

航空機システム革新技術開発
(電源安定化システム)

事業評価用資料

平成 27 年 3 月 26 日

経済産業省製造産業局航空機武器宇宙産業課

川崎重工業株式会社

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.....	1
1-3 国の関与の必要性.....	3
2. 研究開発目標.....	3
2-1 研究開発目標.....	3
2-1-1 全体の目標設定.....	6
2-1-2 個別要素技術の目標設定.....	7
3. 成果、目標の達成度.....	9
3-1 成果.....	9
3-1-1 全体成果.....	9
3-1-2 個別要素技術成果.....	12
3-1-3 特許出願状況等.....	15
3-2 目標の達成度.....	16
4. 事業化、波及効果.....	18
4-1 事業化の見通し.....	18
4-2 波及効果.....	18
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等.....	19
5-1 研究開発計画.....	19
5-2 研究開発実施者の実施体制・運営.....	20
5-3 資金配分.....	21
5-4 費用対効果.....	21
5-5 変化への対応.....	21

1. 事業の目的・政策的位置付け

1-1 事業目的

航空機産業は、成長が見込まれる産業分野であるが、一方で高度な技術力が必要で、民間航空機分野、特にシステム分野では我が国は、十分な参入をはたせていない状況である。今後、航空機産業の発展を図るとともに、完成機を開発する能力を持つためには、この航空機システムの技術に関する開発能力をもつことが重要な要素となる。

また、システム技術のうち、近年の環境意識の高まりから、二酸化炭素排出量削減と省燃費に効果のあるシステムの電氣化技術に注目が集まるようになってきた。これは、787に見られるように、従来の油圧、空気圧、電氣の3種類の動力を電氣へ一元化して、効率をよくし、燃費を改善するというものである。この電氣化は、燃費の改善にとどまらず、設計、製造、整備のコスト低下に寄与できることから、引き続き続いていくものと考えられる。本事業は、このシステムの電氣化に係わる課題を克服するための研究開発である。

航空機のシステムが電氣化されると、これに電力を供給する電源システムは大型化し、電力の変動により、電源品質への悪影響が懸念されるようになってきている。一方、自動車など、他の産業分野を見ると、電氣自動車などでモーター技術や電力変換技術、蓄電技術が目覚ましい発展をとげている。この分野は、特に我が国が技術的に先行している分野でもある。

本事業は、このような状況を踏まえ、地上用などとして開発された電力変換技術や蓄電技術を用いて、電氣化の進む航空機システムの電源を効率的に安定化する基礎技術の確立を目指して、実施する。

本事業で開発された技術を適用することで航空機のシステムの電氣化が進み、より燃費のよい航空機開発ができるとともに、わが国の航空機システム分野での航空機産業への参入機会の拡大に寄与できるものとする。

1-2 政策的位置付け

経済産業省の航空機産業施策については、個別の技術開発の進め方等について、経済産業省及び独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）において図1-1に示す技術戦略マップを策定し、施策に反映している。

これに示されるように、研究開発の分野として装備品（システム）分野がありその中に、全電氣式航空機を実現させるための技術が抽出されている。全電氣式航空機は、システムを電氣化し、燃費を向上させ、設計、製造、整備コストにつながる重要技術として注目されており、その技術確立が急務として技術戦略マップに設定されている。本事業は、このシステムを電氣化した航空機を実現するためのシステム技術としてここに位置づけられる。

