

平成28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条第一号二及び第九号

3. 背景及び目的・目標

①政策的な重要性

東日本大震災以降の電力需給状況を考慮すると、新たな省エネルギー技術の必要性は明白であり、未利用熱エネルギーの有効活用技術開発は、国が政策として押し進めるべき重要事業の一つである。

断熱技術・蓄熱技術・熱電技術の共通課題として、最終目標を達成するためには新規な材料開発が重要かつ必須であり、その点で我が国は世界的な卓越性、先導性を維持している。一方、大学での材料研究と企業での実用化技術の間の乖離が深刻な問題であり、両面に強みを持っている公的研究機関が箸渡し機能を発揮して、我が国の強みを産業競争力にスムーズに活かすスキームを確立することが重要である。

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、提案公募的なものは、他省庁を含め一部事業が存在するものの、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は未だ実施されていない。これまでの大型国家プロジェクトの蓄積や、国内各企業の外国企業に対する技術優位性は依然としてあるものの、大型予算をもつ海外勢が実用化に邁進しているため、将来的には遅れを取る可能性が大きくなっており、産学官連携による研究開発体制の構築が必須である。

③世界の取組状況

米国（DOE）、欧州（FP7）、中国、韓国等では既に大規模なプロジェクト研究をスタートしており、産学官が一体となった熱マネジメント実用研究を展開している。一例として米国DOEでは、「次世代自動車研究・開発プロジェクト」の一環として、GM・Ford・BMW等が参加し、産学官協同体制で排熱発電技術に取り組んでいる。

④本事業のねらい

一次エネルギーの大半は有効活用できておらず、年間1兆kWhにもものぼる未利用熱エネルギーの大部分が排熱として廃棄されている現状にある。また未利用熱の有効活用に関しては、自動車・住宅等幅広い分野において大きな課題となっている。

本事業では様々な環境下における未利用熱エネルギーの再利用に注目し、広域に分散した熱を有効利用する技術の基盤となる熱マネジメント技術として、熱を逃さない技術（断熱）、熱を貯める技術（蓄熱）、熱を電気に変換する技術（熱電変換）等の技術開発を一体的に行うことで、未利用熱エネルギーを経済的に回収する技術体系を確立すると同時に、同技術の適用によって自動車・住宅等の日本の主要産業競争力を強化し、社会全体のエネルギー効率を向上させる、新たな省エネルギー技術の中核とした新たな産業創成を目指す。

【委託事業】

研究開発項目①「蓄熱技術の研究開発」

最終目標（平成34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
- 3) 蓄熱材の占有体積が 9 割以上であり、蓄熱材単体の 50 倍以上の熱伝導率を有する複合蓄熱体の開発

中間目標（平成29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②「遮熱技術の研究開発」

最終目標（平成34年度）

- 1) 理論限界近傍の可視光線透過率 70%以上、日射熱取得率 40%以下（可視光線反射率 12%以下、カット波長 850～1800nm）の遮熱フィルムの開発

中間目標（平成29年度）

- 2) 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 850～1400nm）の遮熱フィルムの開発

研究開発項目③「断熱技術の研究開発」

最終目標（平成34年度）

- 1) 1500℃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
- 2) 上記開発材料等を産業・工業炉に適用し、50%以上の排熱削減を実証

中間目標（平成29年度）

- 1) 1500℃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④「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（平成34年度）

- 1) 性能指数 $ZT=2$ を有する有機材料の開発及び当該材料を用いたモジュールの開発
- 2) 性能指数 $ZT=4$ を有する無機材料の開発及び当該材料を用いたモジュールの開発

中間目標（平成29年度）

- 1) 性能指数 $ZT=1$ を有する有機材料の開発
- 2) 性能指数 $ZT=2$ を有する無機材料の開発

研究開発項目⑤「排熱発電技術の研究開発」

最終目標（平成34年度）

- 1) 200℃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開発
- 2) 200℃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開発
- 3) 工場等における、開発した排熱発電装置を利用した未利用熱削減効果の実証

中間目標（平成29年度）

- 1) 200℃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

研究開発項目⑥「ヒートポンプ技術の研究開発」

最終目標（平成34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
- 2) 60℃以下の熱源で、供給温度-10℃までの幅広い温度範囲に適合するヒートポンプシステムの開発

中間目標（平成29年度）

- 1) 200℃までの供給温度範囲に対応し、80→160℃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) 75℃以下の熱源で、供給温度-10℃を実現するヒートポンプシステムの開発

研究開発項目⑦ 「熱マネージメントの研究開発」

最終目標（平成34年度）

- 1) 高効率ヒートパイプの開発 (-20~50℃にて熱輸送距離 10m、熱輸送量 3000W、抗重力性、動力源レス)
- 2) 吸熱量 10W/cm² を有する吸熱デバイスの開発
- 3) 数 kW 小型ヒートポンプシステムの開発
 - (a) 体積 55L 以下重量 30kg 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 0.6 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 (温度) 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
- 4) 車両トータルの熱移動を制御し、上記省エネシステムを組み合わせ、最適化することで、総合損失を 75% (走行距離 1.6 倍) まで低減したトータル熱マネージメント技術の開発。

中間目標（平成29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 1500W、抗重力性、動力源レス)
- 2) 吸熱量 5W/cm² を有する吸熱デバイスの開発
- 3) 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 (温度) 以上の作動が可能な暖房用ヒートポンプの開発
- 4) 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（平成34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を完了する。
- 2) 優れた新規材料、機器開発を加速するための評価技術を提供する。
- 3) プロジェクト内部の共通基盤ツールとして、新材料探索の基盤情報を提供する。

中間目標（平成29年度）

- 1) 排熱調査を実施し、研究開発シナリオの検討を完了する。
- 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を明確化する。
- 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、体系化を行う。

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 楠瀬 暢彦を任命して、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。

