マイカ・アルミナ複合絶縁材の高温絶縁特性

正員	石池	田政	義	(電力中研)
正員	池	田易	行	(電力中研)
非会員	猶	原信	幸	(電力中研)
正員	三	井久	安	(東 芝)
正員	熊	沢良	二	(東 芝)
非会員	黒	木敏	高	(東 芝)

Dielectric Properties of Mica-Alumina Combined Insulation at High Temperatures

M. Ishida, Member, Y. Ikeda, Member, N. Naohara, Non-member (Central Research Institute of Electric Power Industry),

H. Mitsui, Member, R. Kumazawa, Member, T. Kuroki, Non-member (Toshiba Corp.)

Development of sodium immersed type Electro-Magnetic Pumps (EMP) is expected to improve reliability, safety, maintainability, and construction cost of FBR compared with the conventional mechanical pumps. In order to realize the EMP, establishment of a high-temperature-resistant electrical insulating system is indispensable.

We selected a mica-alumina combination for the insulating system at temperatures higher than 500 °C. Using this insulating system, an ageing pre-test was performed. The ageing condition was to apply 1.5 kV AC voltage in the nitrogen atmosphere at 550 °C for 4000 hours. The dielectric properties before and after the ageing were measured to understand the tendency of temporal change in the ageing.

In this result, the dielectric performance after the ageing was improved compared with the initial performance. The curious phenomenon was clarified to be caused by a decrease of organic component in the insulation, which remained owing to incomplete burning. Also the possibility of the thermal runaway was considered to be higher as a dielectric breakdown mechanism.

キーワード：高速増殖炉，電磁ポンプ，無機質絶縁材料，マイカ，絶縁特性

1. ま え が き

次世代のエネルギー供給の要になると期待される高速増殖炉（FBR）を実用化するためには、高い安全性と信頼性に加え経済性を向上させる必要がある。この目標達成の有望な革新技術として、ナトリウム（Na）浸漬形無冷却電磁ポンプ^①がある。Na浸漬形無冷却電磁ポンプはFBRの冷却材であるNaの大きな導電率を利用し、リニアモータと同じ原理で、外部から与える移動磁界とそれにより生じるNa中の誘導電流で発生する磁界との相互作用によってポンプ動力を得るものである。従来の機械式ポンプと比較すると可動部分がなく、安全性、信頼性の面で優れている。またNa浸漬形無冷却電磁ポンプは、コイル、鉄心等の電気部品をケーシングで完全密封し、Na中に浸漬して無冷却で使用するによって、①自由液面を必要としないため電磁ポンプ設置場所の自由度が大きい（原子炉冷却系のコンパクト化）、②コイル部から発生した熱は、Na接液部表面から周囲のNaに伝わり回収できる（プラント効率の向

上）、③強制冷却ファン等の動的機器が削減でき、また強制冷却用電源・制御系も必要としない（ポンプシステムの簡素化）等、経済的にも大きな効果をもたらすことが期待されている。

しかし、FBRシステムでの使用環境は極度に厳しく、電磁ポンプは安全を見込んだコイル設計使用温度600℃という高温で、かつ最高 $10^5 \text{ n/cm}^2 \text{ s}$ という高速中性子線と5000Gy/hという高放射線照射雰囲気下で20～40年間にわたり安定して動作することが必要である。それゆえ、電磁ポンプ用コイルを構成する電気部品は、このような高温・高放射線に耐えるものでなければならない。一方、電気絶縁材料はこのような高温で長期間使用された実績がなく、適切な候補材料を選定することが重要である。このような背景から、著者らはマイカを主絶縁材料とする無機材料の絶縁構成を提案し、高温での課電実験を行い、長期耐久性に関する研究を行っている。

本論文では、Na浸漬形無冷却電磁ポンプのコイル絶縁用に開発した無機ポリマーを接着剤とし、アルミナクロスで

裏打ちした集成マイカおよびはがしマイカから成る2種類の絶縁構成について、高温で長期課電実験を行い、各種非破壊絶縁特性および絶縁破壊電圧の経時変化を調べ、高温での絶縁破壊電圧を支配する因子、絶縁破壊機構および非破壊絶縁劣化診断の可能性について検討したので報告する。

