

3.1 革新的燃焼技術

(1)意義の重要性、SIP の制度の目的との整合性	Ⅰ 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。 Ⅰ 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。 Ⅰ 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。 Ⅰ 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。
(2)目標・計画・戦略の妥当性	Ⅰ 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。
(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。）	Ⅰ 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。 Ⅰ 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。
(4)直接的な研究成果（アウトプット）	Ⅰ 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。 Ⅰ 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。 Ⅰ 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。 Ⅰ 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。 Ⅰ 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。 Ⅰ 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。 Ⅰ 100 件以上の査読あり論文、15 件の特許出願。
(5)現在・将来の波及効果（アウトカム）	Ⅰ 「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。 Ⅰ 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。 Ⅰ 「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。

	学」研究開発及び成果が期待される。 Ⅰ 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。 Ⅰ 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。
(6)改善すべきであった点と今後取り組むべき点	Ⅰ 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。 Ⅰ 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。 Ⅰ 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。 Ⅰ 「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>>

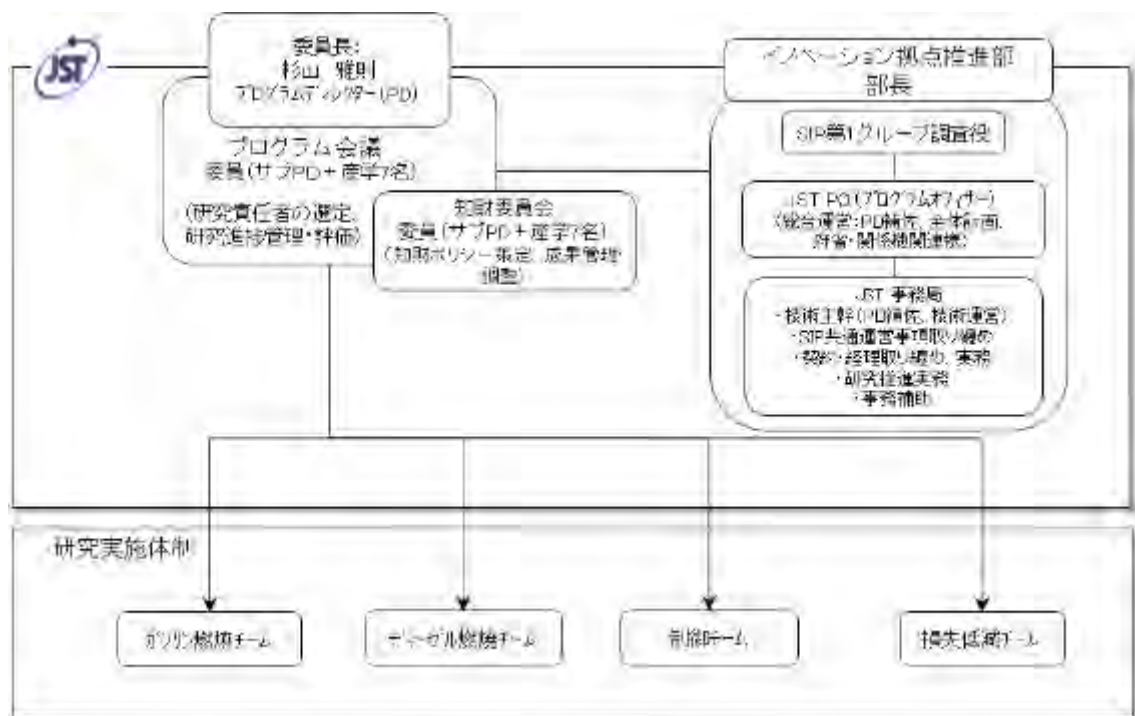


図 3-2 革新的燃焼技術の管理法人 (JST) の体制

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長	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、①超希薄・高流動条件下で着火可能な点火システムの開発、②タンブル流最適化による火炎伝搬の促進、③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、④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、①噴射による混合気制御法の提案、②後燃え現象の解明と低減、③噴霧制御による冷却損失抑制、④超高压噴射による PCCI 燃焼制御¹⁰、⑤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、①高速 3 次元（3D）計算コアソフトの開発、②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、③高いロバスト性を有する制御方式の開発、④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①ターボ過給システムの高効率化と②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③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 早稲田大学研究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。

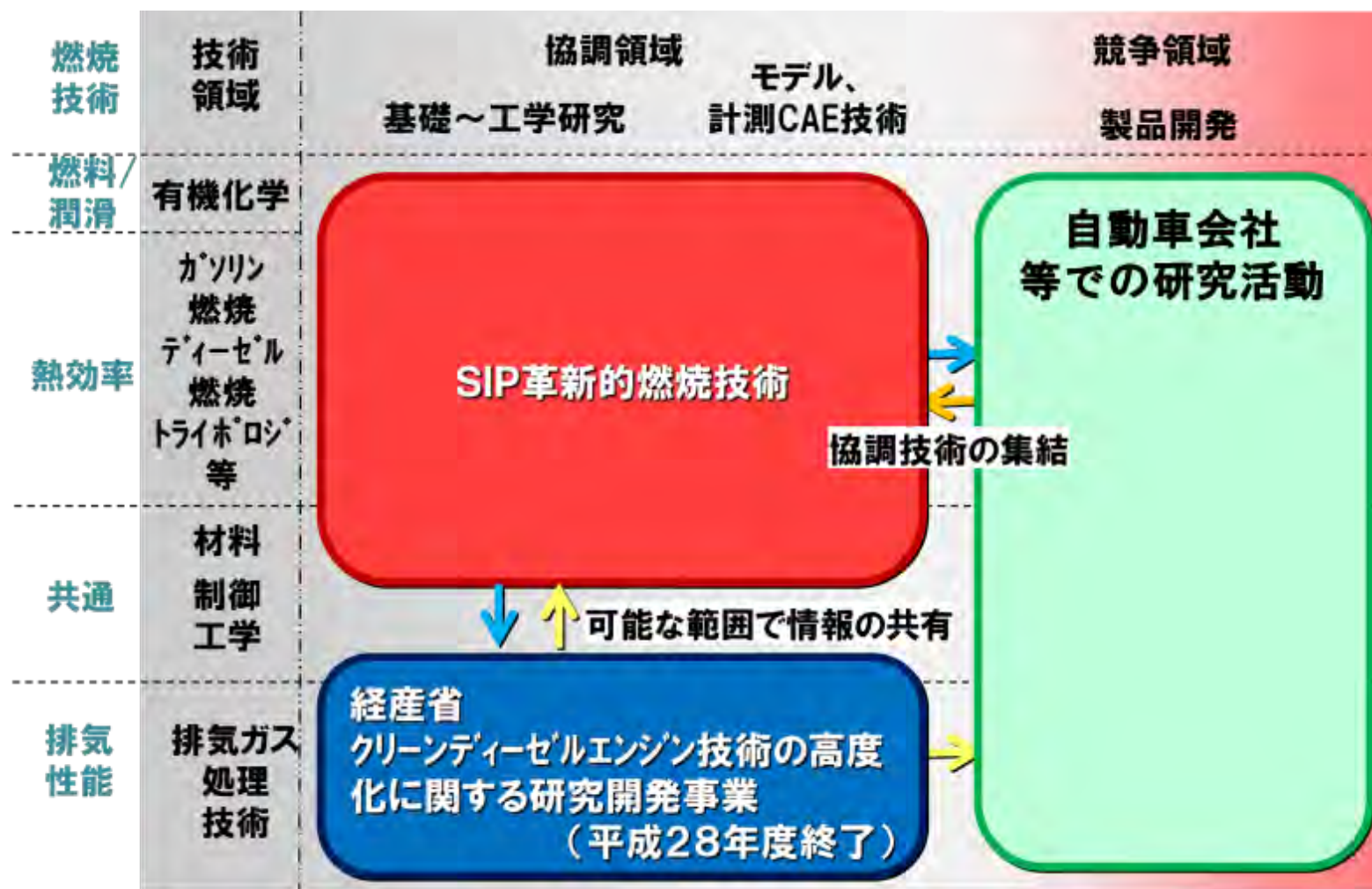


図 3-3 革新的燃焼技術の研究開発テーマ及び各省庁施策との連関図

(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。

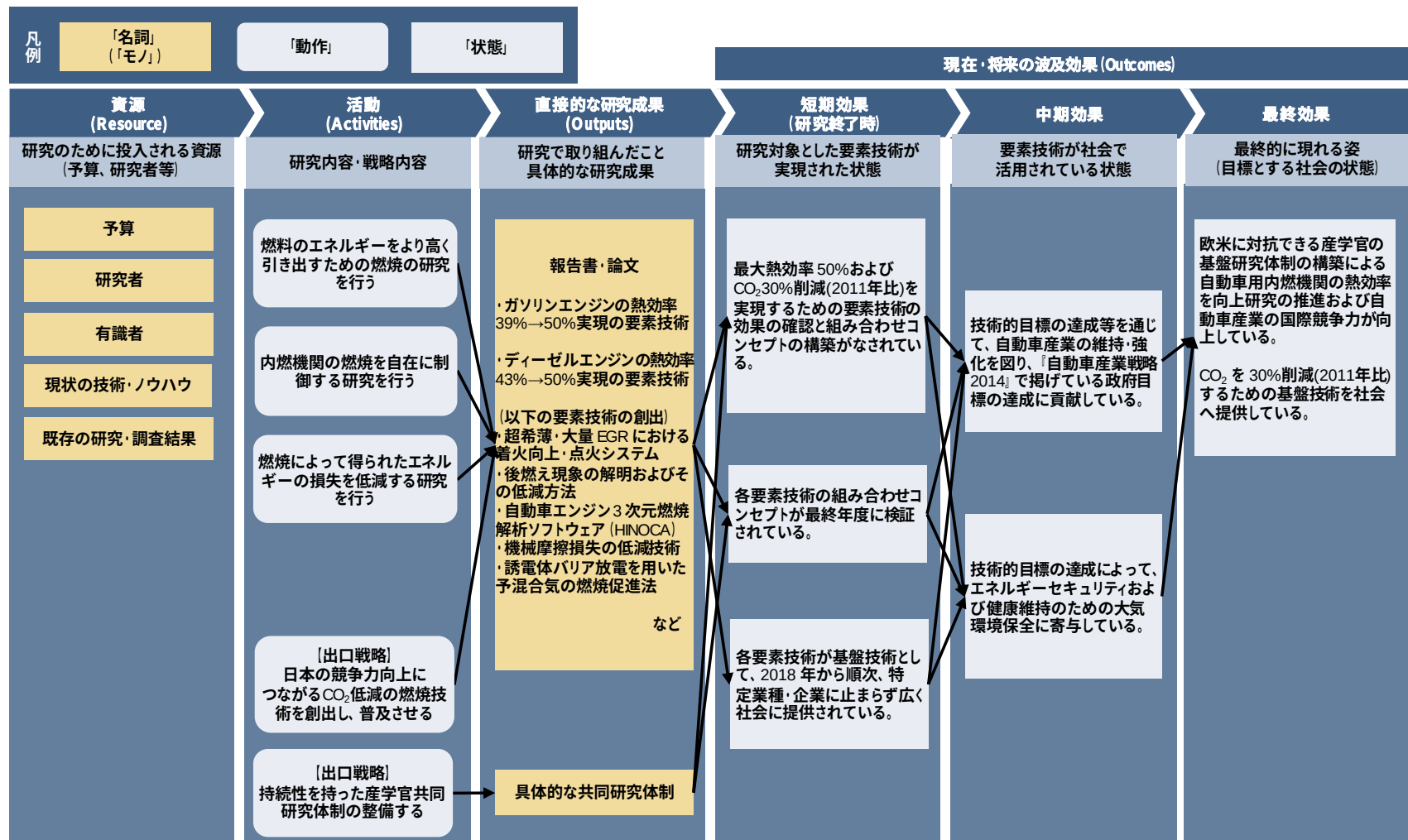


図 3-4 革新的燃焼技術のロジックツリー

(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： 学術界

SIP 開始前の学術界では、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術界も一体となって「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う。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、海外でもニ

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。

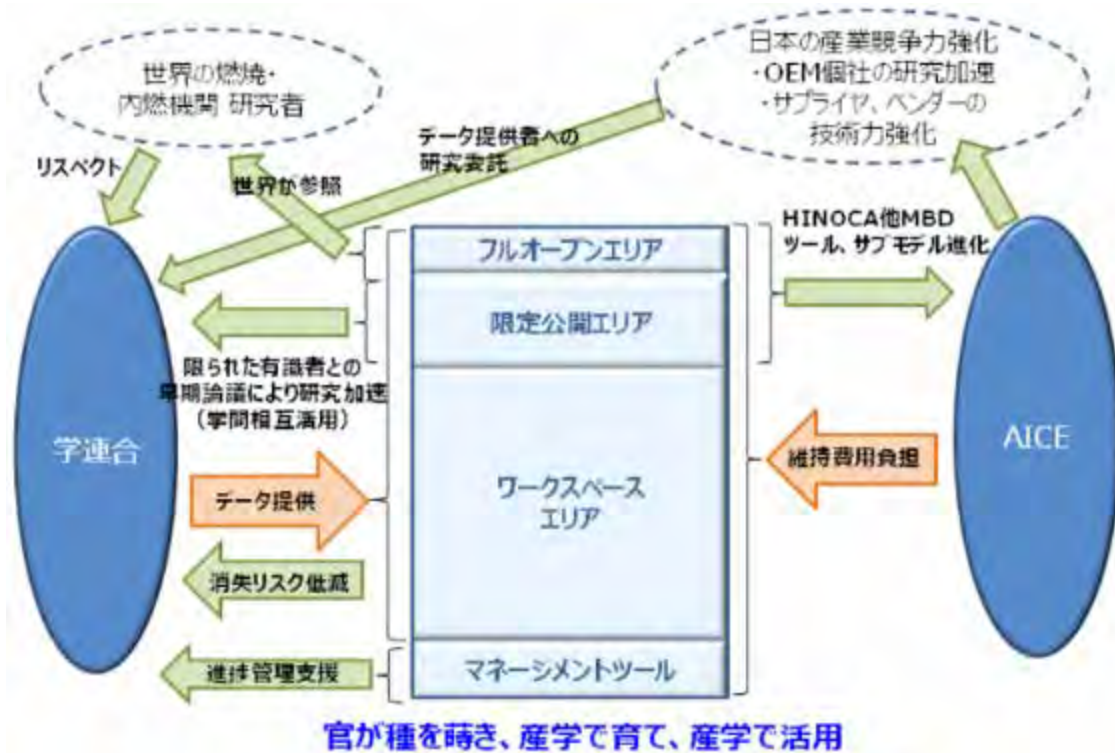


図 3-7 オープン・アンド・クローズを戦略的に選択できる DB を構築

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 Français du Pétrole）

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、マシント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。

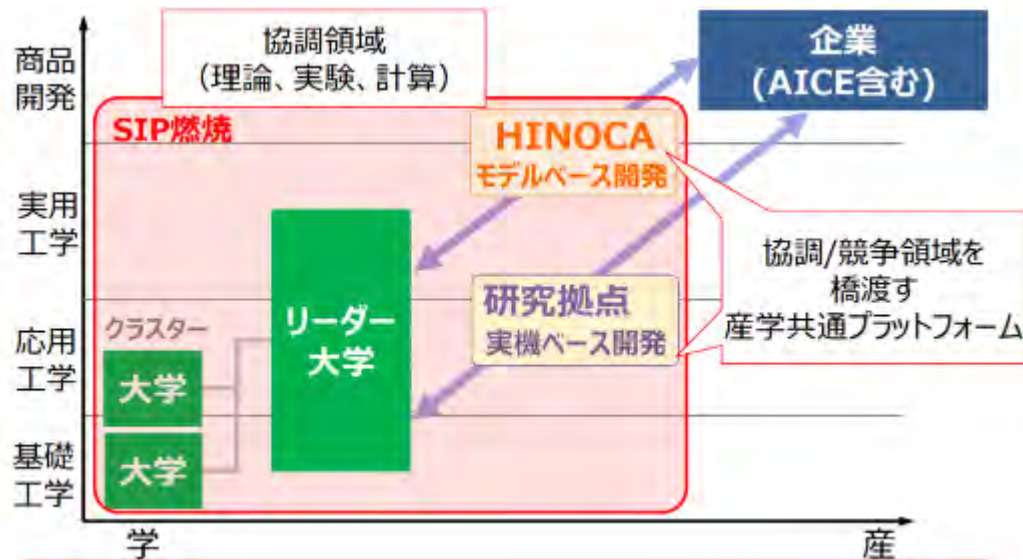


図 3-8 SIP により実現した産産学学連携体制

（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到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度を公平に認め、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、スーパーリーバーンの実験、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】

- ┆ 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。
- ┆ 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】

