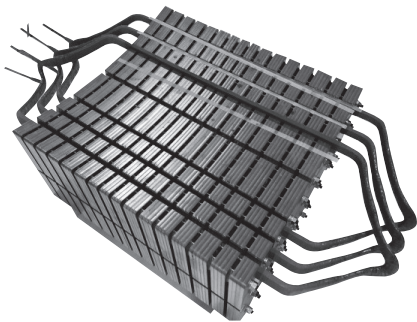


高熱伝導コイル絶縁の開発

佐々木圭太 Keita Sasaki
 平 健一 Ken'ichi Taira
 白須達也 Tatsuya Shirasu
 小川裕治 Yuji Ogawa

キーワード 絶縁技術, 高圧回転機, 固定子, 巻き線, 水車発電機

概要

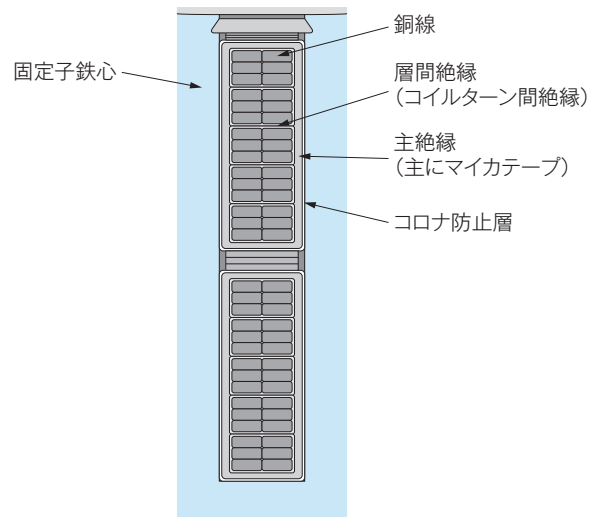


高熱伝導絶縁コイル

安定的でCO₂を排出しないクリーンな再生可能エネルギーである水力を利用した水車発電機の更新及び更新時の出力増強の需要が増加している。とりわけ固定価格買取制度（FIT）の対象となる中小水力の活発化は著しく、当社は出力増加・小形化・高効率化のための発電機固定子コイル絶縁を開発してきた。熱解析技術及び高熱伝導材料評価に基づいたコイル製作技術によって、従来コイル絶縁の約2倍の熱伝導率を持ち、熱抵抗を大幅に低減した高熱伝導コイル絶縁の要素技術を確立した。

1 まえがき

当社は、高度経済成長期に水車発電機を多数納入してきた。現在、その多くは運転開始から50年以上が経過し、更新時期を迎えつつある。水力発電は、安定的でクリーンな再生可能エネルギーである。とりわけ固定価格買取制度（FIT）の対象になる中小容量は、更新及び更新時の出力増強の需要が増加している。発電機は、運動エネルギーを受けて回転する回転子と、電力を発生させる固定子から成る。一般に固定子に収められたコイルの高電流密度化で、出力密度を高めると損失発熱量の増大につながる。そのため、いかに固定子の冷却を効率よくできるかが課題となる。第1図に固定子スロット内のコイル断面模式図を示す。固定子コイルは、層間絶縁層・主絶縁層・コロナ防止層で構成された絶縁層で覆われている。当社の水車発電機の冷却方式は空冷



第1図 固定子スロット内コイル断面模式図

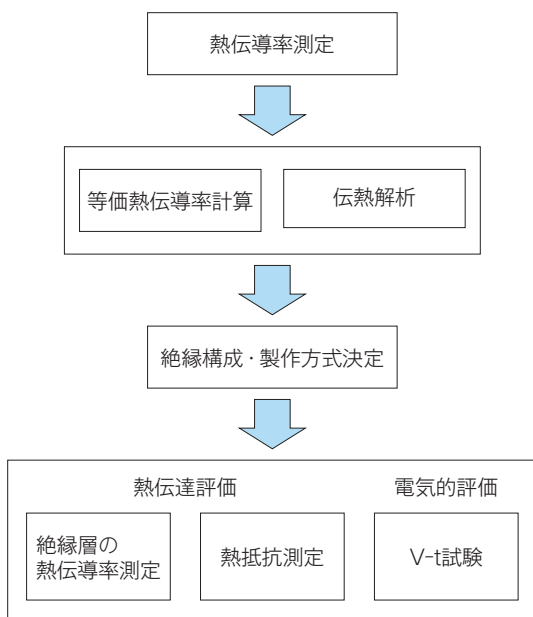
固定子スロットに挿入されたコイル断面を示す。コイル絶縁は、主に層間絶縁・主絶縁・コロナ防止から構成される。

