

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6197026号
(P6197026)

(45) 発行日 平成29年9月13日(2017.9.13)

(24) 登録日 平成29年8月25日(2017.8.25)

(51) Int.Cl.

F I

H O 2 K 3/02 (2006.01)

H O 2 K 3/02

H O 2 K 3/04 (2006.01)

H O 2 K 3/04

Z

H O 2 K 55/04 (2006.01)

H O 2 K 55/04

請求項の数 16 (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願2015-503518 (P2015-503518)
 (86) (22) 出願日 平成25年3月27日(2013.3.27)
 (65) 公表番号 特表2015-515847 (P2015-515847A)
 (43) 公表日 平成27年5月28日(2015.5.28)
 (86) 国際出願番号 PCT/US2013/034059
 (87) 国際公開番号 W02013/148811
 (87) 国際公開日 平成25年10月3日(2013.10.3)
 審査請求日 平成27年10月2日(2015.10.2)
 (31) 優先権主張番号 13/435,156
 (32) 優先日 平成24年3月30日(2012.3.30)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

(73) 特許権者 500117059
 アメリカン スーパーコンダクター コー
 ポレイション
 AMERICAN SUPERCONDU
 CTOR CORPORATION
 アメリカ合衆国 01434 マサチュー
 セッツ州 ディベンズ ジャクソン ロー
 ド 64
 (74) 代理人 100105957
 弁理士 恩田 誠
 (74) 代理人 100068755
 弁理士 恩田 博宣
 (74) 代理人 100142907
 弁理士 本田 淳

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 高いC軸強度を有する幅広の電気伝導体

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

回転機械用の積層電気伝導体であって、

第1支持薄層と、第2支持薄層と、前記第1支持薄層と前記第2支持薄層との間に配置された高温超伝導体を含む単一のインサートであって、前記第1支持薄層及び前記第2支持薄層に対して積層した状態で配置される前記単一のインサートと、前記インサートを囲むとともに、前記インサートを前記第1支持薄層及び前記第2支持薄層のそれぞれに接合する充填材と、を備え、

前記インサートの位置に対応する前記第1支持薄層と前記第2支持薄層との間の位置において、前記インサートの各側部における前記充填材の幅寸法は該積層電気伝導体の幅寸法の少なくとも12.5パーセントであり、

前記第1支持薄層に垂直な軸に沿った該積層電気伝導体の引張り強度が確実に少なくとも21MPaであり、

前記「確実に少なくとも21MPa」という表現は、前記第1支持薄層に垂直な軸に沿った引張り試験データを有する伝導体において、99.7パーセントの引張り試験データが引張り試験データの平均値から3標準偏差以内であり、かつ、引張り試験データの平均値と引張り試験データの3標準偏差との差が少なくとも21MPaであることを意味する積層電気伝導体。

【請求項 2】

前記充填材はハンダである請求項1に記載の積層電気伝導体。

【請求項 3】

前記第 1 支持薄層及び前記第 2 支持薄層の少なくとも一方は電気伝導性材料から形成される請求項 1 に記載の積層電気伝導体。

【請求項 4】

前記第 1 支持薄層は前記第 2 支持薄層とは異なる材料で形成される請求項 1 に記載の積層電気伝導体。

【請求項 5】

前記第 1 支持薄層と前記第 2 支持薄層との間に配置される高温超伝導体を含む第 2 インサートをさらに備え、当該第 2 インサートは、前記第 1 支持薄層、前記第 2 支持薄層、及び前記単一のインサートに対して積層した状態で配置される請求項 1 に記載の積層電気伝導体。

10

【請求項 6】

前記第 1 支持薄層及び前記第 2 支持薄層の少なくとも一方は少なくとも 12 mm の幅を有し、かつ、前記インサートは少なくとも 9 mm の幅を有する請求項 1 に記載の積層電気伝導体。

【請求項 7】

前記第 1 支持薄層及び前記第 2 支持薄層の少なくとも一方は少なくとも 16 mm の幅を有し、かつ、前記インサートは少なくとも 11.8 mm の幅を有する請求項 1 に記載の積層電気伝導体。

【請求項 8】

20

回転機械用のコイル巻線であって、当該コイル巻線は単一の積層電気伝導体を備え、当該積層電気伝導体は、

伝導体の幅に対応する方向に延びる B 軸と、当該 B 軸に直交する C 軸であって、伝導体の厚さに対応する方向に延びる前記 C 軸とによって定義される断面と、

第 1 支持薄層と、

第 2 支持薄層と、

前記第 1 支持薄層と前記第 2 支持薄層との間に配置される高温超伝導体を含む単一のインサートであって、前記第 1 支持薄層及び前記第 2 支持薄層に対して積層した状態で配置される前記単一のインサートと、

前記インサートを囲むとともに、前記インサートを前記第 1 支持薄層及び前記第 2 支持薄層のそれぞれに接合させる充填材と、を備え、

30

前記インサートの位置に対応する前記第 1 支持薄層と前記第 2 支持薄層との間の位置において、前記インサートの各側部における前記充填材の幅寸法は前記積層電気伝導体の幅寸法の少なくとも 12.5 パーセントであり、

前記積層電気伝導体の前記 C 軸の引張り強度が確実に少なくとも 21 MPa であり、

前記「確実に少なくとも 21 MPa」という表現は、C 軸引張り試験データを有する伝導体において、99.7 パーセントの C 軸引張り試験データが C 軸引張り試験データの平均値から 3 標準偏差以内であり、かつ、C 軸引張り試験データの平均値と C 軸引張り試験データの 3 標準偏差との差が少なくとも 21 MPa であることを意味するコイル巻線。

【請求項 9】

40

前記積層電気伝導体は前記 B 軸と平行な巻回軸線の周りに巻かれている請求項 8 に記載のコイル巻線。

【請求項 10】

各ロータ巻線の巻回軸線に沿った寸法は前記積層電気伝導体の前記 B 軸における寸法と同じである請求項 8 に記載のコイル巻線。

【請求項 11】

前記積層電気伝導体は一巻きあたり少なくとも 600 アンペアを送電するために構成されている請求項 8 に記載のコイル巻線。

【請求項 12】

複数の巻きの前記積層電気伝導体を備え、前記積層電気伝導体の各巻きはエポキシ樹脂

50

を用いて他の残りの巻きに固定される請求項 8 に記載のコイル巻線。

【請求項 1 3】

前記積層電気伝導体の前記 C 軸の引張り強度が確実にエポキシ樹脂の引張り強度よりも大きく、

前記「確実にエポキシ樹脂の引張り強度よりも大きく」という表現は、C 軸引張り試験データを有する伝導体において、99.7 パーセントの C 軸引張り試験データが C 軸引張り試験データの平均値から 3 標準偏差以内であり、かつ、C 軸引張り試験データの平均値と C 軸引張り試験データの 3 標準偏差との差がエポキシ樹脂の引張り強度よりも大きいことを意味する請求項 1 2 に記載のコイル巻線。

