

理研超電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

大西純一、冨中利治、奥野広樹、長瀬誠、後藤彰

理化学研究所 加速器基盤研究部

〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

概要

理化学研究所で建設を進めている超電導リングサイクロトロン (SRC) のセクター電磁石の電源システムの設計を行い、超電導メインコイル及びトリムコイル電源の実機を製作した。本論文では超電導コイルの保護回路を中心に電源システムの設計について述べる。

1 はじめに

理化学研究所で建設を行っている「RI ビームファクトリー」は既存の重イオンリニアックとリングサイクロトロンからのビームをさらに 3 つのサイクロトロンでカスケード加速して、すべての元素にわたり核子あたり 350 MeV から 450 MeV までのエネルギーの 1 次ビームを生成する [1]。最終段に置かれる超電導リングサイクロトロン (SRC) は 6 台の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 250 MJ で、総ヨーク重量は 7800 トンである [2]。図 1 にセクター電磁石の平面図と立面図を示す。上下 1 対の超電導メインコイルと 4 対の超電導トリムコイルによりビーム軌道面に等時性磁場を生成する。この他に磁場の微調整を行う 2 2 対の常伝導のトリムコイルが置かれている。以下では超電導のメインコイルとトリムコイルの電源システムについて述べる。

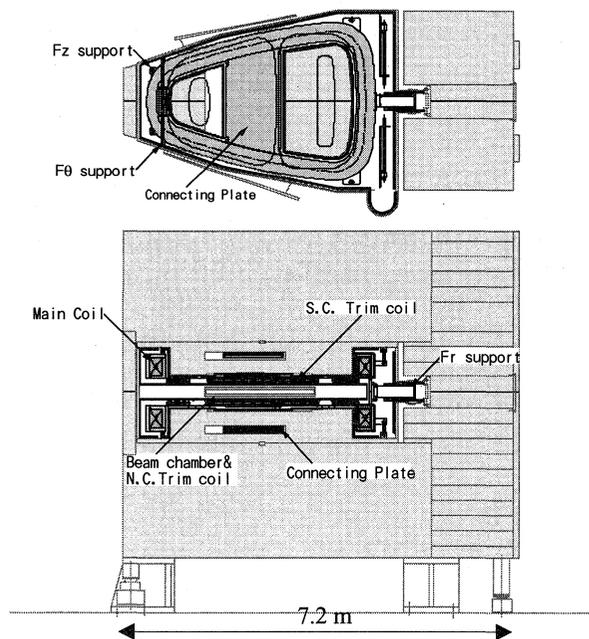


図 1 : SRC セクター電磁石

2 SRC 超電導コイル電源システムの構成

2.1 超電導コイル接続回路

図 2 にメインコイル及び超電導トリムコイルと電源の接続図を示す。メインコイルは定格電流値 5200 A の主電源 (P0) とセクター間のコイル電流を微調する 100 A 補助電源 6 台 (P01~P06) により励磁される。トリムコイルは 4 台の定格電流値 3200 A の主電源 (P1~P4) と 2 台の 400 A (P11, P12) 及び 6 台の 100 A (P21~P42) の補助電源が使用される。トリムコイル電源はすべて、電流の極性を切り替えることができる。補助電源はビーム入射取出し用電磁石などによる磁場の 1 次ハーモニック成分を補正するために使用される。図 2 に示すようにトリムコイルの電流リードは液体ヘリウム温度への入熱を小さくするため、コイル間の電流リードを共通化している。共通部の電流リードの定格は運転に必要な電流値を考慮し 4200A とし、それ以上の電流が流れないように電源にインターロックを設定した。

2.2 各電源の仕様

各電源の諸元を表 1 に示す。各電源は定電流モードで運転し高い安定度を要する。電流のランプ速度は超電導コイルにおける渦電流損失による熱負荷量と電源容量を考慮して決定した。図 3 にメインコイルとトリムコイル主電源の回路構成を示す。メインコイル主電源は IGBT を使用したコンバータ回路+チョッパ回路、トリムコイル主電源はサイリスタ+トランジスタにより定電流出力を得ている。主電源の電流検出は DCC T (HiTEC 社 TOPACC, CURACC) を使用した。メインコイル主電源の模擬負荷による通電試験では 8 時間の安定度は 4.5 ppm であった。