式で、コイル導体で発生する熱は絶縁層を介して固定子ダクトを通る冷却風による熱拡散と、固定子鉄

心への熱伝達によって冷却される。しかし、絶縁層の熱伝導率は固定子鉄心の1/1000にも満たないため、コイル表面又は固定子鉄心への熱伝達を阻害している。そのため、絶縁層の熱伝導率を向上することによって、コイル導体で発生した熱をコイル表面又は固定子鉄心へ効率よく伝達することでコイル導体温度を低下させることができる。本稿では、水車発電機出力増加・高効率化を目指した発電機固定子コイル絶縁の高熱伝導化に関する取り組みを紹介する。

2 高熱伝導コイル絶縁開発

第2図に高熱伝導絶縁開発の流れを示す。まず、従来構成材料と新規構成材料の熱伝導率測定の結果から、等価熱伝導率計算と伝熱解析を用いて新規構成材料の効果を確認し、絶縁構成と製作方法を決定した。次に、絶縁層の熱伝導率の確認、熱抵抗測定によって固定子鉄心への熱伝達の定量的な評価と長期課電試験（V-t試験）による電氣的評価を実施した。



第2図 高熱伝導絶縁開発の流れ

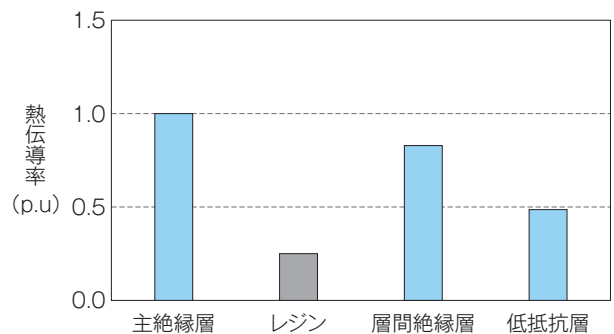
開発の流れを示す。絶縁層を構成する材料の熱伝導率測定と製作方式の検討から、等価熱伝導率計算・伝熱解析によって絶縁構成を決定し、熱伝達評価・電氣的評価を実施したことを示す。

2.1 熱伝導率と製作方法

2.1.1 構成材料の熱伝導率

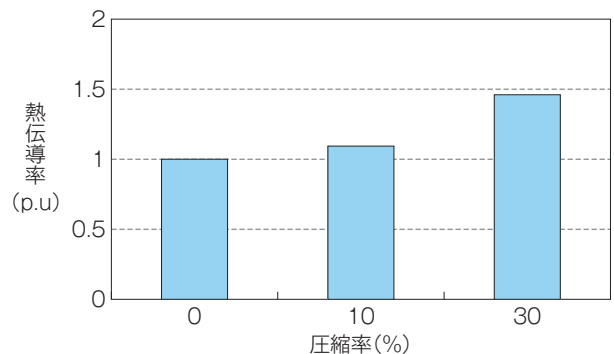
等価熱伝導率計算と伝熱解析に必要となるため、絶縁層を構成する層間絶縁層・主絶縁層（主にマイカテープ）・コロナ防止層、さらに絶縁層全体に含浸されるレジンの熱伝導率を測定した。第3図に各層とレジンの熱伝導率を示す。レジンの熱伝導率が最も低く、主絶縁層の約1/4しかない。レジンには、絶縁層全体に含まれるため、絶縁層の熱伝導率への影響が大きいと推察される。

