

航空機用先進システム基盤技術開発 （耐雷・帯電特性解析技術開発） の概要について

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. プロジェクトの概要
2. 目的・政策的位置付け
3. 目標
4. 成果、目標の達成度
5. 事業化、波及効果
6. 研究開発マネジメント・体制等

1. プロジェクトの概要

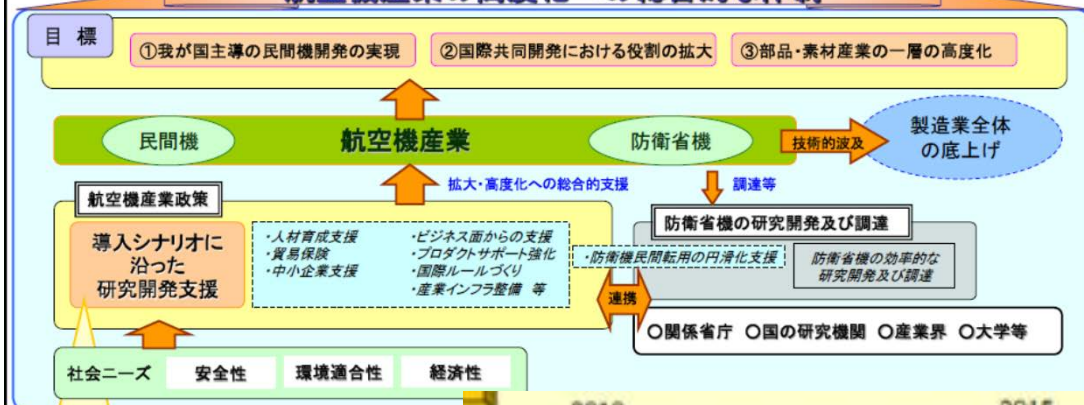
概 要	航空機構造における耐雷・帯電等の電氣的現象及びその影響を解析及び試験により解明し、航空機の安全性を確保するための耐雷・防爆解析技術を開発する。
実施期間	平成22年度～平成26年度（5年間）
予算総額	6.5億円(委託) (平成22年度:0.4億円 平成23年度:1.4億円 平成24年度:1.1億円) (平成25年度:1.9億円 平成26年度:1.7億円)
実 施 者	富士重工業株式会社 航空宇宙カンパニー
プロジェクト リーダー	村田 巖 富士重工業(株)航空宇宙カンパニー研究部 部長

2. プロジェクトの目的・政策的位置付け

目的：炭素繊維複合材航空機設計の耐雷帯電解析技術を確立する

政策的位置付け：航空機産業施策に係る「航空機・宇宙産業イノベーションプログラム」に基づき、事業を推進している

航空機産業の高度化への総合的な体制



3. 目標(1/5)

航空機設計へ適用する耐雷帯電解析技術の構築のため、以下の要素技術を開発する。

- ①解析手法の開発 ②放電現象の研究 ③帯電現象の研究
④検証方法の検討 ⑤測定方法の開発

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
①解析手法の開発	①実大燃料タンク・システム供試体において従来開発手法と比し、開発時間を30%以上短縮する見通しを得る	現状の解析精度は50%程度であるため、耐雷設計の検証のために多く試験が必要である。この課題を解決するために、解析精度を70%に引き上げるとともに高速化し、試験に要する時間を30%以上短縮することを目標として設定した。
	②複雑な構造での電流経路及び放電部特定等の解析を可能とする解析ツール体系を確立する	高精度な解析により放電箇所を事前に特定し、最小限の認証試験にて耐雷性を証明して、設計作業を低減するのが本事業の目的である。この目的を達成するためには、航空機耐雷性認証に使用できることを証明する必要がある、設計標準化した体系的な放電箇所特定プログラムの確立が必要である。
	③TRL5相当	本研究開発における技術の到達目標は、実機へも適用可能なレベルであることを検証すること目標とし、実機の構造様式での解析と、試験での実証を設定した。
	④国際標準への提案	解析手法を国際標準化し、航空機設計に使用可能とするための提案活動を実施し、標準化の目処をつけるのを目標として設定した。

3. 目標(2/5)

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
②放電現象の研究	①放電開始箇所および条件の確立	放電開始箇所の特定は、前項の「①解析手法の開発」の電磁界解析等で得られる電流／電圧集中の推算結果を基に、放電現象が発生する諸条件を適用する手法で実施する。従って、解析を適用する範囲を明確にするため、放電の開始箇所および条件の確立を目標とした。
	②航空機燃料タンク部におけるスパーク発生の可能性がある放電原理の解明	解析と放電発生条件を組み合わせ、放電発生箇所の特定技術を開発するには、放電を支配するパラメータを明確にする必要があり、放電のメカニズムまで解明した上でパラメータを設定する必要がある。 このため、航空機燃料タンク部におけるスパーク発生の可能性のある放電原理を洗い出し、放電の可能性のある原理を解明することを目標とした。
	③放電検出技術の確立	放電箇所の検出の課題としては、現状の国際標準ではフィルム・カメラ撮影法およびガス引火法であり、複雑な構造内部での放電箇所の特定では撮影法だとブラインドが多く、またガス引火法では放電の発生は分かるが、放電箇所の特定は困難である。このような国際標準上での課題を解決するため、構造内部にセンサを巡らせて、放電箇所を特定する検出技術の確立を目標とした。
	④国際標準への提案	開発した放電技術が航空機設計で使用可能になるよう国際標準へ提案活動を実施し、標準化の目処をつけることを目標とした。

3. 目標(3/5)

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
③帯電現象の研究	①航空機燃料タンク部におけるスパーク発生の可能性のある放電原理解明	燃料タンクにおける帯電原理は、燃料の流動による摩擦および引き剥がし等により電荷が発生することを起因している。このため、動的な電荷の移動を解析する必要があるが、計算は困難であり、未だ確立していない。本研究は、電荷の移動の計算方法を研究し、解析手法の開発に反映することを目標とする。また、解析と同様に動的な電荷の移動の試験方法も確立していないため、本研究は、試験方法も研究し、電荷の移動の計算方法の有効性を確認することも目標とする。

3. 目標(4/5)

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
④検証方法の検討	①炭素繊維複合材料の材料／構造の電気的特性の取得	解析技術の高精度／高速化を狙うためには、解析パラメータとなる炭素繊維複合材料の各種積層方法や、材料と継手の組合せ等の数値化がノウハウとなる。 よって、材料と構造の各種組合せを網羅した電気特性データベースを確立することを目標とした。
	②実大燃料タンク・システム供試体にて耐雷／静電気防爆試験を実施し、解析結果を実証	解析技術の高い精度を証明するため、実際の航空機と同等の形状／寸法の燃料タンク・システムを模擬し、かつ、解析を証明するデータが取得可能となる供試体での実証を目標として設定した。
	③国際標準化に向けた解析技術の証明方法の確立	最終的に国際標準化のために解析方法を証明するには、解析の実証法が国際標準に適合することを証明する必要がある。よって、国際標準で認められる解析技術証明方法の確立を目標と設定した。

3. 目標(5/5)

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
⑤測定方法の開発	①炭素繊維複合材料の材料／構造の電気的特性の測定方法確立	解析技術の高精度／高速化を狙うためには、解析パラメータとなる炭素繊維複合材構造の数値化が必要である。ただし炭素複合材料の電気特性は複雑であることが予測され、高精度の測定技術がノウハウとなる。よって、精度良く複合材料の電気特性を取得する測定方法の確立を目標として設定した。

4. 成果、目標の達成度(1／11)