2. 実験試料およびエージング実験

<2・1> 実験用バーコイル試料 主絶縁材料は軟質集成マイカと軟質はがしマイカの2種類とした。はがしマイカは集成マイカに比べりん片すなわち構成マイカ原料単体が大きく、すべりに対する裕度が大きく熱膨張上有利であり、大形コイルへの適用が期待される。だが、資源的に乏しく値段が高い難点がある。いずれの種類も0.1mm厚アルミナクロスで裏打ちされた25mm幅テープを使用した。マイカテープの厚さは、集成マイカの場合0.26mmで、はがしマイカの場合0.23mmである。

実験試料には、電磁ポンプコイルの絶縁基本構成を模擬し、絶縁劣化を引き起こす主要因を解析できるようにできるだけ単純な形状のバーコイルを用いた。実験用バーコイル試料の構造を図1に示す。絶縁厚さが3.0mmとなるようにマイカテープを重ね巻き、最外層はアルミナクロステープで補強してある。マイカテープは無機化シリコン系バインダで固定した。仕上りでの平均絶縁厚さは、集成マイカ試料が2.99mmで、はがしマイカ試料で2.70mmであった。異なる試料間の絶縁厚さのばらつきは大きくて±0.1mm程度であった。他方、導体には実際のアルミナ分散強化銅の代用に、表面をニッケルメッキした純銅を使用した。導体は12mm角の角棒を用いており、角部は0.8mmの曲率半径としてある。酸化劣化防止および内部放電の発生抑止のために接地電極には銀箔を用い、電極内での絶縁破壊実験が可能のように沿面絶縁距離を延伸した上接地電極端にストレスコーンを装着した。さらに端部放電および電極間でのフラッシュオーバーを抑えるために、絶縁物としてアルミナクロステープに無機化シリコン系バインダを塗布しながら巻きつけて全体を被覆した。バーコイル試料形成後に空気中にて600℃で6時間の焼成を行った。

なお、バーコイル試料は製作時の不均一の影響を排除するために、同じロットの材料を用いて、同一の条件で製作するよう配慮した。

図1 長時間絶縁劣化評価実験用バーコイル試料
Fig. 1. Bar-coil specimen for long term insulating performance test.

図2 エージング実験状況
Fig. 2. Ageing experimental view.

<2・2> エージング条件 自己冷却形電磁ポンプは約350℃のNaに浸漬され、コイルのジュール発熱および裕度を考慮すると絶縁材は550℃以上の耐熱性能⁽¹⁾が要求される。そこで、今後予定しているより高温での長期耐久性を評価するための手がかりを得る目的で、今回はエージング温度条件を550℃とした。

電圧としてはポンプ効率の観点から1kV強で10～20Hzの低周波が用いられる⁽²⁾と見積もられており、1.5kVで実験装置の都合により50Hzで課電することとした。高い周波数での代用は、ピーク電圧の印加回数や誘電損の増加から、一般に劣化をより促進する。

雰囲気は窒素で、エージング実験中は酸素濃度が常に1%以下となるようにパージ供給量を保持した。

高温課電実験槽内の様子を図2に示す。エージング時間は2000時間および4000時間とした。また、比較のために無課電条件で2000時間についてのみエージングを行った。新品およびエージング後の試料について、非破壊絶縁特性と絶縁破壊特性を測定して絶縁性能の変化を調べた。エージング1条件についての試料数は2本とした。

3. 絶縁性能の推移

<3・1> 絶縁特性の測定項目と測定方法 各エージング条件に対する絶縁破壊特性の測定温度を550℃、650℃、800℃の3条件として、定常状態よりさらに高温での絶縁特性を計測した。測定は下記項目について行った。それぞれの測定項目の測定方法と計測条件の概要を次に述べる。

(i) 絶縁抵抗 直流1kVにて測定し、印加後1分値を計測値とした。

(ii) 静電容量, (iii) $\tan \delta$ 自動シェーリングブリッジ (2kV, 50Hz) およびLCRブリッジ (1kHz) を用いた。但し、2kV, 50Hzでの $\tan \delta$ は、ここで用いた自動シェーリングブリッジでは10.23%以上が測定できなかったため、静電容量Cおよび交流電流 I_{ac} の計測値から次式、

$$\tan \delta = \sqrt{\left(\frac{I_{ac}}{\omega CV}\right)^2 - 1} \quad \dots \dots (1)$$