【請求項 1 4】

前記コイル巻線は鞍型コイル巻線で形成される請求項 8 に記載のコイル巻線。

【請求項 1 5】

前記巻線は前記 C 軸方向に積層され、前記 B 軸方向に単一の厚さを有するように軸周りに巻かれた単一の伝導体から形成されている請求項 8 に記載のコイル巻線。

【請求項 1 6】

前記第 1 支持薄層と前記第 2 支持薄層との間に配置される高温超伝導体を含む第 2 インサートをさらに備え、当該第 2 インサートは、前記第 1 支持薄層、前記第 2 支持薄層、及び前記単一のインサートに対して積層した状態で配置される請求項 8 に記載のコイル巻線。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、高い C 軸強度を有する幅広の電気伝導体に関する。

【背景技術】

【0002】

発電は回転電気機械の重要な利用分野であり続けている。風力エネルギーは世界において最も急速に成長する電気の資源の一つであり、風力を使用可能な電力に変換するために、回転電気機械を有する風力タービンが使用されている。従来の風力タービンにはタービンブレードと、3～5メガワットの電力を公益電力系統に供給可能な電気機械を駆動する出力軸とを有するタービンロータを備えるものがある。しかし、増大した電力需要は電力タービンに対する増大した電力要求につながっている。10メガワット以上の電力を送電できる風力タービンを得るために、従来のギア付き伝動機構を単に大きくすることは、少なくとも大きさ、重さ、コスト及びこれら要望を満たすギアボックスに対する潜在的な信頼性欠如により現実的ではない。

【0003】

高温超伝導 (HTS) コイル巻線が、超低速であり、かつ、10メガワット (MW) 以上のレベルで電力を生み出す風力タービンに用いる直接駆動発電機に使用するために提案されている。このレベルの電力生産を達成するために、コイル巻線の形成に使用される、改良された HTS 電気伝導体が必要とされる。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

送電ケーブルに使用する HTS 電気伝導体の設計及び製作においては、低損失であるとともに長距離に亘って高電流を送電するケーブルであり、かつ、柔軟性を有するケーブルを提供することに焦点が当てられてきた。HTS 電気伝導体を形成する設計技術及び製作技術は、発電用途の発電機コイル巻線に使用される電気伝導体を形成するためにも使用される。しかし、送電ケーブルに使用される電気伝導体の配置及び荷重条件は発電機コイル巻線における伝導体の配置及び荷重条件とかなり異なるため、コイル巻線に使用される HTS 電気伝導体が必要とされる。

【0005】

この発明は、こうした実情に鑑みてなされたものであり、その目的は、高いC軸強度を有する幅広の電気伝導体を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0006】

幾つかの態様において、積層電気伝導体は第1支持薄層と、第2支持薄層と、前記第1支持薄層と前記第2支持薄層との間に配置される高温超伝導体を含むインサートと、前記インサートを囲むとともに、前記インサートを前記第1支持薄層と前記第2支持薄層のそれぞれに接合する充填材とを含む。前記インサートの位置に対応する前記第1支持薄層と前記第2支持薄層との間の位置において、前記インサートの各側部における前記充填材の幅寸法は該積層電気伝導体の幅の少なくとも10%である。

10

【0007】

幾つかの態様において、積層電気伝導体は伝導体の長さに対応する方向に延びるA軸と、A軸を横切るB軸とを有する。B軸は伝導体の幅に対応する方向に延びる。伝導体は前記A軸及び前記B軸の両軸を横切るC軸を有し、C軸は伝導体の厚さに対応する方向に延びる。該積層電気伝導体は、該積層電気伝導体の幅に一致する幅を有する第1支持薄層と、第1支持薄層に対して前記C軸に沿って層状に配置される第2支持薄層と、前記第1支持薄層と前記第2支持薄層との間に配置される高温超伝導体を含むインサートと、前記インサートを囲むとともに前記インサートを前記第1支持薄層及び前記第2支持薄層のそれぞれに接合する充填材とを含む。前記インサートの位置に対応する前記第1支持薄層と前記第2支持薄層との間の位置において、前記インサートの各側部における前記充填材の幅寸法は該積層電気伝導体の幅の少なくとも10%である。

20

【0008】

積層電気伝導体は次の一つ以上の特徴を有していても良い。前記充填材はハンダである。前記第1支持薄層及び前記第2支持薄層の少なくとも一方は電気伝導性材料から形成されている。前記第1支持薄層は前記第2支持薄層とは異なる材料で形成されている。さらに、該積層電気伝導体は前記第1支持薄層と前記第2支持薄層との間に配置される高温超伝導体を有する第2インサートを含む。前記第1支持薄層と前記第2支持薄層との少なくとも一方は少なくとも12mmの幅を有し、かつ、前記インサートは少なくとも9mmの幅を有する。前記第1支持薄層と前記第2支持薄層との少なくとも一方は少なくとも16mmの幅を有し、かつ、前記インサートは少なくとも11.8mmの幅を有する。前記第1支持薄層に垂直な軸に沿った該積層電気伝導体の引張り強度は確実に少なくとも21MPaであり、前記「確実に少なくとも21MPa」という表現は、前記第1支持薄層に垂直な軸に沿った引張り試験データを有する伝導体において、99.7パーセントの引張り試験データが引張り試験データの平均値から3標準偏差以内であり、かつ、引張り試験データの平均値と引張り試験データの3標準偏差との差が少なくとも21MPaであることを意味する。前記積層電気伝導体の前記C軸の引張り強度が確実に少なくとも21MPaであり、前記「確実に少なくとも21MPa」という表現は、C軸引張り試験データを有する伝導体において、99.7パーセントのC軸引張り試験データがC軸引張り試験データの平均値から3標準偏差以内であり、かつ、C軸引張り試験データの平均値とC軸引張り試験データの3標準偏差との差が少なくとも21MPaであることを意味する。

30

40

【0009】

幾つかの態様では、回転機械は、少なくとも一つのステータ巻線を含むステータアセンブリと、前記ステータアセンブリ内において該回転機械の長手方向の軸線の周りを回転するように構成されるロータアセンブリと、を含んで提供される。前記ロータアセンブリは少なくとも一つのロータ巻線を含み、各ロータ巻線は単一の積層電気伝導体を含む。前記積層電気伝導体は、伝導体の幅に対応する方向に延びるB軸と、前記B軸に直交するとともに前記伝導体の厚さ方向に延びるC軸により定義される断面と、第1支持薄層と、第2支持薄層と、前記第1支持薄層と前記第2支持薄層との間に配置された高温超伝導体を含むインサートと、前記インサートを囲むとともに、前記インサートを前記第1支持薄層及び前記第2支持薄層のそれぞれに接合させる充填材とを含む。前記インサートの位置に対

50

応する前記第 1 支持薄層と前記第 2 支持薄層との間の位置において、前記インサートの各側部における前記充填材の幅寸法は前記積層電気伝導体の幅寸法の少なくとも 10 パーセントである。

【0010】

該回転機械は次のうち一つ以上の特徴を有していてもよい。前記少なくとも一つのロータ巻線は前記伝導体の B 軸が前記ロータアセンブリの半径と平行になるように前記ロータアセンブリ内に支持されている。各ロータ巻線の巻回軸線に沿った寸法は前記積層電気伝導体の B 軸における寸法と実質的に同じである。前記積層電気伝導体は一巻きあたり少なくとも 600 アンペアを送電するために構成されている。前記積層電気伝導体の前記 C 軸の引張り強度が確実に少なくとも 21 MPa であり、前記「確実に少なくとも 21 MPa」という表現は、C 軸引張り試験データを有する伝導体において、99.7 パーセントの C 軸引張り試験データが C 軸引張り試験データの平均値から 3 標準偏差以内であり、かつ、C 軸引張り試験データの平均値と C 軸引張り試験データの 3 標準偏差との差が少なくとも 21 MPa であることを意味する。

