

2.3 イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発（研究組合、九州大学、早稲田大学）

本プロジェクトでは、複合材料の開発から機器応用への開発へつなげるため、イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発を行い、超電導のメリットと希土類元素使用量低減効果の大きな領域として、500 kW(1000 rpm 級)以上の産業用回転機(モータ、発電機)を目標として設定し、新しいイットリウム系複合材料の特性を基に概念設計と要素技術開発を実施した。概念設計では、現在のイットリウム系複合材料の特性を使って回転機の設計を行い、イットリウム系複合材料を使うことによるレアメタル(Rare Metal、以下 RM と略す)削減効果、軽量化、コンパクト化を検証した。

要素技術開発は、回転機の主要部分である界磁巻線とサーモサイフォン式冷却システムに関して、界磁巻線コイル、回転冷却試験機を試作し、将来の回転機の製作に生かせる特性を取得した。

これらの実施により、今後のイットリウム系大容量高速回転機(以下、Y系回転機)作製のための開発に対する課題と指針を得た。

また、今後の実用化の見通し、波及効果についてより具体的に可能性を見るために、世界的にビスマス(以下 Bi と略す)系複合材料で開発が検討されている船用回転機の 5MW 機についてもイットリウム系複合材料を用いた概念設計の検討を行なった (Appendix “実用化の見通し検討” 参照)。これにより、これまで Bi 系複合材料で検討されてきた船用回転機についてもイットリウム系適用の効果を具体的に得ることができた。

2.3.1 回転機適正構造の概念設計

①背景及び目的

超電導による回転機の開発は、Siemens、AMSC、Doosan 社[1-3]などの各社で船用、産業用を目指して活発に開発が行われている。しかしながら、これらは Bi 系複合材料によるものだけで、イットリウム系複合材料を用いた回転機の開発例はない。これは、1つには本複合材料の長尺化が遅れていたためであるが、本プロジェクトで示されたように 1km にもなる長尺化、さらに量産化も可能な情勢となってきた。また、臨界電流 I_c などの特性も大幅に向上してきている。

以前から、イットリウム系複合材料は、Bi 系複合材料と比べて磁場中特性に優れ、大きなメリットが期待されるといわれてきた。km 級の長尺が現実のものとなってきた現段階で、 I_c も向上したイットリウム系複合材料を用いた回転機を設計し、その可能性とメリットをより具体化することは、今後のイットリウム系超電導機器の開発に大いに役立つと思われる。

よって、ここでは本プロジェクトの主な目標である RM 削減を軸に、一般的な超電導回転機の効果、重量、サイズ、効率に関してその効果を設計して確かめた。対象とした機器は、まず、産業用として期待できる 500 kW(1000 rpm 級)の回転機とした。

また、さらに、今後の実用化の見通しをつけるために、船用 5MW 級機の検討も行ったので本章の最後に Appendix として記載した。

②課題とアプローチ

上記目的を達成するための Y 系回転機的设计検討には、以下の課題がある。

- ・磁場-応力-伝熱を連成した回転機評価用シミュレータの開発：

イットリウム系複合材料は高特性のため、従来の Bi 系複合材料より高温高磁場で使える。イットリウム系複合材料の特性を考慮して、それを使った界磁巻線(コイル)用の解析ソフトを開発し、基本的なコイル形状での Y 系界磁巻線の成立性を温度、磁場、応力に関して、把握する必要がある。

- ・Y 系回転機的设计とイットリウム系複合材料使用による効果の算出：

これまでに Y 系回転機の例はない。上記解析ソフトにより、現在のイットリウム複合材料特有の特性を反映させた設計検討を行う。回転機として総合的に必要な磁場依存性だけでなく、応力、伝熱の相互に関与する要素を連成させた解析を行う。これにより具体的にその効果を算出することが今後の開発にとって重要である。

- ・対象とする回転機は、一般産業用の 500 kW 級-1000 rpm 級で広い産業用分野でのイットリウム系複合材料回転機の優位性を見通す。

本プロジェクトは 1 年と短い期間であり、本開発項目 2.3.1 概念設計では、効率よく開発を進めるために以下のアプローチにより設計検討を行った。

まず、界磁巻線コイルの設計検討のための磁場、温度、応力の 3 要素を連成させた解析シミュレータを開発する。これを用いて、基本的な傘型形状コイルに関して、イットリウム系複合材料の通電特性と伝導冷却特性を考慮して、Y 系コイルの成立性を評価した。液体 Ne サーモサイフォン冷却(27K 以上)で軽量化のため鉄心を使わない(2T 以上)、複合材料の使用量もできるだけ少なくする条件下で検討した。

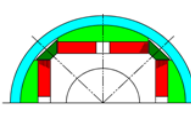
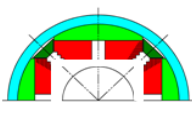
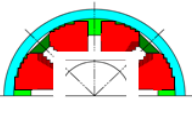
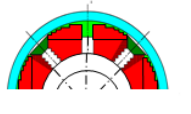
単純矩形 (平型)コイル	平傘型	菱形傘型	鞍型傘型
			
・シンプルな構造 ・応用基盤PJのII 期で試作	・遠心力に対する 保持機構が簡易	・充填率&軽量化 に適する	・最充填。円 筒に沿わせる

図 2.3.1-1 種々の形状の界磁巻線コイル

回転機の界磁巻線の形状としては、図 2.3.1-1 に示す様に 種々の形状が考えられるが、ここでは。界磁巻線コイルの初期検討形状として、製作性の点から、回転機の大きな遠心力に耐える構造、かつ、劣化しやすい接続部が不要なシリンダー巻線を考慮した。すなわち、大きな遠心力のかかる高回転数の 500kW 機は平傘型形状に、回転数の小さな 5MW 機は菱形傘型形状(Appendix)を代表検討例として選んだ。冷却方式には、液体 Ne(沸点 27K)によるサーモサイフォン冷却を想定してい

るので、その沸点以上のできるだけ高温でイットリウム系複合材料使用の効果がある設計を目指した。しかしながら、高温であるほどシステム全体の効率は向上するが、イットリウム系複合材料の I_c は低下するのでバランスが必要である。他方、これまでの類似した検討結果では[2]、界磁コイルの端部温度は 40K 程度になっているので、今回の初期検討としては温度 40K での検討を行った(以上、成果 2.3.1③-1)。

次に、この界磁コイルから成る界磁巻線について、その形状が回転機としての最終出力特性に与える影響を設計検討した。すなわち、量産イットリウム系複合材料の I_c の温度、磁界、磁界印加角度依存性に加え交流損失特性を把握したのち、界磁巻線の形状、配置とギャップ磁界強度などが回転機の最終出力特性である回転機出力、効率、トルク特性に与える影響について検討し、界磁巻線の最適形状化を行った(成果 2.3.1③-2)

さらに、これらの超電導界磁巻線の解析検討に基づき、常電導電機子、ヨークなどを含む回転機全体の詳細設計を行ない、常電導機と比較し、Y 系回転機のメリットを具体的に検討した。すなわち、本開発の主眼である RM 使用量、および従来からの回転機としての効果(高効率化、軽量化、小型化)について Y 系回転機のメリットを数値を上げて具体的に提示する。

設計検討の具体的な目標としては、以下を掲げた。

- ・ RM 量削減効果として、その使用量が従来の永久磁石回転機に比べ 1/10 以下となること
- ・ 汎用的な超電導回転機の効果、重量、サイズの減少、効率向上の程度を明確にすること

③成果

③-1 回転機用連成シミュレータ開発と解析

回転機の設計・評価のため、イットリウム系複合材料に特有な電磁気的特性、熱的特性と機械的特性を同時に考慮した電磁場・電磁力連成解析シミュレータを開発する。イットリウム系複合材料は薄膜積層型のテープ形状をしており、温度・磁場強度・磁場角度によってその特性が大きく変化し、界磁巻線の特性に影響を与える。また、回転機の性能は、回転子の運動、電源リプルなどに起因する回転機内の磁場の時間・空間高調波に影響を受ける。さらに、発生する電磁力(トルク)は、常電導回転機では高強度の鉄心が担っているが、空心界磁型の超電導回転機ではイットリウム系複合材料の巻線部自体が受ける。超電導複合材料は応力分布を経験することとなり、これらの電磁力により巻線が変形し、超電導特性が劣化する可能性がある。

そこで、ここではイットリウム系複合材料の材料特性を考慮した電磁場・電磁力連成解析シミュレータを開発し、磁場、応力、温度が複合的に影響する環境下での回転機、特に界磁巻線コイルについての設計・評価を行ない、その成立性を検討する。

解析は、産業用回転機 500kW-1000rpm 級、より具体的には、産業用で最も良く使われている 4 極 60Hz 相当の 1800rpm とした。また、各々の界磁巻線コイルに関しては、イットリウム系複合材料の複合材料(以下、単に複合材料とも記載する)特性が、1) 現在長尺量産化供給実績がある $I_c=300A/cm$ 幅級、2) さらに特性が向上した $I_c=600A/cm$ 幅級(これもすでに長尺で達成実績がある)の 2 種類を用いた。

(1) 電磁場・伝熱・応力解析連成シミュレータ

(1)-1 電磁場解析

電磁場解析は Maxwell 方程式から、汎用性がある \mathbf{A} - ϕ 法 (ベクトルポテンシャル \mathbf{A} とスカラーポテンシャル ϕ を未知数とする) に有限要素法 (FEM: Finite Element Method) と適用することにより定式化した。

$$\begin{aligned}\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) &= \mathbf{J}_0 - \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \\ \nabla \cdot \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) &= 0\end{aligned}$$

ここで、 \mathbf{A} : 磁気ベクトルポテンシャル、 ϕ : 電気スカラーポテンシャル、 \mathbf{J}_0 : 電流密度、 μ : 透磁率、 σ : 導電率である。磁性体部の透磁率 μ は非線形な \mathbf{B} - \mathbf{H} 特性に従う。また、超電導体部の導電率 σ は非線形な \mathbf{E} - \mathbf{J} 特性に従う。超電導体の \mathbf{E} - \mathbf{J} 特性は、下式の n 値モデルを適用した。

$$\mathbf{E} = E_c \left(\frac{\mathbf{J}}{J_c} \right)^{1/n}$$

ここで、 \mathbf{E} : 電界、 \mathbf{J} : 電流密度、 J_c : 臨界電流密度、 E_c : 臨界電流密度を定義する電界基準である。以上のように、磁性体、超電導体とも非線形特性があるため、有限要素法の定式化の際には、ニュートン・ラフソン法を適用し、線形化して反復計算を行っている。

(1)-2 熱解析

物質の熱伝導現象は次の熱伝導方程式に従う。

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{Q}$$

ここで、 T : 温度、 C : 熱容量、 k : 熱伝導率、 \dot{Q} : 単位体積当たりの発熱である。発熱項の中身は、

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{transfer} + \dot{Q}_{Joule} + \dot{Q}_{AC}$$

で、 \dot{Q}_{Joule} : 導体部にジュール発熱、 \dot{Q}_{AC} : 超電導体部に発生する交流損失である。有限要素法において境界条件は離散化の過程で現れる。本プロジェクトでは冷媒であるネオンとの熱伝達が境界条件 (第三種境界条件) として与えられる。すなわち、冷媒 (ネオン) と境界面との間の熱流束 $\dot{Q}_{transfer}$ は熱伝達係数 h と冷媒の温度 T_{bath} を用いて、以下の関係でまとめられる。

$$\dot{Q}_{transfer} = h(T - T_{bath})$$

以上の解析において、 C , h , k は温度の関数として非線形計算を行った。

(1)-3 応力解析

応力解析では対象が静的弾性体であれば、以下の平衡方程式が成り立つ。

$$\begin{aligned}\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z &= 0\end{aligned}$$

ここで、 $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}$ は垂直応力 ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ とも記載される)、 $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}, \tau_{zx}$ はせん断応力である。 F_x, F_y, F_z はそれぞれ x, y, z 方向にはたらく外力である。

ひずみは変位と以下の関係がある。

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \end{cases} \quad \begin{cases} \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2}\gamma_{xy} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \\ \varepsilon_{yz} = \frac{1}{2}\gamma_{yz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right) \\ \varepsilon_{zx} = \frac{1}{2}\gamma_{zx} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right) \end{cases}$$

ここで、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ は垂直ひずみ、 $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$ はせん断ひずみ、 $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ は工学的せん断ひずみである。 u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の変位である。

応力とひずみは以下の関係がある。

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{kl}$$

具体的に書き下すと、

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left\{ (1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z) \right\}, & \tau_{xy} &= 2G\varepsilon_{xy} = G\gamma_{xy} \\ \sigma_y &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left\{ (1-\nu)\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_z + \varepsilon_x) \right\}, & \tau_{yz} &= 2G\varepsilon_{yz} = G\gamma_{yz} \\ \sigma_z &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left\{ (1-\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y) \right\}, & \tau_{zx} &= 2G\varepsilon_{zx} = G\gamma_{zx}\end{aligned}$$

ここで、 E : ヤング率(縦弾性係数)、 ν : ポアソン比、 G : せん断弾性係数(横弾性係数)である。等方性材料では、ヤング率およびポアソン比との間に次の関係がある。

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

(1)-4 連成解析

連成解析の概念図を図 2.3.1-2 に示す。電磁場・伝熱・応力の連成解析では、共通の有限要素分割を用いて、各解析間で発熱、電磁力などの受け渡しを行っている。

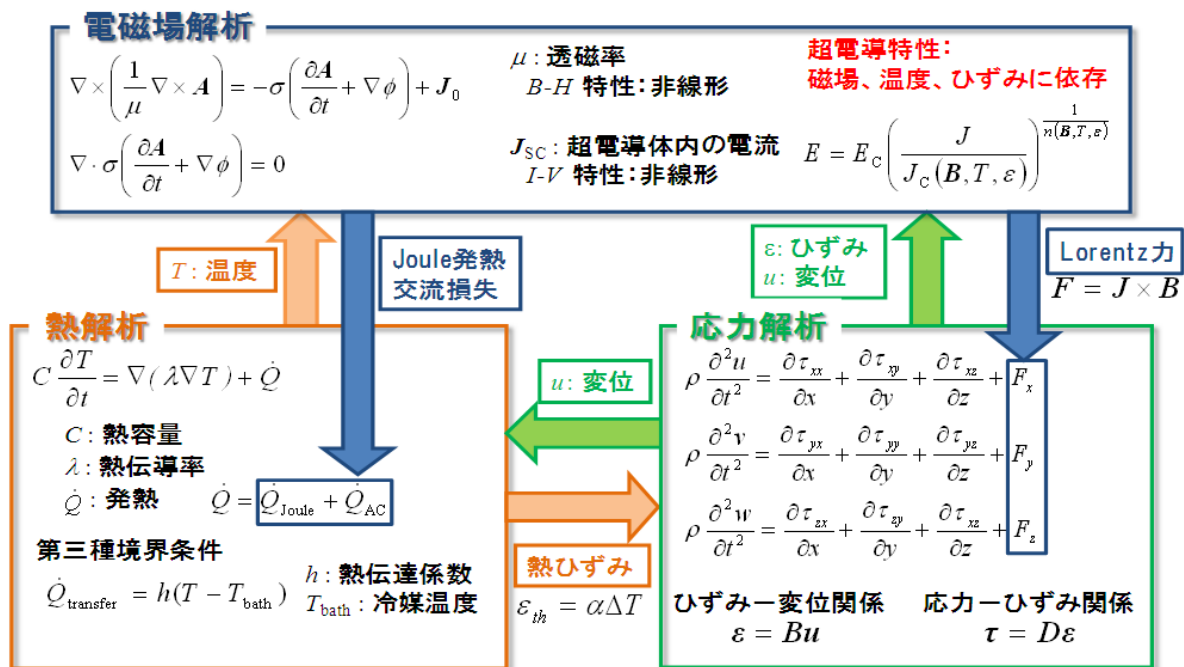


図 2.3.1-2 電磁場・伝熱・応力解析連成シミュレータ

(2) 結果

産業用 500kW-1800rpm 機について、まず、図 2.3.1-3 の特性を持つ複合材料を使い、次に、図 2.3.1-4 の界磁巻線(コイル)の形状、すなわち、平傘型形状および表 2.3.1-1 の仕様を想定して連成解析を行った。これにより、開発した連成シミュレータによる界磁巻線の発生磁場と形状による効果から、界磁巻線の基本設計を行った。以下の仕様に基づき、超電導同期電動機の基本設計を行った。500kW 級機に関しては、 $I_c = 300A/cm$ 幅級の複合材料を用い、また、回転数が 1800rpm と高いことから遠心力の影響を考慮して、平傘型形状の界磁巻線について、検討した。また、運転温度は、2.3.1②で述べたように液体 Ne (沸点 27K) によるサーモサイフォン式冷却を用いた他の検討結果を参考に 40K とした[2]。

方式： 回転界磁型同期電動機(界磁：超電導・無鉄心、電機子：常電導、銅線)

出力： 500 kW、回転数： 1,800 rpm

定格電流：約 750 A、定格電圧：400 V 級

複合材料：幅 5 mm、0.1 mm 厚銅付(半田付け、片面 HTS 側配置)、絶縁付

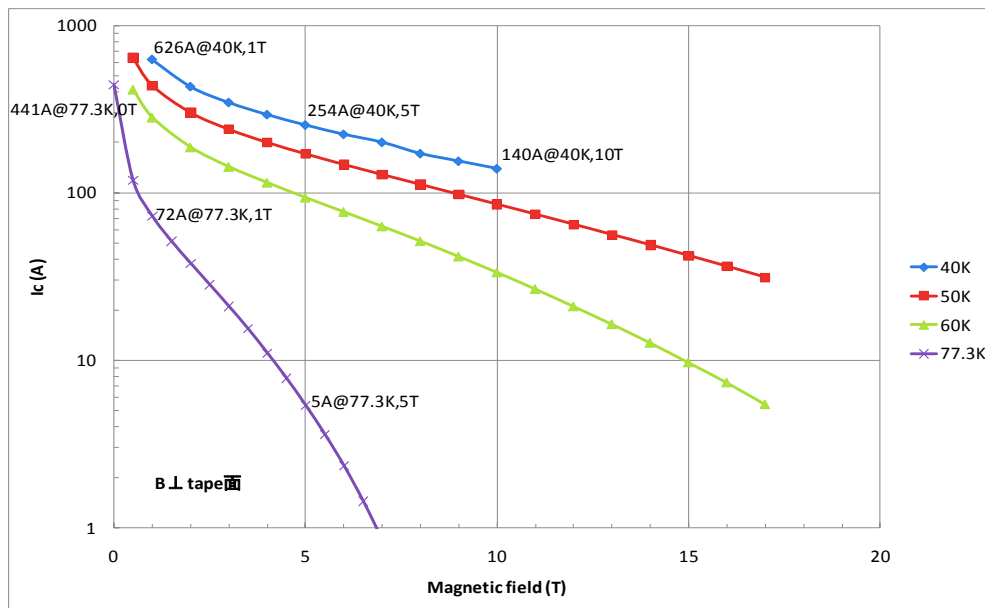


図 2.3.1-3 イットリウム系複合材料の I_c - B - T 特性

表 2.3.1-1 500kW 級回転機の諸元

定格出力	500 kW
定格回転速度	1800 rpm
定格電圧	440 V
定格電流	700 A
固定子外径	580 mm
固定子内径	390 mm
エアギャップ	5 mm
固定子鉄心長	550 mm
固定子スロット数	60
電機子コイル数	60
每溝導体数	6
電機子コイル電流密度	5 A/mm ²
界磁巻数	1170
界磁電流	140 A
複合材料幅	5 mm
複合材料使用量(5mm 幅)	1.6 km/極

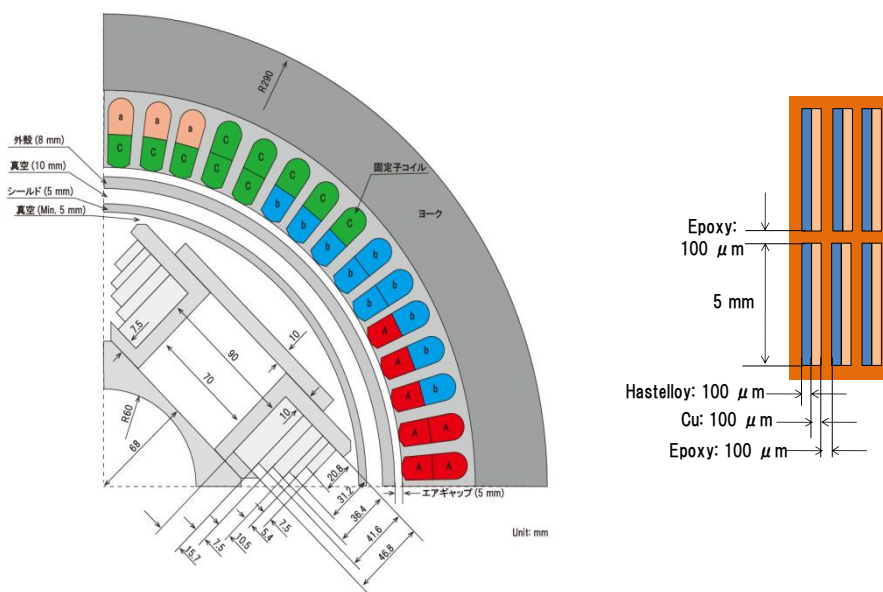


図 2.3.1-4 500kW 級回転機の断面図および巻線部複合材料断面図

以上の基本仕様に基づき、以下の要領で界磁電流を算出して解析を進めた。まず、界磁電流を設計したコイルに流せる最大電流から見積もった。例えば、まず、界磁巻線に使用する複合材料の臨界電流 (I_c) の磁場、温度、角度依存性を評価した。図 2.3.1-3 は代表的な複合材料についての結果である (ここでは磁場はテープ面に垂直)。ただし、この複合材料の 77.3 K, 自己磁場での I_c は 441 A/cm 幅なので、界磁巻線に仕様する複合材料の $I_c = 300$ A/cm 幅 (@77.3 K, 自己磁場) を想定して、図 2.3.1-3 の値をスケールリングして用いた。また、 I_c は磁場角度依存性をもつが、磁場がテープ面に垂直(90°) に印加された場合に特性が悪くなるため、 $B \perp$ テープ面の I_c を基本設計では使用した。本複合材料の I_c の磁場角度依存性は、角度 30-90° で最低値となりほぼ一定である (すなわち、角度 30~90° の範囲で図 2.3.1-3 の値はほぼ同じである)。

次に、検討した各コイルの詳細仕様から出てくるコイルロードライン (運転電流 -発生磁場、分布-角度分布) から、コイルに流せる界磁電流を決めた。

例えば、界磁コイルの運転温度を 40K とし、発生磁場の概略を計算し、さらにその垂直成分も計算し、複合材料の臨界電流特性 (図 2.3.1-3 の 441 A/cm 幅 (@77.3 K, 自己磁場) の特性から使用複合材料 300 A/cm 幅(@77.3 K, 自己磁場) にスケールする) から、運転電流決める。温度 40 K、複合材料経験磁場 2 T(テープ面垂直)の場合、参考データ 431 A/cm 幅 (@40 K, 2 T) に対して、使用複合材料の I_c は次の通りとなる。

$$I_c \text{ (@40 K, 2 T)} = 431 \times 300 / 441 = 293 \text{ A/cm 幅} = 146 \text{ A/5mm 幅}$$

(2)-1 磁場分布

この界磁巻線部の有限要素法による要素分割を図 2.3.1-5 に示す。界磁の巻線部はイットリウム系複合材料の複合材料構造を考慮して要素分割をしている。電磁場・伝熱・応力の連成解析では、共通の要素分割を用いて、各解析間で発熱、電磁力などの受け渡しを行っている。磁場分布を図 2.3.1-6 に示す。界磁巻線に 140 A 通電した状態の磁場分布である。巻線部が経験する最大磁場は 2.2 T であった。

(2)-2 電磁力・遠心力

界磁巻線部の電磁力(ローレンツ力)の分布を図 2.3.1-7 に示す。ローレンツ力は $\mathbf{F}_{elemag} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$ で計算した。ここで、 \mathbf{F}_{elemag} : 電磁力、 \mathbf{J} : 電流密度、 \mathbf{B} : 磁束密度である。電磁力は巻線部(超電導層)に発生する。その最大値は単位体積当たり 6×10^{10} N/m³ となった。鉄心がない空心巻線のため、電磁力はすべて巻線部に働くことになる。

遠心力の分布を図 2.3.1-8 に示す。遠心力は $\mathbf{F}_{centrifugal} = \rho \mathbf{r} \omega^2$ で計算した。ここで、 $\mathbf{F}_{centrifugal}$: 遠心力、 ρ : 密度、 \mathbf{r} : 回転中心からの距離、 ω : 角振動数である。遠心力は巻線部だけでなく、巻枠など回転子を構成するすべての材料に発生する。その最大値は単位体積当たり 5×10^7 N/m³ となった。

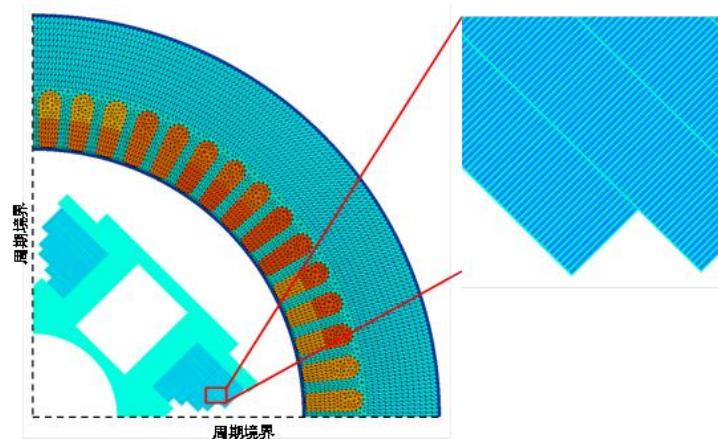


図 2.3.1-5 500kW 級回転機の解析モデル

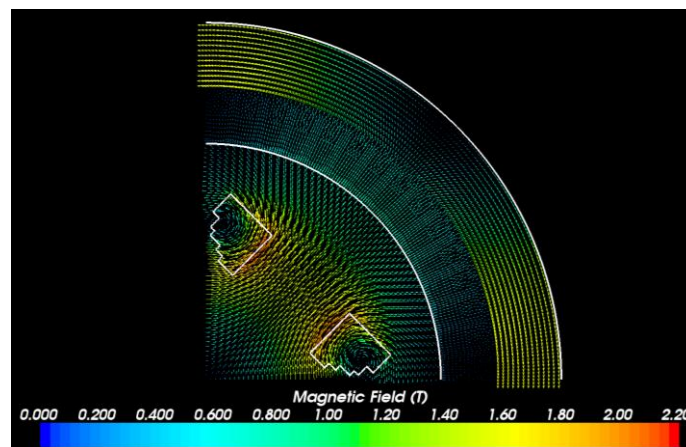


図 2.3.1-6 500kW 級回転機の磁場分布

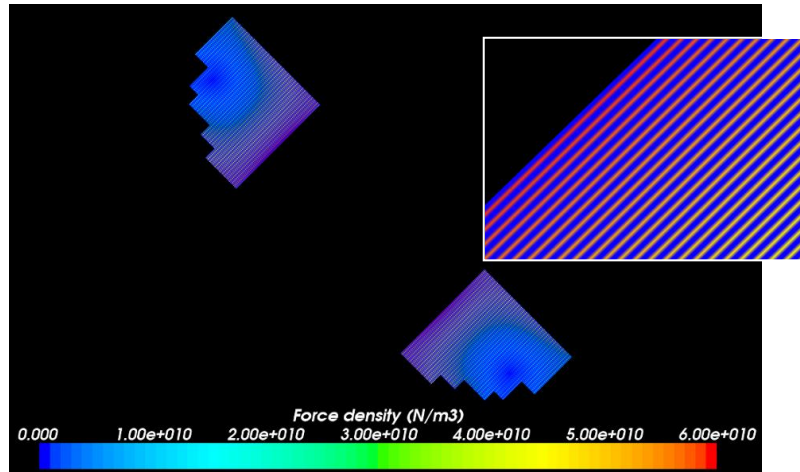


図 2.3.1-7 500kW 級回転機の界磁巻線の電磁力分布(右上:中心拡大図)

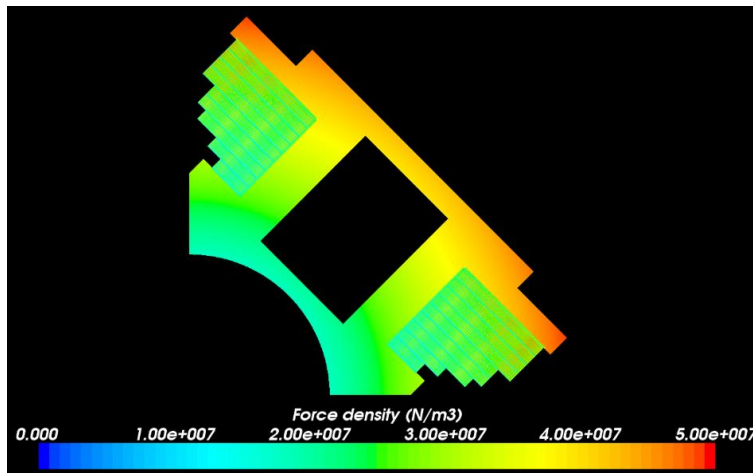


図 2.3.1-8 500kW 級回転機の界磁の遠心力分布

(2)-3 応力分布

2.3.1 (2)-2 で述べた電磁力と遠心力が併せて、巻線にはたらくことにより、応力を発生させる。応力解析においては、弾性変形を仮定した。物性値は表 2.3.1-2 の通りである。

表 2.3.1-2 回転機構成材料の機械特性

	厚さ(μm)	ヤング率(GPa)	ポアソン比	線膨張係数(1/K)
Hastelloy ^{TR}	100	200	0.3	1.28×10^{-5}
YBCO	1	100	0.3	1.31×10^{-5}
Cu	100	100	0.3	1.68×10^{-5}
Epoxy	50 - 100	3	0.3	4.0×10^{-5}

図 2.3.1-9 に複合材料幅広面垂直方向に働く応力分布を示す。この方向の応力は複合材料剥離方向に働く応力である。図 2.3.1-10 に巻線内の各ターンの応力分布を示す。巻線最内層で複合材料幅広面垂直方向に 4.1 MPa の応力が発生している。

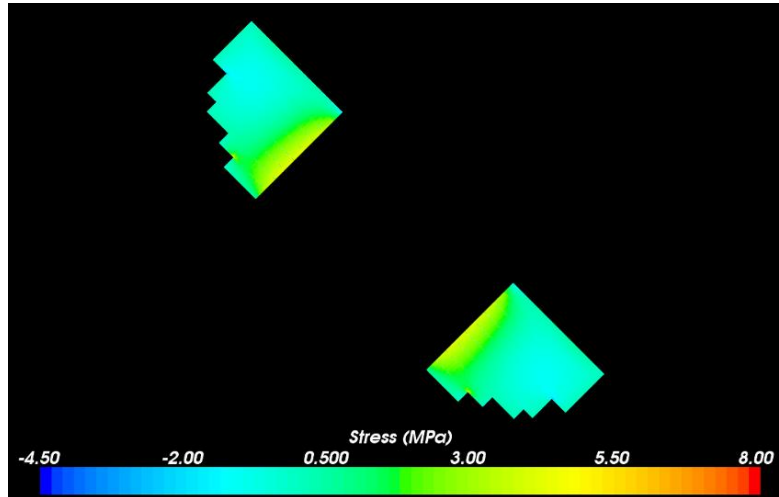


図 2.3.1-9 500kW 級回転機の界磁巻線の複合材料幅広面垂直方向の応力

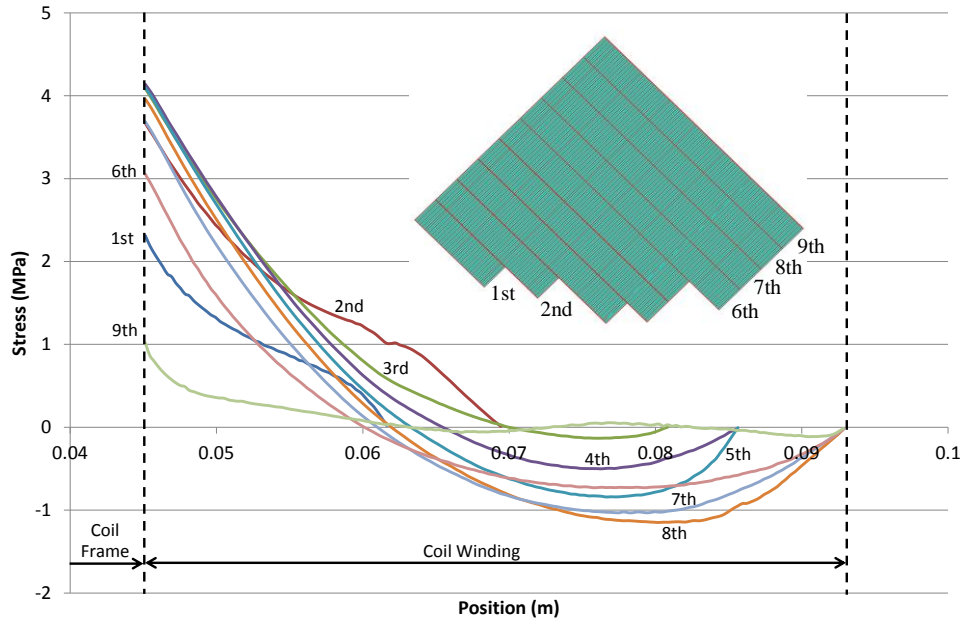


図 2.3.1-10 500kW 級回転機の界磁巻線の各ターンの複合材料幅広面垂直方向の応力

(2)-4 温度分布

ネオンの熱伝達特性に関しては、報告例は極めて少ない。Fuchino らにより最近、図 2.3.1-11 のような結果が報告されている[4]。本開発では、実際に液体 Ne によるサーモサイフォン冷却装置を作製し、本解析と並行して熱伝達係数を明らかにしようとしているが、ここでは、図 2.3.1-11 の熱伝達特性を使用した。データのない $\Delta T=1\text{K}$ 以下の特性は外挿した値を用いた。発熱は、イットリウム系複合材料の超電導複合材料部で 0.005 、 0.01 、 $0.015 \text{ W/m} = 5$ 、 10 、 15 kW/m^3 (複合材料: 5 mm 幅、 $200 \mu\text{m}$ 厚)が均一に発生しているとした。500 kW 機では一極当たりの複合材料長は 1.6 km であるから、一極当たり 8 、 16 、 24 W の発熱に相当する。ネオンの温度は大気圧中の沸点 27K であるとして、回転子はネオンによって十分冷却された状態で初期温度は 27 K とした。この状態から発熱が発生したとして定常状態になるまで計算を行った。図 2.3.1-12～図 2.3.1-14 に界磁の温度分布を示す。 0.005 、 0.01 、 0.015 W/m の発熱に対して、巻線部の最高到達温度はそれぞれ 27.6 、 28.1 、 28.6 K となった。