V (印加電圧) = 2kV,

ω (角周波数) = $2\pi \times 50\text{Hz}$

で見積もった⁽³⁾。

(iv) 交流電流 交流2kV, 50Hzを印加した時に接地線に流れる洩れ電流を測定した。

(v) 部分放電開始電圧 交流電圧を徐々に昇圧しながら放電が発生する電圧を測定した。

(vi) 絶縁破壊電圧 0.1kV/sの昇圧速度で、試料が絶縁破壊を起こすまで交流電圧を直線的に上昇させた。

エージング条件について用いた2試料の平均値を特性値とした。結果として測定値のばらつきは比較的小さく、バークコイル試料がほぼ均一に製作されていたことに加え、高分子絶縁に比べてかなり低い絶縁性能で微妙な材料の影響を受けにくいことが伺える。

<3・2> 絶縁特性の経時変化 非破壊および破壊に関する絶縁特性の経時的な変化の様子を把握するために、絶縁破壊電圧測定時の温度条件(550℃, 650℃, 800℃)での測定値を代表値として、経時変化の傾向を調べる。

(i) 絶縁抵抗 図3に絶縁抵抗の経時変化を示す。初期に比べ2000時間には絶縁抵抗がやや増加している。2000時間から4000時間まではほとんど変化していない。集成マイカよりはがしマイカ試料で顕著な増加が認められる。

(ii) 静電容量 2kV, 50Hzにおける静電容量の変化を図4(a)に示す。測定温度550℃では全体的にほぼ減少する傾向にある。測定温度650℃では、初期には試料の絶縁抵抗が小さく測定器であるシェーリングブリッジのバランスが取れず測定できなかったが、1.5kV課電試料の場合2000時間から4000時間にかけて増加している。試料による変化の違いは大きくない。

1kHzでの静電容量の変化を図4(b)に示す。はがしマイカ試料で初期から2000時間にかけて大きな減少があり、測定温度が高温になるほど変化の度合いが大きくなっていくが、その後4000時間までではほとんど変動はないようである。他方、集成マイカ試料では経時変化がほとんど認められない。

図3 絶縁抵抗の経時変化

Fig. 3. Temporal change of insulation resistance.

(a) 2kV, 50Hz

(b) 1kHz

図4 静電容量の経時変化

Fig. 4. Temporal change of capacitance.

測定温度が高い場合には、静電容量が周波数に依存する傾向があることが示唆されている。

(iii) $\tan \delta$ 2kV, 50Hzで測定した $\tan \delta$ の経時変化を図5(a)に示す。全体的に減少傾向がある。初期から2000時間にかけて大きく減少しており、測定温度650℃では2000時間から4000時間にかけても変化が大きい。

1kHz時の $\tan \delta$ の変化を図5(b)に示す。211%以上は測定装置の制約上測定不可能であった。全体的に減少傾向が認められる。初期から2000時間にかけての減少が大きく、1.5kV課電試料で比べると測定温度が高くなるほど減少の割合も大きいようである。特にはがしマイカ試料で変化が顕著である。2000時間から4000時間にかけての変化は、はがしマイカ試料では少しの減少があるが、集成マイカ試料ではほとんど見られない。絶対値としては、はがしマイカ試料の方が概ね大きな値である。

(iv) 交流電流 交流電流の経時変化を図6に示す。交流電流も初期から2000時間にかけて大きく低下し、2000時間から4000時間にかけてはそれほど大きく低下しない。絶対値としてははがしマイカ試料の方が大きな値である。図の縦軸は対数スケールなので、はがしマイカ試料

(a) 2kV, 50Hz

(b) 1kHz

図5 $\tan \delta$ の経時変化

Fig. 5. Temporal change of dielectric loss tangent.

図6 交流電流の経時変化

Fig. 6. Temporal change of AC current.

図7 部分放電開始電圧の経時変化

Fig. 7. Temporal change of partial discharge inception voltage.

