

ドイツ・重イオン研究所 GSI における国際加速器プロジェクト FAIR と その超伝導電磁石開発の現状

STATUS OF INTERNATIONAL ACCELERATOR PROJECT FAIR AT GSI AND THE SUPERCONDUCTING MAGNET DEVELOPMENTS

杉田 圭*, エクバート・フィッシャー, ピエール・シュニツァー

Kei Sugita*, Egbert Fischer, Pierre Schnizer

GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH

Abstract

At GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt, Germany, an international accelerator project FAIR (Facility for Anti-proton and Ion Research in Europe) is now under construction. By utilizing the upgraded GSI heavy ion accelerator facility as an injector, newly constructed FAIR accelerator complex will be operated and be used for various research experiments. Superconducting magnet systems are adopted to the heavy ion synchrotron SIS100 and the fragment separator Super-FRS in FAIR. We present the status of the FAIR project and the development of the superconducting magnet systems.

1. FAIR プロジェクト

Facility for Antiproton and Ion Research in Europe (FAIR: フェア) は、ドイツ・重イオン研究所 GSI をホストとする国際協力による加速器プロジェクトである [1, 2]。既存の GSI 加速器施設をアップグレードしたのち入射器として利用し、新設される FAIR 加速器群によって、遥かに高いビーム・インテンシティ（二次ビームでは 10000 倍）等を達成する (Figure 1)。

FAIR 加速器群の用地として、GSI に隣接する森林がすでに整地され、加速器を収める巨大建築物建設のため、地盤を安定させる長さ 60 m、直径 1.2 m の柱を 1350 本埋設する工事が 2014 年 5 月に終了した。また、昨年 (2015 年) にはプロジェクトの進捗や物理実験計画等が国際的な委員会のレビューを受けた。その結果、これまで通り計画を推進することが了承された。FAIR 加速器建設を幾つかのサブ・プロジェクトに分け、各サブ・プロジェクトごとに加速器装置の調達等が始まっている。

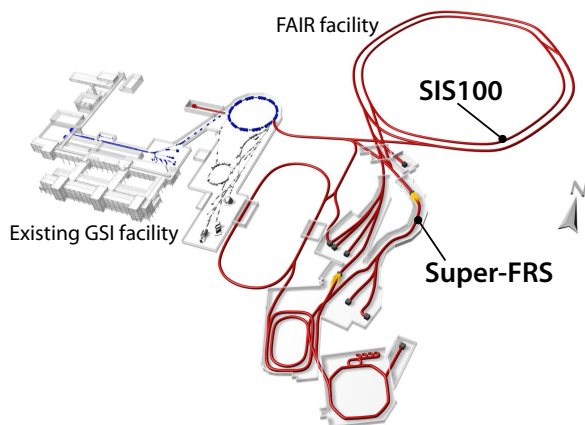


Figure 1: FAIR accelerator complex at GSI.

2. 重イオンシンクロトロン SIS100

FAIR の中核となるのは重イオン・シンクロトロン SIS100 である (Figure 2) [3]。サブ・プロジェクトのひとつである SIS100 は、FAIR 加速器群のなかでも最も高い優先順位に位置づけられ、多くの人的資源と予算が割り当てられており、電磁石をはじめとする各種装置の調達がすでに本格的に始まっている。

SIS100 の特徴として、重イオン・ビームのロスを低減するために超高真空 (10^{-11} mbar) が必要であり、これを低温 (10 から 15 K) のビーム・パイプによる残留ガス吸着により達成させることがあげられる。このビーム・パイプとの適合性と、省エネルギー、省スペースの観点から、Superferric タイプの超伝導電磁石が選択された。また、短時間に粒子を加速することでも残留ガスとの衝突によるロスを防ぐため、高速励磁、早い返しの電磁石が要求されている。これは LHC など他の超伝導加速器電磁石と異なり、超伝導線材等からの交流損失による発熱を低減し、さらにそれを効率よく冷媒であるヘリウムによって取り除かせるなど、工学的な技術開発が必須である。すでに 1990 年代にロシア、ドブナの Joint Institute for Nuclear Research (JINR) で建設されていた高速励磁、早い返しの超伝導シンクロトロンであるニュークロトロン (Nuclotron) の Superferric 電磁石の設計コンセプトを採用し、SIS100 用に最適化を行った。

