

# 超電導を用いた航空機用高効率・高出力電気推進システム －超電導ケーブルの開発－

## High Efficiency and High Power Electric Propulsion System for Airplane by Superconductivity － Development of Superconducting Cable －

塩原 敬  
Kei SHIOHARA

佐藤 迪夫  
Michio SATO

金山 諄志  
Atsushi KANAYAMA

中西 達尚  
Tatsuhisa NAKANISHI

高橋 保夫  
Yasuo TAKAHASHI

青木 裕治  
Yuji AOKI

三堂 信博  
Nobuhiro MIDO

足立 和久  
Kazuhiisa ADACHI

和泉 輝郎\*  
Teruo Izumi

岩熊 成卓\*\*  
Masataka IWAKUMA

超電導電気推進航空機では、モータ、発電機、変圧器、ケーブルに REBCO ( $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ , RE は希土類元素, Y, Gd, Sm, Nd, Eu など) 超電導線材を使用する予定である。このうち、本システムのケーブルには軽量でありながら所定の通電特性を兼ね備えた超電導ケーブルが求められている。そこで、軽量化を図れる線材積層型超電導ケーブル構造を選定し、長尺ケーブルの検証を実施した。このプロジェクトにて開発している線材を用いて 20 m 級の線材積層型超電導ケーブルの作製が可能であることを把握した。また通電試験を行い、航空機使用への線材積層型超電導ケーブルの有効性を確認した。

Some motors, generators, transformers and cables will be made by REBCO ( $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ , RE: rare earth element, Y, Gd, Sm, Nd, Eu etc) superconducting coated conductors in the proposed superconducting electric propulsion system. A laminated superconducting cable is required light weight and large and current-carrying properties for the airplane system. We have developed the light weight laminated superconducting cable and confirmed that it is possible to fabricate 20 m-class laminated cables using the coated conductors developed in this project. The current-carrying properties were also obtained, confirming the effectiveness of the laminated cables for use in airplane.

### 1. はじめに

昨今、高温超電導の本格的な実用化に向けて材料となる線材や各機器開発について国内外共に様々なプロジェクトにより成果が精力的に報告されている。

当社としても線材開発やそれを用いた BASF ジャパン株式会社 戸塚事業所にて実証試験を実施した三相同軸型超電導ケーブルなどの成果を報告してきた<sup>1)~9)</sup>。

ただし、高温超電導技術の真の普及という観点から鑑みると未だ途上段階を脱していないと考えられる。その主たる要因として、

- ✓ 高線材コスト
- ✓ 超電導でなければ達成しきれないという「絶対的な優位性」の欠如
- ✓ 需要側ユーザー/マーケットの本気度不足などの課題が挙げられる。そこで、この現状を打破する新展開として高温超電導技術を活用した「電気推進航空機への応用」が昨今考えられている。

まず社会的な背景として、現状国内で年 900 万 ton, 国外で 5 億 ton とされる CO<sub>2</sub> 排出量が航空機業界の大きな課題で、さらに旅客機は 20 年後に倍増すると予測されている<sup>10)</sup>。この予測に対して対策を講じない場合、CO<sub>2</sub> 排出量が倍増することは自明であるが、CO<sub>2</sub> 排出量に関しては 2030 年までに 2013 年の 1/2 にすることが国連機関にて宣

\* 国立研究開発法人 産業技術総合研究所

\*\* 九州大学

言われている<sup>11)</sup>、<sup>12)</sup>。そのため、旅客機の機体数が倍増すると予測されている中で、CO<sub>2</sub>排出量を1/2となると1機体当たり1/4以下の排出量とすることが求められる。さらに、2050年カーボンニュートラルの実現も表明されている<sup>13)</sup>。これらの目標を達成するためには、新たな技術革新が必要不可欠であることは航空機業界として周知されており、この新たな技術革新として航空機の「電気推進化」が考えられている。