課題であった炭素繊維複合材の繊維の影響による導電率の異方性を解析可能とする手法を世界に先駆けて開発し、目標を達成している。

解析の国際標準化は、時間をかけて進めていく課題がある。
引き続き国際標準委員会の動向を見極めて提案していく。

要素技術	目標・指標	成 果	達成度
① 解析手法 の開発	①実大燃料タンク・システム供試体において従来開発手法と比し、開発時間を30%以上短縮する見通しを得る	・翼胴結合供試体において試験と解析の比較検証を実施し、試験に対して誤差30%以内で解析が合うことを確認した。これより、試験期間を30%以上低減できる見通しを得た。	達成
	②複雑な構造での電流経路及び放電部特定等の解析を可能とする解析ツール体系を確立する	・複雑な電流経路をつくる複合材繊維の導電率の異方性を、層ごとに表現した解析手法を開発して検証した。	達成
	③TRL5相当	・翼胴結合供試体を用いた検証結果にて、妥当の評価を得た。	達成
	④国際標準への提案	・SAE標準へ解析および試験法を報告したが、未だハイレベルの規定の見直しの最中であり、組織化には至っていない。	一部 達成

4. 成果、目標の達成度(2/11)

実証段階において、要素技術の最終目標を達成している。
国際標準化活動の継続が必要である。

要素技術	目標・指標	成 果	達成度
② 放電現象 の研究	①放電開始箇所および条件の確立	・雷電流量と構造の接合方式の相関を試験にて確認し、放電開始しきい値としてまとめた。 ・試験でのデータ取得方法はFAA DER有資格者のレビューを受け、妥当との評価を受けた。	達成
	②航空機燃料タンク部におけるスパーク発生の可能性がある放電原理の解明	・構造の抵抗による電流密度と電位分布が主要な放電発生原因と特定した。 ・機体の各種構造部位での放電開始条件を試験にて確認した。	達成
	③放電検出技術の確立	・放電光によるエネルギー分析手法を開発し、引火する恐れのある放電を探知する技術を開発した。	達成
	④国際標準への提案	・標準化団体SAE Internationalへ放電探知標準の見直しを提案し、標準見直し活動が具体的に開始された。	達成

4. 成果、目標の達成度(3/11)

他には無い、燃料の流動を考慮した動的な電荷の解析および試験にチャレンジし、解析手法および試験手法を開発した。

但し、検証試験において電荷移動の測定精度に課題が残った。

要素技術	目標・指標	成 果	達成度
③ 帯電現象 の研究	①航空機燃料タンク部におけるスパーク発生の可能性がある放電原理解明	帯電による電位分布の発生原理を研究し、以下の成果を得た。 ・3次元での電荷移動原理を解明し、解析手法を開発した。燃料の帯電現象の傾向を推定可能となった。 ・燃料の流体運動を含めた電荷の移動を研究し、解析手法を開発した。流体運動が電位分布へ与える影響を推定可能となった。 ・艀装等を含む燃料タンク供試体を用いた帯電試験手法を開発した。 ・ただし、解析の主要パラメータである電荷の移動度の測定精度に課題が残り、精密な解析を得るには至っていない。	一部 達成

4. 成果、目標の達成度(4/11)

要素確認の基本設計段階において、各要素技術の年度目標を達成している。

要素技術	目標・指標	成 果	達成度
④ 検証方法 の検討	①炭素繊維複合材料の材料／構造の電気的特性の取得	・構造および材料の導電率等のデータを得た。また、取得データを解析に適用し、有効性を確認した。 ・複合材繊維の異方性の影響を測定する手法を開発し、炭素繊維複合材の特性データを得た。	達成
	②実大燃料タンク・システム供試体にて耐雷／静電気防爆試験を実施し、解析結果を実証	・機体に着雷した位置により、複数の雷電流経路が発生する。これら電流経路を燃料タンク部で再現する試験方法を開発した。試験にて電流経路が異なる場合の電流分布の傾向を取得した。	達成
	③国際標準化に向けた解析技術の証明方法の確立	・試験方法および解析の検証法は、FAA DER有資格者のレビューを受け、妥当な適合範囲との評価を受けた。	達成

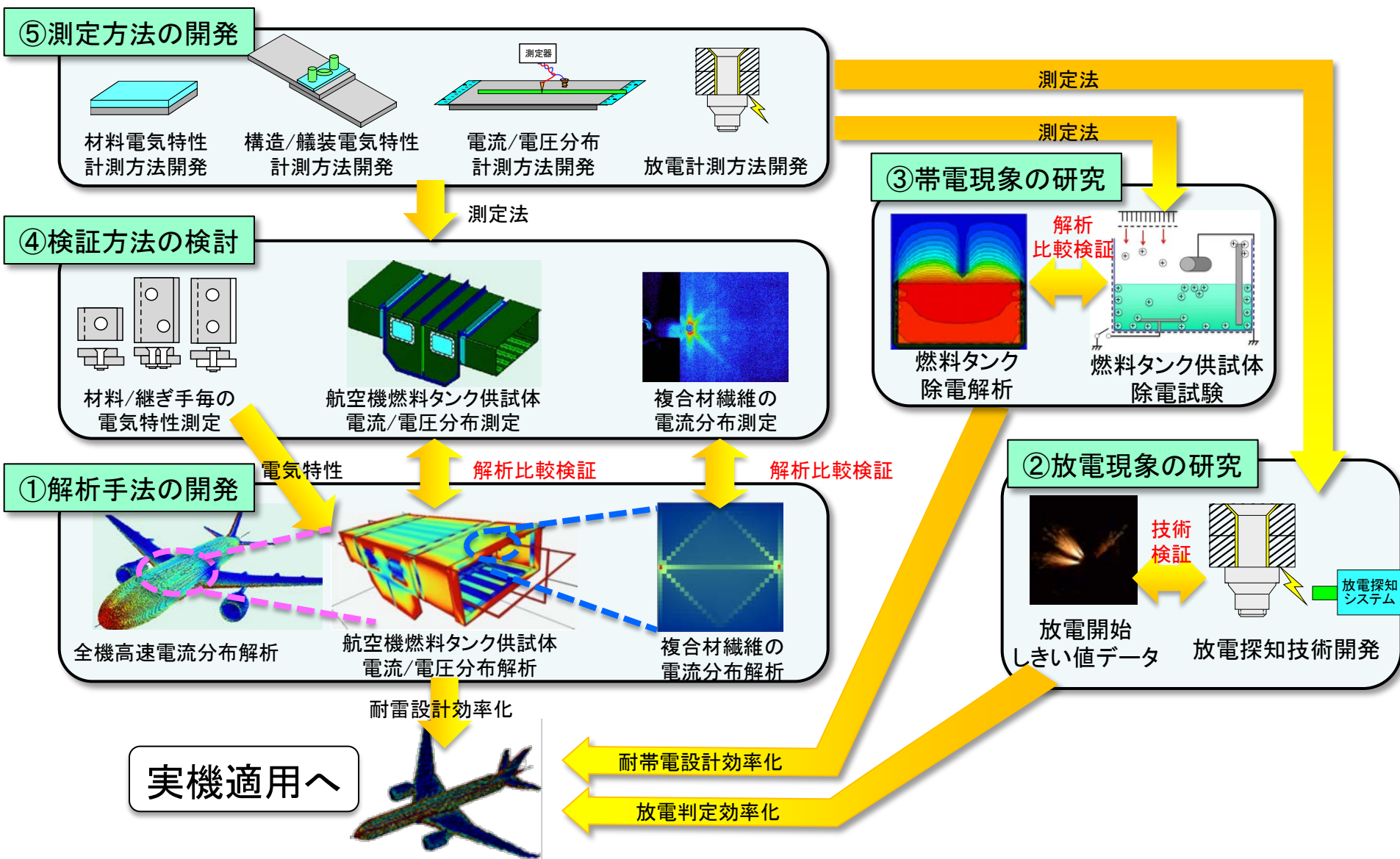
4. 成果、目標の達成度(5／11)

