

「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」
終了時評価報告書

2024年3月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

2024 年 3 月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
理事長 斎藤 保 殿

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会 委員長 木野 邦器

NEDO技術委員・技術委員会等規程第34条の規定に基づき、別添のとおり評価結果について報告します。

「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」
終了時評価報告書

2024年3月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

目 次

はじめに	1
審議経過	2
分科会委員名簿	3
研究評価委員会委員名簿	4
第1章 評価	
1. 評価コメント	1-1
1. 1 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋	
1. 2 目標及び達成状況	
1. 3 マネジメント	
（参考）分科会委員の評価コメント	1-3
2. 評点結果	1-9
第2章 評価対象事業に係る資料	
1. 事業原簿	2-1
2. 分科会公開資料	2-2
参考資料1 分科会議事録及び書面による質疑応答	参考資料 1-1
参考資料2 評価の実施方法	参考資料 2-1

はじめに

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構においては、被評価プロジェクトごとに当該技術の外部専門家、有識者等によって構成される分科会を研究評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの研究評価を行い、評価報告書案を策定の上、研究評価委員会において確定している。

本書は、「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」の終了時評価報告書であり、NEDO 技術委員・技術委員会等規程第 32 条に基づき、研究評価委員会において設置された「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」（終了時評価）分科会において評価報告書案を策定し、第 76 回研究評価委員会（2024 年 3 月 18 日）に諮り、確定されたものである。

2024 年 3 月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

審議経過

● 分科会（2024 年 1 月 10 日）

公開セッション

1. 開会、資料の確認
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法について
5. プロジェクトの概要説明

非公開セッション

6. プロジェクトの詳細説明
7. 全体を通しての質疑

公開セッション

8. まとめ・講評
9. 今後の予定
10. 閉会

● 第 76 回研究評価委員会（2024 年 3 月 18 日）

「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」（終了時評価）

分科会委員名簿

(2024 年 1 月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	ひろた まさふみ 廣田 真史	愛知工業大学 工学部 機械学科 教授
分科会長 代理	しかぞの なお き 鹿園 直毅	東京大学*1 生産技術研究所 教授
委員	あきやま としかず 秋山 俊一	一般財団法人省エネルギーセンター 業務統括役 技監（兼）省エネ技術本部長
	さいかわ みちゆき 齋川 路之	一般財団法人電力中央研究所 グリッドイノベーション研究本部 研究アドバイザー
	しゅどう とし お 首藤 登志夫	東京都立大学 都市環境科学研究科 環境応用化学域 教授
	たけうち けい じ 竹内 敬治	株式会社 NTT データ経営研究所 社会・環境戦略コンサルティングユニット シニアマネージャー
	ゆあさ ひろみ 湯浅 裕美	九州大学*2 大学院システム情報科学研究所 情報エレクトロニクス部門 教授

敬称略、五十音順

注）*1：実施者の一部と同一大学であるが、所属部署が異なるため（実施者：東京大学生産技術研究所）「NEDO 技術委員・技術委員会等規定（平成 30 年 11 月 15 日改正）」第 35 条（評価における利害関係者の排除）により、利害関係はないとする。

*2：実施者の一部と同一大学であるが、所属部署が異なるため（実施者：九州大学大学院工 学研究院材料工学部門）「NEDO 技術委員・技術委員会等規定（平成 30 年 11 月 15 日改正）」第 35 条（評価における利害関係者の排除）により、利害関係はないとする。

研究評価委員会委員名簿

(2024 年 3 月現在)

	氏 名	所属、役職
委員長	きのの くにき 木野 邦器	早稲田大学 理工学術院 教授
委員	あさの ひろし 浅野 浩志	岐阜大学 特任教授 一般財団法人電力中央研究所 研究アドバイザー
	いなば みのる 稲葉 稔	同志社大学 理工学部 教授
	ごないかわ ひろし 五内川 拡史	株式会社ユニファイ・リサーチ 代表取締役社長
	すずき じゅん 鈴木 潤	政策研究大学院大学 政策研究科 教授
	はらだ ふみよ 原田 文代	株式会社日本政策投資銀行 常務執行役員
	まつい としひろ 松井 俊浩	東京情報デザイン専門職大学 情報デザイン学部 学部長・教授
	まつもと ま ゆ み 松本 真由美	東京大学 教育学部附属教養教育高度化機構 環境エネルギー科学特別部門 客員准教授
	よしもと ようこ 吉本 陽子	三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社 政策研究事業本部 経済政策部 主席研究員

敬称略、五十音順

第 1 章 評価

1. 評価コメント

1. 1 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

本事業は、アウトカム達成までの道筋の見直しの工程において、外部環境の変化や当該研究開発により見込まれる社会的影響等が考慮されていた。10 年の間に外部環境が非常に大きく変化する中、特に自動車に関連した研究開発項目では自動車の電化の動きなどがあり対応が難しい面もあったが、その変化に対応しながら全体的に良好に推進できていた。また、進捗状況を見て助成事業へ切り替えを実施したことで早期自立化が達成されたテーマも多かった。また、積極的な成果の PR により社会実装に向けた取り組みが適時適切に行われてきたことは、今後の事業化と普及促進が大いに期待できる。

オープン・クローズ戦略は、実用化・事業化を見据えた上で、クローズ領域とオープン領域が適切に設定されており、特にデータベースやシミュレーションソフトを公開することは、技術の普及促進や用途展開にも有効であった。また、海外への特許出願・権利化の促進も今後の市場展開・拡大を目指す上で非常に重要であり、研究開発成果の事業化に資するところが大きいと考える。

今後において、社会実装が期待できる技術については、NEDO が実施者との対話を通じて、補助金制度活用などの支援による社会実装促進の可能性を探ることが望まれる。また、標準化に向けて、現在の情勢を踏まえて、国際標準化のあり方や取り組み戦略について、実施者で検討することが重要と考える。

1. 2 目標及び達成状況

外部環境の変化や当該研究開発により見込まれる社会的影響等を踏まえてアウトカム指標・目標値を適切に見直していた。また、既に実用化・事業化に至っている技術もあり、アウトカム目標全体としては達成の蓋然性は高いと思われる。個別事業の実用化・事業化に向けた課題を明確にし、達成に向けた取組を行っており、情報発信、成果報告会等により、広く関心が高まり新たな用途への展開も見込まれていることから評価できる。

いずれの研究項目においてもアウトカム達成のために適切な最終目標が定められ、それに対して十分な成果が得られていた。また、熱電変換においては、目標を、当初の素子性能重視から、実際の普及に向けた障壁克服へと見直し、さらに、ヒートポンプ技術については、実測値では最終目標の値が得られていないが、原因を分析し、課題解決の検証も行ってみ通しを得ていた。くわえて、国内のみならず海外への特許出願件数も多く、登録された件数が多いことも評価できる。

一方で、高温ヒートポンプ、小型吸収式冷凍機、熱電変換等については、競合する技術があることから、それらとの優劣を明確にした上で、ニッチなところからでも良いので、具体的な市場を見つけて育てていくことが重要だと考えられる。また、事業終了とともに公開されていたデータベースへのアクセスが出来なくなっているが、重要な成果であるため継続的な使用が可能な対応が望まれる。

1. 3 マネジメント

本事業は、技術範囲が広く長期にわたるマネジメントが難しいものであったが、技術研究組合 TherMAT の関与と実施者間の連携によりシナジー創出を積極的に推進できる適切な実施体制を構築し、大きな成果を導き出すことができた。また、テーマの見直しを含む出口に近いテーマと遠いテーマを束ねて運営した管理体制は、今後の事業運営にも生かされるものと期待される。

アウトプット目標達成に必要な要素技術は十分に網羅され、中間評価の指摘事項にも適切に対応され、アウトプットの目標達成が可能な研究開発計画となっていた。

本事業において早期の実用化やより実用化に近づけるための別事業への展開、また、共通的な課題については、個別のテーマから切り分け基盤研究へ移行させて実施、さらには、小規模研究開発*という枠組みを設け、関連するテーマに役に立ちそうな基盤的な研究を実施するなど、研究開発の進捗状況や外部状況の変化に応じて、マネジメントが適切に行われた結果、目標を上回る成果が得られたものとする。

一方、熱電変換における実用化・事業化の観点では、排熱回収ユーザーのニーズ（発電コスト低減、大面積化、廃棄処理簡便化）を満たしておらず、本事業の成果が無駄になってしまう危惧がある。改めて、排熱回収ユーザーのニーズを見直し、今回開発した材料の特性を生かせる実用化研究に取り組んでいただくことを期待する。

今後は、エネルギーや素材の転換に伴う信頼性の評価などは個別企業で対応が難しいため、長期的なスパンで育成し、維持する仕組みを構築していくことが重要である。また、本事業の運営ノウハウを今後の事業に生かせるように、成功事例や失敗事例を共有していくことが期待される。

注) TherMAT：未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合

小規模研究開発*：関連するテーマに役に立ちそうな基盤的な要素技術の探索・育成に関する研究について、迅速に研究開発に取り組むため委託研究として実施した枠組み

(参考) 分科会委員の評価コメント

1. 1 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

<肯定的意見>

- ・ 10年の間に外部環境が非常に大きく変化し、特に自動車に関連した研究項目では対応が難しい面もあったと思うが、その変化に対応しながら全体的に良好に推進されていた。また、進捗状況によっては積極的に助成事業に切り替えることで早期自立化が達成されたテーマが多いことも評価できる。積極的なPRにより今後の事業化と普及促進が大いに期待できる。
- ・ オープン・クローズ戦略に基づく情報と知財の管理は実用化・事業化を進める上で有効な戦略と評価出来る。特にデータベースやシミュレーションソフトを公開することは、技術の普及促進や用途展開にも有効である。また、海外への特許出願・権利化の促進も今後の市場展開・拡大を目指す上で非常に重要であり、研究開発成果の事業化に資するところが大きいと考える。
- ・ 具体的な成果が上がっており、それらに基づいて今後ユーザーを巻き込んだ評価を進めていただき、製品競争力を高めていっていただきたい。
- ・ 登録された特許の数が多く、参加機関にとっても重要性の高いプロジェクト開発だったことが伺われる。
- ・ 第6次エネルギー基本計画、カーボンニュートラルなどエネルギー情勢の変化を考慮している。社会実装による省エネ効果、及び波及効果が大きいことを踏まえ、関連学会やENEX展など積極的な情報発信の取組がなされている。
- ・ 有用なデータは積極的に公開しており、評価できる。(工場排熱調査、ヒートポンプシミュレーション、材料データベース)
- ・ 研究開発の進捗状況や外部状況の変化をチェックしながら、研究開発を次のステージへステップアップさせたり、研究開発対象を拡大したり、あるいは成果のPRを積極的に行うなど、社会実装に向けた取り組みが適時適切に行われてきたと思われる。
- ・ 知的財産や標準化戦略の考え方やルールは良く整備され、これに基づいて事業が実施されている。
- ・ 「アウトカム達成までの道筋」の見直しの工程において、外部環境の変化や当該研究開発により見込まれる社会的影響等が考慮されている。
- ・ オープン・クローズ戦略は、実用化・事業化を見据えた上で、研究データも含めた上で、クローズ領域とオープン領域が適切に設定されており、妥当であった。
- ・ 自動車の電化の動きなどの外部環境の変化に対応した。多くの成果が得られ、製品化、事業化までの道筋が見えている技術も多い。
- ・ テーマごとに状況は異なるが、基本的な取り組み姿勢に問題はないように見受けられる。実用化・事業化に向けて、今後ますます重要になってくるので、この事業で蓄積した資産を活用していただきたい。

- ・ テーマによるので一概な評価ではないが、本事業終了後の自立化を見据えた計画となっているものがあつた。上市を達成したものもあり、高く評価される。また、論文や知的財産権を通じた発表、およびフリーのデータベース等、科学技術の社会への還元を念頭に幅広いステークホルダーに情報発信されていた。
- ・ 上述のように戦略的なオープン・クローズ領域設定が為されていた。

＜問題点・改善点・今後への提言＞

- ・ 想定されるアウトカムの形が事業者毎に若干異なっており、マネジメントが難しい点もあつたように思う。
- ・ 国際的な標準化への戦略がやや不明瞭であつたように思う。
- ・ まだ用途開拓フェーズのものも見受けられ、継続してニーズとのマッチングを進めていただきたい。
- ・ 公開可能なデータやプログラムについては、HP や展示会をはじめ様々な形で広く周知していただき、アクセスしやすいものにしていただきたい。
- ・ 目処がついた熱電発電の標準化について最終段階までのフォローをお願いしたい。
- ・ 得られた知的財産については、事案ごとに詳細に評価する必要がある。今後のチェックに期待する。
- ・ 全てのテーマについて、アウトカム目標達成に向けた具体的な道筋の検討が実施者任せであつた。既存の助成制度の活用で社会実装が促進できると思われる技術もあつたので、NEDO は、実施者との対話を重ねて、政策支援による社会実装促進の可能性を探っていただきたい。
- ・ 熱電モジュールの計測法の国際標準化については、NEDO クリーンデバイス社会実装推進事業「熱発電デバイスによる中温度域独立給電型センシングモジュールの用途開拓」（2015 年度～2017 年度）における取り組み以降の進展が見られず、IEC TC47/WG7 国内委員会において、今年度も具体的な活動は見られなかった。過去の活動にとらわれず、現在の情勢を踏まえて、国際標準化のあり方や取り組み戦略について、あらためて検討していくことが必要ではないか。
- ・ 本プロジェクトが終了した後のプランが見えないテーマも混在している。当初目標の設定が事業化でない場合、判断は難しい。
- ・ 標準化への本プロジェクトの貢献度は可視化されていない。継続して行う事が重要と思われる。

1. 2 目標及び達成状況

＜肯定的意見＞

- ・ 研究項目によっては外部環境が非常に大きく変化したが、その変化に対応してアウトカム目標が適切に設定されていた。また、アウトカム目標達成のための課題と取り組みも十分整理されており、アウトカム目標の達成が大いに期待できる。アウトカムの実現が日本の経済や国際競争力に与える効果は非常に大きく、今後の展開に期待する。

- ・ いずれの研究項目においてもアウトカム達成のために適切な最終目標が定められ、それに対して十分な成果が得られている。国内のみならず海外への特許出願件数も多く、また登録された件数が多いことも評価出来る。研究発表や PR も積極的に行われており、今後の事業化や普及促進への布石が打たれている。
- ・ 断熱材や蓄熱材など、汎用性の高い素材については、ユーザーニーズとのすり合わせを今後さらに深化、拡大させることで、市場導入が大きく進展することが期待できる。
- ・ 熱電変換の目標を、当初の素子性能重視から、実際の普及に向けた障壁克服へと見直したことは妥当である。
- ・ 各テーマの実用化に向けた課題を明確にし、達成に向けた取組を行っている。情報発信、成果報告等により、広く関心が深まり新たな用途への展開も見込まれており、評価できる。
- ・ 特に省エネ効果の大きいヒートポンプ技術については、実測値では最終目標の値が得られていないが（見通しを得た）、原因を分析しており、課題解決の検証も行っている。
- ・ アウトプットの先にあるのがアウトカムであり、アウトカム目標を設定するのは難しい面もあるが、外部情勢等を踏まえつつ、適切に設定されてきたと思われる。
- ・ 全ての研究開発項目において、目標を達成しており、一部は目標以上の成果が得られている。
- ・ 外部環境の変化や当該研究開発により見込まれる社会的影響等を踏まえてアウトカム指標・目標値を適切に見直していた。
- ・ 最終目標の達成状況は概ね良好である。
- ・ 既に実用化・事業化に至っている技術もあり、アウトカム目標全体としては達成の蓋然性は高いと思われる。社会情勢の変化で、本プロジェクトの重要性はますます高まっており、今後の社会実装の進展に期待できる。
- ・ 各テーマにおいて、優れた成果が多く得られ、ほとんどのテーマで実用化・事業化に向けた取り組みにスムーズに移行できているように見受けられる。
- ・ 10 年間の間には、ターミネートしたテーマもあり、外部環境に応じて目標を見直していた事が分かる。一方、市場規模の見込みが変化すること、利益は技術だけで決まらないことからすると、アウトカムはハッピーケースの状況であり、これを達成するかどうかはあまり重要ではない。
- ・ テーマにより目標の位置づけが異なるため統一見解は難しいが、上市した実績は高く評価される。

<問題点・改善点・今後への提言>

- ・ 開発された機器の普及促進のためには、初期導入コストが障壁になると考える。フィールドで取得されたデータに基づき改良を進めることでより大きな市場展開が期待されるため、この障壁を取り除くような助成金などの取り組みも進めていただきたい。

- ・ プロジェクトの終了とともに公開されていたデータベースへのアクセスが出来なくなったケースがあったが、重要な成果であるため継続的な使用が可能な仕組みを構築していただきたい。
- ・ 高温ヒートポンプ、小型吸収式冷凍機、熱電変換等については、競合する技術があることから、それらとの優劣を明確にした上で、ニッチなところからでも良いので、具体的な市場を見つけて育てていくことが重要だと考えられる。
- ・ 車両熱マネージメント技術は、目標は達成しているものの、個別企業の自社開発ではなく国プロとして実施する意義について、そのポイントを分かりやすく説明して欲しい。
- ・ 高温の産業用ヒートポンプは、省エネ・カーボンニュートラルの対策として期待も大きいので、今後実測で最終目標値をクリアする努力をお願いしたい。
- ・ アウトプットからアウトカムを得るためには、事業終了後の取り組みが重要であり、このフォローをしっかりと実施すべきである。
- ・ 熱電変換素子を用いたエンジン排熱の回収の効果は実用レベルからは遠い。
- ・ 熱電変換については、自動車以外の出口への道筋が曖昧なまま進められてしまったのは残念であった。廃熱回収をメインの出口とするのであれば、発電コストの低下、大面積化、環境負荷低減（廃棄処理簡便化）がユーザーのニーズ（IDTechEx社調査結果より）であることを踏まえ、本事業における取り組み内容を改善することで、アウトカム目標達成の蓋然性が高められたと考える。
- ・ 熱電変換については、自動車以外の出口への道筋が曖昧なまま進められてしまったのは残念であった。廃熱回収をメインの出口とするのであれば、発電コストの低下、大面積化、環境負荷低減（廃棄処理簡便化）がユーザーのニーズ（IDTechEx社調査結果より）であることを踏まえ、本事業における取り組み内容を改善することで、アウトカム目標達成の蓋然性が高められたと考える。
- ・ 熱電変換については、従来材料はレアメタルを使用するなど経済性に課題という問題意識がプロジェクトの初めからあったはずが、アウトプット目標の変換効率を達成するために、課題を抱える既存のBiTe材料とのカスケード構造を採用するという、取り組みになってしまった。BiTe材料とのカスケード構造の熱電モジュールは、廃棄に手間がかかり、廃熱回収ユーザーのニーズを満たさない可能性も考えられ、本プロジェクトの成果は、実用化・事業化にはつながらず、成果が無駄になってしまいう危惧があるので、改めて、出口としての廃熱回収ユーザーのニーズから出発して、今回開発した材料の特性を生かせる実用化研究に取り組んでいただきたい。
- ・ 技術アウトプット1つからアウトカムを見積もることは本来難しく、あまり意味が無いのではないかと考えられる。
- ・ 達成しても事業への貢献が見えにくいテーマもあり、そのままCO₂削減量や市場規模を支えているとは言い難い。そういったテーマについては、位置づけを明確化した上で、別の指標を当初から取り入れるべきだったものもある。

1. 3 マネジメント

<肯定的意見>

- ・ テーマ間の連携をより深めるとさらに効率的に研究開発を進めることができるため、**TherMAT** により実施者間の連携が促進された点は高く評価出来る。進捗管理と研究課題の把握も密に行われており、プロジェクトの適切な推進が可能な体制になっていた。
- ・ アウトプット目標達成に必要な要素技術は十分に把握されており網羅されていた。中間評価における指摘事項に対しても適切な対応がなされており、アウトプットの目標達成が可能な研究計画となっていた。
- ・ 非常に長期で多岐にわたる内容を取り纏めたという点で、マネジメントは適切であったと言える。また、個別事業者間の連携は、プロジェクト初期と比べると格段に進んだと考えられる。
- ・ カーボンニュートラル実現前倒しやウクライナ侵攻など、社会情勢の大きな変化にも柔軟に対応していた。
- ・ 研究組合の設立・運営や、実施者間での連携など複数のテーマを効率的にマネジメントしており評価できる。成果報告会や **ENEX** への出展など、PR 活動を積極的に行っており、中間評価での指摘事項に対して、的確に対応しており、評価できる。
- ・ 分室（事業者）間連携によりシナジー創出を積極的に推進しており評価できる。
- ・ 目標以上の成果が創出された点で、**NEDO** のマネジメントとともに、参画組織間での連携もうまく進んだものと思われる。
- ・ あるものは早期に実用化され、あるものはより実用化に近づく別のプロジェクトへの展開が図られ、また、共通的な課題については、個別のテーマから切り分け基盤研究へ移行させて実施、さらに、小規模研究開発という枠組みを設け、関連するテーマに役に立ちそうな基盤的な研究を実施するなど、研究開発の進捗状況や外部状況の変化に応じて、マネジメントが適切に行われた結果、目標を上回る成果が得られたものとする。
- ・ 実施者は技術力や実用化・事業化の能力を発揮した。
- ・ アウトプット目標達成に必要な要素技術の開発は概ね網羅されていた。
- ・ スcopeが広く長期間にわたる困難なプロジェクトであったが、適切な実施体制を組み、大きな成果を導出することができた。技術研究組合 **TherMAT** による連携の効果も得られた。
- ・ 外部環境の変化や中間評価における指摘事項にも対応し、適切な管理ができた。
- ・ 途中での見直しなども含め、出口に近いテーマと遠いテーマを束ねて運営した管理体制は、今後の大型プロジェクト運営にも活かされるものと期待できる。
- ・ 事業化を果たして卒業したり、実現性を見積もって撤退したり、と変化の多い10年プロジェクトであったことから、進捗管理は適切であった。

<問題点・改善点・今後への提言>

- ・ 実施者間の連携促進が図られる体制となっていたが、もう少し深く連携することでより適切な目標設定と研究開発が可能になったテーマもあったように思う。
- ・ 各実施者の研究開発計画は妥当であるが、テーマ間の連携を促進するために計画（達成時期）の調整を図るとより開発が進むと考える。
- ・ エネルギーや素材の転換に伴う信頼性の評価等は個別企業で対応するのは困難である。このような共通基盤技術については、プロジェクト終了とともに遮断されることなく、より長期的なスパンで育成し、維持する仕組みを構築すべきだと考えられる。
- ・ 技術組合を含めた参加機関間の会合など活発に開催されていたが、外部の情報や意見をより柔軟に反映できる仕組みがあったら、より良かったと思われる。
- ・ 今後の波及効果等をうまく発信できる仕組みがあると良い。
- ・ 熱電変換素子を用いたエンジン排熱の回収において、熱利用率の向上に向けた要素技術開発があると更に良かった。
- ・ これからが社会実装の本番であるが、**TherMAT** がなくなって成果の **PR** や技術の継承等にも支障が出てくることが危惧される。継続的な取り組みに向けた予算措置等を検討いただきたい。
- ・ 今回の事業運営のノウハウを、今後の大規模プロジェクトに生かせるような取り組みが有益ではないか。過去のプロジェクトの成功や失敗を新たなプロジェクトの **PL**、**PM** と共有する機会を設けるなど。
- ・ 問題は特にない。しかし、実用化から遠いテーマを抱える場合、それぞれのテーマのポジションを毎度明確化し、それぞれに対して意味のある目標を明示する必要はあったものと思う。
- ・ テーマは縦割りであり、要素技術同士の連携はあまり見られなかったようである。

2. 評点結果

評価項目・評価結果		各委員の評価							評点
1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋									
(1)アウトカム達成までの道筋		A	B	A	A	A	B	A	2.7
(2)知的財産・標準化戦略		A	B	A	B	A	B	A	2.6
2. 目標及び達成状況									
(1)アウトカム目標及び達成見込み		A	B	A	B	A	A	B	2.6
(2)アウトプット目標及び達成状況		A	B	B	A	B	A	A	2.6
3. マネジメント									
(1)実施体制		A	A	A	A	A	A	A	3.0
(2)研究開発計画		A	B	A	A	B	A	A	2.7

《判定基準》
A：評価基準に適合し、非常に優れている。
B：評価基準に適合しているが、より望ましくするための改善点もある。
C：評価基準に一部適合しておらず、改善が必要である。
D：評価基準に適合しておらず、抜本的な改善が必要である。

（注）評点は A=3、B=2、C=1、D=0 として事務局が数値に換算・平均して算出。

第 2 章 評価対象事業に係る資料

1. 事業原簿

次ページより、当該事業の事業原簿を示す。

「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」

事業原簿

担当部	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 省エネルギー部
-----	--

内容

概要	4
プロジェクト用語集	9
1. 意義・アウトカム(社会実装)達成までの道筋	11
1.1. 事業の位置づけ・意義	11
1.1.1 事業の背景・目的	11
1.1.2 事業の政策的位置付け	13
1.1.3 国内外の研究開発の動向と比較	15
1.1.4 実施の効果(費用対効果)	16
1.2. アウトカム達成までの道筋	18
1.3. 知的財産・標準化戦略	19
2. 目標及び達成状況	20
2.1. アウトカム目標及び達成見込み	20
2.1.1 本事業における「実用化・事業化」の考え方	20
2.2.2 成果の実用化・事業化に向けた戦略・具体的取組	20
2.2.3 アウトカム達成見込み	20
2.2. アウトプット目標及び達成状況	21
2.2.1 事業の目標	21
2.2.2 研究開発項目毎の達成状況	24
3. マネジメント	28
3.1. 実施体制	28
3.1.1 NEDO が実施する意義	28
3.1.2 研究開発の実施体制	28
3.1.3 研究開発の運営管理	31
3.2. 受益者負担の考え方	32
3.3. 研究開発計画	33
3.3.1 事業計画	33
3.3.2 中間評価結果への対応	34
3.3.3 情勢変化への対応	35
4. 目標及び達成状況の詳細	37
4.1. 研究開発項目毎の目標の詳細	37
4.2. 研究開発項目毎の達成状況の詳細	42

(添付資料)

- ・プロジェクト基本計画
- ・特許論文等リスト

概要

		最終更新日	2023 年 12 月 1 日		
プロジェクト名		未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発		プロジェクト 番号	P15007
担当推進部/ PMgr または担当者 及び METI 担当課		省エネルギー部 岩坪 哲四郎（2015 年 7 月～2016 年 4 月、2020 年 4 月～）：PM（2020 年 4 月～2023 年 3 月） 小笠原 有香（2017 年 7 月～2021 年 1 月）：サブ PM（2018 年 7 月～2021 年 1 月） 楠瀬 暢彦（2015 年 4 月～2017 年 8 月）：PM（2015 年 4 月～2017 年 8 月） 今田 俊也（2017 年 8 月～2018 年 6 月）：PM（2017 年 9 月～2018 年 6 月） 近藤 篤（2015 年 4 月～2020 年 3 月）：PM（2018 年 7 月～2020 年 3 月） 梅村 茂樹（2015 年 4 月～6 月）、鍛冶 日奈子（2015 年 4 月）、 谷 泰範（2015 年 4 月～2016 年 4 月）、田中 裕司（2015 年 4 月～2018 年 3 月）、 星野 光男（2015 年 4 月～2018 年 3 月）、松原 健（2015 年 5 月～2018 年 4 月）、 永井 恒輝（2015 年 7 月～2018 年 6 月）、竹内 由実（2015 年 4 月～2020 年 3 月）、 太田 年彦（2018 年 4 月～2021 年 3 月）、高橋 伸幸（2018 年 5 月～2021 年 1 月）、 永田 重陽（2019 年 7 月～2021 年 6 月）、亀田 治邦（2020 年 4 月～2023 年 3 月）、 島田 守（2020 年 4 月～2023 年 3 月）、占部 亘（2020 年 7 月～2022 年 6 月） 野田 佳保子（2021 年 7 月～2023 年 3 月）、笠原 宏併（2022 年 3 月～2023 年 3 月） 後藤 直彦（2022 年 7 月～2023 年 3 月） METI 担当課 製造産業局 金属課（～2019 年度） 資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 省エネルギー課（2020 年度～2023 年度）			
0. 事業の概要		未利用熱エネルギーを効果的に、削減（Reduce：断熱、遮熱、蓄熱等）、再利用（Reuse：ヒートポンプ技術等）、変換利用（Recycle：熱電変換、排熱発電等）するための技術をNEDOは熱の 3 R 技術と呼んでおり、本事業では、その開発とこれらを横断的に扱う熱マネジメント技術・基盤技術の開発を行う。本事業は、得られる成果の実用化・普及を通じて、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・変換利用し、2030年に原油換算で600万kL/年以上の省エネルギー効果と1,700万t-CO ₂ /年以上のCO ₂ 排出削減効果を目指す。			
1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋					
1.1 本事業の位置付け・意義		事業実施の背景と事業の目的 我が国では、石油、石炭、天然ガスといった化石燃料を中心とする一次エネルギーが電力・燃料等に変換・輸送・貯蔵するフローにおいて、その3～4割が有効利用できずに熱として失われている(エネルギー・ロス)。さらに、消費者が最終的に活用する、真に必要なエネルギーに再変換する段階においてもエネルギー・ロスが発生するため、一次エネルギーの6～7割が熱として失われている。一次エネルギーの9割を輸入に頼り、その金額が16兆円(2019年度)にも上る我が国にとっては、これはとても大きな問題である。また、化石燃料は、燃焼して必要なエネルギーに変換するまでにCO ₂ を排出するため、いかにエネルギー・ロスを大幅に減らすかが、我が国が2050年までに80%の温室効果ガスの排出削減を目指す上でも重要な課題である。社会全体のエネルギー・ロスを削減し、エネルギー効率を向上させて徹底した省エネルギーを実現するためには、このような利用されずに捨てられる熱、「未利用熱エネルギー」(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。 また、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。我が国では、研究開発とそれによるイノベーションの創出の大半を企業が担っているが、近年、その企業における研究開発が短期化かつ短視野化しており、その多くが改良型の研究開発であって、抜本的なイノベーションを生み出す可能性を秘めた中長期的研究への投資は少なくなっているといわれている。 更に、海外に目を向けると、中国や米国、欧州など、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。特に、パリ協定の採択以降、2050年までの温室効果ガスの大幅な排出削減に向けて野心的な取り組みをリードする欧州では、熱利用に関するロードマップや白書が策定され、産業から排出される未利用熱の利活用をさらに推進する方針が示されている。そのような方針のもとで、欧州委員会(EC)の研究資金助成プログラムHorizon 2020でも、TASIO、TransFlexTeg、I-ThERM、DryFiciency、CREATE等、未利用熱の活用に関する研究開発が活発になされており、熱利用に関する100%補助プロジェクト事業には、10億円/年以上の予算が投じられている。また、その後継プログラムとして、新たにHorizon Europeがある。これら以外も含め、欧州各国では未利用熱を活用する取り組みが活発に推進されている。 このような背景の下、産学官連携による中長期的研究開発を重点的に行い、古くから研究開発の行われている我が国の未利用の3R技術・熱マネジメント技術について、未来の省エネルギーに向けたフロンティア			

	として革新し、大型予算をもつ海外勢との将来的な技術・市場競争に打ち勝つとともに、国内の3E+S (Energy security (安定供給)、Economical efficiency (経済性)、Environment (環境) + Safty (安全))の実現と、さらに全世界でのクリーンエネルギーへの移行という諸課題の解決に大きく貢献することを目指して、NEDOは本事業を実施する。 政策的位置付け 「エネルギー基本計画」(2021年7月、閣議決定)においては、2030年に向けては徹底した省エネルギー社会の実現のため、各分野において革新的な省エネルギー技術の開発と、さらに廃熱利用や熱システムの脱炭素化を促進することが重要であることが示されている。 「革新的環境イノベーション戦略」(2020年1月、統合イノベーション戦略推進会議決定)においても、2050年までの確立を目指す具体的な行動計画(5分野16課題)に貢献する1つのテーマとして、「未利用熱・再生可能エネルギー熱利用の拡大」があり、高効率な断熱材、ヒートポンプ、熱電変換技術や、熱の評価技術の開発についての支援の必要性が明示されている。 さらに、経済産業省資源エネルギー庁とNEDOは、第5次エネルギー基本計画などの政府の方針を踏まえ、省エネルギー技術戦略の重要技術を2019年7月に改定し、廃熱利用や熱システムの脱炭素化を促進するため、廃熱を高効率に電力に変換する技術や高効率電力加熱技術などを重要技術に追加している(排熱の高効率電力変換、熱エネルギーの循環利用、高効率電気加熱(誘電加熱、レーザー加熱、ヒートポンプ加熱)など)。 NEDOが関与する意義 NEDOは、「持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針」を策定した。この指針では、持続可能な社会を実現する3つの社会システム(「サーキュラーエコノミー」「バイオエコノミー」及び「持続可能なエネルギー」)を掲げ、これらの一体的かつ有機的な推進により、非連続なイノベーションにつなげ、経済合理性を持って社会実装を実現させていくことが重要としている。 本事業の狙いは、自動車・産業等幅広い分野において大きな課題となっている未利用熱の有効利用に関して、経済的に回収する技術体系を確立する(ハイリスク・連携必要)と同時に、同技術の適用によって日本の主要産業の創生とともに競争力を強化し(ハイリスク・連携必要)、社会全体のエネルギー効率を向上することを目指すもの(公共性/汎用性・連携必要)であることから、「持続可能なエネルギー」を実現するためのNEDOの指針に合致する。さらに、材料開発からシステム化までには長い研究開発期間を要するため、単独企業ではリスクが大きく、また、シーズ技術の橋渡しをしながら産学官の叡智を結集して、システムとしての省エネルギー効果を目指す必要があることから、中長期のNEDOプロジェクトとして実施すべきものである。 例えば、高温ヒートポンプ用の新規冷媒については、さまざまなユーザーが想定されるため冷媒データベースの登録等の標準化が求められるが、そのための冷媒研究はヒートポンプメーカーの収益に直結するものではなく、大学や研究機関が主体となって実施すべきものである。そのため、メーカーを含めた産学連携体制で、新規冷媒の物性評価等の基盤研究とデータベース化を推進する必要がある(公共性/汎用性・連携必要)。また、熱電変換材料について、200～600℃で利用可能な熱電変換材料の研究は、長年研究が行われているものの実用化に至っていない。そのため、産学の英知を結集し、中長期の腰を据えた研究開発により材料探索フェーズから脱却するとともに、熱電材料性能の正しい評価と我が国の優位性を担保するため、性能評価技術の国際標準化を推進することが必要とされる(ハイリスク・連携必要)。
1.2 アウトカム達成までの道筋	本事業の研究開発成果の2030年時点における波及効果として、原油換算で600万kL/年程度以上の省エネ、1,700万t-CO₂/年程度以上のCO₂削減効果を見込んでいる。委託事業において要素技術開発を実施し、助成事業にて実用化を見据えた開発、さらには各事業者にて実施する実用化へのフェーズ移行は進捗状況に合わせ、早期自立化を達成する。また、基盤技術の公開や成果のPRを積極的に行い、普及促進と新たな用途展開への進展を促す。社会情勢の変化に伴う電化の方向性、熱利用の動向など外部環境の変化を注視し、市場探索・拡大へと波及させることを狙って事業を展開する。
1.3 知的財産・標準化戦略	本事業で扱う技術領域は、未利用熱の活用という共通目的を有しつつも、競争的に開発を行う部分が生じるため研究項目間の情報管理は徹底して行いつつ、全体としてのシナジー創出のために全ての研究項目に有益な調査・基盤技術の成果は共有するなどして、オープン/クローズの考え方にに基づき、情報管理と知財運営を実施している。たとえば、競争領域の材料組成やシステム構成に関する知財は、企業経営と一体化した運営を行い積極的に権利化する。このとき、将来的な市場拡大が見込まれる海外出願も積極的に実施している。企業経営の変化により、国外に技術流出が行われる可能性がある場合などは、産業財産権を積極的に国内企業等へ移転するなど、柔軟に対応する。また、競争領域の非公開情報は、基本的には企業のノウハウとして秘匿すべきものであるが、組合内の縦連携の活動の中で、適宜開示を促すようなマネジメントを実施する。さらに、非競争領域で非公開の工場熱計測データなどについては、組合内の非公開ワーキンググループや技術委員会、非公開報告書等で共有する。知的財産権等については、NEDO に報告を義務付け、開発技術の特許出願・権利化を逐次把握する。 さらに、実施者である組合においては、組合内連携を有機的に行うため、本事業の試験・研究目的であれば、プロジェクト参加者が所有するバックグラウンド知財については所定の手続きを事前に行うことで委託研究の中で自由に実施可能とすること、本事業(委託)で得られた知財については自由に実施可能とすることなどを規定した「知的財産権及びサンプルの取扱いに関する規程」を整備している。

