

平成30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、①削減（断熱、蓄熱、遮熱）、②回収（熱電変換、排熱発電）、③再利用（ヒートポンプ技術）するための技術開発と、④これらの技術を一体的に行う熱マネジメント技術の開発を行い、環境中に排出される膨大な未利用熱を効果的に削減・回収・再利用し、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。

【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°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
- 2) -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

最終目標（平成30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（平成29年度）

- 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
- 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
- 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29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「断熱技術の研究開発」

最終目標（平成34年度）

- 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

中間目標（平成29年度）

- 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

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) 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/cm² の発電モジュール、発電素子の実用化開発

最終目標（平成29年度）

- 1) パワーファクター（PF）700 μ W/mK²を有する有機材料及び温度差 35℃以下で、出力密度 20 μ W/cm²を有するモジュールの開発

中間目標（平成29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⑤ 「排熱発電技術の研究開発」

最終目標（平成34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（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 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（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

最終目標（平成27年度）

- 1) 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基本要素技術確立

研究開発項目⑥ 「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（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

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) 低温排熱の下限レベルである 60℃排熱で駆動できる高効率冷凍機の開発

最終目標（平成29年度）

- 1) 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 「熱マネジメントの研究開発」

最終目標（平成34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°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
- 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 (平成30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 (平成29年度)

- 1) 吸熱量 5W/cm² を有する吸熱デバイスの開発

中間目標 (平成29年度)

- 1) 高効率ヒートパイプの開発 (0~50°C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°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
 - (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
- 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 (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 (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 今田 俊也を任命して、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 エネルギー・環境領域 エネルギー・環境領域 研究戦略部長 小原 春彦氏の下で、以下の研究開発を実施した。

4. 1 平成29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」「長期蓄熱材料の開発」について、以下の研究開発を行い、中間目標を達成した。

「高密度蓄熱材料(低温用)の開発」では、計算機科学の結果を踏まえ、10℃において、蓄熱密度 0.3MJ/kg を有するゲスト物質候補を抽出し、材料評価によりクラスレートハイドレート組成を確立した。

「高密度蓄熱材料(中/高温用)」では、120℃以下で、蓄熱密度 0.5MJ/kg を有する酸・塩基反応を利用した化学蓄熱材料に要する修飾密度を 7.6mol/kg 以上と定量化し、修飾密度 8.2mol/kg を実現可能な合成プロセスを立案した。

「長期蓄熱材料の開発」では、平成28年度に明らかにした課題を踏まえつつ、-20～25℃環境下で、12h以上の過冷却保持期間を実現する蓄熱材料組成の確立に向けて、プレートフィン構造のモジュール評価により12hの過冷却安定性を検証した。

(2) 車載用蓄熱技術（材料）の研究開発

「蓄熱構造体の開発」「蓄熱材の低コスト化」「蓄熱材の高密度化」「新規蓄熱材の探索」について、以下の研究開発を行い、中間目標を達成した。

「蓄熱構造体の開発」では、材料粒径や熱処理の見直しにより、熱伝導率 3.2W/mK と蓄熱密度 0.5MJ/L を満足する Al-Ti 系ポーラス構造体の製造に成功した。

「蓄熱材の低コスト化」では、変動費 30%低減、固定費 70%低減、寿命予測技術を確立し、商業化フェーズに移行した。

「蓄熱材の高密度化」では、MOF（金属有機構造体）のリンカー分子制御により蓄熱密度 0.5MJ/L を達成した。

「新規蓄熱材の探索」では、蓄熱密度 1～2MJ/kg の可能性を有する新規物質の予測および、1MJ/kg 超に必要な原理と支配因子の解明を行った。

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

「新規光学設計における超高精度積層技術の開発」「次世代遮熱窓材の評価技術の

開発とその商品設計」について、以下の研究開発を行い、中間目標を達成した。

「新規光学設計における超高精度積層技術の開発」では、積層フィルムの品位向上のため、試作フィルムの積層構造の解析を行い、特殊積層装置の改造設計を実施した。この結果に基づいて特殊積層装置の改造を実施し、パイロット製膜において、フィルム幅（500mm）において外観の均一性を向上した。具体的には、可視光線反射率 11%、b 値 3、日射取得率 65%を達成した。