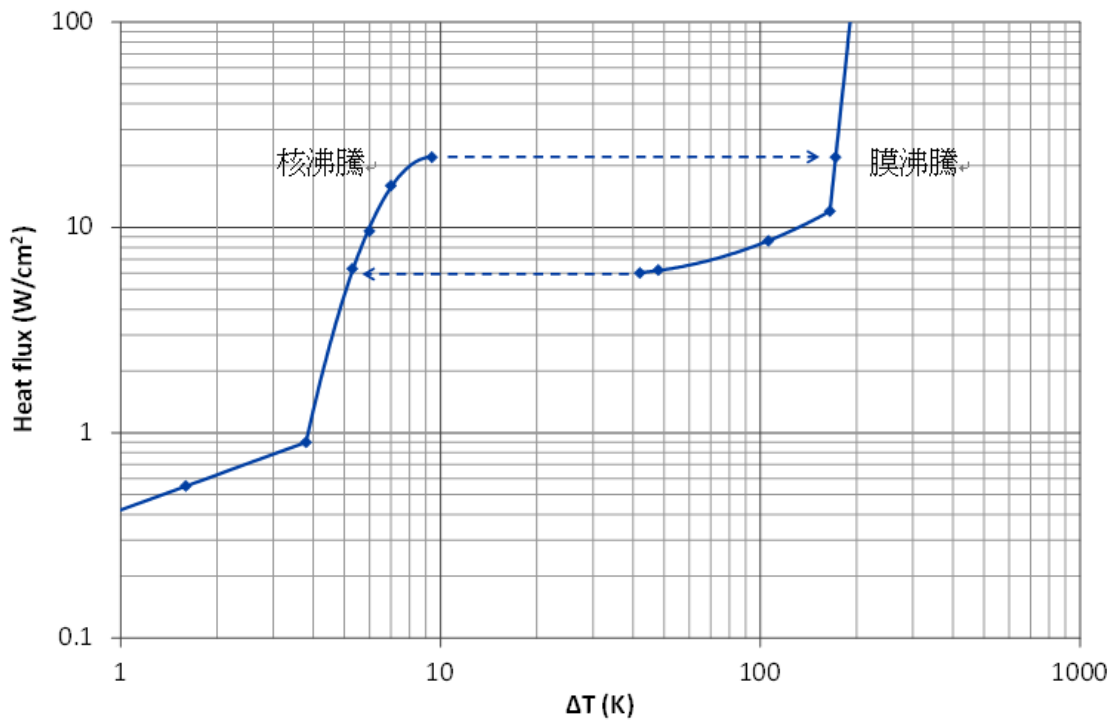


図 2.3.1-11 液体ネオンの熱伝達 [4]

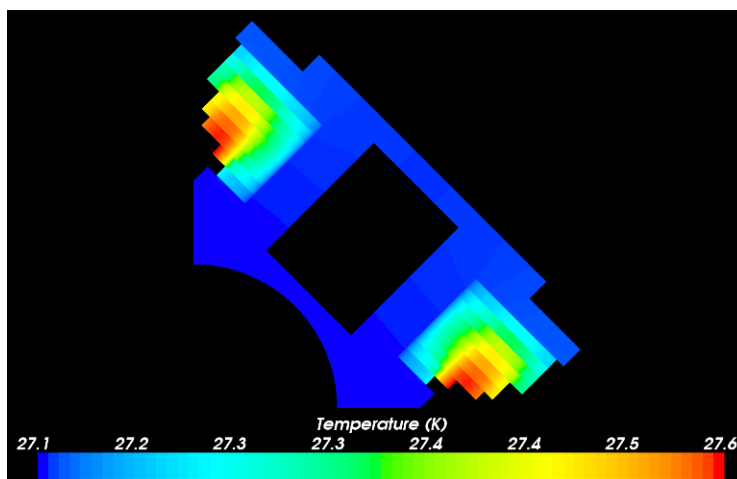


図 2.3.1-12 500kW 級回転機の界磁の温度分布(発熱 0.005 W/m)

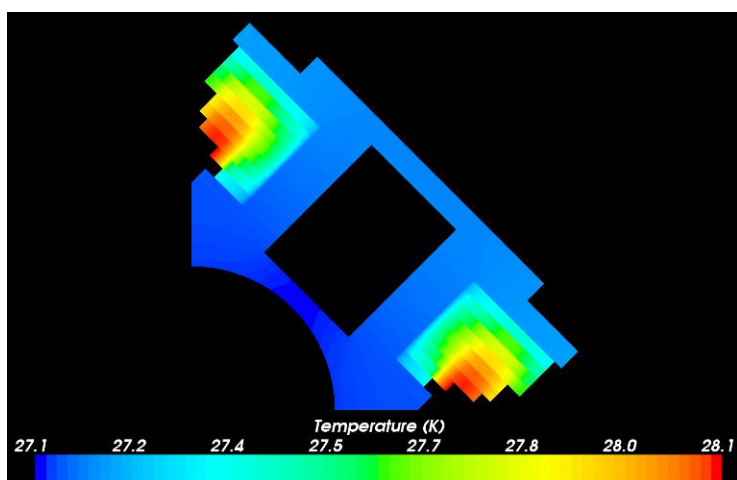


図 2.3.1-13 500kW 級回転機の界磁の温度分布(発熱 0.01 W/m)

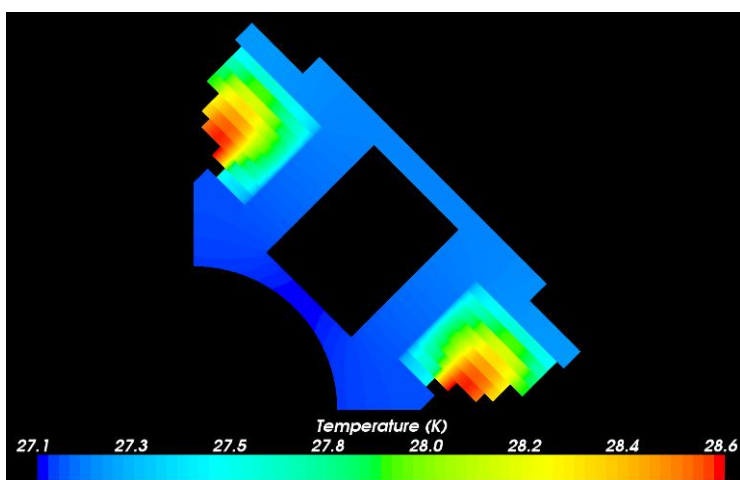


図 2.3.1-14 500kW 級回転機の界磁の温度分布(発熱 0.015 W/m)

(3) 考察

表 2.3.1-3 に電磁場・応力解析の結果をまとめた。複合材料の剥離試験によれば、剥離強度は 40～50 MPa とされる。今回の解析では、電磁力・遠心力により超電導複合材料には 500kW 機で、4.1 MPa の剥離応力が発生することが明らかとなった。これまでの報告から、イットリウム系複合材料の剥離強度は 50MPa 程度であることがわかっている。すなわち、表 2.3.1-3 の今回のコイルで発生する超電導層に垂直にかかり剥離方向に働く力はいずれもこの剥離強度限界内に収まっている。なお、この結果は、電磁力、遠心力だけでなく、各コイル構成部材の冷却温度変化による熱膨張も考慮しており、その意味で磁場、温度、応力で 3 つの要素を連成させた解析検討と言える。

図 2.3.1-15 に 500 kW 機の界磁巻線内の温度の時間変化、図 2.3.1-16 に最高到達温度をまとめた（参考に、Appendix の検討による 5 MW 機の結果もつけた）。界磁巻線の温度は 0.005～0.015 W/m の発熱でも、500 kW 機(8～24W 発熱に相当)で 27.6～28.6 K、5 MW 機(90～270W 発熱に相当)で 30.8～37.7 K となった。また、ネオンと接触している境界面の温度は 27.1 K で 0.1 K の温度上昇で収まっており、膜沸騰領域には達していないため、巻線内に温度差はできる（500kW 機、24W 発熱でコイル端部が 29K 弱。5MW 機では 270W の発熱で 38K 程度、温度差 $\Delta T=10.6$ K）が、冷却は可能と考えられる。

表 2.3.1-3 500kW 級回転機の複合材料に働く最大応力

500 kW 級回転機	
巻線部最大磁場	2.2 T
複合材料幅広面垂直応力	引張り： 4.1 MPa

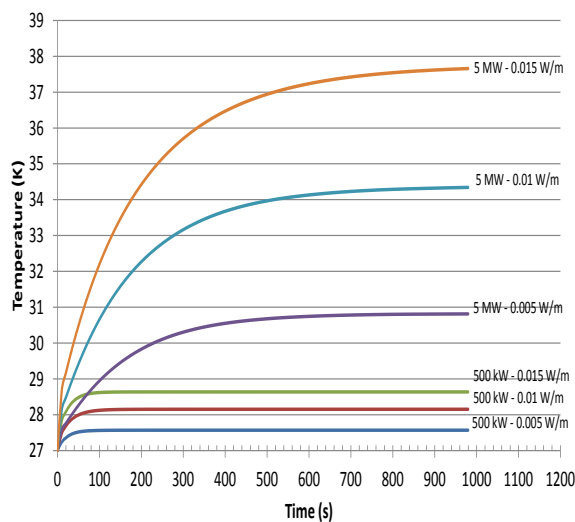


図 2.3.1-15 界磁巻線内の時間変化 (5MW 機は Appendix 参照)

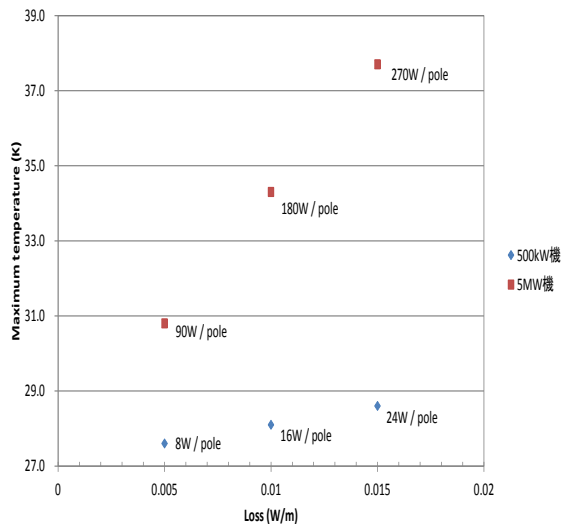


図 2.3.1-16 界磁巻線内の最大温度 (5MW 機は Appendix 参照)

③ - 2 界磁巻線の形状検討

2.3.1③-1 節で基本的な形状の界磁巻線コイルにつき、温度、磁場、応力を同時に考慮した解析検討を行い、その成立性が検証できた。ここでは、その結果をもとに実際の回転機の最終特性(効率、体格、トルクリップル)や使用イットリウム系複合材料(以下、複合材料)の長さなどに対して界磁巻線の最適形状の検討を行なった。対象とした形状は、平面形状がいずれもレーストラック状で、断面形状が 1)通常の矩形(上部、下部半径が同じ)、2)菱形傘型形状(巻線部断面が菱形、すなわち、上端、下端半径が中央に向かい大きくなる。複合材料幅広面は水平軸に平行、3)鞍型傘型(菱形形状であるが、各複合材料が水平軸に傾いている。コイル断面の複合材料充填率を高めたもの)の3種類である。

(1) 方法

解析対象の回転機定格出力は 500kW・1800rpm とし、イットリウム系複合材料の特性としては、ほぼ現状の IBAD・PLD 法 GdBCO(BZO 入り)複合材料のものを想定した。複合材料幅は 5 mm、臨界電流 I_c は 127 A(@77 K、自己磁場)である。すなわち、1cm 幅での I_c は 254A/cm 幅である。超電導層厚は、1.2 μ m、ハステロイ厚は 0.1 mm である。下記のように交流損失まで測った試料としては、この特性のものになるが、他の節で検討している 300A/cm 幅の特性の線と大きな違いはない。絶縁皮覆まで含めた複合材料厚さは 0.2 mm である。図 2.3.1-17 に $I_c(B, T)$ 特性を示した。また、鞍型ピックアップコイルを用いて 35 K、45 K、64 K、77 K において実際に測定したイットリウム系複合材料の GdBCO 複合材料の交流損失の磁界振幅依存性を図 2.3.1-18 に示している。

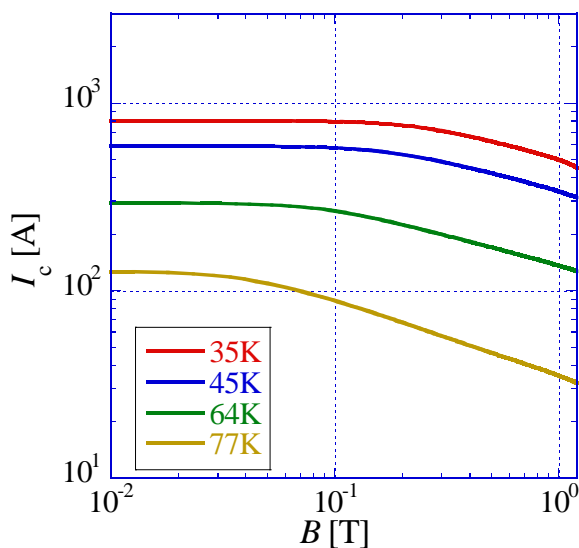


図 2.3.1-17 想定した複合材料の $I_c(B, T)$ 特性

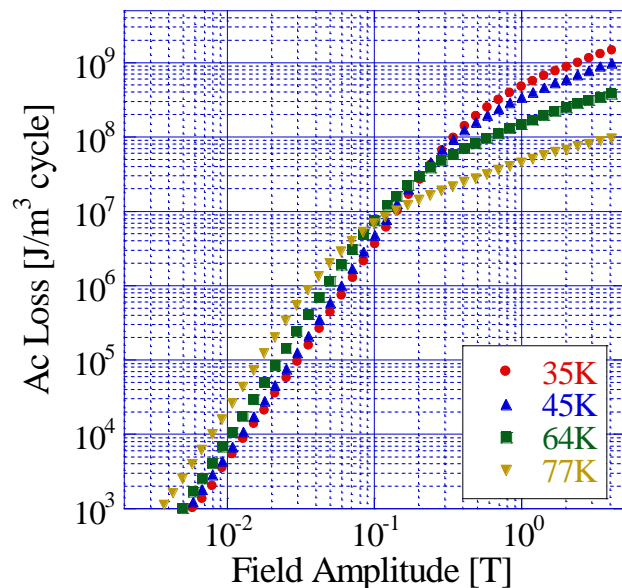


図 2.3.1-18 想定した複合材料の交流損失特性

回転機的设计で、電気装荷と磁気装荷の分配比率等、回転機の基本構造や体格は、従来の常電導機的设计指針通りに决定した。図 2.3.1-19 に设计した回転機の鳥瞰図、図 2.3.1-20 に断面図、表 2.3.1-4 に諸元を示す。従来の指針に則って设计した回転機について数值解析により特性を評価した後、さらに再度设计し直すという手順を踏んで、界磁巻線の最適形状について検討した[5]。

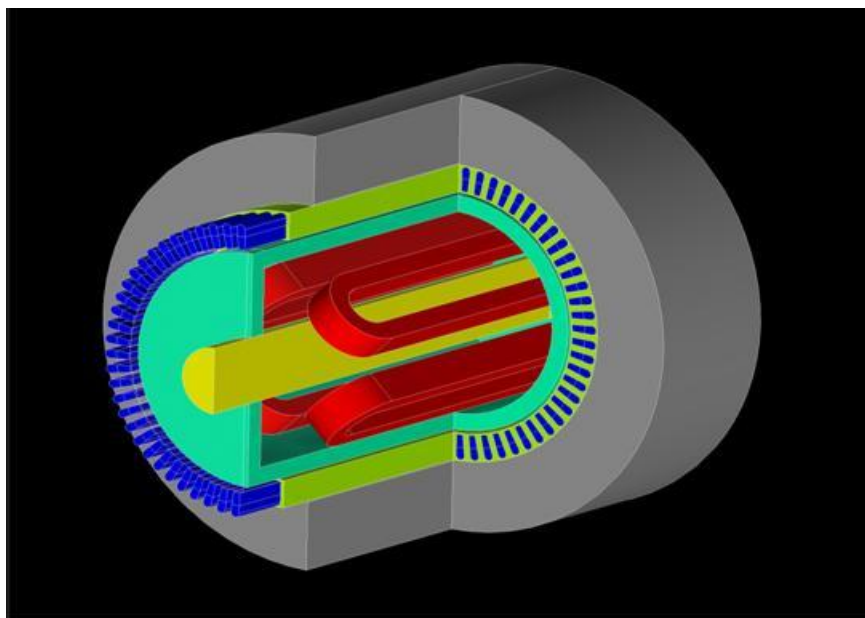


図 2.3.1-19 设计した回転機の概略鳥瞰図

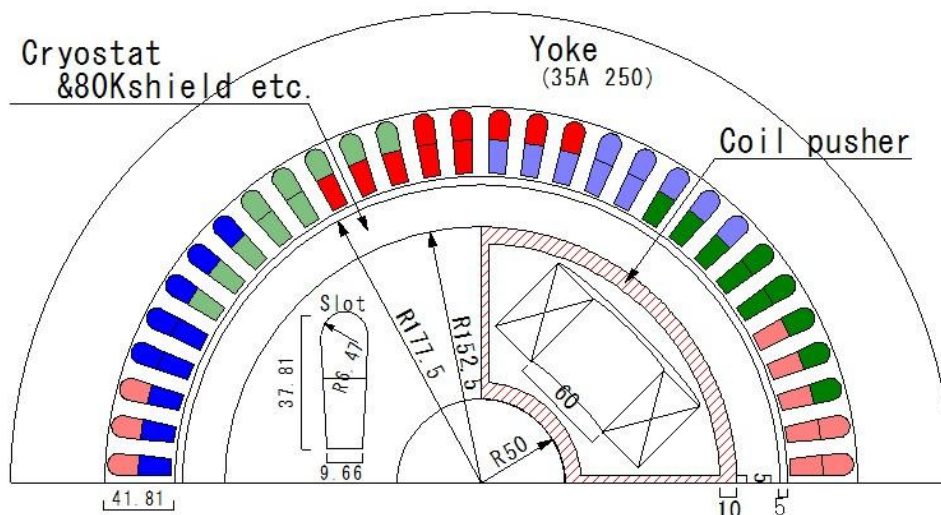
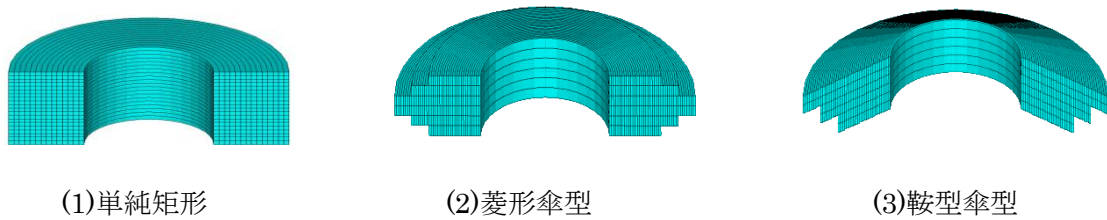


図 2.3.1-20 设计した回転機の断面図

表 2.3.1-4 設計した 500kW-1800rpm 超電導回転機の諸元

Power [kW]	500
Voltage [V]	440
Current [A]	700
Number of pole	4
Frequency [Hz]	60
Loading partition constant	1.5
Standard magnetic loading	0.028
Magnetic loading [Wb]	0.07576
Electric loading [AC]	15750
Electric loading ratio [AC/mm]	55
Magnetic flux density of yoke [T]	1.3
Inner diameter of stator [mm]	365
Field system	
Field winding	REBCO
Operating temperature [K]	40
Load factor of field coil	0.8
Armature system	
Armature winding	Copper
Current density [A/mm ²]	5
Height of yoke [mm]	140
Air gap [mm]	5
Cryostat&80Kshield etc. [mm]	25

本回転機で界磁は4極であり、動作温度は40 Kとした(2.3.1②および[2])。界磁巻線形状としては、図 2.3.1-21 に示すような(1) 単純矩形、(2) 菱形傘型、(3) 鞍型傘型の3種類を考えた。ここでは、超電導複合材料の $I_c(B, T)$ 特性を考慮しつつ、通電電流を I として、超電導巻線の負荷率 II_c が 0.8 以下になるように、また、必要な磁気装荷を持つように界磁巻線の巻数、寸法等を調整した。また、電機子巻線は無鉄心、すなわちシースなしの銅巻線とし、室温空間においた。ただし、界磁巻線の磁界を回転機外部に漏らさないようにシールドのための鉄ヨークは電機子巻線の外側に配置した。それぞれの形状について、市販の電磁界解析ソフトウェア(Ansys)を用いて、数値解析により、定格トルク、出力を満たした上で、発生磁界、トルク等の変動、必要な複合材料長、体格、効率等を算出した。



(1)単純矩形

(2)菱形傘型

(3)鞍型傘型

図 2.3.1-21 解析検討した各種界磁巻線の断面形状：左から(1)単純矩形、(2)菱形傘型断面、(3)鞍型傘型(平面形状はいずれもレーストラック型)

(2) 結果と考察

一例として、図 2.3.1-22 (3)の鞍型傘型レーストラック形状の界磁巻線の場合の回転機断面、界磁巻線の形状及び寸法、ターン数、垂直磁界分布、変動磁界振幅分布を示す。この場合のギャップにおける磁束密度 B_g は 2.4 T であった。また、トルク変動を図 2.3.1-23 に示している。スキュー、ダンパーシールド等の対策は施していないが、界磁巻線に印加される変動磁界の振幅は 2×10^{-4} T 以下であり、トルク変動は 0.1% 以下であった。

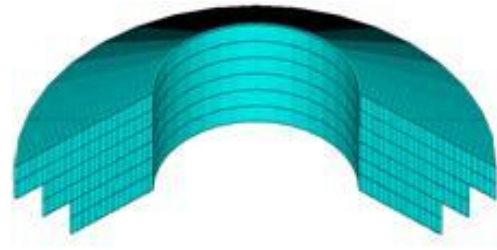
設定した 3 種類の界磁巻線の形状、すなわち(1)単純矩形、(2)菱形傘型断面、(3)鞍型傘型(平面形状はいずれもレーストラック型)について、数値解析で得られた回転機体格、使用複合材料長、トルクリップル、効率を比較してみた。図 2.3.1-24 に結果を示す。(1)、(2)、(3)それぞれの界磁巻線形状の場合のギャップ磁束密度 B_g は、1.5 T、2.35 T、2.4 T である。単純矩形形状の界磁巻線の場合には、ローター内の巻線充填率が低く、ギャップ磁束密度が 1.5 T しか確保できないために、出力 500 W を得るには回転機長を長くせざるを得ず、そのため体格は大きく、また、界磁磁界の周方向分布の正弦波から外れも大きいため、トルクリップル*も大きくなっていることがわかる。体格、トルクリップル、効率の観点からは単純矩形形状より菱形、鞍型形状が適していると判断できる。(*注:トルク $T \propto B$ (界磁磁場) $\times I$ (電機子電流)、また、出力 $P \propto T \times n$ (回転数))

そこで、最初の数値解析結果に基づき、再度、ギャップ磁束密度を $B_g=2T$ として、3 種類の界磁巻線形状で、使用複合材料長が最小になるように設計をやり直し、数値解析により特性を算出し、比較・検討を行った。

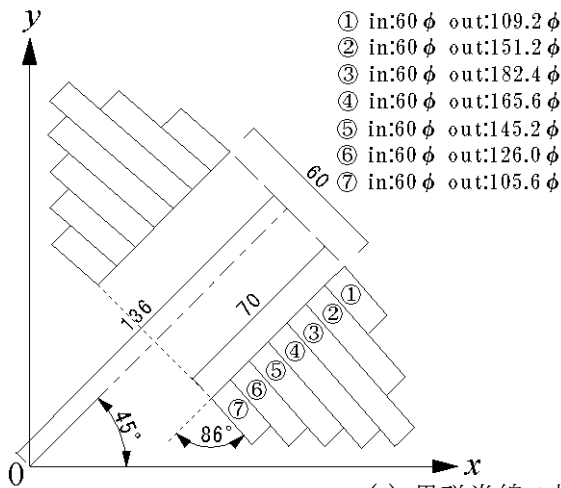
その結果、(1) 単純矩形形状の場合には、現状の複合材料の $I_c(B, T)$ 特性ではギャップ磁束密度 2 T を実現できないことがわかった。ここでは、(2) 菱形、(3) 鞍型の形状を持つ界磁巻線の場合の数値解析結果を示す。図 2.3.1-25、図 2.3.1-26 は、それぞれの場合の回転機断面、界磁巻線の形状及び寸法、ターン数、垂直磁界分布、変動磁界振幅分布である。これら両者の解析結果では、ほとんど回転機特性上の差は見られなかった。唯一、鞍型のほうが、印加磁界角度の観点から $I_c(B, T)$ 特性において有利となり、複合材料長が短くても済むという結果となった。



(a) 回転機断面

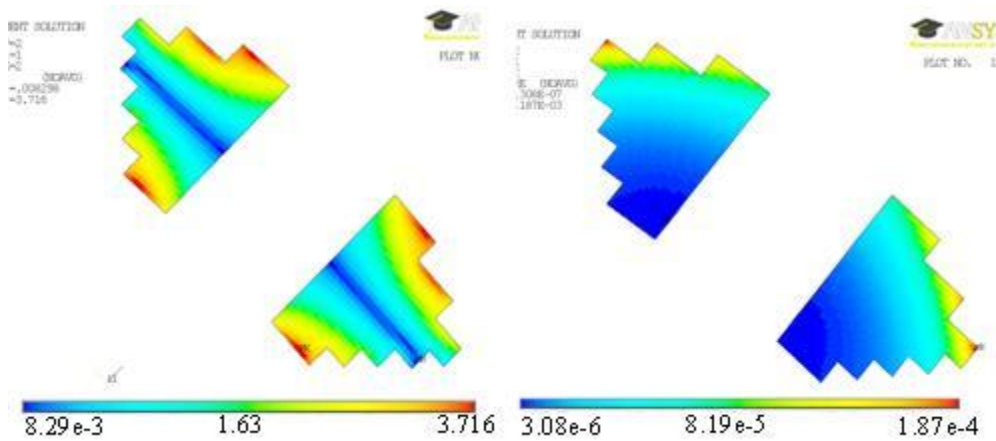


(b) 界磁巻線形状



(c) 界磁巻線 1 極の寸法とターン数

通電電流 [A]	219
層数①	123
層数②	228
層数③	306
層数④	264
層数⑤	213
層数⑥	165
層数⑦	114
使用複合材料長 [m/pole]	1907
継鉄外径 [mm]	786
有効長 [mm]	173
体積 [ℓ]	83.8



(d) 垂直磁界成分 B/c とその変動の大きさ。単位は T

図 2.3.1-22 鞍型傘型形状の界磁巻線 : (a)回転機の断面、(b)界磁巻線形状、(c)界磁巻線 1 極の寸法とターン数、(d)垂直磁界成分と変動磁界成分の大きさ

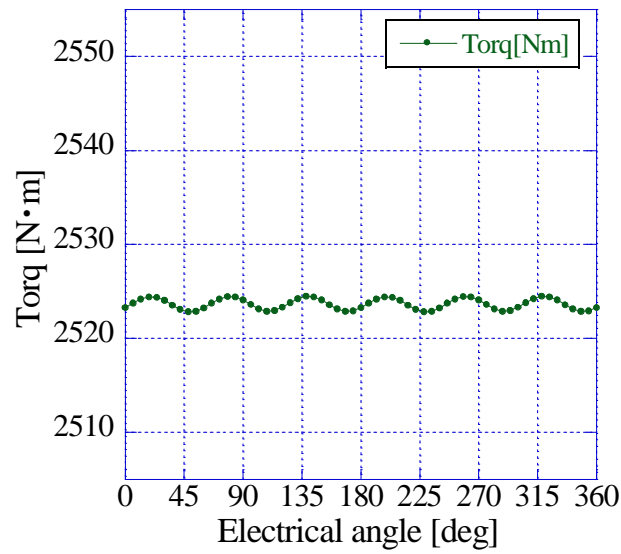


図 2.3.1-23 鞍形状界磁巻線の場合のトルク変動

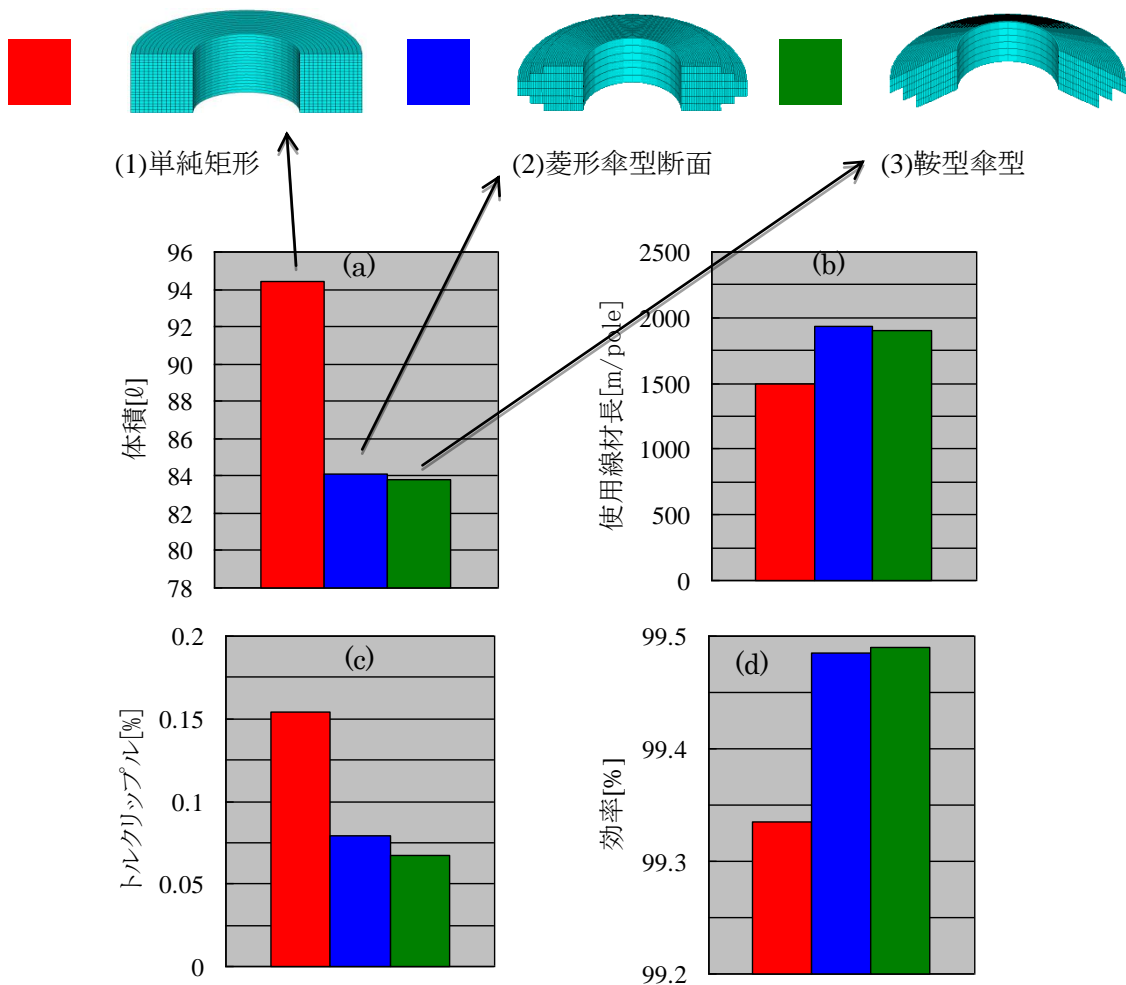
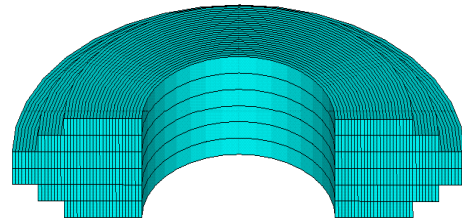


図 2.3.1-24 界磁巻線形状の影響

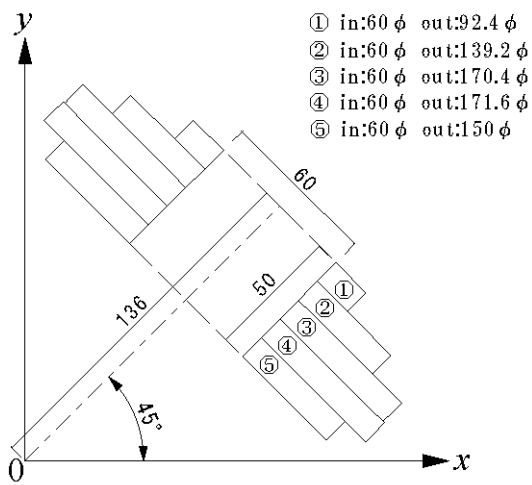
(a)回転機体格、(b)使用複合材長、(c)トルクリップル、(d)効率の比較



(a) 回転機断面

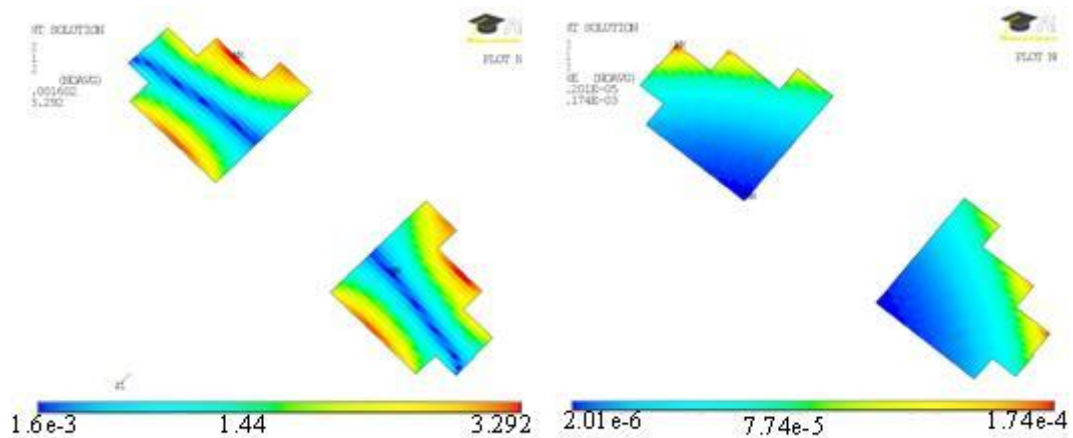


(b) 界磁巻線形状



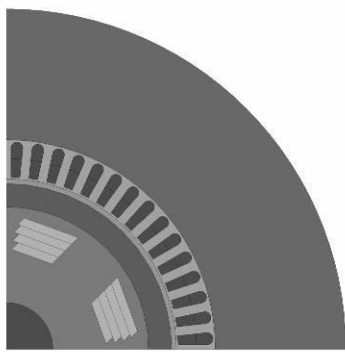
(c) 界磁巻線 1 極の寸法とターン数

通電電流 [A]	228
層数①	81
層数②	198
層数③	276
層数④	279
層数⑤	225
使用複合材料長 [m/pole]	1593
継鉄外径 [mm]	786
有効長 [mm]	208
体積 [ℓ]	86.7

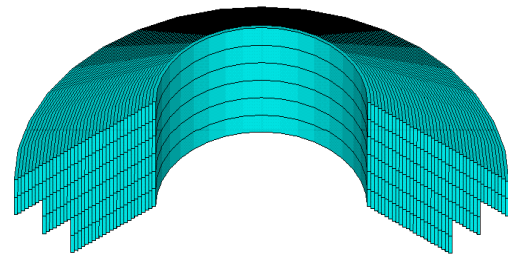


(d) 垂直磁界成分 B/c とその変動の大きさ。単位は T。

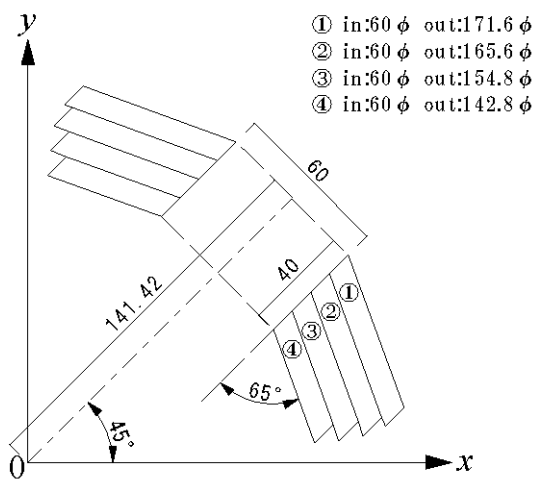
図 2.3.1-25 菱形断面界磁巻線の場合の(a)回転機断面、(b)界磁巻線形状、(c)界磁巻線 1 極の寸法とターン数、(d)垂直磁界成分と変動磁界成分の大きさ



