

## 2019年度実施方針

省エネルギー部

1. 件名： 未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発

2. 根拠法

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第一号二、第三号及び第九号

3. 背景及び目的・目標

①政策的な重要性

我が国のエネルギー供給過程では、一次エネルギーの約6割が有効利用されずに排熱（未利用熱）として排出されている。社会全体のエネルギー効率を向上させて省エネルギーを実現するためには、これら未利用熱を有効活用する技術を開発し社会実装することが重要かつ必須である。低品位な排熱を効率的に回収し、経済的に再利用可能とするには極めて高い技術的ハードルが存在し、広く産官学の英知を集めて開発を行う必要があり、国が主導して取り組むことが不可欠である。

②我が国の状況

未利用熱エネルギーの有効活用に関する技術開発については、ニューサンシャイン計画の一環として実施した「広域エネルギー利用ネットワークシステムプロジェクト」での実績があるが、それ以降は各省庁において提案公募型の事業が一部存在するものの、基盤研究から実用化までをすべて網羅し、企業を含むプロジェクト研究体制では実施されていない。

③世界の取組状況

米国エネルギー省(DOE)ではWaste Heat Recovery Systems等、欧州(FP7/Horizon2020)ではNANOtherma、TransFlexTeg、I-ThERM、CREATE等、さらにドイツ連邦教育研究省(BMBF)、中国科学院、韓国(KAIST)等でも、産学官が一体となったプロジェクトを積極的に展開している。

④本事業のねらい

本事業では、未利用熱エネルギーを効果的に、削減（断熱、遮熱、蓄熱）、再利用（ヒートポンプ技術）、変換利用（熱電変換、排熱発電）するための技術開発と、これらの技術を横断的に取り組む熱マネジメント技術と基盤技術の開発を行い、環境中に排出される膨大な未利用熱を効果的に削減又は回収して再利用・変換利用することで、産業分野、運輸分野、民生分野における更なる省エネ化を目指す。各研究開発項目の目標は以

下のとおり。

#### 研究開発項目①「断熱技術の研究開発」

最終目標（2022年度）

- 1) 1,500℃以上で使用可能な工業グレードのファイバーレス断熱材で圧縮強度 20MPa 以上、かつ熱伝導率 0.20W/m・K 以下を有する断熱材料の開発

中間目標（2017年度）

- 1) 1,500℃以上で使用可能なファイバーレス断熱材で圧縮強度 10MPa 以上、かつ熱伝導率 0.25W/m・K 以下を有する断熱材料の開発

#### 研究開発項目②「遮熱技術の研究開発」

最終目標（2017年度）

- 1) 可視光線透過率 70%以上、日射熱取得率 43%以下（可視光線反射率 12%以下、カット波長 850～1,400nm）の遮熱フィルムの開発

#### 研究開発項目③「蓄熱技術の研究開発」

最終目標（2022年度）

- 1) 120℃以下で、蓄熱密度 1MJ/kg を有する固液相変化等を利用した蓄熱材料の開発
- 2) -20℃～25℃環境下で 24h 以上の保持期間を実現する蓄熱材の開発

最終目標（2018年度）

- 1) 蓄熱密度が 0.55MJ/L 以上であり、熱伝導率 2W/mK 以上を有する複合蓄熱体の開発

中間目標（2017年度）

- 1) 120℃以下で、蓄熱密度 0.5MJ/kg を有する固液相変化等を利用した蓄熱材料の開発
- 2) -20℃～25℃環境下で 12h 以上の保持期間を実現する蓄熱材の開発
- 3) 蓄熱材の占有体積が 9 割以上であり、蓄熱材単体の 20 倍以上の熱伝導率を有する複合蓄熱体の開発

#### 研究開発項目④「ヒートポンプ技術の研究開発」

- (1) 最高温度 200℃域を供給可能な産業用高効率高温ヒートポンプの開発

最終目標（2022年度）

- 1) 200℃までの供給温度範囲に対応し、100→200℃加熱で COP=3.5 以上を達成するヒートポンプシステムの開発

中間目標（2017年度）

1) 200°Cまでの供給温度範囲に対応し、80→160°C加熱で COP=3.5 以上を達成するヒートポンプシステムの開発

(2) 低温排熱の下限レベルである 60°C排熱で駆動できる高効率冷凍機の開発  
最終目標 (2017年度)

1) 75°C以下の熱源で、供給温度-10°Cを実現するヒートポンプシステムの開発

研究開発項目⑤「熱電変換材料・デバイス高性能高信頼化技術開発」

最終目標 (2022年度)

1) 200°C~600°Cで使用可能な発電効率 15%以上を有するモジュールの開発及び出力 200W を達成する発電ユニットの開発

2) コージェネ中高温向け熱電変換システムの利用効率 5%向上仕様の確立

3) 1.5W/cm<sup>2</sup>の発電モジュール、発電素子の実用化開発

最終目標 (2017年度)

1) パワーファクター (PF) 700μW/mK<sup>2</sup>を有する有機材料及び温度差 35°C以下で、出力密度 20μW/cm<sup>2</sup>を有するモジュールの開発

中間目標 (2017年度)

1) 性能指数 ZT=2 を有する無機材料の開発

研究開発項目⑥「排熱発電技術の研究開発」

最終目標 (2022年度)

1) 工場等において、開発した出力 1kW クラス小型排熱発電装置を利用した未利用熱削減効果の実証

最終目標 (2017年度)

1) 200°C以下の中低温排熱に対応した、発電効率 14%(従来比 2 倍)を有する出力 10kW クラス小型排熱発電装置の膨張タービンの開発

中間目標 (2017年度)