10

【0011】

幾つかの態様では、コイル巻線は単一の積層電気伝導体を含む。前記積層電気伝導体は、伝導体の幅に対応する方向に延びる B 軸と、前記 B 軸に直交するとともに前記伝導体の厚さ方向に延びる C 軸により定義される断面を有する。前記積層電気伝導体は、第 1 支持薄層と、第 2 支持薄層と、前記第 1 支持薄層と前記第 2 支持薄層との間に配置された高温超伝導体を含むインサートと、前記インサートを囲むとともに、前記インサートを前記第 1 支持薄層及び前記第 2 支持薄層のそれぞれに接合させる充填材とを含む。前記インサートの位置に対応する前記第 1 支持薄層と前記第 2 支持薄層との間の位置において、前記インサートの各側部における前記充填材の幅寸法は前記積層電気伝導体の幅寸法の少なくとも 10 パーセントである。

20

【0012】

前記コイル巻線は次のうち一つ以上の特徴を有していてもよい。前記積層電気伝導体は前記 B 軸と実質的に平行な巻回軸線の周りに巻かれている。各ロータ巻線の巻回軸線に沿った寸法は前記積層電気伝導体の B 軸における寸法と実質的に同じである。前記積層電気伝導体は一巻きあたり少なくとも 600 アンペアを送電するために構成されている。前記積層電気伝導体の前記 C 軸の引張り強度が確実に少なくとも 21 MPa であり、前記「確実に少なくとも 21 MPa」という表現は、C 軸引張り試験データを有する伝導体において、99.7 パーセントの C 軸引張り試験データが C 軸引張り試験データの平均値から 3 標準偏差以内であり、かつ、C 軸引張り試験データの平均値と C 軸引張り試験データの 3 標準偏差との差が少なくとも 21 MPa であることを意味する。複数の巻きの前記積層電気伝導体を含み、前記積層電気伝導体の各巻きはエポキシ樹脂を用いて他の残りの巻きに固定される。前記積層電気伝導体の前記 C 軸の引張り強度が確実にエポキシ樹脂の引張り強度よりも大きく、前記「確実にエポキシ樹脂の引張り強度よりも大きく」という表現は、C 軸引張り試験データを有する伝導体において、99.7 パーセントの C 軸引張り試験データが C 軸引張り試験データの平均値から 3 標準偏差以内であり、かつ、C 軸引張り試験データの平均値と C 軸引張り試験データの 3 標準偏差との差がエポキシ樹脂の引張り強度よりも大きいことを意味する。前記コイル巻線は鞍型コイル巻線で形成される。前記巻線は C 軸方向に積層し、前記 B 軸方向に単一の厚さを有するように軸周りに巻かれた単一の伝導体から形成されている。

30

40

【0013】

発電機コイル巻線の利用に際しては、C 軸強度は重要な設計検討事項である。これは、発電機コイル巻線の利用時における負荷条件によるものである。より具体的には、これらの利用時には、積層伝導体は多重巻きの発電機コイル巻線を形成するためにマンドレルの周りに巻かれている。その巻線では、個々の伝導体は、各巻きの間のエポキシ樹脂層により、C 軸に沿って積層されている。使用時には、発電機コイル巻線は超伝導性を可能にするため極低温に冷却される。しかし、エポキシ樹脂層は積層体を形成する金属よりはるか

50

に収縮する傾向があるため、伝導体を層間剥離し得る高いC軸応力が積層体にかかる。特に、高いC軸応力はしばしば、HTSインサート内においてHTS層が金属基板層から剥がれるといった層間剥離が発生する原因となる。幅広のフィレット構造を有する積層電気伝導体を提供することにより、伝導体のC軸強度がエポキシ樹脂の強度よりも大きくなり、冷却による伝導体の層間剥離が回避される。特に、HTSインサートの各側部におけるフィレット幅の寸法が積層電気伝導体の幅の少なくとも10%であることが、伝導体を冷却することによる層間剥離の回避に必要とされることがわかっている。これは、送電ケーブル内の伝導体は負荷条件が完全に異なるため、C軸強度が重要な設計検討事項ではない送電ケーブルアプリケーションとは対照的である。

【0014】

10

積層HTS電気伝導体は確実に21MPaより大きなC軸強度を有して提供される。これは、伝導体の各側部のフィレット幅が伝導体の幅の少なくとも10%である積層体を提供することで達成される。好都合にも、積層構造は巻線に成形され、超伝導性を可能にするために十分に冷却されるときに、伝導体の層間剥離を防止する。

【0015】

積層HTS電気伝導体は従来の積層高温超伝導電気伝導体に比べて高い送電容量を有して提供される。これは、伝導体の全体幅が12mmよりも大きな積層体を提供することで達成される。幾つかのケースでは、幅広の積層伝導体は、従来の積層伝導体が一巻きあたり200アンペアに対し、一巻きあたり少なくとも600アンペアを提供するように構成される。相対的に高い送電容量は、より少ない巻きで巻線を形成でき、製造時における労力及びコストを低減することができるため、有利である。さらに、超伝導コイル巻線において幅広の伝導体を使用することは、巻きの効率的な充填及びより少ない絶縁材の使用を可能にし、それにより、従来の成形の巻線に比べて電流密度(アンペア・巻き)が高くなる。

20

【図面の簡単な説明】

【0016】

【図1】風力タービンを示す斜視図。

【図2】図1の風力タービンを示す横断面図。

【図3】発電機ステータアセンブリを示す斜視図。

【図4】発電機ロータアセンブリを示す横断面図。

30

【図5】発電機ロータアセンブリを示す斜視図。

【図6】3層のHTS電気伝導体の斜視断面図。

【図7】HTSインサートの断面図。

【図8】ロータ巻線の一部の斜視断面図。

【図9】4層のHTS電気伝導体の斜視断面図。

【図10】異なる3つの伝導体構成において、それぞれ5つのサンプルにより測定したC軸破壊応力(MPa)を示すグラフ。

【図11】測定したC軸破壊応力(MPa)と伝導体の全幅フィレット幅のパーセンテージとの対比を示すグラフ。

【図12】限界電流(アンペア)と幅11.8mmのインサートを二つ含む幅16mmの伝導体における位置(メートル)との対比を示すグラフ。

40

【発明を実施するための形態】

【0017】

図1に示すように、風力タービン10はハブ24に結合された複数のタービンブレード22を有するタービンロータ20を含む。また、風力タービン10は発電機30を含む。発電機30は、発電機30とハブ24との間に延びる駆動軸90により駆動される。発電機30は、ナセル26の端部の開口部から突出するタービンロータ20と共に示す部分的な切取り内部図に示されるように、ナセル26に収容されている。詳細は後述するが、発電機30は、低周波数の用途に使用するために構成され、タービンロータ20と同じ周波数で回転する。例えば、記載されている実施形態では、発電機30は11rpm程度で動