要素確認の基本設計段階において、各要素技術の年度目標を達成している。

要素技術	目標・指標	成 果	達成度
⑤ 測定方法 の開発	①炭素繊維複合材料の材料／構造の電気的特性の測定方法確立	耐雷材と複合材の相関関係や、複合材繊維方向等の特性を測定可能とする供試体／治具を設計し、試験にて有効性を確認した。	達成

4. 成果、目標の達成度(6/11)

◆耐雷・帯電特性解析技術開発の概要

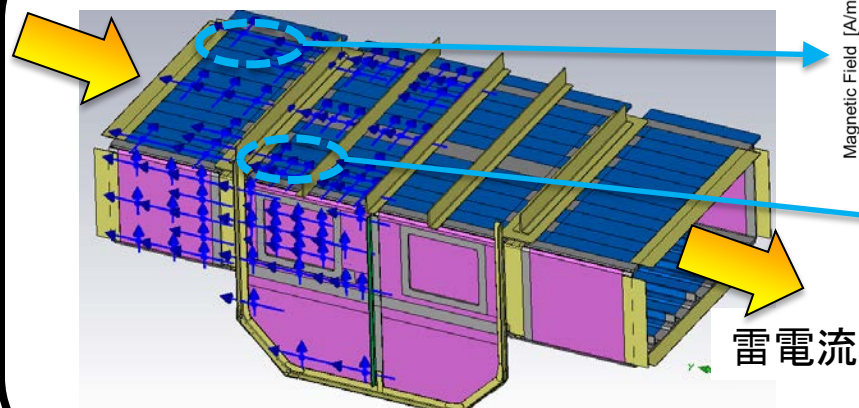


4. 成果、目標の達成度(7/11)

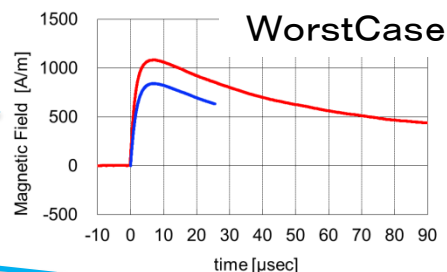
①解析手法の開発

複雑な航空機構造まで解析可能な、雷電流解析手法を開発し、試験にて検証した。

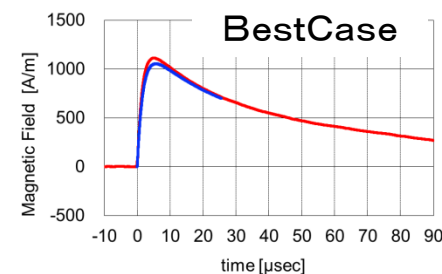
航空機で最も複雑な燃料タンク構造



翼胴結合部モデルの実験と解析



解析精度70%以上
を達成した

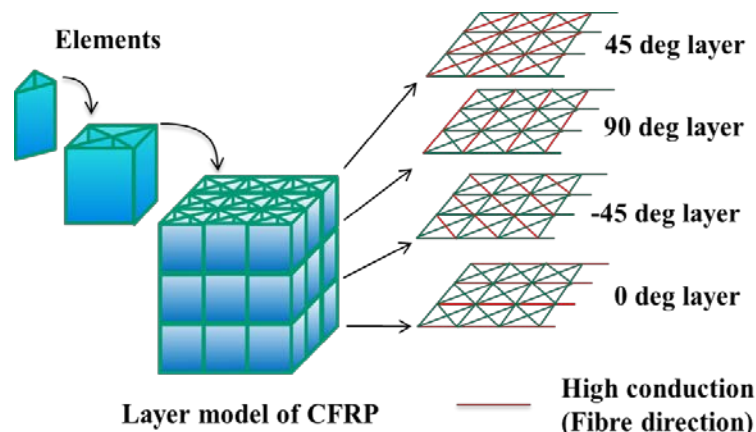


Red : 実験
Blue : 解析

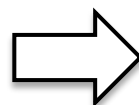
表面磁界(電流分布)を比較

複合材の繊維層の雷電流分布に至る、局所的な解析手法を開発し、試験にて検証した。

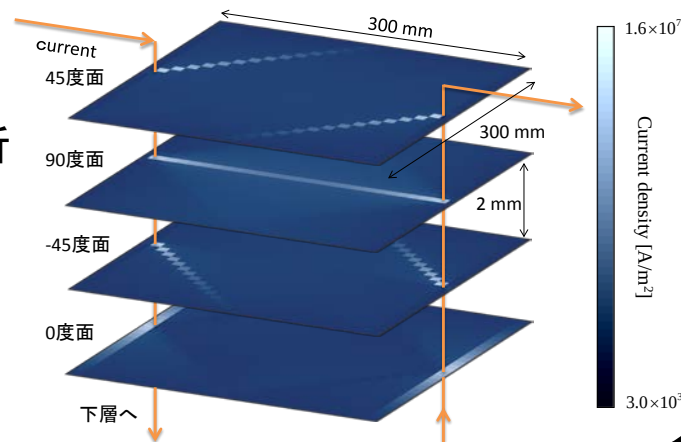
三角柱格子による新解析手法の開発(特許出願:1件)



ファスナ間の
局所的な解析
に適用



CFRP層毎の詳細な解析を実現



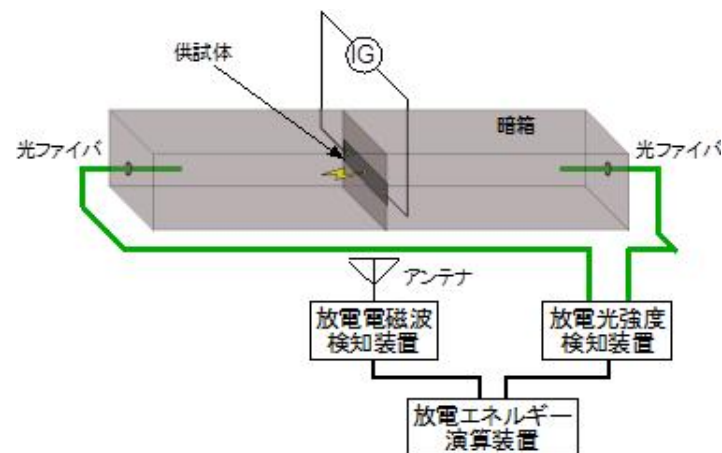
4. 成果、目標の達成度(8/11)

②放電現象の研究

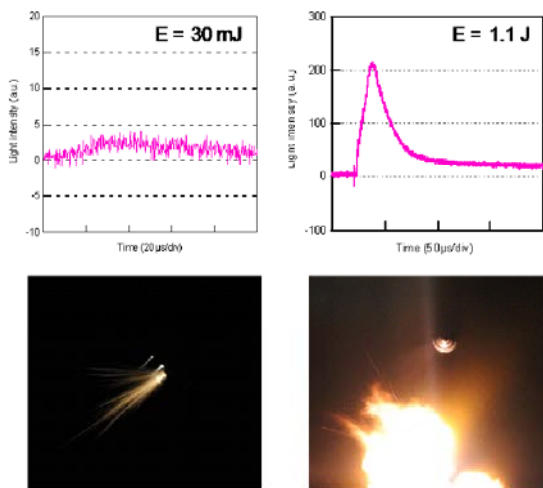
航空機燃料タンク部において、引火の危険性がある放電発生を研究した。各種放電を検討した結果、雷電流でファスナから発生する熱的スパークを課題とした。