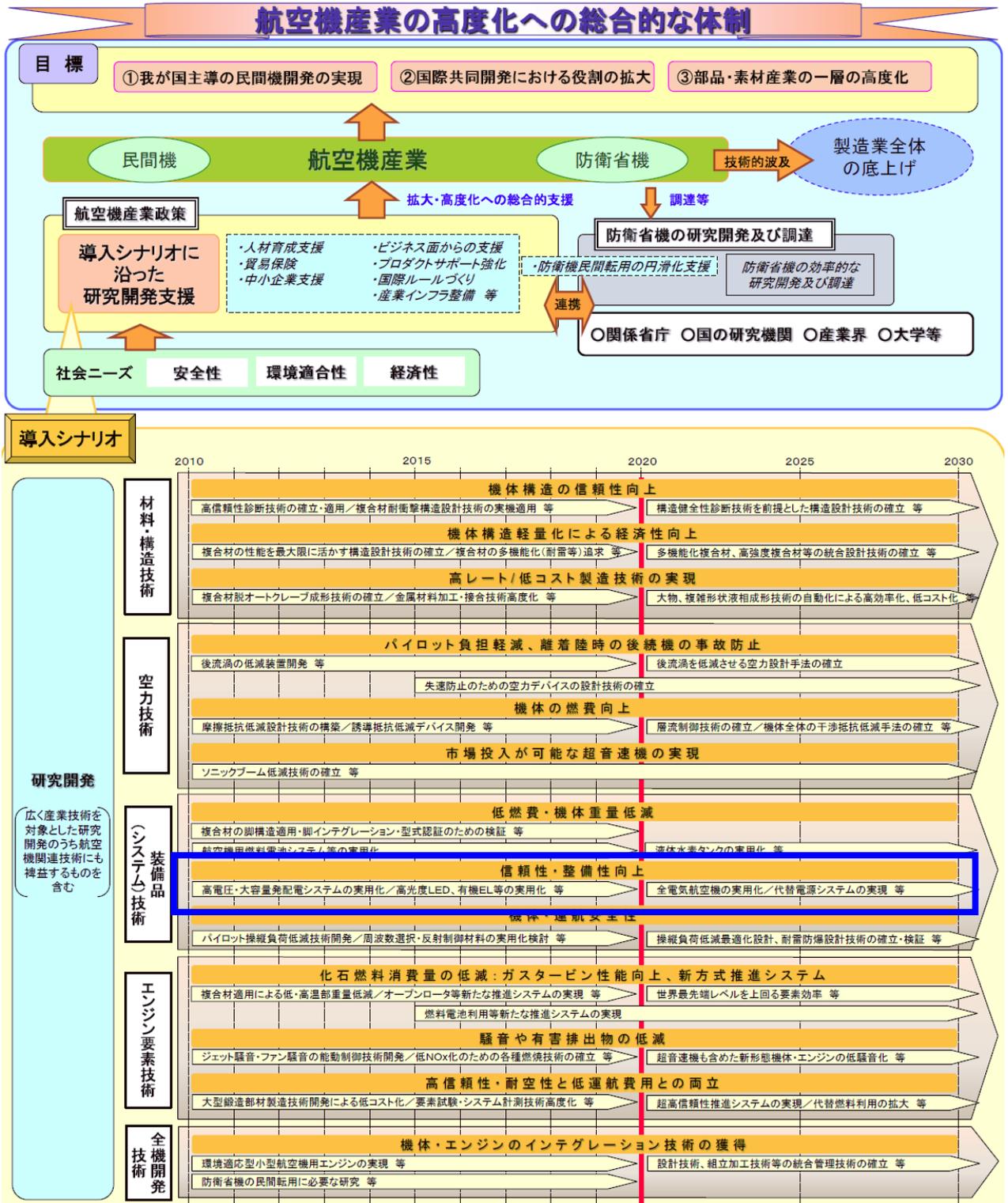


図1-1 本事業の位置づけ

1-3 国の関与の必要性

本事業は、エネルギーの使用の合理化に関する法律に基づき、運輸部門のエネルギー使用合理化の促進といった国策を遂行しているものであり、国家レベルでの取り組みが必要である。

また、航空運輸部門におけるエネルギー需要は、年々増加傾向にあり、その対策の一環として、航空機内のシステムを電氣化してエネルギー使用の合理化を図ることが、不可欠な技術となっている。即ち、航空機電氣化システムについてこれを促進できる革新的な電源安定化システム技術を確立し、さらなる航空運輸部門のエネルギー使用の合理化を実現する。

他方、本事業で開発する技術は、まだ、航空機分野では、開発例もなく、技術的に未成熟で、技術リスクがあるとともに、航空機システム分野では、先行する欧米諸国による参入障壁も高く、国が積極的に研究開発投資を行い、その成果を産業界に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

航空機のシステムは、燃費の向上や設計、製造コストの低減、整備性の向上を目指して、図2-1に示すように、More Electric から All Electric へ電氣化が進むものと考えられる。このように電氣化が進むと、図2-2に示すように、電源が大型化するとともに、負荷変動による電源品質の悪化が懸念されるようになる。

本事業は、将来のより電氣化された航空機を実現するために、課題となる電氣アクチュエータからの電力戻りなどによる電源変動を、地上用装置で開発された電力変換技術や蓄電技術を用いて、効率的に解決する電源安定化システムの基礎技術の確立を目的とする。

より具体的には、図2-3に示すように、高電圧化したバッテリーを用い、これを直交流変換の電力変換装置を用いて電源バスに接続することで、一時的な負荷の供給と電氣アクチュエータからの電力戻りの吸収を行うことで、電源バスの安定化を図るシステムの基礎技術の確立を図る。このシステムは、APU 始動時には、APU スタータとしても機能させることで、効率の高いシステムとすることを旨とする。

➤More Electric Aircraft

システムの動力源を電気に一元化していくことで次の適用効果を得る。

- ・燃料消費低減（ロスの多い抽気⇒抽出力 燃費改善 1~2%）
- ・整備性の向上（電源車だけで整備可能）
- ・設計・製造コストの低減（配管設計や配管取り付けの削除など）