1) 200°C以下の中低温排熱に対応した、発電効率 14%(従来比 2 倍)を有する出力 1kW クラス小型排熱発電装置の開発

最終目標 (2015年度)

1) 200°C以下の中低温排熱に対応した、従来の大型機(500kW クラス)と同等性能を有する 50kW クラス排熱発電装置の基本要素技術確立

研究開発項目⑦「熱マネジメントの研究開発」

最終目標 (2022年度)

1) 数 kW 小型ヒートポンプシステムの開発

- (a) 蒸発性能 2.0kW/19L の性能を有する冷房用ヒートポンプの開発
- (b) 極寒 (-20℃) 環境下などの実用条件で COP=1.7 以上の作動が可能な暖房用ヒートポンプ開発及び実アプリケーションでの実証
- 2) 車両トータルの熱移動を計測し、上記省エネシステムを組み合わせ、最適化したトータル熱マネジメント技術の開発
- 3) 産業分野等における高効率な熱マネジメント技術・システムの開発

最終目標 (2018年度)

- 1) 高効率ヒートパイプの開発 (熱輸送距離 2m、熱輸送量 3,000W、蒸発器体格 0.5L、抗重力性、動力源レス)

最終目標 (2017年度)

- 1) 吸熱量 5W/cm<sup>2</sup> を有する吸熱デバイスの開発

中間目標 (2017年度)

- 1) 高効率ヒートパイプの開発 (0~50℃にて熱輸送距離 5m、熱輸送量 1,500W、抗重力性、動力源レス)
- 2) 数 kW 小型ヒートポンプシステムの開発
  - (a) 体積 100L 以下重量 50kg 以下で排熱温度 95℃以上、冷熱温度 5℃において冷凍能力/排熱入力比 0.4 を有する冷房用ヒートポンプの開発
  - (b) 極寒 (-20℃) 環境下などの実用条件で COP=1.5 以上の作動が可能な暖房用ヒートポンプの開発
- 3) 内燃機関、モーター/インバーター、空調、熱回収の車両トータル等における高精度熱発生・熱伝達シミュレーション技術の開発

#### 研究開発項目⑧「熱関連調査・基盤技術の研究開発」

最終目標 (2022年度)

- 1) 排熱利用機器やシステム設計につながる未利用熱データベースの構築の完了
- 2) 優れた新規材料、機器開発を加速するための評価技術の提供
- 3) プロジェクト内部の共通基盤ツールとしての新材料探索の基盤情報の提供
- 4) 産業用高温ヒートポンプ向け冷媒候補の開発及び冷媒物性情報の収集並びに統合解析シミュレーション技術の構築

中間目標 (2017年度)

- 1) 排熱調査を実施し、研究開発シナリオの検討の完了
- 2) 各種部材の計測・評価結果の分析を進め、整備すべきデータベースの明確化
- 3) 計算機シミュレーションについて計算結果の解析と検討を進め、熱関連材料の特性・性能評価技術の整備、体系化

#### 4. 実施内容及び進捗（達成）状況

プロジェクトマネージャーにNEDO省エネルギー部 近藤 篤を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理し、そのプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させた。

各実施者の研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、NEDOが選定した研究開発責任者（プロジェクトリーダー）国立研究開発法人産業技術総合研究所 企画本部 副本部長 小原 春彦氏の下で、以下の研究開発を実施した。

#### 4. 1 2018年度（委託）事業内容

##### 研究開発項目①「断熱技術の研究開発」

###### （1）断熱材料の研究開発

「高強度高断熱性多孔質セラミックスの開発」では、最終目標値の達成に有望な原料、組成、プロセス候補をリストアップすると共に、所望の熱伝導率、圧縮強度を発現する断熱材組織形態を解析した。また、中間目標値達成レベルのファイバーレス断熱材の試作を実施するとともに、並形形状作製において従来の2倍（200個/月）の鑄込み数量を達成し、また、凍結乾燥工程において並形形状で10個/バッチを24時間以内に乾燥できる技術を確立し、200個/月の乾燥条件を見出した。さらに、加工工程においては、加工ロス重量比で約20%低減するとともに、各種加工装置を用いることでJIS並形れんが相当の寸法精度 $\pm 3.0\text{mm}$ を達成した。

「高効率産業/工業炉における検証」では、上記により得られた並形断熱材サンプルのユーザー評価を実施し、課題抽出を行った。

##### 研究開発項目②「遮熱技術の研究開発」

###### （1）革新的次世代遮熱フィルムの研究開発

2017年度をもって本事業における本項目の研究開発は終了している。

##### 研究開発項目③「蓄熱技術の研究開発」

###### （1）高密度/長期蓄熱材料の研究開発

「高密度蓄熱材料(低温用)の開発」では、材料単体評価やメカニズムの考察を踏まえ、静的環境下において、ハイドレートと類似構造を有する結晶の生成を促進し、この結晶を核として過冷却を抑制する過冷却防止剤の候補を抽出した。また、ゲスト物質の食品添加物認証取得に向けた安全性評価として毒性の評価を実施し、遺伝毒性等の食品添加物として不適切な有害影響無きことを確認した。

「長期蓄熱材料の開発」では、中温用について、熱源温度 $90^{\circ}\text{C}$ 以上の蓄熱条件にて、材料単体評価を行い、高温融解時の過冷却解除確率向上、時間短縮を実現する、より

高沸点の添加剤を含む蓄熱材料組成、及び表面マイクロ構造を利用する解除機構を構築した。また、高温用について、材料単体評価を行い、最適な過冷却安定化剤種、濃度を確定するとともに、25℃環境下で過冷却を24時間保持できることを確認した。