この航空機の電気推進化については、NASA (National Aeronautics and Space Administration) から電気推進システムには高温超電導を用いることがコンセプト提案され、これによる省エネ試算結果は70%とされる<sup>12)</sup>。

また、超電導を使用する電気推進航空機はJAXA (宇宙航空研究開発機構) や航空機メーカーにおいても検討されている<sup>14)</sup>、<sup>15)</sup>。当社が参画する航空機用超電導プロジェクト (プロジェクトリーダー | 九州大学, 産学合わせて12社のNEDO (国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構) 委託事業) では、1 MW 推進システムの実現可能性検証として地上試験の実施を予定している。本稿では、この地上試験に向けた線材積層型超電導ケーブルの開発ならびに通電特性について報告する。

## 2. 電気推進航空機の技術的背景

航空機として現在最も流通しているジェット機は推進力としてジェットエンジンを使用しているが、電気推進航空機化するには、ジェットエンジンを電動モータに換え、モータによりファンを回転させ航空機の推進力にする。電気推進航空機を効率よく飛行させるモータにするためには推進力 (kW) / 重量 (kg) の指標が重要視される。銅を導体に用いた従来の一般的な全電動方式モータでは2 kW/kgとされている。航空機として求められる推進力を想定すると、従来型のモータではモータの総重量は5~10 tonクラスとなり、電動航空機への使用には重すぎるため検討の余地がない。一方、全超電導モータでは20 kW/kg、重量としては0.5~1 tonクラスが可能となる。このため、従来の10倍の効率化が可能となる<sup>16)</sup>、<sup>17)</sup>ことが期待され、超電導技術を使用することにより「軽く」かつ「高出力・大電流化が可能」とすることが航空機の電動化における必須命題である。

今回、我々が提案する電気推進システムのコンセプトは「超電導発電機と超電導モータを超電導ケーブルにて接続する全超電導のシステム」となっている (図1)。本コンセプトにより、冷媒ならびに電力を連続的に供給できる軽量でシンプルな構造を提案している。

さて、上記の技術的背景から、冒頭に示した「超電導業界の現状有する課題」に対して「超電導の航空機応用」を実施した際の利点として

- ✓ 線材コスト | 機器費用に対して相対的に極小  
ex.) 100人乗り航空機 = 約¥100億  
エンジン = 約¥20億 ⇔ 線材 < ¥0.5億

- ✓ 絶対的優位性 | 超電導でのみ大型機の電動化可能
- ✓ 需要側ユーザーの本気度 | 航空機メーカーも検討を開始 (本気度有り)

が挙げられる。

これらより超電導業界が現状抱える課題に対して、超電導技術の適用先として航空機応用が妥当であると考えられる。

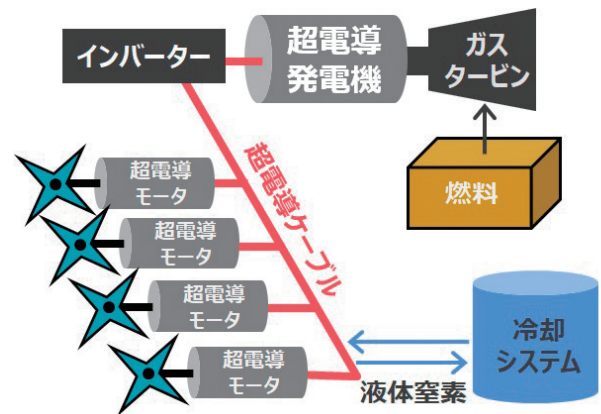


図1 電気推進システムのコンセプト

## 3. 航空機用超電導プロジェクトの概略スケジュールと研究開発項目

今回当社が参画する航空機用超電導プロジェクトは2019年度から開始し、ケーブルや線材などの各種要素基盤技術開発を継続的に実施しながら500 kWならびに1 MWの超電導モータを作製する5年のプロジェクトとなる (図2)。また、今後継続が予定されるプロジェクトでは20 MW 推進システムが計画されており、その要素技術開発の側面を有している。