国立研究開発法人産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 エネルギー・環境領域研究戦略部 研究戦略部長 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した。

外部有識者によるプロジェクトの中間評価を実施し、その結果を踏まえて一部テーマについて研究開発内容の充実を図った。

4. 1 平成27年度（委託）事業内容

研究開発項目①「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、蓄熱密度 0.2MJ/kg のゲスト物質を明確化するとともに、低過冷却・高応答を検証した。「高密度蓄熱材料(中/高温用)の開発」では、酸・塩基反応の 120℃までの低温化の原理検証を行うとともに、1MJ/kg 以上の蓄熱材料候補を抽出した。

「長期蓄熱材料の開発」では、12h 以上の保持期間を実現する組成を明確化するとともに、過冷却解除蓄熱モジュールにて高出力密度を確認した。

(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、母材合金分配比の最適化により伝熱パスを強化した。構造体と市販潜熱蓄熱材を複合化して市販蓄熱材比 5 倍の実効熱伝導率ポテンシャルを実証した。

「蓄熱材の低コスト化」では、原料原単価：3 割削減技術を実機試作で実証した。寿命予測についても劣化要因の特定を完了し、寿命評価法を確立した。

「蓄熱材の高密度化」では、細孔径 10nm の多孔体の有機/無機ハイブリッド化により再生温度を 66℃⇒60℃に低下させた。さらに、シリカ/カーボンより高密度化可能な MOF(細孔径 2nm 以下)の合成に着手し、2nm 以下の細孔内にも形成可能と考えられる感温分子を数種類発見した。

「新規蓄熱材の探索」では、高密度蓄熱が期待されるアルカリ土類金属のアンモニア塩、硫化塩に対して、第一原理計算から原理的な蓄熱密度と反応転移温度の値を評価した。

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

前年度に作成した試作フィルムの結果に基づき、新規ポリマーの設計や重合条件検討、さらに積層精度を高めるための積層装置の設計を実施した。

これらの検討結果に基づき設計した積層装置を製作するとともに、新規ポリマーを適用したフィルム製膜試験を実施し、前年度に試作したフィルムに対して、透明性を5%程度向上させた。

また実物の建築物を用いた革新的次世代遮熱フィルムの省エネ性能評価を進め、夏場の冷房使用下において、市販品に対し、10%程度優れる省エネ効果を実証した。さらに、窓へ貼合する粘着剤について、耐候性に優れた処方を選定した。

研究開発項目③「断熱技術の研究開発」

(1) 断熱材料の研究開発

「産業炉/熱マネージメントシステムの開発」では、前年度までに実施したエネルギー収支シミュレーション結果と実炉から取得したデータの比較を行い、ほぼ一致していることからエネルギー収支シミュレーションの妥当性を確認した。

「高強度高断熱性多孔質セラミックスの開発」では、1400℃で安定な断熱材原料を検討し、熱伝導率 0.24W/mK、圧縮強度 13.1MPa を有する断熱材の製造プロセス因子を明らかにした。また、試作した大型断熱材料(240mm×116mm×65mm)を電気炉に組み込み、消費電力を測定した結果、想定どおり約27%(従来比)の電力量削減を確認した。

「耐高温高効率蓄熱放熱システムの開発」では、従来のセラミック質蓄熱材料と比較して、セラミックシェル構造蓄熱部材の蓄熱速度が約1.5倍となることを確認した。また、化学蓄熱体開発では、蓄熱モジュールの大型化を実施し、使用条件についての検証を完了した。

「高効率廃棄ガス熱回収システムの開発」では、部分的成果となる1,300℃まで使用可能な耐高温熱交換器の開発と検証を終え、プレスリリース及び販売を開始した。

「高効率産業/工業炉における検証」では、検証用ラボスケール炉を作製し、各開発部材の組み込みを実施し、熱収支データの取得及び課題抽出を完了した。

研究開発項目④「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

「熱電材料の高速合成・評価技術開発」では、薄膜試料の合成で擬3元系の組成の異なる薄膜試料を1日あたり400試料製造する技術を開発し、バルク試料では1日あたり100試料を合成する高速化を実証した。またバルク材料の1000点以上の熱電特性を1日で評価する手法を開発した。また、積層構造無機材料の層間に有機分子を挿入した無機有機複合材料において、出力因子を増加させつつ熱伝導率を低下させる新材料設計指針を確立した。

「導電性高分子材料・素子の研究開発」では、出力因子（PF:パワーファクター）の増大を狙い PEDOT への誘電体や水分の影響を詳細に調べ、性能向上に関する指針を得た。また熱電モジュールで $4.54 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ の高い出力密度を得た。

「炭素系熱電変換デバイスの技術開発」においては、カーボンナノチューブと高分子を複合化した熱電材料の性能向上を行った。カーボンナノチューブファイバーの直径制御、及びカーボンナノチューブファイバー間の距離の制御を通じて、出力因子 $500 \mu\text{W}/\text{K}^2\text{m}$ を達成した。

(2) 熱電デバイス技術の研究開発

「熱電材料の開発」では、 $ZT=1.2$ のスクッテルダイト系熱電材料の開発に成功し、準量産化規模対応の $10\text{kg}/\text{バッチ}$ の材料合成技術とともに、世界最大級となる直径 200mm ペレットの焼結成形技術、素子整形技術を開発した。

「熱電デバイスの開発」では、変換効率 $\eta = 8\%$ 、 600°C において約 1 年の耐久性を有する熱電デバイス製造技術を確立した。

(3) 熱電変換による排熱活用の研究開発

5kW のマイクロガスコージェネ装置を導入し、前年度までに試作評価を行った性能指数 ZT が異なる材料の熱電変換モジュールとモジュール通過熱量増大を狙った温水配管を本コージェネ装置へ組み込み、コージェネ排温水 (65°C) からの熱電変換による発電計測を実施した。その結果、熱電変換モジュールでの温度差として 55°C を達成し、 ZT に依存してそれぞれ $22\text{W}/\text{m}^2 \sim 780\text{W}/\text{m}^2$ の性能データを得た。

