

「航空機用先進システム実用化プロジェクト/
⑧次世代電動推進システム研究開発」

事業原簿

【公開】

担当部	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 ロボット・AI部
-----	---------------------------------------

--目次--

概 要	1
プロジェクト用語集	7
I. <u>事業の位置付け・必要性について</u>	13
1. 事業の背景・目的・位置付け	13
2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	15
II. <u>研究開発マネジメントについて</u>	16
1. 事業の目標	16
2. 事業の計画内容	16
3. 情勢変化への対応	21
4. 評価に関する事項	23
III. <u>研究開発成果について</u>	24
1. 事業全体の成果	24
2. 研究開発項目毎の成果	24
IV. <u>成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通し</u>	25
1. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて	25
V. <u>各研究開発テーマ毎の詳細</u>	26
V-1. <u>高効率かつ高出力電動推進システム</u>	26
1. 研究開発マネジメント	26
2. 研究開発成果	33
3. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて	53
V-2. <u>軽量蓄電池</u>	56
1. 研究開発マネジメント	56
2. 研究開発成果	62
3. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて	76
V-3. <u>電動ハイブリットシステム</u>	78
1. 研究開発マネジメント	78
2. 研究開発成果	84
3. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて	105

概要

		最終更新日	2021年9月1日
プロジェクト名	航空機用先進システム実用化プロジェクト/ ⑧次世代電動推進システム研究開発	プロジェクト番号	P15005
担当推進部/ PM、担当者	ロボット・A I 部 【PM】 嶋田 諭 (2019年4月～2020年5月)、白木 聖司(2020年6月～) 【担当者】 林成和 (2019年4月～2020年2月)、白石 貞純(2019年4月～2021年3月)、阿部 憲幸(2019年4月～)、品川 貴(2019年4月～)、服部 元隆(2019年7月～)、金谷明倫 (2020年4月～2021年6月)、白川 周 (2020年4月～)、梅田 英幸 (2021年7月～)		
0. 事業の概要	本研究開発は、航空機の安全性・環境適合性・経済性といった社会のニーズに対応した、軽量・低コストかつ安全性の高い先進的な航空機用システムを開発し、次世代航空機（電動航空機）に提案可能なレベルにまで成熟させることにより、我が国の航空機産業の競争力強化を目指すものである。 本研究開発は委託による課題設定型の研究開発事業である。航空機用先進システム実用化プロジェクトは2015年度より開始しているが、研究開発項目「⑧次世代電動推進システム研究開発」は、2019年度～2023年度の約5年間で実施される。		
1. 事業の位置付け・必要性について	環境負荷低減や経済性、整備性向上のため、今後は推進系も含め更に航空機の電動化が進むと考えられており、特に大型航空機に求められる航続距離も満たす電動ハイブリッド技術による燃費削減効果が試算されている。例えば NASA では種々の機体形態で電動推進システムの構想が検討され大幅な燃費削減効果を期待できるとされている。しかし、電動推進システムを構成する従来のモータやケーブル、発電機、蓄電池等の要素技術及び電力制御システム技術は、飛行に求められる重量当たりの容量・出力の点において旅客や貨物輸送に供する実用レベルには至っていない。そのため、これら要素の高効率化と軽量化が必要とされている。 航空機用先進システムの開発は技術的・経済的な波及効果が大きく、裾野産業の形成や雇用創出につながり、我が国の産業の活性化、海外展開の促進に貢献することが期待できる。 航空機システムは開発期間が長く、認証取得にも膨大な費用と時間を要することから、開発にあたってのリスクが極めて大きいため、NEDO の関与が必要である。		
2. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	以下に示す、研究テーマについて航空機用先進システムのプロトタイプモデルを製作し、地上あるいは飛行環境下で従来のシステムよりも優れた性能・機能等を有することを実証する。 ⑧-1 高効率かつ高出力電動推進システム 超電導技術による回転機、冷却システム、ケーブル、線材、インバータ等の各要素技術を活用し、小型・軽量、高効率・低エミッションの航空機用電機推進システムを開発する。 ⑧-2 軽量蓄電池 正極活物質に硫黄を用いた蓄電池の技術を活用し、電動航空機に求められるエネルギー密度を実現した蓄電池システムを開発する。 ⑧-3 電動ハイブリッドシステム 電動ハイブリッド航空機の実用化に向け、電動推進電力システムおよび熱・エアマネジメントシステムの基礎技術開発をすすめ、これらから構成されるハイブリッド電動推進システムを開発する。		

事業の計画内容	研究開発項目	2019FY	2020FY	2021FY	2022FY	2023FY	
	⑧-1 高効率かつ高出力電動推進システム	仕様策定、試作/評価			プロトタイプ設計/製作、検証		
	⑧-2 軽量蓄電池	仕様策定、試作/評価			プロトタイプ設計/製作、検証		
	⑧-3 電動ハイブリッドシステム	仕様策定、試作/評価			プロトタイプ設計/製作、検証		
開発予算 (単位：百万円)	会計・勘定	2019FY	2020FY	2021FY	総額		
	一般会計	0	0	0	0		
	特別会計	615.6	1,302.6	1,680.4	3,598.6		
	開発成果 促進財源	0	149.6	92.0	241.6		
	総予算額	615.6	1,452.2	1,772.4	3,840.2		
	(委託)	100%	100%	100%	—		
開発体制	経産省担当原課	製造産業局 航空機武器宇宙産業課					
	プロジェクトリーダー	なし					
	プロジェクト マネージャー	NEDO ロボット・AI部 主査 白木 聖司 (⑧-1 高効率かつ高出力電動推進システム のみ NEDO ロボット・AI部 統括主幹 梅田 英幸が代行)					
	委託先	⑧-1 高効率かつ高出力電動推進システム：九州大学、産業技術総合研究所、 (株)神戸製鋼所、大陽日酸(株)、SuperOx Japan 合同会社 (再委託先：富士電機(株)、東海国立大学機構、成蹊大学、鹿児島大学、 福岡工業大学、昭和電線ケーブルシステム(株)、三菱重工業(株)、BASF ジャパン(株)) ⑧-2 軽量蓄電池：(株)GSユアサ (再委託先：関西大学) ⑧-3 電動ハイブリッドシステム：(株)IHI (共同実施先：東京大学、岡山大学、秋田大学、秋田県立大学、立命館、大 阪産業大学) (再委託先：住友精密工業(株)、(株)島津製作所、(株)日立ソリューションズ、三菱電機(株)、住友精化(株)、ナブテスコ(株))					
情勢変化への対応	<p>本プロジェクトに関連して 2015 年度以降に実施された、動向・情勢の把握を目的とした情報収集事業は以下の通り。なお、調査の実施に係る費用は本プロジェクトとは別の予算から支出されている。また、各研究開発項目に関連する動向・情勢については、各委託先に把握に努めるよう指導するとともに、把握された動向・情勢への対応と併せ、事業推進委員会等で報告を行っている。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 国外の航空機開発及び航空機システム開発に関する動向調査 (2015 年度) 2. 航空機システム開発に関する国内他産業連携の可能性調査 (2017 年度) 3. 航空機装備品、電動化分野における研究開発動向調査 (2020 年度) 						
評価に関する事項	事前評価	2015年2月 担当部 ロボット・AI部 (プロジェクト立ちあげ時)					

	中間評価	2020年10月				
	事後評価	事業終了後 実施予定				
3. 研究開発成果について	◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達					
	⑧-1 高効率かつ高出力電動推進システム					
	項目	中間目標	成果	達成度	課題と解決方針	
	航空機用超電導推進システム要素技術開発	250-500 kW 回転機、ケーブル、冷却システム基盤技術確立	・各開発要素に対して、モデル試作等で有効性の検証を一部終了。 ・軽量ケーブル、接続構造に関して適正構造を考案し、モデル試作等で有効性の検証を一部終了。	△ (2022/6 達成見込)	【課題】 新型コロナ感染拡大の影響により研究開発活動が大幅に制限されている。 【解決方針】 目標達成時期を数ヶ月後ろ倒しすることにより対応。	
		0.5-1 MW システム用回転機、ケーブル、冷却システム技術概念確立。				
		・5 分割-100m 長線材で電流密度 250A/cm@ 温度 70K、磁束密度 1.2T かつ歩留り 60%以上を達成。 ・100m 長線材で電流密度 300 A/cm 以上@ 温度 70K、磁束密度 2.5T を達成。	・歩留り向上に有効なスクライブ加工装置を導入、立ち上げ中。 ・短尺線材において左記目標特性を見通す技術を開発。	△ (2022/6 達成見込)		
		0.5-1MW システム用シールド基盤技術を確立。	小型コイルにてシールド基礎特性を把握するとともに、電磁解析で有効性を確認。			△ (2022/6 達成見込)
		65 K で動作する半導体材料の開発。	既存半導体及び名大試作品で、低温評価を行い必要な耐電圧を確認。			△ (2022/6 達成見込)
	航空機用超電導推進システム機器機能検証	250-500 kW 超電導モータを製作し、基礎評価を行うことで、5kW/kg を超える出力密度を実現する見通しを得る。	研究項目【航空機用超電導推進システム要素技術開発】の検討に基づき 250- 500kW モータの基本構造を設計。	△ (2022/8 達成見込)	【課題】 新型コロナ感染拡大の影響により研究開発活動が大幅に制限されている。 【解決方針】 目標達成時期を数ヶ月後ろ倒しすることにより対応、及びモータ容量を調整することで対応。	
		0.5-1 MW 超電導推進システム構成の基本仕様を決定する。	現時点で未着手だが、今後他の進展の状況をみて仕様決定予定	△ (2022/8 達成見込)		
	⑧-2 軽量蓄電池					
	項目	中間目標	成果	達成度	課題と解決方針	
	硫黄を担持する多孔性粒子の研究開発	500Wh/kg が目指せる硫黄正極として、硫黄の担持質量割合が 60% を超えても安定に充放電できる電極炭素材料と、それに対する硫黄担持方法を開発する。	硫黄担持質量割合 60 wt%以上の硫黄正極で 1000 mAh g ⁻¹ から 1300-1600 mAh g ⁻¹ の可逆容量の増大に成功した。エネルギー密度は可逆容量と作動電圧の積であるため、上述の可逆容量の飛躍的な向上により、500Wh/kg のエネルギー密度実現に大きく近づいた。	◎	-	

	硫黄の溶解を抑制する電解液の研究開発	500Wh/kg が目指せる硫黄正極に対して、SEI（電極界面被膜）の効果により、容量安定後の充放電50サイクルの容量維持率が90%以上である電解液を開発する。	硫黄正極小型セル評価において、良好なSEIを形成できるVCを溶媒とした電解液を適用することで、容量安定後の充放電50サイクルの容量維持率は93%であることを確認した。また電解液の粘度が可逆容量に依存することを見出し、高エネルギー密度化への電解液のコンセプトを得た。さらに電解液の軽量化を目的とし密度の小さな電解液も開発済である。	◎	—
	硫黄の大電流での放電性能を向上する要素技術の研究開発	500Wh/kg が目指せる硫黄正極として、電極の電子伝導性を改善し、0.5CA程度の放電でも電極が大きな劣化を起こさず充放電が可能な技術を見出し、高エネルギー密度化との両立に備える。	新バインダーを適用した硫黄正極小型セル評価において、0.1CA相当の放電に対する2CA相当の放電（目標値の4倍の大電流による放電）における容量保持率は100%であり、電極に大きな劣化を起こさず充放電が可能であることを確認した。さらに、新バインダーを適用した高目付(4.21 mg cm ⁻²)の20サイクル充放電後の容量維持率が旧バインダーを適用したものに比べ、約10%高いことを明らかにした。	◎	—
蓄電システムの実証検証		軽量蓄電池について、500Wh/kgが目指せる400Wh/kg級の小型セルのプロトタイプモデルを試作する。さらに、軽量蓄電池に適合するCMU、BMUのプロトタイプモデルを設計し、蓄電池システムを試作する。	<ul style="list-style-type: none"> 試作した5Ah級-積層セルのエネルギー密度は350Wh/kgであることを実証した。（2021年8月時点） 軽量蓄電池に適合する電池モジュール構造（軽量化、均一圧迫機構） およびCMU、BMUのプロトタイプ設計を完了し、蓄電池システムを試作中。 	△ (2022/3達成見込)	<p>【課題】 エネルギー密度向上</p> <p>【解決方針】 詳細設計改善にて検討を更に進める。</p>
		上記の蓄電池システムを用いて、地上の実験室環境下で航空機の電動化に適用可能かどうかを検証する。	<ul style="list-style-type: none"> 試作した蓄電システムについて、地上の実験室環境下で航空機の電動化に適用可能かどうかを検証予定。 	△ (2022/3達成見込)	<p>【課題】 検証指標の確定</p> <p>【解決方針】 地上の実験室環境下で航空機の電動化に適用可能かを判断する指標（安全性などの影響を考慮）の把握。</p>
		軽量蓄電池の大電流での放電性能については、0.5CA程度の放電が可能であることを目標とする。その他の性能値（サイクル特性等）については、機体OEM等との協議により、必要性能値を具体化したうえで、それらを達成する。	<ul style="list-style-type: none"> 試作した5Ah級-積層セルでの大電流での放電性能については、1.0CA程度の放電が可能であった。 その他の性能値については、機体OEMメーカーとの協議を継続中。 	△ (2022/3達成見込)	<p>【課題】 大電流放電性能の検証</p> <p>【解決方針】 地上の実験室にて、蓄電システムの大電流放電性能を確認する。</p>

⑧-3 電動ハイブリッドシステム				
項目	中間目標	成果	達成度	課題と解決方針
ハイブリッド電動推進システム	電動ハイブリッド航空機の実用化に向けた電動推進電力システムおよび熱・エアマネジメントシステムに係るシステム定義、および評価項目設定を行う	電動推進と BLI を組み合わせた機体形態を想定し、電動推進電力システムおよび熱・エアマネジメントシステムに係るシステム定義および評価項目設定を完了した。	○	—
電動推進電力システム	MW級電動推進を達成するエンジン内蔵発電機の特許電磁機械製造技術の実現性確認のための試作を完了する	構造成立性、製造性を踏まえた発電機の詳細設計、解析による性能評価を完了。発熱密度低減を図った巻線構造、高性能絶縁材料を取り入れ試作機の製造を開始、完了の見込みを得た。	△ (2022/3 達成見込)	【課題】 — 【解決方針】 試作機の製造開始しており、年度末までに完了する。
	電力システムを構成する電源グリッド、遮断システム、分散ファン用電動機、電力変換器の技術成立性について、モデル解析等による確認を完了する	電力システムとして、マルチターミナル半導体式限流・遮断器(電源グリッド)、半導体式遮断回路方式(遮断システム)、ハルバツハ構造電動機(分散ファン用電動機)、階調制御等のインバータ方式(電力変換器)、についてそれぞれモデル解析により妥当性確認を完了した。	○	—
熱・エアマネジメントシステム	フライトミッションを通じたシステム特性評価を可能とする燃料排熱空調システム、エネルギー回収システムの技術成立性について、シミュレーションモデル等による確認を完了する	燃料排熱空調システム及びエネルギー回収システムのシステム定義と評価項目設定を完了し、評価ツールとしてのシミュレーションモデルの作成を完了した。年度末までに、シミュレーションモデルを用いた成立性評価を完了する見込みを得た。	△ (2022/3 達成見込)	【課題】 — 【解決方針】 作成したシミュレーションモデルでの成立性評価を完了する。
	熱・エアマネジメントシステムを構成する燃料排熱熱交換器(FCAC)の耐久性評価を完了する	熱・エアマネジメントシステムのシステム設計によりFCACへの要求定義を行い、それを満足するFCACの設計を完了、製造を実施中。8月中旬に製造完了し、年度末までに耐久性評価を完了する見込みを得た。	△ (2022/3 達成見込)	【課題】 — 【解決方針】 試作品完了し、耐久性試験を完了する。
投稿論文		9件 (うち査読有8件)		
特許		出願済4件 (うち国際出願1件) 予定3件 (うち国際1件)		
その他の外部発表 (プレス発表等)		82件 (研究発表・講演72件、新聞雑誌等への掲載8件、展示会への出展2件)		

<p>4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて</p>	<p>本研究開発における実施項目は、いずれも安全性・環境適合性・経済性の向上に寄与するものであり、社会のニーズに対応している。また、次世代航空機に提案可能なレベルにまで成熟させることを目標としているため、提案が採用されることで実用化への道筋が一気に開ける。</p> <p>実用化・事業化に向けての取組みとして、本研究開発で製作する航空機用先進システムのプロトタイプを試作し、認証取得に向けて実証試験等を行うこととする。また、本研究開発を通じて、実証試験インフラの整備、サプライチェーンの確立、人材の確保に寄与するよう取り組む。さらに、必要に応じて国外の航空機メーカーや航空機システムメーカーをパートナーとして選定することにより、ユーザ側のニーズを的確に把握し、成果を実用化・事業化につなげることを目指す。</p> <p>本研究開発にて開発した航空機用先進システムが国内外の航空機メーカーに採用されること、またプロダクトサポートやMRO（Maintenance, Repair and Overhaul）により、年間で研究開発項目毎に数十億円、合計で最大数百億円の売上を継続して得ることが期待できる。</p>	
<p>5. 基本計画に関する事項</p>	<p>作成時期</p> <p>変更履歴 (⑧開始以降)</p>	<p>2015年3月 作成（プロジェクト立ちあげ時）</p> <p>2019年3月 国外の研究開発動向を踏まえて研究開発項目⑧を追加。研究開発スケジュール（別紙2）を追加。</p> <p>2020年1月 研究開発項目⑧のテーマを追加(⑧-3)。</p> <p>2020年7月 プロジェクトマネージャーの変更</p> <p>2021年8月 プロジェクトマネージャーの職務範囲等変更</p>

プロジェクト用語集

⑧-1 高効率かつ高出力電動推進システム

用語	説明
AFRP	Aramid Fiber Reinforced Plastic (アラムド繊維強化プラスチック) の略
BaMO ₃ (M: metal)化合物	BaZrO ₃ 、BaSnO ₃ 、BaHfO ₃ のようなペロブスカイト構造をもつ 3 元系の化合物。REBCO 層中にこれらの BMO 相を不純物(人工ピン止めセンター)としてドーピングすることで、通常よりも高い磁場中特性を得ることができる。PLD 法の場合は、あらかじめ BMO をドーピングした固体ターゲットで成膜することで REBCO と BMO 相が協調成長し、主にナノロッド状の BMO 相が REBCO 層中に形成される。なお、ドーピング量及び成膜プロセス条件を変化させることで、ある程度 BMO の形状や密度は変化させることができる。
CFRP	FRP の一種で、Carbon Fiber Reinforced Plastic (炭素繊維強化プラスチック) の略。FRP は、2 つ以上の素材を組み合わせた複合材料であり、プラスチック (樹脂) を母材とし、そこに繊維を強化材として加えることで、プラスチックの軽量、高い成形自由度に加え、繊維のもつ高剛性・高強度な特性も併せ持つことが可能となる。FRP の中でも、炭素繊維を強化材として加えたものを CFRP と呼ぶ。
FEM 解析	有限要素法 (ゆうげんようそほう、英語: Finite Element Method, FEM) 解析。連続な物体を有限個の「要素」に分割し、各要素の特性を単純な数学的モデルで近似し、連立方程式の形にして全体の挙動を解析する手法。
FFDS 線材	Face to face double stacked 線材の略語。2 枚の RE 系超電導線材の超電導側をハンダ等で接続して作製される。片側の線材に欠陥があっても、安定化層を介してもう一方の線材に電流を流すことができるので、RE 系超電導線の歩留まりを高めることができる。さらに、応力中心が 2 枚の線材の中心となるため、曲げ強度が高いという特徴も有する。
GFRP	Glass Fiber Reinforced Plastic (ガラス繊維強化プラスチック) の略
I-V 特性	電流-電圧特性。高温超電導線の場合、通電電流が小さい場合は電圧は極めて小さいが、臨界電流を越える電流が流れると、急激に電圧が発生する。
IBAD(ion-beam assisted deposition)法	三次元的配向構造を直接形成する世界初の技術として、1991 年に(株)フジクラで開発された手法。通常のイオンビームによるスパッタ蒸着法に改良を加え、アシストビームと呼ばれる第 2 のイオンビームを成膜中の薄膜表面に特定方位から同時照射することにより、薄膜を構成する全ての結晶粒の結晶軸を同一方向に揃えた二軸配向(結晶の a-b 面(a 軸と b 軸)と c 軸の方位を揃えた構造。
MOD(Metal Organic Deposition) 法	有機金属酸塩を含む溶液を基板上に塗布し、これを熱処理することにより酸化物膜を成膜する方法。通常、RE 系高温超電導膜の作製においては、低温で前駆体膜を作製する仮焼成、高温で前駆体膜を超電導相に結晶化させる本焼成の 2 段階の熱処理を施す。また、前駆体膜を本焼成に適した状態にするために、仮焼成と本焼成の間に中間熱処理を施す場合もある。前駆体膜の積層化による RE 系高温超電導膜の厚膜化が可能である。
Oリング	リング形状をした気体や液体をシールするための部品

PLD(pulsed Laser Deposition)法	物理気相蒸着法の一つであり、真空チャンバー内の固体ターゲットにパルスレーザー光を断続的に照射し、ターゲットをアブレーション(ある閾値以上のレーザー光を固体に照射した場合、固体表面で電子的、熱的、光化学的、力学的エネルギーに変換され、中性原子、分子、正負のイオン、ラジカル、クラスタ、電子、光子が爆発的に放出され、固体の表面がエッチングされる)することにより、ターゲットと対向して配置された基板上に薄膜を堆積する成膜技術。
RE 系高温超電導線材	化学式REBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} (RE:希土類元素)で表される超電導体を用いて作製した超電導線材。
SEM	走査型電子顕微鏡。試料表面(断面)の微細構造を観察できる。
TIG 溶接	タングステン-不活性ガス溶接
UTOC (Ultra Thin Once Coating) -MOD 法	MOD 法による BMO ドープ RE 系高温超電導膜の作製に関して、前駆体膜の積層化における一層当たりの前駆体膜厚を、超薄膜化することにより BMO 相を微細化する手法。BMO 相の微細化により、磁場中特性が著しく向上する。
(モータ) ケーシング	モータを構成する固定子(コイル)を固定する容器。コイルの放熱(冷却)や外部との隔壁としての機能も兼ねる。超電導モータでは冷媒を内部に貯めて固定子を冷却する容器としての機能を有する。
スリップリング	固定側から回転側に電力や信号などを伝達する役目を果たすもの
ディップコート法	基板を溶液中に浸漬し、引き上げることにより基板上に液膜を形成する方法。
バーコート法	基板上の塗液を、バーコータ(シャフトにワイヤーを巻きつける等により表面に溝を形成した棒)で引き伸ばし、均一な膜厚の液膜を形成する方法。
バックシール TIG 溶接	バックシールとは、溶接部の裏側を窒素やアルゴンガスといった不活性ガスでシールドする事によって、溶接部の裏側が酸化するのを防ぐ方法。 TIG 溶接は Tungsten Inert Gas 溶接の略称であり、不活性ガス溶接を意味する。火花を飛び散らさず、様々な金属の溶接に対応するアーク溶接の一種。
パルスレーザーのパルス長と波長	レーザーの波長は、用いる媒質ごとに特有の誘導放射エネルギー E があるため、 $E = h \nu$ (h :プランク定数)によってその媒質が発振できる波長は決まっている。波長が 380nm 以下を紫外光(UV: ultra violet)とよび、超電導層の成膜やレーザースクライビング加工の光源として紫外域のレーザーが多く用いられている。パルス 1 発あたりにレーザー照射が行われる時間のことをパルス長と呼び、nsec (10^{-9} sec), psec (10^{-12} sec), fsec (10^{-15} sec)などのレーザーがよく用いられる。
ピン止めセンター	外部磁界を全く侵入させない(マイスナー効果)超電導体は、第 1 種超電導体と呼ばれている。これに対して第 2 種超電導体では下部臨界磁場 H_{c1} を超えると一部量子化磁束が侵入した混合状態となる。この状態で外部から電流を流すと、量子化磁束はローレンツ力を受けて動こうとするが、超電導体内の格子欠陥、析出相(絶縁相、常伝導相)、不純物、転位、粒界等の不均質な部分に外部磁束が捕捉され動きが妨げられる。これをピン止め(ピン止めセンター)という。ローレンツ力よりピン止め力のほうが大きければ、磁束は動かないが、電流または磁場が増加して、ピン止め力よりローレンツ力のほうが大きくなれば、磁束が動き電圧が発生する(電気抵抗が生じる)。このローレンツ力とピン止め力が拮抗した限界の状態における単位面積当たりの電流値が臨界電流密

	度 J_c となる。
(液体窒素) ポンプ	圧力により流体（主に液体）を送り出す（または吸い込む）ための機械。主な方式は、レシプロ式やスクルー式の容積型と遠心式に区別される。送液したい流量と圧力差（揚程）により適した方式が選択される。
レーザースクライビング	レーザーによって溝を形成する技術。液晶パネル作製などによく使われる技術であるが、RE 系超電導線材の場合には、線材をマルチフィラメント化（超電導層まで切削して溝形成）して交流損失を低減する方法として用いる。現在は、UV 波長域のパルスレーザー(KrF エキシマレーザー, psec 固体レーザー等)を用いた加工を行なっている。
永久電流モード	超電導体で閉回路を形成すると、外部起電力がなくても定常電流を流すことができる。超電導マグネットシステムにおいて、このような超電導の閉回路を実現し、定常電流による極めて安定な静磁場を発生する運転方法を指す。通常は、コイルと永久電流スイッチを超電導接続して閉回路を形成する。
鏡板	筐体外筒の両端部に使用する半球状の部材。圧力荷重を分散させ、応力集中を防ぐために設けている。R が付くことで強度が増し、平板よりも設計上の板厚を薄くでき、筐体全体の軽量化に貢献できる。
極数	モータをシャフトに対して垂直に切った面に現れる磁極(N/S 極)の数をいう。
結晶面内・面外配向性	超電導層及び中間層等の結晶軸の揃い方の程度を示したもの。この値が小さい方が配向性が優れていると言える。基板に垂直な方向(膜厚方向、c 軸方向)への配向が面外結晶面外配向、基板の長手方向(a-b 面)の配向が結晶面内配向である。通常、REBCO 超電導層の面外配向度($\Delta\omega$)は、(005)または(006)面の X 線回折ロックングカーブ測定の半値全幅で、面内配向度($\Delta\phi$)は、(103)面の X 線極点図測定を行い、その ϕ スキャンピークの半値全幅で評価することが多い。
交流損失	超電導体に交流磁場が印加されると、ピン止めされた失が発生する。これを低減するためにマルチフィラメント化が最も有効な手段であるが、フィラメント間に電気伝導がある場合には、カップリング損失が発生する。したがって、レーザースクライビング加工によってマルチフィラメント構造を構築する場合には、超電導層が分断されるだけでなくフィラメント間電気抵抗も確保する必要がある。
接続抵抗	超電導線材同士直接あるいは電極を介しての接続では接続抵抗が存在する。電極を介して接続する方が抵抗が高いが、それでも $\mu\Omega$ のオーダーであるためテスターなどで測定することはできず、大電流を印加して I-V カーブを測定し、その傾きより接続抵抗値を求めるという測定方法で求める。
断熱二重構造	2 層式の筐体構造であり、内層は超電導状態を保持するために極低温に冷却され、外層は外部からの熱侵入を低減すべく真空状態となっている。MRI や NMR など超電導電磁石において用いられる技術。
超電導磁気シールド	超電導体は磁束（外部磁場）を排除する性質を有し、特に下部臨界磁場までは完全に磁場を排除できるが、それは無限大の大きさを有する場合であり、実際に RE 系超電導線材を巻いてシールドを作製する場合には、線材間の隙間から磁束が侵入するため完全に磁場を排除するのは難しい。また下部臨界磁場以上の磁場では徐々に磁場の侵入を許すため、完全な磁場の遮蔽は難しい。

熱交換器	保有する熱エネルギーが異なる 2 つの流体間で、熱エネルギーを交換するために使用する機器。温度の高い物体から低い物体へ効率的に熱を移動させることで物体の加熱や冷却を行う目的で用いられる。
力率	電圧と電流の位相差
臨界電流	超電導体に抵抗ゼロで流すことができる電流の最大値であるが、実際にはある電界の閾値を決めて、それに達する電流値を臨界電流と定義する。記号は I_c 。
臨界電流密度	臨界電流を超電導層の断面積で除した値。記号は J_c 。

⑧-2 軽量蓄電池

用語	説明
CA	充放電レート（Cレート）。電池を完全放電状態から満充電までを1時間で充放電する場合、Cレートは1 CAとなる。
STEM-EELS	Scanning electron Transmission Electron Microscopy-Electron Energy Loss Spectroscopy 走査型透過電子顕微鏡 - 電子エネルギー損失分光法 充放電過程の正極および負極粒子に対してナノメートルスケールの空間分解能で、軽元素のリチウムを含めた元素分析や結合状態を測定することで、リチウム硫黄電池の反応メカニズムを明らかにすることができる。その結果からリチウム硫黄二次電池のエネルギー密度に影響与える要因を明らかにし、要素技術開発を促進させることができる。
LiTFSI	Lithium bis(TriFluoromethaneSulfonyl)Imide 電解質塩の一種である。リチウム硫黄電池用電解液に適用することで、高い入出力特性および電池寿命が期待できる。
FEC	Fluoro Ethylene Carbonate 電解液溶媒の一種である。リチウム硫黄電池用電解液に適用することで、充放電過程において正極表面に良好な被膜を形成し、リチウム硫黄電池の電池寿命を向上させることが期待できる。
HFE	Hydro FluoroEther 電解液溶媒の一種である。リチウム硫黄電池用電解液に少量添加することで、充放電過程において正極表面に形成される被膜を改質し、リチウム硫黄電池の電池寿命を向上させることが期待できる。
AFM	Atomic Force Microscope 電極表面の電子伝導性を可視化することができる。この装置を用いることで、リチウム硫黄電池の入出力特性向上の要因を明らかにすることが可能となり、高出力リチウム硫黄電池の開発を促進することができる。

⑧-3 電動ハイブリットシステム

用語	説明
FCAC	Fuel Cooled Air Cooler, 燃料排熱熱交換器
BLI	Boundary Layer Ingestion (境界層吸込み)
MFB	Mission Fuel Burn (燃料消費量)
SFC	単位推力当たりの燃料消費率
HP 軸	高圧軸
LP 軸	低圧軸
PLECS	パワーエレクトロニクスシミュレータ
HMTB	Hybrid Multi Terminal current limit Breaker
MILS	Model In the Loop Simulation
HILS	Hardware In the Loop Simulation

I. 事業の位置付け・必要性について

1. 事業の背景・目的・位置付け

1.1 事業実施の背景と事業の目的

航空機産業は、最先端の技術が適用される典型的な研究開発集約型の産業、かつ極めて広い裾野を有する総合産業であり、極限までの安全性・信頼性が求められ、厳しい品質管理が要求される。また今後、旅客需要は世界的に大きく伸び、今後 20 年で約 2 倍になることが想定されている。

一方、次世代航空機にはさらなる安全性・環境適合性・経済性が求められている。そのため、これらのニーズに対応した航空機用先進システムを開発し、我が国の技術が次世代航空機に早期に導入可能な体制を構築することを目的に、2015 年度より「航空機用先進システム実用化プロジェクト」を開始した。

また、国際民間機航空機関(ICAO)において、二酸化炭素(CO₂)排出量を 2050 年までに 50%削減(2005 年比)する目標が掲げられ、世界的に電動航空機の開発が加速し始めている。我が国も、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が、2018 年 7 月に電動航空機の技術開発を目指す組織「航空機電動化コンソーシアム」を設立し、世界の航空機需要が増える中で地球温暖化をもたらす二酸化炭素(CO₂)の排出量を削減する革新的電動航空機に関する技術創出を目指している。

環境負荷軽減や経済性、整備性向上のため、今後は推進系も含め更に航空機の電動化が進むと考えられていが、電動推進システムを構成する従来のモータやケーブル、発電機、蓄電池等の要素技術及び電力制御システム技術は、飛行に求められる重量当たりの容量・出力の点において旅客や貨物輸送に供する実用レベルには至っていない。そのため、これら要素の高効率化と軽量化が必要とされている。

そこで、電動化のコア技術を育て将来における競争力強化を図り、次世代航空機(電動航空機)に提案可能なレベルにまで成熟させることを目的に、2019 年度から「航空機用先進システム実用化プロジェクト」に研究開発項目「⑧次世代電動推進システム研究開発」(以下、本プロジェクトと記載)を加え、取り組みを開始した。

1.2 政策的位置づけ

我が国においては、本研究開発は以下の通り国家的な施策及び技術戦略マップにおいて、必要なプロジェクトとして位置付けられている。

(1) 産業構造ビジョン2010 (2010年6月)

経済産業省が策定。2020年に航空機産業の売上高2兆円(2014年の約2倍)、2030年に売上高3兆円(2014年の約3倍)を達成することを目指す。具体的な施策として、航空機システムを含めたモジュール単位での設計・開発を行う。

(2) 経済産業省とボーイング社との技術協力合意 (2019年1月)

経済産業省とボーイング社は、新たな技術分野(「電動化」、「低コスト高レートな複合材」、「製造自動化」)における協力強化に合意。

(3) 経済産業省と仏航空総局とのMOC締結（2019年6月）

日本の航空機産業と仏サフラン社との民間航空機産業における協力強化合意。経済産業省とサフラン社は、「電動化、新しい推進システム、AI等の革新的技術」、「材料、航空機システム及び機器、製造」、「日本を含むアジアにおけるサプライチェーン構築」の分野で協力。

(4) カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（2020年12月）

経済産業省、成長が期待される産業（14分野）において「実行計画」を策定。航空機産業も取り上げられ、複合材、電動化、水素や代替燃料などの複数の要素における技術的優位性の確立を目指す。

1.3 国内外の研究開発の動向と比較

我が国では、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が、2030～50年代の実用化を目指して、CO₂ や窒素酸化物（NO_x）など温室効果ガスの排出を少なくし、環境に優しいエミッションフリー航空機の研究を推進している。また、航空機電動化システムに着目した研究開発拠点（秋田県）の整備し、2020年度より運用を開始している。

米国では、NASA Glenn Research Center が Electrified aircraft propulsion や Hybrid Electric propulsion の研究を推進し、Boeing 社も具体的な構想を発信していないが、特許の出願状況を踏まえると電動化に関わる研究等は進めており、また、経済産業省との技術協力を合意していることから何らかの活動が行われていることが伺える。

欧州では、2021年から取組が計画されている Cleansky3 プログラムの中で、電動推進の研究開発が実施される予定であれい、我が国としても諸外国に遅れを取らないようにするため、航空機電動化に関する継続的な研究開発が必要であると考えられる。本研究開発を通じて航空機用先進システムを開発することにより、これまでは国外の航空機システムメーカーの下請けに甘んじていた我が国の航空機システムメーカーも、航空機システム市場に本格的に参入する機会を作り出すことができる。

1.4 技術戦略上の位置づけ

NEDO の 2013 年度情報収集事業「航空機分野における戦略策定調査」の技術戦略マップにおいて、航空機用先進システムの開発は航空機システム技術の重点開発テーマとなっている。

