

2020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」

中間目標

- 1) 1,500°C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 (2017 年度末)
- 2) 1500°C以上で使用可能なファイバーレス断熱材で圧縮強度 15MPa 以上、かつ熱伝導率 0.20W/m・K を有する断熱材料の開発 (2020 年度末)

最終目標

- 1) 1,500°C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 (2022 年度末)

研究開発項目②「遮熱技術の研究開発」

最終目標

- 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 (2017 年度末)

研究開発項目③「蓄熱技術の研究開発」

中間目標

- 1) 120°C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 (2017 年度末)
- 2) -20°C~25°C環境下で 12h 以上の保持期間を実現する蓄熱材の開発 (2017 年度末)
- 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 (2017 年度末)

最終目標

- 1) 蓄熱密度が 0.55MJ/L 以上であり、熱伝導率 2W/m・K 以上を有する複合蓄熱体の開発 (2018 年度末)
- 2) 120°C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 (2019 年度末)
- 3) -20°C~25°C環境下で 24h 以上の保持期間を実現する蓄熱材の開発 (2019 年度末)

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°C域を供給可能な産業用高効率高温ヒートポンプの開発

中間目標

- 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 (2017 年度末)
- 2) 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信頼性確立及び 100→200°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基本設計の完了 (2020 年度末)

最終目標

- 1) 200°Cまでの供給温度範囲に対応し、100→200°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 (2022 年度末)

(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

- 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 (2017 年度末)

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」

中間目標

- 1) 性能指数 $ZT=2$ を有する無機材料の開発 (2017 年度末)
- 2) 200°C~600°Cで使用可能な発電効率 12%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基本設計完了 (2020 年度末)

最終目標

- 1) パワーファクター (PF) $700\mu\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}^2$ を有する有機材料及び温度差 35°C以下で、出力密度 $20\mu\text{W}/\text{cm}^2$ を有するモジュールの開発 (2017 年度末)
- 2) $1.5\text{W}/\text{cm}^2$ の発電モジュール、発電素子の実用化開発 (2020 年度末)
- 3) 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 (2022 年度末)
- 4) 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 (2022 年度末)

研究開発項目⑥ 「排熱発電技術の研究開発」

中間目標

- 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 (2017 年度末)

最終目標

- 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 (2015 年度末)
- 2) 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 (2017 年度末)
- 3) 開発した出力 1kW クラス小型排熱発電装置の性能実証 (2019 年度末)

研究開発項目⑦ 「熱マネージメントの研究開発」

中間目標

- 1) 高効率ヒートパイプの開発 (0~50°Cにて熱輸送距離 5m、熱輸送量 1,500W、抗重力性、動力源レス) (2017 年度末)
- 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°C 以上、冷熱温度 5°C 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(2017 年度末)
- (b) 極寒 (-20°C) 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 (2017 年度末)
- 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 (2017 年度末)
- 4) 安全性評価を完了し、過冷却度 2K 以内、120°C 以下で、蓄熱密度 0.3MJ/kg (従
来材料比 2 倍) の高密度蓄熱材料(低温用)を搭載した蓄熱モジュール及び-20°C
~25°C 環境下で 24h 以上の保持期間を実現する蓄熱材料を搭載した蓄熱モジュ
ールの開発 (2020 年度末)
- 5) 工場等における、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 (2020 年度末)
- 6) 電気駆動車等の対流・輻射・伝導の高分解能計測技術の確立 (2020 年度末)
- 7) 数 kW 小型ヒートポンプシステムの開発
 - (a) 蒸発性能 1.7kW/19L の性能を有する冷房用ヒートポンプの開発 (2020 年度
末)
 - (b) 極寒 (-20°C) 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
ートポンプ開発及び実アプリケーションでの実証 (2020 年度末)

