

## 論文内容の要旨

論文題目 83MVA 超電導発電機の回転子に関する研究

氏名 上田明紀

超電導発電機は回転子の界磁巻線に超電導導体を用いたものであり、単機容量の増大、発電効率の向上、電力システムの安定度向上などの優れた特徴がある。国内では、超電導発電機の実用化をめざし、ニューサンシャイン計画の一環として表1の仕様に基づく83MVA超電導発電機の製作と実証試験が行われている。本研究は、この開発において、界磁巻線に超電導導体を用いることで生じる技術課題に対して明確な解決策を示すことを目的として実施したものであり、以下の点が主要な研究課題である。

- i. 実用機の回転子の基本構造と特性を明らかにし、界磁巻線に適した超電導導体と支持、冷却方式を明確にする。
- ii. クエンチ時の回転子内ヘリウム圧力上昇、界磁巻線の熱的擾乱に対する安定性評価および界磁電流急変時の超電導導体温度上昇の解析方法を確立する。
- iii. 83MVA 超電導発電機の運転試験により、回転子の設計、解析手法が適切であり、回転子の信頼性が現用発電機に劣らないことを実証する。

表1 83MVA 超電導発電機的主要仕様

定格事項	容量 83 MVA	力率 0.9	電圧 10 kV
	周波数 60 Hz	回転数 3600 rpm	同期リアクタンス 0.35 p. u.
超電導界磁巻線の仕様	①電力システムで突発短絡が生じてても界磁巻線は安定である（クエンチしない）。 ②界磁電流を定格の1.2倍まで安定に流せる。 ③界磁電流を零から定格へ10秒以内で安定に変化できる。		

回転子の基本構造や界磁巻線の支持、冷却には、実用機に適した方式を採用した。すなわち、超電導導体には低交流損失の三層構造(Cu/CuNi/NbTi)の撚り線を用い、導体周囲の液体ヘリウムの自然対流で冷却した。また、界磁巻線は端部も含め全体をスロット中に納めて支持し、巻線取付軸の材料には4K、室温ともに高強度、高靱性の非磁性鋼 A286 を用いた。これらは従来の試作機では実績のない方式であり、後述するモデルコイルやロータ部分モデルなどの実験結果を反映し、83MVA 超電導発電機への適用に至ったものである。表 2 に回転子の主要設計諸元、図 1 に回転子の断面構造を示す。

表 2 83MVA 超電導発電機回転子の主要設計諸元

体格寸法	回転子外径	890 mm	界磁巻線	定格界磁電圧	5 V
	界磁巻線平均径	500 mm		定格界磁電流	3000 A
	界磁巻線有効長	1500 mm		界磁ターン数	740

