

# 「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
-----	--

# —目次—

## 内容

概要.....	4
プロジェクト用語集.....	9
<b>1. 意義・アウトカム(社会実装)達成までの道筋.....</b>	<b>11</b>
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
<b>2. 目標及び達成状況.....</b>	<b>20</b>
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
<b>3. マネジメント.....</b>	<b>28</b>
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
<b>4. 目標及び達成状況の詳細.....</b>	<b>37</b>
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	<p>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）</p> <p>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）</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. 意義・アウトカム	<p>（社会実装）達成までの道筋</p>		
1.1 本事業の位置付け・意義	<p>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<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。これら以外にも含め、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。</p> <p>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</p>		

	<p>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。</p> <p>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)。</p> <p>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)。</p>
1.2 アウトカム達成までの道筋	<p>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-CO<sub>2</sub>/年程度以上のCO<sub>2</sub>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。</p>
1.3 知的財産・標準化戦略	<p>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、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。</p>

	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	<p>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-CO<sub>2</sub>/年程度以上のCO<sub>2</sub>削減効果</p> <p>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ー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。</p> <p>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。</p>									
2.2	アウトプット目標及び達成状況	<p>【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<sup>2</sup>)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、          【熱マネージメント】産業分野等の熱マネージメント技術・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。</p>									
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	<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 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)</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> <li>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)</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>									
	2020年度中間評価結果への対応	<table border="1"> <thead> <tr> <th>指摘事項</th> <th>対応</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>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)</td> <td>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。</td> </tr> <tr> <td>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)</td> <td>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。</td> </tr> <tr> <td>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)</td> <td>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。</td> </tr> </tbody> </table>	指摘事項	対応	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なった。
		指摘事項	対応							
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なった。									
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>事前評価</td> <td>2012年度 経済産業省で事前評価</td> </tr> <tr> <td>中間評価</td> <td>2015、2017、2020年度 中間評価実施</td> </tr> <tr> <td>終了時評価</td> <td>2023年度 終了時評価実施</td> </tr> </tbody> </table>	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				
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	119 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：518 件、プレス発表：20 件、雑誌・新聞・広報媒体：45 件、展示会出展：85 件、 受賞実績：28 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的な元素(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。
スキッターライト	スキッターライト 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°C) 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。

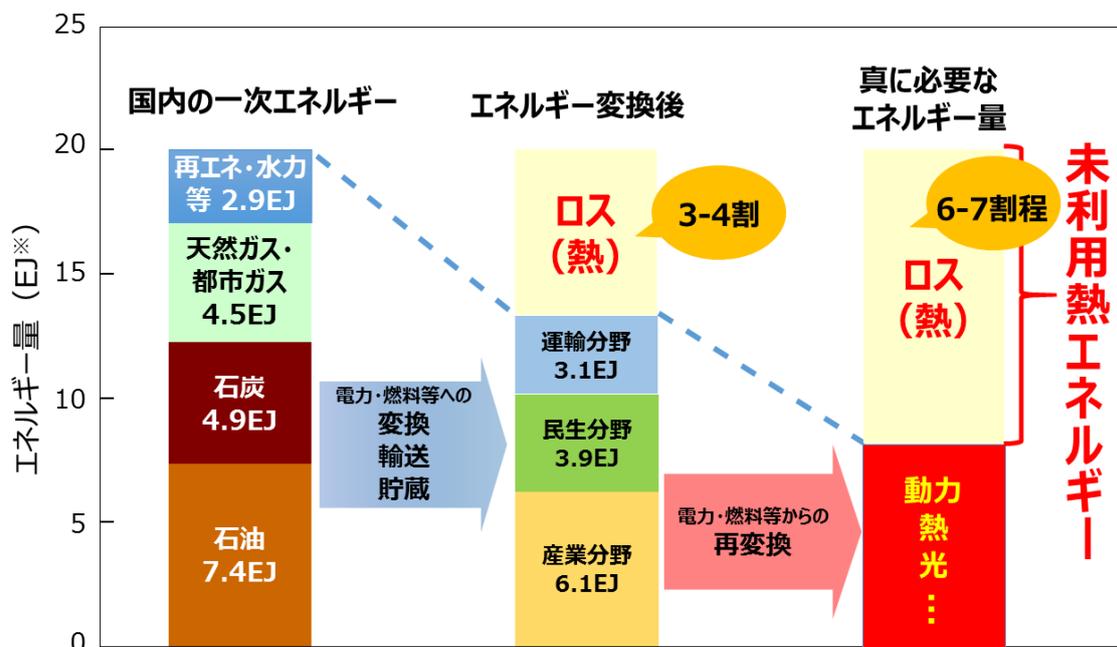
不凍タンパク質	極地の魚類の血漿から発見され、主に生体の凍結防止や氷の再結晶防止による生物の生命維持に寄与するタンパク質のことです。低熱伝導率の断熱材を実現するためには気孔率を高める必要があるが、気孔率を高めると氷結晶由来の粗大な欠陥が生じてしまい、強度が大きく低下してしまうという問題があります。結晶のプリズム面に吸着し結晶成長と粒成長(再結晶化)を強く抑制する不凍タンパク質(グリコプロテイン)を氷結晶成長抑制物質として添加することにより、粗大欠陥が消失し、断熱材の圧縮強度を大きく増大することが出来ます。
未利用熱エネルギー	一次エネルギーを動力などの真に必要なエネルギーへと変換する際に、利用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、熱電変換効率が高く、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する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。