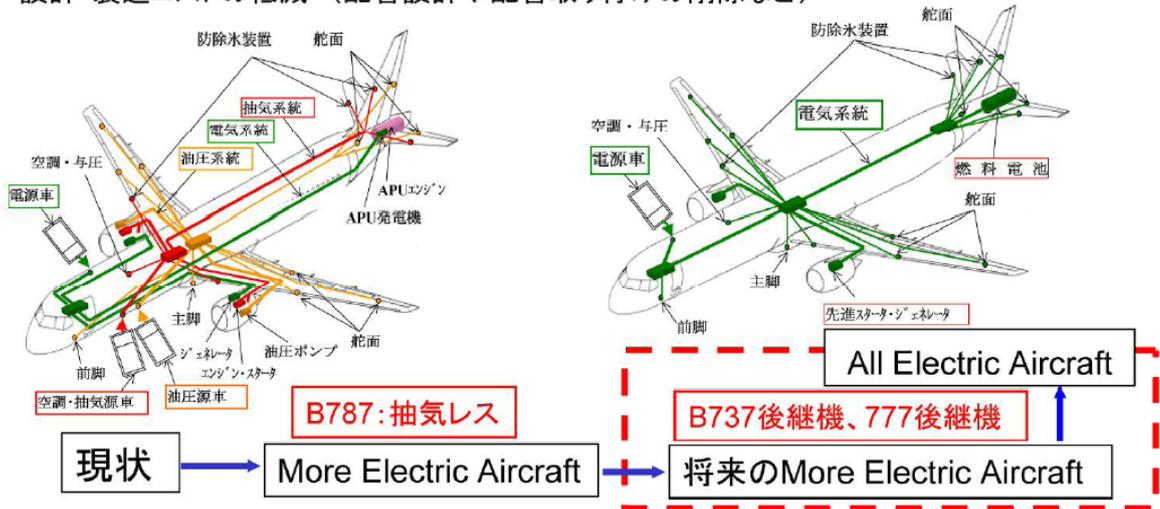


図 2 - 1 航空機システムの電気化の動向

➤More Electric Aircraft電源とその課題

将来のMore Electric Aircraft実現のためには、下記に示す重量増加や電源品質悪化の課題を克服する必要がある。

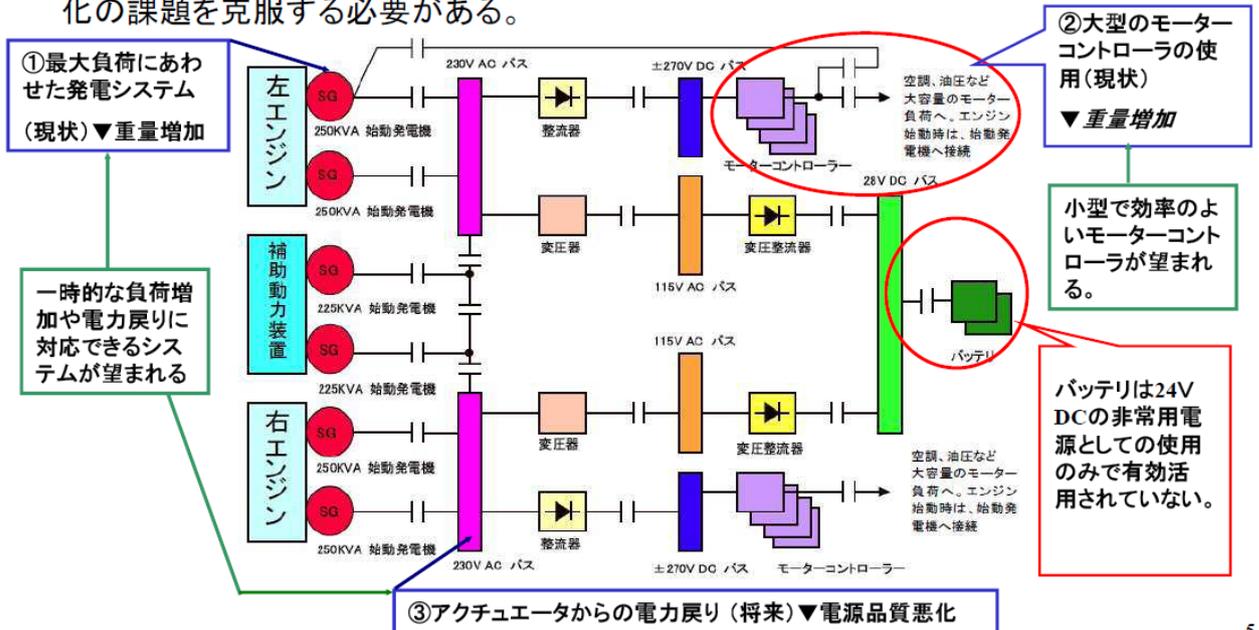


図 2 - 2 電気化された航空機電源の技術的課題

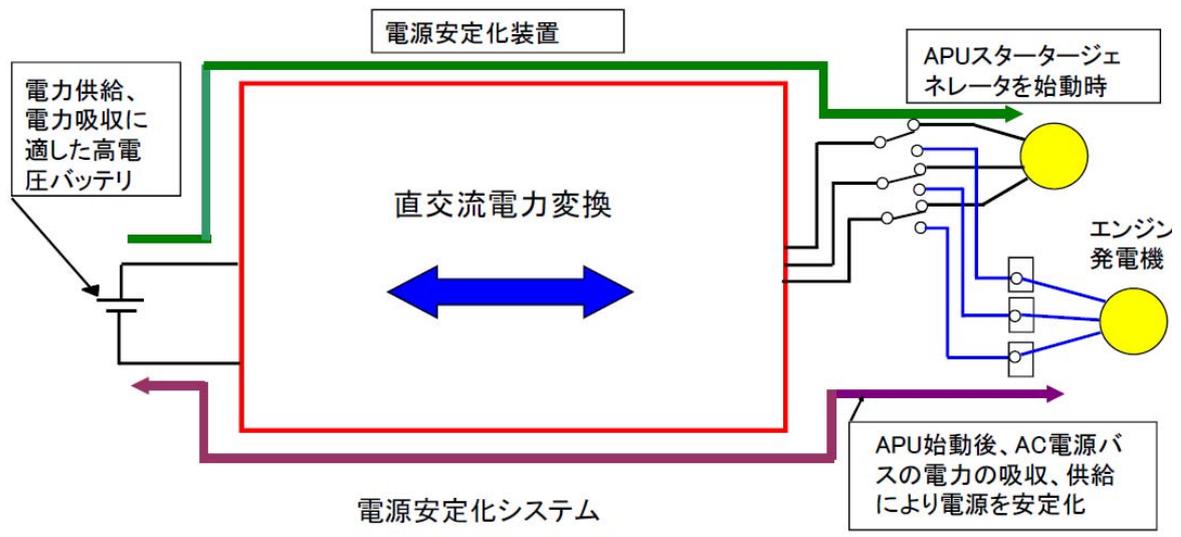


図 2 - 3 電源安定化システムの構成

2-1-1 全体の目標設定

将来のより電氣化された航空機を実現するために、課題となる電氣アクチュエータからの電力戻りなどによる電源変動を、地上用装置で開発された電力変換技術や蓄電技術を用いて、効率的に解決する電源安定化システムの基礎技術を確立する目的で表2-1に示すように全体目標を設定した。