2.1 主二極電磁石

主二極電磁石は Superferric タイプの電磁石で、約 13 kA の電流により 1.9 T の二極磁場を生じさせる (Figure 3) [4, 5]。二層コイルによる直線型電磁石を試作し、試験をおこなった後、加速器の仕様変更に伴い、さらなる冷却効率が必要とされ、太い冷却管を配した線材と、ビームに沿った曲線型電磁石が設計された。2013 年に初号機が完成し、電気試験、ヘリウム・リーク試験など常温での試験ののち、定格温度まで冷却され、クエンチ試験、回転コイルによる磁場測定など詳細な試験が行われた。試験の結果、一回のクエンチのみで、また昇温再冷却後ではクエンチ無しで

*k.sugita@gsi.de

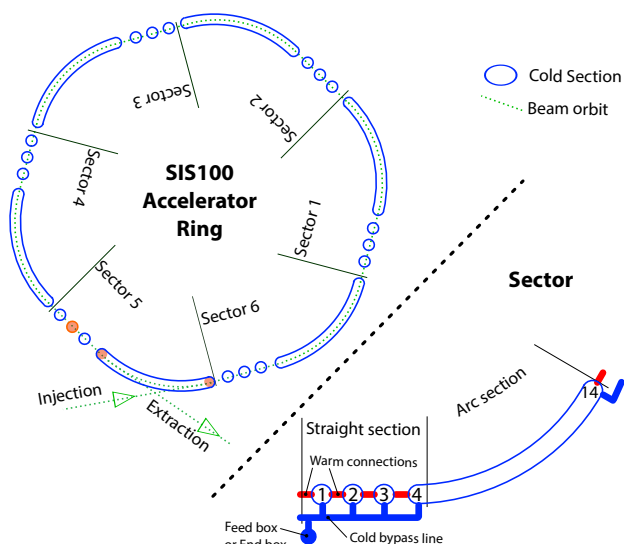


Figure 2: Schematic view of the SIS100 accelerator ring (cryogenic connection). The ring is divided into six sections. Each of the sections consists of the straight sections (four cells) with the quadrupole doublet modules and the cold arc sections (ten cells) with the dipole and quadrupole doublet modules.

定格電流まで到達するなど、ほぼすべての設計仕様を満たすことを確認した。

しかしながら、加速器にとって重要となる磁場精度は予想を下回り、原因を探る詳細な調査が行われた。Superferric タイプの電磁石は、主に鉄ヨークの幾何形状が磁場性能を左右するため、電磁石口径内の精密形状測定と製作工程の詳細なレビューが行われた。その結果、溶接工程において鉄ヨークの大きな変形があったことが確認されるなどしたため、その点を含めて、電磁石製作の全工程を再チェックした。それを受けて、新たに鉄ヨークを作り直し、初号機のコイルと組み合わせた電磁石を試験した。その結果、大幅に改善した磁場性能が確認されたため、約 130 点にもおよぶその他の細かい修正点を合わせて、最終製作設計をまもなく承認し、ドイツ・BNG 社にて量産体制に入る予定である。

2.2 SIS100 四極ダブレット・モジュール

主四極電磁石は主二極電磁石と同様に Superferric タイプの電磁石である。2つの主四極電磁石は、補償用電磁石や他のデバイスと共にダブレットとして、一つのクライオスタットに組み込まれる。各電磁石の断面を Figure 4 に示す。約 10 kA の電流により 27.7 T/m の磁場勾配を生じさせる主四極電磁石と補償用電磁石は、JINR にて製造される。