- Ⅰ 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。

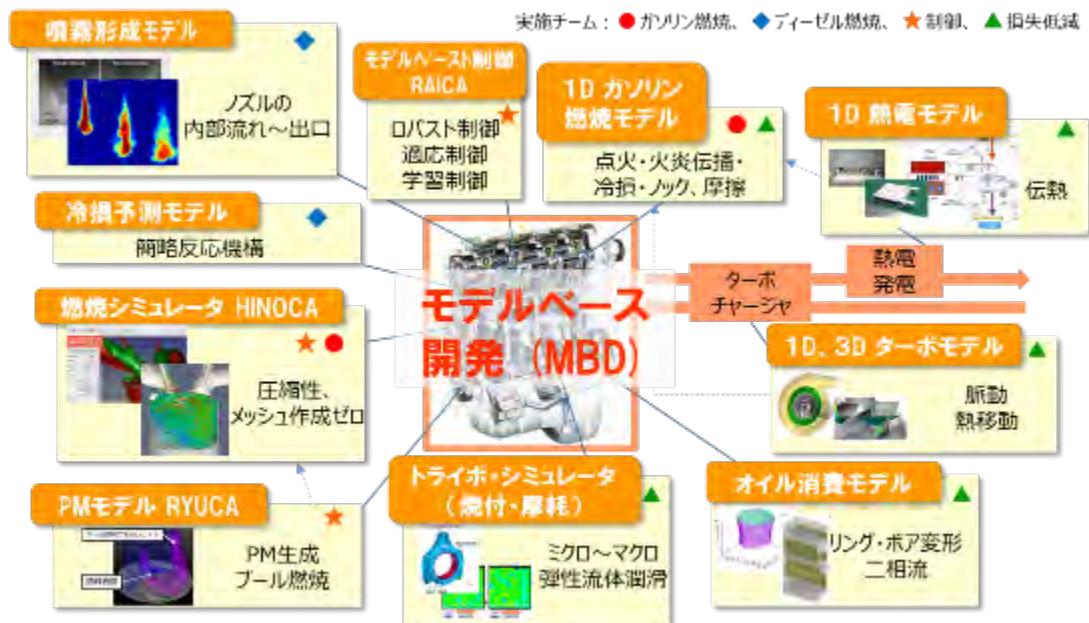


図 3-9 創出された高度なモデル／ソフトウェア群

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。

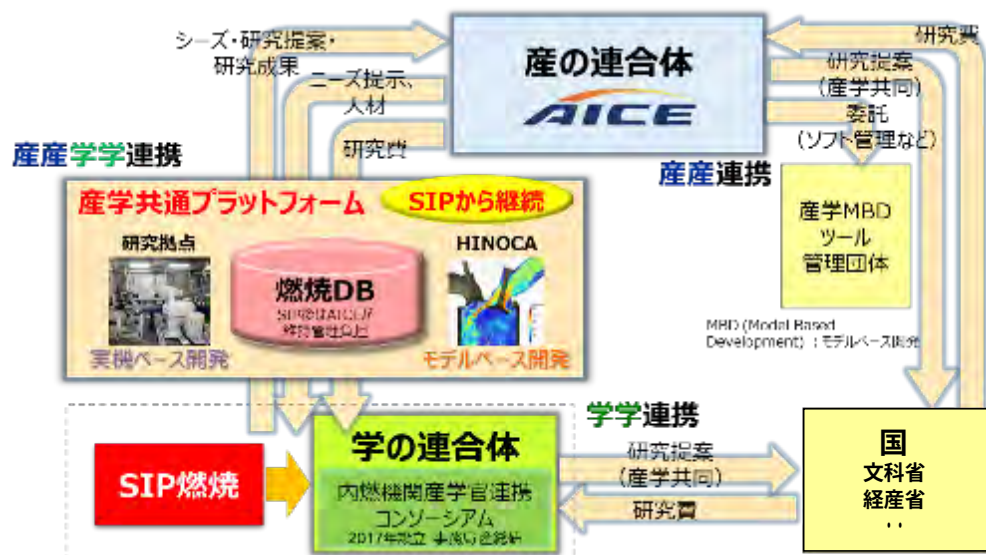


図 3-10 持続可能な産産学学の連携体制

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、排気量が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、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、開発の範囲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

(1)意義の重要性、SIP の制度の目的との整合性	Ⅰ 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。 Ⅰ 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。 Ⅰ 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。
(2)目標・計画・戦略の妥当性	Ⅰ 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。 Ⅰ 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 GaN、ダイヤモンド等) は2年間のフィー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。
(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。)	Ⅰ 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。 Ⅰ 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。 Ⅰ 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。
(4)直接的な研究成果 (アウトプット)	Ⅰ 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。 Ⅰ 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。 Ⅰ 査読あり論文 (293 件)、特許出願件数 (175 件)。
(5)現在・将来の波及効果 (アウトカム)	Ⅰ 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。 Ⅰ 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。 Ⅰ 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)。

	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。
(6)改善すべきであった点と今後取り組むべき点	Ⅰ 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。 Ⅰ 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。 Ⅰ 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。 Ⅰ 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。



図 3-12 次世代パワーエレクトロニクスの研究体制

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、株式会社フジミイ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、コーア株式会社、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 ウェハ製造技術、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化を図った。

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 モーター駆動用機電一体型インバータの研究開発

表 3-19 EV モーター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、①研究開発の内容、目標に関する事、②研究開発の体制に関する事、③研究開発の推進管理、成果の管理に関する事、④実用化・事業家に向けた戦略に関する事、⑤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。

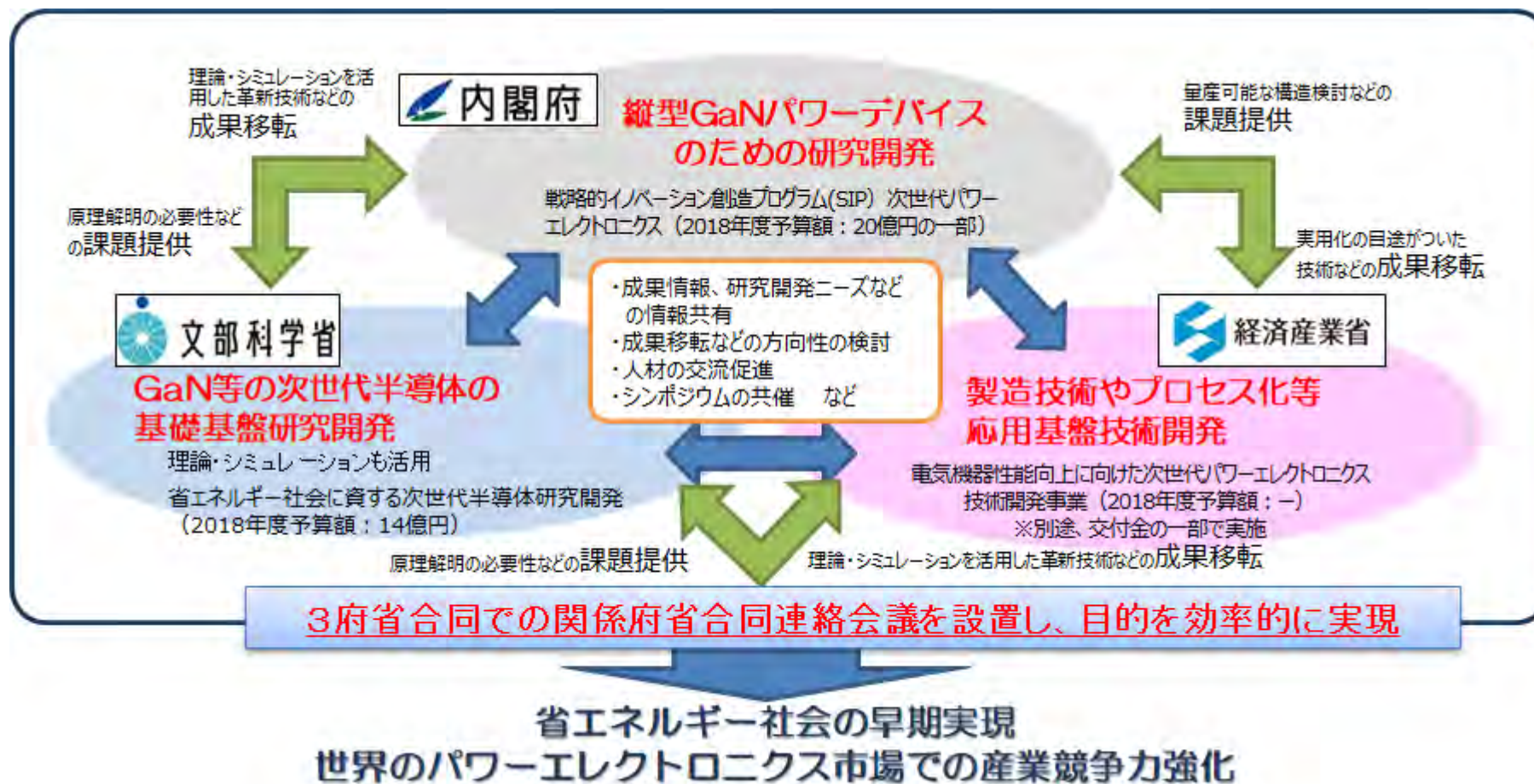


図 3-14 次世代パワーエレクトロニクス (GaN の例) の研究開発テーマ及び各省庁施策との連関図

(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。

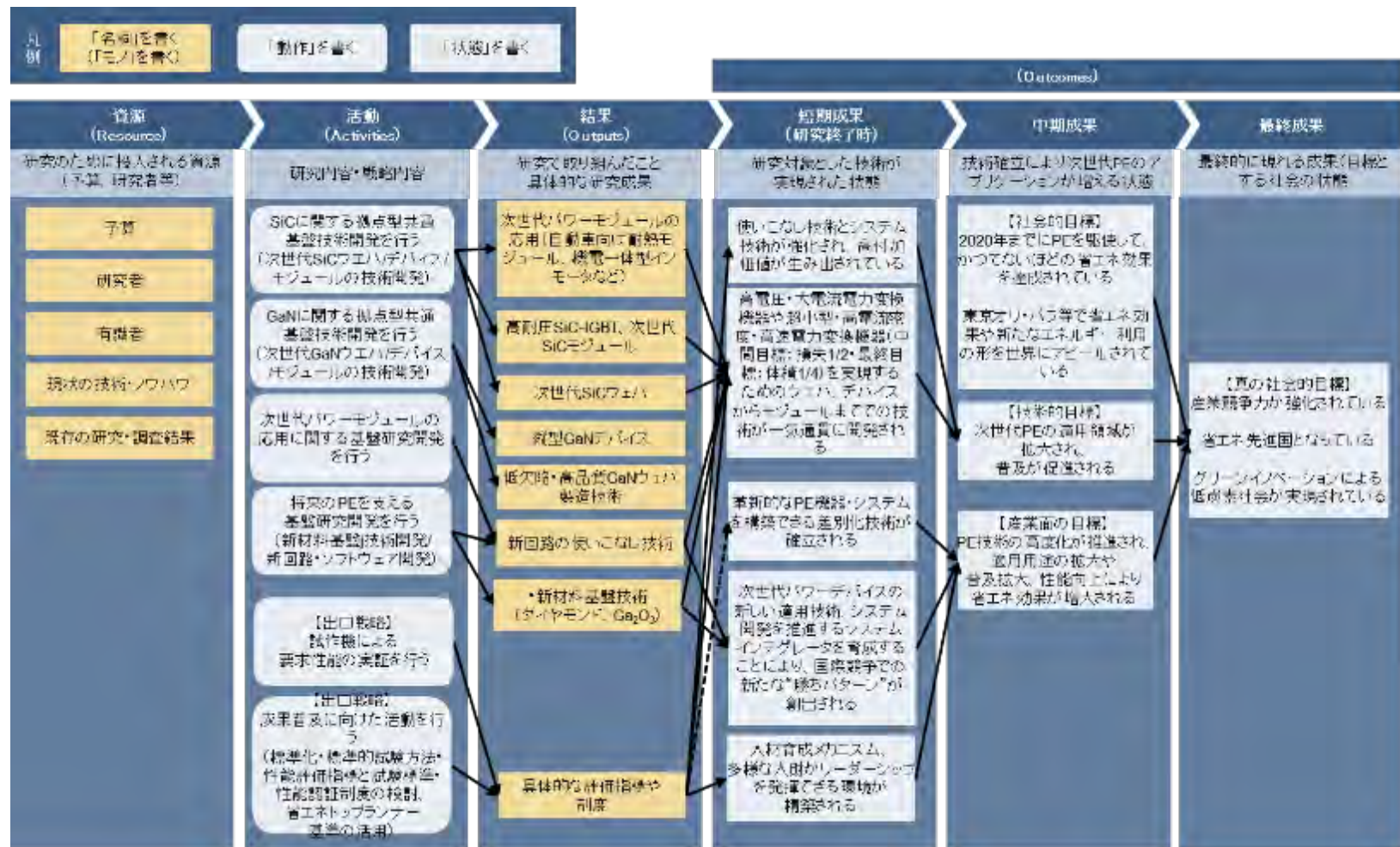
3) 成果普及に向けた活動

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 ウェハ製造技術を確立し、今後民間企業がウェハ事業化すること、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、ウェハ基盤技術を確立し、今後ウェ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。



※PE: パワーエレクトロニクス

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、 Ga_2O_3 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）

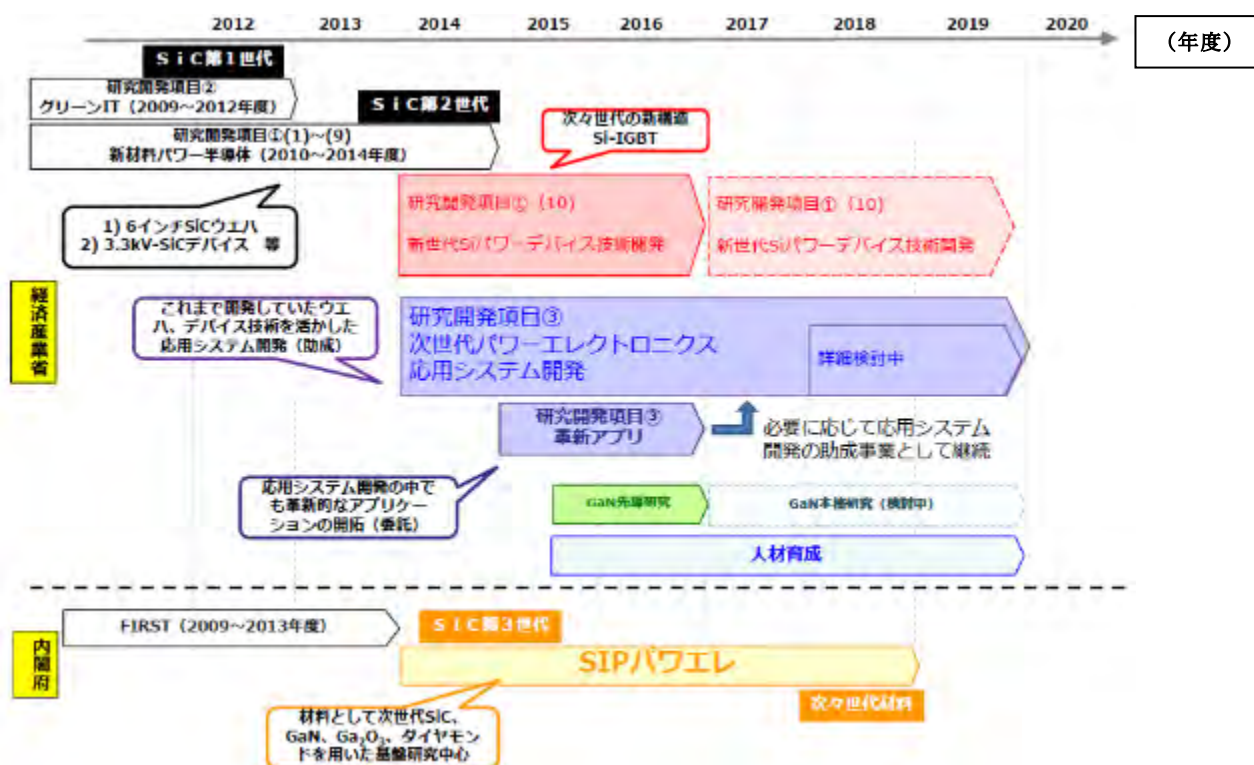


図 3-16 事業の位置付け・必要性

(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 はかねてよりパワー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、パワー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、パワー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 系パワーエレは、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。ユーザーサイドで必要なスペック（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、ということを明確に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も、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換え、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、新規エピ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（Ga₂O₃）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、Ga₂O₃ 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。