「次世代遮熱窓材の評価技術の開発とその商品設計」では、窓からの日射熱に加え、天井・床・壁の熱流入を考慮した高精度な省エネ効果測定手法を適用し、夏期では遮った日射量の 8 割程度が省エネ効果として現れ、冬期においては遮熱による暖房負荷増加がわずかであることを明確化した。これにより、年間を通じて冷房負荷を下げる効果の方が大きいことが明らかとなり、本開発の遮熱フィルムによる優位性を実証した。なお、平成 29 年度までの研究開発により、革新的遮熱技術の確立にめどが立ち実用化開発に移行するため、平成 29 年度をもって本事業における研究開発は終了とした。

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/工業炉への熱マネ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」「高効率排気ガス放熱システムの開発」「高効率産業/工業炉における検証」について、以下の研究開発を行い、中間目標を達成した。

「産業/工業炉への熱マネジメントシステムの開発」では、種々サイズの産業/工業炉に開発部材を適用した際のエネルギー収支シミュレーションを実施し、実用サイズの工業炉において排熱削減率 50%以上の結果を得ることができ、基礎設計を完了した。

「高強度高断熱性多孔質セラミックスの開発」では、骨材添加により高温下での再加熱収縮を低減し耐熱性を向上させ、1,500°C耐熱性、熱伝導率 0.25W/m・K 以下、圧縮強度 10MPa 以上の並形（230mm×114mm×65mm）形状断熱材の試作を完了した。

「耐高温高効率蓄熱放熱システムの開発」では、中間目標値である従来比 2 倍の蓄熱速度を持つ新規セラミックシェル構造体とその製造プロセスを開発した。

「高効率排気ガス放熱システムの開発」では、1,500°Cで使用可能な熱交換器試作品について、約 2 年間に相当する繰り返し耐用試験を完了し実用レベルに到達した。

「高効率産業/工業炉における検証」では、ファインセラミック焼成に代表される低温制御を含めた総合的な運転を実現するためのシステムを追加した。また、本年度までに試作した多孔体を実際の炉体に組み込む構造の基礎設計を完了した。

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」「フォノンと少数キャリアの輸送特性同時制御による熱電性能指数の飛躍的向上」「導電性高分子材料・素子の研究開発」「炭素系熱電変換デバイスの技術開発」について、以下の研究開発を行い、中間目標を達成した。

「熱電材料の高速合成・評価技術開発」では、3元系、4元系等、多元系金属間化合物について系統的な材料探索を行い、 YbAl_3 等 f 電子を含む化合物で出力因子 $\text{PF} > 0.006\text{W/mK}^2@300\text{K}$ を確認した。また Ba_{122} 系材料の組成最適化を進め、 $\text{ZT}=0.8@1000\text{K}$ を確認した。環境調和型シリコン系材料の組成およびプロセス最適化を進め、 BaGaAlSi 系シリコンクラスレート化合物で出力因子 $\text{PF}=0.0014\text{W/mK}^2$ 、 Al-Mn-Si シリサイド系化合物で、 $\text{ZT}=0.3@600\text{K}$ をそれぞれ確認した。 TiS_2 系無機・有機ハイブリッド材料を用いたフレキシブル熱電デバイスの試作を行い、出力密度 2.5W/m^2 (温度差 70K) を確認した。

「フォノンと少数キャリアの輸送特性同時制御による熱電性能指数の飛躍的向上」では、テルル化鉛においては、メルトスピン法を用いて試料を作製することで、少数キャリア散乱の傾向を見出した。その結果として、ゼーベック係数の 30% 程度の向上を確認した。この成果は、フォノンと少数キャリアの輸送特性同時制御を進めることで、 $\text{ZT} > 3.0$ への道筋が開けることを示唆している。

「導電性高分子材料・素子の研究開発」ではパワーファクターの増大を狙い、 PEDOT とカーボンナノチューブのハイブリッド膜で、本年度は新たに単層ナノチューブを用いることにより、昨年度までの成果である多層ナノチューブを用いた場合と比較して2倍となる $295\mu\text{W/K}^2\text{m}$ のパワーファクターを得た。有機熱電モジュール試作では富士フイルムと共同し、ナノチューブ系材料の使用やモジュールの有効温度差を広げる工夫で 71 度の温度差で $81\mu\text{W/cm}^2$ の高い出力密度 (35 度の温度差換算 $19.6\mu\text{W/cm}^2$) を得、 35 度で $20\mu\text{W/cm}^2$ という最終目標の 98% を達成した。

「炭素系熱電変換デバイスの技術開発」では、昨年度までの研究より、CNT-高分子複合材料に熱プレス処理を施すことでパワーファクターが向上することが明らかとなった。本年度は、富士フイルム株式会社により作製した高性能な CNT-高分子複合材料に熱プレス処理を施すことで材料の高性能化を試みた。その結果、CNT 系熱電材料として世界トップレベルのパワーファクター ($700\mu\text{W/mK}^2$) を実現した。