最終目標

- 1) 吸熱量 5W/cm² を有する吸熱デバイスの開発 (2017 年度末)
- 2) 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) (2018 年度末)
- 3) 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 (2022 年度
末)
 - (b) 極寒 (-20°C) 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 (2022 年度末)
- 4) 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 (2022 年度末)
- 5) 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 (2022 年
度末)
 - (a) モジュールを搭載した模擬システムでの検証を通じた、氷蓄熱と同等の蓄熱
密度 (従来材料比 2 倍) を有し、10°C 前後にて冷却・保冷を行う潜熱蓄熱シ
ステム及び-20°C~25°C 環境下で 24h 以上の保持期間を実現する長期蓄熱シ
ステムの確立

研究開発項目⑧「熱関連調査・基盤技術の研究開発」

中間目標

- 1) 排熱調査を実施し、研究開発シナリオの検討の完了 (2017 年度末)

- 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 (2017 年度末)
- 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 (2017 年度末)
- 4) 優れた新規材料、機器開発を加速するための評価技術の構築 (2020 年度末)
- 5) 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 (2020 年度末)

最終目標

- 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 (2022 年度末)
- 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 (2022 年度末)
- 3) 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 (2022 年度末)

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 理事 エネルギー・環境領域 領域長 小原 春彦氏の下で、以下の研究開発を実施した。

4. 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、不凍タンパク質添加により組織の均一化をはかり、シミュレーション結果をフィードバックさせることにより $0.20\text{W/m}\cdot\text{K}$ の熱伝導率、及び 1500°C の耐熱性を有する断熱材を開発した。加えて、耐熱衝撃特性と開発材特性との相関関係を考察した。また、スラリー調製工程と凍結工程の付帯作業の効率化と処理量増加により両工程のリードタイムを短縮し、並形で 300 個/月の作製を可能にする技術を確立した。

「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へ一部施工し、施工時における課題 (断熱材寸法精度の影響、モルタル施工性、適性目地厚み、天井構造の適性など) を抽出した。

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、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した。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した。

「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 20 秒以内に過冷却解除、40 秒以内で最大熱出力が得られることを確認した。

(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、熱電モジュールの構造を最適化し、その耐久性を検証した結果、基板無の熱電モジュールは 600°C、10,000h 作動しても発電性能の劣化が 10% 以内となり、長期耐久性が確認された。一方、耐久性試験途中の基板付熱電モジュールでは、600°C、1,000h 作動した段階で発電性能の劣化は 5% 以内であった。

「熱電発電システムの開発」では、熱交換技術を開発し、熱電発電ユニットを設計、試作した結果、熱電発電ユニットは、中高温排熱を電気に変換することができ、熱電素子両端の温度差が 500°C のとき、200W の電気出力を得ることができた。

(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 9 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。特に 500°C の熱源により 10kW/m² の出力を得られることを確認した。

「新熱電変換材料の開発」では、「システム効率向上の検討」で試作する 9 対熱電変換モジュールへ適用するべき、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(SiGe)の複合材料バルク作製プロセスを確立した。2W/K・m 以下の熱伝導率、最大 ZT=0.7 まで達成した。

(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、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 年度に明確化した目標性能の達成に向けて、各素子に用いるクラスレート焼結体の試作評価を行い、焼結体及びその作製プロセスの適

正化を進めた。

「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ついて、シミュレーションによる検証を行うとともに、テストモジュールを試作し変換効率及びその他の特性を評価し、モジュール設計指針の妥当性を確認した。

(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

「1.5W/cm²の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（接合界面の観察、界面抵抗の測定等）を実施し、上記モジュール接合プロセスに適用可能な電極（拡散防止層）付き発電素子の製造プロセスを確立した。

「1.5W/cm²の発電モジュールの実用化研究開発」では、出力密度 1.55W/cm²を達成した。モジュール接合部について新たな検討を行い、信頼性試験評価を進めた。モジュールの早期の実用化検討として使用用途の模索を行い、農業用途としてバイオマスボイラーへの展開を考案した。

