

## 1. はじめに

2040年頃に実用化が期待されるハイブリッド航空機への適用を想定したMW級航空機電気モータ給電システムに関し、近年、進歩の著しい革新的パワー半導体による電力変換システムの小形軽量化、及び、高パワー密度直流送電技術を用いた液体窒素冷却送電ケーブルを組み合わせた、航空機向け高パワー密度給電システム技術について、既存技術に対する技術優位性と航空機への適用メリット及び技術課題について検証と検討を行っており、これまでの検討状況を報告する。

## 2. 想定する電動旅客機及び給電システムの構成

本研究において、給電システムは、パワーエレクトロニクス機器（電力変換器、遮断器、切替器、保護回路）及び送電ケーブルから構成される。パワーエレクトロニクス機器については、鉄道等への適用が進んでいるSiCパワー半導体の利用を想定し、要求機能（例えば電流容量）と給電電圧レベルの条件を満たす条件下で、高速動作、チップ電流密度の向上、抜熱構造の設計、フィルタの削減などを通じた小形軽量化（高パワー密度化）の検討を進める。送電ケーブルの高パワー密度化は、同じ絶縁耐圧でより大きな電力を送ることが可能な直流方式とし、液体窒素冷却による高パワー密度送電ケーブル技術と既存の送電ケーブル技術を組み合わせた最適な送電システム技術について検討を行う。ハイブリッド航空機については、日本航空機開発協会（JADC）から提案されている電動化の概念設計（エンジン2発に発電機を搭載し、発電した電力を送電し、尾部に配置した電動ファンを用いてエンジンをアシストするハイブリッド電動旅客機）図1を想定している。



図1 想定するハイブリッド電動旅客機概念図<sup>1)</sup>

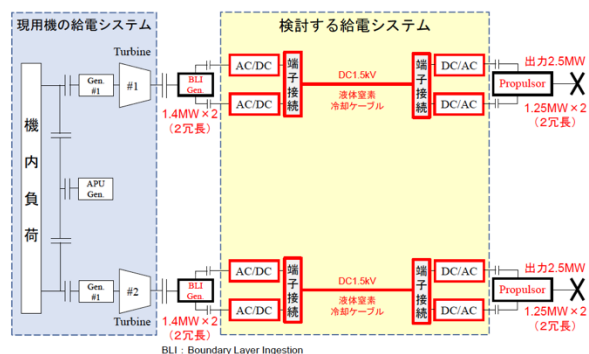


図2 検討する電化航空機の給電システム

今回検討する電化航空機の給電システムを図2に示す。従来の機内負荷については、現用機の給電システムのままで、エンジン付近に電動ファン用に別途1.4MW級の発電機を複数機用いて発電した電力を電動ファンのモータに給電するシステムを想定している。本研究において検討する技術課題は大きく3つのカテゴリーに分かれており、それぞれ、高パワー密度電力変換システム検討、高パワー密度送電システム技術の検討、及び、統合システム技術の検討であるが、ここでは、高パワー密度送電システム技術についての検討を行った。

## 3. 高パワー密度送電システム技術の検討

銅、アルミケーブル等の既存の送電ケーブルシステムに加えて、液体窒素で冷却した航空機向け送電ケーブルシステムを検討した。航空機で高電圧送電をする場合、放電の影響が懸念されるため、できるだけ低電圧での送電が可能となる冷凍機冷却、真空ポンプなどの補機運転を必要としない「液体窒素冷却型軽量・コンパクト送電ケーブル」を採用し、その概念設計を行った。

具体的には、液体窒素温度で超電導状態に転移する銅酸化物超電導線材を用いて、電圧1.5kVDC級、電力2MW級、26.5m長のケーブルモデルを想定したシステムの概念設計を行った。冷却は液体窒素を利用するが、軽量化のために送液ポンプは使用せず、液体窒素の蒸発による圧力の上昇を利用して、液体を注入する方式を採用する。（図3）減圧弁は端部の背圧弁からの排気とバランスするようにケーブルシステム内の液体窒素の圧力を調整する役割を持たせ、システム内の内部圧力が上昇した場合には、この減圧弁により注入速度

を低減させる。背圧弁から排出される窒素ガスは外気、もしくは機内のガス圧が必要な箇所に放出する。ケーブルと末端部分については熱侵入を抑えるための断熱空間を構造として、液体窒素の蒸発速度を抑制している。図2における端子接続部分は図3の電極部分に対応し、電力変換部分からの接続を行う。