シリサイド系熱電変換材料に注目し、シミュレーションにより新規材料であるカルシウムシリサイドを開発対象に加えることを決定した。また、マンガンシリサイド薄膜を対象に、組成・元素調整によるゼーベック係数の向上と、それを母体としたシリコン薄膜との多積層化により低熱伝導率化の可能性を明らかにした。

(4) フレキシブル有機熱電材料及びモジュールの開発

「高機能導電性ポリマーの開発」では、熱励起効率の高い材料に高キャリア移動度を付与するために新たな分子設計を検討し、いくつかの指針を得た。「CNT 及び周辺材料の開発」では、CNT の分散、配向状態を制御する材料開発に加え、ゼーベック係数を制御する新たな添加剤の方針を得た。

「無機熱電材料を利用した熱電変換材料の開発」では、無機材料のナノ粒子化と有機材料とのハイブリッド化を進め、無機材料の更なる性能向上に加え、ハイブリッド化に対する熱安定性付与の必要性についての指針を得た。

「フレキシブル熱電変換モジュールの開発」では、印刷用熱電インク、プロセス、モジュール構造の開発と試作を進めて性能試験を行うことで、更なる性能向上に向けた課題を明確にした。また、実用化を意識したコンセプトモデルを試作し、展示会に参考出品してニーズの把握に努めた。

(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

「高性能化に関する技術開発」では、ナノ焼結技術によりナノ組織のサイズを制御し、熱拡散率が低減することを確認した。「p型特性発現に関する技術開発」では、構成元素の組成比を制御して、p型特性を発現させる組成を得る条件を明らかにした。「モジュール化に関する技術開発」では、クラスレート焼結体素子のモジュール化を目的に、電極部の抵抗を評価して電極接合に関する技術に目処をつけた。

(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

「Mg₂Si 熱電変換材料・発電素子の量産化技術」では、熱電特性及び機械特性の面内偏差±10%以内を満たすφ70mm焼結体製造技術を開発した。また、焼結体の熱電特性及び機械特性の面内偏差を評価する手法の有効性を確認した。電極形成技術では、シリサイド系焼結体に適した複数の乾式成膜技術を開発し、量産ライン設計への導入に目処をつけた。

「車載用熱電発電モジュールの開発」では、接合方法の改良を行うことで小型モジュールにおいて0.7W/cm²（熱源温度600℃）以上の高出力密度化を達成するモジュールを複数の材料/温度仕様で作成した。車載インターフェースに整合したモジュール構造のチューニング及びモジュール耐久試験については、モジュール構造や熱源温度の違いによる耐久性への影響についての知見を得た。また、今後おおよそ35mm×35mmまでの大型化を予定しているモジュールの耐久性試験の評価環境の整備も行った。

研究開発項目⑤「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、200℃以下の中低温排熱に対し、低GWP・不燃冷媒の基本仕様を明確化した。また、出力1kWeクラスの試作試験機で発電効率10.3%を実証するとともに、実工場排熱を用いた課題抽出実験を実施した。さらに、市場調査として主として工場での排熱を有するユーザヒアリングにより小型発電出力帯（1～100kWeクラス）の需要を明確化した。出力10kWeクラスでは、サブスケール5kWeでの小型タービンと気体軸受の性能評価を実施した。

「出力50kWeクラスの余剰蒸気利用排熱発電技術開発」では、ガスジェネレータ（コンプレッサ/タービン）の翼車仕様を明確化し、設計試作を完了した。

研究開発項目⑥「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

前年度までに開発したマルチフィジックス統合解析シミュレータを用いて様々な運転条件における解析を行い、80℃→160℃加熱でCOP:3.5を達成する見通しを得た。この結果を受けて、試作するヒートポンプシステムの設計を行った。

ターボ圧縮機を試作し、この試作機による中間目標COP達成の可能性を確認するため試作機試験装置により性能試験（作動媒体：N₂, R134a）を開始した。また、小型モ

デルでの試作熱交換器の伝熱特性試験により各熱交換器の相関式を導出し、最適化シミュレーション技術を確立した。加えて、使用材料の耐熱性試験等も行い試作機製作の見通しを得た。さらに、断熱材の性能及び経年劣化確認のため、ターボ圧縮機の試作機試験装置に断熱材を施工し、評価試験を開始した。

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

「冷媒開発」では、新型冷媒候補(A)の安定性・安全性評価を行い、燃焼性、毒性、高温度域での安定性の評価結果より、ヒートポンプに有効な冷媒候補を選定した。また、熱力学性質では、高温度域において、より高精度でPVT性質を測定できるように装置仕様を新たに検討し、新型冷媒候補(A)のPVT性質を測定した。輸送性質では、高温条件を含む熱伝導率、粘性係数を測定し、物性式を構築した。さらに、合成実験設備により製造工程を検討し、各評価に必要なサンプルを製造した。新型冷媒候補(B)については、有望な候補を抽出して合成法を検討し、高純度のサンプルの合成を行った。

「機器開発」では、選定した新型冷媒候補(A)を用いて、各種ヒートポンプの熱力学的性能解析を行い、COPが3.5以上となる実機適用サイクルとして2段圧縮抽気サイクルを選定し、構成機器の仕様を決定した。さらに、凝縮要素試験装置を用い、新型冷媒候補(A)の高温での凝縮伝熱特性を明らかにした。