課題解決のため、熱的スパークが発生開始するしきい値とその探知方法を研究し、耐雷構造設計や認証試験を低コスト化する試験手法を開発した。

- ・放電光強度から引火エネルギーを算定する放電探知システムの開発と国際標準化提案実施した。
- ・複合材構造における放電が発生するしきい値をまとめた。

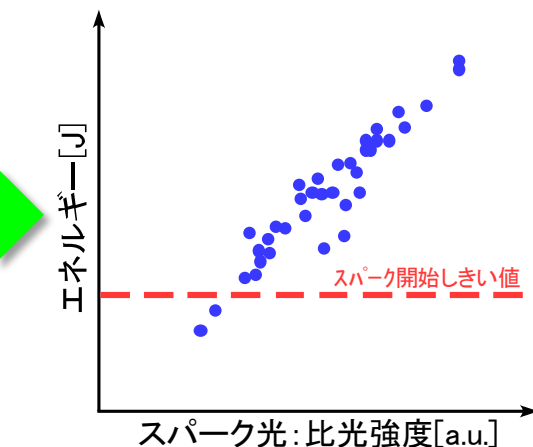


放電光検出実験構成概略図



放電の光度と引火開始を測定

(特許出願: 4件)



放電光とエネルギーの相関を

チャート化

放電光だけで、耐雷設計を確認できる、低コストの試験法を開発

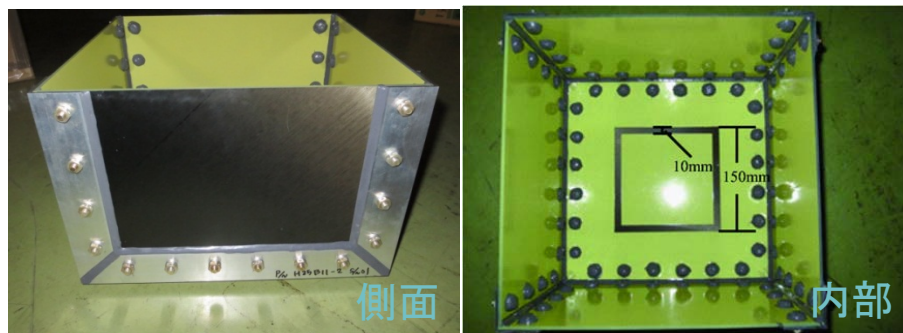
国際標準化提案

4. 成果、目標の達成度(9/11)

