

3. 各課題の概要と評価

今回評価対象とした10課題（表 2-1）について、課題別に「概要」と「評価」の2つの部分から構成されている。

「概要」では、研究開発計画等を基にして背景と目的、実施体制、予算、研究開発テーマ、出口戦略、ロジックツリーについて整理している。

「評価」では、課題評価アンケート調査（研究責任者向け）と課題評価インタビュー調査（研究責任者向け）の結果も踏まえつつ、PDによる自己点検報告等に基づく課題評価WGでの評価結果をベースに、表 2-8 に示した評価項目の大項目別に取りまとめている。

3.1 革新的燃焼技術

<p>(1)意義の重要性、SIP の制度の目的との整合性</p>	<ul style="list-style-type: none"> SIP 開始前、産業界では欧州の研究機関に多くの研究を委託しており、資金と技術力の欧州への流出、我が国の国際競争力低下が懸念されていた。 AICE (自動車用内燃機関技術研究組合) 設立の準備が先行していたため、SIP 計画立案段階から競争/協調領域を整理した上で産学連携の研究開発を開始できた。 燃焼技術は成熟産業の技術とみなされて国の支援は少なく、学界での基礎研究は、設備老朽化が進み下火となっていた。 SIP 開始後、大学の基礎研究が復活するとともに、応用研究、産業界の実用化までがひも付いた「産産学学」連携⁸として研究開発体制が構築され、欧米よりも進んだ燃焼技術の研究開発を促進させることができた。
<p>(2)目標・計画・戦略の妥当性</p>	<ul style="list-style-type: none"> 熱効率 50%という定量的かつ高い目標を明確に設定することで、研究者の高いモチベーションが維持された。
<p>(3)課題におけるマネジメント (適切なマネジメントがなされているか。)</p>	<ul style="list-style-type: none"> PD、サブ PD による月 1 回程度の研究実施機関訪問により、課題内での目標の共有や意思の統一が適切になされた。 学との信用構築のため、AICE からの大規模な人員支援を実施したことにより、目標の共有や意思の統一が進んだ。
<p>(4)直接的な研究成果 (アウトプット)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 目標である熱効率 50% (ガソリンエンジン 51.5%、ディーゼルエンジン 50.1%) を 5 年間という短期間で達成した。 超希薄燃焼領域での安定着火・燃焼の実現等従来の常識を覆し、教科書を書き換えるレベルの結果を得た。 国産燃焼解析ソフトウェア「HINOCA」を含む想定を超えた高度なモデル/ソフトウェア群の開発・試験運用を進め、研究データのデータベース (DB) 構築を産学で進めた。 産学の協力で研究開発拠点にオープンラボを開設し、自動車メーカーによる大学への委託研究が国内回帰の見通しがついた。 我が国主要大学における燃焼分野の研究開発力向上及び研究人材育成に多大な貢献をした。 産学官連携及び研究成果利用促進を図ること等を目的として、学の連合体「内燃機関産学官連携コンソーシアム」を設立した。 100 件以上の査読あり論文、15 件の特許出願。
<p>(5)現在・将来の波及効果 (アウトカム)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 「HINOCA」を含む高度なモデル/ソフトウェア群、DB の成果は産業界での利用が既に始まり、化学反応機構を掲載した Web サイトへのアクセスは海外からを含め 62,000 件を超え、関心やニーズの高さを示している。 外国製市販ソフトでは困難なソースコード共有が可能であり、今後の継続的開発による改良で利用・普及が期待される。 「内燃機関産学官連携コンソーシアム」と AICE が連携してニーズ・シーズマッチングを進めることによって、一層の「産産学

⁸ 「産産学学」連携とは、AICE という「産産」連携と学界の応用・基礎研究の連携の強化という「学学」連携が、従来の個別の産学連携から SIP により発展した産業界連合と学界連合の大規模かつ緊密な連携を表現したものである。

	<p>学」研究開発及び成果が期待される。</p> <ul style="list-style-type: none"> 九州大学発ベンチャー企業の DeepFlow 株式会社（超大規模流体構造連成解析システム開発）の設立、研究開発への投資促進も期待される。 国内では企業における活用を図ることでモデル/ソフトウェアの共通化を進め、開発コスト低減につなげるとともに、デファクトスタンダード化を含めた国際展開が期待される。
<p>(6)改善すべきであった点と今後取り組むべき点</p>	<ul style="list-style-type: none"> 本課題の研究開発の範囲は要素技術の開発にとどまるため、今後、各自動車メーカーにおいて、SIP で得られた成果を基にした高熱効率エンジンの開発が行われるか否かを追跡評価すべきである。 数値目標の実現が優先された結果、開発した各要素技術に対して、高い熱効率を備えたエンジンを自動車に搭載するといった実用化の観点（エンジン単体というよりエンジンシステムとしての観点）での改善検討が不十分となった可能性があるためと研究現場から指摘があった点も追跡評価をする上で考慮すべき点である。 SIP 終了後、「産産学学連携」研究体制を維持・継続するために必要な大学側の研究基盤整備や資金調達について具体的な対応を検討することが必要である。 「HINOCA」を含めたソフトウェア群は「内燃機関産学官連携コンソーシアム」が管理する予定であるが、海外からの利活用も含め、その活用方針や中長期的な維持方針等、具体的な運用方針を検討することが必要である。

3.1.1 概要

(1) 背景と目的

燃焼技術は重要な基盤技術として、特に自動車エンジンを含む小型内燃機関は動力源として広く使われており、国際エネルギー機関（IEA：International Energy Agency）の Energy Technology Perspectives 2012 によれば、電気自動車等の技術向上を考慮しても、今後 30 年以上にわたり世界の石油エネルギー消費の半分程度を占めると考えられている。

内燃機関の開発は、熱効率の向上や環境負荷低減を目指して、現在も技術革新・国際競争が続いている。欧米では多数のコンソーシアムが設立され、産業界における効率的な水平分業を進めて開発スピードを高めているとともに、大学の工学研究に対しては、多方面からの投資と人材の投入が行われて人材育成が進んでいる。一方、我が国では、これまで産業界における技術開発を支えてきた各企業の社内専門人材の後継者不足が進み、大学等研究機関における研究体制も縮小しつつある。我が国のこの分野における国際競争力を維持するためには、我が国の産業界と大学・各種研究機関の間で研究開発力を結集することが喫緊の課題といえる。

本課題は、熱効率の向上によってエネルギー消費と CO₂ 排出の持続的な削減に貢献するとともに、産官学からなる持続的な研究体制の構築と人材育成を実現する新たな枠組みの確立の推進を目的とした。具体的には、自動車用内燃機関を対象とし、現在 40%程度の内燃機関の熱効率を 50%以上に向上させることを目標とした。

(2) 実施体制

平成 30 年度時点で、サブ PD は 1 名、研究責任者は 4 名である。管理法人は科学技術振興機構（JST）となっている。

研究開発はチーム体制とし、各研究課題を「ガソリン燃焼」、「ディーゼル燃焼」、「制御」、「損失低減」の 4 つのチームに分けて、リーダー大学がとりまとめる形とした。また、自動車用内燃機関技術研究組合（AICE）が、各技術テーマに対応した体制で各チームを支援したことも特徴的であった。

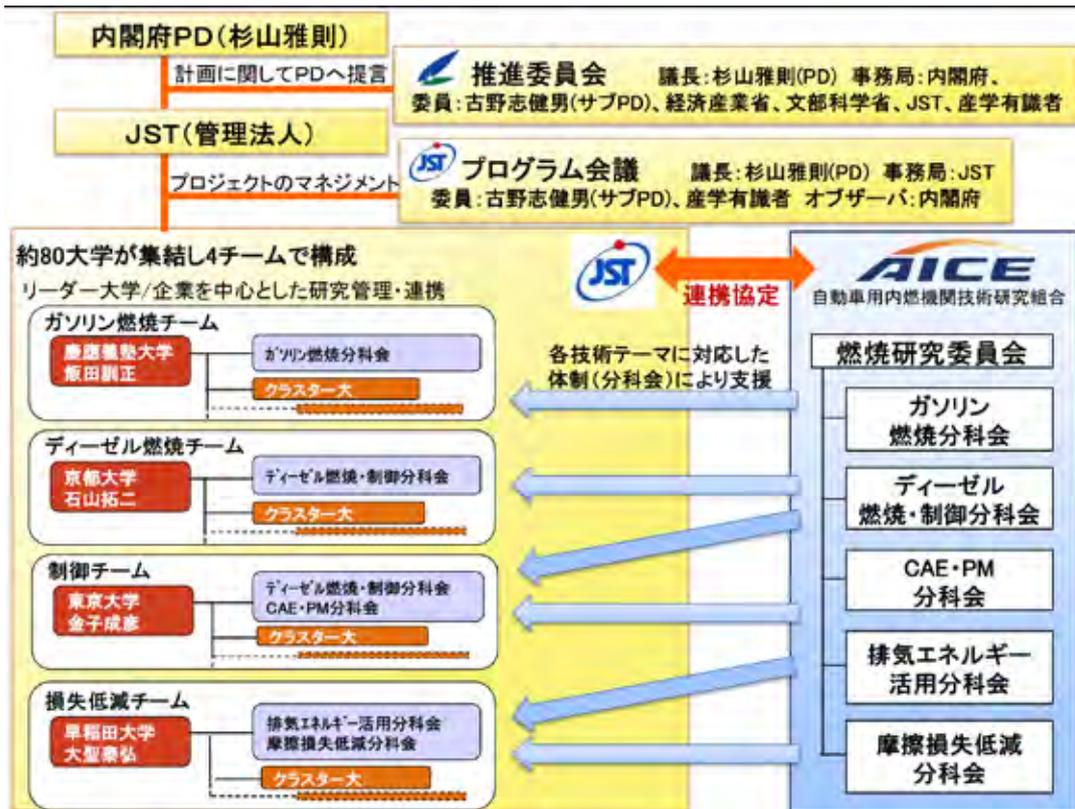


図 3-1 革新的燃焼技術の研究体制

(出典) JST「SIP 革新的燃焼技術」(平成 31 年 1 月閲覧)
< <http://www.jst.go.jp/sip/pdf/kenkyutaisei.k1.pdf> >

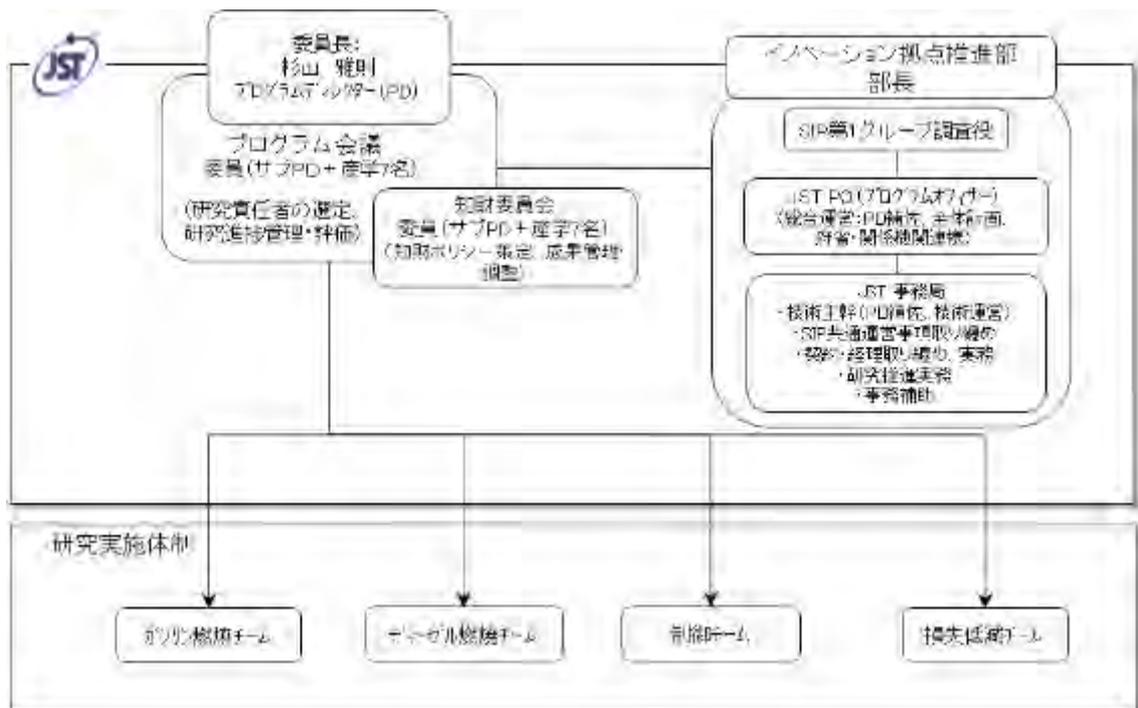


図 3-2 革新的燃焼技術の管理法人 (JST) の体制

表 3-1 革新的燃焼技術の PD 等

区分	所属	氏名
PD	トヨタ自動車株式会社	杉山 雅則
サブ PD	株式会社 SOKEN 専務取締役	古野 志健男

平成 31 年 1 月 1 日現在

表 3-2 革新的燃焼技術の主要会議体

名称	構成員	概要
推進委員会	PD、サブ PD、推進委員、外部有識者、関係省庁、事務局（内閣府）管理法人（JST）（表 3-3 参照）	PD が議長、内閣府が事務局を務め、内閣府に置く。課題の研究開発計画の作成や実施等に必要な調整等を行う。 平成 30 年末までに 11 回開催。 なお、経済産業省における直執行事業である平成 28 年度事業「クリーンディーゼルエンジン技術の高度化に関する研究開発」は、本課題と関連性が高いため、当該事業が補助事業であり成果物が補助金の交付先に帰属する点に留意しつつ、推進委員会にて可能な範囲で情報共有を行い、各事業で得られた知見を相互に有効活用することとしている。
知財委員会	PD 又は PD の代理人、主要な関係者、専門家。必要に応じて独占禁止法への抵触に関する専門家を含める。	JST に置く。
プログラム会議	PD、サブ PD、産学有識者、内閣府（オブザーバ）	高度な専門性を有した産学有識者で構成される会議であり、毎年度研究主体を対象に評価し、研究内容及びそれに最適な体制の見直しを促す。また、研究の進展や新たな課題に迅速に対応できるよう、適宜対応する。JST に置く。
チーム内会議	各チームリーダー、各クラスター大学 ⁹ 、AICE 支援者	年に数回、各チーム内で会議を実施し、チームごとの進捗の報告及び研究計画の確認を行い、研究開発の実施等に必要な調整を行う。プログラム会議委員や JST が参加し、意見交換を行うこともある。

本課題に特徴的な会議体。

⁹ クラスター大学は研究を実施する機関である。同じ大学で複数の研究室がクラスター大学として参加していることもあり、大学の数と必ずしも一致しない。研究開発計画では国研もクラスター大学のカテゴリーに入れている。

表 3-3 革新的燃焼技術推進委員会 構成員一覧表

区分	所属	氏名
PD	トヨタ自動車株式会社未来創生センターエグゼクティブアドバイザー	杉山 雅則
サブ PD	株式会社 SOKEN 専務取締役	古野 志健男
推進委員	東京大学名誉教授	越 光男
	公益社団法人日本工学会会長 / 科学技術振興機構研究開発戦略センター環境・エネルギーユニット上席フェロー	佐藤 順一
	立命館大学経営学部教授	徳田 昭雄
	千葉大学名誉教授	野波 健蔵
	自動車用内燃機関技術研究組合理事長 / 日産自動車株式会社常務執行役員	平井 俊弘
外部有識者	産業技術総合研究所イノベーションコーディネータ	西尾 匡弘
関係省庁	文部科学省研究開発局環境エネルギー課専門官	滝沢 翔平
	経済産業省製造産業局自動車課電池・次世代技術室課長補佐	堀川 泰宏
事務局	内閣府大臣官房審議官 (科学技術・イノベーション担当)	黒田 亮
	内閣府政策統括官 (科学技術・イノベーション担当) 付参事官 (エネルギー・環境担当)	太田 志津子
管理法人	科学技術振興機構イノベーション拠点推進部部长	野口 義博

平成 30 年 11 月 29 日 (開催日) 現在

(3) 予算

表 3-4 革新的燃焼技術の予算

年度	予算 (億円)
平成 26 (2014) 年度	20.0
平成 27 (2015) 年度	19.7
平成 28 (2016) 年度	19.0
平成 29 (2017) 年度	20.0
平成 30 (2018) 年度	15.5
合計	94.2

(4) 研究開発テーマ

本課題では、世界の研究開発トレンドに先駆けて最大熱効率 50% 及び CO₂ 30% 削減 (平成 23 年比) を実現するための革新的なエンジン燃焼制御の要素技術を研究し、各要素技術の効果の確認と組み合わせコンセプトの構築を構築、検証した。また、本課題の実施を通じ、国際的にも通用する内燃機関の産学共同研究体制を育成し、これらの体制を活用しつつ、将来の我が国の内燃機関研究の持続的な発展を図ることを目標とした。

1) ガソリンエンジンの超希薄燃焼等により熱効率向上に関する研究

超希薄燃焼技術によりガソリンエンジンの熱効率 50%を実現するための研究開発を行った。具体的には、超希薄・高流動条件下で着火可能な点火システムの開発、タンブル流最適化による火炎伝搬の促進、化学反応論的アプローチによるノッキング制御コンセプトの創出、壁面熱伝達機構の解明に基づく冷却損失低減に取り組んだ。

表 3-5 ガソリンエンジンの超希薄燃焼等により熱効率向上に関する研究体制

研究責任者	飯田 訓正 慶應義塾大学大学院理工学研究科特任教授（研究）
研究開発実施機関 （計 22 機関）	慶應義塾大学、東京大学、日本大学、岡山大学、東京工業大学、山口大学、九州大学、大阪府立大学、徳島大学、千葉大学、東京農工大学、東京都市大学、明治大学、東北大学、茨城大学、上智大学、北海道大学、広島大学、大阪工業大学、福井大学、産業技術総合研究所、名古屋工業大学

2) ディーゼルエンジンの急速消音及びクリーン低温燃焼等による熱効率向上に関する研究

ディーゼル燃料と空気の高度混合制御により、燃焼の高速化と冷却損失・放射騒音の抑制を両立する新燃焼法の開発を目指した。具体的には、噴射による混合気制御法の提案、後燃え現象の解明と低減、噴霧制御による冷却損失抑制、超高压噴射による PCCI 燃焼制御¹⁰、燃焼とエンジン構造による放射音制御の研究開発を行った。

表 3-6 ディーゼルエンジンの急速消音及びクリーン低温燃焼等による熱効率向上に関する研究体制

研究責任者	石山 拓二 京都大学大学院エネルギー科学研究科教授
研究開発実施機関 （計 16 機関）	京都大学、広島大学、長崎大学、鳥取大学、産業技術総合研究所、明治大学、徳島大学、早稲田大学、同志社大学、大阪工業大学、神戸大学、東京工業大学、九州大学、山口大学、北海道大学、滋賀県立大学

3) ガソリンエンジン及びディーゼルエンジンに共通する研究：燃焼制御モデル、解析ツールに関する研究

高度燃焼制御システムの構築を目指し、制御対象のモデリングに向けた制御系設計開発支援ツールの開発を行った。具体的には、全体モデリングに必要な、高速 3 次元 (3D) 計算コアソフトの開発、着火・燃焼・排気サブモデル群の開発、及びコントローラー設計に必要な、高いロバスト性を有する制御方式の開発、制御モデルの定数最適化を行うツールの開発を行った。

¹⁰ 予混合圧縮着火。燃料と空気をあらかじめ混合してから圧縮して着火させる燃焼方式。

表 3-7 ガソリンエンジン及びディーゼルエンジンに共通する研究：燃焼制御モデル、解析ツールに関する研究

研究責任者	金子 成彦 東京大学大学院工学系研究科教授
研究開発実施機関 (計 18 機関)	東京大学、慶應義塾大学、宇都宮大学、熊本大学、宇宙航空研究開発機構、早稲田大学、神戸大学、海上技術安全研究所、広島大学、上智大学、日本大学、岡山大学、北海道大学、明治大学、千葉大学、大分大学、群馬大学、横浜国立大学

4) ガソリンエンジン及びディーゼルエンジンに共通する研究：損失低減に関する研究

本研究開発テーマでは排気エネルギーと機械摩擦の損失低減に取り組んだ。具体的には、排気エネルギーの有効利用として ターボ過給システムの高効率化と 排気熱を利用した熱電発電の効率と範囲の拡大、機械損失の低減として ピストン・シリンダ系やクランク・軸受系で発生する摩擦損失の評価・低減技術の開発を行い、最終的に摩耗・焼き付きリスクの評価が可能な高精度トライボシミュレータを開発した。

表 3-8 ガソリンエンジン及びディーゼルエンジンに共通する研究：損失低減に関する研究体制

研究責任者	大聖 泰弘 早稲田大学大学院次世代自動車研究機構特任研究教授
研究開発実施機関 (計 13 機関)	早稲田大学、千葉大学、東京理科大学、東京都市大学、東京工業大学、名城大学、名古屋大学、東海大学、東北大学、九州大学、福井大学、香川大学、京都大学

(5) 研究開発テーマと各省庁施策との連関図

研究開発テーマと各省庁施策との連関図を図 3-3 に示す。

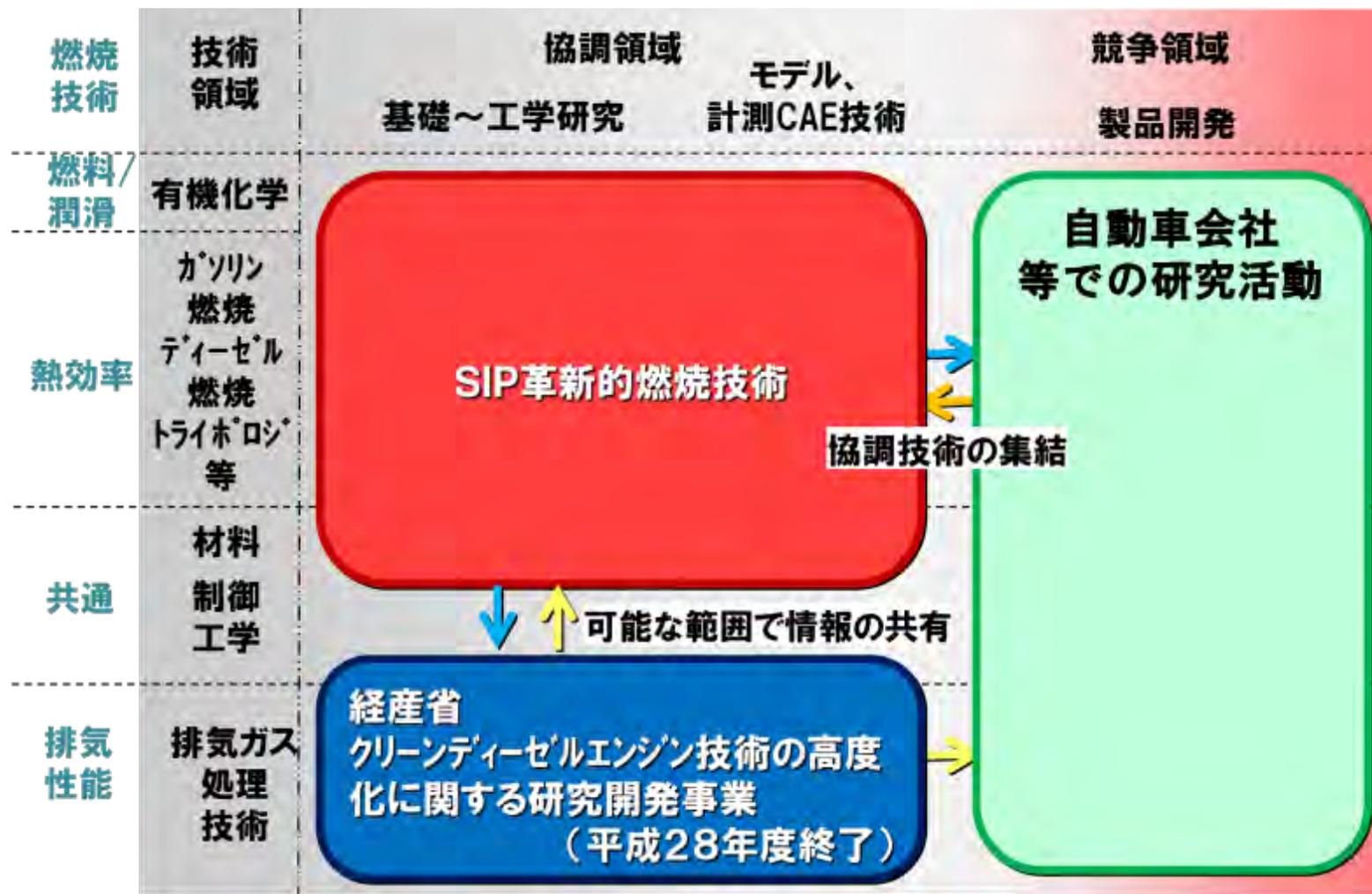


図 3-3 革新的燃焼技術の研究開発テーマ及び各省庁施策との連関図

(6) 出口戦略

1) 我が国の競争力向上につながる CO₂ 低減の燃焼技術創出と普及

国産車の燃費性能をより向上させ、国際競争力を更に強化すべく、CO₂ を 30%削減（平成 23 年比）するための基盤技術、開発ツール等を順次、社会に提供する。

2) 持続性を持った産学官共同研究体制の整備

本課題では、以下の点を重視した研究体制を構築する。

- ┆ 産からの共通ニーズの発信
- ┆ 産学の人材の交流
- ┆ リーダー大学のマネジメント能力の成長
- ┆ 大学から産につなぐ産業の創出

また、課題終了後を見据えた共用研究設備の自立的・持続的運用、並びに大学の成果を実用化につなげるための体制構築等、産業競争力を支える持続的な産学官研究体制に関する施策の検討を実施する。

本体制は、新しい産学官連携のスキームとして他産業への雛形となり、我が国の国力向上に資する新しい研究開発プロセスへ成長するものである。さらに、この持続的な産学官研究体制は、本課題の研究開発テーマ以外にも展開が可能である。例えば、地方自治体とその地域の大学が中心となって、他の地方大学・高等専門学校等や公設試験研究機関と連携し、新たな成果を創出するなどの取り組みが考えられる。

3) モデルベース開発の進展

今回の開発成果を企業において活用を図ることで、国内における制御モデルや制御/解析ソフトの共通化を進めつつ、開発コストの低減につなげ、かつ最新のアカデミアの知見を取り入れて高度に発展していくモデルベース開発の確立を目指す。

(7) 分析フレーム（ロジックツリー）

評価に際して、研究開発活動がもたらす直接的な研究成果と、現在・将来の波及効果について、平成 30 年度研究開発計画からロジックツリーにより整理を行った結果を図 3-4 に示す。