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 1kWe 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った。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、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り込み、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った。

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

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の開発」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た。

「電気駆動車の計測実施」では、国内のハイブリッド車に加えて、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の詳細計測を行った。

「自動車の熱流れのモデルの構築」では、自然対流熱伝達と輻射熱伝達をモデル化し、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し、目標精度を達成した。

(3) 車両用小型吸収冷凍機の研究開発

「軽量化開発」では、車載システムの動作を確認し、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評価を開始した。また、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完了した。冷熱持続時間を確認するためにベンチ評価準備を行った。

「作動媒体の最適化開発」では、吸収器圧力 0.5kPa、吸収温度 50℃、結晶化温度 15℃以下の媒体を選定した。

「分離壁構造開発」では、中空糸膜と平膜構造の吸収冷凍機の適用性を検討し、各構成要素の分離膜モジュール設計を行った。

(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

「吸着熱交換器の研究開発」及び「吸着式冷凍システムの研究開発」では、2018 年度に取得した高出力タイプの吸着熱交換器の実機データから、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した。その結果、年度目標である平均蒸発性能 1.7kW/19L を達成した。

「吸着蓄熱システムの研究開発」では、フロン系冷媒の蓄熱性能を確認するとともに吸着現象以外の蓄熱方法も含め検討を実施した。

「湿度交換器の研究開発」では、除湿性能 0.044 g/sec (160g/h) 及び窓晴れ性効果を検証した。

「湿度交換器用透湿シートの研究開発」では、水浸漬後の通気度 100ml/(m²・Pa・s) 以下を確認した。

「熱輸送技術の研究開発」で、低外気時 COP1.5 以上を達成するための排熱量を確認した。

「車両熱計測技術開発」では、温度、輻射、自然対流を切り分けての計測及び CAE (Computer Aided Engineering) 解析を可能とした。

「電気駆動車の熱量調査」では、国産車ハイブリット車を用いて夏季、冬季、通期を想定した環境下においてモード走行を実施し、熱エネルギーフローを確認した。

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ー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した。

「ヒートポンプ等の統合解析シミュレーション技術の構築」では、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た。加えて、異なるヒートポンプ用途に対するヒートポンプ性能を解析する「産業用ヒートポンプ単体シミュレーター」において、基本 4 タイプの GUI (Graphical User Interface) と計算コアの開発を行った。

「熱マネージメント部材の評価技術開発」では、モジュールの劣化予測に必要な電極での引張強度や材料の 3 点曲げ破壊強度などの機械特性の収集及び、モジュールの高温耐久性試験を行い、基盤的データベースを充実させた。モジュールの評価に

関する国際標準化活動として IEC-TC47/WG7 において活動し、規格の提案、審議をおこなった。また、産業界や学术界の材料開発現場での使いやすさを念頭に、多結晶体などの複雑なナノ構造を持つ材料の熱伝導率を手軽に計算できるソフトウェア