第4図に主絶縁層の圧縮率と熱伝導率の関係を示す。レジン量が絶縁層の熱伝導率に与える影響を表している。圧縮率が高い（レジン量が少ない）ほど熱伝導率が高く、30%まで上げると熱伝導率が約1.5倍に向上した。このように、絶縁層に含浸されるレジン量を低減することで熱伝導率が向上することを確認した。



第3図 絶縁層を構成する各層とレジンの熱伝導率

絶縁層を構成する各層・構成材料の中でレジンが最も熱伝導率が低いことを示す。



第4図 主絶縁層の圧縮率と熱伝導率の関係

圧縮率が高い（レジン含有量が少ない）ほど熱伝導率が高いことを示す。

2.1.2 固定子巻線の製作方式

発電機の固定子巻線の製作方法には、大きく分けて以下の二種類がある。

- (1) 全含浸方式 レジンを含まないコイルを固定子鉄心に挿入した後、固定子鉄心と一体でレジン真空加圧含浸し、加熱・硬化させて固定子巻線を製作
- (2) ヒートプレス方式 レジンを含んだコイルをヒートプレス機によって1本ごとに圧縮・加熱・硬化し、固定子コイルを製作した後に鉄心に挿入し固定子巻線を製作

全含浸方式は、レジンで含浸・硬化する前の状態で固定子鉄心に挿入するため、高圧縮で挿入すると絶縁層が損傷する。そのため、最大でも数%の圧縮が限界である。

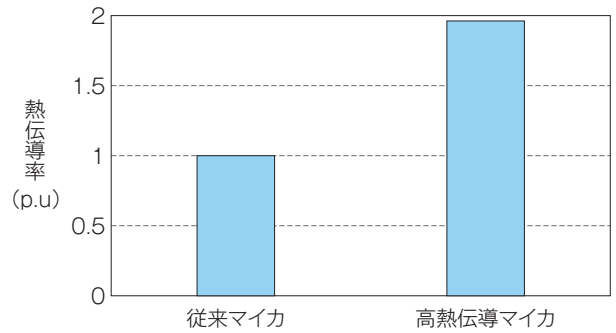
それに対し、ヒートプレス方式は絶縁層をヒートプレスによって圧縮・熱硬化するため、全含浸方式に比べ、絶縁層を高圧縮しレジン含有量を低減できる。熱伝導率測定の結果から、ヒートプレス方式を採用して絶縁層の高熱伝導化を図ることとした。

2.2 等価熱伝導率計算による絶縁構成検討

ヒートプレス方式における構成材料の熱伝導率を測定し、結果から2倍の熱伝導率を達成できるマイカテープの熱伝導率を等価熱伝導率計算で算出したところ、約2.5倍以上が必要であることが分かった。従来のマイカテープ（従来マイカ）ではこれを達成することが困難であるため、主絶縁の材料として高熱伝導無機フィラーを含んだ「高熱伝導マイカテープ（高熱伝導マイカ）」に着目した。

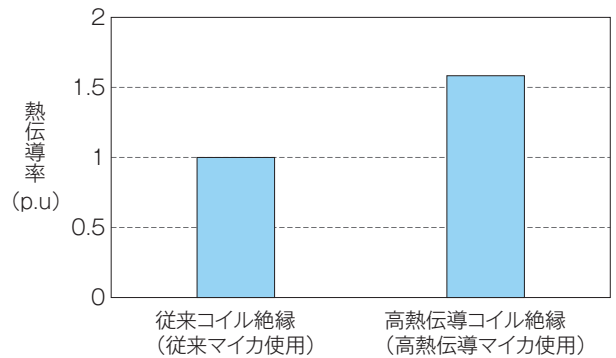
第5図に従来マイカと高熱伝導マイカの熱伝導率測定結果を、第6図に従来マイカと高熱伝導マイカの絶縁層としての熱伝導率測定結果を示す。高熱伝導マイカは主絶縁層として従来マイカの約2倍の熱伝導率を示し、絶縁層としては約1.6倍の熱伝導率を示した。ここで、算出された絶縁層の熱伝導率から絶縁厚みによる熱抵抗を求めた。