		また、熱電変換材料の開発のように、設定した目標に対して多くのアプローチが想定される研究開発項目については、実施者間の競争による研究の進展も図っている。									
2. 目標及び達成状況											
2.1	アウトカム目標及び達成見込み	アウトカム目標： ・2030年時点において、原油換算で600万kL/年以上の省エネ ・1,700万t-CO₂/年程度以上のCO₂削減効果 達成見込み 既存技術の限界及びコスト面での制約から、未利用熱エネルギーの大半、特に中低温領域の排熱は大部分が廃棄されているが、断熱材・蓄熱材・熱電材料等に代表される各種熱マネジメント部材の革新的な技術開発を通し、本プロジェクトの成果の実用化・事業化から、普及促進することによりアウトカムである未利用熱を有効活用できるシステムを確立すること、さらに波及効果として未利用熱の活用が可能であることを実証し、可能性と必要性を広く認知し、様々な分野・用途への適用の検討、技術の普及促進が得られ、産業分野、運輸分野、民生分野における社会実装を実現し、更なる省エネ化を進めることにより、アウトカム目標を達成することを見込んでいる。 また、開発成果による 2030 年における国内市場創出は 2,100 億円/年以上、世界市場創出は 1.3 兆円/年以上を見込んでいる。									
2.2	アウトプット目標及び達成状況	【断熱】ファイバーレスで、耐熱 1500℃以上、圧縮強度 20MPa 以上、熱伝導率 0.20W/m・K 以下、 【遮熱】可視光線透過率 70%以上、日射熱取得率 43%以下、 【蓄熱】20℃～25℃環境下で 24h 以上、 【熱電】受熱温度 200℃～600℃の条件で発電効率 15%以上のモジュール、出力 200W(モジュール出力密度 2W/cm2) の発電ユニット、 【排熱発電】出力 1kW クラスの実証、 【ヒートポンプ】最高加熱温度 200℃、熱源水温度 80℃、加熱器出口温度 180℃加熱条件で COP:3.5 以上、 【熱マネジメント】産業分野等の熱マネジメント技術・システム開発、 【熱関連調査・基盤技術】産業用高温 HP 向け冷媒物性情報の収集、統合解析シミュレーション技術の構築等の目標を達成した。									
3. マネジメント											
3.1	実施体制	経産省担当原課	製造産業局 金属課（～2019 年度） 資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 省エネルギー課（2020 年度～）								
		プロジェクトリーダー	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								
		プロジェクトマネージャー	楠瀬 暢彦（2015 年 4 月～2017 年 8 月） 今田 俊也（2017 年 9 月～2018 年 6 月） 近藤 篤（2018 年 7 月～2020 年 3 月） 岩坪 哲四郎（2020 年 4 月～2023 年 3 月）								
		委託・助成先	未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合（TherMAT） 組合員（参加 21 社、1 財団、1 研究機関） 共同実施：早稲田大学、岡山大学、大阪大学、東京大学、名古屋大学、東北大学、山口東京理科大学、物質材料研究機構、山口大学、九州大学、佐賀大学、九州産業大学、早稲田大学								
3.2	受益者負担の考え方 事業費推移 (単位:百万円)		2015FY	2016FY	2017FY	2018FY	2019FY	2020FY	2021FY	2022FY	総額
		一般会計	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		特別会計(需給)	1,920	1,720	917	650	675	747	586	293	7,508
		開発成果促進財源			(67)		(45)	(99)		(13)	(224)
		総 NEDO 負担額	1,920	1,720	917	650	675	747	586	293	7,508
		(委託)	1,920	1,720	917	603	630	689	561	120	7,160
		(助成) 助成率 2/3	—	—	—	47	45	58	25	173	348

3.3 研究開発計画			
情勢変化への対応	NEDO は、プロジェクトの進捗状況や、革新的熱利用技術委員会の結果、市場・技術動向を踏まえ、情勢変化に対応したプロジェクトの運営・管理を推進した。情勢変化への主な対応事例は以下のとおり。 ①プロジェクトの体制強化 ・「機械・化学産業分野の高温熱供給ヒートポンプに適した冷媒の技術開発」において、種々の物性値を再現可能な高精度ヘルムホルツ型状態方程式の開発と「REFPROP」用データファイルを作成する実績を有する九州産業大学を神戸分室の共同実施先に追加した。（2018 年度） ・近年の電気駆動車の普及とパワートレインシステムの多様化を受け、自動車の熱の流れが大きく変化していくことが予想される中で、自動車全体の熱流れを解析可能にするモデルを構築し、電動化に伴って変化する将来の熱の流れを見える化できるようにするため、広島分室を中心とした A11 TherMAT の取組みとして、熱流れの計測解析技術の開発と自動車全体の熱流れのモデル構築の取り組みを開始した。（2018 年度）また、佐野分室と熱電変換関係分室とで連携し、ハイブリッド自動車の排気回収システムへ熱電発電モジュール搭載する際の最適配置や燃費効果の検討を開始した。（2020 年度） ・「車両用高効率排熱利用・冷房用ヒートポンプの研究開発」において、冬季の換気損失を低減するための湿度交換器システムに必要な、高分子収着剤を用いた耐水性能の高い透湿シートの開発を行うため、日本エクスラン工業株式会社を佐野分室に追加した。（2019 年度） ・本事業は、2020 年度から省エネ施策として再構築し、システム化開発を重点化するなど、実用化に向けたマネジメントを一層強化した。（2020 年度） ・参画企業による実用化を促進するため、研究開発項目の再整理を実施し、一部テーマを助成事業に移行した。（2022 年度） ②ステージゲート方式の採用 熱電変換技術のシーズ探索・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として実施し、ステージゲート方式を採用して、年度ごとにその継続の妥当性等を審議しながらテーマを推進した。 ③欧州における熱利用技術に関する最新技術動向及び市場導入条件調査 パリ協定の採択以降、2050 年までの温室効果ガスの大幅な排出削減に向けて野心的な取り組みをリードする欧州を対象として、熱利用技術に関する最新技術動向及び市場導入条件調査を実施し、TherMAT 内で結果の共有を行った。 また、NEDO がドイツ環境・自然保護・原子炉安全省（BMU）及び経済・エネルギー省（BMWi）と共催した日独エネルギー・環境フォーラムや NEDO とスペイン政府・産業技術開発センター（CDTI）との合同ワークショップ等においても、昨今の欧州各国における情勢と、我が国の未利用熱活用技術に対する関心について、情報収集を実施した。		
	2020 年度中間評価結果への対応	指摘事項	
投じた研究開発費に対して相応の成果が得られたかどうか、個々のテーマ終了後のフォローをしっかりとやって戴きたい。実用化に向け、システムとして目標とする性能を達成するための取り組みとして、今まで以上に研究全体の進捗を促すコーディネーター役を期待する。（2020 年度中間評価）		個別テーマごとの実用化・事業化戦略と進捗を照らし合わせ、一部前倒しにより 2022 年度は委託事業から助成事業にフェーズを移行するものや、各事業者での実施に移行する等、早期実用化を目指した。	
実用化の担い手やユーザーに向けて成果を普及させるための取組をさらに進めることが望ましい。市場ニーズから出て来るスペックへの対応が望まれる。（2020 年度中間評価）		研究の進捗による成果創出と PR 活動により、問い合わせ・引き合いなどにより、多くの市場ニーズが事業者集まる状況が作られ、製品化等の対応がなされている。	
開発技術等の導入に対する意欲が湧くよう、ユーザーへの PR・情報発信や、政策や助成金など効果的な後押しが望まれる。（2020 年度中間評価）		PR 活動として、成果報告会の開催、ENEX に出展、YouTube（NEDO Channel）に動画掲載、NEDO 広報誌 Focus NEDO の特集、学会講演などを積極的に行なった。	
評価に関する事項	事前評価	2012 年度 経済産業省で事前評価	
	中間評価	2015、2017、2020 年度 中間評価実施	
	終了時評価	2023 年度 終了時評価実施	
別添			

投稿論文	211 件	
特 許	551 件（うち海外出願 205 件）	
その他の外部発表 （プレス発表等）	講演・発表：664 件、プレス発表：20 件、雑誌・新聞・広報媒体：13 件、展示会出展：12 件、表彰：20 件	
基本計画に関する 事項	作成時期	制定：2015 年 3 月
	変更履歴	改訂：2016 年 3 月（プロジェクトマネージャー及びプロジェクトリーダーの氏名等追記。） 2018 年 3 月（2017 年度中間評価結果及びプロジェクトマネージャーの交代に伴う氏名等の変更等を踏まえた変更。） 2019 年 2 月（プロジェクトマネージャーの交代に伴う氏名等の変更等を踏まえた変更。） 2020 年 2 月（研究開発項目③「蓄熱技術の研究開発」及び⑥「排熱発電技術の研究開発」における研究開発は2019年度をもって終了とし、2020年度から研究開発項目⑦「熱マネジメントの研究開発」でのシステム化開発に移行することに伴う変更、2020年度中間目標の明記等の変更。） 2020 年 5 月（プロジェクトマネージャーの変更等に伴う軽微な変更。） 2021 年 1 月（2020 年度中間評価結果等を踏まえた変更。） 2022 年 1 月（研究開発の内容の軽微な変更。） 2023 年 11 月（プロジェクト最終成果の追記と終了時評価のための様式変更。）

プロジェクト用語集

用語	説明
吸収冷凍機	熱をエネルギー源として冷房するシステム。吸収液が冷媒を吸収する際に生じる気化熱を利用して冷房します。冷媒で薄まった吸収液を濃縮するために排熱を使用します。
クラスレート化合物	カゴ状の結晶構造を有する金属間化合物で、元素を内包したカゴ状の多面体同士が、互いに面を共有しながら立方晶を形成することにより、高性能な熱電変換材料として期待されています。
クラスレートハイドレート	水分子が作る籠型構造(クラスレート構造)の中にゲスト分子を取り込んだ独特な構造を持つ結晶。氷と類似構造を有することから、氷同等の高密度蓄熱が期待されます。
シリサイド	ケイ素とより電氣的陽性な元素(金属)との化合物。熱電変換材料の中でも、環境親和性、安定供給性、コストなどの観点で優れる、実用的な熱電変換材料として期待されています。
スキッテルダイト	スキッテルダイト TX3 (T:遷移金属 Co、Fe など、X:プニクトゲン P、As、Sb)とあらわされる金属化合物。ノルウェーのオスロ北西部のある地名 (Skutterud) がその名前の由来です。頂点を共有した X の八面体構造に T が囲まれた結晶構造(体心立方晶)をとり、高い電気伝導度と低い熱伝導率を兼ね備えた工業的に有用な高性能な熱電変換材料として期待されています。
ゼーベック係数	温度差で起電力が生じる現象をゼーベック効果と称します。そこで温度差 1 K(1℃) で生じる熱起電力をゼーベック係数と呼びます。なお、この時の発電量はパワーファクター (PF) と呼びます。
導電性高分子 PEDOT:PSS	Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate)。導電性高分子とは電気が流れる高分子のこと。一般的には共役構造が長く続いた高分子が使われます。今回用いた導電性高分子 PEDOT:PSS は、導電性高分子の中でも最も高い 1000 S/cm 程度の導電性を持ちます。また同時に高い柔軟性を持っています。
日射熱取得率	ガラス窓に入射した日射熱が、室内側へ流入する割合。数字が小さい程、優れた遮熱性能を示します。
熱電(変換)モジュール	p/n 型熱電材料、電極及び熱交換／電気絶縁の材料によって構成され、熱を電気に変換する機能を持った部品のこと。熱電(変換)モジュールを有する発電装置を熱電(変換)デバイスと称します。
ヒートパイプ	熱輸送を瞬時に、大量に行うことのできる熱伝導素子のこと。本事業では、多孔体で生じる毛管現象を利用した無電力の気液二相流体ループで、高い熱輸送性能、長距離熱輸送を実現するルートヒートパイプ (LHP)を開発対象としています。
ファイバーレス断熱材	労働安全衛生法の下定められた特定化学物質障害予防規則の中で特定化学物質(第2類物質)の管理第2類物質として追加された「リフラクトリーセラミックファイバー」を含まない断熱材。本事業では、大量の水分を保水できる高分子ゲルに微量のセラミックス粉末を分散させ、これを凍結してゲル内に細孔源となる氷を形成させ、氷結晶を取り除いて焼成してセラミックス多孔体をつくる「ゲル化凍結法」を用いて、高強度高断熱性を有するファイバーレス断熱材を実現します。

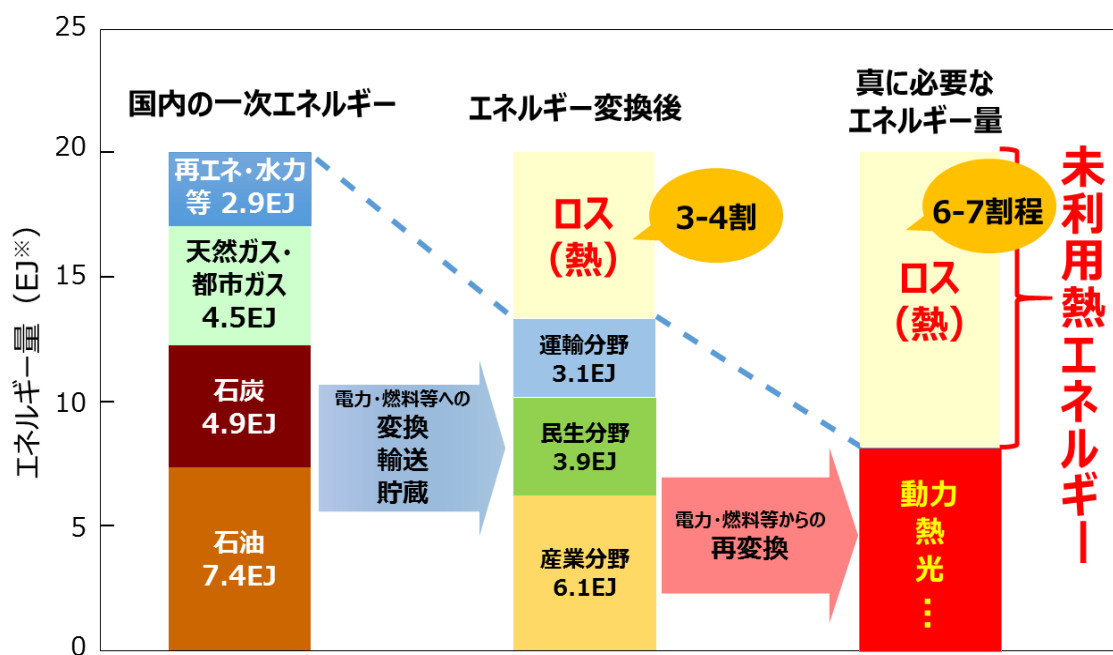
不凍タンパク質	極地の魚類の血漿から発見され、主に生体の凍結防止や氷の再結晶防止による生物の生命維持に寄与するタンパク質のことです。低熱伝導率の断熱材を実現するためには気孔率を高める必要があるが、気孔率を高めると氷結晶由来の粗大な欠陥が生じてしまい、強度が大きく低下してしまうという問題があります。結晶のプリズム面に吸着し結晶成長と粒成長(再結晶化)を強く抑制する不凍タンパク質(グリコプロテイン)を氷結晶成長抑制物質として添加することにより、粗大欠陥が消失し、断熱材の圧縮強度を大きく増大することが出来ます。
未利用熱エネルギー	一次エネルギーを動力などの真に必要なエネルギーへと変換する際に、利用されずに捨てられる熱のこと。一般には排熱や廃熱と呼ばれます。
無次元性能指数(ZT)	材料の熱電変換性能を評価するパラメータです。ZT の値が大きいほど、熱電変換効率がよく、発電性能が優れています。実用化が可能とされる熱電変換材料の目安は $ZT \geq 1$ です。
HFO (Hydrofluoroolefin)	ハイドロフルオロオレフィン。二重結合のフッ素化合物。冷媒としては、地球温暖化係数が低いことが知られており、次世代の冷媒候補として注目されています。
FEM (Finite Element Method)	有限要素法。熱伝導や熱応力など解析的に解くことが難しい微分方程式の近似解を数値的に得る方法の一つ。
COP (Coefficient of Performance)	成績係数。エアコン、冷凍機などのエネルギー消費効率を表す指標の一つで、消費エネルギーに対する施される冷房または暖房の比率として計算される無次元の数値です。
GWP (Global Warming Potential)	地球温暖化係数。二酸化炭素を基準にして、ほかの温室効果ガスがどれだけ温暖化能力があるか表した数字のことです。

1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

1.1 事業の位置づけ・意義

1.1.1 事業の背景・目的

我が国では、石油、石炭、天然ガスといった化石燃料を中心とする一次エネルギーから電力・燃料等に変換・輸送・貯蔵するフローにおいて、その3～4割が有効利用できずに熱として失われている(エネルギー・ロス)。さらに、消費者が最終的に活用する、真に必要なエネルギーに再変換する段階においてもエネルギー・ロスが発生するため、一次エネルギーの6～7割が熱として失われている(図1)。一次エネルギーの9割を輸入に頼り、その金額が16兆円(2019年度)にも上る我が国にとっては、これはとても大きな問題である。また、化石燃料は、燃焼して必要なエネルギーに変換するまでにCO₂を排出するため、いかにエネルギー・ロスを大幅に減らすかが、我が国が2050年までに80%の温室効果ガスの排出削減を目指す上でも重要な課題である。社会全体のエネルギー・ロスを削減し、エネルギー効率を向上させて徹底した省エネルギーを実現するためには、このような利用されずに捨てられる熱、「未利用熱エネルギー」(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。



※EJ=10¹⁸ ジュール

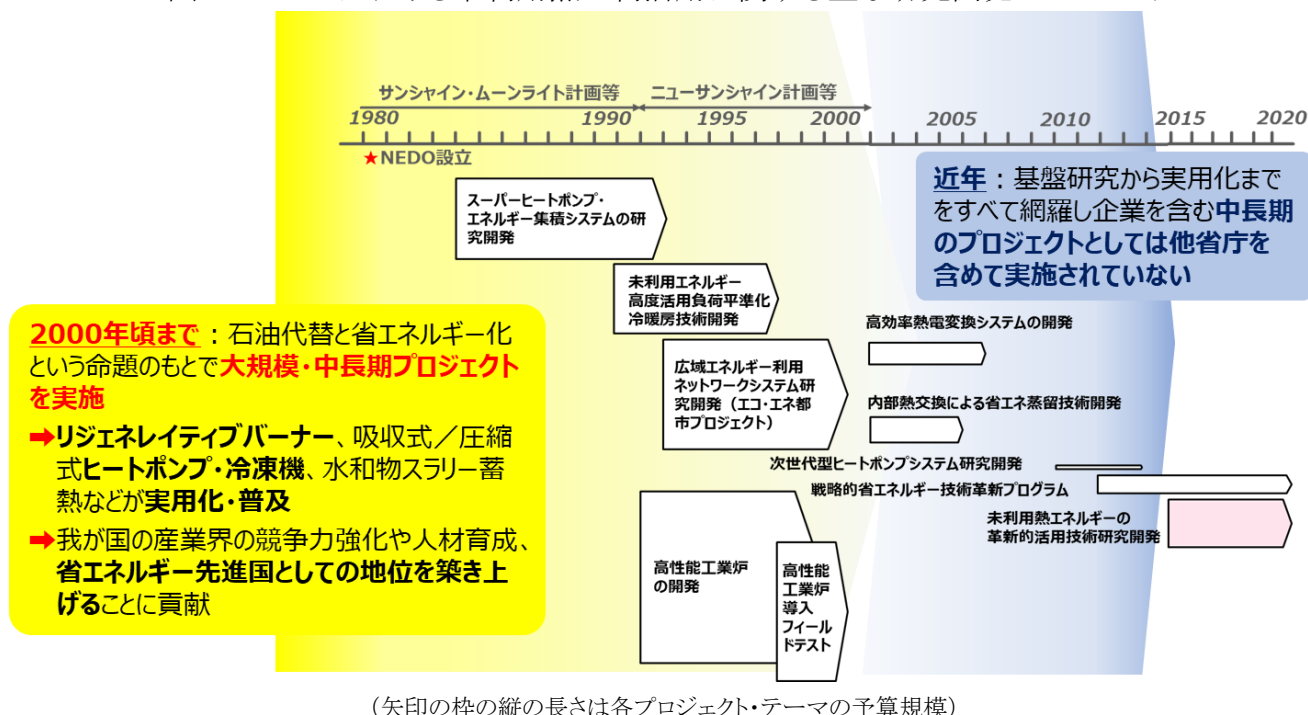
出典：資源エネルギー庁 平成30年度（2018年度）エネルギー需給実績（確報）を基にNEDO作成

図1 日本における一次エネルギー供給から最終活用に至るエネルギーフロー

また、NEDOが進める未利用熱の有効利用に関する研究開発は、1980年代にムーンライト計画の一環として実施された「スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システムの研究開発」から始まった。1990年代に入ってから、ニューサンシャイン計画のもとで規模を拡大し、石油代替と省エネルギー化という命題のもとで「未利用エネルギー高度活用負荷平準化冷暖房技術開発」、「高性能工業炉の開発」など産学官の英知を結集して複数の大規模な研究開発プロジェクトが並行して実施された(図2)。特に、「広域エネルギー利用ネットワークシステム研究開発」(エコ・エネ都市プロジェクト)では、全国排熱総量の推定から、蓄熱・熱輸送技術、熱交換技術、圧縮式・吸収式

冷凍技術、熱電変換材料などの開発まで、幅広い未利用熱の有効利用技術を対象とした技術開発を一体的に行った。しかしながら、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。我が国では、研究開発とそれによるイノベーションの創出の大半を企業が担っているが、近年、その企業における研究開発が短期化かつ短視野化しており、その多くが改良型の研究開発であって、抜本的なイノベーションを生み出す可能性を秘めた中長期的研究への投資は少なくなっているといわれているが、未利用熱の有効利用に関してはそれが顕著である。

図2 NEDO における未利用熱の利活用に関する主な研究開発プロジェクト



更に、海外に目を向けると、中国や米国、欧州など、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。特に、パリ協定の採択以降、2050年までの温室効果ガスの大幅な排出削減に向けて野心的な取り組みをリードする欧州では、熱利用に関するロードマップや白書が策定され、産業から排出される未利用熱の利活用をさらに推進する方針が示されている。そのような方針のもとで、欧州委員会(EC)の研究資金助成プログラム Horizon 2020 でも、TASIO、TransFlexTeg、I-ThERM、DryFiciency、CREATE 等、未利用熱の活用に関する研究開発が活発になされており、熱利用に関する 100%補助プロジェクト事業には、10 億円/年以上の予算が投じられている。また、その後継プログラムとして、新たに Horizon Europe がある。これら以外も含め、欧州各国では未利用熱を活用する取り組みが活発に推進されている。

このような背景の下、未利用熱を効果的に削減(Reduce)又は回収して再利用(Reuse)・変換利用(Recycle)するための技術(熱の 3R 技術)と熱マネジメント技術を産学官連携により中長期的・重点的に実施し、古くから研究開発の行われているこれらの技術について、未来の省エネルギーに向けたフロンティアとして革新する(図3)。これにより、大型予算をもつ海外勢との将来的な技術・市場競争に打ち勝つとともに、国内の3E+S(Energy security(安定供給)、Economical efficiency(経済性)、Environment(環境)+Safty(安全))の実現と、さらに全世界でのクリーンエ

エネルギーへの移行という諸課題の解決に大きく貢献することを目指して、NEDO は本事業を実施する。

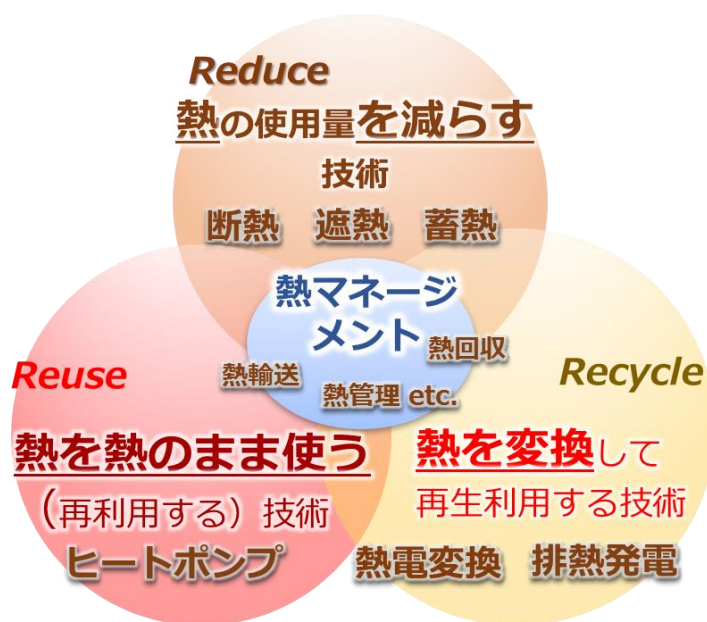


図3 未利用熱の3R

1.1.2 事業の政策的位置付け

「エネルギー基本計画」(2021 年 10 月、閣議決定)においては、2030 年に向けては徹底した省エネルギー社会の実現のため、各分野において革新的な省エネルギー技術の開発と、さらに廃熱利用や熱システムの脱炭素化を促進することが重要であることが示されている。

「革新的環境イノベーション戦略」(2020 年1月、統合イノベーション戦略推進会議決定)においても、2050 年までの確立を目指す具体的な行動計画(5 分野 16 課題)に貢献する1つのテーマとして、「未利用熱・再生可能エネルギー熱利用の拡大」があり、高効率な断熱材、ヒートポンプ、熱電変換技術や、熱の評価技術の開発についての支援の必要性が明示されている。

さらに、経済産業省資源エネルギー庁と NEDO は、第 5 次エネルギー基本計画などの政府の方針を踏まえ、省エネルギー技術戦略の重要技術を 2019 年7月に改定し、廃熱利用や熱システムの脱炭素化を促進するため、廃熱を高効率に電力に変換する技術や高効率電力加熱技術などを重要技術に追加している(排熱の高効率電力変換、熱エネルギーの循環利用、高効率電気

加熱(誘電加熱、レーザー加熱、ヒートポンプ加熱)など)(図4)。

「省エネルギー技術戦略」に定める重要技術



図4 「省エネルギー技術戦略」に定める重要技術
(赤字:未利用熱の有効利用に関連する技術)

1.1.3 国内外の研究開発の動向と比較

前述のとおり、中国や米国、欧州など、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。Web of Science による “waste heat” に関する研究文献検索の結果、2000 年以降の論文発表件数の上位5か国は、中国、米国、ドイツ、日本、英国となっている(図5)。

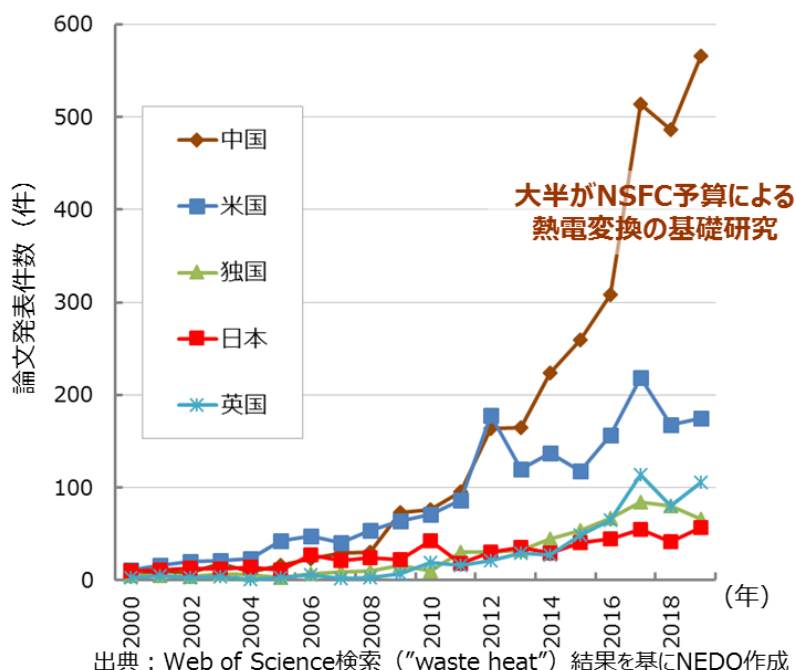


図5 “waste heat”に関する論文発表動向(世界上位5か国)

中国国家発展改革委員会では、「石炭のクリーンで高効率な利用と新型省エネ技術」の実施計画(2016～2020 年度の5か年計画)が発行され、工場の余剰熱回収が重点的研究開発の対象となっている。主として、高温排熱回収を対象とした研究開発が、西安交通大学、北京科学技術大学、中国科学院力学研究所などで実施されているが、上海交通大学では、低質な低温熱を対象として、63.57MW 超の高効率吸収ヒートポンプサイクルシステム、9MW クラスの大温度差、高効率、高信頼の産業用圧縮ヒートポンプ技術を確立した。また、中国国家自然科学基金委員会(NSFC) 予算による熱電変換に関する基礎研究も活発に実施されている。

米国では、DOE Advanced Manufacturing Office(エネルギー省 先進製造室)において、先進製造の実現のための公募が実施され、ポリマーコンポジット材料を用いた新しい熱交換器、マクロチャンネル熱交換器の気液二相流の流動挙動解析、排熱回収システムのシミュレーションベースの設計と最適化等の研究開発が国研を中心に実施されている。DARPA(国防高等研究計画局)やNASA JPL(アメリカ航空宇宙局ジェット推進研究所)では、熱エネルギーハーベスタとして、テルル系化合物、ハーフホイストラー系、スクッテルダイト系、CNT といった熱電変換材料の開発を活発に実施されている。(目標変換効率 6～11%)

欧州では、「EU ヒート・ロードマップ」を 2012 年に策定し、以降順次改定を行って、産業から排出される未利用熱に着目して、その地域熱供給への接続を含め、未利用熱の利活用をさらに推進する方針を示している。欧州委員会(EC)の研究資金助成プログラムとして Horizon 2020 では、2014～2015 年、2016～2017 年、2018～2020 年に実施されている作業プログラムの中で、排

熱利用等の熱マネージメント技術関連の公募枠が設定されている。熱利用に関する 100%補助プロジェクト事業には、10 億円/年以上の予算が投じられており、蓄熱や熱電変換を中心に、未利用熱の活用に関する研究開発が活発に実施されている。

このように、大型予算をもつ海外勢が実用化に向けた研究開発に邁進しているため、本事業を実施しない場合、現状は日本がリードする当該分野の技術について将来的には日本が遅れをとる可能性がある。

1.1.4 実施の効果(費用対効果)

既存技術の限界及び経済性の面での制約から、未利用エネルギーの大半、特に 200℃未満の中低温領域の熱の多くが捨てられているが、未利用熱の3R 及び熱マネージメントの技術開発を通して未利用熱を有効活用できるシステムを確立する。

本事業の国費負担総額は、111.2 億円(経済産業省実施分を含む実績:2013～2022 年度)である。開発成果が社会実装されることにより、2030 年時点で、国内では 2,100 億円/年以上の市場創出、世界では 1.3 兆円/年以上の市場創出が期待され、それぞれ国費投資に対して約19 倍、約 117 倍のリターンとなる(図6)。

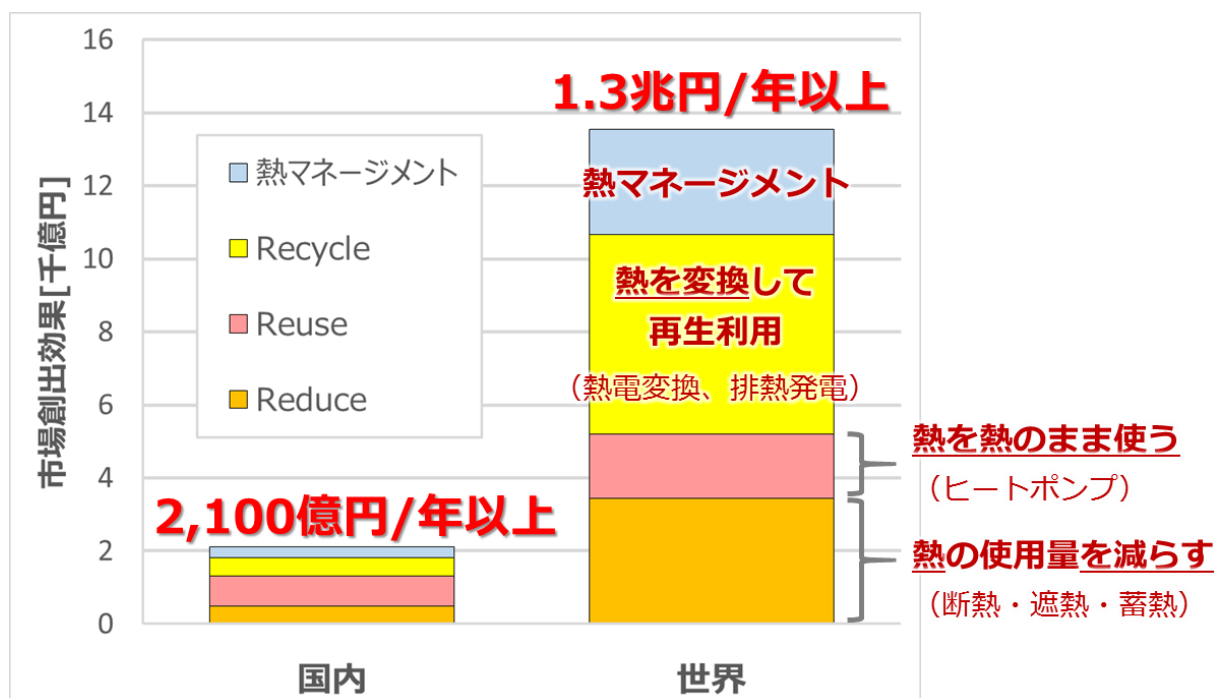


図6 本事業の費用対効果(市場創出効果)

また、本事業の研究開発成果の 2030 年時点における波及効果として、一次エネルギー換算で少なくとも 600 万 kL/年以上の省エネルギーを見込んでいる。これは、原発2～3基分と同等の

エネルギー的な価値があり、第四の電源として3E+Sへ寄与することが大いに期待される(図7)。

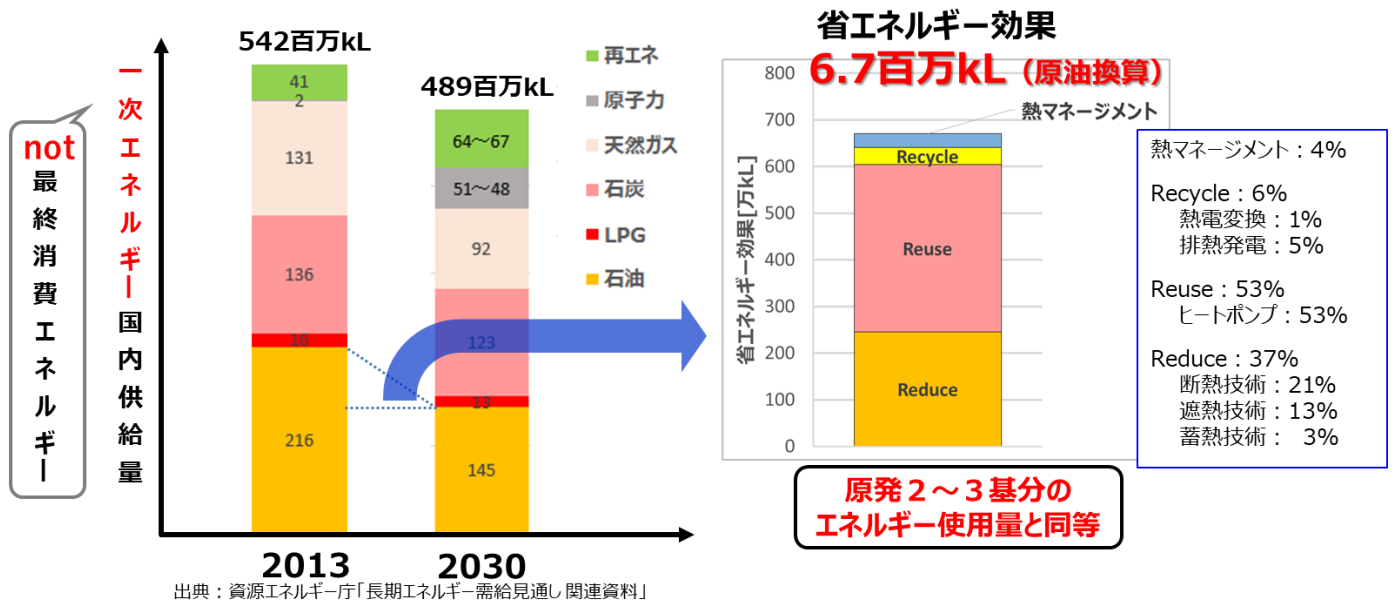


図7 本事業の費用対効果(省エネルギー効果)

1.2. アウトカム達成までの道筋

本事業の研究開発成果の 2030 年時点における波及効果として、原油換算で 600 万 kL/年程度以上の省エネ、1,700 万 t-CO₂/年程度以上の CO₂ 削減効果を見込んでいる(図8)。

