

# 「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」

## 中間評価報告書（案）概要

### 目 次

|               |   |
|---------------|---|
| 分科会委員名簿 ..... | 1 |
| 評価概要（案） ..... | 2 |
| 評点結果 .....    | 4 |

## はじめに

本書は、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」（中間評価）の研究評価委員会分科会（2020年10月9日）において策定した評価報告書（案）の概要であり、NEDO技術委員・技術委員会等規程第33条の規定に基づき、第63回研究評価委員会（2021年1月8日）にて、その評価結果について報告するものである。

2021年1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「未利用熱エネルギーの革新的活用技術  
研究開発」分科会  
（中間評価）

分科会長 廣田 真史

「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」

(中間評価)

分科会委員名簿

(2020年10月現在)

敬称略、五十音順

|                | 氏名                 | 所属、役職                                     |
|----------------|--------------------|---|
| 分科<br>会長       | ひろた まさふみ<br>廣田 真史  | 三重大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 教授                   |
| 分科<br>会長<br>代理 | みやざき こうじ<br>宮崎 康次  | 九州工業大学 工学研究院 機械知能工学研究系 教授                 |
| 委員             | あきやま としかず<br>秋山 俊一 | 一般財団法人 省エネルギーセンター 理事                      |
|                | いわい よしひろ<br>岩井 良博  | 三機工業株式会社 執行役員、プラント設備副事業本部長                |
|                | さいかわ みちゆき<br>齋川 路之 | 一般財団法人電力中央研究所<br>エネルギーイノベーション創発センター 首席研究員 |
|                | しゅどう としお<br>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               |
|                | ゆあさ ひろみ<br>湯浅 裕美   | 九州大学 システム情報科学研究院 教授                       |

# 「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」

## (中間評価)

### 評価概要 (案)

#### 1. 総合評価

ほとんどの研究開発テーマにおいて中間目標が達成され、全般に実用化への基盤となる優れた成果が得られている。実用化に向けた戦略や取り組みも具体的に検討され、適宜関連する事業間で情報交換や開発統合・メンバーの補填を行い、進捗状況や難易度などに応じてプロジェクトから卒業して実用化開発あるいは小規模研究開発スキームへ移行するなど、PLのもとで研究開発マネジメントが上手く進められていることは評価できる。

その一方で、適用対象となるフィールドでの実操業のデータ確認やシステムの導入コストなども考慮し、開発成果を社会に広く還元できるよう、現実的な条件設定や、システム化などの実用面での取り組みに重点を置くようなマネジメントを行ってほしい。

今後については、引き続き NEDO として開発品や途中の成果物などの実物をチェックし、体制の増強や検討項目の絞り込みなどマネジメントをしっかりと行うことや開発された技術が活用されるような NEDO 事業の枠組みを超えた制度作りなど、適宜バックアップ・フォローアップして進めていくことを期待する。

#### 2. 各論

##### 2. 1 事業の位置付け・必要性について

国内の一次エネルギーの6～7割程度が未利用熱エネルギーとなっており、この有効活用に係わる技術開発は、特に産業及び運輸分野の省エネ化を実現するために不可欠と考えられる。また、これらの未利用熱エネルギーをいかに削減するかは国の政策と一致しており事業目的として極めて妥当である。新しい技術や産業創生と関わるハイリスクのために未利用熱エネルギー利用の開発が進みにくい現状と、メーカ、大学、研究機関が一緒になって課題解決を図る必要があることを考えると、公共事業として NEDO が支援する必要性が高いと判断する。

その一方で、算出された投資効果は、市場で汎用的に流通した場合の効果であると考えられ、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は評価が難しい。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。

##### 2. 2 研究開発マネジメントについて

未利用熱エネルギーの利用について広い観点から検討されており、達成目標も明確かつ妥当に設定されている。ユーザーサイドの経験・知識を持つ外部有識者をメンバーに入れた技

術委員会を含めた体制で事業を推進しており、工夫がみられる。また、開発の進展状況に応じて事業を終了させる、共通的な課題については個別のテーマから切り分けて基盤研究へ移行させて実施する、小規模研究枠で開発を継続させる、など実に細やかで迅速なマネジメントが行われている。

その一方で、実用化・事業化の担い手やユーザーをさらに広げることができるか不透明な開発項目もある。

今後については、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、エンジニアリング会社をメンバーに取り込むなど、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。

### 2. 3 研究開発成果について

大部分の研究開発項目において中間目標が達成されており、どのテーマも高いレベルで成果を挙げ、現在継続中のテーマはいずれも世界の技術をリードしていると判断する。最終目標についても達成の見通しが立っているものがほとんどであり、成果については評価できる。また、ソフト開発も並行して実施するなど、開発技術の普及・社会実装を見据えた総合的な開発が進められている。さらに、多くのテーマにおいて研究発表や展示会への出展が行われており、成果の普及についても取り組まれている。

その一方で、テーマによって最終目標に対する中間目標の位置づけが異なっており、中間評価の時点で「何合目」にしているのかがやや分かりづらい。横軸にタイミングを取り、縦軸にキーパラメータを取るなどの方法で可視化して頂きたい。

今後については、省エネ効果の算出基準が曖昧なテーマについては、算出方法を明確化させた上でその妥当性を再度評価し、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。

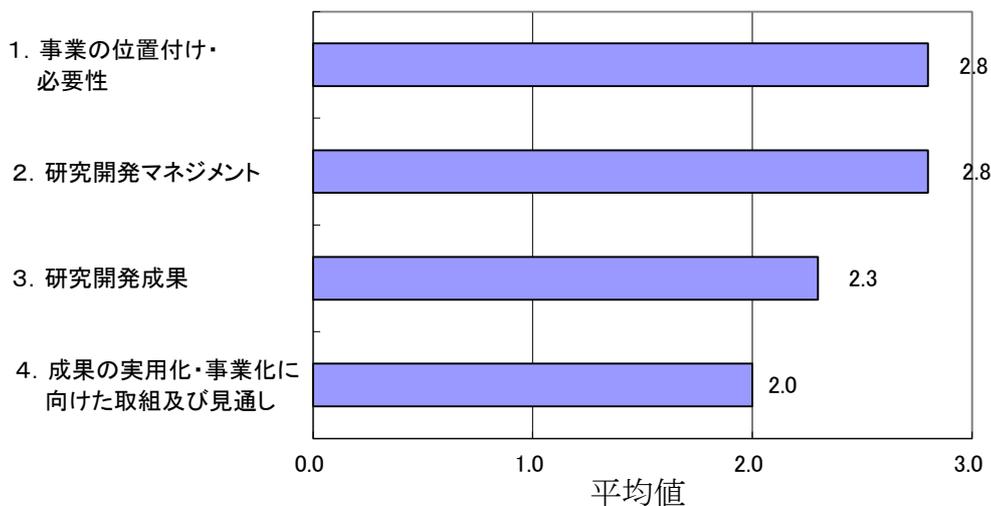
### 2. 4 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