航空機電動化について、「航空機電動化コンソーシアム」や航空業界団体・企業からのヒアリング、シンポジウムでの討論内容等から、電動推進化において必要となる技術課題を整理した。NEDO は 2017 年度に実施した「航空機システム開発に関する国内他産業連携の可能性調査」によるニーズ調査、技術動向及び海外との共同研究への進展状況を踏まえ、「航空機分野技術戦略 Ver3.0（NEDO 2019）」において電動航空機に関する技術戦略を策定し、研究開発支援の優先順位を整理し、テーマを選定した。

表 重要技術課題

分類	重要技術課題名 (概要)	構成要素/システム
A) 全高度共通の重要 技術課題	高出力密度化 (重量の成立性確保、最大出力運転時間確保のための耐熱・冷却・放熱性)	電動要素 (電動モータ、発電機、 パワーエレクトロニクス、電池、 遮断器、分配器、送配電線等)
	電池の安全性と高エネルギー密度化の両立 (熱暴走等の危険封じ込めと電池システム全体としての高エネルギー密度化の両立)	電池 (電力ストレージ)
	高効率化 (BUや多発化による推進効率の向上、推進系熱効率の向上)	推進系・機体統合システム、ハイ ブリッドシステム、電動要素
	安全性・信頼性保証 (電動要素追加による故障率増加等に対するシステムの安全性と信頼性の保証)	電動推進システム、ハイブリッ ドシステム、電動要素
B) 高高度環境特有の 重要技術課題	耐放電・耐放射線 (高高度環境における高電圧要素及びシステムの放電及び放射線影響への対処)	パワーエレクトロニクス、電動 モータ、発電機、電動要素
	熱&パワー管理・制御 (低空気密度・ガスタービンエンジン内外高温環境下の熱とパワーマネジメント)	電動要素、電動推進システム、 ハイブリッドシステム
C) 低高度運用特有の 重要技術課題	耐故障 (推進系故障時の緊急着陸または通航継続に対する耐故障や故障許容設計)	電動推進システム
	低騒音化 (ファン、プロペラの空力騒音低減)	ファン、プロペラ

出展：「航空機電動化 将来ビジョン ver.1」 (JAXA, 2018)

2. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

2.1 NEDO が関与することの意義

航空機用先進システムの開発は技術的・経済的な波及効果が大きく、裾野産業の形成や雇用創出につながり、我が国の産業の活性化、海外展開の促進に貢献することが期待できる。ただし、航空機システムは開発期間が長く実用化までに長期間を要すること、また認証取得に膨大な費用と時間を必要とすることから、民間活動のみでは実施にあたってリスクが極めて大きく、推進にあたって NEDO の関与が必要である。

2.2 実施の効果 (費用対効果)

本プロジェクトで開発した航空機用先進システムが次世代航空機に搭載されれば、2030 年代以降に年間で最大数百億円規模の売上げを継続して得られる可能性がある。そのため、本プロジェクトの総事業費に対し、生み出される効果は十分であると考えられる。

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

1.1 事業の目標

本研究開発では、航空機の安全性・環境適合性・経済性といった社会のニーズに対応した、安全性が高く軽量・低コストな航空機用先進システムを開発し、次世代航空機に提案可能なレベルにまで成熟させることを目的としている。

・アウトプット目標

本研究開発では、航空機用先進システムのプロトタイプモデルを製作し、地上ないし飛行環境下で従来のシステムよりも優れた性能・機能等を有することを実証する。この目標を達成すれば、国内外の航空機メーカーからは一定の成熟度を持つシステムであると判断され、次世代航空機への提案が可能となる。

・アウトカム目標

本研究開発にて開発した航空機用先進システムが国内外の航空機メーカーに採用されること、またプロダクトサポートやMRO（Maintenance, Repair and Overhaul）により、2030年代以降から年間で研究開発項目毎に数十億円、合計で最大数百億円の売上を継続して得ることを目標とする。

1.2 研究開発目標と根拠

本プロジェクトにおける研究開発の目標は以下の通り。

・最終目標（2023年度）

航空機用先進システムのプロトタイプモデルを製作し、地上または飛行環境下で従来のシステムよりも優れた性能・機能等を有することを実証する。

・中間目標（2021年度）

航空機用先進システムのプロトタイプモデルを製作し、実験室環境下で従来のシステムよりも優れた性能・機能等を有するかどうかを検証する。

各研究開発項目の研究開発目標とその設定根拠は、[V.各研究開発テーマ毎の詳細](#) に示す。

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

2.1.1 研究開発のスケジュール

本研究開発の実施期間は2019年から2023年までの約5年間である。
プロジェクト全体の研究開発スケジュールは以下の通り。

	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度
⑧-1 高効率かつ高出力電動推進システム	仕様策定、試作/評価		中間評価	プロトタイプ的设计/製作、検証	
⑧-2 軽量蓄電池	仕様策定、試作/評価			プロトタイプ的设计/製作、検証	
⑧-3 電動ハイブリットシステム		仕様策定、試作/評価		プロトタイプ的设计/製作、検証	

各研究開発項目のスケジュールは、[V.各研究開発テーマ毎の詳細](#) に示す。

2.1.2 プロジェクト費用

本プロジェクト全体の費用は以下の通り

(単位：百万円)

研究開発項目	2019年度	2020年度	2021年度	合計
⑧-1 高効率かつ高出力電動推進システム	320.8	793.6	1,214.8	2,329.3
⑧-2 軽量蓄電池	294.8	428.8	313.9	1,037.6
⑧-3 電動ハイブリットシステム	—	229.6	243.5	473.3
合計	615.6	1,452.0	1,772.3	3,840.2

各研究開発項目の費用は、[V.各研究開発テーマ毎の詳細](#) に示す。

2.2 研究開発の実施体制

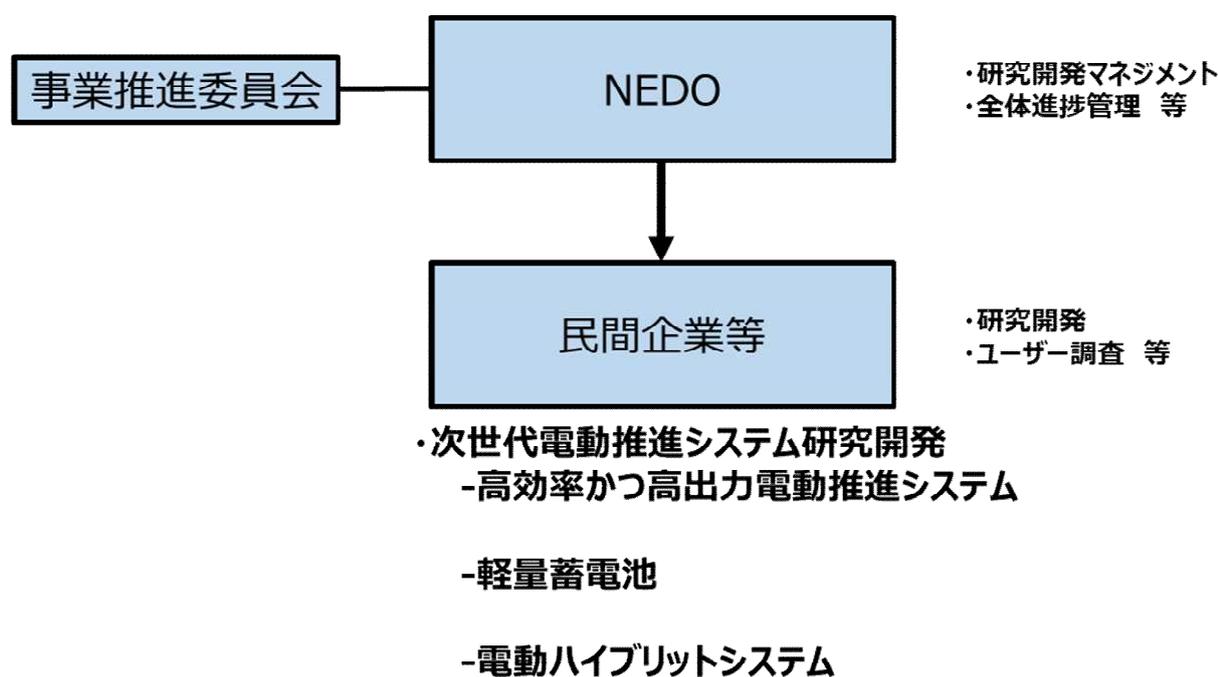
プロジェクトの進行全体を企画・管理や、プロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化

させるべく、プロジェクトマネージャーに NEDO ロボット・AI 部 白木 聖司を任命している。

(2021 年 8 月より、⑧-1 高効率かつ高出力電動推進システム のみ NEDO ロボット・AI 部 統括主幹 梅田 英幸が代行)

本プロジェクトは、NEDO が、単独ないし複数の、原則本邦の企業、研究組合、公益法人等の研究機関 (原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別な研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点からの国外企業との連携が必要な場合はこの限りではない。) から公募によって研究開発実施者を選定後、共同研究契約等を締結する研究体を構築し、委託して実施している。

実施体制を以下に示す。



実施体制概要

各研究開発項目の実施体制は、[V.各研究開発テーマ毎の詳細](#) に示す。

2.3 研究開発の進捗管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有する NEDO は、経済産業省及び総括責任者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標、並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。特に、「三現主義」、「信頼関係構築」、「社会実装」を意識しプロジェクトを推進する。四半期に 1 度程度でイベントを実施する。

進捗管理に関する具体的な取組は以下の通り。

・事業推進委員会の開催

NEDO を主体として、各研究開発項目の研究開発責任者等が進捗報告を行い、NEDO のプロジェクトマネージャーと議論を行い、外部有識者（委員 8 名）による審議を経て、研究開発の方向性を決定している。本委員会は半年に 1 回程度開催している。

<開催実績（※）>

第 7 回：2019 年 9 月 第 8 回：2020 年 2 月 第 9 回：2020 年 2 月

第 10 回：2021 年 3 月 臨時開催：2021 年 6 月

（※ ⑧次世代電動推進システムに関わる実績のみ）

・サイトビジットの実施

2016 年度より、各研究開発項目の進捗状況のよりの確な把握及び外部有識者を含めたプロジェクト関係者間で今後の課題等について認識の共有をはかることを目的として、外部有識者等と共に研究開発現場訪問（以下、「サイトビジット」という。）を実施している。

<開催実績（※）>

第 4 回：2019 年 11 月 (2 箇所、外部委員 延べ 10 人)

第 5 回：2020 年 12 月 (3 箇所、外部委員 延べ 12 人)

第 6 回：2021 年 7 月 (3 箇所、外部委員 延べ 11 人)

（※ ⑧次世代電動推進システムに関わる実績のみ）

・進捗確認ヒアリングの実施

事業推進委員会及びサイトビジットに加え NEDO のプロジェクトマネージャーと委託先との間で進捗確認を目的としたヒアリングを実施している。

<開催実績（※）>

第 5 回：2020 年 5 月

（第 6 回は推進委員会（臨時）やサイトビジット（6 回）にて代用）

（※ ⑧次世代電動推進システムに関わる実績のみ）

年度	2019年度									2020年度									2021年度																	
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
イベント			⑧事業開始			事業推進委員会（第7回）	サイトビジット（第4回）			事業推進委員会（8回）			進捗確認ヒア（第5回・書面）			事業推進委員会（第9回）	サイトビジット（第5回）			事業推進委員会（第10回）			事業推進委員会（臨時）	サイトビジット（第6回）			中間評価	ステージゲート審査					事業推進委員会（第11回）			

航空機用先進システム実用化プロジェクトの進捗管理に関する取組

2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

2.4.1 知的財産権等に関する戦略

委託研究開発及び共同研究の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー・産業技術業務方法書」第 25 条の規定等に基づき、原則として、全て委託先に帰属させることとする。なお、本プロジェクトの当初から、事業化を見据えた知的財産戦略を検討・構築し、適切な知財管理を実施する。

各研究開発項目の戦略は、[V.各研究開発テーマ毎の詳細](#) に示す。

2.4.2 知的財産管理

知的財産管理に関する各研究開発項目の取組は、[V.各研究開発テーマ毎の詳細](#) に示す。

3. 情勢変化への対応

3.1 動向・情勢の把握と対応

本プロジェクトに関連して2019年度以降に実施された、動向・情勢の把握を目的とした情報収集事業は以下の通り。なお、調査の実施に係る費用は本プロジェクトとは別の予算から支出されている。

また、各研究開発項目に関連する動向・情勢については、各委託先に把握に努めるよう指導するとともに、把握された動向・情勢への対応と併せ、事業推進委員会等で報告を行っている。

① 航空機装備品、電動化分野における研究開発動向調査（2020年度）

本調査の目的及び概要は以下の通り。

1) 調査の目的

航空機産業は、最先端の技術が適用される典型的な研究開発集約型の産業、かつ極めて広い裾野を有する総合産業であり、多岐にわたる関連産業分野への技術波及及び技術高度化を促進している。また今後、ジェット旅客機の運航機数は世界的に大きく伸びることが想定されており、2038年には2018年に比べて、約1.7倍に増加する見込みとなっている。航空機産業にとどまらず、より広い産業の技術力向上及び雇用創出のために我が国の航空機産業の発展を図ることは、産業政策上、極めて重要である。

しかし、航空機産業における我が国の産業競争力は決して高くない。例えば国外の航空機システムメーカーでは、M&Aを繰り返し巨大企業に成長してきており、航空機システムを丸ごと受注しているため、我が国の航空機システムメーカーは航空機分野においてビジネスの機会が縮小し、国外の航空機システムメーカーの下請けに甘んじている。そのため、次世代航空機のトレンドである装備品（油圧システムや燃料システム、防氷等）の電動化や、昨今世界的に研究開発がスタートした推進系の電動化を見据えた航空機用先進システムを開発し、我が国の技術が次世代航空機に早期に導入可能な体制を構築しておく必要がある。

そこで本調査では、航空機産業の更なる競争力強化、市場活性化に向けて、国内外の航空機開発・航空機システム開発及び電動化開発に関する動向調査を行い、国内外の航空機メーカー及び航空機システムメーカーのニーズ、今後の航空機装備品、電動化開発の方向性等を明らかにする。

2) 調査の概要

以下の(1)及び(2)の事項について、公開レポート等からの情報収集、国内外で開催されるワークショップ等への出席、国外の航空機メーカー及び航空機システムメーカーや関連企業等への現地調査・個別ヒアリングを通じて、調査（情報収集、分析及び考察）を行う。調査の実施状況はNEDOと密に共有し、調査の方向性について適宜確認を行うとともに、追加で実施すべき事項が発生した際には協力して対処する。

また、調査にあたっては、NEDOや外部有識者、経済産業省、関連機関等との密接な連携のもとで行う。

(1) 国内外の航空機装備品、電動化開発等に関する動向調査

- 2030年以降に納入される航空機に求められる機能・性能や今後の航空機開発、航空機システム開発及び電動化開発の方向性、研究開発動向・シーズに関する調査・分析。
- 国外の航空機メーカー及び航空機システムメーカーの技術ニーズに関する調査・分析。

- 航空機装備品、電動化開発分野における航空機産業と他産業との相互波及や連携の可能性に関する模索。
- 主に電動化コア部品（バッテリー、モーター、半導体等）の国内外ポテンシャル企業・サプライチェーン・重要素材に関する調査・分析。

(2) 航空機産業活性化シナリオの改訂

(1)で得られた調査結果を基に、「国外の航空機開発及び航空機システム開発に関する動向調査」で調査した 3 章から 5 章を改訂し、以下④から⑥を追加する。

今回の調査では、①我が国が目指すべき航空機産業の方向・戦略（航空機構造関連、航空機システム関連、エンジン関連、電動化関連等）、②我が国の航空機に関する技術開発、③我が国の航空機システムに関する技術開発、④我が国の航空機電動化に関する技術開発、⑤航空機産業と他産業との相互波及や連携、⑥新技術の実用化に伴うサプライチェーンや産業構造等の変化を含むものとし、改訂にあたっては各項目に関連する有識者・事業者等と密に連携しながら作業を進めるものとする。必要に応じて内容を追加し、調査を行うこととする。

なお、内容の妥当性について審議するための有識者委員会を立ち上げ、専門的見地から意見を聴取し、反映するものとする。

各研究開発項目の把握・対応状況は、[V.各研究開発テーマ毎の詳細](#) に示す。

3.2 開発促進財源投入実績

開発の進捗を踏まえ、解決すべき課題の対策を進めるため開発促進財源の投入を行った。具体的な内容は下表に示すとおりである。この開発促進財源投入により必要な対策を実施することができ、その後の研究開発の着実な推進が可能となった。

投入時期	研究開発項目	投入額 (百万円)	投入目的	成果・効果
2020.4	⑧-1 高効率かつ 高出力電動 推進システム	20.0	超電導誘導回転機は軽量かつスリップリングフリーである利点があり、航空機用モータとして同機器と共に有力な候補である。本件で、航空機应用到に有効な横型100kW級の誘導機の試作を行いその有効性を検証する。	本事業で2019年度に超電導誘導機の縦型超小型モデルの作製に成功、その有効性を確認し、また2020年度には液体窒素・窒素ガスを圧送する極低温ポンプ適用の試作検証を行い軽量超電導ケーブルの実現性を示した。本件加速により、超電導技術を適用する航空機用電動推進システムの重要な要素技術として、誘導機の有効性検証が可能となり本事業の最終目標である地上試験システム的设计・試作・評価に大きく寄与する。
2020.4	⑧-1 高効率かつ 高出力電動 推進システム	100.0	本事業の研究開発を進める中で、高磁場中でも高い特性を示す線材の成膜方法と、幅広の超電導線材による磁気シールドの効果が明らかになった。加速増額により、40mm幅を有する高性能線材を作製するために必要な装置群を整備する。2020年度は、レーザー源装置の改造を行う。	多層構造の超電導線材について、超電導層、中間層、安定化層などの各層について、長尺幅広で高配向基板の作製装置の整備を図ることで、世界に先駆け、航空機用の超電導回転機及び磁気シールドを開発することができる。また電動推進航空機の最重要課題である軽量化に大きく貢献する。ただしこれらの成果・効果は、2021年度実施の加速増額と併せて実現される。
2020.12	⑧-3 電動ハイブリッドシステム	29.6	事業開始後の情報分析により、エアマネジメントユニットの更なる高出力・高効率化が必要と判断したため、以下2点を実施する。 1.【空気浮上型軸受の高耐荷重化】新構造の開発と新材料等の選定、施工方法の確立 2.【高出力超高速回転用巻線の排熱システムの開発】高伝熱材料の選定と、成型方法の確立	小型超軽量なエアマネジメントユニット実現に必要な超高速電動ターボの要素技術として、空気浮上型軸受の更なる高性能化を可能とする良好な摩擦摩耗特性を有する高耐熱コーティング材料を抽出した。また、ステータ側の巻線電流増強に伴う伝熱効率の向上に関し、高熱伝導率モールド材が正常に流動する空間サイズを、試験上で明確にした。更に実証を進めることで、海外機体メーカーへの提案の主導権獲得を狙うことができる。

これに加え、2021年度中に、2つの研究開発項目に92.0（百万円）の開発促進財源を投入する予定。

4. 評価に関する事項

NEDO は技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、プロジェクト評価を実施することし、評価の時期は、中間評価を2021年度、事後評価を2024年度とした。

III. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

2021年8月末日現在、中間目標の達成に至っていない項目はあるものの、2021年度末に達成、あるいは、2022年度早々に達成見込みとなっており、概ね良好である。

2. 研究開発項目毎の成果

2.1 研究開発項目毎の目標と達成状況

各研究開発項目の目標と達成状況は、[V.各研究開発テーマ毎の詳細](#) に示す。

2.2 各個別テーマの成果と意義

各研究開発項目の成果と意義は、[V.各研究開発テーマ毎の詳細](#) に示す。

2.3 成果の最終目標の達成可能性

2021年8月末日現在、中間目標の達成に至っていない項目はあるものの、2021年度末に達成、あるいは、2022年度早々に達成見込みとなっており、概ね良好であり、最終目標の達成可能性についても現時点で大きな支障は確認されていない。

各研究開発項目の達成可能性は、[V.各研究開発テーマ毎の詳細](#) に示す。

2.4 成果の普及

得られた研究開発成果については、NEDO、実施者とも普及に努めるものとする。また、本プロジェクトでは、航空機用先進システムの開発を通じて、我が国で開発した技術・製品の認証を円滑に取得するために必要な安全性評価手法等を構築する。

各研究開発項目の成果の普及状況は、[V.各研究開発テーマ毎の詳細](#) に示す。

添付の「特許論文等リスト」も併せて参照のこと。

2.5 知的財産権の確保に向けた取組

各研究開発項目の知的財産権の確保に向けた取組は、[V.各研究開発テーマ毎の詳細](#) に示す。

IV. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通し

1. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

1.1 本プロジェクトにおける「実用化・事業化」の考え方

当該研究開発に係る製品・サービスが顧客（機体メーカー、エンジンメーカー、システムメーカー、エアライン等）に納品されることをいう。

1.2 実用化・事業化に向けた戦略

従来、日本メーカーは国外メーカーの下請けに甘んじてきたため、認証取得等を独自で行う上でのノウハウが不十分であった。今後は独自に開発、設計、製造、認証取得、販売を行うことができるよう、本研究開発を通じてプロトタイプ製作や、認証取得に向けた実証試験等の実績を積み、国際競争力を向上させる。

本研究開発を通じて、実用化を見据えた実証試験インフラの整備やサプライチェーンの確立、人材の確保に取り組む。また、必要に応じて国外の航空機メーカーや航空機システムメーカーをパートナーとして選定することにより、ユーザ側のニーズを的確に把握し、成果を実用化・事業化につなげることを目指す。

各研究開発項目の戦略は、[V.各研究開発テーマ毎の詳細](#) に示す。

1.3 実用化・事業化に向けた具体的取組

各研究開発項目の具体的な取組は、[V.各研究開発テーマ毎の詳細](#) に示す。

1.4 成果の実用化・事業化の見通し

各研究開発項目の見通しは、[V.各研究開発テーマ毎の詳細](#) に示す。

1.5 波及効果

本プロジェクトの「アウトカム目標」に示している通り、本研究開発にて開発した航空機用先進システムが国内外の航空機メーカーに採用されること、またプロダクトサポートや MRO（Maintenance, Repair and Overhaul）により、2030 年代以降から年間で研究開発項目毎に数十億円、合計で最大数百億円の売上を継続して得ることを目標としている。

各研究開発項目で見込まれる波及効果は、[V.各研究開発テーマ毎の詳細](#) に示す。

V. 各研究開発テーマ毎の詳細

V-1. 高効率かつ高出力電動推進システム

1. 研究開発マネジメント

1.1 研究開発目標と根拠

(1) 研究開発目標

時流に従って、航空機にも低エミッション化が求められている。しかし、民間機用ターボファンエンジンは高バイパス比と大口径化によりすでに十二分に高効率化が図られ、何らかの革新技術を取り入れない限りこれ以上の高性能化は難しいと言う段階に至っている。この解決策の最有力候補として電気推進化が考えられている。現行の高バイパス比ターボファンエンジンは、推力のおよそ 80%以上がファンにより得られていることから、ジェットエンジン部分をモータで置き換えてもほぼ同等の推力が得られ、航空機の電気推進化が実現される。電動化により、タービン・発電機部分とモータ・ファン部分を分割でき、それぞれ独立にサイズ、効率を最適化できるとともに、機内配置の自由度が大幅に増す。しかし、鉄心と銅線から成る従来の回転機・ケーブルを適用すると重すぎて本末転倒の結果を招くため、全超電導回転機・ケーブルの導入が必須となる。

実施者等は、酸化物超電導テープ線材の交流損失低減技術を独自に開発し、全超電導回転機の原理検証を世界に先駆けて行った。さらに、低電圧・大電流でコンパクトな三相同軸超電導ケーブルの開発も行ってきている。これらの成果を受けて「NEDO 先導研究プログラム/エネルギー・環境新技術先導プログラム/革新的航空機用電気推進システムの研究開発」を実施し、全超電導回転機概念設計を行った。しかしながら、上述の超電導推進システムの実用化には、未だ多くの技術的な課題の解決と目標に掲げるシステムとして実証試験が必要であるとともに、スケールアップを図らなければならない。そこで、本事業では、各要素技術において、解決すべき基盤技術を抽出し、これらの開発を通して、推進システムを構成する各機器の試作、さらには推進システムの試作・評価を行うことで実用化を促進することを目標としている。

(2) 技術的目標とその設定根拠

①「航空機用超電導推進システム要素技術開発」

①—1 超電導回転機基盤技術開発

【2021 年度中間目標】

- ・250-500kW モータ基盤技術確立
- ・0.5-1MW システム用回転機概念確立

【2023 年度最終目標】

- ・20MW システム開発に向けた超電導回転機における課題と対策の明確化

<設定根拠>

250-500kW、0.5-1MW の出力は、小型機の出力に相当し、開発過程で試験も含めて適用対象が存在する規模の出力を設定した。これらの出力の回転機に必要な基盤技術を確立することで、②「航空機用超電導推進システム機器機能検証」の実施を円滑かつ確度を向

上させるために中間目標を設定した。

最終的なターゲットである 20MW は、最も需要が多い単通路の旅客機の出力を想定しており、本プロジェクトに続いて開発ステージが移行するスケールアップに対応した基盤技術として最終目標を設定した。これにより、円滑に次期フェーズの開発が推進できると考えられる。

①—2 超電導ケーブル基盤技術開発

【2021 年度中間目標】

・0.5-1MW システム用ケーブル概念確立

【2023 年度最終目標】

・20MW システム開発に向けた超電導ケーブル関連技術における課題と対策の明確化

<設定根拠>

250-500kW、0.5-1MW の出力は、小型機の出力に相当し、開発過程で試験も含めて適用対象が存在する規模の出力を設定した。これらの出力の回転機に必要な基盤技術を確立することで、②「航空機用超電導推進システム機器機能検証」の実施を円滑かつ確度を向上させるために中間目標を設定した。

最終的なターゲットである 20MW は、最も需要が多い単通路の旅客機の出力を想定しており、本プロジェクトに続いて開発ステージが移行するスケールアップに対応した基盤技術として最終目標を設定した。これにより、円滑に次期フェーズの開発が推進できると考えられる。

①—3 冷却システム基盤技術開発

【2021 年度中間目標】

・250-500 kW モータ用冷却システム基盤技術確立

・0.5-1 MW システム用回転機 冷却システム概念確立

【2023 年度最終目標】

・20MW システム開発に向けた冷却システムにおける課題と対策の明確化

<設定根拠>

250-500kW、0.5-1MW の出力は、小型機の出力に相当し、開発過程で試験も含めて適用対象が存在する規模の出力を設定した。これらの出力の回転機に必要な基盤技術を確立することで、②「航空機用超電導推進システム機器機能検証」の実施を円滑かつ確度を向上させるために中間目標を設定した。

最終的なターゲットである 20MW は、最も需要が多い単通路の旅客機の出力を想定しており、本プロジェクトに続いて開発ステージが移行するスケールアップに対応した基盤技術として最終目標を設定した。これにより、円滑に次期フェーズの開発が推進できると考えられる。

①—4 超電導線材基盤技術開発

【2021 年度中間目標】

・スクライビング加工により 5 分割した 100m 長線材において、温度 70K、磁束密度 1.2T の環境下において、電流密度 250A/cm の電機子用線材を実現し、歩留り 60%以上を達成する。

- ・100m 長線材において、温度 70K、磁束密度 2.5T の環境下で電流密度 300A/cm 以上の界磁コイル用線材を実現する。
- ・0.5-1MW システム用シールド基盤技術を確立する。

【2023 年度最終目標】

- ・スクライビング加工により 10 分割した 100m 長線材において、温度 70K、磁束密度 1.2T の環境下で電流密度 300A/cm の電機子用線材を実現し、歩留り 60%以上を達成する。
- ・100m 長線材において、温度 70K、磁束密度 2.5T の環境下で電流密度 500A/cm の界磁コイル用線材を実現する。
- ・20MW システム用シールド基盤技術を確立する。

<設定根拠>

中間目標は、FS プロジェクトの設計より、条件を設定し、目標値とした。シールド技術としては、後半のシステム開発に適用可能な技術レベルとして設定した。

最終目標は、最終的なターゲットである 20 MW が見込める条件として設定した。シールド技術は、本事業に続いて開発ステージが移行するスケールアップに対応した技術レベルを設定した。

①—5 低温動作半導体技術開発

【2021 年度中間目標】

- ・65K で動作する半導体材料の開発

【2023 年度最終目標】

- ・65K で動作する半導体素子の開発

<設定根拠>

中間目標は、第一段階として、各デバイスの所定の性能確保の確認の後に、システムとしての成立性の確認を目標として設定した。

次期フェーズにインバーターの機能を持った素子の適用を可能にするために、最終目標時には、素子化の目標を設定した。

②「航空機用超電導推進システム機器機能検証」

②—1 500kW 級超電導モータ検証

【2021 年度中間目標】

- ・250-500kW 超電導モータを製作し、定格出力試験により基礎的電気特性に加え機械特性、熱特性を評価し、5kW/kg を超える出力密度を実現する見通しを得る。

【2023 年度最終目標】

- ・250-500kW モータの修正（含再製作）を行い、航空対応条件に対する地上評価を行うことで実機搭載の実現性を評価する。

<設定根拠>

250-500kW の出力は、小型機の出力に相当するものである。本事業提案のモータ構造は、FS プロジェクトにおける 1kW が最大である。従って、実用レベルとしては最初の試作となる本項のテーマでは、第一段階として、中間目標を設定した。

プロジェクト後の飛行試験に繋げるために、地上で行える特殊な環境下での評価試験を最終目標として設定した。

②—2 1 MW級超電導推進システム検証

【2021 年度中間目標】

・0.5-1MW 超電導推進システム構成の基本仕様を決定する。

【2023 年度最終目標】

・0.5-1MW 超電導推進システムを製作し、基礎評価を行うことで、超電導推進システムの成立性を検証する。

<設定根拠>

プロジェクト後の航空機対応評価に繋げるための第一段階として、各デバイスの所定の性能確保の確認の後に、システムとしての機能を確認し、システムとしての成立性の確認を中間目標として設定した。

プロジェクト後の航空機対応評価に繋げるための第一段階として、各デバイスの所定の性能確保の確認の後に、システムとしての機能を確認し、システムとしての成立性の確認を最終目標として設定した。

1.2 研究開発のスケジュール

事業項目	2019年度				2020年度				2021年度			
	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期
① 航空機用超電導推進システム要素技術開発												
①-1 超電導回転機基盤技術開発								500kW級モータ仕様				
①-2 超電導ケーブル基盤技術開発												1MW級システム仕様
①-3 冷却システム基盤技術開発								500kW級モータ仕様				
①-4 超電導線材基盤技術開発												
①-5 低温動作半導体技術開発												
② 航空機用超電導推進システム機器機能検証												
②-1 500kW級超電導モータ検証												
②-2 1MW級超電導推進システム検証												
③ 研究開発推進委員会の開催（全機関）												

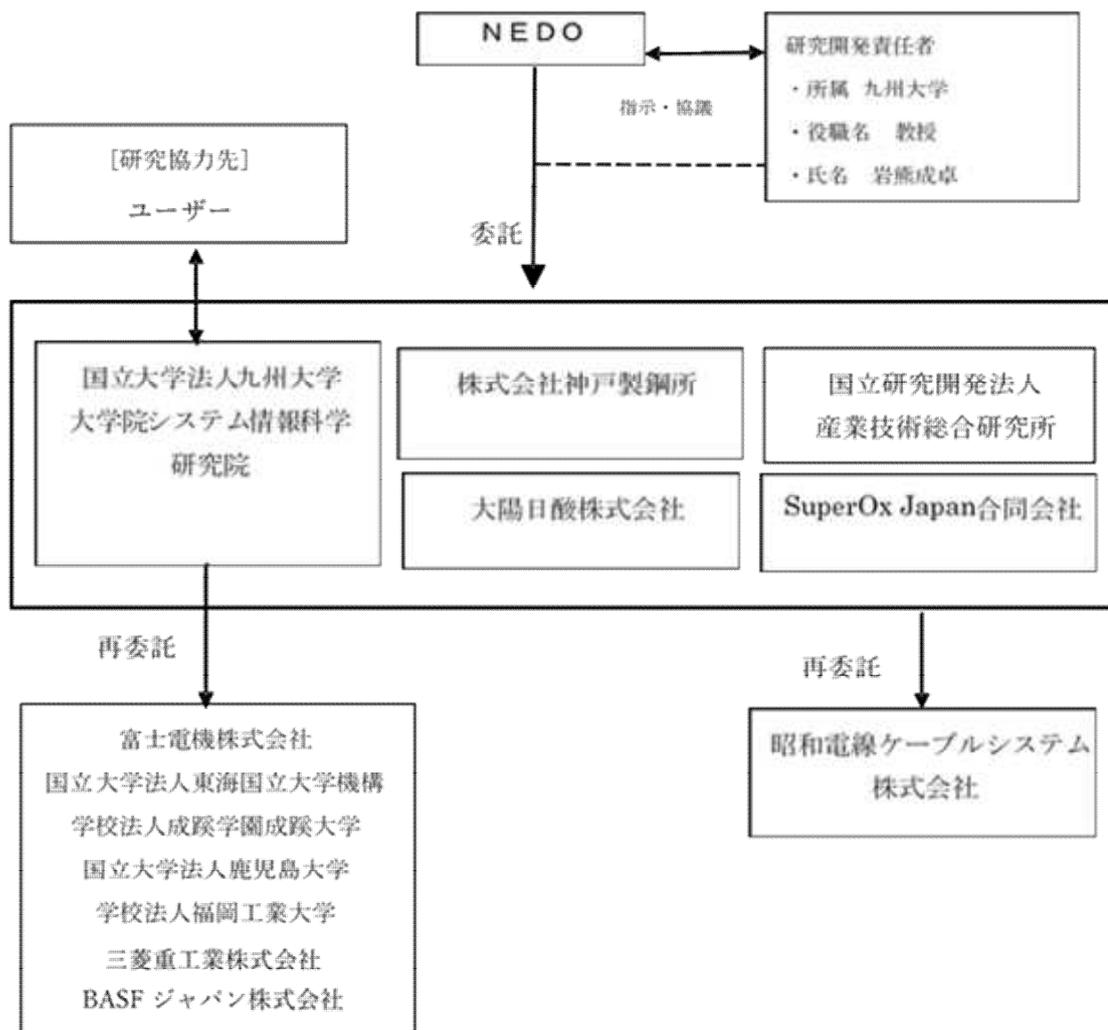
九大:九州大学、産総研:産業技術総合研究所、TN:大陽日酸、SOJ:SuperOx Japan、神鋼:神戸製鋼所

1.3 プロジェクト費用

(単位：百万円)

項目	2019年度	2020年度	2021年度	合計
研究項目①「航空機用超電導推進システム要素技術開発」	321	618	809	1,748
研究項目②「航空機用超電導推進システム機器機能検証」	0	172	406	578
合計	321	790	1,215	2,326

1.4 研究開発の実施体制



1.5 研究開発の運営管理（個別管理）

研究開発機関① 航空機用超電導推進システム要素技術開発の基盤技術毎にワーキンググループを設定し、ここにプロジェクトリーダーとともに関係する参画機関が参加し、進捗を管理するとともに連携関係を確認することとしている。② 航空機用超電導推進システム機器機能検証においては、関連する機関が多いことから進捗管理の機会を設け、相互の連携とともにスケジュールの管理を図る。また、プロジェクト全体としては、研究推進委員会において、取りまとめて進捗及び今後の計画を議論し、管理する体制を取っている。