(a) 回転機断面

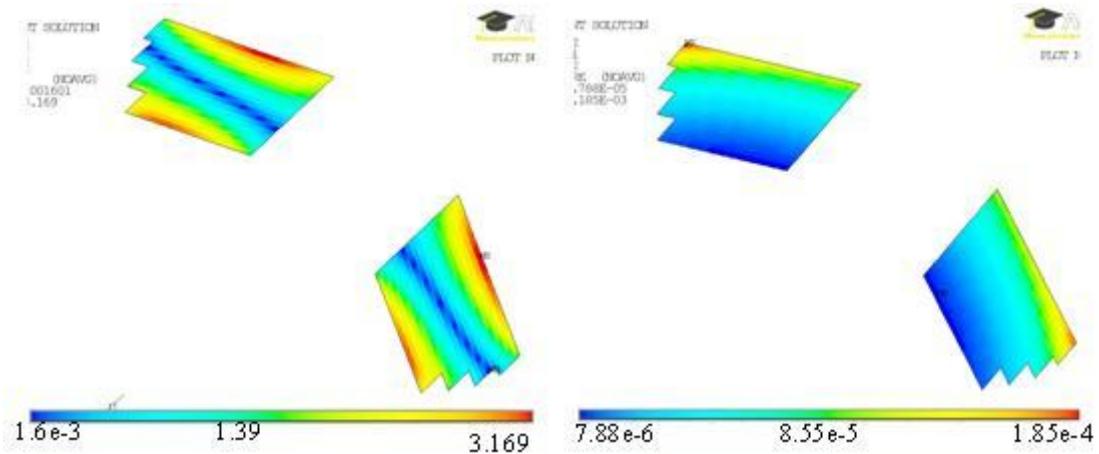


(b) 界磁巻線形状



(c) 界磁巻線 1 極の寸法とターン数

通電電流 [A]	232
層数①	279
層数②	264
層数③	237
層数④	207
使用複合材料長 [m/pole]	1501
継鉄外径 [mm]	786
有効長 [mm]	208
体積 [ℓ]	86.7



(d) 垂直磁界成分 B/c とその変動の大きさ。単位は T。

図 2.3.1-26 鞍形状界磁巻線の場合の(a)回転機断面、(b)界磁巻線形状、(c)界磁巻線 1 極の寸法とターン数、(d)垂直磁界成分と変動磁界成分の大きさ

図 2.3.1-27 に本節で検討した各形状のコイルが、回転機体格、使用超電導複合材料長、トルクリップル、効率に与える影響を比較して示した。いずれも回転機出力は 500kW-1800rpm である。

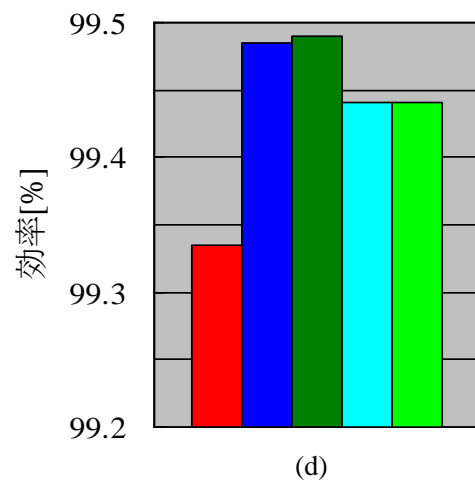
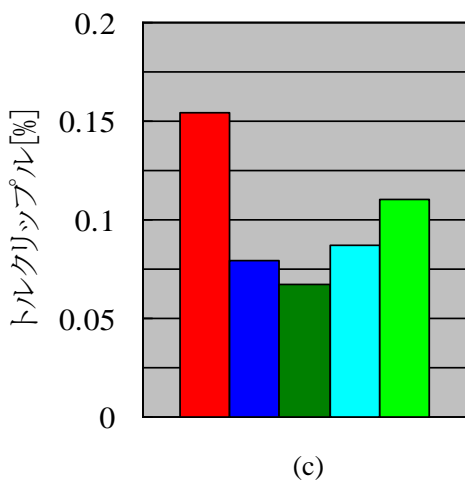
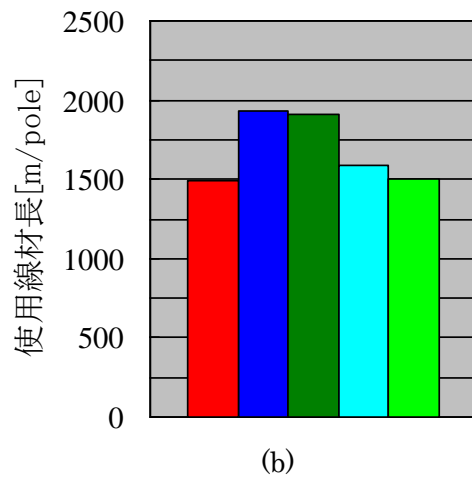
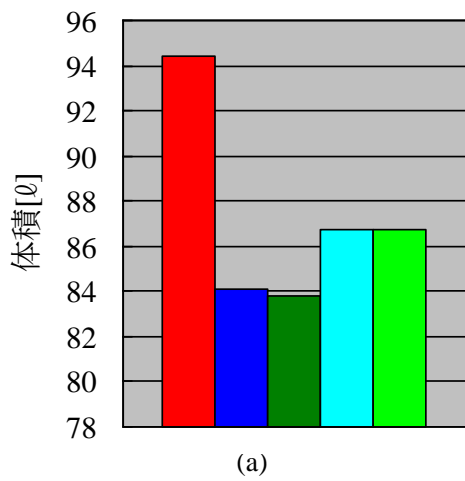
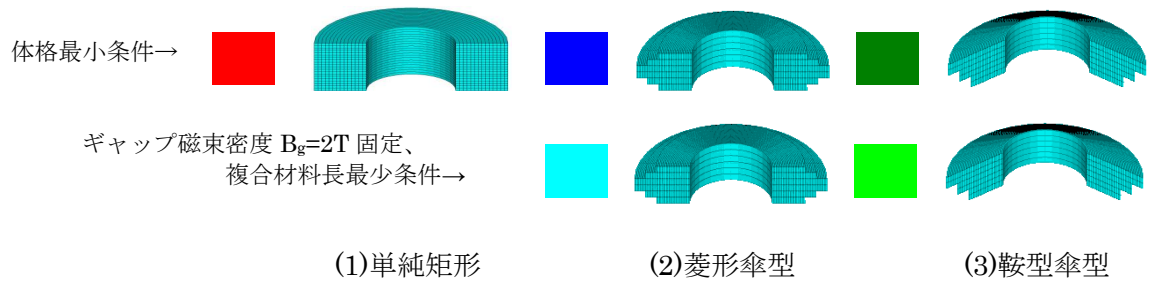


図 2.3.1-27 3 種類の界磁巻線形状に対して数値解析で求めた(a)回転機体格、(b)使用超電導複合材料長、(c)トルクリップル、(d)効率。上段の 3 種類は、ギャップ磁束密度を統一せず、体格最小で設計した場合。下段の 2 種類は、ギャップ磁束密度を 2T に統一し、使用超電導複合材料長を最小にした場合。

③ - 3 500kW 機的设计

前節 2.3.1③-1、2.3.1③-2 で基本的な界磁巻線について、温度、磁場、応力に関する成立性、および最適形状を検討した。ここでは、その結果を受けて、電機子、ヨークなど界磁巻線以外の部分も含む回転機全体の詳細設計を行った。イットリウム系複合材料を使った界磁巻線の固定子に加え、常電導の電機子、ヨークなどを含めた検討により最終的に回転機の体格、重量、効率、RM 使用量を算出し、同出力の常電導機と比較して、Y 系回転機の優位性を論じた。

(1)方法

設計の際の機器、複合材料の条件を以下に示す。

(1)-1 基本構造とコア断面

超電導回転機のシステム構成は超電導回転機とその冷却機で構成され、超電導回転機の方式として現状超電導複合材料の交流損失低減技術が確立されていないため、電機子側(固定子側)コイルの超電導化が難しく、回転子超電導・固定子常電導として回転子を冷却する方式とする。現在最適と考えられる全体構成を図 2.3.1-28 に示す。回転子は回転子軸内を中空にして、その中にネオンを封入し外部よりサーモサイフォン方式で冷却する方法とし、また、液体 Ne の沸点は 27K であるので、想定した冷却温度は界磁コイルの最高温度が 40K として設計した。これは、2.3.1②で述べたように液体 Ne (沸点 27K) の沸点以上で、できるだけ I_c の高い温度でかつ過去の実績を参考に決めた[2]。

この方式はヨーロッパや米国などで採用されている方式であり[1-2]、配管を這わすより簡便であることからこの方式を採用した。回転子は突極構造とし、界磁コイルは小型化、接続部を考慮しパンケーキ形ではなくコイル巻回数を多く出来る傘形形状を中心に設計検討した。

低温時の強度低下およびインバータによる高調波鉄損による冷凍機出力増加を避けるため回転子の鉄心は無しとした。固定子はヨーク・ティース・電機子コイルから成り、ティースはティース磁束密度の大きさによって、磁性/非磁性を使い分けることとした。

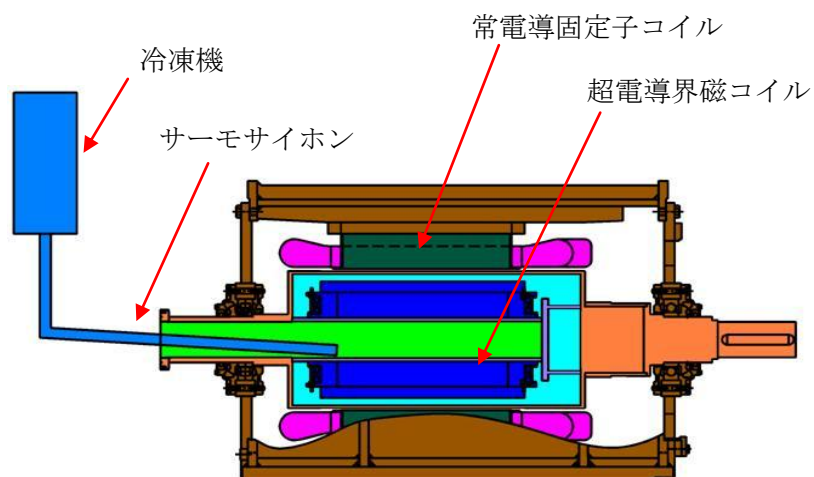


図 2.3.1-28 電導回転機構成

(1)-2 電圧および回転速度

500 kWは産業用を前提としており、最も良く使われている4極60Hz相当の1800rpmとした。一般に500kWクラスの産業用可変速回転機は400V級インバータを適用しており、本設計でも500kWの定格電圧は400V級とした。

(1)-3 複合材料 I_c

イットリウム系複合材料の性能が年々向上しており、500kWに関しては複合材料性能による最適設計として I_c が現状レベルの300A/cm幅(@77K, 自己磁場)の場合と将来の複合材料特性の向上を考慮した I_c が600A/cm幅(@77K, 自己磁場)の場合で回転機特性を比較した。

(1)-4 極数

極数を増やすと一極分の回転子断面において巻枠が占める面積が相対的に増えて巻線として使用可能な面積が相対的に減る。イットリウム系複合材料は曲げ加工で I_c 特性が劣化しやすく、 I_c 特性が劣化しない曲げ半径(R)を35mmとして500kWでは2極~6極の間で最適化を検討した。

(1)-5 界磁コイルの形状

500kWは遠心力対応のため平傘型コイル形状を採用した。図2.3.1-29に代表的なコア断面を示す(500kW-1800rpm級)。外殻・真空層・80Kシールドの内側に界磁コイルを配置した。コイル断面において、通常のコイルでは上辺と下辺が同じ矩形であるが、コイルが設置できる空間が限られているため、より効率良く磁場を発生できるように、断面が三角形などの傘型コイル形状としている。後述のように、他の検討例では菱形断面なども検討している。

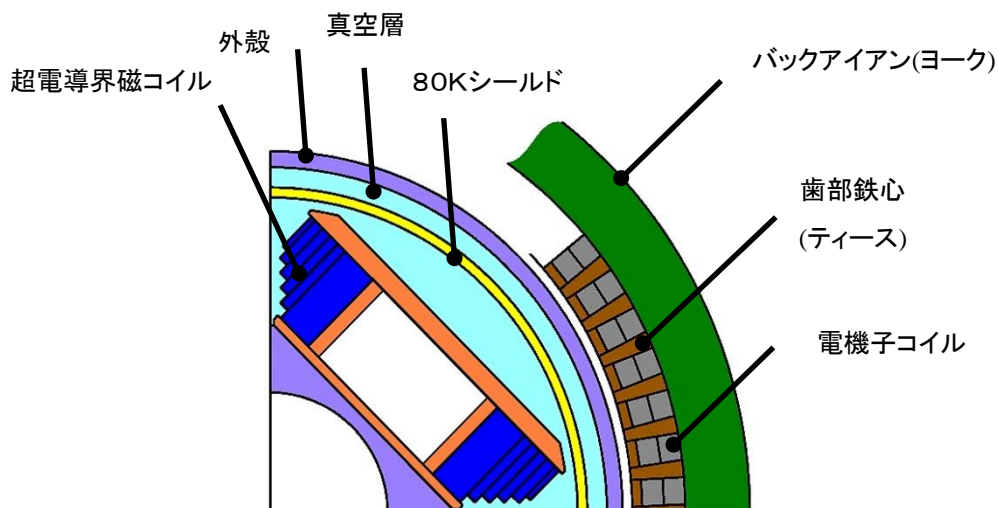


図 2.3.1-29 500kW 回転機のコア断面

(2) 結果

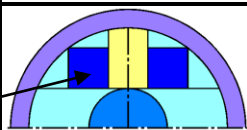
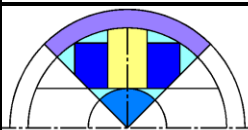
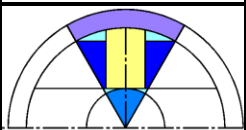
(2)-1 界磁コイル形状、極数比較

本機では回転数が 1800rpm と大きく、界磁巻線にかかる遠心力も相当大きくなると予想され、また、同様な回転数の常電導機の実績から、上部(遠心力がかかる部分)を平型とし、外からの抑えが効く形とした。こうした形状の場合、基本的な表 2.3.1-5 に示す 3 種が基本的なものと考えられる。また、それぞれの形状に適した極数と合わせて、界磁コイルとして利用可能な断面積を表 2.3.1-5 に示すように検討した。形状は、左から矩形、平傘型、三角形である。

図において界磁コイルが磁場を発生し、外側の固定子の電機子へ供給される電力に対応して、回転力を生むが、そのために図の黄色部分の空心部分の面積はいずれも一定とした。また、ロータ外径、中心のシャフト径も同じとした。

巻棒も含まれるのでコイル部断面積を 100%巻線に使えるわけではないが、これらの検討の中で、平傘型の 4 極が最も利用率が高い。2 極の場合は回転子内径周りを巻線に使えないため面積率が低下する。三角形の 6 極は断面がシリンダー状に段々に巻くので面積率は同表より下がる。すなわち、界磁コイル面積率の最も大きい 4 極をこの場合に選んで設計した。

表 2.3.1-5 500kW 回転機の界磁コイルの形状と極数比較

	2 極	4 極	6 極
コイル形状 (界磁コイル)			
界磁コイル部断面積(mm ²)	7540	6539	3629
回転子断面積(mm ² /極)	50894	25447	16965
コイル面積率	14.8%	25.7%	21.3%

(2)-2 I_c による違い

現状、量産化が実施されている 300A 級/cm 幅複合材料と 100m 級で確認された 600A 級/cm 幅複合材料を用いて設計検討を行った。

表 2.3.1-6 に 500kW に I_c 性能による仕様の違いを示す。現状の複合材料性能($I_c=300A/cm$ 幅)ではギャップ磁束密度を充分高く取れないので、固定子鉄心が有りとして、磁束を高し体格的を小さくした。よって、固定子は鉄心有りで設計し、その時ギャップ磁束密度は 0.9T であった。回転子側は超電導コイルが高い磁束を出すため鉄心が磁気飽和して役に立たないことや、軽量化が出来るため鉄心無しとした。

いっぽう、複合材料性能が向上して現状の 2 倍の I_c が取れる ($I_c=600A/cm$ 幅)場合は、固定子も回転子と同じ理由で鉄心歯部(ティース)をなくしバックアイアン(固定子ヨーク)のみとする。ギャップ磁束はティース無しでも現状 I_c より 30%以上高い 1.2T となった。コイル固定のためのティースに変わるものとして非磁性材料を使用するとともに、コイル自体の剛性を上げるために平角

線を使用する。本結果を見ると、高 I_c 複合材料を使った設計は、鉄心相当長が約 20%も小さくなりコンパクト化が図れる。また、鉄の量も少なくなるので表にあるように、回転機の効率あがる。

表 2.3.1-6 500kW 機における I_c 特性による比較

項 目		$I_c=300\text{A/cm}$ 幅	$I_c=600\text{A/cm}$ 幅
仕 様	定格出力	500kW	500kW
	定格電圧	440V	400V
	定格回転数	1800rpm	1800rpm
	極数	4 極	4 極
	効率(冷凍機込み)	96.3%	96.8%
固 定 子	固定子外径	$\phi 580$	$\phi 490$
	固定子内径	$\phi 390$	$\phi 370$
	鉄心歯部(ティース)	あり	なし
	エアギャップ	5mm	5mm
	鉄心相当長*	400mm	330mm
	素線仕様	1.4 ϕ 丸線 0-PEW	6 \times 2.8mm マチ巻角線
回 転 子	磁極鉄心	なし	なし
	界磁電流	135A	230A
	ターン数	1170 ターン	1050 ターン
	界磁コイル複合材料幅	5mm 巾	5mm 巾
	I_c (A/cm 幅@77K,0T)	300	600
	複合材料量(5mm 幅換算)	1.2km/極	1.2km/極
磁 束	界磁コイル磁束密度	2.2T	3T
	ギャップ磁束密度	0.9T	1.2T

*鉄心相当長：空心のものは、コイルの長辺部の内側の長さ。

(2)-3 詳細設計仕様

上記のように最適な形状が 500kW 機では平傘型に決まったところで、界磁コイルの磁場、複合材料の磁場中 I_c 特性を詳細に考慮して設計した。図 2.3.1-30 に 500kW の磁束密度分布を示す。界磁コイル付近の拡大図から超電導複合材料は最大経験磁場の約 3T と約 45°で交差している。

500kW 機の界磁コイルのロードラインと 40-60K における $I_c=600\text{A/cm}$ 幅(300A/5mm 幅)の複合材料の磁場中特性を図 2.3.1-31 に示す。この図から、40K まで冷却できれば所要の界磁電流を流すことができる。後述するように、コイル成形後の I_c 特性については回転子モデルコイル試作試験結果からコイル成形後も複合材料 I_c の電流が流せることを検証している。

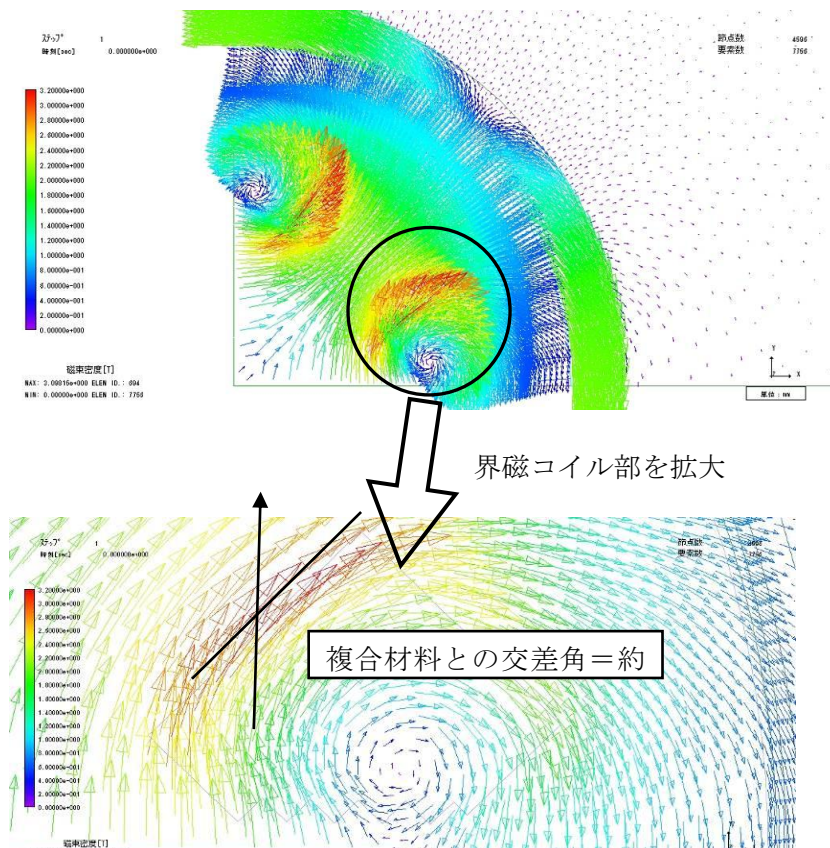


図 2.3.1-30 500kW 機界磁コイルの磁束密度分布

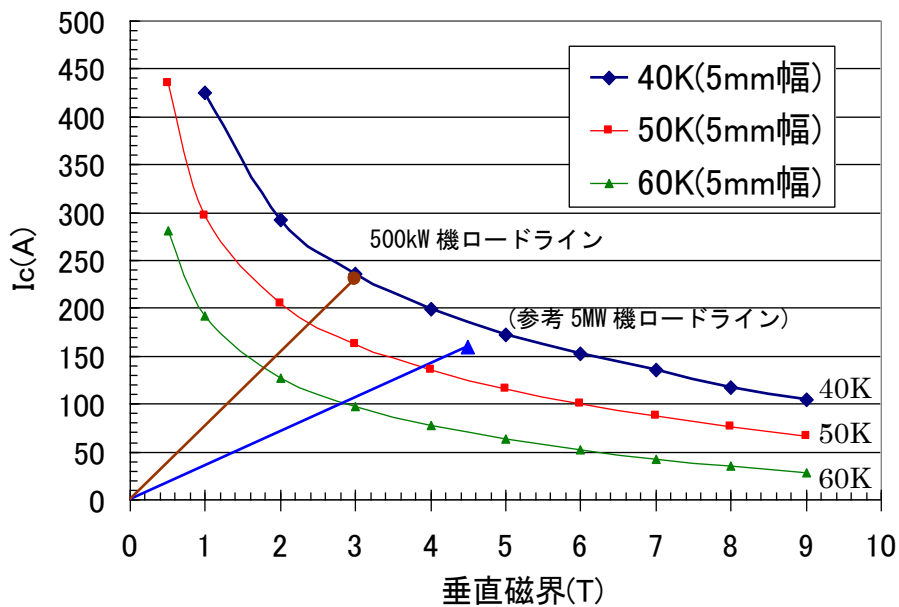


図 2.3.1-31 複合材料の I_c - B - T 特性と各界磁コイルのロードライン (5MW 機は Appendix 参照)

以上の検討に基づき、複合材料 $I_c=600\text{A/cm}$ 幅を使用した時の 500kW 回転機の詳細仕様を表 2.3.1-7 に示す。イットリウム系複合材料に関して重要なのは、500kW 機では $1.2 \times 6 = 4.8\text{km}$ が必要なことである。また、40K 運転を想定しており、記載の各界磁束密度近辺で角度も考慮して運転電流を決める必要がある。さらに、効率を計算すると、各々 96.8% の高い効率が得られた。

表 2.3.1-7 500kW の設計仕様

		500kW	備考
仕様	回転速度(min^{-1})	1800	
	極数	4	
	電圧(V)	440	
	電流(A)	760	
体格	固定子外径(mm)	490	
	鉄心相当長*(mm)	330	
	ヨーク厚(mm)	33	
	エアギャップ(mm)	5	
	回転子内径(mm)	360	
固定子コイル	固定子コイル数	60	
	固定子每溝導体数	6	
	コイルピッチ	#1~#16	
	導体総数	90	
	固定子素線サイズ(mm)	6.0×3.2	マカ巻角線、素線絶縁含まず
	巻線抵抗($\Omega/\text{相 } 20^\circ\text{C}$)	0.0311	
回転子コイル	界磁巻数	1050	段上りの減ターン考慮
	界磁素線サイズ(mm)	5.2×0.3	素線絶縁・ワニス含む
	界磁電流(A)	230	定格
	複合材料 I_c	600	77K 自己磁場
	複合材料長(km/極)	1.2	5mm 幅換算
	総複合材料長(km)	4.8	5mm 幅換算
特性	回転機効率(%)	96.8	冷凍機含む
	ヨーク磁束密度(T)	2.3	
	ギャップ磁束密度(T)	1.2	
	界磁磁束密度(T)	3.0	

* 鉄心相当長：ここでは空心であるので、コイルの長辺部の内側の長さ。

(3) 考察

(3)-1 常電導回転機との比較

前節までに得られた超電導機と代表的な常電導機と体格、重量、効率を比較した。常電導機の界磁コイルは、誘導機はアルミ鋳込みロータ、PM 回転機は永久磁石埋め込み形、電機子(固定子)コイルは両者共銅線コイルである。調べた誘導機、PM 回転機の 500kW の仕様を表 2.3.1-8 に示す。いずれも、500kW、1800rpm、4 極である

表 2.3.1-8 常電導機の仕様

項目		誘導機	PM 回転機
仕様	定格出力	500kW	500kW
	定格電圧	400V	400V
	定格回転数	1800rpm	1800rpm
	極数	4 極	4 極
固定子	固定子外径	φ 600	φ 520
	固定子内径	φ 370	φ 340
	エアギャップ	2.3mm	1.5mm
	鉄心長	420mm	600mm
	コイル仕様	1.3mm 丸線	1.3mm 丸線
回転子	界磁電流	—	—
	ターン数	—	—
	界磁コイル複合材料	アルミロータ	永久磁石
	複合材料使用量	—	—
磁束	界磁コイル磁束密度	—	—
	ギャップ磁束密度	0.9T	0.8T

それらの常電導機の特性と本設計で得られた超電導 500kW 機の特性の比較を表 2.3.1-9 に示す。誘導機と比べると、体格、重量、効率すべての面で超電導機が優れている。効率は 1.8%向上し、体格は 30%向上し、重量は半分になっている。従来から高効率であるといわれている PM 機に比べても効率は多少向上している。しかしながら、体格、重量の点では、超電導機と PM 機ではあまり差が見られず、15%程度の向上にとどまっている。

表 2.3.1-9 500kW 常電導回転機との比較

	超電導回転機	誘導機	PM 回転機
効率	96.8%	95%	96.5%
体格比	0.7	1	0.8
重量比	0.5	1	0.6

(3)-2 希土類元素使用量の比較

一般的に PM 回転機に使用されているネオジウム磁石に含まれる RM の量はメーカーの秘密事項であるため正確には把握できないが、文献等から鉄、ホウ素を除きネオジウムとディスプロジウムの合計の質量比で 32%を RM とした。図 2.3.1-32 に磁石の成分割合のグラフを示す。

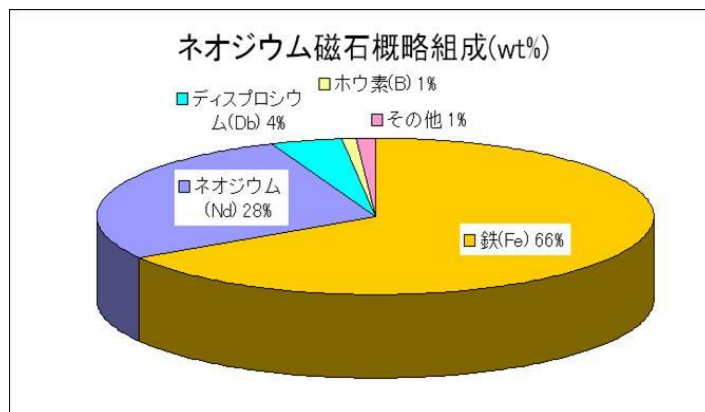


図 2.3.1-32 ネオジウム磁石の概略組成

a) 永久磁石の RM 使用量は次式で表される。

$$\text{永久磁石の RM 使用量(kg)} = \text{磁石使用量(kg)} \times \text{RM 含有率(\%)} / 100$$

b) 超電導複合材料の RM 使用量は次式で表される。なお、中間層および基材に含まれる RM はわずかなため考慮していない。

イットリウム系複合材料作製のための RM 使用量(kg) = (複合材料巾(mm) × 超電導層厚さ(μm) × 総複合材料長(km) × 比重(g/cm³) × 10⁻³ × 収率)である。

ここで、超電導層厚さ = 1.3(μm)、超電導層の比重 = 6.3(g/cm³ : Gd₁Ba₂Cu₃O₇ の比重)
 今回の超電導複合材料で使用されている RM(=ガドリウム:Gd)の比重は上記比重について夫々の原子量から Gd のみの量を計算する。Gd 比重 = 6.3 × (157/734) = 1.35g/cm³

さらに、この Gd の量は超電導層内に含まれるが、正当に比較するため、超電導層を製造するときの材料歩留りを 33%とした。

表 2.3.1-10 に RM 使用量を示す。500kW 機では、1/130 になった。目標値である PM 回転機における RM 使用量の 1/10 に対して十分な削減量が得られる。

表 2.3.1-10 レアメタル(RM)使用量比較

	500kW	
	超電導回転機	PM 回転機
総複合材料長(km)	4.8	—
磁石量(kg)	—	50
RM 使用量(kg)	0.126	16

Appendix 今後の実用化の見通しについての検討

今回得られた Y 系回転機の成果は、産業用回転機(500kW 級)ばかりでなく、広い波及効果を持つ。例えば、MW 級の船用回転機は、Siemens、Doosan、AMSC 社などが Bi 系複合材料で開発を進めており、実用化に有望な分野と言える[1-3]。この船用回転機に、さらに特性の優れたイットリウム系複合材料を用いれば、より一層の優れた効果が期待される。よって、ここではより広い分野での実用化のイメージとその効果を調べるため、産業用をさらに大型化させた船用 5MW 機の検討結果について述べる。

①5MW 機界磁コイルの概念設計

船用応用として代表的な 5MW-200rpm 機に関して、以下検討を行った。

①-1 解析対象回転機と界磁コイル

本船用回転機の回転数は 200rpm と小さいので、遠心力の影響も小さい。また、全体サイズとしても 500kW と比べて大きくなり、界磁コイル設置部にも余裕がある。このため、平傘型形状からさらに変化させ菱形傘型形状として解析を行い、その成立性を調べた。

設計された 5MW 級超電導同期電動機の諸元を表 App-1 および図 App-1 に示す。なお、大型である本モータに使用した複合材料は、 $I_c=600\text{A/cm}$ 幅級のものである。有限要素法の要素分割は図 App-2 の通りである。界磁の巻線部は複合材料構造を考慮して要素分割をしている。電磁場・伝熱・応力の連成解析では、共通の要素分割を用いて各解析間で発熱、電磁力等の受渡しを行っている。

表 App-1 5MW 級回転機の諸元

定格出力	5000 kW
定格回転速度	200 rpm
定格電圧	3000 V
定格電流	1020 A
固定子外径	1350 mm
固定子内径	950 mm
エアギャップ	5 mm
固定子鉄心長	1000 mm
固定子スロット数	120
電機子コイル数	120
每溝導体数	6
電機子コイル電流密度	3.7 A/mm^2
界磁巻数	6956
界磁電流	200 A
複合材料幅	5 mm
複合材料使用量(5mm 幅)	18 km/極

①-3 電磁力・遠心力

電磁力の分布を図 App-4 に示す。電磁力は巻線部(超電導層)に発生する。その最大値は 3×10^{11} N/m³ となった。一方、遠心力の分布を図 App-5 に示す。その最大値は 1.65×10^6 N/m³ となった。500kW 機に比べ、界磁巻線の通電電流が大きくなる一方で、回転数が減っているため、電磁力は大きくなるが、遠心力は小さくなった。

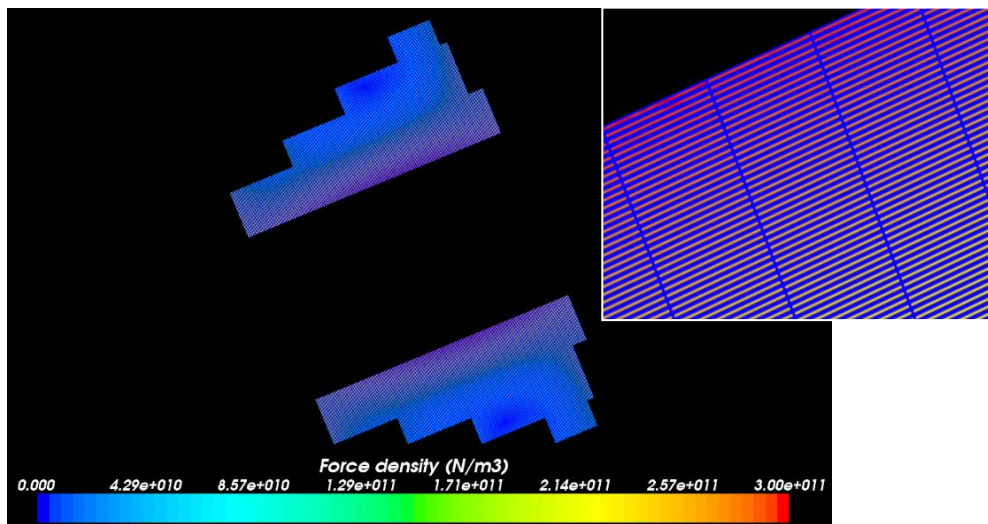


図 App-4 5MW 級回転機の界磁巻線の電磁力分布(右上拡大)

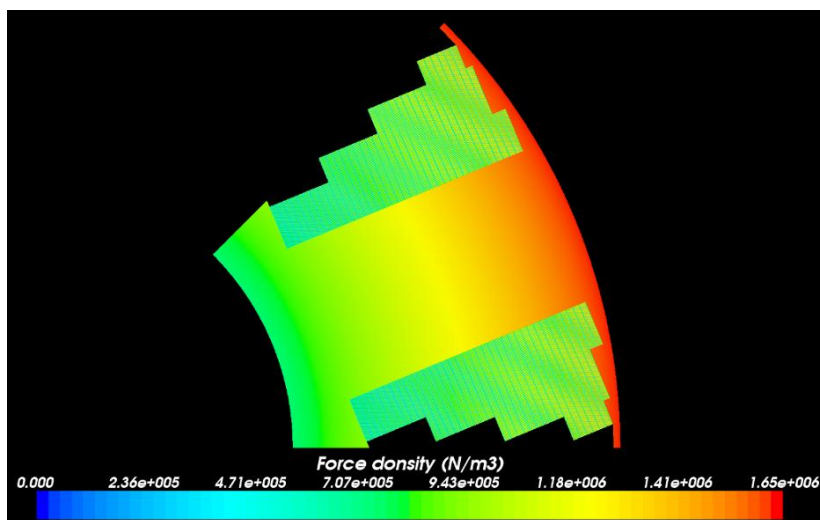


図 App-5 5MW 級回転機の遠心力分布

①-4 応力分布

図 App-6 に複合材料幅広面垂直方向に働く応力分布を示す。この方向の応力は複合材料剥離方向に働く応力である。図 App-7 に巻線内の各ターンの応力分布を示す。巻線最内層で複合材料幅広面垂直方向に 25 MPa の応力が発生している。

