

航空機用先進システム基盤技術開発
（革新的防氷技術）

評価用資料

平成27年11月16日

経済産業省製造産業局航空機武器宇宙産業課

富士重工業株式会社

目 次

1. 事業の目的・政策的位置付け.....	1
1－1 事業の目的.....	1
1－2 政策的位置付け.....	2
1－3 国の関与の必要性.....	3
2. 研究開発目標.....	5
2－1 研究開発目標.....	5
2－1－1 全体の目標設定.....	5
2－1－2 個別要素技術の目標設定.....	6
3. 成果、目標の達成度.....	7
3－1 成果.....	7
3－1－1 全体成果	
3－1－2 個別要素技術成果	
3－1－3 特許出願状況等	
3－2 目標の達成度.....	11
4. 事業化、波及効果.....	12
4－1 事業化の見通し.....	12
4－2 波及効果.....	12
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等.....	13
5－1 研究開発計画.....	13
5－2 研究開発実施者の実施体制・運営.....	14
5－3 資金配分.....	15
5－4 費用対効果.....	16
5－5 変化への対応.....	16

1. 事業の目的・政策的位置付け

1-1 事業目的

航空機にとって着氷と呼ばれる現象は飛行安全上、大変な脅威であり、死亡事故に繋がるケースも報告されている。その為航空会社は着氷に対し、既存の防除氷システムを利用する等、非常に大きな労力を払っている。航空機に搭載されている既存の防除氷システムが抱える主たる課題として、以下の3点が挙げられる（図1）。

1. 安全性 着氷が原因の航空機事故が毎年発生してしまっている。
2. 燃費効率 小型～大型民間機で多く利用されている防除氷装置（Bleed 式）は燃費効率を著しく悪化させている。
3. 環境問題 米国では冬季に使用される防除氷液による、水質汚染が深刻な問題となっている。

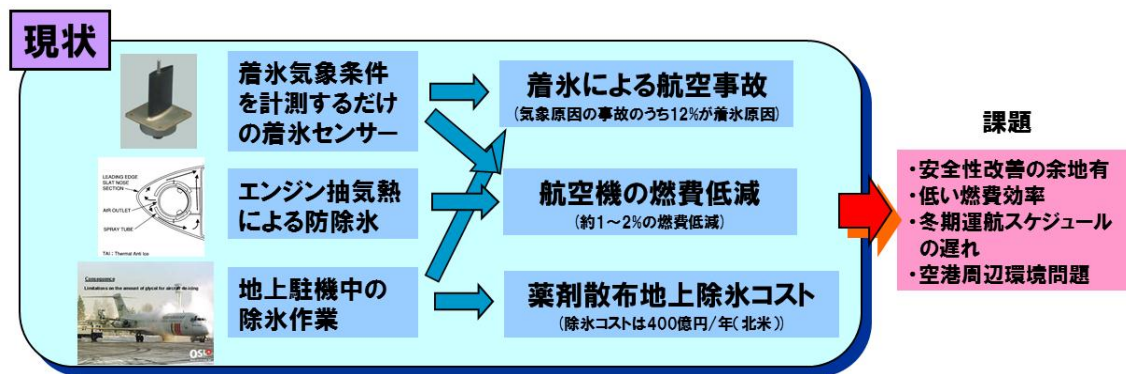


図1 航空業界における現状と課題の概要

さらに、航空機の着氷に関連した耐空性基準（FAR 14 CFR part 25 appendix 0⁽¹⁾）が2015年に改訂され、基準が厳格化された。これに伴い、これまでよりも更に過酷な着氷環境にも対応できる防除氷システムが求められている。

よって、新しい耐空性基準にも対応できる、省エネルギーな新たな防除氷技術開発を世界に先駆けて取り組み、信頼性が高く、経済性に優れた、革新的防除氷システムのコンセプトを実現させることを目指すこととした。

尚、本事業は欧州の第7次研究枠組み計画（FP7）において、日欧共同公募を経て欧州のパートナーと日本のパートナーが JEDI ACE（Japanese-European De-Icing Aircraft Collaborative Exploration）と呼ばれるコンソーシアムを組み、研究開発に取り組む、国際共同研究プロジェクトである。図2に本プロジェクトの体制図を示す。