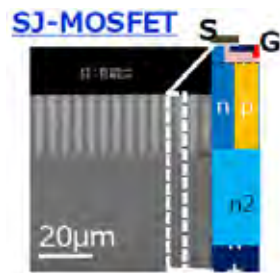


図 3-17 新構造 (SJ) ・高耐圧 (6.5kV 耐圧) MOSFET



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。

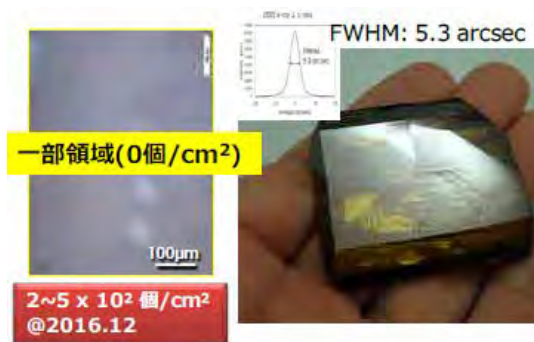


図 3-19 GaN ウエハ

(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。

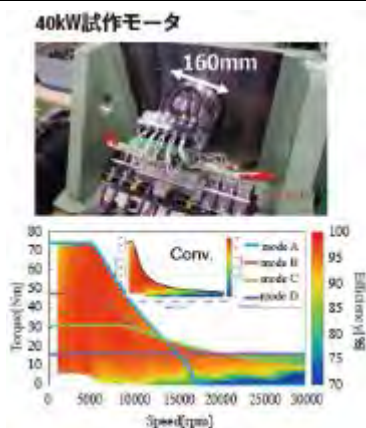


図 3-20 機電一体型インホイールモータ
（出典）SIP 2018 パンフレット



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。

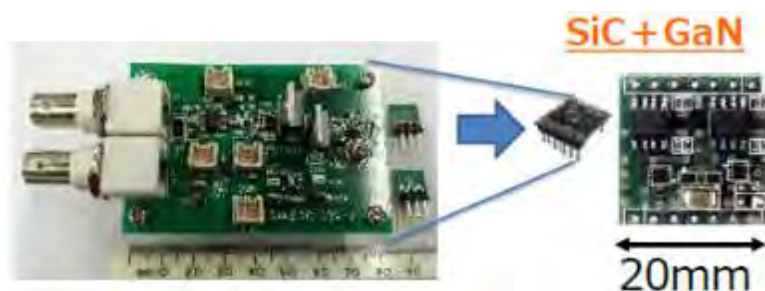


図 3-22 小型高速大電力ドライバ（>10MHz、1kW 駆動）

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 $\text{Ga}_2\text{O}_3(001)$

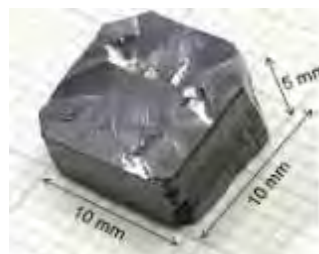


図 3-24 縦方向に長尺成長中のダイヤモンド単結晶

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ードープ技術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 インダスタオリアルチャプター、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。

- Ⅰ 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確立。
- Ⅰ 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。
- Ⅰ 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となれば、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つた。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、新規エビ構造（エビ構造の革新：再結合促進層技術の開発）へ研究開発を進めた事例もあつた。

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つた。

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）スイッチング方式で、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、パワエレ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、パワエレを全分野実施する、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、パワエレ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、パワエレ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エレ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

(1)意義の重要性、SIP の制度の目的との整合性	- 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。
(2)目標・計画・戦略の妥当性	- 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。
(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。）	- 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。
(4)直接的な研究成果（アウトプット）	- 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。

(5)現在・将来の波及効果 (アウトカム)	Ⅰ 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。 Ⅰ 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。 Ⅰ TiAl は参加企業が実用化に向けた取り組みを継続。 Ⅰ 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。 Ⅰ 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。 Ⅰ 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
(6)改善すべきであった点と今後取り組むべき点	Ⅰ 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。 Ⅰ 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。 Ⅰ 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。 Ⅰ 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しうる。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

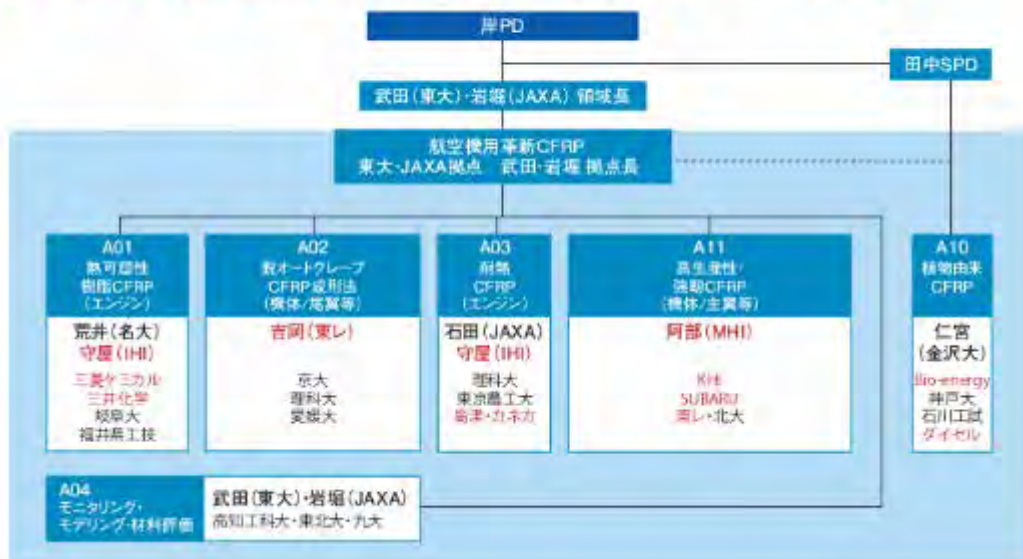


図 3-25 革新的構造材料の研究体制 (A 領域：航空機用樹脂の開発と CFRP の開発)
(赤字：企業、黒字：大学、公的研究機関)

(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

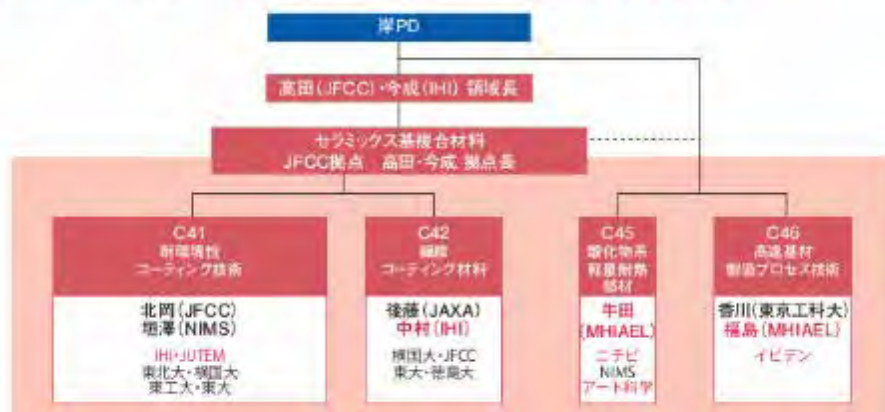


図 3-27 革新的構造材料の研究体制 (C 領域：セラミックス基複合材料の開発)
(赤字：企業、黒字：大学、公的研究機関)

(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>>

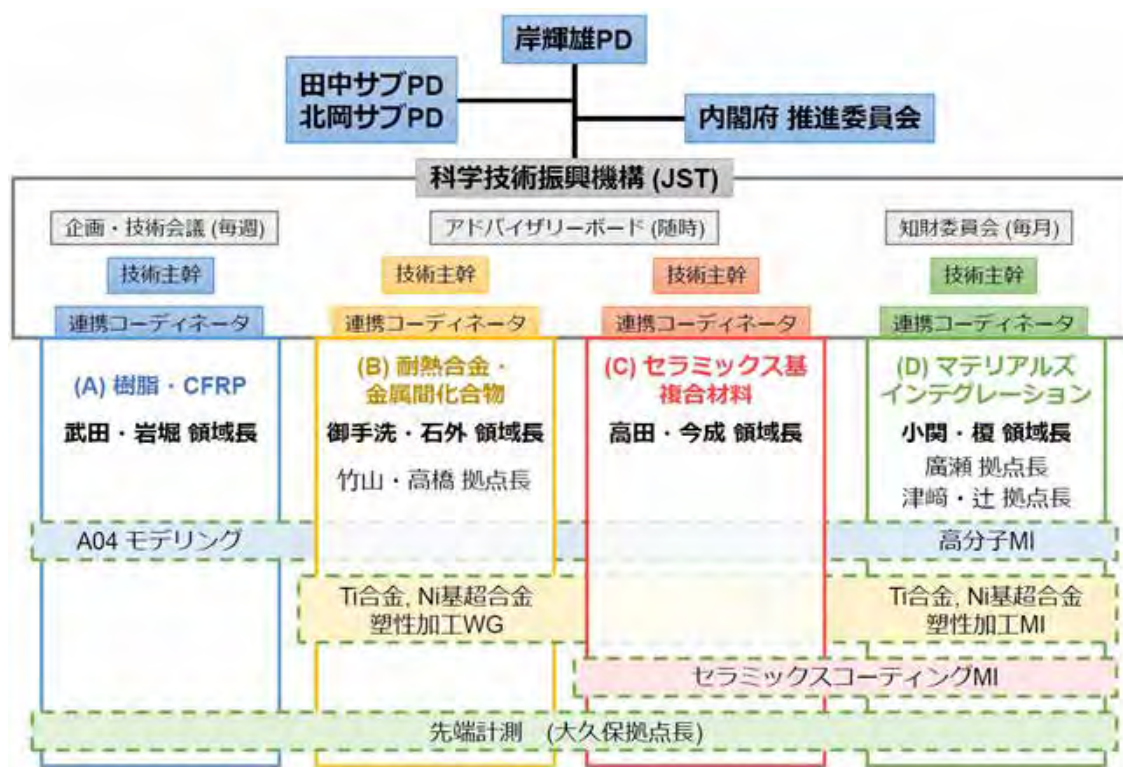


図 3-29 革新的構造材料の管理法人（JST）の体制

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、セラミックス基複合材料、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。

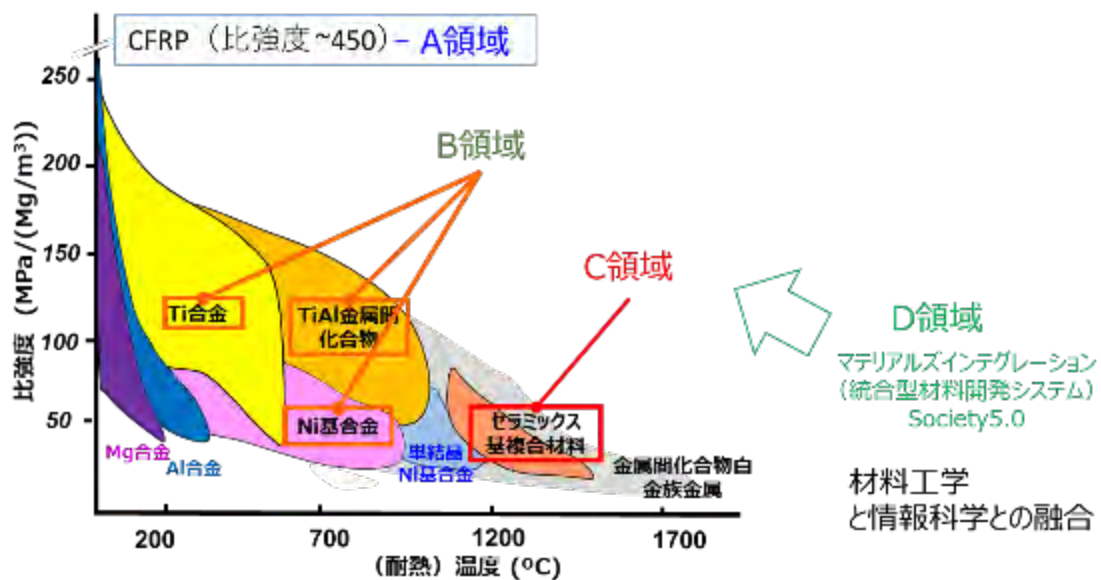


図 3-30 4領域の位置づけ



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	Ⅰ 武田 展雄 東京大学大学院新領域創成科学研究科教授 Ⅰ 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 Ⅰ 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ラ基盤技術グループ主任研究員 Ⅰ 安田 和治 旭化成株式会社次世代自動車材料グループ Ⅰ 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 Ⅰ 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)	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

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鍛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鍛造・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	Ⅰ 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 Ⅰ 石外 伸也 日本エアロフォージ株式会社技術本部本部長 Ⅰ 竹山 雅夫 東京工業大学物質理工学院教授 Ⅰ 高橋 聡 株式会社 IHI 航空・宇宙・防衛事業領材料研究部次長 Ⅰ 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 Ⅰ 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 Ⅰ 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 Ⅰ 安田 弘行 大阪大学大学院工学研究科教授 Ⅰ 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)	物質・材料研究機構、日本エアロフォージ株式会社、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

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・酸素遮断性に優れる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	I 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 I 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 I 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む。

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	- 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

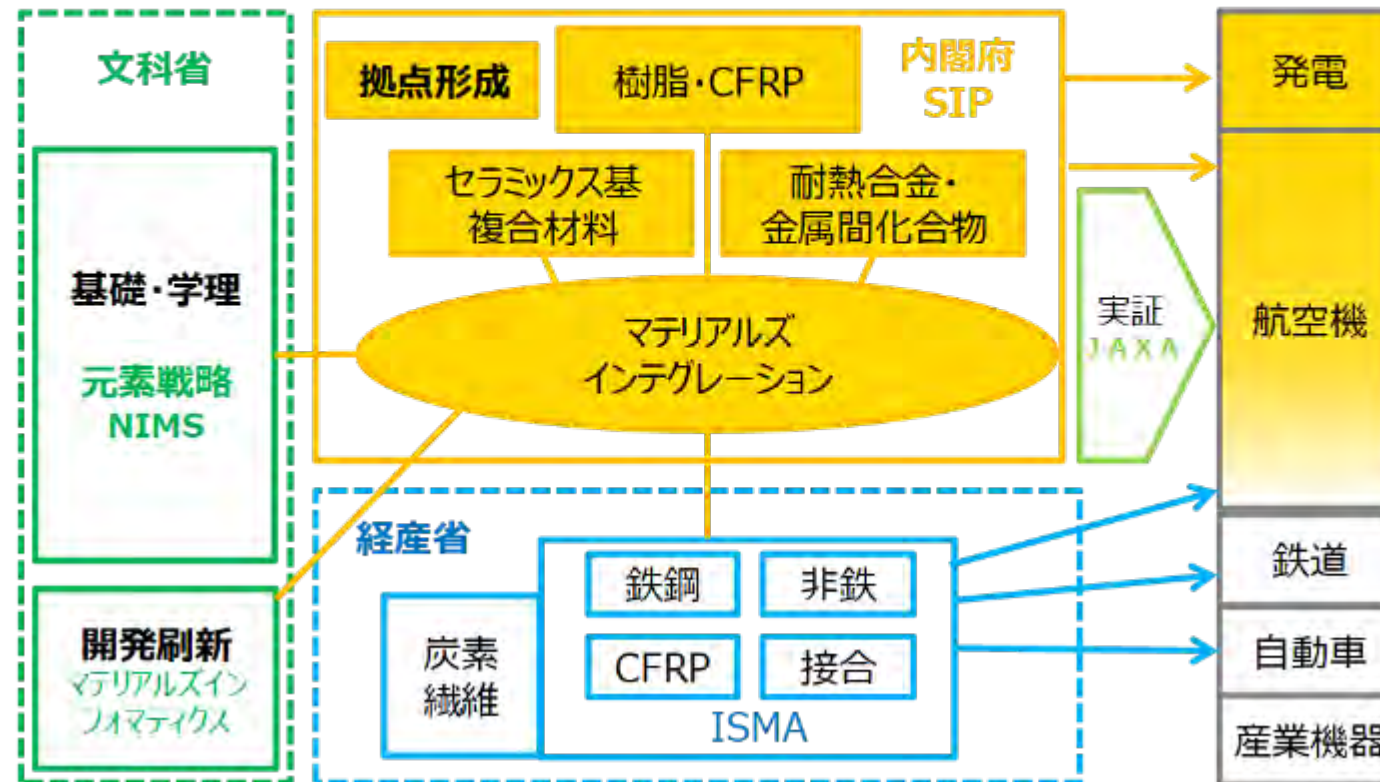


図 3-32 革新的構造材料の研究開発テーマ及び各省庁施策との関連図

(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。

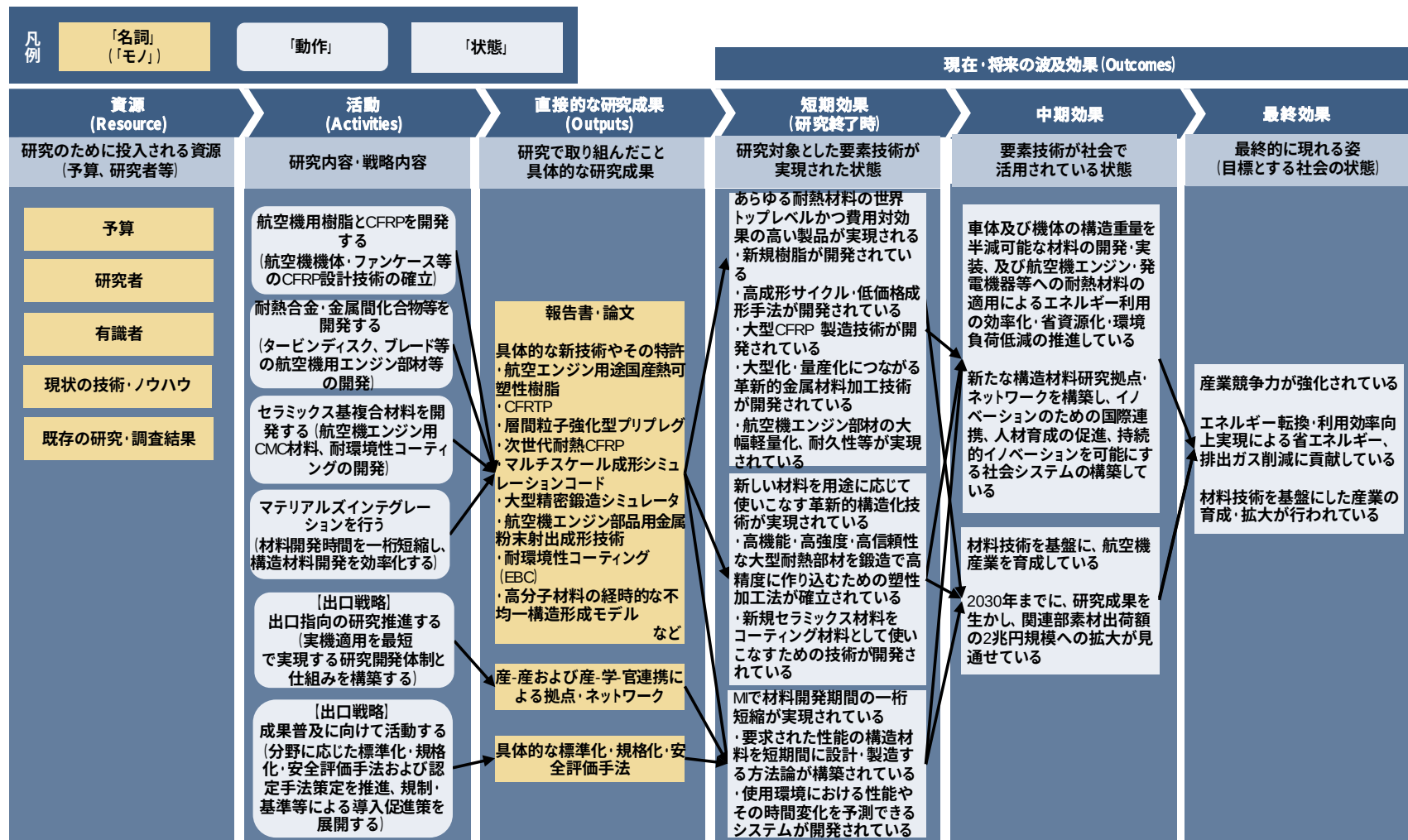


図 3-33 革新的構造材料のロジックツリー

(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、知財に関しても、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