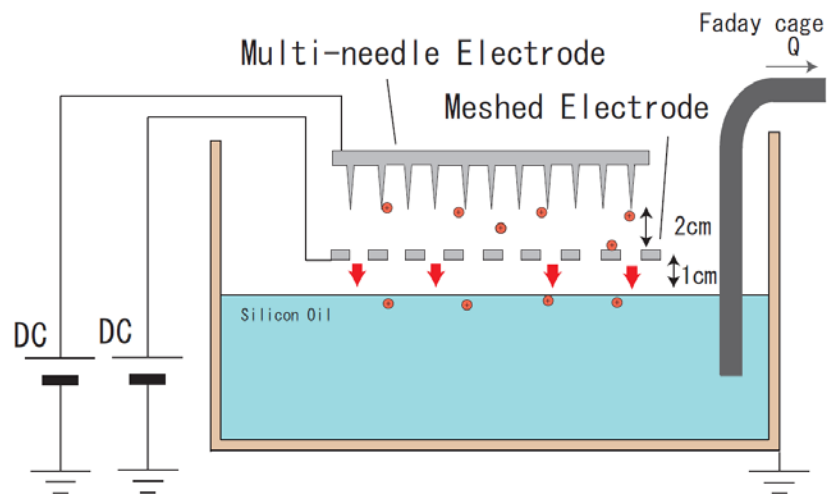
③帯電現象の研究

燃料に帯電した静電気が除電される様子が再現可能な解析手法を、実験手法と共に開発した。

静電気の振舞いを測定可能な実験装置を開発

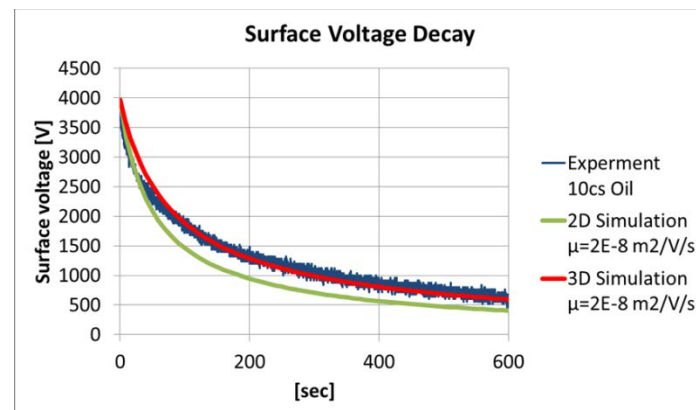


CFRP製の模擬燃料タンク例

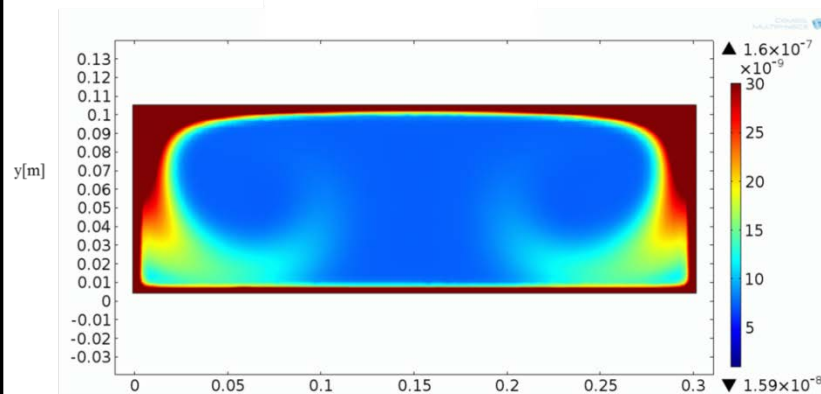


針電極により帯電を行い、帯電した静電気が燃料タンクの壁面から除電する割合を液面の電位減衰により測定

燃料対流を含めた帯電解析を開発し、解析と実験の除電傾向を検証した。



燃料表面の電位減衰の比較



燃料が対流した場合の、ある瞬間における電荷密度分布の計算例

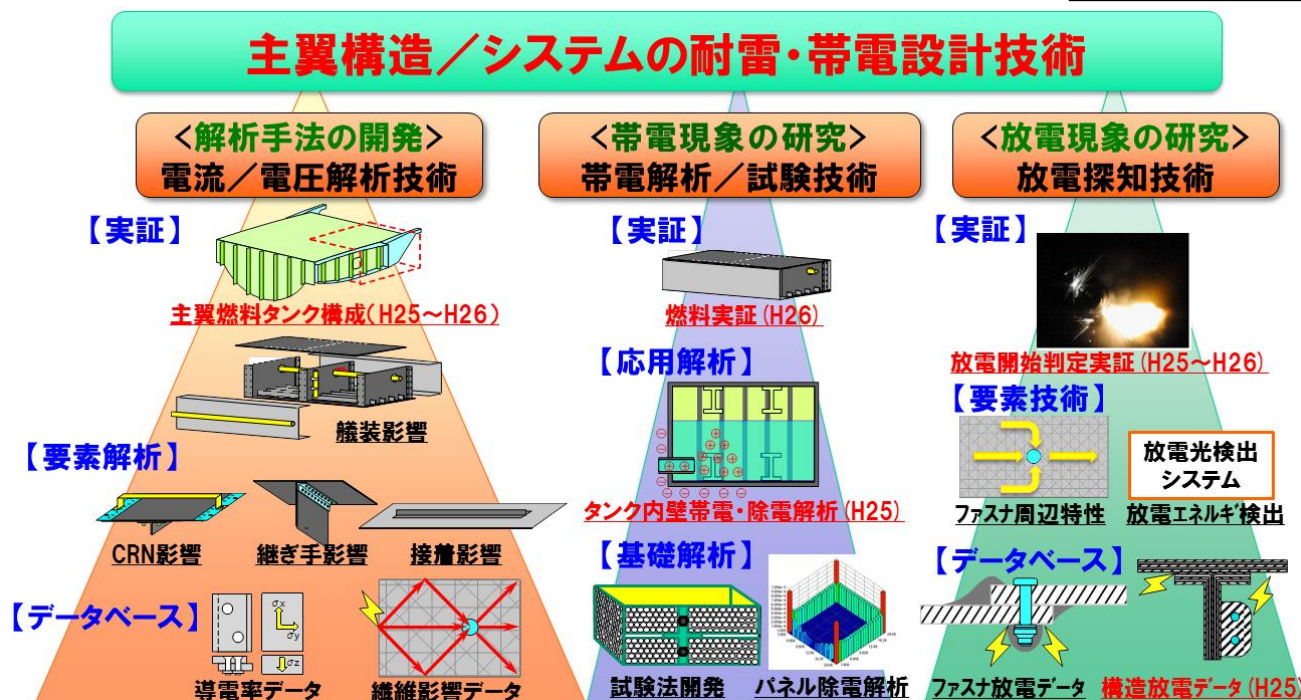
4. 成果、目標の達成度(10/11)

④検証方法の検討

- ・最終目標は実機相当の主翼燃料タンク構成での検証法である。
- ・複雑な構造を要素レベルに分解して各要素の特性データを取得した。
- ・要素レベルのデータを基にモデル検証し、徐々に複雑な構造へステップアップして解析手法を確立した。



主翼燃料タンク(翼胴結合)供試体



検証計画

- ・電気特性試験にて解析用データベースを取得した。
- ・航空機の燃料タンクで最も複雑な電流経路となる主翼と胴体が結合する翼動結合部の構造を模擬した供試体を用い、実証試験を実施し、解析の有効性を確認した。

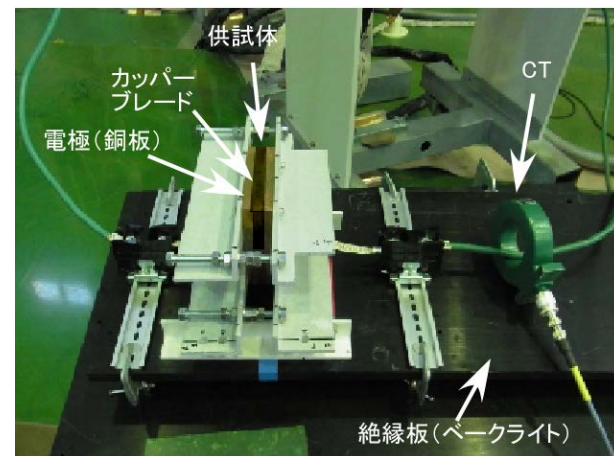
4. 成果、目標の達成度(11/11)

⑤測定方法の開発

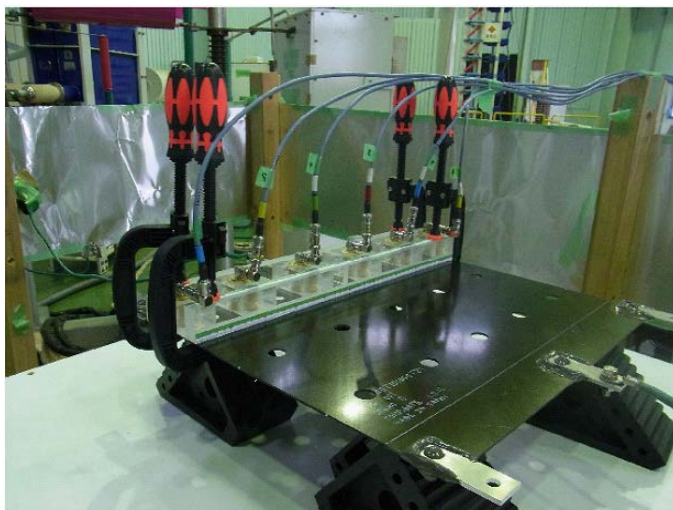
炭素繊維複合材の繊維の影響で生じる複雑な電気特性を測定可能とする測定方法を開発した。

- ・ 複合材の繊維面断面方向／厚さ方向の導電率測定方法を確認した。
- ・ 電流密度分布測定方法を確認した。

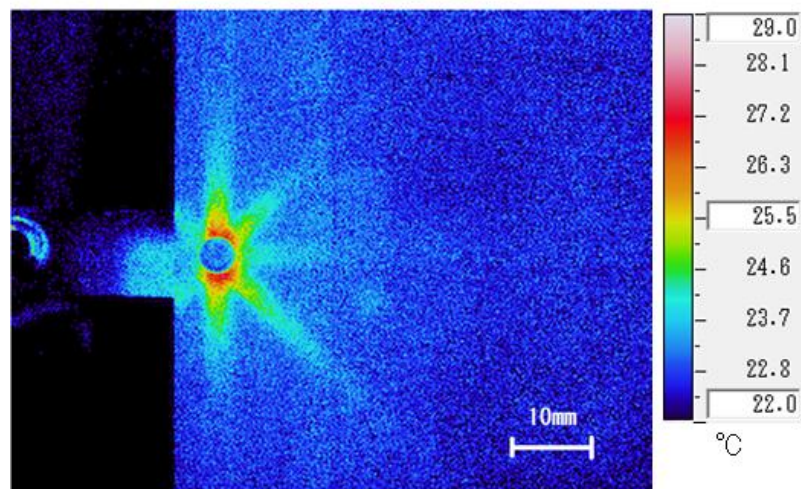
(特許出願: 3件)