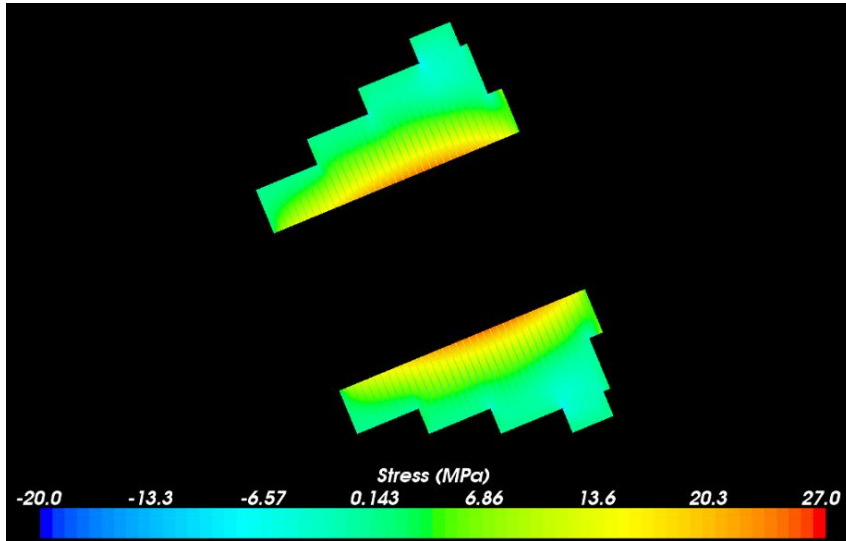


図 App-6 5MW 級回転機の界磁巻線の複合材料幅広面垂直方向の応

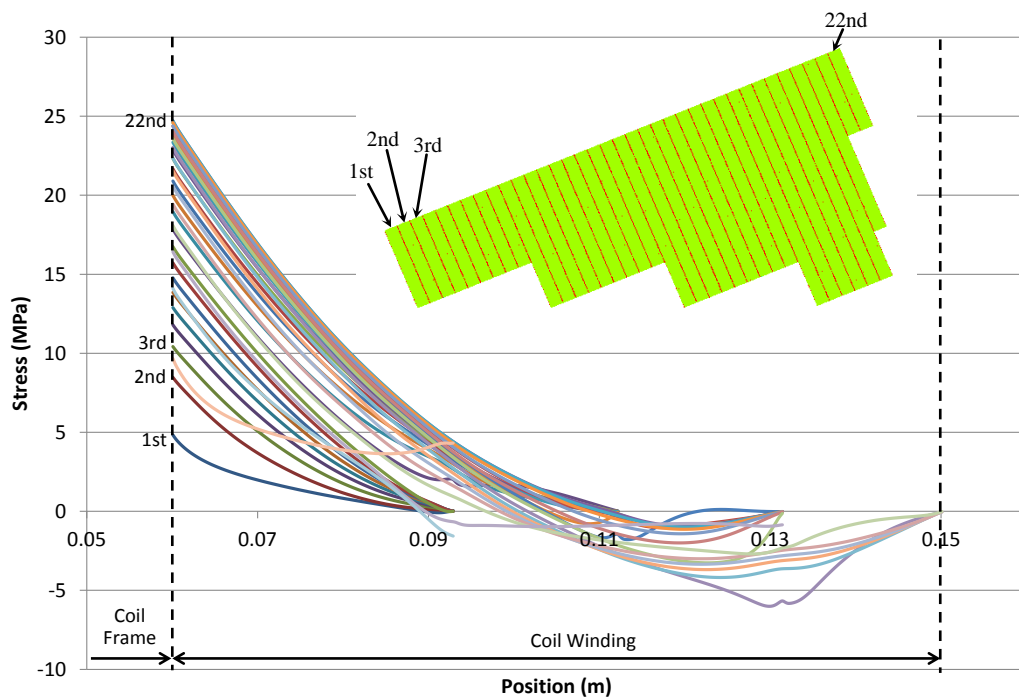


図 App-7 5MW 級回転機の界磁巻線の各ターンの
複合材料幅広面垂直方向の応力

①-5 温度分布

発熱は、超電導複合材料部で 0.005、0.01、0.015 W/m = 5、10、15 kW/m³(複合材料：5 mm 幅、200 μm 厚)とした。5 MW 機では一極当たりの複合材料長は 18 km であるから、一極当たり 90、180、270 W の発熱に相当する。初期温度は 27 K とした。冷却が充分された状態で発熱が発生したとして計算を行った。図 App-8～図 App-10 に回転子の温度分布を示す。0.005、0.01、0.015 W/m の発熱に対して、最高到達温度はそれぞれ 30.8、34.3、37.7 K となった。

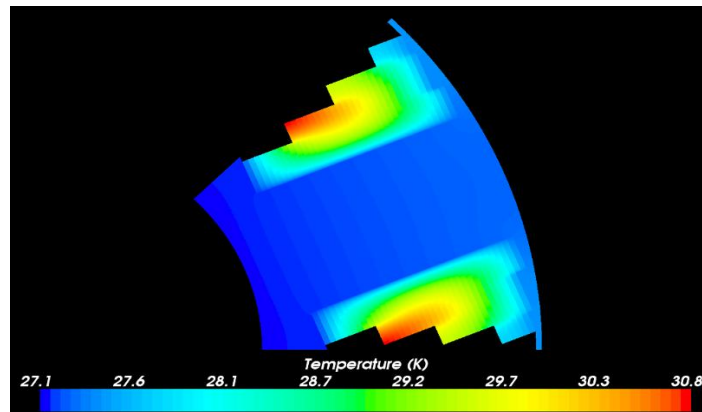


図 App-8 5MW 級回転機の界磁の温度分布(発熱 0.005 W/m)

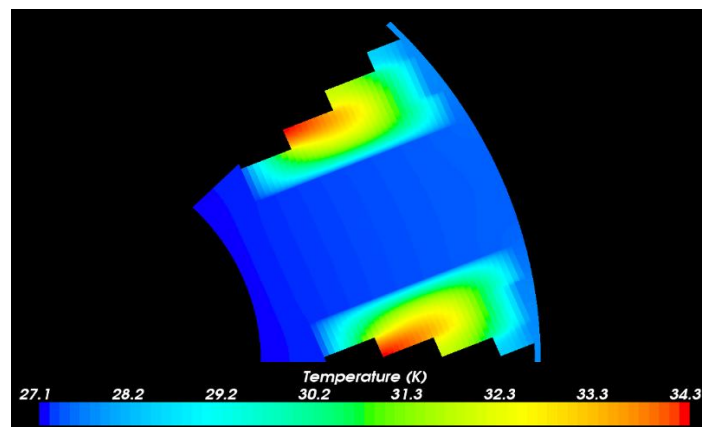


図 App-9 5MW 級回転機の界磁の温度分布(発熱 0.01W/m)

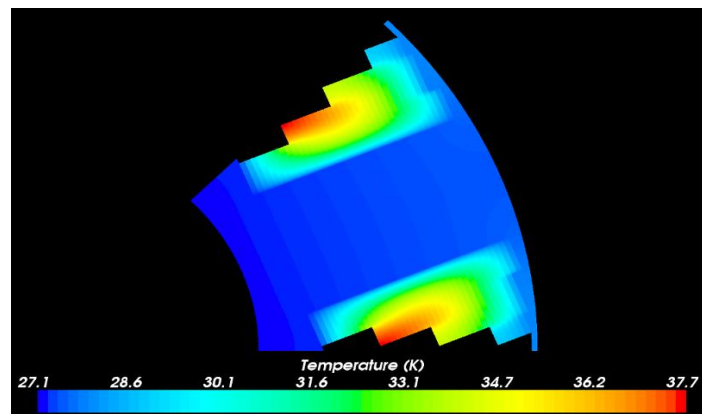


図 App-10 5MW 級回転機の界磁の温度分布(発熱 0.015

①-6 概念設計に関する考察

表 App-2 に示すように、5MW 機で複合材料に 25 MPa の垂直応力=剥離応力が発生する。これまでの報告から、イットリウム系複合材料の剥離強度は 50MPa 程度であることがわかっている。すなわち、今回のコイルで発生する超電導層に垂直にかかり剥離方向に働く力はいずれもこの剥離強度限界内に収まっており、回転機に用いることができることがわかった。

表 App-2 5MW 回転機の複合材料に働く最大応力

	5 MW 級回転機
巻線部最大磁場	7.2 T
複合材料幅広面垂直応力	引張り： 25 MPa

また、5 MW 機の界磁巻線内の温度の時間変化、最高到達温度は、前に示した図 2.3.1-14、図 2.3.1-1415 の通りである。界磁巻線の温度は 0.005~0.015 W/m の発熱でも、5 MW 機(90~270W 発熱に相当)で 30.8~37.7 K となった。また、ネオンと接触している境界面の温度は 27.1 K で 0.1 K の温度上昇で収まっており、膜沸騰領域には達していないため、巻線内に温度差はできるが(最大で 5MW 機で 270W の発熱がある場合、 $\Delta T=10.6$ K)冷却は可能と考えられる。

②5MW 機的设计

上記 5MW の概念設計と 2.3.1③-2 の最適形状を検討結果を受けて、電機子、ヨークを含めた回転機全体の詳細設計を 5MW に対して行った。体格、重量、効率、RM 使用量を算出し、同出力の常電導機と比較して、Y 系回転機の優位性を論じた。

②-1 方法

(1) 設計の際の機器、複合材料の条件は、500kW の場合とほぼ同じである。

- ・基本構造とコア断面：回転子超電導・固定子常電導とした。液体 Ne によるサーモサイフォン方式で冷却し、動作温度は 40K として設計した。回転子の鉄心は無しとした。
- ・電圧および回転速度：5MW は船舶を念頭に、200rpm とした。電気推進船用の MW 級回転機電圧は 3kV 級~6kV 級が標準となっており、5MW 機では定格電圧を 3kV 級とした。
- ・ I_c ：5MW 機では、500kW の複合材料特性の比較結果を受けて、 I_c 性能は 600A/cm 幅 (@77K, 自己磁場)のもので検討した。
- ・極数：6 極~12 極の間で極数の最適化を検討した。イットリウム系複合材料は曲げ加工で I_c 特性が劣化しやすく、 I_c 特性が劣化しない曲げ半径(R)を 35mm として設計した。
- ・界磁コイルの形状：500kW は遠心力対応のため平傘型コイル形状を採用したが、5MW 機は回転速度が低いため遠心力を考慮しなくても良いこと、また、③-2 界磁巻線の形状検討の結果も参考に、菱形傘型形状を選んだ。これを基本に、さらに詳細に回転機特性への影響を検討した。

(2) 界磁コイル形状と極数の検討

5MW の設計に関しては、サイズが大きくなるため界磁コイル用のスペース、ロータシャフト-電機子の距離が取れるので、設計の自由度もます。このため、500kW の平傘型を改良して菱形傘型形状で次の通り検討した。

図 App-11 に断面形状を示す。同じ体格で界磁コイルのターン数を変え、平傘型、菱形の 2 種類のモデルを検討した。コイル巻数以外の固定子・回転子の形状は全て同一とし、界磁電流は各コイル磁界から 40K における最適値と、ギャップ磁束密度と回転機出力を解析し、平傘型よりも菱形傘型が優れていることがわかった。1800rpm で高速回転する場合には、上側からコイルをしっかり押える必要があるが、この 5MW 機では 200rpm を想定しており、菱形形状も可能である。すなわち、本 5MW 機では菱形形状が最も有効である。

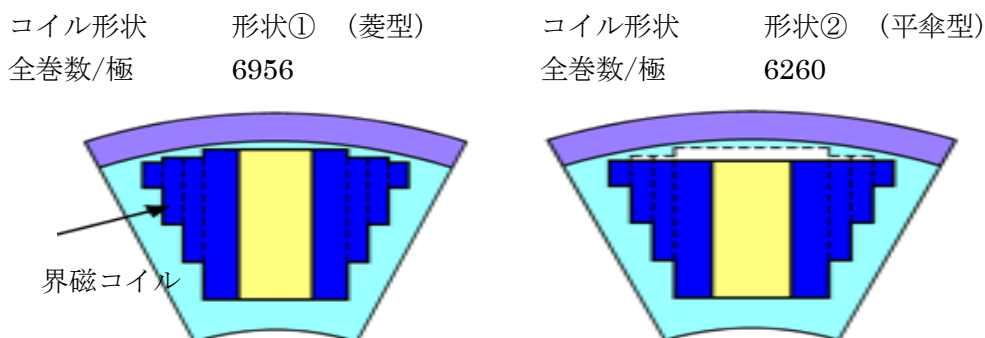


図 App-11 5MW 機の界磁コイル形状の検討

つぎに、この菱形形状を用いて、さらに詳細に 6 極～12 極の最適極数を検討した。また、形状も菱形でありながら、コイル厚みなどが変化する。解析モデルとした各種形状を図 App-12 に示す。各極数とも固定子外径を 1350mm・回転子内径を 400mm・エアギャップ 5mm および界磁コイル巻棒最直径 70mm を統一設計条件とし、回転機出力は界磁コイル長(ここでは界磁コイル内側直線部長さとした)で調整した。

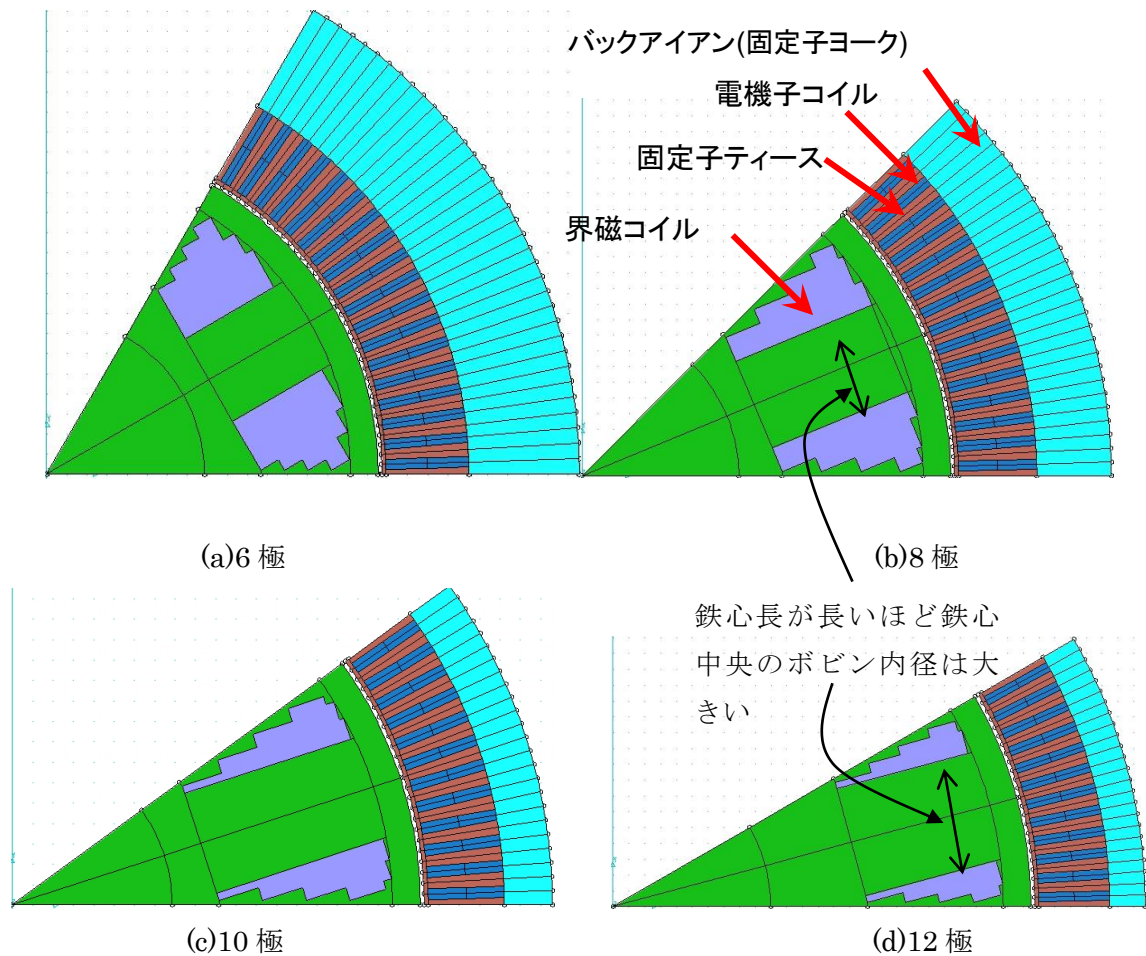


図 App-12 極数と形状を変えた 5MW 機の界磁コイルの形状(1 極分のコア断面図)

図 App-13 に体格比較を示す。鉄心長は極数が増えるほど長くなるが、1 極当たりの発生磁場は小さくなるので、ヨークの厚さが薄くなるり鉄心重量としては極数が増えるほど軽くなる。図 App-14 に界磁コイルの断面積比較を示す。一極当たりの回転子断面積は極数が少ないほど大きいですが、1 極当たりの界磁コイル断面積に対する回転子断面積の比を界磁コイル面積率とすると、8 極が最も面積率が高く、次いで 10 極となっている。

図 App-15 に電磁界解析によるギャップ・ヨークおよび界磁コイルの磁束密度を示す。界磁コイルは最大磁束としており、6 極と 8 極がほぼ同程度の約 5.5T である。ギャップ磁束も 6 極・8 極は 3T 近くとなり、後は極数が大きくなるほど磁束密度は低くなった

図 App-16 に回転機重量・回転機効率の比較を示す。前出の図 App-13 の通り極数が増えるほど鉄心重量は軽くなるが、固定子銅線重量・フレーム等の構造物の重量を加えた全質量では 8 極・10 極が軽くなっている。一方回転機効率は極数が増えるほど低下しており、本仕様においては効率と重量から 8 極が最適である。

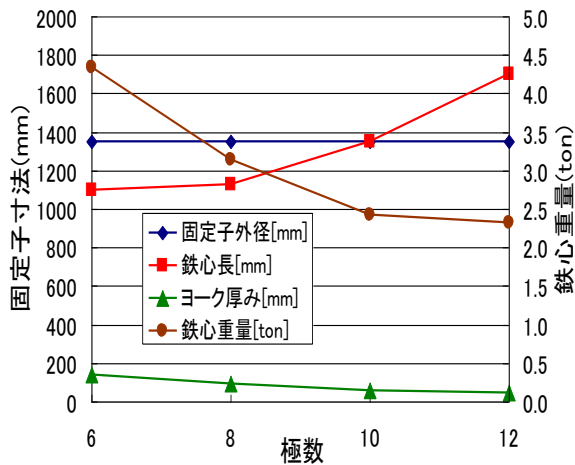


図 App-13 固定子体格比較

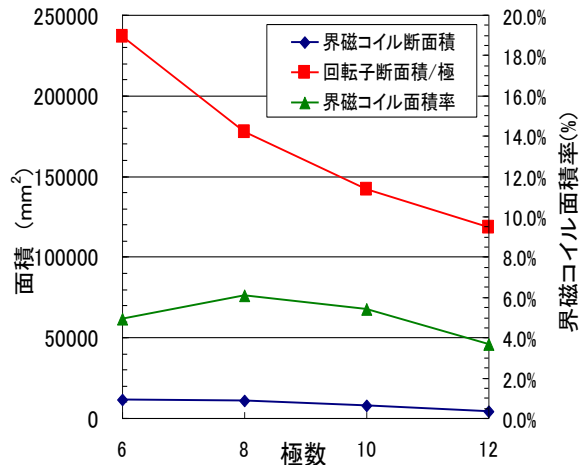


図 App-14 回転子面積比較

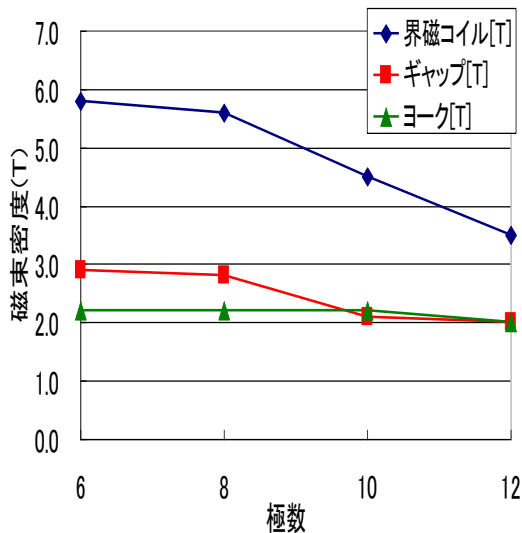


図 App-15 磁束密度の比較

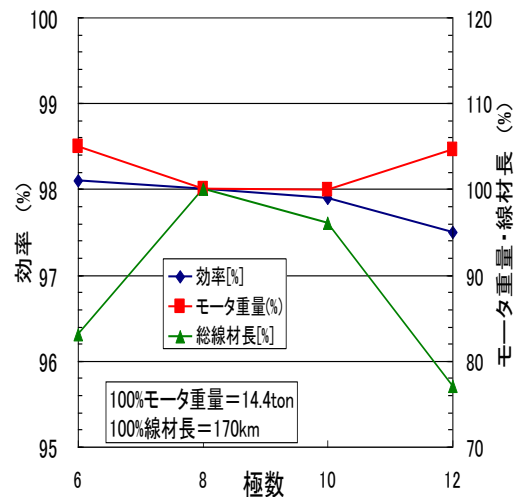


図 App-16 重量・効率比較

(3) 詳細設計仕様

上記のように 5MW 機で菱形の詳細な形が決まったところで、界磁コイルの磁場、複合材料の磁場中 I_c 特性を詳細に考慮して設計した。

図 App-17 に 5MW 機界磁コイルの磁束密度分布を示す。界磁コイル付近の拡大図から超電導複合材料は最大経験磁場 5.3T との交差角はほぼ 10° 以下であるが、界磁コイルのシャフト側端部で約 4.5T の磁場と約 45° で交差している。5.3T における平行磁場特性より 4.5T の垂直磁場特性の方が I_c は低いので、5MW は 4.5T における複合材料の垂直磁場特性で I_c を見積もることとした。

用いた複合材料の 40-60K における $I_c=600A/cm$ 幅(300A/5mm 幅)の磁場中特性と、5MW の界磁コイルのロードライン(図 2.3.1-30)から、5MW も 40K まで冷却できれば所要の界磁電流を流すことができる。後述するように、コイル成形後の I_c 特性については回転子モデルコイル試作試

験結果からコイル成形後も複合材料 I_c の電流が流せることを検証している。

以上の検討に基づき、複合材料 $I_c=600A/cm$ 幅を使用した時の 5MW 回転機的设计詳細仕様を比較して表 App-3 に示す。

5MW 機ではイットリウム系複合材料 $22km \times 8 = 176km$ が必要である。40K 運転を想定しており、記載の各界磁束密度近辺で角度も考慮して運転電流を決める必要がある。また、効率は 98% の高い値が得られた。

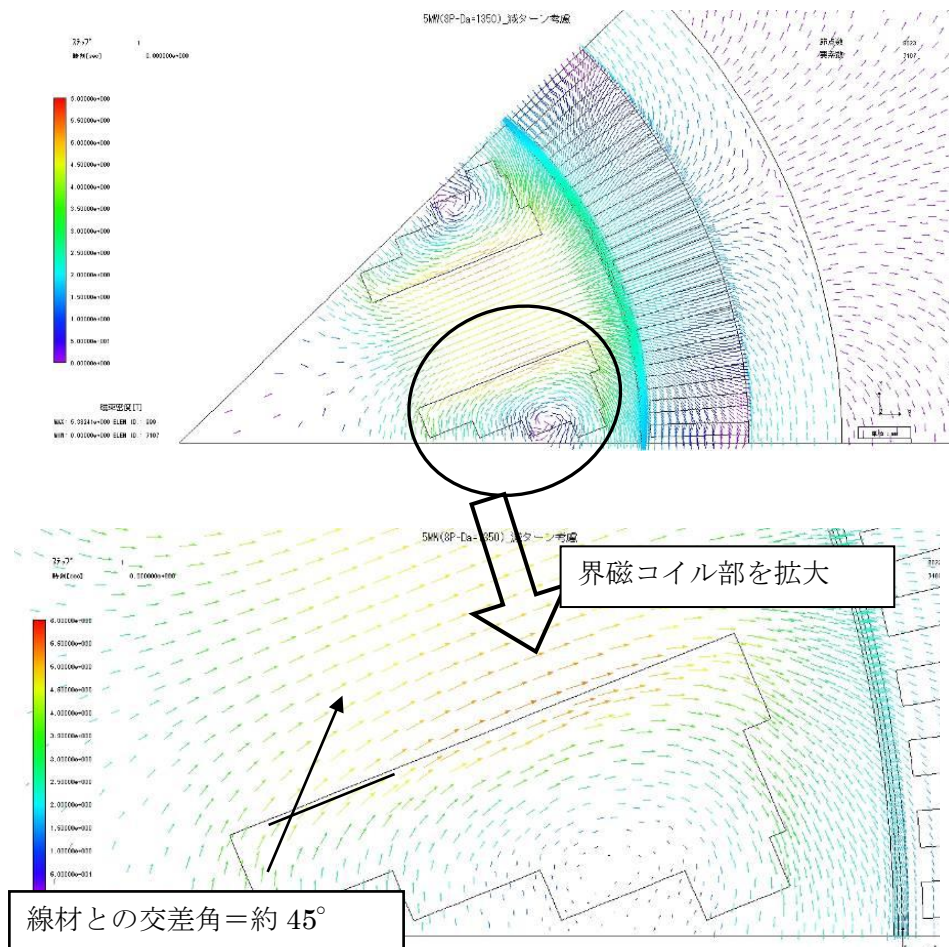


図 App-17 5MW 機界磁コイルの磁束密度分布

表 App-3 5MW の設計仕様

		5MW	備考
仕様	回転速度(min^{-1})	200	
	極数	8	
	電圧(V)	3000	
	電流(A)	1020	
体格	固定子外径(mm)	1350	
	鉄心相当長*(mm)	1200	
	ヨーク厚(mm)	95	
	エアギャップ(mm)	5	
	回転子内径(mm)	940	
固定子コイル	固定子コイル数	120	
	固定子每溝導体数	22	
	コイルピッチ	#1~#13	
	導体総数	330	
	固定子素線サイズ(mm)	5.0×1.8	マカ巻角線、素線絶縁含まず
	巻線抵抗(Ω /相 20°C)	0.0131	
回転子コイル	界磁巻数	6608	段上りの減ターン考慮
	界磁素線サイズ(mm)	5.2×0.3	素線絶縁・ワニス含む
	界磁電流(A)	160	定格
	複合材料 I_c	600	77K 自己磁場
	複合材料長(km/極)	22	5mm 幅換算
	総複合材料長(km)	176	5mm 幅換算
特性	回転機効率(%)	98.0	冷凍機含む
	ヨーク磁束密度(T)	2.2	
	ギャップ磁束密度(T)	2.6	
	界磁磁束密度(T)	5.3	

*鉄心相当長：ここでは空心であるので、コイルの長辺部の内側の長さ。

(4) 考察

常電導回転機との比較

5MW 超電導機と常電導機で体格、重量、効率を比較した。結果を表 App-4 に示す。ただし永久磁石(PM)回転機は、今回の 5MW 機ほど大きいものの実績がないので、それらの体格・重量は参考値である。この結果を見ると、誘導機に対しての圧倒的なメリットがあることがわかる。効率は 2.6% 向上し、体格、重量は約 1/3 に大幅に削減される。また、大型だけに PM 機と比較しても、体格重量は約半分程度と大きな効果が見込まれる。

表 App-4 5MW 常電導回転機との比較

	超電導回転機	誘導機	PM 回転機
効率	98.0%	95.4%	97.5%
体格比	0.29	1	0.65
重量比	0.34	1	0.76

2.3.2 要素技術開発 (1) 界磁巻線技術開発 (九州大学、研究組合)

①背景及び目的

本開発項目では、イットリウム系複合材料の特徴を活かした回転機を実現するために、500 kW (1000 rpm 級) 以上の産業用回転機 (モータ、発電機) を想定して、イットリウム系複合材料を用いた巻線技術とコイル特性の把握、励磁特性(2.3.2③-1)と安定性評価(2.3.2③-2)を行う。特に、回転機に適した種々の傘型形状の界磁巻線の試作を行ない、イットリウム系複合材料傘型界磁巻線の巻線技術、成型性、励磁特性、安定性特性を把握し、大容量機への課題を検討し、今後の開発指針を得る。

②課題とアプローチ

回転機に適した傘型形状をもった界磁巻線の作製を可能にする技術の見通しを得ることが重要な課題である。そのために、最新のイットリウム系複合材料を使い、種々の形状の界磁巻線を試作し励磁特性を評価する。また、交流損失など界磁巻線で生じる発熱要因を評価し、界磁巻線の運転に関する安定性を見通しを得ることも必要である。この両者の検討により、500 kW 級 -1000 rpm 級および大型回転機的设计を見通す。具体的目標としては、以下を掲げた。

- ・傘型界磁巻線工程等における加工劣化を抑制し、巻線状態での特性で複合材料 I_c の 70%以上を得ることを実証する。また、安定性に関しては回転機運転中に生じる交流損失から励磁運転への影響を調べることにした。

すなわち、本節での課題とアプローチは以下の通りである。

課題： イットリウム系複合材料による傘型界磁巻線コイルを作製し、その励磁特性を把握する。また、交流損失からの安定性も検討する。

アプローチ： 回転機で有効な磁束を発生する傘型形状コイルを作製し、これを低温に冷却し励磁試験を行う。その励磁特性とイットリウム系複合材料の I_c - B 特性と比較し、設計が可能となる励磁率を把握する。また、安定性に関してはイットリウム系複合材料の損失評価からコイルとしての損失を計算する。この励磁率、安定性の検討の両者から回転機適用の見通しを立てる。

③成果

③-1 傘型界磁巻線開発

(1) モデルコイルの作製

ここでは、500kW (1000rpm 級) 以上の産業用回転機 (モータ、発電機) への適用のため、イットリウム系複合材料による界磁コイルを模擬した要素モデルコイルを試作し試験評価した。

2.3.1③-2、2.3.1③-3 の界磁コイルの形状検討で述べたように、回転機に有効な形状は平傘型、

菱形傘型、鞍型傘型が解析、設計上の検討では有望であった。しかしながら、界磁コイルに使える長尺イットリウム系複合材料の製造はようやく本格化したばかりで、電流特性、機械特性、それらの均一性なども不明な点が多い。また、イットリウム系複合材料によるコイル化の検討は、少しずつ報告されてきているが、今回のような通常コイルのような単純矩形断面、円筒形状と大きく異なる傘型形状コイルでは、事前のモデルコイルによる作製検討、励磁試験などを行ない、製造技術のデータを蓄積することが必要である。これにより、より確度の高い界磁コイルの設計も可能となる。

よって、ここでは、a) 平傘型コイル、b) 菱形傘型コイル、c) 鞍型傘型コイル、を長尺イットリウム系複合材料により作製した。

巻線方式：短尺イットリウム系複合材料を使う際は、パンケーキ巻が多い[1,2]が、パンケーキコイルでは接続部が多数必要となるため機械強度が弱いなどの弱点が出てくる。今回の傘型形状では、形状から不均一な電磁力、熱収縮力がかかることも予想されるので、シリンダ巻とした。

巻線設計：傘型コイルの巻線方法を検討した。以下、詳細を 500kW 回転機界磁コイルの平傘型コイルについて述べる。

(1)-1 平傘型コイル：以下の条件のもとで設計を行った。

- ・用いたイットリウム系複合材料長は 200m：これは供給されるイットリウム系複合材料量から決まったものである。
- ・ターン数の種類は 500kW 級回転機の界磁巻線と同じとし、層数を減らす。
シリンダ巻線で傘型断面にするためには、層数とターン数を変える必要がある。図 2.3.2-1 に示すように、内径側から順に、9 ターン×14 層、8 ターン×8 層、7 ターン×12 層、6 ターン×6 層、4 ターン×8 層とした。表 2.3.2-1、図 2.3.2-2 に各ブロックのターン数と詳細図を示す。*
- ・巻線内径は 500kW 級回転機の界磁巻線と同じとする。
- ・直線部長さは 150mm とする。本コイルは平面図ではレーストラック形状である。実機と同じ程度の歪がかかるようにした。

*500kW 級回転機の実機設計では、必要な界磁巻線のターン数は内径側から順に、9 ターン×56 層、8 ターン×26 層、7 ターン×38 層、6 ターン×16 層、4 ターン×24 層となった。このため、特に、各ブロック間のわたりで生じる歪から来る劣化の程度の把握が重要であることから、ターン数を実機とモデルコイルで同じとした。

図 2.3.2-1 は、コイルの外形図で層毎にターン数が異なる傘型形状であるが、平面図では長円形のレーストラック形状である。本コイルは伝導冷却するため、巻枠に熱伝導率が良好な材料が望ましいことから、銅で構成することにした。また、巻線の電磁力支持や熱接触を考慮し、線材間にエポキシ樹脂を塗布した。

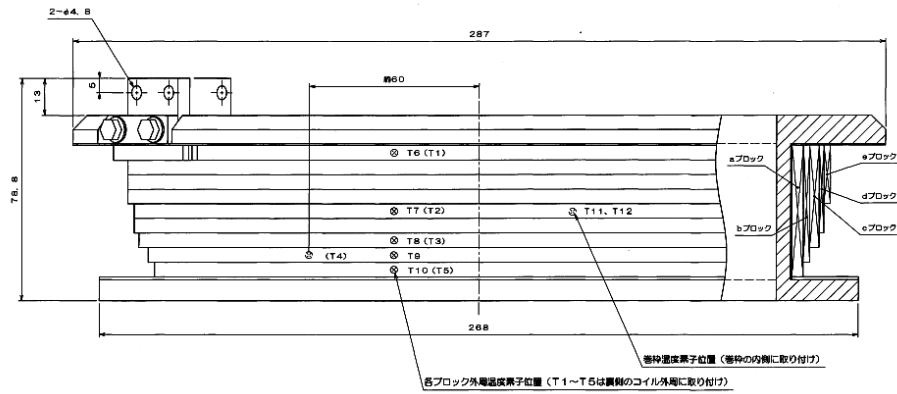


図 2.3.2-1 平傘型界磁巻線モデルコイル外形図

表 2.3.2-1 モデルコイル巻線のブロック毎ターン数

ブロック	層数	ターン数
a	14	9
b	8	8
c	12	7
d	6	6
e	8	4

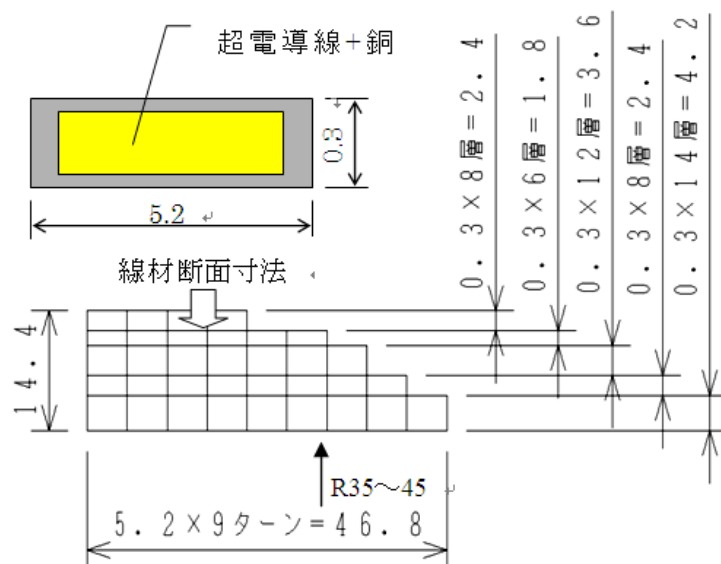


図 2.3.2-2 平傘型モデルコイルの断面図

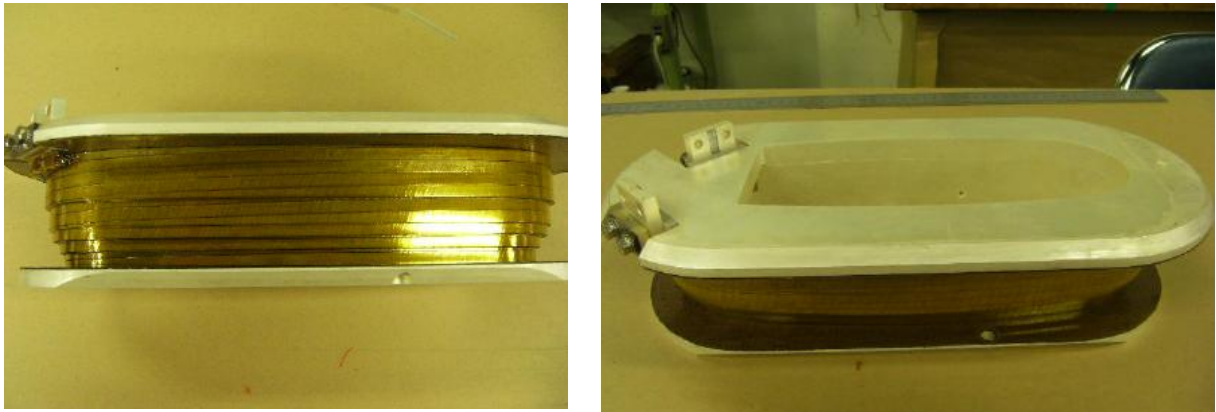


図 2.3.2-3 完成した平傘型モデルコイルの全体写真 左) 断面、右) 平面

(1)-2 菱形傘型コイル：2.3.1③-2、2.3.1③-3 の設計検討で述べたように、5MW 級回転機では、界磁コイルの設置部のスペースに余裕があり、かつ、回転速度も 500kW の 1800rpm に比べ 200rpm と遅く遠心力も小さくなる。このため、形状検討で平傘型よりもより効率の良い菱形傘型モデルコイルを作製した。コイル仕様は次の通りである。本モデルコイルは、5MW 級回転機を想定し、層数、ターン数共に約 1/3 モデルとした。5MW 級回転機コイル断面を図 2.3.2-6 に、ターン数比較を表 2.3.2-2 に示す。用いたイットリウム系複合材料は、500kW 同様幅 5mm のものであるが長さは 300m で 2 本使用した。巻線は 500kW 同様、シリンダ巻とした。完成した菱形傘型モデルコイルの外観を図 2.3.2-7 に示す。