これまでの研究開発成果に基づき、開発項目によってはサンプル品のユーザー評価の計画が進み、システム化、実用化のための課題と取り組みが検討されるなど、具体的な開発計画が実用化に向けて生まれ、適切に実施されている。早期の社会還元が見込まれる開発項目もあり評価できる。

その一方で、競合する製品と比較して性能やコストの面等での優位性を十分に確保できていない開発項目もあるように思える。また、技術が高くても売れない場合、市場ニーズから出て来るスペックが、プロジェクトで定めた目標より高いという可能性がある。

今後の実用化・事業化については、一般的にはコスト競争になり、環境に関わるエネルギー機器など設備導入時の初期費用がハードルになるケースも予想される。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。

## 評点結果〔プロジェクト全体〕



| 評価項目                     | 平均値 | 素点 (注) |   |   |   |   |   |   |  |
|--------------------------|-----|--------|---|---|---|---|---|---|--|
|                          |     | A      | A | A | A | A | B | A |  |
| 1. 事業の位置付け・必要性           | 2.8 | A      | A | A | A | A | B | A |  |
| 2. 研究開発マネジメント            | 2.8 | A      | A | A | B | A | A | A |  |
| 3. 研究開発成果                | 2.3 | B      | A | B | B | B | B | A |  |
| 4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通し | 2.0 | A      | A | B | B | B | C | C |  |

(注) 素点：各委員の評価。平均値は A=3、B=2、C=1、D=0 として事務局が数値に換算し算出。

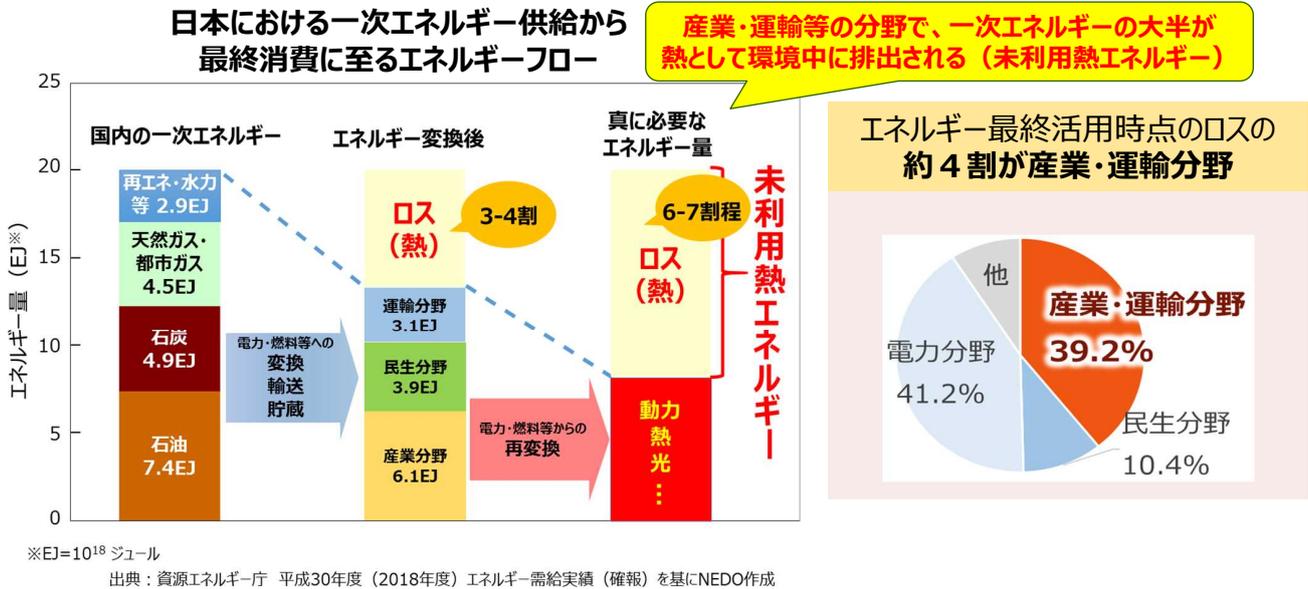
### 〈判定基準〉

- |  |  |
|--|--|
| <p>1. 事業の位置付け・必要性について</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・非常に重要 →A</li> <li>・重要 →B</li> <li>・概ね妥当 →C</li> <li>・妥当性がない、又は失われた →D</li> </ul> | <p>3. 研究開発成果について</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・非常によい →A</li> <li>・よい →B</li> <li>・概ね妥当 →C</li> <li>・妥当とはいえない →D</li> </ul>           |
| <p>2. 研究開発マネジメントについて</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・非常によい →A</li> <li>・よい →B</li> <li>・概ね適切 →C</li> <li>・適切とはいえない →D</li> </ul>       | <p>4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・明確 →A</li> <li>・妥当 →B</li> <li>・概ね妥当 →C</li> <li>・見通しが不明 →D</li> </ul> |

1. 事業の位置付け・必要性 (1) 事業の目的の妥当性

**社会的背景**

- 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&CO<sub>2</sub>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。



1. 事業の位置付け・必要性 (1) 事業の目的の妥当性

- 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

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**

➔ リジェネラティブバーナー、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

**事業の目的**

- 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。
- ➔古くから研究開発の行われている当該分野の技術について、**未来の省エネルギーに向けたフロンティアとして革新し、国内の3E+Sの実現と、全世界でのグ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。**