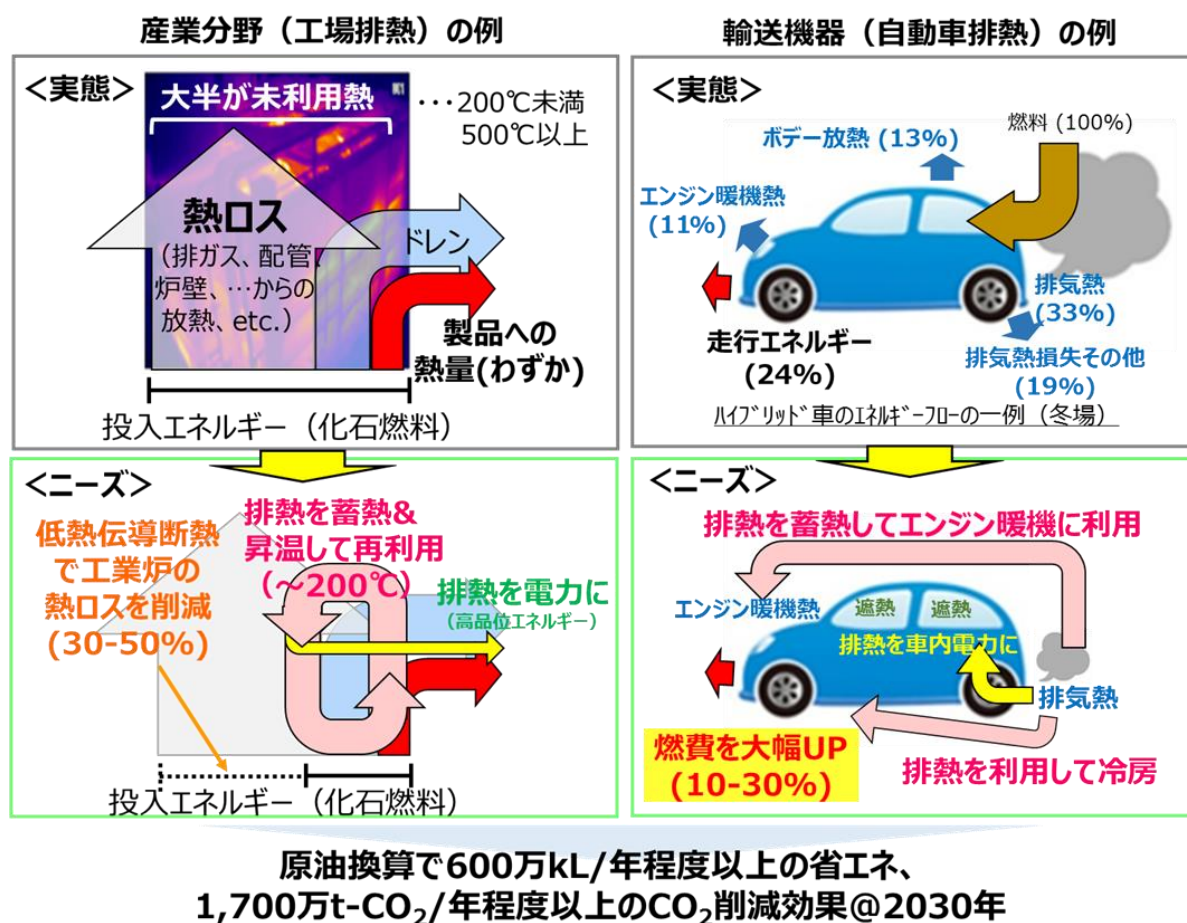


図8 産業分野や運輸分野での未利用熱排出実態と未利用熱活用ニーズ

委託事業において要素技術開発を実施し、助成事業にて実用化を見据えた開発、さらには各事業者にて実施する実用化へのフェーズ移行は進捗状況に合わせ、早期自立化を達成した。また、基盤技術の公開や成果の PR を積極的に行い、普及促進と新たな用途展開へと進展させた。社会情勢の変化に伴う電化の方向性、熱利用の動向など外部環境の変化を注視し、市場探索・拡大へと波及させることを狙って事業を展開した。

1. 3. 知的財産・標準化戦略

本事業で扱う技術領域は、未利用熱の活用という共通目的を有しつつも、競争的に開発を行う部分が生じるため研究項目間の情報管理は徹底して行いつつ、全体としてのシナジー創出のために全ての研究項目に有益な調査・基盤技術の成果は共有するなどして、オープン／クローズの考え方にに基づき、情報管理と知財運営を実施している。たとえば、競争領域の材料組成やシステム構成に関する知財は、企業経営と一体化した運営を行い積極的に権利化する。このとき、将来的な市場拡大が見込まれる海外出願も積極的に実施している。企業経営の変化により、国外に技術流出が行われる可能性がある場合などは、産業財産権を積極的に国内企業等へ移転するなど、柔軟に対応している。また、競争領域の非公開情報は、基本的には企業のノウハウとして秘匿すべきものであるが、組合内の縦連携の活動の中で、適宜開示を促すようなマネジメントも実施している。さらに、非競争領域で非公開の工場熱計測データなどについては、組合内の非公開ワーキンググループや技術委員会、非公開報告書等で共有をしている(図9)。知的財産権等については、NEDO に報告を義務付け、開発技術の特許出願・権利化を逐次把握している。

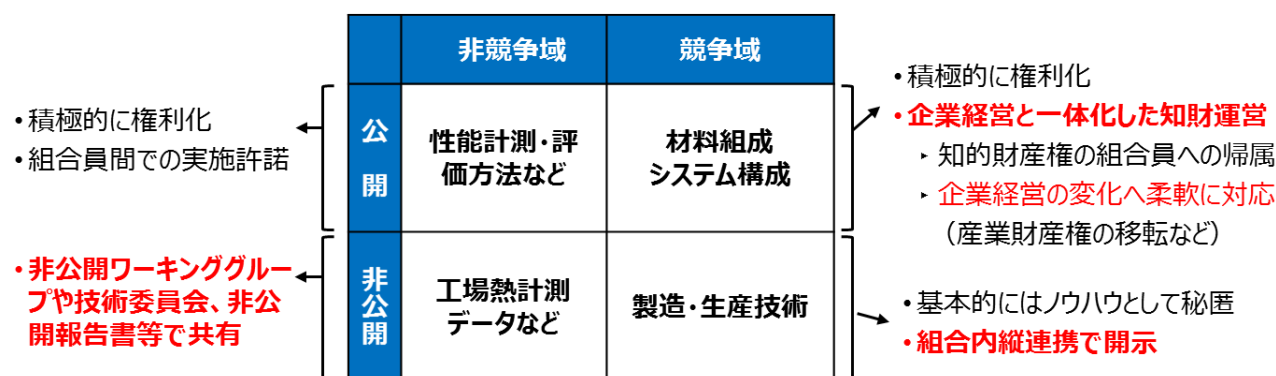


図9 NEDO の知的財産権等に関する戦略

さらに、実施者である組合においては、組合内連携を有機的に行うため、本事業の試験・研究目的であれば、プロジェクト参加者が所有するバックグラウンド知財については所定の手続きを事前に行うことで委託研究の中で実施可能とすること、本事業(委託)で得られた知財については実施可能することなどを規定した「知的財産権及びサンプルの取扱いに関する規程」を整備した。かつ組合員同士の共同研究の中で活用を行った。

また、熱電変換材料の開発のように、設定した目標に対して多くのアプローチが想定される研究開発項目については、実施者間の競争による研究の進展も図った。

2. 目標及び達成状況

2.1. アウトカム目標及び達成見込み

2.1.1 本事業における「実用化・事業化」の考え方

本事業では、当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されることを実用化と定義し、さらに、当該研究開発に係る商品、製品、サービス等の販売や利用により、企業活動(売り上げ等)に貢献することを事業化と定義する。

本プロジェクトの成果の実用化・事業化から、普及促進することによりアウトカムである未利用熱を有効活用できるシステムを確立すること、さらに波及効果として未利用熱の活用が可能であることを実証し、可能性と必要性を広く認知し、様々な分野・用途への適用の検討、技術の普及促進が得られ、「産業分野、運輸分野、民生分野における社会実装を実現し、更なる省エネ化を進める。」が達成される。

2.2.2 成果の実用化・事業化に向けた戦略・具体的取組

本事業は、第5次エネルギー基本計画等を踏まえ、2020年度から省エネ施策として再構築した。ユーザーからの厳しいニーズや導入条件(性能、コスト等)に合致することを目指し、ユーザーのニーズ調査を実施して、各組合員企業が事業終了後に実施する実用化計画へ反映する。

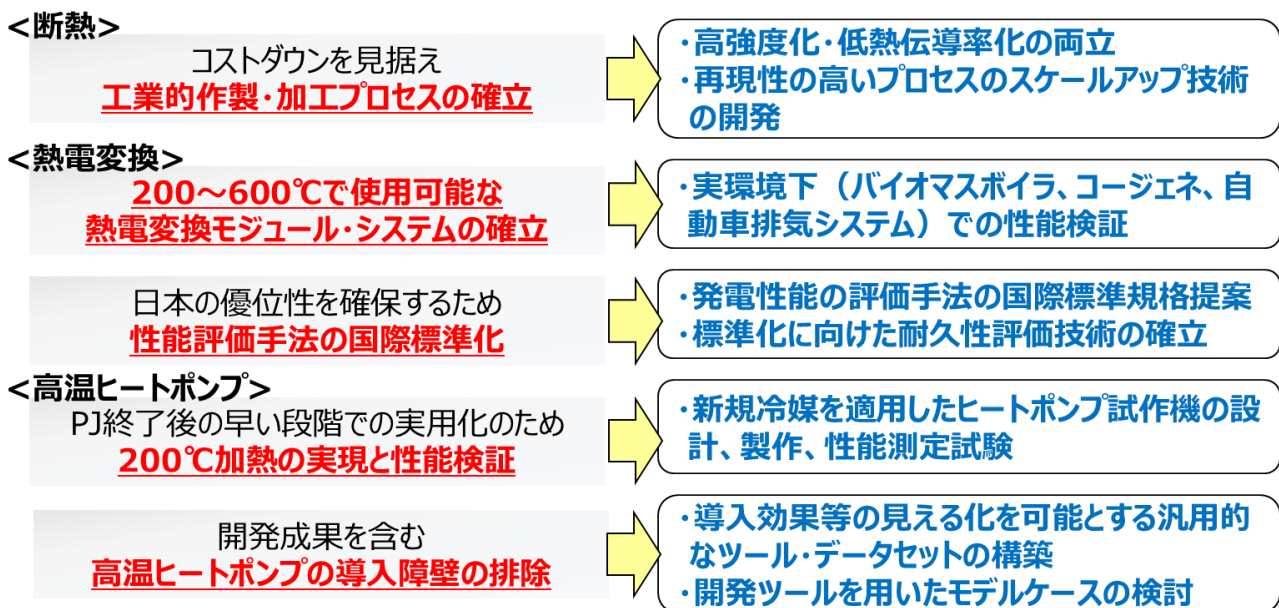


図 10 実用化に向けた主な課題と今後の取組(例)

2.2.3 アウトカム達成見込み

既存技術の限界及びコスト面での制約から、未利用熱エネルギーの大半、特に中低温領域の排熱は大部分が廃棄されているが、断熱材・蓄熱材・熱電材料等に代表される各種熱マネジメント部材の革新的な技術開発を通して未利用熱を有効活用できるシステムを確立し、産業分野、運輸分野、民生分野における社会実装を実現し、更なる省エネ化を進める。その結果、本プロジェクトの研究開発成果の2030年時点における波及効果として、原油換算で600万kL/年程度以上の省エネ1、1,700万t-CO₂/年程度以上のCO₂削減効果を見込んでいる。

また、開発成果による 2030 年における国内市場創出は 2,100 億円/年以上、世界市場創出は 1.3 兆円/年以上を見込んでいる。

2.2. アウトプット目標及び達成状況

2.2.1 事業の目標

産業分野における工場排熱、輸送機器におけるエンジン排熱、オフィスや住宅環境における未利用排熱など、各種社会システムから広い温度領域に渡って膨大な未利用熱エネルギーが排出されている現状に対し、各種熱マネジメント部材の革新的な技術開発を通して未利用熱を有効活用できるシステムを確立し、産業分野、輸送機器、住宅環境等の更なる省エネ化を進める。

アウトプット目標

本事業では、事業化に向けた妥当性を踏まえて以下のような目標を設定した。

- ・断熱:ファイバーレスで、耐熱 1500℃以上、圧縮強度 20MPa 以上、熱伝導率 0.20W/m・K 以下 (2022 年度)
- ・遮熱:可視光線透過率 70%以上、日射熱取得率 43%以下 (2017 年度)
- ・蓄熱:120℃以下で蓄熱密度 1MJ/kg、20℃～25℃環境下で 24h 以上 (2019 年度)
- ・高温ヒートポンプ:80→180℃加熱で COP(成績係数):3.5 以上 (2022 年度)
- ・熱電:200℃～600℃で発電効率 15%以上のモジュール、出力 200W の発電ユニット
- ・排熱発電:開発した出力 1kW クラスの小型排熱発電装置の性能実証 (2019 年度)
- ・熱マネジメント:運輸・産業分野等の熱マネジメント技術・システム開発 (2022 年度)
- ・熱関連調査・基盤技術:
 - 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)
 - 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)
 - 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)

上述の目標を達成するために、以下の研究開発項目を実施した。

【委託事業】

- 研究開発項目①:断熱技術の研究開発 (2021 年度まで)
- 研究開発項目②:遮熱技術の研究開発 (2017 年度まで)
- 研究開発項目③:蓄熱技術の研究開発 (2019 年度まで)
- 研究開発項目④:ヒートポンプ技術の研究開発 (2017 年度まで)
- 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 (2021 年度まで)
- 研究開発項目⑥:排熱発電技術の研究開発 (2020 年度まで)
- 研究開発項目⑦:熱マネジメントの研究開発 (2021 年度まで)
- 研究開発項目⑧:熱関連調査・基盤技術の研究開発

【助成事業】

研究開発項目①:断熱技術の研究開発(2022 年度)

研究開発項目④:ヒートポンプ技術の研究開発(2018 年度以降)

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(2022 年度)

研究開発項目⑦:熱マネージメントの研究開発(2022 年度)

研究開発目標と根拠

研究開発項目	最終目標	根拠
①断熱技術の研究開発	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	現在使われている耐熱レンガの熱伝導率を大幅に改善し、規制が強化され始めている現状のファイバー系断熱材料の熱伝導率と耐火断熱レンガの強度を兼ね備えた性能を実現する
②遮熱技術の研究開発	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(2017 年度末)	自動車フロントガラス向け規制にも適合する可視光線透過率かつ従来比優位な遮熱性能を実現する
③蓄熱技術の研究開発	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)	自動車の蓄熱材用途への適用時に必要な技術として設定
	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(2019 年度末) -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(2019 年度末)	- 産業・業務部門の食品製造業等の 10℃前後の冷熱需要に即した冷凍機の省エネルギー運転等に寄与する蓄熱材料を実現する - 自動車の走行時の排熱を翌日の始動時に使用することを想定して、長期に蓄熱出来る蓄熱材料を実現する
④ヒートポンプ技術の研究開発	200℃までの供給温度範囲に対応し、熱源水温度 80℃、加熱器出口温度 180℃条件で COP:3.5 以上を達成するヒートポンプシステムの開発	- 化石燃焼を用いたボイラー蒸気による工場のプロセス加熱を代替し、1.75 倍の熱効率で加熱可能なシステムを実現する - 一次エネルギー利用効率や経済性の点でメリットが出ることを考慮して、COP:3.5 を満足する産業用高効率ヒートポンプを開発する ※遷臨界サイクルにおいて、未利用熱エネルギーとして蒸気ドレン水を利用し昇温幅を 100℃と想定すると、現実的には 80℃からの昇温になる。100→200℃加熱の実現可能性については机上計算にて検証し、試作機では、80℃→180℃加熱で最高加熱温度 200℃の検証を行う。なお、理論 COP については 80℃→180℃の方がより厳しい条件となる。

⑤熱電変換材料・デバイス 高性能高信頼化技術開発	・受熱温度 200℃～600℃の条件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(モジュール出力密度 2W/cm²)を達成する発電ユニットの開発 ・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(従来のコージェネシステムの発電量を 5%向上)	・従来材料ではできなかった中高温域(200～600℃)の利用に適した熱電モジュール・材料の技術確立し、自動車や工場等の排熱回収用途での実用化が可能レベルとする ・コージェネシステム利用効率 5%を達成するための発電性能を実現する
⑥排熱発電技術の研究開発	・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)	・従来比 2 倍の発電効率で投資対効果の高い小型高効率排熱発電技術を実現する(2020 年度末までに実排ガスで効果実証を行う)
⑦熱マネジメントの研究開発	・氷蓄熱と同等の蓄熱密度(従来材料比 2 倍)で、10℃前後にて冷却・保冷を行う潜熱蓄熱システム及び-20℃～25℃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	・産業/業務部門の食品製造業等の 10℃前後の冷熱需要に即した冷凍機の省エネルギー運転等に寄与する蓄熱モジュールを実現する ・自動車の走行時の排熱を翌日の始動時に使用することを想定して、長期に蓄熱出来る蓄熱モジュールを実現する
	・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)	・従来比 2 倍の発電効率で投資対効果の高い小型高効率排熱発電技術を実現し、実排ガスで効果を検証する
	・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	・将来のクルマの熱流れに関するレイアウトや仕様を決定するために、熱流れのモデル構築が必要 ・少ない計測点で高精度な熱流れを予測するために、伝熱の3つの形態である、伝導/対流/輻射を分離計測する技術の確立を実現する
	・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℃)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)	(a) 夏季の冷房損失を削減するため、現状の自動車用エアコンシステムと同容積(約 19L)にて平均蒸発性能 2kW のを実現する冷房用ヒートポンプを実現する (b) 車両からの排熱を利用し、極低温時でも高 COP の暖房を可能とするとともに、換気損失を大幅に削減し、必要な化石燃料を削減する
⑧熱関連調査・基盤技術の研究開発	・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 ・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 ・産業用高温ヒートポンプ向け統合解析シミュレーション技術の構築	・工場の生産プロセスや熱フローを把握し、生産プロセスに最適化した高度なシステム設計技術確立して、従来は困難であったヒートポンプ技術等の導入効果の見える化を容易にする ・熱電材料の発電性能や耐久性の評価手法、ハイスループット評価技術を早

		期に実現し、我が国が強みを有する熱電材料の国際的な産業化と標準化に貢献する - 革新的な熱マネジメント材料の探索や実用化開発等を可能とするため、これまで整備されてこなかった熱関連材料・部素材の各熱物性情報の収集とデータベース化を実現するとともに、計算シミュレーションを活用した熱関連材料の機能予測を併用することで、各種熱関連材料に関する知見の共有を行う - 安全性等の評価を行い、160～200℃出力用ヒートポンプで使用可能な冷媒を確立する
--	--	--

2.2.2 研究開発項目毎の達成状況

◎ 目標を大きく上回って達成、○ 達成△ 一部未達、× 未達

研究開発項目	達成状況(実績)	達成度 (見込み)	達成の根拠／解決方法
①断熱技術の研究開発	ゲル化凍結法により、最終目標である耐熱性 1,500℃、圧縮強度 20MPa、熱伝導率 0.2W/(m・K)を有する断熱材の開発に成功	◎	開発した断熱材等を実装した検証炉での加熱テストの結果、当社従来炉と比較して、燃料使用量を最大 70%削減可能であることを実証。
②遮熱技術の研究開発	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)の遮熱フィルムを開発(2017 年度末)	○	—
③蓄熱技術の研究開発	- 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を開発(2018 年度末) 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を開発(2019 年度末)	◎	(材料目標を達成、熱マネジメントの研究開発でのシステム化開発へ移行)

	・-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(2019 年度末)		
④ヒートポンプ技術の研究開発	・フロン系低 GWP 冷媒を使用した最高温度 200℃(被加熱媒 80℃→180℃加熱)が供給可能なヒートポンプ試作機的设计・製作・試験を完了。 ・圧縮機 2 台連結運転での定格回転数運転を確認した。 ・実測値から高い解析精度を確認。最終目標:COP3.5 が達成できる見通しが得られた。	○	・圧縮機吐出から熱交換器間の圧力損失が過大である。この課題の改善検証を実施中
⑤熱電変換材料・デバイス高性能高信頼化技術開発	・クラスレート化合物において、接合抵抗、輻射熱を低減するモジュール構造と素子の高性能化により、発電効率 15%を有するモジュール化技術を開発 ・スクッテルダイト系において、モジュールの出力密度は 2W/cm²を達成、発電ユニットの出力は 200W を達成した。 ・シリサイド系において、出力密度 1.24W/cm²を達成した9対シリサイドモジュールを用いて、5kW～1MW 規模のエンジン排熱からの発電実証試験を実施。実測データからエンジン発電出力の 5%以上を実現する仕様を策定した。	○	—
⑥排熱発電技術の研究開発	・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)	◎	(要素技術目標を達成、熱マネージメントの研究開発でのシステム化開発へ移行)
⑦熱マネージメントの研究開発	・本プロジェクトで構築した計測技術を用いて、xEV の熱流れの現象を解明。それを元に伝	◎	・車載向け小型吸収冷凍機の車載以外用途への展開が見込まれる

	熱の 3 形態を考慮する高速 (1 Hr/仕様レベル)かつ高精度な 1 次元の熱流れモデルを構築した。 ・要求仕様を満たすことを実証し、省エネ効果△30%(氷蓄熱比)を明確化、燃費向上効果+0.2%/L(排熱未利用時比)を明確化		
⑧熱関連調査・ 基盤技術の研究開発	・工場の熱利用プロセスに導入する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」を構築した。 ・IEC-TC47/WG7 においてモジュール発電性能の規格の提案、審議を行う見込みである。 ・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した。 ・異方性を考慮し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、スタンダードな計測手法を確立した。 ・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した。 ・熱関連材料のデータベースシステムについて、独立したデータセットを統一したデータ構造でシステムを再構築して、性質の異なる各種熱物性データを統一データシステムとして検索可能とした。またユーザーの利便性を考慮した、データ検索のインタラクティブツールの機能拡張を行った。 ・典型的な化学蓄熱材である酸化マグネシウム MgO と水蒸気	○	・評価技術の提供は可能となっているが、標準化については手続きに時間がかかっているため数年後達成見込み ・データベース及び単体シミュレーションについては、一般公開および継続利用希望者への配布が可能な状況

	との可逆反応について、表面水和反応を素反応過程に分割・解析することで、実際に水和反応物である水酸化マグネシウム $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 結晶核が形成される過程が発熱反応であることを検証した。 • 高温熱供給ヒートポンプに適した新規低 GWP 冷媒候補について、計測した熱物性等によりヘルムホルツ型状態方程式の最適な関数形を決定した		
--	--	--	--

3. マネジメント

3.1 実施体制

3.1.1 NEDO が実施する意義

NEDO は、「持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針」を策定した。この指針では、持続可能な社会を実現する3つの社会システム(「サーキュラーエコノミー」「バイオエコノミー」及び「持続可能なエネルギー」)を掲げ、これらの一体的かつ有機的な推進により、非連続なイノベーションにつなげ、経済合理性を持って社会実装を実現させていくことが重要としている。

本事業の狙いは、自動車・産業等幅広い分野において大きな課題となっている未利用熱の有効利用に関して、経済的に回収する技術体系を確立する(ハイリスク・連携必要)と同時に、同技術の適用によって日本の主要産業の創生とともに競争力を強化し(ハイリスク・連携必要)、社会全体のエネルギー効率を向上することを目指すもの(公共性/汎用性・連携必要)であることから、「持続可能なエネルギー」を実現するための NEDO の指針に合致する。さらに、材料開発からシステム化までには長い研究開発期間を要するため、単独企業ではリスクが大きく、また、シーズ技術の橋渡しをしながら産学官の叡智を結集して、システムとしての省エネルギー効果を目指す必要があることから、中長期の NEDO プロジェクトとして実施すべきものである(図 11)。

NEDOが関与する意義

未利用熱の有効利用に関して

- 経済的に回収する技術体系を確立 (ハイリスク・連携必要)
- 社会全体のエネルギー効率を向上 (公共性/汎用性・連携必要)
- 新たな産業創成と競争力強化 (ハイリスク・連携必要)

中長期のNEDOプロジェクトとして実施すべきもの

図 11 NEDO が関与する意義

例えば、高温ヒートポンプ用の新規冷媒については、さまざまなユーザーが想定されるため冷媒データベースの登録等が求められるが、データベース化のための冷媒研究はヒートポンプメーカーの収益に直結するものではなく、大学や研究機関が主体となって実施すべきものである。そのため、メーカーを含めた産学連携体制で、新規冷媒の物性評価等の基盤研究とデータベース化を推進する必要がある(公共性/汎用性・連携必要)。

また、熱電変換材料について、200～600℃で利用可能な熱電変換材料の研究は、長年研究が行われているものの実用化に至っていない。そのため、産学の英知を結集し、中長期の腰を据えた研究開発により材料探索フェーズから脱却するとともに、熱電材料性能の正しい評価と我が国の優位性を担保するため、性能評価技術の国際標準化を推進することが必要とされる(ハイリスク・連携必要)。

3.1.2 研究開発の実施体制

材料開発やテストモジュール開発などの基礎的研究は、大学などの公的研究機関が主体となって実施し、モジュール化・システム化に向けた応用研究は、アカデミアでの研究成

果を基礎として、各種社会システムのニーズを踏まえた上で、参加各企業が主体となって実施していく体制を構築した。

委託・助成先：未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合（TherMAT）

組合員（参加 21 社、1 財団、1 研究機関）

共同実施：早稲田大学、岡山大学、大阪大学、東京大学、名古屋大学、東北大学、山口東京理科大学、物質材料研究機構、山口大学、九州大学、佐賀大学、九州産業大学、早稲田大学

研究開発項目①：断熱技術の研究開発

瑞浪分室（美濃窯業株式会社、国立研究開発法人産業技術総合研究所）

※2021 年度まで委託事業、2022 年度は助成事業として実施

研究開発項目②：遮熱技術の研究開発

大津分室（東レ株式会社、国立研究開発法人産業技術総合研究所（2017 年度末で終了、委託事業））

研究開発項目③：蓄熱技術の研究開発

守口分室（パナソニック株式会社（2019 年度末で終了、委託事業））

豊田分室（トヨタ自動車株式会社（2018 年度末で終了、委託事業）、三菱ケミカル株式会社、国立研究開発法人産業技術総合研究所（2017 年度末で終了、委託事業））

研究開発項目④：ヒートポンプ技術の研究開発

守谷分室（株式会社前川製作所）

兵庫分室（三菱重工サーマルシステムズ株式会社）

※2017 年度まで委託事業、2018 年度以降は助成事業として実施

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

つくば分室（古河機械金属株式会社（2021 年度末で終了、委託事業））

ひたち分室（株式会社日立製作所（2021 年度末で終了、委託事業））

横浜分室（古河電気工業株式会社（2021 年度までは委託事業、2022 年度は助成事業として実施））

塩谷分室（日本サーモスタット株式会社、株式会社安永（2020 年度末で終了、委託事業））

研究開発項目⑥：排熱発電技術の研究開発

守口分室（パナソニック株式会社（2020 年度末で終了、委託事業））

研究開発項目⑦：熱マネジメントの研究開発

豊田分室（トヨタ自動車株式会社（2018 年度末で終了））

広島分室（マツダ株式会社（2021 年度までは委託事業、2022 年度は助成事業として実施））

佐野分室（マレリ株式会社、日本エクスラン工業株式会社（2021 年度までは委託事業、2022 年度は助成事業として実施））

刈谷分室（アイシン精機株式会社、国立研究開発法人産業技術総合研究所（2021 年度までは委託事業、2022 年度は助成事業として実施））

守口分室（パナソニック株式会社（2021 年度までは委託事業、2022 年度は助成事業として実施））

研究開発項目⑧：熱関連調査・基盤技術の研究開発

技術開発センター（国立研究開発法人産業技術総合研究所、
一般財団法人金属系材料研究開発センター、株式会社前川製作所）

神戸分室（三菱重工サーマルシステムズ株式会社、三菱重工業株式会社、
セントラル硝子株式会社、国立研究開発法人産業技術総合研究所）

※小規模研究開発 委託先：国立研究開発法人産業技術総合研究所、京都大学

3.1.3 研究開発の運営管理

各研究開発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は研究開発責任者であるPL(プロジェクトリーダー)を選定し、各実施者は、PLの下で研究開発を実施する(図 12)。PM(プロジェクトマネージャー)はPLと協議し、プロジェクトの運営を行う。

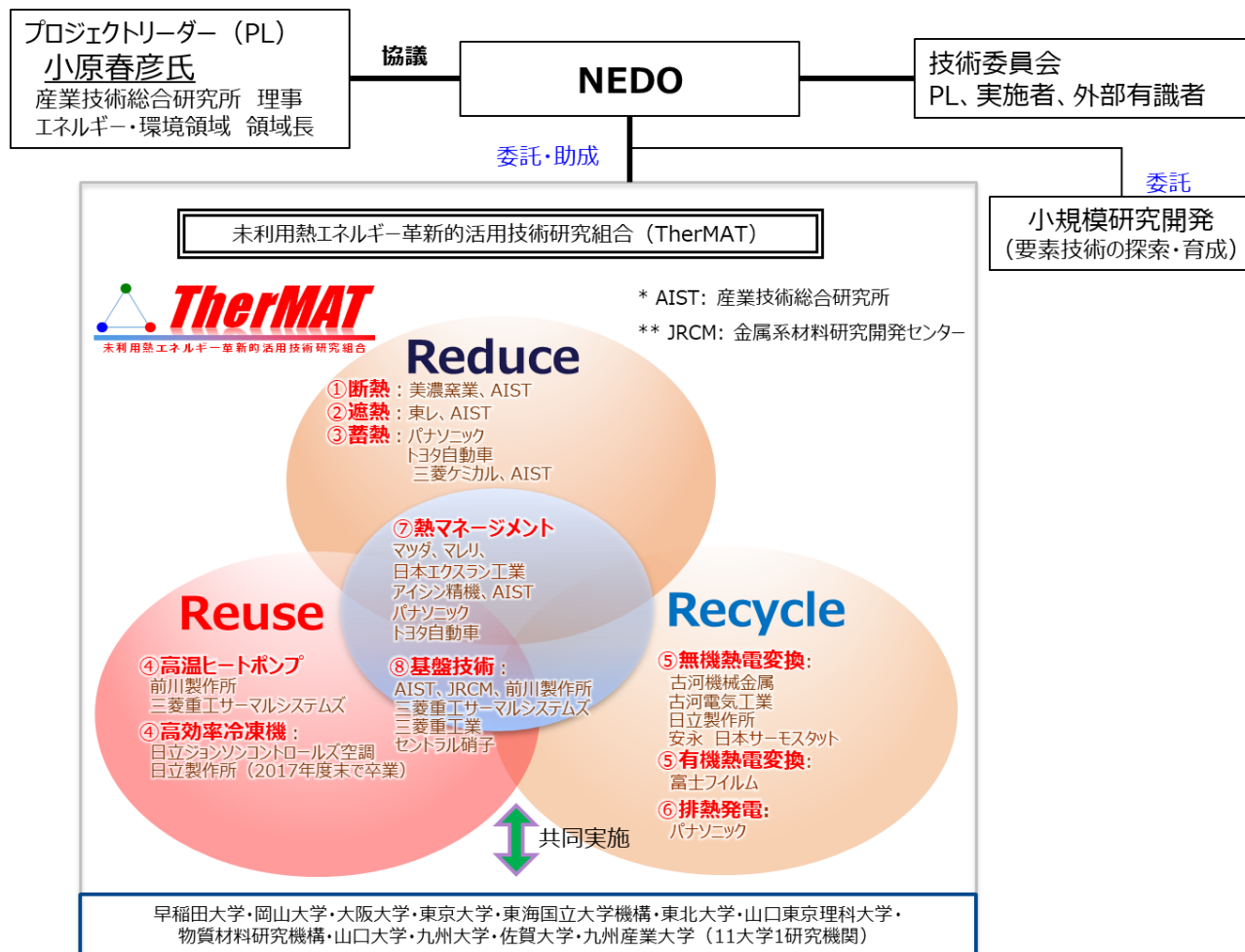


図 12 実施体制

【PL】

- 定期的な研究組合事務局との打合せにより、事業の進捗、成果の普及や知的財産権取得の状況等について情報収集を行っている。
- 各実施テーマについては、半期毎に開発目標と達成度をチェックし、翌半期計画を精査している。

【PM】

- 全ての実施テーマでヒアリングを行い、進捗状況把握、研究開発の課題、実用化への方針、プロジェクトとしての相乗効果等について実施者と直接意見交換を行っている。
- 早期実用化が見込めるテーマについて、成果の実用化を促進するため国内外でのニーズ調査や展示会やワークショップ等での情報発信を計画・実施している。

【PLとPMとの意思疎通】

- ・ 1ヶ月に1回程度以上、プロジェクト加速のための方策や、各テーマの進捗と今後の方向性等について議論を行っている。

3. 2 受益者負担の考え方

限られた予算で最大限の成果を出すため、研究進捗等に応じてテーマの選択と集中を図るとともに、研究開発を加速するために、政府予算に加え、開発促進財源も効果的に投入してプロジェクトを推進した。事業の進捗に応じて、実用化段階となった研究項目については、委託事業から助成事業にフェーズを移行し、事業化段階となった研究項目については、各事業者の自社開発に移行した。

(単位：百万円)

		2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
委託事業	総事業費	1,920	1,720	917	603	630	689	561	120	7,161
助成事業	総事業費	－	－	－	70	67	86	37	253	513
	NEDO 負担額	－	－	－	47	45	58	25	173	348
総額	総事業費	1,920	1,720	917	673	697	775	599	373	7,674
	NEDO 負担額	1,920	1,720	917	650	675	747	586	293	7,508
研究項目数		25	30	29	25	21	20	14	10	

(委託事業は 100%、助成事業は大学・国研は 100%、その他は 2/3)

研究の進捗を考慮し、2022 年度計画を 2021 年度に一部前倒し、委託研究から助成研究への移行など、プロジェクト全体として財源投入を見直した。

継続して委託研究を実施してる研究項目には、下記の 2022 年度加速予算を配賦し、アウトプットの充実を図った。

件名	年度	金額 (百万円)	目的	成果・効果
熱関連材料データベースのアプリケーションプログラム作成	2022 年度	6.4	オンライン公開版と同時にローカル環境で動作するアプリケーションプログラムも作成し、希望者に無償配布することで、プロジェクト終了後も継続して Properties DB Web を利用してもらえる環境を事前に用意しておくため。	40 件以上の配布希望があり、未利用熱エネルギー活用技術研究開発における、基盤技術として活用される見通しを得た

熱電特性評価装置の増強（四重電極）および標準化のための経費	2022 年度	2.3 (増加分)	サンプル形状の制限が無くかつ異方性材料の異方向特性を同時に評価できる装置を構築するため 規格提案書、各国との対応に関して専門家の助言を得て、適切に対応するため	測定の安定化とデータ取得の加速化の両立ができ、各種熱電特性の評価結果を提供できる基盤が得られた 熱電モジュールの計測法の国際規格が、より確実及び迅速に策定される見込みが得られた
工場エネルギーの実地調査対象数を増加	2022 年度	4.0 (増加分)	産業用ヒートポンプ適用のモデルケース検討事例が拡充されデータの信頼性を高めるため	10 需要家の工場のエネルギーデータを取得することにより、今後の普及促進のための解析産業用ヒートポンプ適用ポテンシャルを業種・工程別を網羅的に整理できた

3.3 研究開発計画

3.3.1 事業計画

(年度)		中間評価		中間評価		中間評価		終了時評価		
		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
①断熱技術の研究開発		● 1500℃以上で使用可能なファイバー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								● 1500℃以上で使用可能な工業グレードのファイバー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遮熱技術の研究開発		● 可視光線透過率（明るさ）70%以上、日射熱取得率（遮熱）43%以下の遮熱フィルム								
③蓄熱技術の研究開発	高密度蓄熱材料	● 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								● 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
	長期蓄熱材料	● 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								● -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
	複合蓄熱体	● 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								● 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
④ヒートポンプ技術の研究開発	高温ヒートポンプ	● 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								● 200℃までの供給温度範囲に対応し、熱源水温度80℃、加熱器出口温度180℃加熱条件でCOP:3.5以上を達成するヒートポンプシステムの開発【助成】
	高効率冷凍機	● 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								
⑤熱電変換材料・デバイス高性能高信頼化技術開発		● 性能指数ZT=2を有する無機材料の開発 ● パワーファクター（PF）700μW/mK2を有する有機材料及び温度差35℃以下で、出力密度20μW/cm2を有するモジュールの開発								● 受熱温度200℃～600℃の条件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（モジュール出力密度2W/cm2）を達成する発電ユニットの開発 ● コジエ中高温向け熱電変換システムの利用率5%向上仕様の確立
⑥排熱発電技術の研究開発	1kW級	● 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								● 工場等にて、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
	10kW級	● 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								
	50kW級	● 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								
⑦熱マネージメントの研究開発	高効率ヒートパイプ	● 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） ● 高効率ヒートパイプの開発（熱輸送距離2m、熱輸送量3000W、蒸発器体積0.5L、抗重力性、動力源レス）								
	小型ヒートポンプシステム	● 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 ● 極寒（-20℃）環境下などの実用条件でCOP=1.5以上の作動可能な暖房ヒートポンプの開発								● 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 ● 極寒（-20℃）環境下などの実用条件でCOP=1.7以上の作動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
	吸熱デバイス	● 吸熱量5W/cm2を有する吸熱デバイスの開発								
	熱マネージメント	● 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ージメント技術の開発 ● 産業分野等における高効率な熱マネージメント技術・システムの開発								
⑧熱関連調査・基盤技術の研究開発		● 多角的な材料情報のデータベースへの拡充、計算機シミュレーションを含めた熱関連材料等の特性・性能評価技術の開発								
2013～2014年度の2年間は経済産業省で実施		委託事業		助成事業						

2013～2014年度の2年間は経済産業省で実施

委託事業

助成事業

図 13 事業全体計画

また、PL、TherMAT 事務局、組員と密にコミュニケーションをとり、プロジェクト全体・各テーマの進捗状況と研究開発の課題等を把握し、プロジェクトの今後の方向性等を議論・決定している(表1)。

表1 PL、TherMAT 事務局、組員との主な会議

会議	内容	回数	PL	PM・SPM (NEDO)	TherMAT 事務局	組員	組員企業 の役員等
PL-NEDO- TherMAT 進捗会議	プロジェクト全体・各テーマの進捗と今後の方向性等について議論	月1回 程度	○	○	○	—	—
組員ヒア リング	進捗状況、研究開発の課題を把握し、実用化への方針、プロジェクトとしての相乗効果等について議論	随時	○	○	○	○	—
NEDO革新 的熱利用技 術委員会	熱の有効活用に資する技術開発推進のための外部有識者による助言・審議	年2～ 3回	○	○	○	議題に応 じ出席	—
TherMAT 運営委員会	運営上の基本的事項、重要事項を審議・決定	年5回 程度	○	○	○	○	—
TherMAT 定例会	進捗確認、運営上の課題等について議論	週1回	○	—	○	—	—
TherMAT 総会	事業報告、決算、役員の選挙等のため定款に基づき実施	年1回	○	○	○	○	○