複合材電気特性取得試験構成



構造表面電流分布測定概要



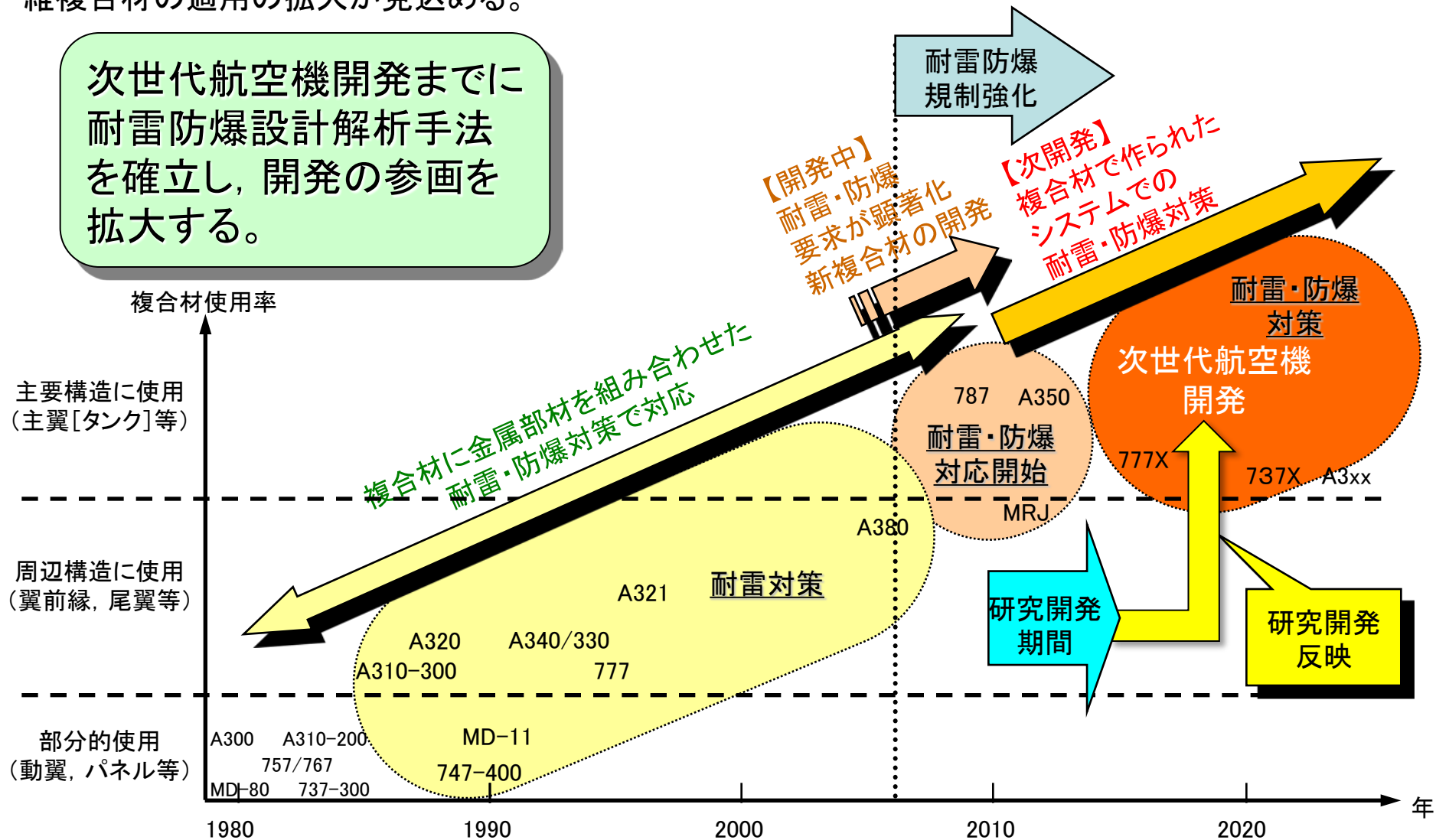
温度による電流分布測定

5. 事業化、波及効果

航空機への炭素繊維複合材の適用拡大は、雷のリスクが阻害要因となっている。

雷のリスクを設計開発段階で排除する解析・試験技術を確認することにより、航空機への炭素繊維複合材の適用の拡大が見込める。

次世代航空機開発までに
耐雷防爆設計解析手法
を確立し、開発の参画を
拡大する。



5. 事業化、波及効果

経済・環境対策を目指した複合材適用による軽量化は、航空機のみならず車両、船舶等の輸送機器から風力発電、石油タンク等まで多くの産業分野に拡大していく。

安全設計の担保として耐雷・防爆解析手法は必須

耐雷／帯電特性の解析技術

耐雷防爆設計の設計技術

送電網



(財)電力中央研究所

- ・複雑な送電網の誘導雷，フラッシュオーバーの解析

輸送機器



- ・自動車，列車，船舶等の防爆

水素社会に向けて輸送機器の軽量化のため複合材化が進む

発電所，建築物等

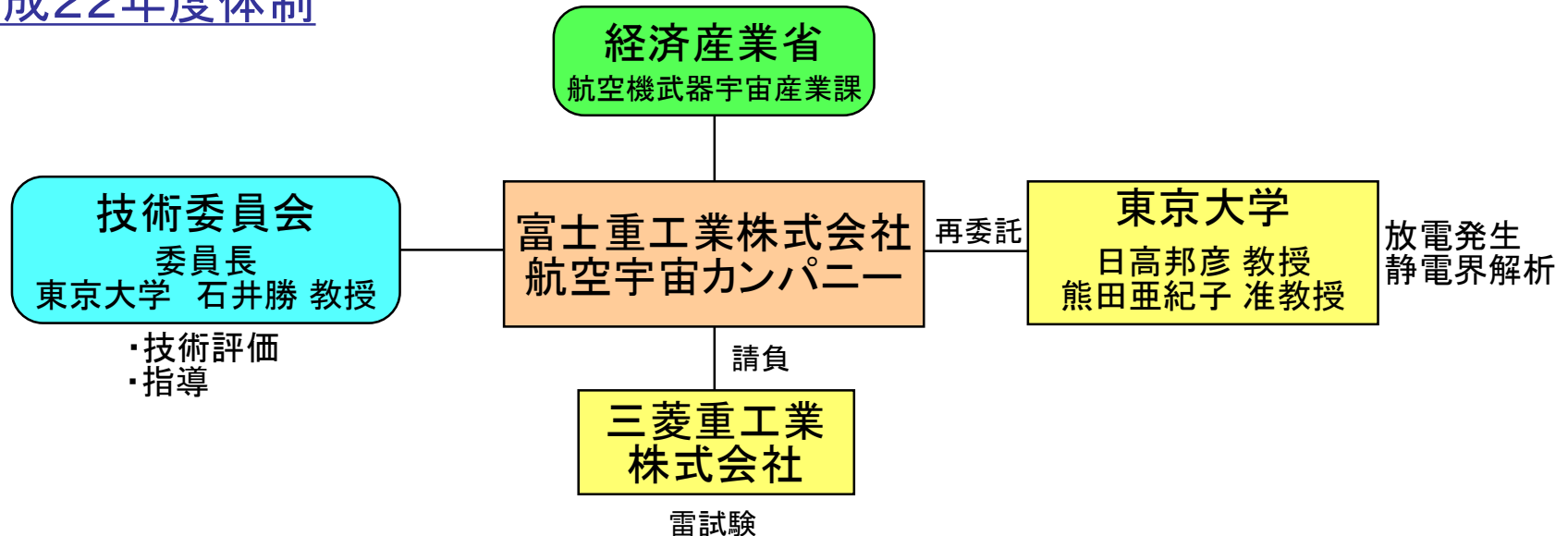


- ・水素タンク，風力発電，建築物等の耐雷／防爆
特に風力発電の雷被害は深刻な問題

6. 研究開発マネジメント・体制等(1/5)

- ・富士重工業株式会社航空宇宙カンパニーが経済産業省からの委託を受けて実施した
- ・富士重工業株式会社航空宇宙カンパニーがプロジェクト管理を実施した
- ・計画・進捗指導のため技術委員会を設置し、東京大学石井勝教授(当時、平成26年度より名誉教授)を技術開発評価の統括として委員長に選任した