また、CNT 系熱電変換モジュール内の CNT 配向の制御により、モジュールの発電性能の向上を試みた。ソルベントフリー印刷法を適用してモジュール作製を行うことで、モジュール内の CNT 配向の状態が改善され、その結果、モジュールの出力を従来の約 8 倍向上させることに成功した。

(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」「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、中間目標を達成した。

「熱電材料の開発」では、高温側スクッテルダイト系/低温側 Bi-Te 系のカスケード式熱電モジュールを開発し、高温端/低温端=600°C/30°Cの条件で発電効率が 11%に達成した。

「熱電デバイスの開発」では、スクッテルダイト系熱電モジュール技術を開発し、発電性能変化 5%以内、600°C@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。

「熱電発電システムの開発」では、熱電発電ユニット技術を開発し、試作したユニットの出力は 100W に達した。

(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」「新熱電変換材料の開発」について、以下の研究開発を行い、中間目標を達成した。

「システム効率向上の検討」では、コージェネエネルギー利用効率 1%向上の電気・熱設計仕様の決定を行った。また、5kW ガスコージェネレーションの 60°C 排温水から熱電変換モジュールを用いて発電した電力によりセンサー、無線モジュールを駆動した。

「新熱電変換材料の開発」では、マンガンシリコン (MnSi) とシリコンゲルマニウム (SiGe) の複合材料薄膜により、 $ZT=2$ を達成するために必要な 1W/Km 以下の低熱伝導率を実現した。また、マンガンシリコン系単相バルク材料の合成プロセスを確立した。

(4) フレキシブル有機熱電材料及びモジュールの開発

「CNT 及び周辺材料の開発」「フレキシブル熱電変換モジュールの開発」について、以下の研究開発を行い、中間目標を達成した。

「CNT 及び周辺材料の開発」では、CNT の熱電性能の可能性を最大限引き出すべく、多面的な観点での検討等により、性能の飛躍的向上に向けた指針を得た。

「フレキシブル熱電変換モジュールの開発」では、広範なニーズに対応するためのモジュールの構造設計とプロセス開発により性能改良を進めるとともに、良好な性能を持つ開発材料を組み合わせることにより、モジュール出力の大幅な改善を図った。

(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

「性能指数向上に関する技術開発」「モジュール化に関する技術開発」について、以下の研究開発を行い、中間目標を達成した。

「性能指数向上に関する技術開発」では、結晶構造や組成の異なるタイプのクラスレート化合物に着目して高性能な材料の探索を行うとともに、特徴的な試作方法を複数検討することで性能指数を高める技術を積み上げ、開発した p 型素子ならびに n 型素子の熱電特性を用いたモジュールの発電効率計算で 10%を越えることを確認した。

「モジュール化に関する技術開発」では、発電効率 10%を超える特性を狙った多接合型オールクラスレートモジュールの構造設計・試作及び評価を行い、開発に目途をつけ

た。また、実用化を念頭にシリコンクラスレート素子からなるアプリケーションの試作を行い、開発材の用途検討を進めた。

(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」「車載用熱電発電モジュールの開発」について、以下の研究開発を行い、中間目標を達成した。

「Mg₂Si 熱電変換材料・発電素子の量産化技術」では、平成 28 年度に開発した φ100mm 焼結体製造技術を軸とした前後工程及びラインレイアウトの検討を行うとともに、生産能力（ラインバランス）の評価を行うことで、年間 50,000 台の自動車への搭載に対応可能な発電素子量産ラインの設計を完了させた。

「車載用熱電発電モジュールの開発」では、素子形状の最適化検討を行い、1.1W/cm² のモジュール出力性能を得た。部品間接合方法の改善により耐久性能として 2000 時間後で初期発電性能から 25%の劣化となる耐久性能を得た。また、熱サイクル以外の信頼性試験の評価を開始した。

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」について、以下の研究開発を行い、中間目標を達成した。

出力 1kWe クラスでは、平成 28 年度に明確化したシステムとデバイスの技術手段に基づき、発電効率 14%を原理実証するとともに、サイクル制御等の課題を確認した。また出力 1kWe クラス用の膨張機とポンプに関して、平成 28 年度に着手した信頼性評価により短期の耐久性を確認し、初期段階での課題を確認した。出力 10kWe クラスでは、平成 28 年度に抽出したフルスケールの膨張タービンと気体軸受の技術課題に対して、これらの要素検証により課題解決手段を明確化した。