の方が変化は大きいことが伺える。

(v) 部分放電開始電圧 部分放電開始電圧の経時変化を図7に示す。大略的には部分放電開始電圧が高くなる傾向のあることがわかる。はがしマイカ試料の方が部分放電開始電圧は高くなっている。

(vi) 絶縁破壊電圧 図8に絶縁破壊電圧の経時変化を示す。絶縁破壊電圧はエージング時間によって概ね高くなっている。しかし、1.5kV課電の集成マイカ試料の測定温度550°Cおよび800°Cについて、2000時間から4000時間にかけて低下が見られる。初期の状態では測定温度550°Cではがしマイカ試料の方が破壊電圧は高いが、650°Cおよび800°Cではほとんど同じ値である。しかしながら、4000時間には集成マイカ試料に比較してはがしマイカ試料の破壊電圧が各測定温度ともに著しく高くなっている。課電の有無の効果が比較できる2000時間でのデータを基にする

図8 絶縁破壊電圧の経時変化

Fig. 8. Temporal change of dielectric breakdown voltage.

と、エージング後の破壊電圧は集成マイカ、はがしマイカ両絶縁ともに課電の有無による差はほとんどなかった。

<3・3> 材料特性の分析と経時変化

(1) 解体による絶縁体の外観検査 絶縁破壊実験終了後にバーコイル試料を解体し、絶縁破壊孔の位置を調べると同時にマイカテープを外側から順次はがして色等の外観を検査した。その結果、破壊孔の大半(66.7%)は電極角部に発生しており、他13.9%が平部、8.3%がストレスコー

[はがしマイカ試料-初期]

(a) 二次電子像

(b) 組成像

(c) 炭素K α 線像

図9 マイカ絶縁体のEPMA観察の例

Fig. 9. Images of mica insulation observed by EPMA.

ン内接地電極端部、残り11.1%は不明であった。一方、マイカ絶縁材料は両試料とも、初期に黒色であったのが、エージング時間に従って破壊部位とは関係無く全体的に徐々に、黒色が消えていく様子が観察された。なお、エージング前後の絶縁厚さの変化はほとんど認められなかった。

(2) 絶縁材料の元素分析 エージングにともなう絶縁体組成の変化を把握するために、エレクトロンプローブマイクロアナライザ(EPMA)を用いて含有元素の半定量分析を行った。検出器にはエネルギー分散型X線分光装置(EDS)を使用した。分析可能のようにサンプル表面を金で蒸着し、加速電圧15kVで分析した。材料の局所的な組成の偏りを避けるため、できるだけ低倍率の30倍(視野: $3 \times 3 \text{ mm}^2$)で観察した。

観察される像の例を図9に示す。図には絶縁体の二次電子による表面形態像と反射電子による組成像およびX線による炭素元素像を示してある。この結果より外観検査で観察された黒い物質は炭素を主成分とするものであることがわかった。

X線のエネルギースペクトルの例を図10に示す。ピークとなるX線のエネルギーの大きさから含有元素を同定すると、図中にも表されているとおり、C, O, Na, Mg, Al, Si, Cl, K, Ti, Feが含まれていることが判明した。集成マイカおよびはがしマイカ試料ともにフログバイト(金雲母)を原料としており、通常化学式にC, Cl, Fe, Tiを含まない⁽⁴⁾ので、これらは使用したバインダ等に含まれる有機物の元素もしくは何等かの原因で混入した不純物と考えられる。

C(炭素)はエージング時間とともにピークが減少している。前項の外観検査での黒色のエージングにともなう消失と関連しており、エージングによって炭素もしくは炭素の化合物が減少していることが推定される。マイカの主な構成元素であるKに対するCのピーク強度の比を炭素含有量と定義して、その経時変化を図11に示す。炭素含有量はエージング時間とともに大きく低下している。初期にははがしマイカ試料での炭素含有量が多く、減少の度合いも大きい。2000時間以降には両試料ともに顕著な変化は見られない。

図10 マイカ絶縁体のX線エネルギースペクトルの例

Fig. 10. Example of X-ray energy spectrum of mica insulation.

図11 EDSで分析された炭素含有量の経時変化
Fig. 11. Temporal change of carbon content analyzed by EDS.