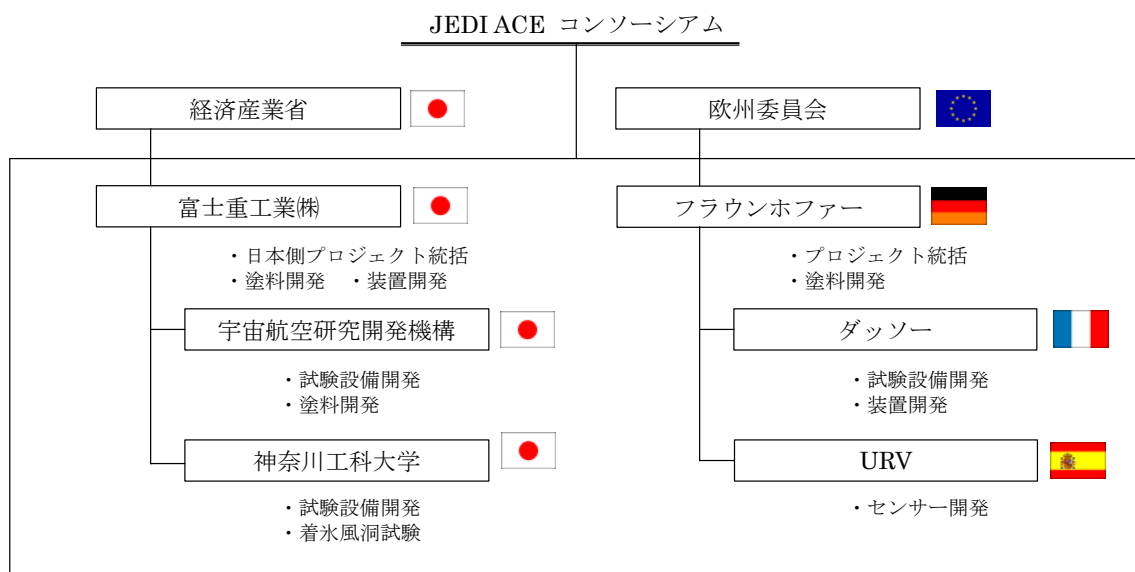


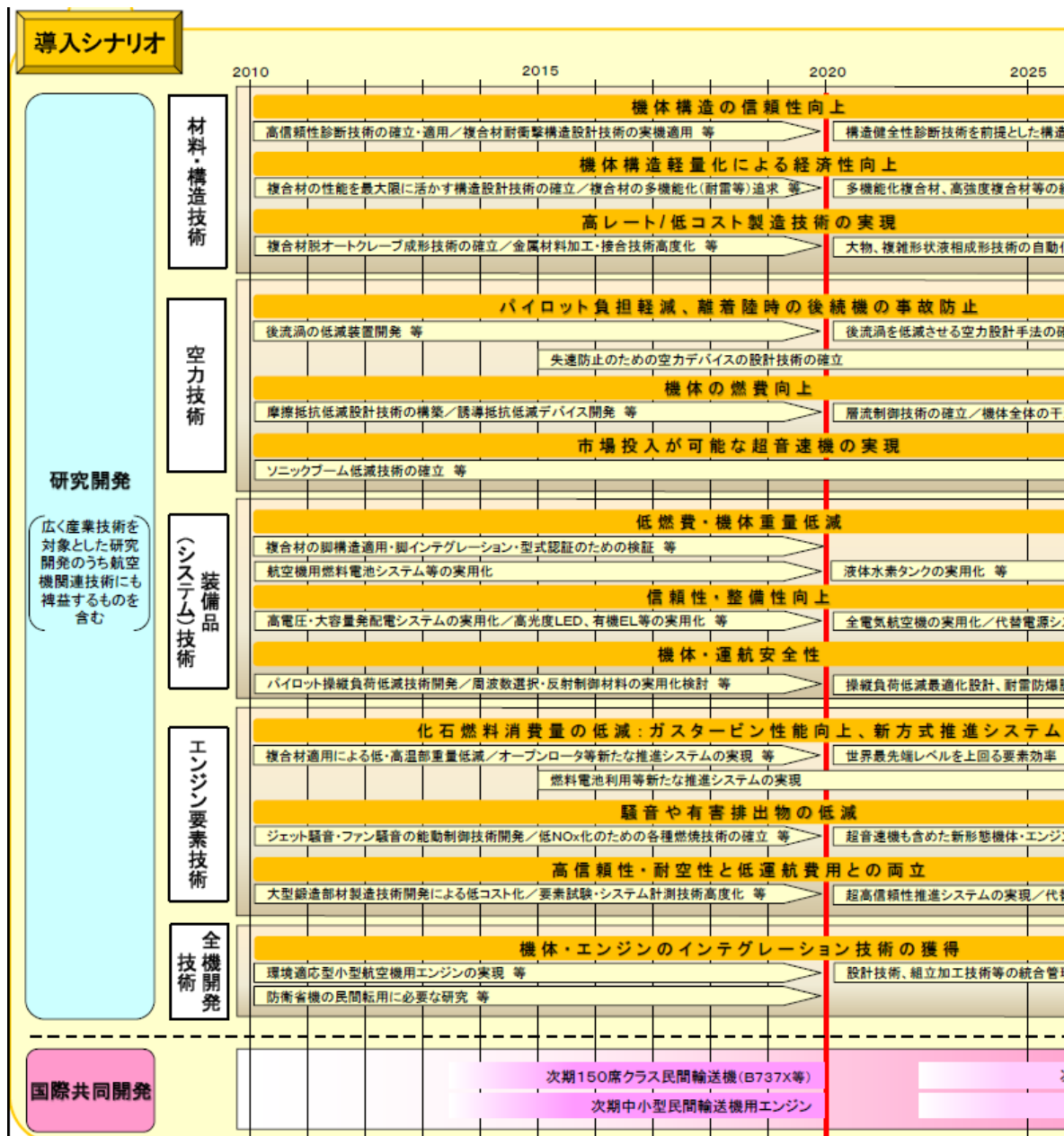
図 2 革新的防除氷システム開発の全体体制図

1-2 政策的位置付け

航空産業は、今後も年数%の割合で成長が見込まれる産業分野である。また、安全性の観点から高い信頼性が求められるため、様々な領域の先端技術を用いて技術開発や製品保証が実施されており、非常に広い裾野産業を伴う。航空産業において適切な技術開発を進め、関連する技術力を向上することは、我が国の産業基盤全体の高度化に繋がることが期待される。

上記を踏まえて経済産業省は、図3に示す航空分野の導入シナリオを策定し、施策に反映している。本事業で開発する「革新的防除氷システム」は装備品技術に該当するものであり、図2に記載の要素技術の開発で改善しようとする社会ニーズ「安全性、環境適合性、及び経済性」のいずれにも貢献できる技術と考えられる。

- ・ 安全性：航空機への着氷は重大事故を引き起こす可能性があり、耐空性基準⁽¹⁾が適宜見直される等、航空機認証機関も大きな関心を示している。
- ・ 環境適合性：空港での除氷作業に環境負荷の高い防除氷液が適用されている。
- ・ 経済性：空港での防除氷作業に多大なコストを要している。また、防除氷作業が民間航空機の定時運行の阻害要因になっている。