なお、200℃以下の中低温排熱に対応した出力 10kW クラス小型排熱発電装置の研究開発については、システム化のための課題が明確化できたこと、出力 1kW クラス小型排熱発電装置の実用化にむけた研究開発に選択と集中を図る観点から、平成 29 年度末をもって本事業における研究開発は終了とした。

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

「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」「高温高压熱交換器の開発」について、中間目標の達成を目指して以下の研究開発を行った。

「遷臨界サイクルヒートポンプの最適化技術の開発」では、80→160℃加熱が可能な加熱能力 300kW 級のヒートポンプについてシミュレーションで COP : 3.5 の達成を見込むとともに、試作機および付帯設備の製作・工事を行い試運転を開始した。

「ターボ圧縮機技術の開発」では、ターボ圧縮機の風損対策等を実施し、改善の傾向を見出した。

「高温高压熱交換器の開発」では、ヒートポンプ試作機用熱交換器を製作した。性能試験により得られた熱交換器データは、最適化シミュレーション技術の精度向上に活

用する。

(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

「ヒートポンプ技術導入プロセス調査」「低 GWP 冷媒候補の開発および物性情報の構築」「ヒートポンプの開発と特性評価」について、以下の研究開発を行い、中間目標を達成した。

「ヒートポンプ技術導入プロセス調査」では、実測により運転実態を把握し、実用に供するプロセス構成の基本計画と投資回収効果を明らかにした。

「低 GWP 冷媒候補の開発および物性情報の構築」では、新型冷媒候補の物性情報を取得した。出力温度 200°C に対応する新型冷媒候補については毒性評価を実施すると共に、熱安定性評価試験により候補冷媒を絞り込んだ。

「ヒートポンプの開発と特性評価」では、高温用高性能凝縮器の最小ユニットにおいて、出力温度 160°C に対応する新型冷媒候補に関する凝縮熱伝達予測法の実機への妥当性を検証した。さらに新型冷媒候補を用いたドロップイン試験を行うと共に、160°C 以上の温熱出力が可能なヒートポンプの成立性評価と検証機の計画図を完成させた。

(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」「低温発生技術」「新吸収剤」について、以下の研究開発を行い、中間目標を達成した。

「低温駆動基本サイクル」では、本研究開発による「一重効用ダブルリフト吸収冷凍機」を実用化した。本製品の冷凍能力は 176~4,395kW であり、熱源温水の利用温度差を従来の最大値である 20°C に対して 40°C 以上とすることにより、単位温水流量あたりの冷凍能力を約 2 倍とした点が特徴である。本製品はこの点が評価され、「コージェネ大賞 2017 技術開発部門 特別賞」を受賞した。

「低温発生技術」では、アルコール系氷点降下剤の実用化に向けて、腐食抑制技術を確立するとともに、冷凍サイクル実験において蒸発温度 -9.3°C を達成し、冷媒組成の最適化により -10°C 以下を実現する見通しを得た。これらの結果を基に、中間目標である 75°C 熱源から最低温度 -10°C の冷熱を発生する、冷凍能力 52.7kW の試作機を製作し、実証試験を行った。

「新吸収剤」では、シミュレーションによる冷却水温度 35°C 以上までの動作範囲の拡大、従来製品と同等以上の耐食性を確認し、これらの結果から冷凍能力約 10.5kW の実験機を製作し、実証試験を行った。

なお、平成 29 年度までの研究開発により、低温排熱で駆動できる高効率冷凍機は、実用化のめどが立ち、順次、製品化に移行するため、平成 29 年度末をもって本事業における研究開発は終了とした。

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」「材料研究」について、以下の研究開発を行い、

中間目標を達成した。

「車載用高効率熱輸送システム」では、昨年度作製したループヒートパイプ（LHP）システムで課題となっていた高熱輸送時の作動液循環不良を蒸発器、補償器を改良することにより改善、平成 29 年度目標の熱輸送距離/熱輸送量を達成した。

「材料研究」では、微粒子分散流体について、有機膜による粒子表面改質条件の最適化により分散安定性が向上し、目標としていた高熱伝導率化を達成した。熱媒流体では高い熱伝導率を持つ会合性液体である水とアンモニアに対し分子動力学シミュレーションを実施し、熱輸送において分子間のクーロン力相互作用が支配的であることを解明した。

(2) 熱マネージメントの研究開発

「モータ領域」「インバータ領域」について、以下の研究開発を行い、中間目標を達成した。

「モータ領域」では、相変化を用いた冷却システムの性能をモータ運転状態にて検証し、中間目標 $5\text{W}/\text{cm}^2$ の冷却性能が得られることを確認するとともに、その特性を解析可能にするモデルを構築した。