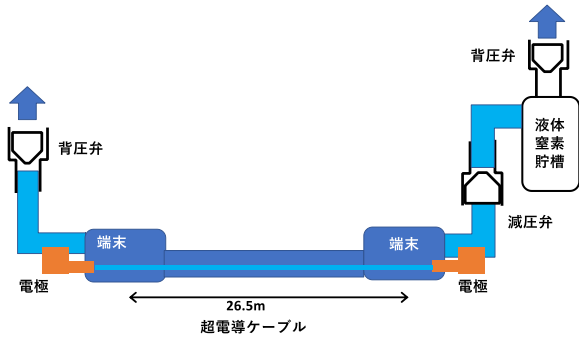


図3 超電導線材を用いた送電システム

次に、超電導ケーブル部分の構造については、図4に示すように2極単芯同軸ケーブルを採用した。このケーブル構造では、外側に二重コルゲート管による真空断熱層（図4の黄色部分）を有し、その内側に液体窒素（図4の水色部分）により冷却された超電導線材を用いた送電ケーブルであるのが特徴である。フォーマ内部の中心部は液体窒素が通る構造になっており、超電導線材は両側から冷却される。ケーブル部分は電圧1.5kV直流での送電を想定しているため、プラス及びマイナス極を有し、電極間、及び対地絶縁を持たせるために絶縁層（図4の緑色部分）を有している。

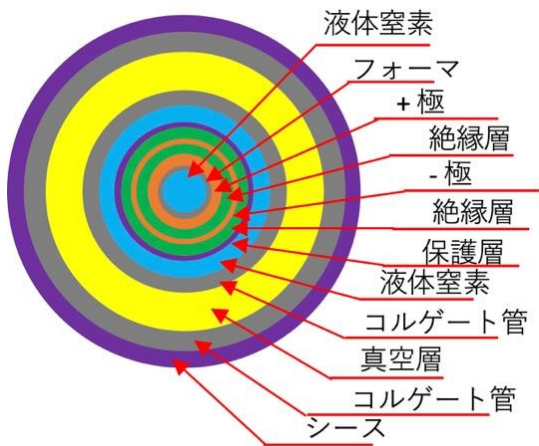


図4 超電導ケーブルの構造図

表1. 概念設計したケーブル構造

仕様	Capacity	2.5MW	
	Voltage	1.5kV DC(L-L)	4kV 耐圧
		0.75kV DC(L-E)	2.5kV 耐圧
	Current	1700A	
	bending	300mm radius	
構造	item	内径 (mm)	外径 (mm)
	former		8.0
	protection	14.9	16.4
	LN2	16.4	19.0
	Sheath	42.0	46.0
Cable 重量	0.76kg/m	保護層内側	
	2.03kg/m	シース内側	
	2.18kg/m	ケーブル全体	
	57.8kg	26.5m での値	
熱侵入	1.06W/m	2時間で窒素 1.26L	
	28.1W	26.5m での値	

電極に使用する銅酸化物超電導線材については、重量増の要因となる銀のシースを使用しない軽量、高強度が期待できる希土類系銅酸化物テープ線材を想定している。希土類系銅酸化物テープ線材は金属基板上に中間層、超電導層、保護層、安定化層があり、超電導層の厚みは約 $2\mu\text{m}$ である。既に市販されている2mm幅のテープ線材においては、液体窒素温度において約80Aの電流の通電が可能である。しかしながら、現在の市販線材は、磁場中での性能向上に特化しており、航空機向けケーブルとしての最適化については、現在、検討を行っている。このような構造を持つケーブルの詳細仕様を表1に示す。航空機での利用を想定しているため、従来のものよりも小径で軽量、かつ、曲げ半径が300mmを満たすことを目指した設計にした。

送電ケーブルシステム全体の重量は、超電導ケーブル部分以外にも、両端の端末部分、パワーリードおよび、真空容器、液体窒素及び、その貯槽が必要になるため、それらの重量を考慮する必要がある。今回の概念設計での重量計算では、液体窒素温度と室温の温度差部分は伝導冷却された銅のパワーリードを採用し、それに伴う、真空容器、断熱材を考慮した重量計算を行なった。また、液体窒素の量については、システム全体の熱侵入の大きさと飛行時間依存するが、熱侵入については、一般的な断熱容器の熱侵入量を仮定し、飛行時間については、近距離線の2時間の飛行を仮定して、システム全体の重量を見積もった。一方、アルミケーブルについては、超電導ケーブルと同じ仕様（2.5MW級、1.5kV、1700A）、許容曲げ半径を300mmとした場合には、許容電流や電流低減率を考慮すると、ケーブル断面積が400mm<sup>2</sup>のものをそれぞれ3本、両極で6本必要となり、これらのケーブルの配置に必要な空間も確保する必要がある。また、絶縁についても超電導ケーブルと同様の条件を仮定すると少なくとも2.5mmの厚みが必要となり、最外層の保護層を含めた重量の見積りが必要となる<sup>3)</sup>。

図6は、2時間の飛行時間を仮定して、2.5MWから20MWまでの送電量に対する超電導ケーブル及び、アルミケーブルのそれぞれの重量の見積もりによって得られた、ケーブル重量、及び、重さあたりの送電量 (W /g) 換算したものをアルミケーブルと超電導ケーブルとで比較したものを示している。ケーブル重量は左側の軸、グラム中のW数を右側の軸に示し、横軸は送電量を示している。

