

Excitation Test and Magnetic Field Measurement of the Superconducting Ring Cyclotron

Jun-ichi Ohnishi, Hiroki Okuno, Kazunari Yamada, Makoto Hamanaka, Nobuhisa Fukunishi, Makoto Nagase, Kumio Ikegami, Hiroo Hasebe, Takeshi Maie, Masayuki Kase, Akira Goto, and Yasushige Yano

Nishina Center for Accelerator-based Science, RIKEN

2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

Abstract

Construction of the superconducting sector magnets for the SRC were completed in September 2005. After cooling down for one month, excitation of the superconducting main coils and trim coils succeeded at the nominal currents without quench. According to the measurement of the magnetic force acting on the coils during the excitation, stresses of the thermal insulating supports were within design values. Magnetic field measurements were carried out for two months to acquire the data for making the isochronous magnetic fields and the data of the magnetic perturbation from the beam injection and extraction elements.

超伝導リングサイクロトロンへの励磁試験と磁場測定

1. はじめに

建設中の超伝導リングサイクロトロン(SRC)は、RIビームファクトリー加速器群の最終段の加速器で、ウランまでのすべての元素を核子あたり350MeV以上のエネルギーに加速することができる^[1]。SRCのセクター電磁石は2005年9月に据付工事を完了し、ほぼ1ヶ月間の冷却の後、励磁試験を開始し、11月7日にメインコイルおよび4つのトリムコイルの定格電流値における通電に成功した。その後、断熱真空部へのリークが起きたため、いったん昇温して修理を行なった。2006年3月より再冷却、再励磁を行ない、6月まで約2ヶ月間磁場測定を行なった。現在、RF、真空、ビーム診断系の据付、調整が行なわれており、2006年12月からビームコミッションングの予定である。

2. 励磁試験

2.1 セクター電磁石

SRCは6台の超伝導セクター電磁石からなり、軌道部分の最大磁場が3.8 T、蓄積エネルギーが235 MJで、総ヨーク重量は7800トンである。SRCの平面図を図1に示す。これは磁場測定時のものを示しており、4台のRF共振器は書かれていない。ビームの入射半径と取り出し半径はそれぞれ3.56mと5.36mである。一部のみ描かれているシールドは純鉄0.8m厚さで、実際には全部のバレー部の上下を覆う構造になっており、磁気ヨークと放射線シールドの役割をもつ。各セクター電磁石は上下1対の超伝導メインコイルと4対の超伝導トリムコイルを持っており、等時性磁場を生成する。超伝導コイルの諸元を表1に、配置図を図2に示す。磁極間隙は最小部で640mmである。図3にセクター電磁石の励磁曲線を示す。

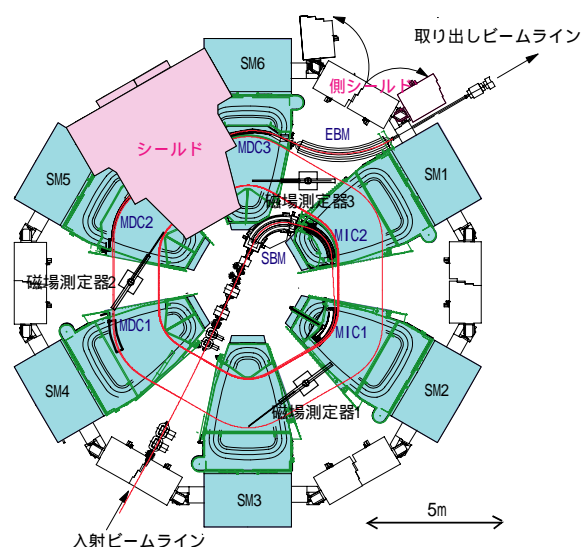


図1：SRC平面図と磁場測定器の配置

表1：メインコイルとトリムコイルの諸元

	メインコイル	トリムコイル
導体	15mm x 8mm Al安定化NbTi線	15mm x 8mm Al安定化NbTi線
定格電流値	5000 A	3000 A
コイル数	1対/セクター	4対/セクター
巻数と巻線方式	18列22層ソレノイド巻	ダブルパンケーキ巻き(2列x2ブロック、5列x5ブロック、7x2ブロック、8列x2ブロック)
冷却方式	LHe浸漬冷却	LHe気液2相流による間接冷却