表 1 : 電源の諸元

	台数	出力電流 (A)	出力電圧 (V)	ランプ速度 (A/s)	8時間安定度	保護抵抗
超伝導メインコイル主電源	1	5200	±35	0.1~1.5	5×10^{-6}	0.3Ω 0.015Ω
超伝導メインコイル分流電源	6	100	±16	0.1~1.5	2×10^{-5}	2Ω
超伝導トリムコイル主電源	4	3200	±8	0.1~5.0	5×10^{-6}	0.05Ω
超伝導トリムコイル分流電源 (コイル# 1 用)	2	400	±10	0.1~5.0	2×10^{-5}	0.1Ω
超伝導トリムコイル分流電源 (コイル# 2, 3, 4 用)	6	100	±16	0.1~5.0	1×10^{-4}	0.3Ω

3 超電導コイル保護回路

3.1 放電モード

コイルにクエンチが起きた場合や電源異常時などには

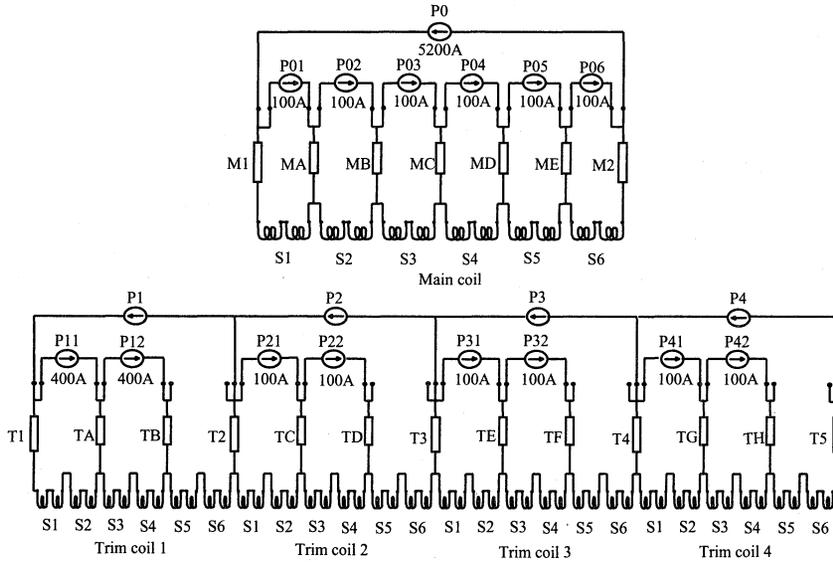


図2：超電導セクター電磁石配線図
M1, M2, MA~ME, T1~T5, TA~TH は電流リードを示す。

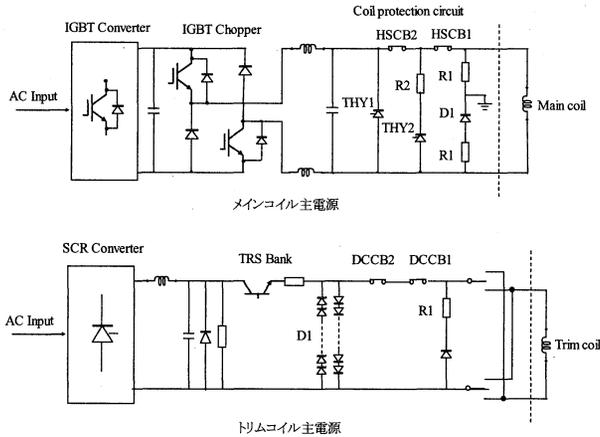


図3：電源回路

電源を確実に遮断して、電磁石の蓄積エネルギーを所定の時定数で保護抵抗に放出させる必要がある。メインコイルは高速放電用と低速放電用の抵抗値がそれぞれ 0.3Ω と 0.015Ω の放電抵抗 (図3上の R1 及び R2) を持つ。高速放電はメインコイルがクエンチした時に使用し、その時定数 (約 60 秒) は常伝導転移したコイルの温度が最高 150 K 程度になるように決められている[3]。一方、停電、電源故障、冷却水停止、冷凍機異常などコイルクエンチ以外の原因で電源を停止させる必要がある場合は、急激な電流減衰により発生する液体ヘリウム温度における渦電流損失を小さくするため低速放電を行う。