第7図に等価熱伝導率計算による絶縁層の熱抵抗算出結果を示す。高熱伝導コイル絶縁は、従来コイル絶縁に比べ従来絶縁厚みで熱抵抗が40%低下し、さらに絶縁厚みを30%減少することで熱抵抗が



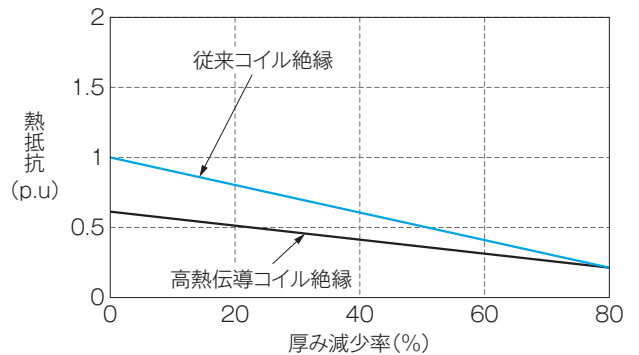
第5図 従来マイカと高熱伝導マイカの熱伝導率測定結果

高熱伝導率の熱伝導率が従来マイカの約2倍であることを示す。



第6図 従来マイカと高熱伝導マイカの絶縁層としての熱伝導率測定結果

主絶縁層に高熱伝導マイカを使用した絶縁層は従来マイカを使用した絶縁層と比較し、約1.6倍の熱伝導率であることを示す。



第7図 等価熱伝導率計算による絶縁層の熱抵抗算出結果

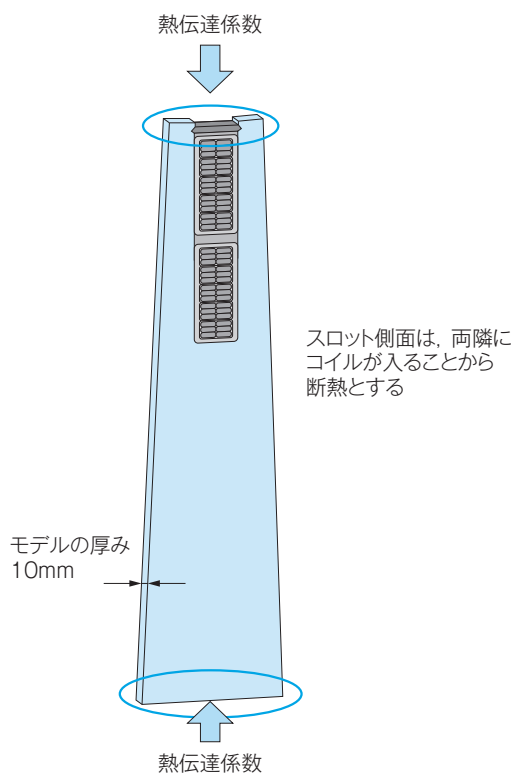
等価熱伝導率計算結果から主絶縁の厚みに対する熱抵抗の変化を示す。

50%以上低下する。それに比べ、従来コイル絶縁は絶縁厚みを30%減少しても熱抵抗が30%までしか低下しない。

2.3 伝熱解析によるコイル温度低減効果

熱伝導率測定によって伝熱解析に必要な各材料の

熱伝導率を取得することができた。そこで、固定子部分モデルによる伝熱解析で、高熱伝導コイル絶縁適用時のコイル温度低減効果を確認した。第8図に伝熱解析モデルを示す。伝熱解析では1スロットをモデル化し、固定子鉄心の内径表面と外径表面に熱伝達係数を与えた。径方向は隣のコイルと隣接す



第8図 伝熱解析モデル

固定子の1スロットをモデル化して解析したことを示す。

第1表 伝熱解析結果

従来コイル絶縁と高熱伝導コイル絶縁の伝熱解析の結果を示す。

絶縁構成	従来コイル絶縁	高熱伝導コイル絶縁	高熱伝導コイル薄厚絶縁 (30%低減)
コンター図			
コイル温度 (°C)	78.1	68.3	66.8
コイル温度差 (°C)	—	9.8	11.3