表2-1 全体の目標

目標・指標 (事後評価時点)	設定理由・根拠等
<p>将来のより電氣化された航空機で課題となる電氣アクチュエータからの電力戻りなどによる電源変動を効率的に解決できる革新的なシステムの基礎技術を確立するため、下記の目標を達成する。</p> <p>① 高効率な電力変換技術とバッテリー技術を用いた小型軽量で多機能な、航空機用電源安定化システム構想とその仕様を設定する。</p> <p>② システムの基本機能を解析と模擬組み合わせ試験によって実証し、その基礎技術を確立する。</p>	<p>① 本システムは、新しいシステムであり、航空機にあったシステム構想の設定が必要である。構想設定にあたっては、小型軽量化のため、高効率な電力変換技術の適用や多機能化を図る必要がある。</p> <p>② システムの基本機能は、試験と解析の併用により効率的に行なって実証する。最近では、解析技術が発達しており、試作品を全部製作しなくても、試験と解析を併用することで、最小コストで機能確認ができると考えられる。</p>

2-1-2 個別要素技術の目標設定

将来の航空機電源に対し、前項の全体目標を達成するために要素技術として高効率で小型軽量の電源安定化装置と高エネルギー密度で、高パワー密度なバッテリーセルを開発する。

表 2-2. 個別要素技術の目標 (1/2)

要素技術	目標・指標 (事後評価時点)	設定理由・根拠等
電源安定化装置	<p>① 高効率で小型軽量の航空機用直交流双方向電力変換装置を開発する。 PWM コンバータ部には、3レベルインバータ技術を用い、高効率化を図る。</p> <p>② 機能確認試験供試体を製作し、試験することによって基本機能を確認する。</p> <p>③ 今後適用できる新技術を含めて、さらに小型軽量の機体搭載用装置についてその構想を設定する。</p>	<p>① 高効率で小型軽量をめざすためには地上用で開発されている3レベルインバータ技術を採用することが有効である。</p> <p>② 航空機は、周波数が地上用と比べて高いので、試作試験による評価が必要である。</p> <p>③ 今回は、機能確認試験用の供試体しか設計、製作しないため、機体搭載用装置の構想設計は別途、必要である。</p>

PWM: Pulse Width Modulation

表 2-2. 個別要素技術の目標 (2/2)

要素技術	目標・指標 (事後評価時点)	設定理由・根拠等
バッテリーセル	<p>① 航空機用で、エネルギー密度が高く、パワー密度も高い、小型軽量のバッテリーセルを開発する。</p> <p>② バッテリーセルの試作、試験による特性の確認を行なうことで基本機能を確認する。</p> <p>③ ①, ②で確立したバッテリーセル技術を用いた小型軽量の機体搭載用バッテリーについて構想を設定する。</p>	<p>① 今回のバッテリーは、非常用電源として用いる他、電力吸収と放出の目的で用いるため、エネルギーとパワー密度の高い特性を併せ持つ必要がある。</p> <p>③ バッテリーセルは、航空機用として多用途で用いるため、それぞれの用途で、性能確認する必要がある。</p> <p>③ 今回は、機能確認試験用のセルしか設計、製作しないため、機体搭載用バッテリーの構想設計は別途、必要である。</p>

3. 成果、目標の達成度

3-1 成果

3-1-1 全体成果

将来機により電氣化が進んだ 2020 年代に就航する航空機を想定し、電気アクチュエータによる電源変動を吸収できる電源安定化システムの仕様を設定し、その機能を模擬組み合わせ試験で確認した。この結果、機能が有効に働くことが評価され、ボーイング社との国際共同開発事業として、(公財)航空機国際共同開発促進基金の助成を受け、技術実証に向けた開発を行うことになった。

(1) システム構想と仕様

ア. システム構想

機体システムは、ボーイング社の協力のもとに実施し、2020 年代に就航する 787 より電氣化された航空機を想定し、電気アクチュエータが搭載されるものとした。電源は、787 と同じく、交流発電機を主電源とした、AC230V の VF システムとする。電源安定化システムは、電気アクチュエータの設置される AC バスに接続され、APU 始動後は、AC 電源バスの安定化に使用される。

電源安定化システムは、次の機能を持ち、多機能化を図る構想とした。

- ① AC バスの電力をバッテリーで調整することで電源バスの安定化を図る。
- ② バッテリーの充電を行なう。
- ③ APU の始動装置として APU を始動する。
- ④ 発電機停止時、インバータとして緊急電力の供給を行う。

イ. 電源安定化システム仕様

(ア) 構成

バッテリーと電源安定化装置で構成する。

(イ) 主な機能

- ・電源安定化：AC バスにバッテリーを電源安定化装置を介して接続することにより、電力戻りの吸収と、一時的な負荷への供給を可能にして、電源の安定化を行う。
- ・バッテリーの充電
- ・APU の始動
- ・緊急電力の供給

(2) 模擬組み合わせ試験による基本機能の確認

航空機用交流発電機に、電源安定化装置を接続して、アクチュエータを模擬した電力変動を与えて、電源安定化の機能を確認した。試験状況を図3-1に、試験結果例を図3-2に示す。図3-2に示すように、アクチュエータの電力戻りにより、発電機負荷電流が減少するため、発電機電圧は、上昇を開始するが、それと同時に、電源安定化装置がバッテリーの充電電流(負荷電流)を増やして、発電機の電圧上昇を抑えるように働くことが認められ、電源安定化の機能が確認できた。なお、本試験では、バッテリーには、自動車用バッテリーを用いた。また、発電機は、将来用いられる230Vの発電機と異なる発電機を用いて試験を行ったが、発電機の電圧、容量などの違いは、解析で補完し、実際のスケールでの現象を予測した。