3.3.2 中間評価結果への対応

中間評価における主たる指摘事項とその対応は下表のとおり

指摘事項	対応
具体的な数値目標を立てていることは評価できるが、実質が伴わない可能性がある目標値については、よりユーザーニーズに近い目標設定に見直してほしい。(2017 年度中間評価)	研究開発項目⑤「熱電変換材料・デバイス高性能信頼化技術開発」 無次元性能指数(ZT)を目標値としてきたところ、実質性を重視しユーザー評価指標である出力密度(μ W/cm ²)、発電効率(%)の目標値を追加する。
最終目標達成の見通しが、必ずしも明確でない印象もある。例えば、実機の試作がやや遅れているテーマなどに対しては効果的なフォローが望まれる。(2017 年度中間評価)	研究開発項目④「ヒートポンプ技術の開発」 2018 年度のシステム実証移行にあわせ、助成事業化する。ただし、基盤となる冷媒開発及び統合解析シミュレーション技術の開発については、研究開発項目⑧「熱関連調査・基盤技術の研究開発」の下で委託事業として進める。 研究開発項目⑤「熱電変換材料・デバイス高性能信頼化技術開発」 デバイス評価まで進めるため、ユーザーとのマッチングを図る。難易度は高いが高性能化が有望な無機材料は、小規模研究枠に移行させ、毎年度のステージゲート評価を課しつつ開発を進める。

一部の技術開発において、技術的な課題と製品化のための課題の区別が曖昧な印象を受ける。実用化からほど遠い研究開発もあり、その成果の活用方法を考慮し、実用化への道筋を明らかにすることにより、全体として選択と集中を図り、効率的な事業運営が望まれる。(2017 年度中間評価)	<u>研究開発項目②「遮熱技術の研究開発」</u> 研究開発の進捗が早く、製品化開発に移行するため、2017 年度末で完了する。 <u>研究開発項目⑤「熱電変換材料・デバイス高性能信頼化技術開発」</u> 有機材料の開発において、最終目標の達成や実用化の見通しが厳しいため、並行して進める導電性高分子材料・炭素系熱電変換デバイスの開発への選択と集中を図る。 <u>研究開発項目⑥「排熱発電技術の研究開発」</u> 技術面とコスト削減の両面から見通しが得られている 1kW クラスへの選択と集中を図り、10kW の開発は終了する。
投じた研究開発費に対して相応の成果が得られたかどうか、個々のテーマ終了後のフォローをしっかりとやって戴きたい。実用化に向け、システムとして目標とする性能を達成するための取り組みとして、今まで以上に研究全体の進捗を促すコーディネーター役を期待する。(2020 年度中間評価)	個別テーマごとの実用化・事業化戦略と進捗を照らし合わせ、一部前倒しにより 2022 年度は委託事業から助成事業にフェーズを移行するものや、各事業者での実施に移行する等、早期実用化を目指した。
実用化の担い手やユーザーに向けて成果を普及させるための取組をさらに進めることが望ましい。市場ニーズから出て来るスペックへの対応が望まれる。(2020 年度中間評価)	研究の進捗による成果創出と PR 活動により、問い合わせ・引き合いなどにより、多くの市場ニーズが事業者に集まる状況が作られ、製品化等の対応がなされている。
開発技術等の導入に対する意欲が湧くよう、ユーザーへの PR・情報発信や、政策や 助成金など効果的な後押しが望まれる。(2020 年度中間評価)	PR 活動として、成果報告会の開催、ENEX に出展、YouTube (NEDO Channel) に動画掲載、NEDO 広報誌 Focus NEDO の特集、学会講演などを積極的に行った

3.3.3 情勢変化への対応

NEDOは、プロジェクトの進捗状況や、革新的熱利用技術委員会での審議結果、市場・技術・政策動向を踏まえ、情勢変化に対応したプロジェクトの運営・管理を推進する。

これまで情勢変化へ対応した主な事例は以下のとおり。

①プロジェクトの体制強化

- ・「機械・化学産業分野の高温熱供給ヒートポンプに適した冷媒の技術開発」において、種々の物性値を再現可能な高精度ヘルムホルツ型状態方程式の開発と「REFPROP」用データファイルを作成する実績を有する九州産業大学を神戸分室の共同実施先に追加した。(2018 年度)

- ・近年の電気駆動車の普及とパワートレインシステムの多様化を受け、自動車の熱の流れが大きく変化していくことが予想される中で、自動車全体の熱流れを解析可能にするモデルを構築し、電動化に伴って変化する将来の熱の流れを見える化できるようするため、広島分室を中心とした All TherMAT の取組みとして、熱流れの計測解析技術の開発と自動車全体の熱流れのモデル構築の取組みを開始した。(2018 年度)また、佐野分室と熱電変換関係分室とで連携し、ハイブリッド自動車の排気回収システムへ熱電発電モジュール搭載する際の最適配置や燃費効果の検討を開始した。(2020 年度)
- ・「車両用高効率排熱利用・冷房用ヒートポンプの研究開発」において、冬季の換気損失を低減するための湿度交換器システムに必要な、高分子収着剤を用いた耐水性能の高い透湿シートの開発を行うため、日本エクスラン工業株式会社を佐野分室に追加した。(2019 年度)
- ・本事業は、2020 年度から省エネ施策として再構築し、システム化開発を重点化するなど、実用化に向けたマネジメントを一層強化した。(2020 年度)
- ・参画企業による実用化を促進するため、研究開発項目の再整理を実施し、一部テーマを助成事業に移行した。(2022 年度)

②ステージゲート方式の採用

熱電変換技術のシーズ探索・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として実施し、ステージゲート方式を採用して、年度ごとにその継続の妥当性等を審議しながらテーマを推進した。

③欧州における熱利用技術に関する最新技術動向及び市場導入条件調査

パリ協定の採択以降、2050 年までの温室効果ガスの大幅な排出削減に向けて野心的な取り組みをリードする欧州を対象として、熱利用技術に関する最新技術動向及び市場導入条件調査を実施し、TherMAT 内で結果の共有を行った。

また、NEDO がドイツ環境・自然保護・原子炉安全省 (BMU) 及び経済・エネルギー省 (BMWi) と共催した日独エネルギー・環境フォーラムや NEDO とスペイン政府・産業技術開発センター (CDTI) との合同ワークショップ等においても、昨今の欧州各国における情勢と、我が国の未利用熱活用技術に対する関心について、情報収集を実施した。

④研究開発内容の見直し、追加検討

自動車産業における急激な電化の普及を受け、熱流れの計測や評価などについて、対象領域、点数や項目を追加した。また、電動駆動車への対応および評価車両を追加した。その他、車両以外の用途について市場動向調査を行い、新たな用途への実用化も検討を行った。

4. 目標及び達成状況の詳細

4.1 研究開発項目毎の目標の詳細

研究開発項目①「断熱技術の研究開発」

1) 研究開発の必要性

運輸・民生・産業分野において、未利用熱エネルギーの削減に直接寄与する断熱材料への期待は大きい。特に、90%以上の熱が有効利用されていない産業／工業炉においては、高温域で利用可能な高性能断熱材が切望されている。しかしながら、産業／工業炉における断熱材料に求める性能としては、材料の耐久性や強度などが優先されるため、十分な断熱性能を有する材料が利用されていないのが状況である。

2) 研究開発の具体的内容

本研究開発では、材料強度やコストなど、アプリケーションの要求指標と断熱性能を両立する高性能高温断熱材料の開発をするとともに、産業／工業炉の高効率化を実現する熱関連部素材及び、これら部素材の有効活用技術を開発する。

3) 達成目標

【中間目標】

- ・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(2017 年度末)
- ・1500℃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】

- ・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(2022 年度末)

研究開発項目②「遮熱技術の研究開発」

1) 研究開発の必要性

現在、住宅やビル等の建造物において、夏場のエアコン電力負荷低減を目的とした省エネ技術の重要度は、ますます高まっている。その中で、太陽光から選択的に熱線のみを反射できる遮熱材料が有望な部材として注目されている。しかしながら、従来の遮熱材料は高コストであり、ユーザーからの要求性能を満たしていないという問題があり、これらを解決した革新的な遮熱材料が求められている。

2) 研究開発の具体的内容

本研究開発では、従来技術では到達困難であった高い性能を有する革新的遮熱材料を開発する。具体的には、透明性、遮熱性及び電波透過性を兼ね備えた住宅・ビル窓材向け遮熱材料や調光ガラス、建築物の壁材として使用可能な高耐久性遮熱コーティング材料などの遮熱材料を創出する。

なお、2017 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、2017 年度をもって本事業における研究開発は終了とする。

3) 達成目標

【最終目標】

- ・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(2017 年度末)

研究開発項目③「蓄熱技術の研究開発」

1) 研究開発の必要性

未利用熱エネルギーを最も効果的に活用する方法の1つとして、熱を熱として保存できる蓄熱材料の利用があり、これまでに固体-液体の相変化を利用する潜熱蓄熱材料などが商用化されている。しかしながら、アプリケーション適用の観点からは、蓄熱材料の性能やコストには多くの課題があり、体積当たりの蓄熱密度や熱伝導の向上が課題となっている。

2) 研究開発の具体的内容

本研究開発では、次世代自動車における暖機時間の低減、ビル空調における消費エネルギー低減や家庭用ヒートポンプ普及のための装置小型化に向けた、高い蓄熱密度や長期安定性を有する蓄熱材料の開発を行う。また、低コストで、高効率な熱交換を可能とする、車載に適用可能な蓄熱複合体を開発する。

なお、2018 年度までの研究開発により、複合蓄熱体の開発は実用化開発に移行するため、2018 年度をもって本事業における研究開発は終了とする。また、2019 年度までの研究開発成果を受け、システム化開発に移行するため、2019 年度をもって本研究開発項目における研究開発は終了とし、2020 年度から研究開発項目⑦「熱マネジメントの研究開発」にて研究開発を実施する。

3) 達成目標

【中間目標】

- ・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(2017 年度末)
- ・-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(2017 年度末)
- ・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】

- ・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)
- ・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(2019 年度末)
- ・-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(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) 研究開発の必要性

熱需要の多い工場等では、各製造工程におけるプロセス加熱において、100～200℃の熱源としてボイラー蒸気が多く使用され、それを構成するシステムから大量の排熱が発生している。特に産業、民生分野で発生している熱エネルギーのうち、60～80℃の低温排熱は、多くが未利用のまま廃棄されている。これらの排熱を有効利用するため、排熱を熱源として高温熱あるいは冷熱を作り出すことができるヒートポンプ技術が高効率排熱回収技術として幅広く適用されている。しかしながら、さらなるヒートポンプ技術の市場拡大のためには、更なる高効率化や適用温度域の範囲拡大といった課題の解決が必要となっている。

2) 研究開発の具体的内容

本研究開発では、(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、及び(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など、新たな市場を開拓するためのヒートポンプ技術確立し、幅広い産業への適用拡大を図る。

なお、2018 年度からシステム実証に移行することから助成事業として実施し、ユーザーとのマッチングを図りながら実証を進める。また、2017 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、2017 年度末をもって本事業における研究開発は終了とする。

3) 達成目標

(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

【中間目標】

- ・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(2017 年度末)
- ・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信頼性確立及び 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基本設計の完了(2020 年度末)

【最終目標】

- ・200℃までの供給温度範囲に対応し、熱源水温度 80℃、加熱器出口温度 180℃条件で 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℃排熱で駆動できる高効率冷凍機の開発

【最終目標】

- ・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(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」

1) 研究開発の必要性

熱から直接発電ができる熱電材料を利用した熱電変換技術は、運輸、産業、民生等、各分野に広く適用出来るポテンシャルを有しており、実用化及びその普及が期待されている。しかしながら、現在の熱電材料は、その性能指数の向上が大きな課題となっており、高い発電効率を実現する革新的な熱電モジュールが求められている。

2) 研究開発の具体的内容

本研究開発においては、熱電発電の経済性を確保することが可能な発電効率を実現するために、熱電材料の高性能化を目指すとともに、低コスト化や長寿命化に資する技術開発を進め、更にはこれらの熱電材料を利用した熱電モジュールを開発するとともにユーザーにおけるデバイス評価を実施する。

なお、本研究開発項目はステージゲート方式を採用する。

3) 達成目標

【中間目標】

- ・性能指数 $ZT=2$ を有する無機材料の開発(2017 年度末)
- ・200℃～600℃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】

- ・パワーファクター(PF) $700 \mu W/m \cdot K^2$ を有する有機材料及び温度差 35℃以下で、出力密度 $20 \mu W/cm^2$ を有するモジュールの開発(2017 年度末)

- ・1.5W/cm²の発電モジュール、発電素子の実用化開発(2020 年度末)
- ・受熱温度 200℃～600℃の条件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(モジュール出力密度 2W/cm²)を達成する発電ユニットの開発(2022 年度末)
- ・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」

1) 研究開発の必要性

産業からの排熱は約 70%が 200℃以下の中低温排熱であり、大部分が廃棄されているのが現状である。これらの排熱を有効利用する方法として、未利用熱エネルギーを、熱サイクルを利用して電気エネルギーとして回収する排熱発電装置が導入されつつある。しかしながら、これらの発電装置は発電能力が比較的大きいため、工場内に分散し変動が大きい小量の排熱や蒸気を回収するのには適していないという欠点がある。

2) 研究開発の具体的内容

本研究開発では、中規模工場の消費エネルギーの削減を目指し、少排熱量かつプロセス追従性が高い、高効率で低コスト化が見いだせる熱サイクルを利用した小型排熱発電関連技術及び装置の開発を行う。

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及び出力 50kW クラス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、出力 50kW クラス排熱発電装置は 2015 年度末、出力 10kW クラス小型排熱発電装置は 2017 年度末で終了する。また、2019 年度までの研究開発成果を受け、システム化開発に移行するため、2019 年度をもって本研究開発項目における研究開発は終了とし、2020 年度から研究開発項目⑦「熱マネジメントの研究開発」にて研究開発を実施する。

3) 達成目標

【中間目標】

- ・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(2017 年度末)

【最終目標】

- ・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(2015 年度末)
- ・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(2017 年度末)
- ・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「熱マネジメントの研究開発」

1) 研究開発の必要性

近年、運輸分野においては、車両における内燃機関熱効率の飛躍的な向上及び電動化の進展によって、低燃費化が急速に進んでいる。しかしながら、車両効率の向上によって暖房熱源の不足の問題が顕在化しつつあり、冬場の実効燃費向上が大きな課題となっている。また、電動車両においても、エアコン ON 時の航続距離の減少は大きな問題となっており、早急の対応が求められている。更に、産業分野においては、排熱を回収し、それを蒸気・温水として工場の加熱プロセス、空調、給湯、温度差発電等へ利用したり、効率的な熱の融通(蓄熱、熱輸送)を行ったりすることで、高い総合エネルギー効率が達成でき、より一層の省エネルギーが期待される。

2) 研究開発の具体的内容

本研究開発では、高効率熱マネジメントシステムを実現するために、熱の効率的な輸送を行うシステム、局所冷却を可能とする高性能熱電素子、高効率空調運転を実現するヒートポンプ技術、内燃機関やモーター／インバーター等における排熱の削減・有効利用技術の開発を図る高効率な省エネユニット等を開発する。最終的には、未利用エネルギー有効活用技術をトータル的に組み合わせることで、運輸分野及び産業分野等における高効率な熱マネジメントシステムを実現することで、車両又は工場ないし社会全体の効率向上を目指す。

なお、2017 年度ないし 2018 年度までの研究開発により、吸熱デバイスの開発及び高効率ヒートパイプの開発は実用化開発に移行するため、それぞれ 2017 年度、2018 年度をもって本事業における研究開発は終了とする。

3) 達成目標

【中間目標】

- ・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) (2017 年度末)
- ・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 (2017 年度末)
 - (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ヒートポンプの開発 (2017 年度末)
- ・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)
- ・安全性評価を完了し、過冷却度 2K 以内、120℃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℃～25℃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)
- ・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)
- ・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)
- ・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℃)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】

- ・吸熱量 5W/cm² を有する吸熱デバイスの開発 (2017 年度末)
- ・高効率ヒートパイプの開発 (熱輸送距離 2m、熱輸送量 3000W、蒸発器体格 0.5L、抗重力性、動力源レス) (2018 年度末)
- ・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℃)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)
- ・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)
- ・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℃前後にて冷却・保冷を行う潜熱蓄熱システム及び-20℃～25℃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」

1) 研究開発の必要性

未利用熱は産業界だけでなく、民生・業務分野を含め広く分布しており、その存在状況を正確に把握することは研究開発の対象や目標を検討するうえで必要不可欠であるが、極めて困難である。

また、幅広い分野の技術開発を進めるうえで、熱関連材料の物性に関するデータや評価技術を統一的に整備することは、研究開発の効率化に極めて有用であり、研究開発の一環として実施する必要性が高い。

2) 研究開発の具体的内容

研究開発項目①～⑦の課題において、研究の効果的な推進を果たすために、各課題と連携して、各種排熱実態の調査、新規熱関連材料の導入シナリオ検討及びシナリオ実現に向けた技術・制度課題の抽出を行う。熱関連材料については、多角的な材料情報のデータベースへの拡充、計算機シミュレーションを含めた熱関連材料の特性・性能評価技術の開発を実施する。

3) 達成目標

【中間目標】

- ・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)
- ・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)
- ・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)
- ・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)
- ・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】

- ・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(2020 年度末)
- ・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)
- ・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)
- ・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)

4.2 研究開発項目毎の達成状況の詳細

研究開発項目①:断熱技術の研究開発

- ・不凍タンパク質添加により組織の均一化をはかり、原料の組み合わせを検証し緻密な気孔壁組織を確立することにより、最終目標である 1,500℃の耐熱性、熱伝導率 0.20W/m・K、圧縮強度 20MPa 以上の特性を有する断熱材を開発した。
- ・開発した断熱材等を実装した検証炉での加熱テストの結果、当社従来炉と比較して、燃料使用量を最大 70%削減可能であることを実証した。

研究開発項目②:遮熱技術の研究開発

- ・高遮熱化、層間密着性、製膜性を有する新規ポリマーの開発を行った。

- ・高精度流動シミュレーション技術を駆使して独自の積層装置を開発してフィルム化することで中間目標の光学特性を有する積層フィルムを創出した。
- ・高精度コート技術の開発を行い、目標透過率と耐久性をクリア可能な遮熱コート剤、粘着剤を開発し、中間目標の光学特性を有する遮熱フィルムの連続加工に成功した。
- ・実際の建物での省エネ評価を行い、開発品が従来品に比べ高い冷房負荷低減効果を有することを実証した。

研究開発項目③:蓄熱技術の研究開発

- ・高密度蓄熱材料(低温):蓄熱密度 0.25MJ/kg を有するクラスレートハイドレートを用いて、振動のない環境下で、過冷却度 2K 以下の蓄熱モジュールの開発を行った。また、2020 年度以降の蓄熱による熱マネジメント実証の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:温度 90℃の模擬熱源で、トリガーを付与してから 30 秒以内に過冷却解除、40 秒以内で最大熱出力が得られる中温用蓄熱モジュール及び 25℃環境下で過冷却を 24 時間保持できる高温用蓄熱材料を開発した。
- ・蓄熱構造体(車載用):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(車載用):新規多孔材(MOF)を用いて、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④:ヒートポンプ技術の研究開発

- ・フロン系低 GWP 冷媒を使用した最高温度 200℃(被加熱媒体 80℃→180℃加熱)が供給可能なヒートポンプ試作機的设计・製作・試験を完了した。
- ・圧縮機 2 台連結運転での定格回転数運転を確認した。
- ・実測値から高い解析精度を確認。最終目標:COP3.5 が達成できる見通しが得られた。
- ・研究開発項目⑧と連携し、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った。

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

従前の開発と検討を踏まえ、最終目標を達成するために、「スクッテルダイト」「クラスレート」「シリサイド」の無機材料系に絞って、開発を進めた。

- ・スクッテルダイト系:熱電材料技術、熱電モジュール技術を開発し、熱電モジュールの変換効率 9%、出力密度 2W/cm²、耐熱性 600℃、耐久性 10,000h 以上を達成した。また、熱電発電システム技術を開発し、出力 200W の熱電発電ユニットの試作に成功した。
- ・クラスレート化合物:多接合型熱電モジュールを開発試作。接合抵抗、輻射熱を低減するモジュール構造と素子の高性能化により、変換効率 15%の見通しを得た。
- ・シリサイド系-1:出力密度 1.24W/cm² を達成した9対シリサイドモジュールを用いて、5kW～1MW 規模のエンジン排熱からの発電実証試験を実施。実測データからエンジン発電出力の 5%以上を実現する仕様を策定した。
- ・シリサイド系-2:発電出力密度 1.55W /cm² を達成(2 素子モジュール、ΔT=580℃)。発電素子材料の耐久性が 3,000 時間以上であることを確認。早期実用化検討対象としてバイオマスボイラーへの展開を考案し、温度環境測定データよりシリサイド系素子の適用温度を得た。(2020 年度末に実証試験を実施)

- ・小規模研究開発においては、主に以下の成果を得た。

熱流センサによる計測技術：フレキシブルな熱電変換素子を袋状に成型し、対象の物質を包むことで、相変化中で温度が一定な物質の熱の流出入量を定量的に計測する技術を開発した。また、本技術を活用し、保冷剤の保冷能力の残量を算出し外部端末に表示するシステムを開発するとともに、研究開発項目⑦での熱流計測にも応用した。

小型で軽量な自然冷却型有機熱電モジュール：導電性高分子(PEDOT/PSS)を用いた有機熱電変換モジュールについて、その導電部材の熱伝導が大きいことがモジュール全体の特性を制限していることを発見し、導電部材の電気抵抗、部材間の接触抵抗をできるだけ増やさずに熱抵抗を高める新たな設計を行った。その結果、小型・軽量で製造コストが低く、放熱フィンなどを使わずに自然冷却が可能な有機熱電モジュールを世界で初めて開発し、100℃から 120℃の低温熱源に設置するだけで、無線通信に十分な電力が得られることを実証した。

研究開発項目⑥：排熱発電技術の研究開発

- ・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。
- ・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、数値解析等により、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行った。

研究開発項目⑦：熱マネジメントの研究開発

自動車及び工場のさまざまなプロセスについて、システム全体で熱を上手く利用し省エネルギー化を図ることを目指し、個別のメソドロジーやシミュレーション技術を組み合わせて、伝導、対流、輻射(伝熱の3形態)等を管理・制御するための技術開発を実施した。

▽自動車の熱マネジメント：

- ・車両搭載に不可欠なループヒートパイプ(LHP)システムの小型化を目指し、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、1.53L(目標 1.6L 以下)で 3kW という LHP システムを構築した。
- ・本プロジェクトで構築した計測技術を用いて、xEV の熱流れの現象を解明。それを元に伝熱の 3 形態を考慮する高速(1Hr/仕様レベル)かつ高精度な 1 次元の熱流れモデルを構築した。
- ・車両熱計測技術の開発：蓄積した熱エネルギーフローと熱電変換デバイスの実機評価を基に、排熱活用デバイスの効果(燃費効果等)を算出できるシミュレーションモデルの構築を行なった。排気温度の高い位置に搭載が可能な熱電モジュールにおいて、最大 2.5%の燃費効果が得られることが分かった。
- ・電動車の熱量調査：シリーズパラレル式 HEV、シリーズ式 HEV およびプラグイン HEV、マイルド HEV の熱計測結果から、各車両の消費エネルギー比較を実施し、エネルギーフローを把握。それを基に、HEV の排気回収可能熱量は車両全体の消費エネルギーの約 10%あり、積極的に利活用することで車両の省エネルギー化が可能であることを明らかにした。
- ・車両用小型吸収冷凍機の実現に向けて、塗布構造吸収器を採用した車載向け小型吸収冷凍機を開発し、商用車への搭載評価を実施。車速により変化する排熱を蓄熱するシステムを開発し、冷房出力を安定化させて 2.8kW 以上を達成した。
- ・吸着式冷凍システムについて、シミュレーションモデルを用いて平均蒸発性能 1.7kW/19L を確認するとともに、極低温下における吸着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した。あわせて車両の適合性を検証した。また、高分子収着剤塗膜ポリマーネットワ

ーク高度化により、高耐水性収着剤塗膜の基本塗布技術を確立した。さらに、信頼性・耐久性を有する高分子収着剤を用いて、高透湿性シート技術を確立した。

- ・研究開発項目③で開発した長期蓄熱材料(中温用)について、車載を想定した 1/1 スケール蓄熱モジュールを用いて模擬システムを構築した。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 0.2kW/L 以上の要求仕様を、同時に満たすことを実証し、燃費向上効果+0.2%/L を明確化した。

▽工場プロセスの熱マネージメント:

- ・研究開発項目③で安全性評価を完了した高密度蓄熱材料(低温用)を搭載した蓄熱モジュールについて、食品工場での蓄冷用途への適用を見据え、過冷却度 2K 以下、蓄熱密度 0.12MJ/L 以上、蓄放熱速度 6W/L 以上の要求仕様を、同時に満たすことを検証し、省エネ効果△30%(氷蓄熱比)を明確化した。
- ・研究開発項目⑥で開発した出力 1kWe クラスの排熱発電に関して、発電効率が 14%以上となることを確認した(2017 年度)。また、熱源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を実施すると共に、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 を達成した。

研究開発項目⑧:熱関連調査・基盤技術の研究開発

- ・15 業種の業種別、温度帯別、設備別の未利用熱の排出・活用に関する実態調査について、その成果を「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。
- ・関係分室、関係機関、共同実施先と連携し、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置きながら、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、その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した。また、工場の熱利用プロセスに導入するヒートポンプ単体の性能が検討可能な「産業用ヒートポンプ単体シミュレータ」を構築し、本事業内で共有化すると共に、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した。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」の開発も実施した。
- ・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した。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ことを目指した。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した。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した。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した。
- ・熱関連材料のデータベースシステムについて、利用者の利便性を考慮し、熱物性値の性格が異なる有機／無機化合物の熱物性データを統一的に検索可能とした。また新たなデータ構造を基盤としてシステムの機能拡張を行い、より利便性を考慮したインタラクティブツールを実装した。計算科学を用いた蓄熱材の反応機構解明について、酸化マグネシウムと水蒸気との化学反応を分子スケールで適切にモデル化し、水和反応と脱水反応のエネルギー変化を第一原理計算から評価した。水和反応に関して、酸化マグネシウム固体表面に水酸化マグネシウムの結晶核が形成されること、この化学過程が発熱反応であることも実際の計算で確認できた。
- ・高温熱供給ヒートポンプに適した新規低 GWP 冷媒候補について、その輸送性質・PVT 物性の熱物性のデータを取得し、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した。また、新規冷媒候補の合成法の効率化を検討し、最適な合成方法を確立した。さらに、新規冷媒候補に関して、最適なサイクルでの性能解析と開発した凝縮熱伝達予測法を用いた計算を行うとともに、最適な絶縁材・エラストマを決定した。

添付資料

●プロジェクト基本計画

●特許論文等リスト

2. 分科会公開資料

次ページより、推進部署・実施者が、分科会において事業を説明する際に使用した資料を示す。

「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」 (終了時評価) 2015年度～2022年度 8年間 プロジェクト(公開版)

2024年1月10日

未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発

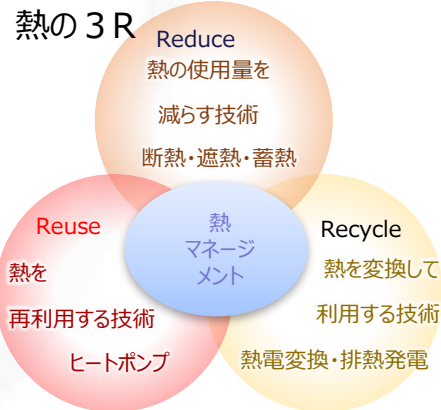
省エネルギー部 後藤直彦(主査)
関連する技術戦略: 未利用熱有効利用



基本計画

プロジェクトの概要

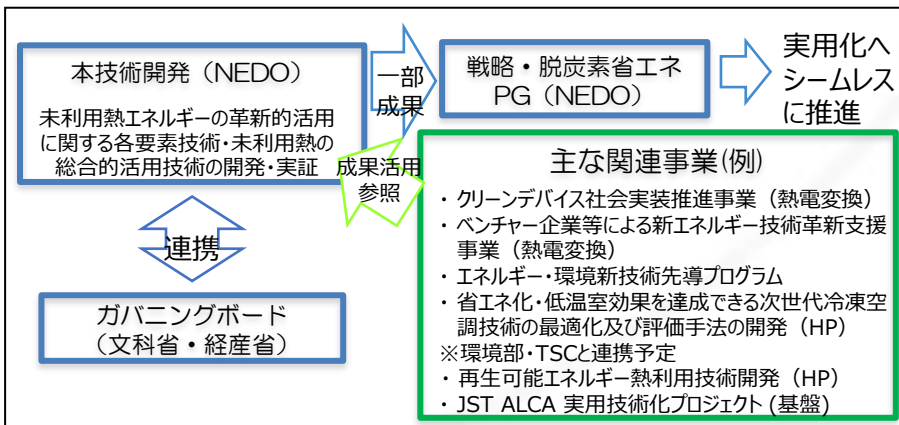
本事業では、未利用熱エネルギーを効果的に、
①削減(断熱、遮熱、蓄熱)
②再利用(ヒートポンプ)
③変換利用(熱電変換、排熱発電)
するための技術開発と、
④これらの技術を一体的に行う熱マネジメント技術の開発
を行い、環境中に排出される膨大な未利用熱を効果的に削減・回収・再利用し、産業分野、運輸分野、民生分野における更なる省エネ化を目指す。



想定する出口イメージ等

アウトプット目標	【断熱】ファイバーレスで、耐熱1500℃以上、圧縮強度20MPa以上、熱伝導率0.20W/m・K以下、【遮熱】可視光線透過率70%以上、日射熱取得率43%以下、【蓄熱】20℃～25℃環境下で24h以上、【熱電】受熱温度200℃～600℃の条件で発電効率15%以上のモジュール、出力200W(モジュール出力密度2W/cm ²)の発電ユニット、【排熱発電】出力1kWクラスの実証、【ヒートポンプ】最高加熱温度200℃、熱源水温度80℃、加熱器出口温度180℃加熱条件でCOP:3.5以上、【熱マネジメント】産業分野等の熱マネジメント技術・システム開発、【熱関連調査・基盤技術】産業用高温HP向け冷媒物性情報の収集、統合解析シミュレーション技術の構築(以上は代表的なアウトプット目標、詳細は基本計画 別紙の「研究開発計画」のとおり)
アウトカム目標	既存技術の限界及びコスト面での制約から、未利用エネルギーの大半、特に中低温領域の排熱は大部分が廃棄されているが、断熱材・蓄熱材・熱電材料等に代表される各種熱マネジメント部材の革新的な技術開発を通して未利用熱を有効活用できるシステムを確立し、産業分野、運輸分野、民生分野における社会実装を実現し、更なる省エネ化を進める。 本プロジェクトの研究開発成果の2030年時点における波及効果として、原油換算600万kL/年程度以上の省エネ、1,700万t-CO ₂ /年程度以上のCO ₂ 削減効果を見込む。
出口戦略(実用化見込み)	熱マネジメント技術の社会実装に向けては、欧米等の競合国も積極的に取組んでいることから、研究開発のみならず評価方法の標準化や規格化のための調査を同時並行的に実施する。 我が国のステークホルダーが保有する材料技術、材料評価技術、モジュール製造技術や関連ノウハウを最大限活用できる基準づくりを進める。特に、我が国が優位性を持つ有機材料において早期に評価・規格の標準化を図る。

既存プロジェクトとの関係



事業計画

事業期間: 2015～2022年度(8年間) ※2013～2014年度の2年間は経済産業省で実施
総事業費(NEDO負担分): 67.2億円(予定)(委託/2/3助成、需給)
プロジェクトリーダー(PL): 国立研究開発法人産業技術総合研究所(AIST) 理事 エネルギー・環境領域 領域長 小原 春彦 氏

<研究開発スケジュール・評価時期・想定する予算規模>	H27 (2015)	H28 (2016)	H29 (2017)	H30 (2018)	R1 (2019)	R2 (2020)	R3 (2021)	R4 (2022)
以下の7項目に係る研究開発 断熱技術/遮熱技術/蓄熱技術/ヒートポンプ技術/熱電変換材料・デバイス高性能高信頼化技術/排熱発電技術/熱マネジメント	各項目について、新材料の開発、機器単体の開発、システムの検討等を行う			各項目についてシステムの構築等を行い、実用化に十分な性能を達成する				
	中間評価		中間評価			中間評価		
熱関連調査・基盤技術の研究開発	整備すべきデータベースの明確化/評価技術の整備、体系化				データベースの製作/新材料探索の基盤情報の提供			
予算(億円)	18.5	15	6.5	6.5	6.3	6.5	4.5	(3.4)

事業概要

(年度)		中間評価	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	終	
①断熱技術の研究開発		● 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										● 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遮熱技術の研究開発		● 可視光線透過率（明るさ）70%以上、日射熱取得率（遮熱）43%以下の遮熱フィルム										
③蓄熱技術の研究開発	高密度蓄熱材料	● 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										● 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
	長期蓄熱材料	● 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										● -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
	複合蓄熱体	● 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										● 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
④ヒートポンプ技術の研究開発	高温ヒートポンプ	● 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										● 200℃までの供給温度範囲に対応し、熱源水温度80℃、加熱器出口温度180℃加熱条件でCOP:3.5以上を達成するヒートポンプシステムの開発【助成】
	高効率冷凍機	● 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										
⑤熱電変換材料・デバイス高性能高信頼化技術開発		● 性能指数ZT=2を有する無機材料の開発 ● パワーファクター（PF）700μW/mK2を有する有機材料及び温度差35℃以下で、出力密度20μW/cm2を有するモジュールの開発										● 受熱温度200℃～600℃の条件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（モジュール出力密度2W/cm2）を達成する発電ユニットの開発 ● コジエネ中高温向け熱電変換システムの利用率5%向上仕様の確立
⑥排熱発電技術の研究開発	1kW級	● 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										● 工場等にて、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
	10kW級	● 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										
	50kW級	● 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										
⑦熱マネジメントの研究開発	高効率ヒートパイプ	● 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） ● 高効率ヒートパイプの開発（熱輸送距離2m、熱輸送量3000W、蒸発器体格0.5L、抗重力性、動力源レス）										
	小型ヒートポンプシステム	● 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 ● 極寒（-20℃）環境下などの実用条件でCOP=1.5以上の作動可能な暖房ヒートポンプの開発										● 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 ● 極寒（-20℃）環境下などの実用条件でCOP=1.7以上の作動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
	吸熱デバイス	● 吸熱量5W/cm2を有する吸熱デバイスの開発										
	熱マネジメント	● 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 ● 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										
⑧熱関連調査・基盤技術の研究開発		● 多角的な材料情報のデータベースへの拡充、計算機シミュレーションを含めた熱関連材料等の特性・性能評価技術の開発										

2013～2014年度の2年間は経済産業省で実施

委託事業

助成事業

1. 意義・アウトカム(社会実装)達成までの道筋

(※)本事業の位置づけ・意義
(1)アウトカム達成までの道筋
(2)知的財産・標準化戦略

2. 目標及び達成状況(概要)

(1)アウトカム目標と達成見込み
(2)アウトプット目標と達成状況

3. マネジメント

(1)実施体制
(2)研究開発計画

4. 研究開発項目ごとの成果概要

＜評価項目 1＞ 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

(※) 本事業の位置づけ・意義 * 終了時評価においては対象外

(1) アウトカム達成までの道筋

(2) 知的財産・標準化戦略

1. 意義・アウトカム(社会実装)達成までの道筋

(※)本事業の位置づけ・意義
(1)アウトカム達成までの道筋
(2)知的財産・標準化戦略

2. 目標及び達成状況(概要)

(1)アウトカム目標と達成見込み
(2)アウトプット目標と達成状況

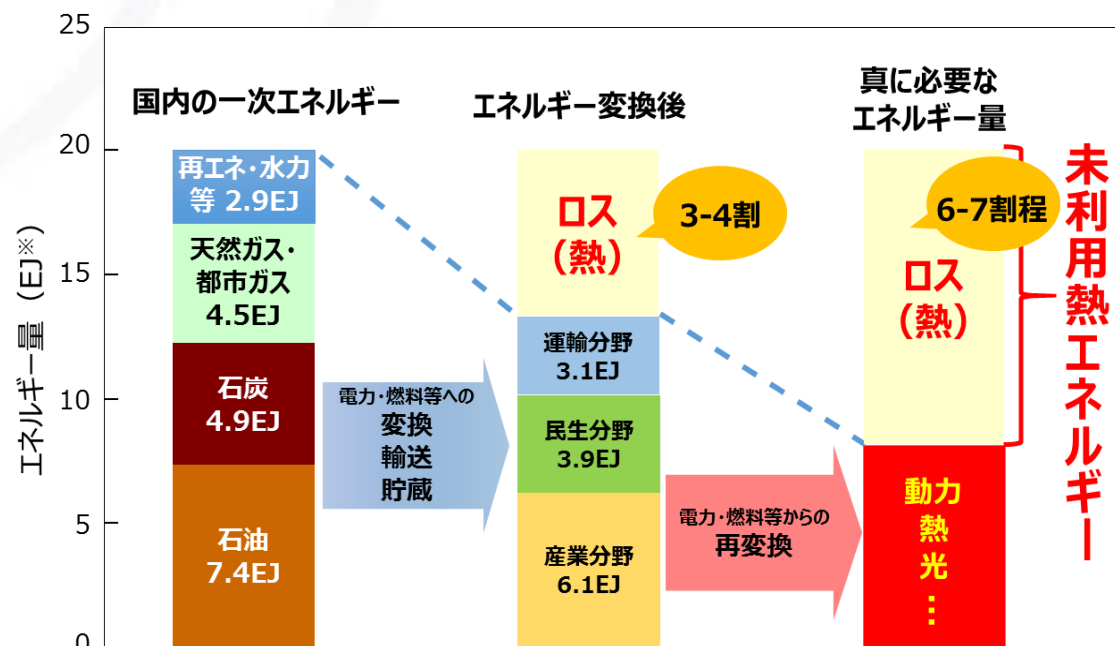
3. マネジメント

(1)実施体制
(2)研究開発計画

4. 研究開発項目ごとの成果概要

事業の背景・目的

- 一次エネルギーの大半は有効活用できておらず、エネルギーの大部分（うち約 4 割が産業・運輸分野）が**未利用熱**として捨てられている＆CO₂として排出されている。
- ➡ 一次エネルギーの 9 割を輸入に頼り、その金額が16兆円にも上るとともに、2050年までに80%の温室効果ガスの排出削減を目指す上で、この未利用熱をいかに減らすかが、我が国にとっては重要な課題。