「Simulator for Phonon Transport in Arbitrary Nano-Structure (P-TRANS)」を開発し、一般公開及びプレスリリースを実施した。さらに、本プロジェクト成果を活用した、異方性を考慮した縦方向熱電計測器が市販され、その装置を用いて有機系・新炭素系材料の評価を行い、測定精度に与える厚さ及び電気伝導度パラメータについて検討した。また、有機熱電材料の微細構造を電子顕微鏡により評価する手法を開発する課題において、ダイヤモンドナイフを用いた有機材料の断面出しにより、加工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、主として有機化合物からなるデータセットを熱関連材料データベースシステム中に再整備し、特に相転移温度、相転移エンタルピー変化などの平衡熱力学量をインタラクティブに表示するウェブアプリケーション、同時にその利用手引書を公開することで、組合員への利用提供を開始した。また、アルカリ土類金属酸化物固体と水蒸気の反応機構を解明すべく、MgO 固体の(001)面上での完全水和構造を出発点とした反応モデルを第一原理計算から構築し、定性的な反応熱評価に必要なモデルサイズを検討すると同時に、固体表面での水和反応、イオン拡散移動に伴うエンタルピー変化を量子計算から直接計算することで、化学反応のエネルギー変化を評価した。蓄熱構造体の開発では、スパーサー法によるポーラス Al を用いて蓄熱材との複合構造体を作製し、PCM (Phase Change Material) が 100%充填された蓄熱複合体を製造した。恒温槽、熱電対、データロガーで構成される冷却速度評価装置を組み立てて性能を評価した。また、粉末床熔融法 (Powder Bed Fusion: PBF) による 3D プリンタでラティス Al を造形して 5 種類の異なる気孔形態を持つラティス構造体を造型した。ポーラス Al は X 線 CT を用いて 3D 構造情報を取得し、FEM (Finite Element Method) 計算により熱伝導率を予測し、実測値との相対誤差 10%以内となることを確認した。高効率ヒートパイプ技術開発では、凝縮器モデルの詳細化、蒸発器内部の熱流動モデルの高精度化に基づいてループヒートパイプ (LHP) システム設計を行い、大型 LHP システムを構築した。各種冷却条件及び姿勢条件で動作試験を行い、熱輸送距離 2.6m、最大熱輸送量 6.2kW という世界最大熱輸送能力を実証することに成功した。

(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、B 冷媒候補¹の一つに対して、安定性・安全性評価として、反復吸入毒性試験を実施し、低毒性であることを確認した。また、輸送性質を測定し、PVT 試験を実施し、臨界定数を決定し、実測値に対して、精度の良いヘルムホルツ型状態方程式を完成した。さらに、

¹ GWP (Global Warming Potential : 地球温暖化係数) が小さく、高温域での利用でも、熱伝導性、熱安定性に優れていると共に、ヒートポンプサイクルの設計圧力を低減できる沸点の高い化合物を選択し、160°C出力用新型冷媒候補を A、200°C出力用新型冷媒候補を B として絞り込んでいる。

B 冷媒候補の製造方法に対して、効率的な触媒条件の組合せを見出した。

「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、B 冷媒候補の一つに対して、サイクル性能評価を行い、既存冷媒との比較で良好な性能を示すことを確認した。また、潤滑油の使用寿命を評価すると共に、樹脂材料の適合性試験を行い、適性のある絶縁材・エラストマを選定した。

このほか、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、小規模研究開発スキームを活用して実施した。

4. 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

「ヒートポンプの最適化技術の開発」では、昨年度より継続して R600 を適用したヒートポンプ試作機を用いた試運転を進め、相変化を伴う運転条件での試験確認を行った。TherMAT の共通技術として進めている統合解析シミュレータ開発において、ヒートポンプメーカーの立場から計測データの検証、ツールの使用確認等を行った。

「ターボ圧縮機技術の開発」では、R600 を適用したヒートポンプ試作機に搭載した圧縮機の改良を実施して風損対策の効果を確認した。昨年度より継続して HF0 系冷媒用ターボ圧縮機の設計製作を行い、ターボ圧縮機の組立を開始した。

「高温高圧熱交換器の開発」では、来年度より製作を開始するヒートポンプ試作機に搭載する HF0 系冷媒用高温高圧熱交換器について、R600 のデータを基に伝熱特性を検討し、選定に向けた検討を開始した。

（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℃温水出力機ヒートポンプのユニット開発」では、B 冷媒候補の一つに対して、委託研究で計測された熱物性データを受領し、200℃温水出力のヒートポンプとしてのサイクル一次評価を行った。COP3.5 以上の性能が試算され目標達成の目途付けができた。また、B 冷媒候補でのサイクル一次評価に基づき、詳細設計のためのヒートポンプの各機器の基本仕様を策定した。