## (2) 車載用蓄熱技術（材料）の研究開発

「蓄熱構造体の開発」では、目標である蓄熱密度 0.55MJ/L(蓄熱材含有率 80%)と熱伝導率 2W/mK に対して、アルミ-チタン系構造体の伝熱経路を維持し 5W/mK 以上の熱伝導率を確保した。また、加熱時間を 1/4 に短縮することで、従来よりも省エネルギー化できる製造プロセスを確立した。

「蓄熱材の高密度化」では、新規多孔材 (MOF) において、クラスターに配位結合した酢酸イオンを一部除去することで、水蒸気吸着サイトの親水性を調整した。その結果、蓄熱密度は若干低下するものの、蓄熱密度 0.8MJ/L (材料目標 0.7MJ/L 以上)、再生温度 56℃ (目標値 60℃以下) を達成した。

## 研究開発項目⑤「熱電変換材料・デバイス高性能高信頼化技術開発」

### (1) 高性能熱電材料及びモジュールの開発

2017 年度をもって本事業における本項目の研究開発は終了している。

### (2) 熱電デバイス技術の研究開発

「熱電デバイスの開発」では、スクッテルライト系熱電モジュールのスケルトン構造を最適化し、高温端/低温端=600℃/50℃の条件で出力密度 1.5W/cm<sup>2</sup> 以上を達成した。

「熱電発電システムの開発」では、スケルトン構造の熱電モジュールについて発電性能変化 10%以内、600℃@5,000h の恒温耐久性及びヒートサイクル耐久性を確認した。また、新たな熱電発電ユニットを設計して試作するため、熱回収構造を検討した。

### (3) 熱電変換による排熱活用の研究開発

「システム効率向上の検討」では、シリサイド素子を適用した一対熱電変換モジュールを作製評価した結果、素子特性から見積もった出力と一致することを確認した。

「新熱電変換材料の開発」では、低コスト環境低負荷なシリコン系バルク材料をターゲットし、マンガンシリコン (MnSi) とシリコンゲルマニウム (SiGe) の複合材料バルク作製プロセスを確立した。2W/Km 以下の熱伝導率、最大 ZT=0.6 まで達成した。また、シミュレーションを用いて界面非平衡系の効果を取り込んだ複合材料系の ZT 評価を行い、電子格子相互作用の小さい Ag や Au のような s 電子系金属を主成分とした材料の組み合わせで、Si や Mg<sub>2</sub>Si のような半導体単体と比較して ZT が 5 倍以上向上できることを提案した。

### (4) フレキシブル有機熱電材料及びモジュールの開発

2017 年度をもって本事業における本項目の研究開発は終了している。

(5) 実用化に適した高性能なクラスレート焼結体の研究開発

「性能指数向上に関する技術開発」では、中高温域での利用を想定した多接合型オールクラスレートモジュールの変換効率 $\eta=12\%$ を目指し、p型素子ならびにn型素子の目標性能を明確化した。各素子に用いるクラスレート焼結体の性能向上を図るため、その結晶構造、組成及び作製プロセスを検討した。

「モジュール化に関する技術開発」では、多接合型オールクラスレートモジュールについて、想定利用環境に適した設計及び試作・評価を行い、設計指針の確立に向けて課題を抽出し解決方法を明確化した。

(6) シリサイド熱電変換材料による車載排熱発電システムの実用化への要素技術開発

「 $1.5\text{W}/\text{cm}^2$ の熱電発電モジュールの開発」では、新たに熱サイクル耐久性評価を実施し、指標として検討すべき内容を抽出した。また、製作したモジュールの抵抗値測定や接合部の観察を行い、モジュール構造の課題を抽出すると共に解決にむけて課題の解決を進めた。

「 $1.5\text{W}/\text{cm}^2$ の熱電発電モジュール向け発電素子の開発」では、発電モジュール形態（配線部+接合材料+電極付き素子）での接合界面の観察、界面抵抗の測定等の耐久性評価により、特に接合部材及び電極間における技術課題を明らかにした。

研究開発項目⑥「排熱発電技術の研究開発」

(1) 排熱発電技術の研究開発

「高効率小型排熱発電技術開発」では、出力 $1\text{kWe}$ クラスに関して、2017年度に明確化したデバイス耐久性とサイクル制御の課題に基づき、膨張機、冷媒ポンプの耐久性改善に対する解決手段（膨張機の膨張機構の改善、冷媒ポンプの潤滑機構及びスラスト軸受構造の改善）を明確化した。また、サイクル制御では、起動、停止の際の過渡応答に対応可能な解決手段（制御フローの改善）を明確化した。システム実証先に関しては、実証試験の実施条件（排ガスの温度、量、成分や設備運転の自由度、設置スペース等）に基づき、候補先を検討した。また、抽出した候補先の条件を考慮して排熱回収用のコンパクト蒸発器の構想設計を完了した。

研究開発項目⑦「熱マネジメントの研究開発」

(1) 熱マネジメント材料の研究開発

「車載用高効率熱輸送システム」では、車両搭載に不可欠なLHPシステムの小型化に取り組んだ。昨年度開発した大熱輸送量ループヒートパイプ（LHP）システムをベースに、蒸発器と補償器（蒸発器への水供給を補償）を一体化したスペース効率の高い蒸発器を新たに開発することにより、小型化目標 $1.6\text{L}$ 以下の $1.53\text{L}$ で $3\text{kW}$ というLHPシステムを構築した。