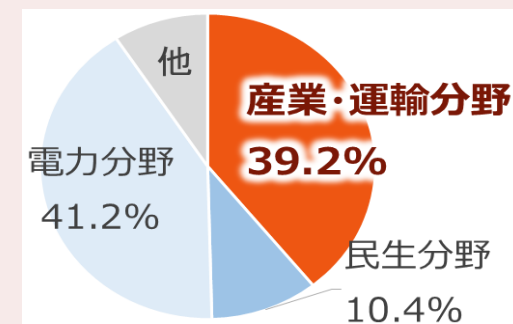


※EJ=10¹⁸ ジュール

出典：資源エネルギー庁 平成30年度（2018年度）エネルギー需給実績（確報）を基にNEDO作成

産業・運輸等の分野で、一次エネルギーの大半が熱として環境中に排出される（未利用熱エネルギー）

エネルギー最終活用時点のロスの約 4 割が産業・運輸分野

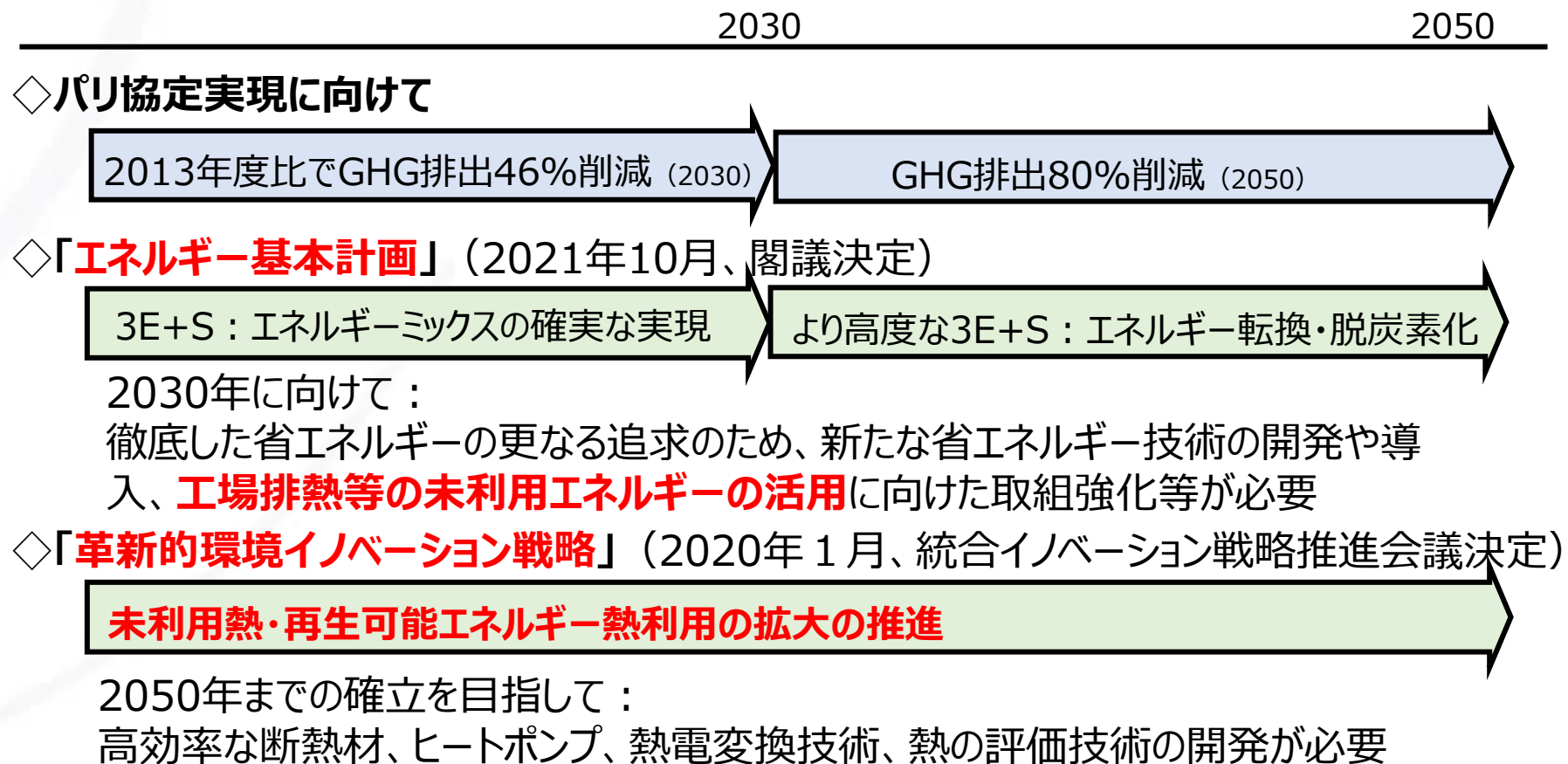


日本における一次エネルギー供給から最終消費に至るエネルギーフロー

政策・施策における位置づけ

政策的背景

- 我が国の中長期的なエネルギー・環境目標の実現に向けて、熱の効率的利用をはじめとする省エネルギーの推進が求められている。



技術戦略上の位置づけ

戦略的省エネPGの重要技術 METIとNEDOの省エネルギー技術開発方針

- 第5次エネルギー基本計画などの政府の方針を踏まえ、廃熱利用や熱システムの脱炭素化を促進するため、省エネルギー技術戦略の重要技術として廃熱を高効率に電力に変換する技術や高効率電力加熱技術などを追加。(2019年7月)

※排熱の高効率電力変換、熱エネルギーの循環利用、高効率電気加熱（誘電加熱、レーザー加熱、ヒートポンプ加熱）など

「省エネルギー技術戦略」に定める重要技術



※赤字：未利用熱の有効利用に関連する技術

国内外の動向と比較



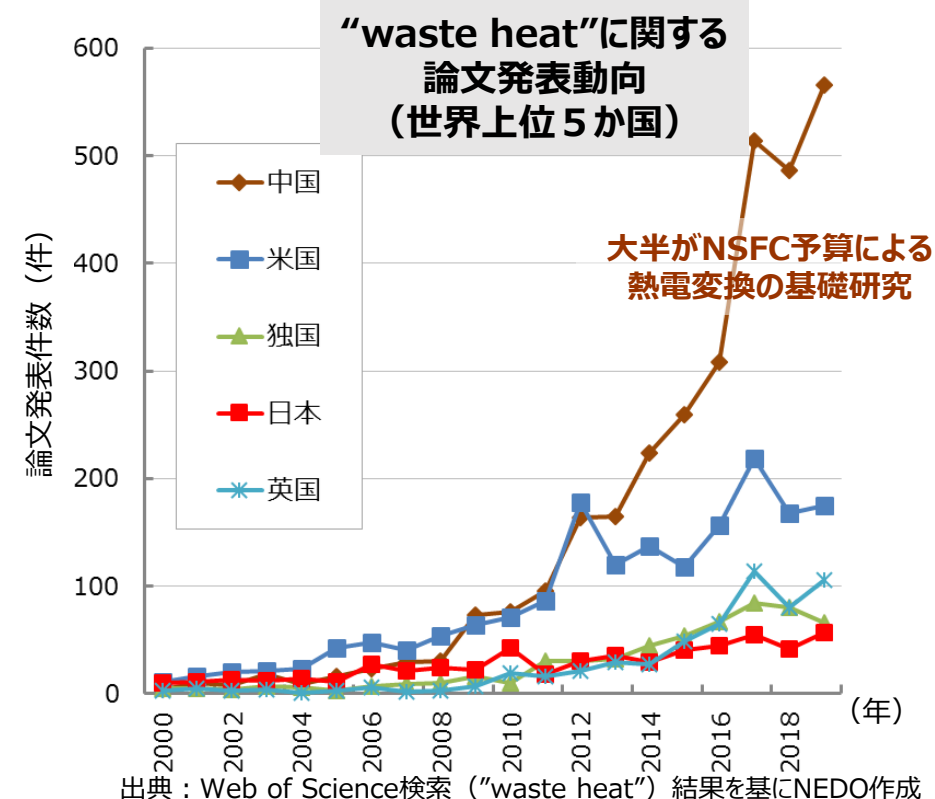
- ✓ 国家発展改革委員会：「石炭のクリーンで高効率な利用と新型省エネ技術」の実施計画を発行
→ 工場の余剰熱回収(主に高温排熱) が重点的研究開発の対象に
- ✓ 中国国家自然科学基金委員会 (NSFC) 予算による熱電変換に関する基礎研究も活発に実施



- ✓ DOE Advanced Manufacturing Office：先進製造の実現のため、ポリマーコンポジット材料を用いた新しい熱交換器、マクロチャネル熱交換器の気液二相流の流動挙動解析、排熱回収システムのシミュレーションベースの設計と最適化等の研究開発を実施
- ✓ DARPA, NASA JPL：熱エネルギーハーベスタとして熱電変換材料の開発を活発に実施 (テルル系化合物、ハーフホイスター系、スキテルダイト系、CNT：目標変換効率6~11%)



- ✓ EUヒート・ロードマップ
産業から排出される未利用熱に着目して、その地域熱供給への接続を含め、未利用熱の利活用をさらに推進する方針を示している (2012~)
- ✓ 欧州委員会 (EC) の研究資金助成プログラムHorizon 2020
2014~2015年、2016~2017年、2018~2020年に実施されている作業プログラムの中で、排熱利用等の熱マネージメント技術関連の公募枠が設定されている。
蓄熱や熱電変換を中心に、未利用熱の活用に関する研究開発が活発に実施されている。



国内外の動向と比較

- 全欧州規模でのフレームワークプログラムである“Horizon 2020”では**熱利用に関する100%補助プロジェクト事業に、10億円/年以上の予算が投じられている。**
- 熱利用技術を網羅的に扱うようなプログラムは実施されていない。

Horizon Europe 2021～2027年が後継プロジェクトとして955億€で実施されている

メイン国	プロジェクト	開発対象	予算	補助率	年間あたりの予算(億円)	期間
オランダ	CREATE	蓄熱	€ 5,914,657	100	1.9	2015.10～2019.9
スペイン	SUSPIRE		€ 3,722,017	100	1.6	2015.10～2018.9
オランダ	SCORES		€ 5,998,599	100	1.9	2017.11～2021.10
スペイン	Indus3Es	熱交換器 (AHT)	€ 3,858,500	100	1.3	2015.10～2019.6
オーストリア	DRYficiency	高温ヒートポンプ(160℃等)	€ 6,465,899	77	2.0	2016.9～2020.8
ポルトガル	TransFlexTe g	熱電変換	€ 4,091,187	100	1.7	2015.1～2018.12
イタリア	CoACH		€ 3,882,900	100	1.6	2015.1～2018.12
スペイン	JOSPEL		€ 6,668,288	100	2.4	2015.5～2018.10
ドイツ	POWERSTEP		€ 5,173,854	77	2.2	2015.7～2018.6
フランス	INTEGRAL		€ 8,845,948	79	3.7	2016.12～2019.11
フランス	MAGENTA		€ 4,999,778	100	1.8	2017.1～2020.6
スペイン	QuIET		€ 3,118,272	100	1.1	2018.2～2021.7
スペイン	TASIO	排熱発電 (ORC)	€ 3,989,248	100	1.3	2014.12～2018.5
英国	I-ThERM	排熱発電等 (～1000℃)	€ 3,996,169	100	1.4	2015.10～2019.3

“Horizon 2020”での熱利用に関する主なプロジェクト (2014～2015年以降に開始された主なもの)

他事業との関係

- 我が国のイノベーションの創出の大半を担う企業における研究開発が、近年短期化かつ短視野化し、**抜本的なイノベーションを生み出す可能性を秘めた未利用熱の有効利用に関する中長期的研究への投資は特に少なくなっている。**

例：NEDOにおける未利用熱の有効利用に関する主な研究開発プロジェクト



スーパーヒートポンプ・
エネルギー集積システムの研
究開発

未利用エネルギー
高度活用負荷平準化
冷暖房技術開発

広域エネルギー利用
ネットワークシステム研
究開発（エコ・エネ都
市プロジェクト）

高効率熱電変換システムの開発

内部熱交換による省エネ蒸留技術開発

次世代型ヒートポンプシステム研究開発

戦略的省エネルギー技術革新プログラム

脱炭素省エネプログラム

未利用熱エネルギーの
革新的活用技術研究開発

高性能工業炉
の開発

高性能
工業炉
導入
フィールド
テスト

近年：基盤研究から実用化まで
をすべて網羅し企業を含む**中長期**
のプロジェクトとしては他省庁を
含めて実施されていない

2000年頃まで：石油代替と省エネルギー化という命題
のもとで**大規模・中長期プロジェクトを実施**

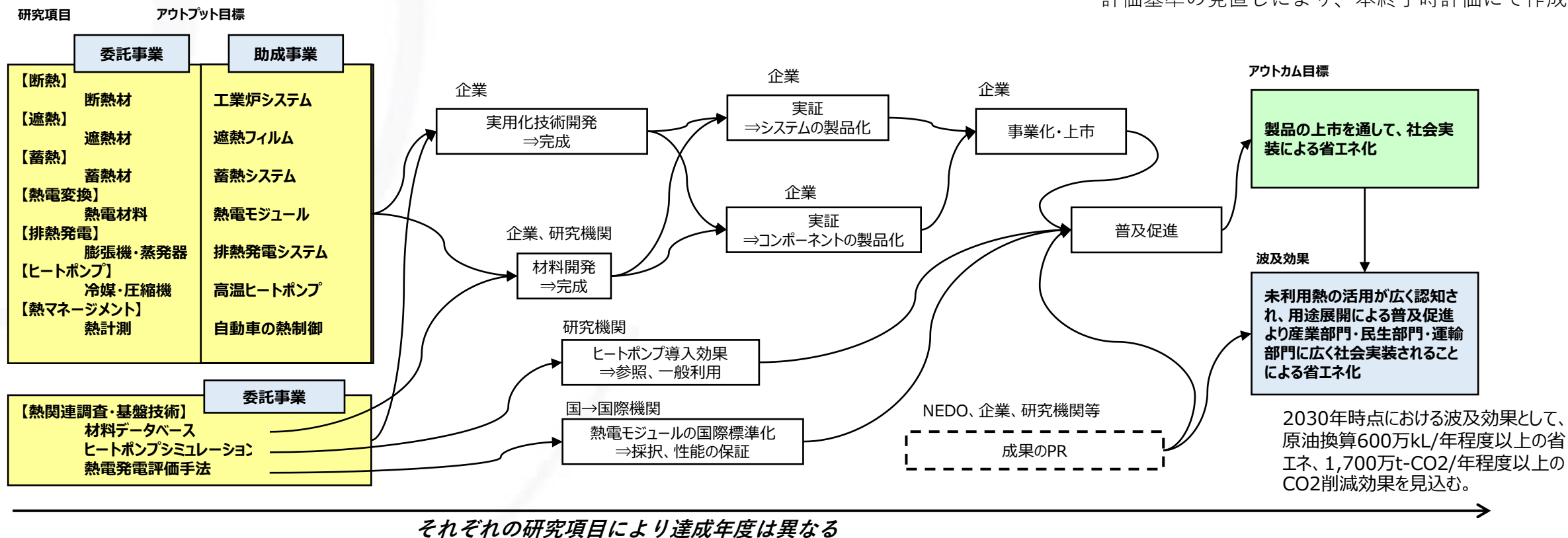
→リジェネレイティブバーナー、吸収式／圧縮式ヒート
ポンプ・冷凍機、水和物スラリー蓄熱などが**実用化・
普及**

→我が国の産業界の競争力強化や人材育成、**省エネ
ルギー先進国としての地位を築き上げる**ことに貢献

※矢印の枠の縦の長さは各プロジェクト・テーマの予算規模

アウトカム達成までの道筋

評価基準の見直しにより、本終了時評価にて作成



- ・ 委託事業→助成事業→各事業者にて実施する実用化へのフェーズ移行は進捗状況に合わせ、**早期自立化を達成**
- ・ 基盤技術の公開や成果のPRを積極的に行い、**普及促進と新たな用途展開に進展**
- ・ 電化の方向性、熱利用の動向など外部環境の変化を注視し、**市場探索・拡大へと波及**

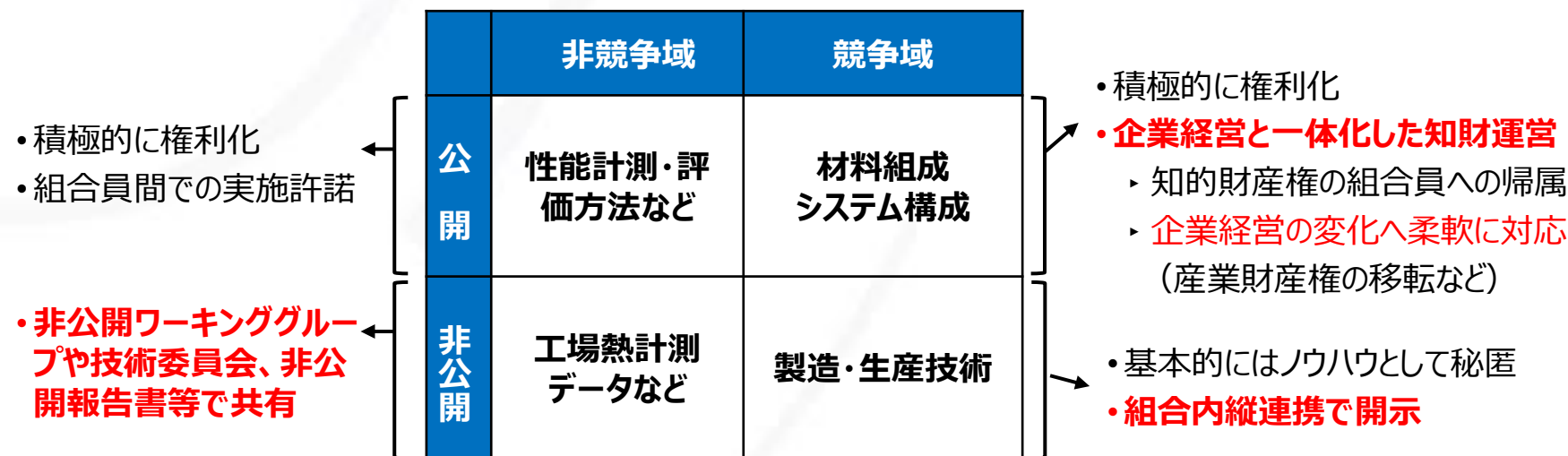
※機密性の高い詳細版は「非公開版」に掲載

知的財産・標準化戦略

知的財産権等に関する戦略

- オープン／クローズの考え方にに基づき、情報管理と知財運営を実施。
- 将来的な市場拡大が見込まれる海外出願も積極的に実施。
- NEDOに報告を義務付け、開発技術の特許出願・権利化を逐次把握。

「成果及び知的財産権の取扱いに関する規程」を整備



工場排熱調査報告書、ヒートポンプシミュレーション及び材料データベースは、**Web上で公開**することにより、多くの引用、利用登録、配布希望

熱電発電の評価手法については、他国の申請状況を注視し、慎重な対応を実施し、**標準化に目処**

実施者による知財管理

組合内連携を有機的に行うため、本事業の試験・研究目的であれば、プロジェクト参加者が所有するバックグラウンド知財については所定の手続きを事前に行うことで委託研究の中で実施可能とすること、本事業（委託）で得られた知財については実施可能とすることなどを規定した「知的財産権及びサンプルの取扱いに関する規程」を整備。かつ組合員同士の共同研究の中で活用。

＜評価項目 2＞ 目標及び達成状況

- (1)アウトカム目標及び達成見込み
- (2)アウトプット目標及び達成状況

1. 意義・アウトカム(社会実装)達成までの道筋

(※)本事業の位置づけ・意義
(1)アウトカム達成までの道筋
(2)知的財産・標準化戦略

2. 目標及び達成状況(概要)

(1)アウトカム目標と達成見込み
(2)アウトプット目標と達成状況

3. マネジメント

(1)実施体制
(2)研究開発計画

4. 研究開発項目ごとの成果概要

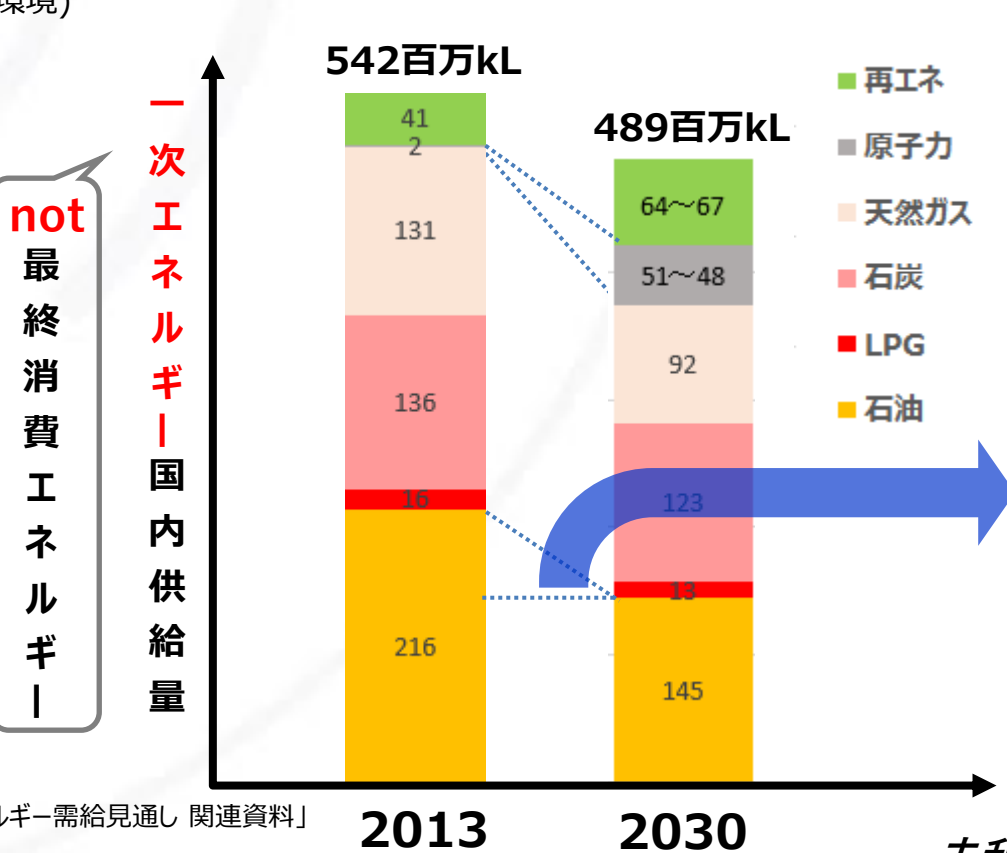
アウトカム目標の設定及び根拠

◆実施の効果 (3E+S)

3E+S= **E**nergy security (安定供給)、
Economical efficiency (経済性)、
Environment (環境)
 + **S**afty (安全)

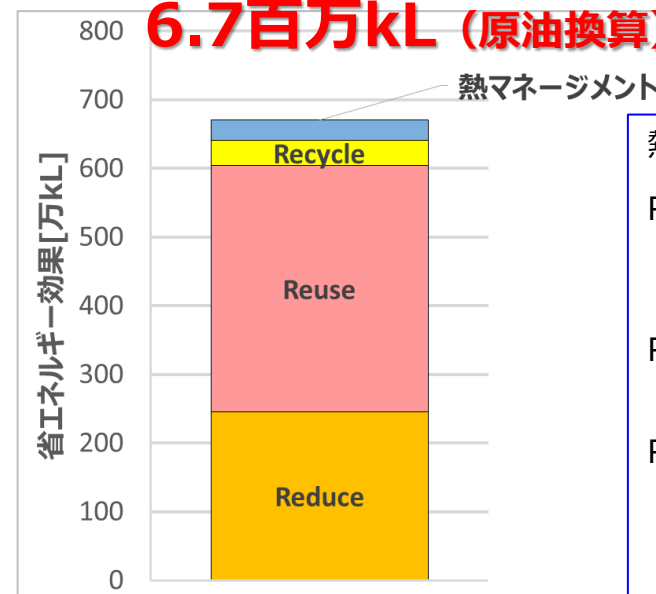
■ 研究開発成果による2030年における省エネルギー効果（国内）は、
一次エネルギー換算で少なくとも600万kL/年

➡ 原発2～3基分と同等の価値 ➡ 第四の電源として3E+Sへ寄与



省エネルギー効果

6.7百万kL (原油換算)



熱マネジメント：4%
 Recycle：6%
 熱電変換：1%
 排熱発電：5%
 Reuse：53%
 ヒートポンプ：53%
 Reduce：37%
 断熱技術：21%
 遮熱技術：13%
 蓄熱技術：3%

原発2～3基分の
エネルギー使用量と同等

出典：資源エネルギー庁「長期エネルギー需給見通し 関連資料」

2013

2030

未利用熱エネルギーのうち利用可能なポテンシャルを試算

本事業における「実用化・事業化」の考え方及び見込み

本プロジェクトは、基盤研究的な研究開発テーマを含む幅広い研究開発課題を対象としているが、以下の「実用化・事業化」の考え方をもとに、マネジメントを実施している。

本プロジェクトにおける「実用化・事業化」の考え方

当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用(顧客への提供等)が開始されることを実用化と定義し、さらに、

当該研究開発に係る商品、製品、サービス等の販売や利用により、企業活動(売り上げ等)に貢献することを事業化と定義する。

本プロジェクトの成果の実用化・事業化から、普及促進することによりアウトカムである

「未利用熱を有効活用できるシステムを確立」

さらに波及効果として

- ・未利用熱の活用が可能であることを実証し、可能性と必要性を広く認知し、
- ・様々な分野・用途への適用の検討、技術の普及促進が得られ、

「産業分野、運輸分野、民生分野における社会実装を実現し、更なる省エネ化を進める。」が達成される。

本事業における「実用化・事業化」の考え方及び見込み(実績)

- 実施関係者の多大なる尽力の結果、**すでに数件の成果が実用化・事業化に至っている。**
- PJ卒業後の実用化開発を後押し、より実用化の確度を高めるため、実用化指向の提案公募型事業やMETI補助事業等へのシームレスな提案を推進する。

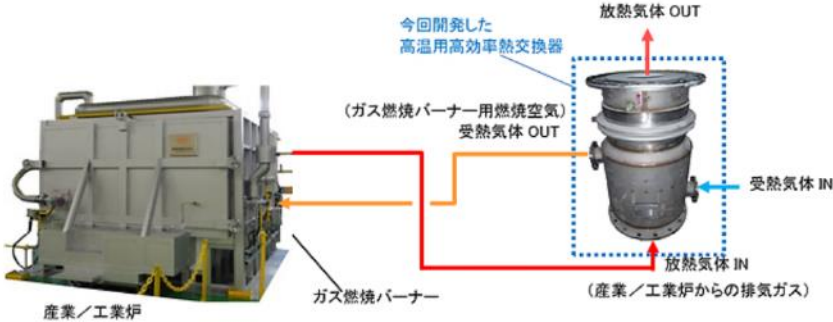
**未利用熱を従来比3倍の性能で回収可能な
高温用高効率熱交換器を実用化 (2015年度)**

実用化

・1300℃の耐高温性能
・従来に比べ3倍の性能で
未利用熱を回収

高温炉に
設置可能





産業／工業炉

ガス燃焼バーナー

高温炉 (～1300℃)

今回開発した
高温用高効率熱交換器

放熱気体 OUT

受熱気体 IN

受熱気体 OUT

放熱気体 IN
(産業／工業炉からの排気ガス)

美濃窯業株式会社

**従来比 2 倍の未利用熱回収性能の
冷凍機を実用化 (2017年度)、事業化 (2019年度)**

事業化

温水熱の利用温度をより低温域まで拡大：
95℃の温水排熱について、従来は75℃までの熱しか回収できなかったところを、より低温域の51℃まで熱回収



開発した一重効用ダブルリフト
吸収冷凍機「DXS」

2019年度以降、ドイツ等に導入、商用運転を開始

導入先	導入国	用途	熱源温水	冷凍能力	台数	導入時期
事務所ビル	ドイツ	業務用空調	95→65℃	630kW	3	2019年
機械工場	ドイツ	産業用空調	90→55℃	1,407kW	1	2020年
大学病院	ポーランド	業務用空調	65→57℃	300kW	1	2020年
化学工場	スロバキア	産業用空調	65→52℃	494kW	1	2021年

日立ジョンソンコントロールズ空調株式会社

本事業における「実用化・事業化」の考え方及び見込み

- 製品化をニュースリリースや成果報告会で公表

省エネルギー型熱処理・工業炉の早期製品化



省エネルギー型熱処理・工業炉
(プロトタイプ、有効容積 1.3m³)

美濃窯業株式会社

産業用高効率高温ヒートポンプの導入



装置外観：W2300×L5400×H2250

2次試作機



ユニット内部



圧縮機外観

2025年度には導入・実用化を目指す

前川製作所

アウトカム目標の達成見込み

課題解決により実用化・事業化が進み、アウトカム目標が達成されることを見込む

- 本事業は、第5次エネルギー基本計画等を踏まえ、2020年度から省エネ施策として再構築。ユーザからの厳しいニーズや導入条件（性能、コスト等）に合致することを目指し、ユーザのニーズ調査を実施して実用化計画へ反映。
- NEDOは、開発技術や導入普及の課題解決と、開発技術を広く知っていただくことの努力を通じて、進行中のテーマのより早期の実用化・事業化を推進。

実用化に向けた主な課題と取組（例）

<断熱>

コストダウンを見据え
工業的作製・加工プロセスの確立

- ・高強度化・低熱伝導率化の両立
- ・再現性の高いプロセスのスケールアップ技術の開発

<熱電変換>

200～600℃で使用可能な
熱電変換モジュール・システムの確立

- ・実環境下（バイオマスボイラ、コージェネ、自動車排気システム）での性能検証

日本の優位性を確保するため
性能評価手法の国際標準化

- ・発電性能の評価手法の国際標準規格提案
- ・標準化に向けた耐久性評価技術の確立

<高温ヒートポンプ>

PJ終了後の早い段階での実用化のため
200℃加熱の実現と性能検証

- ・新規冷媒を適用したヒートポンプ試作機の設計、製作、性能測定試験

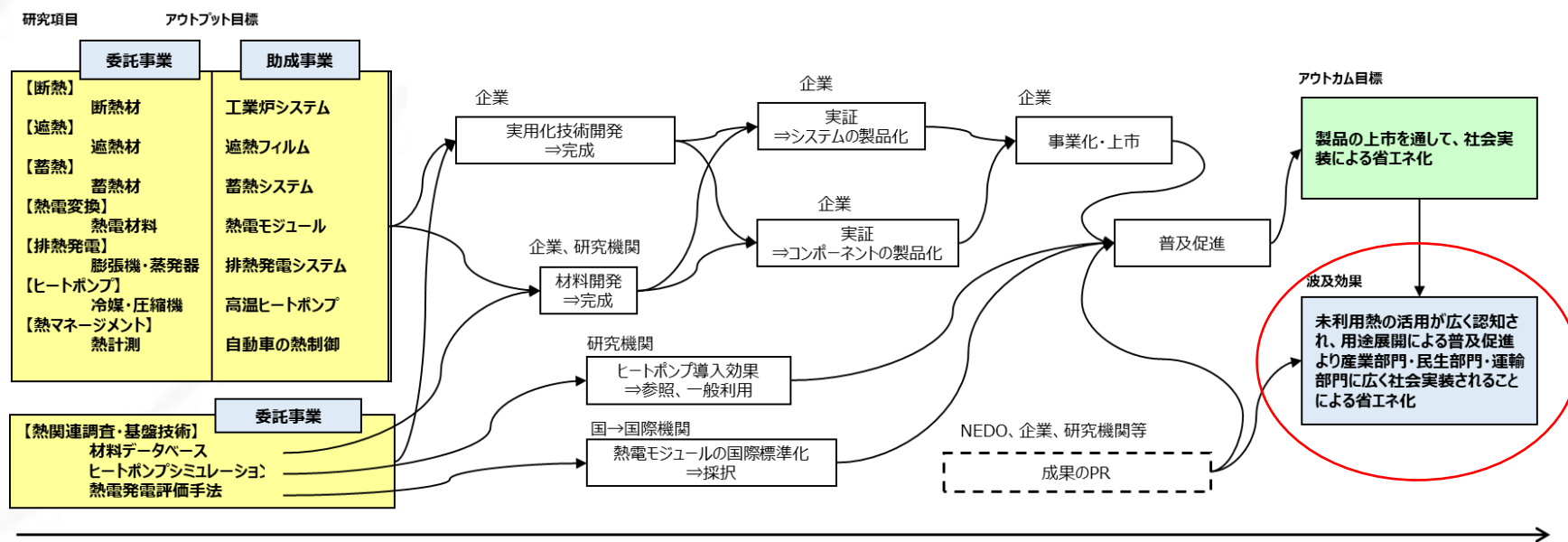
開発成果を含む
高温ヒートポンプの導入障壁の排除

- ・導入効果等の見える化を可能とする汎用的なツール・データセットの構築
- ・開発ツールを用いたモデルケースの検討

波及効果

例：用途展開

本PJにおける産業分野の排熱実態調査報告による情報発信、成果の報告等を通して、広く未利用熱活用への関心が高まった。その結果、各事業者への問い合わせや引き合い、事業化に関する検討依頼等が増加し、本プロジェクト終了後も、各事業者にて**新たな用途への実用化が展開**されている。



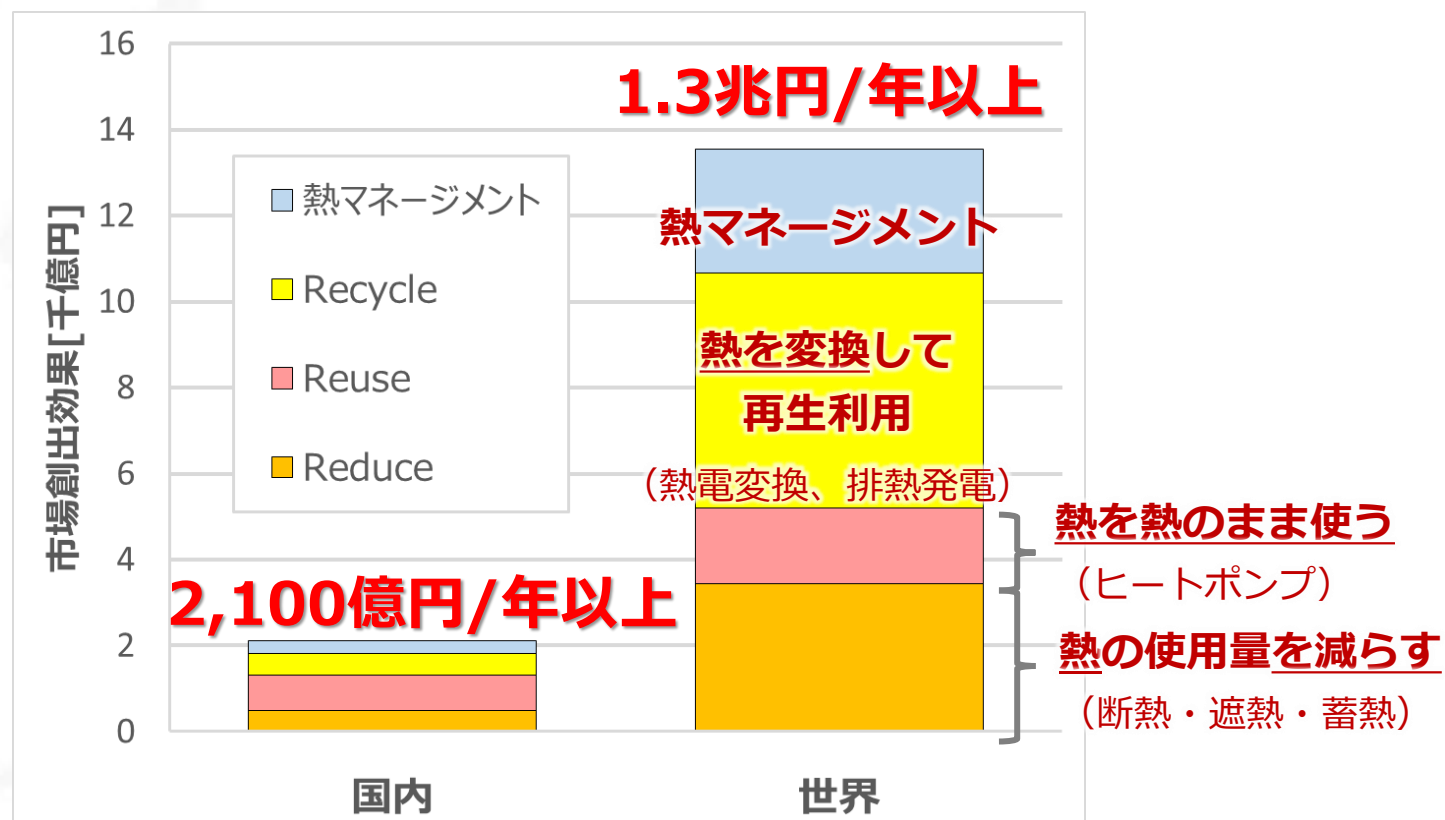
※機密性の高い詳細版は「非公開版」に掲載

費用対効果

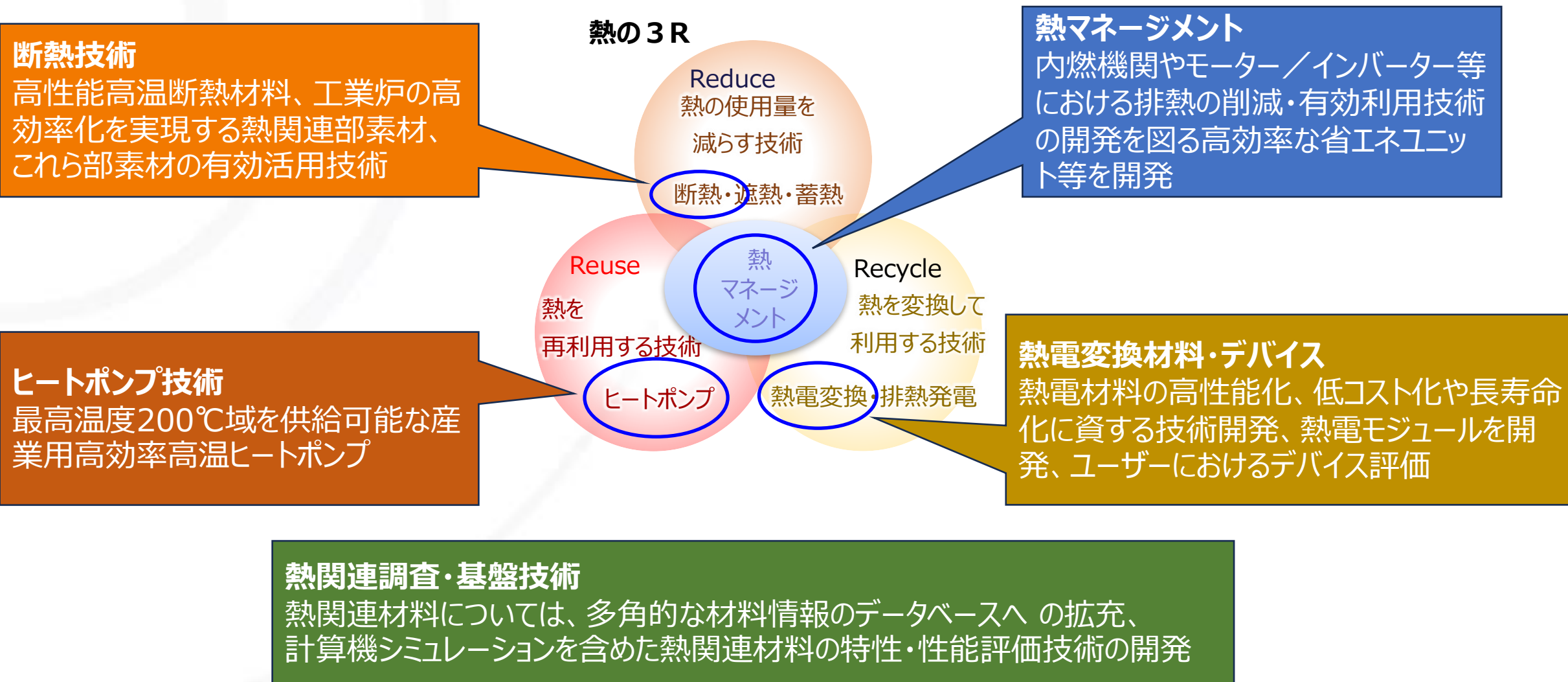
■ プロジェクト国費負担額 **111.2億円**（経済産業省実施分を含む実績額：2013～2022年度）
 ※75.1億円（NEDO負担実績額：2015～2022年度）