本課題は、産業界の協力の下、大学において自動車のガソリンエンジン及びディーゼルエンジンの熱効率向上に資する基礎的な要素技術を確立し、確立された要素技術の組合せにより最大熱効率 50%を達成することが短期的な目標として設定されている。また、これと並行して要素技術の確立に当たって行われた研究成果を民間企業等広く社会に共有することも目標として設定されている。中長期的には、熱効率 50%の達成という目標を達成する過程で欧州に対抗できる産学基盤研究体制を構築し、熱効率向上研究を推進することで、我が国における自動車産業の国際競争力の向上に資することが目標として設定されている。なお、これと並行して熱効率向上による大気環境保全にも貢献するとしている。

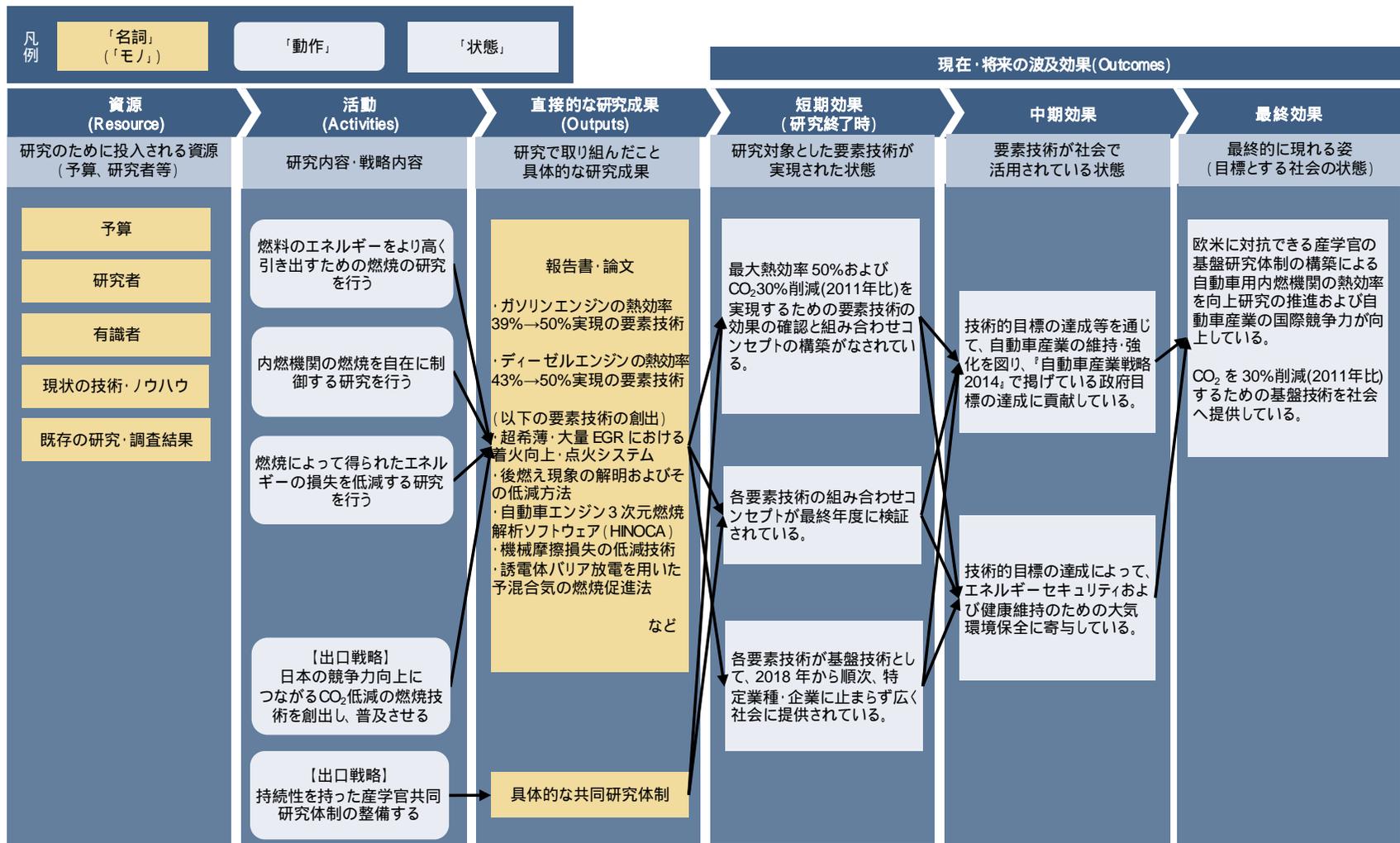


図 3-4 革新的燃焼技術のロジックツリー

(出典)平成30年度研究開発計画を基に作成。

3.1.2 評価

(1) 意義の重要性、SIP の制度の目的との整合性

1) SIP 開始前の研究開発の状況： 産業界

エンジンや燃焼に関する研究は欧州の研究機関に委託されることが多々あり、資金及び技術力(研究開発力)の欧州への流出・集約と、我が国の国際競争力低下が懸念されていた。

こうした状況を背景に、SIP 開始前から自動車産業界で AICE (自動車用内燃機関技術研究組合¹¹) 設立に向けた準備がなされていたため、SIP の計画立案の段階において産業界の「競争領域」と「協調領域」を整理した上で産学連携研究を開始できた。

2) SIP 開始前の研究開発の状況： 学术界

SIP 開始前の学术界では、内燃機関や燃焼現象の研究・開発を対象とする競争的資金が少ない状況が続いていたため、研究設備の老朽化や人材枯渇等が進み、研究活動自体が下火になっていた。また、産業界との接点が少なく、各研究者個人の興味に基づき研究に取り組んでいた面もあった。

3) SIP 開始後の変化

SIP で十分な予算を得たことによって、そのほぼすべてを、研究拠点だけでなく参加した大学の研究推進に必要な設備の整備に振り向けることができ、安全設備も充実することに伴って安全水準及び安全意識も向上した。これにより、産業界が安全面の問題で大学に研究委託できなかった状態が改善された。また、AICE が全面的に研究開発を支援する体制を整備したことで、基礎研究から応用研究、さらには産業界での実用化までがひもづいた「産産学学」連携が進み、エンジン・燃焼研究の分野の基礎研究が再興することになった。産業界側も研究を進める中で、今以上の技術革新には現象論まで踏み込んだ学の力が必要であるとの認識のもと、学を全面的に支援し、かつ密接なコミュニケーションを図ることで、産学の歩調が合った研究開発が行われたと評価される。

我が国の基幹産業である自動車業界の競争力強化の観点からも大きな意義があった。

4) 「産産学学」連携の構築

AICE で検討された産業界のニーズ・課題認識に沿いつつ、基礎研究による深堀を行う学术界も一体となって「産産学学」連携の共同研究体制が構築された。

欧米では産業界のニーズに近い応用研究での産学連携体制が一般的であるのに対し、基礎研究までがひも付いた我が国の体制構築は、今後、欧米よりも進んだ研究開発の活性化・促進に大きく貢献することが期待される。

今回の研究体制・設備の確立によって、研究開発の飛躍的進展・効率化が進むと考えられ、これまでの研究レベル低下の懸念に対しては一定の歯止めがかかるとの期待も多くの研究

¹¹ AICE 自動車用内燃機関技術研究組合 (平成 31 年 1 月閲覧)

<<http://www.aice.or.jp/about/index.html>>

実施者から示されている。

(2) 目標・計画・戦略の妥当性

熱効率 50%という目標値については、妥当な設定値であったと考えられる。仮に 50%よりも低い目標値(例えば 45%等)とした場合、現状の各企業の研究開発目標レベル(競争領域)となり、知財等の関係から企業間での率直なコミュニケーションや情報提供が行われにくくなるという懸念がある。それに対して、今回掲げた目標は各社の現状における研究開発におけるスコープよりも一段高い位置づけで、これによって、各社が競争しない領域(協調領域)にて密接に連携・協力した研究開発を可能としたと評価できる。また、定量的な目標を設定したことで、進捗や成果の評価は厳しくなったが、目標が明確になったことで研究に関するモチベーションが高く維持された。

単気筒エンジンのモデル化¹²を成果目標として設定したことも、研究の進捗要因となった。最終的には実機を作って検証することが必要となるが、企業が開発するエンジンでは競争領域となってしまふ。今回はシンプルな単気筒エンジンでモデル化と実証を行ったことで、研究として基礎的な部分を押さえるとともに企業間の協調を実現しやすくなった。

また、「モデル化の部分までは協調」、数値目標達成のための「要素技術のアイデアは大学から」という SIP での成果の線引きを明確化したことで、成果の取扱について産学の間で大きな摩擦を生むことなく連携・協力が進んだ。

(3) 課題のマネジメント(適切なマネジメントがなされているか。)

産と学の研究開発の歩調については、初期段階に相違があり、両者で合わせる必要であったものの、産学連携の大きな枠組みとしては有効に機能したものと考えられる。

1) PD 等の拠点訪問及びサイトビジットの実施

月 1 回程度のサイトビジット(PD、サブ PD が直接各クラスター大学を訪問)を実施し、進捗確認やアドバイスをする機会を設けた。

さらに、産学間の信用構築のため、大学の研究者たちが SIP 参画企業を訪れ、現場見学する機会を積極的に設定した他、AICE 参加企業から 30 名程度が各主要大学の研究室に入り、研究を実施するなど、支援を含めると延べ 2~300 人が関わった。このように AICE からの大規模な人員支援を実施したことにより、マネジメントの上流側から研究責任者レベルに至るまで、目標の共有や意思の統一が進んだ。

PD やサブ PD によるサイトビジット等によって 2~3 年目からは状況が変わってきたものの、開発ペースの遵守を前提にした工程表による産の研究手法に対して、学の一部からは、学術的な疑問点の究明を丁寧に行うことが難しく、窮屈と感じた、との意見もあった。

¹² 実物の内燃機関(リアル)の性能を数値計算(バーチャル)により再現するために必要な様々な計算式や計算ツールを研究開発すること。計算式には、数値化された構造物、そこに存在、介在する物質(例えば燃料、空気、オイル等)の量・質・運動情報、それらが関係する物理化学的变化を記述する方程式等があり、物理現象の解明を基に構築する物理式と、実験値から導出される実験式に層別される。計算ツールは、使用目的に沿った忠実さで現実を再現し、かつ使用環境に適した計算負荷で動作可能なアルゴリズム及びそれに基づくソフトウェアプログラム等がある。

2) 管理法人の貢献

管理法人については、平成 27 年 1 月に AICE と連携協定を結び、SIP 研究成果の創出のために、AICE が企業ニーズの提示やマネジメント方法の提供、研究に必要なエンジンや特殊な研究設備の導入における協力、人材の派遣、成果の発信等を通して研究主体を支援するとともに、成果の活用に向けて加速することで、新たな産学連携体制を構築した。協定を締結した AICE 内からは、本課題の 4 つの研究テーマ（ガソリン、ディーゼル、制御、損失低減）に対応するチームが構築（延べ 100 人体制）され、AICE の技術者が研究チームの一員として各研究に参画した。

本協定に基づき、技術的な観点での研究の進捗管理を分担することで、効率的な進捗管理体制が構築され、進捗管理だけでなく、PD、サブ PD と研究責任者の間の意思疎通への支援、PD の内外への発表資料の作成が評価されている。また、知財に関する取決めや事務的なサポートの面についても高く評価されている。

(4) 直接的な研究成果（アウトプット）

研究開発活動の目標の達成状況と、得られた直接的な研究成果（アウトプット）は以下である。

1) 目標の全般的な達成状況

今回目標として設定した熱効率 50%を、燃焼の基礎研究、計測技術の高度化、モデル化、機械摩擦損失の低減、排気エネルギーの有効活用によって、ガソリン（51.5%）、ディーゼルエンジン（50.1%）と、いずれも 5 年という極めて短期間で達成した。これは直近の製品（自動車）に搭載されるエンジンの熱効率が直ちにこの水準になることを意味しないものの、今後の着実な燃費効率改善に寄与する成果を得た。

また、産業界ニーズの提示（産産連携）、アカデミアのチーム研究（学学連携）、人材・ニーズ・シーズが往来（産産学学連携）する持続的な産学連携体制を構築した。

2) 燃焼分野新領域の開拓

単気筒エンジンを対象として、超希薄燃焼（スーパーリーンバーン）領域での安定着火・燃焼を実現させた。これは、スーパーリーンバーンの燃焼が不安定で全体的な効率が悪いというこれまでの常識を覆す研究成果であり、燃焼の教科書を書き換えるレベルの学術的に意義のある成果といえる。スーパーリーンバーンの基本コンセプトを図 3-5 に示す。

これまでにないスーパーリーンバーンによる低温燃焼の実現から、エネルギーロス(冷却損失)を低減し、熱効率を向上

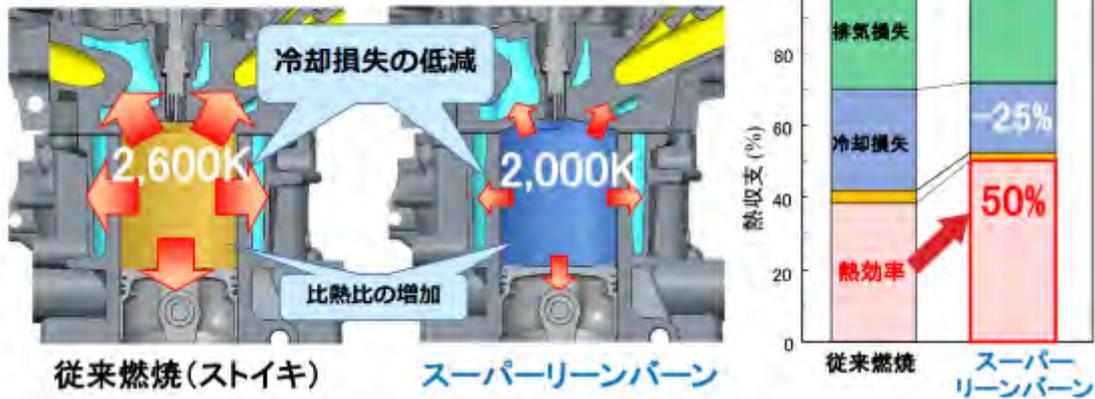


図 3-5 スーパーリーンバーンの基本コンセプト

(出典) JST「SIP 革新的燃焼技術による「産産学学連携」と最新成果(平成 30 年 9 月 13 日)」「平成 31 年 1 月閲覧」<https://www.jst.go.jp/pdf/pc201809_sip.pdf>

3) 多種多様なモデル開発及びソフトウェア開発

SIP 成果で得られたアカデミアの知見により、燃焼の高度制御に不可欠な噴霧形成モデル、PM(粒子状物質)モデル「RYUCA」、モデルベース制御システム「RAICA」、焼き付き・摩耗の危険予測トライボシミュレータ、ターボモデル等、大きく 10 種類に分類される高度モデル群を構築した。

またこれとは別に、高度な流動プラットフォーム及びサブモデルの構築により、詳細な化学反応メカニズムまで踏み込むことで現象論から燃焼解析可能な 3 次元燃焼解析ソフト「HINOCA」が開発された。「産産学学」の力を結集させた 3 次元燃焼解析ソフト「HINOCA」開発の全体像を図 3-6 に示す。



図 3-6 「産産学学」の力を結集させた 3 次元燃焼解析ソフト「HINOCA」の開発

(出典) JST「SIP 革新的燃焼技術による「産産学学連携」と最新成果(平成 30 年 9 月 13 日)」「平成 31 年 1 月閲覧」<https://www.jst.go.jp/pdf/pc201809_sip.pdf>

今回開発された、現象論まで踏み込んだ精緻なモデル群は、国内はもとより、海外でも二

ーズがあり、例えば、燃焼の化学反応機構を掲載したウェブサイト¹³へのアクセスは、平成31年1月現在、海外からを含め62,000件を超えており、更に化学反応機構等の国内外からのダウンロード数は約2,700件に達した。フランスのCERFACS¹⁴とIFP¹⁵が共同で開発した代表的な海外の計算コードAVBPと比較すると、「HINOCA」の性能は燃焼に関する最先端の知見が反映されており、それらのコードを計算速度や精密さで超えるとの専門家からの評価もある。「HINOCA」は将来的にエンジン燃焼研究のデファクトスタンダードになり得るポテンシャルも有する。

4) データベース (DB) の構築

SIP で得られた各種研究成果 (論文等) や実験データを保存する DB を構築するとともに、著作権保護と活用を両立させるポリシーガイドラインを策定し、平成30年8月から運用が始まった (サーバーは産業技術総合研究所に設置)。AICE から DB を活用した研究開発を行いたいとの意見が寄せられている。本 DB については、AICE の活用による SIP 終了後の費用負担や維持管理体制の具体化等、運用面での整備も盤石である。構築したオープン・アンド・クローズを戦略的に選択できる DB の全体像を図3-7に示す。これは、SIP の研究成果が実際の企業の研究開発への活用の可能性を生み出した意味で大きな成果であると考えられる。

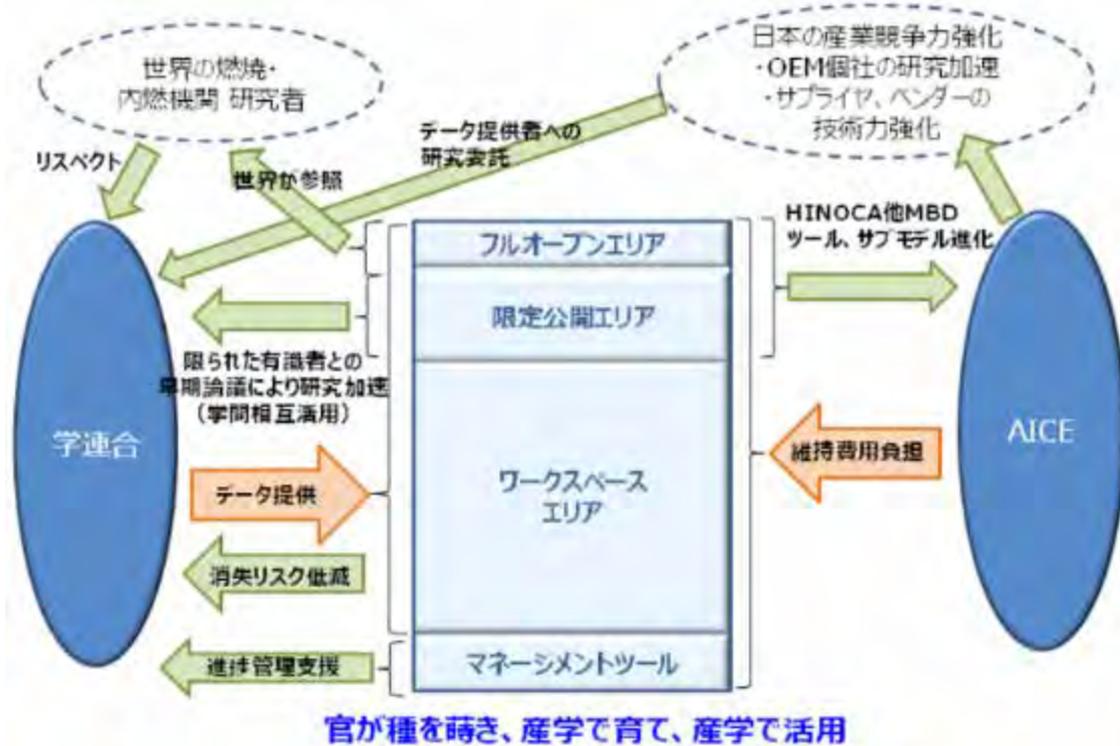


図 3-7 オープン・アンド・クローズを戦略的に選択できる DB を構築

¹³ 「SIP 革新的燃焼技術 ガソリン燃焼チーム」(平成31年2月閲覧) <<http://sip.st.keio.ac.jp/>>

¹⁴ 欧州計算科学推進研究センター (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique)

¹⁵ フランス国営石油研究所 (Institut Francais du Petrole)

5) 「産産学学」連携体制の実現

産学の相互理解が進み、産業界のニーズ・課題認識と、学术界の基礎から応用研究の知見とがかみ合い、我が国独自の「産産学学」連携の共同研究体制を実現した。産産学学連携体制の参考としたドイツ「FVV¹⁶」は、産業に直結した工学的な研究課題の設定が主である。他方、我が国では基礎研究から応用研究までの幅広い取り組みを実現した。SIPにより実現した産産学学連携体制を図 3-8 に示す。

株式会社小野測器、株式会社堀場製作所の協力で研究開発拠点に開設したオープンラボ（企業のスペースに最新の設備を整備したものであり、一大学では実施できない規模での研究が可能）も連携のプラットフォームとしての役割を果たした。大学等の個別機関に装置を導入するのではなく、オープンラボという形式を取り入れたことにより、学术界の研究基盤が整備されただけでなく、研究者同士の交流が深まり、研究進捗に貢献し、人材育成にも好影響を及ぼした点が評価できる。ほかにも、マシンタイムの制約や短時間で成果の最大化を意識した研究内容・計画の立案や、研究者間のコミュニケーションの活性化、モチベーション向上、意識改革にもつながった。

また、本課題実施により構築された「産産学学」連携体制を、SIP 終了後も引き続き維持していくため、「内燃機関産学官連携コンソーシアム」¹⁷（事務局：産業技術総合研究所）が、学术界の連合体として設立された。

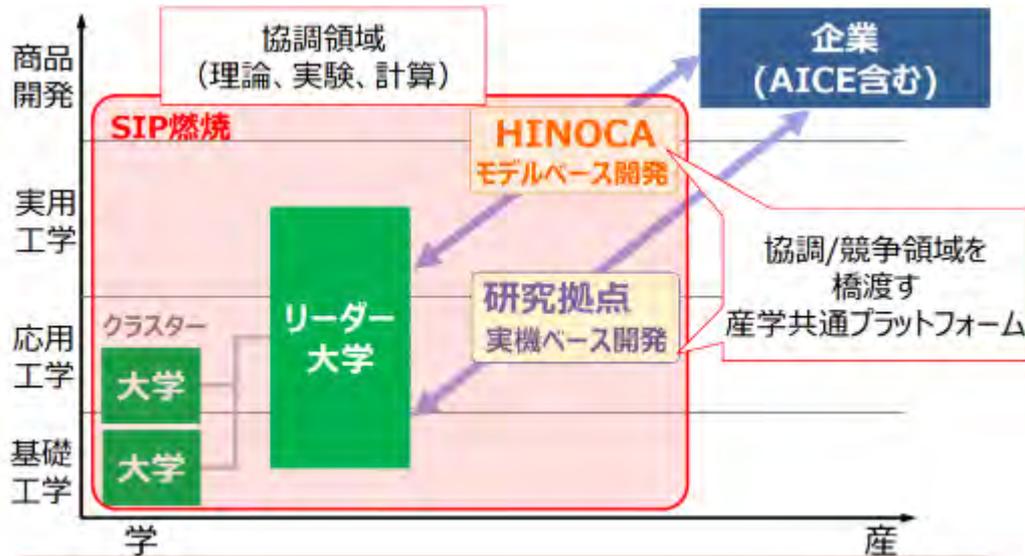


図 3-8 SIP により実現した産産学学連携体制

（出典）JST「SIP 革新的燃焼技術による「産産学学連携」と最新成果（平成 30 年 9 月 13 日）」（平成 31 年 1 月閲覧）<https://www.jst.go.jp/pdf/pc201809_sip.pdf>

6) 情報発信

情報発信活動として、平成 30 年度に開催したシンポジウムを表 3-9 に示す。

¹⁶ Forschungsvereinigung Verbrennungskraft-maschinen e.V.（ドイツ内燃機関研究コンソーシアム）

¹⁷ 産業技術総合研究所「内燃機関産学官連携コンソーシアム」（平成 31 年 1 月閲覧）

<<https://unit.aist.go.jp/rpd-envene/ICEC/ja/membership/index.html>>

表 3-9 革新的燃焼技術に関する情報発信（平成 30 年度実績）

年月日	名称	主催等	概要
平成 31 年 1 月 28 日	SIP「革新的 燃焼技術」最 終公開シンポ ジウム	内閣府 / 科 学技術振興 機構	目標である最大熱効率 50%達成や、現象解明に基 づいて構築されたモデル/ソフトウェア群に関する 研究成果が発表された。また、プロジェクトに参加 している研究機関によるポスター展示や、燃焼制 御システム「RAICA」に関する報道関係者向けエ ンジン実験デモンストレーション等も行われた。

7) 論文・知的財産

過去 5 年間の論文数は全 124 件(うち査読あり 113 件)である。

「HINOCA」は、数十の大学・研究機関による計算・実験・計測結果、及び産（AICE）の検証が統合され一つのソフトウェアになっている。通常、ソフトウェアの著作権はコーディングした者のみに発生する。しかし、本課題の大きな特徴は、これらのソフトウェア等を創出するために、多種多様な実験の実施、実験式やモデルの構築、検証データの取得等に大規模なチームで取り組み、成果授受を行ったことである。よって、「HINOCA」では、ソフトウェア等を創出した全ての参画者の貢献を公平に認め、ライセンス料の配分等に活用できるように、ソフトウェアごとにその創出の貢献度を整理し共有化する仕組みを整えた。これは、全参加者の貢献度を研究・知財の両面で認める工夫であり、「産産学学」で継続して発展可能なオリジナルな知財方策を整備した。

国際的に優れた成果が多数得られたこと対して、論文数が少ない傾向にあるが、これは限られた期間で数値目標の達成を優先させたことが背景にあると推測される。実際に燃焼の基礎研究において世界的に権威のある国際燃焼シンポジウム（International Symposium on Combustion）での発表論文数も 3 件あった。本課題において明らかになった、スーパーリーマンの実験、理論、計算科学等の多面的な取りまとめを通じて、各研究者には今後、質の高い論文投稿が期待される。

表 3-10 燃焼に関する論文数

		発表年					
		5 年合計	2014	2015	2016	2017	2018
合計		124	0	6	31	40	47
査読あり合計		113	0	5	30	36	42
	英文	74	0	5	20	26	23
	和文	39	0	0	10	10	19
	その他	0	0	0	0	0	0
査読なし合計		11	0	1	1	4	5
	英文	0	0	0	0	0	0
	和文	11	0	1	1	4	5
	その他	0	0	0	0	0	0

(注 1) 平成 30 年 12 月末実績。発表年は年度ではなく暦年である。

(注 2) 「査読あり」については学術誌での発表論文以外に学会発表・予稿集等も一部含んでいるが、「査読なし」については学会発表・予稿集等は原則として除いている。

また、本課題は特許の出願件数が極めて少ないが、熱効率 50%を実現足らしめた主要技術に関しては基本的な特許出願が行われている。協調領域での成果である各種モデル群に関するシミュレーションソフトウェア等の成果物も多く、科学的に重要な基礎データの蓄積には成功している。今後は、本成果を各企業が競争領域で活用し、各社の特許出願件数の増加につながることを期待される。

みなし取下げを除いた出願年度別の特許出願件数及び登録件数（ファミリー単位で集計）は表 3-11 のとおりである。7 件の国内出願と、8 件の海外を含む出願があるが、いずれも登録には至っていない。