※EJ=10<sup>18</sup> ジュール

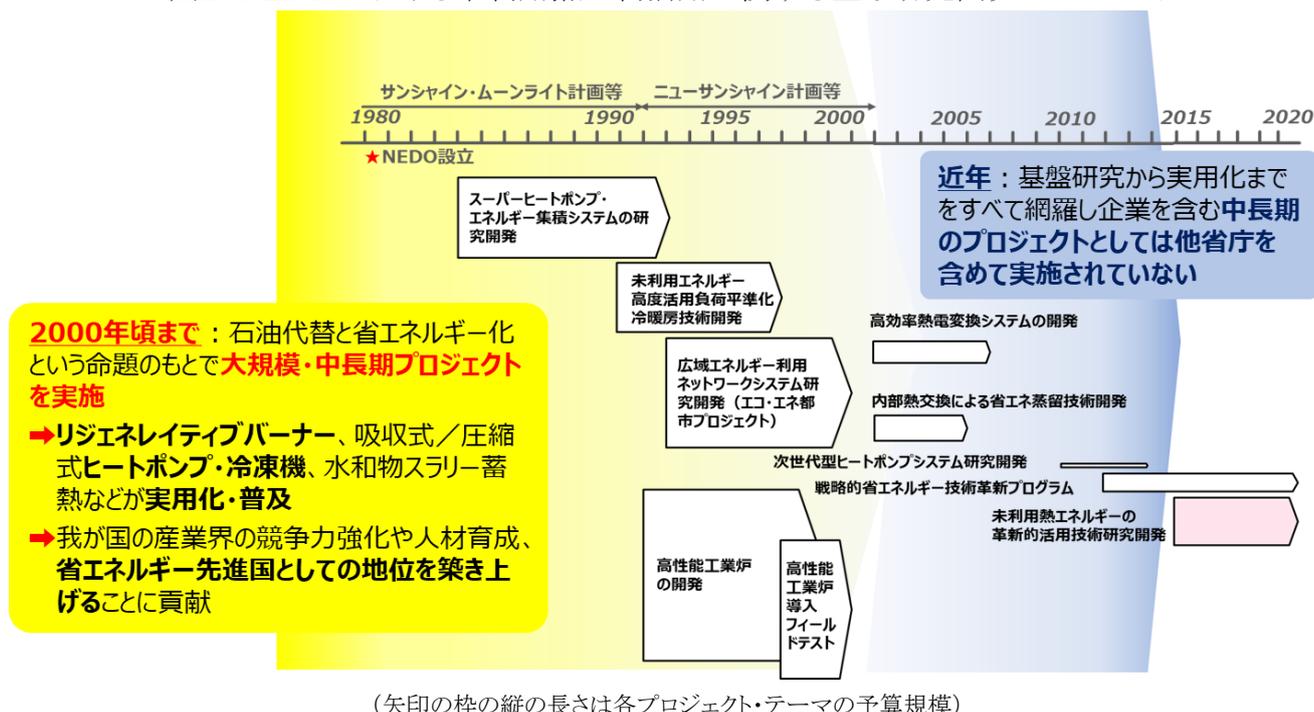
出典：資源エネルギー庁 平成30年度（2018年度）エネルギー需給実績（確報）を基にNEDO作成