「材料研究」では、昨年度の研究成果である高熱伝導微粒子分散流体について、LHPシステムに適用したときに想定される「多孔体ウィックへの体積・閉塞」について沸騰促進機構に基づいた対策を立案し、その効果を確認した。

## (2) 熱マネージメントの研究開発

「熱流れの計測解析技術」では、電気駆動車の熱流れを見える化するため、大規模空間における温度を高分解能かつ高精度に計測できるようにする技術を開発し、従来計測不可であった走行条件下でのノイズを大幅に抑制でき、高精度温度計測が可能であることを実車にて検証した。

「電気駆動車の計測技術開発」では、国内製の電気駆動車を使って、上記の高分解能な温度計測に加え、自動車全体の熱流れのモデル構築に必要な圧力（風速）、熱流量（壁面熱流束、壁面輻射量など）、流量（冷却水流量）等を詳細計測し、各部位の伝熱形態、伝熱量、伝熱経路を見える化した。

「自動車の熱流れのモデル構築」では、上記車両に対して、流れ解析モデルと熱伝導解析モデルを連成し、計測結果を活用することにより、温度場と圧力場（流れ場）の計算精度を同時に確保する3次元モデルを構築し、予測精度の開発目標を満足することを確認した。

## (3) 車両用小型吸収冷凍機の研究開発

「軽量化開発」では、車両向媒体に適した装置形状を設計、試作し数kW冷熱を確認した。また、システムを車載するため、車両形状に合わせてシステムをレイアウト設計し、試作完了した。また、搭載車両の加工等搭載の準備を完了した。

「作動媒体の開発」では、作動媒体を改良することによって、車載条件で運転可能な作動媒体候補を絞り込み、物性値の測定を行った。また、作動媒体候補を新たに検討し、物性値の測定を行い、吸収冷凍機への適用を検討した。

「分離壁構造開発」では、新型溶液熱交換器の製作と性能評価を行った、車載用途に適する中空糸膜／平膜の材質について検討し、より撥水性能、蒸気透過性能また穴孔径制御可能な材質及びモジュールの製作手法を検討した。

## (4) 車両用高効率排熱利用・冷房用ヒートポンプの研究開発

「吸着熱交換器開発」及び「吸着式冷凍サイクルのシステム開発」では、吸着熱交換器を高出力化させるための方策を検討し実機の製作を行った。さらに実機での評価を行い、年度目標の吸着熱量（瞬時値）を確認した。

「電気駆動車の熱量調査」では、国内製のハイブリッド車を用いて中間期を想定した環境下においてモード走行を実施し、エンジン部（燃料）、電気駆動部（電力）、排気ガス熱量、エンジン冷却水報熱量等のデータを取得した。これにより車両全体の熱エネルギーフロー、未利用熱として排出している熱量、温度帯などを解明した。



## 研究開発項目⑧「熱関連調査・基盤技術の研究開発」

### (1) 熱関連調査研究と各種熱マネジメント材料の基盤技術の開発

「排熱実態の調査、研究開発／導入シナリオの検討」では、前年度までに実施した15業種の工場に対する調査データの分析プロセスを検証、精査し、都道府県別の製品出荷額及びガス・熱供給、電力、清掃業の投入熱量の推定方法の見直しを含め、分析データの整合性の確認、精度向上を図った。また、総合エネルギー統計の2018年4月24日改訂に対応した推定データ及び図表の修正を行った。さらに、これまでの調査の成果を「産業分野の排熱実態調査報告書」として取りまとめ、シンポジウムで発表するとともに組合Webページ上で公表した。また、産業部門でのヒートポンプ技術等導入による省エネルギー効果や環境影響性、更にヒートポンプ技術の導入メリット及び同技術を普及拡大させるための方策を明確化することを目指し、関連する工場の生産プロセスでの熱フローを把握するため、工場のエネルギー利用状況等の調査を実施した。また、実際のヒートポンプ適用先を具体的に選定したモデルケース検証を実施し、開発したヒートポンプ等の導入効果を明らかにしていくために、2018年度は特に汎用性確保の観点から、シミュレーションモデルの基本構成の検討を行った。

「熱マネジメント部材の基盤技術の開発」では、モジュールの劣化予測のための技術開発を進めた。焼結体熱電材料の3点曲げ破壊強度の計測データを収集し、データベース化の準備を整えた。モジュール計測の国際標準化活動としてIEC-TC47/WG7における活動を継続実施し、規格の提案、審議をおこない国内ラウンドロビン試験及び国際規格提案をおこなった。また熱電材料の輸送特性の解析法を確立した。

更に、異方性を考慮した新規熱電計測装置のセットアップを完了し、得られる値が導入前のハンドメイド装置で測定したデータと一致することを確認した。PEDOT系材料において、厚さ方向のEG添加量や厚さ依存性等のデータ集積を行った。また、有機材料内部の微細構造を評価するために、有機材料を切削し断面出しを行った。ダイヤモンドナイフを装填したマイクロトームにより断面出しすることで、切削による断面の変形を大幅に低減できることを明らかにした。

「熱関連材料の計算シミュレーションとデータベース構築」では、熱関連材料データベースに収録された比熱容量、相転移温度、相転移エンタルピー、標準生成エンタルピーなどの平衡物性を化合物の構造と対応させるとともに、実験に基づくデータの不足を計算シミュレーションデータが補完することにより、平衡物性の予測技術を高度化した。これらの情報を相関解析しインタラクティブに表示するウェブアプリケーションを開発した。また、論文グラフのデジタル化機能を改良しデータベースと連動させた。これらの成果を展示会等において発表し普及に努めるとともに、データベースに求められる機能等のニーズ調査を実施した。