50

き、10メガワット以上を発電する。

【0018】

図2に示すように、発電機30は直接駆動であるとともに同位相であり、HTS界磁巻線を有するロータアセンブリ60と、銅製のステータ巻線などの非超伝導性ステータ巻線を有するステータアセンブリ40とを含む回転超伝導性機械である。詳細は後述するが、ロータアセンブリとステータアセンブリとが駆動軸90及び長手方向の軸線15において同軸になるように、ロータアセンブリ60はステータアセンブリ40内に支持されている。

【0019】

図3に示すように、ステータアセンブリ40はステータコア42と、ステータコア42内に支持されるステータ巻線46とを含む。ステータコア42は、環状の強磁性体プレート44を形成する積層円弧部の集合体として形成された中空の円筒体である。ステータ巻線46は、伝導損失を低減するパターンを形成するために、個々の銅線伝導体(図示せず)がねじられたり織られたりした転置線ケーブル(図示せず)で形成されている。転置線ケーブルは、リッツ線、ラザフォード線、ロベル線、または任意の他の適切な転置線または直列巻線を含んでも良い。転置線ケーブルは、ダイヤモンドやクランク形状等の従来の形状を有する長尺状で多重巻きのステータ巻線46を形成するために発電機30の長手方向の軸線15を横切る軸線の周りに巻かれる。ステータ巻線46は従来の方法により冷却される。

【0020】

図4及び図5に示すように、ロータアセンブリ60は電磁シールド50に囲まれるロータ巻線アセンブリ62と、トルク伝達アセンブリ80とを含む。電磁シールド50は、ステータ電流により生成される非同期の界磁を減衰させることで、ロータ巻線アセンブリ62内のロータ巻線64を保護する伝導性であり非磁性の材料を含む。さらに、電磁シールド50はロータ巻線アセンブリ62をステータアセンブリ40において発生する熱から保護する。

【0021】

ロータ巻線アセンブリ62は、各々がマンドレル66にHTS伝導体102が巻かれて形成された、複数のロータ巻線64を含む。他の構成も可能だが、以下にさらに説明するように、本実施形態のロータ巻線64は鞍型コイルの形状である。ロータ巻線64及びマンドレル66は、円筒状のロータ巻線支持チューブ68上に配置され、ロータ巻線64、マンドレル66、及びロータ巻線支持チューブ68の全てはクライオスタット70内に封入されている。

【0022】

ロータ巻線64はロータ支持チューブ68を介して冷却される伝導体である。図示の実施形態では、同時係属の米国出願12/045,973に記載されるとともにその内容が本明細書に参考として取り入れられている極低温冷却システムが、ロータ支持チューブ68を冷却するために使用される。極低温冷却システムでは、クライオクーラは支持チューブ68の周囲に分布している。それぞれのクライオクーラはロータ支持チューブ68に接続されたコールドヘッドと、クライオクーラに繋がられる熱負荷に対して冷却剤を循環させるサーキュレータ(図示せず)とを含む。クライオクーラ及びサーキュレータはロータ支持チューブ68と共に回転するように構成されている。

【0023】

トルク伝達アセンブリ80は、ロータ巻線アセンブリ62に対して内部に放射状に配置されている。また、トルク伝達アセンブリ80はステータアセンブリ40内でロータアセンブリ60を回転可能にかつ同軸上に支持している。さらに、トルク伝達アセンブリ80はロータ巻線アセンブリ62を支持し、ロータ巻線アセンブリ62から生成された回転力を駆動軸90に伝達する。

【0024】

トルク伝達アセンブリ80は、支持チューブ68を支持するとともにステータアセンブリ

10

20

30

40

50

リ 40 に対する位置を定めるロータ本体 82 と、駆動軸 90 と、ロータ本体 82 を駆動軸 90 に接続するトルク制限カップリング 100 とを含む。駆動軸 90 の第 1 端 94 はトルク制限カップリング 100 を介してロータ本体 82 に接続されている。駆動軸 90 の第 2 端 92 は支持軸受 28 を介してナセル 26 によって支持されている（図 2 を参照）。ロータ本体 82、トルク制限カップリング 100 及び駆動軸 90 は、クライオスタット 70 により定義される低温空間の外側にあり、故に、雰囲気温度中で動作する。

【0025】

図 6 に示すように、鞍型ロータ巻線 64 は単一の電気伝導体 102 で形成されている。電気伝導体 102 は一般には矩形の断面形状を有し、かつ、寸法において長さが幅又は厚さよりも大きい高温超伝導（HTS）テープである。この説明を目的として、伝導体 102 は、電流の送電方向に対応するとともに伝導体の長さ方向に対応する方向に延びる A 軸を含む。また、伝導体 102 は A 軸を横切る B 軸を含む。B 軸は伝導体の幅 w_c に対応する方向に延びる。また、伝導体 102 は A 軸及び B 軸の両軸を横切る C 軸を含む。C 軸は伝導体の厚さ t_c に対応する方向に延びる。なお、この基準フレームは伝導体 102 全体としての基準として設けられ、伝導体 102 に設けられた伝導材料の結晶学的な座標とは分離されることは理解されるであろう。

【0026】

伝導体 102 は、第 1 支持薄層 108 と、第 2 支持薄層 110 と、第 1 及び第 2 支持薄層 108、110 との間に積層状に配置される少なくとも一つの HTS インサート 112 と、HTS インサート 112 を封入するとともに HTS インサート 112 を第 1 支持薄層 108 及び第 2 支持薄層 110 のそれぞれに接合し、かつ、後にさらに説明されるフィレット 126 を形成するハンダの充填材 124 とを含む積層体である。伝導体 102 は絶縁性のエポキシ樹脂被覆（図示せず）で覆われている。単一の HTS インサートを含む、図 6 に示される積層伝導体アセンブリは「3 層」伝導体と呼ばれる。

【0027】

第 1 及び第 2 支持薄層 108、110 は金属などの電気伝導性材料から形成され、伝導体 102 を強化するために用いられる。例えば、第 1 及び第 2 支持薄層 108、110 は、銅、銅合金、ステンレス鋼、真鍮またはそれら複合材から形成される。図示の実施形態では、第 1 支持薄層 108 は第 2 支持薄層 110 の材料と同じ材料で形成されている。

【0028】

伝導体 102 内において、充填材 124 はインサート 112 を完全に取り囲んでいる。一般的に、充填材 124 は第 1 支持薄層 108 と第 2 支持薄層 110 との間の有用な空間に充填されるが、製造時の表面張力により浅いメニスカスが形成される充填材 124 の側縁部にフィレット 126 が形成される。充填材 124 は全ての構成部品を機械的に接合する。多くの異なるハンダを充填材 124 として使用することができ、使用される特定のハンダは、個々の用途の要件（熱的、電氣的及び機械的）に基づいて選択される。例えば、充填材 124 は Pb-Sn ハンダ、Sn ハンダ、又は、その他のハンダから選択することができる。