1.6 知的財産権等に関する戦略

各基盤技術の開発が進むにつれて個別の知財が生まれつつある。これらは、遅滞なく積極的に権利化を進めるが、加えて本提案の特長である基盤技術の組み合わせで価値が増大する可能性がある内容を能動的に創り出し、関連技術が連携した技術、更には、システムとしての複合技術に関する知財確保を戦略的に進めていくところである。

1.7 知的財産管理

研究開発責任者である九州大学 先進電気推進飛行体研究センター センター長・教授 岩熊成卓を委員長とし、委員長を含め5名以上で構成する知財管理委員会を創設し、ここで出願を想定している知財を審議または確認することとしている。ここでは、「届け出を受けた成果と本プロジェクトとの関連」、「プロジェクトの成果の出願による権利化又は秘匿の選択」、「出願による権利化を行う場合における出願対象国」、「秘匿をする場合における秘匿期間等」を審議、決定する。多少にかかわらず、本プロジェクトと関連が認められる知財は、必ず出願前に本委員会に諮らなければならないこととしている。

1.8 動向・情勢の把握と対応

下記方法により、動向と情勢を把握

- ・国際学会（ISS2019、EUCAS2019、MT26、ASC2020、ISS2020、CEC/ICMC 2021）に参加することにより業界動向・情勢を把握した。
- ・研究開発推進委員会を通して、開発方針への助言を得るとともに重工関係者への理解促進を図った。

情勢	対応
1. 新型コロナ感染拡大により、研究開発活動が大幅に制限	2021年度に作製予定の全超電導モータの容量に関して、中間目標の範囲（250～500kW）内で調整するとともに、作製、評価スケジュールの見直しを行った。
2. 研究開発を加速するために加速予算を受けた	(2019年) (2020年) (2021年)

2. 研究開発成果

2.1 研究開発項目毎の目標と達成状況

中間目標	成果	達成度	課題と解決方針
研究項目① 航空機用超電導推進システム要素技術開発			
250-500kW モータ基盤技術確立	<ul style="list-style-type: none"> ・各開発要素に対して、モデル試作等で有効性の検証を一部終了。 ・軽量ケーブル、接続構造に関して適正構造を考案し、モデル試作等で有効性の検証を一部終了。 	△	<p>【課題】 新型コロナ感染拡大の影響により研究開発活動が大幅に制限されている。</p> <p>【解決方針】 目標達成時期を数ヶ月後ろ倒しすることにより対応。</p>
0.5-1MW システム用回転機概念確立		△	
0.5-1MW システム用ケーブル概念確立		△	
250-500kW モータ用冷却システム基盤技術確立		△	
0.5-1MW システム用回転機 冷却システム概念確立		△	
スクライビング加工により5分割した100m長線材において、温度70K、磁束密度1.2Tの環境下において、電流密度250A/cmの電機子用線材を実現し、歩留り60%以上を達成	<ul style="list-style-type: none"> ・歩留り向上に有効なスクライブ加工に適した装置を導入、立ち上げ中。 ・短尺線材において左記目標特性を見通す技術を開発。 	△	
100m長線材において、温度70K、磁束密度2.5Tの環境下で電流密度300A/cm以上の界磁コイル用線材を実現		△	
0.5-1MW システム用シールド基盤技術を確立	・小型コイルにてシールド基礎特性を把握するとともに、電磁解析で有効性を確認。	△	
65Kで動作する半導体素子の開発	・既存半導体及び名大試作品で、低温評価を行い必要な耐電圧を確認。	△	
研究項目② 航空機用超電導推進システム機器機能検証			
250-500kW 超電導モータを製作し、定格出力試験により基礎的電気特性に加え機械特性、熱特性を評価し、5kW/kgを超える出力密度を実現する見通しを得る。	<ul style="list-style-type: none"> ・研究項目①の検討に基づき250-500kWモータの基本構造を設計。 ・超電導モータ要素技術選定委員会において250-500kWモータに採用する要素技術を決定。 	△	<p>【課題】 同上。</p> <p>【解決方針】 同上 及びモータ容量を調整することで対応。</p>
0.5-1MW 超電導推進システム構成の基本仕様を決定する。	・現時点で未着手だが、今後他の進展の状況をみて仕様決定予定。	△	

◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

2.2 成果と意義（成果の詳細）

研究項目①「航空機用超電導推進システム要素技術開発」

①－1 超電導回転機基盤技術開発

①－1－1 超電導巻線技術開発（九州大学（富士電機、鹿児島大学）、産総研）

○界磁コイル巻き線技術開発

②－1 500kW 級超電導モータ検証で実施した 500kW 級モータの仮設計結果に基づき、実施サイズの界磁コイルの試作を行い、製作性、特性等の評価を行った。

<研究成果>

・500kW 級全超電導モータ用の界磁コイルを試作し、所定の通電特性を確認することが出来た。



図 V1-1 試作した界磁コイルモデルの外観

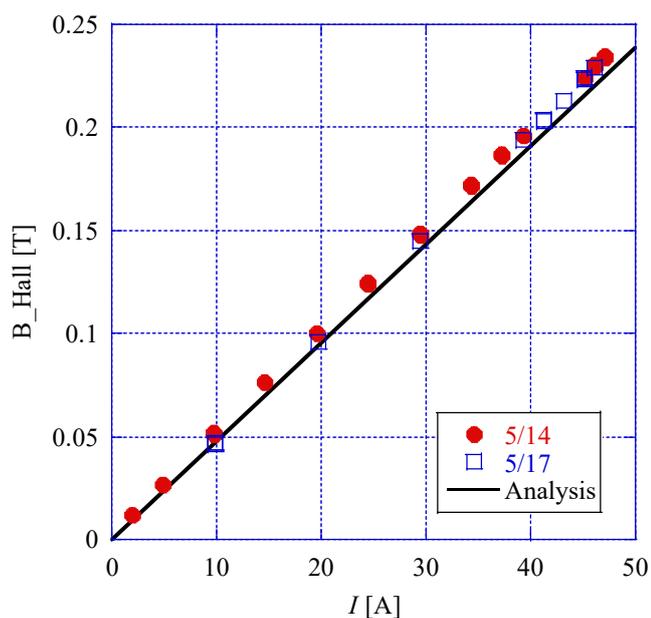


図 V1-2 試作した界磁コイルモデルの通電特性。設計通りの特性を確認。

○電機子コイル巻き線技術開発

②—1 500kW 級超電導モータ検証で実施した 500kW 級モータの仮設計結果に基づき、実施サイズの電機子コイルの試作を行い、製作性等の評価を行った。ここでは、製作性等に重点を置き、スクライブ加工のない線材でのコイルを製作した。

<研究成果>

- ・500kW 級全超電導モータに向けて、電機子コイルを試作し、十分な製作性を確認した。

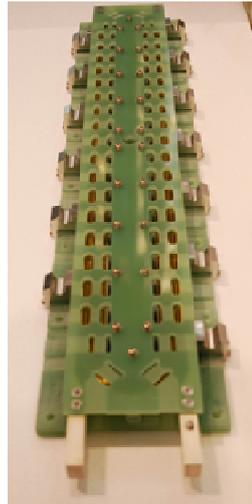


図 V1-3 試作した電機子コイルモデルの外観

④—1—2 軸受構造開発（九州大学（富士電機）、大陽日酸）

軸受構造の健全性を評価するとともに、界磁コイルが運転温度に冷却できることを確認するため、軸受構造開発用冷却モデルを試作し、回転子を固定子容器、断熱材と組み合わせて、冷却試験を実施する。

<研究成果>

- ・界磁コイルを含めた回転子の組み立て完了。



図 V1-4 軸受構造開発用冷却モデル

<意義>

500kW 級超電導モータの課題抽出が可能となる。

①-1-3 界磁コイル給電機構の開発（産総研、九州大学）

①-1-4 回転機ケーシング開発-非金属材料（太陽日酸）

①-1-5 回転機ケーシング開発-チタン合金（神戸製鋼所）

回転機軽量化のために、従来は SUS で作製していたケーシングの代替としてチタン合金を適用した低温筐体の開発にむけ、筐体設計、構成部材の強度評価、成形技術確立、評価試験装置立ち上げを進めた。

<研究成果>

○筐体設計

- ・断熱二重構造ならびに主要部にチタン合金を採用した筐体を設計した。

○構成部材の強度評価

- ・筐体を構成するチタン合金（Ti-15-3-3-3 材、Ti64 材）ならびに支持部材の GFRP 材の 77K 下での評価を実施した。筐体設計時の FEM 解析結果から Ti 合金部にかかる静的応力は 300MPa 以下であり、最大応力振幅を 70MPa 以下とすれば対応可能であることが分かった。GFRP ロッドは使用時の平均応力が引張破断応力の 75%に達する可能性があり、対策の検討が必要であることが分かった。
- ・支持部材については代替材(AFRP 材)を開発し、強度 2.5 倍を確認済。

アルミナFRP製
レーストラック支持体
(破断強度 12kN > 7kN)



図 V1-5 開発したアルミナ FRP 製支持体の外観

○成形技術確立

- ・軽量化のため、筐体外層部に鏡板を採用。2 mm板では成形技術は確立し、本命となる 3 mm板では深さ 133 mmに対して 120 mmまでの加工に成功した（下図）



図 V1-6 開発に成功した約 400mmΦのチタン合金製の鏡板

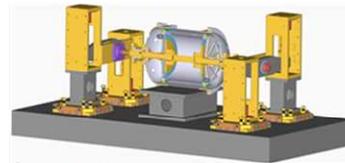
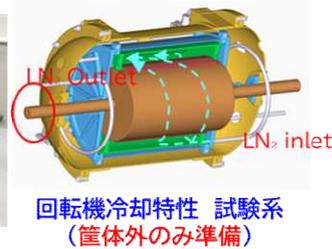
○筐体開発にかかるその他の課題

- ・溶接条件：酸化されやすい条件に対して、バックシール TIG 溶接法を選定し、酸化抑制、強度劣化の回避可能であると考えている。

○評価試験装置の立ち上げ

- ・上記設計案をもとに、回転機筐体構造の妥当性や極低温容器としての要件を確認する目的で、SUS 製の模擬筐体を試作した。専用の負荷試験装置並びに簡易な液体窒素循環装置も試作済みであり、今年負荷試験を予定している。

【負荷試験装置】



模擬筐体の強度確認用 負荷試験装置

図 V1-7 模擬筐体の強度確認用負荷試験装置概念図

<意義>

必要な各要素技術は着実に確立されており、従来技術（SUS）に対して軽量のチタン合金筐体の製作が可能となる。

①-1-6 超電導誘導モータの開発（九州大学）

誘導機の数百 W 級のモデル機を試作し、実証を行った。ここでは、電気推進システム用の超電導誘導機のプロトタイプ機として、出力増大に向けた超電導誘導機の設計及び試作を行った。

<研究成果>

- ・電磁界解析の結果、超電導線材の特性を考慮した上で kW 級の出力が可能であることを確認した。

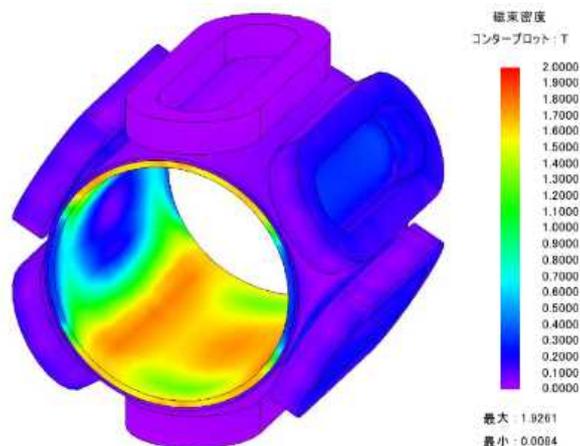


図 V1-8 kW 級超電導誘導機の電磁界解析結果

- ・ 超電導誘導機の冷却試験及び運転試験を実施し、安定して運転できることを確認した。

<意義>

電磁界解析だけでなく実機を用いて原理実証したことにより、超電導誘導機による電気推進システムの構築可能性を示した。

①－1－7 回転機基盤技術開発用線材の提供（SOJ（昭和電線）、産総研）

本事業では、これまで主に、研究項目①「航空機用超電導推進システム要素技術開発」の中で、モデル試作も含めて様々な用途で線材を使用している。本項目では、それらの研究開発に要する線材の提供を行った。

<研究成果>

- ・ 2019年度から現在（2021年8月）まで必要に応じて線材を提供し、モデルコイル試作などに使用した。

<意義>

線材の供給体制を整えることにより、線材を用いるすべての研究開発項目が滞りなく進められるようになった。

①－2 超電導ケーブル基盤技術開発

①－2－1 積層構造ケーブル技術開発（SuperOx Japan（昭和電線）、九州大学（鹿児島大学））

航空機用のケーブルは狭隘な機体内部に配線する関係で細くて大容量、且つ軽量である事が要求される。本項目では、軽量ケーブルの設計及び試作を行い、評価を行った。

<研究成果>

- ・ 軽量構造を有した 20m 試作ケーブルの設計を行った。
- ・ 上記の設計に基づいてケーブルを作製した。（下図）



図 V1-9 積層導体の三相撚線加工

- ・ 上述の超電導ケーブルを SUS コルゲート管に挿入し、端子に接続する部分は撚りを解して各端子に接続した。

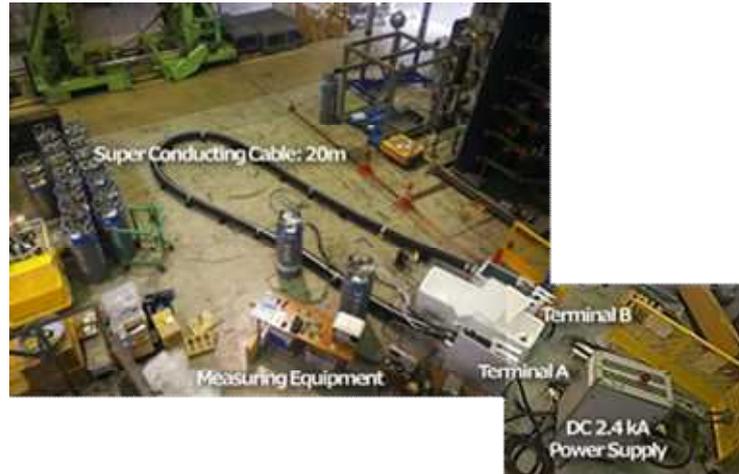


図 V1-10 20m 三相積層型超電導ケーブルの通電試験状況

- ・ 上述の超電導ケーブルの直流通電試験を行った結果、U,V,W の各層とも約 2000A の設計通りの I_c を確認することができた。

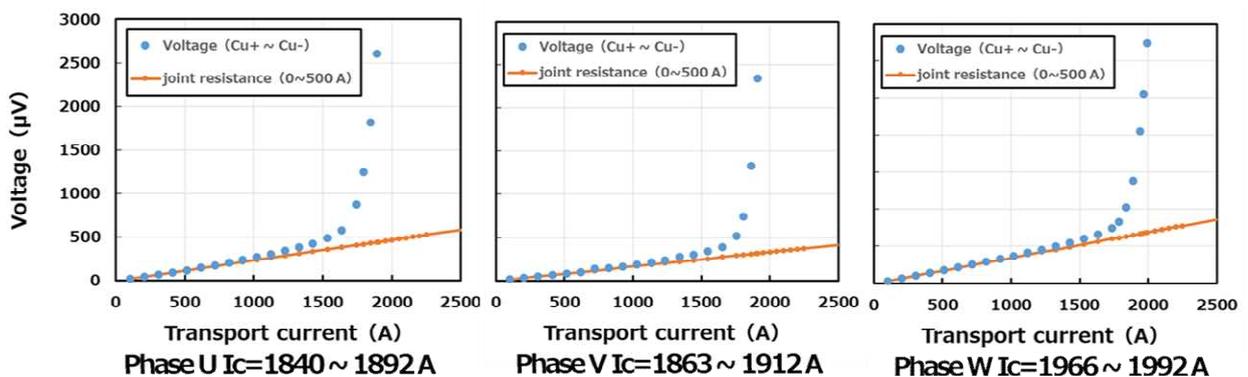


図 V1-11 20m 超電導ケーブルの各相の直流通電試験結果

<意義>

超電導ケーブルの軽量化を意図してケーブルの構造を考案、設計し、20m ケーブルの試作を行った結果、従来の三相同軸ケーブルに比べて大幅に軽量化が可能であることが明らかになった。更に、同ケーブルの直流通電試験を行うことで、同構造のケーブルで所定の I_c を得ることができ、航空機用ケーブルへの適用性を確認することが出来た

- ①-2-2 超電導回転機とケーブルの接続技術開発 (SuperOx Japan (昭和電線)、九州大学)
航空機用のケーブルの両端には、発電機、モータとの接続が必要であり、この要求を満たすべく接続部の開発を行った。

<研究成果>

- ・ 上記要求を満たす接続端子を開発し、①-2-1 軽量構造ケーブル技術開発で作製した 20m ケーブルと合わせて試験を実施した。

①-3 冷却システム基盤技術開発

①-4 超電導線材基盤技術開発

①-4-1 低損失スクライプ線材技術開発 (産総研、SuperOx Japan)

①-4-2 磁場中特性向上技術 (産総研、SuperOx Japan (昭和電線ケーブルシステム)、九州大学 (東海国立大学機構、鹿児島大学、成蹊大学、福岡工業大学))

○パルスレーザー蒸着法による開発 (1)

モータに用いる線材量の軽量化を目指して、IBAD (ion-beam assisted deposition) 配向基板上にパルスレーザー蒸着 (PLD (pulsed laser deposition)) 法により、人工ピン止め点の制御を中心とした超電導層の特性向上技術開発を行った。

<研究成果>

・スクライプによる細線化の際に、長尺線材の高い均一性と歩留りが要求されている。そのため、基板の中間層の膜厚(具体的にはベッド層である $Gd_2Zr_2O_7$ または Al_2O_3 層の膜厚)を厚くし、均一性向上を行った。また、中間層の配向性を改善するためにプロセス技術の改善を行った。その結果、高い均一性と結晶面内・面外配向性を有する長尺基板を作製することが出来た。

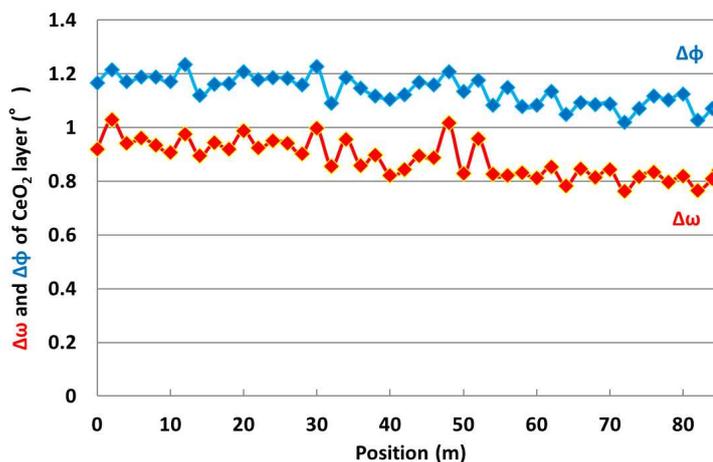


図 V1-12 80 m 長中間層(最表面 CeO_2 層)の長手方向の結晶面内・面外配向度分布

・上記の均一性を向上させた基板を用いて、70m 長 $EuBa_2Cu_3O_x + BaHfO_3(3.5mol\%)$ 線材 (EuBCO + BHO 線材) を作製し、その均一性を評価した。その結果、高い均一性を有する超電導層を作製することが出来た。

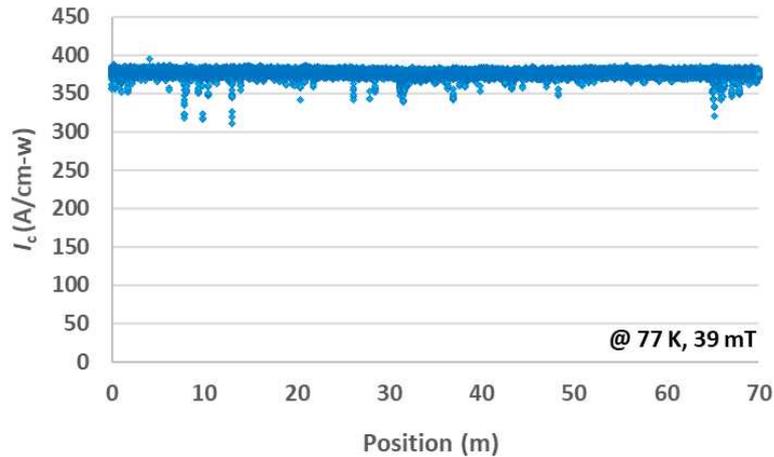


図 V1-13 70m 長 EuBCO + BHO(3.5mol%)線材の I_c 分布

- ・長尺線材の高い均一性と歩留りに加えて、高い磁場中特性も要求されている。そのため、人工ピンである $BaHfO_3$ (BHO)のドーピング量を従来の 3.5mol%から 5mol%に増加することで、磁場中特性の向上を行った。その結果、ドーピング量を増加することで、高い磁場中特性を得ることが出来た。同結果を基に 70K, 2.5T の I_c を推定すると、179~250A/cm となる。

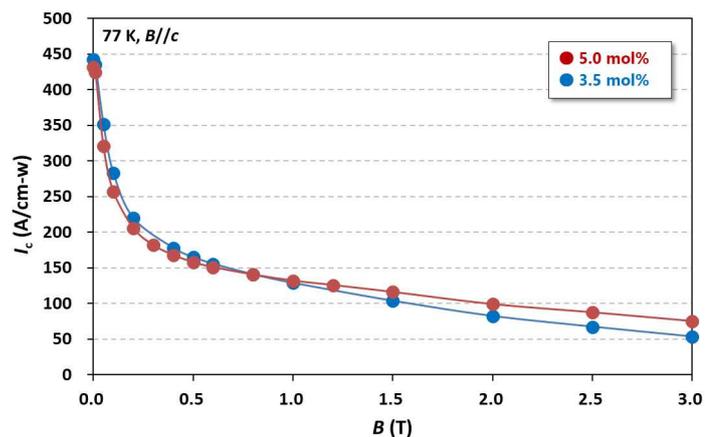


図 V1-14 EuBCO + BHO (3.5mol%)と BHO (5mol%)線材の J_c -B 特性

- ・本PJで使用する長尺線材は FFDS(face-to-face double-stack)構造で用いることが検討されている。そのため、FFDS 構造の際の磁場中特性を評価し、通常(single)線材の磁場中特性と比較した。その結果、FFDS 構造を有する線材の磁場中特性は、通常(single)線材の磁場中特性の約 2 倍になることが実証された。
- ・これにより、5mol%添加の最大 I_c 値 (179~250A/cm@70K, 2.5T) に基づくと、FFDS 化により、357~500A/cm@70K,2.5T が期待できることになり、中間目標を十分に満たす特性となることが分かった。

FFDS Single		
B (T)	I_c (A/cm-w)	
0.00	763.5	442.99
0.01	734.8	435.53
0.05	624.4	352.06
0.10	530.1	282.72
0.20	432.4	219.73
0.30	378.5	-
0.40	346.2	177.82
0.50	322.6	165.09
0.60	304.4	155.63
0.80	276.3	140.80
1.00	251.4	128.77
1.20	234.5	-
1.50	209.3	103.66
2.00	170.4	82.27
2.50	139.4	67.33
3.00	112.1	53.48

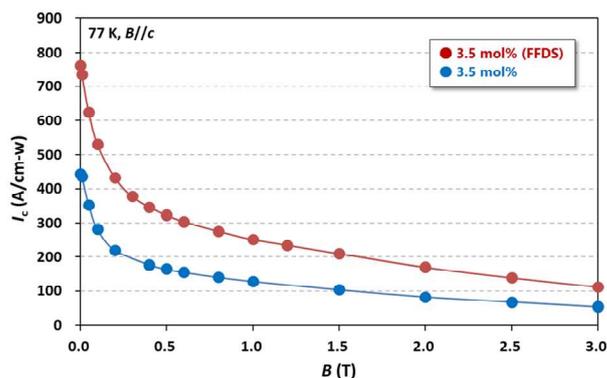


図 V1-15 FFDS 構造と通常(single)線材の EuBCO + BHO (3.5mol%)線材の I_c -B 特性

<意義>

中間層の配向性・均一性を改善することで、より高い I_c 特性の均一性を有する長尺 EuBCO + BHO 線材を作製することが出来るようになる。人工ピンをヘビードープすることで、磁場中特性を向上することが出来るようになる。FFDS 構造の磁場中特性は通常(single)線材と比較して、約 2 倍の磁場中特性を有することが明らかになった。

○パルスレーザー蒸着法による開発 (2)

モータに用いる線材量の軽量化を目指して、IBAD 配向基板上にパルスレーザー蒸着(PLD)法により、人工ピン止め点種類、濃度とともに積層膜の制御を中心とした検討を行った。

<研究成果>

- ・下図には、人工ピン止め点及び積層構造等の検討により得られた代表的な線材の I_c の磁場依存性を示す。本結果は、測定限界の関係から 30 μ m 幅のマイクロブリッジを用いて行った。同図より、試料 A において 70K、2.5T で 194A/cm であった。

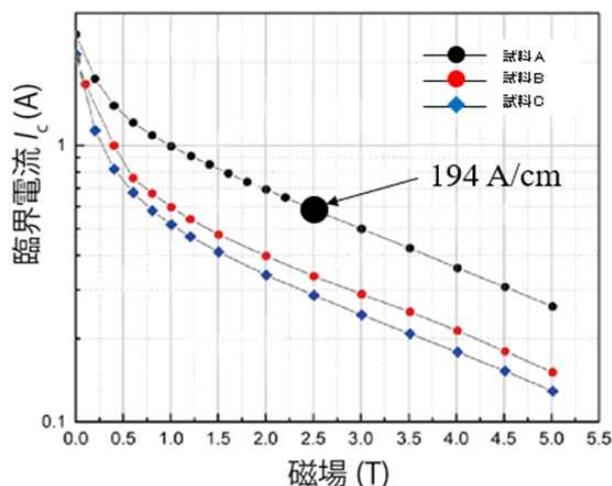


図 V1-16 3 種類の線材の臨界電流 I_c の 70K での磁場依存性

- ・上記の磁場中特性向上線材に関して、安定性向上の観点からプロセスの安定化を図り、 I_c の磁場依存性で高い再現性を確認した。

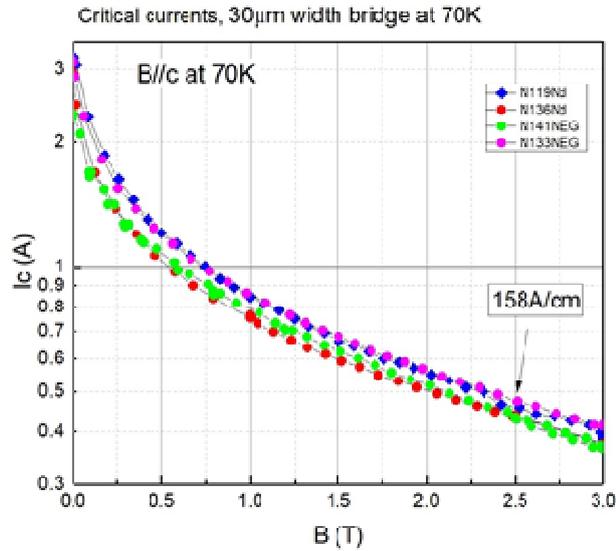


図 V1-17 70K、2.5T で 150A/cm 程度の I_c の再現性

・線材の I_c 特性の向上手法の一つとして 2 枚の線材を貼り合わせる FFDS 線材(face to face double stacked 線材)が有効である。ここでは、これまで作製した線材($I_c \sim 100A$)を用い、実際に FFDS 化し特性を評価した結果、重ね合わせると 2 倍になり、200A を流すことができた。また I_c の分布の標準偏差は、1 本では約 5%であったものが貼り合わせた線材では 3%に低下したことが確認できた。

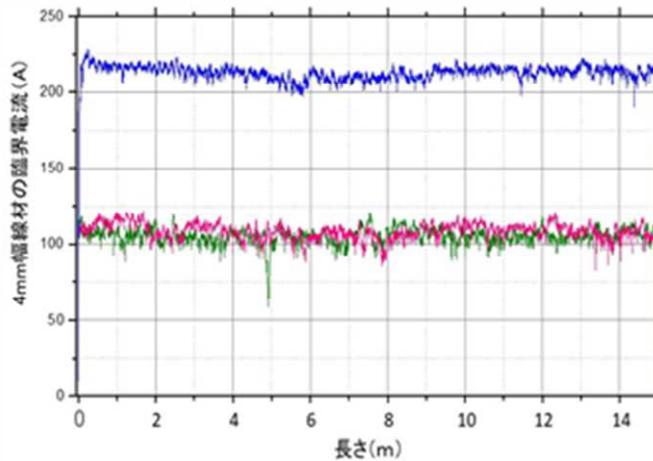


図 V1-18 100A 級線材 (赤、緑) を用いた FFDS 線材 (青) の臨界電流分布

<意義>

$I_c(B)$ 向上成果を基に、更なる $J_c(B)$ の向上を図るとともに、FFDS 化における技術を適用することにより中間目標である 70K、2.5T で 300A/cm を実現する見通しを得たと言える。

また、 $I_c(B)$ 特性の安定化と FFDS 化技術の確立は、線材提供へ大きな貢献が期待できる。

○パルスレーザー蒸着法による開発 (3)

モータに用いる線材量の軽量化を目指して、IBAD 配向基板にパルスレーザー蒸着(PLD)法を用いて、VLS(Vapor-Liquid-Solid Growth)法による高 $I_c(B)$ 化を図った。

<研究成果>

- ・従来のVLS法による知見を活かし、人工ピン止め点としてBHOを選択し、厚膜化による高特性化を図った。結果として、10 μm 厚において下図の通り、非常に高い I_c を確認することが出来た。

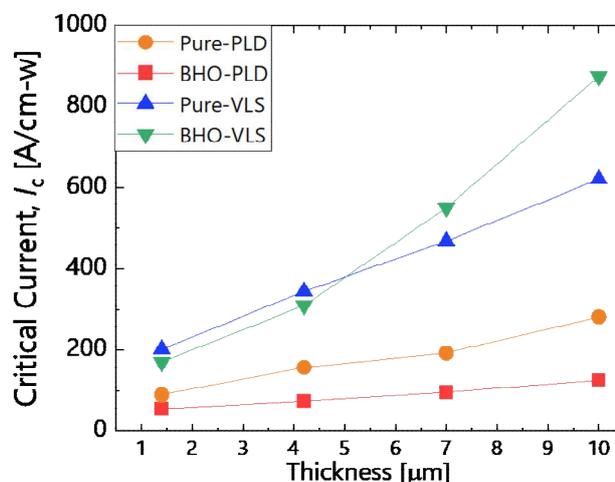


図 V1-19 VLS法で作製したBHO人工ピン止め点入り線材の I_c 特性の膜厚依存性

<意義>

本手法は、液相を積極的に利用する手法にて、厚膜まで高い結晶性を維持することが出来ることを本系でも確認することが出来ている。今後は、上記試料の磁場中特性の評価とともに、長尺化へ展開していくことで高特性線材が期待できる。

○化学液相法による開発

Ultra Thin Once Coating (UTOC)-MOD法により作製した $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$ (REBCO)/ BaHfO_3 (BHO)線材の磁場中 J_c 特性向上のために、中間熱処理条件の最適化を実施した。UTOC-MOD-REBCO/BHO線材の磁場中 I_c 特性向上のために、厚膜化の検討を実施した。

<研究成果>

- ・中間熱処理時間と磁場中 J_c 特性 [70K、2.5T (B//c)] の関係を下図に示す。中間熱処理時間が240minの際に、磁場中 J_c 特性は最大値を示し、 $J_c = 1.83\text{MA}/\text{cm}^2$ が得られた。これより、膜厚が1.7 μm -t以上のUTOC-MOD-REBCO/BHO線材において中間目標 (>300A/cm @70K、2.5T) の達成が期待できる。

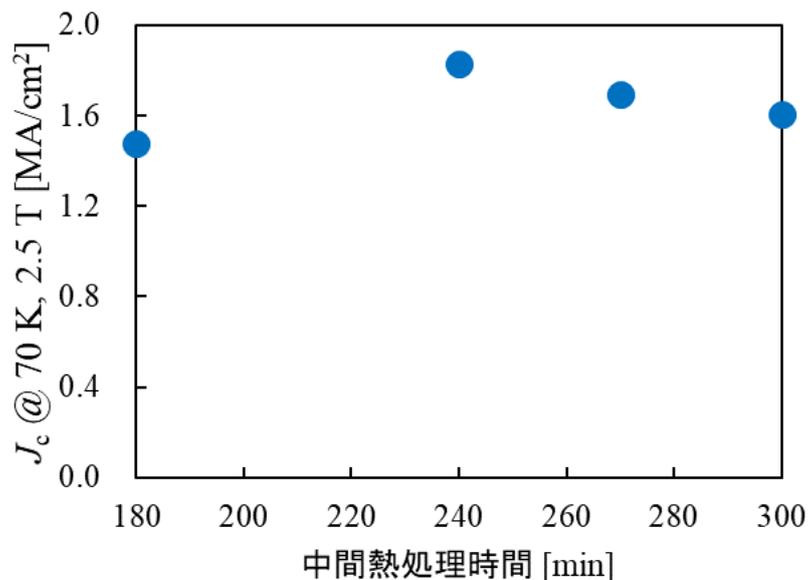


図 V1-20 中間熱処理時間と磁場中 J_c 特性の関係

- ・ UTOC-MOD 法において従来のディップコート法による塗布では、線材幅方向の膜厚不均一性に起因するクラックにより、 $0.6\mu\text{m}$ 以上の厚膜化が困難であった。今回、バーコート法を適用するより $2\mu\text{m}$ までの厚膜化に成功した。このクラック抑制の効果を、Reel-to-Reel 塗布・仮焼成システムによる長尺線材仮焼成膜作製に適用（長さ：10m、移動速度：30m/h、塗布回数：40回、一回塗布膜厚： $40\text{nm}/\text{coat}$ 、総膜厚： $1.6\mu\text{m}$ ）し、連続作製膜において、クラックフリー成膜・仮焼を確認することができた。（下図）。

