

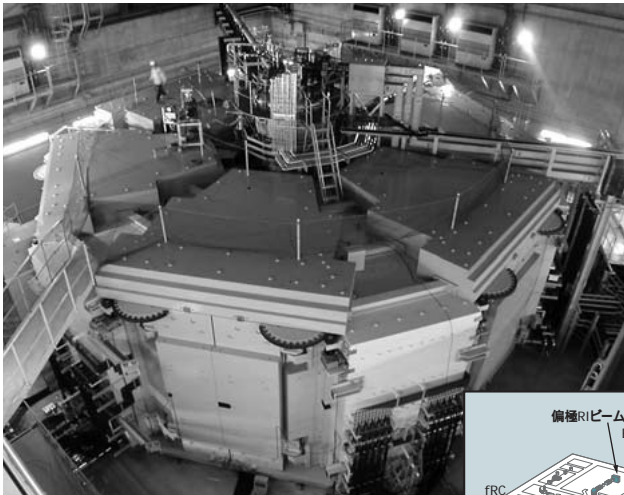
超伝導リングサイクロトロンセクター電磁石の完成

Completion of Sector Magnet for Superconducting Ring Cyclotron

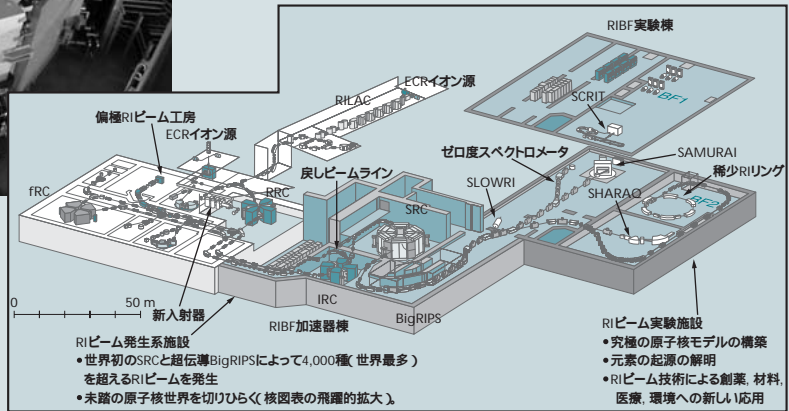
木戸 修一 Shuichi Kido
仙波 智行 Tomoyuki Semba

栞本 孝 Takashi Masumoto
萩原 好晃 Yoshiaki Hagiwara

山内 恒彦 Tsunehiko Yamauchi



(写真, 計画図提供: 独立行政法人理化学研究所)



注:略語説明 SRC(Superconducting Ring Cyclotron), RIBF(Radioactive Isotope Beam Factory), ECR(Electron Cyclotron Resonance)
 RILAC(RIKEN Heavy-ion Linac), RRQ(RIKEN Ring Cyclotron), FRQ(Fixed-frequency Ring Cyclotron), IRC(Intermediate-stage Ring Cyclotron)
 BigRIPS(Superconducting RI Beam Separator), SCRIT(Self-confining Radioactive Ion Target)
 SAMURAI(Superconducting Analyzer for Multi-particle from Radioactive Isotope Beam)
 SHARAC(Spectroscopy of Hadronic Systems with Radioactive Quantum Beam), SLOWRI(RF Ion-Guide for Slow and Trapped RI-beam)

図1 超伝導リングサイクロトロンの全景と、RIビームファクトリー計画図

独立行政法人理化学研究所に建設中の大型加速器施設「RIビームファクトリー(RIBF)」の計画図を右に、最終段加速器である超伝導リングサイクロトロン(SRC)の全景を左に示す。SRCについては、現地での据付け・試験がすでに完了し、ファーストビーム取り出しに成功している。現在は重イオン加速の世界最高性能達成に向け理化学研究所で調整を行っている段階である。

独立行政法人理化学研究所では、重イオン加速器施設「RIビームファクトリー(RIBF)」の建設が進行中であり、その最終段の加速装置として、ウランまでの重イオンを350 MeV/核子まで加速する世界初の超伝導化したリングサイクロトロンSRCが開発された。SRCの最重要機器である全6個のセクター電磁石は、日立製作所が、これまで培ってきた大型超伝導マグネットの製作技術をベースに製作を担当したものである。