「200℃温水出力機の要素機器の開発」では、200℃温水出力も対応可能な A 冷媒候補で、既存ヒートポンプを改良した実証機において、160℃超温水出力での要素試験を行い、機器要素の計画仕様の修正見直しを行った。

4. 3 事業推移(2020年3月31日時点)

	2013 ～ 2014 年度	2015 年度	2016 年度	2017年度	2018年度	2019年度
実績額推移 需給勘定 (百万円)	3,460 (経済産業省)	1,952 (NEDO)	1,757 (NEDO)	951 (NEDO)	673 (NEDO)	630 (NEDO) 当初予算額
特許出願件数 (件)	45	87	100	77	56	64
論文等発表数 (報)	91	122 他に解説等2	145	142	78	127
展示会展等 (件)	2	9	8	11	20	19

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 岩坪 哲四郎を任命して、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 理事 エネルギー・環境領域 領域長 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 2020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、2019年度開発断熱材を高強度化させるため、高温で焼結しても低熱伝導率を保持する原料及び助剤を検証するとともに、圧縮強度と耐熱性を確保可能な一方向配向性に優れた気孔壁を形成可能なプロセス因子を見出すことにより、圧縮強度15MPa以上を有する断熱材を開発する。また、凍結工程や凍結乾燥工程の改良を行い、並形断熱材500個/月が生産可能な製造工程設計を行う。

「高効率産業/工業炉における検証」では、検証炉にて開発部材の性能評価を行い、排熱削減50%省エネ炉の設計指針を決定する。

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

2019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) 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、熱電モジュール成形技術を開発し、耐久性が 600°C、5,000h 以上の基板付熱電モジュール技術の確立を目指す。

「熱電発電システムの開発」では、熱電発電ユニットの構造をコンパクト化し、出力 200W の小型熱電発電ユニットを試作する。

(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、2019年度に試作した熱電変換モジュールを、コージェネに適用し、コージェネの排ガスから電力回収実証を見据えた実証実験の設計を実施する。その設計をもとに熱源と熱電変換モジュールとの熱交換方式を確認する要素検討を実施する。

「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 $ZT > 1$ を見通す。また、「システム効率向上の検討」に適用する熱電変換モジュールに搭載するための材料スケールアップにおける検討を実施する。

(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、高性能クラスレート焼結体の開発・試作を行い、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 型素子の作製技術の確立を図る。

「モジュール化に関する技術開発」では、これまでの開発成果をもとにした多接合型オールクラスレートモジュールを試作・評価を行い、変換効率 $\eta = 12\%$ を持つモジュール化技術の確立を図る。

(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

「1.5W/cm² の発電モジュール向けの発電素子の開発」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（接合界面の観察、界面抵抗の測定等）を実施することにより、上記発電モジュールに適用可能な発電素子の製造プロセスを確立する。

「1.5W/cm² の熱電発電モジュールの開発」では、モジュールの早期の実用化検討対象として、農業用途のバイオマスボイラーへの展開実施と、その実証試験を行い、作物へ

の生育効果がある事を確認する。バイオマスボイラー用途の環境を想定した耐久評価を実施する。

研究開発項目⑥「排熱発電技術の研究開発」

2019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

「電気駆動車の計測実施」では、環境温度 $-10\sim 40^{\circ}\text{C}$ 、車速 $0\sim 130\text{ km/h}$ で熱流れの計測を行い、熱流れモデルの構築に必要なデータを取得するとともに実車ベースの熱流れの見える化を行う。

「自動車の熱流れのモデル構築」では、2019年度に構築したモデルの計算条件を拡張（環境温度 $-10\sim 40^{\circ}\text{C}$ 、車速 $0\sim 130\text{ km/h}$ ）したうえで、目標精度を達成する。