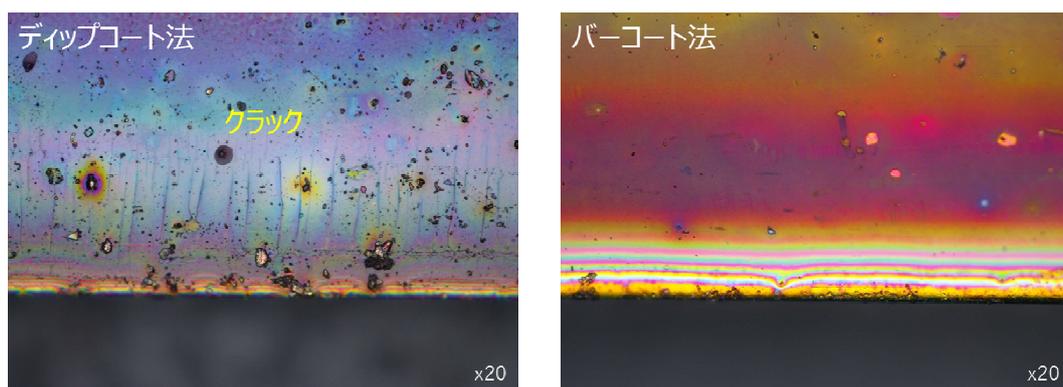


図 V1-21 Reel-to-Reel 塗布・仮焼成システムにより作製した長尺仮焼成膜の端部の光学顕微鏡写真



図 V1-22 Reel-to-Reel 塗布・仮焼成システムにより作製した 10m 級長尺仮焼成膜の外観写真

<意義>

磁場中特性の向上および Reel-to-Reel システムにおける厚膜化を達成したことにより、中間目標値である 300A@70K、2.5T の達成は十分可能となったといえる。

○線材評価技術開発

超電導線材は強磁場を経験することにより臨界電流が低下する。その低下を抑制すべく、超電導線材の加工技術の高度化を行った。

<研究成果>

- ・ 産総研ならびに SuperOx Japan、昭和電線ケーブルシステムが作製した開発線材の磁場中臨界電流特性および面内臨界電流密度分布の評価を行うシステムを構築した。

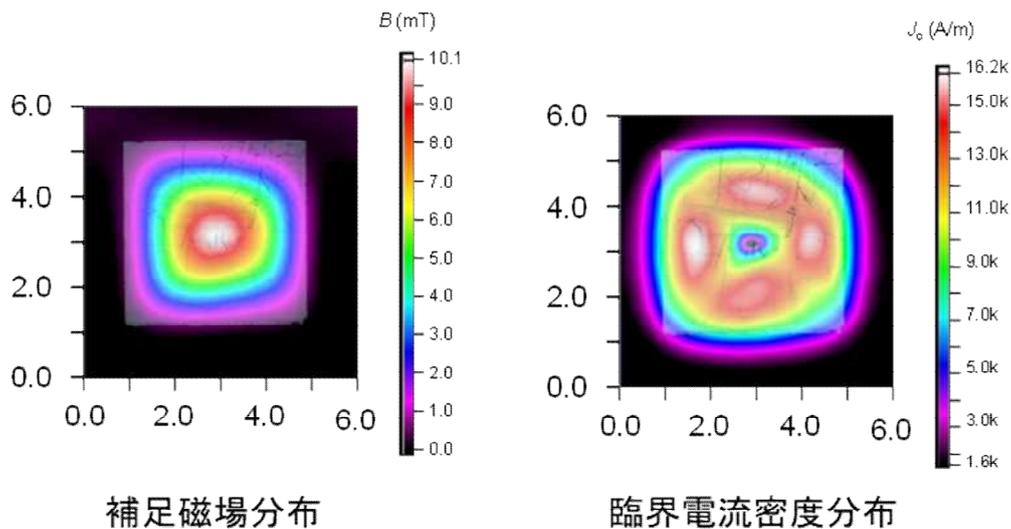


図 V1-23 PLD 法による REBCO 線材の面内臨界電流密度分布評価結果

<意義>

- ・ 得られた開発線材の諸特性を製造プロセスへフィードバックすることにより、加工技術を高度化させて高臨界電流を達成できるようになり、その結果、超電導回転機の性能向上が期待できる。

①-4-3 回転機用軽量シールドの開発（産総研、九州大学）

①-5 低温動作半導体技術開発（九州大学（東海国立大学機構））

液体窒素中においても動作可能な半導体及びこれを用いたデバイスの開発が必要である。ここでは、まず、市販品の GaN-FET の低温における評価および Powdec 製 PSJ(分極超接合)トランジスタの評価、名古屋大学における PSJ トランジスタ試作を行った。

<研究成果>

- ・ 市販品 GaN-FET の低温における電気特性の特性劣化を確認。
- ・ Powdec 製 PSJ トランジスタの評価を行った結果、65K においても 2.3kV の高い耐圧を確認した。

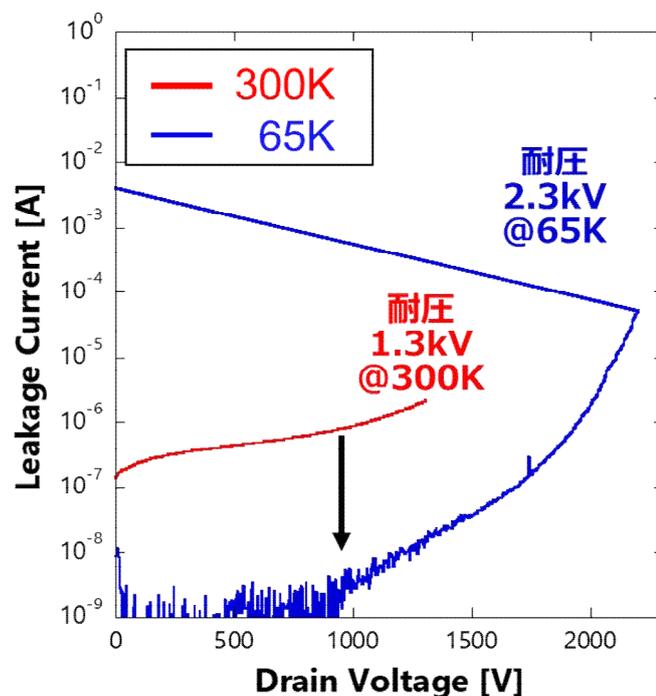


図 V1-24 Powdec 製トランジスタの評価結果

- ・ 名古屋大学試作積層膜において 2 次元キャリアガスの温度依存性が小さいことを確認した上で、PSJ トランジスタを試作し、耐圧 2kV 以上達成。

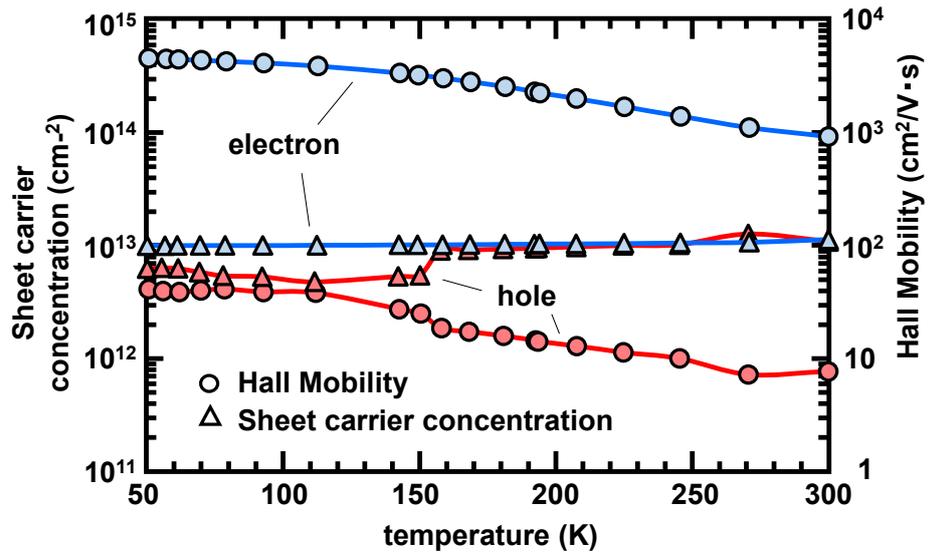


図 V1-25 名大製積層膜による 2 次元キャリアガスの評価結果

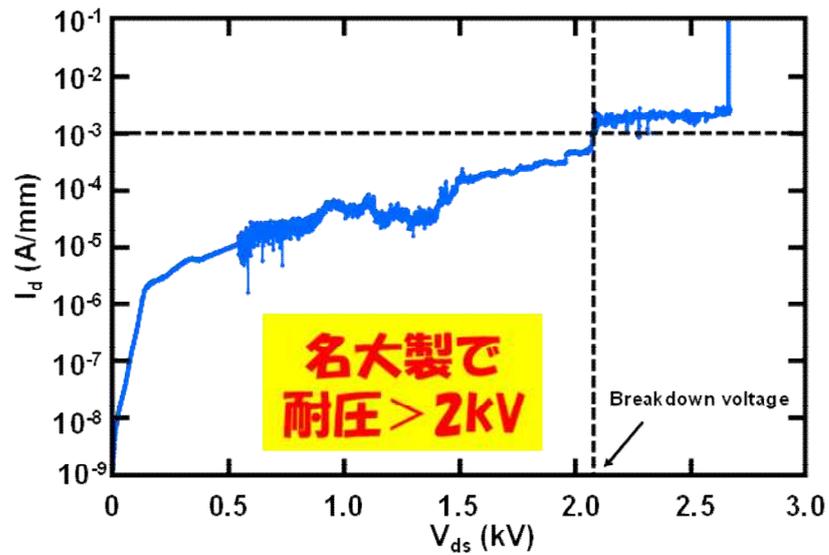


図 V1-26 名大製 PSJ トランジスタの耐圧評価結果

<意義>

耐圧 2kV 以上を達成したことにより、1.2kV 級インバータへ適用可能になった。またリセス構造を採用することによりノーマリーオフ化も期待できる。

研究項目②「航空機用超電導推進システム機器機能検証」

②—1 250-500kW 級超電導モータ検証（九州大学（富士電機、鹿児島大学）、産総研、神戸製鋼所、大陽日酸、SuperOx Japan）

○250-500kW 級全超電導モータの仮詳細設計

250-500kW 級全超電導モータの仮詳細設計を行った。

<研究成果>

- ・ 線材の代表特性等を用いた概念設計を行った後、製造技術面からの知見を反映させ、500kW 級全超電導モータを設計した。

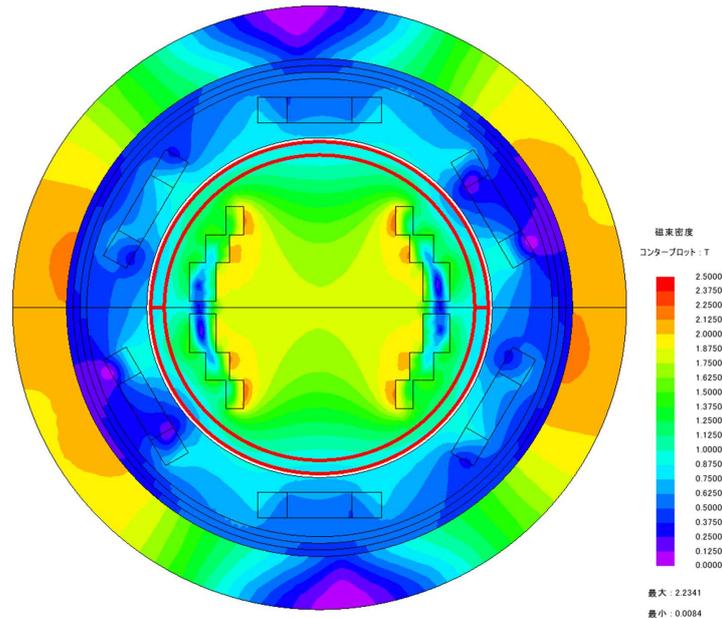


図 V1-27 500kW 級全超電導モータの磁界解析（磁束密度分布図）

- ・ 上記の電気設計の検討結果をもとに、構造面での設計検討を実施した。結果的に、500kW 出力可能である事を確認した。

<意義>

製造上の制約等を考慮したうえでも所望の出力が得られることから、本事業の中間目標である 250-500kW の出力を有する全超電導同期機の成立性を示した。

○500kW 級全超電導モータ採用の要素技術の選定

2019～2020 年度に研究項目①「航空機用超電導推進システム要素技術開発」で開発した各種要素技術において 250-500 kW モータに用いる際に判断が必要な要素技術を対象として、採用の是非を検討し、選定した。具体的には、研究開発推進委員 及び プロジェクト実施機関（共同提案及び再委託企業）から各 1 名で構成される「超電導モータ要素技術選定委員会」を設定し、ここで対象技術の担当機関より進捗状況の説明を行い、内容について議論を行った後に、各委員による採点を経て、プロジェクトリーダー及び研究開発推進委員長による選定案を委員会で承認する形式を取った。

研究項目③「研究開発推進委員会の開催」（九州大学、産総研）

研究開発進捗の管理、開発方針の妥当性を議論し、研究開発を効果的に推進するため、更には研究開発成果を円滑に実用化に繋げることを目的として下表に示す委員を迎え、研究開発推進委員会を開催した。

<実施状況>

- ・本事業を開始から、定期的に 2 回の推進委員会を開催し、第一回では、主に実施計画内容について、第二回は、進捗状況及びそれに基づいた今後の方針について議論を行った。

<意義>

研究進捗内容の議論及び実用化に向けた検討を目的として研究開発推進委員会を設置し、2 回の委員会を開催し、研究方針の検討等に反映させることが出来ている。

2.3 成果の最終目標の達成可能性

最終目標	現状	達成の見通し
研究項目① 航空機用超電導推進システム要素技術開発		
20MW システム開発に向けた超電導回転機における課題と対策の明確化	<p>・各開発技術に関して、モデル試作等により着実に開発は進展しているものの新型コロナ感染拡大の影響により研究開発活動が大幅に制限され、中間目標に関しては、達成時期を数ヶ月後ろ倒しすることにより対応。</p>	<p>新型コロナ感染拡大の影響による遅延を最小限に抑制することで達成を目指す。</p>
20MW システム開発に向けた超電導ケーブル関連技術における課題と対策の明確化		
20MW システム開発に向けた冷却システムにおける課題と対策の明確化		
スクライビング加工により10分割した100m長線材において、温度70K、磁束密度1.2Tの環境下で電流密度300A/cmの電機子用線材を実現し、歩留り60%以上を達成		
100m長線材において、温度70K、磁束密度2.5Tの環境下で電流密度500A/cmの界磁コイル用線材を実現		
20MWシステム用シールド基盤技術を確立		
65Kで動作する半導体素子の開発		
20MWシステム用シールド基盤技術を確立		
65Kで動作する半導体素子の開発		
研究項目② 航空機用超電導推進システム機器機能検証		
250-500kWモータの修正（含再製作）を行い、航空対応条件に対する地上評価を行うことで実機搭載の実現性を評価する。	<p>・研究項目①の検討に基づき250-500kWモータの基本構造を設計を終え、着実に開発は進展しているものの新型コロナ感染拡大の影響により研究開発活動が大幅に制限され、中間目標に関しては、モータ容量の調整とともに達成時期を数ヶ月後ろ倒しすることにより対応</p>	<p>0.5-1MW超電導推進システムの検討を250-500kW超電導モータの製作・評価と並行して行うなどにより、新型コロナ感染拡大の影響による遅延を最小限に抑制することで達成を目指す。</p>
0.5-1MW超電導推進システムを製作し、基礎評価を行うことで、超電導推進システムの成立性を検証する。		

2.4 成果の普及

	2019年度	2020年度	2021年度	計
論文	0	8	0	8
研究発表・講演	37	24	5	66
新聞・雑誌等への掲載	2	0	0	2
展示会への出展	0	1	0	1

2021年8月5日現在

2.5 知的財産権の確保に向けた取組

各基盤技術の開発が進むにつれて個別の知財が生まれつつある。これらは、遅滞なく積極的に権利化を進めるが、加えて本提案の特長である基盤技術の組み合わせで価値が増大する可能性がある内容を能動的に創り出し、関連技術が連携した技術、更には、システムとしての複合技術に関する知財確保を戦略的に進めていくところである。

3. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

3.1 事業化・実用化に向けた戦略

本事業における研究成果は、高効率で大出力密度を特徴とする超電導電気推進システムであり、少なくとも発電機・ケーブル・インバータ・モータ・冷却システムまでのパッケージとしての製品となる。CO₂削減が強く求められている航空機分野へ主に反映されるもので、ビジネスジェット以上の航空機への適用が想定され、特に、常電導システムでは対応不可能ながら、機体数が最も多い100～150人乗りの航空機の推進システムへの適用が最も効果的な市場と考えられる。この推進システムのパッケージは航空機の重要なエンジン機構として、ボーイング、エアバスなどの航空機メーカーが販売先として考えられる。本システムは、エンジン機構の部品ではなく、パッケージの推進システムとして直接の販売を想定している。また、波及的分野としては、空飛ぶ車が考えられるが、この分野では、ベンチャーから大企業、分野も車業界、航空機業界等多岐にわたることが想定されるが、何れにおいても製品メーカーへの直接販売が想定される。

日本において新たな産業として航空機産業を創出することにつながる技術であり、国内航空機産業の隆盛と将来の国産航空機産業の礎となる。これにより、雇用創出も含めた経済効果は大きなものと予想される。具体的には、1通路100～200人乗りの航空機は1機100億円前後であり、エンジンはこのうち20%程度を占めており、二大航空機製造メーカーは現在、数千機のバックオーダーを抱えていることから、世界の数割のマーケットを獲得できれば、数千億円/年の売り上げが見込め、またメンテナンスでも相当の市場規模が期待できる。航空機の市場は、年率5%で成長すると見込まれていることを考えると、更に大きな売り上げが期待できる。

3.2 実用化・事業化に向けた具体的取組

本研究計画において期待される成果は、500kW級モータの試作と基本評価と航空機適用を想定した特殊評価と、1MW級のシステムの試作と基礎評価である。容量的には、小型機～ビジネスジェットが視野に入っているが、本命である100～150人対応の航空機は、20MWの推進パワーが必要であることから少なくともスケールアップが必要である。その際には、航空機全体の構成に適應したシステム開発が必要となる。

また、航空機への適用には、航空機の運転条件及び安全性、信頼性を確保するための評価が必要である。更には、商用には様々な認証も必要であり、これらに10年は必要である。従って、本件の実用化は、2030～2035年頃を想定している。

上記のステップを全てクリアすることで実用化・事業化となるが、本プロジェクト終了後の5年間では、本事業で実現した推進システムの航空機に適應した特殊評価と共に20MW級の推進システムの実現のステップを計画している。

3.3 実用化・事業化の見通し

本事業における特徴は、RE系高温超電導技術を適用した軽量大出力の推進システムである。特に、高特性線材技術、交流損失低減技術、ブレイトンサイクル冷凍機技術など、の基盤技術において、世界最高かつ唯一の技術を複数保有している。これらの強みを活かした、世界唯一である全超電導回転機（発電機、モータ）、超軽量ケーブル、特捜的な熱交換機能を活用した冷却システムなどを全て組み合わせたパッケージは、個別の機器の優位性をより強くし、他では実現できない大出力推進システムの軽量化が可能であり、絶対的な競争力である。

しかしながら、新しい技術である当該技術では、大容量化やシステムの実証だけでなく、航空機で求めら

れる安全性や信頼性を確立するための技術開発が必要であり、これらは、必要な仕様や要求条件を熟知したユーザとの強力な連携などが必要である。以上のことより、本プロジェクトの確実な推進と、その後フォロー開発を推し進めることで実用化・事業化は十分に見通せると考える。

3.4 波及効果

<経済的波及効果>

本提案が成功し、実用化が実現した際には、液体水素や LNG を燃料のみならず冷媒として利用する事で画期的な省エネ・低エミッション・低ノイズ航空機が期待できる。液体水素を燃料として発電するシステムに発展できれば、CO₂ を全く排出しないことになるため、最も大きく見積もれば、現状での航空部門での CO₂ 排出量である約 900 万トン/年 (@2011 年) 1)を削減することが可能となる。世界的にみれば、全 CO₂ 排出量のうち航空部門の排出比率は 2%であるので、約 6.9 億トン/年 2)もの CO₂ の削減に寄与することが可能となる。今後の展開を考えれば、航空業界 (ATAG) が ICAO 会議で宣言した CO₂ 削減目標「2050 年時点で 2005 年時点の半減 (改善無い場合に比べて約 95%削減相当) 3)」を実現しなければならず、そのためには革新的な技術開発が必要とされている。特に、最も需要が大きい細胴機の実現に本事業での開発成果が重要であると考えられることから、成功した暁には、日本において新たな航空機産業を創出する技術であり、国内航空機産業の隆盛と将来の国産航空機産業の礎となると考えられる。これにより、雇用創出も含めた経済効果は大きなものと予想される。

具体的には、1 通路 100~200 人乗りの航空機は 1 機 100 億円前後であり、エンジンはこのうち 20%程度を占めており、二大航空機製造メーカーは現在、数千機のバックオーダーを抱えていることから、世界の数割のマーケットを獲得できれば、数千億円/年の売り上げが見込め、またメンテナンスでも相当の市場規模が期待できる。航空機の市場は、年率 5%で成長すると見込まれていることを考えると、更に大きな売り上げが期待できる。

加えて、本件は比較的大型機を対象としているが、この技術の拡張で小型機への適用が進めば、空飛ぶ車の実現、特に多数人乗りの移動手段としての普及に大きく貢献が見込まれる。物流・人の輸送手段を変革し、ライフスタイルを変えるほどの大きなインパクトを与えるものと考えられる。具体的には、都市部における空き地を利用した小規模空港を整備することによりバスや車に代わる渋滞フリーの手軽で新たな交通手段の構築が期待できる。自動車のマーケットは、世界市場で 200 兆円 4)であることを考えると、導入時のシェアを 1 割と低く見積もっても 20 兆円を越す市場が期待できる。

1) 国土交通省航空局 説明資料 (平成 26 年 2 月 3 日)

<https://www.mlit.go.jp/common/001027544.pdf#search=%27%E8%88%AA%E7%A9%BA%E6%A9%9F+CO2%E6%8E%92%E5%87%BA%E9%87%8F%27>

2) WORKING PAPER DEVELOPED FOR 38th ICAO ASSEMBLY (SEPTEMBER/OCTOBER 2013)

3) ICAO Environmental Report 2016

4) IHS Global Inc. の予測を基に住商アビーム自動車総研が推計

<技術的波及効果>

本事業での成果は、船舶への適用は比較的容易に適用可能である。船舶業界では、航空機業界と同様に CO₂ 削減が迫られており、電動化が進められている。課題は、効率と軽量化であり、本事業で取り組んだ成果は、そのまま転用が可能であると考えられる。

また、大型容量の軽量システムの更なる適用先として、大型洋上風力発電への適用も期待される。特に、洋上風力発電では、浮上体に設置できる風力発電機数が限られることから単機容量を増大させなければならない。ここで、課題となるのは大容量化とともに起こる重量化であり、本事業での軽量大容量超電導機器は、課題解決に大きな武器となりうる。

更に、技術的には、要素技術として超電導回転機技術は、産業用モータ等への適用が期待される。これまで、この分野は、コストが課題であったが、上述分野での実用化、市場化が広がることでの量産によるコストの低減効果によるこの分野での広がりも波及効果として期待できる。

V-2. 軽量蓄電池

1. 研究開発マネジメント

1.1 研究開発目標と根拠

(1) 研究開発目標

航空機の環境負荷低減や経済性、整備性向上のため、2019年以降は推進系も含め更に航空機の電動化が進むと考えられており、特に大型航空機に求められる航続距離も満たす電動ハイブリッド技術による燃費削減効果が試算されている。例えばNASAでは種々の機体形態で電動推進システムの構想が検討され大幅な燃費削減効果を期待できるとされている。しかし、電動推進システムを構成する従来のモータやケーブル、発電機、蓄電池等の要素技術及び電力制御システム技術は、飛行に求められる質量当たりの容量・出力の点において旅客や貨物輸送に供する実用レベルには至っていない。そのため、これら要素の高効率化と軽量化が必要とされている。

上述した研究開発の必要性に鑑み、軽量蓄電池の実機適用レベルのエネルギー密度を実現する要素技術として電極、電解質などの構成要素やCMU(Cell Monitoring Unit)、BMU(Battery Management Unit)などの制御ユニット、モジュール構造、パック構造などの基本仕様開発を行う。



(2) 技術的目標とその設定根拠

① 硫黄を担持する多孔性炭素粒子の研究開発（担当：関西大学）

硫黄を用いた正極において、硫黄が充放電の過程で電解液に溶解することで、使用時の性能低下が大きいという問題点がある。その問題点を解決するための一つの処方として、多孔性の炭素粒子の細孔の中に硫黄を担持して、電解液との接触を低減して、性能低下を抑えることが考えられている。

しかしながら、その処方において、炭素粒子の選択、炭素粒子の細孔体積と細孔径の適正化、細孔への硫黄の担持方法、等の条件の適正化がはかれておらず、所望とする性能が得られていない。

本研究では、多孔性炭素粒子を用いる硫黄正極の要素技術を開発して硫黄正極の性能低下を抑える技術を研究開発するとともに、その量産化のための活物質製造技術と極板製造技術の研究開発を行う。

【2021 年度研究開発終了時の目標】

・500Wh/kg が目指せる硫黄正極として、硫黄の担持質量割合が 60%を超えても安定に充放電できる電極炭素材料と、それに対する硫黄担持方法を開発する。

<設定根拠>

500Wh/kg が目指せる硫黄正極に必要な硫黄担持質量割合である。

② 硫黄の溶解を抑制する電解液の研究開発（担当：関西大学）

硫黄正極の性能低下を抑えるために、多孔性炭素粒子を用いる場合においても、炭素粒子の細孔の開口部分で、硫黄と電解液とが接触するため、硫黄が電解液に溶解することを完全に阻止することは困難であった。

その問題点を解決するための処方として、本研究では、硫黄溶解の防止効果を有する新しい電解液を開発する。このために添加する塩や溶媒の成分、その組み合わせの最適化を検討する。これら材料を用いた試作セルの充放電試験と分析・評価を行い、硫黄電極の充放電効率や容量の安定性確認と、同時に安定化機構を解明する。このように効果確認と機構解明を並行させ、多孔性炭素粒子を用いる硫黄正極の性能低下を抑制する電解液の研究開発を行う。

【2021 年度研究開発終了時の目標】

・500Wh/kg が目指せる硫黄正極に対して、SEI（電極界面被膜）の効果により、容量安定後の充放電 50 サイクルの容量維持率が 90%以上である電解液を開発する。

<設定根拠>

500Wh/kg が目指せる硫黄正極に対して、SEI（電極界面被膜）効果を確認する。

③ 硫黄の大電流での放電性能を向上する要素技術の研究開発（担当：関西大学）

硫黄は絶縁体であり、正極に用いた場合に、大電流での充放電を行うことが難しい。そのため、電解液への溶解を抑制する技術を開発するとともに、大電流での充放電を可能とするために十分な導電性を付与することが望まれる。現時点で、硫黄に導電性を付与する候補技術は乏しいため、従来に無い先進的な要素技術の研究開発を行う必要がある。このコンセプトとして、担持質量の多い硫黄正極に対し、電子伝導経路を付与するとともにイオン伝導経路も良好にキープすることを重視し、研究開発のレベルの高い再委託先の成果を結集して、研究開発を進める。

【2021 年度研究開発終了時の目標】

・500Wh/kg が目指せる硫黄正極として、電極の電子伝導性を改善し、0.5 CA 程度の放電でも電極が大きな劣化を起こさず充放電が可能な技術を見出し、高エネルギー密度化との両立に備える。

<設定根拠>

500Wh/kg が目指せる硫黄正極として、電極の電子伝導性を改善する指標である。

④ 蓄電池システムの実証検証（担当：株式会社 GS ヲアサ）

硫黄正極の要素技術、活物質製造技術、極板製造技術、電解液の技術の成果を基にした電池材料の仕様から、プロトタイプモデルとなる小型セルの設計を行う。複数の小型セルの設計を基に、小型セルの製作に必要な電池材料の数量を算出する。

小型セルの設計を基に、専門メーカーから電池材料を入手し、小型セルの組み立て、製作を行う。

小型セルの評価は、初期容量および出力性能（大電流での放電性能）、および寿命性能について行う。小型セルの評価で得られた結果について、GS コアサにて解析を行い、硫黄正極の問題点や改善点を抽出する。硫黄正極の問題点については、関西大学へフィードバックし、要素技術、活物質製造技術、極板製造技術、電解液の技術の観点から、改善すべきポイントを絞り、その研究開発を行う。新たな問題点の改善策の検討については、関西大学とGS コアサとで逐次連携して行う。

CMU、BMU については、小型セルの評価で得られる電池性能と、電動航空機の軽量蓄電池に要求される性能とを比較し、必要とされる電子制御について設計・開発する。軽量蓄電池として質量エネルギー密度、出力性能、寿命性能の最も適した性能が得られるような制御を検討し、そのアルゴリズムを搭載した CMU、BMU を設計し、仕様書を作成する。

小型セルと、CMU とを組み合わせた蓄電池システムを試作し評価を行う。この評価では、蓄電池システムの初期容量と、大電流での放電性能を確認する。

【2021 年度研究開発終了時の目標】

- ・軽量蓄電池について、500Wh/kg が目指せる400Wh/kg 級の小型セルを試作する。さらに、軽量蓄電池に適合する CMU、BMU を設計し、蓄電池システムを試作する。

- ・上記の蓄電池システムを用いて、地上の実験室環境下で航空機の電動化に適用可能であるかどうかを検証する。

- ・軽量蓄電池の大電流での放電性能については、0.5 CA 程度の放電が可能であることを目標とする。その他の性能値（サイクル特性等）については、機体 OEM 等との協議により、必要性能値を具体化したうえで、それらを達成する。

<設定根拠>

蓄電池システムを試作し、航空機の電動化に適用可能であるかを検証する。

【最終目標（2023 年度末）】

- ・500Wh/kg 級の小型セルの製作

- ・実規模セルを用いた蓄電池システムの実証（TRL6 の達成）

<設定根拠>

蓄電池システムを試作し、航空機の電動化に適用可能であるかを実証する。

1.2 研究開発のスケジュール

以下に本研究開発の2019年度から2023年度までの全体計画を示す。

中間目標までには小型セルを使った蓄電池システムの試作、評価を行う。最終目標では、中間目標で達成した質量エネルギー密度の軽量蓄電池を用いて蓄電池システムを試作し、航空機の電動化への実用化検討を実施する。

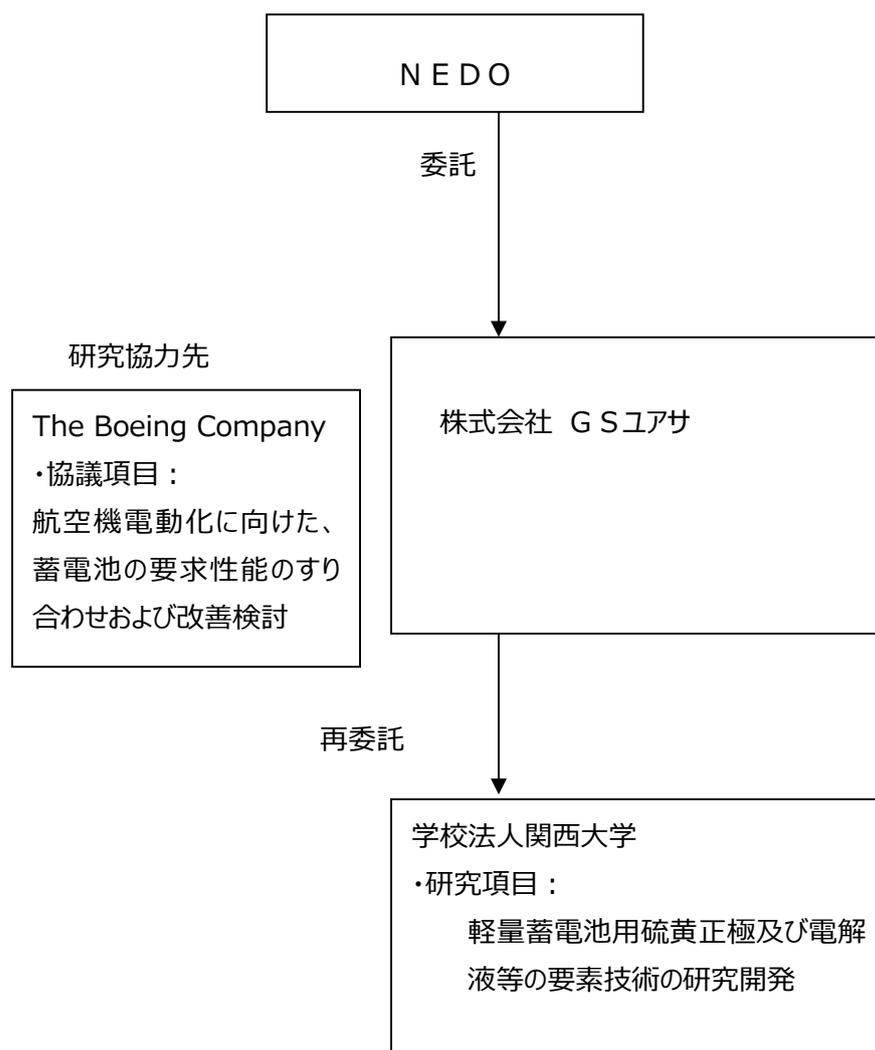
事業項目	2019年度				2020年度				2021年度			
	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期
①硫黄を担持する多孔性炭素粒子の研究開発 ・500Wh/kgを目指す硫黄正極基本仕様 終了時目標:硫黄担持質量割合60%超												
②硫黄の溶解を抑制する電解液の研究開発 ・硫黄正極用長寿命電解液基本仕様 終了時目標:容量維持率90%以上@50サイクル												
③硫黄の大電流での放電性能を向上する要素技術の研究開発 ・500Wh/kgを目指す硫黄正極高出力化基本仕様 終了時目標:0.5CA程度の放電												
④蓄電池システムの実証検証 終了時目標:500Wh/kgが目標せる 400Wh/kg級小型セルの製作												
④-1. 小型セルの設計 ・小型セル基本設計												
④-2. 小型セルの製作 ・小型セルの試作												
④-3. 小型セルの評価 ・小型セルの評価												
④-4. CMUの開発 ・CMU基本設計												
④-5. 蓄電池システムの製作 ・蓄電池システムの試作												
④-6. 蓄電池システムの評価 ・蓄電池システムの評価												

1.3 プロジェクト費用

(単位：百万円)

項目	2019年度	2020年度	2021年度 (予定)	合計
①硫黄を担持する多孔性炭素粒子の研究開発	124	145	53	322
②硫黄の溶解を抑制する電解液の研究開発	83	98	52	233
③硫黄の大電流での放電性能を向上する要素技術の研究開発	57	124	52	233
④蓄電池システムの実証検証	31	62	157	250
合計	295	429	314	1038

1.4 研究開発の実施体制



1.5 研究開発の運営管理（個別管理）

NEDO 主体でおこなわれる事業推進委員会、サイトビジット以外として、研究協力先の The Boeing Company との技術ミーティングおよびレビューミーティングを実施している。これらのミーティングにおいて、同社と、「航空機の電動化に必要な要求性能」について、綿密な協議を継続して実施する。

<開催実施>

・技術ミーティング

2019 年度 11 回開催

2020 年度 15 回開催

2021 年度 2 回開催（7 月時点）

・レビューミーティング

2020 年 9 月、2021 年 4 月 開催

1.6 知的財産権等に関する戦略

本研究開発における知的財産は、製品（軽量蓄電池）より侵害発見が可能である発明に絞って出願する戦略とし、侵害発見が困難な技術ノウハウについては秘匿する。

1.7 知的財産管理

本プロジェクトにおける成果の公表および知的財産権の取り扱いを適切に行うため、株式会社 GS ユアサ 研究開発センター 戦略企画室にて知財運営管理を行うことにした。また、「知財及びデータの取り扱いに関する合意書」により