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)。

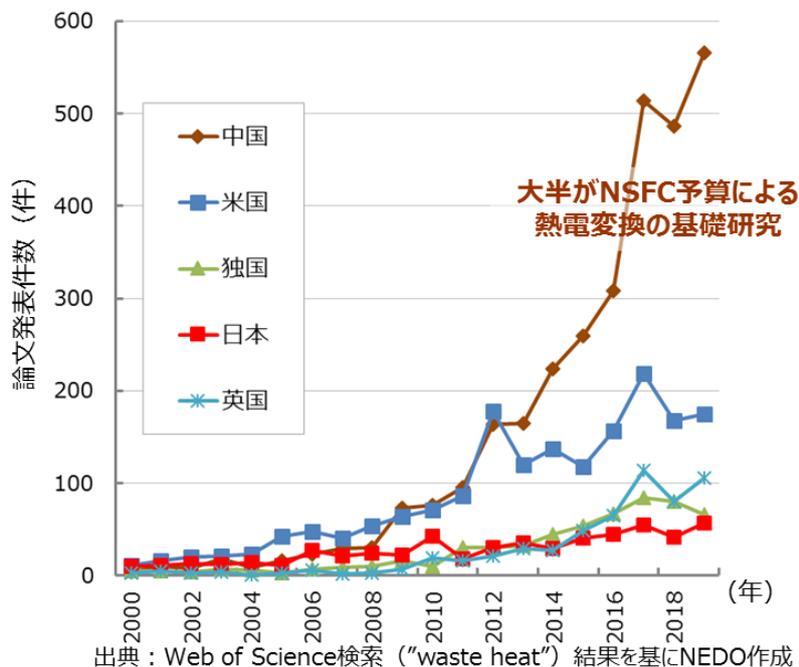


図5 “waste heat”に関する論文発表動向(世界上位5か国)

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、ハーフホイスター系、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)。