超電導トリムコイルの高速放電用の保護抵抗 (図3下の R1) は 0.05Ω で、放電時間はコイル1から4のインダクタンスにより 0.3~3.8 秒である。低速放電は図3下のクランプダイオード D1 によって行われ、放電時間は 0.4~55 秒である。クエンチ及び故障時の各電源の放電モードを表2にまとめる。

3.2 電源遮断の手順、保護抵抗器

表2：各電源の放電モード

		メインコイル		トリムコイル	
		主電源	補助電源	主電源	補助電源
クエンチ	メインコイルクエンチ	高速放電	遮断	高速放電	遮断
	トリムコイルクエンチ	運転継続	運転継続	高速放電	遮断
故障	冷凍システム異常	低速放電	遮断	低速放電	遮断
	停電	低速放電	遮断	低速放電	遮断
	メインコイル主電源故障	低速放電	遮断	運転継続	運転継続
	メインコイル補助電源故障	運転継続	遮断	運転継続	運転継続
	トリムコイル主電源故障	運転継続	運転継続	低速放電	遮断
	トリムコイル補助電源故障	運転継続	運転継続	運転継続	遮断

メインコイルにクエンチが発生した場合は、図3のメインコイル主電源の回路図で、①出力チョッパーのゲートをオフする。②サイリスタ THY1 を ON して転流させる。③直流遮断器 HSCB1 と HSCB2 を開極して、励磁電流を保護抵抗 R1 に転流させ、コイルの蓄積エネルギーを保護抵抗に消費させる。この動作によりコイル電流は時定数 $L/R = 63\text{ s}$ で減衰する。2つの直流遮断器を開極するのは一つが動作しなかった場合のバックアップである。クエンチ以外の異常時は直流遮断器 HSCB2 を開極するとともに THY2 を ON し、1/20 の抵抗値の R2 により低速放電が行う。保護抵抗はそれぞれ重量約 2 トンの鉄製の抵抗器からなり、通常風冷であるが、停電時などを考慮して無冷却で全エネルギーを吸収できる設計としている。抵抗器は通電試験を行った結果、最高温度上昇は約 200 度であった。

3.3 コイルのインダクタンス

1 台のセクター電磁石におけるメインコイルとトリムコイルの配置を図4に示す。各コイルの自己インダクタンスと相互インダクタンスは 3 次元の磁場計算コード TOSACA で各励磁状態によるエネルギーを計算することにより求めた。結果を表3に示す。6 台のセクター電磁石間の磁気的な結合は大きくないため、無視している。また、SRCセクター電磁石は鉄ヨークを持っているために励磁レベルによってインダクタンスが変化するが、メインコイルについては最大励磁した場合の全エネルギーから計算し、トリムコイルは鉄芯のある場合とない場合の値

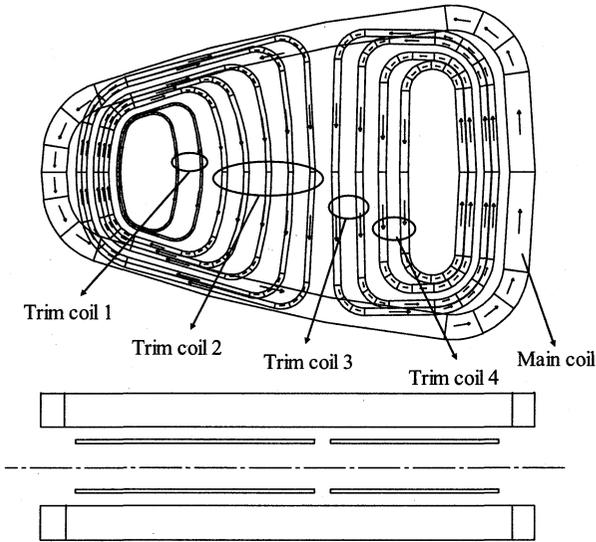


図4：コイル配置図

表3：各コイルのインダクタンス（6セクター電磁石）
トリムコイルのインダクタンスは鉄ヨークを考慮した
場合（前）としない場合（後）を示す。（単位：mH）

	Main	Trim1	Trim2	Trim3	Trim4
Main	18782				
Trim1	-51/-18	1.8/1.3			
Trim2	-1180/-364	9.7/4.2	188/88		
Trim3	813/273	0.0/0.1	0.1/3.5	89/42	
Trim4	445/139	0.0/0.0	0.0/1.3	46/18	52/31