表 3-11 燃焼に関する特許数

		出願年度					
		5年合計					
		2014	2015	2016	2017	2018	
出願	合計	15	0	1	1	7	6
	国内のみ	7	0	1	0	5	1
	海外含む	8	0	0	1	2	5
	PCT	3	0	0	1	2	0
	米国	3	0	0	1	2	0
	欧州	1	0	0	1	0	0
	中国	3	0	0	1	2	0
	韓国	3	0	0	1	2	0
登録	日本	0	0	0	0	0	0
	米国	0	0	0	0	0	0
	英国	0	0	0	0	0	0
	ドイツ	0	0	0	0	0	0
	フランス	0	0	0	0	0	0
	中国	0	0	0	0	0	0
	韓国	0	0	0	0	0	0

（注）平成 30 年 12 月末実績。みなし取下げを除いた出願年度別の特許出願件数及び登録件数をファミリー単位で集計。

(5) 現在・将来の波及効果（アウトカム）

研究終了時である現時点の目標の達成状況と波及効果、将来（短期・中期・最終）に期待できる波及効果については次のとおりである。

1) 目標の全般的な達成状況

平成 30 年度の研究開発計画における社会的な目標及び産業面の目標は、以下のとおりである。

【社会的な目標】

- 1 エネルギーセキュリティ及び健康維持のための大気環境保全への寄与。
- 1 国際的にも通用する内燃機関の産学共同研究体制を育成し、将来の我が国の内燃機関研究を持続的に発展し、世界トップレベルの内燃機関研究者を育成。

【産業面の目標】

- 1 自動車産業の維持・強化を図り、「自動車産業戦略 2014」で掲げている 2030 年における次世代自動車の新車販売に占める割合 50~70%の達成に貢献。

ガソリンエンジン、ディーゼルエンジン、いずれについても単気筒エンジンによって正味熱効率 50%の目標を達成した。加えて、産産学学連携により国内における内燃機関研究開発体制が構築されたことで、持続的な研究開発が可能となった。これにより内燃機関研究者の育成に寄与するとともに、政府が掲げる「自動車産業戦略 2014」の中で言及された「革新的な内燃機関研究開発の推進」に貢献した。

2) 共通プラットフォーム及びデータベースの産業利用

今後は「HINOCA」の企業利用へ向けた改良¹⁸や継続的な学術的知見の取り込み、また DB の公開範囲の拡大、並びに公開レベルの階層的な設定等も視野に入っており、戦略的な国際発信と国際競争力の向上が期待される。「HINOCA」や研究成果 DB は、既に産業界利用が始まっている。操作面の改良を更に加えるなど、継続的な開発の実施によって、これまでは海外製ソフトに依存していた燃焼モデル計算を、国産のソフトで部分的な代替が可能となることが期待される。

また、「HINOCA」は汎用反応性流体ソフトウェアとして、ガソリンエンジンにとどまらずに広範囲な展開を期待されるとともに、ベンチャー創出により経済的波及効果や研究開発投資の促進効果も期待される。

本課題で創出された多数のモデル・ソフトウェアは、モデルベース開発 (MBD)¹⁹を実現する最先端ツールで、自動車産業にとどまらず、他分野の製造業にも波及し、我が国の競争力の強化に寄与するものである (図 3-9)。

¹⁸ 現状の「HINOCA」はスパコンを利用しており、企業としては利用しづらい面がある。

¹⁹ 実機を用いずバーチャルな環境を構築し、シミュレーションで開発を行う手法のことである。

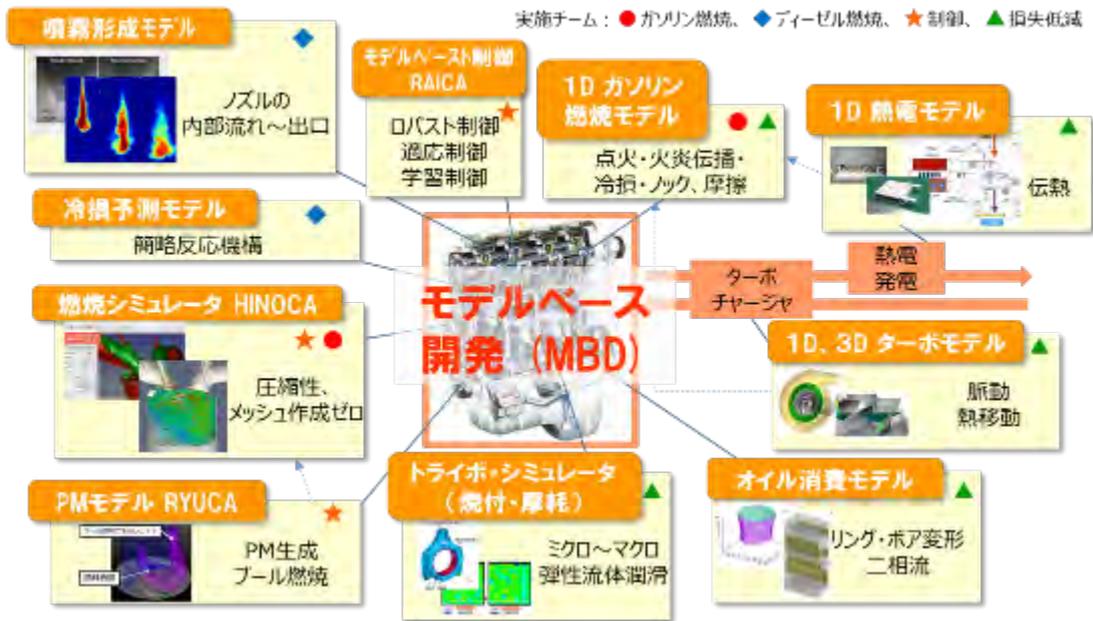


図 3-9 創出された高度なモデル/ソフトウェア群

3) 内燃機関産学官連携コンソーシアムによる研究開発推進

SIP の終了後についても AICE と連携してニーズ・シーズのマッチングを行い、協働で研究開発を進めていく体制が構築できたと考えられる。この構築された体制は将来的には AICE を中心とする産業界と官との連携を図りながら、内燃機関の高度化に係る共通課題の研究を推進していくためのプラットフォームとして維持・発展していくことが求められる。

今回構築された持続可能な産産学学の連携体制を図 3-10 に示す。

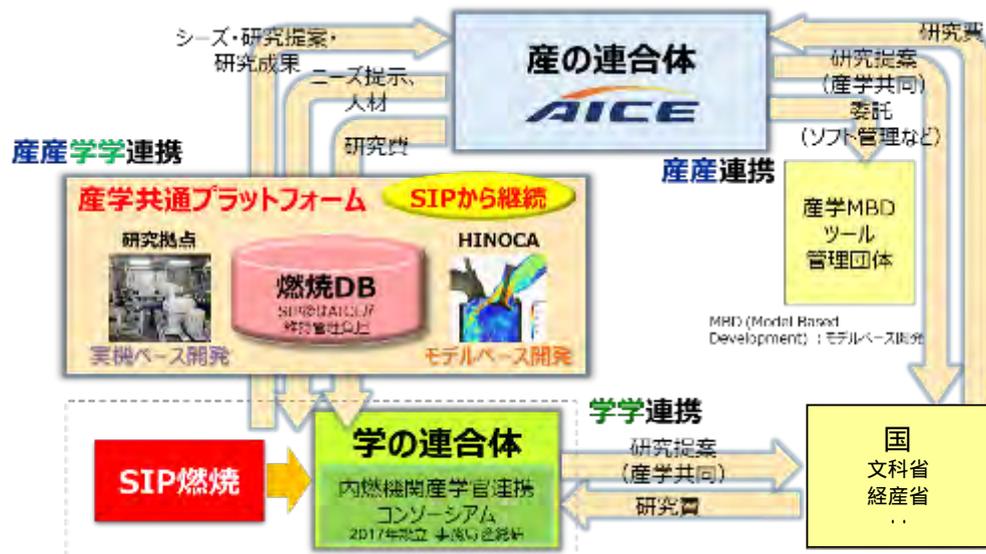


図 3-10 持続可能な産産学学の連携体制

4) 他産業への波及効果

熱効率向上、CO₂削減技術は大型エンジンへの展開が考えられる。ガソリン及びディーゼルエンジンは自動車用小型エンジンよりも大型エンジンの方が効率向上は容易とみられ、排気量大きい大型車や船舶、定置式のエンジン(発電システム、建設機械、農業用機械等)等への成果の適用が進むことによりCO₂削減に大きく貢献するものと考えられる。例えば、ビルのコージェネレーションシステムや船舶エンジンへの展開、ディーゼルエンジンは小・中型発電機への展開が期待される。また、熱電素子による排熱利用は材料の課題があるもののタービン等に応用可能である等、自動車産業以外にも波及する技術要素が開発されたと評価できる。

5) 研究開発活動を通じての波及効果

a ベンチャー創出効果

九州大学発ベンチャー企業として、DeepFlow 株式会社(超大規模流体構造連成解析システム開発)が設立された。同社は経済産業省(特許庁)による知財戦略構築支援先企業にも選定されるなど今後が期待される。

b 人材育成強化

社会的インパクトの大きい研究であるとの評価されたことで研究者のモチベーション向上や、燃焼分野の人気回復等にも好影響を与えたものと考えられる。また若い研究者や学生が、自分の研究が大きな目標達成につながる成功体験を得ることができた。大学によっては、PD やサブ PD のサイトビジットの際に、学生や若手研究者によって直接成果を発表する機会があった。なお、5年間の学の研究参画者数の累計は1,300名であるが、そのうち学生は940名であり、燃焼分野を専攻とした学生を多く輩出した。

さらに、大学がこの分野の社会人ドクター²⁰を受け入れる人数についても増加した。AICEからは22名が大学に派遣され、5年間で3名が学位を取得した。

産と学の人材の流動性が高まり、研究活動が活発化した。

c 大学の研究基盤強化

予算の一部を、本課題の研究における研究設備を稼働させるためには必須となる大学の建屋の安全対策(安全障壁の構築等)に充てたことで、大学の安全設備の充実が図られた。この安全設備の整備には、AICEからのアドバイスも活かされており、設備の充実とともに大学の安全意識も向上し、企業からの研究委託の基盤が構築された。これは今後の研究開発の一層の活発化、効率化に寄与するものと考えられる。構築された SIP 革新的燃焼技術のオールジャパンの研究体制と実機試験可能拠点を図 3-11 に示す。

²⁰ 企業に所属しながら入学し、博士号取得を目指すこと



図 3-11 SIP 革新的燃焼技術のオールジャパンの研究体制と実機試験可能拠点

(出典) JST「SIP 革新的燃焼技術による「産産学学連携」と最新成果(平成 30 年 9 月 13 日)」「(平成 31 年 1 月閲覧) <https://www.jst.go.jp/pdf/pc201809_sip.pdf>

6) 国際的な立ち位置

SIP の結果、前述のドイツ・内燃機関コンソーシアム「FVV」とは異なり、基礎研究までひもづく我が国独自の産学連携体制を構築し、国際的競争力が飛躍的に強化された。これは今後、欧米よりも進んだ研究開発の活性化・促進に大きく貢献すると考えられる。

また、開発したコード「HINOCA」やモデル群「RYUCA」は世界最先端のコード及びモデル群であり、国内では企業における利活用を図ることでモデル/ソフトウェアの共通化を進め、開発コスト低減につなげるとともに、デファクトスタンダード化を含めた国際展開が期待される。

(6) 改善すべきであった点と今後取り組むべき点

1) 改善すべきであった点

本課題は 79 大学、1,300 名(5 年累計)が参加したオールジャパン体制で取り組んだことが有効であったと考えられる。SIP 実施前には、学术界における燃焼分野の研究開発は設備老朽化や人材枯渇等により下火であったところ、本課題において熱効率 50%と困難な数値目標を設定して実施した結果、企業の競争領域に抵触しない協調領域で研究開発が進んだため、大学基礎研究の復活とともに、これまでにない学術的成果を得た。さらに、目標とした「国際的にも通用する内燃機関の産学協同研究体制(産産学学連携)の構築」を達成し、国際的にも大きな影響を与えた。

しかし、当初は、大学基礎研究の復活の観点から設備老朽化や人材枯渇等により実質的な貢献度が低い研究者も参加した可能性があり、研究を進めていく中で実際のエンジンに適用できるものとそうでないものとの仕分を行い、参画する研究実施機関をより絞り込み、夕

ターゲットを絞ってより速く実用化につながる成果を出すことも検討すべきであった。

また、数値目標の実現が優先された結果、開発した各要素技術に対して、高い熱効率を備えたエンジンを自動車に搭載するといった実用化の観点（エンジン単体というよりエンジンシステムという観点）での改善検討が不十分となった可能性がある」と研究現場から指摘があった点も追跡評価をする上で考慮すべき点である。

2) 今後取り組むべき点

本課題では協調領域の開発に注力したため、開発のスコープは要素技術開発が主であった。以降の開発は競争領域に入り、この成果を活用した高効率のエンジンが実際に各社で製品化されるのはこれからとなる。SIP では実用化・事業化を目指しているため、本課題で得られた成果をどのように採り入れていくか、今後各社独自の取り組みが期待される中、そうした製品化は、企業各社の製品戦略にも依存するが、技術的には3年程度、各社が持っている制約やエンジン機種種の制約を考慮すれば5年程度の時間を要するとの見方がある。したがって SIP 終了後、自動車メーカー各社による高効率エンジンの製品化や、開発したモデル・ソフトウェアの利用拡大等について、追跡評価する必要がある。

また、本課題終了後も「産産学学連携」研究体制を維持・継続することが重要であり、そのための研究基盤整備に係る資金調達、予算確保等について、「内燃機関産学官連携コンソーシアム」とAICEが連携をとりつつ、大学側が具体的な対応を検討する必要がある。

更に一層の「産産学学」研究開発及び成果の創出には、学の連合体である同コンソーシアムとAICEが連携してニーズ・シーズマッチングを進めることが期待され、そのためには、今回目標として設定した熱効率50%超達成後の共通の方向性を定めて連携・協力していくことが望ましい。

加えて、同コンソーシアムが管理する予定となっている「HINOCA」を含む高度なモデル/ソフトウェア群について、運用・維持費用の補填として企業からの資金や海外からの利活用も含め、その活用方法や中長期的な維持方針等の具体的な方針を検討し、着実に運用することが必要である。こうした点についても内閣府による追跡的なフォロー及び評価・フィードバックが必要である。

3.2 次世代パワーエレクトロニクス

<p>(1)意義の重要性、SIPの制度の目的との整合性</p>	<ul style="list-style-type: none"> SIPの特徴が活かされ、実用化へ向けた取り組みが前倒しされた。 鉄道で世界に先駆けて実用化したSiCについても欧米、中国に差を詰められている状況であり、欧米に遅れている回路や使いこなしの研究開発を取り上げた。 産学連携が活性化された結果として、共同研究の増加、ベンチャー企業の創出が実現できた。
<p>(2)目標・計画・戦略の妥当性</p>	<ul style="list-style-type: none"> 研究開発計画において、ポートフォリオに基づく的確な目標設定、パワエレ研究者がオールスターで参画する実施体制を描き、明確なロードマップを作成したことが技術的目標を達成できた要因となった。 TRLが高いテーマ(SiC系)は実用化・出口設定を意識した計画とし、その他のテーマ(中低TRLのGa₂N、ダイヤモンド等)は2年間のフェジビリティスタディ(FS)後にテーマを絞った実施とするなど、広く可能性を拾いつつも重点化する計画を立てた。
<p>(3)課題におけるマネジメント (適切なマネジメントがなされているか。)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 企業の感性を持ったPDとアカデミアの専門性が融合し、プロジェクト運営に活かされたところが技術的目標達成のポイントとなった。 PDに大きな裁量を与えられているため、テーマ間調整やリフォーメーションが可能となった。実用化フェーズの研究開発においてこのフレキシビリティは効果的であった。 研究責任者会議を頻繁に開催し、各研究責任者の研究開発の考え方等を整合させた(初年度は2か月に一回ペース、近年は半年1回)。異分野の研究者を一つの場に集めて議論したことが効果的に作用した。
<p>(4)直接的な研究成果 (アウトプット)</p>	<ul style="list-style-type: none"> SiC系新型パワー素子(高耐圧(6.5kV)、超高耐圧(20kV))及びアプリケーション(従来比2倍以上の高トルク出力インホイールモータ、6.6kV連系用トランスレス変換器、EV²¹用250耐熱高電流密度モジュール等)を新規に開発、対Si素子比損失1/2以下、体積1/4以下を達成した。 GaNについては素子故障の要因となる材料欠陥が従来の1/10以下となるウエハ技術、ダイヤモンドについてはウエハ基礎技術(絶縁強度評価技術を含む製造技術)を確立し、Ga₂O₃については基板製造の事業化を「株式会社ノベルクリスタルテクノロジー」において実現した。 査読あり論文(293件) 特許出願件数(175件)
<p>(5)現在・将来の波及効果 (アウトカム)</p>	<ul style="list-style-type: none"> デバイス分野とシステム分野の産学連携により、直接市場である自動車用途及び電力用途でSiCアプリが実用化していく見通しとなった。 今後、間接的市場や、要素技術の周辺分野展開、ベンチャー創出、研究人材の波及等が期待される。 標準化には至らなかったが、構成部材の性能評価に最適な標準

²¹ 電気自動車(Electric Vehicle)。

	<p>的試験方法等を検討し、標準化を推進するほか、各部品・材料の性能認証制度の検討を進める。</p>
<p>(6)改善すべきであった点と今後取り組むべき点</p>	<ul style="list-style-type: none"> ┆ PD が構想していた TRL の異なるテーマを束ねて実施する狙いについて、プロジェクト開始時に研究責任者に理解させる必要があった。 ┆ SiC は、国内ウエハ製造企業が高品質かつ低コストウエハの安定供給体制を構築することが必要である。 ┆ GaN は、実用化に向けた研究開発に加速的に取り組み、早期に実用化することが必要である。 ┆ Ga₂O₃、ダイヤモンドについては、SIP での成果を踏まえつつ、それぞれの材料ポテンシャルを生かした事業化・実用化が本当に可能か否かを見極める必要がある。

3.2.1 概要

(1) 背景と目的

パワーエレクトロニクスは、省エネルギー化における重要なコア技術であり、電力の発生・輸送・消費を効率的・高精度に行う機能や、モータを効率良く回す機能、機器をきめ細かく調整する機能を有している。世界市場で大きな成長が見込まれ、我が国の産業競争力上、重要な技術分野である。

次世代材料である SiC（炭化ケイ素）や GaN（窒化ガリウム）のデバイスへの適用についてみると、我が国企業は鉄道用 SiC デバイスの製品化等、一部の領域で開発を先行させているものの、SiC デバイスは欧米企業が開発を一部先行させている。また、GaN デバイスでは欧米が産学連携による緊密な開発体制を構築し、中国、韓国、台湾も国家プロジェクトを立ち上げるなど、国際的な研究開発競争が激化している。

そこで本課題では、パワーエレクトロニクスの次世代材料を中心に、性能向上、用途と普及の拡大を図ることで、省エネルギー化の推進と我が国産業競争力の強化を目的とする。

(2) 実施体制

平成 30 年度時点で、サブ PD は 2 名で、うち 1 名は研究責任者を兼ねている。研究責任者は 8 名である。管理法人は新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）となっている。

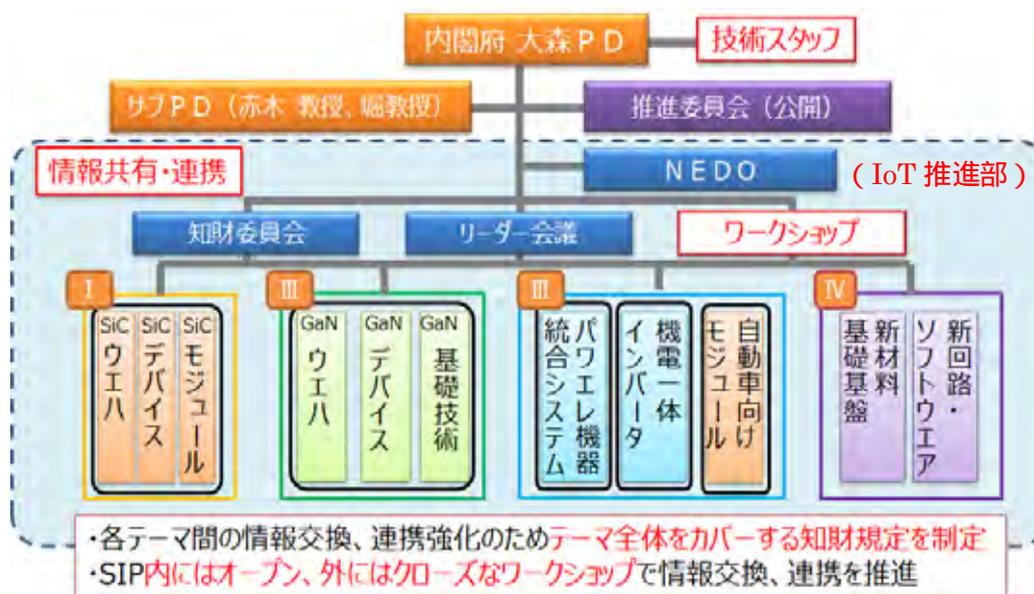


表 3-12 次世代パワーエレクトロニクスの PD 等

区分	所属	氏名
PD	三菱電機株式会社開発本部主席技監	大森 達夫
サブ PD	東京大学大学院新領域創成科学研究科教授	堀 洋一
サブ PD 兼 研究責任者	東京工業大学工学院電気電子系特任教授、名誉教授	赤木 泰文

平成 31 年 1 月 1 日現在

表 3-13 次世代パワーエレクトロニクスの主要会議体

名称	構成員	概要
推進委員会	PD、サブ PD、専門家、 関係省庁、関係機関、事 務局（内閣府）管理法 人（NEDO） （表 3-14 参照）	PD が議長、内閣府が事務局を務め、内閣 府に置く。課題の研究開発計画の作成や 実施等に必要な調整等を行う。 平成 29 年末までに 9 回開催。
知財委員会	PD 又は PD の代理 人、主要な関係者、専 門家等	NEDO に置く。年に 2-3 回実施。
テーマリーダー会議	PD、サブ PD、研究責 任者等	進捗管理、テーマ間調整等。 初年度は 1 回/2 か月、以降は 2 回/年で実 施。
研究開発テーマ毎の進 捗管理を行う進捗会議	PD、サブ PD、研究責 任者等	進捗管理。 全テーマで延べ 40 回/年。最頻の研究開 発テーマでは 1 回/月で実施。

本課題に特徴的な会議体。

上記のほか、年に 1~2 回ワークショップを開催した。

表 3-14 次世代パワーエレクトロニクス推進委員会 構成員一覧表

区分	所属	氏名
PD	三菱電機株式会社開発本部主席技監	大森 達夫
サブ PD	東京工業大学工学院電気電子系特任教授、名誉教授	赤木 泰文
	東京大学大学院新領域創成科学研究科教授	堀 洋一
専門家	公益財団法人鉄道総合技術研究所代理理事長	正田 英介
	京都大学名誉教授	松波 弘之
関係省庁	総務省情報通信国際戦略局技術政策課研究推進室室長	田沼 知行
	文部科学省研究振興局参事官(ナノテクノロジー・物質・材料担当)	齊藤 康志
	経済産業省商務情報政策局情報産業課室長	田中 伸彦
関係機関	科学技術振興機構経営企画部イノベーション企画推進室調査役/研究監	古川 雅士
事務局	内閣府大臣官房審議官(科学技術・イノベーション担当)	黒田 亮
	内閣府政策統括官(科学技術・イノベーション担当)付企画官(SIP担当)	古田 裕志
管理法人	新エネルギー・産業技術総合開発機構 IoT 推進部部長	都築 直史

平成 30 年 2 月 23 日(開催日)現在

(3) 予算

表 3-15 次世代パワーエレクトロニクスの予算

年度	予算(億円)
平成 26(2014)年度	22.0
平成 27(2015)年度	24.2
平成 28(2016)年度	24.1
平成 29(2017)年度	24.0
平成 30(2018)年度	20.0
合計	114.3

(4) 研究開発テーマ

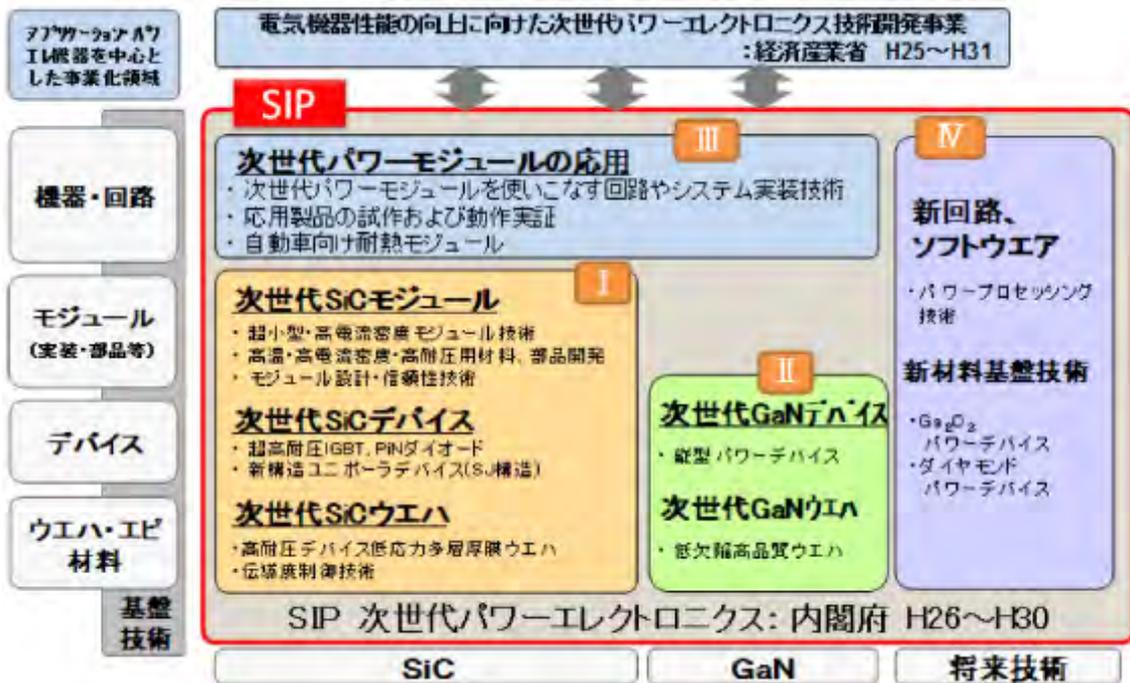


図 3-13 次世代パワーエレクトロニクス研究開発の全体像

(出典) 平成 30 年度研究開発計画

1) SiC に関する拠点型共通基盤技術開発

パワーエレクトロニクスの基盤技術強化を目的とし、中心となる研究開発実施機関(産業技術総合研究所)のもと、産学官の関係機関がネットワークを構築するなどによって、効率的に研究開発を推進する研究開発拠点を形成した。SiC ウエハ、デバイス、モジュールの信頼性の確保の上、高耐圧化、小型化、低損失化²²を図るとともに、若手研究者の人材育成を行った。