・秘密保持

・本プロジェクトの実施により得られた知的財産権の帰属

・共有するフォアグラウンド IP の取扱い

・知的財産権の実施許諾

等を規定した。

1.8 動向・情勢の把握と対応

本研究開発項目は、①機体 OEM メーカーとの意見交換、②展示会、学会等への参加、③技術書籍・雑誌、プレスリリース、市場レポート等の公開情報による競合他社の情報調査、④文献、特許調査、等により世界の動向と情勢を把握している。尚、現時点で、研究開発開始当時との大きな差異はない。

本取り組みの中から、最も重要な情勢・対応の一つを下表に示す。

情勢	対応
昨年未から加速された 2050 年度カーボンニュートラルへの対応として、特に自動車業界において電動化への対応が活発におこなわれている。航空業界にでもこの流れは無視できず、今後、ハイブリッドも含めた電動化が要求されていくと考えられている。	質量エネルギー密度 500 Wh/kg を有するリチウム硫黄電池を開発して、電動航空機の電源としての利用を検討する。

2. 研究開発成果

2.1 研究開発項目毎の目標と達成状況

-項目：硫黄を担持する多孔性粒子の研究開発

中間目標	成果	達成度	課題と解決方針
500Wh/kg が目指せる硫黄正極として、硫黄の担持質量割合が60%を超えても安定に充放電できる電極炭素材料と、それに対する硫黄担持方法を開発する。	硫黄担持質量割合 60 wt.%以上の硫黄正極で 1000 mAh g ⁻¹ から 1300-1600 mAh g ⁻¹ の可逆容量の増大に成功した。エネルギー密度は可逆容量と作動電圧の積であるため、上述の可逆容量の飛躍的な向上により、500Wh/kgのエネルギー密度実現に大きく近づいた。	◎	課題 ：さらなる硫黄担持質量割合と可逆容量の増大が必要である。 解決方針 ：イオン伝導体を兼ね備えた硫黄正極を開発し、さらなる高エネルギー密度化を目指す。

-項目：硫黄の溶解を抑制する電解液の研究開発

中間目標	成果	達成度	課題と解決方針
500Wh/kg が目指せる硫黄正極に対して、SEI（電極界面被膜）の効果により、容量安定後の充放電 50 サイクルの容量維持率が 90%以上である電解液を開発する。	硫黄正極小型セル評価において、良好な SEI を形成できる VC を溶媒とした電解液を適用することで、容量安定後の充放電 50 サイクルの容量維持率は 93%であることを確認した。また電解液の粘度が可逆容量に依存することを見出し、高エネルギー密度化への電解液のコンセプトを得た。さらに電解液の軽量化を目的とし密度の小さな電解液も開発済である。	◎	課題 ：電解液の密度は、エネルギー密度増大に向けた重要な因子の一つである。しかしながら現状、電解液の密度は大きい。 解決方針 ：電解液を構成するリチウム塩や溶媒を、低密度化することでエネルギー密度増大を目指す。

-項目：硫黄の大電流での放電性能を向上する要素技術の研究開発

中間目標	成果	達成度	課題と解決方針
500Wh/kg が目指せる硫黄正極として、電極の電子伝導性を改善し、0.5 CA 程度の放電でも電極が大きな劣化を起こさず充放電が可能な技術を見出し、高エネルギー密度化との両立に備える。	新バインダーを適用した硫黄正極小型セル評価において、0.1CA 相当の放電に対する2CA 相当の放電(目標値の4倍の大電流による放電)における容量保持率は100%であり、電極に大きな劣化を起こさず充放電が可能であることを確認した。さらに、新バインダーを適用した高目付(4.21 mg cm ⁻²)の20 サイクル充放電後の容量維持率が旧バインダーを適用したものに比べ、約10%高いことを明らかにした。	◎	課題 ：高エネルギー密度化と高出力化の両立のために、硫黄正極の目付を向上させることが課題である。 解決方針 ：目付向上に寄与するパラメータ(電極ペーストの粘弾性等)を明らかにし、それらを最適化することで、高目付の正極を開発する。

-項目：蓄電池システムの実証検証

中間目標	成果	達成度	課題と解決方針
軽量蓄電池について、500Wh/kg が目指せる400Wh/kg 級の小型セルのプロトタイプモデルを試作する。さらに、軽量蓄電池に適合するCMU、BMU のプロトタイプモデルを設計し、蓄電池システムを試作する。	・試作した5 Ah 級-積層セルのエネルギー密度は350 Wh/kg であることを実証した。(2021年8月時点) ・軽量蓄電池に適合する電池モジュール構造(軽量化、均一圧迫機構)およびCMU, BMU のプロトタイプ設計を完了し、蓄電池システムを試作中。	△ (2022年3月達成見込)	課題 ：エネルギー密度向上 解決方針 ：詳細設計改善にて検討を更に進める。
上記の蓄電池システムを用いて、地上の実験室環境下で航空機の電動化に適用可能であるかどうかを検証する。	・試作した蓄電システムについて、地上の実験室環境下で航空機の電動化に適用可能であるかどうかを検証予定。	△ (2022年3月達成見込)	課題 ：検証指標の確定 解決方針 ：地上の実験室環境下で航空機の電動化に適用可能かを判断する指標(安全性などの影響を考慮)の把握。

<p>軽量蓄電池の大電流での放電性能については、0.5 CA 程度の放電が可能であることを目標とする。その他の性能値（サイクル特性等）については、機体 OEM 等との協議により、必要性能値を具体化したうえで、それらを達成する。</p>	<p>・試作した 5 Ah 級-積層セルでの大電流での放電性能については、1.0 CA 程度の放電が可能であった。 ・その他の性能値については、機体 OEM メーカーである Boeing との協議を継続中。</p>	<p>△ (2022 年 3 月 達成見込)</p>	<p>課題：大電流放電性能の検証 解決方針：地上の実験室にて、蓄電システムの大電流放電性能を確認する。</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------

◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

※達成度◎の項目において、「課題と解決方法」の欄に記述があるが、これは、年度末、また最終目標に向けて、更に成果を高めて行くという事で記載。

2.2 成果と意義（成果の詳細）

-項目：硫黄を担持する多孔性粒子の研究開発

<研究成果>

本研究で作製した硫黄炭素多孔性粒子のSTEM-EELSによる評価より、粒子全体にわたり、リチウムおよび元素 X が観察された。(図 V2-1) また X 線光電池分光法より元素 X ベースの Li⁺イオン伝導体であることを特定し、Li⁺イオン伝導体を備えた硫黄炭素多孔性粒子を得ることに成功した。この硫黄多孔性粒子を用いたリチウム硫黄電池において、硫黄担持質量割合 65 wt%で 1400~1600 mAh g⁻¹の可逆容量を示し、これまで報告された固相反応を示す硫黄正極の中で最も大きい値を示した。(図 V2-2)

<意義>

リチウム硫黄電池の質量エネルギー密度を向上できる硫黄正極のコンセプトを得た。

-項目：硫黄の溶解を抑制する電解液の研究開発

<研究成果>

① 容量維持率の向上

リチウム硫黄電池の容量維持率向上を目的として、種々の電解液を検討した結果、図 3 に示すように、1M LiTFSI / FEC:VC = 1:1 + 10 wt.%HFE の電解液を適用したリチウム硫黄電池が約 93%の容量維持率を示すことが明らかになった。(図 V2-3)

② エネルギー密度の向上

リチウム硫黄電池の高エネルギー密度化を目的として、種々の電解液を検討し、容量向上要因を調査した結果、電解液粘度と比容量の間に明確な正の相関が確認でき、電解液粘度が 20 mPa s⁻¹ 以上では、比容量は一定となった。(図 V2-4) 電解液粘度が正極被膜形成過程に寄与しており、20 mPa s⁻¹ 以下の電解液において粘度が高いほど低抵抗である良好な被膜が形成されと考えられる。さらなる高エネルギー密度化のために、軽量の電解液の開発を目的として、これまで使用してきた LiTFSI よりも低密度なリチウム塩を検討した。低密度なリチウムを含む新規軽量電解液は、LiTFSI を用いた電解液と同等の充放電容量を示し、エネルギー密度の向上が期待できる。(図 V2-5)

<意義>

リチウム硫黄電池の長寿命化および高エネルギー密度化に向けた電解液の開発に成功した。

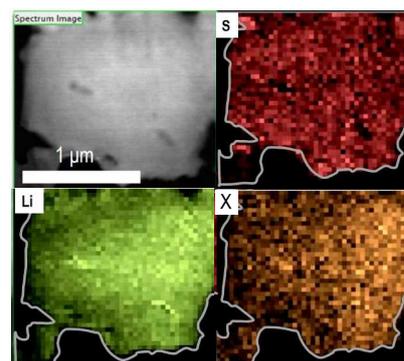


図 V2-1 充電後の硫黄炭素多孔性粒子断面の硫黄(S)、リチウム(Li)、Xの分布

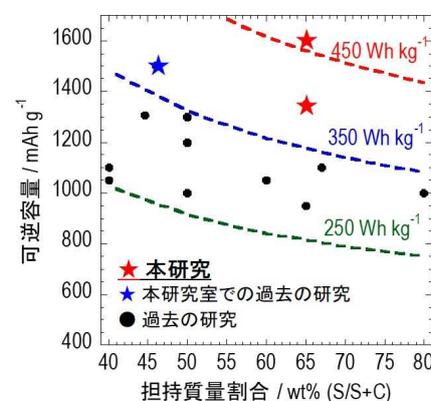


図 V2-2 本研究および過去に報告された硫黄の担持質量と可逆容量の関係

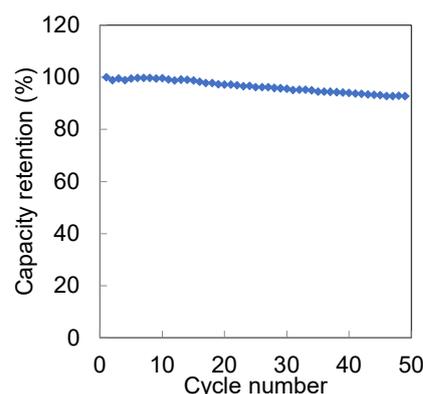


図 V2-3 1M LiTFSI / FEC:VC = 1:1 + 10 wt.%HFE の電解液を適用したリチウム硫黄電池の充放電サイクル数と容量維持率の関係

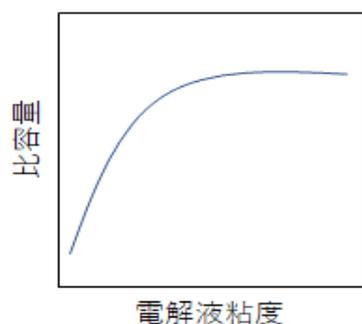


図 V2-4 比容量と電解液粘度の関係

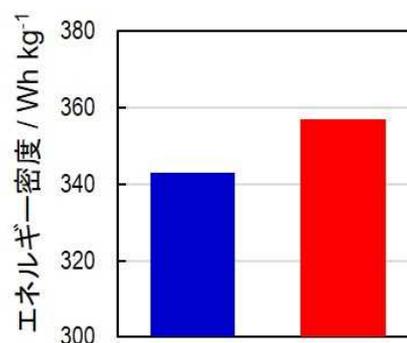


図 V2-5 電解液の密度と電池のエネルギー密度の関係

-項目：硫黄の大電流での放電性能を向上する要素技術の研究開発

<研究成果>

高エネルギー密度と高出力密度を両立する多孔性炭素—硫黄複合体正極開発を目的として、新バインダーの開発をおこなった。その詳細を以下に記載する

① 多孔性炭素—硫黄複合体正極の高出力化

多孔性炭素—硫黄複合体正極の高出力化を目的として、新バインダーを適用した正極を作製した。その電極の導電性を明らかにするために、AFM を用いて電流マッピングをおこなった(図 V2-6)。図より、新バインダーを適用した電極において、従来のバインダー(旧バインダー)を適用した電極には見られない高導電性のネットワークが形成されていることが明らかになった。

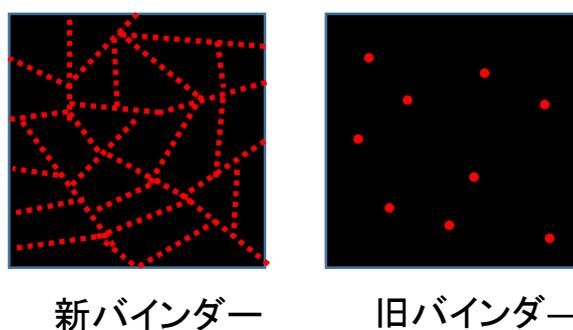


図 V2-6 新バインダーおよび旧バインダーを適用した多孔性炭素—硫黄複合正極の電流

さらに、新バインダーを適用した多孔性炭素—硫黄複合体正極は、旧バインダーを適用したものに比べ高い出力特性を示し、2 CA 相当の高率放電において、0.1 CA 相当の低率放電と同等の比容量を示すことが明らかになった。さらに、10 CA 相当の極めて高い電流密度においても 0.1 CA での比容量の約 91%の容量を維持することが明らかになった(図 V2-7)。

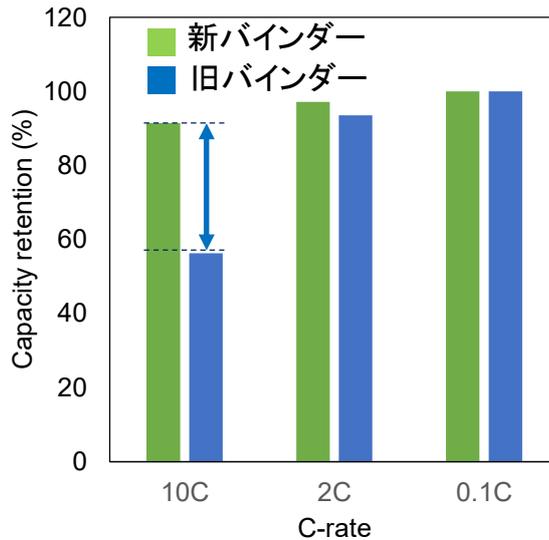


図 V2-7 新バインダーおよび旧バインダーを適用した多孔性炭素—硫黄正極の出

② 多孔性炭素—硫黄複合体正極の高目付化

多孔性炭素—硫黄複合体正極の高エネルギー密度化を目的として、新バインダーおよび旧バインダーを用いて、それぞれ 4.21 mg cm^{-2} の高目付(従来の正極目付は 1.85 mg cm^{-2} である)正極開発をおこなった。いずれの正極も、 0.1CA の低率放電において、従来の正極と同等の比容量を示したが、新バインダーを適用した正極の 20 サイクル充放電後の容量維持率が、SBR を適用したものに比べ約 10%高いことが明らかになった(図 V2-8)。

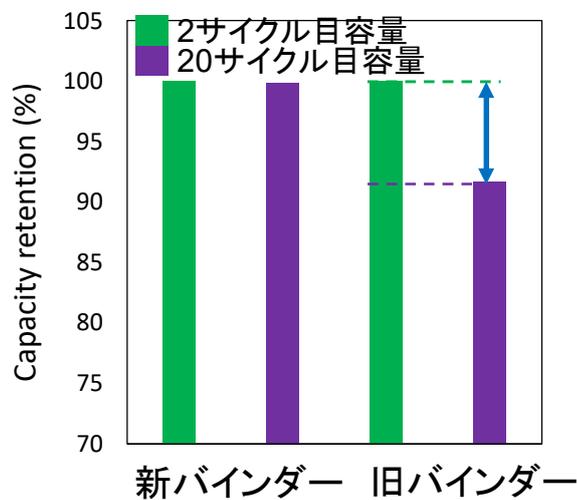


図 V2-8 新バインダーおよび旧バインダーを適用した厚塗り多孔性炭素—硫黄複合体電極 (4.21 mg cm^{-2}) の容量維持率

以上の結果から、新バインダーを適用した多孔性炭素—硫黄正極が高い出力特性を示し、高目付の正極において、高い容量維持率を示すことが明らかになった。その特徴から、新バインダーが高エネルギー密度と高出力密度を両立するリチウム硫黄電池に有望な要素技術であると言える。

<意義>

リチウム硫黄電池の大電流放電性能を向上できる高導電性硫黄正極のバインダーとして新バインダーを見出した。

-項目：蓄電池システムの実証検証

＜研究成果＞

① 軽量蓄電池の開発

正極活物質に硫黄-炭素複合体を適用したリチウム硫黄電池技術を開発するとともに、電動航空機に求められる安全性および高エネルギー密度を実現した蓄電池システムを構築することを目的とする。本検討の中間目標として、400 Wh/kg 級のエネルギー密度を有する小型セルの仕様策定、試作/評価を実施した。関西大学および自社の要素技術の開発成果を展開したプロトタイプモデル（実証セル）を試作・評価し、性能評価をおこなった。研究成果は、次のとおりである。

・ 5 Ah 級-リチウム硫黄電池（積層セル）の製造技術の確立

実証セル（5 Ah 級-積層セル）の製造工程を図 V2-11 に示す。活物質製造工程については、請負外注先（関西熱化学株式会社および株式会社 MC エバテック）に炭素材料の製造および複合化を外注するとともに、数十 kg レベルの製造技術を確立した。また、混練・塗布工程～セル完成までの、製造工程については、自社事業部門の従来リチウムイオン電池の製造設備（図 V2-12：電極用大型コーターおよびプレス機）での製造を検討した。硫黄正極の電極技術として、塗布質量増大・制御技術、多孔度制御技術を確立した。また、電池の形状として、積層型-パウチ外装体を選択するとともに、5Ah 級-積層セルの製造技術を確立した。以上より、本電池の製造工程には、既存リチウムイオン電池の製造装置の転用が可能であることを実証するとともに、5A 級-リチウム硫黄電池の製造技術を確立した。

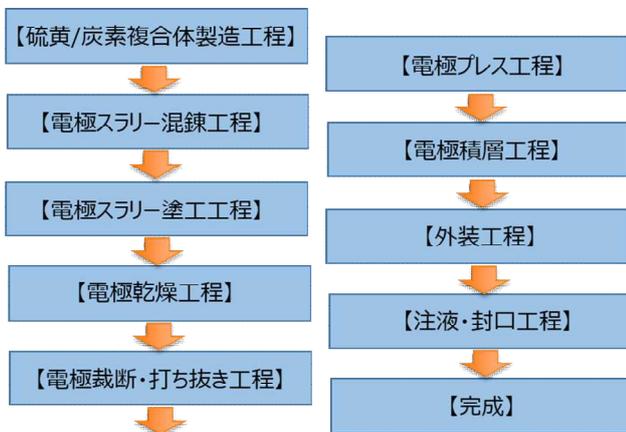


図 V2-11 5 Ah 級-積層セルの製造工程



図 V2-12 大型コーターおよびプレス機

・ 5 Ah 級-積層セルの初期電池特性

図 V2-13 および表 1 に、上記の製造工程を経て製作した 5 Ah 級-積層セルの外観写真および基本仕様を示す。今後、タブ・リードの位置および外装体サイズを最適化することによって、セルのエネルギー密度の増大が期待できる。図 V2-14 に、本セルの初期電池特性を示す。電池設計通りの電池特性が得られることを確認した。



図 V2-13 5 Ah 級-積層セルの外観写真

表 V2-1 5 Ah 級-積層セルの基本仕様

電池容量	5 Ah (5-7 Ah)
サイズ (エレメント部)	55 x 90 mm
積層数	10積層
負極活物質	Li金属
正極活物質	硫黄-炭素複合体
電解液	LiTFSI-VC系

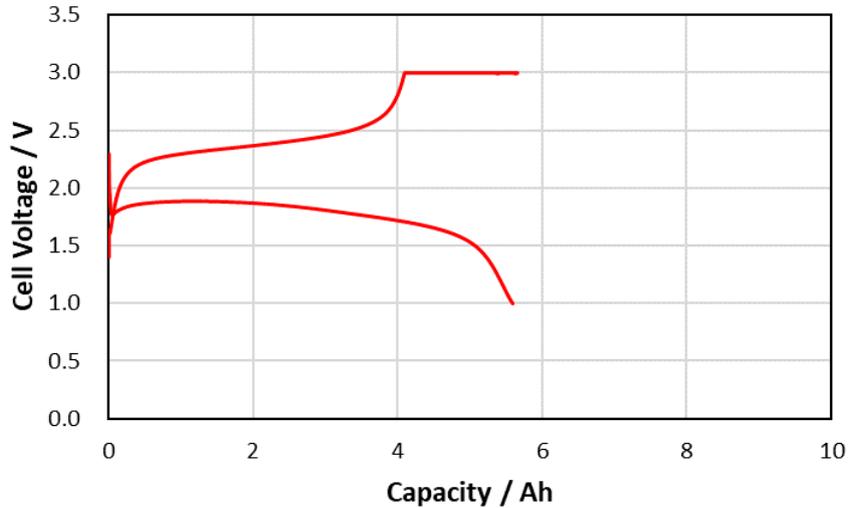


図 V2-14 5 Ah 級-積層セルの充放電特

・5 Ah 級-積層セルのエネルギー密度

図 V2-15 に、5 Ah 級-積層セルの質量エネルギー密度の実績および改善ロードマップを示す。2020 年度実績は、200 Wh/kg であり、2021 年度の現状のエネルギー密度（2021 年 8 月実績）は、350 Wh/kg であることを実証した。今後、正極技術、電解液技術（関西大学新規要素技術を含む）の改善、および電池構造部材の最適化によって、中間目標である 400 Wh/kg 以上の質量エネルギー密度の発現が期待できる。

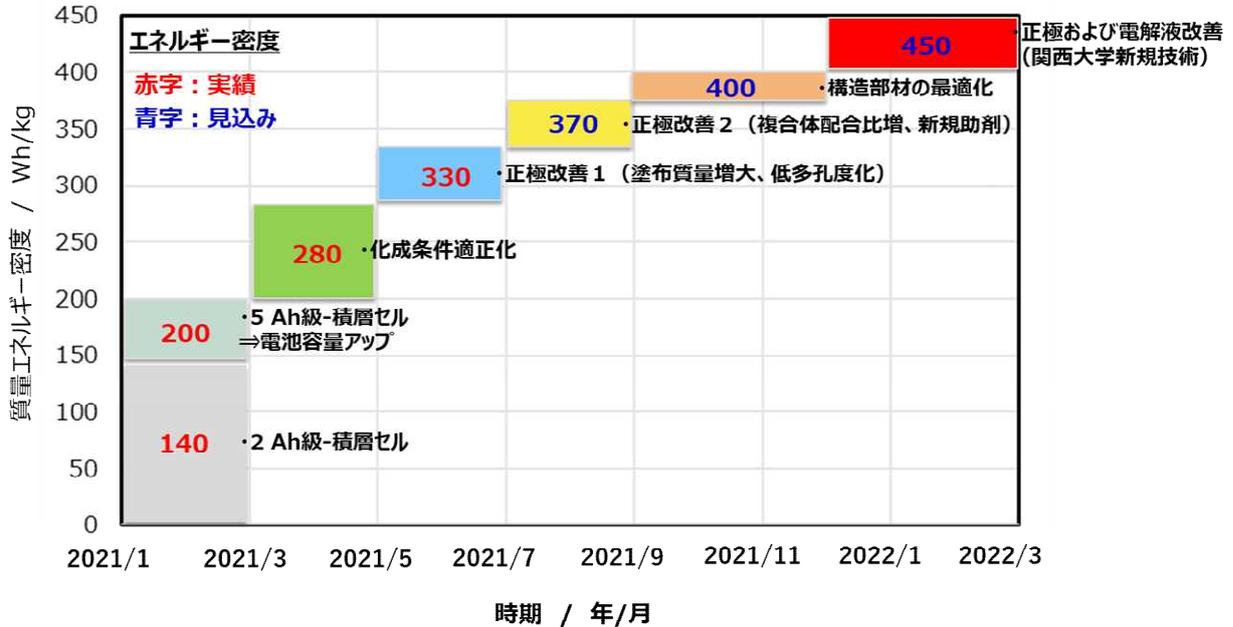


図 V2-15 5 Ah 級-積層セルの質量エネルギー密度の実績と改善ロードマップ

・5 Ah 級-積層セルの放電レート性能

図 V2-16 に、5 Ah 級-積層セルの放電レート性能（充電条件：0.2 CA）を示す。放電レート 1.0 CA まで、放電容量の大きな低下は無く、大電流での放電が可能であることがわかった。また、中間目標である、0.5 CA 以上の放電が可能であることを実証した。

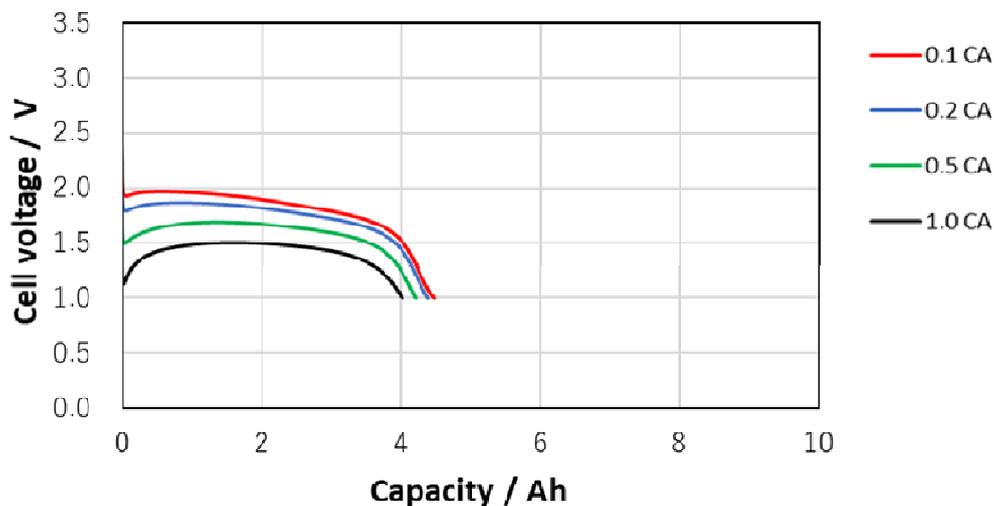


図 V2-16 5 Ah 級-積層セルの放電レート

・5 Ah 級-積層セルの安全性評価

図 V2-17 および 18 に、5 Ah 級-積層セルの過充電試験（SOC100%から 300%まで過充電）および内部短絡（釘差し）試験（SOC100%における、釘差し：貫通 3 回）の結果をそれぞれ示す。過充電状態および内部短絡発生状態のいずれの場合においても、電池温度の過度な上昇は認められず、電池熱暴走は発生しないことがわかった。以上より、5 Ah 級-リチウム硫黄電池において、一定レベルの電池安全性を確認した。今後、電動航空機の安全性基準を考慮した詳細試験を実施予定である。

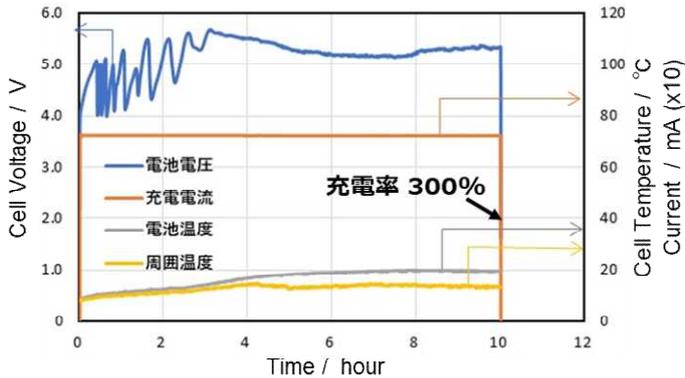


図 V2-17 過充電試験における電池電圧、充電電流および温度の変化

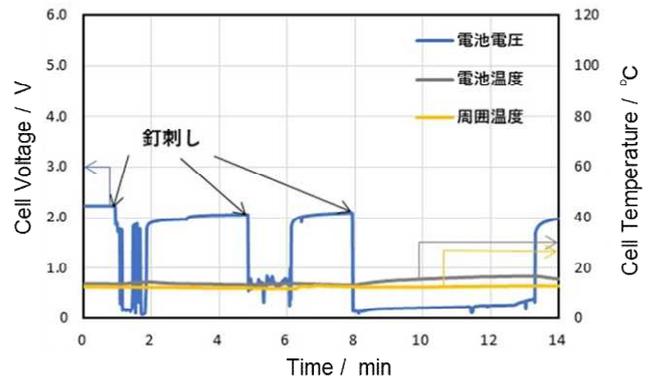


図 V2-18 釘差し試験における電池電圧および温度の変化

② 蓄電池システムの検討

電動航空機の蓄電池システムの実用化のためには、軽量蓄電池のみならず、蓄電池システム全体としての高エネルギー密度化が求められる。そのために、電池モジュール構造および電池システムの小型・軽量化を検討した。電池モジュール構造として、「軽量かつセル均一圧迫機構」をコンセプトとする、構造適正化を実施した。また、CMU（Cell monitoring unit）、BMU（Battery management unit）の軽量化のために、「制御基盤の小型化」、「FPC（Flexible printed circuit）の適用」、および「軽量センサの適用」を検討した。

・CMU-BMUの開発

図 V2-19 および 20 に、蓄電池システムの概要図およびモジュール構成を示す。また、表 V2-2 および 3 に、CMU および BMU の仕様を示す。軽量・小型化の取り組みとして、①基板小型化（リチウム硫黄電池の電圧範囲に適した高機能 I C を搭載し、回路の集積度を高くすることで基板を小型化・軽量化）、②FPC の適用（ケーブルよりも軽量の FPC をセル間接続部（電線およびバスバー）に採用）、および③軽量センサの適用、を実施した。図 V2-21 に、FPC およびセル間接続イメージを示す。

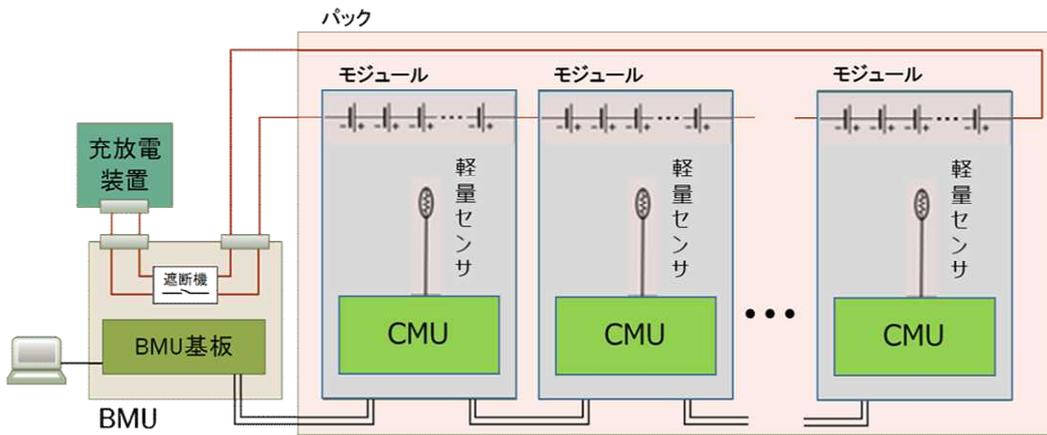


図 V2-19 蓄電池システムの概要図

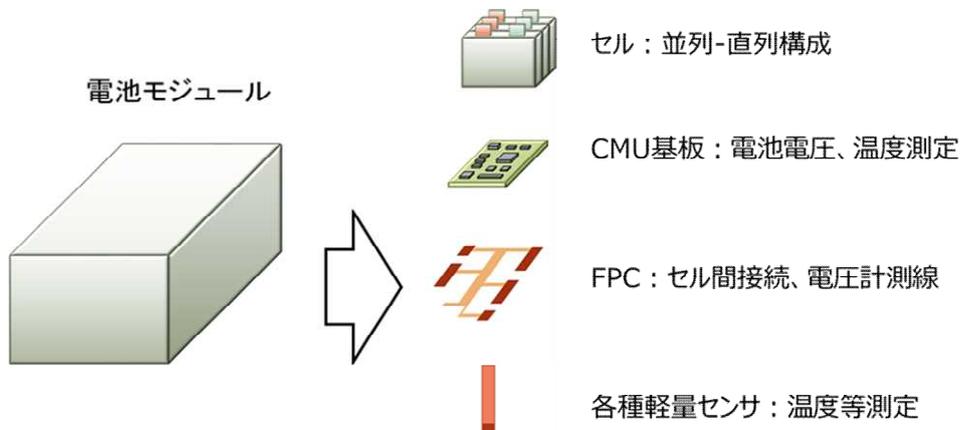


図 V2-20 電池モジュール構成

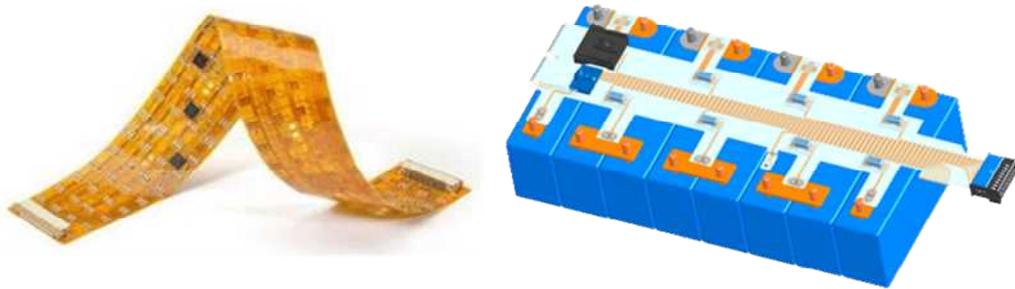


図 V2-21 FPC およびセル間接続イメージ

表 V2-2 CMU の仕様

項目	仕様	備考
MCU	非搭載	MCU を介さず IC 同士で通信可能な高機能 IC を実装し、基板を極力小型・軽量化
セル構成	並列-直列	電池電圧計測 IC で 14 点の電池電圧を計測 モジュール内のセル数は最大 56 セル
計測対象	電圧、温度等	セル電圧、セル温度等を測定
給電方法	電池から給電	電池から CMU に給電するため、消費電流を極力低減

表 V2-3 BMU の仕様

項目	仕様	備考
給電方法	外部電源	AC アダプタから BMU に電源を供給
安全機能	過放電、過充電、セル高温、 過電流による遮断器操作	
外部通信	外部 PC と USB 通信 充放電装置とシリアル通信	PC で電池電圧、温度を表示できるアプリを開発 充放電装置用ソフトウェアの搭載
SOC 演算	電流積算、満充電/放電時 SOC リセット	