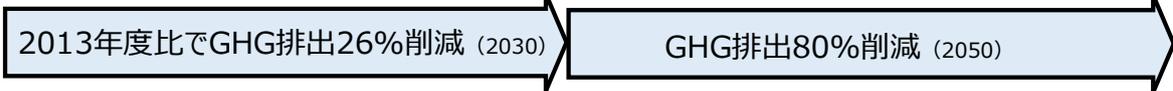
**政策的背景**

- 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。

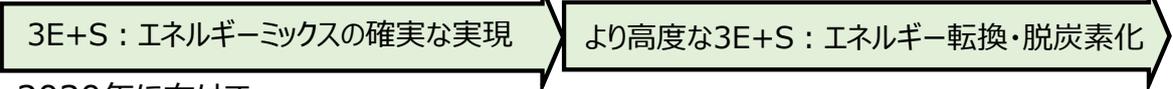
2030

2050

◇ **パリ協定実現に向けて**



◇ **「エネルギー基本計画」** (2018年7月、閣議決定)



2030年に向けて：  
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**

◇ **「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)



2050年までの確立を目指して：  
高効率な断熱材、ヒートポンプ、熱電変換技術、熱の評価技術の開発が必要

**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**



**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**

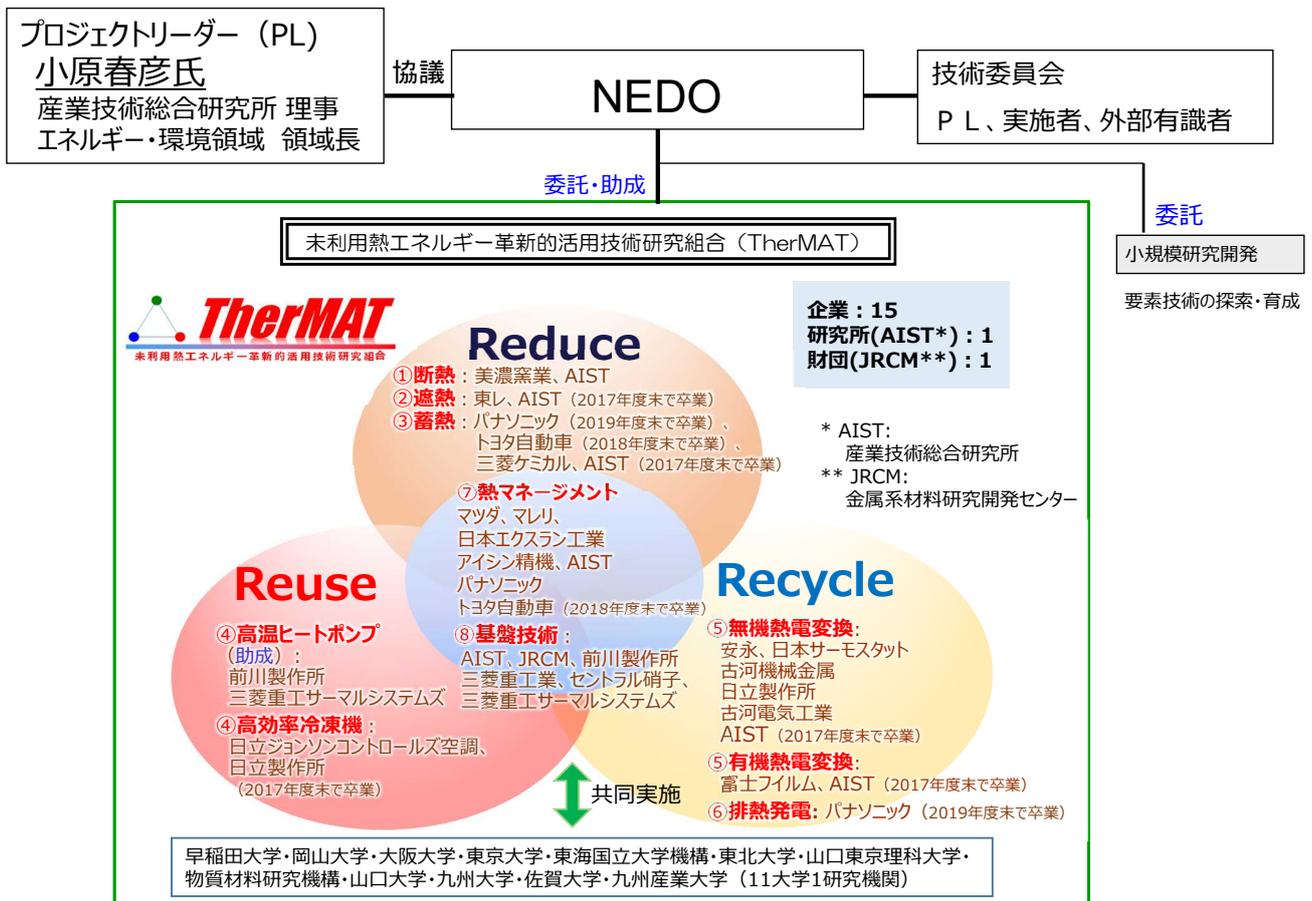
2. 研究開発マネジメント (1) 研究開発目標の妥当性

事業の目標

未利用熱エネルギーを効果的に、①削減 (**Reduce** : 断熱、遮熱、蓄熱)、②再利用 (**Reuse** : ヒートポンプ技術)、③変換利用 (**Recycle** : 熱電変換、排熱発電) するための技術開発 (**熱の3R**) と、④これらの技術を一体的に扱う**熱マネージメント**技術の開発を行い、産業分野、運輸分野等における徹底的な省エネルギーを目指す。

| 研究開発項目        | アウトプット目標 (最終目標)  |
|---------------|--|
| ① 断熱技術        | 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)  |
| ② 遮熱技術        | 可視光線透過率70%以上、日射熱取得率43%以下 (2017年度)  |
| ③ 蓄熱技術        | 120℃以下で蓄熱密度1MJ/kg、20℃～25℃環境下で24h以上 (2019年度)  |
| ④ ヒートポンプ技術    | 100→200℃加熱でCOP:3.5以上 (2022年度)  |
| ⑤ 熱電変換材料・デバイス | 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   |
| ⑥ 排熱発電技術      | 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)  |
| ⑦ 熱マネージメント    | 運輸・産業分野等の熱マネージメント技術・システム開発 (2022年度)  |
| ⑧ 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)<br>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)<br>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) |

2. 研究開発マネジメント (3) 研究開発の実施体制の妥当性





◆研究開発項目ごとの成果：蓄熱技術・熱マネージメント

■ 出口イメージ

「時空を超えた熱利用」により、熱の有効活用を実現

〈産業分野〉

[1] 高密度蓄熱材料（低温）  
夜間の冷凍機運転で蓄えた熱を昼間に使用し、ピークシフト  
@食品製造プロセス



〈運輸分野〉

[3] 長期蓄熱材料  
走行時に出ている排熱を翌日の始動時に使用し、燃費向上@自動車



燃費を10%改善

■ 技術課題（ブレークスルーポイント）

・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)