【0029】

図 7 に示すように、HTS インサート 112 もまた積層構造であり、金属基板 120 を含む。幾つかの実施形態では、金属基板 120 は強磁性材料から形成されている。例えば、金属基板 120 は NiW から形成されてもよい。金属基板 120 における少なくとも一つの表面は、一つ以上の緩衝層 118 及び HTS 層 116 のための結晶型板を提供するために、二軸テクスチャ化されている。緩衝層 118 は金属基板 120 上に積層されている。緩衝層 118 として導電性材料を用いることは可能ではあるが、幾つかの実施形態では、緩衝層 118 は電気絶縁性材料から構成されている。緩衝層 118 は例えば不活性金属、金属又は希土類元素の酸化物、ジルコン酸塩、チタン酸塩、ニオブ酸塩、窒化物、タンタル酸塩、アルミン酸塩、銅酸塩、マンガン酸塩又あるいはルテニウム酸塩（例えば、 Al_2O_3 、 CeO_2 、 Y_2O_3 、 MgO 、 Gd_2O_3 、チタン酸ストロンチウム、ジルコン酸ガドリニウム、イットリア安定化ジルコニア、 AlN 、 Si_3N_4 、 $LaMnO_4$ 、

10

20

30

40

50

$\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 又は $\text{La}_{2-x}\text{Ce}_x\text{Zr}_2\text{O}_7$) から構成される。HTS 結晶を成長させるのに適したテクスチャを提供する任意の材料または複数の材料の組み合わせを用いることができる。HTS 層 116 は緩衝層 118 に積層され、任意の HTS 材料でよい。幾つかの実施形態では、HTS 層は YBCO 等の希土類 - アルカリ土類 - 銅酸化物を含む。キャップ層 114 は HTS 層 116 上に積層され、化学的及び機械的劣化から HTS 層を保護する。キャップ層 114 は、Ag 又は他の不活性金属でスパッタリングされてもよい。HTS インサート 112 は、複数のワイヤを単一で 4 ~ 10 cm の幅広から所望の幅で生産できる広幅ストリップ製造プロセスを用いて作られる。従って、単一のワイヤでより高い電流を許容できる比較的幅広の伝導体が形成される。

【0030】

図 8 に示すように、鞍型ロータ巻線 64 において伝導体 102 は、マンドレル 66 の周囲において発電機 30 の長手方向の軸線 15 を横切る T 軸線の周りに巻かれている。マンドレル 66 は一般的に長尺状の楕円形状であるため、ロータ巻線 64 は、マンドレル 66 の長側面に沿った直線部 64a と、マンドレル 66 において相対的に短く丸みを帯びた端部に沿った湾曲部 64b とを含む。さらに具体的には、鞍型ロータ巻線 64 において、伝導体 102 は、直線部 64a の内部において伝導体の B 軸がロータアセンブリ 60 の半径 R と平行であり、かつ、支持チューブ 68 の外面に対して垂直であるようにマンドレル 66 の周りに巻かれている。半径 R と T 軸線とがマンドレル 66 の中心に同軸であり、さらに半径 R はマンドレル 66 の外周に隣接する位置において T 軸線に相対して僅かに角度ずれを有することが理解される。

【0031】

幾つかの実施形態では、伝導体 102 は T 軸線の周りに少なくとも 300 ~ 400 巻きは巻かれている。その結果、図 6 に示す断面図でコイル巻線 64 を見たとき、伝導体 102 の複数の層が伝導体の C 軸に沿って配置されている。但し、伝導体 102 の断面図は、ロータ巻線 64 内の伝導体の層の方向を可視化するために、図 8 の縮尺で描かれていない。さらに、伝導体 102 は、半径 R に沿ったロータ巻線 64 の寸法が伝導体 102 の B 軸における寸法（例えば伝導体の幅 w_c ）と同じになるように、単層内に配置されている。比較的大きな幅（ w_c ）のため、単層においてコイル巻線 64 を形成することは可能である。単層の鞍型ロータ巻線構成は、円弧部を形成する複数のパンケーキスタックなどの他の構成に比べて比較的単純であるとともに機械的により強固であり、かつ、有効な空間に伝導体を極めて効率的に充填ができるため有利である。当業者は大径の鞍型巻線はパンケーキ巻線とほぼ同じであることを理解するであろう。しかし、鞍型巻線の一つの利点はチューブの表面に合うことである。

【0032】

コイル巻線のアプリケーションに伝導体 102 を用いる場合には、例えば伝導体 102 がコイル巻線の巻きを形成するために C 軸方向に沿って層状に配置されていることや、伝導体 102 を囲むエポキシ樹脂及び伝導体 102 を形成する金属の不均一な熱収縮特性に起因する伝導体の層間剥離を防ぐために、C 軸の強度が 21 MPa より大きいことが重要であるとわかっている。伝導体 102 において要求される C 軸強度は、インサート 112 の各側部の充填材 124 の幅寸法を、インサート 112 の位置に対応する第 1 支持薄層 108 と第 2 支持薄層 110 との間の位置において幅方向（例えば、B 軸に沿って）に測定したときに、伝導体 102 の幅の少なくとも 10 % となるように、伝導体 102 を形成することで達成される。3 層の伝導体 102 においては、この位置は一般的に伝導体 102 の中間の厚さ（例えば、C 軸における中間点）に対応する。

【0033】

必要なフィレットの厚さを得るために、HTS 層 116 を含むインサート 112 は、伝導体の幅 w_c よりも小さいインサートの幅 w_i を有して形成される。特に、従来は超伝導材で充填される伝導体 102 内の領域には充填材 124 が充填され、故に、ロータ巻線 64 に必要とされる C 軸強度特性を達成するために、電流が引き換えになる。

【0034】

図示の実施形態では、伝導体 102 は第 1 及び第 2 支持薄層 108, 110 の幅の 12.0 mm に一致する伝導体の幅 w_c を有し、厚さは 0.050 mm である。さらに、インサート 112 の幅 w_i は 9.0 mm である。特に、インサート幅 w_i は、インサート 112 の各側部の最小のフィレット幅が伝導体の幅 w_c の 10% より大きくなるように決められている。インサート 112 の位置に対応する第 1 支持薄層と第 2 支持薄層との間の高さの位置で測定される、合計のフィレット幅（例えば、インサート 112 の両側から）の伝導体の幅に対するパーセンテージは $((w_c - w_i) / w_c) \times 100$ に相当する。従って、インサート 112 の各側部のフィレット幅の伝導体の幅に対するパーセンテージは $((w_c - w_i) / (2w_c)) \times 100$ に相当し、少なくとも 10% が必要である。これらのパーセンテージはフィレット 126 の凹面を無視しているが、伝導体 102 の全体の厚さは小さく、故に凹面が非常に僅かであるため、これらのパーセンテージは許容される。従って、伝導体の幅 w_c が 12.0 mm であり、インサートの幅 w_i が 9.0 mm の伝導体は、インサート 112 の各側部の充填材 124 の幅寸法は 12.5 パーセントである。

10

【0035】

伝導体の寸法は、上述の 12 mm - 9 mm である構成に限定されるものではない。より高電流を必要とするアプリケーションの場合、伝導体 102 はより大きなインサート幅を用いて形成することができる。例えば、伝導体 102 は伝導体の幅 w_c が 16.0 mm であるように形成することができる。対応するインサート 112 は 11.8 mm の幅 w_i を有して形成される。この例では、インサート 112 の各側における充填材 124 の幅寸法は 13 パーセントである。

20

【0036】

図 9 に示すように、代替的な実施形態の伝導体 202 は、二つの HTS インサート 112, 112' を含み、4 層の伝導体と呼ばれることを除いて、3 層の伝導体 102 と同一である。二つのインサート 112, 112' を有する伝導体 202 を提供することにより、単一のインサート 112 を有する伝導体 102 に比べ、より高い送電容量を得られる。