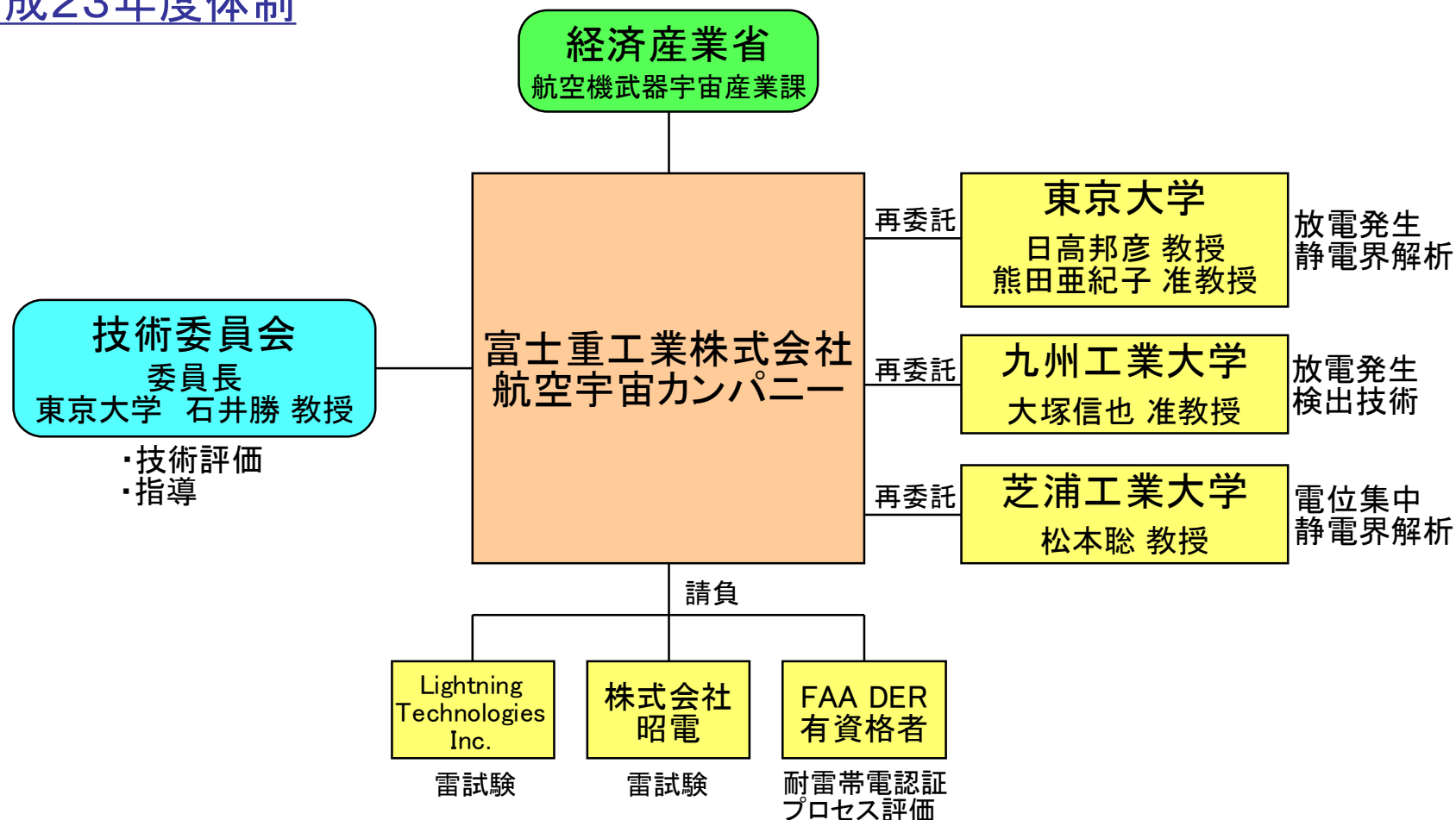
◆平成22年度体制



6. 研究開発マネジメント・体制等(2/5)

- ・本事業の推進にあたり，研究開発の段階に応じて実施体制を見直して研究開発を最適化した。
- ・平成23年度までに解決する放電課題の推進のため，2大学(東京大学，芝浦工業大学)と連携した。
- ・平成23年度から開発する放電検出技術として，1大学(九州工業大学)と連携した。

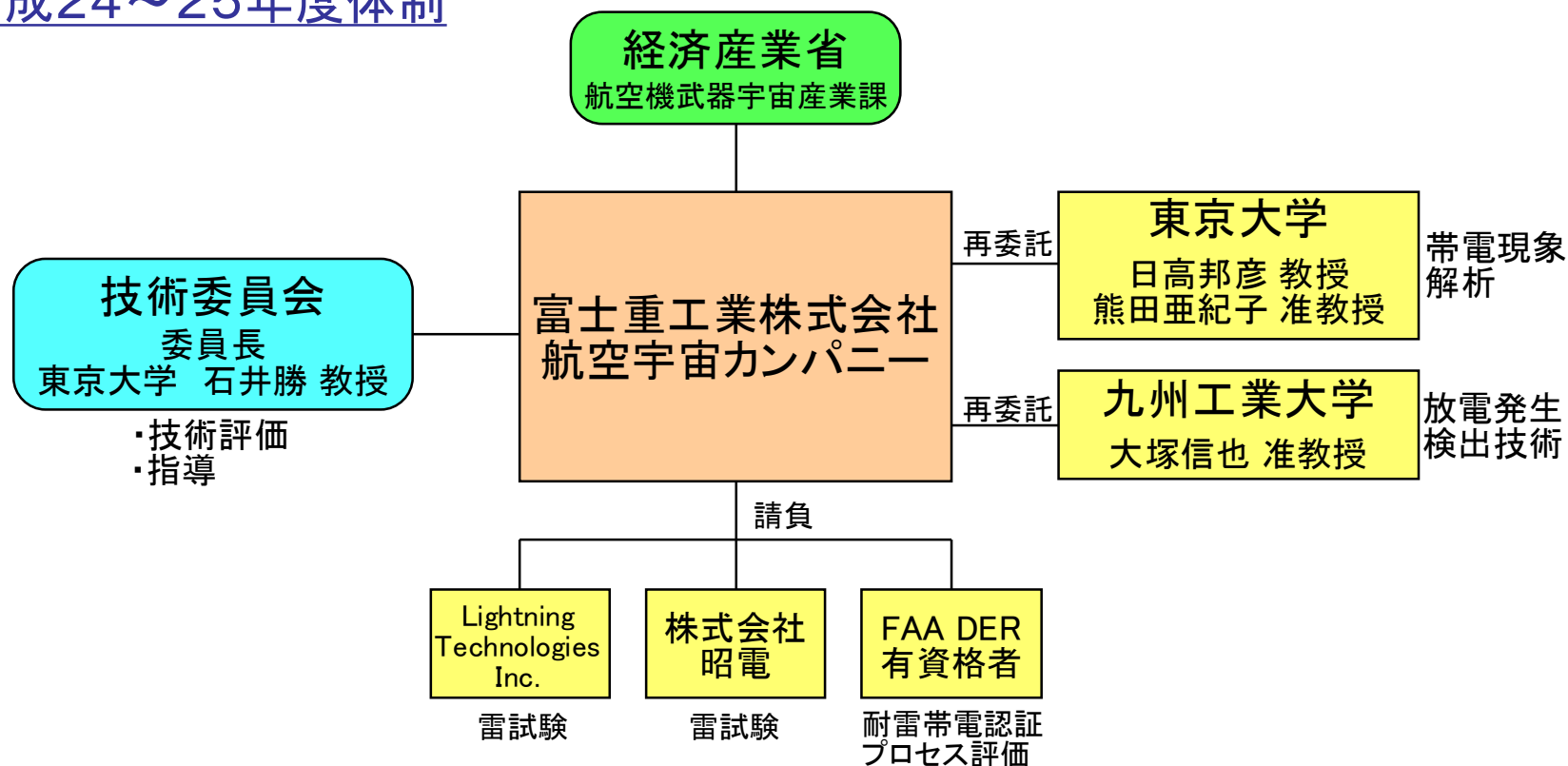
◆平成23年度体制



6. 研究開発マネジメント・体制等(3/5)

- ・平成23年度までの放電課題を解決し、次段階の主翼レベル帯電放電として1大学(東大)と連携した。
- ・放電検出技術開発の推進として、1大学(九工大)と連携した。