(3) 低温駆動・低温発生機の研究開発

「低温駆動基本サイクル」において、前年度に製作した水冷式実用性確認用供試体により、冷水発生サイクルの性能評価を行い、熱源水温度の下限である60℃の温水から冷却水温度30℃の条件において7℃の冷水が得られることを実証した。これにより、当該技術範囲について早期実用化の目処を得た。また、凝縮器と吸収器を空冷化した二段再生吸収を採用した空冷式実用性確認用供試体についてサイクル設計及び詳細設計結果を基に試作機を製作した。「氷点降下剤を用いた新冷媒」では、原理確認実験装置の運転研究によりサイクル挙動を把握するとともに、実機条件を想定した防食実験を実施した。これらの実験結果と凍結温度挙動の詳細計測により、凍結温度が-30℃以下となる氷点降下剤と腐食抑制剤の混合量条件を明らかにした。

「新吸収剤」では、空冷熱交換器の要素伝熱評価を実施するとともに、腐食に関する問題により候補成分の再選定を行った。このためサイクル計算は実施しなかった。

研究開発項目⑦「熱マネージメントの研究開発」

(1) 熱マネー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、ループ式ヒートパイプ(以下LHP)について、自動車に適用する上で重要な過渡状態検討を実機・シミュレーションで行い課題を明確化した。

「材料研究」では、微粒子分散流体について検討を行い、アスペクト比大の微粒子

形状、SAM（自己組織化単分子膜）等を利用した分散手法により伝熱特性を向上させ、最適な伝熱流体の設計指針を確立した。

「熱計測技術」では、開発した熱エネルギー移動評価装置を用いて固液界面の熱エネルギー移動評価を実施し、固液界面に界面改質層を付与した時の熱移動促進効果を明らかにした。

（2）熱マネージメントの研究開発

「モータ領域」では、性能向上のための吸熱モジュール組み付け構造及び製作技術を開発した。また吸熱モジュールの基本構造、回転体の温度計測技術、熱移動モデル等を開発した。これらの成果を活用し、今年度を目指していたコイル部からの熱移動量の確認を実施した。さらに、モータ熱移動モデルにより、中間目標達成までのシナリオと研究計画を明らかにした。

「インバータ領域」では、パワーデバイスと一体化できる吸熱素子の基本構造、素子前後の温度分布計測技術、熱移動量を算出する熱移動モデル等を開発した。これらの成果を活用し、今年度を目指していた吸熱素子の熱移動量の確認を実施した。さらに、熱移動モデルにより、中間目標達成までのシナリオと研究計画を明らかにした。

（3）車両用小型吸収冷凍機の研究開発

「軽量化開発」では、試作機の性能評価により性能影響因子を絞り込み、改良の指針を得た。また、評価中の作動媒体の分析、内部腐食状況を確認して腐食促進因子を確認し、対策を検討した。

「作動媒体の開発」では、結晶化温度を下げる多成分系作動媒体の絞り込みを行った。蒸気圧、結晶化温度、粘度の測定から最適組成比の検討を可能とした。

「分離壁構造開発」では、性能評価及びサイクルシミュレーションを実施した結果から、分離壁型にすることで約2.5倍の性能向上が見込まれることが分かり、小型化に効果があることを確認した。

また、分離壁型吸収冷凍サイクルと分離壁型吸収器、再生器の振動時の溶液の飛散状況の評価では、分離壁型吸収器、再生器ともに振動時の作動媒体と冷媒との直接接触、あるいは混合が発生しないことを明らかにした。

（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

「吸着式冷凍システム」では、吸着材材料の研究開発において吸着材の熱交換器への担持技術開発により、平成25年度に対し1.8倍～2.3倍となる吸着熱交換器性能を達成した。また、1BEDシステム性能では最大蒸発性能で1.5kWを達成した。安定的に性能が得られる吸着式冷凍システム運転制御技術については、サイクルタイムを決め連続運転における性能確認と課題抽出を実施した。さらに、本システムの車載検討に向けて車両廃熱量確認等を実施した。

「廃熱回収システム」では、直接熱交換型排熱回収器の小型車での実車評価において、排熱回収温度効率86%を達成した。また、高熱密度な潜熱蓄熱材として選定した材料を

用いて蓄熱性能 143kJ/min を達成した。さらに、吸着冷凍式システム向けに開発した高性能吸着材の用途検討を行い、高熱密度の吸着特性を活かす車両暖機性能向上を目的とした「吸着蓄熱システム」等を立案した。

研究開発項目⑧「熱関連調査・基盤技術の研究開発」

「排熱実態の調査、研究開発／導入シナリオの検討」では、鉄鋼、化学等熱多消費型の9業種の未利用排ガスの排出・活用状況を定量評価できる形としてまとめた。また、住宅の熱負荷シミュレーションの基盤技術を構築し、広く受け入れられるモデルを材料の観点から立案し、温暖・寒冷・暑熱の三気候の条件で、建物部位で生じる熱移動を定量化し、広域で活用できるデータ・知見を得た。さらに、個別分散型空調システムの詳細評価試験及び制御特性の理論的解析を行い、実動エネルギー評価法の原案の作成を行った

「熱マネージメント部材の基盤技術の開発」では、整備したモジュール評価装置を活用して技術組合参画機関の熱電モジュールの性能評価を実施し、性能及び信頼性向上にむけた課題抽出を行った。また、性能の経時変化等のデータ取得を加速するために、熱電材料の同時ゼーベック係数計測に取り組み、5試料同時計測に成功した。さらに、新型冷媒候補2種の地球温暖化係数(GWP)、及び1種のISO燃焼性等級を決定した。

「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、無機バルク材向けの熱電計算シミュレータを拡張・整備して、熱電性能向上に向けた系統的ドーピング設計シミュレーションを行った。この結果を応用して中・低温領域の層状セレン化スズ材料の熱電効率向上について重要な知見を得た。また、既存糖アルコールの系統的なモデリング・シミュレーションを実行し、物性を詳細に解析する事で、既存分子の性質を超えうる分子構造を計算から予測した。さらに、融解熱や生成エンタルピーなどについて熱物性データの収集と整備を行うとともに、物性値の相関解析技術、物性データの評価技術の開発を進め、蓄熱技術等の研究開発に重要な物性データを体系化された高品位のデータセットとして提供した。