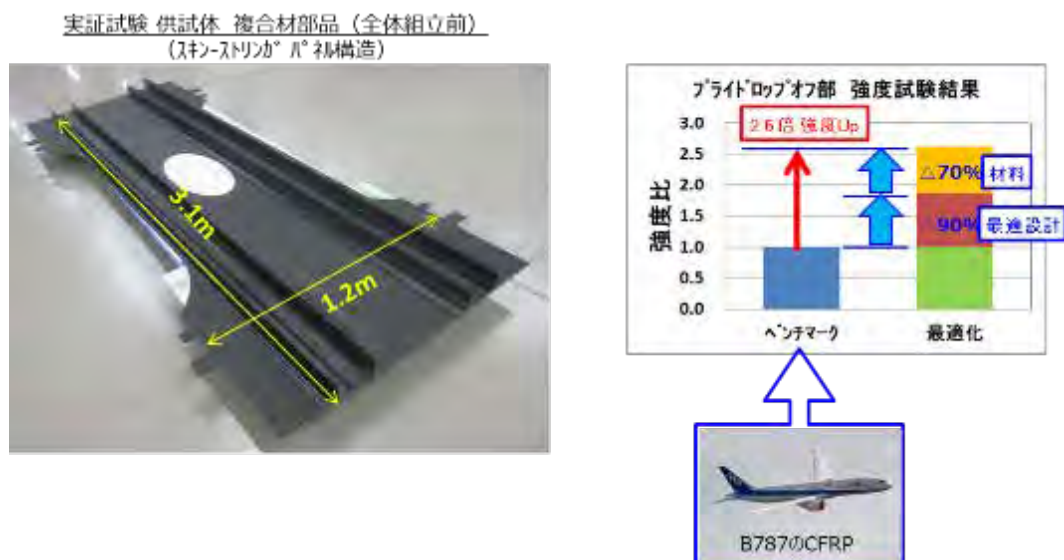
平成 30 年度の研究開発計画における技術的目標は、以下の 3 点である。

- ┆ 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。

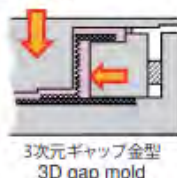
2) 研究成果（樹脂・CFRP）

「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化させた尾翼・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。



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



真空圧成形技術
Vacuum molding technology

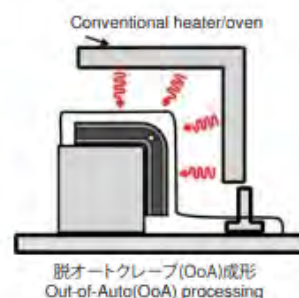


図 3-35 脱オートクレーブ成形による尾翼、ドア

（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。

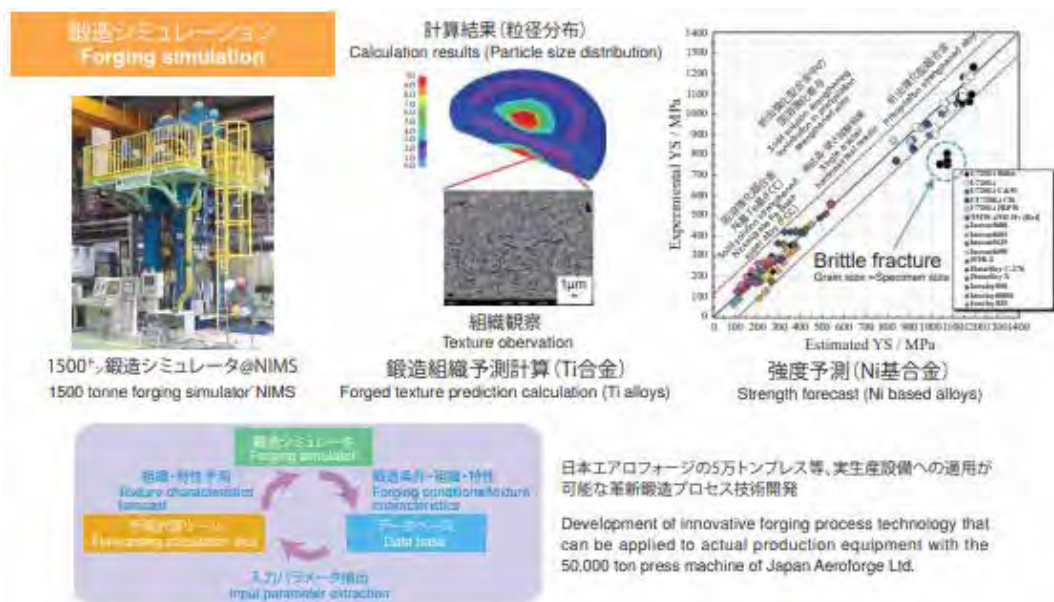


図 3-36 鍛造シミュレーション

(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、 $1,400^{\circ}\text{C}$ 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。

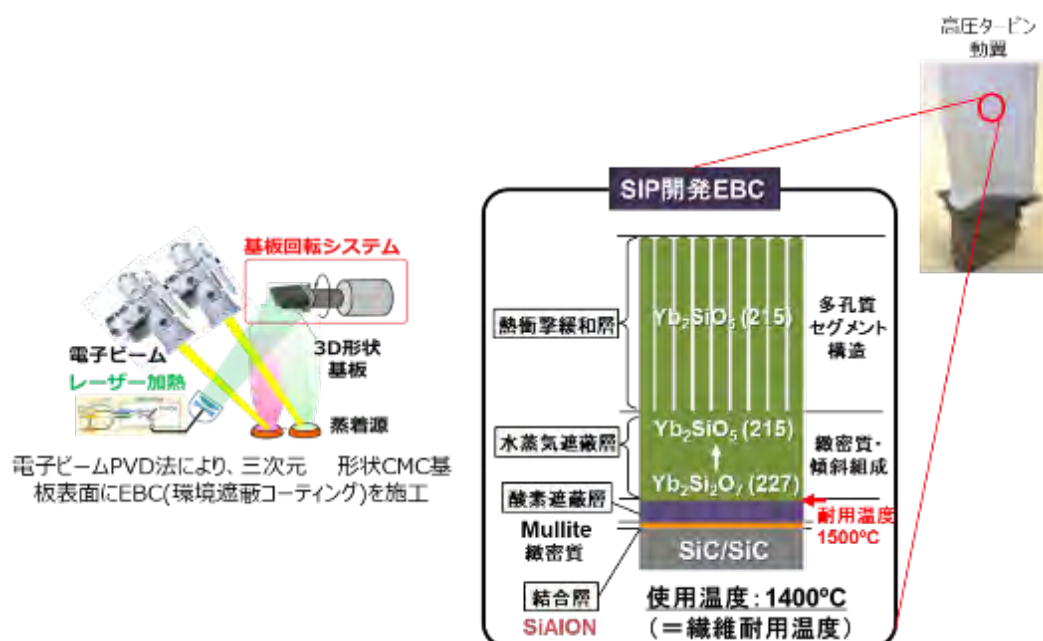


図 3-37 1400°C 級の耐高温過酷環境機能を持つコーティング構造材の開発

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。

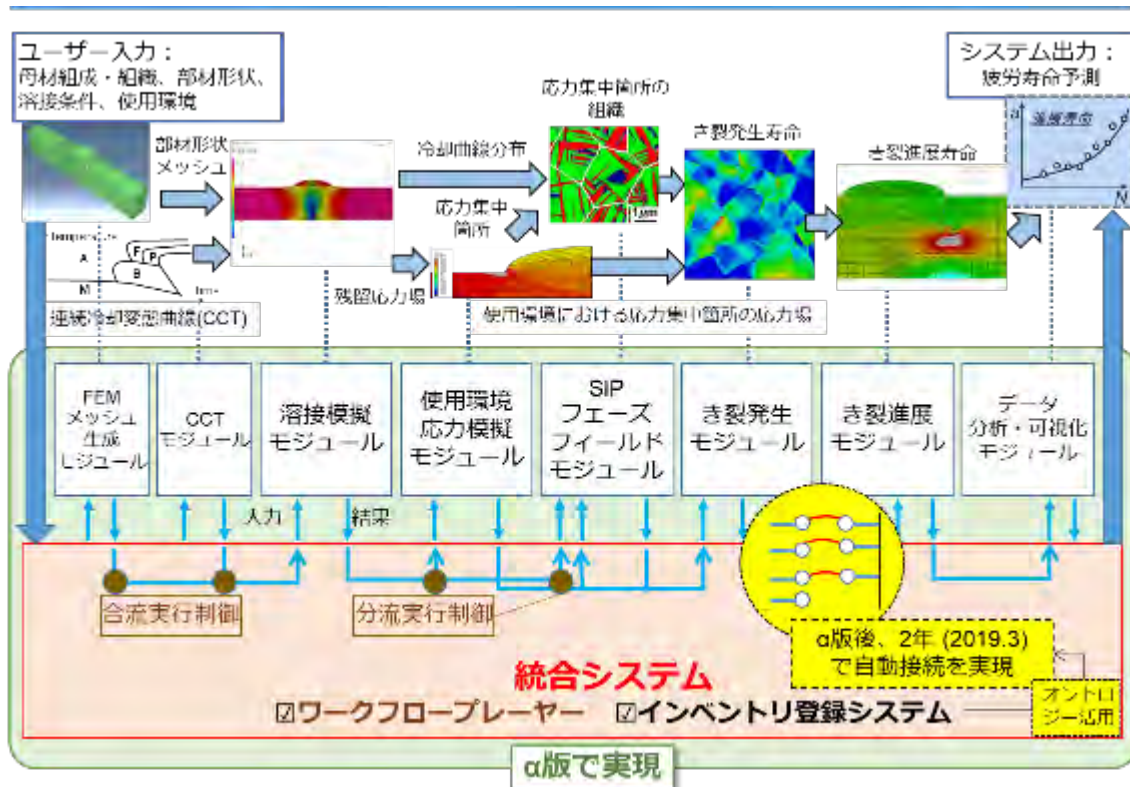


図 3-38 MI システム概要

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
- ü 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 材料のコーディング設計、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】

- Ⅰ 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
- Ⅰ 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】

- Ⅰ 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
- Ⅰ 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が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。

3.4 エネルギーキャリア

(1)意義の重要性、 SIP の制度の目的と の整合性	従来の研究開発では個別の技術課題の解決にとどまっていたが、SIP では複数のテーマに対して基礎研究から実証まで大規模かつシームレスに研究開発を実施できたことで、水素社会を構成するサプライチェーン全体を確立する技術開発に大きく貢献した。
(2)目標・計画・戦略 の妥当性	- 当初対象としていたエネルギーキャリアのうち、コスト評価や研究の進捗によりアンモニアの有用性・可能性に着目し、テーマやリソースも柔軟に選択と集中を行ってアンモニア利用技術における成果を後押しした。 - 社会実装を意識し、装置の大型化等の柔軟な計画変更、円滑なリソース見直しを実施したことも大きな成果につながった。
(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。)	- PD・サブ PD の特筆すべきリーダーシップが企業参画を促進し、管理法人の専門家が日々の研究を密にサポートし、PDCA サイクルを回せる環境を構築できた。 - 社会実装を見据えたテーマの選択と集中を実施し、大規模な実証に必要なリソースを遅延なく供給した。 - より早期に関係省庁の計画・取り組みに反映させるためには、内閣府が関係官庁に対してさらなる働きかけを行うべきであった。
(4)直接的な 研究成果 (アウトプット)	50kW 級マイクロガスタービンでは、アンモニア専焼発電に成功し、2MW 級ガスタービンでは世界初となる熱量比率 20%のアンモニア／天然ガス混焼に成功し、合わせて NO_x の発生も抑制した。 - 再生可能エネルギーを用いて製造したアンモニアを専焼燃料とするガスタービンで発電 (47kW) し、CO₂フリーアンモニアバリューチェーンを世界で初めて模擬的に実証した。 - 微粉炭とアンモニア (熱量比 20%) の混焼試験において NO_x 発生を抑制することを可能とし、その成果を用いて、実操業中の石炭火力発電所でアンモニア混焼発電を実証した。 - アンモニアを燃料として直接供給する燃料電池システムを開発し、1kW の発電に成功し、業務・産業用に向けたシステム大型化の可能性を示した。 - 世界初の技術となる液化水素用のローディングシステムを開発した。 - 査読あり論文 (138 件)、特許出願件数 (188 件)。
(5)現在・将来の 波及効果 (アウトカム)	- 我が国の水素社会実現に向けた基本戦略「水素基本戦略 (平成 29 年 12 月 26 日発表)」にエネルギーキャリアとしてのアンモニア活用が反映され、他の水素エネルギーキャリアとともに国際的な水素サプライチェーンの開発に向けた方針が打ち出された。 - IEA レポート “Renewable Energy for Industry” に SIP エネルギーキャリアが取り上げられ、アンモニア燃料利用の認知度が高まった。 - アンモニアのエネルギー利用による市場創出、アンモニア混焼による石炭火力の低炭素化の効果が見込まれる。

	Ⅰ 今後の事業化に向けた体制構築（グリーンアンモニアコンソーシアム）や、海外でのアンモニア利用の認知向上につながった。 Ⅰ 国際規格原案（液化水素ローディングシステムの技術規格、ローディングのオペレーションの安全性に関する規格）を作成。このうち液化水素用ローディングシステムの技術規格についてISOに提案した。
(6)改善すべきであった点と今後取り組むべき点	Ⅰ グリーンアンモニアコンソーシアムの設立は実用化の第一歩として評価できるものの、早期に社会実装する道筋をつけることが重要であり、今後、アンモニアのエネルギーキャリアとしてのビジネスモデルをどう確立するか検討することが必要である。 Ⅰ アンモニアのエネルギー利用の実現（直接燃焼）には、アンモニアユーザーである電力会社に向け、経営判断をどのように実施の方向（使用量のコミットメント等）に促すのか検討することが必要である。 Ⅰ CO₂フリー水素利用アンモニアの市場形成につながる制度設計、アンモニアの利用拡大に向けた制度・規制改革等の取組が必要である。

3.4.1 概要

(1) 背景と目的

我が国にとって化石燃料依存を低減し、二酸化炭素（CO₂）を削減することは重要な課題である。水素はクリーンであることに加え、再生可能エネルギーからの製造が可能で、エネルギー供給源の多様化にも寄与する。

ただし、水素の製造、輸送・貯蔵はコストがかかり、現状の水素製造コストはガソリンの数倍となっている。このため、水素を効率良く低価格で生産する技術の研究、効率良く輸送・貯蔵するエネルギーキャリアに関連する技術の研究、規模の経済につながる水素の用途拡大に資する研究・実証が必要である。バリューチェーン全体を見据えた研究開発を推進しつつ、水素が広く国民・社会から受け入れられるための運搬・貯蔵・利用等に関する安全基準の検討や、他の燃料との競合や水素の経済評価等、それらを踏まえた導入シナリオの策定が重要となる。

本課題では、2020 年までにガソリンと等価の燃料電池車（FCV）用水素供給コストが実現すること、2030 年までに天然ガス発電と同等の水素発電コストが実現することを目指して研究開発を行うとともに、エネルギーキャリアを活用した水素実証等の実施を通じて水素社会の実現に向けた取り組みを推進した。