表 2.3.2-2 設計機とモデルコイルのターン数比較

	5MW 機界磁コイル	菱形傘型モデルコイル
総ターン数	9222	938
3 ターン部	3 ターン、148 層	1 ターン、46 層
3 ターン部	3 ターン、334 層	1 ターン、100 層
6 ターン部	6 ターン、360 層	2 ターン、108 層
9 ターン部	9 ターン、294 層	3 ターン、88 層
9 ターン部	9 ターン、230 層	3 ターン、68 層
5 ターン部	5 ターン、180 層	2 ターン、54 層
概算線材長	—	600m
直線状部長さ	800mm	150mm
巻線最小内径	R35mm	

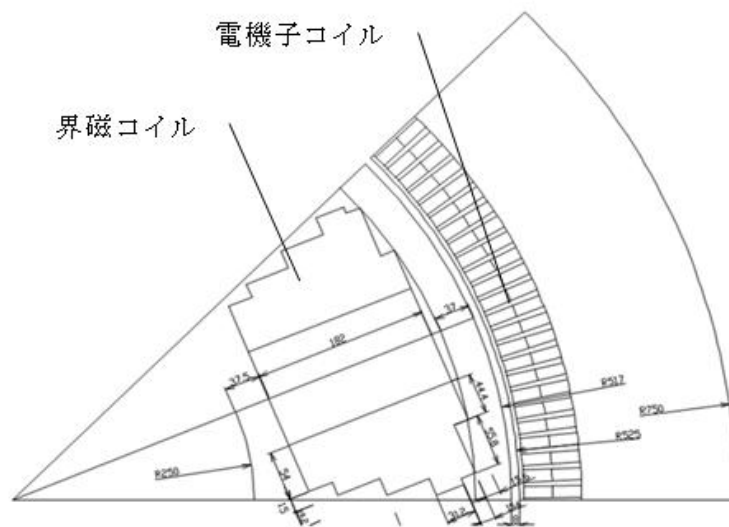


図 2.3.2-4 5MW 回転機 菱形傘型モデルコイル断面図

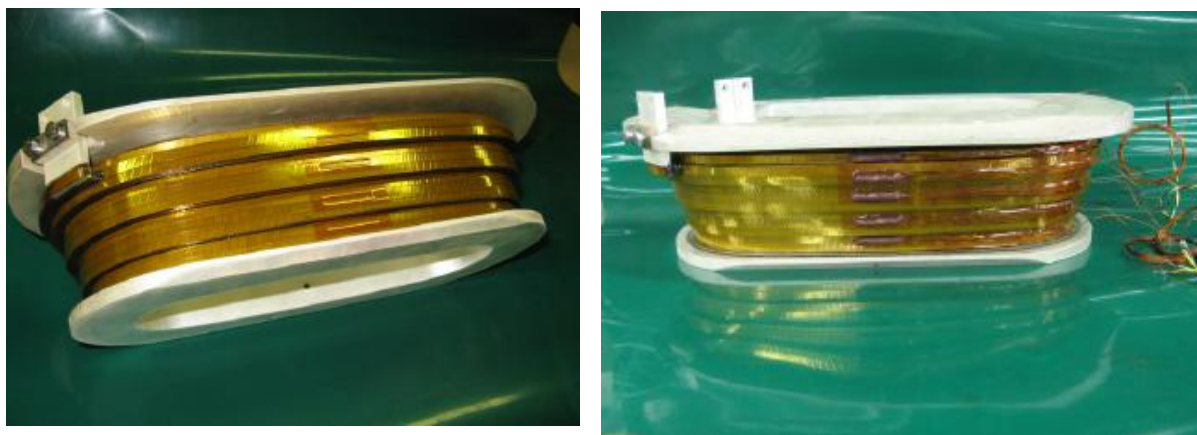


図 2.3.2-5 完成した菱形傘型モデルコイル外観

(1)-3 鞍型傘型コイル

2.3.1 節の形状検討では、鞍型傘型形状も有望であった (2.3.1③-2)。このため、5MW 級回転機のロータ径を想定し、取り付けることを想定して、R270mm の円周に沿った形状とした鞍型傘型モデルコイルを作製した。図 2.3.2-7 にコイル断面を示す。用いたイットリウム系複合材料は、500kW 同様幅 5mm のものであるが、長さは 100m を 1 本使用した。巻線は 500kW 同様シリンダ巻とした。また、励磁試験は、前 2 コイルは冷凍機伝導冷却であったが、これに関しては、3 つ目のコイルで実績も積んだこともあり、また、期間の関係もあり、液体窒素浸漬冷却(77K)のみでの試験とした。

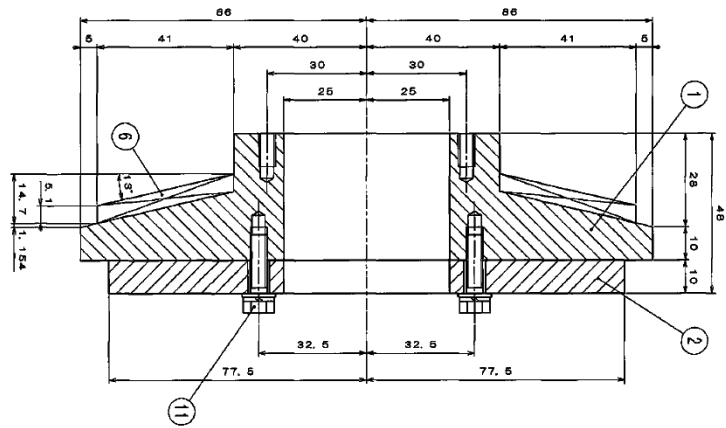


図 2.3.2-6 鞍型傘型コイル断面図



図 2.2.2-7 鞍型傘型モデルコイル

(2) 試験方法

設計した 500kW、5MW 級回転機の界磁巻線コイルの冷却は、液体 Ne を用いたサーモサイフォンを想定した。回転シャフト内に冷媒を導入して回転軸を 40K 程度に冷却し、シャフトに取付けた界磁巻線固定治具を通して伝導冷却する方式とした。このため、前記平傘型、菱形傘型コイルを GM 冷凍機を用いた伝導冷却方式で 40K 程度に冷却し、励磁試験を行うこととした（先述の様に、鞍型傘型コイルは液体窒素浸漬冷却で試験した）。図 2.3.2-8 に試験装置の外観を示す。この装置の外側に輻射シールドを取付け、要素モデルコイル周辺雰囲気は高真空にした。

コイル電圧の測定は、コイルの両端電極に取付けた電圧端子で行っているため、測定電圧には電極の抵抗やイットリウム系複合材料線と電極との接続抵抗を含む値となる。要素モデルコイルの臨界電流測定において、基準となる電圧値は次のように設定した。磁界解析の結果から、コイルの端部の垂直方向磁界が高いことがわかっており、この部分で $0.1\mu\text{V}/\text{cm}$ 発生した場合を臨界電流とした。この理由は、後述の様に n 値が 25・35 と高く、コイルの焼損を防ぐため、通常の I_c 基準の $1\mu\text{V}/\text{cm}$ よりも 1 桁低くしたためである。ただし、前述したように、測定電圧には抵抗成分を含むためこれを差し引く必要がある。

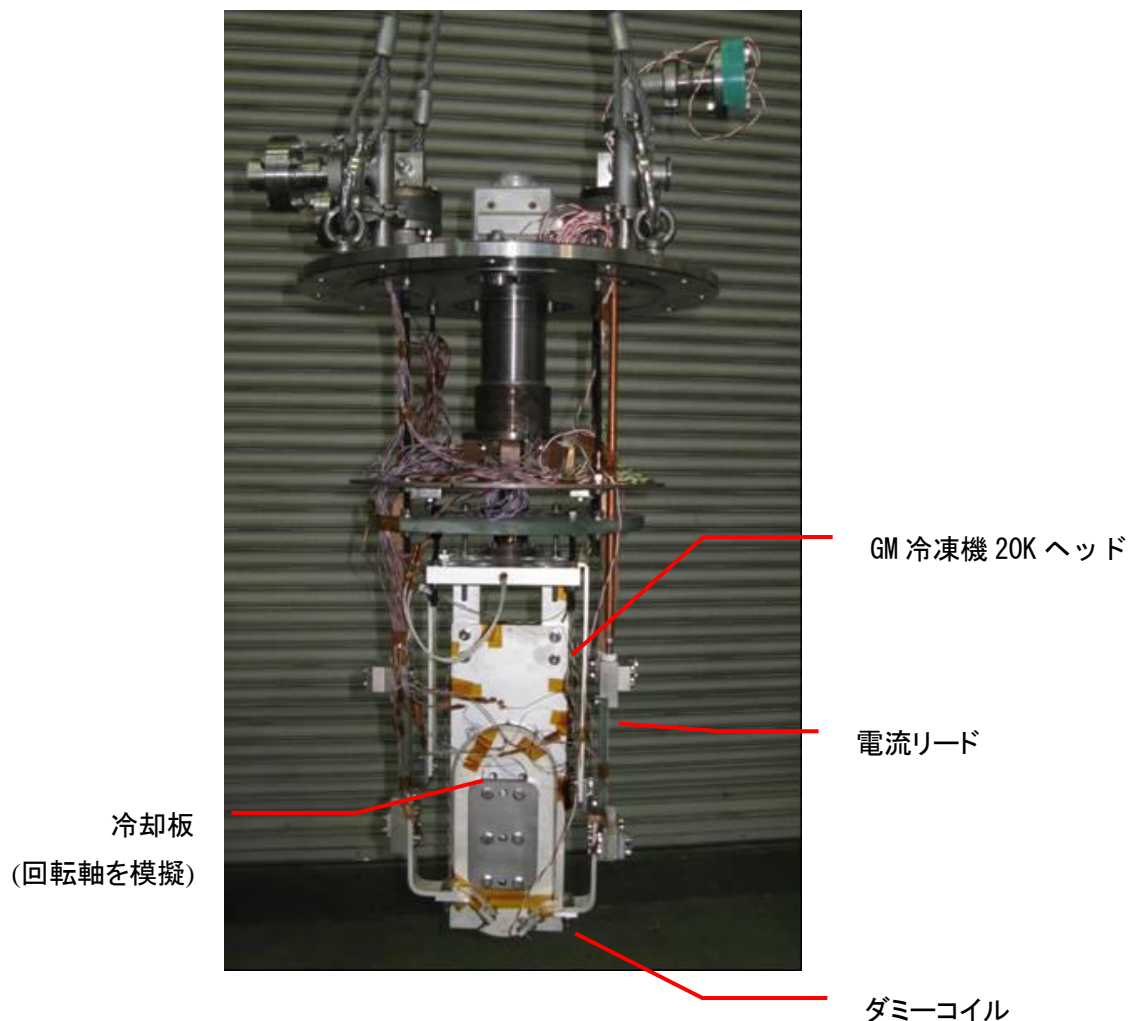


図 2.3.2-8 要素モデルコイルの伝導冷却、励磁試験装置

温度設定は、GM 冷凍機の 20K ヘッド温度を 20K、30K、40K、50K に設定し、巻線部各部温度を測定することを行った。巻線部の温度測定は、巻線の最外周に測温抵抗体を設置して行った。従って測温抵抗体はハステロイTM 基材側に設置した。設置方法はグリースを介在させて行った。図 2.3.2-9 に温度素子配置を示す。磁界測定はホール素子を使用した。図 2.3.2-10 にホール素子取付位置を示す。レーストラック状平面図において、コイル中心と、中心から 60mm 離れた位置の合計 3 箇所とした。この 3 個のホール素子はコイル断面図において、厚さ方向の中心に配置され、図 2.3.2-10 の下図矢印の方向の磁界を測定した。

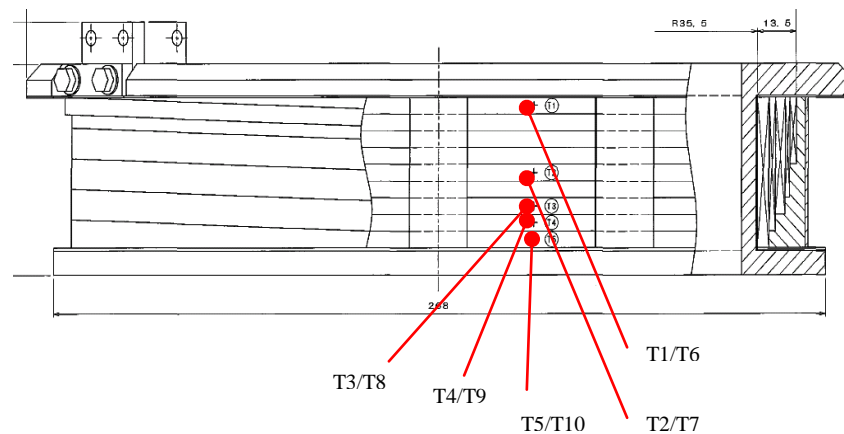


図 2.3.2-9 平傘型コイルにおける温度素子配置

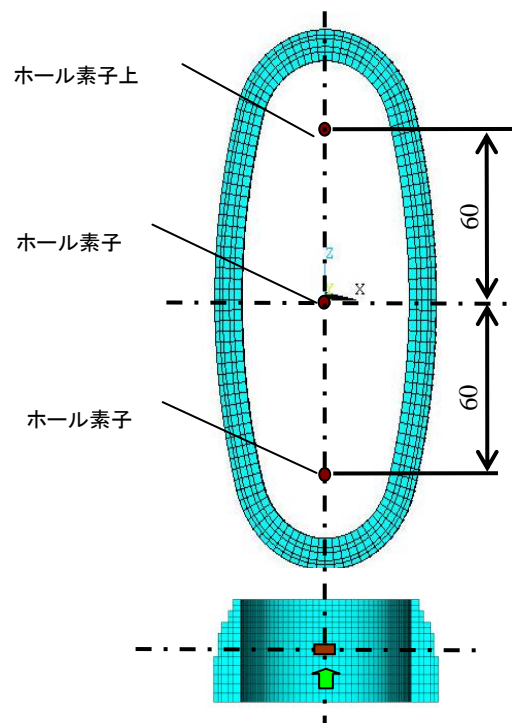


図 2.3.2-10 平傘型コイルにおけるホール素子取付位置

(3) 結果と考察

平傘型モデルコイルに関し、通電試験結果より得られた I_c について、複合材料の I_c - B - T 特性との関係を比較する。図 2.3.2-11 に複合材料の I_c - B - T 特性と要素モデルコイル I_c を示す。50K において、測定された複合材料の I_c - B - T 特性とほぼ一致しており、巻線による低下はなかった。40K においても、ほぼイットリウム系複合材料の I_c 特性と一致しており、すなわち励磁率は 100% であり、コイル化後のイットリウム系複合材料の劣化はなかったものと思われる。

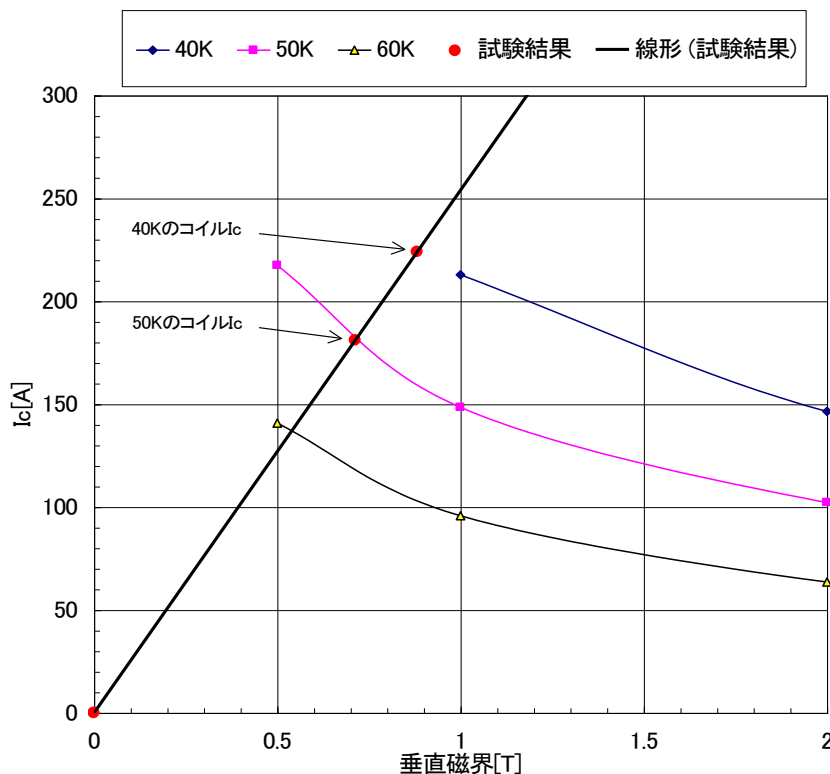


図 2.3.2-11 平傘型モデルコイル励磁結果:イットリウム系複合材料の I_c - B - T 特性とコイルロードライン(77K-150A/5mm 幅線材の I_c - B より換算(300A/cm 幅相当))

次に、菱形傘型モデルコイルに関し、通電試験を行った結果について述べる。コイルの 50K の I - V 特性を図 2.3.2-12 に示す。最大 218A まで通電したが、190A 付近からコイル両端電圧の増加率が増え、磁束フロー電圧が発生した。接続抵抗分を除去した電圧を求め、 I_c 基準を $0.1\mu\text{V}/\text{cm}$ となる値としてコイル I_c を求めると、50K におけるコイルの I_c は 195A であることがわかった。この時、計算では磁場はイットリウム系複合材料テープ面に垂直に 1.2T かかっている。イットリウム系複合材料 I_c - B - T 特性とコイルロードラインの関係を図 2.3.2-13 に示す。交点は約 195A となり、先述のコイル I_c と良く一致しており、イットリウム系複合材料の劣化はなかったものと推察される。すなわち、図 2.3.2-13 で複合材料の I_c とコイル I_c が一致することから、この菱形傘型モデルコイルの励磁率も 100% と言える。すなわち、菱形傘型コイルの巻線、製作性に問題はないと言える。これ以下の低温 40K での I_c 測定も行ったが、200A 以上流しても電圧が発生せず、

焼損の恐れがあるので、励磁試験は中止した。

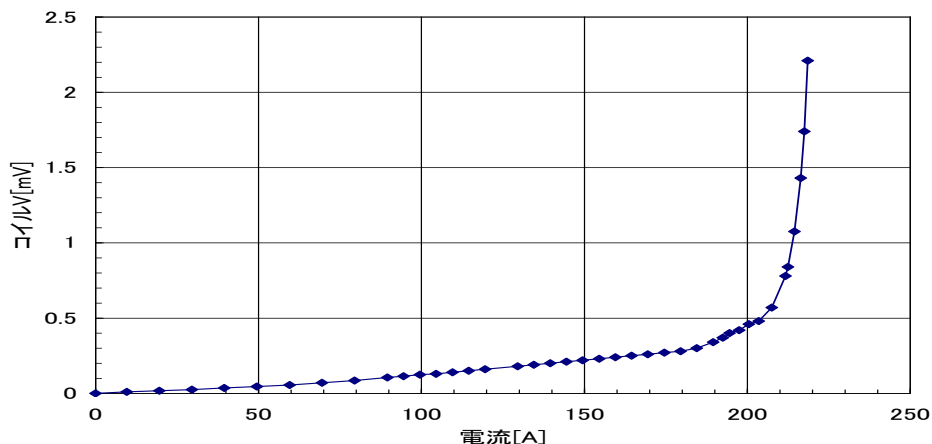


図 2.3.2-12 50Kにおける菱形傘型コイルの I - V 特性

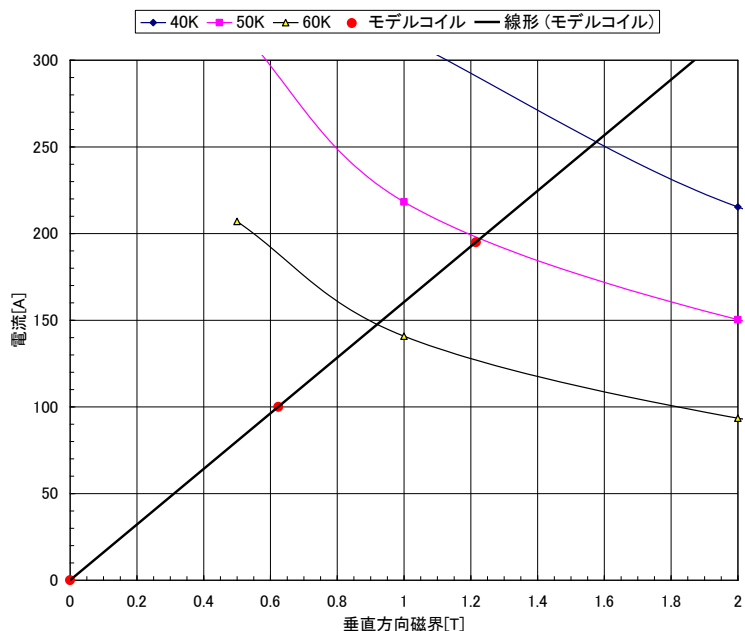


図 2.3.2-13 菱形傘型モデルコイル励磁結果：200A 級(@77K、自己磁場)でのイットリウム系複合材料の I_c - B - T 特性とコイルロードライン

また、50Kにおける超電導成分の電圧は、電流の25乗に比例しており、 n 値が25と高い値であった。元のイットリウム系複合材料の n 値と同程度であり、一般的にも磁場中で高い値である。よって、巻線工程で劣化はないと判断できる。

次に、鞍型傘型モデルコイルの液体窒素(77K)浸漬冷却中励磁試験を行った。コイル I_c とイットリウム系複合材料の I_c - B - T 特性との関係を比較した。図 2.3.2-14 にイットリウム系複合材料の I_c - B - T 特性とコイルの I_c を示す。測定したコイル I_c は81Aであったが、この図から設計のコイルロードラインと複合材料 I_c - B 特性の交点は約100Aであった。すなわち、コイル励磁率は約81%となった。前2コイルはほぼ100%の励磁率であったが、このコイルで目標値70%を超えた

とは言え、値が低かった理由としては、

- ・測定温度が 77K であるので、磁場依存性が大きい。特に、0.1T 程度の低磁場はゼロ磁場の半分近くにもなり、上記線材特性・コイルロードラインからの正確な決定が難しくなる。

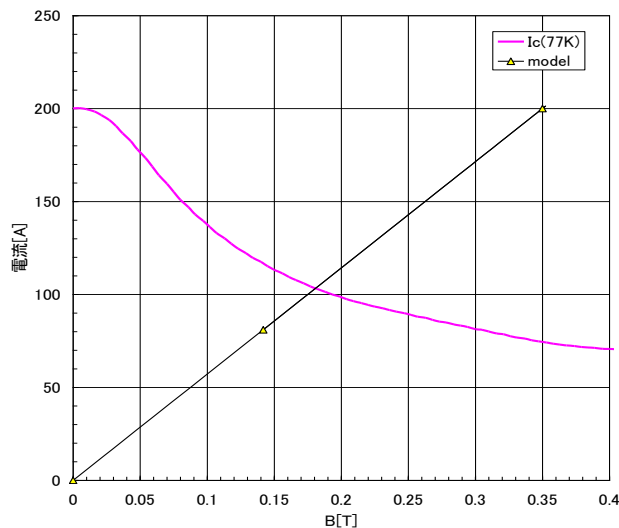


図 2.3.2-14 鞍型傘型要素モデルコイルのロードラインと
イットリウム系複合材料の I_c 特性(77K)

・線材特性は、長手方向では 20-30%程度はばらつく。特に、磁場依存性が強い 77K ではその影響を受けやすい。すなわち、本鞍型傘型コイルの励磁率が 80%であったが、最強磁場の個所で偶然イットリウム系複合材料の長手方向の分布で低い I_c の個所があった可能性もある。

本鞍型傘型コイルの典型的な $I-V$ 測定結果を図 2.3.2-15 に示す。鞍型傘型モデルコイルの液体窒素中での実験結果である。ここに示すように、 I_c は先述の 81A であるが、 n 値は 34 もあり、この点からも巻線工程による特性劣化はないと考えられる。

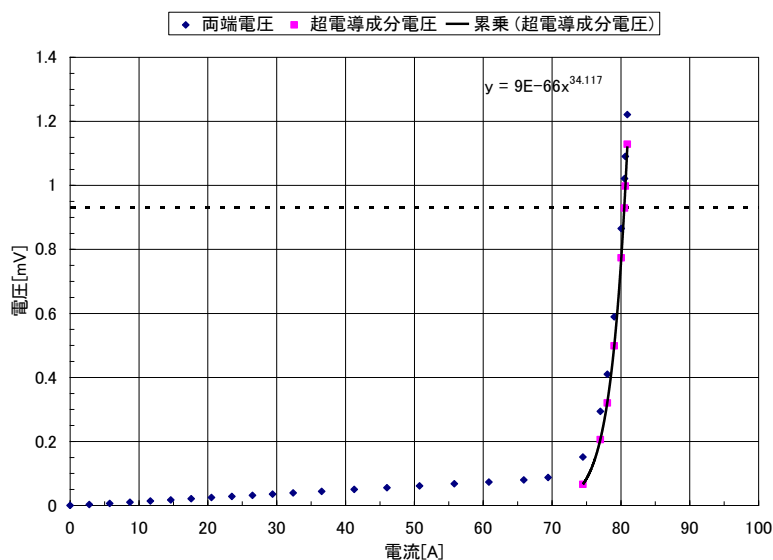


図 2.3.2-15 鞍型傘型要素モデルコイルの液体窒素浸漬冷却中における $I-V$ 特性

③-2 傘型界磁巻線安定性評価

超電導回転機の界磁巻線は、Siemens 社試作機のサーモサイフォン方式で冷却される軸からの伝導冷却方式[1, 2]、あるいは米国での試作機[3]のように界磁巻線を配置した空間を冷媒ガスで満たす間接冷却方式のいずれにおいても、伝導冷却方式である。その際、回転機システムに限られた冷凍能力の中で、界磁巻線で許容できる発熱量を見積もり、全体設計を行う必要がある。これにより、回転機全体としての効率も決まる。よって、ここでは、界磁巻線の発熱、安定性評価の一環として、電機子が発生する交流磁界が界磁巻線に印加されて発生する界磁巻線に生じる交流損失を数値解析により定量的に評価した。

(1) 実験方法

最初に、界磁巻線に用いる GdBCO 超電導複合材料の交流損失を、図 2.3.2-16 に示す鞍型ピックアップコイルを用いて 35K、45K、64K、77K において測定した。図 2.3.2-17 には試料ホルダーの全体を示している。ホルダーの下部面が GM 冷凍機ヘッド面に接触することにより、試料複合材料は伝導冷却される。交流損失の測定結果を図 2.3.2-18 に示す。

この結果を用いて、数値解析より求めた界磁巻線のターン毎の変動磁界振幅に対して発生する交流損失値を求め、全ターンに亘って積算することにより、界磁巻線全体で発生する交流損失を算出した。界磁巻線の動作温度は 40K であり、40K における交流損失値は測定データより、温度スケールリング則を用いて外挿して求めた。

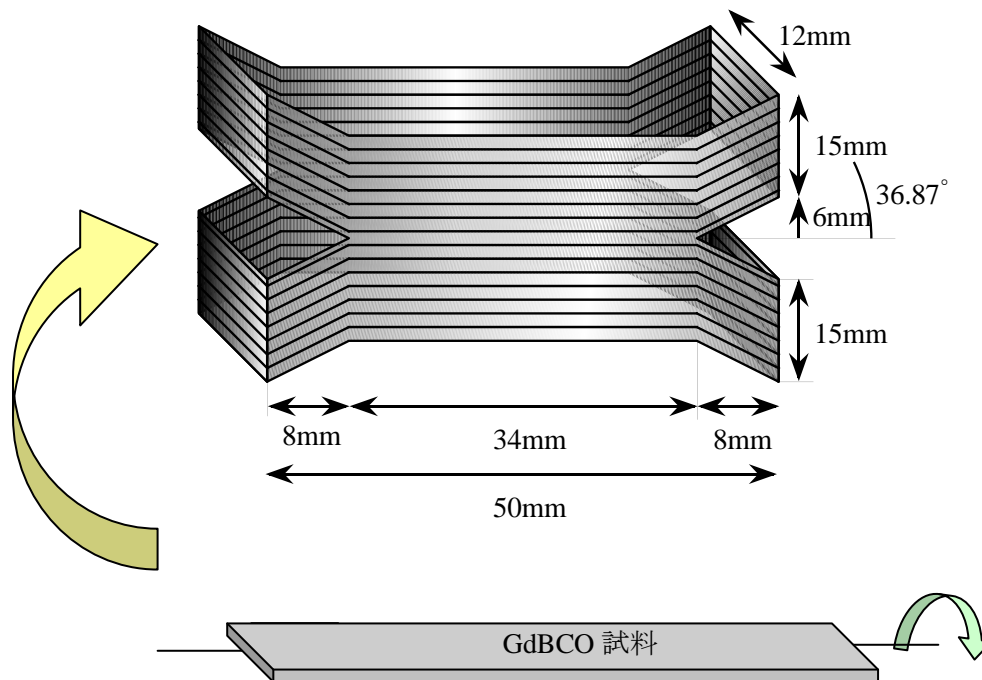


図 2.3.2-16 交流損失測定用の鞍型ピックアップコイル

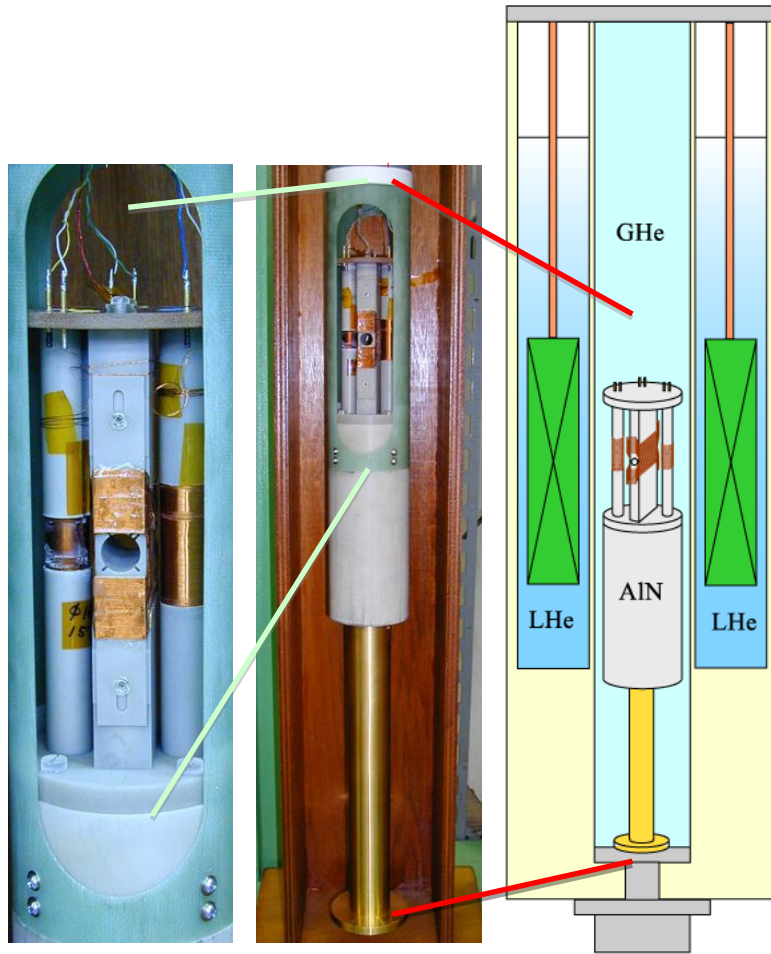


図 2.3.2-17 交流損失測定装置における試料ホルダー全景

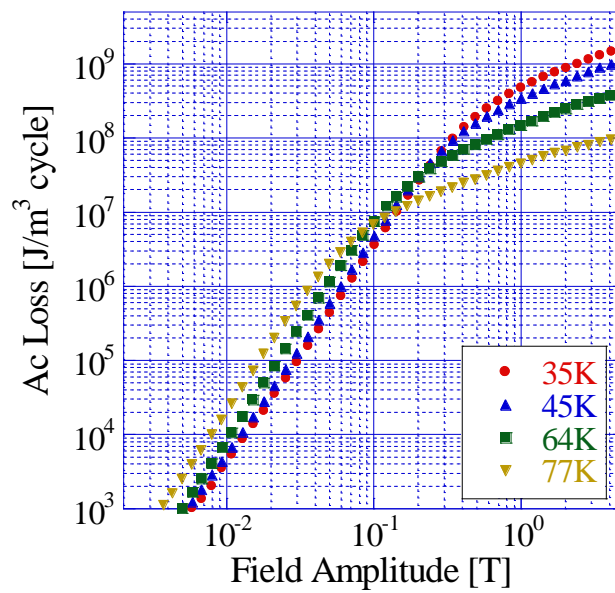


図 2.3.2-18 GdBCO 複合材料の交流損失

(2) 結果と考察

界磁巻線に生じる損失の詳細を、典型例として、ギャップ磁束密度を 2T の鞍型傘型形状の界磁巻線 (図 2.3.2-19) について述べる。500kW-1800rpm の回転機では、この界磁コイルを 4 極組み合わせ回転子として使う。

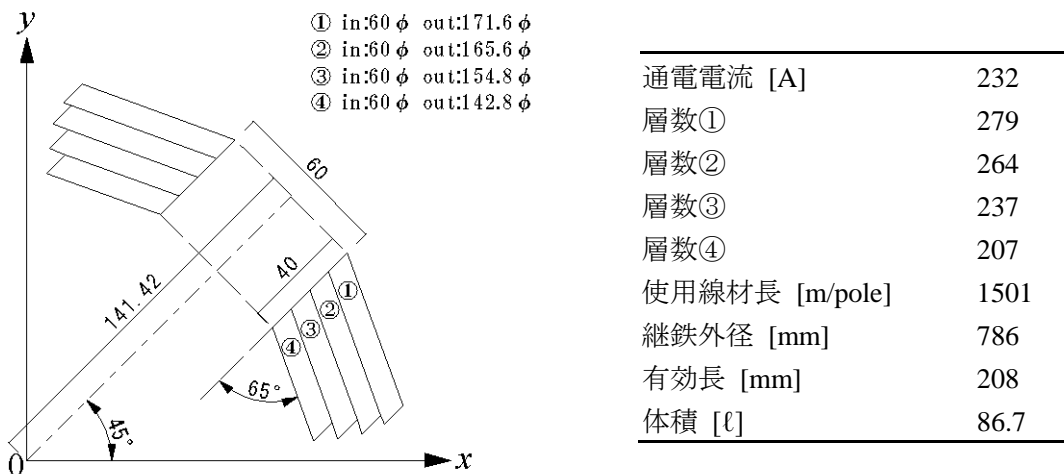


図 2.3.2-19 鞍型傘型形状界磁巻線コイル

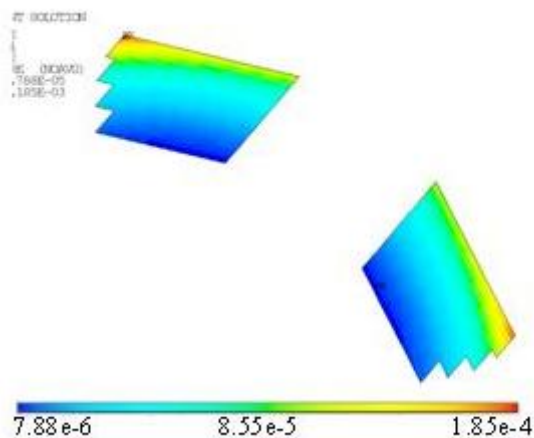


図 2.3.2-20 鞍型傘型形状界磁巻線コイルにおける電機子からの外部磁場変動

この場合の線材面に垂直に印加される磁界成分の振幅は、図 2.3.2-20 に示すように、 $1.85 \times 10^{-4} \text{T}$ 以下である。これに対応する交流損失を図 2.3.2-18 より外挿すると、 $10 \text{ J/m}^3 \text{ cycle}$ 以下である。500kW 機の界磁巻線のターン毎の体積から、界磁巻線における全交流損失を積算すると、その発熱量は 10.4W であることがわかった。これは、シースを持たない電機子巻線が発生する磁界が 0.03~0.04T 程度であり、界磁巻線との距離が 40mm 以上も空いているという超電導機ならではの構造による。結論として、半超電導機では、電機子の変動磁界により界磁巻線で発生する交流損失は無視できることがわかった。

