

電動推進航空機向け 樹脂コルゲートを用いた超電導ケーブルの開発

Development of Superconducting Cable using Resin Corrugated Tube for electrically propulsion Aircraft

金山 諄志
Atsushi KANAYAMA

塩原 敬
Kei SHIOHARA

佐藤 迪夫
Michio SATO

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
Kazuhisa ADACHI

和泉 輝郎*
Teruo Izumi

岩熊 成卓**
Masataka IWAKUMA

著者らは電動推進航空機向けの超電導ケーブルの開発を行っており、この超電導ケーブルには所定の重量目標と通電性能が求められている。事前に開発／試験を実施した超電導ケーブルは、金属製コルゲート管を用いていたことにより、所定の重量目標に至らなかった。重量目標に対する対策として、ケーブル内で大きな割合を占めるコルゲート管に着目し、コルゲート管の樹脂化を試みた。今回、樹脂製コルゲート管が液体窒素浸漬下においても使用が可能で、軽量化に有効であることを確認した。また、今回作製した積層導体では三相通電試験においても目標値を達成することが確認された。

We have been developing the superconducting cable for an electrically propulsion aircraft that is required to have a specified weight target and current-carrying performance. The superconducting cable developed and tested in advance failed to meet the prescribed weight target owing to the use of metallic corrugated tubes. As a countermeasure to the weight target, we focused on the corrugated tube, which accounts for a large proportion of the cable, and attempted to convert it to resin. In this study, we confirmed that corrugated resin tubing can be used under liquid nitrogen immersion and is effective for weight reduction. In addition, it was confirmed that the target values were achieved in a three-phase current-carrying test of the laminated conductor fabricated in this study.

1. は じ め に

近年世界的に地球温暖化に対する取り組みとして、温室効果ガスの排出量を実質ゼロとするカーボンニュートラルへの取り組みが注目を浴びている。航空機業界においても同様で、国際航空運送協会（International Air Transportation Association : IATA）や国際民間航空機関（International Civil Aviation Organization : ICAO）が、二酸化炭素（CO₂）排出量を2050年までに実質ゼロにする目標を掲げている^{1), 2)}。

旅客機の需要は増加傾向にあり、2021年に比べて20年

後には倍増となることが予想されている³⁾。この需要の増加に対してCO₂排出量を削減の方法として、既存技術の改善や、次世代技術としてのバイオ燃料などが注目されている。しかし、CO₂排出量を実質ゼロにするためには更なる技術革新が必要であり、その一つとして超電導技術を用いた電動航空機推進システムがある^{4), 5)}。

SWCC(株)では、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（New Energy and Industrial Technology Development Organization : NEDO）から委託を受け、2019-2023年度「航空機用先進システム実用化プロジェクト／次世代電導推進システム研究開発」に参画した。さらに2024-2026年度「航空機向け革新的推進システム開発事業」に参画している。このプロジェクトにおいて発電機、モーター、ケーブルのすべてに超電導技術を使

* 国立研究開発法人 産業技術総合研究所

** 九州大学

用した電動航空機推進システムを提案している⁶⁾。その中でSWCC(株)の開発項目の担当の一つに超電導ケーブル開発が挙げられる。この超電導ケーブルにおける主たる開発目標としては重量目標として1.0 kg/kA/m以下、通電特性として三相交流通電での運転電流(I_{op} (operation current))値1110 A_{rms}通電が求められている。先行研究として、SWCC(株)の愛知工場において20 mの線材積層型超電導ケーブルを製作し、通電試験を実施した⁶⁾。その際に作製した超電導ケーブルの重量は1.45 kg/kA/mであった。この超電導ケーブル⁶⁾において大きな割合を占める金属コルゲート管部分に着目し、コルゲート管材料の樹脂化により、超電導ケーブル全体としての劇的な軽量化を図ることを本研究の目的とした。そこで、本レビューでは新しく開発した樹脂コルゲート管を用い15 m級三相一括構造の線材積層型超電導ケーブルを作製し、液体窒素冷却時の通電試験を実施した結果について報告する。