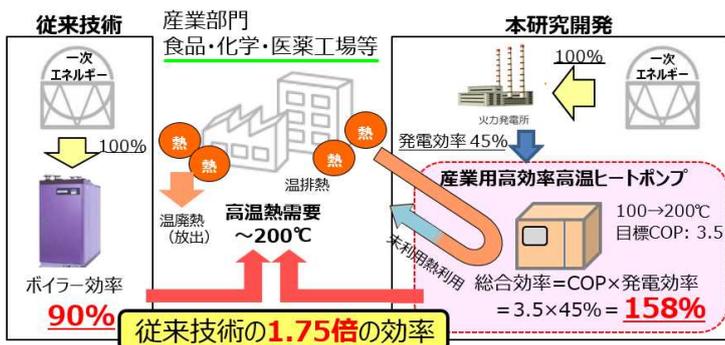
注) 過冷却: 液体の状態のまま融点以下の温度まで冷却される状態

■ これまでの主な成果

- ・**高密度蓄熱**: 過冷却抑制剤を添加した蓄熱材料を用いて、振動のない環境下で過冷却度2K以下（中間目標）を検証@モジュール
- 熱マネージメント**: 食品工場での蓄冷用途への適用を見据え、過冷却度2K以下と、実証先における蓄熱密度、蓄放熱速度の**要求仕様を、同時に満たすことを検証。**
- ・**長期蓄熱**: 新規過冷却解除機構により熱源温度90℃で冷却解除時間30秒以内（中間目標）、沸点90℃以上の過冷却安定化剤の抽出により-20℃で過冷却保持時間24hを検証@モジュール
- 熱マネージメント**: 暖機/冷間始動時の燃料消費特性調査から蓄放熱速度などの**要求仕様を明らかにし、蓄熱モジュールにおいて、過冷却解除時間、過冷却の保持時間、蓄熱密度、蓄放熱速度の要求仕様を、同時に満たすことを検証。**

◆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



化石燃料を多量に用いるボイラ蒸気の代替手段として高温ヒートポンプに期待

■ 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 熱ロスが効率を妨げる（断熱対策）

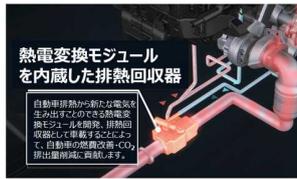
→これら課題を解決するヒートポンプを開発

■ これまでの主な成果

- <160℃出力>
- ・200℃温水出力に対応ができ既に入手可可能な冷媒候補で、**要素実証機において出口温度160℃超の温水出力を実現**、機器要素の計画仕様と試験値がほぼ一致することを確認し、機器要素の設計技術の信頼性を確認。
- <200℃出力>
- ・研究開発項目⑧で開発した新規低GWP冷媒候補での200℃温水出力ヒートポンプのサイクル性能評価を完了して200℃温水出力ヒートポンプの基本制御設計を確立し、開発機の製作図を完成。
- ・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の**設計を完了。**（2020年度末に製作完了の見込み）
- ・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：熱電変換技術

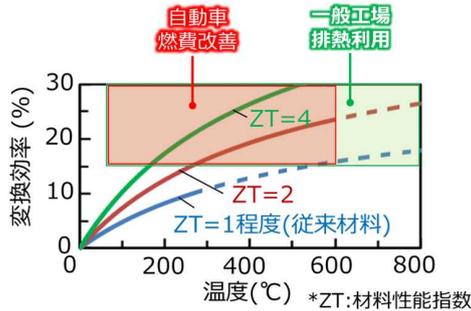
■ 出口イメージ



自動車用・工場用  
熱電発電

■ 技術課題 (ブレークスルーポイント)

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/cm<sup>2</sup>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

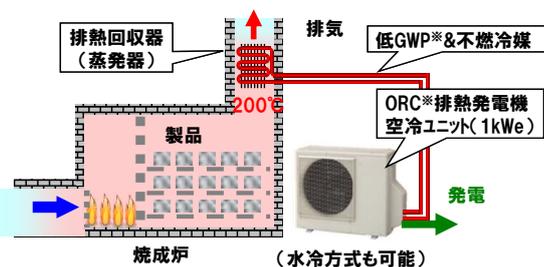
■ これまでの主な成果

- ・**スクッテルダイト系**：熱電モジュールの接合技術、高性能化技術を開発し、**モジュール変換効率9%、出力密度2W/cm<sup>2</sup>**を達成。**600℃で5,000h以上の耐久性**を確認 (基板付モジュール)、**出力200Wの熱電発電ユニット試作**に成功。
- ・**クラスレート化合物**：多接合型オールクラスレート熱電モジュールを開発試作。輻射熱を考慮した新モジュール構造と素子の高性能化により、**変換効率を従来の約10%から12%へ向上するモジュール化技術の確立**を図った。
- ・**シリサイド系**：①試作した熱電変換モジュールの**コージェネ適用実証を見据え、実証実験の設計**を実施。また、中高温用シリサイドモジュール (9対) で、**12.4kW/m<sup>2</sup>の出力密度**を達成。さらに、バルク材料で**ZT>1 (大幅改善)**を見通した。  
②**発電出力密度1.55W/cm<sup>2</sup>**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：排熱発電技術・熱マネジメント

■ 出口イメージ

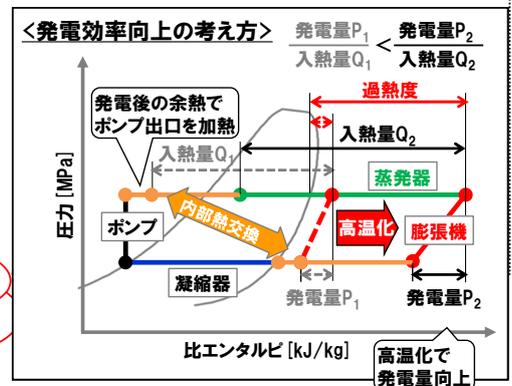
工業炉の排熱発電システム(例)



※) GWP:地球温暖化係数、ORC:オーガニクランキンサイクル

■ 技術課題 (ブレークスルーポイント)

