精度として $\pm 10\mu\text{m}$ という測定結果を得ている。リボンには周回ビームが直接衝突し、フルインテンシティ時で約 1000°C という高温になるため、素材にはタングステンを用いる(展延性を増してリボン形状にしやすいするためレニウムが約 26% まぜてある)。また、放電しにくくするため電解研磨により“ばり”を取り除いてある。このようなリボンを用いた R&D 機によるテストでは 180kV/25mm までの電圧印加に成功している(2007 年 5 月)。

さらに、リボンを支えるコアとチタン電極はそれぞれ独立に動かせるようになっており(コアは $\pm 5\text{mm}$ 、チタン電極は $+10_{-30}\text{mm}$ 、+ がリング外側)、オペレーション時に最適な位置を取ることができるようになっている。

注意したいのは、最終的にビームは MR の外側へ取り出されるが、ESS ではビームを MR の内側に蹴ることである。ビームの水平方向サイズが最大になる地点において、ESS によってビームを MR 内側方向に蹴りだ

してやる。ビームはベータトロン振動しながら周回するため、内側に蹴られたビームは戻ってきて中心軌道を通り過ぎ、ESS によって蹴られた分だけ余分に外側に振れる。ベータトロン振動の ESS からの位相が 270° に近い場所で外側に振られた取り出しビームと周回ビームとの隙間が最大になる。そこにセプタム電磁石を設置し、ビーム間の隙間にセプタム導体を差し入れるのである。

セプタム電磁石群

ESS によって少しだけ曲げられた取り出しビームを、磁場によって徐々に曲げていく。このとき、周回ビームには影響を与えないようにする必要があるため、取り出しビームの領域には一様な磁場を発生しつつ、周回ビームの通る領域には磁場がほとんど漏れない(数ガウス程度)構造にしなければならない。このため、図 4 のような断面をもつ電磁石を製作することになる。ここ

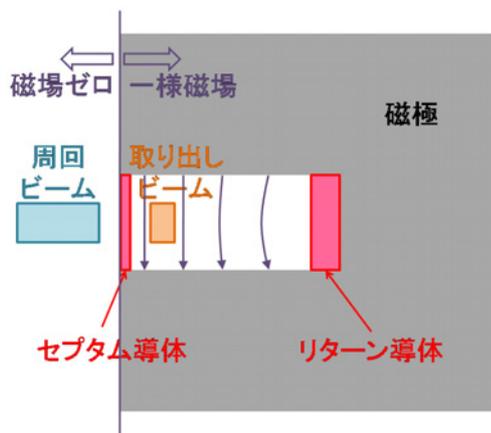


図 4: セプタム電磁石の断面の概念図。

で、ESS でけられた直後においては取り出しビームと周回ビームの間の距離は非常に小さいため、ビームロス avoider するためセプタム導体を薄くしておく必要がある。(ESS の直下流の低磁場セプタムでは、セプタム導体厚さは 1.5mm である。) コイルを薄くすると電流密度が大きくなり、コイルの温度上昇も大きくなる。それをどのように水冷するか、またセプタムコイルには外向きのローレンツ力が働くため、その荷重をどのように支える

のかに注意しながら設計する必要がある。(KEK-PS を見学すると、ローレンツ力によってセプタムコイルが破損したセプタム電磁石と、それを抑えるための巨大なシャコマン (特注品) を見ることができる (図 5)。)



図 5: PS のセプタム電磁石につけられたシャコマン。セプタム導体は黄色い磁極の向こう側。

低磁場セプタム (SMS1) 2 台の磁石 (SMS1.1, SMS1.2) が 1 つの真空チェンバー内に収まっている。基本パラメータを表 1 にまとめた。セプタム導体には

| | 磁場 | コア軸長 | ギャップ |
|--------|---------|--------|--------|
| SMS1.1 | 0.114 T | 1.5 m | 55 mm |
| SMS1.2 | 0.228 T | 1.5 m | 55 mm |
| | ターン数 | セプタム厚 | 電流 |
| SMS1.1 | 1 | 1.5 mm | 5000 A |
| SMS1.2 | 2 | 3.5 mm | 5000 A |

表 1: SMS1 の基本パラメータ (50GeV 運転時)

1.5mm 厚の銅板を用い、2 ターンの SMS1.2 では導体間に 0.5mm 厚の絶縁用セラミクスをはさむ。セプタム導体には水冷管が上下に 1 本ずつはんだ付けされている。SMS1.1 の磁極の断面図を図 6 に、CAD による 3 次元図を図 7 に示す。セプタム導体はおさえ金具によ