出所：技術戦略マップ2010

図3 航空分野の導入シナリオ

1-3 国の関与の必要性

図3に示した「航空分野の導入シナリオ」の研究開発分野のうち、材料・構造技術とエンジン要素技術の分野では、我が国はある一定の存在感を示すことができる。一方、本事業が含まれる装備品技術の分野では、スーパーTier1と称されるUTC等の大手サプライヤが大きな存在感を示しており、我が国の優れた技術力を十分に発揮できていないのが現状である。

また、技術開発の世界的な状況では、ドイツの炭素繊維複合材料クラスター

(CFK バレー) やシンガポールの MRO 事業等、航空産業を中心に他の産業にも波及すると考えられる技術や航空産業の主要な一角にかかわる技術を国の重要技術と捉え、国家的なプロジェクトとして系統的な技術開発体制を構築している例も存在する。

このような外的環境の中、我が国産業もこれらに対抗すべく、産学官連携による新技術の開発を推進することが重要である。

本事業で開発を行う「防除氷システム」は飛行安全上重要なシステムであり、各国で様々な開発が行われているが、塗料やコーティングを適用した防除氷システムを実現した例は皆無であり、一社単独での技術開発では、開発期間と費用の面からリスクが高く、技術開発の面からも産学官の例系体制が必要不可欠と判断できる。また、「防氷コーティング」技術は、着氷、着雪現象による安全性や経済性の低下を余儀なくされている他産業分野、例えば、自動車、車両、船舶等の輸送機器から、橋梁や風車等の社会インフラ設備まで、多くの産業分野に波及しうる技術と考えられる。日本発の技術をあらゆる産業分野において世界中へ展開していくためにも、国が積極的に研究開発を実施し、その成果をあらゆる分野へ普及していく必要がある。

2. 研究開発目標

2-1 研究開発目標

2-1-1 全体の目標設定

事業目的に記載した「安全性向上，燃費効率改善，及び環境負荷低減」を実現するために、本プロジェクトでは、飛行条件を模擬した地上実証試験において革新的な防除氷システムコンセプトの有効性を実証することを目標に開発を行った。表1に、本目標を設定した理由・根拠を示す。また、図4に、目標に掲げている革新的な防除氷システムの概要を示す。

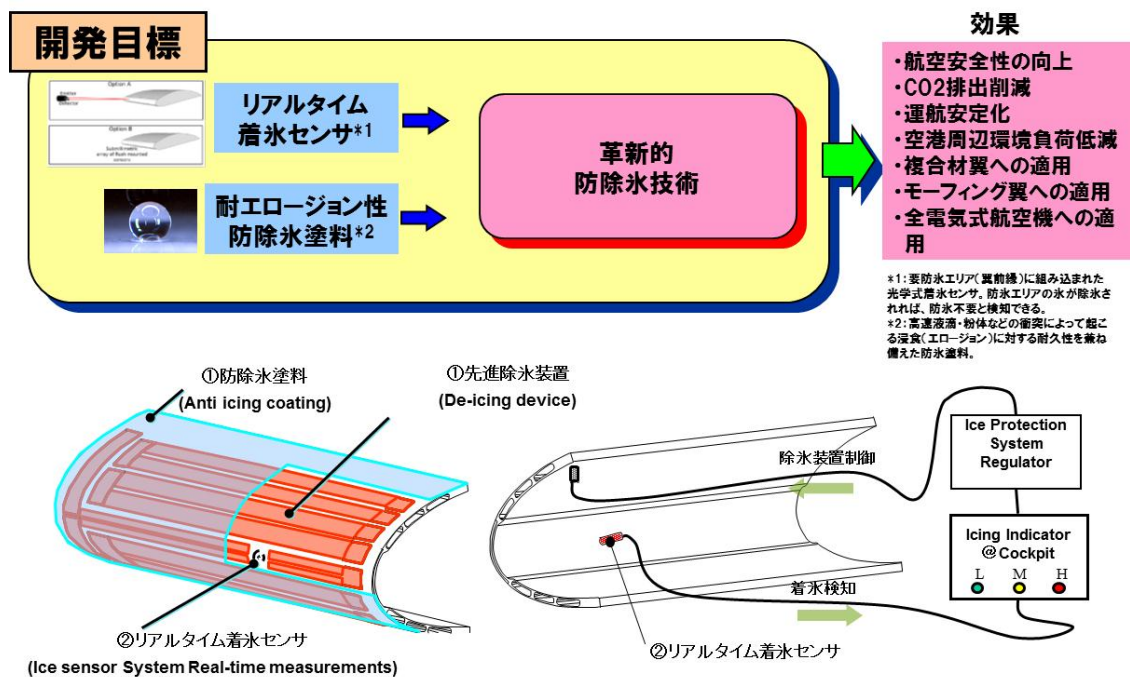


図4 革新的な防除氷システムの概要

表1 全体の目標

目標・指標	設定理由・根拠等
飛行条件を模擬した地上実証試験において革新的な防除氷システムコンセプトの有効性を実証する	気象が原因の航空事故のうち 12% が着氷に起因するものであり、安全性改善の余地があること、防除氷技術の改善により航空機の燃費効率を改善できる可能性があること、薬剤散布による地上除氷作業を低減することにより冬季運航スケジュールの遅れを改善でき、かつ、除氷液の使用量削減により空港周辺の環境影響を低減できることを考慮して目標を設定した

2-1-2 個別要素技術の目標設定

先に示した全体目標を達成するために、本プロジェクトでは、防氷コーティング、防除氷装置、リアルタイム着氷センサを組み合わせた革新的防除氷システムのコンセプト技術を開発することを目的として、以下3つの要素技術の確立を行うこととした。下記要素技術を確立するために設定した目標・指標と、その設定の妥当性・設定理由・根拠等を表2に示す。