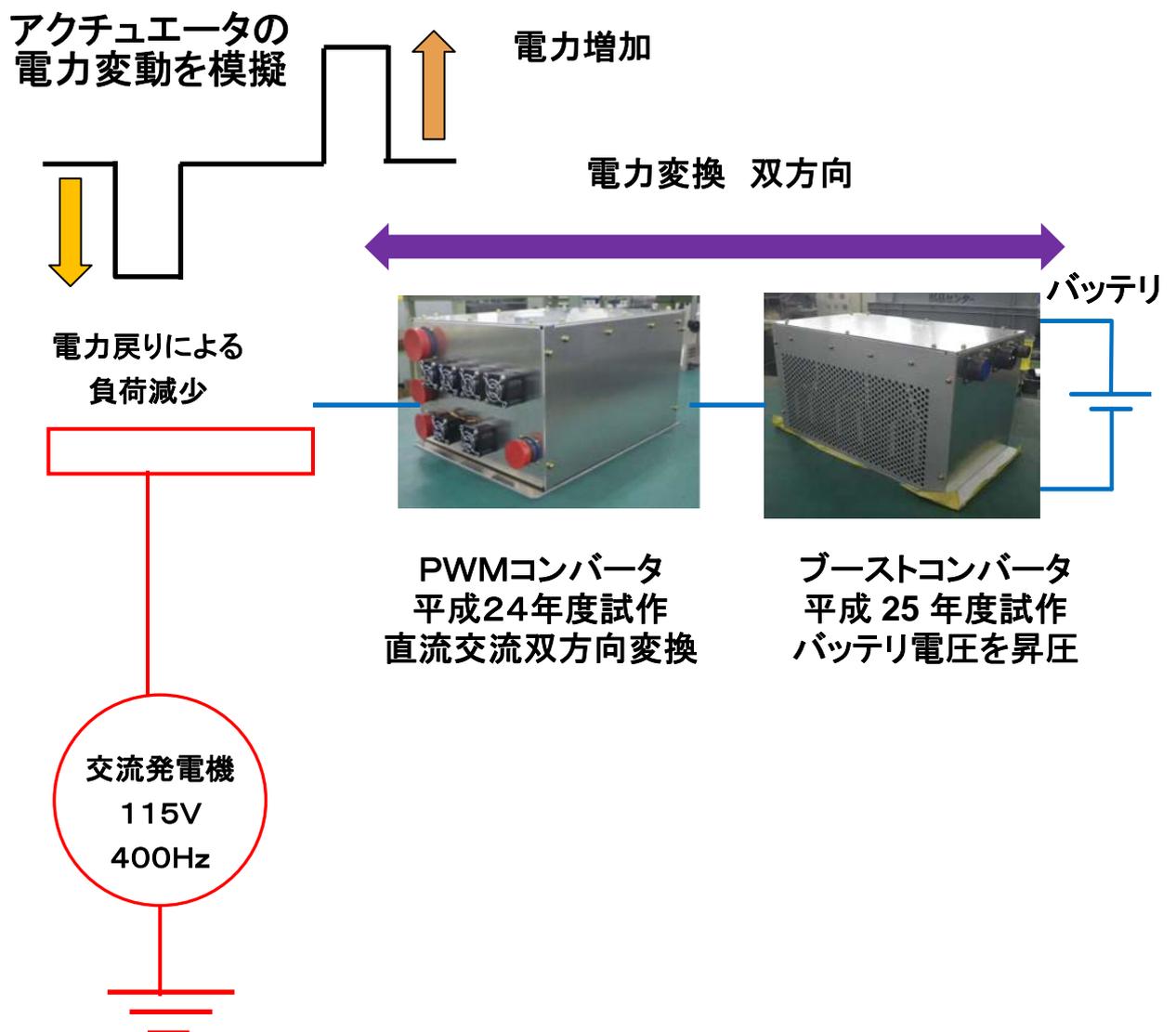


図3-1 電源安定化試験セットアップおよび試験状況図

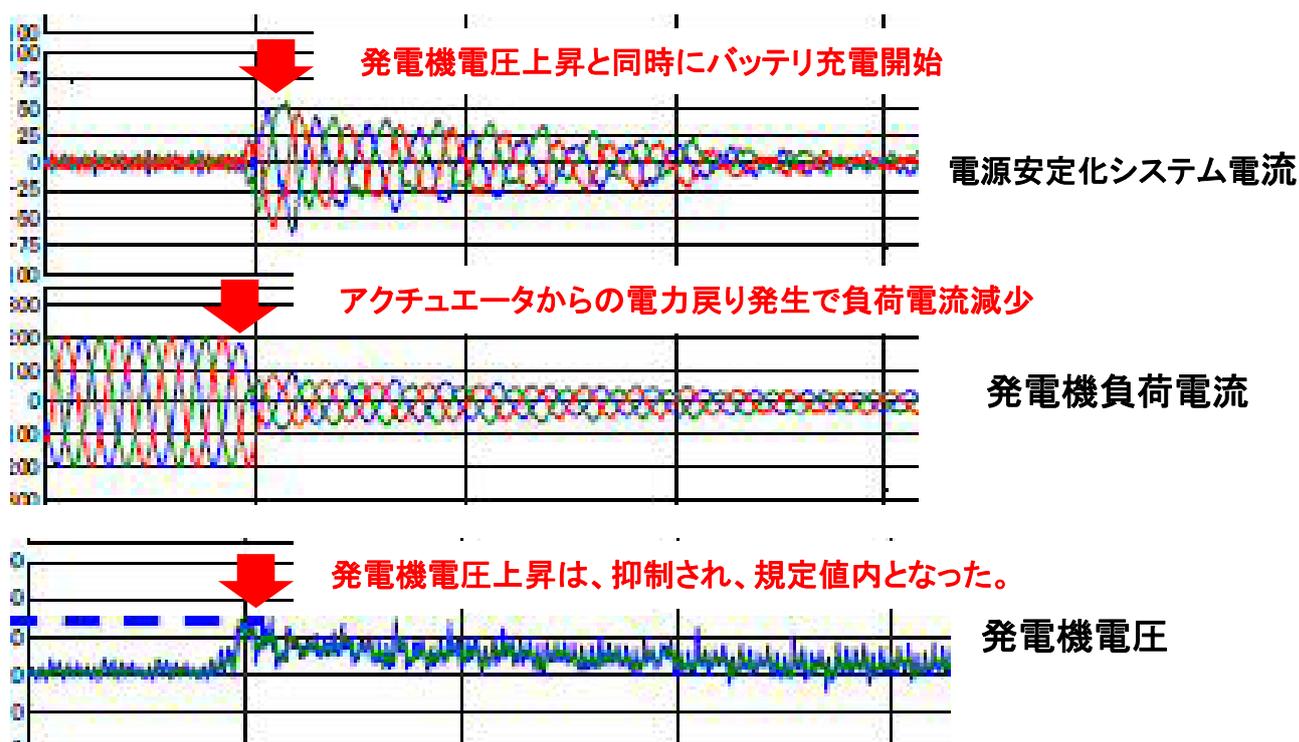


図 3 - 2 電源安定化試験結果例

この他、電源安定化装置が、APU始動のためのモーターコントローラとして作動できるか、また、インバータとして、非常用電源を供給できるかについて確認し、所期の成果を得た。

3 - 1 - 2 個別要素技術成果

(1) 電源安定化装置

ア. 電源安定化装置の全体構成

電源安定化装置は、PWM (Pulse width Modulation) コンバータと、ブーストコンバータから構成し、バッテリーの電圧を昇圧してから、PWM コンバータで、交流にして、交流発電機電源に接続するものとした。PWM コンバータとブーストコンバータは、双方向の電力変換機能をもたせるものとした。

イ. PWM コンバータ

(ア) 機能確認試験用 PWM コンバータの設計

機能確認試験用として PWM コンバータを設計した。PWM コンバータのスイッチの部分の構成は、効率がよく、フィルタを小さくできる 3 レベル方式を選定した。また、電源安定化のソフトウェアとして、電圧が上昇すれば、電力をバッテリーに充電し、電圧が下降すれば、バッテリーから電力を供給して、電源電圧を安定させる機能を設けた。

(イ) 機能確認試験用 PWM コンバータの製造、試験

前項の設計結果に基づき、図 3-3 に示す PWM コンバータを製造し、交流を発生するインバータ機能を中心に、その基本機能を確認した。この時、3 レベル方式を採用したことによる効率向上についても確認を行った。

ウ. ブーストコンバータの設計

(ア) 機能確認試験用ブーストコンバータの設計