2.2 クエンチ保護

励磁試験においてはコイルのクエンチ保護システムが健全に働くかコイルに発生する電磁力が設計と違わないかということ念頭に試験を実施した。クエンチ検出は各セクター電磁石の対を成している上下コイルに発生する電圧の差(抵抗成分)を計測することによって行ない、検出レベルをメインコイ

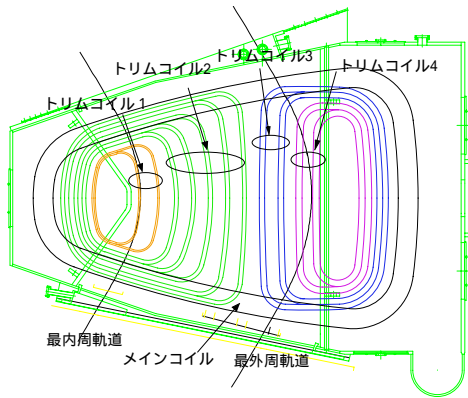


図2：超伝導コイルの配置

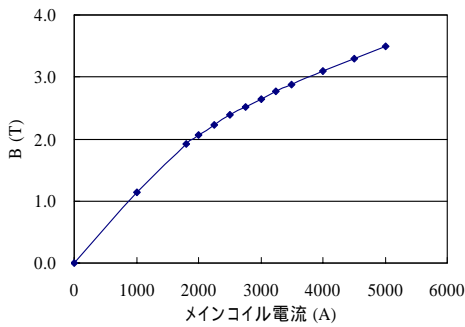


図3：励磁曲線(R=5.45m)

ルは0.1V-0.5秒間、トリムコイルは0.1V-0.1秒間に設定した。クエンチが検出された場合、直流遮断器により電源を負荷と遮断するとともに、コイルの蓄積エネルギーを保護抵抗に消費させる。メインコイルでは温度上昇を150K程度に抑えるため、抵抗値を0.3、約60秒の時定数で放電させる。トリムコイルは0.05、時定数0.003-0.6秒である。電源の遮断は各分流電源、トリムコイル主電源、メインコイル主電源の順に直流遮断する。1000A、3000A、5000Aの各電流値において電流遮断試験を実施して、これらの遮断シーケンス、遮断時の各コイルの電流、電圧波形が設計どおりであることを確認した。

2.3 コイルに働く電磁力

上下のメインコイルとトリムコイルはLHe温度部で連結一体化され、図2に示すように室温部から鉛直方向に8本、サイクロトロン径方向に1本、周方向に8本の断熱支持棒により固定されている。鉛直方向、周方向は対称位置からのずれ量に比例した電磁力が発生する。径方向については対称ではないので、励磁に伴って外側へ向かう電磁力が発生する。これらの電磁力をTOSCAによる3次元磁場計算によって求めて、構造計算を行い、支持棒形状を設計した。全セクター電磁石の断熱支持棒(計102本)に発生するひずみ(電磁力)を計測した。周方向の変位量は断熱支持棒のひずみ量から換算して最大0.1mm程度であったが、鉛直方向の断熱支持棒は定格励磁において中心側で0.4~0.5mm、外側で0.3mm収縮した。これは支持棒支点部のヨークの変形によるものであると考えられる。Fr支持棒のひずみ量から換算した