現状参画しているプロジェクトの研究開発項目は「要素技術開発」と「機器機能検証」に大別される。まず、要素技術開発については、モータ、ケーブル、冷却装置、超電導線材、低温動作半導体の5項目の開発となっている。この要素技術開発の目標は「500 kW モータの基礎技術確立」と「1 MW システム用回転機の開発」である。また、機器機能検証については、500 kW モータと1 MW 推進システム要素の開発である。500 kW モータの目標は、モータを作製し「モータの5 kW/kgへの展望把握」と「フライトテストに向けた評価」である。最終的な1 MW 推進システム要素の開発目標については「システムの実現可能性確認」である。当社が担当する開発項目は超電導ケーブルシステムと超電導線材となっており、1 MW 推進システム要素開発のタイミングでの導入を予定している。

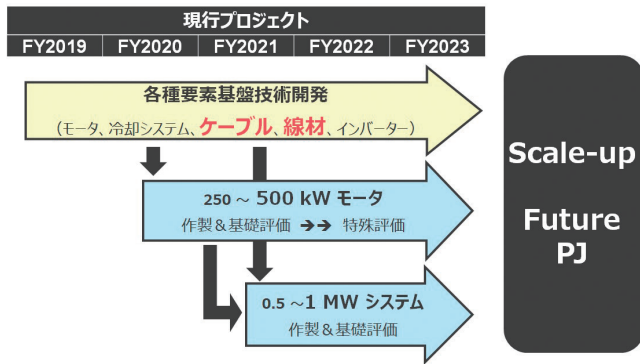


図2 航空機用超電導プロジェクトの概略スケジュール

#### 4. 航空機用超電導ケーブルの開発

##### 4.1 航空機用超電導ケーブルへの要求性能

図1に示す超電導モータへの電源供給用のケーブルとして適用される超電導ケーブルについては他の航空機用機材よりもさらに軽い目標として「さらなる軽量化 (<1 kg/kA/m)」の指標に挑戦している。当社は三相同軸型超電導ケーブルの実績を有するが、使用したケーブル重量の約70%はコルゲートが占めており、この重量を削減することが航空機用への適用には大きな課題となる(表1)。そこで、ケーブル要求性能へのアプローチとして

- ✓ 積層型ケーブルによる細径化/軽量化
- ✓ コルゲート部材の材料変更

を検討している。今回はケーブルの小型軽量化を達成するために、通電時に発生する自己磁場の影響による $I_c$ 値の減衰を許容し、REBCO (REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>, REは希土類元素, Y, Gd, Sm, Nd, Euなど)線材<sup>18), 19)</sup>を積層させた導体をケーブル化するものとした。積層導体により、三相同軸ケーブルではφ64.3 mm<sup>7)</sup>であったケーブルコア外径をφ39.5 mmに小型化が可能となった。これにより、課題となっていたコルゲート重量が抑えられ、ケーブルとしての全重量の軽量化を図れる。今回作製した「積層型ケーブル」ならびに「交流電用積層型ケーブル」においては、各々1.29 kg/kA/m, 1.45 kg/kA/mと、三相同軸ケーブルの約1/3の重量を達成した。将来的には、前述した様に重量割合の高いコルゲートなど材料を変更することで、目標とされる1 kg/kA/mを最終的に達成することが可能となる。

また、今回のプロジェクトにおいて、積層型ケーブルには「交流電にて運転電流 ( $I_{op}$  (operation current)) 値が1110 A<sub>rms</sub>」が併せて求められる。ここで、直流通電での臨界電流 ( $I_c$  (critical current)) 値を交流電時の波高値と定義し、 $I_{op}$  値は $I_c$  値の実効値換算とする。そのため、今回のプロジェクトにおいては $I_c$  値=1570 A以上が求められる。この目標 $I_c$  値を確保するため、線材の自己磁界中の $I_c$  値を考慮して積層枚数を30枚とした。