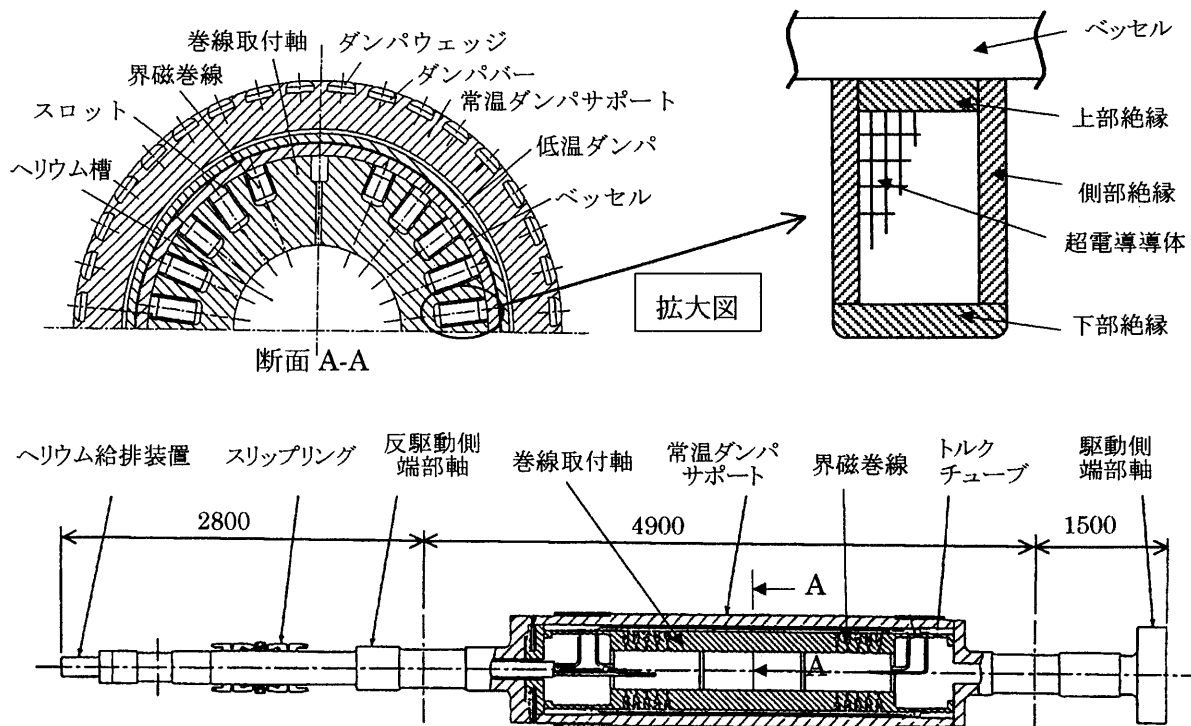


図 1 83MVA超電導発電機回転子の断面構造

界磁巻線に適した超電導導体と支持、冷却方式を明らかにするためモデルコイルによる通電実験を行なった。導体の Cu 比決定のため Cu 比 1 と 2 のモデルコイル (図 2) を用いて静止状態でクエンチ電流を比較した。表 3 に示すように Cu 比 1 の導体で構成したコイルは Cu 比 2 のコイルに比べ、導体の臨界電流は高いが、低い励磁電流でクエンチした。実験結果の評価と考察から界磁巻線の導体には Cu 比 2 が適切であることが明らかになった。

静止時と回転時ではコイルに加わる遠心力や冷却状態が異なるため、超電導導体の交流損失と界磁巻線の支持、冷却方式は3600 rpmで回転中のモデルコイル(Cu比2)のパルス励磁実験をもとに検討した。実験では励磁電流を急変させ、最大で22T/sの磁界変化を28ms間加えたが、クエンチを生じなかった。この結果から、電力系統で突発短絡が発生しても界磁巻線が安定を保つよう、超電導導体の交流損失値は磁界変化率5T/s(at 4.5T)で50kW/m<sup>3</sup>以下とした。また、約30回の起動停止やクエンチを行ったが通電特性の劣化はなく、モデルコイルに用いた支持、冷却方式が適切であることを確認した。この方式はロータ部分モデル、83MVA超電導発電機回転子にも適用した。

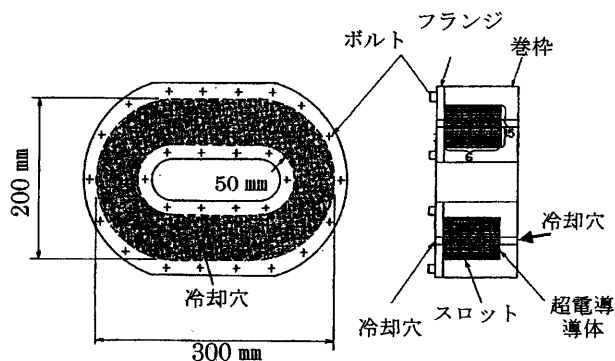


図2 静止モデルコイルの構成

表3 静止モデルコイルの比較

		コイル1	コイル2
導体	Cu/CuNi/NbTi比	1/1/1	2/1/1
	導体外形寸法	2.3×9.4mm	
	臨界電流 (実測値)	5 T	14300 A
7 T		8200 A	5870 A
コイル	ターン数	90	
	クエンチ電流 (実測値)	5000 A	6800 A at 6.5 T

クエンチ時の回転子の圧力上昇および界磁巻線の熱的擾乱に対する安定性を明確にするため、ロータ部分モデルを用いて実験を行なった。ロータ部分モデルの基本構造は83MVA超電導発電機回転子と同様であり、コイルの数と軸方向長さを減少している。直径が同一のため界磁巻線に作用する遠心力は同一である。比較を表4に示す。

表4 ロータ部分モデルと83MVA超電導発電機の回転子諸元比較

	ロータ部分モデル	83MVA機
界磁巻線コイル数	4	10
コイル軸方向長さ	760mm	1900mm
巻線取付軸外径	610mm	610mm

図3にロータ部分モデルのクエンチ後のヘリウム槽回転軸近傍の圧力の計測と解析結果を示す。解析では、微小時間毎の界磁巻線からヘリウムへの伝熱量およびヘリウムの回転子外への流出量を求め、圧力の変化を計算した。クエンチ時の発熱によるヘリウムの圧力上昇を正確に解析できるようになり、回転子の圧力に対する強度設計が可能となった。