(3) 車両用小型吸収冷凍機の研究開発

「エンジン排熱利用吸収冷凍機の開発」では、課題対策したデバイスを設計試作し、車載評価でシステム制御を確立するとともに、数 kW 冷熱を確認する。また排熱を蓄熱するシステムの構成デバイスを車搭設計・試作する。熱交換器の更なる性能向上のため熱流センサを開発し熱交換分布を計測把握する。

「分離膜式吸収冷凍機のデバイス開発」では、分離膜式吸収冷凍機の構造設計と性能評価を行う。セミスケールの分離膜式吸収冷凍機を評価し、車載用分離膜吸収冷凍機の設計を行う。

(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

「吸着蓄熱システムの研究開発」では、極低温下における蓄熱性能の評価を行いシステム及び車両適用時の課題を明確にする。あわせて車両の適合性の調査を行う。また、高分子吸着剤塗膜ポリマーネットワーク高度化により、高耐水性吸着剤塗膜の基本塗布技術を確立する。

「車両熱計測技術の開発」では、吸気系・排気系の製品開発へ繋げるべく、検討を行い今後必要となる技術の効果を査定する。

「電気駆動車の熱量調査」では、海外製ハイブリット車を用いて夏季、冬季、通期における各環境下での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）熱流れを明らかにするためのデータを提供する。

「湿度交換器用透湿シートの研究開発」では、信頼性・耐久性を有した高分子吸着剤よりなる透湿シートにより、高透湿性シート技術を確立する。

(5) 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、安全性評価を完了した蓄熱材料を搭載した蓄熱モジュールにおいて、過冷却度 2K 以下、蓄熱密度、蓄放熱速度の要求仕様を、同時に満たすことを検証する。

「長期蓄熱材料の開発」では、中温用について、実証先における要求仕様を明らかにし、蓄熱モジュールにおいて、過冷却解除までの時間 30 秒以内、過冷却の保持時間 24 時間、蓄熱密度 0.1MJ/L、蓄放熱速度の要求仕様を、同時に満たすことを検証する。

(6) 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 1kWe クラスに関して、2019 年度に設計した排熱回収用コンパクト蒸発器を製作すると共に、同じく 2019 年度までに設計・構築したデバイスや制御技術を用いてシステム実証機の構築を行い、排熱発電効果実証を達成する。熱源の起動に伴う排ガスの温度と量の上昇に追従した起動運転、安定した排ガス温度と量での定常運転、熱源の停止に伴う排ガスの温度と量の低下に追従した停止運転試験を実施する。そして排ガス温度 200℃の定常運転の条件において、平均発電出力 1kW を達成し、発電効率についても評価を行う。

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、関係分室、関係機関、共同実施先と連携し、2019 年度までに実施した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結果とそのシミュレーションの結果から、開発したヒートポンプ等の導入効果を明らかにする。また、ヒートポンプ導入のモデルケースのライブラリ化を念頭に、2019 年度までの調査対象以外の業種・ラインへの開発したヒートポンプ等の導入ポテンシャルを検討・調査する。

「ヒートポンプ等の統合解析シミュレーション技術の構築」では、ヒートポンプ単体の性能が検討可能な「産業用単体シミュレーター」を構築し、本事業内で共有すると共に、詳細なモデルケースシミュレーションを実施し、年間性能も含めた導入効果を検証する。また、産業用プロセス全体の検討が可能な「産業用エネルギー統合シミュレーター」の開発を推進する。

「熱マネジメント部材の評価技術開発」では、様々な熱電材料の機械的強度データを収集し、モジュールの劣化予測に必要な材料データベースを構築する。IEC-TC47/WG7 においてモジュール発電性能の規格の提案、審議を行い、次期規格提案の内容を決定する。また、一般公開した熱伝導率計算ソフト「P-TRANS」に電子輸送計算機能を追加し、熱電特性や電子デバイスのジュール発熱・熱散逸が計算できるようにする。さらに、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有機系・新炭素系の熱電特性データを集積し、市販した縦方向熱電計測器によるスタンダードな計測手法を確立する。また、切削による変形を低減した有機材料断面出し技術を開発し、有機熱電材料内部のサブミクロンオーダーの微細構造観察技術を確立する。