²² SiC は破壊電界強度が高いため電流が流れる層を薄くできる。単位面積当たりオン抵抗を結果的に小さくでき、新構造採用、シミュレーション技術適用等により高耐圧化、小型化、低損失化を可能とした。

表 3-16 SiC に関する拠点型共通基盤技術開発体制

研究責任者	奥村 元 産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクス研究センターセンター長
研究開発実施機関 (計 43 機関)	産業技術総合研究所、京都大学、大阪大学、産業科学研究所、一般財団法人電力中央研究所、名古屋大学、名古屋工業大学、大阪電気通信大学、筑波大学、東京大学、東京工業大学、東北大学、株式会社デンソー、京セラ株式会社、株式会社タカトリ、旭ダイヤモンド工業株式会社、株式会社フジミンコーポレーテッド、昭和電工株式会社、ローム株式会社、株式会社東レリサーチセンター、JFE テクノリサーチ株式会社、富士電機株式会社、株式会社東芝、株式会社日立製作所、三菱電機株式会社、住友電気工業株式会社、新日本無線株式会社、株式会社アルバック、トヨタ自動車株式会社、電気化学工業株式会社、日本ファインセラミックス株式会社、株式会社ノリタケカンパニーリミテド、日本特殊陶業株式会社、日本碍子株式会社、太陽誘電株式会社、コア株式会社、日産自動車株式会社、カルソニックカンセイ株式会社、サンケン電気株式会社、住友ベークライト株式会社、株式会社明電舎、ルネサスエレクトロニクス株式会社、矢崎総業株式会社。

2) GaN に関する拠点型共通基盤技術開発

パワーエレクトロニクスの基盤技術を強化するため、産学官連携の研究開発拠点を構築し、低欠陥の次世代 GaN ウエハ製造技術、GaN 縦型パワーデバイスのプロセス技術開発を行った。

表 3-17 GaN に関する拠点型共通基盤技術開発

研究責任者	須田 淳 名古屋大学大学院工学研究科電子工学専攻教授
研究開発実施機関 (計 15 機関)	名古屋大学、京都大学、大阪大学、三菱ケミカル株式会社、住友電気工業株式会社、株式会社豊田中央研究所、富士電機株式会社、パナソニック株式会社、産業技術総合研究所、北海道大学、福井大学、京都工芸繊維大学、筑波大学、東北大学多元物質科学研究所、奈良先端科学技術大学院大学。

3) 次世代パワーモジュールの応用に関する基盤研究開発

次世代パワーエレクトロニクス技術の活用を推進するため、デバイスの性能を最大限に引き出す回路や制御等の使いこなし技術、応用技術、システム技術等の開発で高付加価値を図った。

a 次世代パワーモジュールを使用したパワーエレクトロニクス機器とその統合システムの包括的研究開発

表 3-18 次世代パワーモジュールを使用したパワーエレクトロニクス機器とその統合システムの包括的研究開発体制

研究責任者	赤木 泰文 東京工業大学工学院電気電子系特任教授、名誉教授
研究開発実施機関 (計 18 機関)	東京工業大学、首都大学東京、大阪大学、千葉大学、名古屋工業大学、横浜国立大学、筑波大学、北海道大学、山口大学、三菱電機株式会社、富士電機株式会社、宇部興産株式会社、東邦亜鉛株式会社、三菱マテリアル株式会社、アルプス電気株式会社、日本ケミコン株式会社、双信電機株式会社、日立金属株式会社。

b EV モータ駆動用機電一体型インバータの研究開発

表 3-19 EV モータ駆動用機電一体型インバータの研究開発体制

研究責任者	赤津 観 芝浦工業大学工学部電気工学科教授
研究開発実施機関 (計 3 機関)	芝浦工業大学、日産自動車株式会社、株式会社日産アーク。

c 自動車向け SiC 耐熱モジュール実装技術の研究開発

表 3-20 自動車向け SiC 耐熱モジュール実装技術の研究開発体制

研究責任者	巽 宏平 早稲田大学理工学術院大学院情報生産システム研究科教授
研究開発実施機関 (計 7 機関)	早稲田大学、九州工業大学、トヨタ自動車株式会社、株式会社デンソー、株式会社ウォルツ、株式会社三井ハイテック、公益財団法人北九州産業学術推進機構。

4) 将来のパワーエレクトロニクスを支える基盤研究開発

SiC や GaN を超える高性能なパワーデバイスの実現のため、Ga₂O₃ (酸化ガリウム) やダイヤモンド等の新材料の開拓、新構造、新回路の開発等、革新的な性能向上につながる研究開発を行った。

a 酸化ガリウムパワーデバイス基盤技術の研究開発

表 3-21 酸化ガリウムパワーデバイス基盤技術の研究開発体制

研究責任者	東脇 正高 情報通信研究機構未来ICT研究所グリーン ICT デバイス先端開発センターセンター長
研究開発実施機関 (計 8 機関)	情報通信研究機構、株式会社タムラ製作所、東京農工大学、新日本無線株式会社、株式会社シルバコ・ジャパン、株式会社ノベルクリスタルテクノロジー、株式会社サイコックス、三菱電機株式会社。

(注)平成 28 年度末に株式会社ノベルクリスタルテクノロジーが終了。

b ダイヤモンドパワーエレクトロニクス基盤技術開発

表 3-22 ダイヤモンドパワーエレクトロニクス基盤技術開発体制

研究責任者	牧野 俊晴 産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクス研究センター研究チーム長
研究開発実施機関 (計 6 機関)	物質・材料研究機構、産業技術総合研究所、東京工業大学、コーンズテクノロジー株式会社、千葉大学、大阪大学。

c ワイドバンドギャップパワーデバイス応用による低用量小型パワー集積回路開発及びパワープロセッシング技術の研究開発

表 3-23 ワイドバンドギャップパワーデバイス応用による低用量小型パワー集積回路開発及びパワープロセッシング技術の研究開発体制

研究責任者	引原 隆士 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻教授
研究開発実施機関 (計 8 機関)	京都大学、千葉工業大学、東京電機大学、千葉大学、筑波大学、東京理科大学、名古屋大学、愛知工業大学。

(5) 研究開発テーマと各省庁施策との連関図

SIP 次世代パワーエレクトロニクス推進委員会を設け、おおよそ 2 回 / 年で開催している。構成員は、府省連携のため、PD、関係省庁担当課長（経済産業省、文部科学省、総務省） 専門家、管理法人（NEDO）、オブザーバー（JST）で構成した。検討事項は、研究開発の内容、目標に関する事、研究開発の体制に関する事、研究開発の推進管理、成果の管理に関する事、実用化・事業家に向けた戦略に関する事、その他、各課題の推進に際し必要な事項、である。

PD は各省施策との連携を図るため、SIP を補完するパワエレ技術に関するプロジェクト（低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト / 経産省、NEDO）に PD がオブザーバー参加するとともに、内閣府アクションプランレビューに PD が参画するなど、府省連携による相乗効果強化を進めた。府省連携の例として、GaN パワーデバイス実現に向けた効率的な研究開発の連関図を図 3-14 に掲げる。縦型パワーデバイス実現に向けて研究開発を進めている内閣府と文部科学省、経済産業省が、連携体制を構築した。

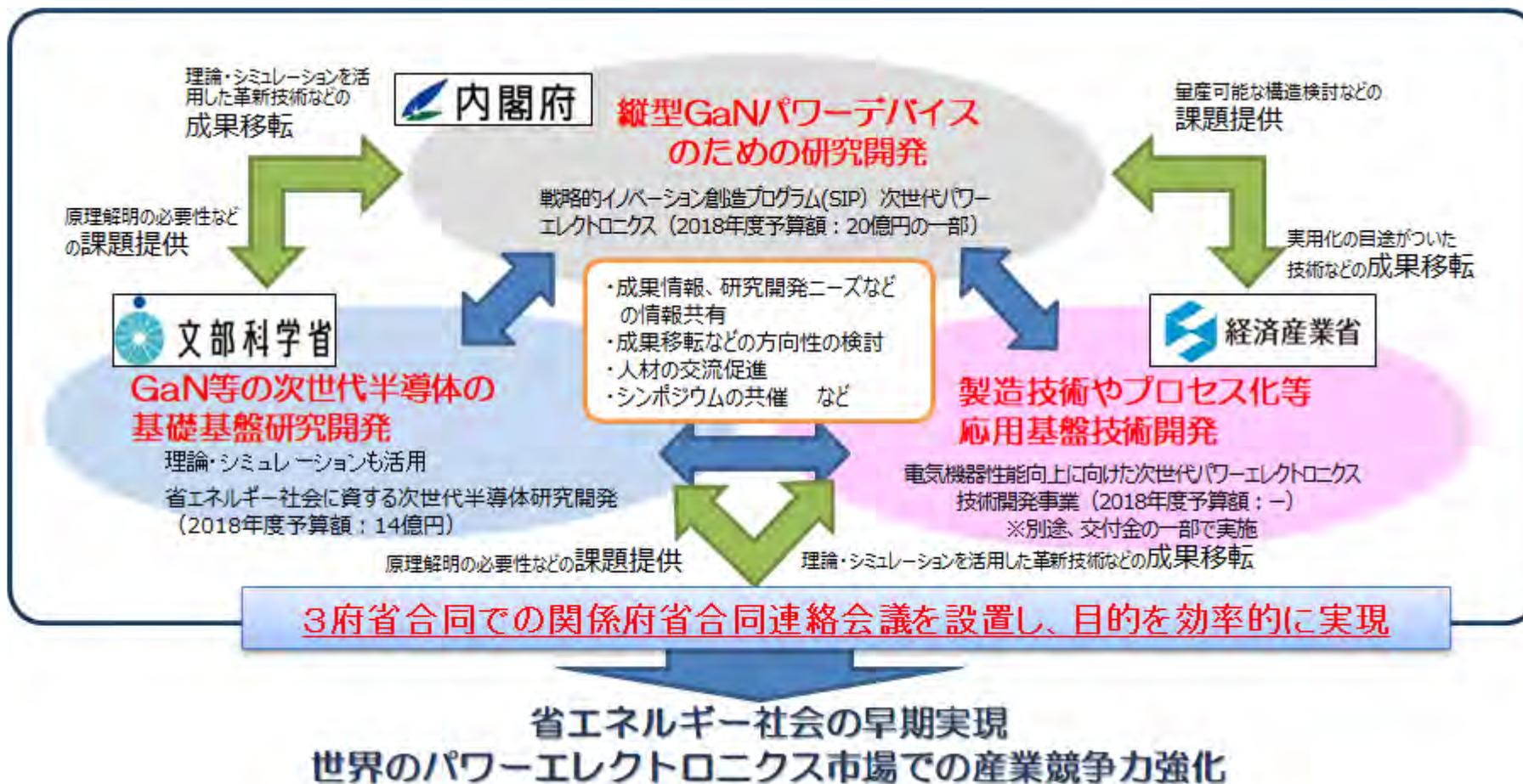


図 3-14 次世代パワーエレクトロニクス (GaN の例) の研究開発テーマ及び各省庁施策との連関図

(6) 出口戦略

1) 戦略の検討・策定

パワーエレクトロニクスによる新たな産業・市場の創出を目的とし、目指すべき社会、技術の新たな用途拡大、社会実装に向けた活動等の戦略を検討・策定する。

2) 試作機による要求性能の実証

性能・仕様をバックキャストして設定し、それを満たす技術が開発できていることを機器の試作によって示す。性能・品質・生産性での優位性を具体的に提示することによって、産業界での製品化の開発を推進する。

3) 成果普及に向けた活動

成果の普及に向けて、構成部材の性能評価に最適な標準的試験方法等を検討し、標準化を推進するほか、各部品・材料の性能認証制度の検討を進める。

(7) 分析フレーム（ロジックツリー）

評価に際して、研究開発活動がもたらす直接的な研究成果と、現在・将来の波及効果について、平成 30 年度研究開発計画からロジックツリーにより整理を行った結果を図 3-15 に示す。

SiC については、アプリケーション、モジュールの成果を民間企業が事業化することが期待されている。GaN については、次世代 GaN ウエハ製造技術を確立し、今後民間企業がウエハ事業化すること、GaN 縦型素子については基礎的素子特性を把握し、今後デバイス技術を確立すること、ダイヤモンド、Ga₂O₃ については、ウエハ基盤技術を確立し、今後ウエハ事業化やデバイス技術の確立することが期待されている。

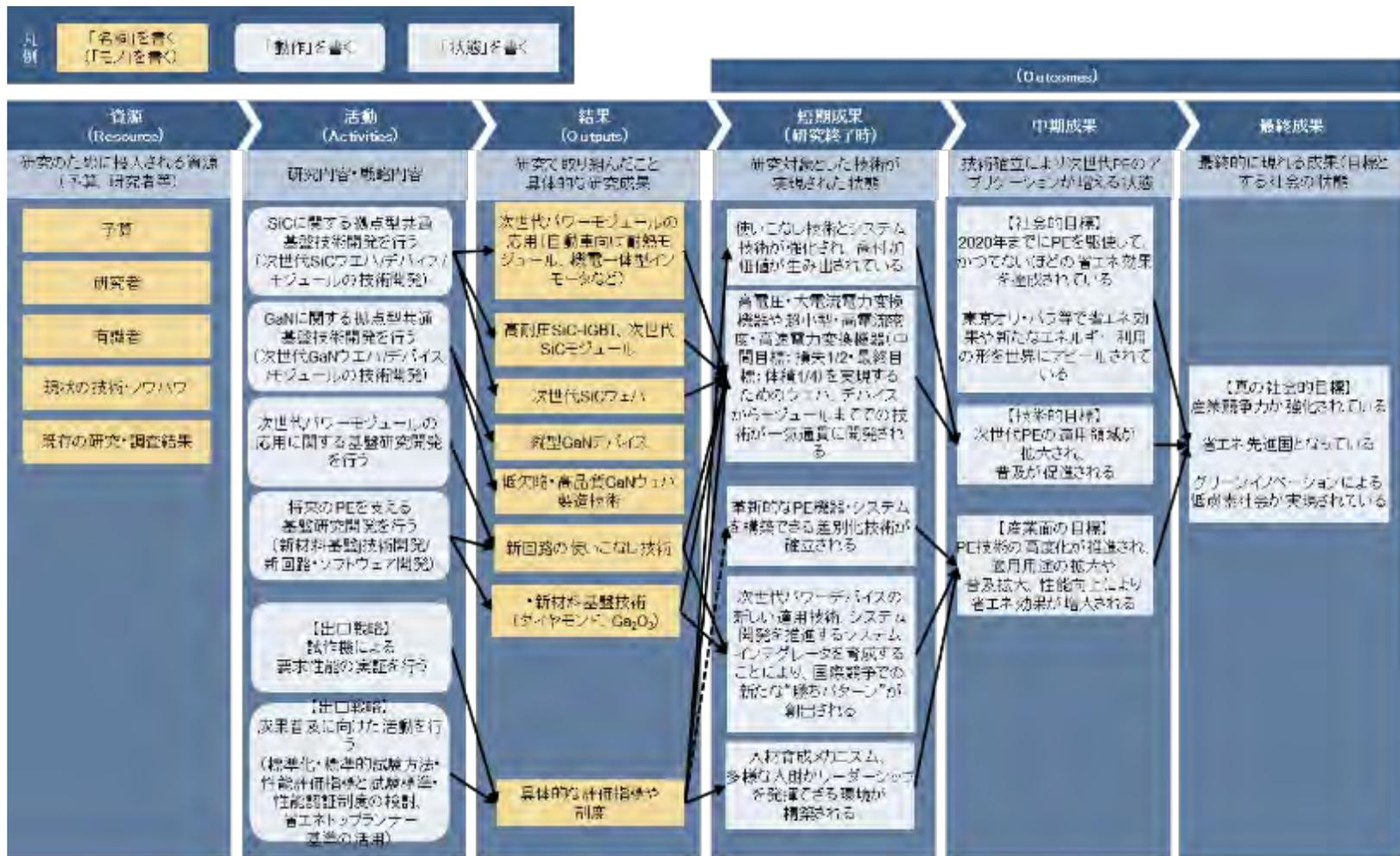


図 3-15 次世代パワーエレクトロニクスのロジックツリー

(出典) 平成 30 年度研究開発計画を基に作成

3.2.2 評価

(1) 意義の重要性、SIP の制度の目的との整合性

本課題は、SiC の第三世代開発に位置づけられる。加えて、GaN、ダイヤモンド、Ga₂O₃ を材料として用いた基盤研究も行われた。

これまでに実施されたパワエレに関する取り組みは以下のようになる。

- ┆ SiC 第一世代開発： グリーン IT (2009-2012 年度、経済産業省)
- ┆ SiC 第二世代開発： 新材料パワー半導体 (2010-2014 年度、経済産業省)
- ┆ FIRST (2009-2013 年度、内閣府)

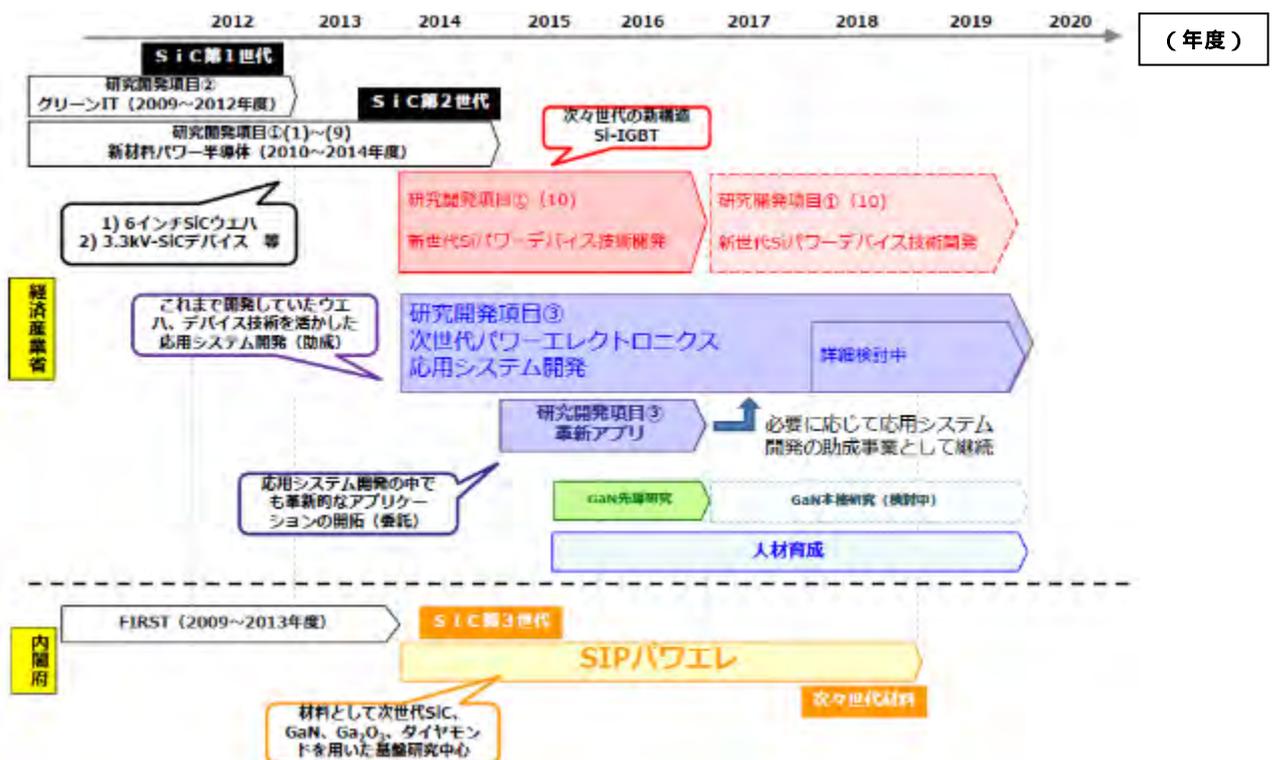


図 3-16 事業の位置付け・必要性

(注) 平成 28 年 9 月 6 日時点。

(出典) NEDO IoT 推進部「低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト(平成 26 年度から平成 31 年度 6 年間) プロジェクトの概要説明「事業の位置付け・必要性」及び「研究開発マネジメント」(平成 28 年 9 月 6 日)」

本課題では、SIP の特徴である「産学官連携、一気通貫の研究開発、社会実装(出口)指向」が活かされた。具体的には、従来の国プロでは欠けていた一気通貫の技術開発を行うことを目的として、実施当初から SiC デバイスの周辺部品、回路等の使いこなし技術、応用技術の開発を盛り込んだ²³計画とした。産業技術総合研究所と企業が連携したことで、実用

²³ 我が国は SiC デバイスを世界に先駆けて商品化したが、回路や使いこなしが遅れているために欧米、中国に差を詰められている状況となっているため、SIP で取り上げた。

化へ向けた取り組みが前倒しされ²⁴、産学連携が活性化した結果、共同研究が増加し、ベンチャー企業の創出も期待できる。また、自動車市場以外での実用化による大きな経済波及効果も期待できる。

課題評価アンケート調査(研究責任者向け)の結果でも、当該課題の社会的・経済的意義について、「とてもそう思う」及び「ややそう思う」をあわせた回答者比率は100%(とてもそう思う:7名、ややそう思う:3名)との結果を得ている。

(2) 目標・計画・戦略の妥当性

1) あらかじめ構想されていたテーマ構成

本課題の PD はかねてよりパワエレ分野の研究開発構想を有しており、ポートフォリオに基づいた的確な目標設定、パワエレ研究者がオールスターで参画する実施体制を盛り込んだ研究開発計画が立案された。

具体的には、パワエレ材料をベースに研究開発テーマの整理を行い、TRL が高く実用化に近い SiC だけではなく、TRL が低い GaN、ダイヤモンド、Ga₂O₃ を加えて、広範な分野における研究開発テーマでポートフォリオを構成した。SiC は事業化を目指すこととし、次世代の GaN については全ての事業化を目指すのではなく可能性の実証にフォーカスし、次々世代のダイヤモンド等は基礎の確立に注力することとした。

SiC 系パワエレは、我が国が競争力を持つ自動車分野の EV (インホイールモータ²⁵) と電力機器分野(トランスレス変換器等)の2つを出口に想定して研究を開始し、当初目的以外の用途への展望が開ける成果を得た。

新回路・ソフトウェア技術開発としては、電力パケット技術²⁶をベースとした研究開発を取り上げ、当初2年間は FS を実施し、残り3年間はロボットや EV の制御にテーマを絞り、本格実施とした。

2) テーマ間連携

研究開発計画当初から、ウエハ開発、デバイス開発、モジュール開発・実装技術間の縦連携、Ga₂O₃ と SiC の酸化膜の評価を行う横連携といった課題内のテーマ間連携が図られていた。

技術的目標を達成できた要因としては、将来の社会的ニーズから必要なアプリケーション、アプリケーションから要求されるモジュールやデバイス性能、デバイス性能を担保するためのウエハ技術といったようにバックキャスト型のロードマップを明確に描いたことが挙げられる。ユーザーサイドに必要なスペック(製造側からは想定できない)をロードマップの中で明確化することで、バックキャスト型の目標管理が十分に実行できた。

ただし5年間で基礎から実用化までの「一気通貫」の成果を実現することは、たとえ開発フェーズが進んでいる SiC 系といえども、前工程の成果をシーケンシャルに次工程へつな

²⁴ 研究開発テーマ「SiC 次世代パワーエレクトロニクス統合的研究開発」において実施された。

²⁵ EV 用機械 - 電気一体型モータの一種。タイヤホイールの中に装着して車輪を直接に駆動できる小型・大出力のモータ。モータ制御に小型でハイパワー・高効率の半導体スイッチング素子が必要となる。

²⁶ 電力パケットは電力パルスと宛先等を表す情報タグから構成される電力の単位のこと、その2つの組みを単位とすることで電力をデジタル化・量子化してきめ細かな電力の処理を行う技術。

げる、という意味では困難であった。例えば、川上の研究開発成果を利用した川下テーマ開発を並行的に進めることはできない²⁷。実用化に当たって、コストダウン及び信頼性確保（製品開発上、必ず故障解析の要求がある。）等を考慮すれば研究開発にも一定の時間がかかる。信頼性を担保し、量産性を確保するための生産技術的な研究開発も必要である。そのため、基礎研究（おおまかにはウエハやデバイス等の開発）と実用化研究（同じく、回路、モジュール、アプリケーション）と研究開発テーマを分け、並行的に進めざるをえなかった。特に、GaN等については、長いもので10年以上先に利益が得られる技術なため、現段階では企業が国プロで実用化するために参加することは現実的には不可能であり、垂直統合的な出口の意味で「事業化」「ベンチャー立ち上げ」等の「成果」を5年で求めることは難しい。そこで、5年で達成できる目標をどのように設定し、それを超えたらどこがその成果及び残りの研究開発テーマを引き継ぐのか、ということを確認するためのロードマップは非常に重要であった。

課題評価アンケート調査（研究責任者向け）の結果からも、目標・計画・戦略の妥当性に係る設問項目において、ほぼ90～100%が妥当との回答を得ている一方で、実現可能なスケジュールだったかという設問に対しては「とてもそう思う」及び「ややそう思う」の回答者比率は70%（10人中とてもそう思う：4名、そう思う：3名）にとどまった。このことは、本課題が本来であれば7～8年を要するスケジュールを5年間で達成しようとしたことを表していると見られる。

(3) 課題のマネジメント（適切なマネジメントがなされているか。）

1) 企業の感性を持つPDとアカデミアの専門性を持つサブPDの組合せ

企業の感性（実務経験及び現場主義の姿勢等）を持ったリーダー（大森PD）とアカデミアの専門性がうまく融合し、プロジェクト運営に活かされた点が今回の技術的目標を達成できた大きなポイントである。大森PDの出身である三菱電機株式会社は材料・デバイスからモジュール、アプリケーションを手掛ける企業であり、一貫通貫で開発するためのノウハウがPDに蓄積されていた。大学の研究者ではこのように全体を網羅することは難しいと考えられる。さらに、大森PDはデバイス、赤木サブPDは回路、堀サブPDは自動車、と、それぞれの専門分野において個別具体的な指導等も行った。こうした管理・運営は他の国家レベルのプロジェクトではみられないものであった。

2) PDの裁量によるテーマのマネジメント

PDに計画変更や予算配分の大きな裁量を与えられているため、テーマ間調整やリフォーメーション（予定されていなかった研究実施者が参加するなど）がフレキシブルに実現できた。例えば、サブPDを追加投入することによる応用面のカバーや、少額予算増によるテーマ追加、装置故障への機動的な予算配分等である。特に、高TRLの実用化フェーズの研究開発においてこのPDによるフレキシビリティは効果的であった。