セクター電磁石の各機器は2003年3月末に完成し、現地への搬入・据付けの後、2005年秋にノークエンチでの全超伝導コイル定格励磁を達成、2006年12月にはファーストビームの取り出しに成功している。

1.はじめに

近年、量子ビームの利用は、基礎科学のみならず生物・医学など幅広い分野へも応用が広がっている。日本の原子核研究の草分けである独立行政法人理化学研究所では、水素からウランまでの全元素にわたり、現在の世界水準をはるかにしのぐ性能を有する放射性同位元素を含む量子ビームを発生させる、次世代の重イオン加速器施設「RIビームファクトリー(RIBF:Radioactive Isotope Beam Factory)」の整備に1997年から着手した¹⁾。RIBFは複数の大型サイクロトロンを多段式に用いて粒子を加速する、世界に冠絶する重イオン加速器施設であり、その最終段の加速装置として、世界初の超伝導化したリングサイクロトロンSRC(Superconducting Ring Cyclotron: 超伝導リングサイクロトロン)を開発した²⁾(図1参照)。

表1 SRCの主要諸元

SRCに求められる基本仕様を示す。

項目	仕様
K値	2,600 MeV
最大磁場	3.8 T
最大磁気エネルギー	240 MJ
RF周波数	18~42 MHz
入射半径	3.56 m
出射半径	5.36 m
総重量	8,300 t

注:略語説明 RF(Radio-frequency)

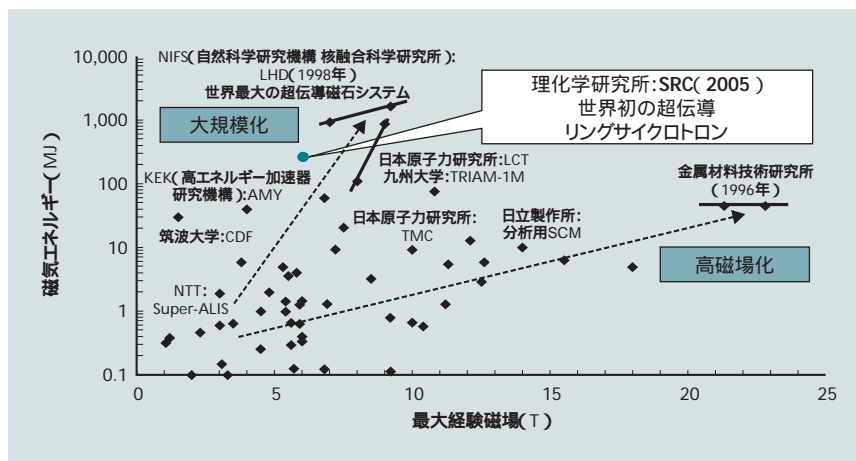


図2 日立製作所における超伝導マグネットの製作実績

日立製作所がこれまでに製作した超伝導マグネットの実績を示す。大規模化と高磁場化の二つの方向性を持っている。

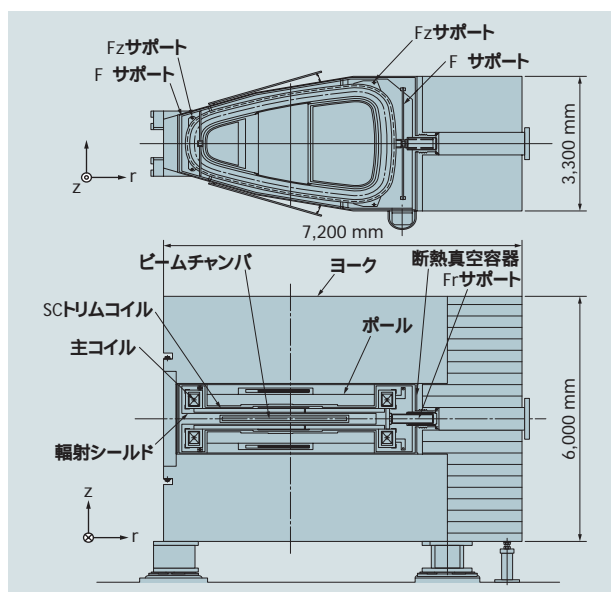
ここでは、日立製作所が担当した、SRCの最重要機器であるセクター電磁石の主要機器について述べる。