「インバータ領域」では、吸熱モジュールの熱移動メカニズムを解明するとともに、電熱素子の吸熱性能向上技術、界面部の熱抵抗低減技術を開発することで、中間目標 $5\text{W}/\text{cm}^2$ を達成可能なことを確認した。

なお、平成 29 年度までの研究開発により、吸熱デバイスの開発は実用化開発に移行するため、平成 29 年度をもって本事業における研究開発は終了とした。

(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」「分離壁構造開発」について、以下の研究開発を行い、中間目標を達成した。

「軽量化開発」では、吸収冷凍機の車載システムを検討し、車両の排熱を回収した評価で有効性を確認した。また、目標体格、重量以下の装置を設計試作し、性能目標を満たす事を確認した。

「作動媒体の開発」では、車両向の改良作動媒体をエンタルピー、物性値の測定結果から性能解析し最適化した。

「分離壁構造開発」では、分離壁構造のセミスケール試験機を試作、性能確認、システムの運転確認を行った。

(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

「吸着熱交換器開発」「吸着蓄熱システム等の開発」について、以下の研究開発を行い、中間目標を達成した。

「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、吸着式冷凍システムでの車載状態におけるシステム制御の最適化を実施し、 $1.5\text{kW}/19\text{L}$ を達成した。

「吸着蓄熱システム等の開発」では、凍結防止剤を付加した試作冷媒による冬季を想

定した温度条件においての蓄熱密度：1.2MJ/kg（中間目標値：1.0MJ/kg）を確認した。検討した凍結防止剤の影響によりベース冷媒の蓄熱密度：1.7MJ/kgに対して約3割減少することを確認した。

研究開発項目⑧「熱関連調査・基盤技術の研究開発」

「排熱実態の調査、研究開発／導入シナリオの検討」「業務用民生分野の建物での熱損失調査」「業務用空調システムの実働エネルギー効率評価法の開発」「熱マネジメント部材の基盤技術の開発」「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、中間目標の達成を目指して以下の研究開発を行った。

「排熱実態の調査、研究開発／導入シナリオの検討」では、繊維、電気機械、電力、ガス・熱供給、清掃、その他製造業の工場の高温固体、温水からの排熱量を調査、モデル解析し、前年度の排ガス調査のデータも加えて日本全体での業種別排熱量を明らかにした。また、該6業種の熱回収利用機器の導入状況、蒸気輸送状況等、未利用熱の活用傾向および技術ニーズを明らかにした。

「業務用民生分野の建物での熱損失調査」では、遮熱フィルムの熱的負荷に対する改善と問題を分析し、プロジェクト内の関係機関と連携して物性改善の指針を得た。

「業務用空調システムの実働エネルギー効率評価法の開発」では、主に暖房運転時における多様な室内機運転パターンに対する実働評価試験を行い、これまで得たデータから多様な気候地域および室内機運転パターンに対応した実働エネルギー評価法の改良を行った。

「熱マネジメント部材の基盤技術の開発」では、無機熱電モジュールの劣化試験を行い、新しい劣化挙動の観察手法を確立した。また温度サイクル試験およびパワーサイクル試験の装置を開発し、各種条件により分析用データを収集し、劣化の推定を行った。また熱電モジュールの評価手法の国際標準化推進のため国内委員会でも新規規格提案書の作成を行った。

また、有機熱電材料の同時ゼーベック係数計測、市販化を前提とした材料の構造異方性を考慮した計測装置の試作に取り組み、同時ゼーベック係数計測装置の精度向上と構造異方性を考慮した計測装置の開発を行った。

有機熱電材料発電性能に決定的な影響を与える材料内の微細構造を、電子顕微鏡により評価することを可能とするため、材料の断面を抽出する手法の開発を行った。その結果、材料の切削により、断面が変形してしまうこと、並びにこの変形は、研磨を行うことで低減できることを明らかとした。

本プロジェクトで開発した新型冷媒候補等の環境影響評価として、絶対速度法を用いる新型冷媒候補の評価及び相対速度法を用いる類似化合物の評価を行い、新型冷媒候補の大気寿命及び地球温暖化係数（GWP）、オゾン層破壊係数（ODP）を明らかにした。また、燃焼性評価として、新型冷媒候補の高精度評価を行い、それぞれの燃焼速