量産化・実用化の実現のため、PDの裁量（柔軟なマネジメント）により、目標を早期達

²⁷ 例としてSiC系開発を取り上げると、ウエハでトップデータが示されるような結果が出て、その川下の研究開発テーマとなるデバイスの研究開発を並行的に進めている場合、そのウエハを提供して直ちにトップデータのデバイス成果が出せるわけではない。

成したものとして終了させた(期間途中でSIPとしての支援を終了した)テーマがあった。具体的には、中程度のTRLであったGaNウエハ(NEDOのプロジェクトへ移行) GaNデバイスである。ほかには、SIPの5年間で目指していた成果を3年間で達成することができたGa₂O₃の基板グループ²⁸は事業化を目指すこととし、期間途中で終了させた。

PDがテーマの方針や研究内容の方向性を明確化したことで、事業の進捗に合わせてメンバーを入れ替え、常にベストな状態を維持することができた。例えば、電力パケット技術を活用したロボット駆動制御では、FSから本格実証へ移行する際に千葉工業大学を追加投入して研究を効果的・効率的に進めた。テーマ開始時とテーマ終了時とではメンバー構成が変わったものの、計画推進中の体制変更は最終的に適切であったといえる。

課題評価アンケート調査(研究責任者向け)の結果では、自身が担当している研究開発テーマの参加機関・参加者に対して、適切かつ十分との回答者比率が100%であり、「とてもそう思う」の回答者比率が90%に達したことは、こうした変更が適切であったことを裏付ける結果である。

3) 課題内の密なコミュニケーションとマイルストーン管理

PDは、全体会議、研究会、WSといった場で、研究実施者の意見を吸い上げた上でマネジメントを行った。研究責任者会議は、1年目こそ2か月に一回のペースで実施したが、2~3年目は方針が全体に浸透して会議等が(年2回程度の開催で)円滑に行われた。最も効果的であった点は、実装とパワーデバイス、実装とモータドライブ等異分野の研究者を一つの場に集めて議論したことである。さらに、PDが、直接、現場に赴き適切に対応したことにより、成果が出、固いチームワークも生まれた。平成30年度に限っても15件のPDによる現場訪問を実施している。

PDはマイルストーン管理を2~3か月に1度行い、各テーマにおける達成度(既達・未達)を明確にした。ここでのマイルストーン管理とは、目標達成のために計画どおりに事業が進行しているかという進捗管理のみならず、その時期に何を明らかにするのか、どうすれば次につながるのかといったことを意識したステップ毎の目標や実施内容を明確にした管理である。研究開発から製造に至るエレクトロニクス企業の実際の現場を熟知するPDの経験がこうしたマネジメントを可能とした。

課題評価アンケート調査(研究責任者向け)でも、PD、推進委員会、管理法人、研究責任者等の推進体制・役割分担・権限は明確であったかという問いに対し「とてもそう思う」とした回答者比率が80%に達したことから、PDによるマネジメントが十分良く機能したといえる。

4) 知財委員会による知財のマネジメント

本課題では知財委員会を開催し、知的財産の所有についても委員会で判断し、関係者間で発生した知的財産は共有している。学会での発表前に特許出願を行うほか、SIPの成果として創出した知財は我が国の産業界における重要な財産として活用する方針とし、海外には利用させない方針を徹底した。今後の課題は、共有する特許権のプロジェクト終了後における維持管理費であり、不実施補償として費用を確保できない限り、大学の自己負担が発生す

²⁸ 株式会社ノバルクリスタルテクノロジー(株式会社タムラ製作所の子会社)の研究加速により、新規エビ技術で実用化に近いところまで到達したことで、事業化のためにSIPでの研究を終了した。

る可能性があることである。

課題評価アンケート調査(研究責任者向け)の結果では、知財の管理・活用戦略の実現可能性について「とてもそう思う」及び「ややそう思う」の回答者比率は80%(とてもそう思う:4名、ややそう思う:4名)との結果を得ており、知財マネジメントも適切に実行できたといえる。

5) 課題内での成果・ノウハウの共有

課題内外との共有情報、非共有情報は整理されており、課題内で横連携可能な技術やノウハウ(例えばゲート駆動回路や失敗学)はSIP関係者限定のワークショップで共有された。SiC モジュール化技術開発では、課題の体制内で部品専門家に問題点を聞ける機会を作った。ワークショップ等では交流会を同時に開催するなど、チームワークが生まれる環境を整えた。

6) 予算のマネジメントの工夫

PDがメンバーの要望を集約して重点分野や削減分野を判断し、案をメンバーと共有した上で予算総額を決定してGBに申請した。得られた予算の配分については、外部評価委員会委員の各テーマへの評価結果・コメント、推進委員会、GBの意見を参考にして課題内でメンバーを説得した。

様々な工夫(予算を単純に個々のメンバーへ配分するのではなく、消耗品(素子・基板等)を一括購入してメンバーに配分する等)により、限られた予算が効率的に運用されたが、実用化時期が遠い基礎研究段階テーマ(ダイヤモンド、 Ga_2O_3)では予算が不足気味であった。

課題評価アンケート調査(研究責任者向け)において、予算規模や配分が適切であったか、という設問については、「とてもそう思う」「ややそう思う」の回答者比率は80%(とてもそう思う:7名、ややそう思う:1名)で、10%が「あまりそう思わない」、残り10%が「全くそう思わない」と回答している。課題内の予算配分に関しては、更に納得性が高い説明が期待されていた。

7) SIPの意義を課題全体で共有する難しさ

GBからの要求と現場との調整は本課題のPDにとって容易ではなかったと考えられる。GBの評価によって求められる計画と、研究開発を進める上で、現場が具体的に実行するアクションプランでは、項目の重要性や詳細といった観点で異なったためである。

こうした問題が生じる原因としては、課題の意義や目標を末端の研究実施者まで十分に共有できていないことも挙げられる。今後、SIPの特徴である「府省連携」「出口志向」「一気通貫」をGBから参画する研究実施者全体にまでより一層浸透させていくよう努めていく必要がある。

(4) 直接的な研究成果(アウトプット)

本課題の研究開発活動で得られた直接的な研究成果(アウトプット)は以下のとおりである。ただし、こうした研究成果はSIPのみならず、過去のプロジェクトの成果を継承したことによって生み出されていることにも留意する必要がある。

1) 目標の全般的な達成状況

本課題は次世代パワーエレクトロニクス技術のさらなる適用領域の拡大や普及促進を技術的目標とした。具体的には、超高耐圧デバイス技術と次世代デバイスの特性・優位性を活かすためのモジュール、回路構成、制御や保護技術等の使いこなし技術と応用技術、周辺技術を含むシステム技術を強化し、高付加価値を生むことを目指した。特に、次世代電力用や次世代自動車・産業用等のパワーエレクトロニクス機器実現に必要な高電圧・大電流電力変換機器、超小型・高電流密度・高速電力変換機器(従来比、損失 1/2 という中間目標に加え、体積 1/4 を最終目標とする)を実現するためのウエハ、デバイスから回路までの各技術を一貫通貫に連携し研究開発を実施した。

最終年度も実証試験やデザインレビュー²⁹等、目標の更なる明確化を行って研究開発を推進したことで期間内に目標を達成した。各項目別の概要は以下のとおりである。

a SiC に関する拠点型共通基盤技術開発

SiC ウエハ、デバイス、モジュールの高耐圧化、小型化、低損失化を信頼性の確保とともに実現する目標に対し、高耐圧(6.5kV、20kV)化及び対 Si 素子比損失 1/2 以下を達成した。

b GaN に関する拠点型共通基盤技術開発

低欠陥の次世代 GaN ウエハ製造技術、及び GaN 縦型パワーデバイス技術を開発する目標に対し、高品質ウエハ製造技術を確立した。縦型素子は基本的な素子特性を評価した。

c 次世代パワーモジュールの応用に関する基盤研究開発

次世代パワーモジュールを使用したパワーエレクトロニクス機器とその統合システムの包括的研究開発(EV モータ駆動用機電一体インバータの研究開発、自動車向け SiC 耐熱モジュール実装技術の研究開発等)の目標に対し、機電一体インバータ等で対 Si 素子比体積 1/4 以下を達成した。

d 将来のパワーエレクトロニクスを支える基盤研究開発

酸化ガリウム(Ga_2O_3)パワーデバイス基盤技術の研究開発、ダイヤモンドパワーエレクトロニクス基盤技術開発、ワイドバンドギャップ³⁰パワーデバイス応用による低容量小型パワー集積回路開発及びパワープロセッシング技術の研究開発等の目標に対し、 Ga_2O_3 ウエハ製造を事業化し、高品質ダイヤモンドウエハ製造技術を確立した。

2) SiC に関する拠点型共通基盤技術開発

SiC 系は第三世代開発目標(対現状比で体積 1/4 以下、損失 1/2 以下)を掲げ、新構造

²⁹ 設計開発プロセスにおける企画・設計完了・量産移行など、それぞれのフェーズの区切りで、仕様書や設計書、図面、プログラムなどの成果物を、第三者(営業、経理、購買、生産管理、品質保証などの部門の責任者)とともに設計品質及び製造品質を検証すること。

³⁰ 半導体の特性の 1 つであるエネルギー禁制帯幅(バンドギャップ)がシリコンより広い半導体を指す。

(SJ)・高耐圧 (6.5kV 耐圧) MOSFET³¹、超高耐圧 (20kV 耐圧) IGBT³²等の新型パワー素子、小型・高耐熱パワーモジュール (1000A/cm²、250 耐熱の自動車、産業用パワーモジュール)と必要個別素子、部材 (250 耐熱の受動素子 (抵抗、コンデンサ)、回路基板 (メタライズ放熱基板、配線基板)、接合材料・プロセス (ZnAl、Ag)) の試作及び目標性能実証を達成した。

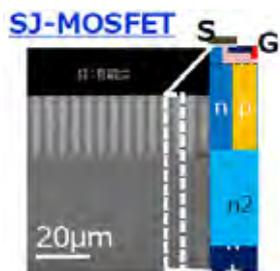


図 3-17 新構造 (SJ) ・高耐圧 (6.5kV 耐圧) MOSFET



図 3-18 ダイオード内蔵高耐圧 (20kV 耐圧) IGBT

また、産学共同の集中研スタイルでディスカッションを行い、SiC デバイスの通電劣化 (順方向劣化) 機構解明という大きな課題を解決し、新規エピ³³構造 (エピ構造の革新: 再結合促進層技術の開発) へ研究開発を進めた。

3) GaN に関する拠点型共通基盤技術開発

縦型素子実現に向け、材料欠陥が従来の 1/10 以下となる世界初のウエハ技術を確立し、デバイスとして p 型確認を行い、理論に合致した電圧・電流特性やチャネル移動度を確認した。

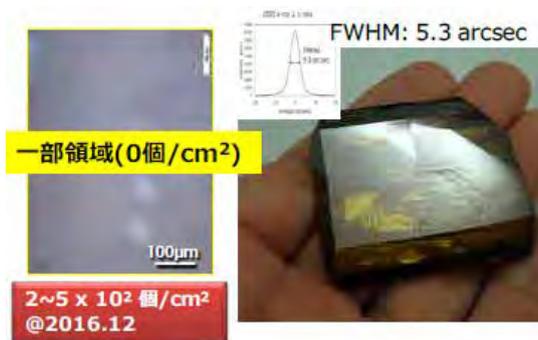


図 3-19 GaN ウエハ

(注) 欠陥密度は、SIP 開始時には 6.9×10^5 個/cm² であったが、2016 年 12 月時点で $2 \sim 5 \times 10^2$ 個/cm² を達成。

4) 次世代パワーモジュールの応用に関する基盤研究開発

将来のニーズを先取りしたモジュールやモジュールを実装したアプリケーションに取り

³¹ Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor : MOS 型電界効果トランジスタ

³² Insulated Gate Bipolar Transistor : 絶縁ゲート型両極性トランジスタ

³³ Epitaxy : 結晶性材料における表面での薄膜結晶成長過程を指す。工学的にはその成長技術や成長した薄膜結晶も含む意味で用いることがある。薄膜結晶はデバイス (素子) を作成する材料として重要。

組んだ結果、SiC アプリケーションについて、メーカーが注視する研究成果が得られた。まず、機電一体型インホイールモータは自動車メーカーの技術者からのデザインレビューを受けるなど、具体的な社会実装に向けた性能評価を進めた。6.6kV 級トランスレス電力変換器（三相不平衡でも安定動作制御）は従来の 2 倍以上の高トルク出力を実現し、評価のみにとどまらず、最終年度には開発技術の実証試験も実施した。EV 用耐熱モジュール（高耐熱、高電流密度）は実車搭載による試験等「目に見える」成果に結実している。250 耐熱モジュールにおけるメッキ接合法は世界初であり、モジュールのコスト削減の可能性があることから、早期に実用化される見込みである³⁴。

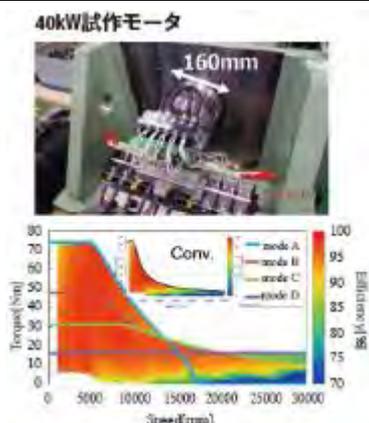


図 3-20 機電一体型インホイールモータ
（出典）SIP 2018 パンフレット



図 3-21 6.6kV 級トランスレス電力変換器
（出典）SIP 2018 パンフレット

5) 将来のパワーエレクトロニクスを支える基盤研究開発

電力パケット供給は、パワーと情報の統合制御技術開発テーマとして斬新である。高周波絶縁ゲートドライバの開発、パワー集積回路設計パワーユニットセル化技術、パワー情報の統合的技術開発を行い、今後は、ロボットを使った技術検証等を計画している。

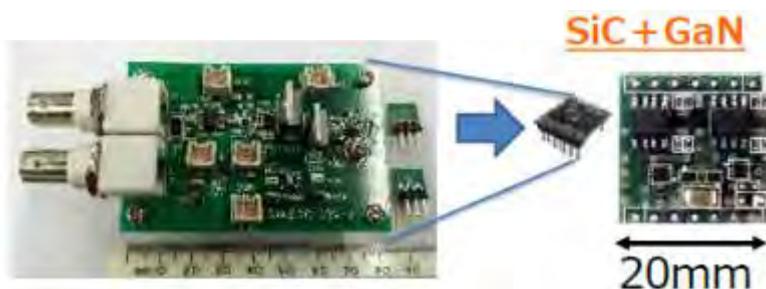


図 3-22 小型高速大電力ドライバ（> 10MHz、1kW 駆動）

新材料基盤技術について、Ga₂O₃ の基板製造に係る技術は SIP での研究開発（ウエハ開発）を終了し、前述のとおりベンチャーを出口として終了した。ダイヤモンドはウエハ基礎技術（絶縁破壊電界強度の確認を含むウエハ製造技術）を確立した。

³⁴ 3.2.2 (5) 1) c 次世代パワーモジュールの応用に関する基盤研究開発を参照。

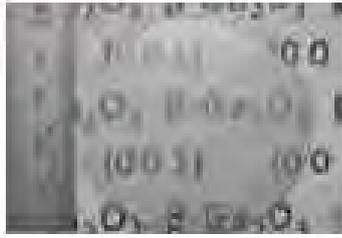


図 3-23 2 インチ径単結晶 Ga₂O₃(001) ウエハ



図 3-24 縦方向に長尺成長中のダイヤモンド単結晶

6) ノウハウ

モジュールの設計指針の明確化、信頼性試験の評価方法の確立、データ蓄積等も専門的観点から見て特筆すべき研究開発成果がある。具体的には、SiC デバイス低コスト化のブレークスルー、順方向電圧劣化の解明やコドーブ技術³⁵の確立が挙げられる。

7) 情報発信

情報発信活動として、平成 30 年度に開催したシンポジウムを表 3-24 に示す。

表 3-24 次世代パワーエレクトロニクスに関する情報発信（平成 30 年度のシンポジウム）

年月日	名称	主催等	概要
平成 30 年 11 月 22 日	第 5 回 NEDO パワエレシンポジウム(第 22 回新産業技術促進検討会)	主催：モノづくり日本会議 / 日刊工業新聞社 共催：新エネルギー・産業技術総合開発機構	「次世代パワーエレクトロニクス」に関するプロジェクトを推進し、各アプリケーションで必要とされるパワーエレクトロニクス像のヒントを紹介。
平成 31 年 2 月 27 日	逆導通対応パワー半導体デバイス・応用の最新技術	公益社団法人応用物理学会 先進パワー半導体分科会 第 13 回研究会	SiC - MOSFET 内蔵ダイオードの通電劣化に関する課題と対策について成果紹介。
平成 31 年 3 月 7 日	第 174 回産学交流サロン「ひびきのサロン」 「SIP パワーエレクトロニクス 自動車用高耐熱パワーモジュールの開発」成果報告会	公益財団法人北九州産業学術推進機構 産学連携統括センター	「自動車用高耐熱パワーモジュールの開発」について、研究開発成果の報告。

³⁵ 市販品の性能を大きく上回る低抵抗値・低欠陥密度を持つウエハを実現する技術。

平成 31 年 3 月 9 日	「急加速するクルマの電動化 ~ 電池・パワー半導体・モータとシステムの協調開発 ~」	公益社団法人応用物理学会 インダスタリアルチャプター、一般社団法人エレクトロニクス実装学会協力 先進パワー半導体分科会	SiC インバータを用いた機電一体インホイールモータについて成果紹介。
平成 31 年 3 月 28 ~ 29 日	SIP「次世代パワーエレクトロニクス」公開シンポジウム どこでもパワエレ機器で豊かな省エネ社会	内閣府、NEDO	SIP「次世代パワーエレクトロニクス」プログラムの 5 年間の内容とその成果の紹介。

8) 論文・知的財産

査読あり論文は 293 件、特許出願件数は 175 件であった。その他、講演・発表（1,235 件）、新聞発表・プレスリリース（34 件）と、アウトリーチ活動も十分行っている。特に電力パケット供給に関する SIP の研究成果の論文の引用件数も上がってきている。

表 3-25 次世代パワーエレクトロニクスに関する論文数

		発表年					
		5 年合計	2014	2015	2016	2017	2018
合計		298	2	22	75	97	102
査読あり合計		293	2	21	73	97	100
	英文	264	1	20	64	88	91
	和文	29	1	1	9	9	9
	その他	0	0	0	0	0	0
査読なし合計		5	0	1	2	0	2
	英文	1	0	0	0	0	1
	和文	4	0	1	2	0	1
	その他	0	0	0	0	0	0

(注 1) 平成 30 年 12 月末実績。発表年は年度ではなく暦年である。

(注 2) 「査読あり」については学術誌での発表論文以外に学会発表・予稿集等も一部含んでいるが、「査読なし」については学会発表・予稿集等は原則として除いている。

みなし取下げを除いた出願年度別の特許出願件数及び登録件数（ファミリー単位で集計）は表 3-26 のとおりである。海外を含む特許出願を積極的に進めている。国内 7 件、米国 6 件等、一部は既に登録に至っている。

表 3-26 次世代パワーエレクトロニクスに関する特許数

		出願年度					
		5年合計					
			2014	2015	2016	2017	2018
出願	合計	175	6	25	61	50	33
	国内のみ	87	4	10	28	25	20
	海外含む	88	2	15	33	25	13
	PCT	40	2	11	22	5	0
	米国	45	2	13	22	8	0
	欧州	15	2	9	2	2	0
	中国	36	2	12	16	6	0
	韓国	21	0	5	11	5	0
登録	日本	7	0	2	3	2	0
	米国	6	0	2	3	1	0
	英国	0	0	0	0	0	0
	ドイツ	0	0	0	0	0	0
	フランス	0	0	0	0	0	0
	中国	0	0	0	0	0	0
	韓国	0	0	0	0	0	0

(注) 平成 30 年 12 月末実績。みなし取下げを除いた出願年度別の特許出願件数及び登録件数をファミリー単位で集計。

(5) 現在・将来の波及効果 (アウトカム)

研究終了時である現時点の目標の達成状況と波及効果、将来 (短期・中期・最終) に期待できる波及効果については次のとおりである。

1) 目標の全般的な達成状況

産業面の目標は、パワーエレクトロニクスに関係する技術の高度化を推進し、適用用途の拡大や普及拡大、性能向上による省エネ効果の増大等を図り、今後一層の産業競争力の強化及び省エネ化を推進することとした。

- ┆ 関連市場規模の拡大傾向の中、革新的なパワーエレクトロニクス機器・システムを構築できる差別化技術を確立。
- ┆ 併せて次世代パワーデバイスの新しい適用技術、システム開発を推進する技術者 (システムインテグレータ) を育成することにより、国際競争での新たな“勝ちパターン”を創出するとともに、これらを支える人材育成メカニズム、多様な人材がリーダーシップを発揮できる環境の構築を図る。
- ┆ これらにより関連市場における我が国の企業の世界シェアを維持・拡大。

社会的目標としては、2020 年までにパワーエレクトロニクス技術を駆使した超高効率なエネルギー利用によって、かつてないほどの省エネ効果の達成を目指すこととした。また、同年、盛夏の中で開催される東京オリンピック・パラリンピックで、その省エネ効果や新たな

なエネルギー利用の形を世界に向けてアピールすることとした。

これらの達成状況については、例えば、インホイールモータ等、実用化に近い成果は多く創出されているが、今後メーカーによる製品化・事業化まで注視する必要がある。

課題評価アンケート調査(研究責任者向け)では、アウトカム目標が達成される見込みがあるか、という設問に対し、「とてもそう思う」「ややそう思う」の回答者比率は100%(とてもそう思う:1名、ややそう思う:8名)に達している。これは、これまでの国家プロジェクトと比較し事業化・実用化をより強く意識したSIPならではの結果といえる。

各項目別における達成状況と今後の展望以下のとおり。

a SiC に関する拠点型共通基盤技術開発

SiC を用いた低抵抗ウエハ、高品質エピはサンプル出荷等の実用化開発、事業化が開始される見通しである。

SiC-MOSFET の再結合促進層による順方向劣化対策技術については、研究成果の事業展開を検討する。

b GaN に関する拠点型共通基盤技術開発

大口径・低欠陥 GaN ウエハ開発は NEDO による支援事業へと移管した。

GaN デバイス関連の研究開発は、文部科学省「省エネルギー社会の実現に資する次世代半導体研究開発」等で研究を継続される予定である。

c 次世代パワーモジュールの応用に関する基盤研究開発

SiC を用いた小型・高耐熱モジュール、高耐熱受動素子・部品、Ni メッキ接合技術、機電一体インホイールモータ技術、6.6kV 連系用トランスレス電力変換装置実用化の研究開発、HVDC 向け変換器セルの製作と実機検証、大容量高効率絶縁形 DC-DC コンバータの研究開発、SiC-MOSFET の実用化に対応した受動デバイス高性能化の研究開発等では、研究成果の事業展開を検討する。

d 将来のパワーエレクトロニクスを支える基盤研究開発

開発された Ga_2O_3 単結晶バルク・基板製造技術は、株式会社ノベルクリスタルテクノロジーに技術移転し Ga_2O_3 ウエハを量産中である。

2) 自動車用 SiC モジュールの優位性による展望

デバイス分野とシステム分野の産学連携により、今後 SiC アプリケーションが直接市場である自動車用途分野及び電力用途分野において実用化される見通しである。SiC 化と実装の高耐熱化を実現することで最大出力の向上、モジュール小型化にもつながり、アプリケーションの1つであるインバータの許容度が拡大する。SiC デバイスのアプリケーションへの適用により、ハイブリッド・EV 共通で安全性が向上する。

3) 自動車以外での実用化

直接市場(自動車用途分野及び電力用途分野)以外の分野(間接市場)としては、SiC アプリケーションのロボット等への適用がある。その他 SiC については、パワエレ分野、パ

ワーデバイス分野、システム分野が連携して検討することで、様々な分野においてアプリケーションとしての実用化が実現可能である。関係各社で上市に向けての計画があるが、民間企業の事業戦略に係る内容であり公開されていない。

4) 要素技術の周辺分野への波及効果

周辺分野(周辺市場)における要素技術の実用化の見通しとしては、SiC モジュールの受動部品で、高靱性・高熱伝導性を特徴とする耐熱基板である Si-N 基板や、耐熱ニッケルメッキ接合技術、ダイヤモンドウエハ応用が挙げられる。

5) ベンチャー創出効果

Ga₂O₃ 基板製造における株式会社ノベルクリスタルテクノロジーは、研究開発期間中においてもベンチャー創出につながった事例である。

次世代パワーエレクトロニクスのアプリケーションが増加することになれば、さらなるベンチャー創出も期待できる。半導体後工程及び電源関連の事業者等には中小企業が多く、ベンチャーの参入も比較的しやすいと考えられる。

6) 産学連携の活性化

本課題では、本当の意味で「一つの拠点で一緒に仕事をした」ことから、様々なプラスの効果があった。産学が共に研究を行うカルチャーが醸成された結果、産学連携による共同研究が生まれ、大学から企業に SIP 成果を技術移転するなど、大学が研究に対して論文だけではない視点を持つようになった。我が国のこの分野における研究開発での産学連携の活性化が、将来の我が国の産業競争力につながる期待も大きい。

事業期間中に、産学共同の集中研スタイルでディスカッションを実施したことで、SiC デバイスの通電劣化(順方向劣化)機構解明という大きな課題を解決し、新規エピ構造(エピ構造の革新：再結合促進層技術の開発)へ研究開発を進めた事例もあった。

7) 研究開発人材の育成

企業と学生との連携が強くなったことで、研究開発人材の育成の観点からも将来の我が国の研究開発レベルの底上げが期待できる。

本課題ではテーマ間連携を積極的に意識して実施したため、企業とアカデミアの接点が増えることとなった。そのため、民間企業の若手研究者・技術者が学会に参加したり、学会で座長を務めたりするなど、表舞台に出てくるようになった。また、SIP での研究開発機会を活用して、学生が論文を執筆し、卒業後に関連メーカーに就職という事例もあった。

8) 電力パケット技術への関心の増加

本課題の研究開発を通じて本分野で関心が高まったテーマとして、電力パケット技術がある。電力パケット技術は、通信技術を電力へ適用したテーマで、ハードウェアを含めた研究を実施しているのは我が国のみだが、海外においても支持・賛同者が広がっている。海外の著名研究者が、学術雑誌での特集に賛同し、寄稿しているほか、通信と電力の融合に関しては国際会議をサポートする我が国の企業が学会でも評価しており、良い宣伝になっている。

なお、電力パケット技術については、バックグラウンド特許を基本として、必要に応じて SIP 参加企業がアイデア特許を自由に出せる環境となっており、現在は検証段階であるアイデアが 10 年後に実用化する可能性がある。電力パケット技術で SiC を高速に駆動することにより、コイルやコンデンサを小型化できる。