るため断熱の状態であると仮定した。解析は、以下の4モデルで実施した。

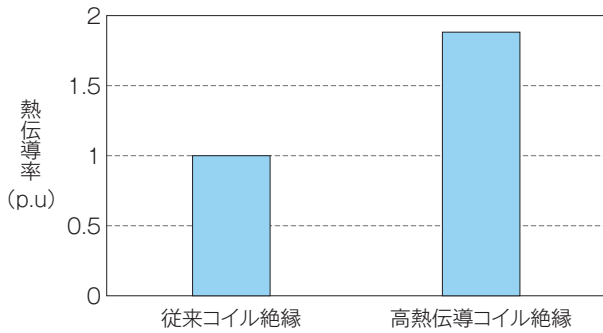
- (1) 全含浸コイル
- (2) 従来ヒートプレスコイル絶縁
- (3) 高熱伝導ヒートプレスコイル絶縁
- (4) 高熱伝導ヒートプレスコイル薄厚絶縁 (絶縁厚み30%減)

第1表に伝熱解析の結果を示す。従来コイル絶縁に比べ高熱伝導コイル絶縁は約10K、高熱伝導コイル薄厚絶縁は約12K低い結果となり、十分な効果が見込まれる。

2.4 絶縁層の熱伝導率測定

高熱伝導マイカテープと従来マイカテープの熱伝導率を比較するため、それぞれのコイル絶縁構成の熱伝導率を測定した。

熱伝導率の測定方法には、大別して定常法と非定常法がある。定常法は試料に定常的な1方向の熱流を作り熱伝導率を測定する。非定常法は非定常的に試料を加熱して温度応答を測定することで熱伝導率を測定する。今回の熱伝導率測定は発電機運転状態での熱伝導率を評価するため、定常法で測定した。第9図に絶縁層の熱伝導率測定結果を示す。試験片は実際の層構造を模擬した。測定の結果、高熱伝導コイル絶縁は従来コイル絶縁と比べて約1.9倍の熱伝導率を持つことを確認した。



第 9 図 絶縁層の熱伝導率測定結果

高熱伝導コイル絶縁は従来コイル絶縁の約 1.9 倍の熱伝導率を持つことを示す。

2.5 熱抵抗測定

固定子コイルが固定子に挿入された状態を模擬し、コイル導体-固定子鉄心の熱抵抗を測定することで高熱伝導コイル絶縁の冷却性能を定量的に評価した。熱抵抗は式(1)のとおりである。

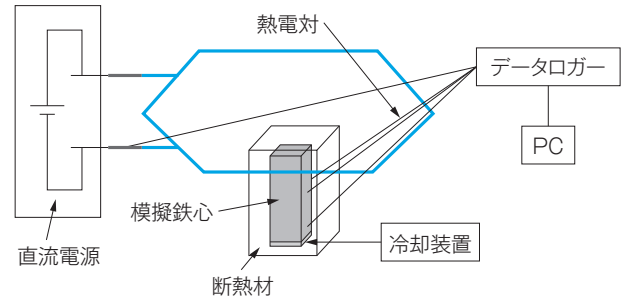
$$R_{th} = \frac{1}{K \times A} \dots\dots\dots(1)$$

熱抵抗は、個体内部の熱抵抗と個体間の接触熱抵抗に分けられ、接触熱抵抗に関しては、金属に対して適用できる式(2)の橋の式⁽¹⁾がある。絶縁材料は高分子樹脂及び無機材料で構成されるが、物理的な接触状況は金属と相違ないと考え、この式を適用した。

$$K = \frac{1.7 \times 10^5}{\frac{\delta_1 + \delta_0}{\lambda_1} + \frac{\delta_2 + \delta_0}{\lambda_2}} \times \frac{0.6 \times P}{H} + \frac{1 \times 10^6 \times \lambda_f}{\delta_1 + \delta_2} \dots\dots(2)$$