なお、ナノ材料技術の急速な進展等に伴い、近年様々な取組により大きな性能改善の可能性が期待される「熱電変換材料・デバイス高性能高信頼化技術開発」について、これまでに取り組めていない新たな技術を発掘し、本格研究への移行の可能性を確かめることを目的として小規模研究開発の公募を行い6つのテーマを採択して研究開発を開始した。

4. 2 事業推移(平成28年2月22日時点)

	平成27年度
実績額推移 需給勘定(百万円)	1,850
特許出願件数(件)	81
論文発表数(報)	13 他に解説等2
フォーラム等(件)	0 展示会出展9

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 楠瀬 暢彦を任命して、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 エネルギー・環境領域 エネルギー・環境領域研究戦略部 研究戦略部長 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 平成28年度(委託)事業内容

研究開発項目①「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」、「高密度蓄熱材料(中/高温用)の開発」及び「長期蓄熱材料の開発」について研究開発を行い、中間目標の達成を目指す。

「高密度蓄熱材料(低温用)の開発」では、高密度化と最適温度を両立するゲスト物質候補を抽出する。

「高密度蓄熱材料(中/高温用)」では、官能基の修飾密度を向上する合成プロセスを明確化するとともに、1MJ/kg以上を目指す蓄熱材料候補の有効蓄熱密度を定量化する。

「長期蓄熱材料の開発」では、過冷却安定性の向上と過冷却解除の信頼性向上を両立する蓄熱材料組成を抽出する。

(2) 車載用蓄熱技術(材料)の研究開発

「蓄熱構造体の開発」、「蓄熱材の低コスト化」、「蓄熱材の高密度化」及び「新規蓄熱材料の探索」について研究開発を行い、中間目標の達成を目指す。

「蓄熱構造体の開発」では、高蓄熱密度材との複合化を検証し、蓄熱複合体としての製法、耐久性、性能劣化、安全性の基礎検討を実施する。

「蓄熱材の低コスト化」では、蓄熱材の水熱耐久性の向上検討を実施する。

「蓄熱材の高密度化」では、高密度化に適した MOF の構造検討と、その細孔内に形成可能な感温分子構造、形成技術の検討を行う。

「新規蓄熱材の探索」では、第一原理計算から蓄熱密度、反応温度の理論限界値を明らかにし、高密度蓄熱が期待される化合物に対して化学反応素過程のエネルギー変化を解析する。

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

「新規光学設計における超高精度積層技術の開発」、「次世代遮熱用ポリマーの開発」及び「次世代遮熱フィルムのフィルム加工技術の開発」「次世代遮熱窓材の評価技術の開発とその商品設計」について研究開発を行い、中間目標の達成を目指す。

前年度に製作した新規積層装置を活用し、反射波長 850~1400nm である革新的次世代遮熱フィルムの製膜及び新規ポリマー重合のスケールアップを目指した課題の明確化を行う。また粘着層を含め、革新的次世代遮熱フィルムに必要なフィルム加工を一体化した連続工程で試作実験を行い、得られたフィルムの実用特性を評価することでフィルム加工におけるスケールアップの課題を明確化する。さらに省エネ効果の実証として、壁の熱流入までを考慮した高精度な省エネ効果測定手法の確立を進め、遮熱フィルムの熱性能と実際の省エネルギー効果との関係を明らかにする。

研究開発項目③「断熱技術の研究開発」

(1) 断熱材料の研究開発

「産業炉/熱マネージメントシステムの開発」、「高強度高断熱性多孔質セラミックスの開発」、「耐高温高効率蓄熱放熱システムの開発」、「高効率廃棄ガス熱回収システムの開発」及び「高効率産業/工業炉における検証」について研究開発を行い、中間目標の達成を目指す。

「産業炉/熱マネージメントシステムの開発」では、エネルギー効率向上目標（排熱削減率 50%以上）を達成するための課題抽出を完了する。

「高強度高断熱性多孔質セラミックスの開発」では、1450°Cで安定な断熱材原料を検討し、熱伝導率 0.25W/mK 以下、圧縮強度 10MPa 以上を有する断熱材の製造プロセス因子を明らかにする。また、並形形状断熱材料の量産のための技術を確立する。

「耐高温高効率蓄熱放熱システムの開発」では、取得したデータを基に既存蓄熱材料と比較して、蓄熱放熱速度 2 倍以上の蓄熱材料開発のための材料設計を実施する。

「高効率廃棄ガス熱回収システムの開発」では、試作した熱交換器にて試験を実施し、1,500°C以上で使用するための課題の抽出を完了する。

「高効率産業/工業炉における検証」では、前年度に抽出した課題を基に、検証炉

の設計を完了する。

研究開発項目④「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

「熱電材料の高速合成・評価技術開発」、「導電性高分子材料・素子の研究開発」及び「炭素系熱電変換デバイスの技術開発」について研究開発を行い、中間目標の達成を目指す。

「熱電材料の高速合成・評価技術開発」では、革新的高性能熱電材料を実現するため、これまでに開発した高速合成・評価技術を活用して、物質探索を加速するとともに、高性能材料設計指針の検討も継続する。さらに、多元系金属間化合物について系統的な材料探索を行い、出力因子(PF)や無次元性能指数(ZT)の高い熱電材料を開発する。また、有機系熱電材料とも連携し、フレキシブル性や実用性を踏まえた ZT 以外の目標・指標の検討を行う。

「導電性高分子材料・素子の研究開発」では PEDOT 系材料を中心に添加物や素子構造の検討を進め継続して材料の PF 向上とモジュール出力密度の向上に取り組む。また、有機熱電材料に適した評価指標策定にも取り組む。