度が、いずれの ISO 燃焼性等級も 2L (微燃性) であることを明らかにした。また、炭素数 3 のオレフィン系冷媒の温暖化効果について、各種置換基や異性体構造が与える影響を明らかにし、環境影響の面から好ましい構造を提示した。

「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、高密度蓄熱を達成する有望候補として化学蓄熱材料に注目し、典型的な化学蓄熱材の反応機構を分子シミュレーションから解析した。特に酸化マグネシウムの水蒸気付加反応を取り上げて、金属酸化物固体表面での水和反応を第一原理シミュレーションから解析した。また熱電材料の計算科学研究については、伝熱計算プログラムの開発と整備を進めて、ユーザーインタフェースとマニュアルの整備を行うと同時に、企業分室からの要望に答えて化合物の熱物性解析を実施して、材料開発を目指した応用研究を進めた。さらに、定常熱物性値、熱エネルギーの蓄積・取出し速度ならびに熱エネルギーの輸送と熱電変換に関わる約 6500 点の物性値をデータベースに収録しプロジェクトにおいて共有した。元素組成比により組成が記述された熱関連材料の組成・構造に関する定量的指標と熱特性の定量的表現である熱物性値との相関を解析する技術を開発した。蓄積された熱関連材料データをプロジェクト参加機関に提供するとともに、広汎なユーザの利用にインターネットにより提供するためのウェブデータベースを開発し試験公開した。技術交流会においてデータベース利用法を発表して活用を図った。

このほか、「技術シーズ発掘のための小規模研究開発 (蓄熱)」及び「熱電変換材料の技術シーズ発掘小規模研究開発 (第 2 回)」を実施した。

4. 2 事業推移 (平成 30 年 2 月 15 日時点)

	平成 25 年度	平成 26 年度	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度
実績額推移 需給勘定 (百万円)	1, 469 (経済産業省)	1, 991 (経済産業省)	1, 952 (NEDO)	1, 757 (NEDO)	650 (NEDO) 当初予算額
特許出願件数 (件)	1	44	87	100	77
論文等発表数 (報)	6	85	122 他に解説等 2	145	142
展示会出展等 (件)	1	1	9	8	11

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 今田 俊也を任命して、プロジ

エ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 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30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、静的環境下において過冷却を抑制する過冷却防止剤の候補を抽出するとともに、ゲスト物質の食品添加物認証取得に向けた安全性評価を実施する。

「長期蓄熱材料の開発」では、高温融解時の過冷却解除確率向上、時間短縮に向けた組成、解除機構を構築する。

（2）車載用蓄熱技術（材料）の研究開発

「蓄熱構造体の開発」では、熱伝導率に及ぼす製造条件を体系的に整理し、最小エネルギーでの製造法を明確にする。

「蓄熱材の高密度化」では、多孔質材料の細孔内面の分子制御により、蓄熱密度に関わる空間容量の確保と蓄熱温度の両立を目指す。

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

平成29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「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、シミュレーション等により0.20W/m・Kの熱伝導率、20MPaの圧縮強度を発現可能な断熱材気孔形態を決定するとともに、その気孔形態とプロセスの相関関係および高温安定性を明らかにする。実用化に向けた技術開発については、中間目標値達成レベルの断熱材の試作サイズアップと作成数量アップを行い、試作サンプルを想定ユーザーに提供する。

「高効率産業/工業炉における検証」では、得られた断熱材について、小型ガス炉での性能評価を行い、課題を抽出する。

なお、「耐高温高効率蓄熱放熱システムの開発」「高効率排気ガス放熱システムの開発」は、平成29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

平成 29 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、シミュレーション手法を用いた構造解析、流体解析により、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、高温端/低温端=600℃/50℃の条件で出力密度 1.5W/cm² の熱電モジュール技術を開発し、その耐久性を検証する。

「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、熱電素子酸化防止技術及び発電技術を開発し、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、シリサイドを適用した中高温用熱電変換モジュールの利用ニーズヒアリング調査に基づく課題、仕様の机上検討を行う。

「新熱電変換材料の開発」では、1kW/m² 以上の中高温用熱電変換モジュール向け高効率熱電変換材料の開発を行う。具体的には、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とし、シミュレーションおよび薄膜技術を用いて、熱伝導率と比抵抗を両立させて ZT=2 水準を可能とする、複合構造の材料設計モデルを確立する。

(4) フレキシブル有機熱電材料及びモジュールの開発

平成 29 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する。その上で性能向上を図るため、各素子に用いるクラスレート焼結体の結晶構造、組成及びその作製プロセスを検討する。

「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および試作・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