を併記している。

3.4 電源遮断時のコイル電流と電圧

コイル間に磁気的な結合があるので、高速放電および低速放電時のコイル電流及び電圧について回路シミュレーションを行い、保護抵抗値を決定し安全性を確認した。

メインコイルの高速放電を行う場合、最初にすべての補助電源を遮断し、次にトリムコイル主電源の遮断を行った後、メインコイル主電源の遮断を行う必要がある。このときのメインコイルとトリムコイルの電流と電圧の変化の計算結果を図5に示す。電流方向は図4に示す方向で、定格電流値から $t=0.5\text{ s}$ にトリムコイルを、 $t=1.0\text{ s}$ にメインコイルを遮断した場合である。図からトリムコイル電流の増加や過電圧が生じていないことが分かる。

一方、トリムコイルの高速放電は回路シミュレーションによるとトリムコイル電源の極性によりメインコイルの電流値が最大145A程度増加する可能性があるが、メインコイル主電源の運転は継続が可能であることが分かった。また、メインコイル及び各トリムコイルの低速放電及び分流電源の遮断では、他の電源への誘起電圧は小さく運転は継続できることが確認できた。

3.5 コイル保護回路の信頼性向上対策

コイル保護回路の信頼性の向上を図るため、以下のよう
な対策を行った。（1）直流遮断器を2台直列に接続し

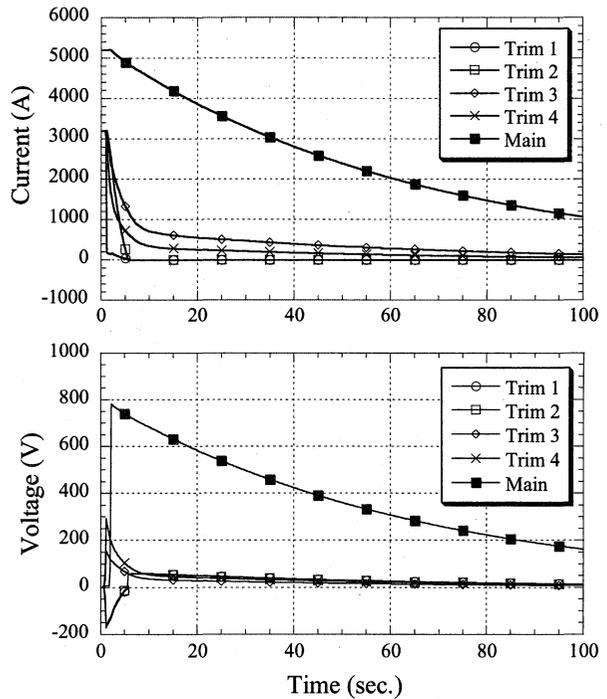


図5：メインコイル高速放電時の電流と電圧

2重化を行った。（2）停電時にも動作が可能であるように、クエンチ検出や直流遮断器操作などの制御電源をAC電源とUPS電源の2系統の入力として2重化した。（3）直流遮断シーケンスは通常PLCで制御するが、PLC異常時のためリレー回路によるバックアップを設けた。（4）停電時、断水時において動作が可能ないように、保護抵抗器及び還流ダイオードは自冷式とした。一部風冷の必要なものは冷却ファン電源をUPSでバックアップした。（5）メインコイルのクエンチ検出器を2重化した。（6）直流遮断器は定格電流値の10%以上の過電流で自己遮断するようにした。

4 おわりに

理研超電導リングサイクロトロン（SRC）セクター電磁石の電源の設計と製作は日立エンジニアリング（株）によって行われ、2003年3月に完成した。電源の調整及び通電試験はSRCの据付及び冷却後、2005年後半に行う予定である。

参考文献

- [1] Y. Yano et al., Proceedings of the 16th Int. Conf on Cyclotrons and Their Applications, East Lansing, USA 2001, p. 161.
- [2] A. Goto et al., Proceedings of the 16th Int. Conf on Cyclotrons and Their Applications, East Lansing, USA 2001, p. 319.
- [3] T. Tominaka et al., IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 12 (2002), p1587.