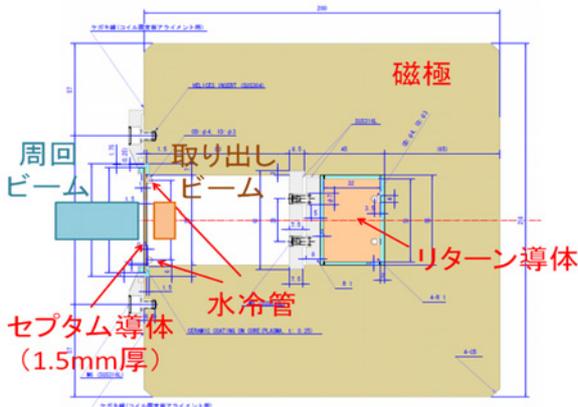


図 6: SMS1.1 の磁極の断面図。

て磁極に押しつけられて固定されている。運転時は熱によってセプタム導体が伸びるので、導体が長手方向に滑ることができるように押しつける強さを調節しておく。また、導体のはさまれる部分に電流が流れてしまうと磁場が乱れてしまうため、図 8 のように切れ目が入ってい

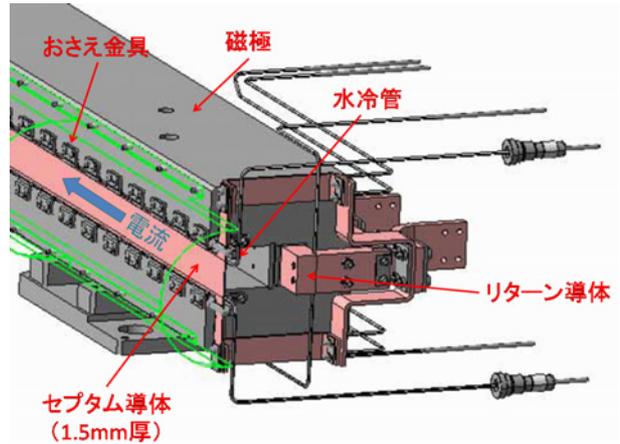


図 7: SMS1.1 の CAD による 3 次元図。

る。(このセプタム導体のことを「ムカデ導体」と呼んでいる。)

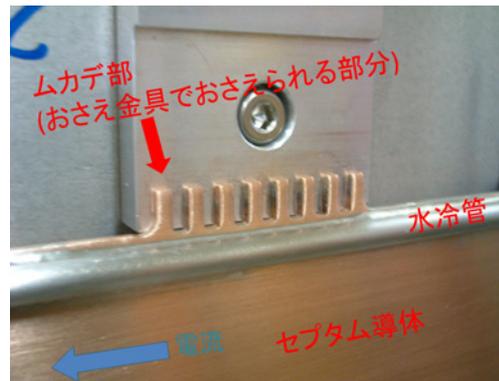


図 8: SMS1 のセプタム導体のおさえられる部分。

また、ビームロスの最も少ない最適なポジションで運転できるように、チェンバー自体の位置が $\pm 5\text{mm}$ の範囲で動かせるようになっている。

SMS1 の磁極が 30GeV 運転対応となったことについて 50GeV 運転時には SMS1 には 5000A の電流を流す必要があるが、DC 運転 (電流常時流しっぱなし) では 3000A(30GeV 運転に対応) までしか熱的に耐えられないため、50GeV 運転時には取り出し時のみ電流を ON にする「パターン運転」を行わざるを得ない。その場合、磁極に流れるエディカレントを抑えるために磁極を積層しておく必要があるため、SMS1 の磁極は 0.6mm の積層鋼板で製作する予定であった。その際セプタム導体と磁極の絶縁をどのようにとるかが問題となる。第 1 の案は、“絶縁を取らない” というものであった。磁極が積層になっており、積層鋼板同士はコーティングにより絶縁されているため、セプタム導体と磁極を絶縁しなくても磁極に電流は流れないという考え方である (図 9)。しかしサンプルによる試験の結果、積層鋼板同士の絶縁は破れていることがわかり、案 1 は見送りとなった。第 2 の案はセプタム導体にセラミクス溶射をかけるというものであったが、導体が 1.5mm