2. 樹脂コルゲートを用いた超電導ケーブル開発

2.1 超電導ケーブルの構造

超電導ケーブルに使用した超電導線材は、有機酸塩塗布熱分解法(Trifluoroacetates Metal Organic Deposition : TFA-MOD法)によりSWCC(株)で作製された $Y_{0.77}Gd_{0.23}Ba_2Cu_3O_y + BaZrO_3$ 線材である⁷⁾。

航空機の翼の長さからケーブル長は15 mとし、0.2 mmの絶縁紙を各相の積層導体に巻き付けた⁶⁾。1 kVの相間電圧に耐えうるために、相間にスペーサーを設けた。

直流通電の臨界電流(critical current : I_c)値を交流通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と、プロジェクト目標として $I_c=1570$ A以上が求められる。さらに自己磁場を考慮すると最大で素線 I_c 値の30%の低下が考えられるため⁸⁾、2240 A以上の素線 I_c 値の総和が必要となる。この値に25%以上の安全率を考慮し、本超電導ケーブルの直流での I_c 値の仕様値を3 kAとした。このことから積層する超電導線材の積層枚数を30枚とした。

この超電導ケーブルの概略構造を図1に示す。今回、コルゲート管の二重管構造を採用した。内管部分は液体窒素の流路となり、内部の積層導体三相分を冷却する。内管と外管の間の部分は真空断熱層を形成する。本開発品では、この内管、外管のコルゲート管を樹脂化することで大幅な軽量化を図った。

2.2 樹脂コルゲート管を用いた超電導ケーブル試作

スーパーエンジニアリングプラスチックの一種であるポリフェニルスルホン(PolyPhenylSulfone : PPSU)を用いたコルゲート管を作製した。コルゲート管は内管(内径21 mm ϕ)および外管(内径35 mm ϕ)の2種類を作製した。内管ならびに外管コルゲート管の概略図と寸法を図2に示す。

PPSUは低温でも弾性を示し、衝撃に強いという特長がある。試作した外管コルゲート管を液体窒素にて3時間浸

漬させたのち、直ちに図3のように曲げてみたが、PPSUコルゲート管にひびや割れなどが生じることなく、極低温下においても十分な可撓性を有することを確認した。

このPPSUコルゲート管を用いて三相一括の線材積層型超電導ケーブルを作製した。前述した愛知工場での製作においては、内管は金属コルゲート管を採用し、外周に断熱材を設ける構造としていた。先行製作での超電導ケーブルの外径は140 mmに対して、本開発品の超電導ケーブルの外径は40.1 mmであり、大幅にコンパクト化した。本開発品の超電導ケーブルはPPSUコルゲート管での二重管構造

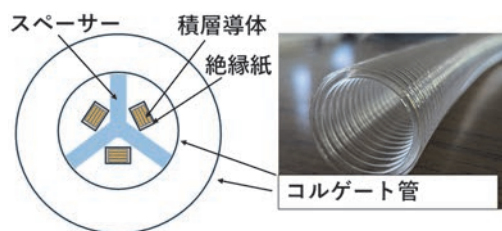


図1 超電導ケーブル概略構造

		寸法(mm)
外コルゲート	外径(a)	40.1
	内径高さ(b)	1.5
	厚み(c)	1.0
	内径(d)	35.1
クリアランス(e)		4.0
内コルゲート	外径(f)	27.0
	内径高さ(g)	2.0
	厚み(h)	1.0
	内径(i)	21.0