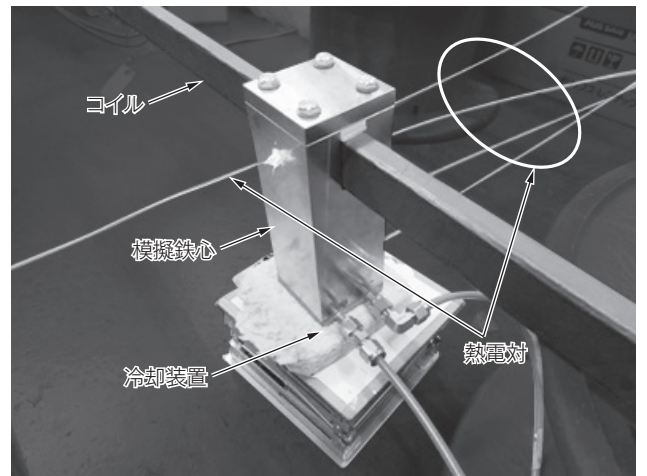
- R_{th} (K/W) : 熱抵抗
- K (W/m²·K) : 接触熱コンダクタンス
- δ_1, δ_2 (μm) : 面粗さ
- δ_0 (μm) : 接触相当長さ (23μm)
- λ_1, λ_2 (W/m·K) : 各材料の熱伝導率
- λ_f (W/m·K) : 空隙内部の熱伝導率
- P (MPa) : 接触圧力
- H (HB) : 柔らかい方の材料のブリネル硬さ

第 10 図に熱抵抗測定装置概略図を、第 11 図に模擬鉄心 (温度計測部) を、第 12 図に模擬鉄心内部模式図を示す。素線に電流を流すことで発生した熱は左側面、右側面、溝底面の 3 方向へ分散し、断



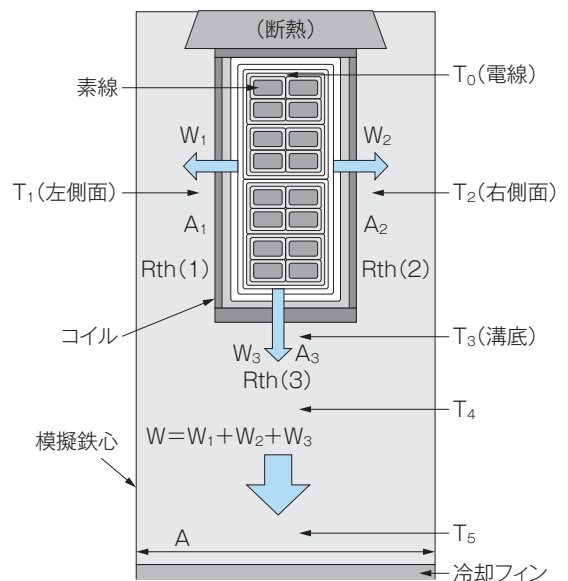
第 10 図 熱抵抗測定装置概略図

熱抵抗測定装置の概略を示す。コイルに熱電対を埋め込んだ模擬鉄をはめ、直流電源でコイルを加熱することでコイルと鉄心の温度差を測定できる。



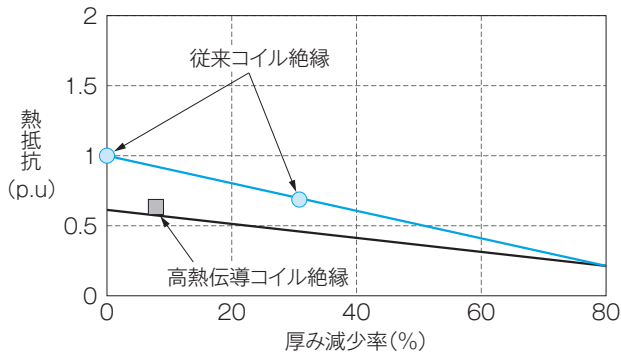
第 11 図 模擬鉄心 (温度計測部)