1. 省エネルギーな革新的防除氷システムのコンセプトを実証する。
2. 防除氷コーティングの耐久性を向上する。
3. 信頼性のある着氷現象を再現可能な試験法を確立する。

なお、リアルタイム着氷センサは欧州主導の要素技術であり、平成27年度末にコンセプト実証試験の結果が出る予定のため本資料での報告は割愛する。

表2 要素技術とその目標、及び目標設定の妥当性・設定理由

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
省エネルギーな革新的防除氷システムコンセプトの有効性を実証する	防除氷コーティング、防除氷装置、及び着氷センサを組み合わせた革新的な防除氷システムのコンセプトを立案し、各種地上試験にて、その有効性を実証する	飛行安全上大きな脅威と成り得る着氷現象に対して、着氷に伴う事故防止の観点から、より過酷な着氷環境にも対応可能な防除氷システムが求められている 既存の防除氷システムは、エンジン抽気熱を利用するシステムをはじめ、燃費低減をきたすものである このようなシステムの改善を図ると共に、防除氷コーティング、及び着氷センサを組みわせることにより省エネルギー化と安全性を同時に両立できるシステムは革新的な技術と考えられる
防除氷コーティングの耐久性を向上する	撥水性： ・接触角$>130^{\circ}$ ・転落角$<10^{\circ}$ 耐久性： ・レインエロージョン試験後撥水性を維持していること	富士重工業（株）が開発した超撥水コーティング（世界トップレベル）をベースに、その撥水特性を保ちつつ、耐久性の向上を主目的として開発を行うこととした

防除氷システムの地上評価を可能とする試験法、及び、規定の着氷現象を再現できる試験法を設定する	防除氷コーティングの標準的な評価法、及び、米国耐空性審査基準 ⁽¹⁾ の着氷条件を再現できる信頼性の高い試験法を設定する	航空機への適用実績がなく、その評価方法も設定されていない防除氷コーティングの特性を評価するための専用装置を開発し、標準的な評価法を設定すると共に、米国耐空性審査基準に基づく着氷条件を実現し、防除氷システムの評価を可能とする試験法を設定することとした
--	---	--

3. 成果、目標の達成度

3-1 成果

3-1-1 全体成果

飛行条件を模擬した地上実証試験において、提案する革新的防除氷システムの有効性を実証することを目指し開発を進め、以下の成果を得ることができた。

- ・本プロジェクトで開発した耐久性に優れる防除氷コーティングを適用した防除氷システムのコンセプトを提案した。
- ・提案した防除氷システムを適用した翼型模型を製作し、風洞試験において、当該システムと従来塗装を適用したシステムとの比較を行った結果、翼型への着氷を防止するために必要となる電力量を約7割削減できた（図5）。

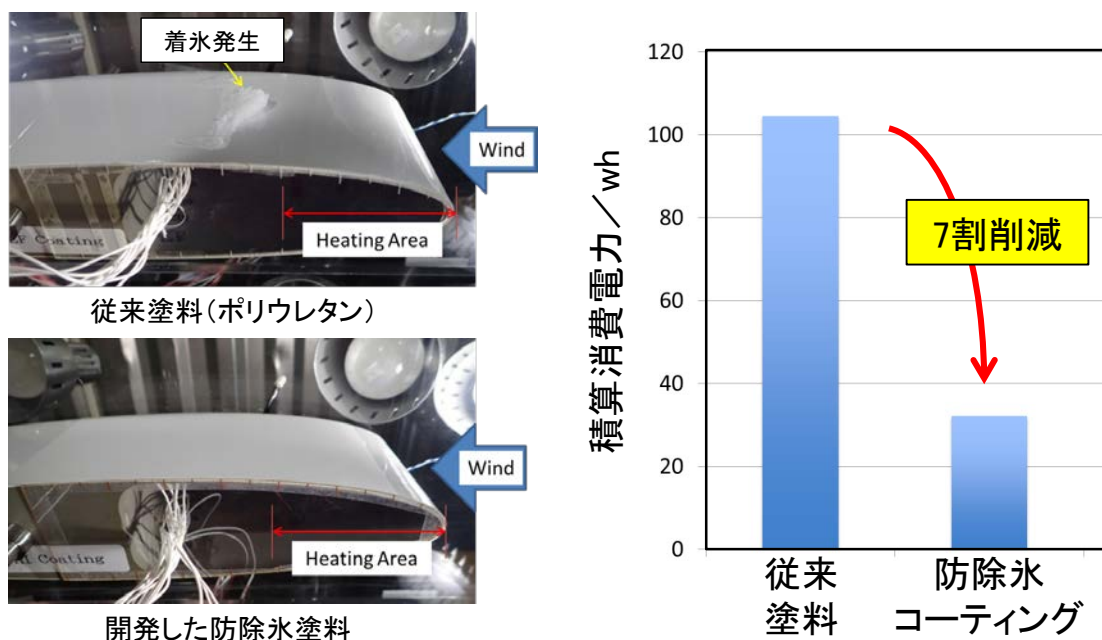


図5 風洞内の試験状況の一例と消費電力の比較

3-1-2 個別要素技術成果

(1) 省エネルギーな革新的防除氷システムコンセプトの証明

本プロジェクトでは、耐久性を向上した防除氷コーティングを適用することによる省エネ化を実現するために、電熱式防除氷システムと組み合わせるコンセプトを立案した。表3に現在航空機に適用されている防除氷システムと防除氷コーティングとの組み合わせのトレードスタディを示す。