・モジュール構造の開発

モジュール構造のコンセプトは、①軽量化（新規構造を提案し、軽量化）および②セル均一圧迫機構（体積変化の大きい「リチウム硫黄電池」に対して、常時均一かつ一定の圧力付与が可能な機構）である。セルエンドプレート構造の開発には、「トポロジー最適化解析（CAE 技術）」を用いた設計を実施した。質量を10%低減しながら、セル膨張の応力が生じた際のエンドプレート変形率を1/30にとどめることができる構造を見出した。均一圧迫機構として、セルエンドプレート部に対して、「ガススプリング」、「ガス圧制御ベローズ」、および「拘束バンド」などの適用を検討した。図V2-22に、セル圧迫機構の一例（トラクションガススプリングを適用した電池モジュール構造）を示す。また、モジュール構造における電池への適性圧迫条件の予備検討として、前述の5Ah級-積層セルを用いた、「2並列-5直列構成（10セル）」の電池モジュールを試作し、ロードセルを用いて充放電サイクルにおける荷重変化を測定した。図V2-23に、充放電サイクル過程における荷重変化を示す。充放電サイクルにともない、荷重変化、すなわち電池の体積変化の挙動を確認した。今後、電池性能におよぼす圧力適正值を見極めるとともに、電池モジュール構造の最適化に展開する。

以上のCMU、BMU、およびモジュール構造の検討結果を展開した蓄電池システムのプロトタイプ試作（10月予定）を実施するとともに、実験室環境下にて、航空機の電動化に適用可能であるかの実証試験を実施する予定である。また、その際は、機体OEMメーカーとの協議を継続することによって、必要性能値の具体化とともに、性能評価・実証を実施する。

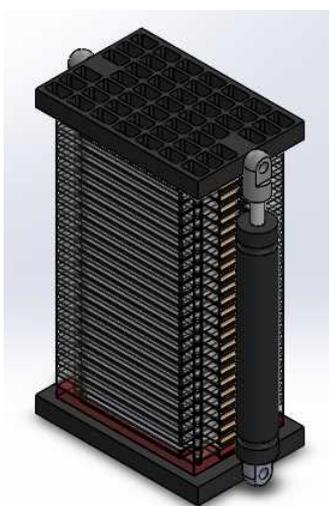


図 V2-22 セル圧迫機構の一例
(トラクションガススプリング)

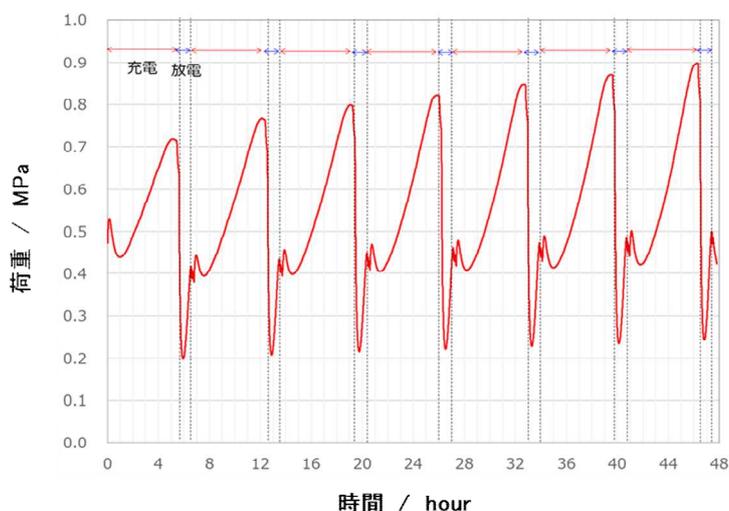


図 V2-23 充放電過程における荷重
変化（セル膨張収縮に依存）

<意義>

本成果の適用によって、電動航空機用先進システムのプロトタイプモデルの製作に資する、「安全性と高エネルギー密度化の両立」を満たした蓄電池システムの確立が期待できる。

2.3 成果の最終目標の達成可能性

-項目：硫黄を担持する多孔性粒子の研究開発

最終目標	現状	達成見通し
500Wh/kg が目指せる硫黄正極として硫黄担持質量割合 60%超、15mAh/cm ² 以上となる電極処方	硫黄担持質量割合が 60%超の硫黄正極小型セルを試作・評価し、新たな課題を抽出した。	・リチウム硫黄電池のエネルギー密度を高めるには、硫黄正極の比容量と目付量とともに向上する必要がある。硫黄正極のイオンおよび電子伝導パスの改善を実施して達成する見込み。

-項目：硫黄の溶解を抑制する電解液の研究開発

最終目標	現状	達成見通し
500Wh/kg が目指せる硫黄正極（15mAh/cm ² 以上）に対して、SEI（電極界面被膜）の効果により、容量安定後の充放電 50 サイクルの容量維持率が 90%以上である電解液を開発する。	硫黄正極小型セル評価において、充放電 50 サイクル後の容量維持率は 93%であることを確認したが、新たな課題を抽出した。	・リチウム硫黄電池のエネルギー密度を高めつつ容量維持率の目標を達成するには、負極への影響も考慮する必要がある。SEI の効果を維持しつつ電解液の分解を抑制して達成する見込み。

-項目：硫黄の大電流での放電性能を向上する要素技術の研究開発

最終目標	現状	達成見通し
500Wh/kg が目指せる硫黄正極（15mAh/cm ² 以上）として、電極の電子伝導性を改善し、2 CA 程度の放電でも電極が大きな劣化を起こさず充放電が可能な技術を見出し、高エネルギー密度化との両立に備える。	新規 PAA 系バインダーを適用した硫黄正極小型セル評価において、0.1 CA 相当の放電に対する 2 CA 相当の放電における容量保持率は 100%であることを確認した。	・リチウム硫黄電池のエネルギー密度を高めつつ、さらなる大電流放電を目指し、硫黄正極のイオンおよび電子伝導パスの改善を実施して達成する見込み。

-項目：蓄電池システムの実証検証

最終目標	現状	達成見通し
<ul style="list-style-type: none"> ・軽量蓄電池について、500 Wh/kg 級の小型セルを試作する。 ・軽量蓄電池に適合する CMU, BMU の仕様を決定し、蓄電池システムを試作する。 ・上記蓄電池システムを用いて、航空機の電動化に適用可能であることを実証する。 ・大電流放電性能として、2 CA 程度の放電が可能である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・400Wh/kg 級の 5 Ah 級-積層セルを試作・評価中。 ・CMU, BMU および蓄電池システムの設計検討中。 	<ul style="list-style-type: none"> ・小型セルについて、500 Wh/kg 級が見通せるいくつかの要素技術については成果が得られているが、それらを組み合わせた電池設計では、まだ改善すべき要素技術がいくつかあり、それら要素技術を如何に改善できるかが目標達成のカギとなる。 ・蓄電池システムについては、機体 OEM メーカーと要求仕様を協議しながら、2021 年度までに得られた小型セルの成果をベースに設計を進め、必要性能を具体化したうえで達成する。

2.4 成果の普及

	2019 年度	2020 年度	2021 年度	計
論文	0	0	0	0
研究発表・講演	0	3	0	3
新聞・雑誌等への掲載	2	4	0	6
展示会への出展	1	0	0	1

2021 年 7 月 30 日現在

2.5 知的財産権の確保に向けた取組

リチウム硫黄電池の競合他社の特許出願状況について、定期的に調査を行い、競合他社の技術レベルを確認するとともに、当該研究活動の内容が競合他社の特許に抵触するリスクを回避している。また、硫黄正極、電解液については、関連する先行特許について逐次調査を行い、当該研究活動成果である請求項の新規性、進歩性を確認している。

再委託先である関西大学との定期的な進捗打ち合わせにて、当該研究活動の内容の中に知的財産権の確保が必要となるような成果はないか相互確認をおこなっている。

知的財産権の出願・取得実績。

	2019 年度	2020 年度	2021 年度	計
国内出願	0	0	1	1
外国出願	0	0	0	0

2021 年 7 月 30 日現在

3. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

3.1 事業化・実用化に向けた戦略

本プロジェクトで培った高エネルギー密度かつ高出力な蓄電池システムの研究成果を元に、以下のアプリケーションの軽量蓄電池としての実用可能なレベルを目指す予定である。

- ・ドローン・エアタクシー・HAPS など軽量蓄電池が渴望されている事業
- ・電動航空機事業
- ・高エネルギー密度かつ高出力な特長を生かしたその他特殊用途

3.2 実用化・事業化に向けた具体的取組

2023 年度までに、技術成熟度（TRL）Level 6 達成

2035 年度頃に電動航空機に搭載を目標

米国 Boeing 社との研究協力

軽量蓄電池として性能面で競争力のある開発目標設定のための最新技術動向のリサーチ

3.3 実用化・事業化の見通し

軽量蓄電池として、500Wh/kg 級の質量エネルギー密度が実現すると、エンジンのハイブリッド化によって旅客機の離陸上昇時のアシスト電力として適用できる可能性が出てくる。本プロジェクトにて、500 Wh/kg 級が見通せるいくつかの要素技術は成果が得られているが、まだ改善すべき課題は多くある。この改善すべき課題について、再委託先である関西大学と連携して研究開発を進めている。そのため、関西大学にて得られた成果は、すぐさま GS コアサにて実用化・事業化に向けた検討を開始することができる。

なお、GS コアサにおいて軽量蓄電池の研究開発は、第 5 次中期経営計画で重要研究案件と位置づけており、最終年度以降も実用化・事業化に向けた取り組みを行う予定である。

3.4 波及効果

<経済的波及効果>

- ・小型のエアタクシーのような用途から、ハイブリッド・タイプの大型航空機や、将来的には全電動航空機の実用化も検討されている。
- ・日本国内では、電動車両の優れた技術があり、モータ、電力変換器、蓄電池・等の分野において、世界的なレベルの技術を有している。その中で、蓄電池に関しては、日本の技術は、世界のトップレベルにあり、新規の活物質や固体電解質・等の研究開発が進んでいる。航空機の電動化に必要な軽量蓄電池の開発も進んでおり、近い将来の実用化が期待されている。
- ・航空機産業の発展が遅れた背景の中で、航空機の電動化へ取り組む際には、上記のような蓄電池の技術レベルが高い事で、優れた性能の電動航空機の開発が可能になり、世界に先駆けて、空を飛ぶ用途全般における優位性が確保できると考えられる。
- ・航空機産業の中の特に電動航空機において、日本の強みが出せる新しい産業の創生が可能になる

<技術的波及効果>

- ・他産業への波及効果等

蓄電池の軽量化が渴望されている、宇宙産業、ロボット産業（アシスト・介護）などへ展開することで波及効果が見込まれる。

V-3. 電動ハイブリッドシステム

1. 研究開発マネジメント

1.1 研究開発目標と根拠

(1) 研究開発目標

次世代電動推進システムを将来航空機に導入する際の課題としての小型・軽量化に着目し、導入段階で課題となる高空での高電圧利用を可能とする材料、構造を明らかにするとともに、発展性のある優れた制御性能を有し軽量・コンパクトな革新的原動機としてのハイブリッド推進システムを実現する電力制御および熱・エアマネジメントを実用化する必要がある。そこで本研究は、電動ハイブリッド航空機の実現に向けた電力制御及び熱・エアマネジメントシステムを中核とした次世代電動推進システムについて、その実用化で解決すべき課題に取り組み、これらのシステムを地上実証する。

本研究における研究対象概念図を図 V3-1～3 にそれぞれ示す。また、本事業におけるシステム地上実証概要を図 V3-4 に示す。

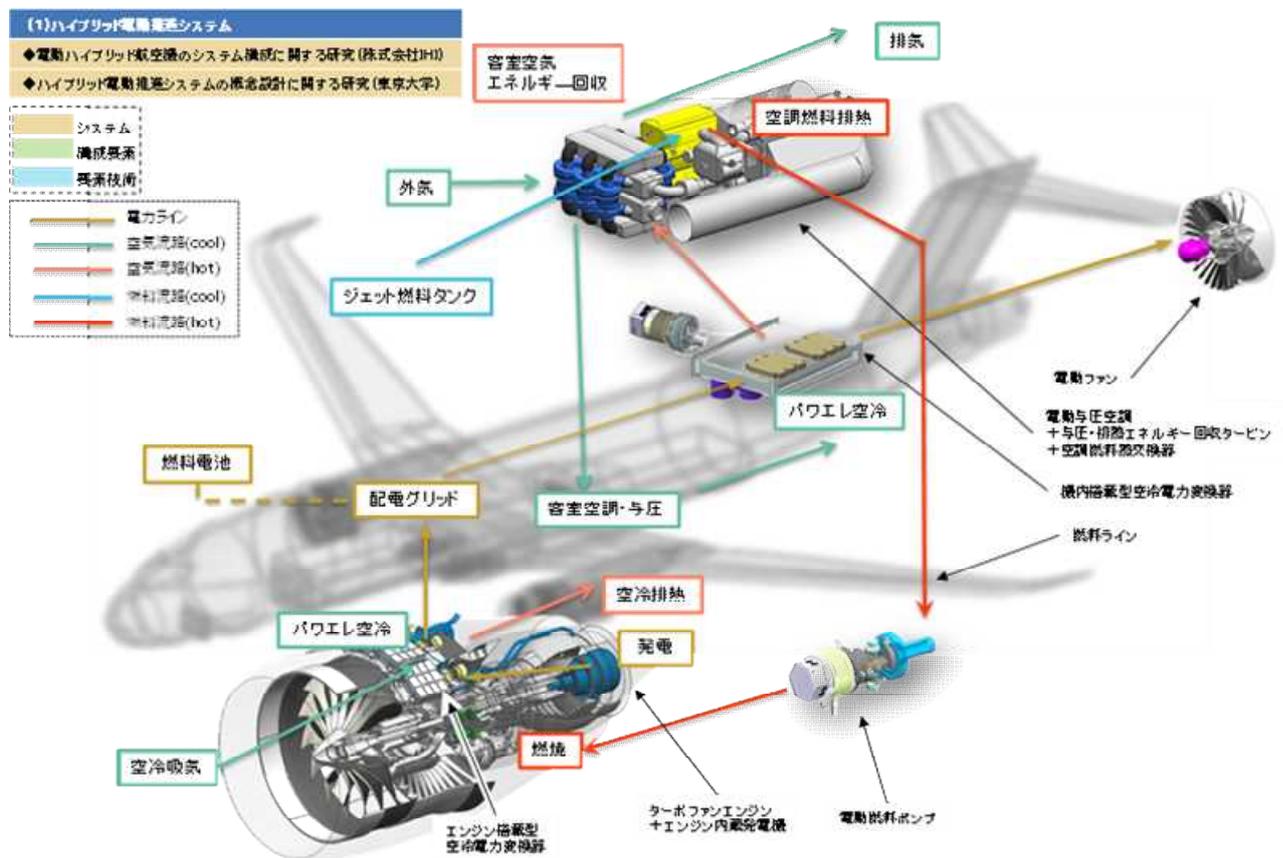
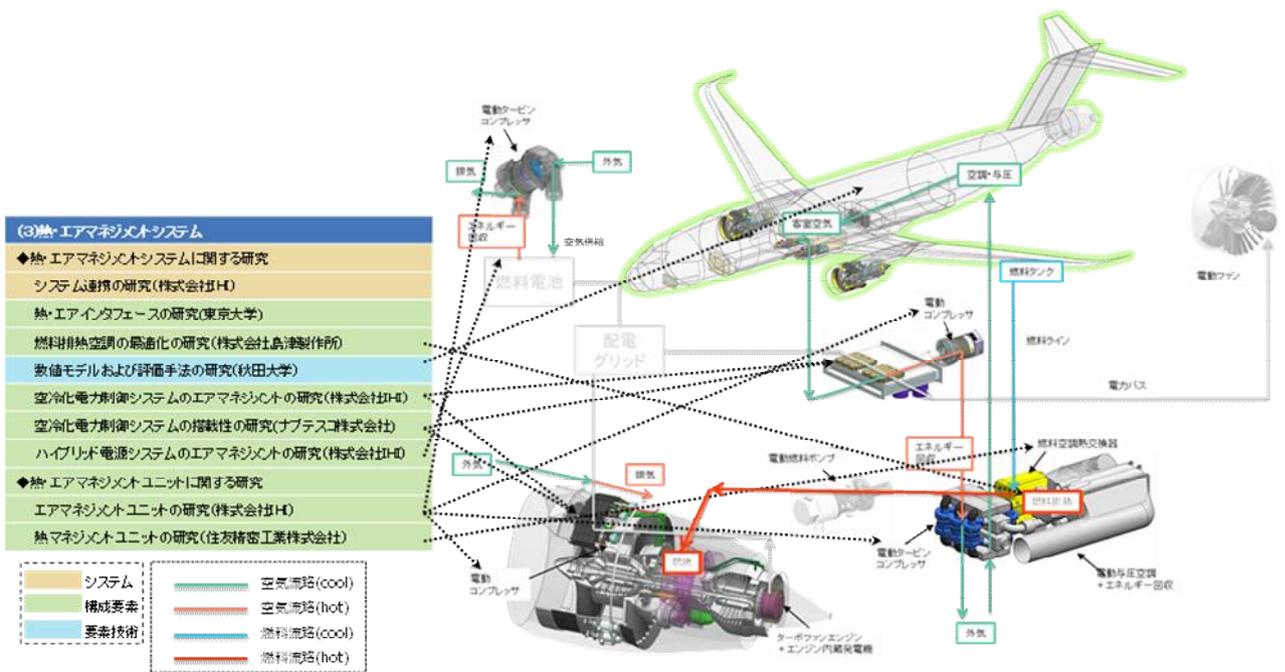
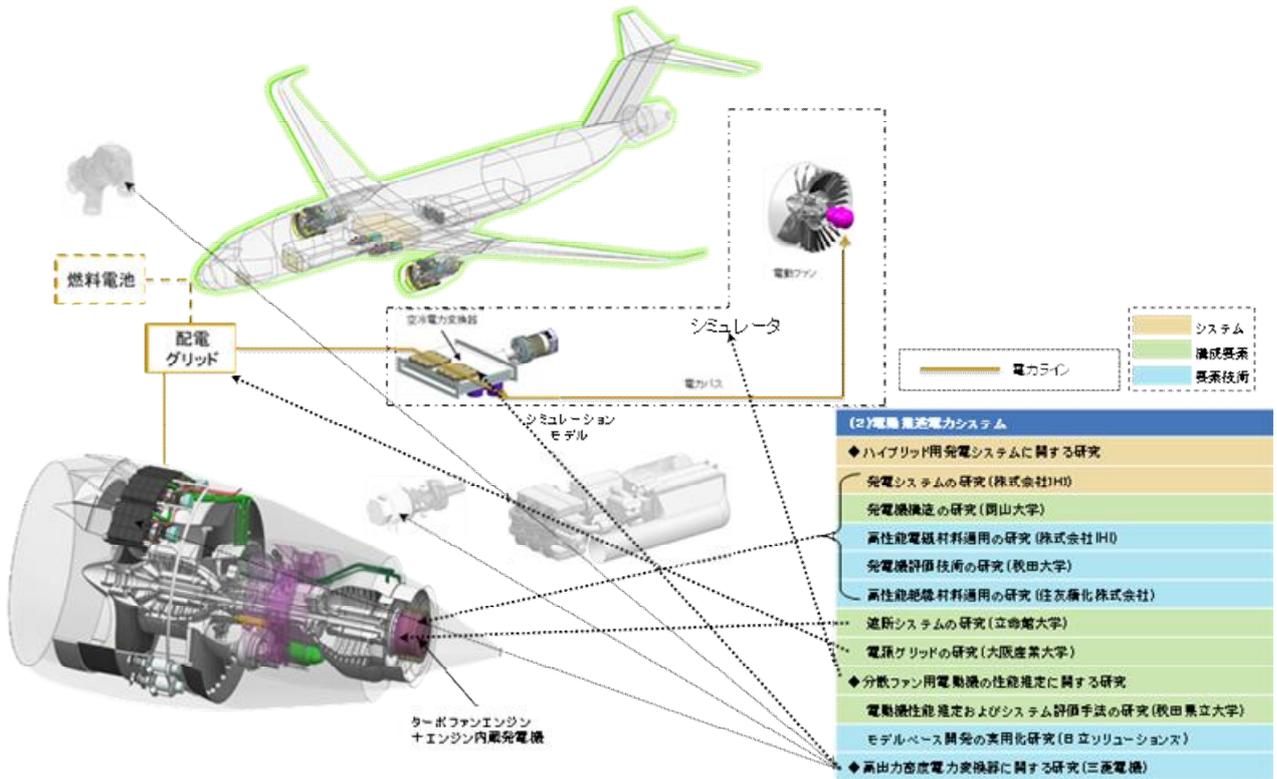


図 V3-1： ハイブリッド電動推進システム研究対象概念図



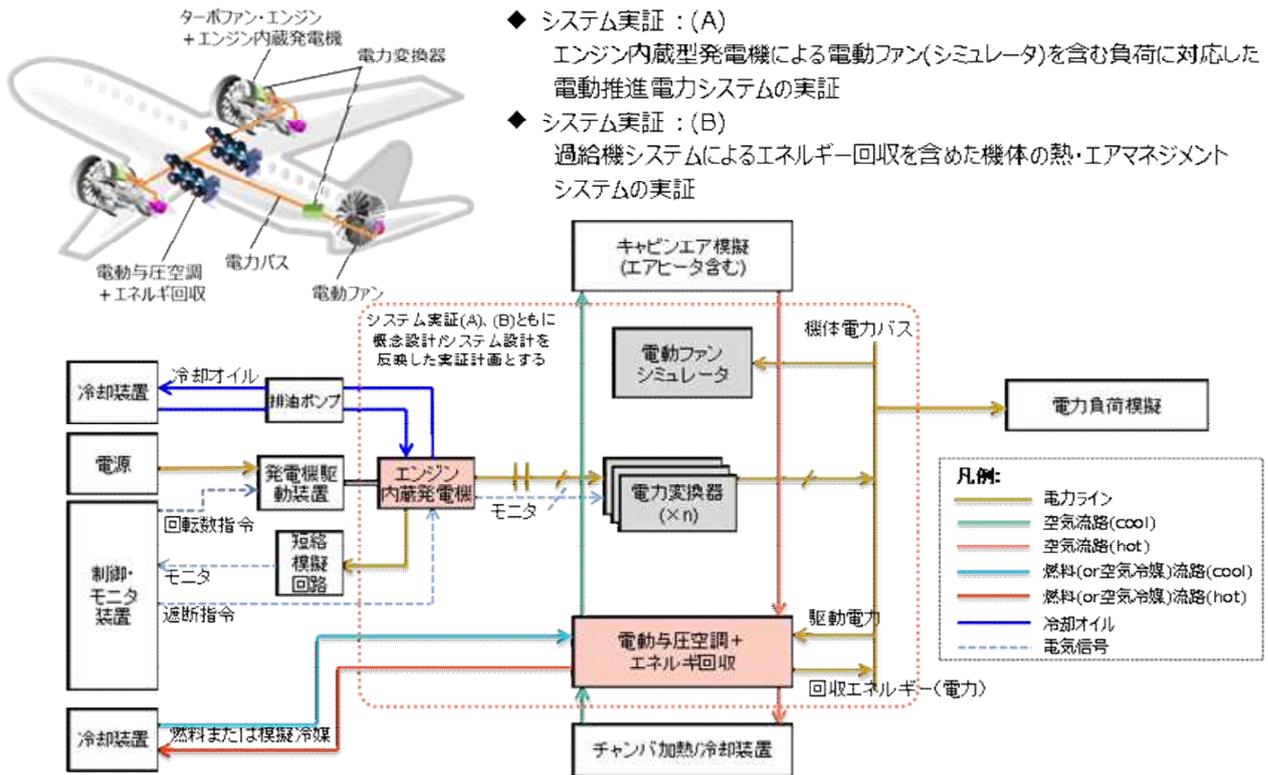


図 V3-4：次世代電動推進システム研究開発/電動ハイブリッドシステム システム地上実証概要

(2) 技術的目標とその設定根拠

➤ ハイブリッド電動推進システム

【中間目標（2021年度末）】

電動ハイブリッド航空機の実用化に向けた電動推進電力システムおよび熱・エアマネジメントシステムに係るシステム定義、および評価項目設定を行う

<設定根拠>

本実用化プロジェクトにおける電動推進電力、熱・エアマネジメントの各システムベースラインを設定

【最終目標（2023年度末）】

実用化に向けたシステム定義の妥当性評価、および将来を見据えた中長期スパンでの技術開発ロードマップの策定を行う

<設定根拠>

長期的視野に立ったハイブリッド電動推進システムのあるべき姿を Forecast していくため

➤ 電動推進電力システム

【中間目標（2021年度末）】

MW級電動推進を達成するエンジン内蔵発電機の特種電磁機械製造技術の実現性確認のための試作を完了する

電力システムを構成する電源グリッド、遮断システム、分散ファン用電動機、電力変換器の技術成立性について、モデル解析等による確認を完了する

<設定根拠>

MW 級の電磁機械製造技術に対する実現性検証、及びシステム実証に向けた解析検証を可能とするため

【最終目標（2023 年度末）】

MW級電動推進を達成するエンジン内蔵発電機の電流密度及び耐電圧性に係る性能評価を完了する
システムリグ試験を含むシミュレーションによる電力システムの地上実証を行い、機能・性能評価を完了する

<設定根拠>

MW 級の電磁機械に対する性能優位性検証、及びシステム実証による機体適用可能性の検証のため

➤ 熱・エアマネジメントシステム

【中間目標（2021 年度末）】

フライトミッションを通じたシステム特性評価を可能とする燃料排熱空調システム、エネルギー回収システムの
技術成立性について、シミュレーションモデル等による確認を完了する

熱・エアマネジメントシステムを構成する燃料排熱熱交換器(FCAC)の耐久性評価を完了する

<設定根拠>

システム実証に向けた解析における事前検証を可能とするため、及び構成要素の搭載実現性検証のため

【最終目標（2023 年度末）】

システムリグ試験を含むシミュレーションによる熱・エアマネジメントシステムの地上実証を行い、燃費改善効果を含む機能・性能評価を完了する

実用化に向けた燃料排熱熱交換器(FCAC)の性能図表作成を完了する

<設定根拠>

システム実証による機体適用可能性の検証のため、及び構成要素の製品展開を視野に入れた DB 構築のため

1.2 研究開発のスケジュール

以下に本研究開発の 2020 年度から 2023 年度までの全体計画を示す。

	2020	2021	2022	2023
(1)ハイブリッド電動推進システム				
◆電動ハイブリッド航空機のシステム構成に関する研究(株式会社IHI)	・概念設計およびシステム設計	・推進sysモデル整備 ・電力sysモデル整備	・推進sys最適化検討 ・電動sys最適化検討	・統合sys評価
◆ハイブリッド電動推進システムの概念設計に関する研究(東京大学)				
(2)電動推進電力システム				
システム設計完了 → システム成立性実証				
◆ハイブリッド用発電システムに関する研究				
発電システムの研究(株式会社IHI)	・発電機設計	・プロトモデル製造	・プロトモデル評価	・統合sys評価
発電機構造の研究(岡山大学)				
高性能電磁材料適用の研究(株式会社IHI)				
発電機評価技術の研究(秋田大学)				
高性能絶縁材料適用の研究(住友精化株式会社)				
遮断システムの研究(立命館)	・システム設計	・要素評価	・サブシステム設計・製造 ・最適化検討	・サブシステム評価 ・統合sys評価
電源グリッドの研究(大阪産業大学)				
◆分散ファン用電動機の性能推定に関する研究				
電動機性能推定およびシステム評価手法の研究(秋田県立大学)	・シミュレータ検討・整備	・MBDモデル整備	・サブシステム試験	・統合sys評価
モデルベース開発の実用化研究(株式会社日立ソリューションズ)				
◆高出力密度電力変換器に関する研究(三菱電機株式会社)	・設計モデル検討	・シミュレーションモデル整備	・最適化検討	・モデル化
(3)熱・エアマネジメントシステム				
システム設計完了 → システム成立性実証				
◆熱・エアマネジメントシステムに関する研究				
システム連携の研究(株式会社IHI)	・概念設計およびシステム設計	・回収sysモデル整備	・回収sys最適化検討	・統合sys評価
熱・エアインタフェースの研究(東京大学)				
燃料排熱空調の最適化の研究(株式会社島津製作所)	・試験リグ設計	・試験リグ製造	・エネルギー回収試験	・モデル化
数値モデルおよび評価手法の研究(秋田大学)				
空冷化電力制御システムのエアマネジメントの研究(株式会社IHI)	・実用型ヒートシンク設計	・PM製造	・PM評価	・統合sys評価
空冷化電力制御システムの搭載性の研究(ナブテスコ株式会社)				
ハイブリッド電源システムのエアマネジメントの研究(株式会社IHI)	・概念設計	・過給sysモデル整備	・過給sys最適化検討	
◆熱・エアマネジメントユニットに関する研究				
エアマネジメントユニットの研究(株式会社IHI)	・大出力ETC設計/試作評価	・PM製造	・PM評価	・統合sys評価
熱マネジメントユニットの研究(住友精密工業株式会社)	・FCAC設計・製造	・試験リグ製造	・エネルギー回収試験	・モデル化

1.3 プロジェクト費用

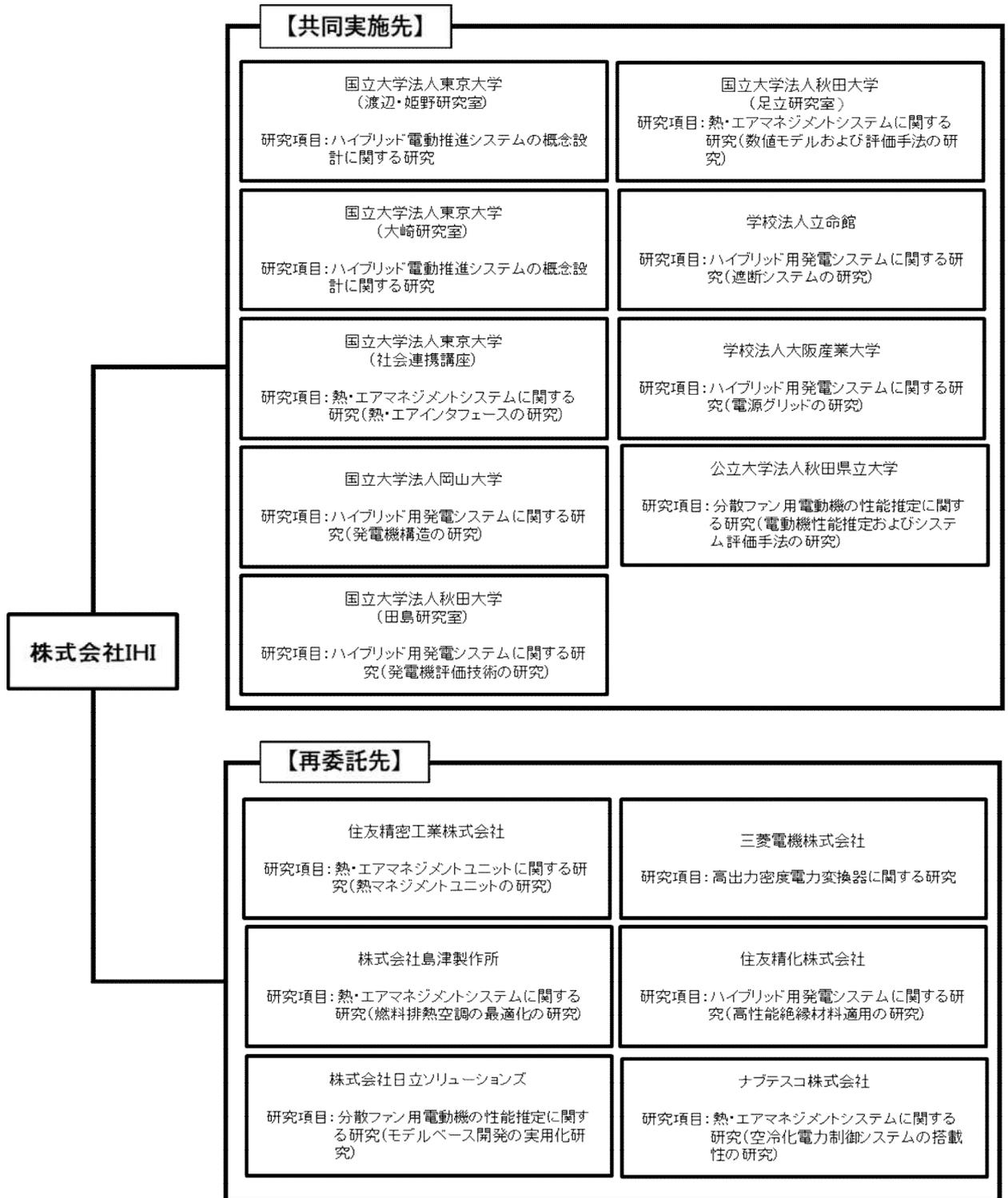
(単位：百万円)

項目	2019年度	2020年度	2021年度	合計
ハイブリッド電動推進システム	-	2.0	2.0	4.0
電動推進電力システム	-	118.0	111.2	229.2
熱・エアマネジメントシステム	-	109.6	100.4	210.0
合計	-	229.6	213.6	443.2

注1：プロジェクト費用は現契約の範囲(2年間)にて記載

注2：加速案件による2020年度追加予算を含む

1.4 研究開発の実施体制



1.5 研究開発の運営管理（個別管理）

本研究会開発プロジェクトを運営するにあたり、主要な共同実施先、再委託先と IHI 間での定例会を週一回程度の頻度で実施することで課題の早期発見と対応に努めるとともに、半期ごとの全体進捗レビュー、ならびに毎月の予実算管理報告を IHI 社内で行ってプロジェクト運営管理を行っている。

1.6 知的財産権等に関する戦略

知財合意書にもとづき、知的財産権等の取得を実行する。なお、

- システム構想については、オープン戦略により、機体メーカーやエンジンメーカー、システムメーカーが有する構想とのすり合わせを積極的に行うことにより、他国他社に先駆けて事業化の機会を得るものとする。
- 材料、構造、工法については、その知的財産権の侵害を発見・証明することが困難であることから、知財委員会等で個別に取得すべきとの判断のない限りにおいて、ノウハウとして公開しない。
- 標準化については、認証に係る規格、規準、ガイドライン等の制定を行う国際的な機関である SAE International のコミッティ活動への参加を考慮する。

1.7 知的財産管理

本プロジェクトにおける成果の公表および知的財産権の取扱いを適切に行うため、知財運営委員会を設置した。また、知財合意書により、

- 秘密保持
- 本プロジェクト成果の知的財産権の帰属
- 共有するフォアグラウンド IP の取り扱い
- プロジェクト参加者間での知的財産権の実施許諾等を規定した。

1.8 動向・情勢の把握と対応

海外機体メーカー、システムメーカー等との意見交換を通じた動向・情勢の把握、及び電動化に関連する規格化・標準化団体における動向・情勢の把握を実施した。

2. 研究開発成果

2.1 研究開発項目毎の目標と達成状況

項目：ハイブリッド電動システム

中間目標	成果	達成度	課題と解決方針
電動ハイブリッド航空機の実用化に向けた電動推進電力システムおよび熱・エアマネジメントシステムに係るシステム定義、および評価項目設定を行う	電動推進と BLI を組み合わせた機体形態を想定し、電動推進電力システムおよび熱・エアマネジメントシステムに係るシステム定義および評価項目設定を完了した。	○	

◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

項目：電動推進システム

中間目標	成果	達成度	課題と解決方針
MW級電動推進を達成するエンジン内蔵発電機の特 殊電磁機械製造技術の実 現性確認のための試作を完 了する	構造成立性、製造性を踏 まえた発電機の詳細設計、 解析による性能評価を完 了。発熱密度低減を図った 巻線構造、高性能絶縁材 料を取入れ試作機の製造 を開始、完了の見込みを得 た。	△	
電力システムを構成する電 源グリッド、遮断システム、分 散ファン用電動機、電力変 換器の技術成立性につい て、モデル解析等による確認 を完了する	電力システムとして、マルチ ターミナル半導体式限流・遮 断器(電源グリッド)、半導 体式遮断回路方式(遮断 システム)、ハルバツハ構造 電動機(分散ファン用電動 機)、階調制御等のインバー タ方式(電力変換器)、につ いてそれぞれモデル解析によ り妥当性確認を完了した。	○	

◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

項目：熱・エアマネジメントシステム

中間目標	成果	達成度	課題と解決方針
フライトミッションを通じたシステム特性評価を可能とする 燃料排熱空調システム、エネルギー回収システムの技術成立性について、シミュレーションモデル等による確認を完了する	燃料排熱空調システム及びエネルギー回収システムのシステム定義と評価項目設定を完了し、評価ツールとしてのシミュレーションモデルの作成を完了した。年度末までに、シミュレーションモデルを用いた成立性評価を完了する見込みを得た。	△	
熱・エアマネジメントシステムを構成する燃料排熱熱交換器(FCAC)の耐久性評価を完了する	熱・エアマネジメントシステムのシステム設計により FCAC への要求定義を行い、それを満足する FCAC の設計を完了、製造を実施中。8 月中旬に製造完了し、年度末までに耐久性評価を完了する見込みを得た。	△	

◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

2.2 成果と意義（成果の詳細）

開発項目(1)：ハイブリッド電動推進システム

実施項目(1)-①：電動ハイブリッド航空機のシステム構成に関する研究（担当：株式会社 I H I）

<研究成果>

ハイブリッド電動推進システムの概念設計に関する研究より、電動推進と BLI を組み合わせた場合に、電力システム的大幅な軽量化を前提とした上で、Mission Fuel Burn の削減が可能であること、また BLI 用電動ファンは複数に分散化することで燃料消費量削減効果を増強できるという結果が得られていることから、複数の分散ファンへの給電ライン、および負荷を持つハイブリッド電動推進形態とした。

一方で、発電機は負荷変動による影響を考慮し、電動ファンと機体システム電力で別系統で給電する構成とした。発電機構造の研究より、発電機の大出力化、また発電機誘起電圧の低減のため巻線多層化が有効である結果が得られているが、航空機、エンジン搭載を考慮した場合の配線臙装、スペースが課題となることから巻線 2 層構造を採用。発電機の構成は、エンジン HP 軸搭載 1 台、LP 軸搭載 1 台の構成とし、LP 軸発電については、搭載性及び交換容易性の観点から、発電機はテールコーン内蔵とする搭載様式とした。発電の形式としては、出力密度向上のため永久磁石式発電を採用した。

発電機遮断(2)-①(f)、グリッド遮断(2)-①(g)の検討結果よりシステム成立性を確認した。

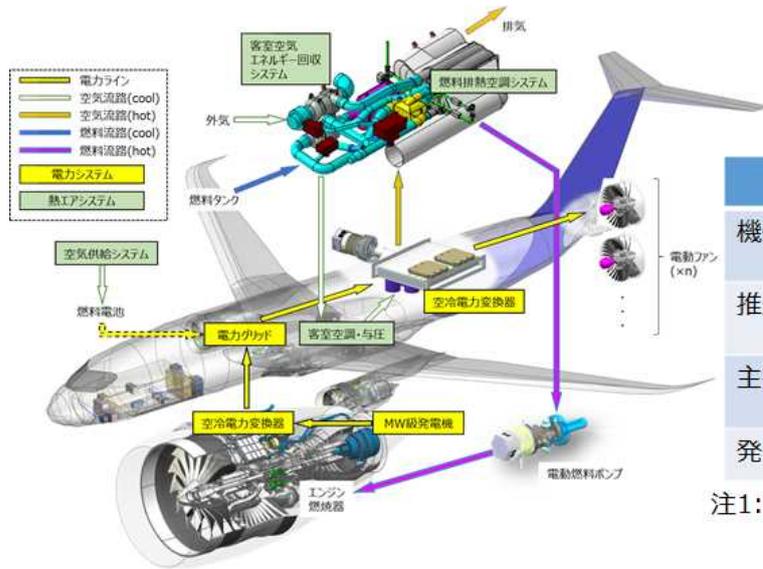
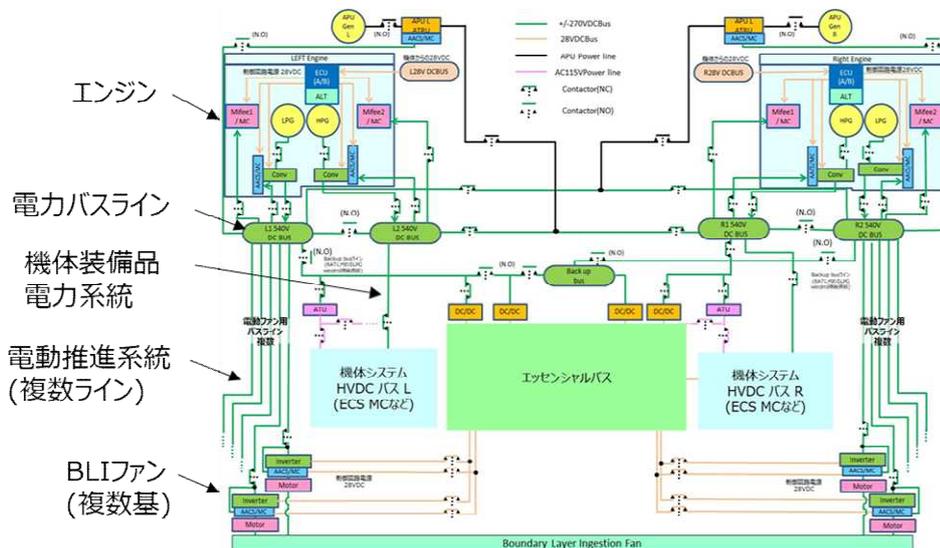


表. 想定機体形態

項目	想定形式・仕様
機体形式・乗員数	Tube&Wing単通路機, 180人乗り
推進システム形態	Partial Turboelectric + 機尾BLI ⁽¹⁾ 電動ファン
主推進器形態	Turbofan双発, 離陸時出力約40MW
発電機出力	2MW×2

注1: Boundary Layer Ingestion (境界層吸込み)



PMG遮断については(2)-①(f)項を参照

冗長バスシステムの電源グリッド遮断は(2)-①(g)項を参照

図 ハイブリッド推進システム電源系統構成 更新案

<意義>

複数の電動ファンより構成されるハイブリッド電動推進形態の成立性を確認した。

実施項目(1)-②: ハイブリッド電動推進システムの概念設計に関する研究 (担当: 国立大学法人東京大学)

<研究成果>

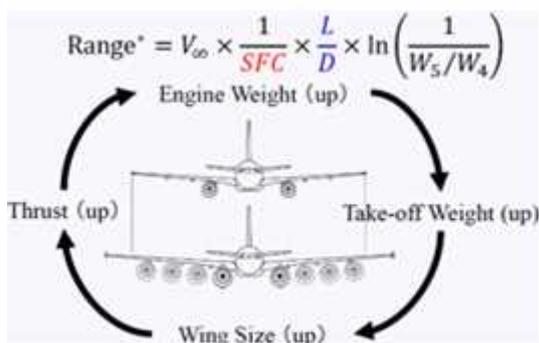
ガスタービンの運転を模擬する「エンジンモデル」、エンジン内部構造と電装品構成の「重量推算モデル」を連成させ、ターボエレクトリック推進の性能評価を実施した。

性能評価モデルにおいては、

- (1) ファン分散化による重量軽減と推進効率向上
- (2) 電装品搭載による機体重量増とエネルギー伝達効率低下
- (3) 分散ファン基数、境界層吸込(BLI)効果

を考慮し、小型機(70席級)、中型機(150席級)、大型機(300席級)が一定距離を飛行するために要する燃料消費量(MFB: Mission Fuel Burn)=CO₂排出量を推算。MFBの低減に対する、電装品軽量化の感

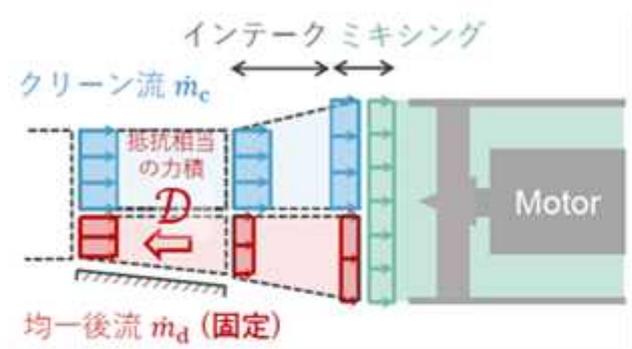
度解析を実施した。



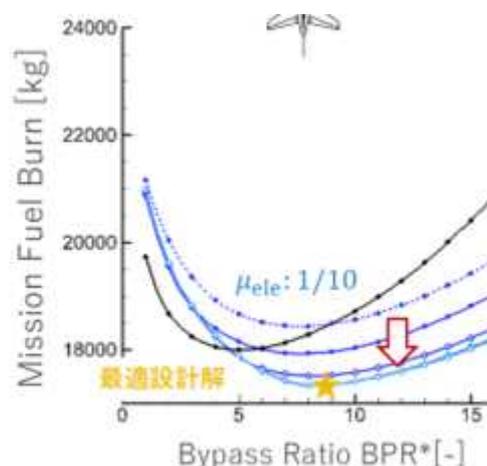
機体概念設計との連成



電動推進システム構成



BLI 評価モデル



分散ファンによる性能改善効果

<意義>

エンジンおよび電装品の技術開発目標をバランスよく設定する俯瞰的議論に貢献した。

開発項目(2)：電動推進電力システム

(2)-①ハイブリッド用発電システムに関する研究

実施項目(2)-①(a)：発電システムの研究（担当：株式会社 I H I）

<研究成果>

(iv)MW 級発電機プロトタイプモデル製造

発電機構造の研究による発熱密度低減化をはかった巻線構造の成果をベースに、製造容易性を踏まえた設計を反映し、電磁気解析モデルにて性能評価を完了した。発電機の構造成立性に加え、高性能絶縁材料を適用した絶縁設計を含めた詳細設計を完了した。また、構成品製造に係る要素検証と条件出しを実施し実現性の確認を行った。それらのフィードバックを考慮し、プロトタイプ製造を開始する。

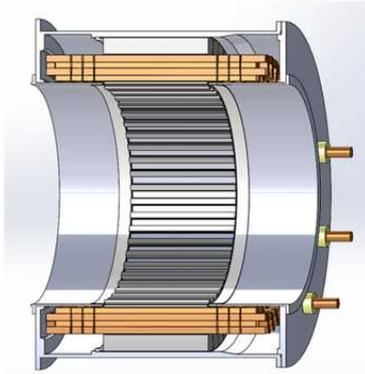
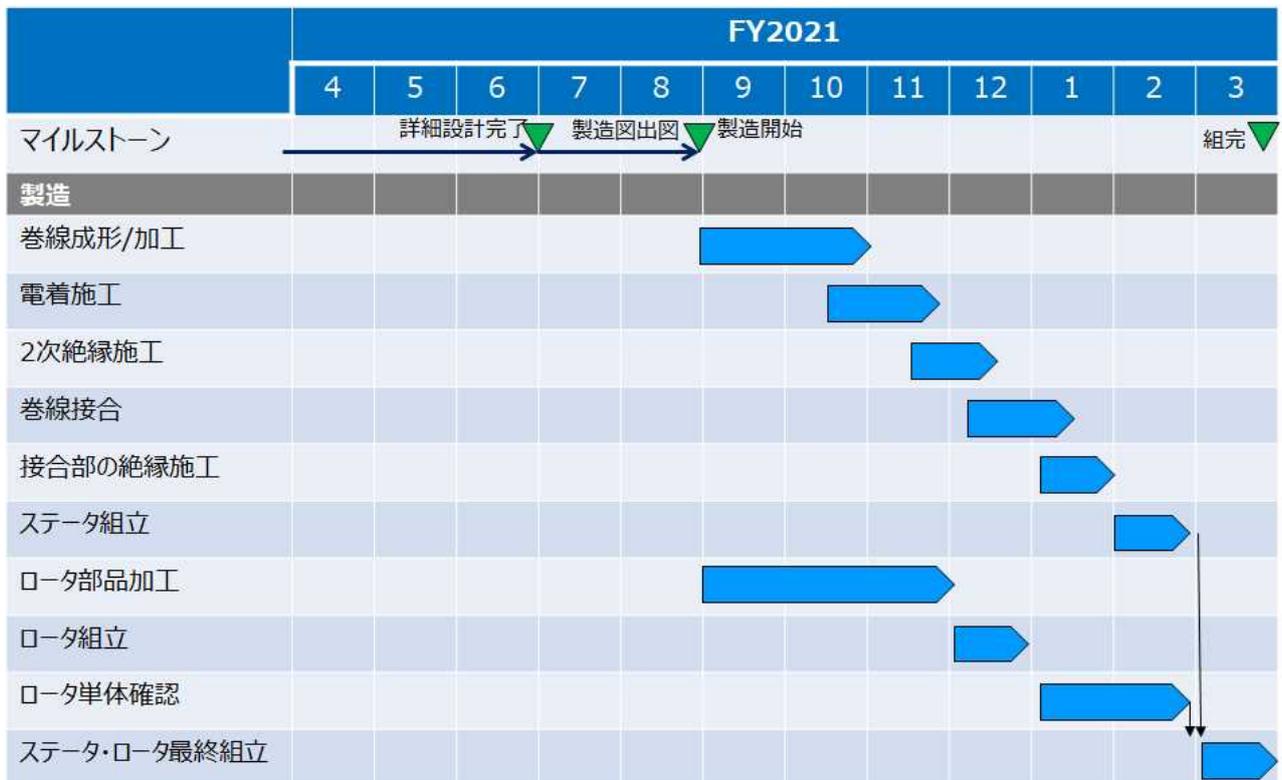


図 発電機の固定子構造概要



図 9層巻線 接合、成形精度要素検証



<意義>

MW級電動推進を達成するエンジン内蔵発電機のプロトタイプ製造を開始し、2021年度の試作完成が見込める。

<研究成果>

(v) 電動推進電力システムの要素検証に基づく成立性確認

発電機構造研究およびシステムの研究より、必要な電力量を供給する MW 級発電機の電磁気、熱、構造に係る成立性を確認した。

複数のファンを持つ電源グリッド遮断について、キーパーツとなる限流・遮断器を軽量化・単純化のために部品の共用化が課題。複数の遮断器の故障電流吸収用のアブゾーバを共通化できるマルチターミナル半導体式限流・遮断器や限流用リアクトルの共通化を提案し、回路シミュレーションを行い基本動作を確認し成立の見込みを得ている。

永久磁石式発電機の遮断については、パワーエレクトロニクスシミュレータ（PLECS）により、発電機と電力変換器、また短絡模擬回路（相内、相間、および地絡）を持つ解析モデルを構築し、短絡～遮断完了動作を確認した。シミュレーション結果を基に、構築した 20kW 一次評価用テストベッドにて実際の短絡、遮断の挙動を確認し、遮断ロジックへ反映する。

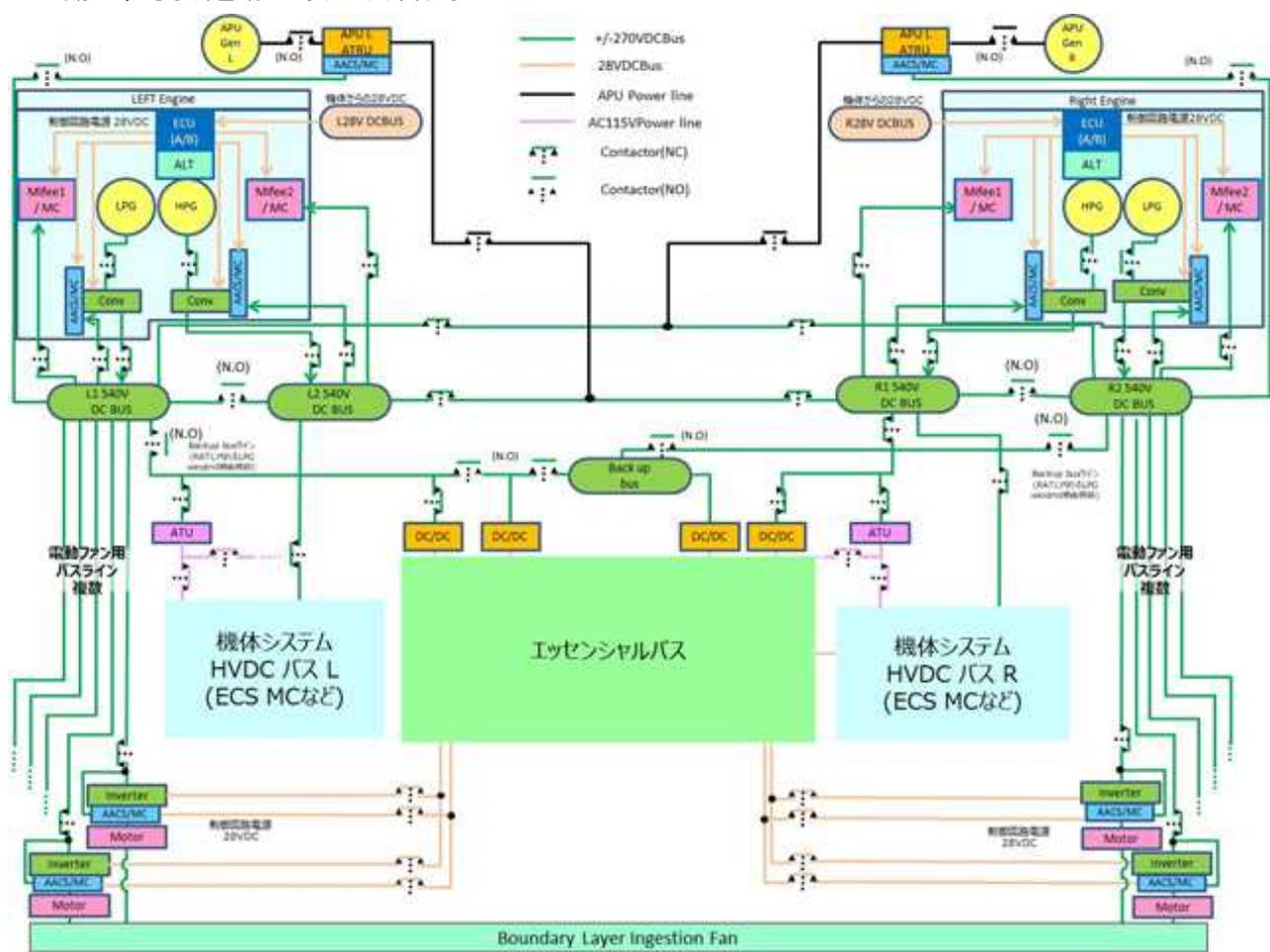


図 ハイブリッド推進システム電源系統構成

<意義>

電力供給の観点で、ハイブリッド推進システムへの電力供給成立性を見込みを、電源グリッド、および永久磁石発電機の遮断システム検証より保護機能の観点でのシステム成立性を評価できる。

実施項目(2)-①(b)：発電機構造の研究（担当：国立大学法人岡山大学）

<研究成果>

冷却構造や製造性を考慮した「最新の高占積率巻線を用いた 1 MW 発電機」について、回転子の軽量化などを進めた結果、高い出力密度特性を備えていることを確認した。そして、より詳細な損失分布等の性能評価を実施するために、大規模な電磁場解析を実施する必要があり、そのために、 FOCUS スパコンシステムに、モータの電磁場解析が実施できるような計算システムを作り上げた。

表 モータ電磁場解析結果

項目	数値	補足
平均トルク	1182.1 Nm	
出力	1.04 MW	≥1.0 MW
回転子合計損失	5.61 kW	
固定子合計損失	24.3 kW	
合計損失	29.9 kW	
効率	97.20%	
出力密度	43.0 kW/L, 8.10 kW/kg	
固定子損失密度	2.40 kW/L	≤2.9 MW

<意義>

航空機用発電システムの実用化には、高出力密度を達成できる発電機が必要不可欠である。そして、トレードオフの関係にある「冷却可能な低損失密度」と「高出力密度」の両立が不可欠であり、軽量化しながら両立できる構造を明らかにした。そして、より詳細な損失分布等の性能評価を実施することが、実用化のためには欠かせないが、そのためには、大規模な電磁場解析を実施する必要がある。しかし、日本国内において、誰もが使用できる公的な機関で、モータの大規模電磁場解析が実施できるスパコンシステムは無い。そこで、公益財団法人計算科学振興財団が所有する FOCUS スパコンシステムに、モータの電磁場解析が実施できるように計算システムを立ち上げた。これにより詳細な損失分布等の性能評価を可能とした。

実施項目(2)-①(c)：高性能電磁材料適用の研究（担当：株式会社 I H I）

<研究成果>

軟磁性材料への応力および積層化による磁気特性劣化、また劣化特性の低減プロセスに係る過去の知見を考慮して発電機を試作し、積層鋼板の形状、製造プロセスの妥当性を確認した。

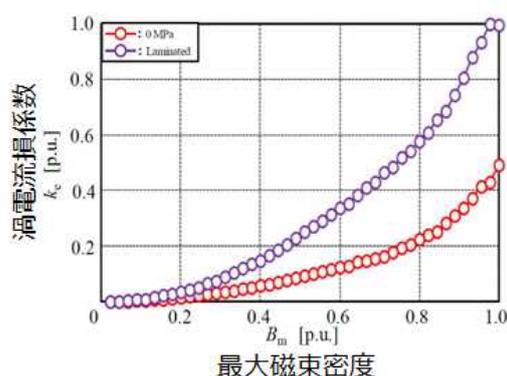


図 積層による磁気特性劣化¹

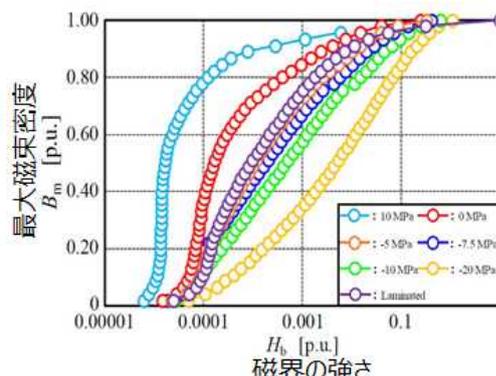


図 応力による磁気特性劣化¹

[1]Yuya Aki, Yasuhito Takahashi, Koji Fujiwara and Takehiro Jikumaru "Investigation on Deterioration of Magnetic Property of Permenndur Due to Laminating Process for Improvement of Power Density in Permanent Magnet Motors", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 15th Int. Workshop on 1 & 2 Dimensional Magnetic Measurement and Testing, 2DM-Grenoble 24-26 Sept (2018) IOS Press

<意義>

部品加工、成形における磁気特性劣化を低減するプロセスによって、発電機の効率向上を図ることが可能となり、解析精度の向上にも寄与する。

実施項目(2)-①(d)：発電機評価技術の研究（担当：国立大学法人秋田大学）

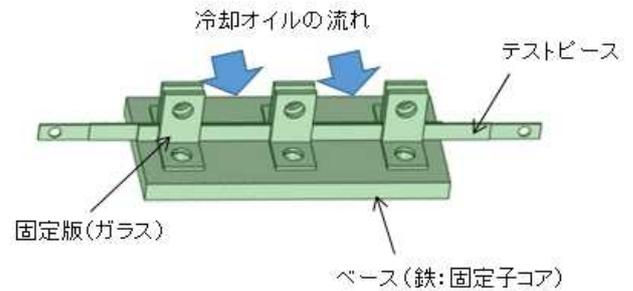
<研究成果>

高空条件下を模擬した発電機コイルの絶縁性能評価を行うために、発電機冷却油温（180℃）と気圧（0.2atm）を同時に設定可能な評価装置を構築し、インバータサージ電圧を模擬した高電圧（±1.5 kV、10 kHz）でのテストピースの絶縁破壊試験を行った。気中（常温、0.2atm）の絶縁破壊時間と比較すると、約 5 倍の寿命時間となることがわかった。また、部分放電時の放電電流を観測した。

絶縁評価装置全体図



コア-コイル間の絶縁評価



油中180℃部分放電開始電圧測定実験結果

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	10回目	平均
1.0 atm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.8 atm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.2 atm	1060 V	1040 V	1040 V	1020	1040	1020	1000	1020	1020	1020	1028

絶縁破壊時間の測定
(油中180°C、0.2atm)

気中での試験結果との比較

印加電圧最大値	±1.5 kV
印加電圧周波数	10 kHz

気中(常温)、0.2atm
絶縁破壊時間: 35時間

油中(180°C)、0.2atm
絶縁破壊時間: 172時間

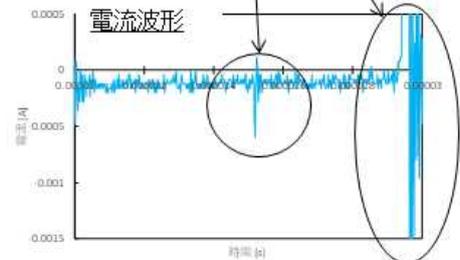
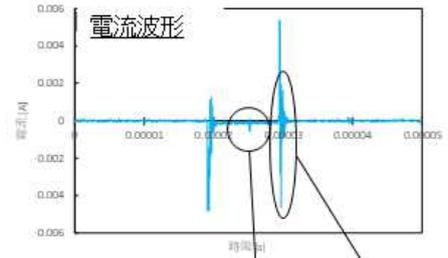
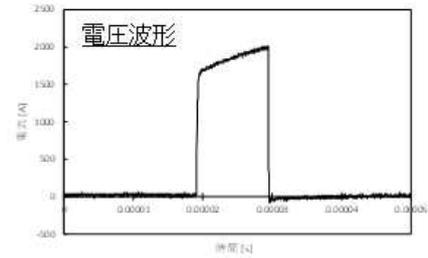
約5倍



絶縁破壊痕



部分放電電流の観測
(油中180°C、0.2atm)



<意義>

絶縁体の絶縁性能は周囲の環境による影響を強く受けるため、環境パラメータによる評価が必要不可欠である。本評価装置により放電開始電圧、絶縁破壊時間の測定を行うことで発電機評価技術を構築する目的を得た。

実施項目(2)-①(e)：高性能絶縁材料適用の研究（担当：住友精化株式会社）

<研究成果>

発電機プロトタイプモデルにおける試作を含めた絶縁材料被膜塗装結果について、提供した材料の特性、およびその塗装プロセスの条件から、本結果の妥当性を確認し、その上で、施工および材料の特性の観点から改善に向けた提示を行った。また、材料中の樹脂特性の観点から電着塗工プロセス標準化に向けた提言を行った。

<意義>

発電機巻線への高性能絶縁材料の施工、および標準プロセスの構築が可能となる。

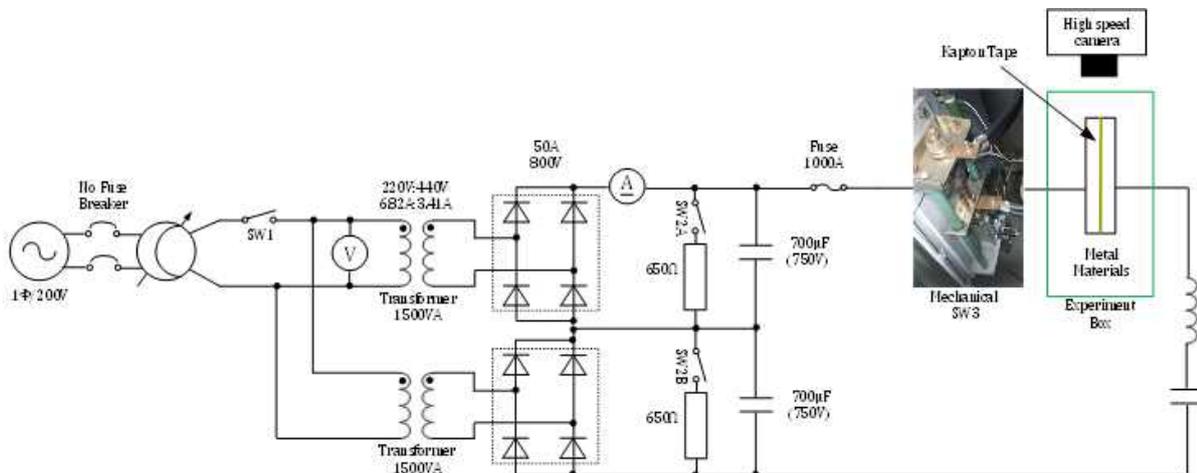
実施項目(2)-①(f)：遮断システムの研究（担当：学校法人立命館）

<研究成果>

(iii) アーク放電発生時の過渡状態の検討

アークに関連する文献から、アーク放電に必要な最低電圧とその距離を調査した。アーク放電に至る電

氣的・構造的條件を明らかにするため、プラズマ試験装置を構築中であり、予備試験によりアークを発生可能なことを確認した。また、発電機の巻線・絶縁被膜構造を模擬するため、回路構成及び試験条件の検討を行い、装置を製作中。年度内に試験を完了する目途を得た。



電極を兼ねた銅棒2本を向かい合わせで固定し、その間にカプトンテープを挟み、共振電圧をかける。

図 プラズマ試験装置

<意義>

アーク放電発生時の過渡変化をのデータを取得し、発電機及び遮断装置の仕様に反映可能となる。

<研究成果>

(iv) 第一次評価用テストベッドによる遮断システム評価

シミュレーションモデルにより、発電機の遮断回路を検討し、解析にて技術成立性を確認。引き続き、実機での安全な故障分離を考慮した遮断仕様を確認中。またスケールダウンした 20kW のミニモデルでの実機検証のため、誘導電動機を負荷とした永久磁石発電機の back to back システム、および遮断回路などを製作した。



図 第一次評価用テストベッド(20kWミニモデル)

<意義>

解析と試験により、解析モデルの妥当性検証を可能とし、遮断システム評価に活用可能となる。

<研究成果>

項目 1 信頼性の高い配電経路のトポロジー（グリッドアーキテクチャー）

①故障の発生確率と余剰推進パワーを図示した拡張信頼性MAPを提案し（図1）、故障切替後の信頼性、軽量性の観点から定量的に評価する手法を開発した。ベンチマークとしてNASAがN3Xで提案するグリッド構成を評価した。NASAが推奨する構成2（中央融通型）は故障切り替えを行っても信頼性を確保できないことが判明。また信頼性を満足する構成4（切替え経路網羅型）は構成が複雑となる課題がある。

②バスの信頼性を 10^{-4} (FIT) から 10^{-5} (FIT) に改善した条件での新たな構成として「中央融通 & 部分切替え型グリッド構成」を提案した。提案構成は、故障切替後の信頼性、軽量性、構成単純性、から判断していずれの方式よりも優位であることを定量的に確認した。

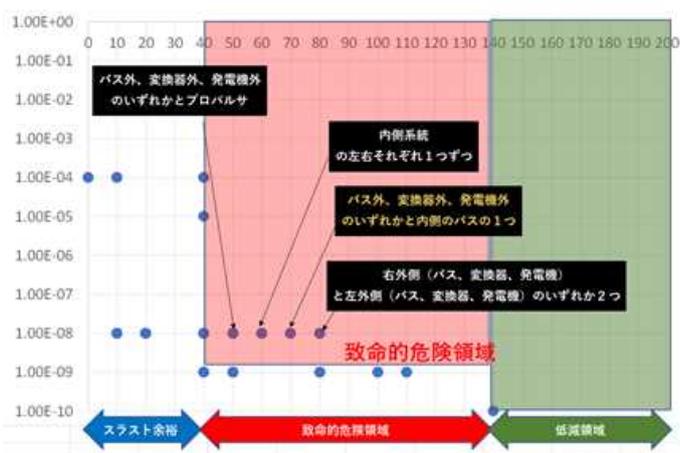


図1.NASA推奨の構成2の故障切替後の拡張信頼性MAP

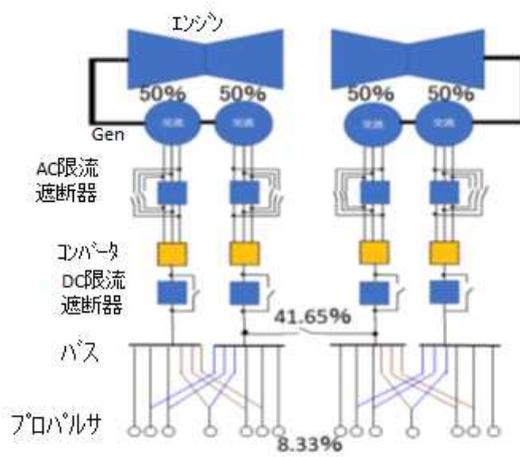


図2.中央融通 & 部分切替え型グリッド構成

<意義>

拡張信頼性 MAP を用いて、高信頼性と軽量性を満たすグリッドの上位システム仕様の検討スキームを確立した。抽出仕様に基づき下位の各構成要素（モータなど）の目標仕様に落とし込むことができる。

<研究成果>

項目 2 高い安定性を維持するグリッド制御ロジック（冗長・切替、遮断・保護、回路方式）

①電動航空機グリッドで最重要のキーパーツである限流・遮断器の低損失化、軽量化を実現するハイブリッド型マルチターミナル限流・遮断器（図3、Hybrid Multi Terminal current limit Breaker: HMTB）を提案し、基本動作をシミュレーション（図4）により確認した。

②要点

- ・常時低損失の機械式遮断器とパワー半導体を組み合わせたアークレス遮断
→：スイッチ部の常時低損失と軽量化
- ・複数ルートのエネルギー吸収用回路の共用化回路
→：周辺回路の簡素化・軽量化
- ・磁束結合共用リアクトルの逆相接続による限流用リアクトルの2個1共用化
→：最重量部品の軽量化

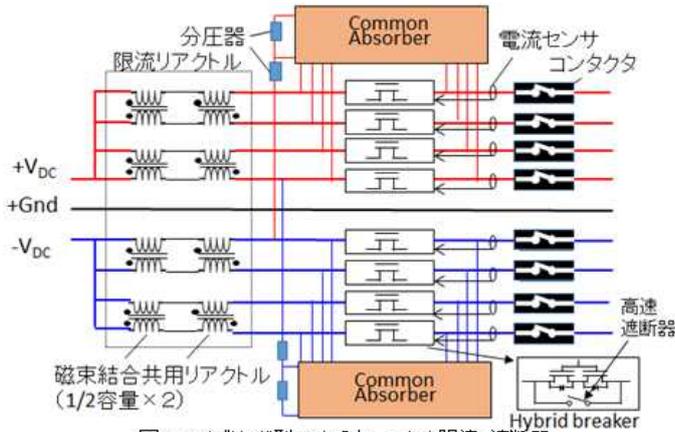


図3.ハイブリッド型マルチターミナル限流・遮断器
(Hybrid Multi Terminal current limit Breaker: HMTB)