ブーストコンバータは、PWM コンバータから供給される電圧を降圧し、バッテリーに供給する機能及びバッテリーより供給される電圧を昇圧し、PWM コンバータに供給する機能を持たせるものとした。

(イ) 機能確認試験用ブーストコンバータの製造、試験

前項の設計結果に基づき、図 3-4 に示すブーストコンバータを製造し、直流電圧の昇圧、降圧機能について、確認した。

エ. 機体搭載用電源安定化装置の構想設計

機体搭載用電源安定化装置について、機体搭載用装置の構想設計を行い、新しい半導体素子である SiC (シリコンカーバイド半導体) 技術を適用し、機能確認試験用装置に対し、重量比で 40%以上の低減ができる見通しを得た。



寸法: 260 × 270 × 380 mm
重量: 21.0 Kg

図 3-3 PWM コンバータ



寸法：245×240×470mm
重量：27.0Kg

図3-4 ブーストコンバータ

(2) バッテリセル

ア. バッテリセルの試作と試験

バッテリーについては、今回の用途では、アクチュエータの電力吸収に用いるため、高パワーの特性を向上させる必要がある。このため、平成24年度と平成25年度に、バッテリーのもともと持っている高エネルギー特性を保持したまま、高パワー特性である低温時のバッテリー充電受け入れ特性を改善する目的で、極板枚数や、溶液の化学組成を変更したセルを試作して試験を実施した。

その結果、図3-5に示すように低温時の充電受け入れ特性を改善し、バッテリーを電力吸収用途にも用いられることを確認した。

イ. 機体搭載用バッテリーの構想設計

機体搭載用のバッテリーの構想設計を実施し、その外形と重量について検討した。バッテリーは、電圧約250Vを得るために、バッテリーセルを8個組み合わせたモジュールを10個直列にして構成し、これを収納できるケースに収めるものとした。図3-6に構想図を示す。