「炭素系熱電変換デバイスの技術開発」では、カーボンナノチューブ-高分子複合熱電材料の微細構造制御を通じて、 $550 \mu\text{W/K}2\text{m}$ 以上の PF を示す材料の作製技術の構築を行う。また、ZT に加えて新たな目標・指標について検討する。

(2) 熱電デバイス技術の研究開発

「熱電材料の開発」、「熱電デバイスの開発」及び「熱電発電システムの開発」について、以下の研究開発を行い中間目標の達成を目指す。

「熱電材料の開発」では、 $ZT=1.3$ のスクッテルダイト系熱電材料を開発し、同材料による準量産化規模対応の材料合成技術、ペレット成形技術及び素子整形技術を確立する。

「熱電デバイスの開発」では、熱電デバイスの耐久性影響要因を究明し、変換効率 $\eta=8.5\%$ 以上、1年以上の耐久性を有する熱電デバイス技術を確立する。

「熱電発電システムの開発」では、出力 200W の熱電発電ユニット技術を開発する。

(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証」及び「新熱電変換材料の開発」について研究開発を行い、中間目標の達成を目指す。

前年度までの実験結果に基づき、コージェネ装置のエンジン排熱や排温水を活用してシステム全体のエネルギー利用効率を 1 ポイント向上させるために必要な熱電変換材料性能の仕様を明確化する。また、エンジン排熱系からの高効率電力変換を目的に、シリサイド系熱電材料(マンガンシリサイド、カルシウムシリサイド)を対象に、薄膜を用いて熱伝導率の飛躍的低減が可能な組織構造を決定する。さらに、薄膜材料

の知見をもとにモジュール適用可能なバルク体の合成を実施する。

(4) フレキシブル有機熱電材料及びモジュールの開発

「高機能導電性ポリマーの開発」、「CNT 及び周辺材料の開発」、「無機熱電材料を利用した熱電変換材料の開発」及び「フレキシブル熱電変換モジュールの開発」について研究開発を行い、中間目標の達成を目指す。

「高機能導電性ポリマーの開発」では、有機ポリマーにおける重要課題である高移動度化技術の開発として、最適なポリマー骨格の探索を進める。

「CNT 及び周辺材料の開発」では、CNT 熱電性能の可能性を最大限引き出すべく、多面的な検討を行い性能飛躍の指針を得る。

「無機熱電材料を利用した熱電変換材料の開発」では、複数の材料系に対し無機材料の一層の性能向上とナノ構造応用による性能向上を狙った基礎検討を進める。

「フレキシブル熱電変換モジュールの開発」では、広範なニーズに対応するためにモジュールの熱特性に着目し、モジュール出力の大幅な改善が見込めるプロセス、構造の設計と開発を進める。

(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

「高性能化に関する技術開発」、「p 型特性発現に関する技術開発」及び「モジュール化に関する技術開発」について研究開発を行い、中間目標の達成を目指す。

「高性能化に関する技術開発」では、前年度に作成したナノ焼結体試料を用いてナノ組織が熱電特性に与える影響を解析する技術を研究し、材料高性能化の方向性を定める。

「p 型特性発現に関する技術開発」では、構成元素が熱電特性に与える影響を第一原理計算等により解析し、実験的検討への指針を明確化する。

「モジュール化に関する技術開発」では、クラスレート焼結体素子のモジュールを試作し、発電効率及び出力の評価を行って素子の課題を明確化する。

(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

「Mg₂Si 熱電変換材料・発電素子の量産化技術」及び「車載用熱電発電モジュールの開発」について研究開発を行い、中間目標の達成を目指す。

「Mg₂Si 熱電変換材料・発電素子の量産化技術」では、主に焼結条件の探索によりφ100mm 焼結体において焼結体：熱電特性及び機械特性の面内偏差±10%以内、発電素子：熱電特性及び機械的特性のバラつき±5%以内を達成して製造プロセスを確立する。

「車載用熱電発電モジュールの開発」では、発電出力密度 0.85W/cm² 以上、耐久性 1,500 時間以上のモジュール開発を行い、安定したサンプルの提供が可能なことを確認したうえでサンプル提供を行う。

なお、本研究開発項目④については、別途実施している小規模研究開発のテーマと合わせて今年度末までに研究開発の進捗状況を確認し、次年度以降の方向性を定め

る。

研究開発項目⑤「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」について研究開発を行い、中間目標の達成を目指す。

「高効率小型排熱発電技術開発」では、出力 1kWe クラスで低 GWP&不燃冷媒に適合し発電効率 14%を実現するオーガニックランキンサイクルのシステム構成、膨張機、冷媒ポンプと蒸発器等の耐熱デバイスの仕様を明確化する。また、中間評価結果を踏まえて構成機器等の耐久性評価に予定を前倒しして着手する。出力 10kWe クラスでは、小型膨張タービンをスケールアップするとともに、模擬熱源装置を用いて実使用条件を考慮した試験を行い、小型膨張タービンの技術課題を抽出する。

研究開発項目⑥「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」、「ターボ圧縮機技術の開発」及び「高温高圧熱交換器の開発」について研究開発を行い、中間目標の達成を目指す。

80→160℃加熱が可能な加熱能力 300kW 級のヒートポンプ試作機の詳細設計と一部製作を行う。また、圧縮機、熱交換器の動特性を考慮したマルチフィジックス統合解析シミュレーション技術を確立する。また、前年度に製作したヒートポンプ試作機用ターボ圧縮機試作機の性能試験結果を反映して改造、試運転を行い、中間目標性能達成の見通しを得る。加えて、前年度に検討したヒートポンプ試作機用熱交換器試作機の設計と製作を行うとともに、耐熱性を評価するためのサーマルサイクル試験を行う。