電力パケット供給については、デバイスの基礎的な動作解析結果から新しい研究開発テーマが生まれる可能性もある。高周波領域での SiC MOSFET の挙動は単純な電圧駆動ではなくほとんど電流駆動であることも判明し、高周波駆動時にはアナログ回路の要素を持つソフトスイッチング技術³⁶も重要となっている。デジタル化の影響によって小電力容量のアナログ回路専門家は活躍の機会が縮小していたが、この分野の研究開発に参入する余地が生じてきており、今後の活躍が期待される。

9) 国際的な立ち位置

SiC パワーデバイスに関しては、1kV 級耐圧インバータの鉄道や家電製品、産業機器への社会実装が始まっている。現時点では我が国が先行しているものの、米国・中国・韓国・台湾から猛追を受けている。今後、求められる高耐圧化や用途拡大のためには、デバイス構造見直しやモジュールレベルでのコスト削減が必要である。

GaN については、現時点で、日本勢がウエハ及びデバイス製造の世界市場においてシェア上位を占めており、我が国のプレゼンスは高い。しかし、今後の世界市場での日本勢のシェア確保のためにはウエハ製造技術の確立及び SiC・Si に比べたコスト優位性が必要である。

縦型 GaN デバイスについては、ARPA-E³⁷主催の国際的なイベントや国際会議等で我が国のプレゼンスが高まっている。

我が国は Ga₂O₃ 分野のパイオニアであり、現在も研究開発においてトップを走っている。実用化はまだ先であるものの Ga₂O₃ に携わる研究者は増加しており、研究開発テーマが拡大していると見られる。ただし、米国で大型プロジェクトが始動していることから今後、キャッチアップされる可能性は排除できない。

ダイヤモンドについても、我が国は他国（例えば、フランス、ベルギー、ドイツ、米国等）に比べて大きく先行していると見られている。

ほかにも、SIP パワエレチームとしては、IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers、アイ・トリプル・イー) のパワエレ・技術ロードマップ委員会に参画し、海外コンソーシアムとの情報交換を推進し、パワエレ・技術ロードマップ (初版) を平成 31 年 3 月に発行予定である。

10) 標準化

SIP の事業期間内 (5 年間) で標準化は達成できなかったものの、SIP 以前の国家プロジェクトの成果 (ウエハ、エピ、モジュール部材) をベースにした信頼性評価方法等について

³⁶ 高周波共振現象を利用し、スイッチング素子に掛かる電圧が 0V (OFF) になってから電流を流し始める (ON) 又は流れる電流が 0A (OFF) になってから電圧を上げ始める (ON) スwitching 方式で、スイッチング損失、電磁干渉 (EMI) ノイズの低減に対し、そうした制御をしない従来型の、いわゆるハードスイッチング方式に比べ、数々の優れた特徴がある。

³⁷ 米国のエネルギー高等研究計画局。

の取り組みが行われている。例えば、パワーエレクトロニクスの信頼性等の評価の手法については日産自動車株式会社が参画することによってアドバイスを得ており、課題内で評価基準として共有している。

(6) 改善すべきであった点と今後取り組むべき点

1) 改善すべきであった点

本課題では、SiC のみに注力せず、GaN、Ga₂O₃、ダイヤモンド等、TRL の異なる材料研究を行った。この点について、先行する SiC の研究開発視点を続く GaN、Ga₂O₃、ダイヤモンドが活用できたという評価ができる。しかし、ダイヤモンド及び Ga₂O₃ は TRL が低い一方で、SiC は TRL が高く実用化に近いことから、パワーエレクトロニクスを全分野実施する、すなわち TRL の異なるダイヤモンド等を同一に含めるのはやや無理があり、SIP 設立当初に各技術分野の TRL を見極めて選択する必要があったと考える。この点に関しては、PD が構想していた TRL の異なるテーマを束ねて実施する狙いについて、プロジェクト開始時に研究責任者に理解させ、必要に応じて研究開発テーマの選択と集中を更に強く進めるべきであった。

また、パワーエレクトロニクス業界内メンバーを中心に体制が構築されていたため、チームワークが醸成された反面、研究開発の進め方や出口戦略等について、パワーエレクトロニクス業界から見た議論に終始する傾向が否めなかった。自動車メーカーのパワーエレクトロニクス専門家も参画しているが、他業界を含め、広くユーザーの意見を取り入れるべきであったと考える。

2) 今後取り組むべき点

SiC は、海外(米国及び中国)との競争が激しく、国内ウエハ製造企業が高品質かつ低コストウエハ(特に p 型で 6 インチ径)の安定供給体制を構築することが必要である。さらに、実用化を担う企業による信頼性の確認・利用が急務で、参加企業がビジネスモデルを早急に確立することが不可欠である。

GaN は、海外勢による技術開発(ウエハの低欠陥密度化及び大型化等)が積極的であり、我が国も実用化に向けた研究開発に加速的に取り組み、早期に実用化を達成すべきである。

Ga₂O₃、ダイヤモンドについては、基本的な素子特性を評価できた段階で、今後、SIP における成果を踏まえつつ、それぞれの材料ポテンシャルを生かした事業化・実用化が本当に可能かどうかを見極める必要がある。

今後、SIP で得られた成果を基に製品化・事業化、既存事業での応用を進めているかどうか、引き続き追跡評価等を通じて注視していくことが重要である。

3.3 革新的構造材料

<p>(1)意義の重要性、SIPの制度の目的との整合性</p>	<ul style="list-style-type: none"> 密な人的連携を伴う実質的な産学連携が進み、海外航空機メーカーを通じた繋がりから国内メーカー各社の連携³⁸が促進された。 材料開発の手法(試行錯誤の実験を繰り返し、物理量を測定する等)に情報科学を融合させたマテリアルズインテグレーション(MI: Materials Integration)の活用は、世界の先駆けである。
<p>(2)目標・計画・戦略の妥当性</p>	<ul style="list-style-type: none"> 産業界からの提案、要望等を踏まえて、企業がSIPの成果を事業化・実用化に繋がるような妥当な最終目標を定めた。 拠点形成や海外特許取得等の知財創出に目標の重点が置かれたことは、我が国の航空機産業における国際競争力強化の観点から戦略として重要かつ妥当であった。
<p>(3)課題におけるマネジメント (適切なマネジメントがなされているか。)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 個別研究で用いる指標が企業毎に異なるため、各研究領域の共通言語としてTRLを設定し、研究進捗管理が行われた。 専門用語の翻訳家として各拠点に連携コーディネーターを管理法人で導入した。研究機関とPDとの間の円滑な意思疎通が図られ、適切な研究管理がなされた。 研究領域間の連携はA-D、B-D等、一定の領域間連携が実施された。 研究領域内に設置した知財部会において特許出願や外部発表の許諾・時期が検討され、知財委員会へ報告され、情報が集約された。
<p>(4)直接的な研究成果 (アウトプット)</p>	<ul style="list-style-type: none"> CFRPの主翼/胴体用高生産性・強靱成形法、尾翼/ドア用コスト低減成形法の開発及び実証(メートル級模擬部材の試作達成)を行った。 エンジンファンブレード用熱可塑性CFRP³⁹材及びその成形技術を実証した。 1,500t 鍛造実験機データから世界最大級(5万トン)鍛造設備によって作製された材料の性能を予測するための鍛造シミュレーションシステムを確立した。 耐環境セラミックコーティング材料、低コストのSiC/SiC基材を開発し、航空機用部材に適用した。 MIシステム⁴⁰ver1.0(自動化版)を完成。理論計算・材料パラメータDBを駆使してプロセス-構造-特性-性能を連関させ、金属溶接部に適用し、疲労寿命の予測を自動で算出できるようにした。 4領域各々で産学がSIP後も研究を継続推進できる拠点を7か所(宇宙航空研究開発機構(JAXA)、東京大学、東京工業大学、NIMS、JFCC等)整備した。 論文(査読あり)約315件、特許出願約107件。

³⁸ ここでの連携とは、国内の航空機産業に係る各メーカーが、SIPによって横の繋がりが強化されたことを表現したものである。

³⁹ 炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics)。

⁴⁰ 多様な素材・プロセスの組み合わせから製造される部材・構造体の性能・寿命などを、理論・経験則、計算科学、データベース等を融合して予測するシステム。

<p>(5)現在・将来の波及効果 (アウトカム)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 航空機用 CFRP 材料として、2025 年頃の開発開始が見込まれる次世代航空機での採用を目指し、参画企業において開発が継続される。 脱オートクレーブ法や高効率複合材部品製造法(ドレーブ法)を確立し、CFRP 製造コストや製造時間の寄与が期待される。 TiAl は参加企業が実用化に向けた取り組みを継続。 マテリアルズインテグレーションは Society 5.0 につながる成果であり、企業での導入、利用が進むことで開発期間短縮や大幅なコスト削減が期待される。 導入した大型設備は NIMS や JAXA 等、国研で維持管理し、企業利用を促進する。 SIP で得られた研究成果により国際競争力は確実に強化されたが、機体・エンジンともに米欧が圧倒的に優位な航空機産業において、認証・標準化の仕組みを把握し、開発素材の利用促進を図ることが期待される
<p>(6)改善すべきであった点と今後取り組むべき点</p>	<ul style="list-style-type: none"> SIP で開発した各種技術 (TRL : ~5) が航空機用部材として採用を検討できるレベルに到達するよう、今後、SIP 参加企業が開発を継続していくことが不可欠である。 課題の研究開発テーマが多岐にわたったため、連携が薄かった。第 2 期においてそうした課題があれば、テーマを絞り込み、材料ユーザーがリーダーとなって明確な出口に向けて推進すべき。 マテリアルズインテグレーションを実用化するためには、少なくとも、民間企業が保有する材料物性等のデータが提供されるような仕組みを検討し、企業が多く使うことが不可欠である。 研究領域拠点に整備された大型設備 (NIMS に導入した大型鍛造シミュレータ、JFCC へ導入した耐環境コーティング形成装置等)について、導入機関が責任を持って継続的に維持・活用する方策を決定することが必要である。

3.3.1 概要

(1) 背景と目的

材料技術は我が国全体の産業を支えるために重要な役割を担っており、産業上多くのイノベーションはこうした材料技術の成果を利用して実現されている。我が国は構造材料に関して特に強い競争力を有している。今後もこれらを維持していくため、新たな材料の開発は必要不可欠である。特に、我が国が強い技術力を有する CFRP (炭素繊維強化プラスチック) や樹脂等における技術革新は、構造材料の軽量化に大きく貢献し、自動車産業や航空機産業の発達に直結する。またセラミックス基複合材料や耐熱合金・金属間化合物の技術革新は、材料の耐熱性・靱性を向上させることにより、航空機用エンジン・発電プラント等のエネルギー転換・効率に大きな革新をもたらすことが期待できる。

本課題は、航空機分野で用いられる部材を主な対象として、強く、軽く、熱に耐えることができる革新的材料の研究開発を行った。航空機分野は、多くの省庁が関与し、安全評価手法やその認定手法の策定、認証取得等への対応が求められ、開発リスクが高い。また、SIP では、効率的な材料開発環境構築に向けた「マテリアルズインテグレーション」の研究開発にも取り組んだ。

目標としては、輸送機器・発電等産業機器への実機適用と、エネルギー転換・利用効率向上を掲げ、さらに、これら材料技術を基盤に、航空機産業全体の育成、拡大を目指した。

(2) 実施体制

航空機のエンジン及び機体に用いられる部材を対象とし、各研究領域を「航空機用樹脂の開発と CFRP の開発」、「耐熱合金・金属間化合物の開発」、「セラミックス基複合材料の開発」、「マテリアルズインテグレーション」の 4 つの領域に分けて各領域長が研究開発をとりまとめる体制とした。平成 30 年度時点で、サブ PD は 2 名、研究責任者は 33 名である。管理法人は科学技術振興機構 (JST) となっている。

各領域のマネジメントに関して大学・国研等の研究者と企業研究者との共同リーダー制に変更したこと及び各領域に研究内容について熟知した連携コーディネーターを配置したことや、研究内容や成果に関する評価を行う「アドバイザリーボード」⁴¹に、海外委員を総人数の約半数である 11 名配置したことが本課題の特徴として挙げられる。

⁴¹ 詳細は表 3-28 を参照。

A領域 航空機用樹脂の開発とCFRPの開発

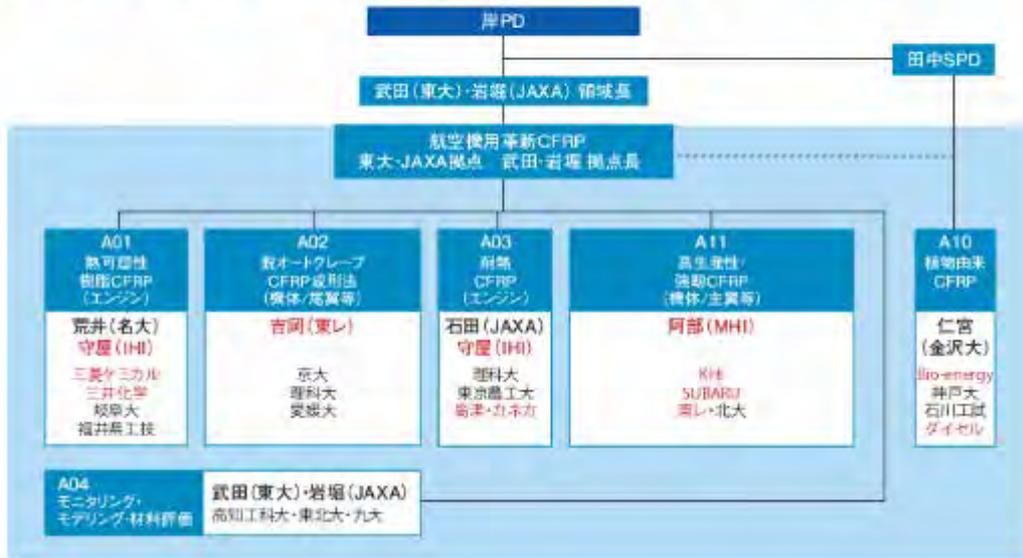


図 3-25 革新的構造材料の研究体制 (A 領域：航空機用樹脂の開発と CFRP の開発) (赤字：企業、黒字：大学、公的研究機関)

(出典) JST「SIP 革新的構造材料」(平成 31 年 1 月閲覧) <<http://www.jst.go.jp/sip/k03/sm4i/dl/sip-sm4i-pamphlet.pdf>>

B領域 耐熱合金・金属間化合物の開発



図 3-26 革新的構造材料の研究体制 (B 領域：耐熱合金・金属間化合物の開発) (赤字：企業、黒字：大学、公的研究機関)

(出典) JST「SIP 革新的構造材料」(平成 31 年 1 月閲覧) <<http://www.jst.go.jp/sip/k03/sm4i/dl/sip-sm4i-pamphlet.pdf>>

C領域 セラミックス基複合材料の開発

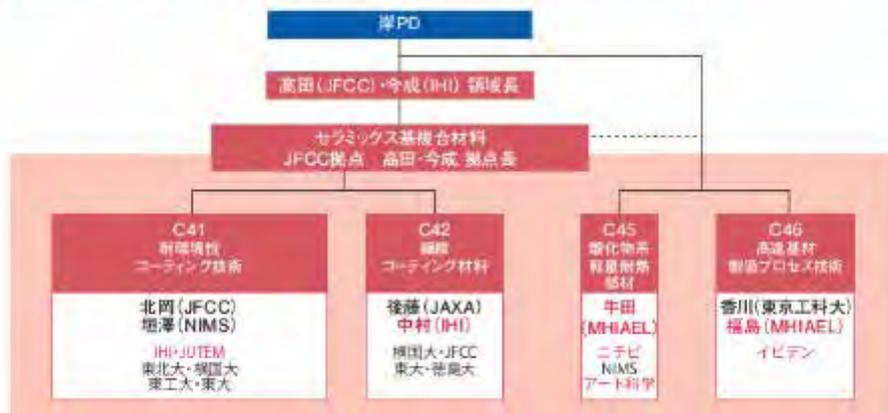


図 3-27 革新的構造材料の研究体制 (C領域：セラミックス基複合材料の開発)
(赤字：企業、黒字：大学、公的研究機関)

(出典) JST「SIP「革新的構造材料」(平成31年1月閲覧)

<<http://www.jst.go.jp/sip/k03/sm4i/dl/sip-sm4i-pamphlet.pdf>>

D領域 マテリアルズインテグレーション



図 3-28 革新的構造材料の研究体制 (D領域：マテリアルズインテグレーション)
(赤字：企業、黒字：大学、公的研究機関)

(出典) JST「SIP「革新的構造材料」(平成31年1月閲覧)

<<http://www.jst.go.jp/sip/k03/sm4i/dl/sip-sm4i-pamphlet.pdf>>

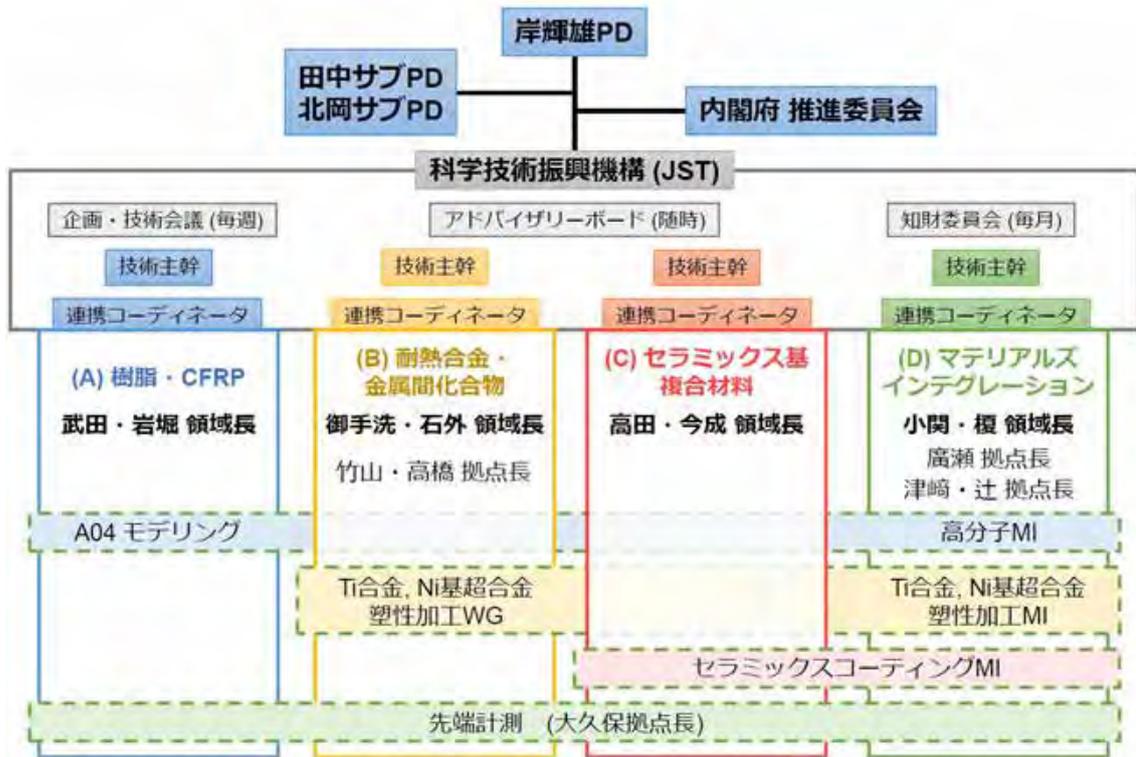


図 3-29 革新的構造材料の管理法（JST）の体制

表 3-27 革新的構造材料の PD 等

区分	所属	氏名
PD	東京大学名誉教授 / 物質・材料研究機構名誉顧問	岸 輝雄
サブ PD	イノベーションオフィス田中代表(元東レ代表取締役副社長)	田中 千秋
	大阪大学大学院工学研究科教授	北岡 康夫

表 3-28 革新的構造材料の主要会議体

名称	構成員	概要
推進委員会	PD、サブ PD、関係省庁、関係機関、事務局(内閣府) 管理法人 (NEDO) (表 3-29 参照)	PD が議長、内閣府が事務局を務め、内閣府に置く。課題の研究開発計画の作成や実施等に必要な調整等を行う。 平成 29 年末までに 11 回開催。
知財委員会	PD 又は PD の代理人、主要な関係者、専門家等	JST に置く。毎月開催。
知財部会	各研究機関の代表者	研究課題に関する共同研究契約毎に設置する。外部発表、知財権出願等の可否、知財権の実施許諾、維持管理等について協議し、その内容を知財委員会に報告する。

アドバイザーボード	国内委員 12 名、海外委員 11 名	PD のへの助言を目的として JST（管理法人）が組織する、外部専門家からなる委員会で、国内・国際アドバイザーボードがある。前者は、12 名（大学 5 名、国立研究開発法人 2 名、企業 5 名）のボードメンバーから構成される。後者は、航空機産業が先行している欧米からの視点を取り入れる目的で設置され、欧州委員会（EC）の委員などを務める Van de Voorde 教授を議長とし、11 名（欧州 8 名、米国 3 名）から構成される。開催は随時。（いずれもアドバイザーボード設置当時）
-----------	---------------------	--

本課題に特徴的な会議体。

表 3-29 革新的構造材料推進委員会 構成員一覧表

区分	所属	氏名
PD	東京大学名誉教授 / 物質・材料研究機構名誉顧問	岸 輝雄
サブ PD	イノベーションオフィス田中代表(元東レ代表取締役副社長)	田中 千秋
関係省庁	文部科学省研究振興局参事官(ナノテクノロジー・物質・材料担当)付専門職	丹羽 良太
	経済産業省産業技術環境局研究開発課産業技術プロジェクト推進室室長	松本 真太郎
	環境省地球環境局地球温暖化対策課地球温暖化対策事業室室長	水谷 好洋
	防衛省防衛装備庁技術戦略部技術戦略課課長	嶺 康晴
関係機関	新エネルギー・産業技術総合開発機構材料・ナノテクノロジー一部部長	吉木 政行
事務局	内閣府大臣官房審議官(科学技術・イノベーション担当)	黒田 亮
	内閣府政策統括官(科学技術・イノベーション担当)政策企画調査官(産業技術・ナノテクノロジー担当)	千嶋 博
管理法人	科学技術振興機構イノベーション拠点推進部部長	野口 義博
	科学技術振興機構イノベーション拠点推進部 SIP 革新的構造材料参事役	竹村 誠洋
	科学技術振興機構イノベーション拠点推進部副総括	西野 誠

平成 30 年 4 月 27 日(開催日)現在

(3) 予算

表 3-30 革新的構造材料の予算

年度	予算 (億円)
平成 26 (2014) 年度	36.1
平成 27 (2015) 年度	38.8
平成 28 (2016) 年度	37.6
平成 29 (2017) 年度	40.4
平成 30 (2018) 年度	34.0
合計	186.9

(4) 研究開発テーマ

本課題における研究開発では、特に、航空機機体・エンジン、大型発電設備での利用を出口として想定し、新材料技術を利用した材料技術を通じた持続的イノベーションを可能とする仕組みの構築を目指した。具体的には樹脂・CFRP、耐熱合金・金属間化合物、セラミックス複合材料、マテリアルズインテグレーションの4領域を対象として、新材料利用技術に関する研究開発を行うとともに、通常、長期間を要する構造材料技術研究開発の効率化のためのシステム作りを行った。同時に、先端計測・部材化・構造化技術等の基盤技術の開発や研究開発拠点形成とネットワーキングによる材料情報循環体制を構築した。

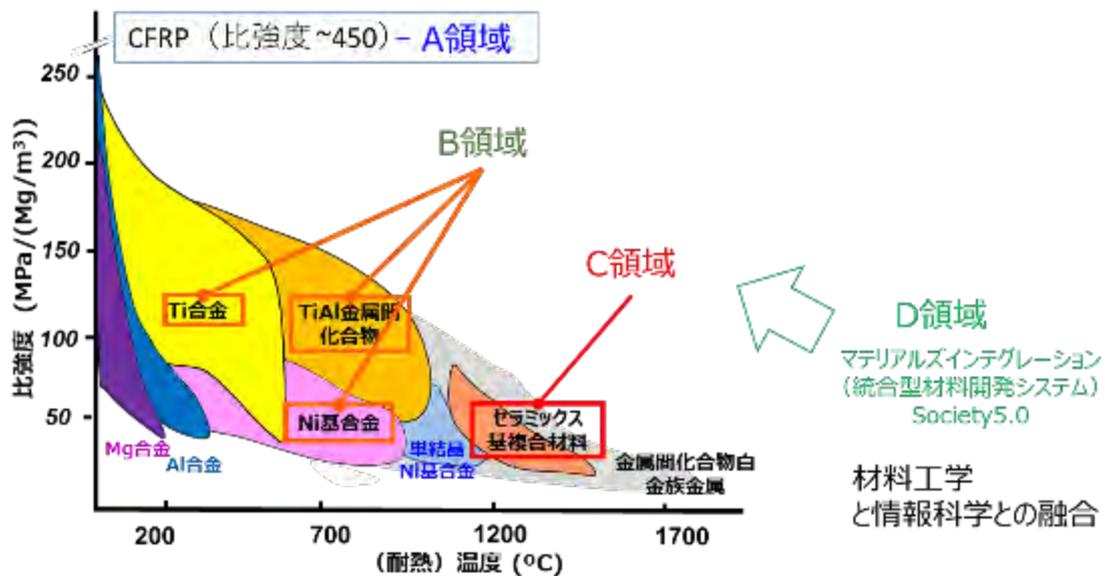


図 3-30 4領域の位置づけ



図 3-31 航空機用エンジンを対象にした場合の材料適用

1) 航空機用樹脂の開発とCFRPの開発

熱可塑性樹脂を用いたCFRPは、短時間で部材を成形することを可能とし、衝撃性にも優れていることから、航空機材料としての利用が拡大されつつある。将来の機体の大型化や複雑形状に対応できるCFRP製造技術として、既存のオートクレーブを用いた技術に替わる工業的な製造技術の開発が求められている。また、成形される材料の要求性能を基に、素材性能と生産性のトレードオフの関係を打破し、生産性に加えて信頼性を飛躍的に向上させたCFRP部材成形技術システムの構築を行うことが重要とされている。

そこで、本領域では、耐衝撃性・耐熱性等に優れた新規CFRP材料の開発と、高品質・低コスト・高生産性を実現するプロセス技術の開発を行った。

同時に、品質保証・最先端計測技術等の関連基盤技術の開発と、CFRPの付加価値を高めるための高分子材料や複合材料周辺技術開発も行った。

なお、高強度・高透明GF-PC (Glass Fiber-Polycarbonate) 複合材料の開発については

平成 28 年度末で TRL4 に達して終了した。また、構造部材用テキスタイルコンポジットの開発についても平成 28 年度末で TRL5 に達して終了した。セルロースナノファイバー強化樹脂の開発についても平成 28 年度末で TRL3 に達して終了した。