図 2.3.2-21 に他の形状の単純矩形、菱形傘型も含めた各界磁巻線を使った場合の回転機的全損

失を示した。この図から、シールドとなるヨークにおける鉄損と電機子における銅損が損失のほとんどを占めていることがわかる。すなわち、界磁巻線で発生する電機子変動磁界による交流損失は、前述した 10W 程度なので無視できるほど小さい。

最後に、界磁巻線の通電電流をゼロから定格電流まで高速の 1 秒で立ち上げた際に界磁巻線で発生する交流損失を図 2.3.2-22 に示す。界磁巻線の発生磁界自体を変動させたとしても大きな発熱量にはならないことがわかる。

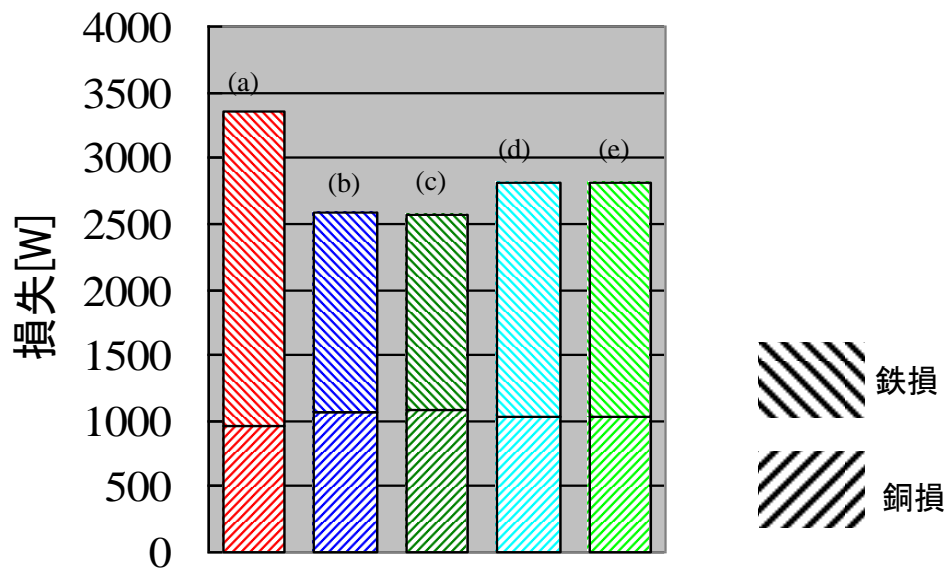
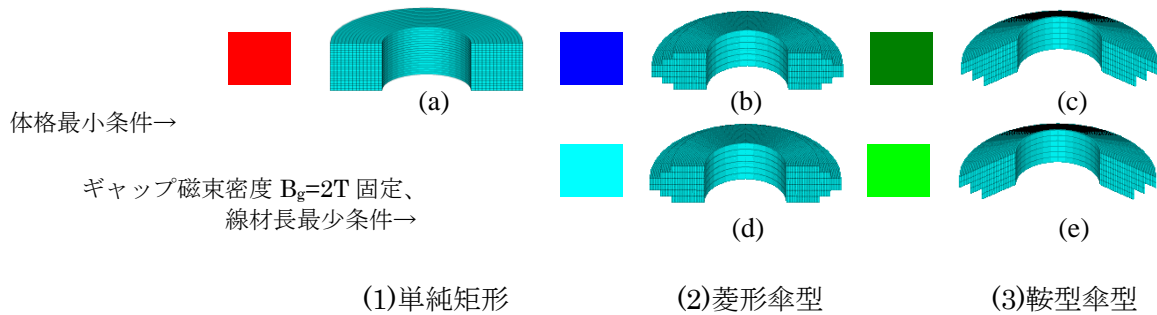


図 2.3.2-21 各傘型形状の各種界磁巻線(上図)を使った 500kW 回転機的全損失

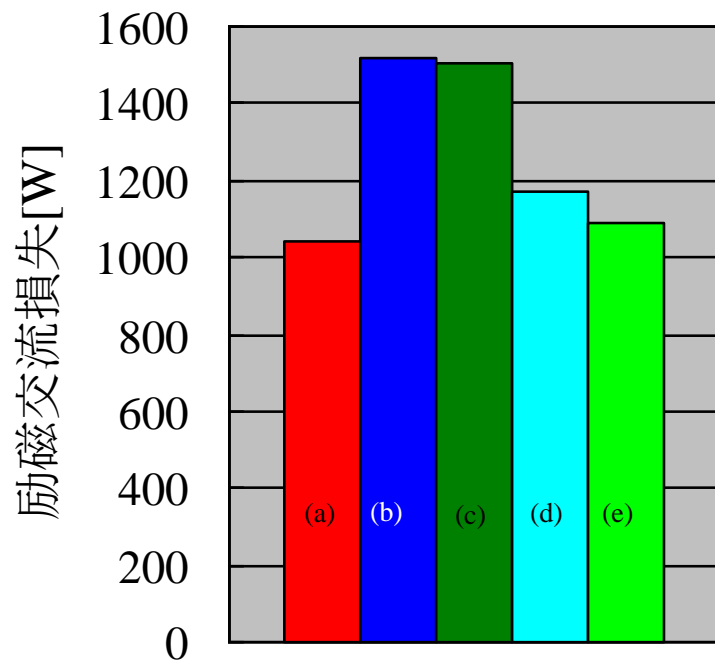


図 2.3.2-22 図 2.3.2-21 (a) ~ (e) の各種界磁巻線を定格電流まで 1 秒で立ち上げた際の交流損失

2.3.3 要素技術開発(2) 冷却技術開発 (九州大学、研究組合)

①目的

高速で回転する回転機の超電導界磁巻線コイル部の冷却に適した液体 Ne によるサーモサイフォン冷却技術を開発する。特に、液体 Ne とコイルを冷却する SUS 製シャフト間(LNe-SUS 間) の界面熱伝達係数のデータを得る。これにより、高性能のイットリウム系複合材料に適したサーモサイフォン冷却による Y 系回転機の実現性を見通す。

②課題とアプローチ

今回採用する回転型サーモサイフォン式冷却法は、図 2.3.3-1 に示す様に回転機の界磁巻線回転子の中心軸である SUS304 製シャフトの中に、沸点が 27K の液体 Ne 冷媒を流し込み、このシャフトからの熱伝導により界磁コイルを冷却する。液体 Ne による回転体の冷却実績は海外で 1-2 例ある[1,2]が、国内ではほとんどないため、将来の回転機設計に支障をきたすのが現状である。特に、回転機の冷却系における熱設計の際には、用いる SUS や FRP(Fiber Reinforced Polymer)などの構成材の熱伝導度や冷媒である液体 Ne と SUS などの容器との界面における熱伝達係数が必要となる。これにより、外部侵入熱並びに界磁コイル発熱に起因した到達温度などを見積もることができ、ひいては界磁コイルの通電電流、発生磁場の想定が可能となる。しかしながら、前者の熱伝導度はこれまでに多数のデータがあるのに対し、後者の液体 Ne に関する熱伝達係数のデータはほとんどないのが現状である。特に、高速回転する液体として使用した場合のデータは皆無である。このため、回転機の詳細熱設計が困難であった。このことから、本項目では以下の課題とアプローチで開発を進めた。

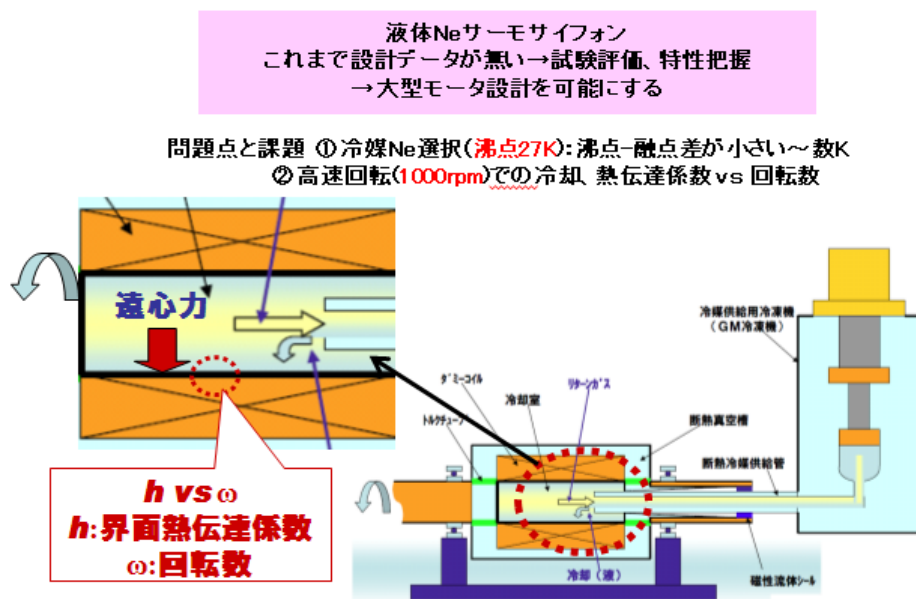


図 2.3.3-1 サーモサイフォン冷却の原理模式図と問題点、課題

課題：高速回転する液体 Ne-回転シャフト (SUS) 間の熱伝達係数を実験的にデータを取得し、今後の液体 Ne によるサーモサイフォン冷却設計を可能にすること。

アプローチ：この課題に対して、以下の手法で検討を行った。

- ・500 kW 級回転機を模擬した回転試験装置、液体 Ne 液化装置、冷媒供給システムを製作し、回転冷却試験を行う
- ・本装置により、1)Ne の液化、2)液体 Ne の輸送を行い、回転部での 3)液体 Ne、4)界磁コイル取り付け部周辺等の温度を測定し、熱流束を求め、熱伝達係数の値を得る。
- ・この温度実測データおよび実験系の複雑な熱の侵入と温度分布を考慮した数値解析データの比較により、最終的に液体 Ne-回転シャフト(SUS)間の熱伝達係数を今後の回転機冷却の設計に使えるように回転数との関係を調べる。

③成果

③-1 試験装置と方法

高速で回転する液体 Ne-SUS 界面(回転機における液体 Ne 容器であり、界磁コイルに熱を伝える)の熱伝達係数を調べるため、以下の装置を作製した。(1) 冷却系試験装置： 図 2.3.3-2 に実験装置の全体写真を示す。また、図 2.3.3-3 に装置の全体構成フロー図を示す。回転機外部のコールドボックス内の凝縮器で液化された液体 Ne を断熱配管により、回転機の中心に移送する構造としている。また蒸発した Ne を強制的に循環させることができるように回収用の配管を取り付け、外部のコンプレッサで循環させる構造とした。主な構成機器は、超電導モータを模したモデルロータ、冷却システムの冷却源となるコールドボックス (Ne ガスを液化)、Ne の循環を行うガスハンドリング部である。

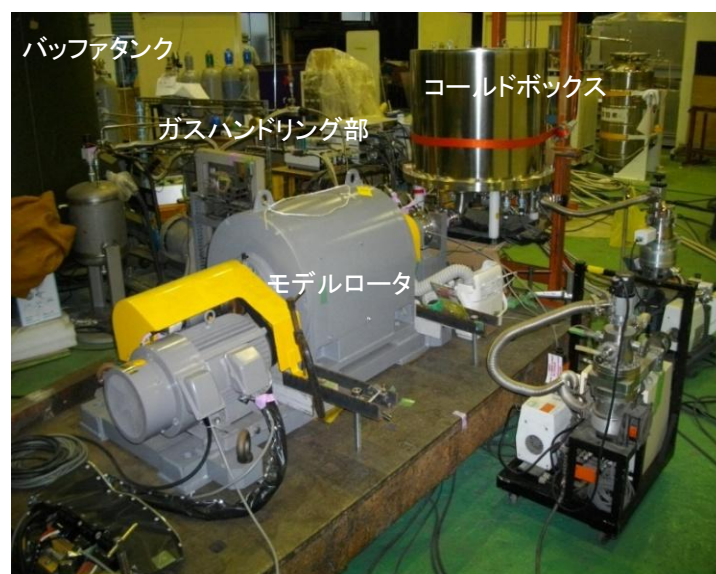


図 2.3.3-2 サーモサイフォン冷却試験装置全景

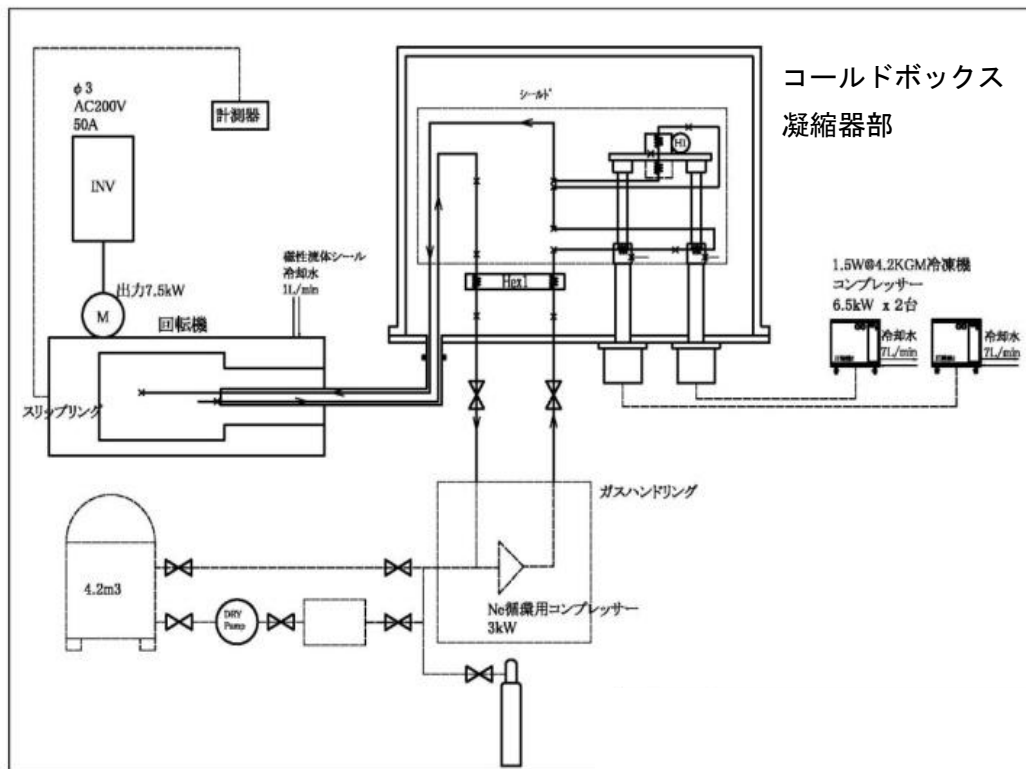


図 2.3.3-3 サーモサーフォン冷却試験装置全体構成フロー図

GM 冷凍機のコンプレッサは 6.5kW(×2 台)の水冷型で、冷凍能力は 4.2K で 1.5W である。Ne はガスハンドリング部のコンプレッサにより循環される。コールドボックスは 2 段の 4K-GM 冷凍機 2 台を使用している。コンプレッサから吐出された Ne は熱交換器 (Hex1) でモデルロータからの戻りのガスと熱交換して 100K 程度まで冷却された後、2 台の GM 冷凍機の 1st ステージ部の交換機で 40K 以下に冷却される。そのあと GM 冷凍機の 2nd ステージの熱交換機で 30K 以下に冷却された後、凝縮器にて液化される。凝縮器の熱交換器は温度差を 2K で約 230W 以上の冷凍能力がとれるものとした。凝縮器には Ne の固化を防ぐためにヒータを取り付けている。Ne は沸点と融点の温度差が小さいため、固化を防ぐ調整が必要である。

(2) 回転系試験装置(モデルロータ) :

図 2.3.1-2 のモデルロータの全体断面を図 2.3.3-4 に示す。モデルロータ(回転機)はインバータにより制御された外部のモータにより回転させることでモータの回転状態を模擬する。最大で 1800 回転/分(rpm)、連続回転は最高で 1500rpm である。

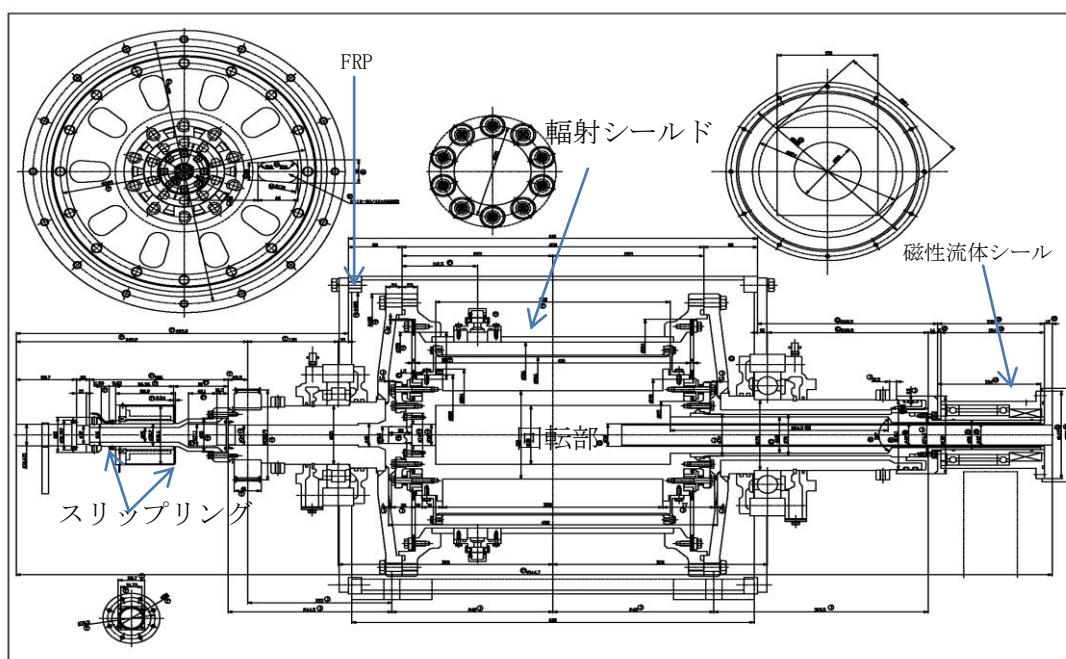


図 2.3.3-4 モデルロータ全体断面図

その中の回転部を図 2.3.3-5 に示す。中心に SUS 製の円管シャフトが通り、その外側に界磁巻線コイルの取り付けが可能なステンレス (SUS304) 製の液体 Ne を貯める液体 Ne 内槽部 ($\phi 100 \times L350\text{mm}$) がある。これは、シャフトとともに回転する。さらに、この外側 4 面に超電導コイル取り付けを想定した 1 辺 150mm の正方形の領域が設けられている。図の右の端部は、断熱のため厚さ 5mm の FRP 製の保持板で外槽に固定し保持している。



図 2.3.3-5 回転部の外観：この中に液体 Ne が流し込まれる。1000rpm 程度で回転させて、これに取り付けた温度計で各部の温度を測定した。

温度計の取り付け位置とその写真を図 2.3.3-6 に示す。温度計はシリコンダイオードを使用し、熱接触をよくするためにスタイキャスト™で張り付けた。液に接する面の近傍の温度計測のため液体に接する面から 3mm まで穴をあけ温度計を取り付けた。ヒータはカプトンシートヒータを使用し、熱接触を良くするために銅板（180×130×5mm）で挟んでスタイキャストで接着した。

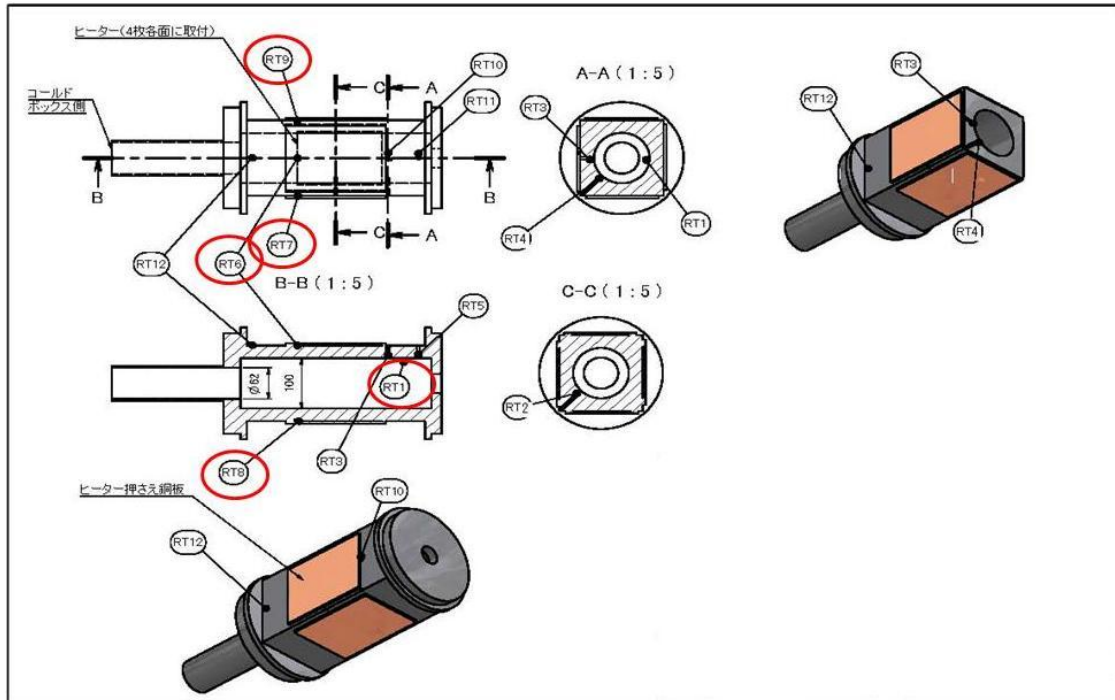


図 2.3.3-6 モデルローターセンサ取り付け位置図（丸印は解析に用いた測定点）

(3) 試験方法：冷却試験は、Ne ガスを循環させ GM 冷凍機を起動する。回転機は停止した状態でコールドボックスにて凝縮された Ne を回転機に導入する。回転機内槽の壁温度が Ne の液温に近くなったら、断熱真空の排気を止めロータを回転させる。回転機内のセンサの温度が液温を示した状態から回転機内に液体が溜まり始めたと考えポンペ(バッファ容器)の圧力を確認しながら回転機に液を導入する。これにより液化された量を求める。計測は、循環量・回転数を固定、ヒータ 0W の状態で温度が安定したところでヒータ負荷を加え温度・圧力を計測する。回転数を変え同様な計測を行った。

(4) 解析方法：液体 Ne とステンレス間の熱伝達係数 h は、

$$Q = hA(T_W - T_L)$$

で定義される。ここで、 Q は界面を通る熱流束、 A は界面の表面積、 T_L は界面近傍の液温、 T_W は壁の温度である。

しかし、実際の試験装置では形状の対称性から熱源からの距離が異なっているため、熱流束の大きさが場所により異なる。仮にヒータ負荷を与え温度差を測定したとしても、正確な熱流束を求めることはできない。さらに輻射、FRP やロッド部からの侵入熱もあり、状況を複雑にしている。そのため測定したデータから直接計算で熱伝達係数を決めることは難しい。そこで実際の計測値の値に近くなるようにシミュレーションのパラメータを合わせ、熱伝達係数をもとめた。シミュレーションでは RT1(図 2.3.3-6)を液温としてヒータ直下部の温度 RT6~RT9(図 2.3.3-6)の位置での計算値が測定値に近くなるようにした。そのシミュレーションの解析方法の概略は以下の通りである。

解析は 3 次元のモデルで行った。シャフト、サポート部を含む回転冷却全体をセル数 120396 個に分割した。伝熱解析は、熱伝導率を使用し定常伝熱解析で行ない、液体 Ne と SUS との接触面では沸騰熱伝達を考慮して熱流束 q を計算する。その際の熱伝達係数 h は実測値、またはそれらの多項式の関数を作り解析に用いた。

沸騰熱伝達係数 h の算出には良く使われる次の Rohsenow の式 [6] を適用した。

$$\frac{h}{\lambda_L} \sqrt{\frac{\sigma_L}{g(\rho_L - \rho_V)}} = \frac{\text{Pr}_L^{-0.7}}{C_{sf}} \left(\frac{q}{L\rho_V\nu_L} \sqrt{\frac{\sigma_L}{g(\rho_L - \rho_V)}} \right)^{0.67} \left(\frac{\rho_V}{\rho_L} \right)^{0.67}$$

式中の g は遠心加速度であり、回転機の回転数 1000rpm、内径 0.1 m で 548.31m/s² となる。

なお、この Rohsenow の式はプール核沸騰熱伝達の整理式として良く使われるものであるが、今回はプール沸騰ではなく、回転体の中の沸騰である。しかしながら、回転体であっても通常の流体のような壁との相対速度を有する流れはないため静止液層と近似できる。システムそのものが回転系であり、液体と内壁に相対速度はないと考えられる。よって、この Rohsenow の式を用いて今回検討した。

表 2.3.3-1 ネオン物性値 [7]

名称	値	名称	値
蒸発潜熱 L	82710 J/kg	気相密度 ρ_V	10.41 kg/m ³
液相密度 ρ_L	1206 kg/m ³	加速度 g	548.31 m/s ²
液相粘性係数 μ_L	0.0001247 Pa·s	液相動粘性係数 ν_L	1.034 × 10 ⁻⁷ m ² /s
液相定圧比熱 $c_{p,L}$	1937 J/(kg·K)	液相プラントル数 Pr_L	1.926
液相熱伝導率 λ_L	0.1254 W/(m·K)	係数 C_{sf}	(0.008) (変数)
液相表面張力 σ_L	0.04784 N/m		

実際の解析では、液体の温度として実験で得た測定値 RT1 を用いる。また、SUS 壁面の温度を実測値 RT6～RT9 の温度から解析で出し、それがさらに各部の温度測定値に近い値になるように熱伝達率を決める。すなわち、上式において $q=hA\Delta T$ (液体・SUS 壁面温度差) で h が出るが、それを使い Rohsenow の式における変数 C_{sf} を変えていき、全体の各部の温度、その分布が実際と解析で一致するようにして h にフィードバックを掛けて値を求める。表 2.3.1-1 には解析に使用した Ne の物性値[7]を示す。

③-2 結果

(1) 初期冷却試験

最初に、GM 冷凍機を起動し、Ne ガスの循環を開始した。Ne 循環量は 50～65 L/min (0℃, 1atm 換算) (以後 SLM) の範囲で調整した。冷却は回転機を停止した状態で開始し、起動後約 18 時間で凝縮器出口の温度が急激に下がり、22 時間以後は循環圧力での沸点温度で一定になった。回転機への液体 Ne の供給が開始され始めたと考えられる。同様に供給側移送管先端部温度計も 22 時間で急激に下がり液温を示し、液体が供給されていることがわかった。その後、モデルロータの回転を開始し約 6 時間後には内部に液体 Ne が溜まり始めた。液体が遠心力により壁に張り付き、全面で液体と壁との熱伝達が良好となり、冷却効率が上がったと考えられる。液化された Ne の量は 600cc～1000cc 程度で液の厚さとしてはこのシャフトの壁面に約 5mm～8mm であった。仮に 54SLM 若しくは 64SLM の流量で液体 Ne が供給されたとすると、蒸発潜熱から求めた冷凍能力はそれぞれ約 68W と 81W となる。

表 2.3.3-2 に流量が 54SLM と 64SLM、回転数 1000rpm で温度が一定になった時のコールドボックス内各部温度の値を参考に示す。表 2.3.3-2 の各温度計は左から循環経路順に並べている。T1～T4：熱交換器 (Hex1) の出入りのガス温度、TA、TB：GM 冷凍機 1 段目熱交換器、TC：GM 冷凍機 2 段目凝縮器、T11：モデルロータに供給される液温、RT1：モデルロータ内の液温、T9:モデルロータからの戻りガス温度である。GM 冷凍機の 2 段目で液体 Ne の沸点になり液化され、ロータ部分までその温度を保ち、すなわち、液が供給循環していることがわかる。

この結果の中で、モデルロータからの戻りのガス温度 T9 が 86～90K とかなり高くなっている。液体の温度が 29K 程度であるのでこの循環量のガスが 29K から 80K 以上まで温度が上昇するには数十 W の熱が必要である。その熱流入の原因として、移送管のポートのウイルソンシールからのリーク、断熱真空層内での脱ガスによる真空劣化 (高速回転対応させるために、真空層に配線等固定用接着剤を使用した。固定の問題もあり真空劣化を防止するための活性炭を封入していない) などが一因と考えられ、今後の装置改善の課題となる。

表 2.3.3-2 コールドボックス、ロータ内各部温度

	流量 MF slm	圧力 P3 kPa	温度 T1 K	温度 T2 K	温度 TA K	温度 TB K	温度 TC K	温度 T11 K	温度 RT1 K	温度 T9 K	温度 T3 K	温度 T4 K
データ	54	64.9	290.4	99.4	52.6	32.5	28.5	28.8	28.7	86.5	90.3	286.6
	64	78.8	294.8	108.1	60.7	38.2	28.8	29.2	29.1	91.4	95.3	292.5

(2) 温度測定結果

熱伝達係数を求めるにあたり、600～1400rpm で回転数を変え、また、外部からのヒータでの過熱を0～4Wで制御して、モデルロータ各部の温度を測定した。その内、代表的な結果について説明する。図2.3.3-7は、回転数1000rpmでヒータ負荷を加えた際の圧力、温度などの変化である。図2.3.3-7の上図には回転機内の圧力P3(kPa)、Ne流量FM(SLM)、ヒータ負荷の値(W)の変化を示す。この測定でのNeの液化量は液の厚さにして約5～8mm(液量500～800cc)であった。ヒータ負荷を4Wより大きくすると、圧力P3の線でわかるように、圧力が大幅に上昇し、定常状態に落ち着かなかつた。

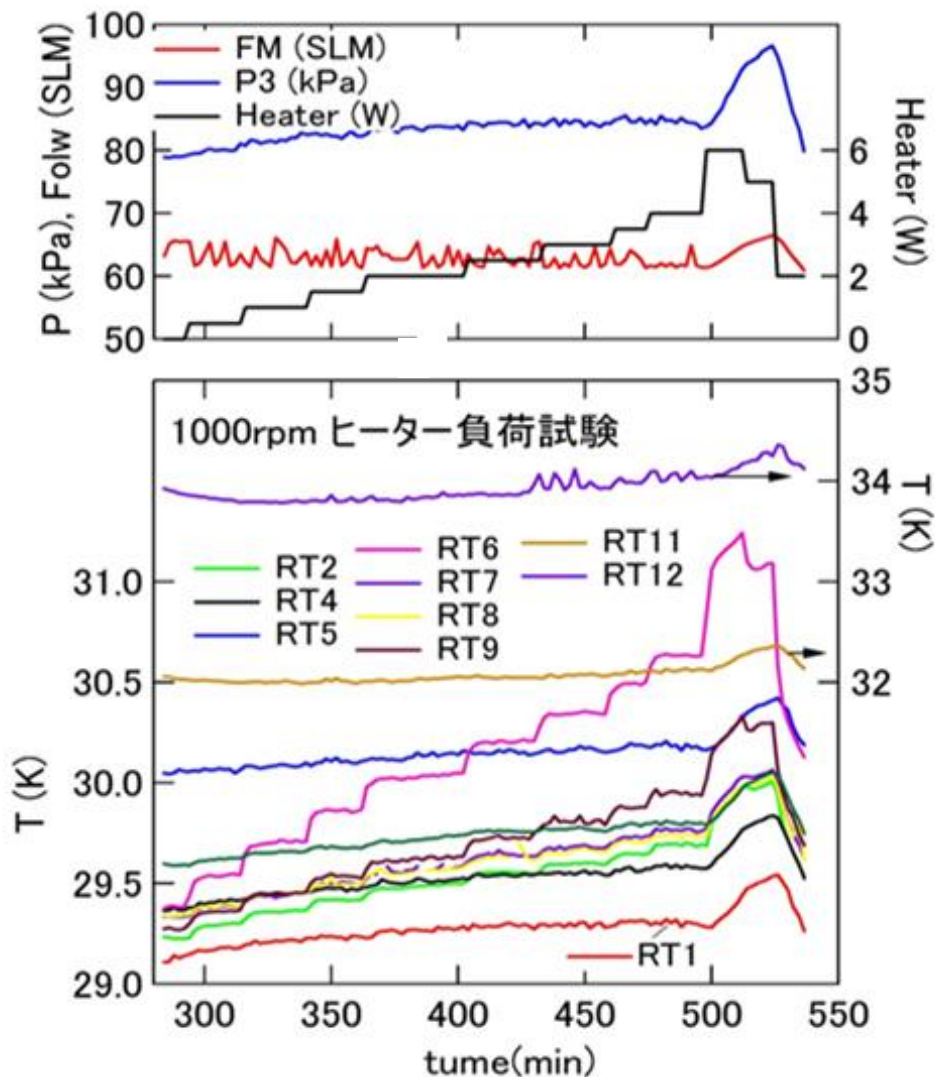


図 2.3.3-7 1000rpm でのヒータ負荷試験時の温度変化(下)
流量、圧力変化とヒータ負荷履歴(上)

図 2.3.3-7 の下図には、回転数 1000rpm でヒータ負荷を加えた際の回転機各部の温度変化を示す。また、RT2~RT12 の温度に関して図 2.3.3-8 にわかりやすく log スケールで表したヒータ負荷と各部の温度変化の関係を示す。縦軸は RT1 との差をプロットしている。この界磁コイル取り付け部を模擬した部分の RT7~9 を見ると、投入熱量に応じて温度が上昇している(RT6 はセンサ固定の不良のため、RT3 は断線のため、データ解析には使っていない)。また、RT2~RT5 は液体に接する壁面の温度であるが、RT5 は RT2、RT4 に比べ温度が 1K ほど高くなっている。RT5 は容器の端側で、端は固定板や輻射など構造からくる侵入熱が大きく温度が高くなっているためと考えられる。

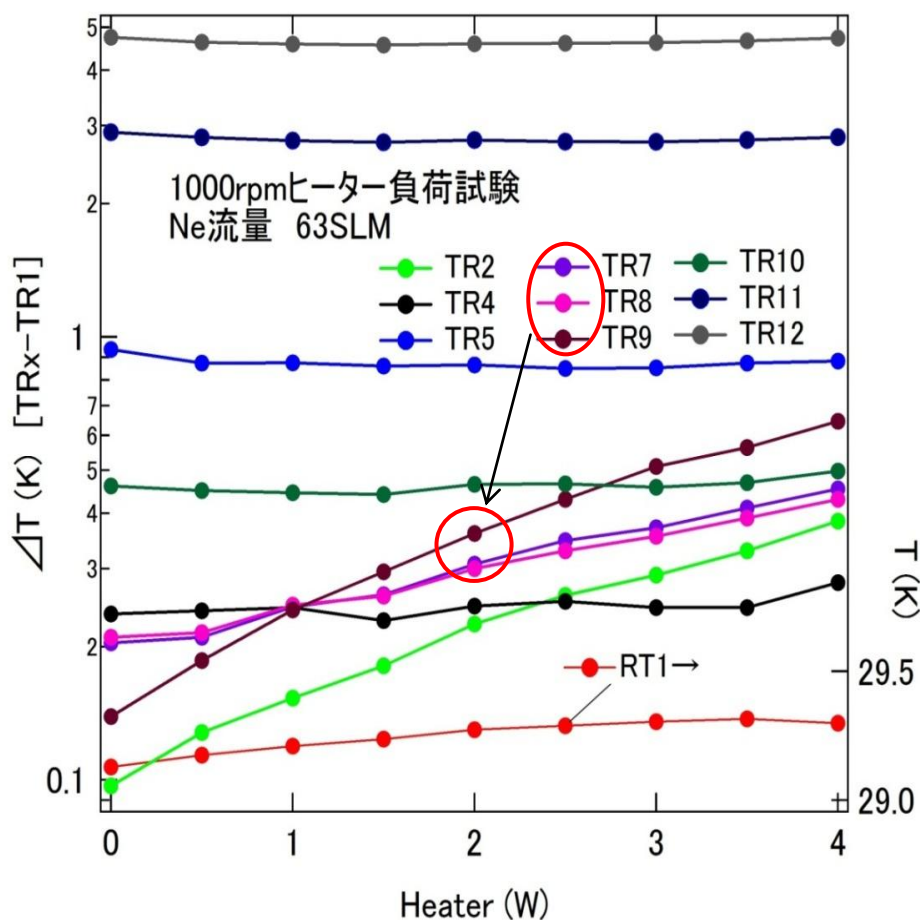


図 2.3.3-8 1000rpm でのヒータ負荷試験時の温度変化

今回、ヒータ負荷を 4W より大きくすると、前記圧力同様、温度も一定状態に落ち着かず上昇傾向になったので、後述の熱伝達係数の解析には 4W 以下のヒータ負荷のデータを使用し