「1.5W/cm² 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において、信頼性試験項目や条件についてヒアリング調査に基づき実機想定したものを追加して継続評価を行う。

信頼性評価を実施するなかで、モジュールの抵抗値測定、接合部の観察等によりモジュール構造に関する課題を抽出するとともに、課題の解決を進める。

「1.5W/cm² の熱電発電モジュール向け発電素子の開発」では、上記評価で抽出された発電素子の課題を解決し、耐久性 3000 時間以上の発電素子を開発する。

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」では、出力 1kWe クラスの平成 32 年度以降におけるシステム実証機の構築に向けて、平成 29 年度までに明らかにしたデバイス耐久性の課題とサイクル制御課題に対して、理論解析等により解決手段を明確化する。

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、最終目標の熱輸送量・輸送距離に向けてシステム形状の最適化を実施すると共に、実用化を見据えて蒸発器・補償器の小型化を実機の LHP システムで実証する。

「材料研究」では、平成 29 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時に想定される課題（多孔体ウィックへの堆積・閉塞等）に対し、堆積防止被膜等の対策立案と効果検証を行う。

(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、多様な環境走行条件に対応する、大規模空間における温度を高分解能かつ高精度に計測する技術を開発する。

「電気駆動車の計測技術開発」では、開発した計測技術を活用し、自動車の運転状態における温度計測を実施する。

「自動車の熱流れのモデル構築」では、この高分解能な計測結果を活用して、自動車全体の熱流れを解析可能にするモデルの構築手法を開発し、自動車の未利用熱が見える化する技術を構築する。

(3) 車両用小型吸収冷凍機の研究開発

「軽量化開発」では、車両システムについて、車両レイアウトに合わせた最適設計・試作を行い、実車搭載を行う。

「作動媒体の開発」では、作動媒体の改良を進め、より車両環境に適した媒体を絞り込み物性値の測定を行う。

「分離壁構造開発」では、分離壁構造の試作評価を実施し、ユニット作成手法の確立、分離壁材質の検討を行う。

(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

「吸着式冷凍サイクルのシステム開発」及び「吸着蓄熱システムの開発」では、高出力可能な吸着熱交換器を開発し、性能確認を行う。

「熱輸送技術開発」では、極低温条件をラボレベルで再現し、サイクル挙動を確認することにより、排熱利用ヒートポンプの課題を抽出する。

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、前年度までに実施した

5 業種（食料品、繊維、パルプ・紙、化学、石油・石炭）の工場に対する調査分析、典型的なプロセスモデルの分析結果を活用して、業種別、製造品別の未利用熱の活用可能量を明らかにする。また、当該 5 業種の典型的なモデル工場への未利用熱活用機器等の効果的な導入方法、導入による物理的、経済的効果を明らかにする。

「熱マネージメント部材の基盤技術の開発」では、平成 29 年度に引続き劣化予測のための技術開発を進める。またハイスループット発電性能評価の手法開発に着手する。熱電材料機械強度データを収集しデータベース化する。IEC-TC47/WG7 において標準化活動を継続実施し、規格の提案、審議をおこなうため、国内委員会活動をおこなう。

また、平成 29 年度に導入した異方性を考慮した新規熱電計測装置のセットアップを続け、PEDOT 系を中心に種々の材料の熱電特性計測を行う。

有機熱電材料を切削後の研磨過程の高度化を通じて、断面出し加工による変形を大幅に低減する。これにより有機熱電材料の断面電子顕微鏡観察により 10 ミクロンオーダーの微細構造を観察できるようにする。

「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する。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する。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る。技術交流会においてデータベース利用法を報告して活用を図る。

（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、出力温度 200℃に対応する新型冷媒候補の熱物性、安定性、安全性の評価試験を実施し、ヘルムホルツ型状態方程式導出のための相関式を作成するとともに、効率的な冷媒合成法の検討を行う。

「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℃に対応する新型冷媒候補を用いた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と共に、同冷媒候補に適した潤滑油の抽出、及び材料の評価試験を実施する。

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、平成 30 年度から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実施する。

5. 2 平成30年度(助成)事業内容

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」では、中間目標である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性能試験を行い、COP=3.5を検証していく。また、今までの研究開発における課題に関して、対策を実施した最終評価目標条件のヒートポンプ試作機の検討を行う。さらに、本ヒートポンプを適用したモデルケース検討を行う。

「ターボ圧縮機技術の開発」及び「高温高圧熱交換器の開発」では、最終評価目標条件のヒートポンプ試作機に対応するフロン系低GWP冷媒用ターボ圧縮機の設計・製作・単体試験、熱交換器の設計を行う。