図2 二重管コルゲート概略図および各寸法表



図3 液体窒素浸漬後の外管コルゲート管の曲げ試験

表1 愛知工場開発品と本開発品超電導ケーブルの重量比較

	愛知工場試験 超電導ケーブル (1 kV-1.5 kA)	本開発品 超電導ケーブル (1 kV-3 kA)
断面構造		
液体窒素流路部分内径[mm]	39.5	21.0
超電導ケーブル外径[mm]	140	40.1
導体コア[kg/m]	0.57	0.60
スペーサー[kg/m]	0.16	0.16
SUSコルゲート管[kg/m]	0.58	-
PPSUコルゲート管[kg/m]	-	0.25
断熱材[kg/m]	0.27	-
液体窒素[kg/m]	0.52	0.28
ケーブル全体[kg/m]	2.17	1.29
ケーブル全体[kg/kA/m]	1.44	0.43

を採用することにより、重量は 0.43 kg/kA/m となり、プロジェクトの目標数値を満たす軽量化を達成することができた。表 1 に愛知工場試験製作品と本開発品の重量比較表を示す。

3. 超電導ケーブル通電試験

3.1 樹脂コルゲートを用いた 15 m 長線材積層型超電導ケーブル通電試験方法

開発した樹脂コルゲート管を用いた 15 m 長三相一括線材積層型超電導ケーブルの直流および交流での通電特性を把握するために内管コルゲート管に液体窒素を注液し、通電試験を実施した。なお本通電試験においては、各積層導体に電圧の印加は行わないため、スパーサーを取り外して通電試験を実施した。

直流での各相の超電導ケーブルの I_c 値の測定方法は、直流四端子法にて評価した。電流 - 電圧特性を計測し、発生電圧が電界基準 ($1 \mu \text{ V/cm}$) に達した電流値を I_c 値と定義した。

交流通電試験の際には図 4 のように回路を組み、周波数は 51 Hz にて交流通電を実施した。各相測定 I_c 値の実効値換算の I_{op} 値近傍まで交流通電試験を実施した。その後直流で I_c 値を測定することで、交流通電によるケーブルの劣化の有無を確認した。

3.2 樹脂コルゲートを用いた 15 m 長線材積層型超電導ケーブル通電試験結果

コルゲート管の内径が細く圧力損失が大きいため、注液側の液体窒素容器に蓋を取り付け、 0.05 MPaG 程度の圧力をかけて液体窒素を圧送した。圧送することにより図 5 のように PPSU コルゲート管内に液が流れていくことが確認された。

15 m 長線材積層型超電導ケーブルの通電試験結果を表 2 に示す。表 2 に各超電導ケーブルの自己磁場を考慮した際の I_c 値総和、そして今回の測定での I_c 値、 I_{op} 値を記載した。

直流での I_c 値測定結果について述べる。プロジェクトの目標は 1570 A 以上であった。測定結果は、U、V、W 相でそれぞれ、 867 A 、 816 A 、 1570 A であり、W 相のみプロジェクト目標を達成した。

次に、各相の単相での交流通電試験結果について述べる。各相の交流通電時の I_{op} 最大値は U、V、W 相でそれぞれ 517 A_{rms} 、 612 A_{rms} 、 1117 A_{rms} であった。交流通電試験実施後、直流にて I_c 値を測定したところ、交流通電の前後で I_c 値に変化はなく、交流通電によるケーブルの劣化は確認されなかった。W 相のみプロジェクト目標である 1110 A_{rms} 通電を達成した。

液体窒素冷却中には常に内管コルゲート管内に液体窒素が流れていることが外から確認された。

全相とも自己磁場 I_c 値に対して実測電流値が低かった理由については図 5 のように、内管内は液相と気相が混合状態であり、積層導体が十分に冷却できなかったためと考え

た。そこで今回作製した超電導線材積層型導体の健全性を確認するために、冷却状態が改善された場合を想定し、オープンバスにて本試験で使った積層導体を液体窒素に浸漬させた状態で通電試験を再度実施した。