■ 開発成果による**国内市場創出** **2,100億円/年以上**@2030年 ➡国費投資に対して約**19倍**

■ 開発成果による**世界市場創出** **1.3兆円/年以上**@2030年 ➡国費投資に対して約**117倍**



アウトプット(研究開発成果)のイメージ (2021,2022年度分)



アウトプット(終了時)目標の設定及び根拠 (2021,2022年度分)

研究開発項目	最終目標 (2022年 3 月)	根拠
①「断熱技術の研究開発」	・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 (中間目標値より高性能な条件を目標値としている)	・現在使われている耐熱レンガの熱伝導率を大幅に改善し、規制が強化され始めている現状のファイバー系断熱材料の熱伝導率と耐火断熱レンガの強度を兼ね備えた性能を実現する
④「ヒートポンプ技術の研究開発」	・200℃までの供給温度範囲に対応し、熱源水温度 80℃、加熱器出口温度 180℃条件でCOP:3.5 以上を達成するヒートポンプシステムの開発 (中間目標値より高性能な条件を目標値とし、中間評価時点より現実的かつ厳しい温度条件に変更)	・化石燃料を用いたボイラ蒸気による工場のプロセス加熱を代替し、1.75倍の熱効率で加熱可能なシステムを実現する ・一次エネルギー利用効率や経済性の点でメリットが出ることを考慮して、COP:3.5を満足する産業用高効率ヒートポンプを開発する
⑤「熱電変換材料・デバイス高性能高信頼化技術開発」	・受熱温度 200℃～600℃の条件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 (モジュール出力密度 2W/cm²)を達成する発電ユニットの開発 ・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 (従来のコージェネシステムの発電量を 5%向上) (中間目標値より高性能な条件を目標値とし、中間評価時点より具体的な補足()内を追加)	・従来材料ではできなかった中高温域(200～600℃)の利用に適した熱電モジュール・材料の技術を確立し、自動車や工場等の排熱回収用途での実用化が可能レベルとする

アウトプット(終了時)目標の設定及び根拠 (2021,2022年度分)

研究開発項目	最終目標 (2022年 3月)	根拠
⑦「熱マネージメントの研究開発」	・車両トータルの熱移動を計測し、開発した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ージメント技術の開発 ・産業分野等における高効率な熱マネージメント技術・システムの開発 (a)氷蓄熱と同等の蓄熱密度(従来材料比 2 倍)で、10℃前後にて冷却・保冷を行う潜熱蓄熱システム及び-20℃～25℃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	・将来のクルマの熱流れに関するレイアウトや仕様を決定するために、熱流れのモデル構築が必要 ・産業/業務部門の食品製造業等の10℃前後の冷熱需要に即した冷凍機の省エネルギー運転等に寄与する蓄熱モジュールを実現する ・自動車の走行時の排熱を翌日の始動時に使用することを想定して、長期に蓄熱出来る蓄熱モジュールを実現する
⑧「熱関連調査・基盤技術の研究開発」	・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 ・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 ・産業用高温ヒートポンプ向け統合解析シミュレーション技術の構築	・工場の生産プロセスや熱フローを把握し、生産プロセスに最適化した高度なシステム設計技術確立して、従来は困難であったヒートポンプ技術等の導入効果の見える化を容易にする ・熱電材料の発電性能や耐久性の評価手法、ハイスループット評価技術を早期に実現し、我が国が強みを有する熱電材料の国際的な産業化と標準化に貢献する ・革新的な熱マネージメント材料の探索や実用化開発等を可能とするため、これまで整備されていない熱関連材料・部素材の熱物性情報を体系的に整理したデータベースシステムを構築すると同時に、計算シミュレーションに基づく知見の共有化を行う

アウトプット目標の達成状況 (2021,2022年度分)

研究開発項目	目標	成果（実績）	達成度（見込み）	達成の根拠／解決方針
①「断熱技術の研究開発」	・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	・ゲル化凍結法により、最終目標である耐熱性 1,500℃、圧縮強度 20MPa、熱伝導率 0.2W/(m・K)を有する断熱材の開発に成功。	◎	・開発した断熱材等を実装した検証炉での加熱テストの結果、当社従来炉と比較して、燃料使用量を最大 70%削減可能であることを実証。
④「ヒートポンプ技術の研究開発」	・200℃までの供給温度範囲に対応し、熱源水温度 80℃、加熱器出口温度 180℃条件でCOP:3.5 以上を達成するヒートポンプシステムの開発	・フロン系低GWP冷媒を使用した最高温度 200℃(被加熱媒80℃→180℃加熱)が供給可能なヒートポンプ試作機的设计・製作・試験を完了。 ・圧縮機2台連結運転での定格回転数運転を確認した。 ・実測値から高い解析精度を確認。最終目標:COP3.5が達成できる見通しが得られた。	○	・圧縮機吐出から熱交換器間の圧力損失が過大。この課題の改善検証を実施中。
⑤「熱電変換材料・デバイス高性能高信頼化技術開発」	・受熱温度 200℃～600℃の条件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(モジュール出力密度 2W/cm ²)を達成する発電ユニットの開発 ・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(従来のコージェネシステムの発電量を 5%向上)	・クラスレート化合物において、接合抵抗、輻射熱を低減するモジュール構造と素子の高性能化により、発電効率 15%を有するモジュール化技術を開発 ・スクッテルダイト系において、モジュールの出力密度は2W/cm ² を達成、発電ユニットの出力は200Wを達成した。 ・シリサイド系において、出力密度1.24W/cm ² を達成した9対シリサイドモジュールを用いて、5kW～1MW規模のエンジン排熱からの発電実証試験を実施。実測データからエンジン発電出力の5%以上を実現する仕様を策定した。	○	

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

アウトプット目標の達成状況 (2021,2022年度分)

研究開発項目	目標	成果（実績）	達成度（見込み）	達成の根拠／解決方針
⑦「熱マネージメントの研究開発」	・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ージメント技術の開発 ・産業分野等における高効率な熱マネージメント技術・システムの開発 (a)氷蓄熱と同等の蓄熱密度(従来材料比 2 倍)で、10℃前後にて冷却・保冷を行う潜熱蓄熱システム及び-20℃～25℃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	・本プロジェクトで構築した計測技術を用いて、xEVの熱流れの現象を説明。それを元に伝熱の3形態を考慮する高速（1 Hr/仕様レベル）かつ高精度な1次元の熱流れモデルを構築した。 ・要求仕様を満たすことを実証し、省エネ効果△30%（氷蓄熱比）を明確化、燃費向上効果+0.2%/L（排熱未利用時比）を明確化	◎	・車載向け小型吸収冷凍機の車載以外用途への展開が見込まれる
⑧「熱関連調査・基盤技術の研究開発」	・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 ・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 ・産業用高温ヒートポンプ向け統合解析シミュレーション技術の構築	・データ拡張性を持つ熱物性DBシステムへと改良し、直観的な可視化、簡易解析機能など、利便性の高い検索機能を追加した。 ・計測技術についてIEC国際規格の新規提案を行った ・評価手法のデファクトスタンダードを目指した装置を開発し上市された	○	・データベース及び単体シミュレーションについては、一般公開および継続利用希望者への配布が可能な状況 ・評価技術の提供は可能となっているが、標準化については手続きに時間がかかっているため数年後達成見込み

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

研究開発成果の意義(副次的成果)

副次的成果

- 研究組合員および関連する共同研究先のみならず、人脈の形成、技術者の交流の場、適用先企業との意見交換など、活動の場が広がった。
- 高い目標の設定および実用化を目指した取組であることから、高いモチベーション保ち続け、物作りにおける技術者のレベルアップが感じられ、事業者内での人材育成に結びついた。

例：熱電発電

本PJによる大学、国研との連携を通して、熱電材料および熱電モジュールの研究が深まり、熱電モジュールの高性能化が進められた。また、材料、素子、モジュール、及び評価技術までをカバーした研究開発を10年間続けたことにより、日本の研究開発力が全体的に向上した。これにより、オールジャパンで取り組む地盤ができ、更なる技術力向上のためJST（CREST、未来社会）などの大型予算の獲得に繋がった。



特許出願

- 特許出願可能と判断したものについては、速やかに出願を行うと共に、早期審査を活用して早期登録を狙う。
- 標準になり得る技術は、速やかに特許出願する。
- 一つの発明物を多面的に捉えて多数の出願で特許網を構築する。
- 国内特許出願を先行するが、特に重要な特許は海外出願も行う。

	～2017 年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度	2023 年度	計
特許出願件数 (うち外国出願)	368 (135)	63 (21)	50 (22)	32 (14)	26 (10)	11 (3)	1 (0)	551 (205)
特許登録件数 (うち海外登録)	6 (1)	28 (11)	51 (14)	45 (22)	35 (14)	20 (8)	4 (0)	189 (70)

※NEDOへの報告数を集計（2023年10月現在）
登録国が複数ある場合は複数件のカウントをしている

本事業での特許出願の特徴

- ・ 特許出願件数のうち、登録された件数が多い
- ・ 実用化後の将来マーケット拡大と競争を見据え、PCT以外の狙いを定めた外国出願を実施
(例) トヨタ自動車（蓄熱）：米・印・中・伯・韓・露・泰・尼 パナソニック（蓄熱）：欧・米・中
アイシン精機（吸収式ヒートポンプ）：独・仏 日立ジョンソンコントロールズ空調（吸収冷凍機）：中・印・韓
日立製作所、日本サーモスタット、富士フイルム（熱電）：米 古河機械金属：米・欧・独



論文発表等

	～2017 年度	～2020 年度	2021 年度	2022 年度	2023 年度	計
論文	61	38	15	8	3	125
研究発表・講演	274	167	35	48	13	537
受賞実績	14	8	1	4	11	38
新聞・雑誌等への 掲載	8	21	3	8	5	45
展示会への出展	37	34	7	6	1	85

2023年9月 日本冷凍空調学会 年次大会にて本プロジェクトの成果を基調講演でNEDOから紹介
断熱技術に関しては2023年度にTBS系列がっちりマンデーでの紹介および新聞記事掲載が数社

※2023年10月現在
終了時評価非公開資料を集計

成果の広報

成果報告会の開催、展示会でのサンプル展示、NEDO広報誌およびYouTube等において取り組みや成果の広報を実施。



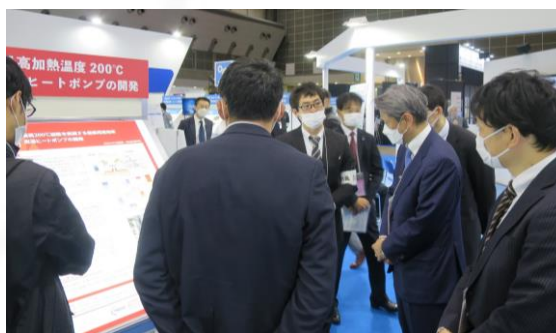
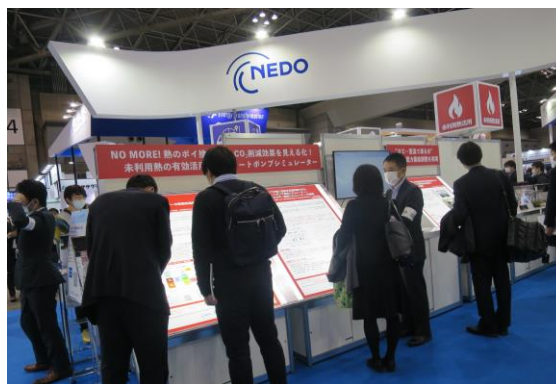
成果報告会をWeb配信 (2022年度)

関連イベント・成果等	
■報告書・開発ツール等	
公開日	報告書・開発ツール等
2020年1月	☐ 事業紹介パンフレット (2020年1月 第1版)
2020年1月27日	☐ 熱伝導材料の熱伝導率を手軽で高精度に計算するソフトウェア
2019年1月	☐ 熱伝導材料の熱伝導率を手軽で高精度に計算するソフトウェア (P-TRANS) 3
関連イベント・成果等を見える化	
2019年1月	☐ 熱伝導材料の熱伝導率を手軽で高精度に計算するソフトウェア

■NEDOニュース (ニュースリリース・NEDOからのお知らせ)		
日付	実施者	タイトル
2020年1月27日	未利用熱エネルギー革新活用技術 研究組合	☐ 熱伝導材料の熱伝導率を手軽で高精度に計算するソフトウェア
2020年1月24日	国立大学法人東京大学	☐ 「ENEX 2020」 出展へ

NEDOホームページの更新

(https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100097.html)



ENEX2023

未利用熱活用コーナー (上) と
VIPへの技術紹介のようす (下)



#8 未利用熱でミライの省エネ【後編】

NEDO Channel (YouTube)

前編で事業の紹介、後編で産業用ヒートポンプを紹介



NEDO広報誌で特集 (2022年度)



本事業のパンフレット更新 (2022年度)

＜評価項目 3＞ マネジメント

(1) 実施体制

(2) 研究開発計画

1. 意義・アウトカム(社会実装)達成までの道筋

(※)本事業の位置づけ・意義
(1)アウトカム達成までの道筋
(2)知的財産・標準化戦略

2. 目標及び達成状況(概要)

(1)アウトカム目標と達成見込み
(2)アウトプット目標と達成状況

3. マネジメント

(1)実施体制
(2)研究開発計画

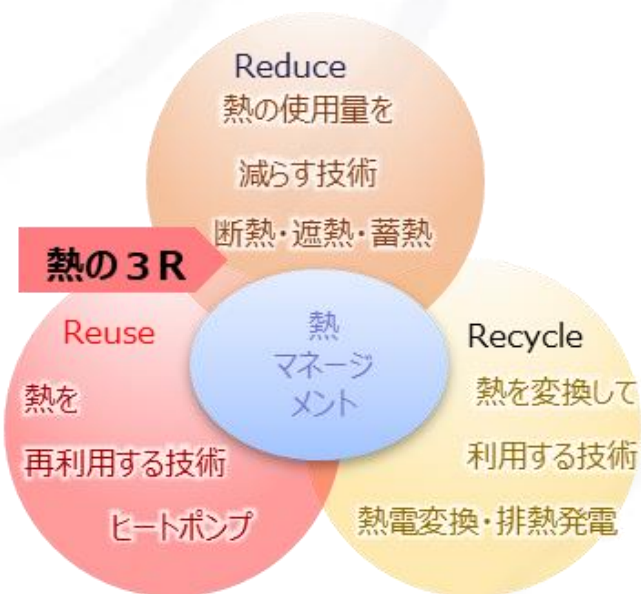
4. 研究開発項目ごとの成果概要

NEDOが実施する意義

NEDOのミッション

- エネルギー・地球環境問題の解決
- 産業技術力の強化

NEDOにおける未利用熱の活用に関する研究開発



未利用熱の活用、**省エネルギー**技術のタネを育成・実用化・**社会実装**へ

NEDOが実施する意義

未利用熱の有効利用に関して

- 経済的に回収する技術体系を確立 **(ハイリスク・連携必要)**
- 社会全体のエネルギー効率を向上 **(公共性/汎用性・連携必要)**
- 新たな産業創成と競争力強化 **(ハイリスク・連携必要)**

中長期のNEDOプロジェクトとして実施すべきもの

例1：高温ヒートポンプ用 冷媒開発 (公共性/汎用性・連携必要)

新規冷媒についてはさまざまなユーザが想定され、標準化（冷媒データベースの登録等）が求められるが、標準化のための冷媒研究はヒートポンプメーカーの収益に直結するものではない

➡メーカーを含めた産学連携体制で、新規冷媒の物性評価等の基盤研究と標準化を推進

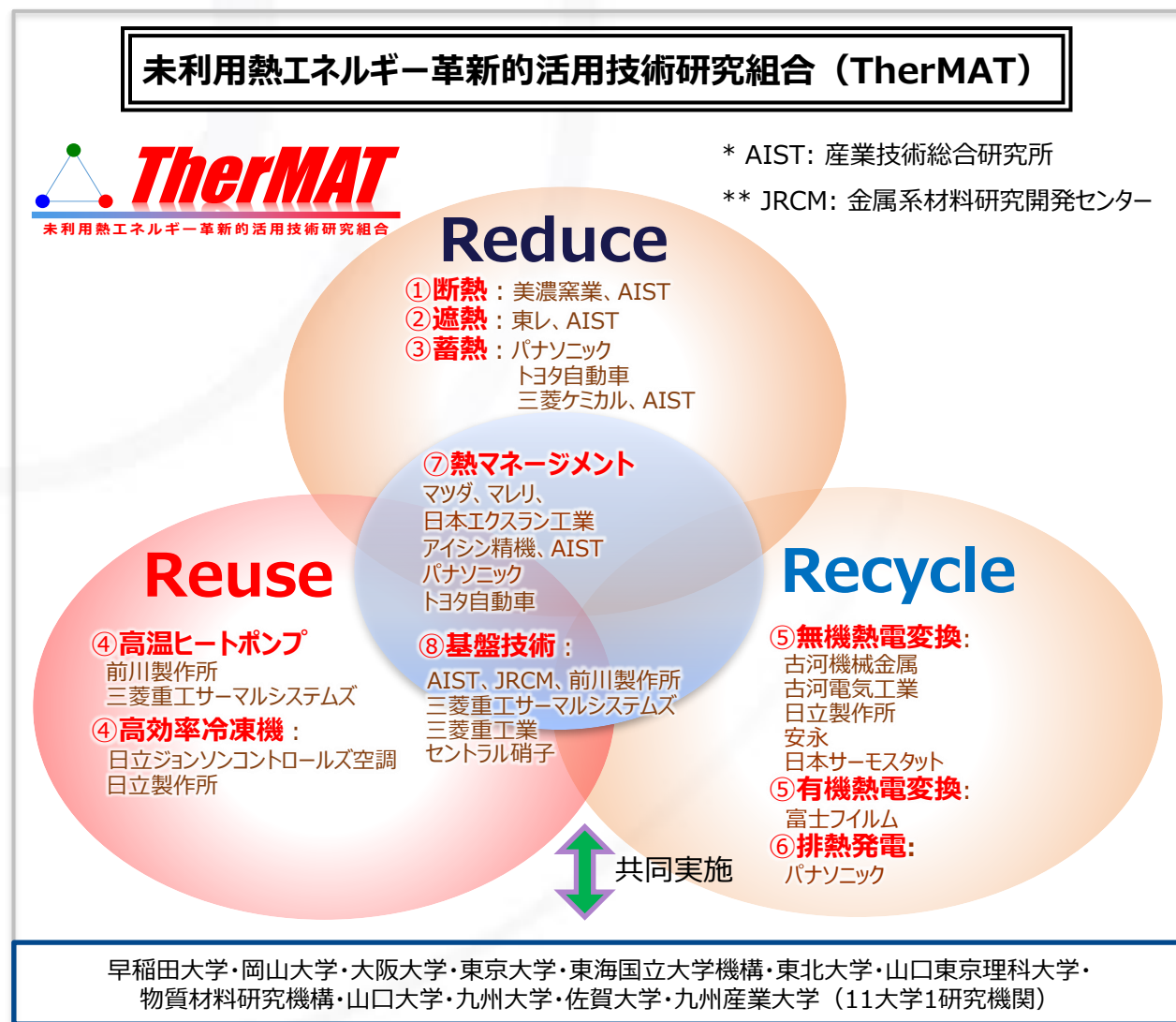
例2：熱電変換材料の開発 (ハイリスク・連携必要)

200～600℃で利用可能な熱電変換材料の研究は、長年研究が行われているものの実用化に至っていない

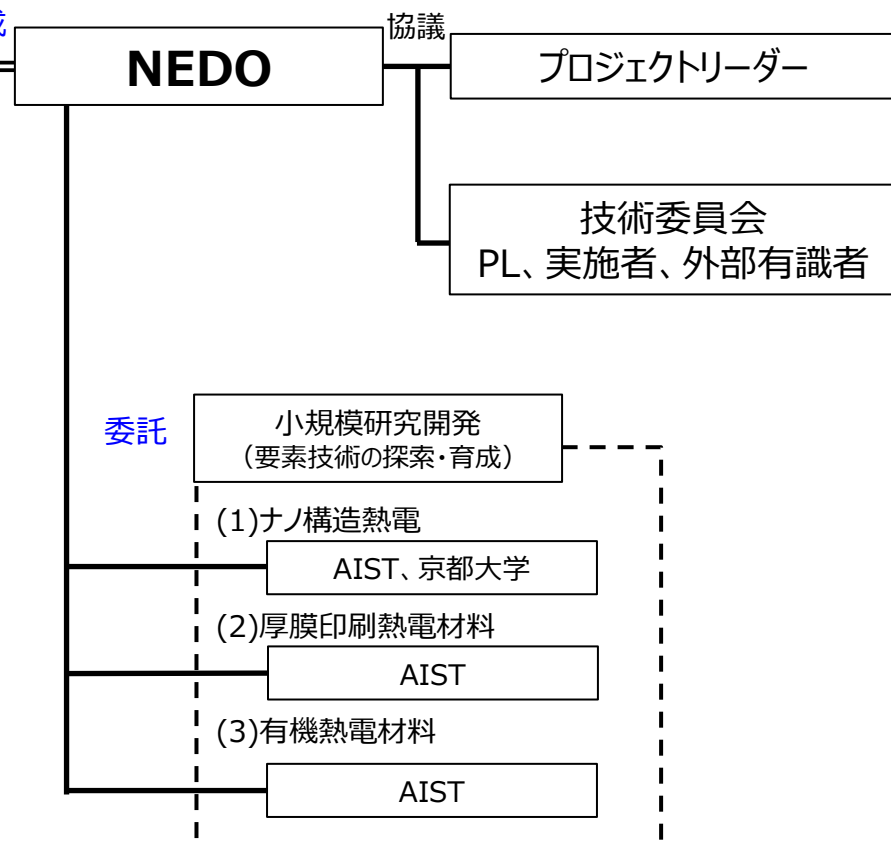
➡産学の英知を結集し、中長期の腰を据えた研究開発により材料探索フェーズから脱却

➡熱電材料性能の正しい評価と我が国の優位性を担保するため、性能評価技術の国際標準化を推進

実施体制（実施者間での連携）



委託・助成



実施体制（実施者間での連携）

成果を最大化するため、**分室間連携によるシナジー創出**を積極的に推進

分室間連携活動の内容（2021年度以降継続していた活動を抜粋）		企業（分室）・共同実施先
ヒートポンプ×基盤	工場の統合解析シミュレーション技術（産業用ヒートポンプ導入支援ツール）の開発と、シミュレータを用いた導入効果検証（2018年度～）	・ とりまとめ：JRCM（技術開発センター） ・ ツール開発：早稲田大学 齋藤研、前川製作所（守谷） ・ 検証：前川製作所（守谷）、三菱重工サーマルシステムズ（卒業）、日立ジョンソンコントロールズ空調（卒業）
熱電変換関係	クラスレート化合物を用いた熱電変換素子の設計値と実測値の比較による製造因子の評価	・ 評価：AIST（技術開発センター） ・ 高性能素子：古河電気工業（横浜）、山口大 小柳研、山口東京理科大 阿武研、九州大 宗藤研、物質・材料研究機構
熱マネ×熱電変換	ハイブリッド自動車の排気回収システムへ熱デバイスを搭載する際の実車測定を実施。測定した排熱データを基に、最適配置や燃費効果を熱シミュレーションモデルを用いて算出（2020年度～）	・ 評価：マレリ（佐野） ・ 熱電発電モジュール情報等提供：古河機械金属（つくば）、日本サーモスタット（卒業）
	車載用吸収冷凍機の吸収器内の熱流れを可視化するため、小規模研究開発スキームでの成果であるフレキシブルセンサを活用（2019年度～）	・ 吸収器・評価：アイシン精機（刈谷） ・ フレキシブルセンサ：AIST
熱マネ	クルマの熱流れ計測・熱流れの見える化技術の開発（2018年度～）	・ クルマ全体のモデル構築：マツダ（広島） ・ 計測：マレリ（佐野） ・ 計測結果等の利用：全分室

進捗管理

PL、TherMAT事務局、組合員と密にコミュニケーションをとり、プロジェクト全体・各テーマの進捗状況と研究開発の課題等を把握し、プロジェクトの今後の方向性等を議論・決定。

会議	内容	回数	PL	PM・SPM (NEDO)	TherMAT事務局	組合員	組合企業の 役員等
PL-NEDO- TherMAT進捗 会議	プロジェクト全体・各テーマの進捗と今後の方向性等について議論	月1回程度	○	○	○	—	—
組合員ヒアリング	進捗状況、研究開発の課題を把握し、実用化への方針、プロジェクトとしての相乗効果等について議論	随時	○	○	○	○	—
NEDO革新的熱 利用技術委員 会	熱の有効活用に資する技術開発推進のための外部有識者による助言・審議	年2～3回	○	○	○	議題に応じ 出席	—
TherMAT運営 委員会	運営上の基本的事項、重要事項を審議・決定	年5回程度	○	○	○	○	—
TherMAT定例 会	進捗確認、運営上の課題等について議論	週1回	○	—	○	—	—
TherMAT総会	事業報告、決算、役員の選挙等のため定款に基づき実施	年1回	○	○	○	○	○

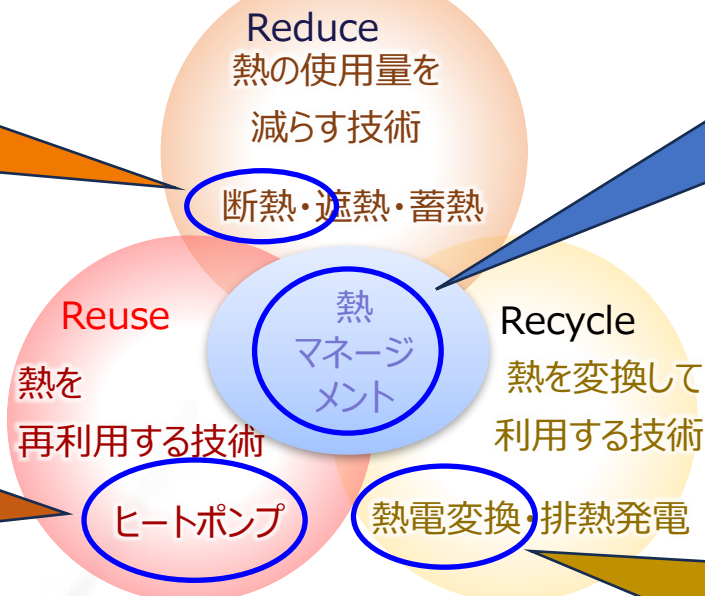
アウトプット(研究開発成果)のイメージ (2021,2022年度分)

再掲

断熱技術

高性能高温断熱材料、工業炉の高効率化を実現する熱関連部素材、これら部素材の有効活用技術

熱の3R



熱マネジメント

内燃機関やモーター／インバーター等における排熱の削減・有効利用技術の開発を図る高効率な省エネユニット等を開発

ヒートポンプ技術

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

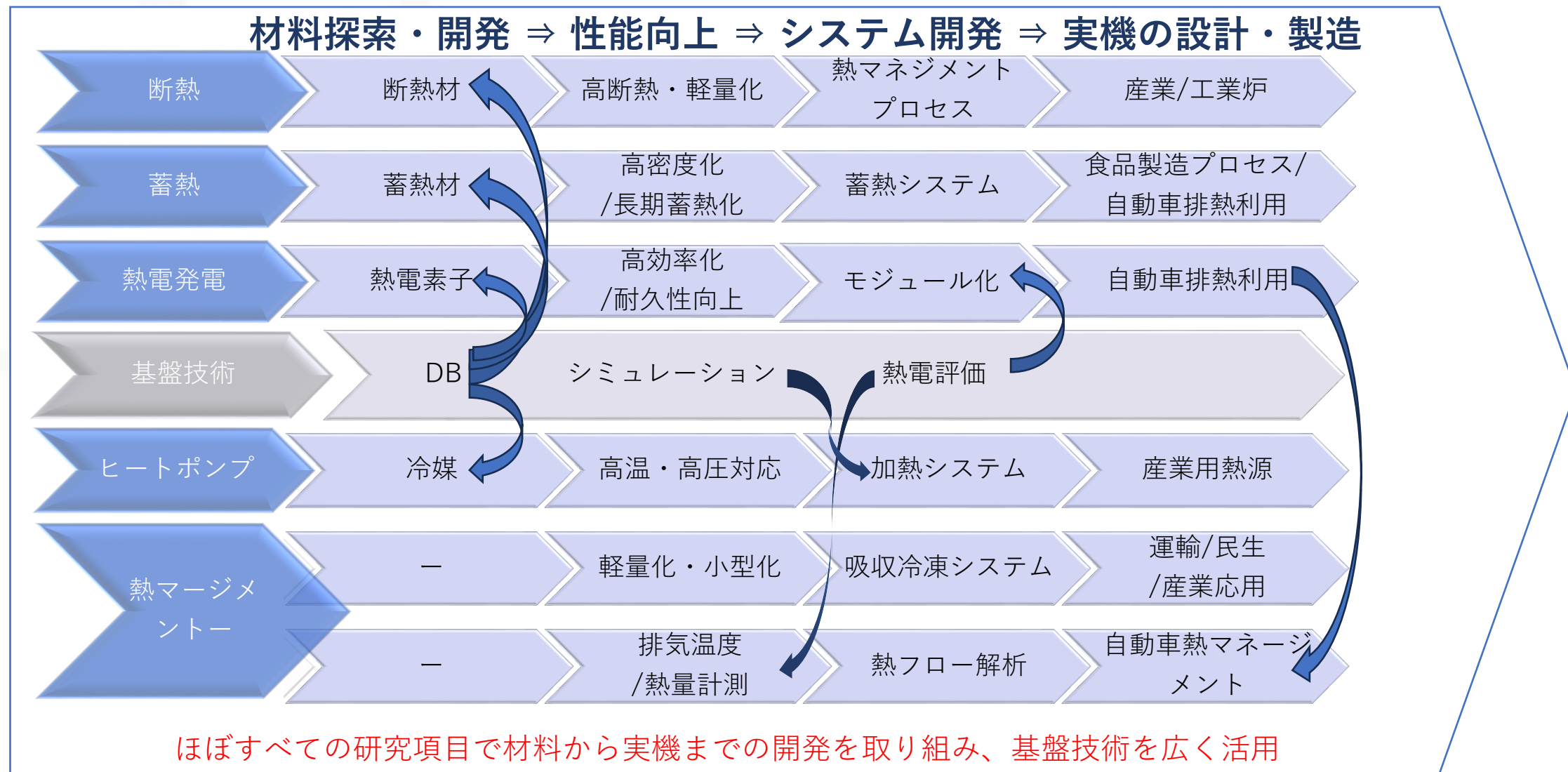
熱電変換材料・デバイス

熱電材料の高性能化、低コスト化や長寿命化に資する技術開発、熱電モジュールを開発、ユーザーにおけるデバイス評価

熱関連調査・基盤技術

熱関連材料については、多角的な材料情報のデータベースへの拡充、計算機シミュレーションを含めた熱関連材料の特性・性能評価技術の開発

目標達成に必要な主要要素技術



実績額とNEDO負担額

限られた予算で最大限の成果を出すため、研究進捗等に応じてテーマの選択と集中を図るとともに、研究開発を加速するために、政府予算に加え、開発促進財源も効果的に投入してプロジェクトを推進

◆実績額

(単位: 百万円)

		2015 年度	2016 年度	2017 年度	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度	合計
委託事業	総事業費	1,920	1,720	917	603	630	689	561	120	7,161
助成事業	総事業費	—	—	—	70	67	86	37	253	513
	NEDO負担額	—	—	—	47	45	58	25	173	348
総額	総事業費	1,920	1,720	917	673	697	775	599	373	7,674
	NEDO負担額	1,920	1,720	917	650	675	747	586	293	7,508
研究項目数		25	30	29	25	21	20	14	10	

〔 委託事業は100%、助成事業は大学・国研は100%、その他は2/3
2013～2014年度経済産業省実施分は3,460百万円 〕

◆受益者負担の考え方

〔 実用化研究段階となった研究項目については、委託事業から助成事業にフェーズを移行
事業化研究段階となった研究項目については、各事業者の自社開発に移行 〕

進捗管理: 中間評価(2020年度)結果への対応

主な指摘事項		対応
1	投じた研究開発費に対して相応の成果が得られたかどうか、個々のテーマ終了後のフォローをしっかりとやって戴きたい。 実用化に向け 、システムとして目標とする性能を達成するための取り組みとして、今まで以上に 研究全体の進捗を促すコーディネーター役 を期待する。	個別テーマごとの実用化・事業化戦略と進捗を照らし合わせ、 一部前倒し により 2022年度は委託事業から助成事業に フェーズを移行するものや、 各事業者での実施 に移行する等、 早期実用化 を目指した。
2	実用化の担い手やユーザーに向けて 成果を普及させるための取組 をさらに進めることが望ましい。 市場ニーズ から出て来るスペックへの対応が望まれる。	研究の進捗による成果創出とPR活動により、 問い合わせ・引き合い などにより、多くの市場ニーズが事業者に集まる状況が作られ、 製品化等の対応 がなされている。
3	開発技術等の導入に対する意欲が湧くよう、ユーザーへの PR・情報発信 や、政策や助成金など 効果的な後押し が望まれる。	PR活動 として、成果報告会の開催、ENEXに出展、YouTube (NEDOChannel) に動画掲載、NEDO広報誌Focus NEDOの特集、学会講演などを 積極的に行った 。

進捗管理：動向・情勢変化への対応

動向の把握

・パリ協定の採択以降、2050年までの温室効果ガスの大幅な排出削減に向けて野心的な取り組みをリードする欧州を対象として、熱利用技術に関する最新技術動向調査を実施。

欧州各国における情勢と、我が国の未利用熱活用技術に対する関心について、国際会議を通じて収集。

- ・日独産業排熱利用専門家ワークショップ・排熱利用プロジェクト（2023年2月）
日独エネルギー環境フォーラム主催、日独の産官学による産業排熱利用に関する政策・革新技术・コンセプト・事例の情報交換および協業・ビジネス機会の特定と協力プロジェクトの開始を目的としたワークショップ



（出典：ECOSウェブサイト）

情勢変化への対応

- ・自動車産業における急激な電化の普及を受け、熱流れの計測や評価などについて、対象領域、点数や項目を追加。電動駆動車への対応および評価車両を追加。
- ・車両以外の用途について市場動向調査を行い、新たな用途への実用化も検討。

計測解析技術を用いてハイブリッド車等の熱流れの現象を解明 ⇒ 高速かつ高精度な熱流れモデルを構築

駆動方式の異なる電動車の各部温度・流量等を計測 ⇒ 熱流特性を把握することにより、プラグインハイブリッド、マイルドハイブリッド等それぞれにおける排気の回収可能な熱量を調査

電動車や車両以外の市場動向調査を再度実施 ⇒ 車載向け技術開発を活かし、小型加熱装置の排熱利用などの定置用途への実用化も検討

進捗管理：開発促進財源投入実績(2021年度以降)