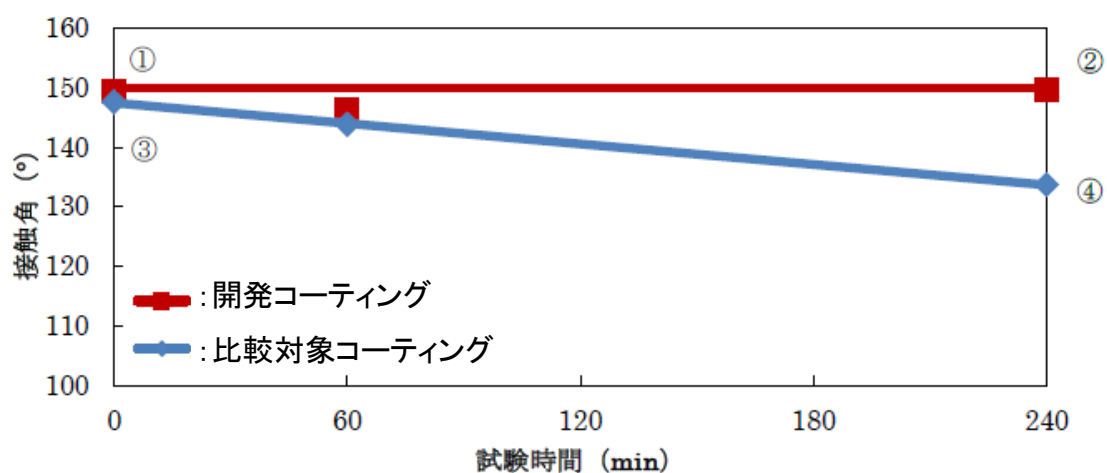
表3 防除氷コンセプト立案のためのトレードスタディ

	熱的防除氷システム		機械的防除氷システム		化学的防除氷システム
	Bleed Air	電熱式	ラバーブーツ	電磁パルス方式	
制御性	×	○	×	○	×
塗料の塗布性	翼の変形などはないため適用可。 (要耐高温性)	翼の変形などはないため適用可。	翼が変形するため適用不可	適用可。(要耐衝撃性)	不凍液散布用孔のため適用困難
効果	低着氷剪断力による除去性能UP ⇒消費電力低下	低着氷剪断力による除去性能UP ⇒消費電力低下	低着氷剪断力による除去性能UP ⇒消費電力低下	低着氷せん断性 ⇒除氷性	不凍液分布を妨げるため効果無
塗料への要求	—	撥水性 ⇒防氷性	—	低着氷せん断性 ⇒除氷性	—

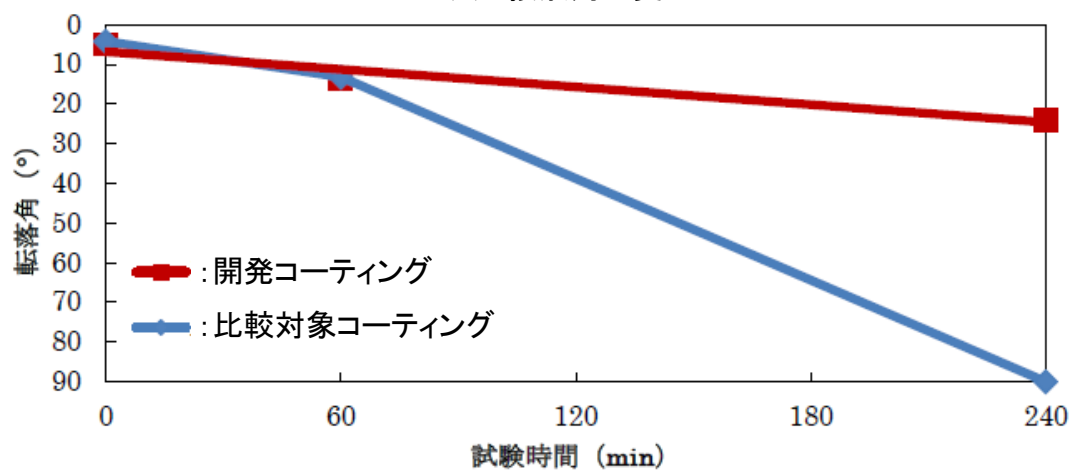
ここで選定したコンセプトに基づき製作した供試体を用いて評価を行った結果、3-1-1 項に示す成果を得ることができた。

(2) 防除氷コーティングの耐久性向上

耐久性の向上に着目して開発を行った。先導研究にて開発した防除氷コーティングはアクリル樹脂に PTFE 粒子を分散させた構成であった。ここでベースとなるアクリル樹脂はコーティングの耐久性に、PTFE 粒子は撥水性に、主として影響を及ぼすと考えられる。そこで耐久性向上のため、ベースとなる樹脂の選定、及び混合する PTFE 粒子の最適量を検討した。その結果、ベースをフッ素樹脂として所定の配合量で PTFE 粒子を分散させることにより、目標とする撥水特性と耐久性を両立する防除氷コーティングを開発することができた(図6, 7)。なお、本評価に使用した装置は、本プロジェクトで開発した防除氷システム評価用装置である。



(a) 接触角の変化



(b) 転落角(滑水性)の変化

図6 レインエロージョン試験による撥水特性の変化

サンプル名	試験前	試験後 (240min)
開発 コーティング	①	②
比較対象 コーティング	③	④

図7 レインエロージョン試験前後の撥水角の比較

(3) 防除氷システムの地上評価を可能とする試験法、及び、規定の着氷現象を再現できる試験法の設定

着氷温度下での接触角と転落角を自動で計測する装置を構築した。計測の自動化により、人的要因による実験誤差の排除と作業効率の向上が実現できた。

飛行環境を模擬した実証試験を行うための風洞の着氷環境設備を改修すると共に、風洞測定部に翼型模型を設置した際の気流の二次元性を確認し、本風洞を用いた実証試験が適正に実施できることを確認した。なお、ここでコンセプト提案を行った防除氷コーティングを適用した防除氷システムの評価は、欧州パートナーであるダッソー社製のビジネスジェット機に対する要求値を活用した。また、着氷風洞試験の条件は、米国耐空性審査基準に基づき設定した。