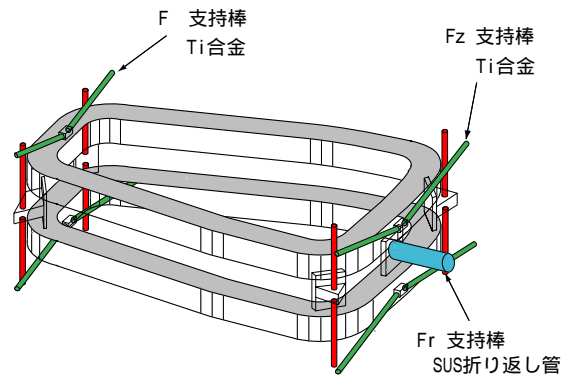


図4：コールドマス断熱支持体

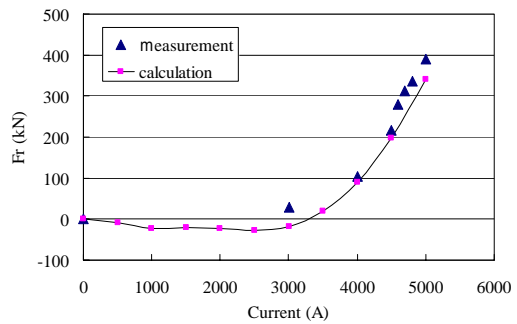


図5：Fr支持体に働くR方向の電磁力 (測定値とTOSCA計算値)

径方向の電磁力の測定値とTOSCAによる計算値は図5に示す。両者はよく一致している。コイルの最大変位量は0.6mm程度に相当する。

2.4 定格励磁

メインコイル3000Aでの電流遮断試験を行なった後、コイルに働く電磁力を確認しながらメインコイル電流値を5000Aまで上げていき、クエンチすることなく定格電流値5000Aに到達した。さらにトリムコイルを順に励磁しクエンチすることなく3000Aの定格通電を達成した。メインコイル電流のランプ速度は電源容量と渦電流損失によるトリムコイルの温度上昇によって制約されており、0Aから700Aまでは0.5 A/s、700Aから5000Aまでは1 A/s、トリムコイルは5 A/sに設定した。

3. 磁場測定

3.1 測定方法と条件

磁場測定は3台の磁場測定器を図1に示すように配置して、ホール素子によるマッピングを行なった。各測定器に5個のホール素子を取り付けられており、回転と一軸の並進駆動により60度の範囲の測定が可能である。測定位置精度は1mm以内である。測定器を途中で移設して加速軌道の全領域を測定した。測定メッシュ間隔は等時性磁場作成のための補間精度から50mm程度とした。60度の1マップは約8500点で測定時間は約3時間30分であった。各種イオンに

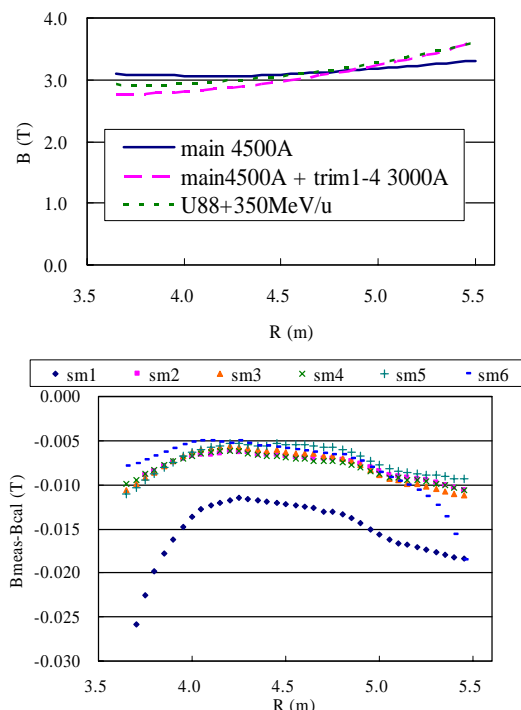


図6：セクター電磁石中心線上の磁場分布（上）とメインコイル磁場の各セクター電磁石における測定値とTOSCA計算値からの偏差

ついて等時性磁場を作成するため、メインコイル電流値1800A~5000A（中心付近の磁場で1.7T~3.3T）の範囲の10レベルでベース磁場とトリムコイルを励磁した磁場の測定を行なった。測定期間は約50日間、全マップ数は390、全計測点数は約330万点であった。