- ・発電効率向上...排ガスからの**直接熱回収**でサイクル高温化
- ・省スペース/低価格...単段膨張機で対応できる**圧力比**
- ・付帯工事費抑制...**空冷凝縮器**で水配管や冷却塔不要
- ・環境対応...**冷媒(作動流体)の低GWP化**



200℃以下の  
中低温排熱を活用した  
世界最高効率の  
1kWe小型発電システムを確立

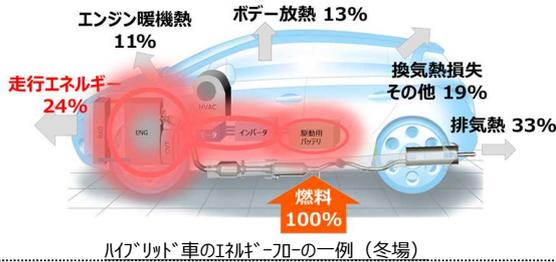
■ これまでの主な成果

- ・5年相当の耐久性を実現するための材料や機構要素とデバイス効率を両立させた**1kWクラスのデバイス基本設計を完了**。
- ・バラック試作機により、**排熱発電サイクル自動制御運転/年間平均発電出力として1kWを実証**。
- 熱マネジメント**：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。**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**。

◆ 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（ブレイクスルーポイント）

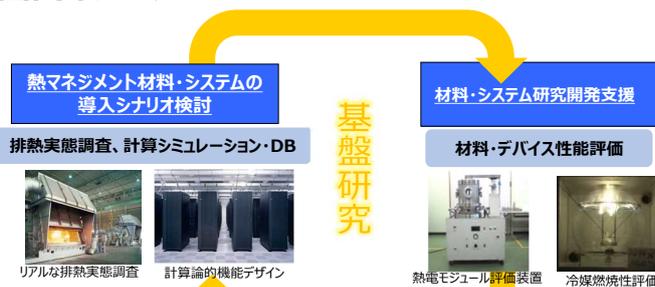
- 熱の流れの見える化 → 熱流れの計測解析技術の開発とモデル構築
- 排熱を利用し冷熱・電力等を生成 → 吸収冷凍システム、蓄熱・熱電変換利用システム等
- 換気熱損失を削減 → 湿度交換システム
- 排熱を暖機に活用 → 蓄熱モジュールを用いた熱マネジメント
- ロスなく熱を運ぶ → 熱輸送/移動、伝熱促進

■ これまでの主な成果

- ・**熱の流れの見える化**：①光ファイバを用いた0～130km/hまで計測可能な高分解能・高応答温度計測技術を開発。対流・輻射熱伝達を明らかにし、**実測に基づいた伝熱3形態による熱流れをモデルに反映**。  
 ②シリーズパラレル式（アクセラHV）の熱計測を実施し、消費エネルギーが、**夏季条件では冷房負荷により7%悪化、冬季条件では暖房等のためエンジン稼働比率が増加することにより39%悪化**することを明らかにした。
- ・**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して冷房出力1.5kW以上**。
- ・**吸着式冷凍システム**：平均蒸発性能1.7kW/19Lをシミュレーションモデルを用いて確認。
- ・**湿度交換システム**：湿度交換器を搭載するHVACの検討を行い、車載用として求められる**除湿性能（173g/h）、再生側風量（3m<sup>3</sup>/min以上）**を達成。

◆ 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

■ 出口イメージ

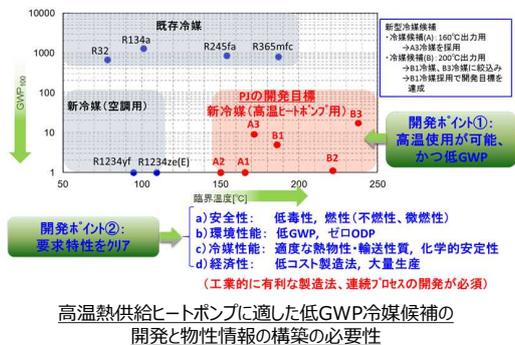


新規材料開発の加速、排熱利用機器・システム設計、産業化に貢献

- 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



■ 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の見える化できる「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

### 3. 研究開発成果 (3) 成果の普及

| 成果の件数      |         | ※2020年8月31日現在 (非公開セッション発表テーマ分を集計) |        |         |     |  |
|------------|---------|-----------------------------------|--------|---------|-----|--|
| 成果件数       | ～2017年度 | 2018年度                            | 2019年度 | 2020年度※ | 計※  |  |
| 論文         | 72      | 19                                | 19     | 3       | 103 |  |
| 研究発表・講演    | 309     | 75                                | 94     | 12      | 445 |  |
| 受賞実績       | 15      | 2                                 | 5      | 0       | 22  |  |
| 新聞・雑誌等への掲載 | 8       | 5                                 | 9      | 5       | 23  |  |
| 展示会への出展    | 46      | 18                                | 23     | 0       | 80  |  |



共同実施先の修士論文  
としても成果公表  
(次世代の人材育成にも貢献)

学会等での受賞  
(2019年度：美濃窯業・AIST、日立製作所)

- 産業技術総合研究所 (福島博士) が  
アメリカセラミクス協会  
Richard M. Fulrath Awardを受賞  
(<https://ceramics.org/awards/richard-m-fulrath-awards>)
- 日立製作所 (早川博士) が  
International Association of Advanced  
Materials (IAAM)  
Advanced Materials Awardを受賞  
(<https://www.iaamonline.org/advanced-materials-award>)



第46回東京モーターショー2019での  
熱電モジュール展示 (日本サーモスタット)

### 3. 研究開発成果 (4) 知的財産権等の確保に向けた取組

#### ◆ 知的財産権の確保に向けた取組

- 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※   | 計※           |
|----------------------|--------------|------------|------------|-----------|--------------|
| 特許出願件数<br>(うち外国出願)   | 380<br>(116) | 83<br>(35) | 54<br>(22) | 8<br>(5)  | 525<br>(178) |
| 特許登録件数※※<br>(うち海外登録) | 13<br>(6)    | 35<br>(17) | 42<br>(15) | 10<br>(8) | 100<br>(46)  |

※2020年8月31日現在 (非公開セッション発表テーマ分及び卒業分室分を集計)  
※※ 1件の出願に対して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