表1 三相同軸型超電導ケーブルと積層型超電導ケーブルの重量比較

	11 kV-3 kA 3 相同軸 ケーブル	積層型 ケーブル (1 kV-1.5 kA)	現状設計 交流電用 積層型ケーブル (1 kV-1.5 kA)	将来設計 交流電用 積層型ケーブル (1 kV-1.5 kA)
導体コア [kg/m]	2.4	0.57	0.57	0.57
現状スベーサ [kg/m]	-	-	0.23	-
新規スベーサ [kg/m]	-	-	-	0.16
SUS 製 コルゲート [kg/m]	7.9	0.58	0.58	-
新規 コルゲート [kg/m]	-	-	-	0.09
断熱材 [kg/m]	-	0.27	0.27	0.27
液体窒素 [kg/m]	1.8	0.52	0.52	0.52
ケーブル全体 [kg/m]	12.1	1.94	2.17	1.61
ケーブル全体 [kg/kA/m]	4.03	1.29	1.45	1.07

##### 4.2 積層型ケーブル構造検証

今回のプロジェクトでは機体の最大長となる主翼部で最大長20 mを検討している。そのため、当社製REBCO線材を用いて20 m積層型超電導ケーブルを当社愛知工場にて製造を実施し、既設のケーブル製造設備での20 m級のケーブル製造能力があることを把握した。作製したケーブルの断面構造と燃合せ工程を示す(図3)。本ケーブルに大気中・液体窒素(77 K)浸漬冷却にて、各相のケーブル $I_c$  値を直流4端子法にて取得した(図4)。この結果、各相 $I_c$  値は約1900 Aを取得し、積層型ケーブルによる直流通電での目標である1570 A以上の通電を達成した(図5)。