(2) 実施体制

平成 30 年度時点で、サブ PD は 2 名、研究責任者は 5 名である。管理法人は科学技術振興機構（JST）となっている。



図 3-39 エネルギーキャリアの研究体制

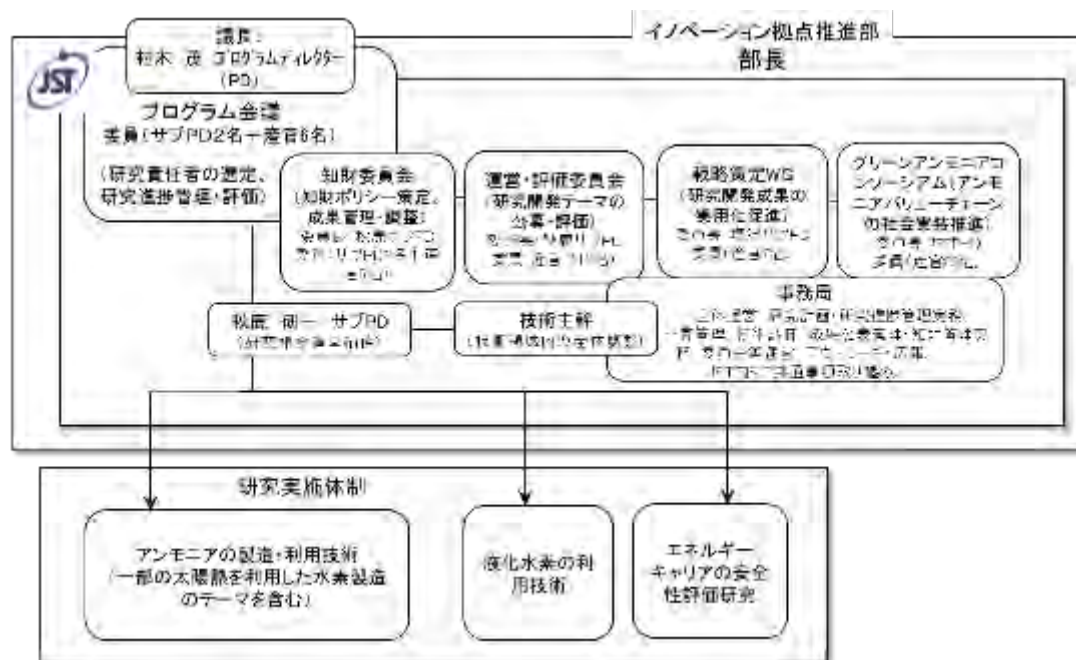


表 3-38 エネルギーキャリアの PD 等

区分	所属	氏名
PD	東京ガス株式会社アドバイザー	村木 茂
サブ PD	東京工業大学名誉教授	秋鹿 研一
	住友化学株式会社レスポンシブルケア部気候変動対応（兼）技術・研究企画部主幹	塩沢 文朗

平成 31 年 1 月 1 日現在

表 3-39 エネルギーキャリアの主要会議体

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（JST）（表 3-40 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 10 回開催。
知財委員会	サブ PD、外部専門家、関係官庁	JST に置く。サブ PD が議長を務める。
内閣府・経済産業省連携戦略会議※	内閣府、経済産業省、JST、NEDO、事務局（内閣府・経済産業省）	経済産業省事業との情報交換を実施。
水素関連研究開発に関する情報・意見交換会※	内閣府、経済産業省、JST、NEDO、事務局（内閣府・経済産業省）	SIP 及び NEDO 事業の関連する研究者を一堂に集めたボトムアップの意見交換。

プログラム会議※	PD（議長）、サブPD、外部専門家、関係官庁、事務局（JST）	研究開発計画策定等の実務的議論を実施。
運営・評価委員会※	サブPD（議長）、外部専門家、事務局（JST）	公募の審査及びテーマ進捗評価等。
戦略策定WG※	サブPD（座長）、外部専門家、事務局（JST）	CO ₂ フリー水素サプライチェーン構築に向けたシナリオ策定の検討。
水素技術実証検討会※ （～平成27年度）	PD（座長）、外部専門家、事務局（JST）	オリンピック・パラリンピックを契機としたデモンストレーション案の検討。

※本課題に特徴的な会議体。

表 3-40 エネルギーキャリア推進委員会 構成員一覧表

区分	所属	氏名
PD	東京ガス株式会社アドバイザー	村木 茂
サブPD	東京工業大学名誉教授	秋鹿 研一
	住友化学株式会社レスポンシブルケア部気候変動対応（兼）技術・研究企画部主幹	塩沢 文朗
専門家	科学技術振興機構顧問	相澤 益男
	京都大学大学院工学研究科物質エネルギー化学専攻教授	江口 浩一
	トヨタ自動車株式会社先進技術統括部担当部長	河合 大洋
	東京理科大学大学院経営学研究科教授	橘川 武郎
	産業技術総合研究所関西センター所長代理	栗山 信宏
	JXリサーチ株式会社執行役員／エネルギー技術調査部長	斎藤 健一郎
関係省庁	消防庁危険物保安室室長	渡辺 剛英
	文部科学省研究開発局環境エネルギー課課長	横地 洋
	経済産業省産業技術環境局研究開発課エネルギー・環境イノベーション戦略室室長	梅北 栄一
	経済産業省産業技術環境局研究開発課エネルギー・環境イノベーション戦略室産業技術総括調査官	染矢 聡
	資源エネルギー庁省エネルギー・新エネルギー部新エネルギーシステム課水素・燃料電池戦略室室長補佐	牟田 徹
	国土交通省海事局海洋・環境政策課技術企画室室長	田村 顕洋
	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補佐	佐藤 滋芳
	環境省水・大気環境局自動車環境対策課課長補佐	井上 有希子
関係機関	新エネルギー・産業技術総合開発機構次世代電池・水素事業部統括研究員	大平 英二
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）付ディレクター（エネルギー・環境担当）	中納 暁洋
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技術主幹	宮崎 進

平成 30 年 11 月 1 日（開催日）現在

(3) 予算

表 3-41 エネルギーキャリアの予算

年度	予算（億円）
平成 26（2014）年度	33.1
平成 27（2015）年度	32.7
平成 28（2016）年度	34.9
平成 29（2017）年度	36.6
平成 30（2018）年度	28.5
合計	165.8

(4) 研究開発テーマ

各研究開発テーマの概要を下記に示す。また、国内の取り組みにおける各研究開発テーマの位置づけは図 3-46 に示した。なお、SIP 期間途中で終了したテーマも含まれており、詳細は以下の各研究開発テーマの研究開発スケジュールで示した。

1) 高温太陽熱供給システム

	2014	2015	2016	2017	2018 (年度)
開発計画					
高温太陽熱供給システム	要素技術開発(集熱管、蓄熱・熱媒体、化学蓄熱システム、など)				事業性評価 ※2017年度で終了 (集熱管のみ実証予定)
熱利用 水素製造	要素技術開発(還元法、水素気電解)		システム化・高性能化		実証評価 ※2017年度で終了 (新水素気電解のみ実証予定)

図 3-41 研究開発スケジュール（高温太陽熱供給システム）

① 高温太陽熱供給システム

水素を安価で大量に製造するために、太陽光を集熱し利用するシステムの開発を行った。また、同システムに適合する熱媒体、集熱管等の基幹部材の開発を行った。

表 3-42 高温太陽熱供給システム体制

研究責任者	加藤 之貴 東京工業大学科学技術創成研究院先導原子力研究所教授
研究開発実施機関 (計 12 機関)	東京工業大学、千代田化工建設株式会社、日揮株式会社、東洋エンジニアリング株式会社、日立造船株式会社、株式会社豊田自動織機、京都大学、新潟大学、東ソー株式会社、綜研テクニクス株式会社、一般財団法人エネルギー総合工学研究所、一般財団法人ファインセラミックスセンター

② 熱利用水素製造

太陽熱等の熱を用いた高効率な水素製造技術（膜 IS 法、新水蒸気電解）の開発を行った。

表 3-43 熱利用水素製造体制

研究責任者	坂場 成昭 日本原子力研究開発機構グループリーダー
研究開発実施機関 (計 12 機関)	日本原子力研究開発機構、広島大学、芝浦工業大学、熊本大学、九州大学、住友化学株式会社、日揮株式会社、千代田化工建設株式会社、株式会社日本触媒、株式会社ノリタケカンパニーリミテド、宮崎大学、量子科学技術研究開発機構

2) アンモニアの製造・利用技術

	(年度)				
開発計画	2014	2015	2016	2017	2018
CO ₂ フリー水素利用 アンモニア製造・貯蔵・ 輸送関連技術の開発	要素技術開発、システム設計			システム化	システム実証
アンモニア水素 ステーション基盤技術	要素技術開発(脱水素、精製)		システム化		事業性評価 ※2017年度で終了
アンモニア燃料電池	SOFC要素技術開発、 スタック試作評価		SOFCモジュール試作、システム化		システム実証
アンモニア直接燃焼	要素技術開発		装置設計、試作、改良		システム実証

図 3-42 研究開発スケジュール（アンモニアの製造・利用技術）

① CO₂ フリー水素利用アンモニア製造・貯蔵・利用関連技術の開発

再生可能エネルギー等を用いた CO₂ フリー水素製造を介してアンモニアを高効率で製造するプロセスを開発し、輸送等のサプライチェーンに関連した技術開発を行った。

表 3-44 CO₂ フリー水素利用アンモニア製造・貯蔵・利用関連技術の開発体制

研究責任者	藤村 靖 日揮株式会社プロセス技術本部技術イノベーションセンター技術研究所長
研究開発実施機関 (計 15 機関)	日揮株式会社、産業技術総合研究所、日揮触媒化成株式会社、沼津工業高等専門学校、北海道電力株式会社、大阪ガス株式会社、一般財団法人エネルギー総合工学研究所、三菱日立パワーシステムズ株式会社、三菱商事株式会社、広島大学、株式会社日本触媒、九州大学、千代田化工建設株式会社、株式会社豊田自動織機、一般財団法人ファインセラミックスセンター

② アンモニア水素ステーション基盤技術

アンモニアを活用した水素ステーションを実現するための、アンモニアの脱水素、水素精製、安全対応に関する技術開発とシステム実証を行った。

表 3-45 アンモニア水素ステーション基盤技術の体制

研究責任者	小島 由継 広島大学自然科学研究支援開発センター先端機能物質部門長、教授
研究開発実施機関 (計 5 機関)	広島大学、株式会社豊田自動織機、産業技術総合研究所、大陽日酸株式会社、昭和電工株式会社

③ アンモニア燃料電池

アンモニアを燃料とした燃料電池を開発した。特に、固体酸化物形燃料電池については、1kW 級のアンモニア燃料電池システムを開発した。

表 3-46 アンモニア燃料電池の体制

研究責任者	江口 浩一 京都大学大学院工学研究科教授
研究開発実施機関 (計 7 機関)	京都大学、株式会社ノリタケカンパニーリミテド、株式会社日本触媒、株式会社豊田自動織機、三井化学株式会社、株式会社トクヤマ、株式会社 IHI

④ アンモニア直接燃焼

アンモニアを燃料とした直接燃焼技術を開発し、ガスタービン、火力発電所、工業炉等での実用化のための装置開発と実証を行った。

表 3-47 アンモニア直接燃焼の体制

研究責任者	小林 秀昭 東北大学流体科学研究所教授
研究開発実施機関 (計 18 機関)	東北大学、大阪大学、産業技術総合研究所、株式会社 IHI、株式会社豊田中央研究所、大陽日酸株式会社、日新製鋼株式会社、宇部興産株式会社、一般財団法人電力中央研究所、中国電力株式会社、東北電力株式会社、中部電力株式会社、関西電力株式会社、三菱日立パワーシステムズ株式会社、三菱重工業株式会社、JFE エンジニアリング株式会社、海上・港湾・航空技術研究所、株式会社トヨタエナジーソリューションズ

3) 有機ハイドライドの製造・利用技術



図 3-43 研究開発スケジュール（有機ハイドライドの製造・利用技術）

① 有機ハイドライドを用いた水素供給技術の開発

有機ハイドライドを水素ステーションで脱水素化するための触媒の高性能化と水素精製技術の開発を行った。

表 3-48 有機ハイドライドを用いた水素供給技術の開発体制

研究責任者	梶 英 J X T G エネルギー株式会社中央技術研究所水素基盤研究所有機ハイドライドグループプリンシパルリサーチャー
研究開発実施機関 (計 9 機関)	J X T G エネルギー株式会社、NOK 株式会社、産業技術総合研究所、東京工業大学、早稲田大学、横浜国立大学、大阪府立大学、デノラ・ペルメレック株式会社、旭化成株式会社

4) 液化水素の利用技術



図 3-44 研究開発スケジュール（液化水素の利用技術）

① 液化水素用ローディングシステム開発とルール整備

液化水素の荷役に必要なローディングシステムを開発し、荷役に係る安全ルールを策定した。

表 3-49 液化水素用ローディングシステム開発とルール整備の体制

研究責任者	千田 哲也 一般財団法人日本船舶技術研究協会審議役
研究開発実施機関 (計 6 機関)	一般財団法人日本船舶技術研究協会、川崎重工業株式会社、東京貿易エンジニアリング株式会社、宇宙航空研究開発機構、株式会社日本海洋科学、公益社団法人日本海難防止協会

② 水素エンジン技術開発

天然ガスと同等の熱効率と環境調和性のある水素エンジンを開発し、具体的には水素噴流制御、点火等に関する技術開発を行った。

表 3-50 水素エンジン技術開発の体制

研究責任者	飮 雅英 川崎重工業株式会社技術研究所熱システム研究部部長
研究開発実施機関 (計 7 機関)	川崎重工業株式会社、産業技術総合研究所、株式会社前川製作所、 東京都市大学、岡山大学、海上技術安全研究所、早稲田大学

5) エネルギーキャリアの安全性評価



図 3-45 研究開発スケジュール（エネルギーキャリアの安全性評価）

アンモニア、有機ハイドライド、液化水素の漏洩等に関する事故解析、リスク評価を行い、これらのエネルギーキャリアの貯蔵・供給設備の社会リスクを定量化した。

表 3-51 エネルギーキャリアの安全性評価研究の体制

研究責任者	三宅 淳巳 横浜国立大学先端科学高等研究院副高等研究院長、教授
研究開発実施機関 (計 3 機関)	横浜国立大学、広島大学、産業技術総合研究所

(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 3-46 に示す。

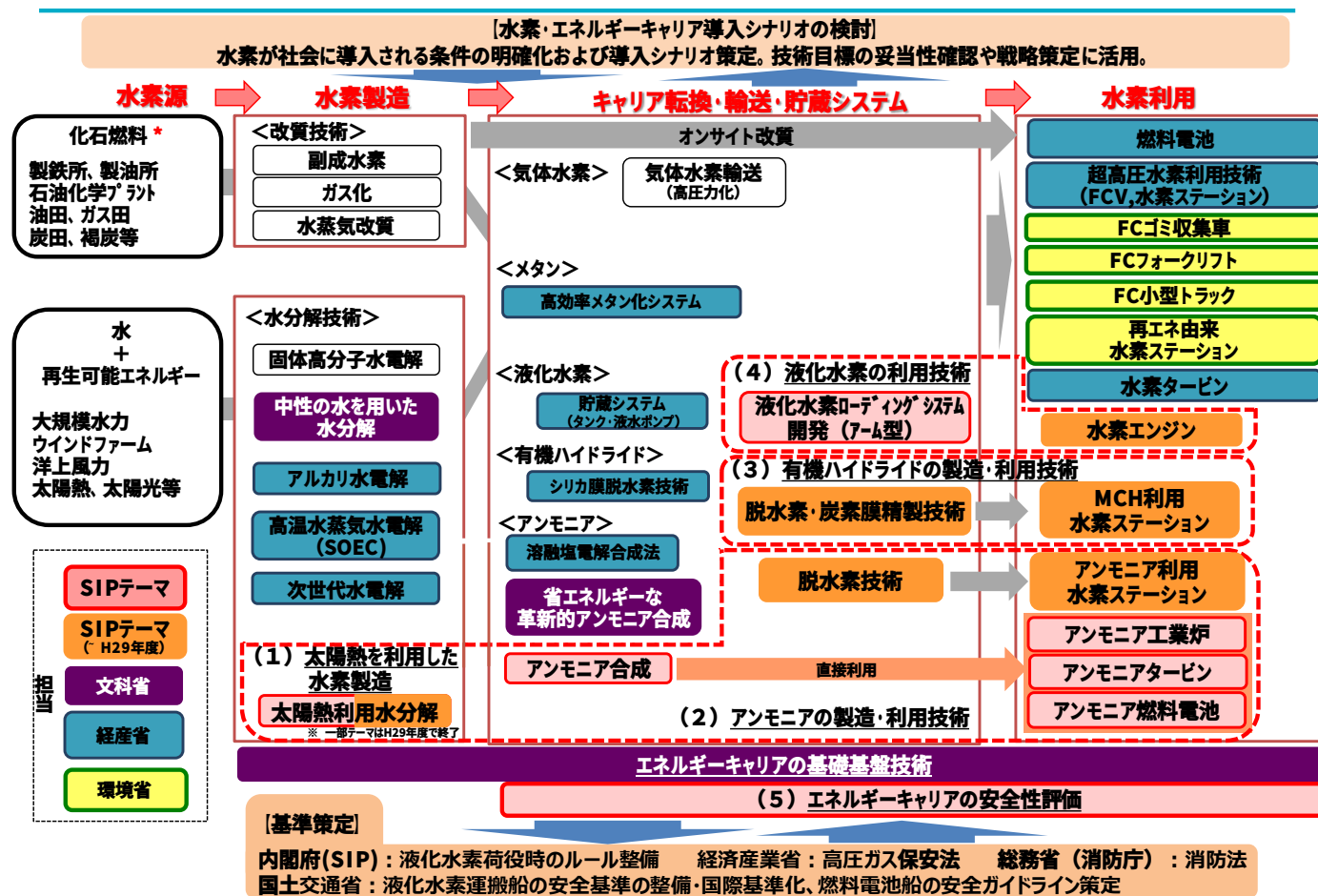


図 3-46 エネルギーキャリアの研究開発テーマ及び各省庁施策との連関図

(6) 出口戦略

研究開発計画で示された出口戦略は以下のとおりである。

1) 技術の評価、基準等の整備による成果普及

水素関連の各エネルギーキャリアに関する経済性・安全性を含めた各種技術の評価を行う。また、アンモニア、メチルシクロヘキサン（MCH）を代表とする有機ハイドライド等の安全性に関する体系的な評価、液化水素船に関する安全基準の整備、国際基準化による取り組み等を進め、水素エネルギーキャリアの利用環境整備を進める。以上を踏まえて、水素導入シナリオを策定・見直しを行い、柔軟な投資配分により技術開発を推進する。