3.3 オープンバスにおける 2.5 m 線材積層型超電導ケーブル通電試験方法

今回作製した超電導線材積層型導体の健全性を確認するために、15 m 試験で用いたケーブルを 2.5 m ずつに切り分けて図 6 に示すオープンバスにおける液体窒素浸漬状態で通電試験を実施した。切り分けた 2.5 m 長のケーブルは 15 m 試験時の注液側に近い側から 1 とし各相 1 から 6 まで番号を割り振った (例えば、注液側に最も近い 2.5 m 分の各相のケーブルは U1、V1、W1 と記述する)。

全ての 2.5 m に切り分けた超電導ケーブルの直流 I_c 値を取得し積層導体の健全性を確認した。その後、15 m 試験において注液側から最も離れており、冷却状態が最も悪いと考えられる U6、V6、W6 の単相での交流通電を実施し、さらに三相一括での各相 1110 A_{rms} の交流通電を実施した。

3.4 オープンバスにおける 2.5 m 線材積層型超電導ケーブル通電試験結果

直流 I_c 値を取得した結果、全ての超電導ケーブルにおいて 2800 A 程度の自己磁場を考慮した I_c 値総和に近い想定通りの結果を得られた (表 3)。

U6、V6、W6 の超電導ケーブルの単相での交流通電試験の結果、その I_{op} 最大値はそれぞれ 1505 A_{rms} 、 1618 A_{rms} 、 1709 A_{rms} (表 3) であり、いずれもプロジェクト目標を達成した。また三相一括での 1110 A_{rms} 通電を実施し、試験後の直流 I_c 測定により、導体の劣化 (I_c 値劣化) がないことを確認した。以上の試験により、今回作製した超電導導体はプロジェクト目標を満たす通電性能を有することを確認した。

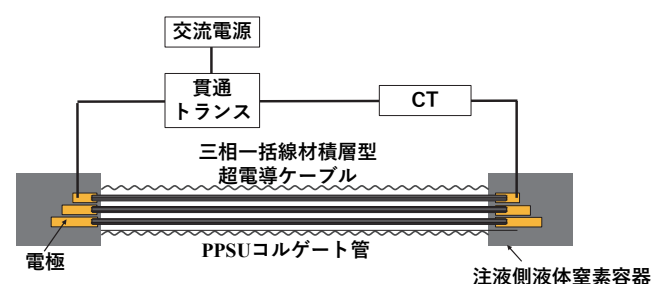


図 4 樹脂コルゲートを用いた 15 m 長線材積層型超電導ケーブル交流通電試験時回路図

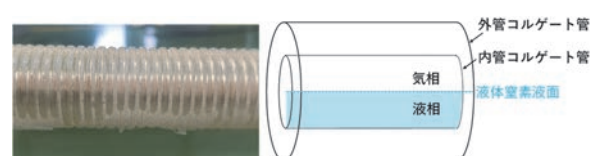


図 5 液体窒素冷却時のコルゲート管の様子と模式図

表2 15 m 超電導ケーブルの各 I_c 値 (左) と I_{op} 値 (右)

	自己磁場考慮 I_c 値総和 (A)	直流 I_c 値 (A)		I_{op} 最大値 (A_{rms})
U相	2804	867	U相	571
V相	2805	816	V相	612
W相	2800	1570	W相	1117

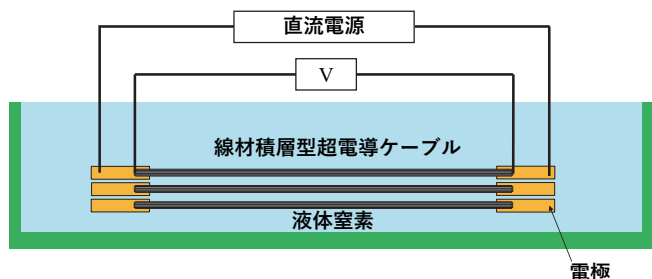


図6 オープンバスにおける直流通電試験概略図

表3 2.5 m 超電導ケーブル各 I_c 値 (上) と I_{op} 値 (下)