## (2) 高温熱供給ヒートポンプに適した冷媒の研究開発

「高温熱供給ヒートポンプに適した低GWP冷媒候補の開発及び物性情報の構築」では、出力温度 200℃に対応する新型冷媒候補の毒性予備試験と収率の高い合成法の開発を行った。また、合成過程における高選択率、高転化率、長寿命の触媒を見出した。さらに冷媒候補でのガス音速物性試験、PVT 性質測定、蒸気圧測定を行い、蒸気圧に関しては、概ね一致することを確認した。

「高温熱供給ヒートポンプ用途の新型冷媒候補の適性評価」では、出力温度 200℃に対する冷媒候補の類似物を用いてヒートポンプサイクルの熱力学的特性解析と熱交換特性評価を行った。また、冷媒候補に適した潤滑油を選定し、エラストマ適合評価を行った。

このほか、個別要素技術の探索・育成に向け先導的に取組むべき研究開発については、小規模研究開発スキームを活用して実施した。

## 4. 2 2018年度(助成)事業内容

### 研究開発項目④「ヒートポンプ技術の研究開発」

#### (1) 産業用高効率高温ヒートポンプの開発

「遷臨界サイクルヒートポンプの最適化技術の開発」では、ヒートポンプ試作機の高低段圧縮機において、磁気軸受の調整を行いながら、定格回転数まで運転確認を行った。設計条件より低負荷の条件ではあるが、2台の圧縮機を連結し定格回転数まで運転可能であることを確認した。統合解析シミュレーションについては、引き継ぎ解析を実施するとともに「熱関連調査・基盤技術の研究開発」と連携して、モデルケース検討を行うための調査を行った。

「ターボ圧縮機技術の開発」では、ヒートポンプ試作機用圧縮機の風損対策を進め、更なる効率向上と不燃性を実現のため、HF0系冷媒を作動媒体とした圧縮機的设计・製作に着手した。

「高温高圧熱交換器の開発」では、熱交換器の信頼性を確認するためにサーマルサイクル試験を実施した。

#### (2) 機械・化学産業分野の高温熱供給に適したヒートポンプシステム技術開発

「200℃温水出力機の適用プロセス検討と経済性効果の検証」では、160～200℃の高温熱需要が予測される有望プロセスでの市場規模・経済性効果を再精査した。乾燥プロセスでは、装置全体の初期費用が大きく、投資回収年数が長くなり導入が困難であり、化学プロセスでは、必要とする供給熱の温度が高い場合が多く、ヒートポンプサイクルでの性能が悪くなるため、導入メリットが厳しいことが判明した。

「200℃温水出力機の要素機器の開発」及び「200℃温水出力ヒートポンプのユニット開発」では、A3冷媒を用いた場合の200℃温水出力・加熱能力600kWでのヒートポン

プ超臨界サイクル計算を実施し、COP3.45になることを確認し、基本サイクルを決定した。また、140℃超の実証試験を実施し、200℃出力機開発に必要な基本データを取得した。さらに、微燃性冷媒の高温仕様でのリスクアセスメントを実施し、対策案を抽出した。

#### 4. 3 事業推移(2019年2月6日時点)

|                        | 2013年度           | 2014年度           | 2015年度          | 2016年度          | 2017年度        | 2018年度                 |
|------------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|---------------|------------------------|
| 実績額推移<br>需給勘定<br>(百万円) | 1,469<br>(経済産業省) | 1,991<br>(経済産業省) | 1,952<br>(NEDO) | 1,757<br>(NEDO) | 951<br>(NEDO) | 650<br>(NEDO)<br>当初予算額 |
| 特許出願件数<br>(件)          | 1                | 44               | 87              | 100             | 77            | 56                     |
| 論文等発表数<br>(報)          | 6                | 85               | 122<br>他に解説等2   | 145             | 142           | 63                     |
| 展示会出展等<br>(件)          | 1                | 1                | 9               | 8               | 11            | 15                     |

#### 5. 事業内容

プロジェクトマネージャーにNEDO省エネルギー部 近藤 篤を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理し、そのプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させる。

国立研究開発法人産業技術総合研究所 企画本部 副本部長 小原 春彦氏にプロジェクトリーダーを委嘱し、以下の研究開発を実施する。実施体制については、別紙を参照のこと。

また、必要に応じて、実施テーマの追加や委託調査について公募を行う。なお、公募の詳細は公募要領に記載する。

##### 5. 1 2019年度(委託)事業内容

###### 研究開発項目①「断熱技術の研究開発」

###### (1) 断熱材料の研究開発

「高強度高断熱性多孔質セラミックスの開発」では、シミュレーションにより得られた組織をゲル化凍結プロセスに随時フィードバックし、所望の熱伝導率を有する断熱材の試作を進める。加えて、原料の粒径と組成、凍結条件と不凍添加物、気孔形状と熱伝導率と耐熱性との関係を調査し1,500℃の耐熱性と0.2W/m・Kの熱伝導率を有する断熱材を開発する。実用化に向けて、連続的な断熱材成形方法の検討を行い、成形

工程全体での課題の抽出と併せて、並形形状で 300 個/月の作製を可能にする技術を確立する。また、乾燥体焼成時の加熱条件や試料設置条件が焼成収縮や焼成歪みに及ぼす影響を評価することで、最適な焼成工程の指針を得る。さらに、断熱材の高温機械的特性を測定し、市販高温断熱材と比較評価することで、高温炉操業中に必要な特性を把握し、実用化に向けた性能指標を確立する。