表 3-31 航空機用樹脂の開発と CFRP の開発体制

研究責任者	<ul style="list-style-type: none"> 武田 展雄 東京大学大学院新領域創成科学研究科教授 岩堀 豊 宇宙航空研究開発機構航空技術部門航空・複合材技術研究ユニットユニット長 山尾 忍 出光興産株式会社化学事業部機能材料研究所エンブレ基盤技術グループ主任研究員 安田 和治 旭化成株式会社次世代自動車材料グループ 中島 康雄 古河電気工業株式会社研究開発本部コア技術融合研究所主査 仁宮 一章 金沢大学新学術創成研究機構准教授
研究開発実施機関 (計 35 機関)	<p>東京大学、東京工業大学、名古屋大学、岐阜大学、京都大学、東京理科大学、愛媛大学、高知工科大学、東北大学、九州大学、東京農工大学、北海道大学、滋賀県立大学、金沢大学、神戸大学、首都大学東京、宇宙航空研究開発機構、福井県工業技術センター、株式会社 IHI、三菱ケミカル株式会社、三井化学株式会社、東レ株式会社、株式会社島津製作所、株式会社カネカ、三菱重工業株式会社、川崎重工業株式会社、株式会社 SUBARU、出光興産株式会社、旭化成株式会社、旭ファイバーグラス株式会社、本田技術研究所、古河電気工業株式会社、Bio-energy 株式会社、石川県工業試験場、株式会社ダイセル</p>

2) 耐熱合金・金属間化合物の開発

本領域は、耐熱材料創製技術 NIMS 拠点と、高性能 TiAl 基合金 東京工業大学拠点の 2 拠点から成る。

耐熱材料創製技術 NIMS 拠点では、国際競争力のある航空機部材等を創出するために、耐熱合金の革新的加工技術の開発を実施した。耐熱合金や金属間化合物の加工には鋳造や鍛造等の技術が必要であり、材料加工技術は部材のコストや信頼性と密接に関連している。そのため、エンジン用材料の部材を短時間で精度良く、かつ、製造コストを抑えて作製するための加工プロセス技術開発を目的とし、鍛造シミュレータ(大型鍛造プレス機)を用いた Ti 合金、Ni 基合金鍛造材のデータベース(DB)の作成と、信頼性の高い組織・特性予測ツールの構築を行った。

高性能 TiAl 基合金東京工業大学拠点では、比強度と耐熱性に優れた高機能次世代 TiAl 金属間化合物の実用化を目指した。組織設計指導原理を東京工業大学で構築し、その原理に基づいて提案された開発合金の溶解製造プロセス技術を株式会社神戸製鋼所で、ジェットエンジン翼の精密鋳造・鍛造によるものづくりプロセス開発を株式会社 IHI で行い、産学が密接に連携して研究開発を実施した。

なお、高強度 Ni 基ディスク材料の実用的加工プロセスの開発については、前倒しで目標を達成して終了した。

表 3-32 耐熱合金・金属間化合物の開発体制

研究責任者	<ul style="list-style-type: none"> 御手洗 容子 物質・材料研究機構構造材料研究拠点耐熱材料設計グループグループリーダー 石外 伸也 日本エアロフォーシ株式会社技術本部本部長 竹山 雅夫 東京工業大学物質理工学院教授 高橋 聡 株式会社 IHI 航空・宇宙・防衛事業領材料研究部次長 今野 晋也 三菱日立パワーシステムズ株式会社研究所火力システム研究部火力システム第二研究グループグループ長 木村 一弘 物質・材料研究機構環境・エネルギー材料部門材料信頼性評価ユニットユニット長 河村 能人 熊本大学先進マグネシウム国際研究センターセンター長 安田 弘行 大阪大学大学院工学研究科教授 佐藤 順 三菱日立パワーシステムズ株式会社研究所火力システム研究部主席研究員
研究開発実施機関 (計 29 機関)	<p>物質・材料研究機構、日本エアロフォーシ株式会社、川崎重工業株式会社、株式会社神戸製鋼所、大同特殊鋼株式会社、日立金属株式会社、株式会社 IHI、株式会社大阪チタニウムテクノロジーズ、三菱日立パワーシステムズ株式会社、住友電気工業株式会社、産業技術総合研究所、労働安全衛生総合研究所、株式会社東芝、金属技研株式会社、東京工業大学、香川大学、岐阜大学、東北大学、大阪大学、東京大学、東京電機大学、名古屋大学、九州大学、筑波大学、名城大学、近畿大学、兵庫県立大学、北海道大学、熊本大学</p>

3) セラミックス基複合材料の開発

軽量セラミックス材料部材の航空機用エンジンへの利用は、高温環境でのエネルギー効率アップの観点から、今後欠かせないものになっていくと考えられる。軽量セラミックス部材の実現に向けては、使用時の過酷な環境から表面を守り、部材の長時間使用を可能とする技術が、国際的な差別化のために必要とされる。

本領域では、耐熱・耐環境コーティング(EBC)を開発し、軽量セラミックス部材に適用することにより、航空機エンジン部材のタービン動翼・静翼、シュラウド等の大幅軽量化と使用環境下における部材の耐熱性、耐久性、並びに信頼性の飛躍的向上を可能にすることを目指し、以下の技術の開発を行った。

- (1) 熱・水蒸気・酸素遮断性に優れた多層セラミックスコーティング膜の最適材料設計
- (2) 最適多層セラミックスコーティング膜を具現化する EBC 技術の開発
- (3) 部材内部の基材となる SiC 繊維表面へのコーティング技術の開発
- (4) EBC 膜の使用限界の把握と、世界最高水準の部材特性の実証

- (5) 高速溶融合浸法 (MI : Melt Infiltration) により CMC⁴²高速基材製造プロセスを開発
- (6) アルミナ長繊維等を使った低コストで高耐熱性の酸化物系軽量耐熱部材を開発

表 3-33 セラミックス基複合材料の開発体制

研究責任者	高田 雅介 一般財団法人ファインセラミックスセンター材料技術研究所長兼ナノ構造研究所長 今成 邦之 株式会社 IHI 航空宇宙事業本部技術開発センター副所長 牛田 正紀 三菱重工航空エンジン株式会社技術部部長
研究開発実施機関 (計 14 機関)	一般財団法人ファインセラミックスセンター、株式会社 IHI、物質・材料研究機構、宇宙航空研究開発機構、株式会社超高温材料研究センター、三菱重工航空エンジン株式会社、イビデン株式会社、株式会社アート科学、株式会社ニチビ、横浜国立大学、東北大学、東京工業大学、東京大学、東京工科大学

4) マテリアルズインテグレーション

将来の航空機産業における国際的な競争では、要求性能を満たす材料の開発から部材の実用化まで一貫して迅速に実施することが不可欠である。そのために、経験に頼る既存の開発手法から脱皮し、利用加工技術や使用時特性等、材料から構造体に至るまでのパフォーマンスをシミュレーション等で予測する、効率的な研究開発の手法・環境を構築していく必要がある。このような研究開発が可能となれば、研究開発期間の短縮のみならず、投資に対する回収効率の飛躍的向上にもつながる。この材料物性及び加工プロセス条件等から、製造した構造体の使用環境での予測性能や予想寿命等を求める問題を「順問題」という。

本領域では、材料工学を中心として、既存の理論や実験、シミュレーション等の計算機科学的手法、データベース、マテリアルズ・インフォマティクス⁴³等の情報科学を融合し、材料の時間依存の性能を予測する統合型開発支援システム、マテリアルズインテグレーションの開発を進め、材料開発時間の短縮、効率化、コスト削減、材料選択やプロセスの最適化への貢献を目指した。

⁴² Ceramic Matrix Composites (セラミック基複合材料)

⁴³ マテリアルズ・インフォマティクスは材料の構造と性質を主に第一原理の計算で結びつけることを指す。一方、マテリアルズインテグレーションは構造・性質・パフォーマンス・プロセスを結びつけることであり、マテリアルズ・インフォマティクスの構造と性質の部分を含包する。

表 3-34 マテリアルズインテグレーションの開発体制

研究責任者	<ul style="list-style-type: none"> 小関 敏彦 東京大学大学院工学系研究科教授 渡邊 誠 物質・材料研究機構構造材料研究拠点 廣瀬 明夫 大阪大学大学院工学研究科教授 大久保 雅隆 産業技術総合研究所エレクトロニクス・製造領域 構造材料ナノ物性計測分析ラボ研究ラボ長 津崎 兼彰 九州大学工学研究院教授 辻 伸泰 京都大学工学研究院教授 松原 秀彰 東北大学大学院環境科学研究科教授 毛利 哲夫 東北大学金属材料研究所教授 菖蒲 一久 産業技術総合研究所製造技術研究部門客員研究員 栗山 卓 山形大学大学院理工学研究科教授 藤元 伸悦 新日鉄住金化学株式会社総合研究所主任研究員 西浦 廉政 東北大学材料科学高等研究所特任教授 志澤 一之 慶應義塾大学理工学部教授 山下 雄史 東京大学先端科学技術研究センター特任准教授
研究開発実施機関 (計 33 機関)	東京大学、北海道大学、東洋大学、青山学院大学、東京農工大学、 名古屋大学、帝京大学、大阪大学、大阪府立大学、富山大学、筑波 大学、九州大学、北見工業大学、京都大学、東北大学、九州工業大 学、山形大学、広島国際学院大学、岐阜大学、名古屋工業大学、東 京工業大学、慶應義塾大学、大阪市立大学、物質・材料研究機構、 理化学研究所、JFE スチール株式会社、株式会社神戸製鋼所、株式 会社 IHI、株式会社 UACJ、新日鉄住金化学株式会社、産業技術総 合研究所、高エネルギー加速器研究機構、日本原子力研究開発機構

(5) 研究開発テーマと各省庁施策との連関図

研究開発テーマと各省庁施策との連関図を図 3-32 に示す。

SIPが先導する構造材料関連AP（アクションプラン） 特定施策

各省施策と連携し、**構造材料重要分野**を**基礎から社会実装**まで

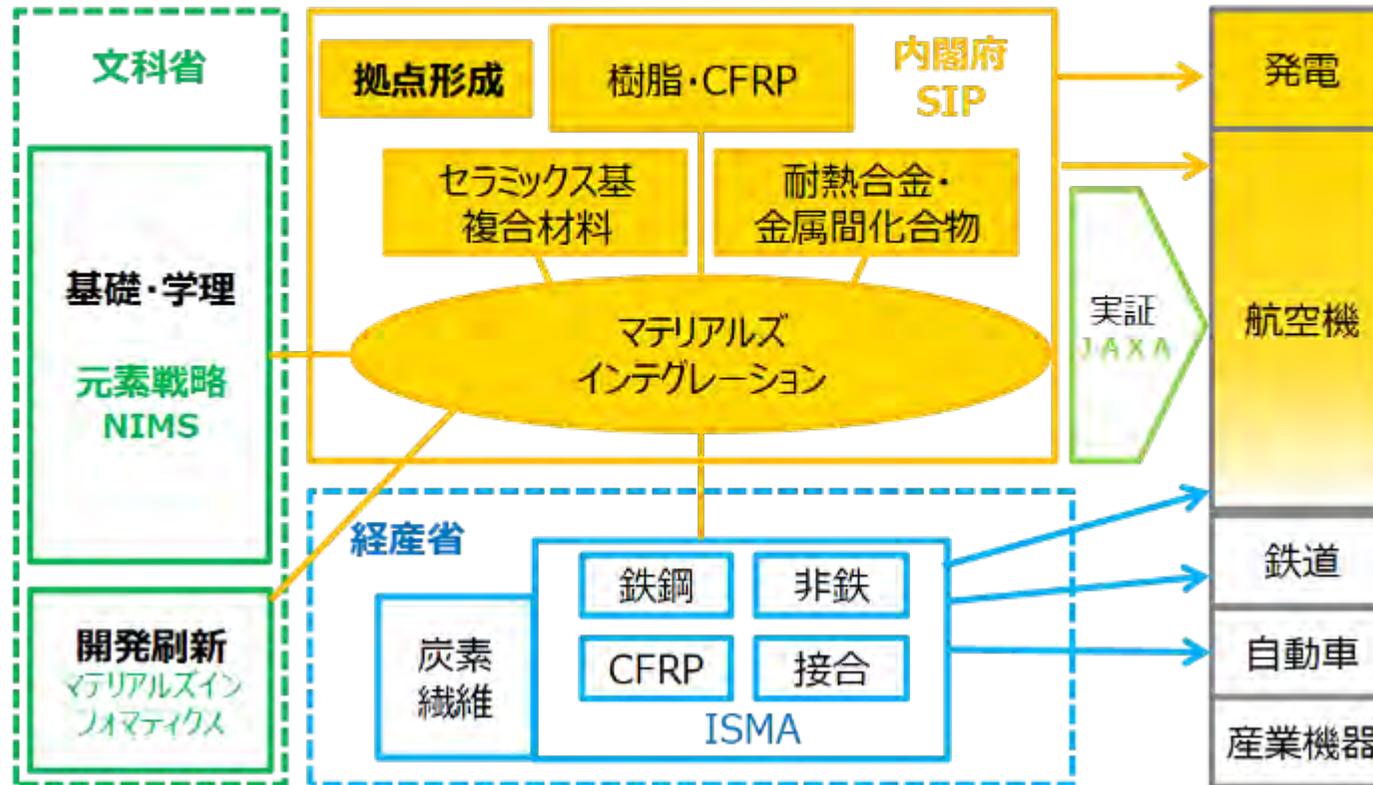


図 3-32 革新的構造材料の研究開発テーマ及び各省庁施策との関連図

(6) 出口戦略

1) 出口指向の研究推進

材料技術の基盤から設計・製造を含めた航空機のバリューチェーン掌握を視野に開発を行う。また、研究開発段階から実機適用を最短で実現する研究開発体制と仕組み構築のため、マテリアルズインテグレーション構築による構造材料の実機適用の迅速化、産産及び産学官連携による拠点・ネットワークの形成、国際連携による長期イノベーション戦略の構築を図る。

2) 普及のための方策

航空機分野及びその他の波及が期待される分野に応じ、標準化・安全評価手法やその認証手法の策定、認証取得等を推進し、開発素材の利用促進を図る。また、メーカーや、有識者へのヒアリング、内外の技術動向の調査等を行い、今後の社会動向に合わせて最適な研究が実施されるようなマネジメントを遂行する。

3) 拠点形成

基礎から応用研究まで展開可能な体制作りを重視し、企業と大学・国研のダブル領域長制を採用し研究当初より拠点形成を行う。拠点は産学官連携機関として、構造材料分野の研究開発、人材育成、国際連携等を推進する役割を担う。

(7) 分析フレーム（ロジックツリー）

研究開発活動がもたらす直接的な研究成果と、現在・将来の波及効果について、平成 30 年度研究開発計画からロジックツリーにより整理を行った結果を図 3-33 に示す。

本課題は、航空機の主翼や尾翼、エンジンといった主構造部材の研究開発と、航空機分野材料に限定せず、材料開発時間の短縮等を目的としたシステム開発の大きく分けられる。出口戦略として、実機適用を最短で実現するための研究開発体制の構築と、分野に応じた標準化・安全評価手法及び認定手法策定を推進、規制・基準等による導入促進策を展開することを目指した成果の普及活動が掲げられている。これらの直接的な研究成果としては、具体的な新技術やその特許の取得、シミュレーションコードの構築等が挙げられる。これら研究成果を基礎とすることで、大型化や量産化するための技術やエンジン部材の大幅な軽量化・耐久性の向上を実現するための技術の確立が期待される。中長期的には、2030 年までに 2 兆円規模の関連部素材出荷額が見通せていること、ひいては我が国の産業競争力の強化や省エネルギー、排出ガス削減等に貢献することが期待されている。

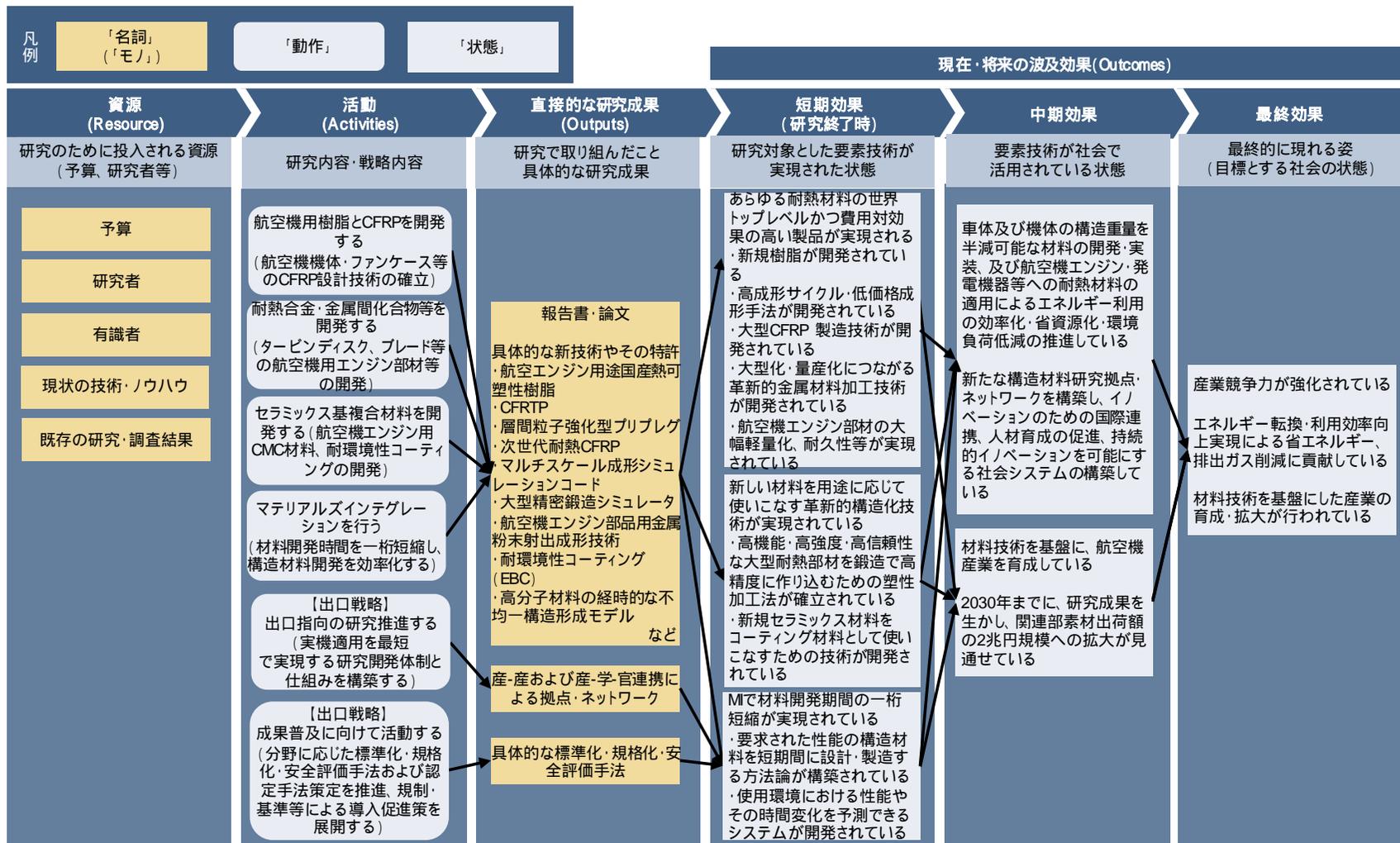


図 3-33 革新的構造材料のロジックツリー

(出典) 平成 30 年度研究開発計画を基に作成

3.3.2 評価

(1) 意義の重要性、SIP の制度の目的との整合性

各研究領域(A～D)において、拠点の形成、特許化、知的財産の創出等に重点が置かれ、産学の研究者が同じ研究目標を達成すべく協働することにより、密な人的連携を伴う実質的な産学連携が進んだ。また、産学だけでなく、これまでは海外航空機メーカーを通したつながりのみであった企業同士に接点ができ、研究者レベルでの人事交流が進んだ。

本課題で提唱されたマテリアルズインテグレーションは、これまでの材料開発の手法に情報科学を融合させ、開発期間の短縮等を可能する取り組みである。開発には材料開発の具体的知見を有する「産」と情報科学の研究を行っている「学」による産学連携が不可欠であり、SIP の特徴が活かされている。マテリアルズインテグレーションの取り組みは世界に先駆けるもので、Society 5.0 のコンセプトにも沿っており、今後継続的な利用・発展が期待される。

(2) 目標・計画・戦略の妥当性

産業界からの提案・要望等を受けてPD がとりまとめた研究開発計画に対して、プロジェクト開始前までに、アドバイザリーボード⁴⁴の有識者等の意見を反映し、目標設定を明確化するために繰り返し 10 回程度の修正を行った。大きな労力を必要とする作業であったが、おおむね産業界のニーズを踏まえ、参画企業が SIP の成果を製品化・事業化・実用化に繋がるような妥当な目標設定となった。

課題評価と並行して行った課題評価アンケート(研究責任者向け)では、実現可能なスケジュールだったかという質問に対し、78%が「とてもそう思う」又は「ややそう思う」と回答しているものの、目標の修正や進捗評価に当たっては、実質的な研究期間を考慮に入れてほしいとの研究実施者の意見⁴⁵もあった。

さらに、材料開発分野は国際競争の激しく、SIP 事業の目的に鑑み、当初設定された目標を 5 年かけて達成するだけで良いのか、海外の競合相手の研究開発状況を見据え、目標をより適宜に見直す必要があったのではないかという指摘もあった。

成果については、国内特許だけではなく、海外特許の取得を目指した。国際競争力を有する構造材料を開発する上で、海外特許をおさえておくことは重要な戦略であり、海外特許の出願に見合う成果が研究実施者に求められた。

また、課題評価アンケート(研究責任者向け)では、制度・規制改革に関する戦略やベンチャー創出・中小企業支援戦略に関しては、「本課題には関係しない」という回答が多くみられた。出口(ユーザー)から遠い上流(シーズ)側に位置する課題に携わる研究者・開発者が持つ特徴的な意識の現れとも考えられる。

⁴⁴3.3.2 (3) 4) アドバイザリーボードによる評価を参照。

⁴⁵ 研究開発開始に当たって大型設備の設計・導入を行った B 領域や C 領域では、設備を利用したデータ取得等が始まるのが 2 年目以降となったが、進捗評価等の際にこの点を踏まえていない場合があったという意見である。3.3.2 (4) 3) 研究成果(耐熱合金・金属間化合物)参照。

(3) 課題のマネジメント（適切なマネジメントがなされているか。）

1) TRL による達成度の把握

各研究領域共通で、TRL を用いて研究の進捗状況を管理した。研究進捗管理の指標は、一般的に企業毎に異なるため、共通指標として TRL を設定したことは、各課題の進捗状況を把握する上で重要であった。

2) 連携コーディネーターと共同リーダー制による領域のマネジメント

各領域のマネジメントに関して、当初は研究機関の研究者を領域長としてスタートし、各領域には研究内容について熟知した連携コーディネーターが配置され、管理法人と研究機関の橋渡し役を担った。しかし途中から、産学連携を進める目的で、企業研究者との共同リーダー制に変更された。企業研究者を共同リーダーにすることによって、国研及び大学側のリーダーが実用化に向けた方針を明確化することができるなど、産学のリーダー同士で密なコミュニケーションが生まれた。

3) 領域間連携

研究領域の連携は D 領域のマテリアルズインテグレーションを中心に進めた。A から C の各領域の材料について実験データ蓄積とモデルの構築等を進め、研究開発時間短縮やコスト削減等に向けた試みが行われた。鉄鋼材料の溶解・凝固及び破壊を例題として、世界に先駆けて MI システムを開発する一方、CFRP では分子レベルから部材のそり変形等をシミュレーションしつつ、高効率複合部品製造法において成型シミュレーションで適正なプロセスを製造法にフィードバックしている。また TiAl 開発において重要な相図を実験とシミュレーションから構築し、鍛造シミュレータによって 5 万トン鍛造の適正な条件を提案できる状態になった。また CMC のタービンブレード実部品の応力や振動解析を進め、作成仕様に利用されている。

4) アドバイザリーボードによる評価

研究内容や成果について、国内外の有識者によるアドバイザリーボード（国内委員 12 名・海外委員 11 名）により評価を行った。国内のアドバイザリーボードの委員は企業と大学・国研関係者が 1:1 になるように設定した。研究推進上で基礎的な視点から実用的な視点まで有用な意見が得られた。他方で、個別企業の経営戦略について必要以上に質問され、対応に苦慮したという参加企業の意見も聞かれた。

さらに、評価の中立性を保つため国際アドバイザリーボードも設置した。航空機メーカーにより近い欧米研究者に評価してもらうことによって、目標設定と研究方法を再検討することができた。ただし、我が国の技術が海外の委員を通して流出する恐れがあるため、成果発表には計測手法開発を主とするなど工夫を要した。

5) 管理法人の適切な管理

研究実施者と研究責任者、PD・サブ PD の間のコミュニケーションサポートや資金配分等の管理に関する管理法人によるサポートは、研究責任者らからの評価も高い。また、知財に関して、管理法人が一元管理し、知財の内容を把握して、特許権を取得した研究内容や、

優れた成果だが権利化に至っていない事例を分析するなどの取り組みが行われた。課題評価アンケート（研究責任者向け）でも、管理法人のサポートは適切だったかという質問に対し、38%が「とてもそう思う」、55%が「ややそう思う」と回答している。

(4) 直接的な研究成果（アウトプット）

研究開発活動で得られた直接的な研究成果（アウトプット）は以下である。

1) 目標の全般的な達成状況

平成 30 年度の研究開発計画における技術的目標は、以下の 3 点である。

- ┆ 耐熱材料の世界トップレベルかつ費用対効果の高い製品の実現
- ┆ 新しい材料を用途に応じて使いこなす革新的構造材料技術を実現
- ┆ マテリアルズインテグレーションで材料開発期間の一桁短縮を実現

アウトプット目標値は企業ニーズに応じて、国研及び大学の持つ知識や利用可能技術、JST やシンクタンクの調査を基に設定した。領域・テーマ毎に TRL の考え方を導入し、研究開発技術の位置づけや製品完成までのスケジュールを明確にした。目標 TRL の最高設定値は 5「技術要素としての実証モデルが、実際の使用環境に近い条件のもとで試験されている。」であり、A、B、D 領域において設定されていた目標 TRL は、ほぼ到達できる見込みである。一方 C 領域では、目標 TRL 未到達のテーマがあり、例えば、「耐用温度 1400 級環境遮蔽コーティングの高速製造プロセスの開発」にて、TRL3 の達成度は 50%程度であった。