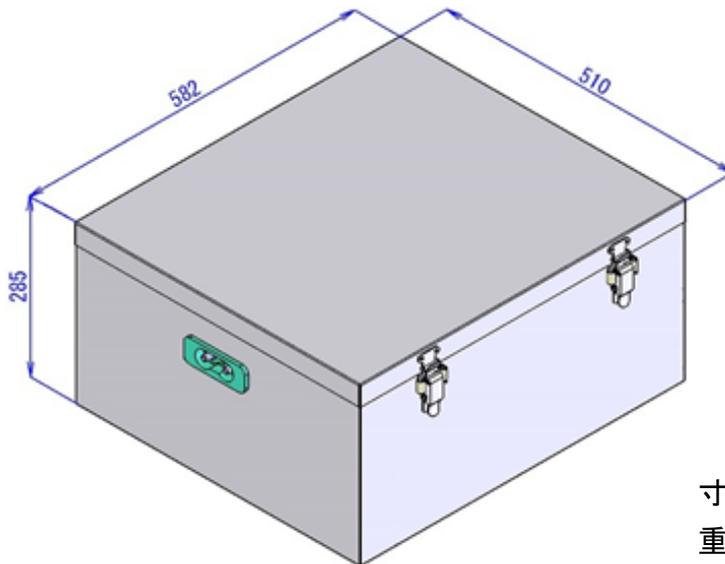
平成 24 年度試作



平成 25 年度試作

	平成 24 年度試作	平成 25 年度試作
公称容量 (A H)	1 0	1 0
公称電圧 (V)	3. 2	3. 2
寸法 (mm)	1 8 0 × 5 5 × 1 0	1 7 8 × 5 0 × 1 0
重量エネルギー密度 (Wh / Kg) @25°C	9 1	9 1
重量パワー密度 (KW / Kg) @10°C	1. 1	1. 8

図 3-5 バッテリーセルの試作と試験



寸法：単位 mm
重量：60. 5 Kg

図 3-6 バッテリーの構想図

3-1-3 特許出願状況等

表3-2に特許・論文等件数を、表3-3に、論文、投稿、発表、特許リストを示す。

表3-2. 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
電源安定化システム	0	0	1	0	0	0	0
電源安定化装置	0	0	0	0	0	0	0
バッテリーセル	0	0	0	0	0	0	0
計	0	0	1	0	0	0	0

表3-3 論文、投稿、発表、特許リスト

	題目・メディア等	時期
論文	なし	
投稿	なし	
発表	なし	
特許	米国特許出願 No. 13/561572	H24.7

3-2 目標の達成度

表3-4に平成23年度の目標に対する成果概要と達成度を示す。

表3-4. 目標に対する成果・達成度の一覧表(1/2)

要素技術	目標・指標	成果	達成度
電源安定化システム	<p>① 高効率な電力変換技術とバッテリー技術を用い、小型軽量で多機能な航空機用電源安定化システムのシステム構想とその仕様を設定する。</p> <p>② システムの基本機能を解析と模擬組み合わせ試験によって実証し、その基礎技術を確認する。</p>	<p>① 電源安定化の他、APU始動、緊急電力供給などを行える多機能なシステム構想とその仕様を設定した。</p> <p>② 模擬組み合わせ試験により、電源安定化について、基礎技術を確認した。</p>	達成

表 3-4. 目標に対する成果・達成度の一覧表(2/2)

要素技術	目標・指標	成果	達成度
電源安定化装置	<p>① 効率で小型軽量の航空機用直交流電力変換装置を開発する。Pulse Width Modulation コンバータ部には3レベルインバータ技術を用いる。</p> <p>② 機能確認試験用供試体を製作し、試験することによって基本機能を確認する。</p> <p>③ 今後適用できる新技術を含めて、さらに小型軽量の機体搭載用装置についてその構想を設定する。</p>	<p>① Pulse Width Modulation コンバータ部に3レベルインバータ技術を採用した高効率な航空機用直交流電力変換装置を開発した。</p> <p>② 機能確認試験用供試体としてPWMコンバータとブーストコンバータを製作し、その機能を試験により、確認した。</p> <p>③ 今後、適用できる技術としてSiCを用いた機体搭載用装置についてその構想を設定した。</p>	達成
バッテリーセル	<p>① 航空機用でエネルギー密度が高く、パワー密度も高いバッテリーセルを開発する。</p> <p>② バッテリーセルの試作、試験による特性の確認を行なうことで、基本性能を確認する。</p> <p>③ ①、②で確立したバッテリーセル技術を用いた小型軽量の機体搭載用バッテリーについて構想を設定する。</p>	<p>①② 航空機用でエネルギー密度が高くパワー密度も高いバッテリーセルを開発し、試験により、その性能を確認した。</p> <p>③ 上記の技術を用いたバッテリーセルを用いた機体搭載用バッテリーについて、構想を設定した。</p>	達成

4. 事業化、波及効果について

4-1 事業化の見通し

電源安定化システムは、今までの民間航空機では、用いられていない革新的なシステムで、今後、より電氣化が進んだ将来航空機への適用を目指している。3年間の基礎技術の確認フェーズを終了して、約3年間の技術実証フェーズに移行することができた。ここで機体搭載相当品を製作、試験し、実用化のめどを得る予定である。その後は、将来機開発にあわせて、本格開発を行い、実機搭載による事業化を狙っていく。本事業には、機体会社であるボーイング社が加わっており、アドバイスをすることで、より、将来航空機に適合したシステム開発が可能と考えられるため、事業化の可能性が高いと考えられる。

表4-1 電源安定化システム事業化への流れ

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
電源安定化システム	基礎技術確認			技術実証			実機システム開発			
電源安定化装置	機能確認用装置			機体搭載相当品			実機搭載品開発			
バッテリー	バッテリーセル			バッテリー			実機搭載品開発			

4-2 波及効果

本研究は、民間航空機の電源安定化を主目的に研究しているが、システムとこれに含まれる要素技術については、次のような技術分野へ多くの波及効果が見込まれる。

(1) 電源安定化システム

本研究の電源安定化システムは、バッテリーを用いて、交流電源システムの安定化に供しえるシステムであるので、船舶、電車などの移動体の電源や家庭用の電源などの安定化に用いることができる。

(2) 電源安定化装置

電源安定化装置で実証する3レベルインバータ技術は、航空機の他の電力変換器に応用可能で、波及効果は大きい。特に、これから、電氣化が進む航空機では、モーターコントローラの小型軽量化が必要で、これに有効な技術として広く用いることが可能である。またこの技術は、航空機以外の小型軽量化が必要な移動体のモーターコントローラに適用できる。