3-1-3 特許出願状況等

表4に特許・論文等の件数を、表5に論文、投稿、発表、特許リストを示す。

表4 特許・論文等件数

要素技術	論文数	論文の被引用度数	特許等件数(出願を含む)	特許権の実施件数	ライセンス供与数	取得ライセンス料	国際標準への寄与
革新的防除氷システムコンセプト	0	0	0	0	0	0	0
防除氷コーティングの耐久性向上	0	0	1	0	0	0	0
地上評価を可能とする試験法等の設定	0	0	0	0	0	0	0
計	0	0	1	0	0	0	0

表5 論文、投稿、発表、特許リスト

	題目・メディア等	時期
特許	高撥水性の塗膜を形成可能な混合塗料の製作方法	H25.5
投稿	なし	
発表	なし	

3-2 目標の達成度

表 6 に、各要素技術の目標、成果、及びその達成度を示す。表 6 より、全ての要素技術において目標を達成している。

表 6 要素技術とその目標、及び目標設定の妥当性・設定理由

要素技術	目標・指標	成果	達成度
省エネルギーな革新的防除氷システムコンセプトの有効性を実証する	防除氷コーティング、防除氷装置、及び着氷センサを組み合わせた革新的な防除氷システムのコンセプトを立案し、各種地上試験にて、その有効性を実証する	翼最前縁部に高耐久性塗料を、それより後縁部に超撥水性コーティングを適用するという Dual surface ^{※1} と、電熱ヒータによる除氷システムとを組み合わせた革新的な防除氷システムを提案し、風洞試験にて、7 割の消費電力低減が可能なことを実証した	達成
防除氷コーティングの耐久性を向上する	撥水特性： ・接触角 $>130^{\circ}$ ・転落角 $<10^{\circ}$ 耐久性： ・レインエロージョン試験後撥水性を維持していること	開発品の撥水特性： ・接触角 $=154.1^{\circ}$ ・転落角 $=4.2^{\circ}$ 耐久性： ・レインエロージョン試験後の撥水性に変化は見られず、高い耐久性を確認した	達成
防除氷システムの地上評価を可能とする試験法、及び、規定の着氷現象を再現できる試験法を設定する	防除氷コーティングの標準的な評価法、及び、米国耐空性審査基準 ⁽¹⁾ の着氷条件を再現できる信頼性の高い試験法を設定する	防除氷コーティングの特性を評価するための評価法を設定すると共に、米国航空規格に基づく着氷条件を設定できる風洞試験法を設定した	達成

※1 Dual surface：翼前縁部分には耐久性の高い塗膜または素材を適用し、それより後縁表面に撥水性に優れる開発コーティングを適用する方法。「着氷防止構造を有する翼構造体（特開 2010-234989）」に基づく。

4. 事業化、波及効果について

4-1 事業化の見通し

本プロジェクトにて開発した要素技術の1つである「耐久性のある防除氷コーティング」について、航空機への適用を目指し、飛行試験を計画中である。本飛行試験にて実環境での評価を行い、本プロジェクトにおいて評価を行った地上実証試験の結果の妥当性を検証するとともに、開発した防除氷コーティングの性能評価を行う計画である（図8）。

事業化については、飛行試験結果の評価・反映はもちろんのこと、競合技術の分析やサプライチェーンに関する検討等を行い、早期の実現を目指したい。

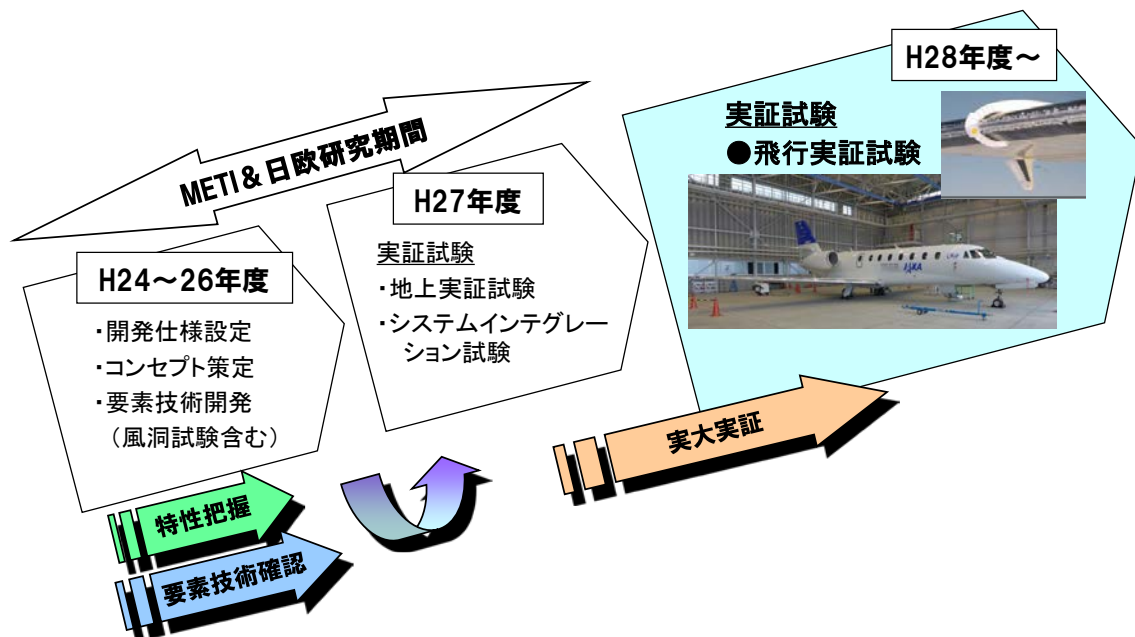


図8 開発ステップ概要

4-2 波及効果

着氷に伴う経済性的損失は、航空機のみならず、風力発電ブレード、送電線、車両、船舶等多くの産業分野に影響を与えている。本プロジェクトで開発した防除氷コーティングは、図9に示す分野等への波及が見込まれる。これらの分野に属する事業者が開発したコーティングの特性や適用のメリットを紹介し、可能性のある分野において、事業化の道筋を策定したい。