補償用電磁石の多くは個々の電源により励磁されるため、スペース上の制約や入熱を低減するために低電流 (250 A) のカレントリードを用いる。そのため各超伝導線が絶縁された低電流ニュークロトン型ケーブルが採用された (Figure 4)。この線材でコイル巻線した後、各超伝導線が直列に接続される。

四極ダブレット・モジュールは、電磁石やデバイス

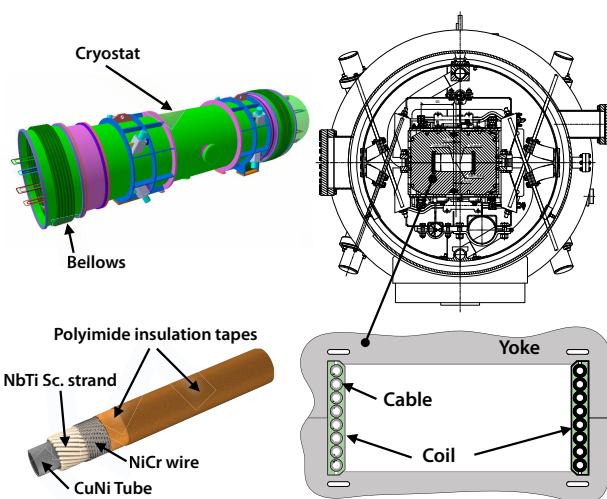


Figure 3: SIS100 dipole: The cryostat (top left) and the cross section (top right), the magnet aperture cross section (bottom right), the Nuclotron type cable (bottom left).

の組み合わせにより 8 種の標準タイプと入射、取り出し部、高放射線部用に特別なタイプが必要となる。標準タイプのうちのひとつのモジュールのための電磁石 (2つの四極電磁石、六極電磁石、ステアリング電磁石) が、現在 JINR にて製作されている。これらの電磁石は、JINR にて低温での磁場測定など詳細な試験、検査を行い、必要な改良を取り入れ、量産体制に入る予定である。

JINR にて製造され、低温試験を通過した電磁石は、他の加速器デバイスと共に、最終的に四極ダブレット・モジュールとしてクライオスタットに収められ、再び低温での試験を受けたのち、加速器トンネルへ搬入される。

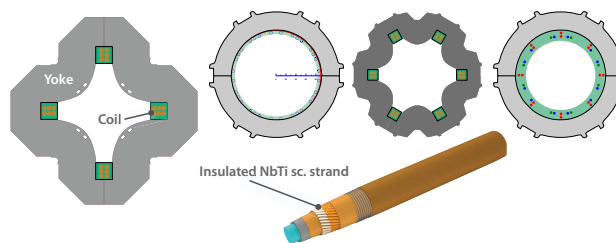


Figure 4: Cross section of the superconducting magnets in the SIS100 quadrupole doublet modules: Quadrupole, steering, chromaticity septupole, and multipole corrector magnets (from left to right). The low current Nuclotron type cable for the corrector magnets (bottom).

3. SUPER-FRS 超伝導電磁石

Super-FRS は上流の加速器からのビームをターゲットに当て、そこからの二次粒子を選別するフラグメント・セパレータである (Figure 5)。上流の高放射線領域では耐放射線性のある常伝導電磁石が用いられ、下流では超伝導電磁石が用いられる。ビームの大き