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

「導入調査」、「機器開発」及び「冷媒開発」について研究開発を行い、中間目標の達成を目指す。

「導入調査」では、産業分野の熱プロセスの詳細調査・実態計測を行い、160℃レベルの加熱と 80℃レベルの排熱が効率的に利用可能であることを示し、対応するヒートポンプの詳細仕様を明らかにする。

「機器開発」では、導入調査で明らかとなったヒートポンプ仕様に対して、主幹要素の検証を継続して行う。

「冷媒開発」では、ヒートポンプへ適用するために不可欠な熱安定性・安全性・環境性物性評価、熱力学的性質・輸送性質の測定による定量評価及び合成法検討を継続し、このヒートポンプに好適な冷媒候補を絞り込む。

(3) 低温駆動・低温発生機の研究開発

「低温駆動基本サイクル」、「低温発生技術の開発」及び「新吸収剤」について研究開

発を行い、中間目標の達成を目指す。

「低温駆動基本サイクル」では、前年度に製作した二段再生吸収を採用した空冷式実用性確認用供試体により熱源温下水限 70℃で駆動可能な空冷式ヒートポンプ冷水発生サイクルの性能評価を行う。

「低温発生技術の開発」では、新冷媒について物性検討を進めるとともに、冷凍サイクルの多段化により効率的に氷点下温度を発生するシステム構成を開発する。なお、同時に氷点下温度発生時に低下が予想される蒸発器の伝熱性能評価を実施する。

「新吸収剤」では、前年度に再選定した吸収剤について熱物性の情報入手及び腐食抑制技術を開発し、従来吸収剤との比較検討を行う。

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

「車載用高効率熱輸送システム」、「材料研究」及び「熱計測技術」について研究開発を行い、中間目標の達成を目指す。

「車載用高効率熱輸送システム」では、ループ式ヒートパイプ（以下「LHP」という）について、実用化に重要な非定常時（過渡状態）の熱バランスの検討を集中的に実施する。

「材料研究」では、微粒子分散流体について微粒子の分散性、粒子-液体間の熱抵抗低減に向けた微粒子表面改質（SAM付与）等について検討を継続し、ベース流体（例として水等）に対して1.6倍程度の熱輸送特性向上を目指す。

「熱計測技術」では、開発した熱エネルギー移動評価装置の時間分解能を向上する改良を行い、表面改質層の熱移動促進効果のより定量的な検証を行う。

(2) 熱マネジメントの研究開発

「モータ領域」及び「インバータ領域」について研究開発を行い、中間目標の達成を目指す。

「モータ領域」では、吸熱モジュール組み込み時の伝熱性能を向上させるため、「接合界面伝熱抵抗の低減」と「モジュール内を流れる熱経路の最適化」を熱モデルの活用による取り付け構造の見直し等により行う。また、熱移動面積の拡大を図るため、発熱部の形状や特性等を踏まえた新たな吸熱要素技術を構築するとともに、吸熱モジュールとの組合せ等を検討する。

「インバータ領域」では、吸熱モジュールの短時間・局所での熱移動を妨げる界面での発熱成分と伝熱抵抗成分を低減するために、材料の観察や構造の解析等によるメカニズム解明を行う。これらの知見を活用し、電気的な寄生抵抗と背反関係にあるゼーベック係数を向上させるための方策や制御因子を抽出し、中間目標の達成を見通せる要素技術の構築を進める。

(3) 車両用小型吸収冷凍機の研究開発

「軽量化開発」、「作動媒体の開発」及び「分離壁構造開発」について研究開発を行い、中間目標の達成を目指す。

「軽量化開発」では、軽金属化した装置において、作動媒体の混合を抑制する構造設計やシステム化技術、及び腐食対策技術を確立する。

「作動媒体の開発」では、絞り込んだ作動媒体の混合比をパラメータとして熱物性値を求め、他の物性値も考慮して最適な媒体を明確化する。

「分離壁構造開発」では、分離壁構造の小型装置を試作して性能評価を行う。また、冷媒蒸気の透過性、作動媒体の接触角の測定等を行い分離壁詳細寸法などの仕様の最適化を行う。

(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

「吸着熱交換器開発」、「吸着式冷凍サイクルのシステム開発」及び「吸着蓄熱システム等の開発」について研究開発を行い、中間目標の達成を目指す。

「吸着熱交換器開発」では、担持技術の改良及び吸着熱交換器の専用設計を行った上で、台上評価により目標吸着熱交換器性能を検証する。

「吸着式冷凍サイクルのシステム開発」では、車両冷却水回路検討、排熱回収器開発及び各コンポーネントの小型最適化設計を行い、台上評価により目標蒸発器性能を検証する。

さらに、前年度に立案した「吸着蓄熱システム等の開発」として、冬季の吸着現象及び冷媒の凍結による課題抽出と解決策の立案を行い、低温時におけるシステム成立性等を検証する。

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」、「熱マネジメント部材の評価技術開発」及び「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」について研究開発を行い、中間目標の達成を目指す。

「排熱実態の調査、研究開発／導入シナリオの検討」では、電力、清掃等6業種の未利用排ガス熱量を調査し、排出傾向を明らかにする。また、シミュレーションに実測または実用を反映したデータを組み込み、精度と信頼性の高い熱負荷計算を行って結果をワークショップ等で発信する。民生分野では、特に窓に重点を置き、異なる特性の窓材を用いた際の熱負荷を調べ、遮熱制御技術の指針を示す。さらに、個別分散型空調システムの評価法について室内機の多様な運転パターン及び蒸暑地・寒冷地などの気候の多様性に応じた評価法の改良を行う。

「熱マネジメント部材の評価技術開発」では、無機熱電モジュール評価装置の高度化の一環として、高精度の変位計測機能を追加する。これを用いてモジュールの歪や寸法変化と劣化の相関を観測し、高信頼モジュール開発のための基盤データとする