「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、データベースシステム基幹部の基本データ構造を再構築することで、現在利用可能なデータ群に加えて別データセットの利用を可能とすると同時に、利用者の利便性を考慮したインタラクティブツールの機能拡張を行う。蓄熱材の反応機構解明について、反応の出発構造となる MgO(001)面上での反応モデルに加えて(110)面、(111)面、テラス構造、ステ

ップ構造等を出発点とした反応モデルを順次構築することで、MgO 固体表面に Mg(OH)₂ 結晶核が形成されるという反応仮説を検証すると同時に、酸化物固体表面での水和物形成過程のエネルギー変化を定性的に正しく見積もる手法を検討し、実際にエネルギー変化を計算する。蓄熱構造体の開発の開発では、FEM 計算を活用して、放熱速度に及ぼす蓄熱複合体の構造因子の影響を系統的に明らかにするとともに、計算状態図を利用して、融点の低い Al 共晶合金を見出し、ポーラスアルミニウム製造方法の低消費エネルギー化を達成する。FEM 解析の結果を整理して、放熱速度が高い複合構造体の構造因子を決定し、実際のサンプルで効果を検証する。高効率ヒートパイプ技術開発では、幅広い用途（特に大量熱輸送要求）に適用可能な LHP の設計技術、製作技術、性能評価技術を確立するため、昨年度の実験による課題の洗い出しを行い、LHP 要素の再設計、製作、実験により安定した大容量 LHP を実現する。また最適化設計手法を確立し、様々な熱要求に対する最適解を提案可能なモデルを確立する。

(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 冷媒候補の開発及び物性情報の構築」では、B 冷媒候補での輸送性質・PVT 物性の熱物性のデータを継続取得し、得られた飽和密度と臨界定数から、ヘルムホルツ型状態方程式の最適な関数形を決定する。また、B 冷媒 2 候補の合成法の効率化を検討し、最適な合成方法を確立する。

「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、B 冷媒候補に関して、最適なサイクルでの性能解析を行う。また、凝縮熱伝達予測法の精度向上を図ると共に、潤滑油を決定し、樹脂材料の適合性試験を継続して実施して、最適な絶縁材・エラストマを決定する。

このほか、2019 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 2020 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

「ヒートポンプの最適化技術の開発」では、HF0 系冷媒用ヒートポンプ試作機の設計製作を開始する。統合解析シミュレータを用いて実工場データを使用した導入効果等の検討を行う。

「ターボ圧縮機技術の開発」では、ターボ圧縮機の単体試験装置を用いて、HF0 系冷媒用ターボ圧縮機の性能を確認し、定格回転数での運転及び断熱効率 70%以上であることを確認する。

「高温高圧熱交換器の開発」では、ヒートポンプ試作機に搭載する HF0 系冷媒用高温高圧熱交換器の仕様を決定し、製作する。

(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℃温水出力機ヒートポンプのユニット開発」では、追加取得した B 冷媒候補での

200℃温水出力ヒートポンプのサイクル性能評価を完了させる。また、B冷媒候補を用いた200℃温水出力ヒートポンプの基本制御設計を確立し、開発機の基本計画を完了させ、製作図を完成させる。