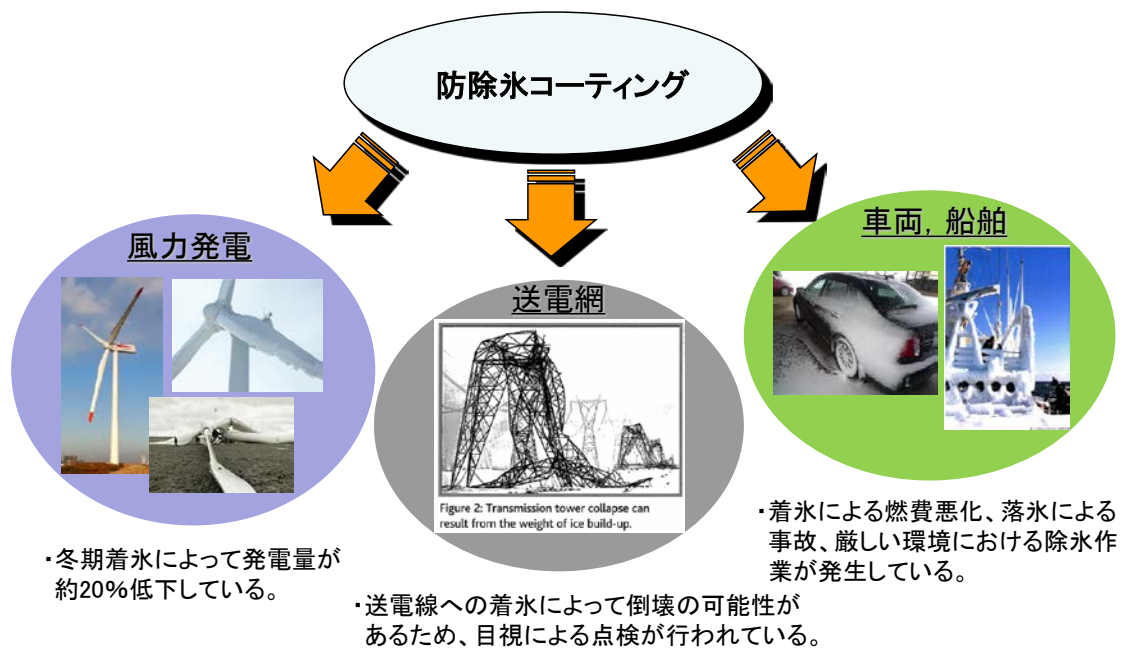
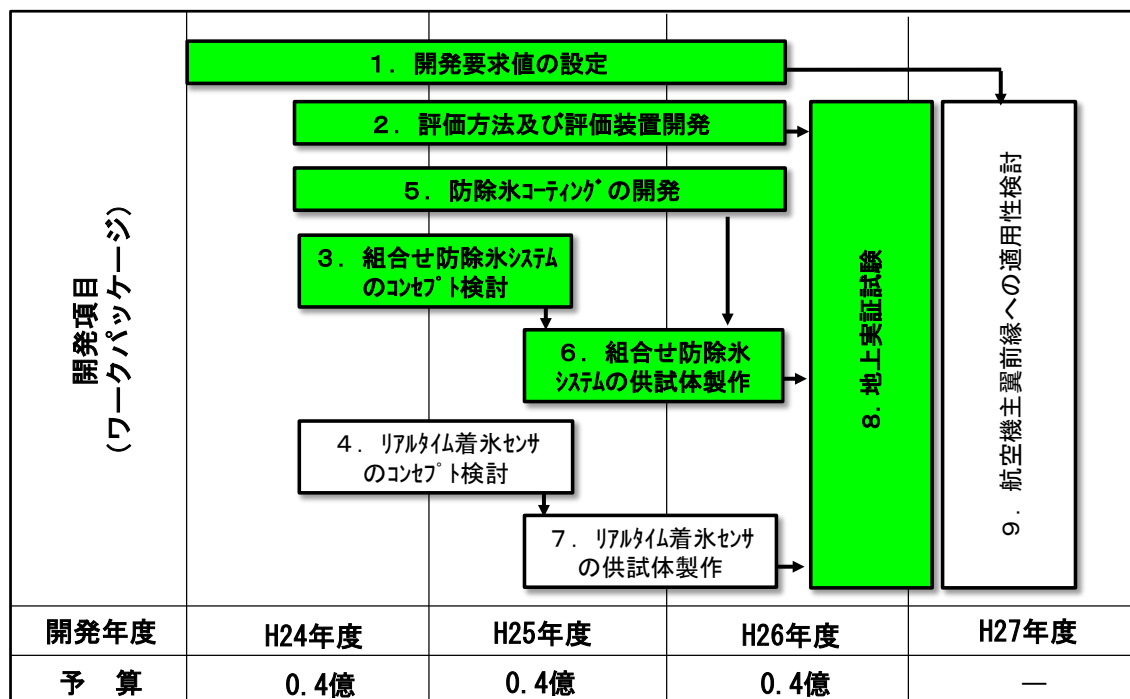


図9 ニーズがあると考えられる分野

5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

5-1 研究開発計画

目標達成のために、本プロジェクトでは、開発項目を図10に示す9つのワークパッケージに分割して取り組んだ。また、効果的に開発を進められるように、国内の参画機関を中心に年3回の技術委員会を開催するとともに、欧州パートナーとも年2回の日欧合同会議を開催し、計画調整／進捗確認／情報共有等を適宜行った。その結果、ほぼ計画通りに開発を進めることができた。