「高効率産業/工業炉における検証」では、2018 年度までに開発した断熱材を検証炉の一部へ施工し、施工時の課題抽出を行う。

#### 研究開発項目②「遮熱技術の研究開発」

##### (1) 革新的次世代遮熱フィルムの研究開発

2017 年度をもって本事業における本項目の研究開発は終了している。

#### 研究開発項目③「蓄熱技術の研究開発」

##### (1) 高密度/長期蓄熱材料の研究開発

「高密度蓄熱材料(低温用)の開発」では、蓄熱モジュールを設計、試作し、振動のない環境下で、この蓄熱モジュールの過冷却特性評価を行い、過冷却度 2K 以下が得られることを確認する。また、蓄熱実証対象システムの調査を行い、蓄熱密度、蓄放熱速度等の機器の要求仕様を明らかにする。

「長期蓄熱材料の開発」では、中温用の蓄熱モジュールを設計、試作し、温度 90°C の模擬熱源を用いて、この蓄熱モジュールの過冷却解除特性評価を行い、トリガーを付与してから 30 秒以内に過冷却解除が得られることを確認する。

##### (2) 車載用蓄熱技術(材料)の研究開発

2018 年度をもって本事業における本項目の研究開発は終了している。

#### 研究開発項目⑤「熱電変換材料・デバイス高性能高信頼化技術開発」

##### (1) 高性能熱電材料及びモジュールの開発

2017 年度をもって本事業における本項目の研究開発は終了している。

##### (2) 熱電デバイス技術の研究開発

「熱電デバイスの開発」では、基板付のスクッテルダイト系熱電モジュールの構造最適化設計を行い、その耐久性を確認する。

「熱電発電システムの開発」では、熱電発電ユニットの熱交換技術、発電技術及び熱電素子酸化防止技術を開発し、出力 200W の発電ユニットの設計、試作及び発電性能を検証する。

##### (3) 熱電変換による排熱活用の研究開発

「システム効率向上の検討」では、2018 年度から継続して、コージェネの排熱活用として中高温熱への展開を見据え、シリサイドを適用した中高温用熱電変換モジュール試作、評価を行う。また、低温モジュールも視野に入れ、実証可能なフィールド調

査を実施する。

「新熱電変換材料の開発」では、低コスト環境低負荷なシリコン系バルク材料をターゲットに、マンガンシリサイドバルク材料の高性能化により  $ZT=2$  を見通す。また、シミュレーションを用いて、高  $ZT$  を予想したカルシウムシリサイドの材料検証を行う。更に、シミュレーションを用いて、熱伝導率を飛躍的に低減可能な複合構造の界面構造設計を行う。

(4) フレキシブル有機熱電材料及びモジュールの開発

2017年度をもって本事業における本項目の研究開発は終了している。

(5) 実用化に適した高性能なクラスレート焼結体の研究開発

「性能指数向上に関する技術開発」では、変換効率  $\eta=12\%$  のモジュールに必要な p 型素子ならびに n 型素子について、2018 年度に明確にした目標性能の達成度を検証するとともに、各素子に用いるクラスレート焼結体の性能向上を図る。

「モジュール化に関する技術開発」では、2018 年度に明確化した多接合型オールクラスレートモジュールの設計指針に基づき試作したテストモジュールについて、変換効率の検証を行い、モジュール設計指針の確立を図る。

(6) シリサイド熱電変換材料による車載排熱発電システムの実用化への要素技術開発

「 $1.5\text{W}/\text{cm}^2$  の熱電発電モジュールの開発」では、モジュールの信頼性試験評価を継続して進め、評価を継続したなかで抽出された課題の解決を進める。特に接合については新たな検討も行い、課題の抽出、解決を進める。

「 $1.5\text{W}/\text{cm}^2$  の熱電発電モジュール向け発電素子の開発」では、発電モジュール形態(配線部+接合材料+電極付き素子)での接合界面の観察、界面抵抗の測定等の耐久性評価を継続するとともに、特に接合部材及び電極間における技術課題を解決し、耐久性 3,000 時間以上の発電素子を開発する。

研究開発項目⑥「排熱発電技術の研究開発」

(1) 排熱発電技術の研究開発

「高効率小型排熱発電技術開発」では、出力  $1\text{kWe}$  クラスに関して、2020 年度のシステム実証機の構築に向けて、2018 年度に明らかにした膨張機、ポンプ等のデバイス耐久性とサイクル制御の課題解決手段を踏まえて、5 年相当の耐久性を考慮したデバイス設計と、熱源の起動や停止時における排熱の温度や量の変動に対応したサイクル自動制御技術の構築を行う。また、排ガスの温度、量、成分や設備運転の自由度、設置スペース、試作したシステム実証機及び測定系を含めた全体構成等の観点でシステム実証先を絞込み、想定される実排ガスと設置環境に応じて目標の回収熱量が得られる排熱回収用のコンパクト熱交換器の設計を数値解析等によって行う。

## 研究開発項目⑦「熱マネジメントの研究開発」

### (1) 熱マネジメント材料の研究開発

2018年度をもって本事業における本項目の研究開発は終了している。

### (2) 熱マネジメントの研究開発

「熱流れの計測解析技術」では、2018年度に開発した技術をベースとして、走行条件（特に高車速域）での計測が可能な技術へと発展させる。

「電気駆動車の計測技術開発」では、2018年度の計測対象車に加えて、新たな電気駆動車における高速条件下含めた熱流れを見える化するために詳細計測を行なう。

「自動車の熱流れのモデル構築」では、自然対流熱伝達と輻射熱伝達もモデル化し、伝熱の3形態である、対流・輻射・伝導を網羅するモデルへと拡張することで、さらなる高精度化に取り組む。