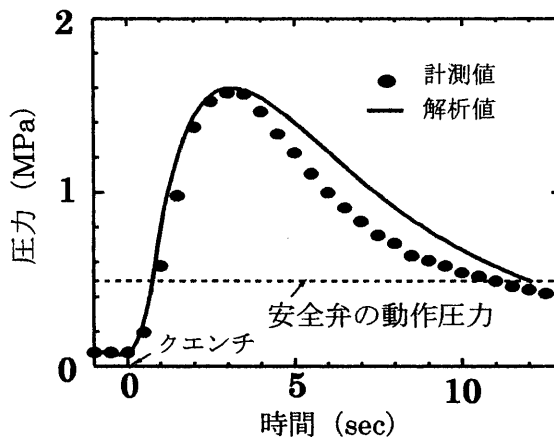


図3 クエンチ後の圧力変化

界磁電流通電時にヒータで超電導導体を加熱し、クエンチを発生させる熱量(クエンチエネルギー)を計測し、これを基にクエンチエネルギーの解析方法を導出した。計測と解析結果を図4に示す。クエンチエネルギーは常電導域の発熱量、および、液体ヘリウムの遠心力による冷却特性向上と断熱圧縮による温度上昇との関係から決まることが分かり、熱的擾乱に対する安定性と界磁電流、回転数の関係が明確になった。

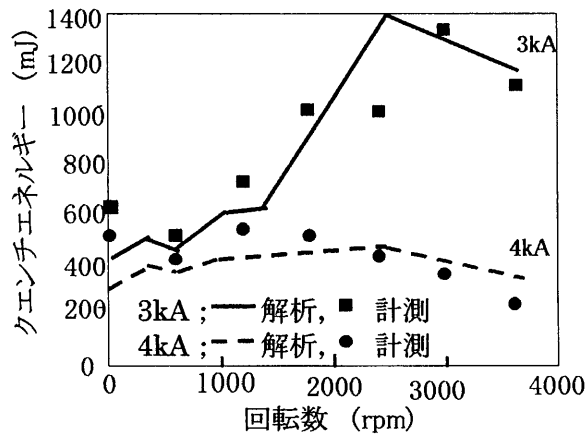


図4 クエンチエネルギーと界磁電流、回転数の関係

設計、解析手法の妥当性と回転子の信頼性を実証するため、83MVA超電導発電機回転子の単体および固定子との組合せ試験を実施した。

単体試験では界磁電流を 660A/s で 0A→3780A→0A と変化したが界磁巻線は安定であり、クエンチ電流は定格 3000A の 1.2 倍を上回ることで、0A から定格 3000A まで 10 秒以内に変化できることを確認した。導体温度の解析結果を図5に示す。界磁電流 3780A 時の導体温度は 4.7K で、超電導導体の分流開始温度に対し 1.2K の余裕がある。解析からもクエンチしないことが確認できた。

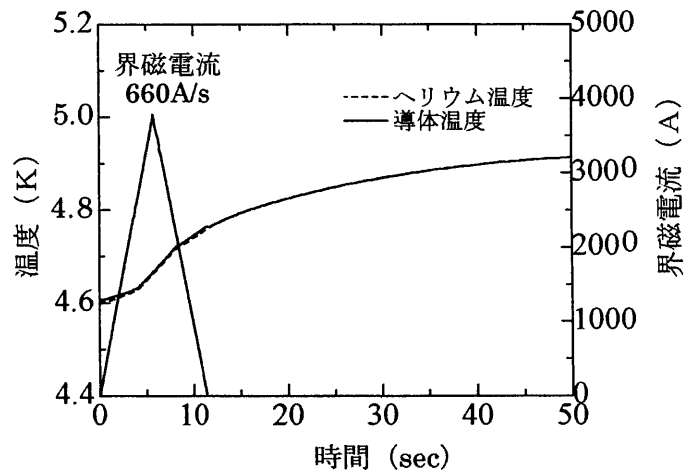


図5 パルス励磁時の超電導導体温度 (回転数 3600rpm)

固定子との組合せ試験では、超電導発電機の電気、冷却特性を計測し、設計、解析手法が適切であることを確認した。また、負荷運転で 814 時間、D S S (Daily Start & Stop) 運転を含めると 1500 時間の連続運転を行い、安定な長期運転ができることを確認した。更に、発電所至近端系統での三相突発短絡を模擬した試験を実施し、界磁巻線にクエンチが生じないことを確認した。

83MVA 超電導発電機回転子の試験から、本研究で提案した解析手法の妥当性が確認でき、超電導発電機の信頼性が現用発電機に劣らないことを実証でき、超電導発電機の実用化に向けて大きな前進を図ることが出来た。