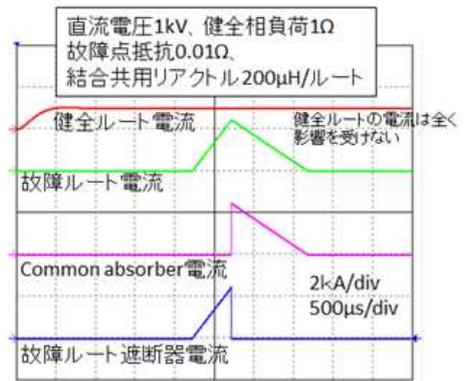


図4.故障時のHMTBの近傍の各電流

<意義>

電動航空機の信頼性確保に最も重要な限流・遮断器の低損失・軽量化が可能となる。

(2)-②分散ファン用電動機の性能推定に関する研究

実施項目(2)-②(a)：電動機性能推定およびシステム評価手法の研究（担当：公立大学法人秋田県立大学）

<研究成果>

①電動機性能推定のためのモデル構築

回転子にハルバツハ構造を有する電動機の2次元電磁界解析モデルを構築した。初期段階のシミュレーションの結果、本電動機を定格回転数かつ理想的な正弦波電流を用いて駆動することにより、目標とするトルク(図1)が得られる可能性が明らかになった。さらに、逆起電力やインダクタンス等の基本的な電動機特性を算定できるようになった。

②電動ファンシミュレータを用いた電動機性能推定評価

ハルバツハ構造を有する電動機の代わりに汎用電動機を導入し、電動ファンシミュレータ(HILS)を構成する装置の連携動作や通信機能の検証を行う計画を考案し、これに必要な機材等を検討した。本検証方法により、システムの誤動作による装置破壊のリスクを低減しながらリアルタイムシミュレータやファン模擬負荷装置が問題なく動作することを検証できる。

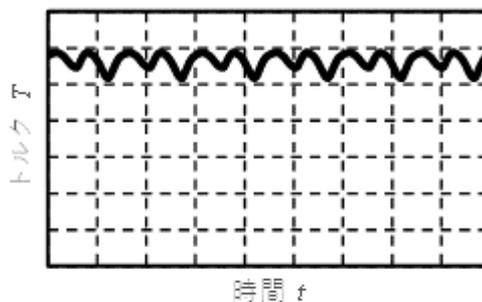


図1 電動機トルク算定結果

<意義>

ハルバツハ構造を有する電動機を用いた電動ファンの性能が、MILS および HILS の両シミュレーションによ

り推定できる。

実施項目(2)-②(b)：モデルベース開発の実用化研究（担当：株式会社日立ソリューションズ）

＜研究成果＞

航空業界の MBD における各プロセスのあるべき姿「現存する課題を解決しつつ、多様な解析ツール統合及びリモート検証化」について、現状の課題の深堀と統合シミュレーション環境の仕様を決定し、試行用ソフト年度内完成に向けて作成に着手した。

＜意義＞

現状の得られた課題の深堀について以下の課題整理を行うことで、既存のツールやモデルを有効活用して、航空機搭載レベルのモデルが作成できる。

- ・ オートコーダ等バージョン違いによる出力結果の違いについて、解決方法の検討。
- ・ 前年度に行った「必要な解析ツールの洗い出し」結果から、多様な解析ツール群の統合化のための進め方を決定。

(2)-③高出力密度電力変換器に関する研究

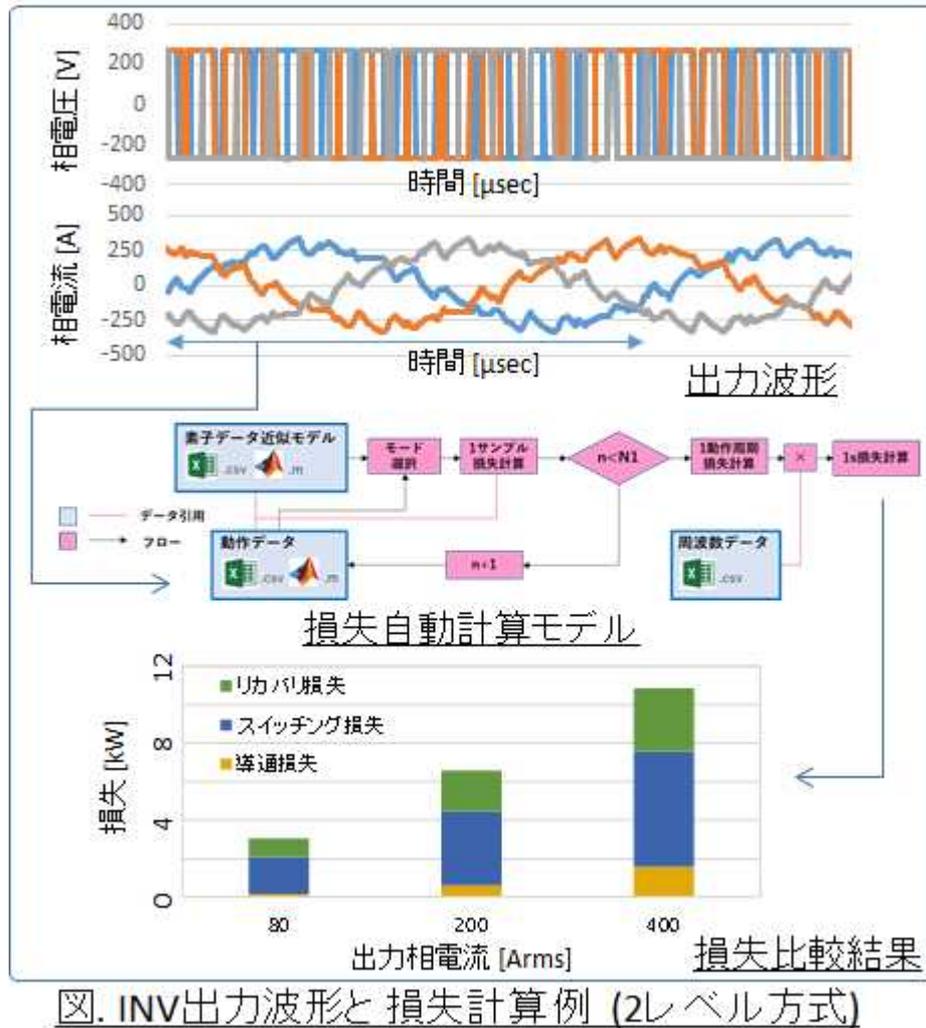
実施項目(2)-③：高出力密度電力変換器に関する研究（担当：三菱電機株式会社）

＜研究成果＞

- ・ 各種回路方式（2レベル・3レベル・階調制御）のインバータ（INV）を対象に、機体システムとの連携が容易な MATLAB/Simulink*による回路モデルを構築。
- ・ 発熱を見積もるため、波形周期毎にエネルギー損失を自動計算する MATLAB*モデルも構築。PSIM*計算結果と比較検証し妥当性を確認。
- ・ 電力容量、電圧レベルのスケールアップに対応したモデルの拡張を実施し、各種回路方式 INV の性能を比較評価。

表.スケールアップを考慮したINVモデル

拡張項目	範囲
回路方式	2レベル, 3レベル, 階調制御 (5~7レベル)
電力容量	~2MW
DCバス電圧	~1080V



<意義>

ハイブリッド航空機向けにマルチレベル電力変換器を機体 OEM やシステムメーカーが採用するには、上位システムでの適合性を試作前に統合的な総合評価する必要がある。機体モデルとの統合と、各種回路方式や電力容量に対応が可能な、新たな INV 計算モデルを開発することで、この課題を解決する。

開発項目(3)：熱・エアマネジメントシステム

(3)-①熱・エアマネジメントシステムに関する研究

実施項目(3)-①(a)：システム連携の研究（担当：株式会社 I H I）

<研究成果>

燃料排熱空調、空冷化電力制御システム、及びエネルギー回収等を組み合わせた熱・エアマネジメントシステムのシステム定義と評価項目設定を完了し、解析モデルを構築して燃費消費量低減効果を算出した。

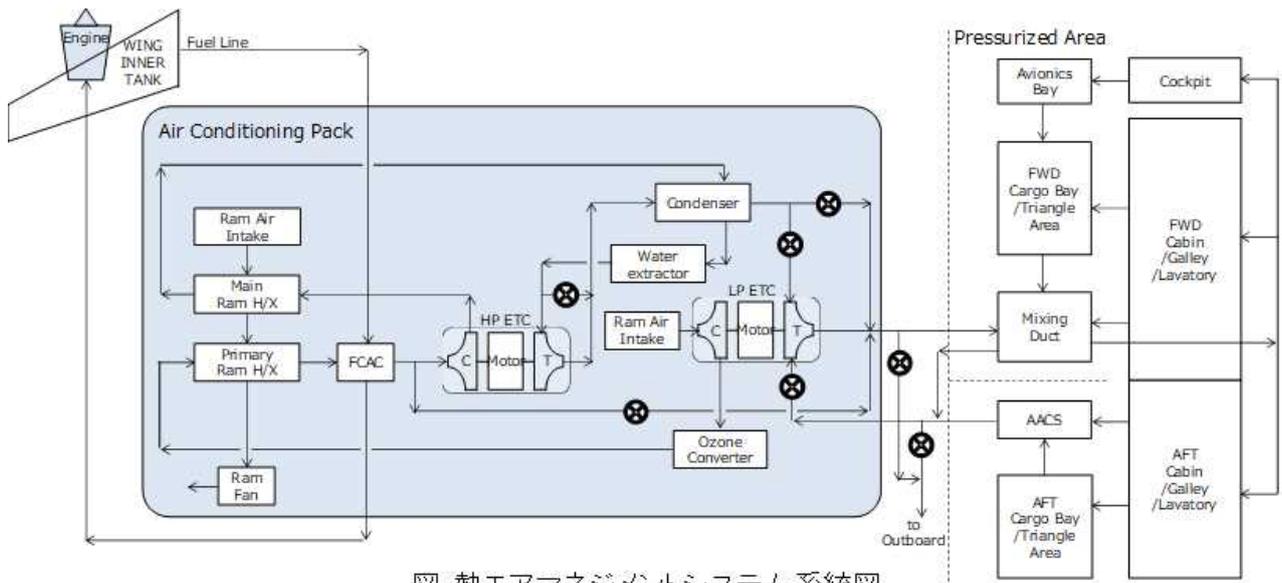


図. 熱エアマネジメントシステム系統図

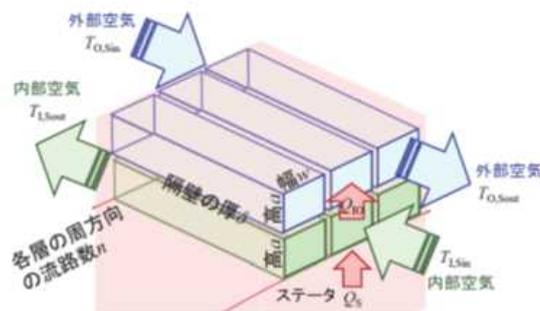
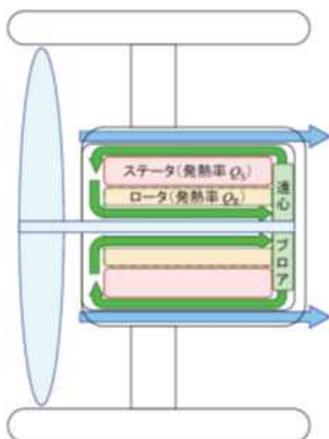
<意義>

システム定義が完了し、各構成要素の要求仕様が明確となることで、構成要素の検討を行う準備が整った。また、評価項目が設定され、解析モデルを作成することにより、技術成立性を評価する準備が整った。

実施項目(3)-①(b)：熱・エアインタフェースの研究（担当：国立大学法人東京大学）

<研究成果>

分散化された電動ファンは運用性・整備性の観点から空冷化が好ましい。電動ファン用モータの強制空冷の成立性を示すため、地上高温環境と、高空低圧環境における冷却性能について検討した。特に、高空の低圧環境下では空冷能力が著しく低下するが、空気の冷却能力を、熱輸送能力と熱伝達能力、2つの観点で整理し、伝熱工学の理論式を用いて推算した結果、いずれも質量流量に比例するとの結果を得た。圧縮性を考慮した圧力損失のモデル化、除熱量と圧力損失の関係の整理から、空冷での冷却能力とそれに伴うペナルティの関係を年度末までに明らかにできる見通しを得た。



電動ファン用モータの強制空冷の成立性について、以下の観点で整理

- 固体(構造材)からの熱伝達能力
- 空気流の熱輸送能力

<意義>

大出力電動ファンの冷却に伴う課題が整理され、理論式からその基本的な特性が明らかになった。

実施項目(3)-①(c)：燃料排熱空調の最適化の研究（担当：株式会社島津製作所）

<研究成果>

ターゲット機体における空調システムの代表条件での要求性能を達成するための機器仕様・性能の割付けと構想検討を行い、これをもとにシステム性能解析を実施して所要の性能を満たすことを確認した。さらに、燃料排熱空調システムの主要部分である空調パッケージの3Dモデルを作成するとともに、上位の熱・エアマネジメントシステムの特性評価に使用するシミュレーションモデルを開発した。また、(d)項で報告するシステム試験リグの設計の妥当性を確認した。

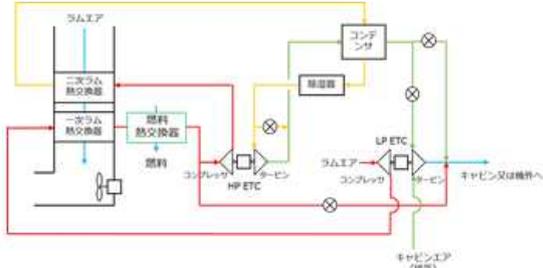


図. 燃料排熱-与圧エネルギー回収空調系統図

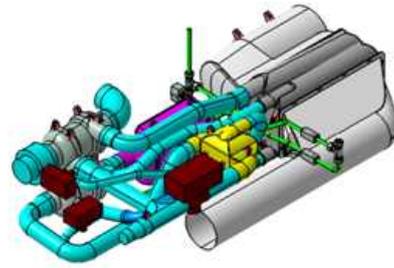


図. 燃料排熱-与圧エネルギー回収空調3Dモデル

<意義>

シミュレーションモデルの作成により、燃料排熱空調システムの技術成立性評価を行う準備が整った。

実施項目(3)-①(d)：数値モデルおよび評価手法の研究（担当：国立大学法人秋田大学）

<研究成果>

(a)システム連携の研究成果として得られたエアマネジメントシステムを実証するための環境試験リグの基本設計と、MATLAB/Simulinkによるシミュレーションモデルの構築が完了した。

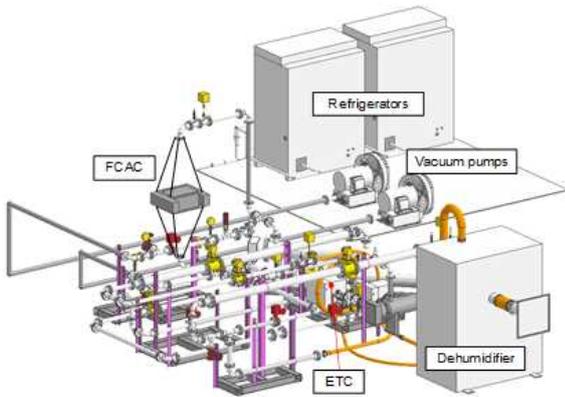


図.リグの基本設計による3Dモックアップ

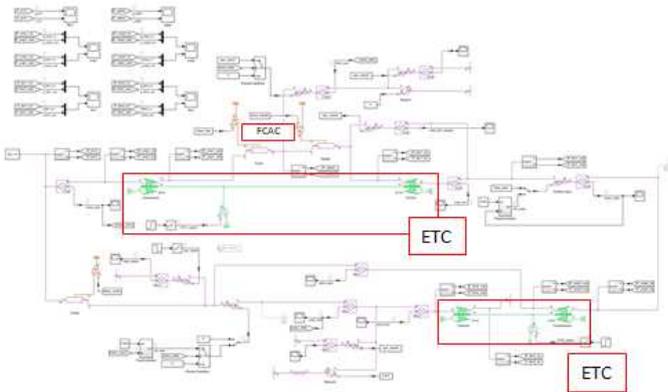


図.MATLAB/Simulinkによるシミュレーションモデル

<意義>

シミュレーションモデルとリグ試験の組み合わせにより、世界でも前例のない熱エアマネジメントシステムの技術成立性を評価する準備が整った。また、シミュレーションモデル上でのリグ設備の動作確認を実施する事により、初号機要素によるリグ試験遂行上のリスク低減が可能となった。

実施項目(3)-①(e)：空冷化電力制御システムのエアマネジメントの研究（担当：株式会社 I H I）

<研究成果>

電力制御装置の中で、発熱密度が最大となるパワエレ素子に冷却能力を集中するため、ヒートシンクに取

り込んだ冷却空気の全量を用いてパワエレ素子を冷却した後、その他の受動素子を冷却する、往復流路式ヒートシンクを考案。先行研究で得た知見に基づき、ヒートシンク内の冷却フィン密度を変化させることで、圧損を抑えつつ、各コンポーネントの冷却クライテリアを満たす事が出来る解析結果を得た。本形態では、パワエレからの排熱回収量を最大化することができる。また、ヒートシンクの製造に着手し、年度内に製造完了の目途を得た。

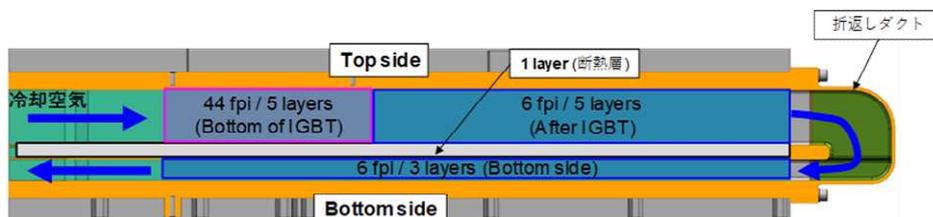


図. 往復流路式ヒートシンクの断面図

<意義>

電力制御デバイスの将来的な発熱密度の増大に対応しつつ、排熱回収も実現可能とするヒートシンク的设计資料を得、評価試験を進めることができる。

実施項目(3)-①(f)：空冷化電力制御システムの搭載性の研究（担当：ナブテスコ株式会社）

<研究成果>

現行機体を電動化した場合の搭載性についての検討を実施した。機体内の空気経路である Triangle Area を流れる換気空気を取込み電力制御システムを冷却後、Bilge Area へと排気する、胴体 1 フレーム分の空間を使用したシステムレイアウト案を定義した。

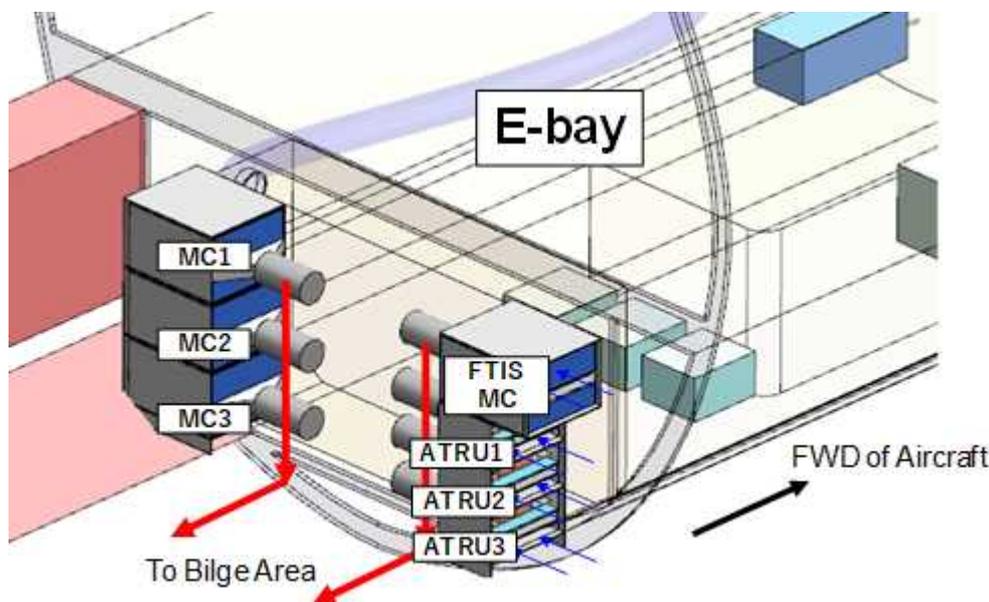


図. 空冷化電力制御システムの搭載性検討結果

<意義>

本レイアウト案をベースとした熱収支モデルを作成する事で、胴体内のシステム配置位置ごとの空冷キャパシティを得る事ができる。また、システム搭載ラックの機械検討へと進める事ができる。

実施項目(3)-①(g)：ハイブリッド電源システムのエアマネジメントの研究（担当：株式会社 I H I）

＜研究成果＞

設定した要件定義に基づき、システム評価手法についての検討を実施し、システム要件を満足させる技術的な目標値の設定を完了した。当該目標値を達成する上で成立性に影響を与える技術項目、もしくは技術的リスクの高い技術項目の抽出を行い、年度末までに成立性に影響のある技術項目を完了する目途を得た。

＜意義＞

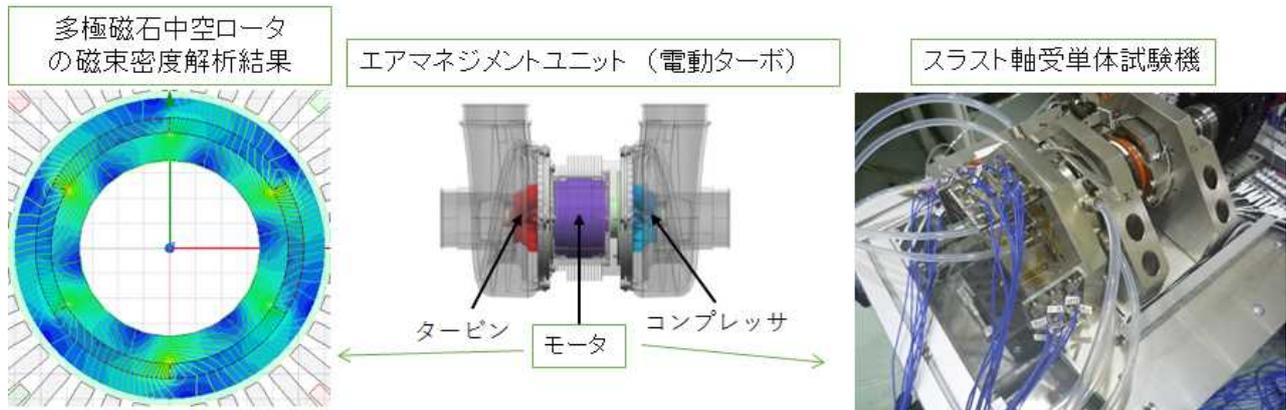
成立性に影響のある技術項目の洗い出しにより、影響評価解析が可能となる。

(3)-②熱・エアマネジメントユニットに関する研究

実施項目(3)-②(a)：エアマネジメントユニットの研究（担当：株式会社 I H I）

＜研究成果＞

- ロータ性能安定性に関する評価
磁石の多極化および解析に基づく配置検討により、シャフトを中空化した高出力密度ロータ構造の技術成立性について目途を得た。
- 支持構造負荷容量に関する評価
スラスト軸受単体の負荷容量確認試験について、試験機の熱伸びの影響を排除して負荷容量の計測精度を向上させる手法を確立した。



＜意義＞

上記設計/評価が実施可能となり、本評価結果の高出力密度エアマネジメントユニット設計への反映が可能となる。

実施項目(3)-②(b)：熱マネジメントユニットの研究（担当：住友精密工業株式会社）

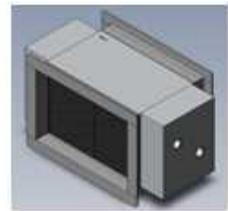
＜研究成果＞

熱・エアマネジメントシステムのシステム設計によりFCACへの要求定義を行い、それを満足するFCACの設計を完了、製造を実施中。7 月末に製造完了し、年度末までに供試体による耐久性評価を完了する目途を得た。

- 燃料排熱空調システムのリグ試験装置のうち、FCAC への燃料供給システムの仕様検討および必要機材の調達を完了。
- 実用化にあたり想定される技術課題の洗い出しおよび先行検討の実施計画立案完了。

- 燃料コンタミネーション対策：燃料浸漬試験による耐食性確認。
- 燃料氷結対策：数値流体解析（CFD）による確認および評価。

2021年度 研究開発活動スケジュール		2021 FY											
大項目	小項目	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
製造	FC AC製造-3 unit												
	性能試験												
試験	耐圧試験												
	圧力サイクル試験												
	燃料コンタミネーション試験												
	FC ACの性能図表を作成												
解析	CFDを用いた燃料氷結現象の確認および評価												



試験用供試体(概観)

<意義>

旅客機の客室空気を直接燃料と熱交換するデバイスはこれまで存在せず、その実用性評価の準備が整った。

2.3 成果の最終目標の達成可能性

項目：ハイブリッド電動推進システム

最終目標	現状	達成見通し
実用化に向けたシステム定義の妥当性評価、および将来を見据えた中長期スパンでの技術開発ロードマップの策定を行う	電動ハイブリッド航空機の実用化に向けた電動推進電力システム及び熱・エアマネジメントシステムに係るシステム定義と評価項目設定を完了した。	中間目標におけるシステム定義及び評価項目に基づき、各研究項目で作成したシミュレーションモデルを用いてシステム成立性の解析評価を行うことで、システム定義の妥当性評価を完了する見通し。また、システム評価の過程で洗い出された技術課題を整理することにより、将来を見据えた中長期スパンでの技術開発ロードマップの策定も完了する見通しであり、最終目標を達成する見込み。

項目：電動推進電力システム

最終目標	現状	達成見通し
MW級電動推進を達成するエンジン内蔵発電機の電流密度及び耐電圧性に係る性能評価を完了する	発電機の構造、電磁気の詳細設計を完了。試作機の製造を開始し製造完了の見込み。	試作した発電機において、MW 級電動推進を達成するエンジン内蔵発電機の電流密度、及び耐電圧性に係る性能評価を完了、最終目標を達成する見込み。
システムリグ試験を含むシミュレーションによる電力システムの地上実証を行い、機能・性能評価を完了する	電動ファンシミュレータを構成する装置の器材検討および検証計画の立案を完了。	中間目標におけるシミュレーションによる解析評価と、今後実施するシステムリグ試験の組み合わせにより、電力システムの地上実証を行い、機能・性能評価を完了して最終目標を達成する見込み。

項目：熱・エアマネジメントシステム

最終目標	現状	達成見通し
システムリグ試験を含むシミュレーションによる熱・エアマネジメントシステムの地上実証を行い、燃費改善効果を含む機能・性能評価を完了する	燃料排熱空調システム及びエネルギー回収システムのシミュレーションモデルの作成を完了した。	中間目標におけるシミュレーションによる解析評価と、今後実施するシステムリグ試験の組み合わせにより、熱・エアマネジメントシステムの地上実証を行い、燃費改善効果を含む機能・性能評価を完了して最終目標を達成する見込み。
実用化に向けた燃料排熱熱交換器 (FCAC)の性能図表作成を完了する	FCAC の設計を完了、製造を実施中。	試作した FCAC を用いてシステムリグにおいて性能評価を実施、燃料排熱熱交換器(FCAC)の性能図表作成を完了して最終目標を達成する見込み。

2.4 成果の普及

	2019 年度	2020 年度	2021 年度	計
論文	-	0	1	1
研究発表・講演	-	1	2	3
新聞・雑誌等への掲載	-	0	0	0
展示会への出展	-	0	0	0

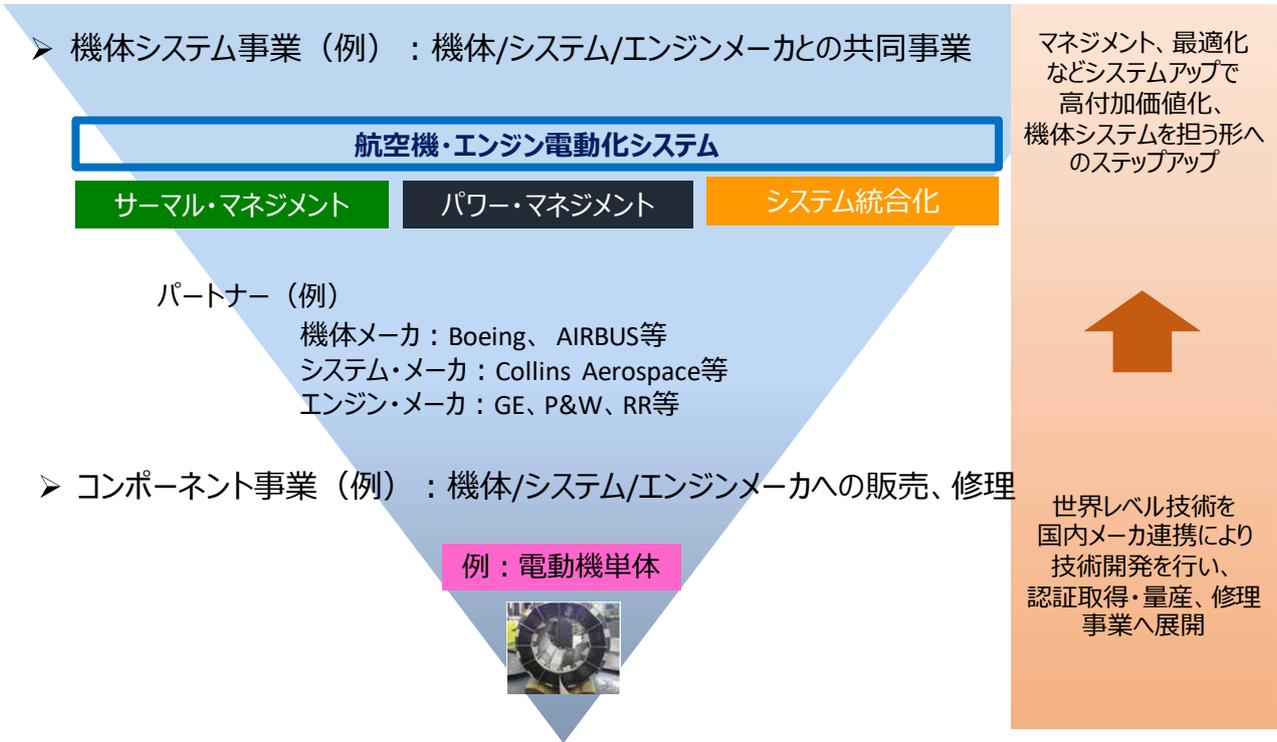
2021 年 8 月 27 日現在

2.5 知的財産権の確保に向けた取組

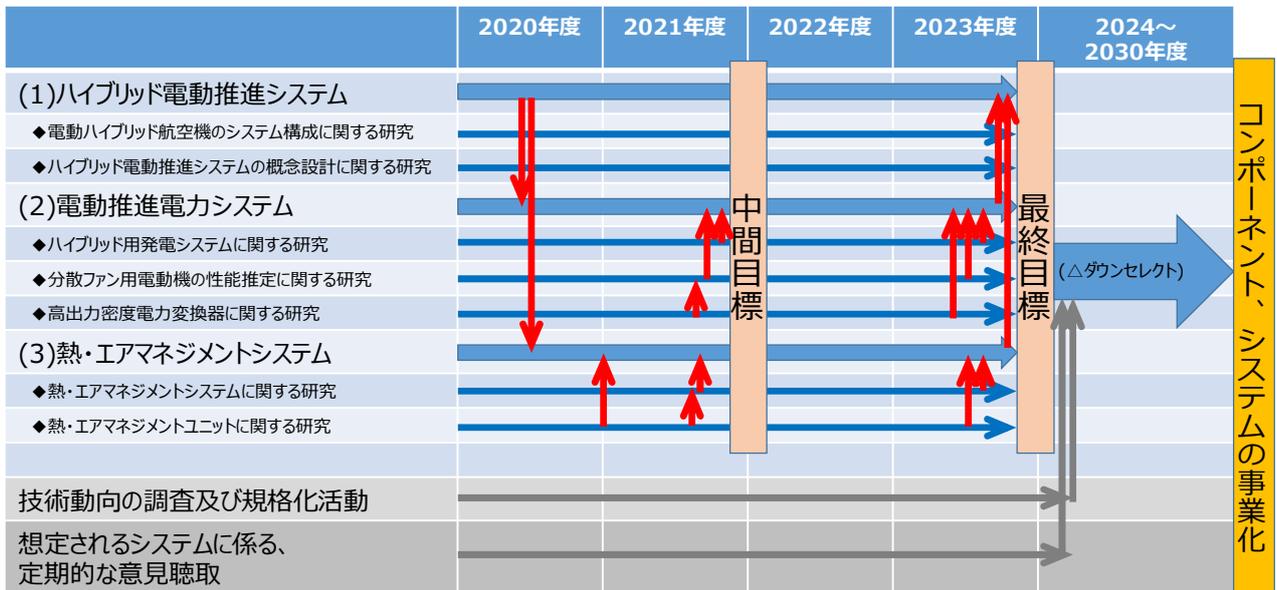
- システム構想については、オープン戦略により、機体メーカーやエンジンメーカー、システムメーカーが有する構想とのすり合わせを積極的に行うことにより、他国他社に先駆けて事業化の機会を得るものとする。
- 材料、構造、工法については、その知的財産権の侵害を発見・証明することが困難であることから、知財委員会等で個別に取得すべきとの判断のない限りにおいて、ノウハウとして公開しない。
- 標準化については、認証に係る規格、規準、ガイドライン等の制定を行う国際的な機関である SAE International のコミッティ活動への参加を考慮する。

3. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

3.1 事業化・実用化に向けた戦略



3.2 実用化・事業化に向けた具体的取組



3.3 実用化・事業化の見通し

- ✓ 中長期 技術開発計画
 - ・ 中期的には、装備品レベルでの実用化の見通しを得ることを目指す。本研究開発の成果は、要素技術の水平展開として装備品開発において実用化事業に供することを計画している

- 長期的には本プロジェクトの目標である2030年代の単通路機におけるシステム参入の機会を得ることを目指す。本研究開発の成果は中核技術としてシステムを担うとともに、それらを使ったシステムの実用化事業に供することを計画している
- ✓ 技術動向の調査及び規格化活動
 - SAE International の電動化に係る技術委員会等での調査及び標準化活動
 - EASG (Electric Aircraft Steering Group)、AE-9 (Electrical materials committee) 等での情報収集を実施
 - SAE E-40(Electrified Propulsion Committee)にて電動化の規格化活動を実施
- ✓ 想定されるシステムに係る、定期的な意見聴取を実施
 - 海外 OEM メーカーからの意見聴取を継続実施

3.4 波及効果

<経済的波及効果>

本研究開発の結果として技術成立性に目途が得られ、製品への適用・事業化を行う場合、以下の市場規模が想定される。

2030年代： エンジン搭載システムとして年間1,000セット
機体搭載システムとして年間500セット

<技術的波及効果>

本研究成果は、従来型電動機の小型・軽量化技術として利用され、航空機においては特に排熱が困難な翼や非与圧部の高温部位などに設置される電動機器で有効な技術となる。また、航空機のみならず地上で使用される様々な電動装置の軽量化に応用可能である。例えば、高速鉄道車両等で利用すれば、車両の軽量化に貢献し、走行時のエネルギー消費削減のみならず騒音低減や軌道への負荷低減等の効果を得ることができる。