2000時間について見ると、無課電試料に比べて課電試料の方が炭素含有量の低下がやや大きい。EDSの軽元素検出限界は3wt%程度と言われており、恐らく2000時間には既に炭素の質量比が検出限界以下で、詳しい定量ができていなかったことを考慮する必要がある。

4. 考察

<4.1> 高温用絶縁材料のエイジングによる電気特性変化 エーシングによる絶縁抵抗の増加、 $\tan \delta$ および交流電流の減少は、絶縁特性が向上していることを表している。絶縁抵抗の増加は、結果として交流電流と $\tan \delta$ を減少させることになる。ところが静電容量の減少は(1)式から $\tan \delta$ を増すことになるので、 $\tan \delta$ が減少したことを想起すると、 $\tan \delta$ の経時変化には絶縁抵抗の変動がより大きく影響していることがわかる。電極面積と絶縁厚の変化がないので、絶縁抵抗の増加は絶縁体の導電率の低下、静電容量の減少は誘電率の低下によるものと考察される。

絶縁体の導電率および誘電率の低下は、EDSで検出された炭素もしくは炭素の化合物を主体とする有機物すなわち導電性物質の減少が起因している可能性が高い。図11で見た炭素含有量の減少の様子は、絶縁抵抗(図3)と静電容量(図4)の経時変化とほぼ対応している。この対応からも有機物の減少が絶縁特性の変化に大きな影響を及ぼしたことが示唆される。初期における絶縁体内の有機物の残存は、バーコイル試料製作時に使用したバインダに含まれていた有機物が焼成の工程で完全に無機化しなかったことが原因であると想像される。エイジング中には雰囲気を窒素でパージしていたが、完全な無酸素状態ではなく、僅かに含まれている酸素によって焼成がゆっくり進み、長時間にわたって徐々に未焼成分の有機物が飛散していったと思われる。このことは、初期コイルで空気の補給が不十分となり易い内層ほど炭素含有量が高かったこと、また、初期コイルを再焼成することにより最内層でも炭素含有量は検出限界以下となったことから説明できる。はがしマイカ試料

は材料構造的にりん片が大きく、それらの間に存在する有機物はりん片が小さい集成マイカに比べて焼成し難い特質が、有機物含有量の初期残存量と経時変化に影響したのであろう。課電試料が無課電試料よりもエイジング後の絶縁特性が向上しているのは、課電によって誘電損発熱で絶縁体の温度が加熱温度よりさらに高くなり、残存していた有機物の焼成が進んだことが原因であろう。このことは図11で課電試料の方が無課電試料より炭素含有量の低下が大きかったことから頷ける。エイジングによる絶縁破壊電圧の向上は有機物の含有量減少の影響を大きく受けていると言える。部分放電開始電圧の向上傾向は高温によって絶縁体の焼成が進展し、有機物が減少して局所高電界が解消されたことに起因すると推測される。

<4.2> 絶縁破壊電圧を決定する要因 絶縁破壊電圧と非破壊絶縁特性との相関を調べてみた。測定温度条件に関係なくバーコイル試料ひとつひとつについて絶縁破壊電圧と絶縁抵抗、静電容量(2kV, 50Hz)、 $\tan \delta$ (2kV, 50Hz)、交流電流との関係をプロットしたところ、交流電流、絶縁抵抗、 $\tan \delta$ 、静電容量の順に相関の強さ

(a) 集成マイカ試料

(b) はがしマイカ試料

図12 絶縁破壊電圧と交流電流との相関
Fig. 12. Relationship between dielectric breakdown voltage and AC current.

図13 集成マイカとはがしマイカとの材料構造の違い

Fig. 13. Structure difference between mica paper and mica splittings.