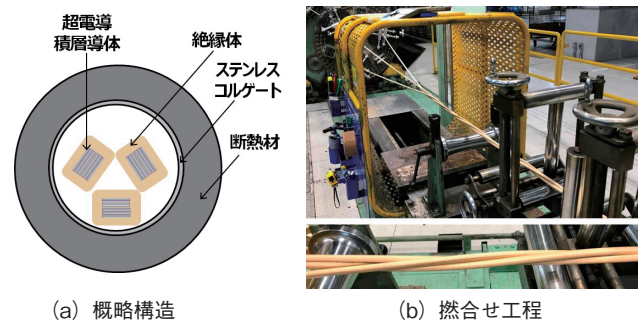


図3 積層型超電導ケーブルの概略構造と燃合せ工程

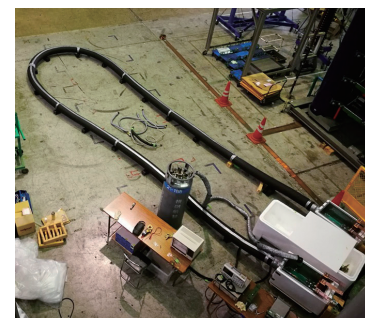


図4 積層型超電導ケーブルの直流通電試験時の全体外観

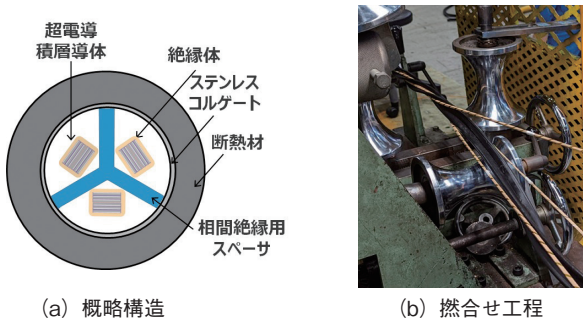


図5 交流通電用積層型超電導ケーブルの概略構造と燃合せ工程

### 4.3 交流通電用積層型ケーブル構造検証

次のステップとして、上記の積層型ケーブル構造を基に交流通電に適したケーブル構造を開発した。交流通電用ケーブルにおいては、積層導体からの十分な放熱性と電気絶縁性が確保される必要がある。図3に示した構造の積層型ケーブルでは、各相導体毎に絶縁を十分に施し、相間絶縁性能を担保する構造としていた。ただし、本ケーブル構造においては各相の絶縁層が厚いため、通電時の熱はけが悪く、交流通電においては直流通電時には発生しない交流損失による発熱が生ずるためケーブルへの冷却に対して課題が残る。このため、プロジェクト目標である「交流通電にて  $I_{op}$  値が  $1110 A_{rms}$ 」を達成するには、さらなる冷却が可能なケーブル導体の構造が求められる。

そこで、今回のプロジェクト仕様電圧が  $1 kV$  のため、耐電圧については絶縁スペーサにて担保する設計とし、各相導体の絶縁層については30枚積層導体構造の一体化・維持させることを主目的として各相導体の絶縁層を  $2 mm$  厚から  $0.2 mm$  厚に薄くした。これらより、各相導体の冷却を促進し、相間絶縁を担保する構造とした。この交流通電用積層型ケーブルの断面構造と燃合せ工程を示す(図5)。

交流通電用積層型ケーブル導体長  $1 m$  を大気中・液体窒素浸漬下にて交流通電測定を実施した。交流通電による導体の劣化を直接的に判定することが困難なため、交流通電前後に直流通電での  $I_c$  値を測定し、 $I_c$  値の劣化有無にて導体劣化を判定した(図6)。本ケーブルの液体窒素浸漬下 ( $77 K$ ) での直流4端子法にて得られたケーブル  $I_c$  値は  $3800 A$  であり、交流通電時の負荷率  $1.0$  の  $I_{op}$  値は  $2687 A_{rms}$  となる。今回は、プロジェクト目標である  $1110 A_{rms}$  以上かつ安全率 ( $50\%$ ) も考慮し、 $500 A_{rms}$  (負荷率  $0.19$ ) から  $1400 A_{rms}$  (負荷率  $0.52$ ) まで  $51 Hz$  の交流を通電し、導体劣化の有無を直流4端子法にて確認した。その結果、交流通電後の直流通電試験による  $I_c$  値確認において、事前に把握したケーブル  $I_c$  値である  $3800 A$  を取得し、劣化がないことが確認された。

この結果より、交流通電用積層型ケーブル構造において、航空機用超電導ケーブルに求められる要求性能が満たされることを把握した。

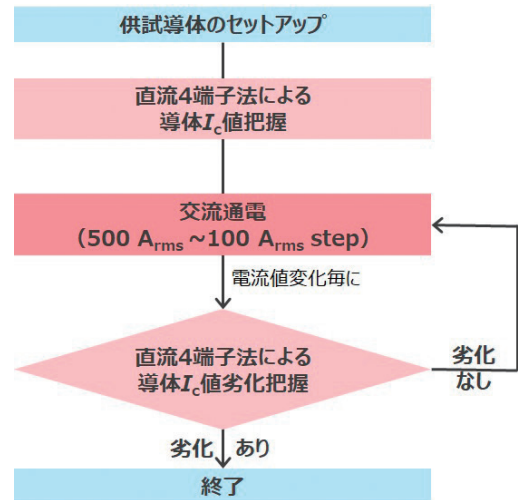


図6 測定フロー

## 5. まとめ

電気推進航空機用に適用される超電導ケーブルへの要求性能として、「さらなる軽量化 ( $< 1 kg/kA/m$ )」ならびに「 $I_{op}$  値 =  $1110 A_{rms}$ 」が求められている。これらの目標を達成するために本プロジェクトでは、REBCO 線材を用いた線材積層型超電導ケーブルを採用した。これにより、三相同軸型など従来の超電導ケーブルに比較して、約  $1/10$  の軽量化を見込んだ。ケーブル製造においては、当社ケーブル製造設備を用いて、予定する機体主翼部長の最大である  $20 m$  級の製造能力を確認した。また、通電特性においては、熱はけ対策を施した積層ケーブルにてプロジェクト目標を達成することを確認した。