2) 研究開発成果の社会実装に向けた取り組み

2020 年の東京オリンピック・パラリンピックに向けて、研究開発成果の積極的な情報配信等を実施する。特区等による制度改革も交え、水素社会が成り立つことを国内外に示していく。

3) 海外の再生可能エネルギー等活用のための国際共同開発

海外市場において CCS⁵²を導入した化石燃料や、太陽エネルギー等の再生可能エネルギーの有効利用に関する国際共同開発を実施し、水素エネルギーの製造から利用までのシステムを実証する。

(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を作成し、整理を行った結果を図 3-47 に示す。

本課題は、水素製造から利用までのバリューチェーン全体を意識したテーマ設定がされていることと、有機ハイドライド、液化水素等の技術開発に加えて、太陽熱やアンモニア利用等の新しい技術開発分野を加えた網羅的な取り組みがされていることが特徴である。バリューチェーン全体を網羅し、新規開発分野を取り入れつつ、水素社会を実現することが最終目標として設定されている。また、長期かつ大規模で、技術・社会双方からの取り組みが必要とされるエネルギーインフラの開発に対応するために、出口戦略の形としてグリーンアンモニアコンソーシアムの形成が盛り込まれている。

⁵² 二酸化炭素の回収・貯蔵（carbon dioxide capture and storage）。

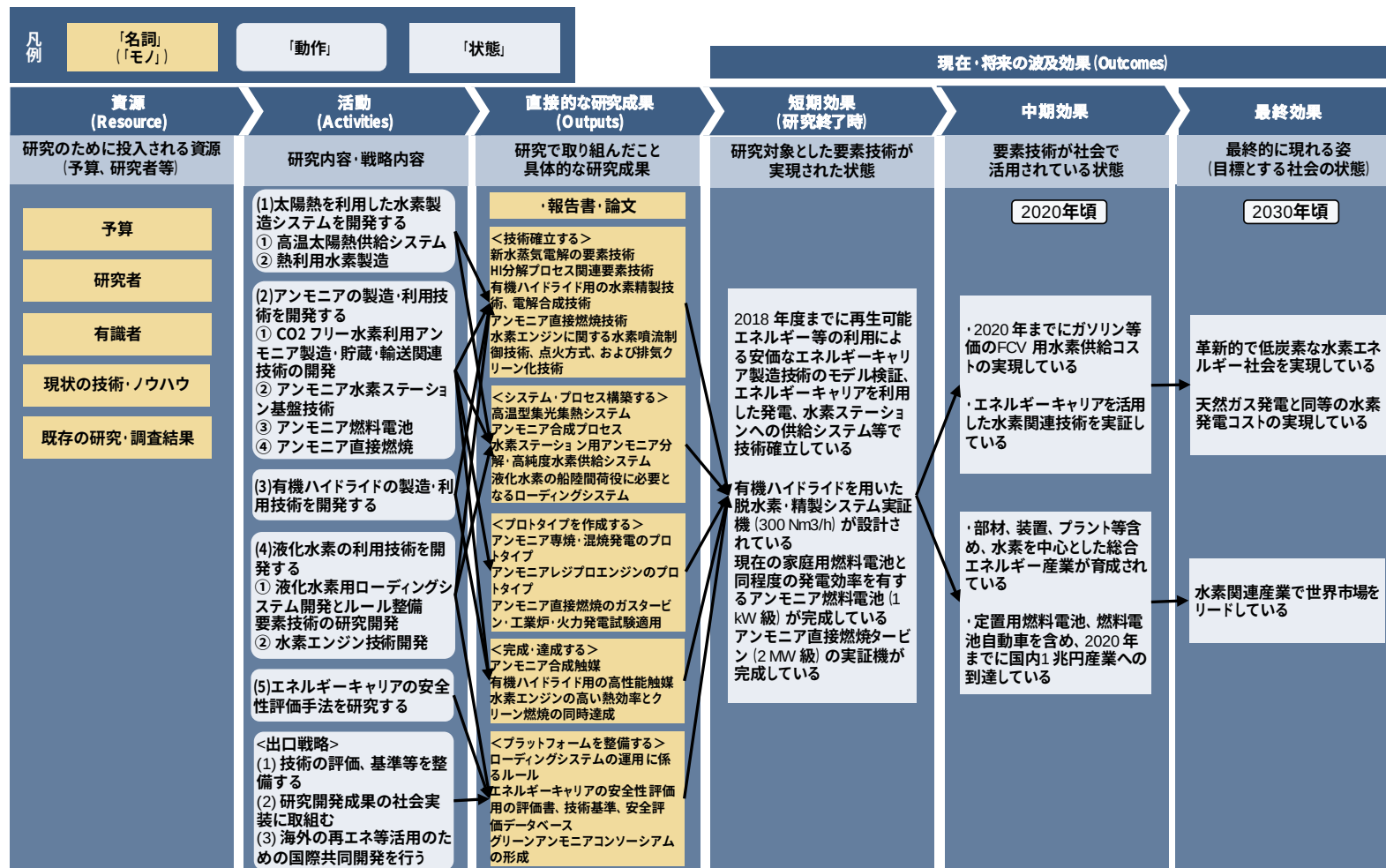


図 3-47 エネルギーキャリアのロジックツリー

(出典) 平成 30 年度研究開発計画を基に作成

3.4.2 評価

(1) 意義の重要性、SIP の制度の目的との整合性

国内の長期的な CO₂ 削減目標に対して、国内の再エネの普及、さらには低炭素なエネルギーの輸入は重要な課題となる。これらの課題に対して水素社会の実現は大きな意義があるとともに、エネルギーキャリアの手段の一つとして本課題におけるアンモニア等に関する取り組みは重要な検討課題であった。

一般的な公的研究開発プログラムでは、研究フェーズが限定されていることが多く、個別技術課題の解決にとどまっていたが、SIP では複数のテーマに対して基礎研究から実証まで大規模かつシームレスに研究開発を実施できたことで、水素社会を構成するサプライチェーン全体を確立する技術開発に大きく貢献した。遂行中の計画変更やリソース見直しについて、PD の裁量で柔軟に対応できたため、より高い成果の実現に大きく貢献した。

本課題の計画遂行により、アンモニアのエネルギー利用が水素基本戦略、エネルギー基本計画に盛り込まれるまでに至った点は評価できる。ただし、内閣府から経済産業省等への府省を超えた働きかけがより強く行われれば、早期に関係官庁の計画・取り組みに反映できた可能性があり、内閣府がよりリーダーシップを発揮する余地があった。

(2) 目標・計画・戦略の妥当性

アンモニアが、エネルギーキャリアとして有用性・可能性が高いと判断し、研究開発テーマやリソースをアンモニアにフォーカスしたことが成果につながった。当初は水素エネルギーのキャリアとして、液化水素、有機ハイドライド、アンモニアを取り上げ、我が国に輸送してから水素として利用することも研究対象として研究開発を実施していた。しかし、有識者で構成される戦略策定ワーキンググループ（WG）でエネルギーキャリアのコスト評価を行ったところ、特に低炭素化が望まれ、大量導入が必要な発電分野において、アンモニアの直接利用が液化水素、有機ハイドライドに比べて低コストであるとの評価を得たことや、アンモニアを CO₂ フリー燃料として利用する技術に大きな成果が得られたことを受けて、社会実装を意識した大胆な研究開発テーマの選択と集中を行った。

具体的には、太陽熱利用をはじめとして、成果を出したものの社会実装時期の違いでテーマを廃止した例があり、研究開発を加速し、社会実装、実用化・事業化を目指すという SIP の特徴に合致しないテーマの改廃を実施した。一方で、5 年間の社会実装という目標設定によって、チャレンジングな技術目標が設定しにくいとの意見があった。

個別のテーマについても、装置の大型化等の柔軟な計画変更を実施したことが、大きな成果につながった要因であり、柔軟かつ迅速なリソース、体制構築による研究開発の加速は SIP ならではの成果創出の要因である。例えば、アンモニア製造技術について、将来的なコストメリットを想定して、計画当初より装置を大型化するなどの前向きな変更を行った。このような変更の際して、PD がその裁量で円滑なリソースの見直しを行ったことも成果創出を後押しした。

SIP 終了後の出口戦略についても、アンモニア戦略ロードマップを作成して検討されており、長期的視野に立った取り組みが実施されている。ただし、SIP 終了後の企業における

技術開発・実証等は企業負担等となるが、エネルギー分野のような我が国全体の施策への継続的な関わり方については、内閣府及び他省庁が連携して取り組むべき今後の検討課題である。

(3) 課題のマネジメント

課題のマネジメントにおける PD、サブ PD、管理法人、研究責任者等の役割分担は適切であり、効果的なマネジメントが成果につながった。本課題のマネジメントは、SIP 第 2 期課題の計画遂行にも大いに参考となる事例であると考えられる。

1) PD、サブ PD、管理法人の効果的な活動

PD、サブ PD がそれぞれの特色を活かして活動し、産学連携においてバランスが良い体制となっており、企業参画の面で成果に大きく貢献した。

特に村木 PD のマネジメントは特筆すべきものであり、自ら企業トップへのプレゼンや海外動向の視察、グリーンアンモニアコンソーシアムの設立を提案するなど、精力的に活動した。民間企業の経営経験を有していたことの効果も大きく、取り組みにおいてコストや実用化を意識した明確な方向付けを行った。テーマの選択と集中、リソースの見直し等による研究の加速等において重要な役割を果たした。

塩沢サブ PD は「民」の面で人脈を駆使して、研究開発の戦略策定面やテーマの選択と集中、リソースの見直しで、村木 PD を補佐した。また秋鹿サブ PD は「学」の面で米国の NH3 Fuel Association 等を通じたコネクションで国際的な認知度の向上に貢献したとともに、研究開発の内容面でのサポートを行って産学連携の体制を整えた。

管理法人にも分野の専門家が多く配置され、日々の研究サポートが手厚く行われた。このことは研究開発における適切な管理がされた好例といえる。管理法人の課題担当には PD の所属企業出身の専門家をそろえ、日々、研究の進捗状況や問題点をフォローしつつ PD に報告する体制が整っており、常に PDCA（Plan-Do-Check-Action）サイクルを回せる環境を構築した。他の国プロでは定期的な評価会があるが、日頃の密な連携や研究開発計画遂行において内容面にも深く入り込んだサポートまで実施する例は少ない。

また、PD 及び管理法人がテーマ遂行に必要な企業・団体を考え、参加を促すことに貢献した。例えば、ローディングシステムにおいては JAXA の参加によって実証試験が円滑に進み、アンモニア直接燃焼においては、低炭素社会実現のキープレーヤーである電力会社が参画し、SIP プロジェクト成果の社会実装に向けて大きく貢献した。

2) テーマの効果的な見直し

テーマの見直しにおいて、社会実装を見据えて選択と集中を実施したことも大きな意義があった。社会実装のフェーズがまだ先であると判断したテーマに関しては中止として、テーマの選択と集中を行ったが、単に中止とするのではなく、その後の進展について助言をするなどのフォローも丁寧に行った。

さらに、NEDO 等との意見交換会を積極的に実施し、NEDO での水素の取り組みと連携を促進しながらテーマごとの研究開発を進めたことが、SIP 後の出口戦略の検討にもつながった。

以下に調査対象とした 5 つの研究サブテーマに対して、マネジメントにおける評価を記

載した。

① CO₂ フリー水素利用アンモニア製造・貯蔵・利用関連技術の開発

産業技術総合研究所の協力により円滑に進められたことは成功の大きな要因であった。アンモニア合成技術開発は、日揮株式会社が全体を見ながら、触媒開発は産業技術総合研究所が中心となってとりまとめた。実証試験装置の仕様検討、設計は日揮株式会社で実施し、実証場所の調整や官庁への申請、調達等の事務的な業務を産業技術総合研究所が担当した。

当初は小型装置向けのアンモニア分離技術開発をテーマとして設定していたが、大型装置を開発する方針に転換したため、方針とテーマが整合しなくなり、2年目の終わりに取り組み中止等の見直しを行った。大型装置に方針転換したのは、アンモニアの製造コストを検討する中で、コスト低減には大型化が必須と判断したためである。

このような研究計画の変更においては、PD・サブ PD の承認により柔軟に計画変更することが可能であったため、5年間で技術開発から実証試験までを完遂することができた。

また、社会実装のためには、コストや CO₂ 削減のメリットの明確化が重要との観点から、2～3年目からアンモニアバリューチェーンのコスト評価、LCA (Life Cycle Assessment)、CO₂ フリーアンモニア製造に関する検討にも取り組み、社会実装に向けた検討を深めることができた。

② アンモニア燃料電池

管理法人、PD、サブ PD の指導で出口戦略を意識した研究開発を行い、より社会実装を意識して目標を「システム化」と設定し、装置化を行った。2年目からシステムメーカーとして株式会社 IHI が参画したことにより実現を図った。

大学だけでは実施が困難な規模の研究を行うために、スタックや装置の大型化の検討に関しては株式会社ノリタケカンパニーリミテド及び株式会社 IHI が参加した。参画企業を選定する際には PD が企業参画における橋渡しの役割を担った。

燃料電池発電スタックの大型化や、研究開発の加速による計画の前倒しのため、予定していた量よりも材料が多く必要となったが、その際のリソースの要請に対しては、管理法人や PD が迅速かつ的確な対応を行い、研究を滞らせることなく、開発を促進させることができた。

③ アンモニア直接燃焼

早期に成果が現れ、研究計画の前倒しにも迅速に対応できたことで、アンモニアガスタービンの成功と大型化への展開を加速できた。具体的には、大型試験に挑戦する際はより大きなリソースが必要となるが、迅速な対応で研究が加速できた。

社会実装に向けた大きな目標は残しつつ、途中から参画した企業には、よりハードなタスク・目標を個別に立ててもらい、研究責任者の強力なリーダーシップとマネジメント能力により、特にプレスリリース等の面からは、目標を超える成果をあげた。

テーマの領域が広く、参画する機関並びに研究者・開発者の人数が多かったため、内燃機関の分野、工業炉等の分野、電力会社が発電事業に関わる分野と分けて、領域毎にサブリーダーを設けて研究開発・マネジメントの促進、効率化を図った。

④ 液化水素用ローディングシステム開発とルール整備

液化水素技術の専門性、実績の高い JAXA がチームに参加したことで、海外で実施する計画であった大規模実験を国内で実施できた。液化水素用ローディングシステムについては、当初海外企業に外注して性能確認試験を実施する計画であったが、JAXA が参画したことにより、大規模な試験を JAXA の施設で実施できた。外注では、試験結果が報告されるのみだが、JAXA が参加して、研究チームと一緒に試験方法の検討や技術開発を行ったことにより、課題解決が加速した。

⑤ エネルギーキャリアの安全性評価

単なる工学的安全性評価ではなく社会総合リスクという新しい評価を目指したため、JST から紹介されたサイエンスアゴラ 2016 や JST フェア 2017 を社会的な受容性調査、リスクコミュニケーションの機会ととらえ、積極的に参加した。

課題の開始当初は重要なステークホルダーである水素ステーション関連の事業者がメンバーとして入っていなかったが、2 年目からはオブザーバーとして会議に参画させ、適宜拡充を図った。

アンモニア水素ステーション⁵³は社会的な受容性の観点から実現が困難であるという議論を経て、アンモニア水素ステーションに関するリスク評価は行わないこととした。しかし、アンモニア直接燃焼や燃料電池等のアンモニア利用技術の開発が成果をあげていることから、今後アンモニア水素ステーションのリスク評価が必要となる可能性がある。

3) 予算の柔軟な配分

大規模な実証試験におけるリソース見直しが必要な場合に、内閣府及び管理法人、PD 等を中心に迅速に見直しできたことが、本課題の円滑な遂行に役立った。リソース見直し・計画変更による成功事例としては、アンモニア直接燃焼における大型実証、アンモニア製造装置の大型化等が挙げられる。