3.2 セクター電磁石中心における磁場分布

セクター電磁石中心線上の磁場分布とTOSCAによる3次元磁場計算からの偏差を図6に示す。入射取り出し領域を除くとSM1以外の電磁石では計算値より50~110ガウス(0.16%~0.35%)、SM1では110~180ガウス(0.35%~0.58%)小さい。SM1は実機大モデル電磁石のヨークを改造したためにヨークの材質と形状が他のセクターと若干異なっている。他の5セクターはなるべく同じロットの鋼板を同じ部分に使用しているため、ばらつきが小さい。ヨーク材には、炭素含有率が0.01wt%以下、Mn、Siについてもそれぞれ0.2wt%、0.01wt%以下の純鉄を使用している。これはヨークの上下非対称性による水平磁場成分を極力小さくするためである。ビーム入射用磁気チャンネルMIC2と取り出し用磁気チャンネルMDC3（図1参照）には鉄が使われているため、SM1は内周側、SM6は外周側において、磁場の減少が見られる。

3.3 平均磁場による等時性磁場の作成

各セクター電磁石におけるビーム軌道に沿った平均磁場とTOSCA計算値からのずれを図7に示す。入射取り出し用電磁石の影響があるSM1とSM6を除くと計算値より50~70ガウス(0.4%程度)小さい。この20ガウス程度のばらつきはコイルの形状誤差と磁場

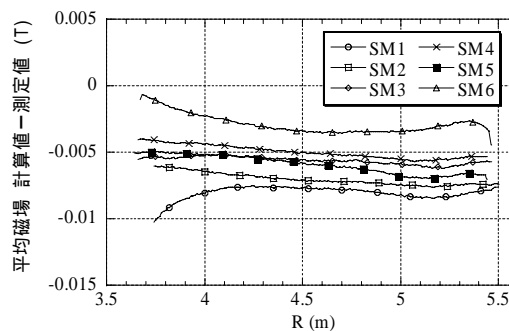


図7：メインコイル4500Aにおける各セクター電磁石の平均磁場のTOSCA計算値からの偏差

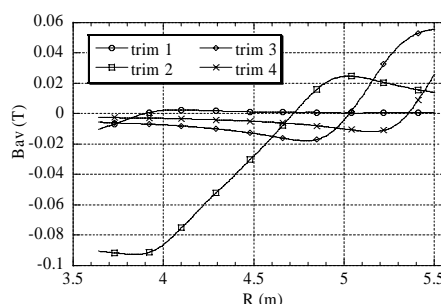


図8：トリムコイル平均磁場（メインコイル4500A）

測定器の位置誤差によると考えられる。SM6はビーム取り出し用の電磁石EBM（15トン）がバレー部分の逆方向の磁場（バレー中心で-600ガウス程度）を吸収するために平均磁場が大きくなっている。また、SM1とSM6は磁気チャンネルMIC2とMDC3によってその付近の平均磁場は減少している。ウランビームの加速では10ガウスの1次ハーモニック磁場により入射側で7mm、取り出し側で3mm程度の軌道のゆがみを生じるので、この程度以下に補正する必要がある。EBM、MIC2、MDC3は自身が持っている補償コイルの励磁により加速軌道部における誤差磁場の補正が可能であった。メインコイルは各セクター毎に、トリムコイルはSM1-SM6、SM2-SM3、SM4-SM5の2セクター毎に分流電源（100A）を持っており、ハーモニック磁場の補正を行なうことができる。

メインコイル4500Aにおいて4つのトリムコイルが作る平均磁場を図8に示す。これらの平均磁場から加速ビームに合った等時性磁場を生成するコイル電流値が計算される。ビーム運転時の調整を容易にするため、等時性磁場作成の目標精度は0.1%以下である。

参考文献

- [1] H. Okuno, et al., “理研超伝導リングサイクロトロン の現状報告”, in these Proceedings.
A. Goto, et al., “Progress on the sector magnets for the RIKEN SRC”, AIP Conf. Proc. 600, 319 (20001).
- [2] J. Ohnishi et al., “理研超伝導リングサイクロトロンセクター電磁石の電源システム”, Proc. the 14th Symposium on Accelerator Science and Technology.