本ケーブルが適用可能となれば、超電導技術でなければ達成しきれないという電気推進航空機の実応用に向けて、大きく資することが期待される。

## 謝 辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP15005) の結果得られたものです。

## 参考文献

- 1) 足立和久, 他: 昭和電線レビュー, Vol. 61, P15-19 (2015)
- 2) 菅根秀夫, 他: 昭和電線レビュー, Vol. 62, P5-8 (2016)
- 3) 北村祐, 他: 昭和電線レビュー, Vol. 63, P18-23 (2017)
- 4) K.Adachi, et, al: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 26, 4, Article number 5400604, 2016. 06.
- 5) K.Adachi, et, al: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 27, 4, Article number 5401105, 2017. 06.
- 6) K.Adachi, et, al: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 28, 4, Article number 5401104, 2018. 06.
- 7) K.Shiohara, et, al: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 31, 5, Article number 4801804, 2021. 03.
- 8) 足立和久, 他: 昭和電線レビュー, Vol. 66, P10-15 (2020)

- 9) 足立和久, 他: 昭和電線レビュー, Vol. 67, P30-35 (2021)
- 10) 日本航空機開発協会: 民間航空機に関する市場予測: 2017-2036
- 11) 国連国際民間航空機関 (International Civil Aviation Organization) : Annual Report of the ICAO Council: 2013
- 12) James Beard, Airlines' biofuel ambitions must not increase emissions, Environmental Defense Fund
- 13) 令和3年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2022)
- 14) JL Felder et al. : ISABE-2011-1340
- 15) 宇宙航空研究開発機構: エミッションフリー航空機技術の開発:  
<https://www.aero.jaxa.jp/research/frontier/feather/>
- 16) Airbus: Cryogenics and superconductivity for aircraft, explained (March 2021)
- 17) A. Luongo, et. al: IEEE Trans. Appl. Supercond., 19, 3 :1055 - 1068
- 18) 木村一成, 他: 昭和電線レビュー, Vol. 60, P20-24 (2014)
- 19) 塩原融, 他: 日本金属学会誌, 第80巻, 第7号 P406-419 (2016)

昭和電線ケーブルシステム(株)  
塩原 敬 (しおはら けい)  
技術開発センター 超電導応用製品課  
博士 (工学)  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)  
佐藤 迪夫 (さとう みちお)  
技術開発センター 超電導応用製品課  
博士 (工学)  
超電導線材の研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)  
金山 諄志 (かなやま あつし)  
技術開発センター 超電導応用製品課  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)  
中西 達尚 (なかにし たつひさ)  
技術開発センター 超電導応用製品課  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)  
高橋 保夫 (たかはし やすお)  
技術開発センター 超電導応用製品課  
超電導線材の研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)  
青木 裕治 (あおき ゆうじ)  
技術開発センター 超電導応用製品課  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)  
三堂 信博 (みどう のぶひろ)  
技術開発センター 超電導応用製品課  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)  
足立 和久 (あだち かずひさ)  
技術開発センター 超電導応用製品課  
課長  
博士 (工学)  
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

国立研究開発法人 産業技術総合研究所  
和泉 輝郎 (いずみ てるお)  
省エネルギー研究部門  
主任研究員  
工学博士  
超電導線材の研究・開発に従事

九州大学  
岩熊 成卓 (いわくま まさたか)  
先進電気推進飛行体研究センター  
センター長  
工学博士  
超電導電力機器の研究・開発に従事