2. SRCセクター電磁石の概要

SRCは、RIBFの多段サイクロトロン最終段としてウランまでの重イオンを350 MeV (Mega Electron Volt) 核子まで加速するため強力な磁場が要求され、リングサイクロトロンとしては世界初の超伝導化を行った。SRCの主要諸元を表1に示す。SRCは全蓄積エネルギー240 MJに及び粒子加速器用としては前例のない大型6セクターの超伝導マグネットシステムであり、同時に加速器としての高い製作精度も必要となるため、これらをいかに実現するかが最大の課題となった。

日立製作所はこれまで核融合装置用などの大型超伝導マグネットを製作しており、この装置にその製造技術を適用した。日立製作所における超伝導マグネットの製作実績を図2に示す。

セクター電磁石の機器構成を図3に示す。主要な機器である(1) 4 Tの主磁界を発生させる主コイル、(2) 最大1 Tの補正磁場を発生させて傾斜磁場を作り出すSC(Superconductivity) トリムコイル、(3) コイル系を極低温に保つために周囲から熱



注:略語説明 SC(Superconductivity)

図3 SRCセクター電磁石の機器構成

2種類の超伝導コイルとクライオスタットおよび常温のポール・ヨークから構成する。

絶縁させるための断熱サポート、輻射シールドから成るクライオスタットのうち、(1)と(2)の超伝導コイルについて、主要諸元を表2に示す。

与えられた要求仕様・制約条件下で超伝導状態を安定に保つためには、導体を液体He温度(4.2 K)に保持し続けることが必須事項となる。この目的達成のため、NbTi線より線をAl安定化材で覆った複合超伝導線を使用することとし、これにより浸漬冷却方式の主コイルにおける完全安定化および間接(伝導)冷却方式のSCTリムコイルにおける熱伝導率向上を実現した。

表2 超伝導コイルの主要諸元

2種類の超伝導コイルに求められる基本仕様を示す。

1. 主コイル

項目	仕様
起磁力	4 MAT/セクター
定格電流	5,000 A
冷却方式	浸漬冷却
超伝導導体	Al安定化材NbTi燃線(外形8×15 mm)
巻線方式	ソレノイド巻

2. SCTリムコイル

項目	仕様
定格電流	3,000 A
冷却方式	間接(伝導)冷却
超伝導導体	Al安定化材NbTi燃線(外形8×15 mm)
巻線方式	ダブルバンケーキ巻

3. SRCセクター電磁石の製作

3.1 主コイル

Al安定化材超伝導導体を用いた大型非円形コイルの製作

における三つの課題と、それらを克服するためにとった対策は以下のとおりである(図4参照)。

(1) 導体が軟らかいことによる変形や異物による短絡の危険性
短絡に対しては、構造や作業手順を工夫してリスクを低減するとともに、徹底した異物管理や作業途中での電気試験による確認を強化することで発生を防いだ。

(2) クエンチ(突然超伝導状態が破れる現象)発生を防ぐための導体の固定
導体固定に関しては、軟らかいAl安定化材に変形・損傷を与えることなく、力をかけて密着させることが要求される。これを次の3段階の手順により実現すると同時に、コイル中心に要求される巻線精度(±0.6 mm)を確保することにも成功した。

- (a) 導体に張力をかけて巻線して径方向に導体を密着する。
- (b) コイルとコイル容器内壁間にコッター(くさび)を入れて軸方向に加圧し、導体間を密着させる。
- (c) 巻線完了後、コイル外周面全体に必要な面圧が均一にかかるようにコイル外周面と外側板内周面の間の接触度合いを感圧紙によって確認・調整する。当たり面を確保した後、外側板をコイルに密着させ、高強度鋼製のボルトで締め付けてコイルを固定する(図5参照)。

(3) 導体接続要領

Al導体接続の従来技術はCuメッキ後はんだ接合か溶接接合であったが、今回は摩擦攪拌(かくはん)接合法(FSW: Friction Stir Welding)を採用した³⁾。これは回転ツールを接合部に押し当てて摩擦熱によって軟化した金属に塑性流動を起こして一体とする方法で、低温で接合可能な点など多くの特長がある。この方法で、接続長300 mmで超伝導特性を損なわずに母材以上の接合強度と5 n 以下(5 K, 4 Tに

おいて)の低抵抗を実現した。

3.2 SCTリムコイル

主コイルとビームチャンパの間の狭い空間に設置し、サイクロトロンに必要な傾斜磁場への補正を行うSCTリムコイルに特有の二つの課題と、それらの解決のために実施した対策は以下のとおりである(図6参照)。