が表されていた⁽⁹⁾。交流電流と絶縁破壊電圧との関係についてのみ図12に示す。はがしマイカ試料で特に相関が良いことがわかる。

本絶縁は有機物を高温で焼成したものであるため、絶縁層はマイカ等の固体絶縁物と空隙で形成されており、各空隙は外気と連結した開放系ポイドとなっている。電圧を印加すると絶縁表面の空隙（本実験では窒素が充満している）で部分放電が起き、電圧を高くすると徐々に部分放電の起きている部分が增大し、部分的には放電が橋絡することにより、マイカ面を這って流れる電流が増加する。この電流があるしきい値を越えると絶縁破壊に至ると考えられる。このような破壊現象であるため、回転機絶縁の場合に比べて、非破壊特性と破壊特性の相関が高いのであろう。はがしマイカは集成マイカに比べて図13に示すように電界E方向に直角により大きなマイカによるバリアが形成されるので、放電電流が電界方向に流れにくく、従って破壊電圧が高い。また、はがしマイカの場合はマイカ面を這う破壊パスが形成される沿面破壊であるのに対し、集成マイカの場合電界方向に見かけ上バリアがないに等しい確率がより大きい。このように集成マイカでは沿面破壊の他にギャップ破壊が加わることから、絶縁破壊特性と非破壊絶縁特性との相関性ははがしマイカに比べて劣ったものと考えられる。

交流電流との相関の強さには絶縁破壊のメカニズムを反映していることが示唆される。絶縁体内部に局部的に集中する電流が増加すると、そこでジュール発熱と熱散逸の不均衡が生じる熱暴走によって絶縁破壊に至る熱破壊⁽⁹⁾の可能性が高いと考察される。交流電流との強い相関が得られたことは、将来、電磁ポンプの電気絶縁上の劣化や異常の診断技術の開発にあたって有益である。

<4・3> 課電可能な電圧および温度に関する検討 今後の実験での課電可能な電圧を検討するために、再焼成して未焼成分を十分取り除いたコイルの高温における電圧-交流電流特性を測定した。元々のパーコイルをさらに酸素焼成処理（酸素中600℃×2時間）したものを再焼成試料とした。実験方法は温度800℃において電圧を0kVから0.5kVステップで上昇させ、各電圧で10分間保持し、電流の変化を1分毎に測定した。

図14 電圧印加時の交流電流の経時変化

Fig. 14. Temporal change of AC current at high voltages.

実験結果を図14に示す。集成マイカ試料は1.5kV以下では電圧印加後の交流電流変化はほとんどなく、2.0kVから2.5kVにかけては増加するものの飽和傾向にある。3.0kVからは10分以内では飽和することなく、3.5kVで著しい増加を示し破壊に至っている。他方、はがしマイカ試料については、変化の傾向は集成マイカ試料とほぼ変わらないが、集成マイカ試料よりも交流電流の値が大きく、そのためか3.0kVで破壊まで至ってしまった。

ここでの実験結果から一定電圧でも交流電流が飽和せずに増加する場合に絶縁破壊を起こすことがわかる。前節でも考察したとおり、絶縁破壊メカニズムが熱破壊であることを示す現象のひとつであると考えられる。また、絶縁劣化が進展した場合に、交流電流が増加するようであれば、

図15 初期および再焼成後の絶縁破壊電圧の比較

Fig. 15. Comparison of dielectric breakdown voltage between before and after re-burning.

交流電流を常時モニターする手法を適用することで絶縁破壊に至る前に絶縁破壊を予測できるであろう。

交流電流が10分間ほとんど変化しない電圧を課電可能な電圧と判断すると、再焼成試料であっても800℃では3kVは耐えられないことが判明した。

再焼成試料についての初期絶縁破壊電圧を測定した。測定時の温度条件は、550℃、650℃、750℃(800℃より下げた)である。結果を再焼成前のバーコイルの結果と比較して図15に示す。550℃での集成マイカ試料に関しては、絶縁破壊電圧の若干の低下が認められる。これは550℃のように比較的低温では、未焼成分の絶縁特性に対する影響が小さく、試料個別の破壊値のばらつきの範囲内で低い結果になったと考えられる。その他では特に温度が高くなるほど、再焼成によって初期絶縁破壊電圧が大きく改善していることがわかる。

5. む す び

Na浸漬形無冷却電磁ポンプのコイル絶縁用に開発したアルミナクロスで裏打ちした集成マイカおよびはがしマイカ絶縁について、550℃の窒素中において、無課電および1.5kV課電下で4000時間までのエージング実験を行い、絶縁劣化機構、非破壊絶縁診断の可能性に関して検討を加えた。その結果以下のことが明らかとなった。