	直流 I_c 値 (A)		直流 I_c 値 (A)		直流 I_c 値 (A)
U1	2600	V1	3150	W1	3000
U2	3400	V2	3400	W2	3500
U3	2800	V3	3100	W3	3100
U4	2900	V4	3400	W4	3400
U5	3200	V5	3300	W5	3300
U6	3300	V6	3200	W6	2800

	I_{op} 最大値 (A_{rms})
U6	1505
V6	1618
W6	1709

4. 樹脂コルゲート管を用いた超電導ケーブルの設計指針

オープンバスでの液体窒素浸漬状態での通電試験結果から、積層導体はプロジェクト目標を超えるような通電性能を有することがわかった。PPSU コルゲート管を用いた通電試験において通電性能が低下した原因は、コルゲート管内部の冷却が不十分のためと考えられる。ここで、冷却状態の改善を行うための施策の一つとして、液体窒素の流量を増やす必要があるが、圧力損失を増やさずに流量を増やすためにはコルゲート管の大口径化が必要となる。大口径化に伴う重量変化を算出し、今後の設計指針を示す。

仮定として、積層導体の通電特性は今までと同様各相 3 kA で、導体重量も同様の重量（線材構成）とする。内管の内径半径、外径半径が r_i , r_e [m], 外管の内径半径、外径半径が R_i , R_e [m] で内管・外管ともに長さが L [m] の一様な円筒モデルとして考える。内管コルゲート管のモデルを図7に示す。また液体窒素重量を考える際には積層導体の断面積をゼロとして考える。

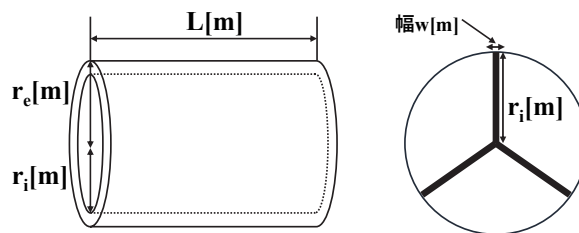


図7 内管コルゲート管とスペーサー（断面図）の計算モデル

実際のコルゲート管は図2のように長さ方向にその内外径が一樣ではないので、仮定として、内管は、

$$r_i = \frac{i}{2}, r_e = \frac{f}{2} \quad (1)$$

外管は、

$$R_i = \frac{d}{2}, R_e = \frac{a}{2} \quad (2)$$

として r_i , r_e , R_i , R_e を規定する。ただし、 a , d , f , i は図2において示した二重管コルゲートの概略図で定義した文字である。PPSU の密度を d_p [kg/m³] とすると、内管、外管の重量 W_i , W_e はそれぞれ式 (3), 式 (4) で表される。

$$W_i = d_p \pi (r_e^2 - r_i^2) L \quad (3)$$

$$W_e = d_p \pi (R_e^2 - R_i^2) L \quad (4)$$

ここで、コルゲート管（内管、外管）の内径半径、外径半径を n 倍した時の重量と、スペーサー重量、内管の内部全体が液体窒素で満たされているときの液体窒素重量を算出し、大口径化に伴う超電導ケーブルとしての単位重量を把握する。

内管、外管の内径半径、外径半径を n 倍した際にそれぞれの重量 W'_i , W'_e は式 (5), 式 (6) となり重量は n^2 倍となる。

$$W'_i = d_p \pi n^2 (r_e^2 - r_i^2) L = n^2 W_i \quad (5)$$

$$W'_e = d_p \pi n^2 (R_e^2 - R_i^2) L = n^2 W_e \quad (6)$$

次にスペーサーの重量について考える。スペーサーは図7に示すように、内径半径 r_i [m] の内管コルゲートに配置され、長さが r_i [m], 幅が w [m] の3つの部分から構成されるモデルと仮定し、長さが L [m] で一様で、密度は d_s [kg/m³] とする。またその幅 w は一定であるとし、積層導体同様に液体窒素重量を考える際にはその断面積はゼロとして扱う。スペーサーの重量 W_s は式 (7) で表される。