## 概要

|                            |  | 最終更新日    | 2020年10月9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/<br>PMまたは担当者         | <p>省エネルギー部</p> <p>岩坪 哲四郎（2015年7月～2016年4月、2020年4月～）：PM（2020年4月～現在）</p> <p>小笠原 有香（2017年7月～）：サブPM（2018年7月～現在）</p> <p>楠瀬 暢彦（2015年4月～2017年8月）：PM（2015年4月～2017年8月）</p> <p>今田 俊也（2017年8月～2018年6月）：PM（2017年9月～2018年6月）</p> <p>近藤 篤（2015年4月～2020年3月）：PM（2018年7月～2020年3月）</p> <p>梅村 茂樹（2015年4月～6月）、鍛冶 日奈子（2015年4月）、</p> <p>谷 泰範（2015年4月～2016年4月）、田中 裕司（2015年4月～2018年3月）、</p> <p>星野 光男（2015年4月～2018年3月）、松原 健（2015年5月～2018年4月）、</p> <p>永井 恒輝（2015年7月～2018年6月）、竹内 由実（2015年4月～2020年3月）、</p> <p>太田 年彦（2018年4月～現在）、高橋 伸幸（2018年5月～現在）、</p> <p>永田 重陽（2019年7月～現在）、亀田 治邦（2020年4月～現在）、</p> <p>島田 守（2020年4月～現在）、占部 亘（2020年7月～現在）</p>   |          |            |  |
| 0. 事業の概要                   | <p>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3R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<sub>2</sub>/年以上のCO<sub>2</sub>排出削減効果を目指す。</p>  |          |            |  |
| 1. 事業の位置<br>付け・必要性に<br>ついて | <p><b>事業実施の背景と事業の目的</b></p> <p>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<sub>2</sub>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。</p> <p>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。</p> <p>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として進行中のHorizon 2020でも、TASIO、TransFlexTeg、I-ThERM、DryFiciency、CREATE等、未利用熱の活用に</p> |          |            |  |

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 も計画されている。これら以外にも、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 3 R 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的、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 3 E + 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」(2018 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、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標準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)。

## 2. 研究開発マネジメントについて

|              |   |
|--------------|---|
| <b>事業の目標</b> | <p>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。</p> <p>研究開発目標と根拠</p> <p>研究開発項目①「断熱技術の研究開発」</p> <p>1) 研究開発の必要性</p> <p>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。</p> <p>2) 研究開発の具体的内容</p> <p>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。</p> <p>3) 達成目標</p> <p>【中間目標】</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・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）</li><li>・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）</li></ul> <p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・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）</li></ul> <p>研究開発項目②「遮熱技術の研究開発」</p> <p>1) 研究開発の必要性</p> <p>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。</p> <p>2) 研究開発の具体的内容</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>3) 達成目標</p> <p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・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）</li></ul> |
|--------------|---|

#### 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を確立し、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、100→200℃加熱で COP:3.5 以上を達成するヒートポンプシステムの開発 (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)  $700\mu\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}^2$  を有する有機材料及び温度差 35℃以下で、出力密度  $20\mu\text{W}/\text{cm}^2$  を有するモジュールの開発 (2017 年度末)
- ・ $1.5\text{W}/\text{cm}^2$  の発電モジュール、発電素子の実用化開発 (2020 年度末)
- ・200℃～600℃で使用可能な発電効率 15%以上を有するモジュールの開発及び出力 200W を達成する発電ユニットの開発 (2022 年度末)
- ・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「熱マネー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「熱マネー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、高効率熱マネー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ー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/cm<sup>2</sup>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⑥「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)

|  |   |   |        |        |        |        |        |       |  |
|--|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--|
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>・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）</li> <li>・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）</li> <li>・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）</li> </ul> <b>【最終目標】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・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）</li> <li>・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）</li> <li>・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）</li> </ul> |   |        |        |        |        |        |       |  |
| <b>事業の計画内容</b>   | 主な実施事項  | 2015fy  | 2016fy | 2017fy | 2018fy | 2019fy | 2020fy |       |  |
|  | ①蓄熱技術の研究開発  | →   |        |        |        |        |        |       |  |
|  | ②遮熱技術の研究開発  | →   |        |        |        |        |        |       |  |
|  | ③断熱技術の研究開発  | →   |        |        |        |        |        |       |  |
|  | ④ヒートポンプ技術の研究開発  | →   |        |        |        |        |        |       |  |
|  | ⑤熱電変換材料・デバイス高性能高信頼化技術開発   | →   |        |        |        |        |        |       |  |
|  | ⑥排熱発電技術の研究開発  | →   |        |        |        |        |        |       |  |
|  | ⑦熱マネージメントの研究開発  | →   |        |        |        |        |        |       |  |
|  | ⑧熱関連調査・基盤技術の研究開発  | →   |        |        |        |        |        |       |  |
| <b>事業費推移</b><br>(会計・勘定別にNEDOが負担した実績額(評価実施年度については予算額)を記載)<br>(単位:百万円) | 会計・勘定   | 2015fy  | 2016fy | 2017fy | 2018fy | 2019fy | 2020fy | 総額    |  |
|  | 一般会計  |   |        |        |        |        |        |       |  |
|  | 特別会計(需給)  | 1,850   | 1,500  | 650    | 650    | 630    | 650    | 5,930 |  |
|  | 開発成果促進財源  |   |        | 67     |        | 45     | 99     | 211   |  |
|  | 総NEDO負担額  | 1,920   | 1,721  | 917    | 650    | 675    | 749    | 6,632 |  |
|  | (委託)  | 1,920   | 1,721  | 917    | 603    | 630    | 691    | 6,482 |  |
|  | (助成)<br>助成率2/3  | 0   | 0      | 0      | 47     | 45     | 58     | 150   |  |
| <b>開発体制</b>  | 経産省担当原課   | 製造産業局 金属課(～2019年度)<br>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  | 小原 春彦 (国立研究開発法人 産業技術総合研究所 理事<br>エネルギー・環境領域 領域長)                 |        |        |        |        |        |       |  |
|  | プロジェクトマネージャー  | 岩坪 哲四郎 (国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構<br>省エネルギー部 特定分野専門職)          |        |        |        |        |        |       |  |