とともに、自動車用の評価条件として、低温側を 100°C 近傍で固定するための装置改造を実施する。また、前年度に開発した熱電材料の同時ゼーベック係数計測について、計測時間の 12% 短縮を目指す。同時に、有機熱電材料の耐久性向上の要因解明にも取り組む。さらに、前年度に引き続き新型冷媒候補や類似化合物の評価を継続し、1 種以上の GWP、ISO 燃焼性等級を決定する。

「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、薄膜・バルク材料で構築してきた熱電計算シミュレーション技術の高度化、効率化を検討する。10nm スケールの薄膜、超格子材料まで対象に材料スクリーニングに資するシミュレーションを実施する。さらに、計算から予測される新規蓄熱分子の性質を詳細に調べることで、分子構造と物性の機能相関を解明し、有機分子系潜熱蓄熱密度の上限を計算から明らかにする。また、熱関連材料を元素組成比を用いて記述し、物性値との相関を明らかにする技術を整備するとともに、熱エネルギーの蓄積・取出し速度に関わる蓄熱材料・部材の熱伝導率、熱電材料・部材の比熱容量等の物性値を分析して提供する。

5. 2 平成 28 年度事業規模

委託事業

需給勘定 1,500 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) 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。

(2) 複数年度契約の実施

調査委託等を除き、平成 28～29 年度の複数年度契約を行う。

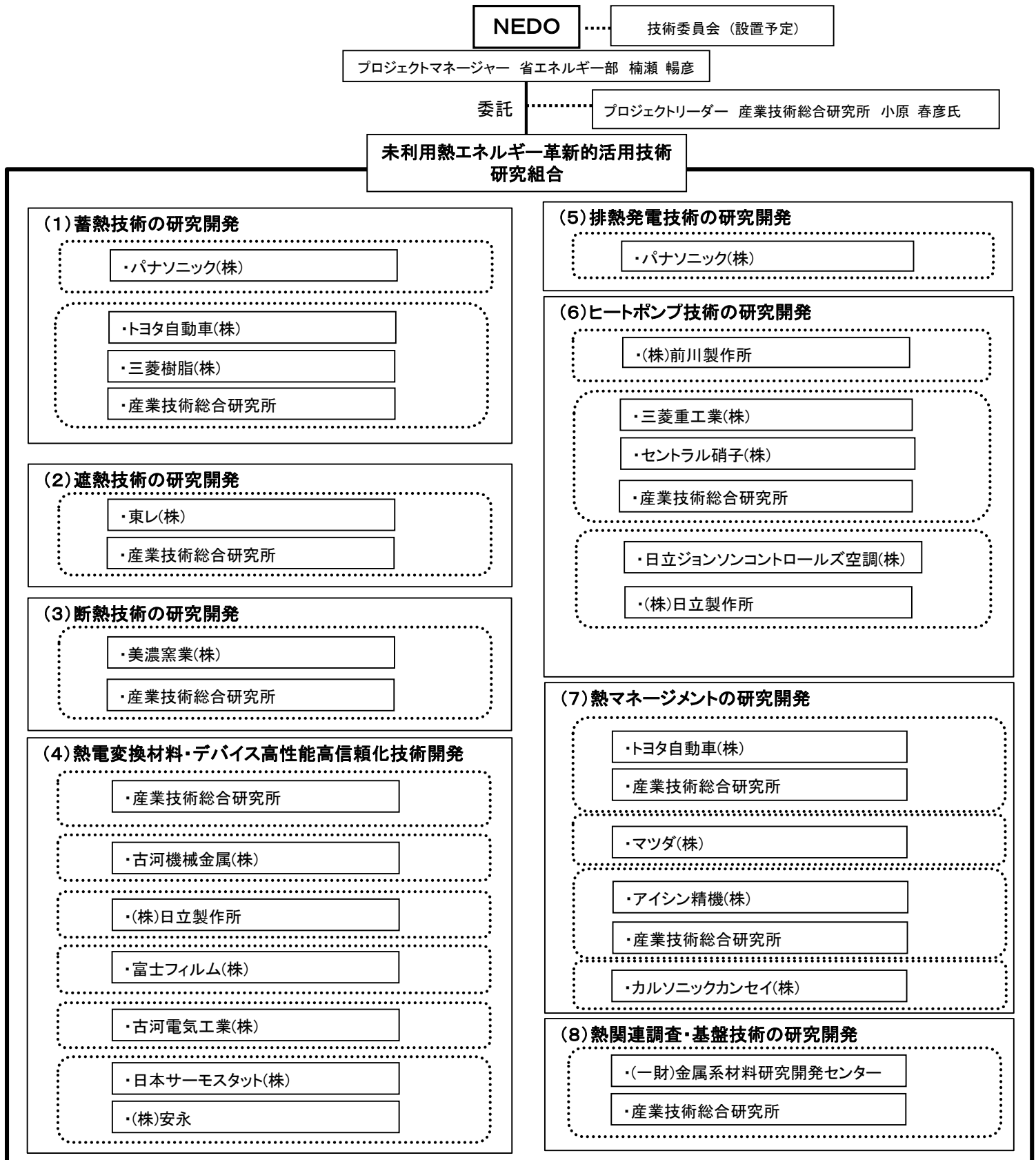
(3) 知財マネジメントに係る運用

「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) 平成28年3月 制定

(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)



共同実施

早稲田大学・東京工業大学・名古屋大学・東北大学・岡山大学・大阪大学・東京大学・山口東京理科大学・東京理科大学・物質材料研究機構・広島大学・九州大学・佐賀大学・八戸工業大学・宇都宮大学・建築研究所・北陸先端科学技術大学院大学・長岡技術科学大学・北海道大学・豊田理化学研究所・理化学研究所・奈良先端科学技術大学院大学

(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)