※表中の緑色の部分を、日本側にて主導的に実施した。

※平成 27 年度については富士重工業（株）の持ち出しで実施中である。

図 10 研究開発計画

5-2 研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、富士重工業株式会社が経済産業省からの委託を受けて実施した。また、再委託先として宇宙航空研究開発機構と神奈川工科大学が参加した。

研究開発の実施に当たっては、研究開発を統括するためのプロジェクトリーダー（富士重工業株式会社 研究部長）を設置するとともに、プロジェクトを計画通り進捗するため、また、開発の方向性を見誤らないため、開発担当機関以外の有識者からなる技術委員会（東京理科大学 山本委員長）を設置した。

図 11 に具体的な実施体制を示す。富士重工業株式会社がプロジェクト全体の統括を行い、研究開発のマネジメントを実施した。先に示した通り、研究開発の目標・計画の妥当性、研究開発の進捗確認、及び技術的内容の精査について、年 3 回の技術委員会を開催し、開発担当機関以外の有識者の評価を頂きながら開発を進めてきた。

これと同時に、欧州パートナーと共に、年 2 回の日欧合同会議を開催し、開発の総合調整や技術に関する詳細な議論を行った。更に、着氷関連のワークショップや航空関連の委員会等に参加し、開発成果の発表等を行った。

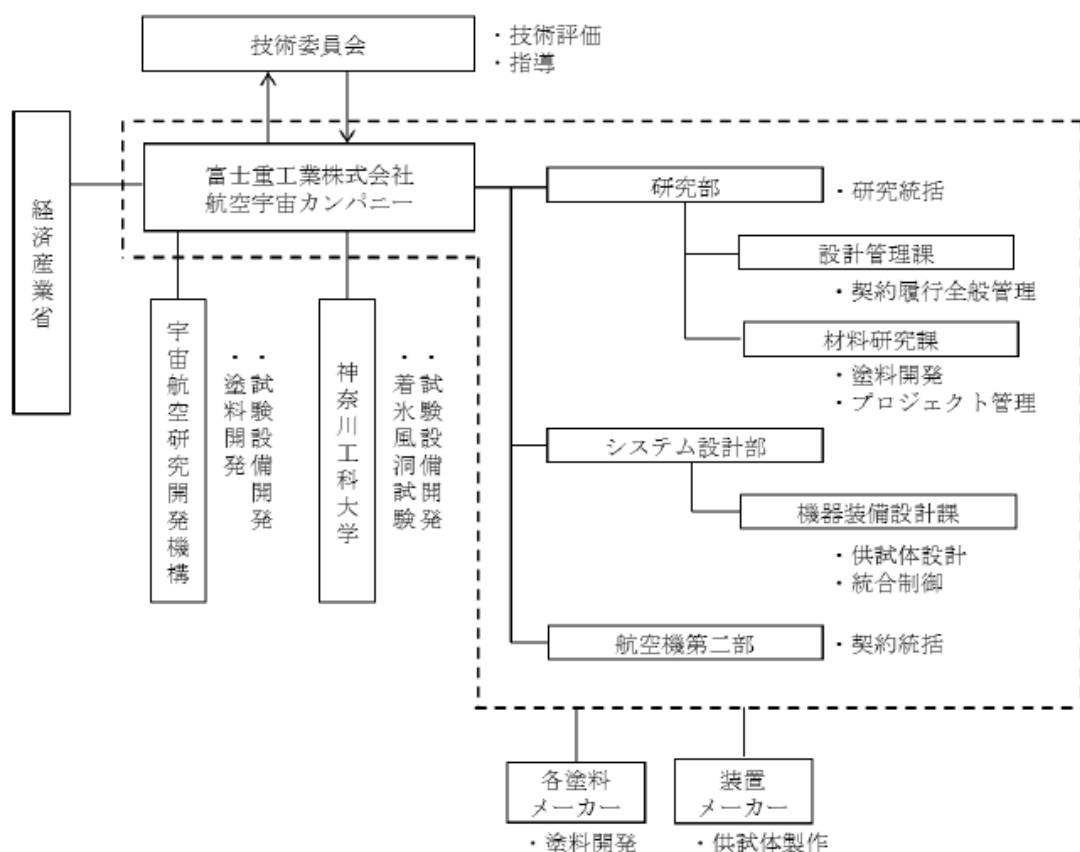


図 11 日本側の実施体制

5-3 資金配分

当初の計画通り開発を進捗できたため、資金配分も妥当であったと判断する。

表 7 資金度配分 (単位：百万円，税抜)

年度 平成	2 4	2 5	2 6	合計
革新的防除氷システム技術開発				
革新的防除氷システムコンセプトの有効性実証	11.7	17.0	20.0	48.7
防除氷コーティングの耐久性向上	14.5	11.0	16.0	41.5
防除氷システムの評価法設定	11.8	10.0	1.0	22.8
合計	38	38	37	120

5－4 費用対効果

プロジェクトの期間内で、当初の目標を達成できたことを考えると、本研究開発の費用対効果は妥当と判断できる。今後は、早期の実用化を実現して事業的にも優れた費用対効果を実現できるよう開発を進めていく。

5－5 変化への対応

プロジェクトの2年目で、航空機の着氷に関する耐空性基準⁽¹⁾が改訂されたが、当初の目標設定が適切であったため、本基準の変更にも適応可能な防除氷システムを開発することができた。

参考文献

- (1) FAA FAR Part 25 : Federal Aviation Administration Federal Aviation Regulation Part 25。米国連邦航空局が定める規格で、Part 25 は輸送機に関連する規格がまとめられている。