4) 知財管理の徹底

学会・論文等での報告・発表は事前に管理法人に届ける運用ルールにしており、特許出願前の発表による新規性喪失が生じないように管理した。

(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

研究開発計画で示された本課題の技術的な目標は次のとおりであり、各テーマで概ね達成した。

特にアンモニアの直接利用技術については、プロジェクトの早期に想定以上の成果をあげることができたため、目標・計画・戦略の妥当性を広く他省庁、企業に周知することがで

⁵³ アンモニアから水素を製造し、燃料電池自動車に供給するための施設。アンモニアを輸送して貯蔵するオフサイト型が主流。

き、社会実装の証明ができたと考えられる。

【技術的目標⁵⁴】

- Ⅰ 平成30年までに再生可能エネルギー等の利用による安価なエネルギーキャリア製造技術のモデル検証、エネルギーキャリアを利用した発電、水素ステーションへの供給システム（有機ハイドライドを用いた脱水素・精製システム実証機（300 Nm³/h）の設計や現在の家庭用燃料電池と同程度の発電効率を有するアンモニア燃料電池（1kW 級）、アンモニア直接燃焼タービン（2MW 級）の実証機）等での技術確立を目指す。

2) CO₂ フリー水素利用アンモニア製造・貯蔵・利用関連技術の開発

目標は、従来の天然ガス原料によるアンモニア製造プロセス⁵⁵に代わる、CO₂ フリー水素の原料⁵⁶に適合したアンモニア製造プロセスを開発することであり、主な開発課題として以下の2点があった。

- Ⅰ 従来法に比べて低温で高活性な国産アンモニア合成触媒の開発
- Ⅰ 開発触媒を用いたアンモニア製造プロセスの実証試験を平成30年度に実施

平成30年10月に、世界初となる、再生可能エネルギー由来の水素を用いたアンモニア製造と発電に成功した。

本テーマでは、低温・低圧下で効率的にアンモニアを合成できる新たなルテニウム触媒とそれに適合するプロセスを開発した。また、太陽光発電由来の電力を用いた水の電気分解によって CO₂ フリー水素を製造し、その水素を原料に、開発触媒を充填した実証試験装置で CO₂ フリーアンモニアを製造し、さらに、そのアンモニアを燃料とするガスタービンで発電（47kW）を行う試験に成功した。CO₂ フリーアンモニアのバリューチェーンを模擬的に実証する試験に世界で初めて成功した。

⁵⁴ 産業面の目標及び社会的な目標は、3.4.2（5）現在・将来の波及効果（アウトカム）の節で述べる。

⁵⁵ ハーバー・ボッシュ法。水素と窒素から、鉄系触媒を用いて高温高压（400-600℃、200-400 気圧）でアンモニアを合成する方法。現在のアンモニア製造商用プロセスでは、天然ガスを分解して水素を取り出す方法と組み合わせて用いられている。

⁵⁶ 再生可能エネルギー由来あるいは天然ガス+CCS/EOR（Enhanced Oil Recovery）によって製造される水素。なお、再生可能エネルギーより水素製造を行う場合、再生可能エネルギーの変動による水素製造量の変動が起きる。ハーバー・ボッシュ法によるアンモニア製造では、投入水素量の変動に対応してアンモニア製造効率の最適点を維持することが難しいとされる。



図 3-48 アンモニア合成実証試験装置

(出典) 日揮株式会社「再生可能エネルギー由来の水素を用いたアンモニア合成と発電に世界で初めて成功 (平成 30 年 10 月 19 日)」(平成 31 年 1 月閲覧) <<http://www.jgc.com/jp/ViewPdf/view/2064>>

3) アンモニア燃料電池

目標は、アンモニアを燃料とする高効率な燃料電池システムの技術確立と実証を行うことであった。特に固体酸化物形燃料電池 (SOFC: Solid Oxide Fuel Cell) について、1kW クラスの直接アンモニア供給型システムを設計・試作し実証実験を行うことを目指した。

平成 29 年 7 月に、アンモニアを直接燃料とした固体酸化物形燃料電池 (SOFC) で世界初となる 1kW クラスの発電に成功した⁵⁷ (図 3-49)。発電効率は 56%であり、水素を燃料とした燃料電池と同等の発電効率を達成することで、アンモニアのエネルギーキャリアへの期待を国内外で広める役割を果たした。

その他、1kW システムのパッケージ化、自動起動、分解触媒開発、反応器作製、発電システムの構成材料の明確化を実現し、平成 30 年 5 月に燃料電池システムを開発した⁵⁸ (図 3-50)。

今後は業務・産業用途向けに、装置のより大型化を目指し、水素社会における分散電源としての役割を果たせる規模への開発を行う予定である。

⁵⁷ JST「アンモニアを直接燃料とした燃料電池による 1 キロワットの発電に成功 (平成 29 年 7 月 3 日)」(平成 31 年 1 月閲覧) <<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20170703-2/index.html>>

⁵⁸ 株式会社 IHI「アンモニアを燃料とした燃料電池システムによる 1kW の発電に成功 ～CO₂フリーのクリーンな燃料電池 低炭素社会の実現に寄与～ (平成 30 年 5 月 16 日)」(平成 31 年 1 月閲覧) <https://www.ihi.co.jp/ihi/all_news/2018/technology/2018-5-16/index.html>



図 3-49 1kW 級 SOFC スタックの外観

(出典) JST「アンモニアを直接燃料とした燃料電池による 1 キロワットの発電に成功（平成 29 年 7 月 3 日）」（平成 31 年 1 月閲覧）<<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20170703-2/index.html>>



図 3-50 燃料電池システムの外観

(出典) 株式会社 IHI「アンモニアを燃料とした燃料電池システムによる 1kW の発電に成功 ～CO₂フリーのクリーンな燃料電池 低炭素社会の実現に寄与～（平成 30 年 5 月 16 日）」（平成 31 年 1 月閲覧）<https://www.ihico.jp/ihico/all_news/2018/technology/2018-5-16/index.html>

4) アンモニア直接燃焼

目標は、アンモニアを燃料とした直接燃焼（専焼及び混焼）技術を開発し、ガスタービン（数 10kW～数 MW 級）、工業炉、火力発電所等での実用化のための装置開発を行うとともに実証試験を行うことであった。

アンモニアの直接燃焼については、着火温度が低く燃焼速度も遅いアンモニアの燃焼を基礎から見直し、通常の脱硝設備を用いたマイクロタービンを用い、100%アンモニア燃料による 50kW 級の発電出力を 10ppm 以下の低窒素酸化物（NO_x）で実現した。

アンモニアと天然ガスの混焼については、2MW 級ガスタービンでは世界初となる熱量比率 20%の混燃に平成 30 年 3 月に成功し、NO_x 生成の抑制が可能であることを示した。燃焼速度の異なるアンモニアと天然ガスの燃焼安定性や、NO_x の抑制が課題であったが、既存の燃焼器をアンモニア混焼用に改良することで、安定燃焼と NO_x の抑制を実現した。

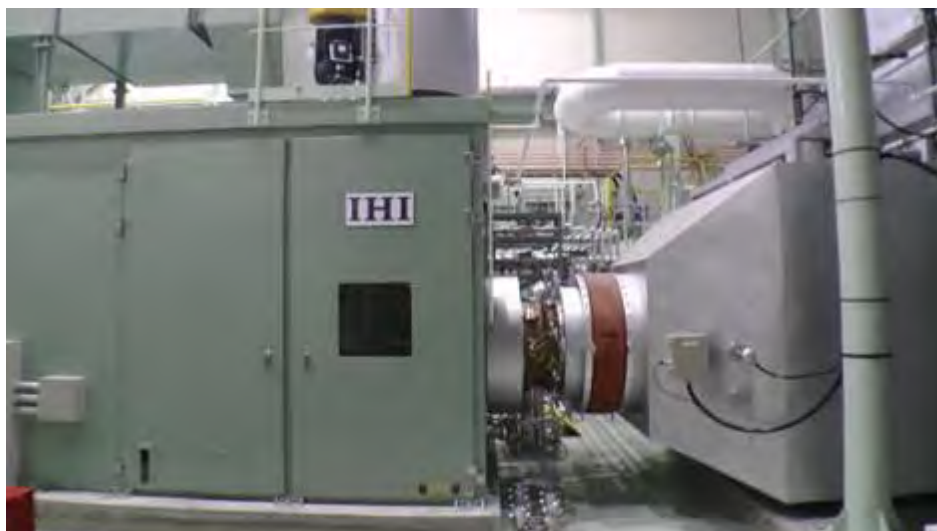


図 3-51 アンモニア混焼ガスタービン試験設備（株式会社 IHI 横浜事業所内）

（出典）株式会社 IHI 「2,000kW 級ガスタービンで世界初のアンモニア混焼を実証 ～CO₂排出量低減に寄与 アンモニアの燃料利用を可能にする燃焼技術を開発～（平成 30 年 4 月 18 日）」（平成 31 年 1 月閲覧）<https://www.ihico.jp/ihico/all_news/2018/technology/2018-4-18/index.html>

石炭火力発電所でのアンモニアの燃料利用については、大容量の燃焼試験設備において、アンモニアと石炭火力発電の燃料である微粉炭の混焼試験を実施し、平成 29 年 12 月には世界最高水準となる熱量比率 20%の混燃に成功した。アンモニアと微粉炭の混焼では、NO_x の排出濃度が上昇する懸念があるが、この実証試験結果からは、既存の発電所に対する小規模な改造で、NO_x 排出濃度を従来の石炭火力発電所からの排出濃度と同程度に抑制できることを見いだした。

また、平成 29 年 7 月には中国電力の水島火力発電所 2 号機にてアンモニア混焼試験を行い、実操業中の石炭火力発電所においてアンモニア 1%混焼発電に成功した。



図 3-52 大容量燃焼試験設備（株式会社 IHI 相生事業所内）

（出典）JST 「アンモニアを直接燃焼させる 炭素を含まない燃料による火力発電」（平成 31 年 1 月閲覧）<<https://www.jst.go.jp/seika/bt111-112.html>>

さらに、工業炉のアンモニア直接利用技術については、10kW のモデル工業炉において、NO_x の発生を環境基準値以下まで抑制するとともに火炎の伝熱を強化するアンモニア燃焼技術の開発に成功した。工業炉には様々な種類があるため、モデル工業炉での成果から、実際の炉に導入されるまでには時間がかかると思われるが、CO₂ フリーアンモニアが商用に大量利用されアンモニアに十分なコスト競争力が出来れば、工業炉への展開も進むと想定される。



図 3-53 10kW モデル燃焼炉（正面）

（出典）大陽日酸株式会社「工業炉分野で化石燃料の代替燃料、アンモニアの社会実装に一步近づく（平成 28 年 10 月 31 日）」（平成 31 年 1 月閲覧）
<http://www.tn-sanso.co.jp/jp/_documents/news_08384287.pdf>

工業炉でのアンモニア利用の具体的な適用例として、鋼板脱脂目的のため「アンモニア混焼衝突噴流式脱脂炉」のバーナの開発に成功し、最適加熱条件を確立した。これにより、工業炉分野でもアンモニアの燃料としての利用が、CO₂ 排出削減に寄与する技術であることの可能性を示した。

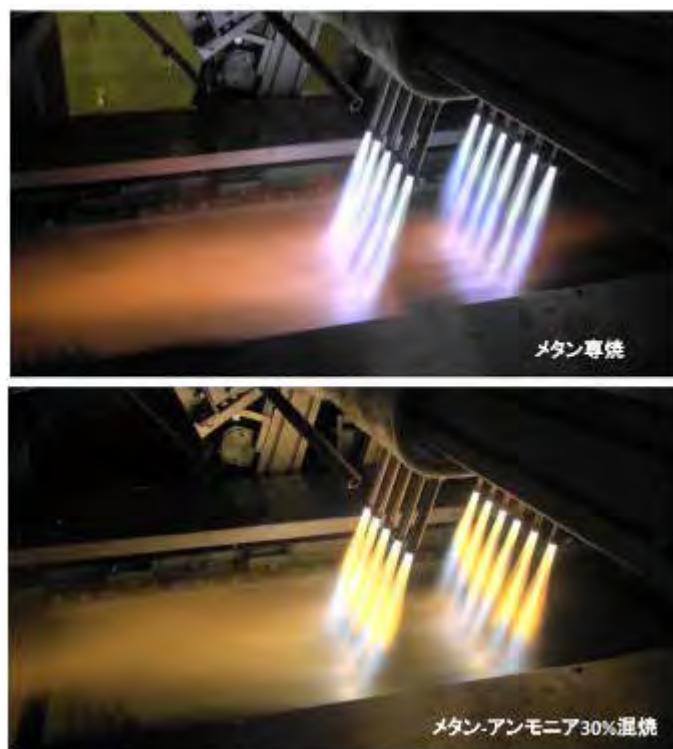


図 3-54 メタン専焼とメタン-アンモニア 30%混焼における鋼板加熱状況の比較

(出典) 大阪大学 ReSOU「工業炉における CO₂ 排出量削減に向けた、アンモニア燃焼利用技術を開発
(平成 29 年 6 月 26 日)」(平成 31 年 1 月閲覧)
<https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2017/20170626_2>

5) 液化水素用ローディングシステム開発とルール整備

目標は、液化水素用のスイベルジョイント（可動式継手）及び緊急離脱機構の研究開発を行い、これらを組み込んだ液化水素用ローディングシステムを開発・構築することであった。このシステムの運用上の安全対策を策定し、関係する基準・規則の整備を行うとともに、基準の国際規格化を図ることも目標であった。

成果として、世界初の技術となる液化水素用のアーム式ローディングシステムを開発した。液化水素の極低温という課題を解決し、高断熱構造を有する安全なローディングシステムを設計した。特に二重管構造が適用できないスイベルジョイント部分は伝熱距離を長くし伝導伝熱を抑制する新型式を設計・開発した。さらに、緊急離脱機構を開発し、離脱時のリーク量や切離し方式が適切であることを確認した。

また、国際規格原案（液化水素用ローディングシステムの技術規格、ローディングのオペレーションの安全性に関する規格）を作成した。そのうち、液化水素用ローディングシステムの技術規格について国際標準化機構（ISO）に提案した。

6) エネルギーキャリアの安全性評価

目標は、以下の 2 点であった。

- 1 エネルギーキャリアの漏洩等の事故解析、大気拡散、リスク評価等を実施することで、貯蔵・供給設備について、社会リスクを定量化することにより、許認可(消防法、高圧ガス保安法等)、安全対策、リスクコミュニケーションのための基礎デー

タを構築すること

- 1) キャリアの評価システムを構築し、評価、体系化を実施し、開発へのフィードバック及び公表を実施すること

成果として、水素ステーションの社会総合リスクアセスメントガイドライン及びリスクアセスメント報告書の作成が挙げられる。これらのガイドライン及び報告書は、国際的な水素安全に関する活動を行っている IEA Hydrogen Implementing Agreement (IEA-HIA) において、国際標準を見直す資料として貢献することが期待される。また、エネルギー分野においては社会的な受容性の向上が重要であり、今後は、水素ステーションの社会実装において上記ガイドライン等がコミュニケーションツールとして活用されることも期待される。

アウトリーチ活動の一環として、研究開発テーマ独自のホームページを整備し、広く社会に公表を行った（図 3-55）。



図 3-55 研究開発テーマ独自のホームページ整備による取り組みの紹介

（出典）横浜国立大学「SIP エネルギーキャリアの安全性評価研究事務局」（平成 31 年 1 月閲覧）
<<http://www.anshin.ynu.ac.jp/sip/overview.html#5year>>

7) 情報発信

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 3-52 に示す。

表 3-52 エネルギーキャリアに関する情報発信（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 21 日	グランド再生可能エネルギー2018 国際会議スペシャルセッション 再生可能エネルギー由来アンモニアへの期待と展望	JST	再生可能エネルギー由来の水素からアンモニア製造・輸送・利用のバリューチェーンに興味を示す海外のメーカー、学識者を招待し、PDとともに再生可能エネルギー由来アンモニアへの期待と展望について議論する。
平成 30 年 10 月 19 日	SIP エネルギーキャリア 公開シンポジウム 2018	JST・内閣府	最新成果及び SIP 第 1 期 5 年間の成果の集大成を紹介するとともに、今後の展開に向けた意見交換を行う。

8) 論文・知的財産

論文数は全 200 件(うち査読あり 138 件)となっている。

表 3-53 エネルギーキャリアに関する論文数

	発表年					
	5 年合計	2014	2015	2016	2017	2018
合計	200	11	36	54	50	49
査読あり合計	138	8	27	36	38	29
英文	123	8	25	28	36	26
和文	15	0	2	8	2	3
その他	0	0	0	0	0	0
査読なし合計	62	3	9	18	12	20
英文	2	0	0	1	0	1
和文	60	3	9	17	12	19
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 3-54 のとおりである。早い段階から特許出願を積極的に進めており、かつ海外を含む件数も数多い。

企業出願人による出願が多く、PCT 国際出願を活用して多くの国で権利を獲得しようとする動向がみられる。

表 3-54 エネルギーキャリアに関する特許数

		出願年度					
		5 年合計					
			2014	2015	2016	2017	2018
出願	合計	188	31	43	39	48	27
	国内のみ	92	20	20	9	20	23
	海外含む	96	11	23	30	28	4
	PCT	96	11	23	30	28	4
	米国	65	7	21	15	20	2
	欧州	29	6	13	10	0	0
	中国	62	6	19	15	20	2
	韓国	55	5	13	15	20	2
登録	日本	14	5	6	3	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