【0037】

HTS インサート 112, 112' は構造的に同一であり、第 1 の HTS インサート 112 の層の順序が、伝導体の厚さにおける中央を通り、かつ、B 軸に平行な軸を挟んで見たときに、第 2 の HTS インサート 112' の層の順序と重なるように薄層の間に配置されている。具体的には、HTS インサート 112, 112' は層の順序が一般的にキャップ層 114 / HTS 層 116 / 緩衝層 118 (複数可) / 金属基板 120 / 金属基板 120' / 緩衝層 118' (複数可) / HTS 層 116' / キャップ層 114' となるように配置されている。言い換えれば、HTS インサート 112, 112' は、HTS 層 116, 116' が金属基板 120, 120' のそれぞれに対して外側に位置するように配置されている。この配置により、それぞれの HTS 層 116, 116' は金属基板 120, 120' 及び軸を挟んで重なるのではなくインサート 112 の順序が繰り返された HTS テープ構成に対して AC 損失を低下させる構成を電氣的に保護する。

30

【0038】

上述のように、広いフィレット幅を含む伝導体構造は、伝導体を層間剥離しうる高い C 軸応力が、エポキシ樹脂の冷却により積層板に対し加わるコイル巻線故障モードに対処する。具体的には、層間剥離は、伝導体の C 軸引張強度がエポキシ樹脂の張力緩和点より大きい伝導体を形成することにより回避される。図示の実施形態では、張力緩和点が 14 MPa のエポキシ樹脂であり、安全係数 1.5 を含み、伝導体の最小 C 軸強度は 21 MPa である。

40

【0039】

伝導体 202 において、必要な C 軸強度は充填材 124 の幅寸法が、HTS インサート 112, 112' の位置に対応する第 1 支持薄層 108 と第 2 支持薄層 110 との間の位置において幅方向に測定したとき（例えば、B 軸に沿って）、伝導体 202 の幅寸法の少なくとも 10 パーセントとなる伝導体 202 を形成することで達成される。4 層の伝導体

50

202において、この位置は一般的に伝導体202の中間の厚さ（例えば、C軸方向の中間点）に対応する。

【0040】

インサートの片側又は両側のフィレット幅が10パーセント未満の伝導体102, 202は、必要なC軸強度（例えば、21MPaより大きい）を確実に提供することではなく、図10及び図11を参照して以下に説明するように、ロータ巻線64に用いるのに適していないことが、実験的にわかっている。

【0041】

図10は次の異なる3つの構成の4層の伝導体のサンプルにおいて、C軸の破壊応力を測定したグラフである。第1例の伝導体は、伝導体の幅 w_c が16.0mmであり、かつ、インサートの幅 w_i が11.8mmである。第2例の伝導体は、伝導体の幅 w_c が12.0mmであり、かつ、インサートの幅 w_i が9.0mmである。第3例の伝導体は、伝導体の幅 w_c が12mmであり、かつ、インサートの幅 w_i が10mmである。第1及び第2例の伝導体は、伝導体の幅に対するインサートの各側部のフィレット幅がそれぞれ13.1パーセント及び12.5パーセントであるフィレット幅を有す。第3例の伝導体においては、伝導体の幅に対するインサートの各側部のフィレット幅は僅か8.3パーセントである。このグラフは、一般的にフィレット幅が増加するとC軸引張り破壊強度が増加することを示している。

【0042】

従来の知識では、フィレット幅を増加しても、インサート112がフィレット領域126の外側の面から遠すぎるため、強度はほとんど改善しない。さらに、電気伝導体技術、特に巻線アプリケーションに使用される電気伝導体に関する技術は、送電容量を増加する要求によって活性化されている。このように、フィレット幅を増加することはインサート幅を減少させることになるため、当業者はインサートのサイズを減少させるよりもインサートのサイズを増加することに解決策を見出し、フィレット幅を増加することは考えないであろう。予想外にも、フィレット幅を増加させることで、C軸引張り強度に革新的な改善があった。これは、伝導体の縁部が伝導体102, 202の製造中に発生したスリット形式プロセスによる亀裂核形成場所であるという事実によるものである。より広いフィレット126は亀裂核形成場所において、より高い引張り強度を提供する。

【0043】

図10に示された各例は、C軸引張り強度が21MPaを超えていることを示す。しかし、後述するように第3例の伝導体は少なくとも21MPaのC軸引張り強度であることを確実に示しているのではない。従って、フィレット幅が10パーセント未満である図10の第3例の伝導体は、ロータ巻線64に使用するのに適していない。

【0044】

フィレット幅（伝導体の幅に対するパーセントとして表示されている）とC軸方向における破壊応力との関係を示す図11を参照すると、伝導体の全幅に対するフィレット幅のパーセントがより大きい伝導体において、より高い破壊強度を得られることがわかる。さらに、インサート112の各側部のフィレット幅が伝導体の幅に対して10パーセントよりも大きな伝導体102, 202は確実に21MPaよりも大きな機械的強度を有することを示している。本明細書で使用されるように、伝導体102, 202は、99.7パーセントのC軸引張り強度のテストデータが、テストデータの平均値から3標準偏差以内にあれば、信頼できると考えられている。この場合、伝導体102, 202において、伝導体のC軸引張り強度の平均と伝導体のC軸引張り強度の3標準偏差との差は、最低でも21MPaでなければならない。この基準を満たす伝導体は信頼性が非常に高い可能性を有しており、発電機30内に一度組み付けられると欠陥のあるコイル巻線64を取り替えることは困難であるとともに費用がかかるため、信頼性はコイル巻線にとって重要な特徴である。図11では、インサートの各側部のフィレット幅が伝導体の幅の10パーセント未満、例えば4パーセント及び8.3パーセントの伝導体が信頼性の基準を満たさず、そのため、ロータ巻線64での使用には適していない。

【 0 0 4 5 】

図 1 2 は薄層幅が 1 6 m m であり、かつ、インサート幅が 1 1 . 8 m m である 4 層の伝導体 2 0 2 の 2 4 0 メートルに沿って間隔を置いて測定した臨界電流 I_c のグラフである。好都合にも、伝導体 2 0 2 は高い送電容量（例えば、臨界電流 I_c は約 6 0 0 アンペア）を示しており、それにより、伝導体 2 0 2 を形成する単一の伝導体の巻線 6 4 もまた同様の高い送電容量を備えるであろう。このように、並列に複数のコイルを有する発電機巻線を回避することができる。さらに、臨界電流 I_c は伝導体の長さに沿って変化がほとんどない。