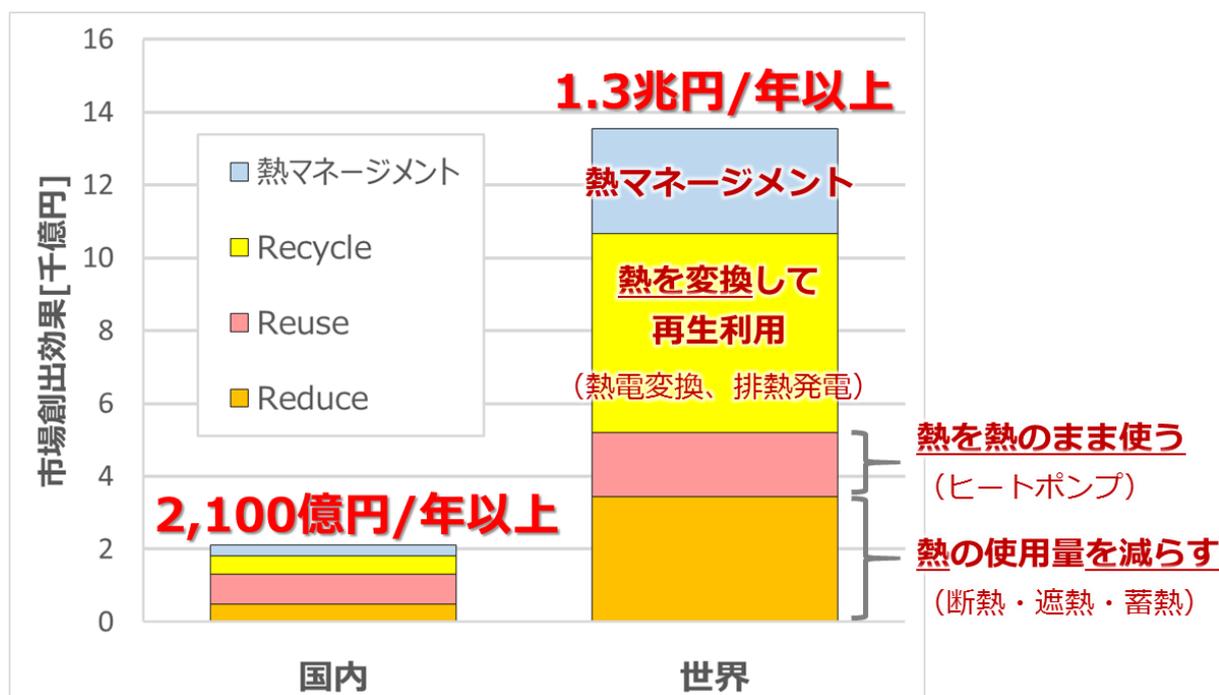


図6 本事業の費用対効果(市場創出効果)