(1) 超扁(へん)平形で上方に浸漬冷却にて発生するHeガスの泡抜き空間がとれない。

泡抜ききの課題に対しては、浸漬冷却方式ではなく二層流強制冷却配管による間接(伝導)冷却方式とすることを解決策とした。ただし、この場合には超伝導導体をいかに冷却するかという新たな課題が発生する。この間接冷却の課題は次の対策により克服した。

- (a) 超伝導導体のみならず、構造物/冷却配管すべてを純AlまたはAl合金製にして熱伝導率を向上させた。
- (b) 冷却配管はコイル支持体のベース板に断続溶接とした。
- (c) 冷却配管を有するベース板とコイルを接着することにより、必要な熱伝達率が確保できることを要素試作によって確認し、電磁力が働いても接着がはがれない材料・施工要領の組み合わせを数多くの引張試験の結果として選定した。具体的には、導体表面をガラスプリプレグテープにより絶縁し、さらに接着力の強いエポキシ樹脂を追加塗布して、コイル軸方向にバネ力で加圧しながら加熱硬化させる手法を採用した。施工後、接着面の剥(はく)離が生じていない

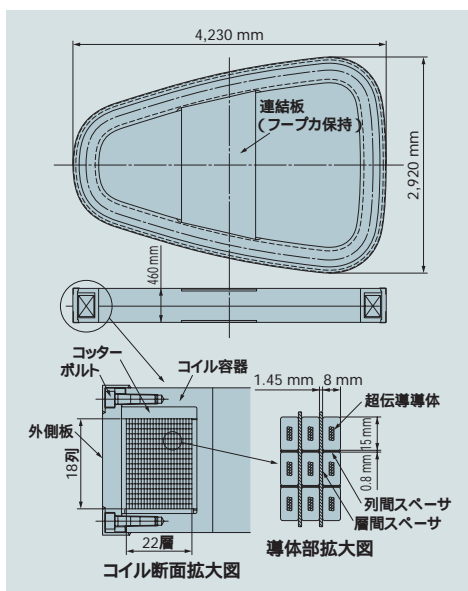


図4 主コイル形状
主コイルの全体図とコイル巻線部分・導体部分の拡大図を示す。

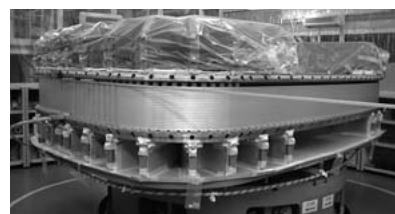


図5 主コイル巻線状況
導体に張力をかけてソレノイド巻線し、コイルとコイル容器内壁間にコッター(くさび)を入れてコイルを軸方向下向きに加圧している。

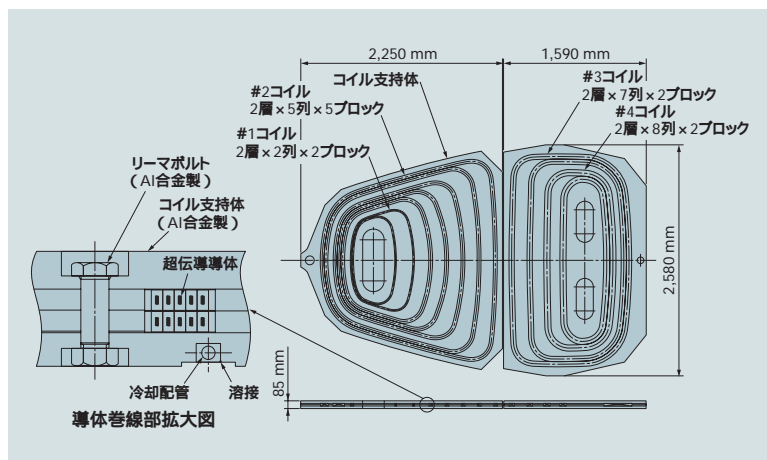


図6 SCTリムコイル形状
SCTリムコイルの全体図とコイル巻線部の拡大図を示す。SCTリムコイルは四つのコイルから成り、2コイルずつ別々の支持体に収めている。

ことを超音波探傷試験で確認している。

(2) 導体を径方向に離散的に配置した形状になる。

巻線形状については、Al合金製のコイル支持体を高精度機械加工によって製作し、この形状に合わせて巻線することで必要な寸法精度を確保した。この支持体は分割構造として巻線の進行に合わせて順々に組み立てる必要があり、冷やし嵌(ばめ)ピンとリーマボルトを多用することで、要求精度と電磁力に対する機械強度を確保した(図7参照)。