(1) 実験終了後の破壊電圧は、集成マイカ、はがしマイカ両絶縁ともに、電磁ポンプで必要とされる電圧に対し十分な裕度があった。その値は、はがしマイカ絶縁の方が集成マイカ絶縁に比べ高かった。また、課電の有無による差はほとんどなかった。

(2) 加熱時間が長くなるに従って、絶縁特性が改善された。これは初期に残存していた未焼成分の炭素またはその化合物等導電性物質の減少によるものであった。

(3) 高温での絶縁破壊電圧と交流電流との間には良好な相間性が見られた。また、交流電流が飽和せずに増加するような高い電圧を印加すると絶縁破壊が起きた。これらのことから、絶縁破壊は熱破壊によることが示唆されるとともに、絶縁劣化診断手法として接地線に流れる交流電流の常時監視が有効であることがわかった。

(4) 再焼成した試料の高温での初期絶縁破壊電圧は著しく向上した。このことと(2)に述べたことから、高温用絶縁では特に導電性異物の除去が極めて重要であることがわかった。

なお、再焼成して未焼成分を除去した絶縁についても実験を行っているが、その結果については別途報告する予定である。(平成6年6月27日受付、同6年9月26日再受付)

文 献

- (1)中崎正好・香月健治・三井久安：「高速増殖炉用高温電磁ポンプ」, 東芝レビュー, 43, 7, p.589 (昭63)
- (2)猶原信幸・大音明洋・石田政義・黒木敏高・香月健治・熊沢良二：「ナトリウム浸漬形電磁ポンプ用コイルの開発」, 機学論B, 59, 565, p.129 (平5-9)
- (3)絶縁試験法ハンドブック改訂委員会編：「高電圧試験法ハンドブック」, p.386, (昭58)電気学会

ク」, p.386, (昭58)電気学会

(4)山口卓巳：「マイカの応用展開」, ボリファイル, p.49, 大成社 (平4-7)

(5)石田政義・池田易行・猶原信幸・三井久安・黒木敏高：「Na浸漬型電磁ポンプ用コイル絶縁材の高温課電による長期特性評価」, 電研資DEI-92-107 (平4-12)

(6)犬石嘉雄・中島達二・川辺和夫・家田正之：「誘電体現象論」, 電気学会大学講座, 電気学会 (昭48)

石田 政義

(正員)昭和35年9月27日生。60年3月筑波大学大学院修士課程理工学研究科理工学専攻修了。同年4月(財)電力中央研究所入所。現在、同所横須賀研究所電力部絶縁材料グループ主査研究員。工学博士。高分子絶縁材料および高温用無機絶縁材料に関する研究に従事。平成6年電気学会論文賞受賞。

池田 易行

(正員)昭和12年2月12日生。31年3月都立小石川工業高校電力科卒業。39年3月東京理科大学Ⅱ部物理学科卒業。31年4月(財)電力中央研究所入所。現在、同所横須賀研究所電力部絶縁材料グループ主任研究員。発電機巻線および配電用CVケーブルの絶縁診断技術に関する研究に従事。

猶原 信幸

(非会員)昭和26年8月27日生。54年3月東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年4月(財)電力中央研究所入所。現在、同所本部研究開発部計画課主任研究員。FBRの炉心熱流動および電磁ポンプシステムに関する研究に従事。日本機械学会、日本原子力学会会員。

三井 久安

(正員)昭和17年9月7日生。40年名古屋工業大学工業化学科卒業。同年(株)東芝入社。現在、同社重電技術研究所主幹。工学博士。IEEE SM, 技術士。48年日本電機工業会発達賞, 62年日本非破壊検査協会奨励賞受賞。

熊沢 良二

(正員)昭和17年2月28日生。35年弘前工業高校電気科卒業。同年(株)東芝入社。現在、同社重電技術研究所化学・絶縁技術開発部主査。重電機器絶縁システムの開発評価に従事。

黒木 敏高

(非会員)昭和28年8月1日生。54年早稲田大学大学院機械工学専攻修了。57~59年同大学助手。59年(株)東芝入社。現在、同社原子力事業部動力炉開発部主査。高速炉プラント機器開発に従事。日本機械学会会員。