この 1000rpm での試験の他に、600~1400rpm で回転数を変えた回転機各部の温度測定試験も同様に行った。傾向は 1000rpm のときと同じであったが、回転数を 1200、1400rpm まで上げると 2W 程度のヒータ負荷で温度 RT1、圧力 P3 が上昇傾向を示し定常状態にならず、高速回転時の侵入熱が大きくなっていることも考えられた。今回の課題、液体 Ne と SUS 界面での熱伝達係数を求めることには、支障はないが、今後の冷却システム全体を作製する際の課題となる。

(3) 熱伝達係数

前記の各温度の測定結果およびシミュレーションから熱伝達係数を求めた。表 2.3.3-3 にヒータ負荷のない場合のシミュレーションと実測測定値の比較データ、シミュレーションによる内槽への侵入熱の計算値、シミュレーションにより推定された界面に垂直な侵入熱成分、界面の壁側の平均温度、熱伝達係数を示す。ここで、熱伝達係数は h 、RT1 を壁近傍液体温度 T_L とした。計算で求めた液体に接する壁温度の平均値 T_w と侵入熱の界面への垂直成分 Q_{\perp} を用い、接触面積 0.1099 m^2 から、 $h = Q_{\perp} / (T_w - T_L) / 0.1099$ により計算した。

先述したように、3次元の熱の出入りのある実験系では液体 Ne との界面では、ロータ軸垂直方向以外に長手方向にも温度分布があることから、液体 Ne-SUS 界面における熱伝達係数を求めることは単純ではない。このため、シミュレーションにより実際と解析の温度分布を比較し、それに適合させて h を求めた。このヒータ負荷のない場合の h は表に示すように、 $1070 \sim 1120 \text{ W/m}^2/\text{K}$ 程度であった。

また、表 2.3.3-4、5 に同様にヒータ負荷 1W、4W の場合の h の計算結果を示す。1000rpm-1W 負荷時は、 $2600 \text{ W/m}^2/\text{K}$ 台であったが、その 1 点を除き他は概ね $1070 \sim 1590 (1330 \pm 260) \text{ W/m}^2/\text{K}$ の範囲であった。回転数依存性の測定で、ここでは回転数に関する明確な相関関係は見られていない。測定されている温度差も 0.2K 程度と非常に小さく、シミュレーションの結果を併用しての計算であり、定量的な相関性を述べることは難しいが、過去の Fuchino らによるごく最近の報告値[4] (2.3.1 概念設計 図 2.3.1-11) とも概ね合致し、本解析値は妥当と思われる。

表 2.3.3-3 シミュレーションと測定データ(ヒータ負荷無し)

	600rpm		1000rpm		1200rpm	
	測定値	計算値	測定値	計算値	測定値	計算値
温度計 No						
RT1 (K)	28.641	28.863	28.657	28.877	28.76	28.977
測定値 T_L (K)						
RT2 (K)	28.801	28.876	28.797	28.89	28.834	28.989
RT3 (K)	断線	28.888	断線	28.9	断線	28.999
RT4 (K)	29.014	28.974	28.9802	28.986	29.066	29.084
RT5 (K)	30.172	29.169	29.8603	29.174	30.3	29.269
RT6~RT9 (K)	28.987	28.98	28.930	28.993	28.976	29.091
RT10 (K)	29.31	29.043	29.221	29.055	29.328	29.153
RT11 (K)	32.837	30.865	31.8603	30.87	33.223	30.96
RT12 (K)	34.905	31.186	33.5572	31.189	35.088	31.278
接液面壁の平均温度 T_w (K)		28.878		28.888		28.986
圧力 (kPa)	63.52	28.82K	64.39	28.84K	67.9	28.94K
沸点 (K)						
全侵入熱(W)		43.82		43.82		43.82
侵入熱 Q_{\perp} (W) (垂直成分)		27.89		27.89		27.89
熱伝達係数 h ($\text{W/m}^2/\text{K}$)		1070.8		1100.0		1122.4

他の回転数の影響としては、表中の RT11 や RT12 のようなロータシャフト端側の温度に関しては、回転数が増加するほど計算値と実測値の開きが大きくなっている。回転数の増加により振動などによる熱侵入が増加していることも考えられ、今後の実機作製には考慮すべきであろう。

表 2.3.3-4 シミュレーションと測定データ (ヒータ負荷 1W)

温度計No	600rpm, 1 W		1000rpm, 1W		1200rpm, 1 W	
	測定値	測定値	測定値	計算値	測定値	測定値
RT1 (K)						
測定値 T_L (K)	28.666	28.88	29.16	29.260	29.337	29.528
RT2 (K)	28.934	28.903	29.363	29.283	29.505	29.551
RT3 (K)		28.897		29.276		29.544
RT4 (K)	29.066	28.99	29.455	29.368	29.676	29.634
RT5 (K)	30.198	29.17	30.084	29.539	30.973	29.802
RT6~RT9 (K)	29.113	29.083	29.455	29.460	29.717	29.726
RT10 (K)	29.376	29.101	29.655	29.477	29.977	29.743
RT11 (K)	32.719	30.869	31.984	31.218	34.054	31.466
RT12 (K)	34.911	31.19	33.794	31.534	36.125	31.78
接液面壁の平均温度 T_w (K)		28.881		29.259		29.526
圧力 (k Pa) 沸点 (K)	63.255	28.82	81.242	29.208	94.477	29.478
全侵入熱(W)		44.81		44.80		44.79
侵入熱 Q_L (W) (垂直成分)		28.88		28.88		28.88
熱伝達係数 h (W/m ² /K)		1295.6		2653.2		1389.8

表 2.3.3-5 シミュレーションと測定データ (ヒータ負荷 4W 但し 1200rpm は 2W)

表 2.3.3-6 シミュレーションと測定データ (ヒータ負荷 4W 但し 1200rpm は 2W)

	600rpm, 4 W		1000rpm, 4 W		1200rpm, 2 W	
温度計 No	測定値	測定値	測定値	計算値	測定値	測定値
RT1 (K)						
測定値 T_L (K)	28.6782	28.92	28.715	28.931	29.204	29.453
RT2 (K)	29.1041	28.977	29.2031	28.988	29.43	29.487
RT3 (K)	断線	28.921	断線	28.931	断線	29.463
RT4 (K)	29.0837	29.036	29.1075	29.046	29.557	29.561
RT5 (K)	30.2009	29.171	29.9017	29.176	30.764	29.716
RT6~RT9 (K)	29.307	29.385	29.327	29.395	29.605	29.738
RT10 (K)	29.3706	29.271	29.346	29.281	29.837	29.711
RT11 (K)	32.9018	30.881	31.8636	30.886	33.734	31.388
RT12 (K)	35.0948	31.202	33.5192	31.205	35.719	31.702
接液面壁の平均温度 T_w (K)		28.888		28.897		29.440
圧力 (k Pa) 沸点 (K)	63.52		64.39		80.00	29.390
	kPa		kPa			
全侵入熱(W)		47.82		47.82		45.79
侵入熱 Q_L (W) (垂直成分)		31.87		31.87		29.86
熱伝達係数 h (W/m ² /K)		1382.1		1593.2		1151.5

他の回転数の影響としては、表中の RT11 や RT12 のようなロータシャフト端側の温度に関しては、回転数が増加するほど計算値と実測値の開きが大きくなっている。回転数の増加により振動などによる熱侵入が増加していることも考えられ、今後の実機作製には考慮すべきであろう。

また、回転遠心力による界面での液の圧力が上昇、および温度上昇について述べる。今回、回転数を 600~1400rpm に変えたヒータ負荷なしでの実験によれば、600 から 1400rpm の増加で LNe の温度はわずか 0.1K 程度上昇した。しかし、同時に回転系全体の圧力も 5kPa 程度上がり Ne の相図による圧力-沸点の関係と一致した。すなわち、この LNe の温度上昇は遠心力ではなく、むしろ回転数増加による侵入熱の増加による全体の圧力上昇、それによる沸点上昇と思われた。

③-3 考察

図 2.3.3-9 に得られた熱伝達係数と回転数の関係を示す（異常値の 1000rpm-1W ヒータ負荷の場合の 1 点を除いた）。得られた熱伝達係数はおおよそ 1070~1590(1330±260)W/m²/K の範囲であった。現試験機では内槽の表面積は 0.1099m² であるので、得られた熱伝達係数に面積を掛けて、現モデル機では約 120~175W/K 以上の吸熱が可能であることになる。

ここで実際の回転機設計に合わせて冷却能力を考える。2.3.1 の概念設計③-3 で検討したように、実際の 500kW 回転機の界磁コイル面積は上記の値の約 3 倍になる。すなわち、界磁コイル冷却面積は 0.3m² 程度であり、界面での吸熱量は上記 3 倍の 360~525W/K である。この界面での温度差は、実際の界磁コイルの発熱量、界磁コイルと液体 Ne の間に介在する SUS、FRP などの材料の熱伝導度などに依存するが、仮に、今回の実験で見られた温度差 0.5K としても 150-240W の吸熱が可能となる。従来の他の高温超電導コイルの実験から、本 500kW 級界磁コイルの発熱は高々 10~20W 程度であり、また、設計では界磁コイルの運転温度を 40K（すなわち、0.5K に対して 9.5K の余裕がある）としているので、今回の回転機の設計に使える十分な冷却能力が取れると思われる。

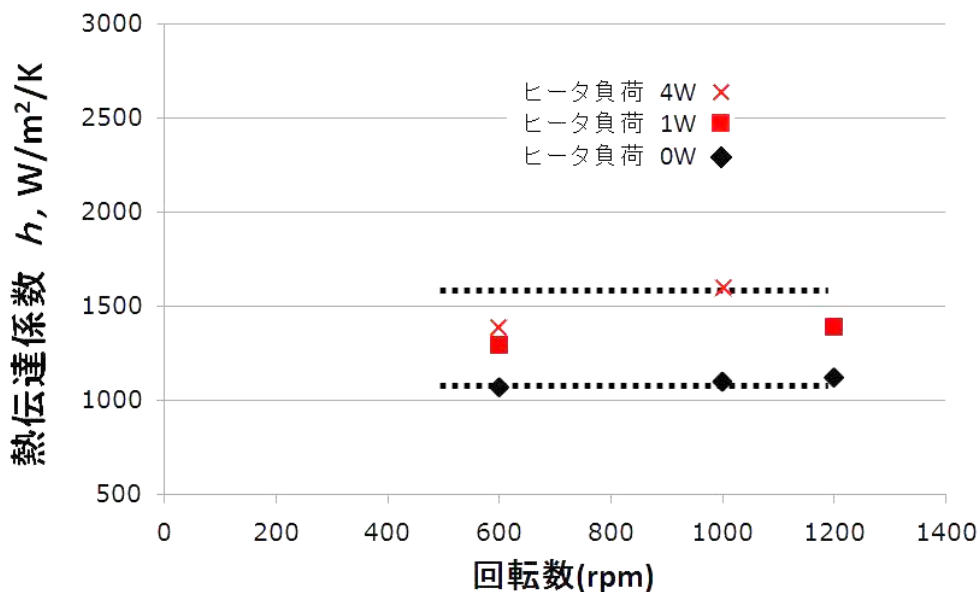


図 2.3.3-9 熱伝達係数と回転数の関係

2.3.4 イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発のまとめ

2.3.4-1 回転機適正構造の概念設計

・今回、1)磁場、温度、応力の3要素を考慮した連成シミュレータを開発し、それにより2)イットリウム系複合材料を使った代表的な界磁巻線コイルの成立性を検討し、次に3)界磁巻線コイルの形状を検討し、最後にそれらを統合して、4)電機子、ヨークも含めた500kW機回転機の詳細設計を行った。その結果、本プロジェクトの主目的であるレアメタル(以下RMと略す)使用量に関して、同じ出力の永久磁石回転機に較べて1/130の削減効果があることが分かった。将来PM回転機の需要が伸びればRMの入手性や価格上昇が課題となるが、超電導回転機で使用するRM(Gd)量は微量であるため、RM使用量はかなり抑制される。また、効率、体格、重量も従来の常電導機と比べると改善効果が見られた。

また、Appendixには今回の成果を生かして、今後の実用化の見通し、波及効果をより具体的にするために、船用5MW機の設計検討を行った。その結果、RM削減効果に加え、体格、重量が1/3になるなど、イットリウム系複合材料を使った顕著な効果が見られた。

・目標に対する達成度 100%

・今後の展望と課題

今後の課題として、実機の設計と作製を進めていくために、以下のハード的な検証がある。

- a) イットリウム系複合材料の長尺化と特性安定性
- b) 量産化コイルとしての界磁コイルの作製法、成型性の検討
- c) トルクロッド・熱収縮緩衝技術、高速回転対応技術、振動・衝撃対応技術
- d) 高圧絶縁技術
- e) 回転子冷却技術、熱侵入低減技術など

また、さらなる効率向上には、電機子も超電導化する全超電導回転機の検討も必要である。そのためには、特に線材の損失低減が重要となる。また、回転機本体だけでなく、冷却装置も高効率化、小型化、装置の長寿命化などの課題がある。

2.3.4-2 要素技術開発(1) 界磁巻線技術開発

・500kW級回転機の界磁巻線の開発を目的に、イットリウム系複合材料を使った1)平傘型、2)菱形傘型、および3)鞍型傘型形状の界磁巻線モデルコイルを試作し、40-50Kで冷凍機冷却し、複合材料の各温度の I_c - B と比較して、ほぼ励磁率100%の結果を得た。すなわち、各コイルともイットリウム系複合材料を劣化させることなく、 I_c の特性のほぼ100%までコイルを励磁することができた。すなわち、今後、今回の製作実績をもとにして界磁巻線を作製すれば、イットリウム系複合材料の I_c 特性から、界磁巻線の設計および回転機の設計が可能となる。界磁巻線の安定性検討のため、イットリウム系複合材料の交流損失を測定し、これを代表的な単純矩形、菱形

傘型、鞍型傘型形状の界磁巻線とそれを用いた 500kW 回転機の全交流損失を計算した。特に、外部の常電導固定子からの変動磁場の影響を調べた。その結果、超電導コイルの全イットリウム系複合材料にわたる発熱量は高々10W 程度であり、回転機の全体損失 (2.5kW 以上) に比べると、非常に小さかった。損失の内訳は、シールドとなるヨークにおける鉄損と電機子における銅損がほぼすべてであった。すなわち、界磁巻線で発生する電機子変動磁界による交流損失は無視できることがわかった。

以上、傘型界磁巻線コイルの製作性、交流損失からの成立性を調べたがいずれも回転機の設計、製作には問題ないことがわかった。

- ・ 目標に対する達成度 >100%

- ・ 今後の展望と課題

今後の課題としては、界磁巻線コイルの作製では、イットリウム系複合材料の長尺にわたる事前の I_c の把握が重要である。界磁巻線は磁場分布を持つため、イットリウム系複合材料の長手方向の I_c バラつきをできるだけ少なくすること、およびその分布状況を事前に把握して、安全なコイル設計をすることが必要である。また、n 値、伝導冷却における熱暴走挙動、クエンチ挙動なども調べ、安全な運転基準も検討していく必要がある。

今後、超電導回転機は一層の大型化、高効率化が進むと思われる。その際には、電機子も超電導化するなどの全超電導回転機による一層の高効率化も検討する必要がある。そのために、イットリウム系複合材料の一層の低交流損失化やコイルの安定性の検討が必要である。

2.3.4-3 要素技術開発(2) 冷却技術開発

- ・ 500kW 級回転機を模したモデルロータ部と冷却系からなる回転試験装置を試作し、液体 Ne サーモサイフォン冷却の試験を行った。この試験で回転系での液体 Ne と SUS304 界面での沸騰熱伝達係数を求め、 $1330 \pm 260 \text{ W/m}^2/\text{K}$ の値を得た。回転数 400~1200rpm で試験を行ったが、依存性は見られなかった。実際に設計した 500kW 回転機の界磁コイル部の冷却面積 0.3m^2 から、界面における吸熱量 $360 \sim 525\text{W/K}$ が見込まれ、また、従来報告結果からの同程度のコイルの発熱は 10W 程度であり、界面温度差は 0.2-1K 程度であるので、今回開発した液体 Ne サーモサイフォン冷却法は十分機器に使えるものと思われる。

- ・ 目標に対する達成度 >100%

- ・ 今後の展望と課題

今回、機器の熱設計に重要な液体 Ne-SUS 界面での熱伝達係数を求めることができ、目的を達成することができた。これにより、機器の冷却設計も可能になるが、さらに実機作製については、高速回転するシステム系全体での熱侵入量低減を断熱、真空度などの改善から検討することも必要である。

参考文献

1. H H W Neumüller, et al. Supercond. Sci. Technol. 19 (2006) S114.および W. Nick, "HTS Rotating Machines" European Summer School 発表資料,Pori, Finland(2008)など
2. S.K. Baik et al., "Electrical parameter evaluation of a 1 MW HTS motor via analysis and experiments", Cryogenics 49 (2009) 271. S.K. Baik, et al. Physica C 470 (2010) 1763.
3. AMSC 社ホームページ http://www.amsc.com/pdf/MP_DS_365_0610.pdf
- 4.S.Fuchino, N. Tamada, I. Ishii and M. Okano, .ation of a 1 MW HTS motor via a,Proceedings of the Eighteenth International Cryogenic Engineering Conference (ICEC18), Mumbai, India, (2000).
5. 友田、岩熊ほか 第 84 回 2011 年度春季低温工学・超電導学会予稿集 p53.
6. 西川、藤田 伝熱学 (理工学社) p231.
7. ネオンの物性値『岩波理化学辞典』 岩波書店、1994 年、第四版第九刷など

2.4 超電導回転機開発委員会

①背景及び目的

回転機の応用に関しては、従来、量産、商用化が進んでいた Bi 系線材による機器開発が行われていた。米国エネルギー省による Superconductivity Partnership Initiative など、これまで米国、欧州、韓国において、超電導発電機、船用モータ、風力発電機的设计などの開発が積極的に進められてきた。こうした回転機応用分野は CO₂削減や省エネなど昨今の世界の対環境事情に寄与できるものが多く、超電導の応用先としては有望なものが多い。

他方、最近、イットリウム系複合材料の開発の進展が著しい。本プロジェクトでも 1km の超長尺化が、「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトでも臨界電流の向上などを含めた特性向上の検討が活発に行われている。さらに、各日米欧の企業においては、数百m級の線材の市販が始まろうとしている。

本委員会は、このような状況に対応し、「希少金属代替材料開発プロジェクト ⑨-2 Nd-Fe-B 系磁石を代替する新規永久磁石及びイットリウム系複合材料の開発（超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発）」の中にイットリウム系複合材料を用いた超電導回転機開発調査委員会を組織し、現在のイットリウム系複合材料、回転機応用の現状を調べ、Y 系回転機としてのメリットや今後の課題と進むべき方向性を議論した。これにより、その調査した結果を並行して進める回転機の開発および将来の開発に資することを目的とした。

②調査検討の方法

イットリウム系複合材料の現状、従来の回転機および超電導機の現状、研究、開発例を調査するとともに、イットリウム系複合材料を使った回転機の概略の検討を行い、Y 系回転機のメリット、課題を注出し、今後の有望応用分野の開拓の提言とした。回転機の調査検討項目としては、「船用回転機」、「風力用回転機」、「産業用電動機」を選んだ。これらの典型的な例にたいして、現状のイットリウム系複合材料による検討を行い、従来の常電導回転機、PM 式回転機に対するメリット、RM（レアメタル）削減量、効率、CO₂排出量などの効果を調べた。また、イットリウム系複合材料では大幅に低コスト化が進められているため、複合材料のコストと機器の経済的成立性も調べた。

検討の実施にあたっては、表 2.4-1 の識者からなる委員を選定し、表 2.4-2 の通りの内容で実施した。各担当委員がイットリウム系複合材料、常電導、超電導回転機の開発現状、イットリウム系適用性の検討の結果を報告し、会議で全委員を交えて討論し、後日、委員会報告書としてもまとめた。

表 2.4-1 平成 22 年度イットリウム系複合材料を用いた超電導回転機開発委員会
委員名簿（順不同・敬称略）

	氏名	所属・役職
委員長	仁田 旦三	明星大学 理工学部 電気電子システム工学科 教授
委員	山崎 克巳	千葉工業大学 工学部 電気電子情報工学科 教授
	植田 浩史	大阪大学 核物理研究センター 特任助教
	牧 直樹	東京海洋大学 海洋工学部 博士研究員
	河島 裕	三菱重工業（株）原動機事業本部 高砂製作所 水・エネルギー部 開発グループ 主席技師
	柳本 俊之	川崎重工業（株）技術研究所 機械システム研究部 部長
	井岡 茂	（株）東芝 電力システム社 磯子エンジニアリングセンター 原子 力開発設計部 先端システム担当部長
	長谷 吉二	富士電機システムズ（株）鈴鹿製作所 設計部回転機グループ 担 当部長
	今野 雅行	富士電機システムズ（株）エネルギーソリューション本部 グリーンエネルギーソリューション事業部 グリーンエネルギーソリューション統括部 原子力技術部 電気制御グループ マネージャー
	鈴木 佳明	大陽日酸（株）つくば事業所 超低温技術部 部長
	岩熊 成卓	九州大学 大学院システム情報科学研究所 准教授
	齊藤 隆	産業用超電導線材・機器技術研究組合 佐倉分室長
	青木 伸夫	産業用超電導線材・機器技術研究組合 相模原分室長
	和泉 輝郎	産業用超電導線材・機器技術研究組合 特別研究員
山田 穰	産業用超電導線材・機器技術研究組合 特別研究員	
オブザーバ ー	石山 敦士	早稲田大学 理工学術院 教授
	木須 隆暢	九州大学 大学院システム情報科学研究所 教授
	大熊 武	(財)国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 電力機 器研究開発部長
	塩原 融	産業用超電導線材・機器技術研究組合 専務理事
事務局	定方 伸行	産業用超電導線材・機器技術研究組合 技術開発部長代理

表 2.4-2 平成 22 年度イットリウム系複合材料を用いた超電導回転機開発委員会：テーマと日程

	主なテーマ	開催日
第 1 回	応用分野別常電導回転機・超電導回転機の現状と課題、イットリウム系複合材 料開発、超電導回転機開発の現状と計画、イットリウム系複合材料適用の課 題とリット、まとめ及び第 2 回委員会、報告書案について	平成 22 年 12 月 16 日
第 2 回	応用分野別常電導回転機・超電導回転機の現状と課題、イットリウム系 複合材料の適用検討、総合討論、まとめ及び報告書について	平成 23 年 2 月 22 日

報告者：第 1 回：和泉委員、山田委員、牧委員、柳本委員、長谷委員、岩熊委員、河島委員

報告者：第 2 回：山田委員、山崎委員、川島委員、牧委員、長谷委員

③成果 現状調査

③-1 イットリウム系複合材料の現状

・本複合材料線材に関しては、長尺化の進展著しい PLD、EB、RCE、MOD、MOCVD 法について調査した。その結果、フジクラ、Bruker、住友電工が PLD 法で、KERI、SuNAM が EB 法で、SuperPower 社が MO-CVD 法、AMSC 社、昭和電線が TFA-MOD 法で量産商業化に取り組んでいる。各社とも数百 m 級以上の長尺を数 10~600m/h の速度で作製できるようになっている。図 2.4-1 には代表的な例として、最近のフジクラによる 615m 線の特徴を示す。こうした線が機器応用に使われようとしている。

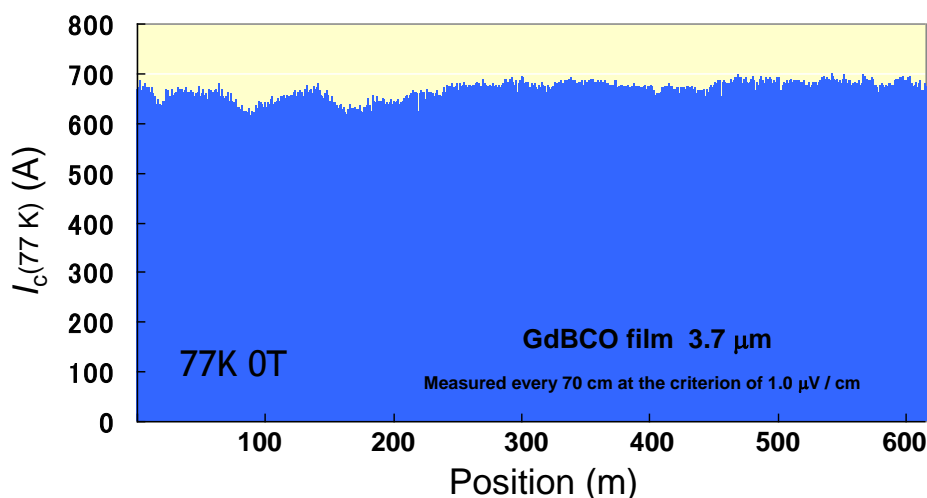


図 2.4-1 フジクラにおける最近の長尺線の 615m 線の I_c 分布特性

・コスト的には、フジクラは 2015 年には 500 A/cm 幅×1000 m 線材をプライス 3,000 円/m とする目標として掲げ、韓国の SuNAM も 2011 年には市場に販売を開始すると発表している (ISS2010)。先行する米国の AMSC 社、SuperPower 社も精力的に販売に取り組んでいる。例えば、SuperPower 社は、2015 年を目標に表 2.4-3 のように低コスト化に取り組む予定と発表している [1]。

表 2.4-1 SuperPower 社が設定したイットリウム系複合材料のプライス目標 [2.3.4-1]

Today	Customer requirement	
\$400/kA·m	<\$100/kA·m	For commercial market entry (small market)
	<\$50/kA·m	For medium commercial market
	<\$25/kA·m	For large commercial market

③-2 回転機の現状（常電導および超電導）

特に、本プロジェクトの目標であるレアメタル（RM）削減のために永久磁石（PM）式同期回転機について現状を調べた。また、超電導応用が期待される大型機の応用分野である風力、船用、産業用について詳細に調査した。その結果、

- ・いずれの分野でもモータの高効率化、軽量コンパクト化は重要であり、そのため PM 式同期モータが増えている。
- ・風力応用では、現在の主流の 2 MW 機からさらに 5 MW 以上の大型化が進みつつあるが、大型化に対応するには発電機を含むナセルのサイズ、重量の軽減が必須である。
- ・船用では、時代のニーズにあった環境配慮型の高効率の電気推進船の開発が活発であり、その電気モータでは、数 MW 級のものの高効率化が望まれる。特に、電機推進船はすでに実際に大型ものも建造、販売され広く世界に普及している。日本でもスーパーエコシッププロジェクトが国交省のもとで推進され、環境配慮型の船舶の開発が盛んである。
- ・産業用（自動車、電車、工場用など）では、市場競争、コスト低減競争が激しいが、そのためにより高効率、軽量コンパクト化が求められている。

次に、これらに対応した高温超電導応用の回転機の開発状況を調べた。

- ・船用、産業用では Bi 系線材によりモデル機がいくつか試験検証されている。これまでに、川崎重工、AMSC、Siemens、Doosan の各社が活発に 400kW から 36.5MW 機の開発を行っている。
- ・風力用では設計のみである。Convertteam、AMSC 社がこれまでに 8MW、10MW の超電導同期式発電機の設計検討を行っている。
- ・これらの例では、従来常電導モータに比べ、小型軽量で高効率化（最大で数 % 向上）が可能であるとの結果を得ている。ただし、市場参入にはさらなる低コスト、信頼性向上が必要であるとされている。
- ・Y 系回転機の例は少なく、回転試験まで行ったのは 7.5kW 機の ISTEK のもののみである。理由は、機器に使用する線材量産化がこれからであるためである。

③-3 イットリウム系複合材料適用性の検討

上記調査内容を踏まえ、現状のイットリウム系複合材料を使って場合の各応用でメリットを検討した。

③-4 船用モータ

- ・超船舶推進装置への適用では、モータ効率が 95.4% から 98% に増加する。
- ・常電導誘導機に対し体積・重量は 1/3 となり、小型・軽量化が必要な電気推進船に適している。
- ・RM 使用量は従来の PM モータと比較して、約 1/30(材料歩留り 33% 考慮)程度になる。
- ・定格時の負荷角が小さく、同期機を使った電気推進船で急激な加減速運行を必要とする海上保安船などの特殊船舶にも適している。
- ・コストは、常電導の現状機に比べると 1.3~5 倍となった。効率向上でこの初期コストは 12 年

ほどで吸収できるが、低コスト化のためには線材と冷却のコスト低減化の R&D が必要である。

- CO₂ 排出量削減、省エネに関しては、相当大きな効果が見込めた。国内大型モータ年間生産量の半分の 350 台を超電導化するだけで、原油換算で 34,300kl の省エネになる。

③-5 産業用モータ

- 500kW の産業用超電導モータは従来の常電導機より 2-3% の高効率化が図れる(表 2.4-2)。
- 従来の誘導機と比較すると体格で 0.7-0.5、質量で 1/2-1/3 の小型軽量化が図れる。また、PM モータと比較してもある程度の小型軽量化が可能である(表 2.4-2 および図 2.4-2)。

以前は超電導化のメリットが出るのは数MWクラス以上であったが、イットリウム系複合材料の性能が向上し、 $I_c=600A/cm$ 幅クラスの線材を使用することにより、今回 500kW の容量でも小型軽量化のメリットが出せることが分かった。さらに、

- RM 使用量は PM モータと比較し、約 1/130(材料歩留り 33%考慮)程度になり、大きな削減効果が見込まれる。
- コストは、産業用は容量が小さいだけに、厳しく、超電導化で現状機の 3-5 倍となった。しかし、逆に値段が安いだけに、効率向上でこの初期コストは 10 年ほどで吸収できる。
- CO₂ 排出量削減、省エネに関しては、国内大型モータ年間生産量半分の 350 台のみを超電導化する場合原油換算で 5,000kl の省エネになる。

表 2.4-2 各種モータ比較

	Y 系超電導モータ	誘導機	PMモータ
効率	96.8%	95%	96.5%
体格比	0.7	1	0.8
重量比	0.5	1	0.6

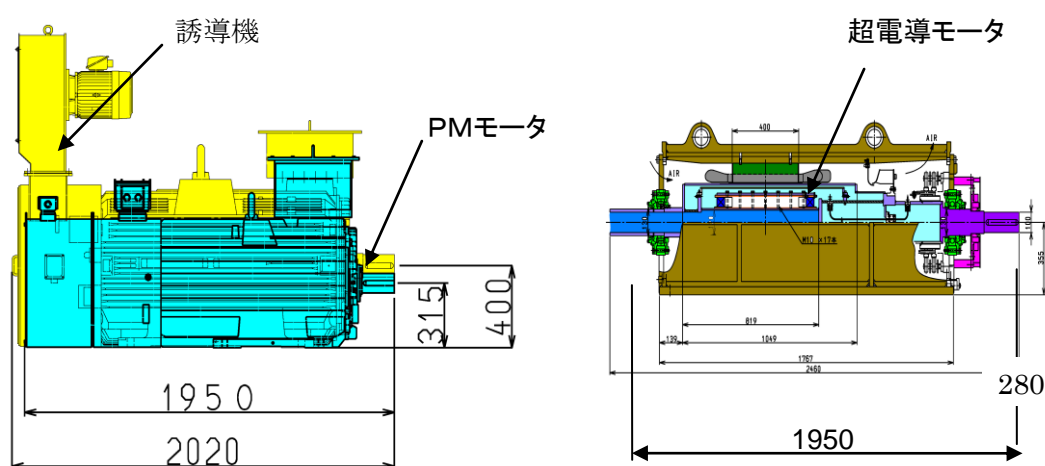


図 2.4-2 500kW モータの体格比較：左 常電導機、右 Y 系超電導機

表 2.4-3 500kW モータの RM 含有量

	超電導モータ	PMモータ
線材／磁石の総量	イットリウム系複合材料 4.8km	磁石 50kg
レアメタル	0.126kg	16kg

③-6 風力用発電機

- ・イットリウム系複合材料の特性と発電機の主な回転数、重量、出力などの基本パラメータとの相関を検討の結果、5MW 級以上で超電導の効果が出ることがわかり、5MW 級機の詳細検討を行った。
- ・運転温度の検討でイットリウム系複合材料であれば 77K でもコスト的に十分成り立つことが分かった。
- ・これを Cu 巻線で作った常電導相当機と比較すると、線材使用量が 1/10 に発電機重量が 1/3 になることが分かった。
- ・効率は、常電導相当機が 90% に対し、本機は 95.8% と大幅に効率向上が見込めた。
- ・Y 系発電機と永久磁石 (PM) を用いた PM 発電機とでレアアースの使用量を比較検討した。PM 機では 1571kg に対し、Y 系機では 0.762 kg と使用量は約 1/660(材料歩留り 33%考慮) となった。
- ・77K 以下の低温動作も検討した。40K になると複合材料の I_c は 77K の 7.8 倍になり複合材料使用量も大幅に削減できる。
- ・Y 系発電機の初期コストを算定した。40-77K いずれの運転方式でも、現状の Cu 巻線発電機と増速器の値段を下回り、コスト的にも Y 系超電導同期機がメリットがあることが分かった。ただし、冷却を含めたより詳細な検討が今後必要である。

③-7 全超電導機

- ・全超電導機についての検討を行った。最新のイットリウム系複合材料で確認された大幅な交流損失低減効果を用いた 400kW-3600rpm 全超電導機概念設計を行い、モータとしての損失低減と効率改善効果を検討した。電機子部の超電導化と交流損失低減により、大幅な効率改善が期待できる。最高で 99% の高効率が得られる。今後、技術的な検討を行って可能性をより具体的に検証していく必要がある。

④まとめ

調査検討の結果、主に以下のことが明確になった。

④-1 複合材料

- ・日米欧韓の各社で線材の販売が活発化し、発表資料からは数百 km/年の生産能力はある。
- ・その特性は、長さは数百 m 級、 I_c は 200-400A/cm 幅程度である。
- ・コストは、SuperPower 社の例では現状\$400/kAm で、2015 年までに\$20-100/kAm にする予定である（価格は発注量による）。フジクラも 500A/cm 幅の線を 3000 円/m で将来販売する予定である。

④-2 回転機の市場現状と超電導化現状

- ・超電導適用可能な数百 kW～MW 級の回転機を調査した。その結果、風力発電機、船用モータ、大型車載用で PM 式同期回転機が使われており、超電導での代替の可能性があることが分かった。
- ・超電導の研究開発は、これまで船用を中心に Bi 系線材で行われてきた。米国 AMSC 社、ドイツ Siemens 社、韓国 Doosan 社が数 100kW 級から 36.5MW 級まで開発した実績がある。
- ・いずれも軽量コンパクト化と数%ほどの効率向上が見込めることが明らかになっている。

④-3 イットリウム系適用検討

- ・上記で有望な船用、産業用、風力発電機の大型回転機に Y 系を適用した際のメリットを調べた。
- ・従来 PM 式回転機に比べ、RM 量は 1/100-1/2000 程度に削減できることが分かった。
- ・いずれの分野でも、効率は船用産業用で 2-3%、風力では 5%向上することが分かった。
- ・コスト的には少容量機ほど厳しく、500kW 産業用では数倍の初期コストがかかるが、逆に低価格のために、ランニングコストを含めた全体コストは 10 年程度で超電導機が安くなる。
- ・風力では、77K 運転も可能であり、かつ、初期コストも従来の常電導機の Cu 巻線発電機と増速器を合わせた値段を下回り、コスト的に大きなメリットが生じることが分かった。

④-4 全超電導

全超電導機、特に交流を流す電機子部の超電導化も検討し、大幅に効率が上がるなどのメリットを確認し、今後の応用が期待できることを確認した。

④-5 課題

検討により、今後の課題として以下のことが考えられた。

- ・コスト的には線材、冷凍機のさらなる低コスト化が求められる。
- ・Y 系機作製の実績と信頼性：これまで 1 機しか作製されたことがない。今後の応用検討には、多くにモデル機作製検討が必要であり、同時に市場化には信頼性試験も必要である。

また、個別の技術では、以下が考えられる。

- Y系導体とマグネット技術：高安定Y系マグネット技術：長期高安定運転が出来る巻線・支持・冷却・絶縁法を協調させたマグネット作製技術の開発。これには、①イットリウム系複合材料の機械特性、 I_c 特性などを考慮した最適コイル形状、②コイル巻き線、成形性の検討、③コイルの冷却と励磁特性の把握、④以上の試験による設計データの積み上げ、信頼性向上が必要である。
- Y系マグネットの安定性解析と保護システム：各種擾乱に対するマグネットの安定性解析並びにクエンチ時にY系コイルが損傷しない保護システムの開発
- 高速回転に対応する耐力特性：特に産業用では1500-3600rpmであり、大きな遠心力も加わる。よって、超電導部分で使用する部材に耐力性、固定法などの検討が必要である。
- その他構成材、構造：コイルを巻き付ける界磁、電機子部のティースの材質、固定方法、冷却構造の検討。特に、電機子や固定子界磁などで鉄製のティースを使わないときには、その固定方法や磁場が散逸するため生じる渦電流への対処などが必要である。
- 船用では、三次元で揺れる(ローリング、ピッチング、ヨーイング)に対しての冷却システム
これまで製作実績のない風力用超電導機の開発では、上記のほかに、
- 最適電気・機械設計：発電機重量や発電機コストなど最適設計手法の開発。特に、風力では頻繁に on, off が起こる (20%の稼働率)。これに対応した最適システム化の検討も必要である。
- 空間・時間高調波を低減するダンパーの最適構造：発電機出力をインバータ制御する際に発生する高調波に伴う渦電流発熱を低減するダンパーの最適構造と製造技術の開発
- 冷凍機冷却システム：通常の超電導対応以外に、大型風力では100m以上の高所に設置される、また、洋上風力などの設置を考えても信頼性、メンテフリー化が重要である。また、通常風力の有効動作時間は、風況によるが20%と言われている。このため、冷凍機の効率化はより一層重要である。

参考文献

- [1] V. Selvamanickam et al., Applied Superconductivity Conference, Washington D.C. August1-6, 2010.