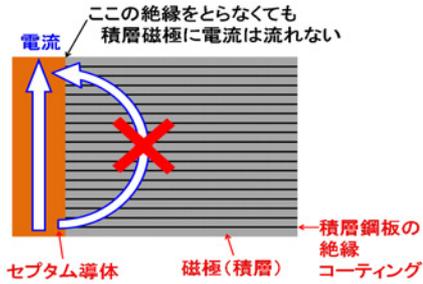


図 9: SMS1 の磁極とセプタム導体の接触面を上から見た図(本文中の「案 1」)。

と薄く、また熱伸びなどもあるため、運転中の溶射の剥落が大きな不安要素である。そこでより信頼性を高めるために、磁極を積層でなくバルクにし、磁極の方にセラミクス溶射する方法が採用された。以上のような経緯で、現在製作中の SMS1 の磁極はバルクとなり、30GeV(3000A 運転) 対応機となった。(その後、結局実機での絶縁はセラミクスブロックをコイルと磁極の間にはさんで行うことになった。) 50GeV(5000A 運転) には 2 号機以降で対応することとなる。

中磁場セプタム (SMS2) セプタム厚 7.5mm の同じ形の電磁石 4 台が 1 つの真空チェンバー内に収まっている。基本パラメータを表 2 にまとめた。SMS2 も SMS1

| 磁場 | コア軸長 | ギャップ |
|---------|---------|--------|
| 0.524 T | 0.838 m | 80 mm |
| ターン数 | セプタム厚 | 電流 |
| 4 | 7.5 mm | 4972 A |

表 2: SMS2 の基本パラメータ (50GeV 運転時。4 台の磁極は同一)

と同じく 50GeV 運転時には 5000A の電流が必要だが、こちらはもともと DC 運転できる設計になっている。磁極もバルクである。断面図を図 10 に示す。セプタム導体は SUS パイプ 2 本が銅導体の中を通る構造になっている。導体が細く (5mm 厚)、また 5000A の大電流により発生する熱を取り去るために冷却水の流量を大きくする必要があるので、単純に穴をあけただけの銅導体 (ホロコン) では銅が潰食されてしまう恐れがあるからである。また SUS パイプには銅導体の真直度を保つ働きもある。セプタム導体の断面は図 11 を参照されたい。このとき SUS パイプと銅導体間の熱接触をどうとるかという問題があり、さまざまな方法をテストした結果 HIP(熱間等方加圧) 法による拡散接合を採用することに決定した。SUS パイプの横の銅の肉厚はわずか 0.5mm であるため、太めの銅導体に溝を掘り、SUS パイプを仕込んで HIP をかけた後、超音波により距離を測りながら機械加工で削りだして製作する。

SMS2 も SMS1 と同じく、チェンバー自体が $\pm 5\text{mm}$ の範囲で動かせるようになっている。

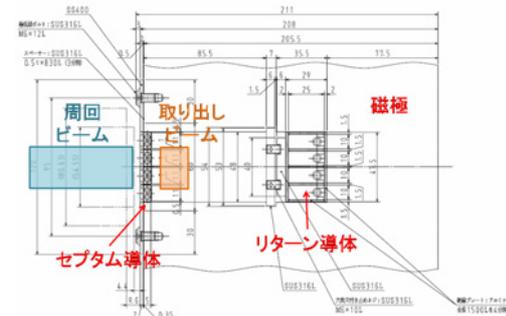
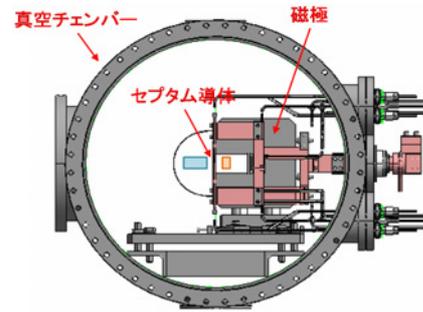


図 10: SMS2 の磁極の断面図 (下は詳細図)。

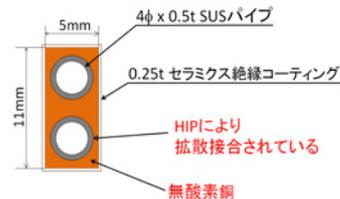


図 11: SMS2 のセプタム導体の断面図。

高磁場セプタム (SMS3) SMS3 の位置まで来ると、取り出しビームが周囲ビームから十分離れているため、セプタム導体にはホロコンを使用することができ、ビームダクトを 2 本に分けることもできる。そのため、電磁石本体は大気中に設置し、磁極のギャップに 2 本のダクトが設置される構造をとる。磁極の短い SMS3_1,3_2 と磁極の長い SMS3_3,3_4 の 2 種類 4 台の磁石を用いる。SMS3 の配置図を図 12 に、SMS3_1 の断面図を図 13 に、基本パラメータを表 3 に示す。