研究の進捗を考慮し、2022年度計画を2021年度に一部前倒し、委託研究から助成研究への移行など、**プロジェクト全体として財源投入を見直した**。
継続して委託研究を実施してる研究項目には、下記の**2022年度加速予算を配賦**し、アウトプットの充実を図った。

件名	年度	金額 (百万円)	目的	成果・効果
熱関連材料データベースのアプリケーションプログラム作成	2022年度	6. 4	オンライン公開版と同時にローカル環境で動作するアプリケーションプログラムも作成し、希望者に無償配布することで、プロジェクト終了後も継続して PropertiesDB Web を 利用してもらえる環境 を事前に用意しておくため。	40件以上の配布希望があり、未利用熱エネルギー活用技術研究開発における、基盤技術として活用される見通しを得た
熱電特性評価装置の増強（四重電極）および標準化のための経費	2022年度	2. 3 (増加分)	サンプル形状の制限が無くかつ異方性材料の異方向特性を同時に評価できる装置を構築するため 規格提案書、各国との対応に関して専門家の助言を得て、適切に対応するため	測定の安定化とデータ取得の加速化の両立ができ、 各種熱電特性の評価結果を提供できる基盤 が得られた 熱電モジュールの計測法の国際規格が、より確実及び迅速に策定される見込みが得られた
工場エネルギーの実地調査対象数を増加	2022年度	4. 0 (増加分)	産業用ヒートポンプ適用のモデルケース検討事例が拡充されデータの信頼性を高めるため	10需要家の工場のエネルギーデータを取得することにより、今後の普及促進のための解析事例を示し、 産業用ヒートポンプ適用ポテンシャル を業種・工程別を網羅的に整理できた

1. 意義・アウトカム(社会実装)達成までの道筋

(※)本事業の位置づけ・意義
(1)アウトカム達成までの道筋
(2)知的財産・標準化戦略

2. 目標及び達成状況(概要)

(1)アウトカム目標と達成見込み
(2)アウトプット目標と達成状況

3. マネジメント

(1)実施体制
(2)研究開発計画

4. 研究開発項目ごとの成果概要

研究開発項目ごとの成果：断熱技術

■ 出口イメージ

<現状>

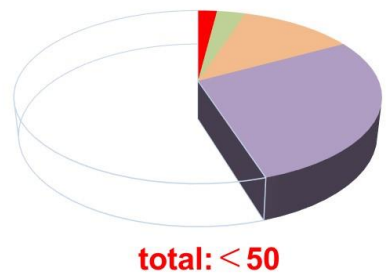
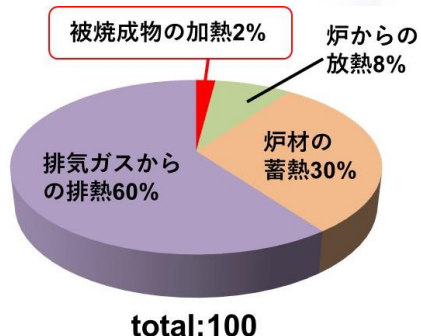
窯業/土石分野向け産業工業炉では多量の熱が廃棄されている。



<目標>

高性能ファイバーレス断熱材料と周辺技術の開発によって産業/工業炉の排熱料を50%以上削減。

目標：排熱削減率50%以上



例：一般的なバッチ式セラミック焼成炉のエネルギー収支

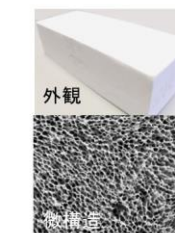
■ 技術課題（ブレイクスルーポイント）

○1,500℃以上の高温域で使用可能で、かつ高強度と低熱伝導率を両立したファイバーレス断熱材料の開発
○断熱材料の大型化技術の開発と大量生産手法の確立
○排出エネルギーを回収・再利用するための各開発部材を用いた効率的なシステムの開発

[3]耐高温高効率蓄熱放熱システムの開発(高効率バーナー)
2017年度で基本技術確立(テーマ終了)



[1]産業/工業炉への熱マネジメントシステムの研究開発
2017年度で基本技術確立(テーマ終了)



[2]高強度高断熱性多孔質セラミックスの開発

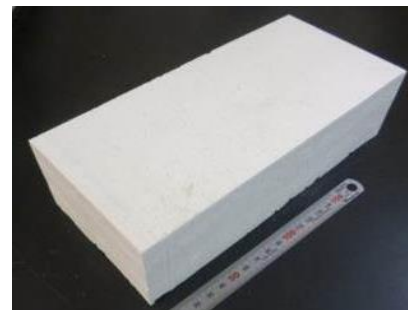


[5] 高効率産業/工業炉における検証
目標:排熱削減率50%以上

[4] 高効率排気ガス熱回収システムの開発(熱交換器)
2017年度で基本技術確立(テーマ終了)

■ これまでの主な成果

- ・ゲル化凍結法により、最終目標である耐熱性1,500℃、圧縮強度20MPa、熱伝導率0.2W/(m・K)を有する断熱材の開発に成功。
- ・開発した断熱材等を実装した検証炉での加熱テストの結果、当社従来炉と比較して、燃料使用量を最大70%削減可能であることを実証。



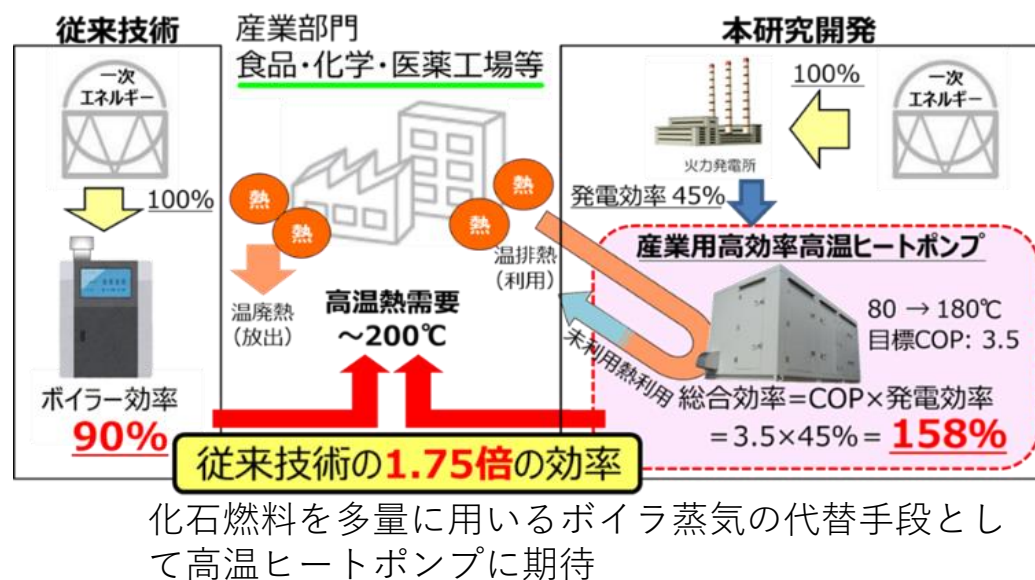
開発した高性能断熱材



作製した検証炉外観

研究開発項目ごとの成果:ヒートポンプ技術

■ 出口イメージ



■ 技術課題 (ブレークスルーポイント)

150℃以上の高温需要に対応し、現行の燃焼式（ボイラ）に対抗できるヒートポンプは開発されていない。

～ヒートポンプの原理を応用し、産業分野の排熱を利用して高温（200℃）の出力が可能なヒートポンプを開発する～

- 課題① 冷媒がない（高温・高圧対応&環境性能良好）
- 課題② 圧縮機がない（高温・高圧対応）
- 課題③ 熱交換器がない（高温・高圧・大温度差対応）
- 課題④ 熱ロスが多い（断熱対策）

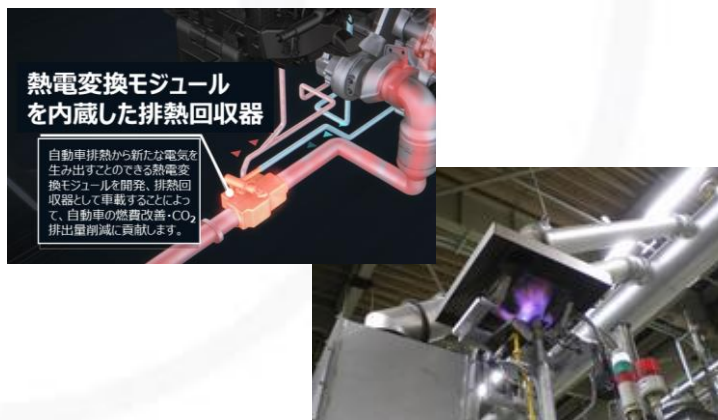
➡ これら課題を解決するヒートポンプを開発

■ これまでの主な成果

- ・ フロン系低GWP冷媒を使用した最高温度200℃（被加熱媒体80℃→180℃加熱）が供給可能なヒートポンプ試作機的设计・製作・試験を完了。
- ・ 圧縮機2台連結運転での定格回転数運転を確認した。
- ・ 実測値から高い解析精度を確認。最終目標：COP3.5が達成できる見通しが得られた。
- ・ 研究開発項目⑧と連携し、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実施。

研究開発項目ごとの成果：熱電発電技術

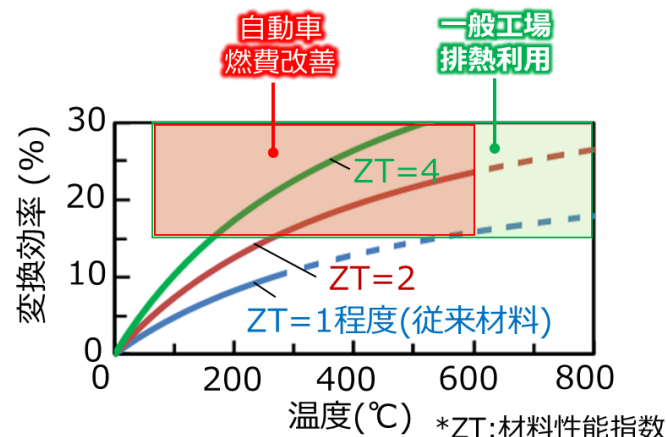
■ 出口イメージ



自動車用・工場用熱電発電

■ 技術課題（ブレイクスルーポイント）

熱電変換材料に求められる性能
(例：温度帯・変換効率に対する材料性能指数ZT)



従来材料：

- ・150℃程度未満の低温でしか使えない
- ・材料性能が低い（材料性能指数：ZT=1程度、変換効率： $\eta=10\%$ 未満、出力密度：1.0W/cm²未満）
- ・レアメタルを使用するなど経済性に課題

- ・熱電変換材料、モジュールの耐久性の向上
- ・熱電変換材料の性能向上
- ・新規材料を用いた熱電変換モジュール化技術の開発
- ・熱電変換モジュールの変換効率向上
- ・熱電変換のコスト削減

■ これまでの主な成果

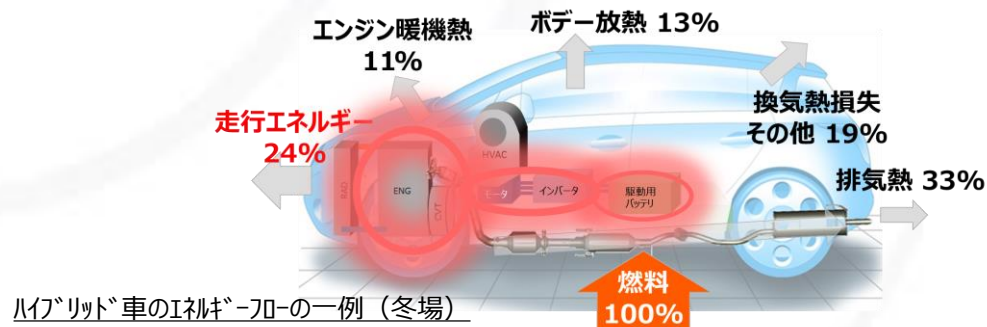
- ・**スクッテルライト系**：熱電材料技術、熱電モジュール技術を開発し、**熱電モジュールの変換効率9%、出力密度2W/cm²、耐熱性600℃、耐久性10,000h以上**を達成した。熱電発電システム技術を開発し、**出力200Wの熱電発電ユニット**の試作に成功した。
- ・**クラスレート化合物**：多接合型熱電モジュールを開発試作。接合抵抗、輻射熱を低減するモジュール構造と素子の高性能化により、**変換効率15%の見通しを得た**。
- ・**シリサイド系**：①**出力密度1.24W/cm²**を達成した9対シリサイドモジュールを用いて、**5kW～1MW規模のエンジン排熱からの発電実証試験**を実施。実測データから**エンジン発電出力の5%以上を実現する仕様**を策定した。
②**発電出力密度1.55W/cm²**を達成（2素子モジュール、 $\Delta T=580^\circ\text{C}$ ）。発電素子材料の**耐久性が3,000時間以上**であることを確認。**早期実用化検討対象としてバイオマスボイラーへの展開を考案し、温度環境測定データよりシリサイド系素子の適用温度を得た**。（2020年度末に実証試験を実施）

研究開発項目ごとの成果：熱マネジメント技術

■ 出口イメージ

<運輸>排気熱等を削減（湿度交換）・回収して暖機や暖房等に活用（蓄熱・熱電変換・熱輸送）することで、**冬場の燃費を約1割向上**

<産業>断熱・蓄熱等の要素技術やシミュレーション技術を組み合わせ、産業熱利用プロセスの省エネを実現



■ 技術課題（ブレークスルーポイント）

熱の流れの見える化

➡ 熱流れの計測解析技術の開発とモデル構築

排熱を利用し冷熱・電力等を生成

➡ 吸収冷凍システム、蓄熱・熱電変換利用システム等

車両熱計測技術の開発

➡ 形式違いの電気駆動車の熱エネルギーフローを推計できるシミュレーションモデルの構築

電動車の熱量調査

➡ 駆動方式違いによる、熱エネルギーフローの把握

■ これまでの主な成果

- ・**吸収冷凍システム**：塗布構造吸収器を採用した車載向け小型吸収冷凍機を開発し、商用車への搭載評価を実施。車速により変化する**排熱を蓄熱するシステムを開発し、冷房出力を安定化させて2.8kW以上を達成。**
- ・**熱の流れの見える化**：本プロジェクトで構築した計測技術を用いて、**xEVの熱流れの現象を解明。それを元に伝熱の3形態を考慮する高速（1 Hr/仕様レベル）かつ高精度な1次元の熱流れモデルを構築した。**
- ・**車両熱計測技術の開発**：蓄積した熱エネルギーフローと熱電変換デバイスの実機評価を基に、**排熱活用デバイスの効果（燃費効果等）を算出できるシミュレーションモデルの構築を行なった**
- ・**電動車の熱量調査**：シリーズパラレル式HEV、シリーズ式HEVおよびプラグインHEV、マイルドHEVの熱計測結果から、各車両の消費エネルギーを比較を実施し、エネルギーフローを把握。それを基に、**HEVの排気回収可能熱量は車両全体の消費エネルギーの約10%あり、積極的に利活用することで車両の省エネルギー化が可能であることを明らかにした。**

研究開発項目ごとの成果：熱マネジメント技術（蓄熱技術）

■ 出口イメージ

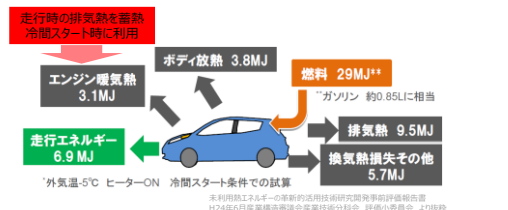
＜産業分野＞ [1] 高密度蓄熱システム（低温用）の開発

食品製造プロセスなどにおいて、利用温度に近い温度で冷熱を蓄えることで『省エネ』



＜運輸分野＞ [3] 長期蓄熱システムの開発

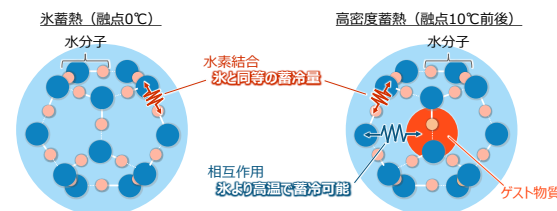
内燃機関を有する自動車において、走行時に出ていた排熱を使用することで『燃費向上』



■ 技術課題（ブレイクスルーポイント）

- ・単位重量、体積当りの蓄熱量が高い

『高密度蓄熱材料』の開発 （従来材料比2倍）



- ・断熱材なしで長期間蓄熱が保持可能な

『長期蓄熱材料』の開発 （24h過冷却保持）

注) 過冷却：液体の状態のまま融点以下の温度まで冷却される状態

■ これまでの主な成果

[1] 高密度蓄熱システム（低温用）の開発

- ・食品製造プロセスへの適用を想定した模擬システム（1/500スケール）を構築
 - ・上記模擬システムにおいて、要求仕様を満たすことを実証し、省エネ効果△30%（氷蓄熱比）を明確化
- ＜要求仕様＞ ①過冷却度 2K以下、②蓄冷密度 0.12MJ/L以上、③蓄放冷速度 6W/L以上

[3] 長期蓄熱システムの開発

- ・車載を想定した蓄熱モジュール（1/1スケール）を用いて模擬システムを構築
 - ・上記模擬システムにおいて、要求仕様を満たすことを実証し、燃費向上効果+0.2%/L（排熱未利用時比）を明確化
- ＜要求仕様＞ ①過冷却保持時間 24h以上、②過冷却解除までの時間 30s以下、③蓄熱密度 0.1MJ/L以上、④蓄放冷速度 0.2kW/L以上

研究開発項目ごとの成果： 排熱実態調査、計算シミュレーション、データベース構築、性能評価基盤技術

■ 出口イメージ



新規材料開発の加速、排熱利用機器・システム設計、産業化に貢献

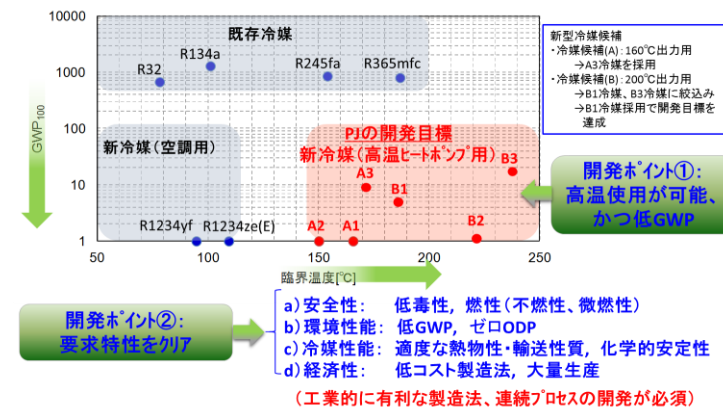
優れた新規材料、
機器開発を加速

ヒートポンプ技術等の
導入効果の見える化

熱マネジメント材料の国
際的な産業化と標準化

■ 技術課題（ブレイクスルーポイント）

- ・排熱の詳細な実態調査による熱マネジメント技術の導入シナリオ検討
- ・プロジェクトの横串的役割として、材料・デバイスの性能評価による各企業の研究開発・実用化支援
- ・計算シミュレーション、材料データベース構築による基礎データ整備と技術普及への貢献



高温熱供給ヒートポンプに適した低GWP冷媒候補の
開発と物性情報の構築の必要性

■ これまでの主な成果

- ・15業種の工場設備の排熱実態調査報告書を公表
- ・ヒートポンプ導入効果が見える化できる「産業用ヒートポンプシミュレーター」を開発
- ・新型冷媒候補の標準データベースへの登録に必要なGWP、燃焼性、熱安定性、安全性等のデータを取得
- ・多試料同時熱電評価装置、異方性を考慮した熱電計測法の開発
- ・蓄熱材料データの収集とデータベースへの収録、糖アルコールを対象とした蓄熱量・転移温度のシミュレーションを実施

参考資料 1 分科会議事録及び書面による質疑応答

研究評価委員会
「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」(終了時評価) 分科会
議事録及び書面による質疑応答

日 時：2024 年 1 月 10 日（水）10：00～18：10

場 所：ステーションコンファレンス川崎（オンラインあり）

出席者（敬称略、順不同）

＜分科会委員＞

分科会長	廣田 真史	愛知工業大学 工学部 機械学科 教授
分科会長代理	鹿園 直毅	東京大学 生産技術研究所 教授
委員	秋山 俊一	一般財団法人省エネルギーセンター 業務統括役 技監(兼)省エネ技術本部長
委員	齋川 路之	一般財団法人電力中央研究所 グリッドイノベーション研究本部 研究アドバイザー
委員	首藤 登志夫	東京都立大学 都市環境科学研究科 環境応用化学域 教授
委員	竹内 敬治	株式会社 NTT データ経営研究所 社会・環境戦略コンサルティングユニット シニアマネージャー
委員	湯浅 裕美	九州大学 大学院システム情報科学研究院 情報エレクトロニクス部門 教授

＜推進部署＞

後藤 直彦(PMgr 代理)	NEDO 省エネルギー部 主査
木下 宏一	NEDO 省エネルギー部 統括主幹
野田 佳保子	NEDO 省エネルギー部 主任
藤田 陽一	NEDO 省エネルギー部 専門調査員
笠原 宏併	NEDO 省エネルギー部 主任
米内 敏文	NEDO 省エネルギー部 主査

<実施者※メインテーブル着席者のみ>

小原 春彦(PL)	国立研究開発法人産業技術総合研究所 上級執行役員 エネルギー・環境領域 領域長
宇都 浩三	TherMAT（未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合）専務理事
箕浦 忠行	一般財団法人金属系材料研究開発センター TherMAT（未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合）非鉄材料研究部長 /事務局長
町田 明登	株式会社前川製作所 技術企画本部 執行役員
工藤 瑞生	株式会社前川製作所 技術企画本部 技術研究所 開発推進グループ 主席研究員
渕上 英紀	株式会社前川製作所 技術企画本部 技術研究所 熱システム技術グループ 専任研究員
稲葉 健造	株式会社アイシン グループ技術開発本部 先進開発部 第1開発室 主任
田代 宗大	株式会社アイシン グループ技術開発本部 先進開発部 第1開発室 主幹
土田 建一	株式会社アイシン グループ技術開発本部 先進開発部 第3開発室 室長
松田 州央	株式会社アイシン CN推進センター CN技術開発部 CNシステム開発室 室長
山本 寿英	マツダ株式会社 技術研究所 所長
種平 貴文	マツダ株式会社 技術研究所 革新研究創成部門 アシスタントマネージャー
新濱 誠	マツダ株式会社 技術研究所 次世代人間中心システム研究部門 車両システム研究 エキスパートエンジニア
久永 徹	マレリ株式会社 グリーン・テクノロジー・ソリューション製品開発部 グリーン・テクノロジー・システム開発センター グリーン・テクノロジー・システム事業本部 主管
田中 英郎	マレリ株式会社 実験研究センター管理部 /TTT
鈴木 基啓	パナソニック株式会社 エレクトリックワークス社 ソリューション開発本部 電材&エネルギー開発センター 総括主幹技師
田中 洋介	美濃窯業(株)プラント部 技術課 アシスタントマネージャー
福島 学	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 マルチマテリアル研究部門 セラミック組織制御グループ 研究グループ長
石田 豊和	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 材料・化学領域 機能材料 コンピューショナルデザイン研究センター 主任研究員

<オブザーバー>

遠藤 竜司	経済産業省 資源エネルギー庁省エネルギー・新エネルギー部 省エネルギー課 課長補佐
中村 千晴	経済産業省 資源エネルギー庁省エネルギー・新エネルギー部 省エネルギー課 担当係

<評価事務局>

三代川 洋一郎	NEDO 評価部 部長
山本 佳子	NEDO 評価部 主幹
佐倉 浩平	NEDO 評価部 専門調査員
西尾 昌二	NEDO 評価部 主査

議事次第

(公開セッション)

1. 開会、資料の確認
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法について
5. プロジェクトの概要説明
 - 5.1 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋
 - 5.2 目標及び達成状況
 - 5.3 マネジメント
 - 5.4 研究開発項目ごとの成果
 - 5.5 質疑応答

(非公開セッション)

6. プロジェクトの詳細説明
 - 6.1 産業用高効率高温ヒートポンプの開発、統合解析シミュレーション技術の構築
 - 6.2 熱マネジメントの研究開発
 - 6.2.1 車両用小型吸収冷凍機の研究開発
 - 6.2.2 熱マネジメントの研究開発
 - 6.2.3 電動車の熱量調査・次世代エネルギーマネジメントデバイスの研究開発
 - 6.2.4 蓄熱技術の研究開発
 - 6.3 断熱技術の研究開発
 - 6.4 熱電変換材料・デバイス高性能高信頼化技術開発
 - 6.5 計算科学およびデータベースの研究開発
7. 全体を通しての質疑

(公開セッション)

8. まとめ・講評
9. 今後の予定
10. 閉会

議事内容

(公開セッション)

1. 開会、資料の確認

- ・開会宣言（評価事務局）
- ・配布資料確認（評価事務局）

2. 分科会の設置について

- ・研究評価委員会分科会の設置について、資料1に基づき事務局より説明。
- ・出席者の紹介（評価委員、評価事務局、推進部署）

【廣田分科会長】 分科会長を仰せつかりました愛知工業大学の廣田です。専門は機械工学であり、特に熱工学を主としております。今日は一日どうぞよろしくお願いいたします。

【鹿園分科会長代理】 東大生研の鹿園です。専門は、冷凍サイクルの要素技術や SOFC 固体酸化物形燃料電池となります。よろしくお願いいたします。

【秋山委員】 省エネルギーセンターの秋山です。もともと川崎にある高炉の製鉄所で省エネ等のエネルギー管理をやっておりました。10 年前から省エネセンターのほうで中小企業を中心とした省エネ支援の仕事をしております。本日はプロジェクトの成果を拝聴できることを楽しみにしております。よろしくお願いいたします。

【齋川委員】 電中研の齋川です。私も、廣田分科会長や鹿園会長代理と同じく、機械の熱工学が専門でヒートポンプの研究開発をやっております。今回のプロジェクトにもヒートポンプがございますので、深くお話を伺えればと思っております。よろしくお願いいたします。

【首藤委員】 都立大の首藤です。私は応用化学の学科におりますが、出身は機械の熱工学、エネルギー利用、熱機関係、燃焼になります。現在の専門は、燃料電池やエンジン等の自動車の動力システム全般となります。どうぞよろしくお願いいたします。

【竹内委員】 NTT データ経営研究所の竹内です。2010 年にエネルギーハーベスティングコンソーシアムを設立し、その運営を 14 年間してきております。また、現在は熱電発電をはじめとするエネルギーハーベスティング技術の事業化支援を行っております。本日はよろしくお願いいたします。

【湯浅委員】 九州大学の湯浅です。専門は磁性体を使った材料デバイスの研究開発となります。また、その一つとして熱電材料の開発をやっております、その関係でこちらに参加しております。本日の発表を非常に楽しみにしておりますので、どうぞよろしくお願いいたします。

3. 分科会の公開について

評価事務局より資料 2 及び 3 に基づき説明し、議題 6.「プロジェクトの詳細説明」及び議題 7.「全体を通しての質疑」を非公開とした。

4. 評価の実施方法について

評価の手順を評価事務局より資料 4-1～4-5 に基づき説明した。

5. プロジェクトの概要説明

推進部署より資料5に基づき説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

【廣田分科会長】 ありがとうございました。

それでは、ご意見、ご質問等を受け付けます。鹿園会長代理、お願いします。

【鹿園分科会長代理】 本プロジェクトは、経産省時代から非常に長きにわたる大きな取組だと理解しております。壮大なプロジェクトを取りまとめいただき、そして推進して下さった皆様にまず敬意を表

したいと思います。また、まさにこの絵にあるように多くが助成に移り、あるいは自社開発に移っているといったところですが、ユーザーと本当の普及に向けたやり取りが今後とも重要と感じます。ユーザーにおいても、電化や燃料転換といった将来の不確実性の中、まだ決断し切れていない時期でもありますし、この苦しい時期を何とか乗り切っていただき、今のうちにテクノロジーレディーの形にさせていただく。そして実際に投資をするときに間に合うように引き続き技術を磨いてほしいと切に願います。感想となってしまいましたが、今後とも頑張っていたきたいという思いであります。以上です。

【後藤 PMgr 代理】 ありがとうございます。今おっしゃっていただいたように、そもそも熱を利用できることが世間にあまり知られていない状況下で今回開発をし、いろいろなものの装置としてこういうものができるといったところは非常に企業の刺激になっており、問合せ等も様々あるところです。また、脱炭素、CO₂ 削減という価値と新しい装置を入れることによる価値との差がまだまだ事業者は判断できないというところで、なかなか導入は現段階では難しいところもあると考えます。そこも含め、今後事業者様には開発を進めていただいて、日本だけでなく世界に誇れる脱炭素技術に発展したのなら非常にうれしい限りです。

【鹿園分科会長代理】 ありがとうございました。

【廣田分科会長】 それでは、ほかのいかがでしょうか。秋山委員、お願いします。

【秋山委員】 「未利用熱の有効利用」という目的の下、いろいろなテーマをうまくマネジメントしていただいて、NEDO に移られてからも 8 年間という長いテーマ期間でしたが、非常に成果を挙げられたものと理解しております。本当にありがとうございました。今、鹿園会長代理からもお話があったように、最初は未利用熱と省エネから入ったものと思います。そうした中、ここ数年で非常に情勢が変わってきて CN も加わりました。そういった意味で、今回研究開発されたテーマが今後 2030 年、そして 2050 年の CN に向けての要素技術開発の種として非常に期待されるものと考えます。

私は、常に事業者と接しておりますが、どうしても様々 CN をしなくてはいけないといったところで「まずは省エネだ」というお話をいたします。しかし、省エネだけではカーボンニュートラルといった意味では限界があります。そういった意味では、今後カーボンニュートラルにするためには脱炭素をどうするのか。そうすると、再エネの電気という話になるのですが、その場合に、熱の中でまだまだ未利用熱がある。それをまず有効に活用してから、その上でどうしても使わざるを得ないものを電化する。又は非化石エネルギーの熱にしていくといった話をしております。今、事業者様のほうでもいろいろと模索状態だと思いますが、情報発信として、今後開発されたものが省エネや CN に展開していくことを地道に伝えていただければと思います。

また、第 6 次エネルギー基本計画であるとか、昨年 4 月に省エネ法が改正されたところでは、例えば排熱回収の対象としてバイオマスボイラーが対象になっております。従来で言えば、バイオマスボイラーは省エネ法の対象外でしたので、回収してもキロリッター換算ができなかったのですが、これから非化石エネルギーも省エネ法の対象になっていくといったところでは、そういったものの熱も含めて回収をしていけば、よりキロリッター効果が上がっていくと思いますので、そのあたりもお願いできればと思います。以上です。

【後藤 PMgr 代理】 ありがとうございます。最初に NEDO のマネジメントに関してお言葉をいただきましたが、実際のところは TherMAT 様にこちらの事業を受けていただきまして、非常に数多い事業者を取りまとめていただいたところが大変大きいところであり、TherMAT 様には感謝しております。また、研究成果も種のところから事業化といったところで確かにいろいろなものがございます。一方、事業化されたものの導入が思うように進んでいないといったところもありますから、今後はそうしたところの PR も含めてやっていきたいと思います。実は、さきの 12 月に省エネルギーセンター様の

ウェブセミナーにおいて、私がこちらの成果報告及び PR をさせていただいたところでもあります。今後ともそういう機会がありましたら、積極的にやっていきたいと思います。

【秋山委員】 ありがとうございました。

【廣田分科会長】 それでは、ほかのいかがでしょうか。竹内委員、お願いいたします。

【竹内委員】 スライドで示していただいているように、今回のプロジェクトは非常にスコープが広く、かつ足掛け 10 年という大規模なプロジェクトとなります。それを完結されたということで、関係者の皆様、本当にお疲れさまでございました。その上で、1 点だけ伺えれば幸いです。今後のこういった国プロの進め方、在り方にも関係すると考えると、今回の足掛け 10 年というプロジェクトにおいて、外部環境も目まぐるしく変われば、実施者企業の事業方針も変わる。人事異動もあるといったところで、その期間は長過ぎたか、短過ぎたか、ベストだったのかを NEDO 推進部及び PL からご感想としてお聞きできればと思います。

【後藤 PMgr 代理】 私は、関係してから浅いところですので、10 年間について適切に把握できていないかもしれませんが、内容によっては長くやらなくてはいけないものがありますが、例えば今回のヒートポンプは非常に難しいものですから、10 年というところで、ほかの事業者様と連携して研究を併せることも必要となります。ただ、目標を達成したものは、我々「早期に卒業」という言い方をしておりますが、先ほどの「世間環境は変わる」というところと、開発状況に合わせながら変えていく。それは中間評価でいろいろ指摘をいただいたところも反映をしつつということになります。また、確かに 10 年になりますと、昔の担当者がつかまらないであるとか大変な面もありますが、そこも NEDO の仕事であると考えます。中には、継続するというものもあり、物によって長いものもあれば短いものもあるといったところで、回答となっていないかもしれませんが、私はそう感じている次第です。

【小原 PL】 当初の経産省の委託事業から PL を担っている小原でございます。竹内委員から、大変重要なポイントをご指摘いただいたと思っております。まず、この期間においては、大きな環境変化が途中にございました。1 つは、先ほど秋山委員からもご指摘があったように、当初はパリ協定で温室効果ガスが 80% 減というところで走っていたものの、途中から完全に CN となりました。そういう意味では、省エネに対する期待がものすごく高まったところがございます。その一方、難しかった状況としては、当初、運用分野で特にハイブリッド自動車の燃費向上を念頭に置いていたのですが、急速に自動車分野の電化が進み、排熱が減っていきました。あるいは、そもそも排熱がないような状況になっているという点も外部環境としてあったところです。しかし、それに対して、今回のプロジェクトをただ 10 年間やらせていただいたというわけではありません。ここにお示ししているように、非常にダイナミックに参画企業の入替えも含め、NEDO でマネジメントをしていただいたと思っております。参加企業の担当者も変わりましたが、組合が常にあるということで継続性を維持していただいたと考えます。そうしたところで、「10 年間で長かったか、短かったか」という問いに結論を出すのは非常に難しいのですが、10 年は非常に長い期間でありましたが、こういったプロジェクトというのは一つあると考える次第です。先ほど最初に後藤様のほうから紹介のあったスーパーヒートポンプや当時のサンシャインプロジェクトで得られた成果というのは、日本のその後の例えばエコキュートであるとか、いろいろな実用化につながってございます。そういった意味で、このような長期的な視点のプロジェクトというのは必要だと感じます。またその一方、やはり時々刻々とダイナミックに変わっていく環境に対応するためには、ある程度、短期的・集中的なプロジェクトというものを並立して行っていくことが必要ではないかという感想を持ってございます。雑駁な意見となりますが、以上でございます。

【竹内委員】 ありがとうございました。

【廣田分科会長】 確かにここ数年での環境の変化は非常に大きく、かつコロナがあってというところで、なかなか顔を付き合わせて様々なディスカッションをすることもできない中、非常に苦しいところをう

まくマネジメントしていただいたのではないかという印象を持っております。こうした環境の変化は今後も続いていくといえますか、大きな波が来るのか、なかなか難しいとは思いますが、NEDOとしてはどのような感触をお持ちでしょうか。

【後藤 PMgr 代理】 脱炭素であるとか、そういったところで考えますと、あと残っているのは熱の利用になるので、そういう意味では今後とも非常にフォーカスされていくかと思います。ただ、残っているのは非常に難しい種類といったところでは、どれだけ活用されれば本当に脱炭素に貢献されるかというところがございます。それで解決するのか、しない場合には何か違うところになってしまうのか、そうしたところが一つポイントになるのではないかという感想を持っております。

【廣田分科会長】 ありがとうございます。そのほかいかがでしょうか。齋川委員、何かございますか。

【齋川委員】 質問となると細かい話になってしまうのでコメントになりますが、全体としてしっかり成果が出ているといったところで、今後の社会実装やアウトカム達成に向けてのフォローがすごく大事だと思います。プロジェクトが終わったから終わりということではなく、皆様重々承知だと思いますが、そのあたりをしっかりとやっていただきたく思います。実施者の皆様、10年間お疲れさまでございました。

【後藤 PMgr 代理】 ありがとうございます。後継のプロジェクトがない中、なかなか具体的なフォローは難しいところもありますが、先ほど申し上げた省エネ部の脱炭素プログラムというものがございます。そちらのほうに応募をいただいて、また開発が必要なところはそこで開発をしていく。それと併せて、PR 活動の機会があれば行っていき、未利用熱が使えることを広報してまいる所存です。また、それに付随しまして、今月末の ENEX において、未利用熱に係る出展は少ないものの展示させていただくことを予定しております。今後ともできる限りフォローをしていきたいと思っている次第です。

【廣田分科会長】 ありがとうございます。ほかいかがでしょうか。首藤委員、何かございますか。

【首藤委員】 特に質問はございませんが、こういった重要な課題を幅広く網羅されたものが、すばらしい体制の下、まとまった予算及び年数で遂行されたことは非常によかったと感じています。成果も非常によいものが出ていますし、例えば達成状況を拝見すると、熱電変換でコジェネの効率を 5% 上げたというのは、熱利用率のほうでも非常にブレイクスルーがあったように思います。そうした点では、ここにあるだけではなく、ほかにもアピールポイントが多くあると考えますので、積極的に成果を発信し、いろいろな方に認知していただいて広がっていけばよいと思います。以上です。

【後藤 PMgr 代理】 ありがとうございます。今コメントをいただいたように、今回の成果はこれだけでなく、いろいろ発展していくということは必要でありますし、そういうポテンシャルもある技術だと考えております。そういうところのフォローも含め、できる限りやっていく所存ですので、よろしくお願いいたします。