|  |     |  |
|--|-----|--|
|  | 委託先 | <p>委託先：未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合（TherMAT）<br/> 組合員（参加 15 社、1 財団、1 研究機関）<br/> 共同実施：早稲田大学、岡山大学、大阪大学、東京大学、<br/> 名古屋大学、東北大学、山口東京理科大学、<br/> 物質材料研究機構、山口大学、<br/> 九州大学、佐賀大学、九州産業大学<br/> （2020 年 10 月時点）</p> <p>研究開発項目①：断熱技術の研究開発<br/> 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）</p> <p>研究開発項目②：遮熱技術の研究開発（2017 年度末で終了）</p> <p>研究開発項目③：蓄熱技術の研究開発<br/> 守口分室（パナソニック株式会社（2019 年度末で終了））<br/> 豊田分室（トヨタ自動車株式会社（2018 年度末で終了）、<br/> 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<br/> 終了））</p> <p>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<br/> つば分室（古河機械金属株式会社）<br/> ひたち分室（株式会社日立製作所）<br/> 横浜分室（古河電気工業株式会社）<br/> 塩谷分室（日本サーモスタット株式会社、株式会社安永）</p> <p>研究開発項目⑥：排熱発電技術の研究開発<br/> 守口分室（パナソニック株式会社（2019 年度末で終了））</p> <p>研究開発項目⑦：熱マネージメントの研究開発<br/> 豊田分室（トヨタ自動車株式会社（2018 年度末で終了））<br/> 広島分室（マツダ株式会社）<br/> 佐野分室（マレリ株式会社、日本エクスラン工業株式会社）<br/> 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）<br/> 守口分室（パナソニック株式会社）</p> <p>研究開発項目⑧：熱関連調査・基盤技術の研究開発<br/> 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、<br/> 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）<br/> 神戸分室（三菱重工サーマルシステムズ株式会社、三菱重工工業株式会社、<br/> 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）</p> <p>※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</p> |
|--|-----|--|

|          |  |   |
|----------|--|---|
|          | 助成先  | <p>助成先：未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合（TherMAT）<br/> 組合員（参加 2 社）<br/> 共同実施：早稲田大学<br/> （2020 年 10 月時点）</p> <p>研究開発項目④：ヒートポンプ技術の研究開発<br/> 守谷分室（株式会社前川製作所）<br/> 兵庫分室（三菱重工サーマルシステムズ株式会社）</p> |
| 情勢変化への対応 | <p>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。</p> <p>①プロジェクトの体制強化</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・「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）</li> <li>・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 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）</li> <li>・「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）</li> <li>・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）</li> </ul> <p>②ステージゲート方式の採用</p> <p>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。</p> <p>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</p> <p>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。</p> <p>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「第 10 回日独エネルギー・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。</p> |   |

|   |   |  |
|---|---|--|
| 2017 年度<br>中間評価結果<br>への対応   | 中間評価における主たる指摘事項とその対応（2017 年度末時点）は下表のとおり。  |  |
|   | <b>指摘事項</b>   | <b>対応</b>  |
|   | 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。   | <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><br>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（ $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ）、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。  | <u>研究開発項目④「ヒートポンプ技術の開発」</u><br>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。<br><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><br>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。 | <u>研究開発項目②「遮熱技術の研究開発」</u><br>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。<br><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><br>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。<br><u>研究開発項目⑥「排熱発電技術の研究開発」</u><br>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。   |  |
| 評価に関する<br>事項  | 事前評価  | 2012 年度 経済産業省実施  |
|   | 中間評価  | 2015 年度、2017 年度、2020 年度  |
|   | 事後評価  | 2023 年度（予定）  |
| 3. 研究開発成果<br>について   | <p><u>研究開発項目①：断熱技術の研究開発</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>不凍タン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、1500℃の耐熱性、熱伝導率 0.20W/m・K、圧縮強度 15MPa 以上の特性を有する断熱材を開発した。</li> <li>スラリー調製工程と凍結工程の付帯作業の効率化と処理量増加により両工程のリードタイムを短縮し、並形で 300 個/月の作製を可能にする技術を確立した。また、凍結工程や凍結乾燥工程のスケールアップ検証により、並形断熱材 500 個/月が生産可能な製造工程を確立する見込みである。</li> <li>検証炉にて開発部材の性能評価を行い、排熱削減 50% 省エネ炉の設計指針を決定する見込みである。</li> </ul> <p><u>研究開発項目③：蓄熱技術の研究開発</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>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ー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。</li> </ul> |  |

- ・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

- ・冷媒にハイドロフルオロオレフィン（HFO）系を用いた最高温度 200℃（80℃→180℃加熱）、COP（成績係数）3.5 以上のヒートポンプ試作機の設計を完了した。2020 年度末までに製作を完了する見込みである。このとき、ターボ圧縮機の定格回転数での運転を実施し断熱効率 70%以上であることを確認するとともに、高温高压熱交換器の仕様を決定した。
- ・200℃温水出力に対応ができ既に入手可及な冷媒候補で、160℃超温水出力での要素試験を行い、機器要素の計画仕様と試験値がほぼ一致することを確認し、機器要素の設計技術の信頼性を確認した。
- ・研究開発項目⑧で開発した新規低 GWP（地球温暖化係数）冷媒候補での 200℃温水出力ヒートポンプのサイクル性能評価を完了して 200℃温水出力ヒートポンプの基本制御設計を確立し、開発機の基本計画を完了させ、製作図を完成させた。また、開発した設計技術を用いて、新規冷媒候補での 200℃温水出力ヒートポンプの機能品の採用部品を決定した。
- ・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、「スクテルライト」「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。

- ・スクテルライト系：熱電モジュール基本技術を開発し、耐久性が 600℃、5,000h 以上の基板付熱電モジュール技術を確立した。また、熱電発電ユニットの構造を適正化し、出力 200W の熱電発電ユニットを試作した。
- ・クラスレート化合物：高性能クラスレート焼結体の開発・試作を行い、変換効率 $\eta=12\%$ のモジュールに必要な p 型素子ならびに n 型素子の作製技術の確立を図った。また、多接合型オールクラスレートモジュールを試作・評価を行い、変換効率 $\eta=12\%$ を持つモジュール化技術の確立を図った。
- ・シリサイド系-1：試作した熱電変換モジュールのコージエネ適用実証を見据え、実証実験の設計を実施した。また、要素試験により熱源と熱電変換モジュールとの熱交換方式を確認した。さらに、熱電変換材料の高度化に向けて、低コスト環境低負荷なシリコン系バルク材料をターゲットに、マンガンシリサイドバルク材料で  $ZT>1$  を見通した。また、材料スケールアップにおける課題を抽出した。
- ・シリサイド系-2：発電モジュール形態（配線部 + 接合材料 + 電極付き素子）での接合界面の観察、界面抵抗の測定等の耐久性評価（接合界面の観察、界面抵抗の測定等）を実施することにより、 $1.5\text{W}/\text{cm}^2$  の発電モジュールに適用可能な発電素子の製造プロセスを確立した。また、モジュールの早期の実用化検討対象として、農業用途のバイオマスボイラーへの展開を検討し、2020 年度末にその実証試験を行い、作物への生育効果がある事を確認するために、バイオマスボイラー用途の環境を想定した耐久評価を実施した。
- ・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：熱マネー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、個別のメソッ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、放射（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。