模擬鉄心を示す。模擬鉄心の底部は冷却装置につながっており、各所に熱電対が埋め込まれている。



第 12 図 模擬鉄心内部模式図

模擬鉄心の断面模式図を示す。コイル内部と模擬鉄心の各所に埋め込んだ熱電対で温度を測定し熱抵抗を求める。



第13図 実測熱抵抗と算出した熱抵抗の比較

従来絶縁と比較し高熱伝導絶縁は熱抵抗が40%低下する。また算出結果ともほぼ一致する。

第2表 長期課電試験規格

固定子コイルの長期課電試験の規格を示す。

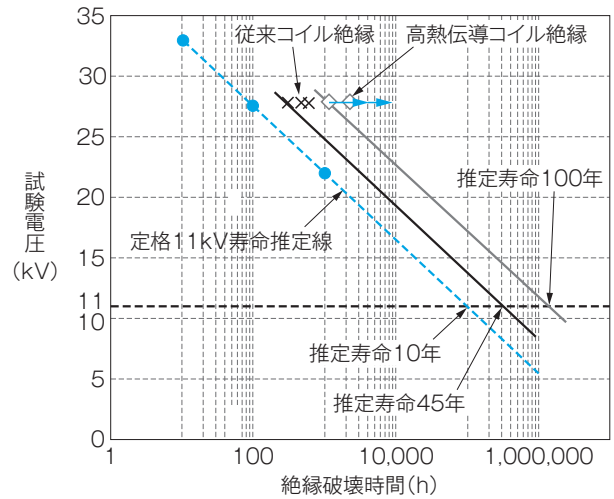
規格	試験仕様
IEC 60034-18-32	下記三条件結果から寿命推定 (1) 絶縁破壊時間：about 100h (2) 絶縁破壊時間：about 1000h (3) 絶縁破壊時間：about 5000h
IEEE 1553	Schedule A : 2.17Un-400h以上 Schedule B : 2.53Un-250h以上 Un : 定格電圧

熱材で覆われているため、最終的には合成され冷却フィンへ放熱される。総熱抵抗は左側面、右側面、溝底面の熱抵抗を合成したもので、それらを測定することで冷却性能を定量的に評価することができる。

第13図に実測熱抵抗と算出した熱抵抗の比較を示す。高熱伝導コイルの熱抵抗は、従来コイルより約40%低下した。また、従来コイル絶縁の絶縁厚みを30%減少すると熱抵抗は30%低減した。これは、等価熱伝導率計算から算出した熱抵抗ともほぼ一致する。

2.6 課電試験

高熱伝導コイル絶縁の絶縁耐力を確認するため、長期課電試験を実施した。長期課電試験はIEC60034-18-32とIEEE1553で、それぞれ推奨試験方法がある。第2表に長期課電試験の規格を示す。今回の試験では、アメリカの規格であるIEEE1553-Schedule Bに準拠した。



第14図 長期課電試験結果

定格11kV絶縁の寿命10年の推定線から、従来コイル絶縁は約45年の推定寿命に対し、高熱伝導コイル絶縁は100年の推定寿命を持つと予測できる。

第14図に長期課電試験結果を示す。従来コイル絶縁は600h未滿で全て破壊し、最低値は300hである。それに対し高熱伝導コイル絶縁は1000hを超えても1本も破壊せず、中には2000hを超えて破壊しないものもある。高熱伝導コイル絶縁は従来コイル絶縁と比較し2倍以上の課電寿命を持つ可能性がある。

3 むすび

高熱伝導マイカテープを主絶縁層に使用し、ヒートプレス方式で固定子コイルを製作することで、従来の固定子コイルと比べ熱伝導率が約2倍に向上し、熱抵抗を約40%低下できることが分かった。

今後は、絶縁厚を30%低減したコイルで同様に試験し、更なる高性能化を図るとともに、信頼性試験を実施し、製品適用化を目指して開発を進めていく。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《参考文献》

- (1) 国峰尚樹編：「電子機器の熱流体解析入門」, 日刊工業新聞社, 2009, p.170

《執筆者紹介》



佐々木 圭太
Keita Sasaki

基盤技術研究所
高圧回転機の絶縁開発に従事



白須 達也
Tatsuya Shirasu

基盤技術研究所
高圧回転機の絶縁開発に従事



平 健一
Ken'ichi Taira

基盤技術研究所
高圧回転機の絶縁開発に従事



小川 裕治
Yuji Ogawa

基盤技術研究所
高圧回転機（発電機）の基盤開発に従事