(3) バッテリ

今回、開発するバッテリーは、他の先行するバッテリーより、安全性が高く、搭載を目指している民間旅客機用途以外にも、ヘリコプタ、ビジネスジェットなど航空機全般に非常用電源として用途がある。

航空機以外にも、自動車、電車、船舶などの移動体や地上設置用としても利用可能である。

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

本事業は、表5-1に示すように平成23年度～25年度の3年計画で実施した。

表5-1. 研究開発計画

実施項目／年度	23	24	25
電源安定化システム	システム仕様の設定	システム作動解析	システム模擬組み合わせ試験
	→	→	→
電源安定化装置	基本設計	機能確認試験用供試体設計・製作	試験
	→	→	→
バッテリーセル	バッテリーセルの特性把握と基本設計	バッテリーセルの詳細設計、製作	バッテリーセルの試験
	→	→	→

5-2 研究開発実施者の実施体制・運営

(1) 研究開発実施者の実施体制

本研究開発は、平成23年度の公募による選定審査手続きを経て、川崎重工業が経済産業省からの委託を受けて実施した。

また、研究開発責任者（プロジェクトリーダー）は、川崎重工業の航空宇宙カンパニーの技術本部 第二装備技術部の烏野部長が選任され、企業4社の協力のもとに研究開発を実施した。また、研究開発の方向性や実施内容の妥当性を評価するため、外部委員を含めた技術評価委員会を設置し、各年度の最初と中間、終わりに、研究状況の説明を行い、アドバイスを得た。委員長には、自動車の電動化などに知見のある名古屋大学の道木教授が就任した。

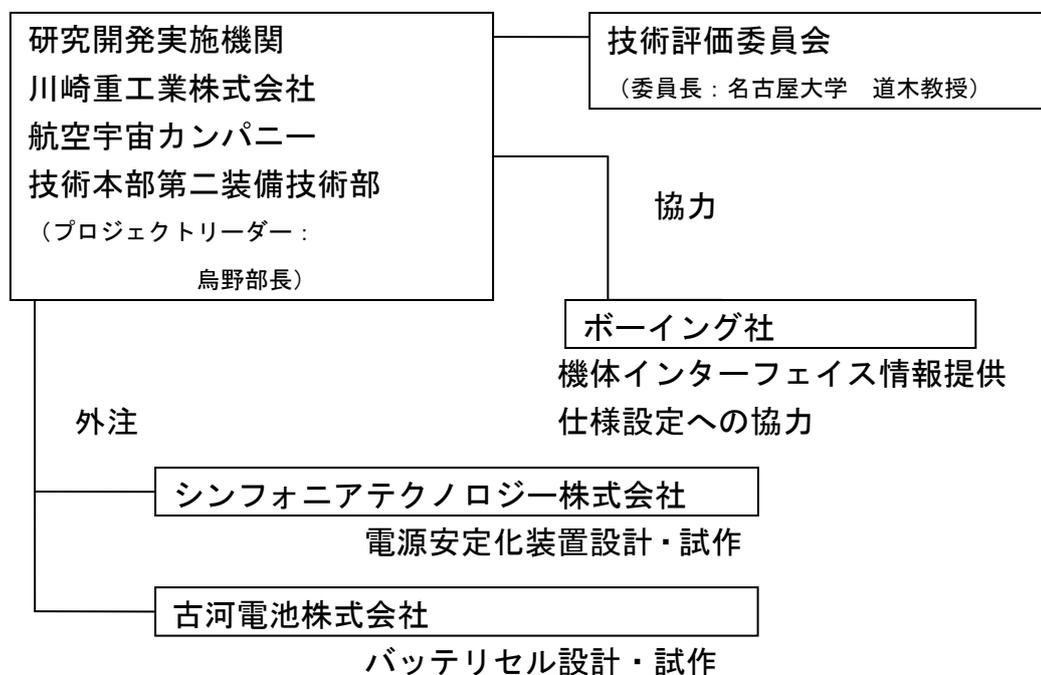


図5-1 事業実施体制

(2) 実施体制の妥当性

川崎重工業は、最近開発された P-1、XC-2 などの大型機の電源システム設計を実施しており、航空機電源設計の経験が長く、本事業のまとめ運営を行なう機関として妥当である。また、川崎重工業株式会社の航空宇宙カンパニーの技術本部 第二装備技術部は、この電源設計、研究をになう部署であり、この烏野部長が本事業の研究開発責任者として最適である。

5-3 資金配分

表5-2. 資金配分 (単位：百万円)

年度 平成	23	24	25	合計
電源安定化システム				
システム	21.3	19.2	19.9	60.4
電源安定化装置	10.9	25.3	32.0	68.2
バッテリーセル	13.6	18.4	18.1	50.1
合計	45.8	62.9	70.0	178.7

5-4 費用対効果

システム仕様は、川崎重工業が担当し、これに基づき、電源安定化装置の設計、試作とバッテリーセルの設計、試作をそれぞれの専門メーカーが担当しながら研究開発を行なった。また、ボーイング社から必要な機能、仕様情報を入手することにより、本事業は、非常に効率的に進められて、投資以上の効果が得られた。

5-5 変化への対応

本事業は、平成23年度に開始し、平成25年度に終了しているが、この間に、技術動向・社会情勢・市場ニーズの変化等本事業に影響を及ぼすような変化はなかった。しかし、本研究で実施している電力変換、蓄電池の分野は、新技術開発が非常に活発に行なわれているので、この動向を注視し、本研究へ取り入れられるよい技術があれば反映を検討した。