3.3 クライオスタット

常温部からの極低温部支持のため、 r 、 θ 、 z の3方向に断熱サポートを配置する。 z 方向の重力と地震力は、熱侵入量低減と強度確保を目的にTi合金製ロッド型サポート各8本を用いて支持した。 r 方向の電磁力と地震力は、長手方向の空間的制約と機械強度確保、熱侵入量低減の観点からSUS(Stainless Used Steel)製三重円筒の折り返し構造を有するサポート1本を用いて外周片側から支持した。

80 Kの輻(ふく)射シールドは組立上の制約によって極低温部から支持する方針とし、熱侵入量低減と熱応力緩和のためFRP(Fiber Reinforced Plastics)製ロッド型サポートをスライドさせるか、板バネを入れる構造とした。なお高放射線環境にさらされる場所には、多層反射断熱材の基材にポリイミドを採用した。

4. 現時点でのSRCの稼働状況

セクター電磁石の各機器は2003年3月末に完成し、工場内部分組立の後、現地への搬入・据付けが行われた(図8参照)。2005年秋にはSRC全体が完成し、初冷却でノークエンチでの全超伝導コイル定格励磁を達成後、試験調整を経て、

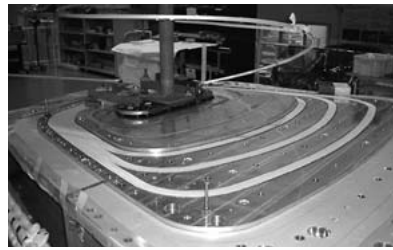


図7 SCトリムコイル巻線状況

分割構造のAl合金製支持体部品の組み立てと巻線を交互に行いながら、特殊形状のダブルパンケーキを巻線していく。



図8 工場内での部分組立状況

現地据付け作業工程の短縮を目的に、完成したセクター電磁石の機器を工場内で部分的に組み立てた後、現地に搬入することとした。

2006年12月にはファーストビームの取り出しに成功した。

またRIBFとしては、利用系の基幹実験設備の整備も始まり、すでに短寿命新RIの生成などの成果が出始めている。

5. おわりに

ここでは、SRCセクター電磁石の完成に至るまでの主要機器における技術開発について述べた。

この装置の製作を通じて開発、確立された技術は、将来の大型加速器プロジェクトへの適用拡大が期待される。

終わりに、この装置の開発にあたっては、独立行政法人理化学研究所をはじめ、関係各位から多大なご指導とご協力をいただいた。ここに深く謝意を表する次第である。

参考文献など

- 1) 矢野:理研「RIビームファクトリー計画」,日本加速器学会誌,Vol.2, No.2, 170~175(2005)
- 2) 理化学研究所 仁科加速器研究センター, <http://www.rarf.riken.go.jp/>
- 3) 岡村,外:摩擦攪拌接合による超伝導コイル導体の接合,軽金属学会 第100回春期大会講演概要(2001.5)

執筆者紹介



木戸 修一
1996年日立製作所入社,電力グループ 日立事業所 医療・核装置生産本部 核融合・加速器部 所属
現在,核融合実験装置・超伝導応用機器の設計に従事
博士(工学)
プラズマ・核融合学会会員



仙波 智行
1989年日立製作所入社,電力グループ 日立事業所 医療・核装置生産本部 核融合・加速器部 所属
現在,超伝導応用機器・低温機器の設計に従事
博士(工学)
日本加速器学会会員,低温工学協会会員



折本 孝
1970年日立製作所入社,電力グループ 日立事業所 医療・核装置生産本部 核融合・加速器部 所属
現在,核融合実験装置・加速器用機器・超伝導応用機器・低温機器の設計に従事



萩原 好晃
1994年日立製作所入社,電力グループ 日立事業所 医療・核装置生産本部 核融合・加速器部 所属
現在,超伝導応用機器の設計に従事



山内 恒彦
1979年日立ニュークリア・エンジニアリング株式会社(現株式会社日立エンジニアリング・アンド・サービス)入社,火力・水力本部 電機サービス部 所属
現在,核融合実験装置・加速器用機器・超伝導応用機器の設計に従事