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)。

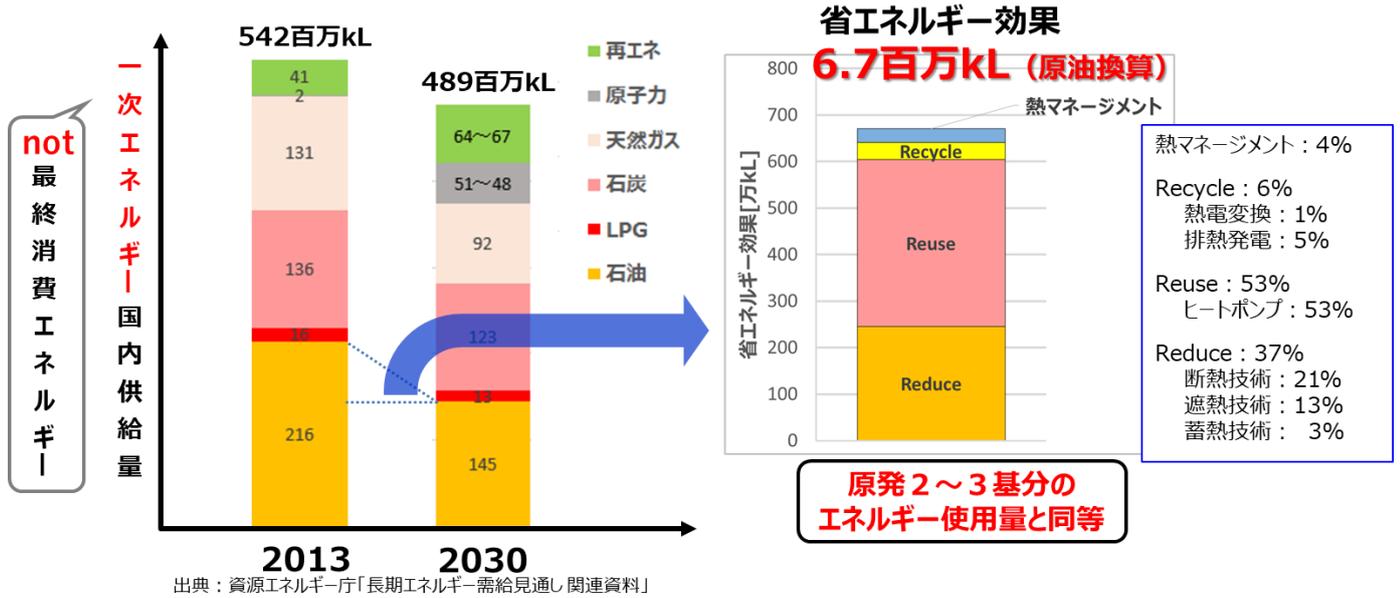
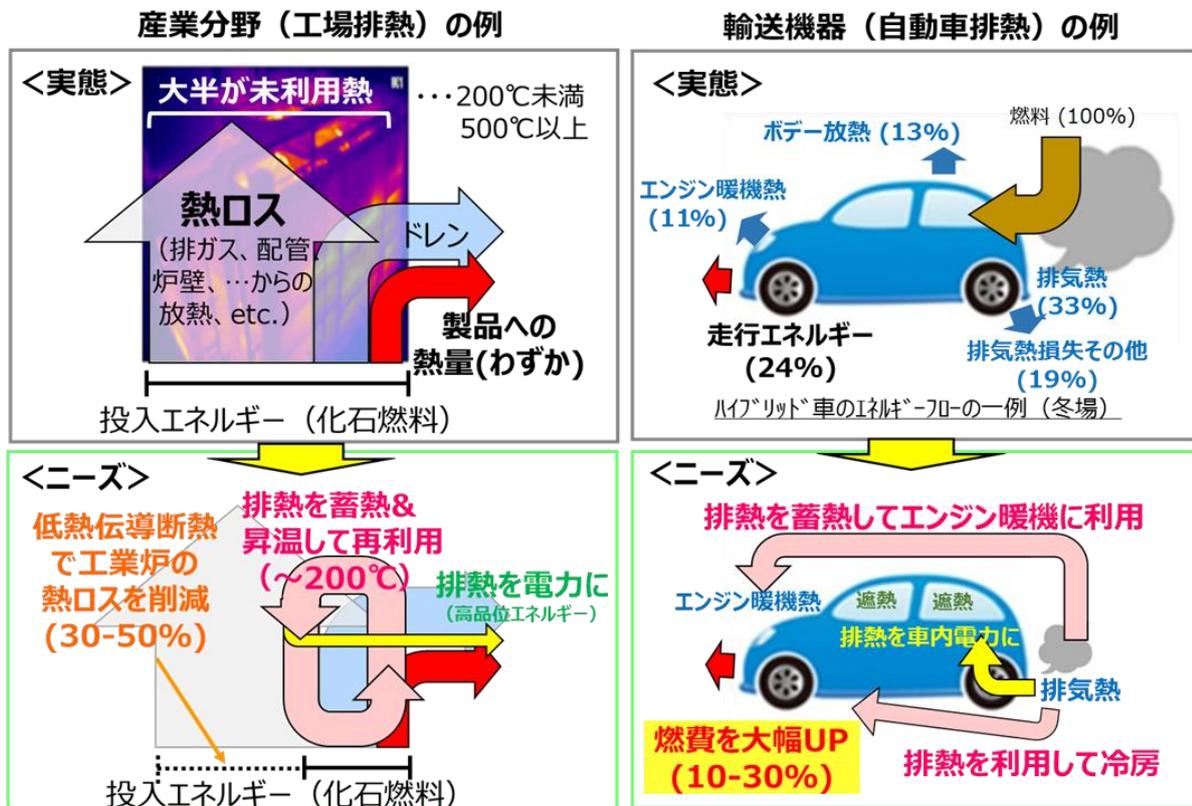


図7 本事業の費用対効果(省エネルギー効果)