(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化学プロセス等での市場規模を再精査すると共に、ヒートポンプ適用と経済性効果を確認する。

「200℃温水出力機の要素機器の開発」では、200℃温水出力でのヒートポンプサイクル計算を実施すると共に、200℃前後の環境下での機能品の課題抽出を行い、解決策を検討する。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する。

「200℃温水出力ヒートポンプのユニット開発」では、サイクル検討結果から、ヒートポンプの基本構成を検討する。

5. 3 平成30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、平成30～32年度の複数年度契約・助成を行う。

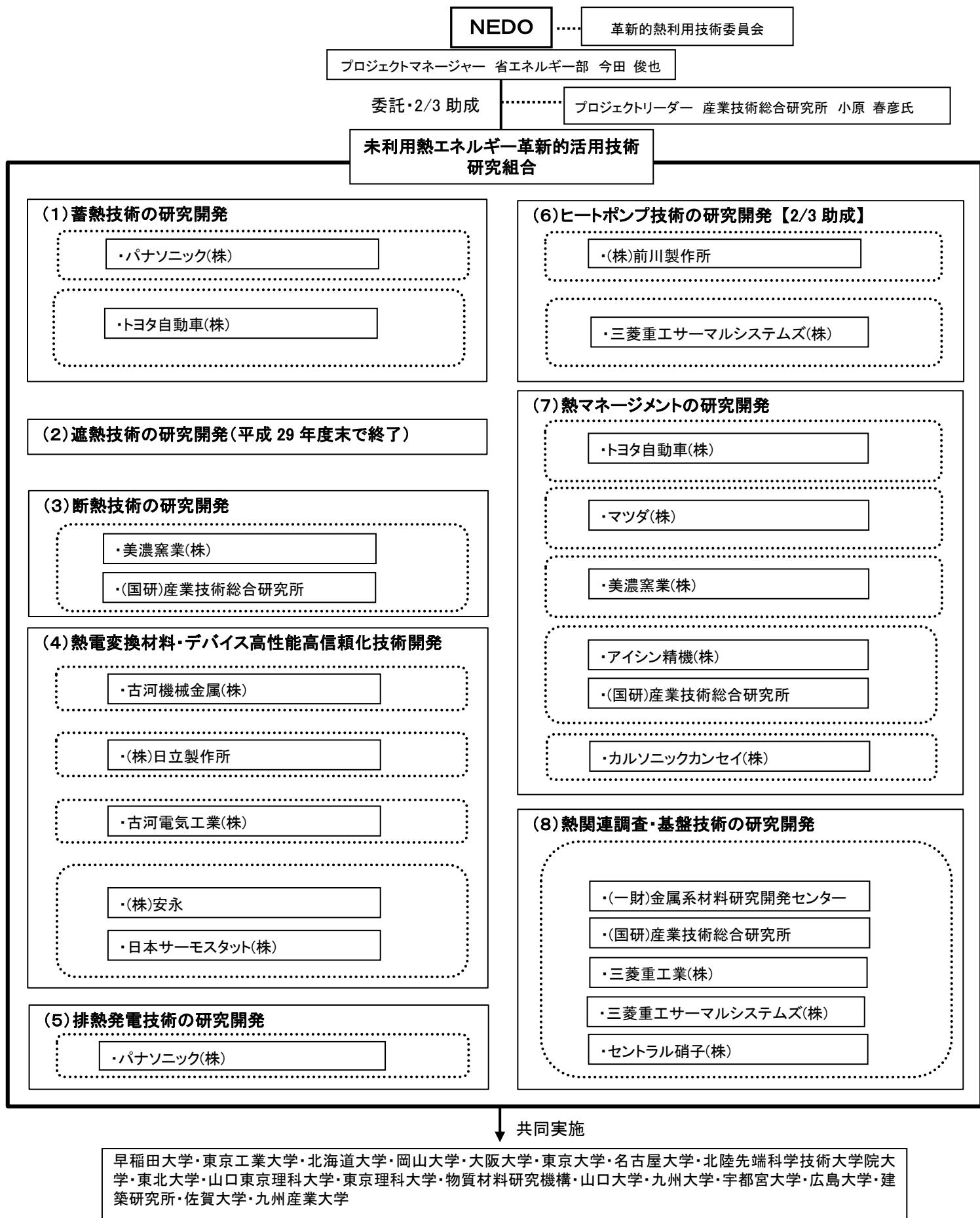
(4) 知財マネジメントに係る運用

「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) 平成30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)



(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)