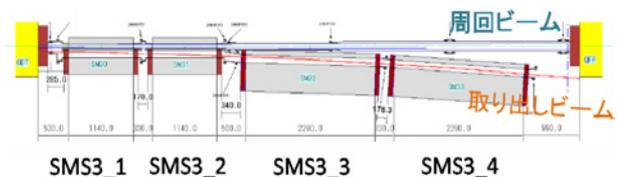


図 12: SMS3 の磁極の配置図。

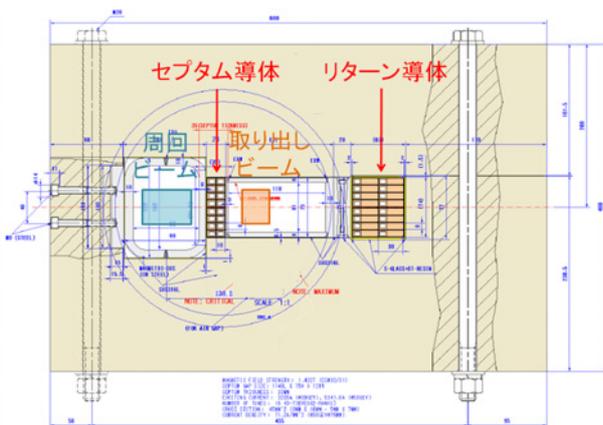


図 13: SMS3_1 の磁極の断面図。

| | 磁場 | コア軸長 | ギャップ |
|----------|--------|--------|--------|
| SMS3_1,2 | 1.50 T | 1.14 m | 75 mm |
| SMS3_3,4 | 1.60 T | 2.28 m | 62 mm |
| | ターン数 | セプタム厚 | 電流 |
| SMS3_1,2 | 16 | 35 mm | 5608 A |
| SMS3_3,4 | 18 | 69 mm | 4547 A |

表 3: SMS3 の基本パラメータ (50GeV 運転時)

バンブ電磁石 (BUMP)

上記の磁石に加えて、加速されてサイズの小さくなったビームを ESS のセプタム面に寄せるためにバンブ電磁石と呼ばれる磁石を用いる。ビーム加速中は OFF で、取り出し中のみ ON にするため、必然的に Spill の周期でのパターン運転となる。このため磁極は積層になっている。遅い取り出しセクションの始まりの部分に 2 台、終りの部分に 2 台設置される。

共鳴 6 極電磁石

ベータトロン振動の 3 次の共鳴点 ($\nu = n \pm 1/3$) をつくりだす働きをする。取り出し時にはこの 3 次共鳴点にチューン ν を近づけていくことで、ビームの水平方向のベータトロン振動を発散させる。全 8 台について、製作・試験・インストールが完了している。基本パラメータを表 4 にまとめた。外観の写真を図 14 に示す。

| 磁場 | コア軸長 | ボア半径 | 電流 |
|----------------------|-------|-------|-------|
| 230 T/m ² | 0.7 m | 68 mm | 657 A |

表 4: 共鳴 6 極電磁石の基本パラメータ

製作の現状と今後のスケジュール

基本的に全機器とも 2008 年 3 月末に KEK に納入され、4 月から 6 月にかけて試験を行い、その後 J-PARC MR にインストールされる予定である。



図 14: 共鳴 6 極電磁石の外観。

ESS リボンは東芝マテリアル (株)、真空チェンバー、コア、架台はマイテック (有)、高電圧フィードスルー、チタン電極は住友重機 (株) がそれぞれ製作を担当している。製作はおおむね予定通り進んでおり、2008 年 3 月末納入予定である。

- リボン単体については製作が完了している。
- コア部分は電解研磨を含め製作完了した。真空チェンバーの製作は、チェンバーの足の精度を機械工作で出す方針にしたため加工に少し手間取ったが、内部の電解研磨 (真空対策) もふくめ完了し、2008 年 1 月に 200°C のベーキング (脱ガス処理) を行った。現在はリボン張り作業と架台の製作が進行中である。リボン張りが終了し次第、KEK にてリボンアライメントの測定を行う (2 月上旬)。
- チタン電極は住友重機 (株) による製作が完了し、メカノケミカル研磨 (神戸製鋼) 中である。

2008 年 4 月より、エージングを兼ねた高電圧試験を行う。R&D 機によるテストから推測するに、非常にゆっくりと電圧を上げていく必要があり、また高真空が要求されるため、1 台につき 2 か月程度の試験期間を予定している。試験は PS 北実験室にて行う予定である。