$$W_s = d_s \times r_i \times w \times 3 \times L = 3 d_s r_i w L \quad (7)$$

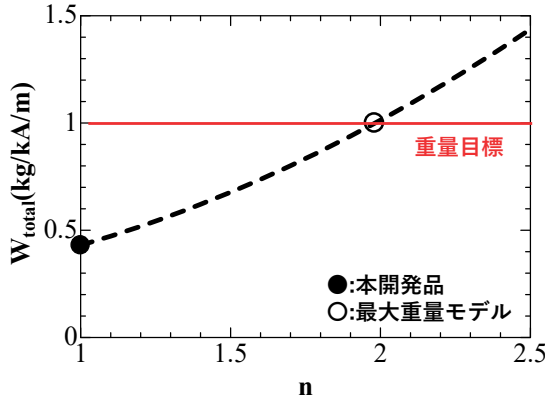


図8 コルゲート管の内管、外管の内径半径、外径半径を n 倍した際の三相一括線材積層型超電導ケーブルの重量
※破線はコルゲート管の各寸法を n 倍した際の W_{total} の変化を示す

内管コルゲートの内径半径が、 n 倍された時のスパーサー重量 W_s' は式 (8) となり、重量は n 倍になる。

$$W_s' = d_s \times nr_i \times w \times 3 \times L = 3nd_s r_i w L = nW_s \quad (8)$$

同様に液体窒素重量は最初の仮定に基づき、内管に配置される三相分の積層導体とスパーサーの断面積はゼロとして扱うため、単純に内管の径の増加に伴う内管の断面積変化のみを考慮すればよい。内管の断面積が n^2 倍になることから、液体窒素重量も n^2 倍となる。

本開発品の積層導体の重量は、0.6 kg/m であり、液体窒素重量が 0.28 kg/m である。内管、外管の内径半径、外径半径が n 倍された超電導ケーブルの単位長さ当たり重量 w_{total} は、式 (5), (6), (8) より、式 (9) で表される。

$$w_{total} = n^2(W_i + W_e + 0.28) + nW_s + 0.6 \text{ [kg/m]} \quad (9)$$

本開発品の PPSU コルゲート管重量 ($W_i + W_e$) は 0.25 kg/m、スパーサー重量 W_s は 0.16 kg/m であるので、式 (10) で表される。

$$w_{total} = 0.53 \times n^2 + 0.16 \times n + 0.6 \text{ [kg/m]} \quad (10)$$

この超電導ケーブルは 3 kA の通電性能を有することから、大口径化した際の 1 kA 当たりの単位長さ重量 W_{total} は、式 (11) で表される。

$$W_{total} = \frac{0.53 \times n^2 + 0.16 \times n + 0.6}{3} \text{ [kg/kA/m]} \quad (11)$$

また重量目標を満たす際の n の値は、式 (12) を満たすときで、 $n \leq 1.98$ となる。

$$W_{total} \leq 1 \text{ [kg/kA/m]} \quad (12)$$

本開発品は外内コルゲート内径がそれぞれ $R_e=35.0$ [mm], $r_e=21.0$ [mm] であるのに対して、式 (12) を満たす最大重量モデルでは、外内コルゲート内径がそれぞれ $R_e=69.3$ [mm], $r_e=41.6$ [mm] となる。

図 8 に本開発品のコルゲート管の内管、外管の内径半径、外径半径を n 倍した時の n を x 軸、その際の超電導ケーブル重量 W_{total} を y 軸としてグラフに示す。

今後の冷却状態の改善に向けた大口径化は、本開発品の径の 1.98 倍までの範囲という設計指針を得た。

5. ま と め

電動航空機用超電導ケーブルは軽量化が求められている。軽量化に寄与する PPSU コルゲート管を試作した。

試作した PPSU コルゲート管は液体窒素浸漬下において十分な可撓性を示すことを確認した。

次に PPSU コルゲート管を用いた 15 m 長三相一括線材積層型超電導ケーブルを試作した。通電試験実施の際には、液相と気相が混在しており、十分な冷却が実施できていないことが考えられた。この状態でも通電試験では、W 相で要求通電性能を満たしていることを確認した。