III-3 成果の総括

以下に各研究項目の主要成果と目標に対する達成度を総括する。

1. 超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発

1.1 エキシマレーザ PLD 法による複合材料作製プロセス開発

- ・超長尺イットリウム系複合材料作製を目的として、ホットウォール型エキシマレーザ PLD 装置を改良した高磁界長尺イットリウム系複合材料作製装置を開発した。
- ・1050m の長さを有するイットリウム系複合材料の I_c の平均値は 533.9A であった。また、イットリウム系複合材料の長手方向の I_c 分布測定の結果から、10m 長以上で I_c が 300A/cm 幅 (@77K, 自己磁場) 以上という特性も十分満たすことから、目標である「1km 長で平均 I_c で 200A/cm 幅以上 (@77K, 自己磁場)」および、「10m 長以上にわたって I_c が 300A/cm 幅 (@77K, 自己磁場) 以上」という性能をすべて達成した。
- ・目標に対する達成度 >100 %

1.2 TFA-MOD 法による複合材料作製プロセス開発

- ・シミュレーションに基づき設計した超長尺バッチ式本焼炉は 730°C で運転可能であることが実証され、超長尺複合材料を作製できる装置であることを証明できた。
- ・超長尺バッチ式本焼炉において、シミュレーションに基づき設計したガス導入システムと排気系に関し、実証試験の結果 1000m の平均で 300A/cm 幅以上 (@77K, 自己磁場)、10m 以上で 300A/cm 幅以上 (@77K, 自己磁場) を達成でき、ガス系統及び熱処理温度に問題ないことが実証され、今回の目標値である 1000m 平均で 200A/cm 幅以上、10m で 300A/cm 幅以上 (@77K, 自己磁場) を達成した。
- ・長尺化の手段の一つとして RTR 方式の本焼炉を設計・製作・検討した。設計仕様を満足する温度分布、ガス流量を得ることができ、短尺試験の結果、BaF₂ の生成が抑えられ、c 軸配向超電導層が生成していることを確認できた。この結果、RTR 方式本焼炉は設計が適正に行われ、超長尺複合材料を作製可能な設備であることを実証でき、超長尺目標である 1000m 平均で 200A/cm 幅以上 (@77K, 自己磁場)、10m 以上で 300A/cm 幅以上 (@77K, 自己磁場) を達成することを見通すことができた。
- ・ホール素子の高速走査方式とデータの低雑音取得方式の開発により、従来と同等の空間分解能 (複合材料の幅方向に 40 μ m、長手方向に 100 μ m) で、従来システムの 200 倍の評価速度を達成した。
- ・前項の空間分解能で得られる情報と同等の情報が得られる条件で、長尺複合材料への適用が十分に可能となる 36 m/h という評価速度を達成した。
- ・目標に対する達成度 100%

2. イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発

2.1 レーザ CVD 法による希少金属利用率向上技術開発

- ・液体原料供給機構を備えたレーザ CVD 装置の開発を行った。
 - ・Y 系複合材料成膜への適用可能性および収率向上を目的とした成膜条件の最適化を図った。
 - ・IBAD 線材基板上に c 軸配向 YBCO 膜を合成、Y 収率は最大 45.7%を達成した。
 - ・RTR 機構を備えた連続成膜用レーザ CVD 装置を設計、開発した。
 - ・移動基板上において $J_c > 3\text{M/cm}^2$ 、 $I_c > 100\text{A}$ の高い超電導特性を達成し、イットリウム系複合材料の連続作製法としての LCVD 法の有効性を証明した。
- ・達成度 100%

2.2 YAG レーザ PLD 法による希少金属利用率向上技術開発

- ・10 mm×10 mm 短尺基材上イットリウム系複合材料膜に関する基礎検討から、ターゲット-基材間距離の短縮と酸素分圧の最適化で収率が向上することが明らかとなった。本検討では、ターゲット-基材間距離 20 mm、酸素分圧 200 Pa において最高で 19%の収率を得ることが出来た。
 - ・収率の増加に対して超電導特性は単調に低下したが、ターゲット組成の最適化で、高い収率を維持しながら $T_c = 88.2\text{ K}$ 、 $J_c = 1.8\text{ MA/cm}^2$ (@77 K、自己磁場)を得ることが出来た。
 - ・蒸着面積を増加させ収率をさらに向上させるために、マルチターン YAG レーザ PLD 装置を導入し、酸素分圧の最適化(160 Pa)によって、56.1%の収率を得た。
 - ・マルチターン YAG レーザ PLD 装置において収率 40%の条件 (酸素分圧 80 Pa) では、 $T_c = 88.2\text{ K}$ 、 $J_c = 1.4\text{ MA/cm}^2$ (@77 K、自己磁場)が得られた。
 - ・静止系の膜厚分布から予想した膜厚分布と移動系で実測した膜厚分布は同じ傾向であったことから、移動系においても 40%以上の収率を見込むことが出来た。
 - ・IBAD 基材上にイットリウム系超電導膜を静止状態にて複数位置で成膜し、断面の微細組織観察を高分解能 SEM、EDS マッピングを用いて実施した。中心レーンでは、YBCO ほぼ単相の均一な微細組織が観察され、膜厚は $0.85\mu\text{m}$ であったのに対し、隣接レーンでは、YBCO 結晶中に多数の高 Cu 濃度の粒子が存在し、その膜厚も $0.49\mu\text{m}$ であった。また、組織・組成に関しても成膜位置による違いが見られた。
 - ・2 倍波 YAG レーザ PLD 法を用いてイットリウム系超電導膜を作製した結果、2 軸配向し、 $T_c = 89.0\text{ K}$ 、 $J_c = 1.4\text{ MA/cm}^2$ (@77 K、自己磁場)を示した。しかし、Ba と Cu が過剰な膜組成であった。
- ・達成度 >100%

3. イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発

3.1 回転機適正構造の概念設計

- ・ 磁場、温度、応力の 3 要素を考慮した連成シミュレータを開発した。
- ・ 同シミュレータを用い、イットリウム系複合材料を使った代表的な界磁巻線コイルの成立性を確認した。
- ・ 500kW 機回転機の詳細設計を行い、レアメタル(RM)使用量に関して、同じ出力の永久磁石回転機に較べて 1/130 の削減効果があることが分かった。

- ・ 目標に対する達成度 >100%

3.2 界磁巻線および冷却要素技術開発

- ・ イットリウム系複合材料を使った 1)平傘型、2)菱形傘型、および 3)鞍型傘型形状の界磁巻線モデルコイルを試作し、40-50K で冷凍機冷却し、複合材料の各温度の I_c - B と比較して、ほぼ励磁率 100%の結果を得た。
- ・ 界磁巻線の安定性検討のため、イットリウム系複合材料の交流損失を測定し、これを代表的な単純矩形、菱形傘型、鞍型傘型形状の界磁巻線とそれを用いた 500kW 回転機の全交流損失を計算した。その結果、超電導コイルの全イットリウム系複合材料にわたる発熱量は高々 10W 程度であり、回転機の全体損失(2.5kW 以上)に比べると、非常に小さかった。すなわち、界磁巻線で発生する電機子変動磁界による交流損失は無視できることがわかった。
- ・ 500kW 級回転機を模したモデルロータ部と冷却系からなる回転試験装置及び液体 Ne サーモサイフォン冷却試験機を試作した。
- ・ 同装置を用いて冷却試験を行い、回転系での液体 Ne と SUS304 界面での沸騰熱伝達係数を求め、 $1330 \pm 260 \text{ W/m}^2/\text{K}$ の値を得た。回転数 400~1200rpm での試験を行ったが、依存性は見られなかった。

- ・ 目標に対する達成度 >100%

以下には、各項目の成果を下表にまとめる。

超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発			
最終目標	具体的目標値	小項目	成果
300 A/cm 幅 (@77K, 自己磁場) の特性を有し、1 km を超える超長尺線材作製を見通す。	<ul style="list-style-type: none"> 1km 長複合材料を作製し、平均 I_c が 200A/cm 幅以上 (@77 K, 自己磁場) であることを実証する。 同条件で作製した 10m 長以上の複合材料で I_c が 300A/cm 幅 (@77 K, 自己磁場) 以上を実証する。 	エキシマレーザ PLD 法による複合材料作製プロセス開発	達成度 > 100% <ul style="list-style-type: none"> 1050m 長線材—平均 $I_c=534A/cm$ 幅 10m 長—$I_c=300A/cm$ 幅以上
		TFA-MOD 法による複合材料作製プロセス開発	達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 1000m 長パッチ線材—平均 $I_c \geq 300A/cm$ 幅 10m 長—$I_c=300A/cm$ 幅以上
イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発			
最終目標	具体的目標値	小項目	成果
超電導層の連続形成プロセスにおいて原材料収率 40% 以上を見通す。	<ul style="list-style-type: none"> 全成膜領域に対し、静止成膜により原材料収率 40% 以上を実証する。 成膜領域の一部を通過する移動成膜により、静止成膜結果から予想される成膜量を実証する。 	レーザー CVD 法による希少金属利用率向上技術開発	達成度 100% <ul style="list-style-type: none"> 原料収率 45.7% 超電導特性 $J_c > 3MA/cm^2$, $I_c > 100A/cm$ 幅
		YAG レーザ PLD 法による希少金属利用率向上技術開発	達成度 > 100% <ul style="list-style-type: none"> 原料収率 56.1% 超電導特性 $J_c > 1.4MA/cm^2$
イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発			
最終目標	具体的目標値	小項目	成果
500 kW 級-1000 rpm 級の大容量回転機の概念設計により、イットリウム複合材料による大型回転機の優位性を見通す。	<ul style="list-style-type: none"> 磁場—応力—伝熱を連成した回転機評価用シミュレータを開発する。 上記シミュレータを用いた総合評価により傘型コイル利用回転機で従来の永久磁石回転機に比べ希少希土類元素使用量が 1/10 となる成立性を示す。 	回転機適正構造の概念設計	達成度 > 100% <ul style="list-style-type: none"> 500kW 機設計検討で希少金属使用量が従来の 1/130 に低減できることを示した。 磁場、温度、応力の 3 要素を連成させた解析シミュレータを開発し、上記設計機を評価し成立性を確認した。

<p>傘型界磁巻線の試作とその熱的、電磁氣的、機械的特性評価およびサーモサイフォン式冷却試験とその冷却特性評価により、500 kW 級-1000 rpm 級回転機的设计に資する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・傘型界磁巻線工程等における加工劣化を抑制し、巻線状態での特性で複合材料 I_c の 70%以上を得ることを実証する。 ・Ne を用いたサーモサイフォン式冷却装置において高速回転時の回転数と冷却能力の関係を明らかにし、回転機の冷却設計を可能にする。 	<p>界磁巻線および冷却要素技術開発</p>	<p>達成度 >100%</p> <ul style="list-style-type: none"> ・エッジワイズ歪、段差歪などの Y 系の課題を克服し、劣化なく Y 系傘型界磁モデルコイルの製作に成功し、回転機設計の見通しを得た。 ・液体 Ne を用い、高速回転時に 30K 冷却と界面の熱伝達係数 h を得て、冷却設計の見通しを得た。
---	--	------------------------	---

III-4 成果の意義

以下に各研究項目の成果の意義をまとめる。

1. 超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発

本項目では、回転機に用いられている永久磁石に含まれる Dy や Nd などの希土類希少金属を削減するための高温超電導磁石を実現するために必要な 1km を超える単長を有する複合材料作製技術の開発を行い、前項でまとめた通り設定された目標を大きく上回る成果を達成した。本プロジェクト開始時には、臨界電流(I_c)と長さ(L)の積では世界最高レベルの技術レベルを有していたものの、内訳として 500m より長い材料を作製することは困難であり、むしろ臨界電流(I_c)の高特性で補っていた。しかしながら、本プロジェクトの成果において得られた 1km 以上の長さで 500A/cm を超える I_c を得たことにより、従来のレベルを大きく凌駕する技術レベルに到達し、世界最高レベルの技術を確立したことになる。図 4-1 には、イットリウム系複合材料の技術開発レベルを示す I_c - L マップ上における本項成果の位置付けを示す。

また、本技術開発において 1km を超える複合材料を作製するための基板から評価までの一連の装置とともにその技術を実証したことは、今後の長尺線材量産化の基盤技術を整えたことになる。

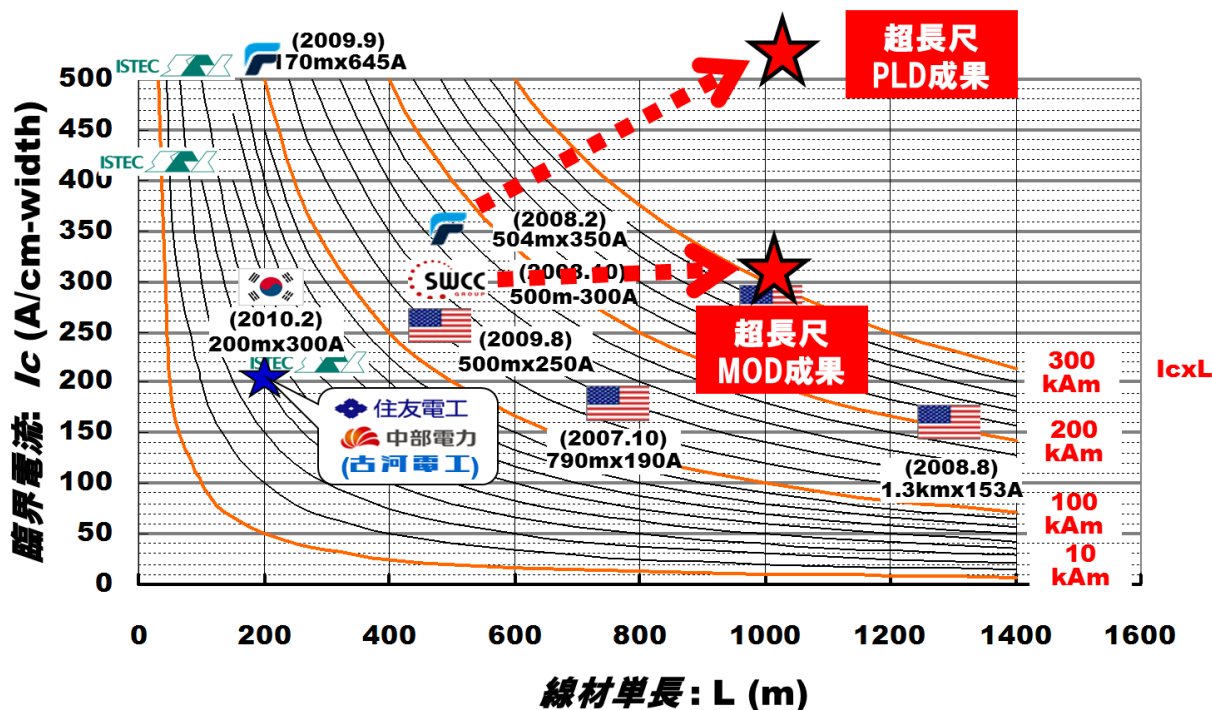


図 4-1 I_c - L マップ上における本項成果の位置付け

2. イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発

本項目では、上述の超長尺材料開発を行ったプロセスに比べて長尺実績は劣るものの、より原料収率が
高く、希少金属利用率等の効率向上が見込めるプロセスとしてレーザ CVD 法及び YAG レーザ PLD 法

を選択し、高原料収率の実証を目指した開発を行った。結果として、前項でまとめた通り設定された目標を大きく上回る成果を達成した。高原料収率値として得られた56%は、従来実績値（～30%）に比べて約2倍の値を示しており、これは希少金属使用量をさらに半減できる可能性を示していることを意味する。

更に、本項目で開発したレーザ CVD 法は、元来レーザ照射による反応促進効果を利用することから、原料収率の増大とともに高速化が期待できるプロセスである。一方、YAG レーザ PLD 法は、熱源としてレーザが YAG レーザで前項の開発で用いているエキシマレーザに比べて非常に安価に導入可能な装置であると共に、稼働に際して必要とするユーティリティも電機だけでメンテナンスも不要であるなどの特長をもつ。これらは何れも低コスト化を期待できる要素であり、本プロジェクトにおいてこれらのプロセスの有効性を実証したことは将来の低コスト複合材料への可能性を示したことになる。

3. イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発

本項目では、高性能で超長尺のイットリウム系複合材料が実現できたことを想定して、高温超電導回転機実用化促進を目的として、同材料の諸特性に適合した回転機概念設計を行うことにより、希土類希少金属使用量の低減効果の定量化を行うと共に、この回転機を実現するにあたって鍵となる要素技術として、コイル化技術と冷却技術を選択し、その実現性を検証した。結果として、従来実績である単純レーストラック型コイルを用いた回転機に比べて占積率の向上が図られる傘型コイルを導入した概念設計を行い、強度、発生磁場、伝熱等の成立性を確認すると共に、同回転機において同等の永久磁石回転機に比べて希土類希少金属使用量が1/130になることを証明した。さらに、小型ながら傘型コイルを試作し、劣化なく磁場発生が可能であることを確認し、サーモサイフォン型冷却装置での冷却能力を確認したことは、上記の概念設計による回転機の実現性を確認したことになる。また、高温超電導材料を用いた回転機において希土類希少金属使用量を低減させる技術は世界的なトレンド（図4-2参照）ではあるものの、その使用量低減効果を定量的に評価したのは世界でも初めてであり、世界の技術開発を先取りした成果であると考えられる。この定量評価結果を受けて、具体的な希土類希少金属の削減量を試算してみた。信越化学工業(株)の美濃和氏のレポート（2011.1 金属資源レポート p56 レア金属シリーズ「希土類磁石から見たレア金属と磁石応用の今後」）によると図4-3に示す通り、2010年で日本国内のNd系永久磁石の製造重量は14,000t程度であり、2005年からの増加率は約11%/年である。この増加率が維持されると仮定して2020年の国内製造重量を予測すると約40,000tとなる。またNd系永久磁石の歩留まりが65%程度であることを考えると原料投入量は約61,500tと見積もることができる。ここで、図4-4に示すNd系永久磁石の用途別比率(25%)に従ってモータ用のNd系永久磁石投入量を求めると約15,400tになる。Nd系永久磁石の希土類重量比率(～26.6%)より希土類(NdおよびDy)重量を算出すると、約4,100tとなる。2020年におけるイットリウム系超電導磁石回転機の置き換え率は明らかではないが、これを25%と仮定し、置き換えによる希土類使用量低減効果(1/130)による希土類

削減量は約 1,000t となり、これは 2005 年の Nd と Dy の年間輸入総量（約 4,000t）の 1/4 に相当する。

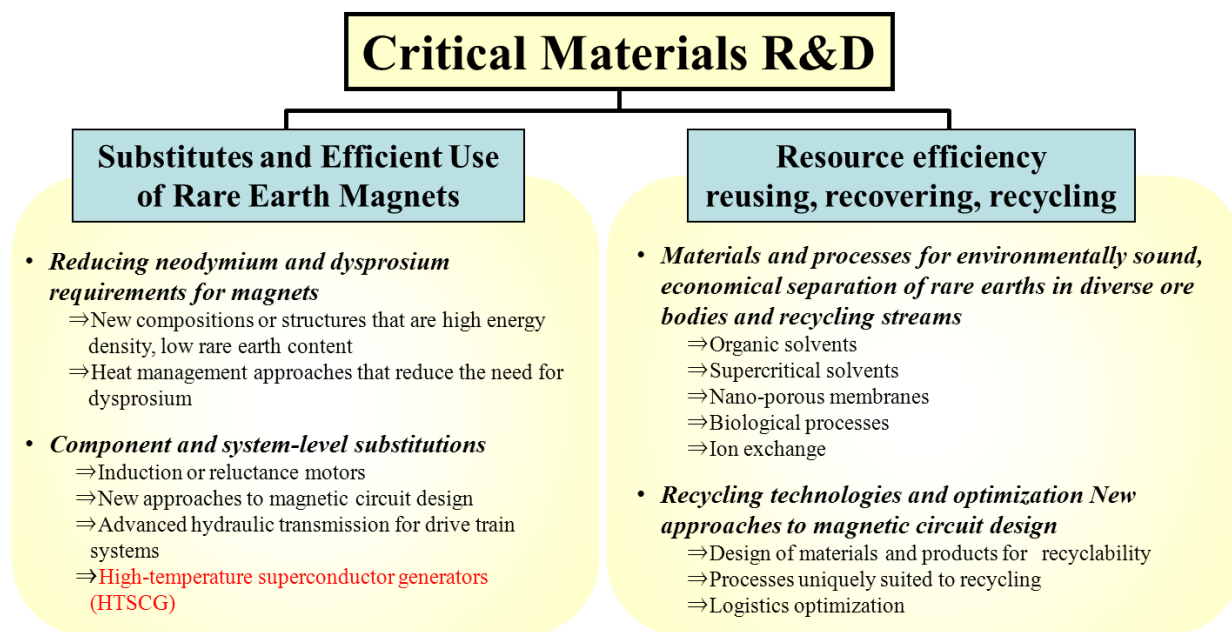


図 4-2 2011 年 10 月に米国ワシントン DC で行われる EU-Japan-US Workshop on Critical Materials R&D におけるセッション構成

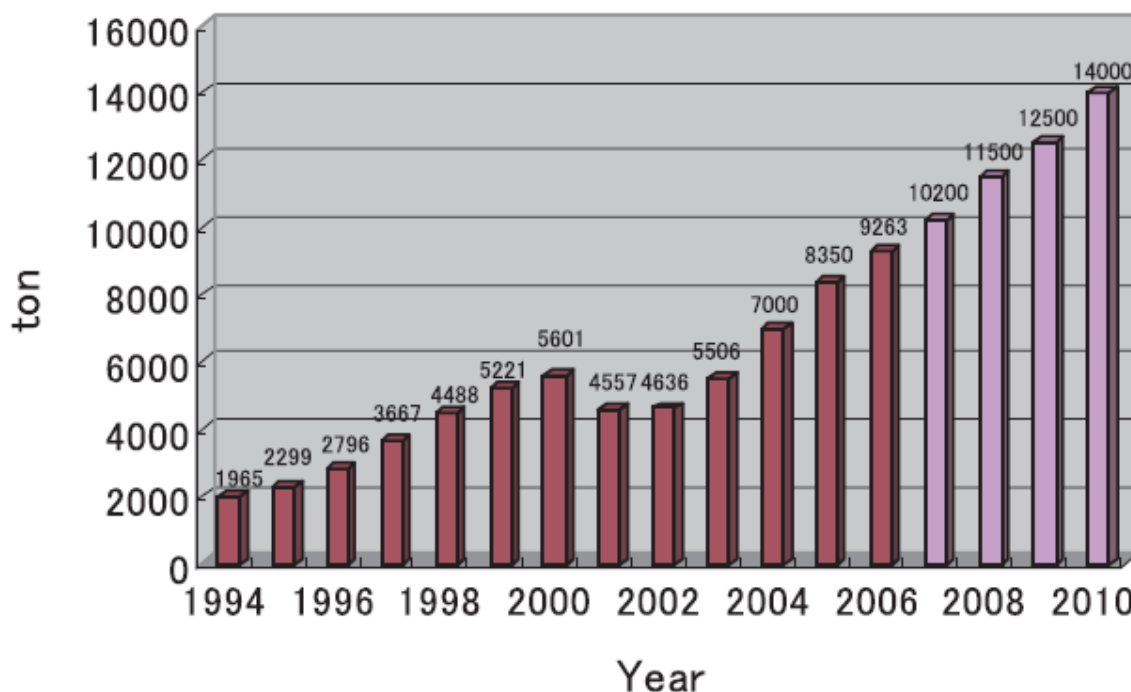


図 4-3 ネオジウム磁石の国内製造重量推移（出典：2011.1 金属資源レポート p56 レアメタルシリーズ「希土類磁石から見たレアメタルと磁石応用の今後」）

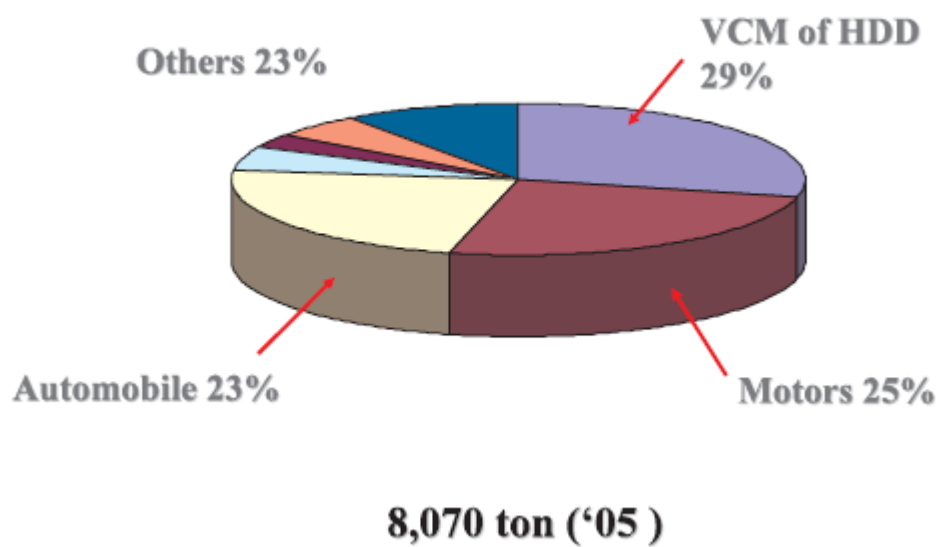


図 4-4 ネオジウム磁石の用途別比率（出典：2011.1 金属資源レポート p56 レアメタルシリーズ「希土類磁石から見たレアメタルと磁石応用の今後」）

IV 実用化の見通しについて

IV. 実用化の見通しについて

本プロジェクトの中核的役割を果たした産業用超電導線材・機器技術研究組合は、組合員の協同による超電導技術を利用した次世代の産業用機器及び当該機器に用いる線材の技術開発に関する試験研究その他組合員の技術水準の向上を図るための事業を行うことを目的として、平成 21 年 9 月 24 日に設立された技術研究組合である。本組合は、(株)フジクラ、昭和電線ケーブルシステム(株)、(財)国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)により構成され、平成 21 年 4 月 22 日に創設された新たな研究開発パートナーシップ制度(技術研究組合制度)に基づき設立したもので、同制度により研究組合自身が株式会社等に組織変更して、研究成果をそのまま共同で実用化できるようになるとともに、新設分割により会社を設立して、研究成果が得られたものから順次実用化することができることになった。本プロジェクトでは、効率的な永久磁石モータの代表的な大型モータ規模である 500kW 級モータをイットリウム系複合材料で代替する場合に必要とされる、300A/cm 幅(@77k, 自己磁場)の臨界電流(I_c)を有し、かつ少なくとも単長 1km 程度を実現する見通しがつくとともに、500 kW 級-1000 rpm 級の大容量回転機に対し、イットリウム複合材料による大型回転機の優位性を見通すことができたことを受けて幾つかの実用化のシナリオが考えられている。一つは、組合の発展系による会社組織により実用化するもので、組合構成メンバーである線材メーカーを中心とした、超長尺イットリウム系複合材料の実用化である。

組合構成メンバーであるフジクラは、超長尺イットリウム系複合材料のキーテクノロジーといえる結晶粒配向中間層作製技術である IBAD 法を開発し、その後、長尺線材化・高性能化・低コスト化の可能性を鑑み、IBAD/PLD 法を選択し、研究開発を進めてきた。同社は、いち早く長尺化、高特性化に成功し、「超電導応用基盤技術研究開発(第Ⅱ期)」プロジェクトにおいては、 I_c 値で 350A/cm 幅(@77K, 自己磁場)、502m を得るに至った。続いて「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」においては、歩留り改善、長さ方向の均質性改善に取り組んだ結果、100~300m 長の超電導線材に対して 70%を超える歩留りで製作できる目処が立つようになった。既に平成 20 年には小型ではあるが、超電導線製造装置の自社設備として導入し、実用化のための足がかりとして平成 21 年度より超電導線材の販売も開始し、イットリウム系超電導線材の機器応用を検討している研究機関等へ販売・提供している。本プロジェクト内では、上記技術の発展系として、ホットウォール型エキシマレーザ PLD 装置の改良により、超長尺イットリウム系複合材料の製造に成功した。この手法は、高速で安定した成膜条件を特徴としていることから、今後製造条件のさらなる検討を進め、線材の良品単長を改善や歩留改善によるコストダウンを図っていくことで、低コスト・安定製造技術レベルの向上が期待できることより実用化がより促進されると考えられる。さらに、本プロジェクトで見通しを得た超電導回転機市場への線材供給事業以外にも、1km 超える長尺線材は汎用性を有していることより大きな市場を獲得していくことも視野に入ってきたと言える。

同様に、本研究組合の構成機関で線材メーカーである、昭和電線ケーブルシステム(株)においては、平成 11 年より新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)の委託研究である「超電導

応用基盤技術研究開発（第Ⅰ期）」に参画し、国際超電導産業技術研究センター（ISTEC）と共同で TFA-MOD 法によるイットリウム系複合材料の線材開発に着手した。続く平成 15 年からは「超電導応用基盤技術研究開発（第Ⅱ期）」においても、イットリウム系複合材料の長尺線材作製に適したバッチ式大型本焼炉の開発を行い、長さ 500m、1cm 幅で 310A(@77K、自己磁場)の特性を有する線材の作製に成功した。バッチ式熱処理の特長は、作製する線材を電気炉に設置して一括の熱処理を行うため、短時間で線材を作製することが可能であり、工業生産性に優れていることを特長としている。本プロジェクトにおいては、これらの知見に基づいて超長尺イットリウム系複合材料の製造に必要な装置開発を行い、鍵となる技術である、炉設計技術、ガス制御技術等のノウハウを習得し、今回のプロジェクトにおいて平均 300A/cm 幅を有し、1km 以上の超長尺線材作製が見通せる成果を達成することができた。今後は、既に導入した自社設備による実用化を進めるとともにフジクラ同様に 1km 超長尺超電導線の安定製造、極低コスト技術のレベルの向上を図ることで、低コスト・超長尺線材の用途として回転機のみならず広い意味での超電導市場の形成に対し線材を供給すること実用化促進に貢献していくことになる。

一方、希少金属利用率等の効率向上技術開発及び超電導回転機要素技術の実用化に関しては、組合構成機関である(財)国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)が中心となった展開が考えられる。同財団は、過去 20 年以上に渡り超電導技術の開発にあたり、単独あるいは共同研究体を組織し、広い範囲にわたり多くの成果を挙げている。それぞれの共同研究体においては、研究の遂行のみでなく、研究体の中枢として研究方針・内容などの策定を行い、自身の成果を挙げるのみではなく、マネジメント機能も発揮し、共同研究体としての成果も出している。当財団では、エンドユーザーをはじめとする多くの会員企業との連携により実用化に繋げていくことが考えられる。具体的には、希少金属利用率等の効率向上技術を大学と共に線材作製プロセス開発を推し進め、核となるプロセス技術を線材メーカーへ移管することで実用化に貢献する。また、一方で、超電導回転機の実用化に関しては、継続的な研究開発を経て実用化に向かうものと考えている。本プロジェクトにおいては、概念設計による超電導回転機の有用性を証明すると共に要素技術によりそのキーテクノロジーの実現性の確認を行ったところである。ここで、イットリウム系超電導回転機が希土類の使用量削減に効果的なだけでなく、容積及び重量低減にも有効であることを定量的に示したことで、今後の開発の意義を与えることになり、実用化を促進したと考えられる。今後は、これらの概念を統合し、実際に超電導回転機の試作、実証を行っていくことになる。経済産業省による技術戦略マップによれば、産業用電動機、船用モータ等で 2011 年ごろには超電導回転機が世の中に出現することになっている。米国では、Bi 系超電導線材を用いて早くから回転機の研究開発が継続しており、この技術戦略マップに大きく遅れることなく高温超電導大型回転機が出現し、長尺イットリウム系超電導線材を用いた回転機も数年後には続いて現れるものと考えられる。一方、日本においては、米国に対し数年の遅れをとることになるが、その時期は継続した研究開発の規模に強く依存し、例えば国家プロジェクト等で精力的に開発を実施することにより実用機導入が促進されるが、民間の自力開発に依る場合は、東日本大震災後の経済状況等も勘案すると、長期間を要することも考えられる。

現在のところ、本プロジェクトの後継プロジェクトの位置付けではないものの、開発ロードの中では不可欠な実用規模コイルの試作（レトロフィット型電磁石の試作）を主眼とした「希少金属代替・削減技術実用化開発助成事業（イットリウム系超電導回転機用電磁石の開発）」が平成23年3月から約1年間の期間で始まっている。ここでは、事業を積極的に意識した開発グループにより助成事業（一部補助）により事業が進められている。このようにおり、大局的には継続的な研究開発は行われている一方で、その後の展開は未だ決まっていない。しかしながら、顧客要求である省エネ、低コスト、小型軽量化に対応し、また近年世界的目標であるCO₂削減に対しても効果があるため現状高効率・小型化が図れる永久磁石回転機が市場に出始めていることから、今後この分野での上記市場要求が高まり物量の拡大が期待される。一方で、具体的な実用化の道筋としては、研究組合及びその構成機関である(財)国際超電導産業技術研究センターが中心となってエンドユーザを含めた企業へさまざまな方策で普及啓蒙活動を行い、組合参画も含めた開発体制構築を図り、上記の継続研究開発を推進し、超電導市場の開拓、拡大に努めるとともに、より実用的な段階の開発を強者連合で実施することにより実用化へつなげる見通しが得られている。