【廣田分科会長】 ありがとうございます。ほかいかがでしょうか。湯浅委員、何かございますか。

【湯浅委員】 私は、10 年間のプロジェクトのうち最後の 3 年ほど関わらせていただいておりますが、非常に成果が出てきたところで拝見しており、アウトプットの多さに驚いたところがございます。そして、今回も製品化までいった技術があるということで、技術がよくても売れないということがよくある中で、実際にちゃんと売った実績、どのように販路をつくっていったかというのは、他のプロジェクトに対するロールモデルになるのではないかと感じたところです。また、ヨーロッパで売れたということですが、技術によって売れやすい地域があると思うものの、何かそこにフォーカスし、いろいろと工夫をなされたと考えますので、ユニバーサルにアドバイスできることがあれば、この後のプロジェクトに共有していただけると非常によいと思います。

【後藤 PMgr 代理】 今のお話は、ジョンソンコントロールズ空調様の冷凍機の話だと思いますが、こちらは、海外ではヒートポンプ導入というものが今非常に積極的であり、特にロシアの燃料を依存しない

ことから電化となり、特に大きい物を入れるというプロジェクトが様々動いております。あちらは日本よりランニングコストを重視する、また新しい物を入れるというのは結構積極的ですし、スペースも多分あると思います。そういう点から海外は入っていきやすい状況でもあります。一方、少し技術開発と違うところで日本では導入のバリアになっているのではないかという点は、報告書等でも種々指摘されているものでございます。技術開発や販路というところではなかなか難しいところがあるのですが、どういうバリアがあるかというのは分かってきているので、その対策として、大きくなってしまっていますが、日本全体で解決していくようなところを進めないと、未利用熱のよい製品が出来ても入れていただけない、利点は分かるものの入れ難いという点もありますから、そちらは徐々に普及していくと、「では、ここでも入れよう」といった動きになると思いますので、そういう事例も含めて実績を積み重ねていくというのがこれから重要になっていくかと思っております。以上です。

【湯浅委員】 ありがとうございます。

【廣田分科会長】 ありがとうございます。それでは時間が参りましたので、以上で議題 5 を終了いたします。

(非公開セッション)

6. プロジェクトの詳細説明

省略

7. 全体を通しての質疑

省略

(公開セッション)

8. まとめ・講評

【湯浅委員】 九州大学の湯浅です。本日の中盤は、講義のため中座をさせていただきましたこと誠に申し訳ございませんでした。その上での講評となりますが、本日は貴重な成果を報告いただきましてどうもありがとうございました。10 年間の大きなプロジェクトにおいて、関係の皆様の達成感であるとか、次へのフィードバックといった大きな思いがあるのではないかと想像いたします。また、前回の中間評価が初めての参加となりましたが、そのときには各テーマの最終ゴールまでのタイムラインと、その時点での皆様の立ち位置が理解しにくかったという点が個人的にございました。しかし、今回はその懸念がない状態で報告資料を拝見したところです。そもそもの最終ゴールの設定が大きく異なるテーマをよく束ねられてマネジメントされていたことと理解いたしますし、そのことだけでもハードルの高いプロジェクトだったのではないかと感じたところです。一方、本日後半の議論においても、ここが起因となった指摘があったと思うところもございます。システム側と材料開発側はそもそもカルチャーが大きく違っており、トップダウンで設計どおり進めるシステムと、ボトムアップでの要素が大きく、時々ジャンプアップする材料側とではなかなか話がかみ合わないことが多く、共同でのづくりすることは難しい、こういった場で一律な評価をすることも大変難しいと感じています。現在、私の所属の部局には「システム」という言葉が入っているのですが、もともと私は材料屋であったということから、企業に在籍しているときにもこの難しさは常々感じていたところです。そうした観点で、このプロジェクトはそういったハードルを抱えつつも、個別のテーマで非常に卓越した成果を蓄積されてきたということで、非常に評価されるプロジェクトであったのではないかと思います。私からは以上です。

【廣田分科会長】 ありがとうございます。次に、竹内委員お願いいたします。

【竹内委員】 NTT データ経営研究所の竹内です。関係者の皆様、本日は大変お疲れさまでございました。詳細にご報告いただきまして、プロジェクトの成果をよく理解できました。このプロジェクトは非常に長期にわたり、かつスコープも非常に広いものであり、湯浅委員のおっしゃるようにマネジメントも大変難しかったものと思います。いろいろと具体的な成果が出てきて今後につながる道も多く見えているので、今後ともこの成果の事業化に向けて進んでいただけたら幸いです。また、冒頭には「このプロジェクトの10年は長過ぎたのか、短過ぎたのか、ベストだったのか」という点で伺いました。テーマによっては長かったり短かったりという回答をいただきましたが、一つ一つテーマとスコープが違うものを束ねるべきか、ばらばらにやるべきかを考えながら今回の発表をお聞きいたしました。そうしたところで、熱関係のプロジェクトを一つに束ね、関係者が集まって議論ができるといった連携の成果も出ているということで、やはり一つにまとまるということは非常に意味があるという理解に至っております。今後とも国プロには長期かつ大型のものもあると思いますので、今回のプロジェクトのよいところ、そして課題点を生かしていっていただければと思います。NEDOのGI基金等も活用すると熱関係のプロジェクトができると思いますので、ぜひそちらのほうもご検討いただければと思います。以上です。

【廣田分科会長】 ありがとうございます。次に、首藤委員お願いいたします。

【首藤委員】 都立大の首藤です。私はこのプロジェクトの最初から評価に関わらせていただいたのですが、10年間は短かったという思いもございます。実際にやられていた皆様にとっては苦労もあったかと思いますが、振り返ってみますと、中には達成度が非常に高く、早々に卒業されたテーマもございました。今回ご説明いただいた2021年度以降のテーマは、中でも課題が残っていて、やるべきことがあったということで、必ずしも全て完全によい結果というわけではないかもしれませんが、未利用熱といった非常に重要なテーマで網羅的に、かつ、これだけのテーマでやられたことはとても価値があると感じています。先日も別の委員会でご述べたのですが、日本を支えている大きなプロジェクトは大抵自動車を応用対象にすることが多いと思いますが、今日の話を聞いていても車に非常に使いやすい、燃費効率を上げやすいテーマもあれば、なかなかハードルが高いものもあるといった印象を改めて思った次第です。せっかくこういった予算を使ってやった成果ですので、車にこだわらずに使えるところは何でもよいので使って、費用対効果を高めて様々な場面で技術応用をしていただきたいと思います。本当に大変お疲れさまでございました。以上です。

【廣田分科会長】 ありがとうございます。次に、齋川委員お願いいたします。

【齋川委員】 電中研の齋川です。本日は熱に関連したプロジェクトとなりましたが、熱というのは全てのエネルギーの行き着く先と思っております。割と地味でなかなかプロジェクトとして目立たないといえますか、あまり関心を引かないものとも言えるのですが、そうしたところで未利用熱に焦点を当てられたプロジェクトですから、画期的な取組だったと私は思いますし、研究開発としての成果も目標を十分達成し、成果も出されている点を高く評価したいと思います。それから、今日は前回の中間評価以降の成果を詳しく聞きまして、それに関してもしっかりと成果が出ていたと感じておりますが、一方、成果は出ているものの、やはり社会実装に向けた今後の取組が非常に大事と考えます。これは実施者各社でやられることもあるでしょうし、NEDOプロでやっていただくこともあるでしょうし、いろいろなやり方でやっていかれながらも、それをぜひNEDOのほうでチェックしていただきたいと思います。最後に、今回は未利用熱でありましたが、私自身は未利用熱に限らず、熱利用全体において熱の質と量といった2つをしっかりと考えて理にかなった熱の使い方をする、そういうものを明示するようなプロジェクト展開を図ってほしいと思っております。以上です。

【廣田分科会長】 ありがとうございます。次に、秋山委員お願いいたします。

【秋山委員】 省エネルギーセンターの秋山です。本日は、プロジェクトの全体と各テーマに関してプロジェクトに関わられた皆様からお話を伺いし、苦労された点や重要性を改めて認識することができました。ありがとうございました。このプロジェクトは、冒頭の発表でもありましたように、2030年までの省エネの量として、基本計画の中でも期待されているテーマが多いかと思いますし、この8年間の成果が今後の実用化につながるものとして高く評価していきたいと考えております。あわせて、この8年間において省エネ法も改正され、評価軸が省エネだけではなく、非化石エネルギーへの転換であるとか、電気の需要の最適化といった3つになりました。また、テーマによっては、例えばバイオマスボイラーからの排熱回収であるとか、今日の話にもあったように、デマンドレスポンスへの対応といったことで実用化の対象がCNによって拡大するケースになるかと思います。やはり熱についてはCNの中でなかなか解決策がない中、今回のプロジェクトの貢献が引き続き期待されるのではないかと思います。基本的な開発や技術の実証はされたと捉えていますので、ぜひこれらの技術の活用に関してそれぞれの課題を解決していただきたいと思います。本日はどうもありがとうございました。

【廣田分科会長】 ありがとうございました。次に、鹿園会長代理をお願いいたします。

【鹿園分科会長代理】 東大生研の鹿園です。今日はどうもありがとうございました。私も立ち上げの頃から関わらせていただいておりますが、本当に昨今のCNやサーキュラーといったところで世の中が非常に変わってきている中では、これまでの業界や学会の縦割り、シーズとニーズ、サプライヤーとユーザーといったところの情報の分断において、もう一度根本的に見直さなければいけないと思っております。いろいろな仮説に基づいてトライをして評価するというのは一見無駄に見えるかもしれませんが、これをやっていかないといけないと思うとともに、そういう取組としてTherMATは非常に価値があったのではないかと思います。やはり、これをここで終わりにするのではなく、次のトライアルを途切れることなく回していかなければ、なかなか新しいものは生まれてきません。熱の場合、先ほど齋川委員からもありましたように、原理・原則に基づくにしても現実の正解を見つけるのが非常に難しいと思いますので、いろいろなトライをして、チャレンジをして新しいものを生み出していくことを努力してやり続けたいといけないのではないかと思います。本当に10年間にわたりまして大変お疲れさまでございました。ありがとうございました。

【廣田分科会長】 ありがとうございました。それでは、最後に愛知工業大学の廣田より講評いたします。今日は長い時間にわたりまして、どうもありがとうございました。10年間というのは非常に長いプロジェクトであり、10年前には想像しなかったような様々な環境の変化がここ数年で起きております。そうした意味では、このプロジェクトが立ち上がった頃よりも、さらに未利用熱の需要かつ重要性が増しているとも考えます。そして、今日のご発表を拝聴し、非常に技術的には素晴らしい成果が得られていることに対し感嘆している次第です。中には、市場投入が非常に近いようなプロジェクトから、もう少し時間がかかりそうなプロジェクトまであるかと思います。一方、今の現段階としては、まだ研究レベルで物がちょうど完成しているといったところで、これが実際のフィールドに出てどのように性能が出て、そのデータをまたフィードバックし、実際に商業性を測れるというサイクルが非常に大事になってくると考えます。今日の最初のほうで、「日本は入れるときのコストが非常に大きなハードルになっており、なかなか最初に入っていない」というお話があったのですが、これはNEDOの範囲ではないのかもしれませんが、そういうハードルを下げるような努力というのも、これは実施者の方の努力かもしれませんが、ぜひ心がけていただきまして、少しでも導入が進み、実際に取れたデータでまた改良していくというようなサイクルを回していただけると非常に成果が挙がってくるのではないかと思います。10年間お疲れさまでございました。

【西尾主査】 委員の皆様、ご講評をありがとうございました。それでは、最後に実施者を代表しまして、小原PLより一言頂戴できればと思います。よろしくお願いします。

【小原 PL】 僭越ながら、私のほうから挨拶を述べさせていただきます。このプロジェクトは経済産業省からの直委託として 2013 年に始まりまして、ちょうど 10 年間になります。当初は「熱のテーマで 10 年間本当にできるのか」といった指摘をいただきながらスタートをいたしました。そして、委員の皆様から本日コメントをいただきましたように、様々な非常にバリエーションの広いテーマを取りまとめて行うということで、関係者の方々には大変ご協力をいただきました。経産省をはじめ、マネジメントに本当にご尽力いただいた NEDO 様、そして技術研究組合の皆様にご感謝を申し上げたいと思います。あわせて、中間評価であるとか、中にはプロジェクト当初からご指導いただいた評価委員の先生方もおられます。心より御礼を申し上げます。

熱の問題は、齋川委員からお話があったように非常に難しい問題であります。今回取り上げたのは、広い熱領域の中の本当に一部の技術でしかないということも十分に理解しておりますので、このプロジェクトはこれで終わりますが、この取組はずっと続いていくと思っております。また、先ほど来の話にもありましたように、CN の非常に強い流れがある中、日本企業は特に省エネ機器に関しては相当強みがあると私は信じております。こう話しているだけでも 10 年間の思いがこみ上げてきてしまうのですが、冒頭に申し上げましたように、「スーパーヒートポンプ」のプロジェクトはエコキュートの実用化につながったこともございました。数年が経ったときに、今回のプロジェクトで開発された物が世の中に出てきてくれたのなら、それはプロジェクトリーダーとしての喜びでございます。それから、今回のプロジェクトが立ち上がったことにより、熱の大事さを非常に認識していただいたということで、NEDO の補助事業も進んでおりますし、JST の大きなプロジェクトが立ち上がったのは、まさに TherMAT があったからだと信じております。そういった意味で、人材育成も含め、重要な取組であったと考えております。最後になりますが、本当に関係者の皆様に改めて御礼を申し上げます。ありがとうございました。

【廣田分科会長】 ありがとうございました。以上で、議題 8 を終了いたします。

9. 今後の予定

10. 閉会

配布資料

資料 1	研究評価委員会分科会の設置について
資料 2	研究評価委員会分科会の公開について
資料 3	研究評価委員会分科会における秘密情報の守秘と非公開資料の取り扱いについて
資料 4-1	NEDO における技術評価について
資料 4-2	評価項目・評価基準
資料 4-3	評点法の実施について
資料 4-4	評価コメント及び評点票
資料 4-5	評価報告書の構成について
資料 5	プロジェクトの概要説明資料（公開）
資料 6	プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
資料 7	事業原簿（公開）
資料 8	評価スケジュール
番号なし	質問票（公開 及び 非公開）

以上

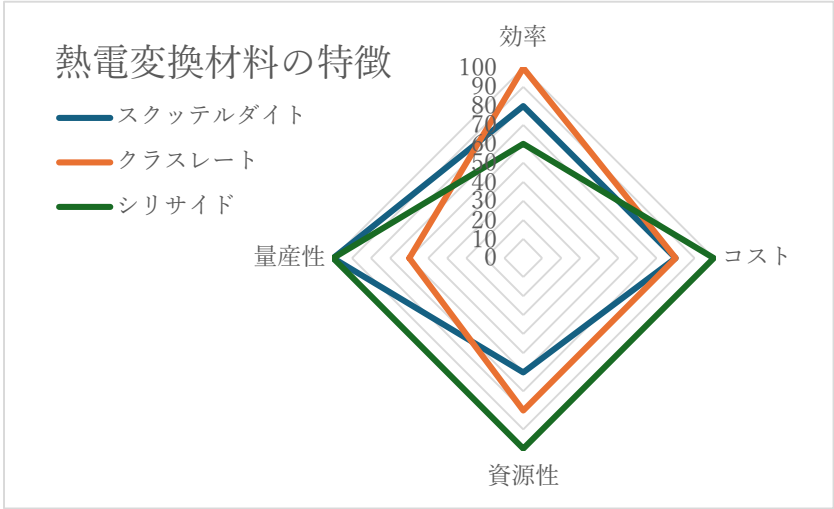
以下、分科会前に実施した書面による公開情報に関する質疑応答について記載する。

「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」（終了時評価）分科会

ご質問への回答（公開分）

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
資料 5, p.48	目標値である COP3.5 は定格運転時の値と推察しますが、工場に導入した場合には年間平均でどの程度の COP が見込めそうでしょうか？シミュレータで検討されていれば示して下さい。	廣田分科 会長	本ヒートポンプは 80℃程度の未利用熱を熱源としており、外気温の変化による性能への影響は小さく、年間を通して COP3.5 が見込めますが、設置環境により配管等の放熱分が影響し、10%程度の性能低下が発生する可能性があります。
資料 5, p.49	3 種類の熱電変換材料について開発を進められていますが、それぞれの材料の特徴と想定している応用先について説明して下さい。	廣田分科 会長	クラスレート系については、工場、動力機等の排熱回収を応用先として想定しています。 スクッテルダイト系については、受熱温度 600℃以下の広い温度範囲で熱電発電することができ、比較的高い発電性能を有します。試作した熱電変換モジュールは高温 600℃/低温 50℃条件下の出力密度、変換効率、耐久性がそれぞれ 2W/cm²、9%、10,000h を達成しました。応用先は工場排熱発電、エネルギーハーベスティング、自動車排熱発電等を想定しています。 シリサイド系では、300～500℃の温度域での廃熱を活用できます。材用の特徴としては、環境低負荷・低コスト・資源豊富なシリコンを主原料としています。 高効率化が課題であるが、シリコンベースの半導体バンドエンジニアリングを使って、性能を高められるポテンシャルを有しています。本プロジェクトで実証したガスエンジン（ガ

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
			スコージェネレーション）や産業機器（脱炭素向けのグリーンテックプロダクト）の廃熱利用を想定しています。
資料 5, p.50	車載向け小型吸収冷凍機もハイブリッド車で評価されたのでしょうか？車速により変化する排熱を蓄熱するシステムで冷房能力を安定化させたとありますが、車速変化はどのような基準で与えたのか説明して下さい。また、走行中は常に 2.8kW 以上の冷凍能力が確保できたと理解してよろしいでしょうか？	廣田分科 会長	小型吸収冷凍機はディーゼルエンジン車で評価しました。車速変化は JE05 燃費計測走行モード（都市内走行、都市間走行）に従い、シャシダイナモにて与えました。 2.8kW 以上の冷凍能力が見込めない車速まで低下した場合に、高車速走行時の余剰熱を蓄熱した熱量に応じた冷凍能力の補助可能な時間内は冷凍能力を安定して確保できました。
資料 5・ P.19	冷凍機について事業化の実績があり、素晴らしいです。国内で販売されない理由はあるのでしょうか？	湯浅委員	日本国内についても、販売していない訳ではなく、リーフレットを発行し、お客様からの問い合わせもありますが、国内では排熱利用に対する関心が欧州などの海外に比べ高いことや、実績が無いものは導入されにくいという面が大きいと思われます。今後、脱炭素の流れの中で、排熱を活用した吸収式冷凍機の需要が国内でも増えてくると思われ、積極的に本製品の拡販に取り組み、早期に実績を作りたいと考えています。
資料 5・ P.25 と P.27 の項目 ⑤	P.25 に目標が2つ記載されています。P.27 には3種の材料性能が個別の目標に対し記載されています。結局、2つの目標をクリアしたのはどれなのか、分かりませんでした。最初に記載された材料系は、そもそも目標には無いパラメータを達成したと書かれているよ	湯浅委員	1 つ目の目標の前半が、クラスレート系に関する目標で、受熱温度 200℃～600℃の条件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を行った結果です。 1 つ目の目標の後半が、スクッテルダイト系に関して、受熱温度 600℃の条件でモジュールの出力密度は 2W/cm ² と発電ユニットの出力 200W を達成しました。

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
	うに見えますが、これも成果になるのでしょうか。		2 つ目の目標に対しては、シリサイド系の材料を搭載した熱電変換モジュールを使用して実証試験を行い得られた成果になります。
資料 5 P.49	成果である 3 種の材料系の位置づけが分かりにくいです。いくつかの性能に対し得意・不得意があるものと思いますが、それが明記されておらず、どの利用シーンにどの材料を使うべきか、分かりませんでした。レーダーチャートに纏まると業績として認識しやすいように思います。	湯浅委員	特徴の概要が分かるようレーダーチャートを作成しました。 
資料 5 の P.23	開発成果による市場創出効果の金額は、プロジェクトを実施した場合と実施しない場合の差分となっているか？	竹内委員	本 PJ の成果に対する市場を算出していますので差分とはなっていません。一部の成果は既存の技術の代替を狙ったものでは有りますが、未利用熱の活用という観点から新しい市場の創出となる部分が大きいと考えています。
資料番号 5・ 質問箇所 P13	アウトカム達成までの道筋の内容で、下段に、委託事業→助成事業→各事業者にて実施する実用化へのフェーズ移行は進捗状況に合わせ、早期自立化を達成と記載があります。	秋山委員	産業用高効率高温ヒートポンプに関して、2023 年度追加公募の「脱炭素社会実現に向けた省エネルギー技術の研究開発・社会実装促進プログラム」に前川製作所から提案された「グリーン冷媒を用いた産業用大温度差加熱高温ヒートポンプの

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
	その中で、例えば NEDO の実用化に向けた補助事業などに提案・採択されてテーマはあるでしょうか。 (例えば、「脱炭素社会実現に向けた省エネルギー技術の研究開発・社会実装促進プログラム」など)		開発」が採択されました。その他の研究に関して、2024 年度の応募を検討されている事業者もあります。
資料番号 5 質問箇所 P14	資料の中で、実施者による知財管理の内容が記載されています。 本事業（委託）及び助成の中で、得られた知財については、商品化の際に使用できるという認識でしょうか。またその際は無償で使用できるのでしょうか。ご教示ください。	秋山委員	自己実施：商品化の際に使用可能、無償他組合員の知財：商品化の際に使用可能（要承諾）、有償（協議で決定）委託事業で取得した知的財産権は、NEDO の約款および組合の知的財産権取扱い規程により、各実施者（各組合員）に帰属します。 従って、各組合員が自社の保有する特許を自己実施する場合は、無償で自由に実施可能です。 一方、組合員が委託事業で取得した特許の実施に当たり、他組合員が本委託事業で取得した特許の使用許諾を求めた場合、特許保有組合員は、合理的な拒否理由がある場合を除き、組合事業の事業化の範囲内で、原則実施許諾を行なうことが定められています。 実施許諾する場合において、実施の範囲、実施料その他の事項については、当事者間の協議により定めるものとなっています。 なお、助成事業で取得した特許については、上記の規程は適用されないので当事者間の協議により許諾の可否は決めることになります。

参考資料 2 評価の実施方法

NEDO における技術評価について

1. NEDO における技術評価の位置付けについて

NEDO の研究開発の評価は、事業の実施時期毎に事前評価、中間評価、終了時評価及び追跡評価が行われ、研究開発のマネジメントにおける PDCA サイクル（図 1）の一角と位置づけられています。さらに情勢変化の激しい今日においては、OODA ループを構築し、評価結果を計画や資源配分へ適時反映させることが必要です。

評価結果は、被評価事業等の資源配分、事業計画等に適切に反映させることにより、事業の加速化、縮小、中止、見直し等を的確に実施し、技術開発内容やマネジメント等の改善、見直しを的確に行っていきます。

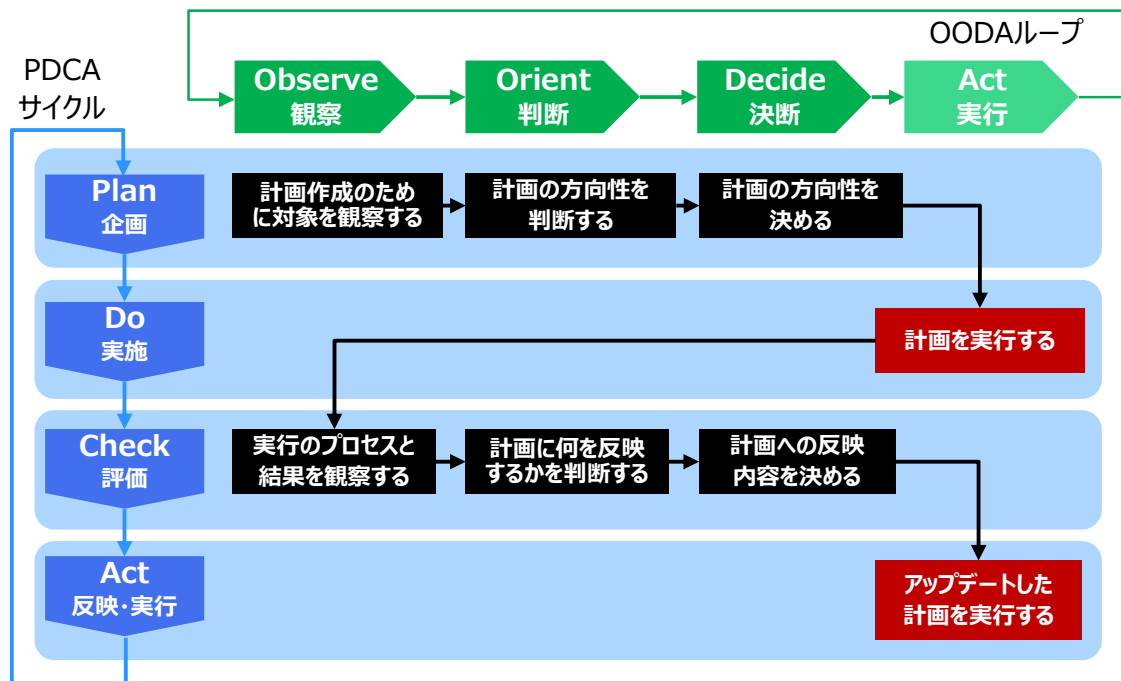


図 1 研究開発マネジメント PDCA サイクルと OODA ループ組み合わせ例

2. 技術評価の目的

NEDO では、次の 3 つの目的のために技術評価を実施しています。

- (1) 業務の高度化等の自己改革を促進する。
- (2) 社会に対する説明責任を履行するとともに、経済・社会ニーズを取り込む。
- (3) 評価結果を資源配分に反映させ、資源の重点化及び業務の効率化を促進する。

3. 技術評価の共通原則

技術評価の実施に当たっては、次の5つの共通原則に従って行います。

- (1) 評価の透明性を確保するため、評価結果のみならず評価方法及び評価結果の反映状況を可能な限り被評価者及び社会に公表する。なお、評価結果については可能な限り計量的な指標で示すものとする。
- (2) 評価の明示性を確保するため、可能な限り被評価者と評価者の討議を奨励する。
- (3) 評価の実効性を確保するため、資源配分及び自己改革に反映しやすい評価方法を採用する。
- (4) 評価の中立性を確保するため、可能な限り外部評価又は第三者評価のいずれかによって行う。
- (5) 評価の効率性を確保するため、研究開発等の必要な書類の整備及び不必要な評価作業の重複の排除等に務める。

4. プロジェクト評価の実施体制

プロジェクト評価については、図2に示す実施体制で評価を実施しています。

- (1) 研究開発プロジェクトの技術評価を統括する研究評価委員会をNEDO内に設置。
- (2) 評価対象プロジェクト毎に当該技術の外部の専門家、有識者等を委員とした分科会を研究評価委員会の下に設置。
- (3) 同分科会にて評価対象プロジェクトの技術評価を行い、評価報告書（案）を取りまとめた上、研究評価委員会に諮る。
- (4) 研究評価委員会の審議を経て評価報告書が確定され、理事長に報告。

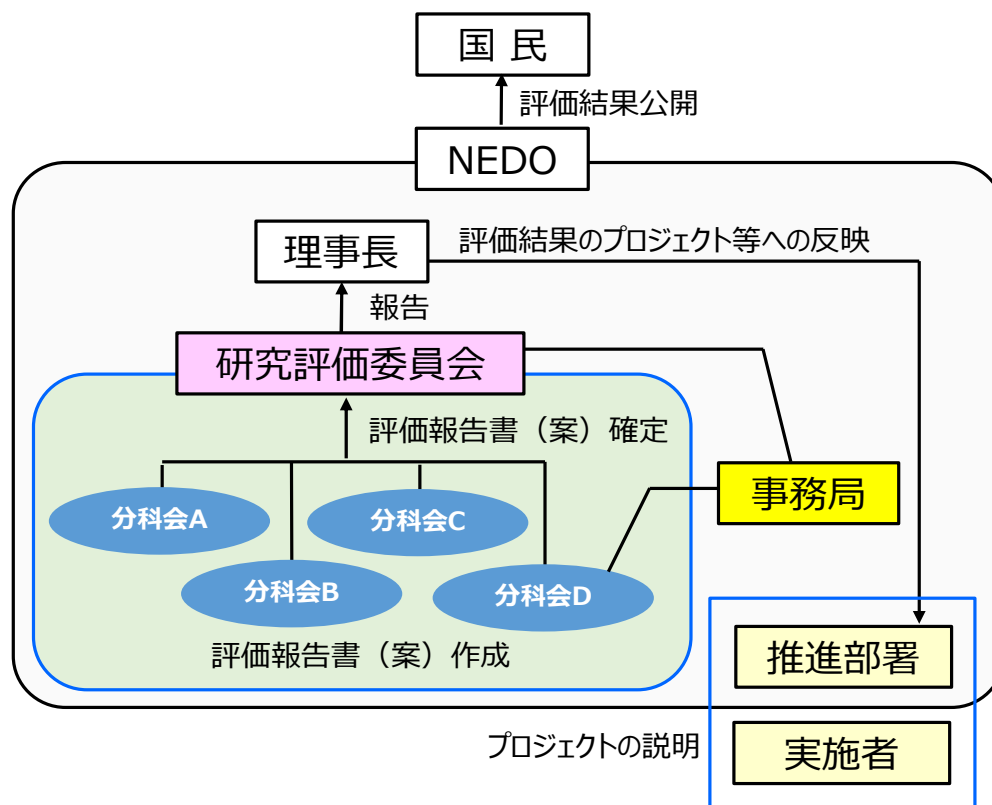


図2 評価の実施体制

5. 分科会委員

分科会は、研究開発成果の技術的、経済的、社会的意義について評価できる NEDO 外部の専門家、有識者で構成する。

6. 評価手順

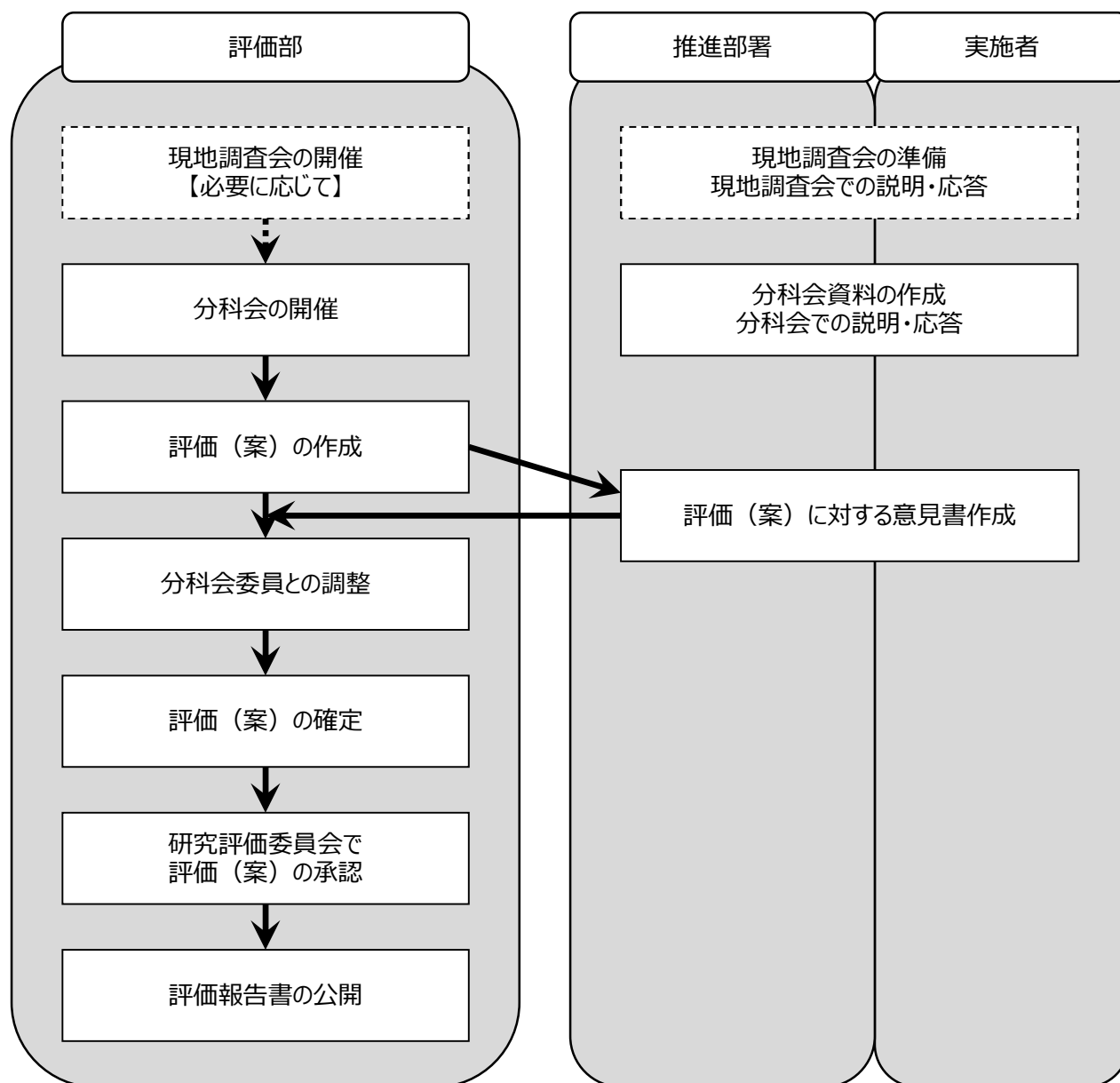


図3 評価作業フロー

「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」（終了時評価）分科会に係る
評価項目・評価基準

1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

(1) アウトカム達成までの道筋

- ・「アウトカム達成までの道筋」※の見直しの工程において、外部環境の変化及び当該研究開発により見込まれる社会的影響等を考慮したか。

※ 「アウトカム達成までの道筋」を示す上で考慮すべき事項

- ・将来像（ビジョン・目標）の実現に向けて、安全性基準の作成、規制緩和、実証、標準化、規制の認証・承認、国際連携、広報など、必要な取組が網羅されていること。
- ・官民の役割分担を含め、誰が何をどのように実施するのか、時間軸も含めて明確であること。
- ・本事業終了後の自立化を見据えていること。
- ・幅広いステークホルダーに情報発信するための具体的な取組が行われていること。

(2) 知的財産・標準化戦略

- ・オープン・クローズ戦略は、実用化・事業化を見据えた上で、研究データも含めた上で、クローズ領域とオープン領域が適切に設定されており、外部環境の変化等を踏まえてもなお、妥当であったか。
- ・本事業の参加者間での知的財産の取扱い（知的財産の帰属及び実施許諾、体制変更への対応、事業終了後の権利・義務等）や市場展開が見込まれる国での権利化の考え方は、オープン・クローズ戦略及び標準化戦略に整合し、研究開発成果の事業化に資する適切なものであったか。
- ・標準化戦略は、事業化段階や外部環境の変化に応じて、最適な手法・視点（デジュール、フォーラム、デファクト）で取り組んでいたか。

2. 目標及び達成状況

(1) アウトカム目標及び達成見込み

- ・外部環境の変化及び当該研究開発により見込まれる社会的影響等を踏まえてアウトカム指標・目標値を適切に※見直していたか。
- ・アウトカム目標の達成の見込みはあったか（見込めない場合は原因と今後の見通しは妥当であったか）。

※ アウトカム目標を設定する上で考慮すべき事項

- ・本事業が目指す将来像（ビジョン・目標）と関係のあるアウトカム指標・目標値（市場規模・シェア、エネルギー・CO₂削減量など）及びその達成時期が適切に設定されていること。
- ・アウトカムが実現した場合の日本経済や国際競争力、問題解決に与える効果が優れていること。
- ・アウトカム目標の設定根拠は明確かつ妥当であること。
- ・達成状況の計測が可能な指標が設定されていること。

(2) アウトプット目標及び達成状況

- ・外部環境の変化及び当該研究開発により見込まれる社会的影響等を踏まえてアウトプット指標・目標値を適切に※見直していたか。
- ・最終目標は達成しているか。未達成の場合の根本原因分析や今後の見通しの説明は適切だったか。
- ・副次的成果や波及効果等の成果で評価できるものがあつたか。
- ・オープン・クローズ戦略や実用化・事業化の計画を踏まえて、必要な論文発表、特許出願等が行われていたか。

※ アウトプット目標を設定する上で考慮すべき事項

- ・アウトカム達成のために必要なアウトプット指標・目標値及びその達成時期が設定されていること。
- ・技術的優位性、経済的優位性を確保できるアウトプット指標・目標値が設定されていること。
- ・アウトプット指標・目標値の設定根拠が明確かつ妥当であること。
- ・達成状況の計測が可能な指標（技術スペックとTRL※の併用）により設定されていること。

※ TRL：技術成熟度レベル（Technology Readiness Levels）の略。

3. マネジメント

(1) 実施体制

- ・実施者は技術力及び実用化・事業化能力を発揮したか。
- ・指揮命令系統及び責任体制は明確であり、かつ機能していたか。
- ・実施者間での連携、成果のユーザーによる関与など、実用化・事業化を目指した体制となっていたか。
- ・個別事業の採択プロセス（公募の周知方法、交付条件・対象者、採択審査の体制等）は適切であったか。

- ・本事業として、研究開発データの利活用・提供方針等は、オープン・クローズ戦略等に沿った適切なものであったか。また、研究者による適切な情報開示やその所属機関における管理体制整備といった研究の健全性・公平性（研究インテグリティ）の確保に係る取組をしたか。

(2) 研究開発計画

- ・アウトプット目標達成に必要な要素技術の開発は網羅され、要素技術間で連携が取れており、スケジュールは適切に計画されていたか。
- ・研究開発の進捗を管理する手法は適切であったか（WBS※1 等）。進捗状況を常に関係者が把握し、遅れが生じた場合、適切に対応していたか。

※1 WBS：作業分解構造(Work Breakdown Structure)の略。

本研究評価委員会報告は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）評価部が委員会の事務局として編集しています。

NEDO 評価部

部長 三代川 洋一郎

担当 西尾 昌二

* 研究評価委員会に関する情報は NEDO のホームページに掲載しています。
(https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_index.html)

〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地

ミューザ川崎セントラルタワー20F

TEL 044-520-5160 FAX 044-520-5162