2) 研究成果（樹脂・CFRP）

「高生産性・強靱 CFRP（機体 / 尾翼等）」(TRL4) では、胴体・主翼用の高生産性・強靱 CFRP の成形法、「脱オートクレーブ CFRP 成形法（機体 / 尾翼等）」(TRL4) では、低コストかつ成形時間を短縮させた尾翼・ドア用の脱オートクレーブ成形法により、いずれもメートル級の模擬部材を試作した。また、「熱可塑性樹脂 CFRP（エンジン）」(TRL4) では、エンジン用ファンブレードに適用可能な熱可塑性 CFRP 及びその成形技術を開発し、実証を行った。さらには「耐熱 CFRP（エンジン用）」(TRL3) では、エンジン用耐熱 CFRP として、250、3000 時間の熱曝露においても強度が低下しない TriA-X ポリイミド CFRP を開発した。

実証試験 供試体 複合材部品 (全体組立前)
(スパン-ストリカ°ル°構造)

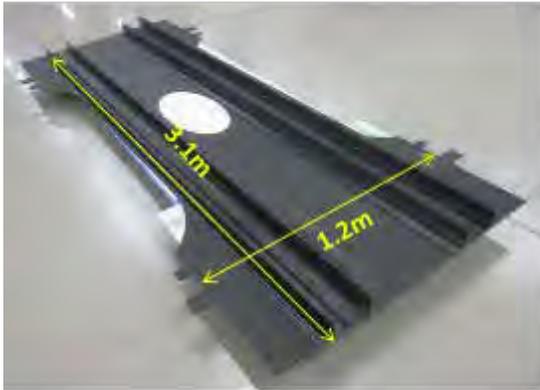
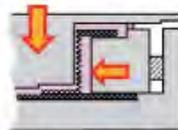


図 3-34 高強度・高靱性 CFRP 実証試験供試体

脱オートクレーブ成形による尾翼、ドア
Tail and door by the out of autoclave molding

3次元ギャップRTM成形技術
成形時間: オートクレーブ比1/5
3D gap RTM (Resin Transfer Molding) technology
Molding time : 1/5 of molding by autoclave



3次元ギャップ金型
3D gap mold

真空圧成形技術
Vacuum molding technology



脱オートクレーブ(OoA)成形
Out-of-Auto(OoA) processing

図 3-35 脱オートクレーブ成形による尾翼、ドア

(出典) JST「SIP 革新的構造材料」(平成 31 年 1 月閲覧)
<<http://www.jst.go.jp/sip/k03/sm4i/dl/sip-sm4i-pamphlet.pdf>>

3) 研究成果 (耐熱合金・金属間化合物)

「大型鍛造シミュレータ」(TRL5)では、Ti合金・Ni基合金開発に関して、1,500t 鍛造実験機データを用い、信頼性の高いデータベースと、材料の性能を予測するための鍛造シミュレーションシステムを構築した。「高性能 TiAl 基合金」(TRL5)では、難加工性克服と高温力学特性向上との両立を達成した。鍛造シミュレータの開発に2年を要したが、現在、着実に企業の利用が進み、SIP 終了後も順調に運用が進むと考えられる。

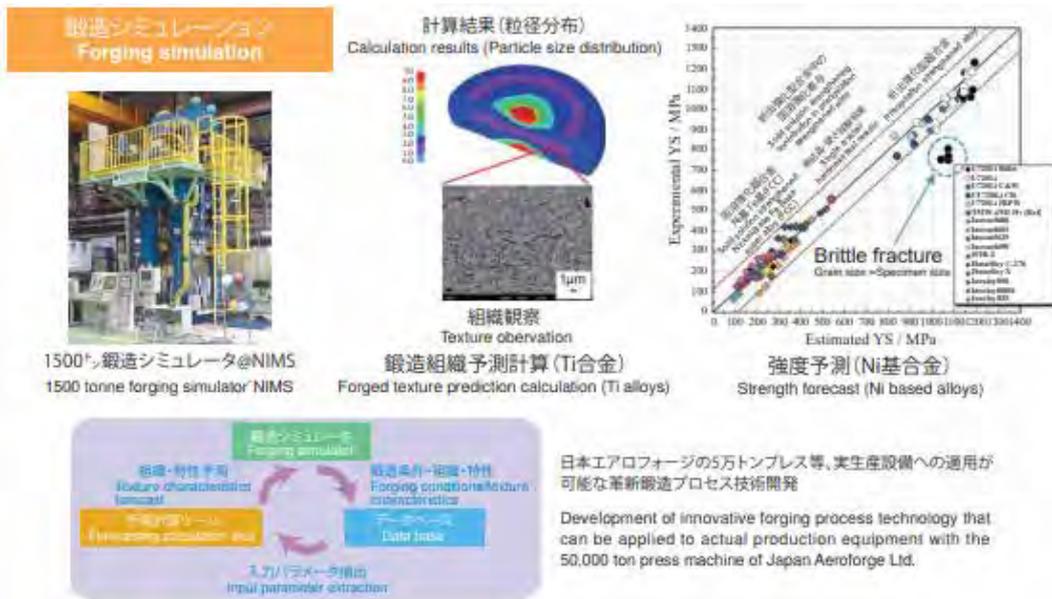


図 3-36 鍛造シミュレーション

(出典) JST「SIP「革新的構造材料」(平成31年1月閲覧)
 <<http://www.jst.go.jp/sip/k03/sm4i/dl/sip-sm4i-pamphlet.pdf>>

4) 研究成果(セラミックス基複合材料)

「耐環境性コーティング技術」(TRL3)及び「繊維コーティング材料」(TRL3)では、1,400 級の酸素・水蒸気環境下において環境遮へい性に優れる耐環境コーティング構造材の開発に成功した他、「高速基材製造プロセス技術」(TRL3)では非氧化物系セラミックス基複合材料の低コスト化に向け、高速溶融合侵法によるニアネットシェイプ成形技術を確立した。

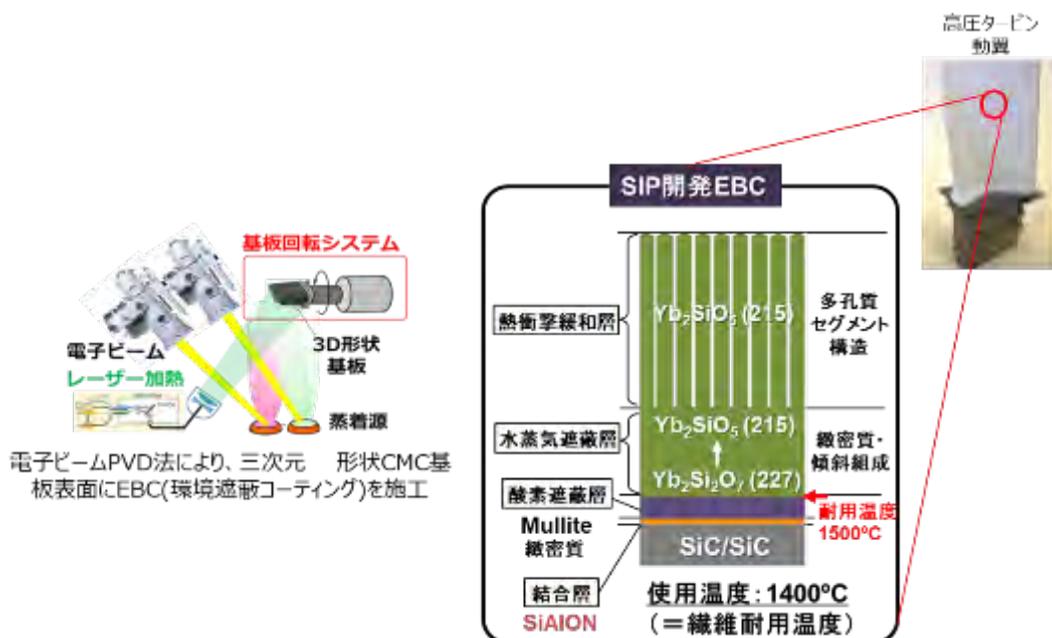


図 3-37 1400 級の耐高温過酷環境機能を持つコーティング構造材の開発

5) 研究成果 (マテリアルズインテグレーション)

「マテリアルズインテグレーションシステムの開発」(TRL3)では、プロセス 組織 特性 性能の計算モジュールを自動接続して一気通貫で解析し、寿命等を予測する MI システム ver.1.0 が完成した。これを用い、理論計算・材料パラメータ DB を駆使してプロセス-構造-特性-性能を連関、金属溶接部に適用し、疲労寿命予測を自動算出した。また「先端計測拠点」では、新たな計測技術も確立され、特に高エネルギー加速器研究機構による放射光(高輝度、高品質の X 線)を中心に活用した CFRP の破壊(クラック進展)挙動の微視的三次元その場観察技術は世界に誇れるものである。ただし、MI システムを用いた A・B・C 各研究領域間の連携は機能する段階まで至っておらず、金属材料領域だけでなく、CFRP やセラミックス材料領域への MI システムの適用が今後求められる。

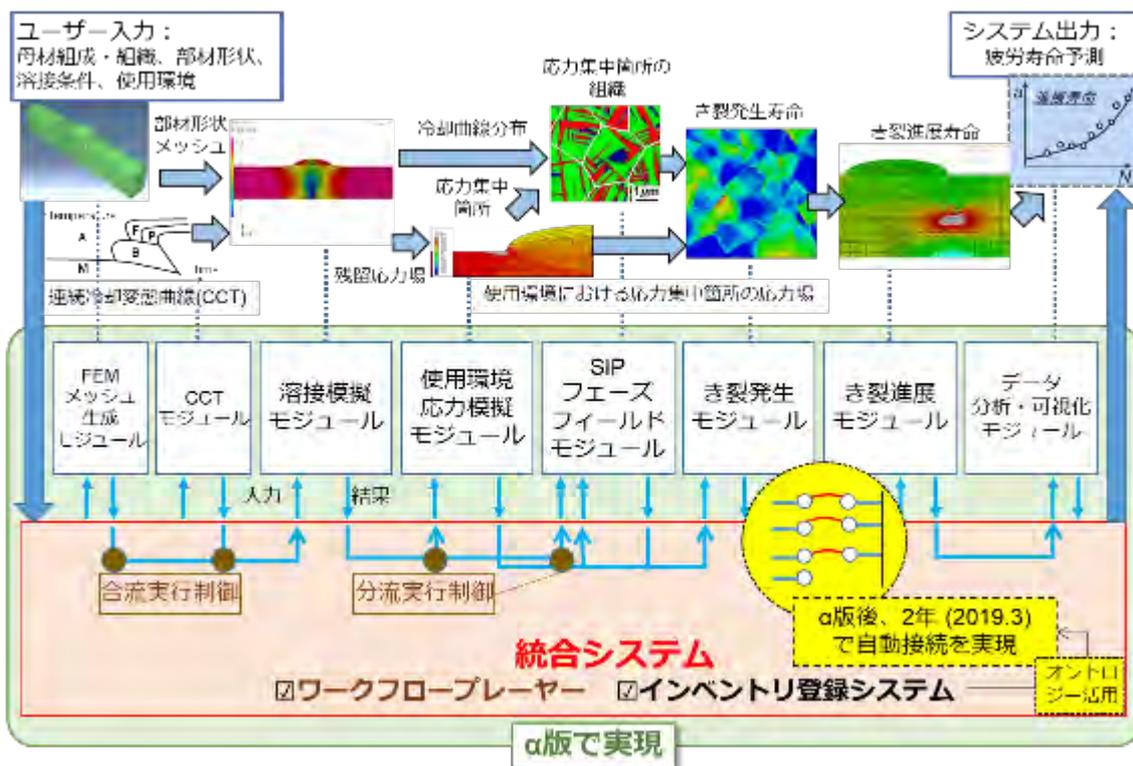


図 3-38 MI システム概要

6) 研究拠点・研究体制の構築

出口戦略の一つとして設定されていた研究拠点については、SIP 終了後に産が(共同)リーダーとなって実用化を目指すための拠点として、国研及び大学を合わせた計 7 か所に整備された。

- Ⅰ A 領域: JAXA が研究拠点となり、他の企業も参画し、引き続きモデリング、材料評価、データベース拡充等に取り組む
- Ⅰ B 領域: NIMS と東京工業大学が研究拠点となり、それぞれの研究拠点に対し、参画する企業も決定し、プロセス開発や材料評価等に取り組む

Ⅱ 1,500 トン鍛造シミュレータを NIMS に構築

- Ⅰ C 領域：一般財団法人ファインセラミックスセンター(JFCC)と東京工科大学が研究拠点となり、他の企業も参画し、CMC 材料のコーティング設計、低コスト作製技術や材料評価等に取り組む
- Ⅰ D 領域：東京大学とNIMS が研究拠点となり、計算材料科学、データベース整備、情報工学、MI システムに取り組む

7) 情報発信

国内においては、各種学会にて国内SIP キャラバンを実施した他、2016年度以降毎年度、公開成果報告会を開催し、研究成果の発信を行った。

海外においては、内閣府 外務省科学技術発信キャラバン(8か国：ドイツ、オーストリア、フランス、英国、インドネシア、タイ、フィリピン、オランダ)を実施した。平成31年2月にパリで最後のキャラバンを実施した。また、国際会議を平成27年度、29年度に開催した。各領域では国際シンポジウム⁴⁶に招待され、発表するなどの活動も見られた。

なお、本課題の情報発信活動として、平成30年度に開催したシンポジウムを表3-35に示す。

表 3-35 革新的構造材料に関する情報発信(平成30年度のシンポジウム)

年月日	名称	主催等	概要
平成30年 6月29日	第11回SIP「革新的構造材料コロキウム」 「環境要因による材料の劣化と破壊」	NIMS	金属・セラミックス及び高分子材料における重要かつ特徴的な環境劣化機構を紹介する。
平成30年 10月12日	第12回SIP「革新的構造材料コロキウム」 「多彩な材料系に展開するAdditive Manufacturing技術」	大阪大学	金属、セラミックス及び高分子材料、それぞれの材料に固有並びに共通となるAdditive Manufacturing技術の利点・欠点及び将来展望や複合化への課題を紹介する。
平成30年 12月14日	SIPシンポジウム 大型精密鍛造シミュレータを用いた革新的新鍛造プロセス開発と材料・プロセスデータベース構築	NIMS	これまでのプロジェクトの研究成果の発信とともに、プロジェクト終了後の1,500トン鍛造シミュレータ活用のための運用体制を含め、企業が実用化・事業化を見据えて、プロジェクト成果を活用していく方策、あるいはオールジャパン体制でのイノベーション創出への取り組み等について議論する。
平成31年 1月29日	「革新的構造材料」 最終成果報告会	JST	課題の終了を迎えるに当たり、5年間の成果を公表する。

⁴⁶ 例えば先進セラミックス基複合材料(Advanced Ceramic Matrix Composites)会議(2017)
<http://www.jst.go.jp/sip/k03/sm4i/dl/sip-sm4i-magazine_vol6.pdf>でSIP関係者が招待講演を実施していることが挙げられる。

8) 論文・知的財産

査読あり論文 312 件が投稿され、97 件（うち海外含む 39 件）の特許出願がなされた。

表 3-36 構造材料に関する論文数

	発表年					
	5年合計	2014	2015	2016	2017	2018
合計	419	9	42	107	130	131
査読あり合計	312	3	31	76	103	99
英文	268	3	30	64	89	82
和文	44	0	1	12	14	17
その他	0	0	0	0	0	0
査読なし合計	107	6	11	31	27	32
英文	49	3	5	21	11	9
和文	58	3	6	10	16	23
その他	0	0	0	0	0	0

(注1) 平成30年12月末実績。発表年は年度ではなく暦年である。

(注2) 「査読あり」については学術誌での発表論文以外に学会発表・予稿集等も一部含んでいるが、「査読なし」については学会発表・予稿集等は原則として除いている。

みなし取下げを除いた出願年度別の特許出願件数及び登録件数（ファミリー単位で集計）は表 3-37 のとおりである。海外を含む特許出願を積極的に進めており、一部は既に権利化されている。企業による出願が大半を占めるが、一部研究機関による出願もみられる。例えばC領域では、株式会社IHIとJFCCが中心となり、耐環境性皮膜に関する海外特許を出願している。この他、耐環境性コーティング部材や、強化繊維を皮膜する耐環境制コーティング及び皮膜方法についても海外特許を出願している。

表 3-37 構造材料に関する特許数

		出願年度					
		5年合計					
		2014	2015	2016	2017	2018	
出願	合計	97	2	12	34	35	14
	国内のみ	58	2	5	18	25	8
	海外含む	39	0	7	16	10	6
	PCT	33	0	7	14	9	3
	米国	31	0	6	10	10	5
	欧州	10	0	6	3	1	0
	中国	29	0	6	11	10	2
	韓国	25	0	5	9	9	2
登録	日本	5	1	0	2	2	0
	米国	2	0	1	0	1	0
	英国	0	0	0	0	0	0
	ドイツ	0	0	0	0	0	0
	フランス	0	0	0	0	0	0
	中国	0	0	0	0	0	0
	韓国	0	0	0	0	0	0

(注) 平成 30 年 12 月末実績。みなし取下げを除いた出願年度別の特許出願件数及び登録件数をファミリー単位で集計。

さらに、特許以外の知的財産として、各領域でプログラム等の著作権、及び秘匿すべき技術的なノウハウが蓄積された。

(5) 現在・将来の波及効果 (アウトカム)

研究終了時である現時点の目標の達成状況と波及効果、将来 (短期・中期・最終) に期待できる波及効果については次のとおりである。

1) 目標の全般的な達成状況

平成 30 年度の研究開発計画における社会的な目標及び産業面の目標は、以下のとおりである。

【社会的な目標】

- ┆ 航空機を対象とし、構造重量を半減可能な材料の開発・実装、及び耐熱材料の適用によるエネルギー利用の効率化・省資源化・環境負荷低減の推進
- ┆ 構造材料研究拠点・ネットワークの構築、イノベーションのための国際連携・人材育成の促進、持続的イノベーションを可能にする社会システムの構築

【産業面の目標】

- ┆ 中・小型機を中心に材料～部材～設計・製造のバリューチェーンを掌握するよう航空機産業を育成
- ┆ 2030 年までに研究成果を生かし、関連部素材出荷額の 2 兆円規模へ拡大

本課題では、新規生産量が多い中・小型航空機への開発材料・技術の適用により、2030 年

の関連部素材出荷額を2兆円とすることを目標とし、そこから遡って課題終了時の目標TRLを設定した。

開発された新材料に対する評価は高いが、最終目的である航空機への実機適用は、有力な海外企業の調達先として食い込めるかどうかに依存する。なお、課題評価アンケート(研究責任者向け)においても、今後達成できると思われる段階として、「製品化段階」との回答は59%となっているが、「上市段階」は15%にとどまっている。

2) 事業化・大学発ベンチャー

既に研究開発目標が達成され、事業化へ向けて動き出した例がある。「高強度・高透明 GF-PC 複合材料の開発」では研究開発の中心となった参画企業において、目標としていた材料性能の達成やその評価、市場調査が終了し、社内で事業化を進めた。「構造部材用テキスタイルコンポジットの開発」は参画企業において社内で事業化が進められており、今後の成長が期待される。また、TiAl 基合金材も参画企業が実用化に向けた取り組みを継続する意向である。

産業技術総合研究所・大学発ベンチャーも立ち上がっている。「計算熱力学」(AIST、九州工業大学、東北大学、NIMS 実施)では産総研技術移転ベンチャー企業として「株式会社計算熱力学研究所」が設立された。

3) マテリアルズインテグレーション

MI は Society 5.0 のコンセプトに沿っており、今後も継続的な利用・発展が期待される。順問題について今後、材料開発等に必要なデータが蓄積され、企業や大学等が利用する機会が増加すれば、材料開発の時間やコスト等の大幅な短縮が見込まれる。今回の MI システムを速やかに他プロセス(Ti 合金、Ni 基合金の鍛造プロセス等)にも展開すること、特に A 領域への展開は産業界の要望も強く連携の強化が期待される。なお、マテリアルズインテグレーションは SIP 第 2 期の「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」においても主要テーマであり、要求する性能から材料・プロセスをデザインする「逆問題」が対象とされている。ただし、現状では順問題に対しても限られた条件の下でしかマテリアルズインテグレーションが機能していないことは懸念事項として挙げられる。

4) 航空機産業以外への展開

A~C 領域は、航空機材料をターゲットとしていたが、本課題で開発された成形技術等の成果は、産業用ガスタービン等への応用も今後は考えられる。開発した材料の多くを航空機以外の分野で用いるには生産コストが高いが、一部部材(樹脂・CFRP)はコスト低減目的から二輪車部品、更なるコスト低減で自動車部品(特に、軽量化が必要な HV⁴⁷、EV、FCV⁴⁸)への適用が期待できる。

5) 人材育成

多くの研究開発テーマで大学の若手研究者や企業の若手社員が参画し、人材育成の促進

⁴⁷ ハイブリッド車 (hybrid Vehicle)。

⁴⁸ 燃料電池自動車 (Fuel Cell Vehicle)。

がなされた。SIP「革新的構造材料」コロキウムを開催（平成30年度末までに計13回開催予定）した。C領域においては、大学のポストドクターがSIPを通じて活発に交流したことにより、JFCCに就職するという例もあった。大学の若手学生等が企業について良く知る機会が増え、若手学生のキャリアパスイメージを広げる点でも有益であった。

6) 大型設備

B領域でNIMSに導入した大型鍛造シミュレータは、Ti合金やNi基合金について鍛造条件に対応した様々なデータを取得することができる、世界的にも類を見ない設備である。新たに付帯設備を導入すれば他の金属についてもデータ取得が可能となっている。

しかし、課題終了後のこれらの大型設備の保守・運用費用を確保する方策を検討する必要がある。例えば、今後の鍛造シミュレータの保守・運用には年間3,000万円程度が必要となり、1サンプルを作成するためには金型作成や材料調達費用等で数千万円の費用を要する場合がある。C領域でJFCCに導入した設備（耐環境コーティング形成装置）に関しても、同様の課題がある。

7) 国際的な立ち位置

A領域（樹脂・CFRP）は我が国のシェアが約70%と国際競争力は強い分野であり、本成果の実用化で今後の国際競争力の維持が期待され、さらなる国際シェアの向上も期待される。また、素材メーカー、機体メーカー及び研究機関の連携での研究事例は少なく、国内メーカー各社の連携が促進されて国際競争力は確実に強化された。今後は、ボーイング社以外の航空機への採用、国内航空機産業発展による実績増加が必要であるが、これらは国内メーカー各社による企業努力が重要である。

D領域で開発されたMIシステムは、類似のシステムとして、米国：Materials Genome Initiative⁴⁹（MGI）（平成23年開始）、欧州：European Center of Excellence for Novel Materials Discovery⁵⁰（平成27年開始）らが既に存在し、競合している。本課題の成果として得られたマテリアルズインテグレーションによる金属材料の疲労き裂発生・進展においては、米国MGI⁵¹においてもシミュレーションによるき裂進展予測が行われている。しかし、溶接に関する熱源モデリングから継手性能評価までの一貫したMIシステムの構築は、本課題が世界に先駆けて確立した成果であり、これにより溶接部のき裂発生・進展予測を可能としている。今回のMIシステムを速やかに他プロセス（Ti合金、Ni基合金の鍛造プロセス等）にも展開して国際競争力の強化を図るべきである。

SIPで得られた研究成果により国際競争力は確実に強化されたが、機体・エンジンともに米欧が圧倒的に優位な航空機産業において、認証・標準化の仕組みを把握し、開発素材の利用促進を図ることが期待される

⁴⁹ The White House 「Material Genome Initiative for Global Competitiveness」(平成31年1月閲覧)
<https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/materials_genome_initiative-final.pdf>

⁵⁰ NOMAD (平成31年1月閲覧) <<https://nomad-coe.eu/>>

⁵¹ U.S. DOE Office of Science(SC) 「Materials Genome Initiative Accelerating Materials Research Third Principal Investigator Meeting」(平成31年1月閲覧)
<https://science.energy.gov/~media/bes/mse/pdf/docs/Materials%20Genome%20Initiative/2016_NSF_DOE_MGI_PI_Mtg_Book.pdf>

(6) 改善すべきであった点と今後取り組むべき点

1) 改善すべきであった点

当初、企業側からは A~D 領域すべてを並行的に進めるよりも、産業競争力強化のため、例えば A 領域のみに特化すべきとの意見があった。しかし、我が国の強みとともに弱みも強化しなければ、長期的な視点では産業競争力強化につながらない、との意見もあり、長い議論の結果として、航空機産業の 4 つのポイントとして A (CFRP) B (TiAl 金属間化合物、耐熱合金) C (CMC) D (マテリアルズインテグレーション) に絞った。しかし、それでもテーマ設定が多岐にわたり、研究テーマ間の連携を含めて SIP の課題として一体的に実施する意義が達成されたとは必ずしもいえなかったため、やはり研究開発テーマをユーザーの立場から見直す、材料ユーザーがリーダーとなって明確な出口に進むようにするなどの視点を持って、より絞り込む検討をすべきであった。

研究テーマが幅広い一例として、課題評価 WG における PD の限られた発表時間内では、テーマ全体の状況説明よりも個別テーマの進捗報告にとどまった結果、評価委員が研究テーマ間の連携状況を把握すること及びその連携不足を指摘することは困難だったと課題評価 WG での指摘もあった。さらに、研究開発実施機関が多いため、管理法人の契約事務が相当程度発生したこと、個々の研究開発実施機関の進捗状況の把握に時間がかかったという反省点もある。

マテリアルズインテグレーションについては、もともと企業が保有しているデータを SIP の中へ提供することは困難であるが、SIP 研究の中で得られたデータの交換は進んだと考えられる。SIP2 期の課題ではデータベース構築が 1 つの目標であるが、本課題の取り組みを参考にして取り進めを検討すべきである。

2) 今後取り組むべき点

本課題で開発した各種技術 (TRL: ~5) が航空機用部材として採用を検討できるレベルに到達するよう、本課題参加企業が開発を継続していくかどうか、さらに、A~C 領域では航空機材料をターゲットとしていたが、本課題で開発された成型技術等の成果は、他分野への応用も考えられるため、出口に向けたコストダウン等の地道な取り組みが進展するかどうか、についても追跡評価等を通じて、引き続き注視することが重要である。

さらに、MI システムを実用化するためには、マテリアルズインテグレーションを速やかに Ti 合金や Ni 基合金の鍛造プロセス、CFRP 順問題等に展開するなど、民間企業が多く使うことが不可欠である。特に CFRP への展開は要望も強いことから、MI システムとの連携強化が期待されるが、民間企業が保有する材料物性等のデータを活用できる仕組みを検討していくことが必要である。また、現状では順問題に対してもマテリアルズインテグレーションに限られた条件の下でしか結果を出していないため、第 2 期でどのように「逆問題」に取り組むか、十分に検討する必要がある。

研究領域拠点に整備された大型設備 (NIMS に導入した大型鍛造シミュレータ、JFCC へ導入した耐環境コーティング形成装置) について、継続的に維持・活用する方策を導入機関が決定することが必要である。