「200℃温水出力機の要素機器の開発」では、B冷媒候補での200℃温水出力ヒートポンプの機能品の検証試験を実施し、採用部品を決定する。

5. 3 2020年度事業規模

委託・助成事業

需給勘定 650百万円（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。

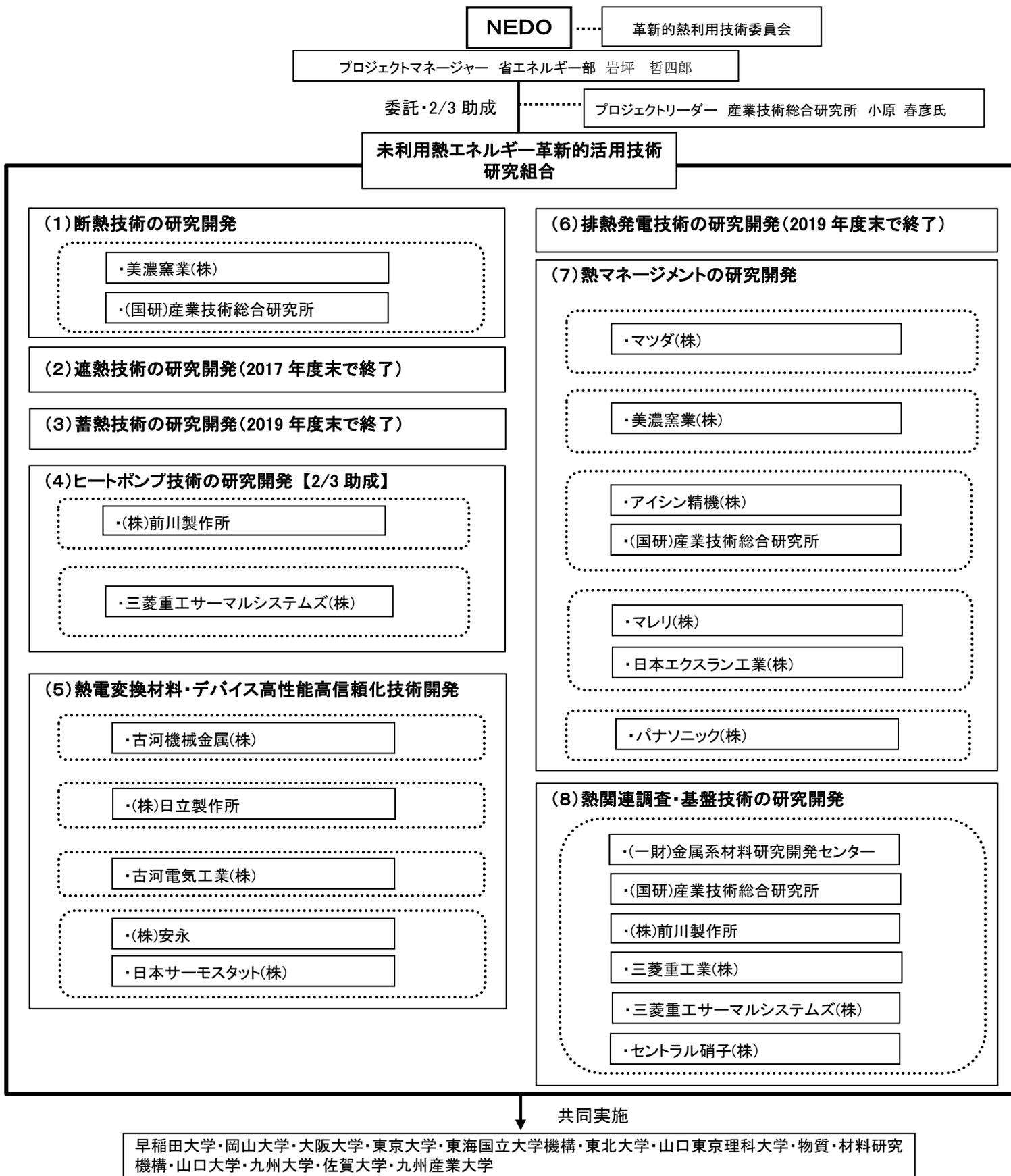
(4) 知財マネジメントに係る運用

「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) 2020年2月 制定

(2) 2020年5月 プロジェクトマネージャーの変更等に伴う変更



(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2)