▽自動車の熱マネージメント：

- ・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。
- ・海外製ハイブリット車等を用いて夏季、冬季、通期における各環境温度 -10～40℃、車速 0～130 km/h で熱流れの計測を行い、熱流れモデルの構築に必要なデータを取得するとともに実車ベースの熱流れの見える化を行った。また、開発したモデルの精度が目標に達していることを確認した。
- ・車両用小型吸収冷凍機の実現に向けて、車載システムの動作を確認し、夏季環境条件での車両走行時のシステム性能評価を実施し、システム制御を検討するとともに、数 kW 冷熱の出力を確認した。また、熱交換器の更なる性能向上のため、研究開発項目⑤の小規模研究開発で開発した熱流センサを応用し、熱交換分布を計測把握した。さらに、更なる小型化に向け、分離膜式吸収冷凍機の構造設計と性能評価を行った。
- ・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、高分子吸着剤塗膜ポリマーネットワーク高度化により、高耐水性吸着剤塗膜の基本塗布技術を確立した。さらに、信頼性・耐久性を有する高分子吸着剤を用いて、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、実証先における要求仕様を明らかにし、蓄熱モジュールにおいて、過冷却解除までの時間 30 秒以内、過冷却の保持時間 24 時間、蓄熱密度 0.1MJ/L、蓄放熱速度の要求仕様を、同時に満たすことを検証した。

▽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、実証先における蓄熱密度、蓄放熱速度の要求仕様を、同時に満たすことを検証した。
- ・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-

|                          |  |      |            |     |                           |                      |  |
|--------------------------|--|------|------------|-----|---------------------------|----------------------|--|
|                          | <p>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、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。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul> |      |            |     |                           |                      |  |
|                          | <table border="1"> <tr> <td data-bbox="354 1064 582 1131">投稿論文</td> <td data-bbox="582 1064 1461 1131">「論文」 103 件</td> </tr> <tr> <td data-bbox="354 1131 582 1198">特 許</td> <td data-bbox="582 1131 1461 1198">「出願」 525 件 (うち外国出願 178 件)</td> </tr> <tr> <td data-bbox="354 1198 582 1310">その他の外部発表<br/>(プレス発表等)</td> <td data-bbox="582 1198 1461 1310">「研究発表・講演」 445 件、「新聞・雑誌等」 23 件、<br/>「その他(展示会への出展等)」 80 件、「受賞実績」 22 件</td> </tr> </table>  | 投稿論文 | 「論文」 103 件 | 特 許 | 「出願」 525 件 (うち外国出願 178 件) | その他の外部発表<br>(プレス発表等) | 「研究発表・講演」 445 件、「新聞・雑誌等」 23 件、<br>「その他(展示会への出展等)」 80 件、「受賞実績」 22 件 |
| 投稿論文                     | 「論文」 103 件   |      |            |     |                           |                      |  |
| 特 許                      | 「出願」 525 件 (うち外国出願 178 件)  |      |            |     |                           |                      |  |
| その他の外部発表<br>(プレス発表等)     | 「研究発表・講演」 445 件、「新聞・雑誌等」 23 件、<br>「その他(展示会への出展等)」 80 件、「受賞実績」 22 件   |      |            |     |                           |                      |  |
| 4. 成果の実用化に向けた取組及び見直しについて | <p>早期の実用化促進とともに実用化のために必要な新たな技術開発シーズを取り込む等、研究開発テーマの新陳代謝が良い活力ある研究開発プロジェクトを目指し、成果の実用化に向けた取組みについては特に注力してきた。主な活動内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>関係者の不断の努力により、すでに数件の成果が実用化された。特に、従来の熱回収温度の下限を 75℃から 55℃に低減して、従来比約 2 倍の性能を実現する一重効用ダブルリフト吸収冷凍機については、日立ジョンソンコントロールズ空調（株）が本開発技術を適用した吸収冷凍機「DXS」の販売を開始し、2019 年には初号機が出荷され、商用運転を開始した。また、開発成果として広報するために、INCHEM2019 及び ENEX2020 にて DXS の実機展示を行った。</li> <li>産業用の高温ヒートポンプについて、工場のエネルギー管理者などを含め、そのコストや導入効果（省エネルギー性、CO<sub>2</sub> 排出削減効果）、ヒートポンプシステムの構成などを予め定量的に評価することが困難なことが、導入障壁の 1 つとなっている。そこで、2018 年度から「高温ヒートポンプ等技術のモデルケース検討 WG」を立ち上げ、関係分室、関係機関、共同実施先と連携して、既存のシステムのみならず開発中の高温ヒートポンプ等のシステムについて、そのコストや導入効果等の評価や設計を可能とする汎用的なモデル・シミュレータとデータセットの構築、それらを用いたモデルケース検討を実施してきた。</li> <li>本事業で実施している高性能熱電発電モジュールの研究開発の加速及び近い将来の熱電発電モジュールの市場拡大を見据えて、正確で迅速な熱電発電モジュールの発電性能評価技術の開発と、国際標準化の活動を推進してきた。</li> </ul>   |      |            |     |                           |                      |  |

|               |  |   |
|---------------|--|---|
|               | <p>・ニュースリリースや展示会でのサンプル展示、シンポジウムの開催や、海外とのワークショップ、関係雑誌での未利用熱活用特集などを積極的に行い、取組みや成果の広報とともに、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の反映を行った。</p> <p>また、第 5 次エネルギー基本計画において、廃熱利用や熱システムの脱炭素化を促進することが示されたことなどを踏まえ、本事業は 2020 年度から省エネ施策として再構築した。</p> <p>2020 年度の間目標は、ほとんどのテーマで達成見込みであり、一部テーマでは最終目標を前倒しで達成している。上述の活動を継続することを前提として、成果の実用化と普及を見通している。</p> |   |
| 5. 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、2018 年 3 月、2019 年 2 月、2020 年 2 月、2020 年 5 月 |