な位相空間アクセプタンスを確保するため、大口径の電磁石となる。

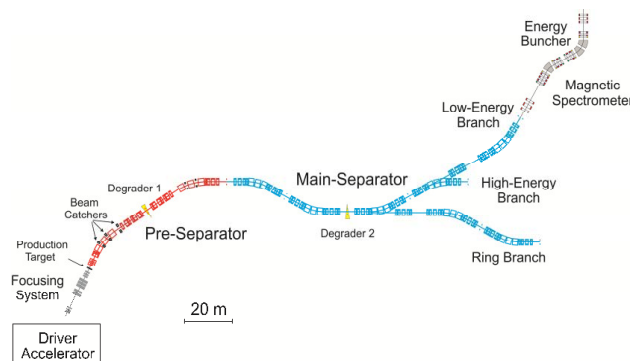


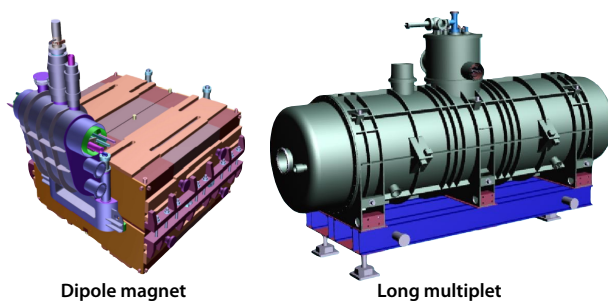
Figure 5: Super-FRS in the FAIR accelerator complex.

超伝導二極電磁石は、コイルのみ低温に冷却され、鉄ヨークは常温の Superferric 電磁石である (Figure 6)。四極電磁石を主とし、六極、八極、ステアリングの各電磁石を組み合わせたマルチプレットは、一つの大規模クライオスタットに収められ液体ヘリウムに浸漬される。各電磁石はカレント・リードからの入熱を抑えるため比較的低電流 (300 A 以下) で励磁される。

二極電磁石は、中国、蘭州で試作機が製作され、試験を行い、定格の仕様を満たした。この設計を元に量産デザインが決定され、CEA/Saclay の技術協力のもと製造が進められる予定である。

マルチプレットは、イタリア・ASG 社により製造される。現在基本設計が終わり、初号機の製造設計が進められている。四極と六極は Superferric タイプ、八極とステアリング電磁石はコサイン・シート型の設計となっている。

製造された二極電磁石、マルチプレットは常温での各種試験を通過したのち、CERN の低温試験施設にて磁場測定など低温での試験をおこない、FAIR へ搬入される。



Dipole magnet

Long multiplet

Figure 6: Super-FRS magnets.

4. まとめ

GSI では、FAIR 建設のため、総力を挙げて研究開発や調達が行われている。加速器群の中核である SIS100 は FAIR プロジェクトのなかで最も準備が進んでいる。主二極電磁石はまもなく最終設計が承認され、量産が始まり、四極ダブレット・モジュールは磁石の初号機が製作されている。Super-FRS の二極電磁石は CEA/Saclay との協力関係が正式に構築され次第、入札等が進められる予定である。マルチプレットは初号機製作の準備が進んでいる。全電磁石は低温での試験を終えた後、FAIR トンネルに搬入、設置され、コミッショニングが行われる予定である。

参考文献

- [1] K. Sugita, “ドイツ・重イオン研究所 GSI と国際協力加速器プロジェクト FAIR”, 「加速器」, vol. 10, no. 4, pp. 246–249, 2013.
- [2] P. Spiller *et al.*, “The Accelerator for Antiproton and Ion Research”, in Proc. 6th International Particle Accelerator Conference, Richmond, VA, USA, pp. 1343–1345, 2015.
- [3] P. Spiller *et al.*, “Status of the FAIR Heavy Ion Synchrotron Project SIS100”, in Proc. 6th International Particle Accelerator Conference, Richmond, VA, USA, pp. 3715–3717, 2015.
- [4] E. Fischer *et al.*, “From Design Towards Series - The Superconducting Magnets for FAIR”, in Proc. of International Particle Accelerator Conference (IPAC'16), Busan, Korea, pp. 1167–1170, 2016.
- [5] E. Fischer *et al.*, “Production Status of the SIS100 Superconducting Magnets for FAIR”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26 no. 4 pp. 4005405–4005405, June, 2016.