### (3) 車両用小型吸収冷凍機の研究開発

「軽量化開発」では、搭載したシステムの動作確認を行い、夏季環境条件にて、排熱による車両走行時のシステム性能を評価する。余剰熱を蓄熱するシステムを検討し、デバイスを設計試作し、ベンチ評価で冷熱持続時間を確認する。

「作動媒体の開発」では、作動媒体候補について、引き続き結晶化温度、蒸気圧、粘性係数の測定を行い、その結果に基づいて冷凍性能を解析する。吸収器性能促進技術の適用も含めて、総合的な観点から作動媒体の最適化を図る。

「分離壁構造開発」では、車載用吸収冷凍機の各構成要素において中空糸と平膜構造の適用性を検討する。各構成要素について分離膜モジュールの設計と製作を行い、特性を評価し最適構造を検討する。更に、分離膜の表面改質による撥水性能向上を探索する。

### (4) 車両用高効率排熱利用・冷房用ヒートポンプの研究開発

「吸着熱交換器開発」及び「吸着式冷凍サイクルのシステム開発」では、2018年度に取得した高出力化タイプの吸着熱交換器の出力データをもとに、吸着式冷凍システムの車両搭載状態において冷凍能力の出力値についてシミュレーションを実施する。

「電気駆動車の熱量調査」では、国内製のハイブリッド車を用いて2018年度に取得した中間期に加え夏季、冬季を想定した環境下においてモード走行を実施しデータ計測を行う。これにより年間を通した（季節別の）車両全体の熱エネルギーフロー、未利用熱として排出している熱量、温度帯の見える化を図る。

## 研究開発項目⑧「熱関連調査・基盤技術の研究開発」

### (1) 熱関連調査研究と各種熱マネジメント材料の基盤技術の開発

「排熱実態の調査、研究開発／導入シナリオの検討」では、2018年度に引き続き、関係分室、関係機関、共同実施先と連携し、産業用ヒートポンプ等の導入検討に係る工場のエネルギー利用状況等の調査を実施する。また、シミュレーションモデルの基

本構成を拡張・活用し、実際のヒートポンプ等の適用先を具体的に想定したモデルケース検証を実施し、開発したヒートポンプ等の導入効果を明らかにしていく。

「熱マネジメント部材の基盤技術の開発」では、劣化加速試験をおこない寿命を推定する。前年度に引き続き高信頼性モジュールの開発のために必要となる材料の基盤的データベース整備に取り組み、新たに熱膨張率のデータの収集を行う。また計算材料科学に基づく高信頼・高性能な熱電材料の探索研究の手法を一部公開する。IEC-TC47/WG7において熱電モジュールの評価手法の規格策定のための活動を進める。

更に、異方性を考慮しセットアップされた熱電計測装置を用いて、PEDOT系以外の有機系・新炭素系材料の熱電特性データの集積を行う。また、有機材料内部の微細構造を評価するために、有機材料を切削し断面出しを行う技術を開発する。切削後の断面に研磨、並びにエッチングを施すことで、切削による断面変形を低減する。

「熱関連材料の計算シミュレーションとデータベース構築」では、熱関連材料データベースに収録された材料の組成・構造と熱伝導率、電気伝導率、熱膨張率、ゼーベック係数などの非平衡物性を対応させる機能等を開発する。また、論文グラフデータのデジタル化機能のウェブからの利用を実現する。更に、本データベースを用いて未利用熱エネルギー活用部材として優れた候補物質・材料を探索するとともに、データベース利用法を周知して活用を図る。

## (2) 高温熱供給ヒートポンプに適した冷媒の研究開発

「高温熱供給ヒートポンプに適した低GWP冷媒候補の開発および物性情報の構築」では、引き続いて、合成法の検討、効率的製造法の開発を進めると共に、反復吸入毒性試験と評価を行う。新型冷媒候補の一つについて、臨界定数を正確に決定し、実在流体部分の関数形を決定する。また、もう一つの新型冷媒候補の臨界点測定のための予備試験を行う。

「高温熱供給ヒートポンプ用途の新型冷媒候補の適性評価」では、出力温度200℃に対する新型冷媒候補を用いてヒートポンプサイクルの熱力学的特性解析と熱交換特性評価を行う。また、冷媒候補に適したエラストマ適合評価を引き続き行い、適用可能な材料を選定する。

このほか、2018年度に引き続き、個別要素技術の探索・育成に向け先導的に取り組むべき研究開発については、ステージゲート方式を採用した小規模研究開発スキームを活用して実施する。

## 5. 2 2019年度（助成）事業内容

### 研究開発項目④「ヒートポンプ技術の研究開発」

#### (1) 産業用高効率高温ヒートポンプの開発

「遷臨界サイクルヒートポンプの最適化技術の開発」では、圧縮機の風損対策を実

施しながらノルマルブタンを用いたヒートポンプ試作機試験を継続して実施し、中間目標である COP=3.5 を試験データとして検証する。また、最終目標に向けた HF0 系冷媒ヒートポンプ試作機の設計を開始する。モデルケース検討について、工場等の実データを基にしたシステム及び導入効果の検討を行う。

「ターボ圧縮機技術の開発」では、昨年度より開始した HF0 系冷媒用圧縮機の製作を行い、圧縮機単体試験装置を用いて、動作確認、性能確認を実施する。

「高温高圧熱交換器の開発」では、これまでノルマルブタンで得られたデータを基に、最終目標に向けた試作機用の HF0 系冷媒に対応できる熱交換器の選定を進める。

## (2) 機械・化学産業分野の高温熱供給に適したヒートポンプシステム技術開発

「200℃温水出力機の要素機器の開発」では、2018 年度に抽出した 200℃出力機に適したヒートポンプを構成する機能品の要素課題に対して、単体検証試験を実施する。また、新型冷媒候補(B)を用いた実証試験を実施し、ヒートポンプサイクルの各構成要素の部品性能の確認・健全性評価を行う。