研究開発計画で示された産業面の目標及び社会的な目標は次のとおりである。

【産業面の目標】

i) 産業創出

- Ⅰ 部材、装置、プラント等含め、水素を中心とした総合エネルギー産業を育成する。
- Ⅰ 定置用燃料電池、燃料電池自動車を含め、2020 年までに国内 1 兆円産業への到達を目指す。

ii) 世界シェア

- Ⅰ 国際的基準化・標準化にも積極的に取り組み、我が国の水素関連産業の国際競争力向上を進め、2030 年までに世界市場で大きなプレゼンスを持つ産業への発展を目指す。

【社会的な目標】

- Ⅰ 2020 年までにガソリン等価の FCV 用水素供給コストの実現、2030 年までに天然ガス発電と同等の水素発電コストの実現を目指す。

※時期、コスト、水素供給量については、シナリオ策定の中で詳細を検討する。

- Ⅰ 2020 年頃エネルギーキャリアを活用した水素関連技術の実証を目指す。

産業面の目標、社会的な目標については、目指す目標が極めて野心的であり、終了時点で達成が判断できる内容の目標ではない。他方で、我が国の「水素基本戦略」（平成 29 年 12 月 26 日第 2 回再生可能エネルギー・水素等閣僚会議決定）及び「第 5 次エネルギー基本計画」（平成 30 年 7 月 3 日閣議決定）においてアンモニア利活用の取り組みが盛り込まれたことは、産業創出や世界市場でのシェア確立に向けての推進力となる。この戦略においてアンモニアは他のエネルギーキャリアと比べて実現時期が早期に設定されており、水素社会実現への貢献が認められるため、目標は概ね達成されたといえる。

産業創出に向けては、グリーンアンモニアコンソーシアムの形成によって取り組みを継続する。また、国際的な認知度向上の実現やサプライチェーン構築に向けた海外との連携も構築しつつあり、アウトカムの達成にも期待が持てる。

2) 国内でのエネルギーキャリアとしての位置づけ

前述のように SIP での取り組みが国内で認められた結果、「水素基本戦略」及び「第 5 次エネルギー基本計画」においてアンモニア利活用の取り組みが盛り込まれた。SIP エネルギーキャリアでの成果が水素社会の早期実現の可能性を高めることができたと評価できる。具体的には水素基本戦略において、アンモニア利用に関する実現時期は、液化水素、有機ハイドライドの他のエネルギーキャリアと比べて早期に設定された。これは、アンモニアの直接燃焼等の利用技術が SIP にて大幅に進展したことやアンモニアのサプライチェーンが既に技術的に確立されたものであり、他のエネルギーキャリアと比べて早期の実用化が可能と想定されたためである。

水素基本戦略（平成 29 年 12 月 26 日第 2 回再生可能エネルギー・水素等閣僚会議決定）

水素基本戦略（概要）より

3. 水素社会実現に向けた基本戦略①

（2）国際的な水素サプライチェーンの開発

効率的な水素の輸送・貯蔵を可能とするエネルギーキャリア技術を開発。

液化水素サプライチェーン開発は、2030 年頃の商用化に向けて 2020 年代半ばまでに商用化実証を実施。

有機ハイドライドサプライチェーン開発は、2020 年度までに基盤技術を確立し、2025 年以降の商用化を目指す。

エネルギーキャリアとしてのアンモニア活用は、直接燃焼時の NO_x 低減、可燃性劇物に係る安全性確保等の課題解決を進め、2020 年代半ばまでの CO₂ フリーアンモニアの利用開始を目指す。

CO₂ フリー水素を用いたメタネーションは普及方策を検討。

（4）電力分野での利用（一部抜粋）

メタン、アンモニアはキャリアの直接利用が可能。アンモニアについては 2020 年頃までの石炭混焼発電等での利用開始等を目指す。

第5次エネルギー基本計画（平成30年7月3日閣議決定）

第2章 2030年に向けた基本的な方針と政策対応

第2節 2030年に向けた政策対応

6. “水素社会”の実現に向けた取組の抜本強化

（3）低コストの水素利用実現に向けた国際的な水素サプライチェーンの構築と水素発電の導入

水素供給コストの低減に向けては、海外の安価な未利用エネルギーと CCS を組み合わせる、または安価な再生可能エネルギーから水素を大量調達するアプローチが基本になる。この実現に向けては、上流側の取組として、安価な海外資源を確保すべく、民間ベースの取組に加えて政府間レベルでの関係構築を図るとともに、効率的な水素の輸送・貯蔵を可能とする液化水素、メチルシクロヘキサン、アンモニアやメタンといったエネルギーキャリア技術の開発が必要となる。

第3節 技術開発の推進

2. 取り組むべき技術課題

（3）低コストの水素利用実現に向けた国際的な水素サプライチェーンの構築と水素発電の導入

（略）さらに、アンモニアを燃料として直接利用する技術開発、水素を CO₂ と組み合わせることでカーボンニュートラルとしうるガスを生成するメタネーションなど、既存のインフラを有効利用した脱炭素化のための技術開発を推進していく。

3) グリーンアンモニアコンソーシアムの設立

CO₂ フリーなエネルギーキャリアとしてのアンモニアのバリューチェーン構築を目指して、平成29年7月にグリーンアンモニアコンソーシアムを設立した。アンモニアのエネルギー利用に関する戦略・ロードマップ策定、社会実装への取り組みを推進し、事業化を目指す組織である。バリューチェーン形成のために、商社、化学・機械メーカー、電力会社、ガス会社等の民間企業や研究機関の28社が平成30年9月時点で参画している。特にアンモニア利用先となる火力発電を有する電力会社が多く参画している点は特徴的で、他の水素関連の取り組みにはない組織編成となっている。

SIP 終了後は、幅広く国内外の企業及び機関が参加した一般社団法人として活動予定である。

＜グリーンアンモニアコンソーシアム参画機関＞

（SIP エネルギーキャリア報道機関向け資料より 平成30年5月25日時点）

議長：村木茂(PD)

議長代理：塩沢文朗(サブ PD)

参画企業

電力・ガス：北海道電力株式会社、東北電力株式会社、中部電力株式会社、中国電力株式会社、電源開発株式会社、大阪ガス株式会社

商社：三井物産株式会社、三菱商事株式会社、丸紅株式会社
 化学メーカー：大陽日酸株式会社、宇部興産株式会社、株式会社日本触媒、日揮触媒化成株式会社、株式会社ノリタケカンパニーリミテド
 機械メーカー：株式会社 IHI、日揮株式会社、株式会社豊田自動織機、JFE エンジニアリング株式会社、トヨタ自動車株式会社、株式会社トヨタエナジーソリューションズ、株式会社豊田中央研究所、三菱重工業株式会社、三菱日立パワーシステムズ株式会社
 研究機関：一般財団法人電力中央研究所、一般財団法人石炭エネルギーセンター、海上・港湾・航空技術研究所、産業技術研究所
 ※その他、SIP エネルギーキャリアに係る一部の大学教授を「アドバイザー」として招聘 秋鹿研一(サブ PD・東京工業大学)、江口浩一(京都大学)、小林秀昭(東北大学)、赤松史光(大阪大学)

4) 環境効果

現在、石炭火力発電は燃料の石炭にコスト競争力があるため、ベースロード電源として活用されている。その一方で、温室効果ガス発生による環境負荷への懸念から世界的に石炭火力発電の導入見直しの気運が高まっている中、石炭火力発電所を所有する電力会社はその環境性向上が重要となっている。

こうした背景から、石炭火力発電の低炭素化（CO₂排出削減）が期待できるアンモニア混焼技術は電力会社としても注目度が高い。グリーンアンモニアコンソーシアムへの電力会社の参画状況もその注目度の高さを示している。また、アンモニアは既存の火力発電設備で既に脱硝等に使われており、試験導入に際しても障壁が低く、既存技術との親和性が高い。

石炭火力における 20%の CO₂ 削減（全石炭火力を IGCC⁵⁹に変更した効率に相当）が実現した場合、約 0.58 億トン/年の CO₂ 削減効果⁶⁰となる。これは平成 28 年の国内の CO₂ 排出量 12.06 億トンの約 5%に相当する。

5) 国際的な立ち位置

アンモニア利用等で、我が国は技術的には世界の中で一歩リードしている。特に SIP の成果であるアンモニア直接燃焼、燃料電池は技術優位性が高く、いずれも世界初の成果が出た。アンモニアのエネルギー利用に関する学会活動では米国の NH₃ Fuel Association が先

⁵⁹ 次世代の火力発電システムで石炭ガス化複合発電プラントのこと。石炭をガス化炉でガス化し、さらに、ガスタービン・コンバインドサイクル発電（GTCC）と組み合わせることにより、発電効率と環境性能の飛躍的な向上を実現するもの。大型では従来型石炭焚き火力発電方式と比べ、発電効率約 15%向上、CO₂低減も図ることができるとされる。

⁶⁰ 0.58 億トン/年の削減効果の算出根拠は以下の計算式による（三菱総合研究所の試算）。
 0.000864t・CO₂/kwh（石炭火力の排出原単位）×3,373 億 kWh（平成 28 年度の石炭の発電電力量）×20%

※石炭火力の排出原単位、「全石炭火力における 20%の CO₂削減（全石炭火力を IGCC に変更した効率に相当）」の仮定は次の資料より引用。

経済産業省「火力発電に係る昨今の状況（平成 29 年 10 月 10 日）」（平成 30 年 1 月閲覧）

<http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shoene_shinene/sho_ene/karyoku/pdf/h29_01_04_00.pdf>

行していたが、今回の SIP の取り組みで燃焼技術、燃料電池等で世界初の成果が出ており、我が国がリードする形となった。近年では欧州でもアンモニア関連の取り組みに注目が集まっており、ノルウェー等と意見交換を実施している。



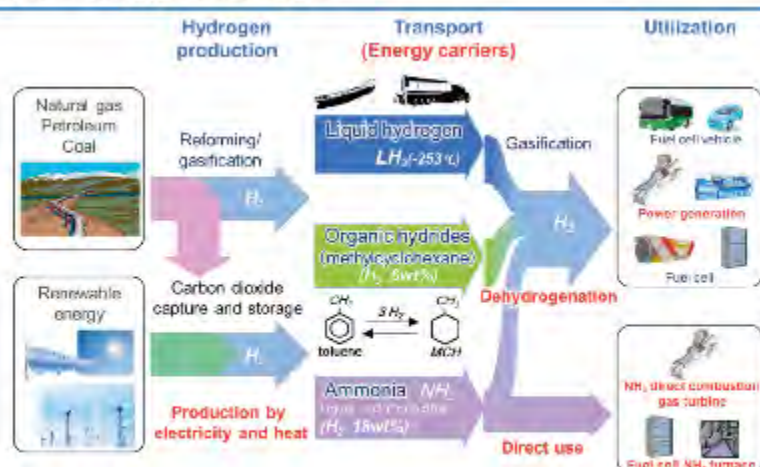
(出典) 内閣府「SIP(エネルギーキャリア)の取組み(平成30年5月25日)」(平成31年1月閲覧) <<https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/press/enekyari.pdf>>

また、平成 30 年 10 月に我が国で開催された水素閣僚会議にて、IEA の発表の中で、水素の導入においてアンモニアが重要であるということが示された。

「Japan's cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP) "Energy Carriers" examines three different options: liquid hydrogen (H₂), ammonia (NH₃), and organic hydrides, for transporting clean energy from Australia to Japan, whether from fossil fuel with carbon capture and storage (CCS), as originally thought, or from renewable power, as appears more and more

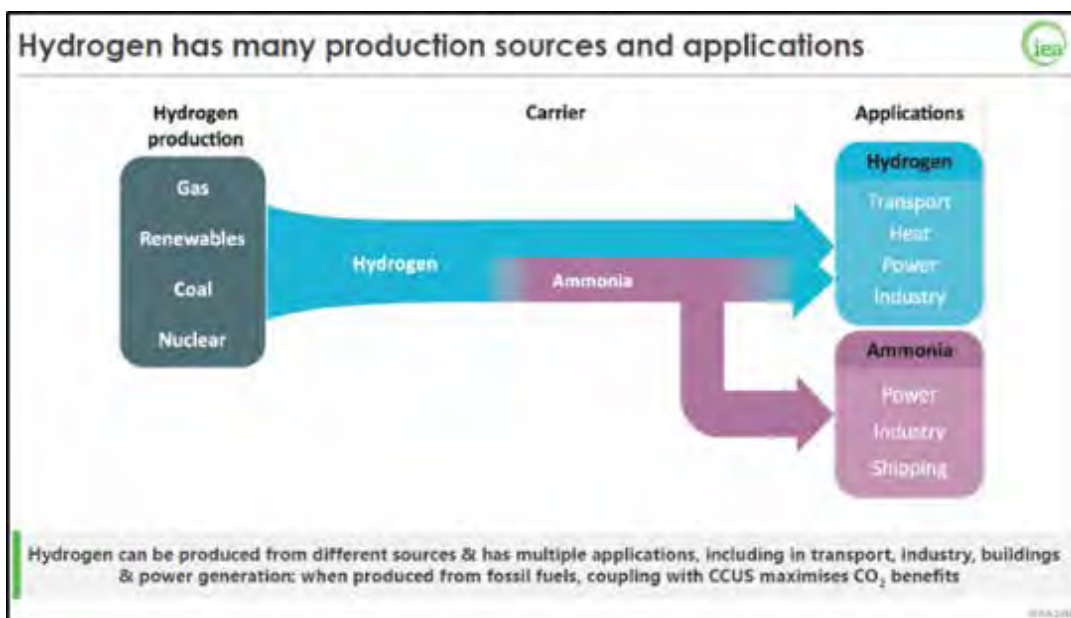
likely (Figure 17).」

Figure 17. Japanese energy carrier strategies



Source: Muraki, 2017, RD&D on Hydrogen and Energy Carriers in Japan.

Key message • Liquefied hydrogen, organic hydrides and ammonia are the main options for shipping hydrogen long distances cost-effectively.



(出典) IEA “Hydrogen: Accelerating & Expanding Deployment” (平成 31 年 2 月閲覧)
 <<https://www.nedo.go.jp/content/100885441.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

本課題の研究成果を社会実装するためには、民間企業のリスクの軽減や規制改革の実現が必要となるため、個別企業のみでの対応には限界がある。そのようなテーマを SIP の課題として取り上げたことは適切であり、SIP の成果としてアンモニアのエネルギー利用について、水素基本戦略、エネルギー基本計画に言及されるまでに至ったことは評価できる。しかし、より早期に関係官庁の計画・取り組みに反映させるためには、内閣府から経済産業

省等への府省を超えた働きかけをより強く行うべきであった。

エネルギーキャリア開発という当初の設定から、選択と集中のプロセスを経て、最終的にはアンモニア利用に特化した取り組みとなった。テーマの絞り込みが必要となった背景には、当初のエネルギーキャリアとしての課題設定自体が広すぎたことも挙げられる。

アンモニア利用の技術のうち、発電所等で活用できる直接燃焼以外の技術では、国内にアンモニアの流通インフラを確立する必要がある。アンモニアのインフラ確立に関する障壁は大きいため、実現性の観点から、アンモニア利用の中でも更にテーマを絞り込むことができた可能性がある。

また、特許について、アンモニアグリーンコンソーシアムの中では管理せず所有者にて個別に管理する方針であるが、維持活用のための管理の仕組みも検討すべきであった。

2) 今後取り組むべき点

本課題の最大の成果は、「微粉炭とアンモニアの混焼」を大規模実証したことである。今後、アンモニアのエネルギー利用の実現（直接燃焼）には、アンモニアユーザーの電力会社に向けて、経営判断を実施の方向（使用量のコミットメント等）にどのように促すのか検討することが必要である。さらに、コスト試算においては、実際にその値にコミットメントする機関が出るようにしていく必要がある。その上で、石炭火力発電がベース電源として生き残る方策を検討し、水素基本戦略のスケジュールに合わせた実現時期を目指していく必要がある。

「グリーンアンモニアコンソーシアム」の設立は実用化の第一歩として評価できる。SIP 終了後、同コンソーシアムでは、アンモニア直接燃焼を中心にアンモニア利用に関する俯瞰的な取組を行うとしているが、今後、エネルギーキャリアとしてのアンモニアのビジネスモデルをどう確立するか、検討することが必要であり、早期に社会実装する道筋をつけることが重要である。具体的には、石炭火力の CO₂ 排出量を LNG 火力と同等にまで低減できるアンモニア混焼率を 30% 程度までの上昇や、木質バイオ利用石炭低炭素化と比べたコストメリット等の精査である。また、アンモニアの利用側だけでなく、アンモニアの製造・輸送を担う供給側の取り組みも活性化させることで、アンモニアサプライチェーンの形成を進めることが重要と考える。

さらに、エネルギーインフラに関する研究開発及び社会実装は、長期かつ大規模な取り組みが必要となる。これらは民間企業としては多大な投資リスクを伴うとともに、社会実装においては技術開発の支援のみならず、CO₂ フリー水素利用アンモニアの市場形成につながる制度設計、アンモニアの利用拡大に向けた制度・規制改革等に一層取り組むことが必要であることを意味する。そのためには社会的な受容性の視点が重要であり、安全性研究を更に進めるべきである。また、アンモニアの導入による社会コストの試算を更に継続検討して精緻化していく必要がある。