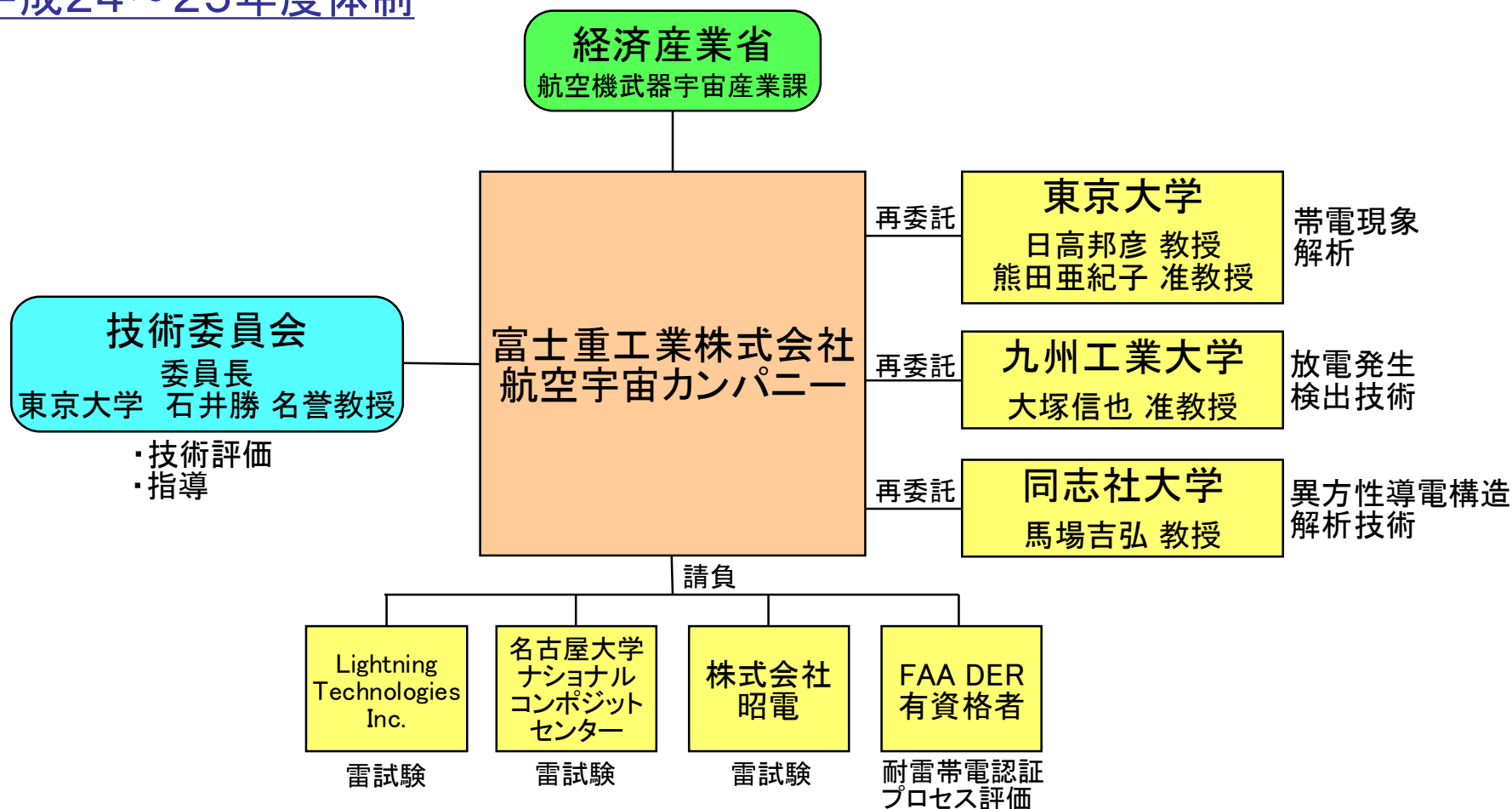
◆平成24～25年度体制



6. 研究開発マネジメント・体制等(4/5)

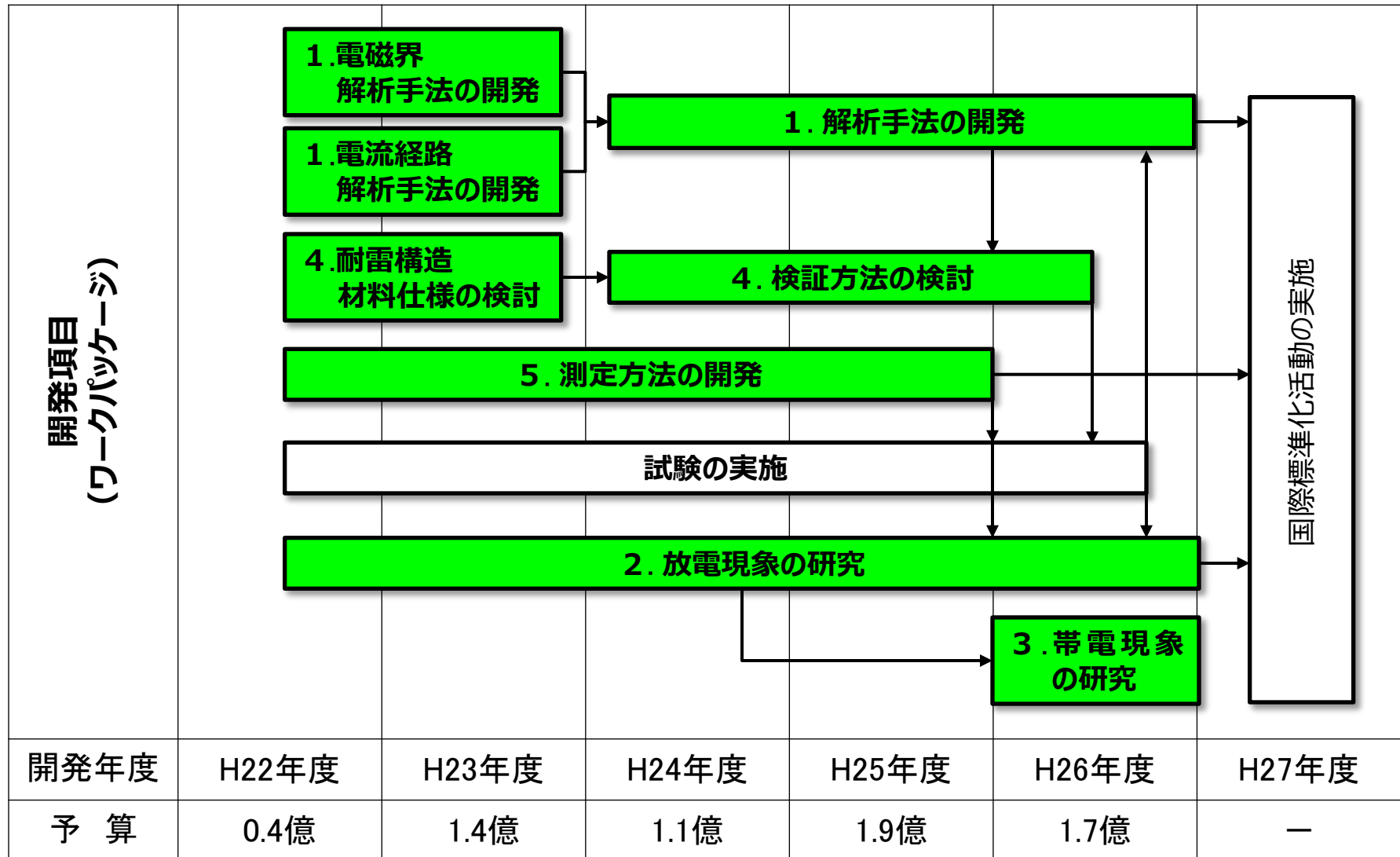
- ・平成25年度までに解決する炭素繊維による異方性導電率での解析課題の推進のため、1大学（同志社大学）と連携した。

◆平成24～25年度体制



6. 研究開発マネジメント・体制等(5/5)

開発項目を5つのワークパッケージに分けて取り組んできた。



※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。