「200℃温水出力機ヒートポンプのユニット開発」では、200℃出力機に適した新型冷媒候補(B)の熱物性データを用いて、高温ヒートポンプの性能係数を評価し、ヒートポンプの基本計画策定のための計画図を作成し、基本仕様を決定していく。

## 5. 3 2019年度事業規模

委託・助成事業

需給勘定 630百万円(継続)

事業規模については、変動があり得る。

## 6. その他重要事項

### (1) 評価の方法

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、技術評価実施規程に基づき、プロジェクト評価を実施する。

### (2) 運営・管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及び研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、本事業の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、本研究開発については、技術委員会における外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、随時、プロジェクトリーダー等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受けること等により進捗の確認及び管理を行うものとする。また、早期実



用化が可能と認められた研究開発については、期間内であっても研究を完了させ、実用化へ向けた実質的な研究成果の確保と普及に努める。

なお、最終年度又は終了翌年度中に、本研究開発の成果を成果報告会等で公開する。

(3) 複数年度契約・助成の実施

調査委託等を除き、2018～2020年度の複数年度契約・助成を行う。

(4) 知財マネジメントに係る運用

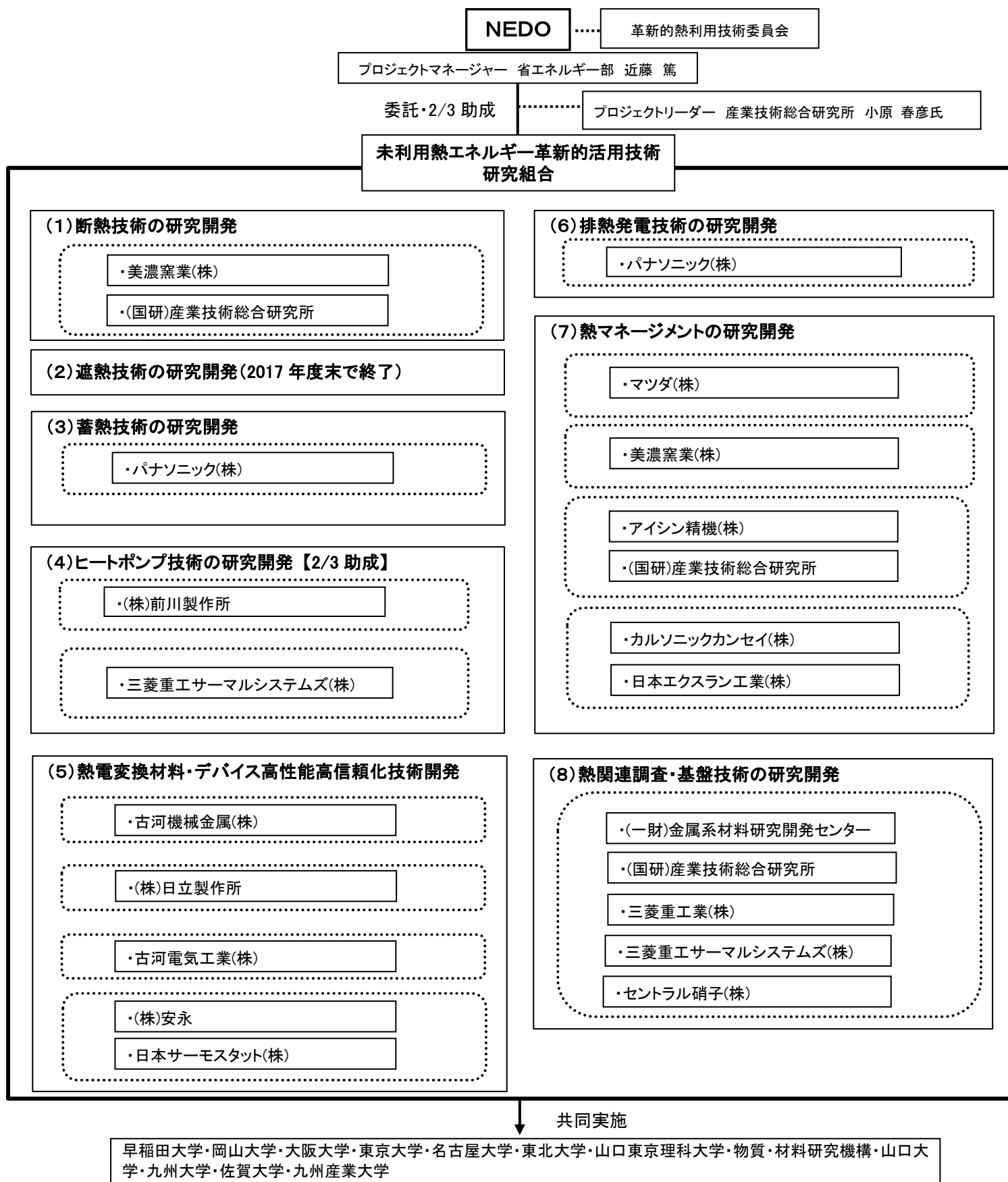
「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」に従ってプロジェクトを実施する。

7. 実施方針の改訂履歴

(1) 2019年3月 制定

(2) 2019年9月 体制変更に伴う別紙の変更

(別紙) 「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」実施体制図 (その1)



(別紙) 「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」実施体制図 (その2)