十分に冷却が実施できた場合の通電性能を確認するため、15 m 長超電導ケーブルを 2.5 m 長に切り分けたのち、オープンバスでの液体窒素浸漬下における通電試験を実施した。結果として積層導体は全相でプロジェクト目標を満たす十分な通電性能を有していることを確認した。このことから本開発品の PPSU コルゲート管の冷却状態の改善が必要であることが分かった。

冷却状態改善にはコルゲート管の大口径化が必要である。重量を目標の 1 kg/kA/m 以下にするためには本開発品の径の 1.98 倍までが許容限界であることを確認した。今後、その範囲における PPSU コルゲート管の大口径化を検討し、冷却状態の改善を行う。

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 (New Energy and Industrial Technology Development Organization : NEDO) の委託業務 (JPNP15005) の結果得られたものです。

参考文献

- 1) International Air Transport Association, 2021, "Net-Zero Carbon Emission by 2050," [Online]. Available: <https://www.iata.org/en/pressroom/pressroom-archive/2021-releases/2021-10-04-03/>.
- 2) International Civil Aviation Organization, 2022, "States adopt net-zero 2050 global aspirational goal for international flight operations," [Online]. Available: <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/States-adopts-netzero-2050-aspirational-goal-for-international-flight-operations.aspx>.
- 3) 一般財団法人 日本航空機開発協会, 2022, "民間航空機に関する市場予測 2022-2041."

- 4) H. Sasa et al., "Experimental Evaluation of 1 kW-class Prototype REBCO Fully Superconducting Synchronous Motor Cooled by Subcooled Liquid Nitrogen for E-Aircraft" *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 31 (2021) 5, doi: 10.1109/TASC.2021.3055452
- 5) T. Izumi, et al.: "Development of Superconducting Cable and Coated Conductors for Airplane Electric Propulsion System," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 31 (2023) 5, doi: 10.1109/TASC.2023.3258902
- 6) 塩原敬他, 「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－」, *SWCC レビュー* Vol. 68 P5-9
- 7) M. Sato, *et al.*, "Development of Ba-Zr-O-doped Y-Gd-Ba-Cu-O coated conductors using a reel-to-reel system furnace," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 34, 6600304, May. 2024, doi:10.1109/TASC.2023.3343314
- 8) 金山諄志他「航空機搭載用超電導ケーブルの小型電極開発」, *SWCC レビュー* Vol.69 P28-32

SWCC (株)

金山 諄志 (かなやま あつし)

技術開発本部 新領域開発センター 超電導システムグループ
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

SWCC (株)

塩原 敬 (しおはら けい)

技術開発本部 新領域開発センター 超電導システムグループ博士
(工学)
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

SWCC (株)

佐藤 遼夫 (さとう みちお)

技術開発本部 新領域開発センター 超電導システムグループ博士
(工学)
超電導線材の研究・開発に従事

SWCC (株)

中西 達尚 (なかにし たつひさ)

技術開発本部 新領域開発センター 超電導システムグループ超電導
ケーブルシステムの研究・開発に従事

SWCC (株)

高橋 保夫 (たかはし やすお)

技術開発本部 新領域開発センター 超電導システムグループ超電導
線材の研究・開発に従事

SWCC (株)

青木 裕治 (あおき ゆうじ)

技術開発本部 新領域開発センター 超電導システムグループ超電導
ケーブルシステムの研究・開発に従事

SWCC (株)

三堂 信博 (みどう のぶひろ)

技術開発本部 新領域開発センター 超電導システムグループ超電導
ケーブルシステムの研究・開発に従事

SWCC (株)

足立 和久 (あだち かずひさ)

技術開発本部 新領域開発センター 超電導システムグループグルー
プ長
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