SMSI トヤマ (株) が製作を担当している。当初予定より設計が遅れ、真空チェンバー内部の磁極とコイルに限っても設計終了が 2007 年 11 月末となってしまった。チェンバー、架台については詳細設計が 2007 年 12 月に完了し、現在は磁極、コイル、チェンバー、架台ともに製作が進行中である。設計が遅れたおもな原因は、水冷管が非常に込み入っていること (セプタムコイルだけでなく、セプタムコイルとリターンコイルとの間をつなぐ導体や、真空チェンバー内へ電流を導入する端子とコイルの間をつなぐ導体においても電流密度が大きいため水冷する必要がある)、また設計する上で、各部分に加わる力、発生する熱量、それを取り去るための水量や配管のサイズ、また銅導体の熱伸びなど検討を要する事項が多いことであった。

真空チェンバーから外の電気配線・水配管については KEK で担当することになり、現在部品図を作成中である。

2008年3月末に真空チャンバーと架台が納品されてから、KEKにて配線・配管を行い、磁場測定・温度測定を行い、2008年夏にMRにインストールする。試験場所は4号館の隣の低温真空棟である。

SMS2 トヤマ(株)が製作を担当している。SMS1と同様に2007年12月に設計が完了し、現在急ピッチで製作が行われている。図15にチャンバーと架台の3D-CADによる概念図を示す。

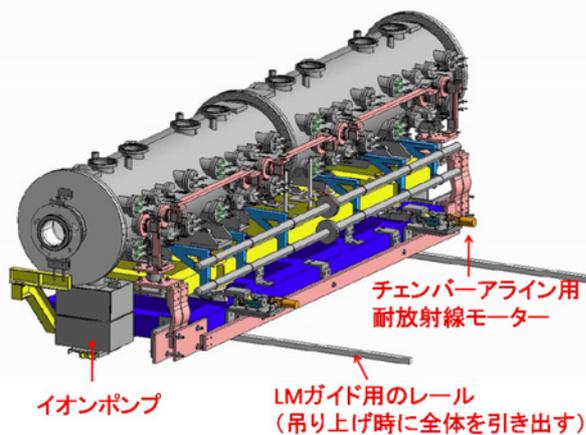


図15: SMS2のチャンバー、架台の概念図。

SMS1との大きな違いは、セパタム導体としてSUSパイプが通ったHIP導体を用いていることである。金属技研(株)においてHIP導体の製作が行われており、2008年1月末の時点で全16本のHIP導体のうち半数の8本が完成している。残りの8本も2月上旬に完成予定である。この後、絶縁のために日本コーティング(株)においてセラミクス溶射が行われる。ひとくちにセラミクス溶射といっても様々な方法があるが、事前に何種類かセラミクス溶射したサンプルを用意してそれぞれ3点曲げ試験を行い、最も剥離しにくい方法(Ni下地をつけ、グレイアルミナをプラズマプレー法で溶射する)で行うことにした。溶射には約1か月を要するため、組立スケジュールが非常に厳しい状況である。SMS2においても、真空チャンバーから外の電気配線・水配管についてはKEKで担当する。2008年3月末に真空チャンバーと架台が納品されてから、KEKにて配線・配管を行い、磁場測定・温度測定を行う。試験場所は東カウンターホールである。

SMS3 NEC/トーキン(株)が製作を行っている。取り出しビームと周回ビームが十分離れているため、SMS1,2と比べると特殊な技術を使わなくてもよい分、製作にあたってのチャレンジングな点は少ない。ただ、ダクトが2本になっているため、SMS3の前後の機器(モニターなど)とのつなぎ目や、前半2つの磁極と後半2つの磁極の間のつなぎ目は特殊な形状となり、さらに半遠隔でクランプを開閉する必要がある上にスペースに余裕がないため、注意して設計する必要がある。つなぎ目部分については詳細設計が完了し、製作に入っている。2008

年3月末納品予定。4月から東カウンターホールにて励磁試験を行う。

BUMP NEC/トーキン(株)が製作を行っている。3次元磁場計算による磁極の形状決定が終了し、積層鋼板の打ち抜き加工が完了した。架台については詳細設計が進行中である。2008年3月末納品予定。4月から低温真空棟にて試験を行う。

おわりに

現在、2008年3月末の納品に向けて、機器の製作が急ピッチで進んでいる真最中です。製作の工程はSMS1とSMS2が最も厳しい状況ですが、遅れを最小限にとどめるようやれることは全部やっていきたいと考えています。また、2008年4月からのKEKでのテストをつつがなく行うために準備をすすめています。テストは3か所にて並行して行う予定なので、マンパワー的に非常に厳しい状況です。現在テストの詳細なスケジュールを作成しています。2008年12月のファーストビームを目指して最善を尽くしていきますので、ご支援をよろしくお願いいたします。