これらの結果を見ると、2.5MWの場合でも、超電導ケーブルはアルミケーブルと比べて40%の軽さであることがわかる。また、送電量が大きくなるにつれて、アルミの場合は径を太くするもしくは、本数を増やす必要があるため、重量が増加するが、超電導ケーブルの場合は、全体に対して、超電導線材の占める重量割合が低いため、その重量増加量は低く抑えられることがわかる。また、重さあたりの送電量でみた場合、超電導ケーブルに優位性があることがわかる。この結果は、現在の送電量では超電導を採用する積極的な理由はないが、将来の航空機の電動化による送電量の増加を考慮すると、送電ケーブルとしての超電導の利用は、十分に可能性があると考え

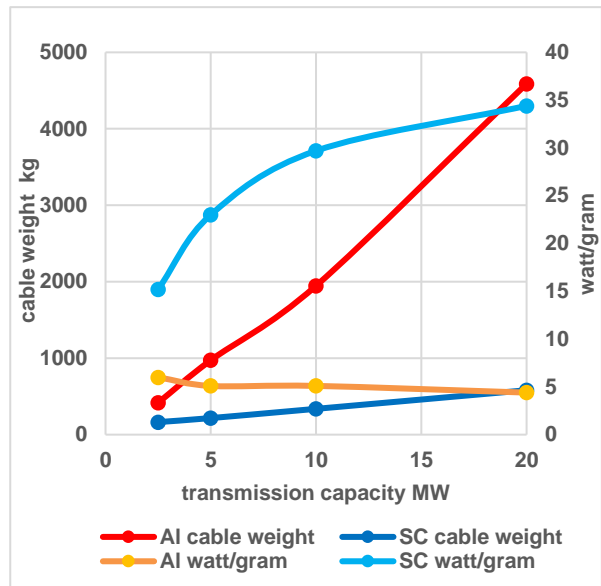


図6 送電量に対するケーブル重量、及び、重さあたりの送電量 (W /g) における、アルミケーブルと超電導ケーブルとの比較

られる。

#### 4. 超電導ケーブルの試作

これまでの概念設計検討に基づいて、超電導ケーブルの試作を行う上で、まず、検討すべき項目は以下の3点である。

- ケーブル試作により、現実にはどの程度の大きさのケーブルの作製が可能なのか。
- 試作したケーブルは曲げ半径 300mm で曲げることが可能なのか
- ケーブル化、及び、曲げることで通電性能が維持できるのか。

ケーブルの試作を行った結果、設計仕様の径については、想定通りのケーブルの作製に成功した。



図7 試作した航空機用超電導ケーブル（上側）と従来の超電導送電ケーブル（下側）



図7に今回、試作を行った超電導ケーブルの写真を示す。参考までに、これまでの電力送電用の超電導ケーブル模型の写真も示している。従来の送電ケーブルは三相ケーブルであるため、3芯一括のケーブルで単純な比較はできないが、今回の試作ケーブルが小型化できているというのは明らかである。

試作した超電導ケーブルの液体窒素層の内側部分を図8に示す。本来なら中心部は中空であるが、作製時に使用したSUSの丸棒は残した状態で保管している。電極部分のプラス及び、マイナス極には臨界電流の評価のために一部着色している。



図8 試作した超電導ケーブル（内側）

次に、この試作したケーブルを半径300mmで曲げた後の写真を示す。曲げる際には、まず、フォーマーの内側にあるSUS棒を抜き、次に、R300の型枠に沿って曲げる作業を行った。図9に曲げた後の超電導ケーブルの写真を示す。曲げている間に機械的破壊はなく、液体窒素温度での臨界電流の測定からも超伝導特性の劣化がないことが確認できた。



図9 R300で曲げた超電導ケーブル

## 5. 今後の検討

これまで超電導ケーブルを用いた送電システムの概念設計を行い、ケーブルの試作まで行ったが、今後は、冷却システムの試作、評価を順に行い、解決すべき課題の洗い出しを行う。それら課題を解決するとともに、今後の要素試験を通して、航空機に特化した仕様を決定し、試作品の開発を行う予定である。

## 謝辞

本稿の検討はNEDO先導研究プログラムエネルギー・環境技術先導研究プログラムの支援によるもので、深く感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 戸井康弘、山北晃久、村田巖：第57回飛行機シンポジウム講演集 JSASS-2019-5145
- 2) S. Isojima et al., J. Phys.: Conf. Ser. 1293 012073 (2019)
- 3) 山口浩 他：第58回飛行機シンポジウム講演集 JSASS-2020-5061
- 4) 吉田良行 他：第58回飛行機シンポジウム講演集 JSASS-2020-5062