【 0 0 4 6 】

コイル巻線の特徴の組み合わせにより、上述のように、コイル巻線 6 4 から必要とされる性能（例えば、一巻きあたり 6 0 0 アンペアかそれ以上を送電する能力）を達成することが可能である。特に、コイル巻線は 4 層の H T S 伝導体 2 0 2 から形成されており、伝導体 2 0 2 は、以下でさらに述べるように、幅が例えば 1 2 m m、1 6 m m 又はそれ以上というように大きな幅 w_c を有して形成されている。各ポールセットは $\theta = 1 8 0$ 度の円弧部を磁極対の数で割ったものを占めるように巻かれている。伝導体の大きな幅 w_c は、円弧部（図 8 参照）内で使用できるように伝導体 2 0 2 の単層配置を可能にし、そのことが伝導体 2 0 2 の円弧（例えば利用可能な空間）において非常に効率的かつ高密度の充填に寄与する。改良された充填は必要とされる絶縁体が少なくなるため、結果としてより高い電流密度、すなわち、より高いアンペア - 巻きになる。さらに、たった一つの伝導体の層が各巻線 6 4 に巻かれているため、複数の層が使用されている構成に比べ、製造において必要とされる労力が少なくなる。また、伝導体の高い充填密度は、送電容量において 3 0 パーセントの利益となる電流再分配を促進する構成である。このことは、非常に幅広の単層の巻線が、一般的にポールセットにおいて放射方向外側及び内側の縁部において、伝導体 2 0 2 の C 軸に平行であり、かつ、円弧の中央付近において伝導体 2 0 2 の B 軸に平行な束密度における勾配にさらされるために生じる。テクスチャ Y B C O 及び B S C C O 伝導体は、付与された束密度が伝導体の C 軸に平行であるときに、より大きな電流を送電する。このように、幅広の伝導体 2 0 2 は、円弧の縁部から円弧の中央への電流再分配を開示する。

【 0 0 4 7 】

4 層の伝導体 2 0 2 を含む単層の巻線 6 4 を用いた H T S 機械は従来の機械に対し、相対的により小型でかつ軽量であり、その上、6 0 0 アンペアの動作電流を提供する。このことは、例えば、エアギャップ束密度が 1 . 5 T より大きく、ロータアイアンとステータバックアイアンとの間の効果的なエアギャップが約 2 0 0 m m であり、かつ、円弧部の絶縁された巻きの厚さ 4 0 0 ミクロンに対し単層の巻線のターン数が 4 0 0 巻きよりも大きいときに達成される。

【 0 0 4 8 】

発電機 3 0 に使用するためのトルク制限カップリング 1 0 0 において選択された例示的な実施形態の詳細を説明した。本発明の実施例について上述したが、本発明は上記の実施例に限定されるものではなく、種々の設計変更は、特許請求の範囲に記載の本発明から逸脱することなく行うことができる。

【 0 0 4 9 】

伝導体 1 0 2 , 2 0 2 は二つの支持薄層 1 0 8 , 1 1 0 を含むものとして本明細書に記載されているが、伝導体は二つ以上の薄層を有して形成してもよい。さらに、第 1 支持薄層 1 0 8 は必ずしも第 2 支持薄層 1 1 0 と同じ材料で形成される必要はない。代わりに、伝導体 1 0 2 , 2 0 2 は異種の材料から形成された薄層を含んでもよい。支持薄層 1 0 8 , 1 1 0 は厚さ 0 . 0 5 0 m m を有するものとして記載されているが、支持薄層は 0 . 0 5 0 m m 以外の厚さを有するように形成してもよい。

【 0 0 5 0 】

伝導体 1 0 2 , 2 0 2 は、一つまたは二つのインサートを有するものとして本明細書に記載されているが、伝導体はこの数のインサートに限定されるものではない。いくつかの

10

20

30

40

50

実施形態では、伝導体は、二つ以上のインサートを有するように形成してもよい。また、通常の金属がそれぞれのインサートの間に配置されてもよい。

【 0 0 5 1 】

図示の実施形態では、ロータ巻線 6 4 は、極低温冷却システムを使用してロータ支持チューブ 6 8 を介して冷却される伝導体であるが、ロータ巻線の伝導冷却は、他の技術を使用して達成することできる。例えば、他の実施形態では、冷却チューブは、ロータ巻線 6 4 を仲介するロータ支持チューブ 6 8 の外側面に溶接される。さらに他の実施形態では、冷却チューブは、マンドレル 6 6 及び巻線 6 4 の少なくとも一方に配置されてもよい。あるいは、ロータ巻線 6 4 を冷却するための他の方法が、冷却チューブの配置の代わりに用いられてもよい。例えば、いくつかの実施形態において、ロータ巻線 6 4 を冷却するた

10

【 0 0 5 2 】

また、本発明を明確にするために必要と考えられる構造のみが、本明細書に記載されていることを理解されるべきである。他の従来の構造や、システムの付属的及び補助的な構成要素は、当業者には理解されているものとする。

【 図 1 】

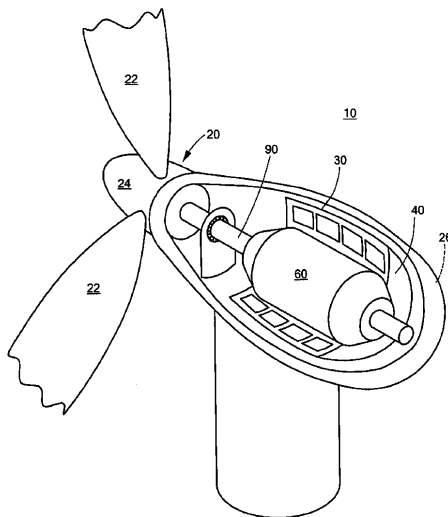


FIG. 1

【 図 2 】

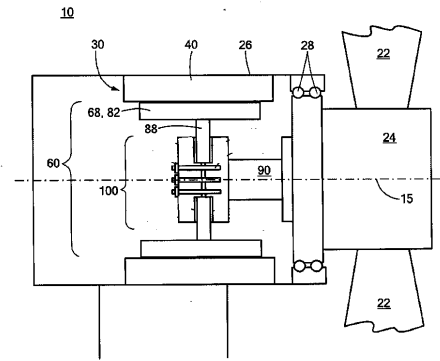


FIG. 2

【 図 3 】

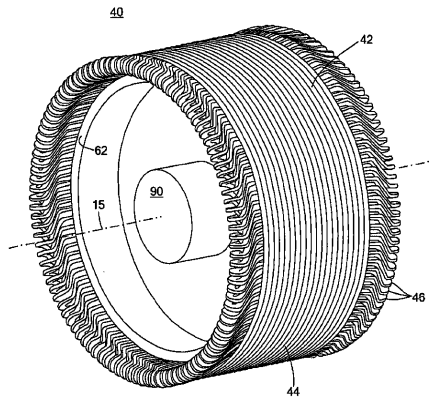


FIG. 3

【 図 4 】

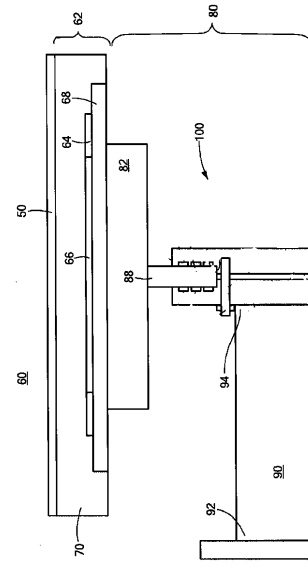


FIG. 4

【 図 5 】

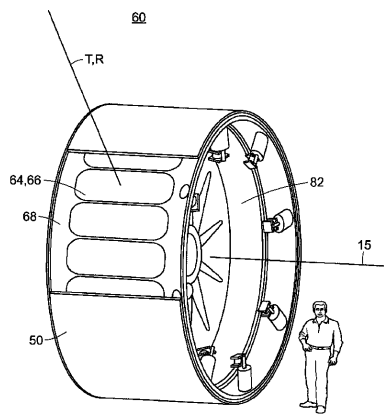


FIG. 5

【 図 6 】

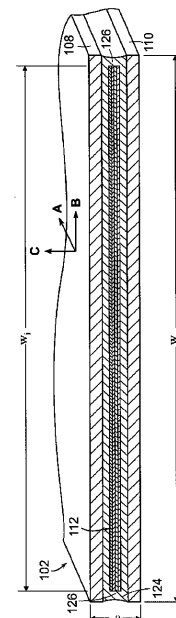
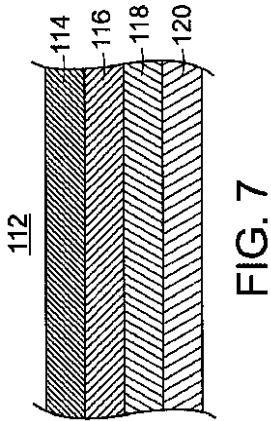
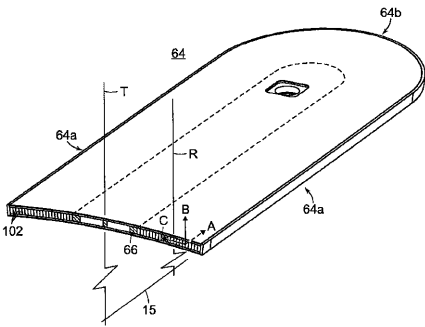


FIG. 6

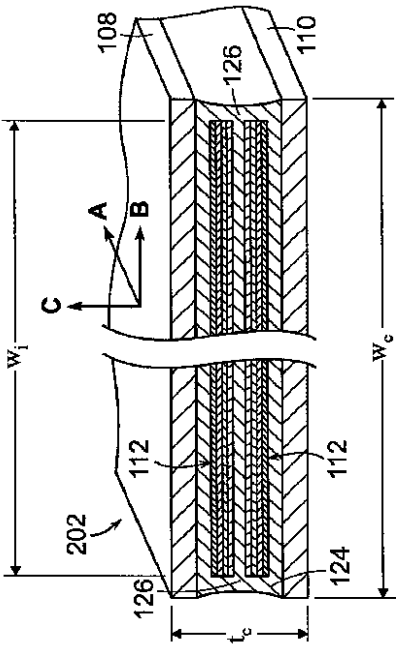
【 図 7 】



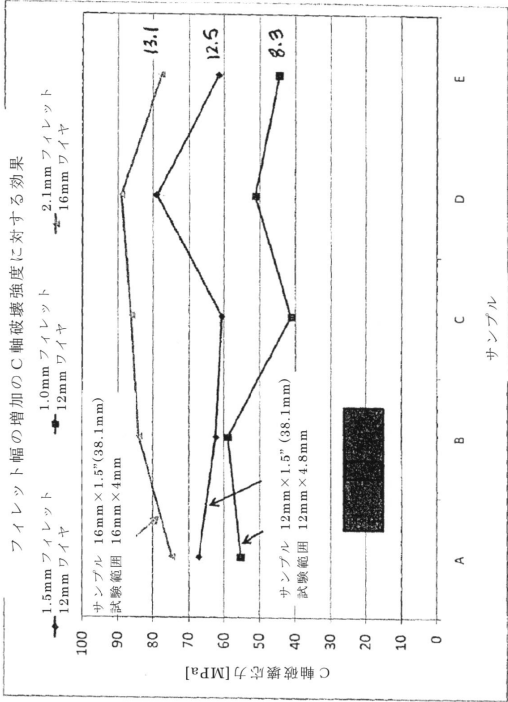
【 図 8 】



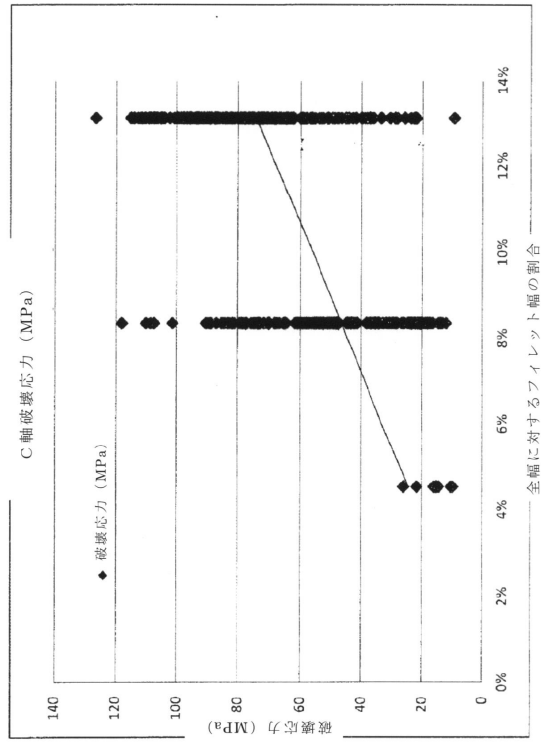
【 図 9 】



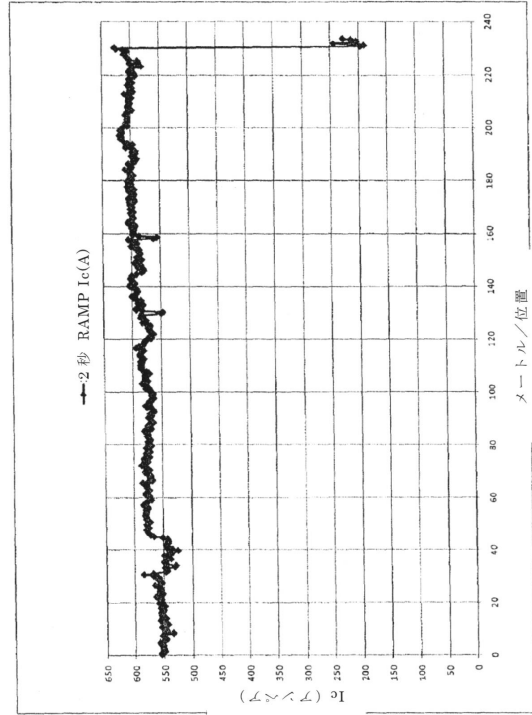
【 図 10 】



【図 1 1】



【図 1 2】



フロントページの続き

- (72)発明者 タナー、マイケル エイ .
アメリカ合衆国 01581 マサチューセッツ州 ウェストボロー ブリックヤード レーン
8
- (72)発明者 スニッチラー、グレゴリー エル .
アメリカ合衆国 01545 マサチューセッツ州 シュルーズベリー イレタ ロード 64
- (72)発明者 カーター、ウィリアム エル .
アメリカ合衆国 01824 マサチューセッツ州 チェルムスフォード ウェストチェスター
ロード 17
- (72)発明者 ポッドバーグ、エリック アール .
アメリカ合衆国 01760 マサチューセッツ州 ナティック シャーウッド ロード 28

審査官 安池 一貴

- (56)参考文献 特表2009-503794(JP,A)
特表2003-505848(JP,A)
特開2011-198469(JP,A)
特開2008-243588(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H02K 3/00 - 3/28
H02K 55/00 - 55/06
H01B 12/00 - 12/16
H01B 13/00 - 13/02