## 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-CO<sub>2</sub>/年程度以上のCO<sub>2</sub>削減効果を見込んでいる(図8)。



**原油換算で600万kL/年程度以上の省エネ、  
1,700万t-CO<sub>2</sub>/年程度以上のCO<sub>2</sub>削減効果@2030年**

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。

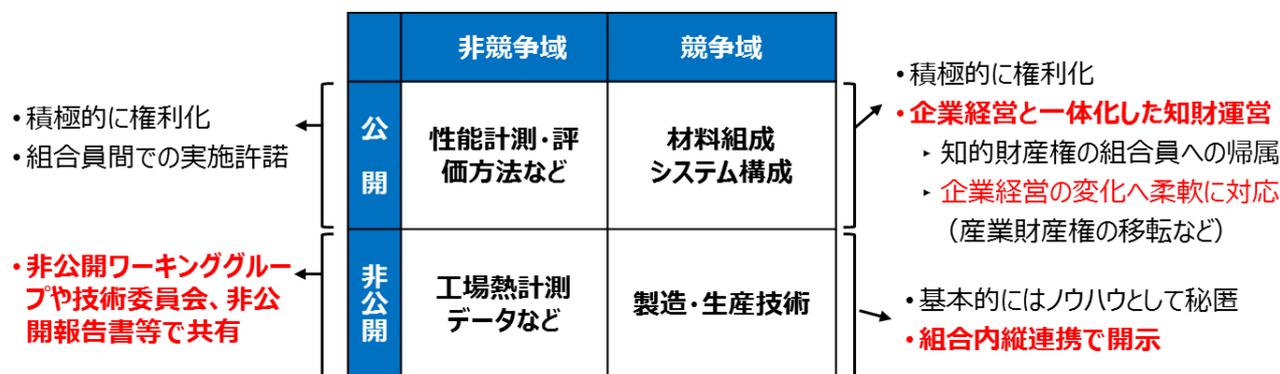


図9 NEDO の知的財産権等に関する戦略

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1,170万t-CO<sub>2</sub>/年程度以上のCO<sub>2</sub>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°C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°C以下で蓄熱密度 1MJ/kg、20°C～25°C環境下で 24h 以上(2019 年度)
- ・高温ヒートポンプ:80→180°C加熱で COP(成績係数):3.5 以上(2022 年度)
- ・熱電:200°C～600°C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	<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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>現在使われている耐熱れんが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れんがの強度を兼ね備えた性能を実現する</li> </ul>
②遮熱技術の研究開発	<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>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> </ul>
③蓄熱技術の研究開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>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)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>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)</li> <li>-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)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> <li>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</li> </ul>
④ヒートポンプ技術の研究開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> <li>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</li> <li>※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。</li> </ul>

<p>⑤熱電変換材料・デバイス 高性能高信頼化技術開発</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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<sup>2</sup>)を達成する発電ユニットの開発</li> <li>・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)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・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</li> </ul>
<p>⑥排熱発電技術の研究開発</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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)</li> </ul>
<p>⑦熱マネジメントの研究開発</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・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</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・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</li> </ul>
<p>⑧熱関連調査・基盤技術の研究開発</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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)</li> <li>(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)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(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</li> <li>(b) 車両からの排熱を利用し、極低温時でも高 COP で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</li> </ul>
	<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</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</li> <li>・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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・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</li> </ul>

		<p>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</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> <li>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</li> </ul>
--	--	--

## 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	<ul style="list-style-type: none"> <li>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</li> </ul>	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>
②遮熱技術の研究開発	<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)の遮熱フィルムを開発(2017 年度末)</li> </ul>	○	
③蓄熱技術の研究開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>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)</li> <li>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)</li> </ul>	◎	(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)

	<ul style="list-style-type: none"> <li>・-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)</li> </ul>		
④ヒートポンプ技術の研究開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・圧縮機 2 台連結運転での定格回転数運転を確認した。</li> <li>・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。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> </ul>
⑤熱電変換材料・デバイス高性能高信頼化技術開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> <li>・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<sup>2</sup>を達成、発電ユニットの出力は 200W を達成した。</li> <li>・シリサイド系において、出力密度 1.24W/cm<sup>2</sup>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。</li> </ul>	○	
⑥排熱発電技術の研究開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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)</li> </ul>	◎	(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	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> </ul>	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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</li> </ul>

	<p>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 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</li> </ul>		
<p>⑧熱関連調査・ 基盤技術の研究開発</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 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。</li> <li>• 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。</li> <li>• 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。</li> <li>• 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。</li> <li>• 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、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。</li> <li>• 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</li> </ul>	<p>○</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 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</li> <li>• 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</li> </ul>

	<p>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 <math>Mg(OH)_2</math> 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。</p> <ul style="list-style-type: none"> <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、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</li> </ul>		
--	--	--	--

### 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(「サーキュラーエコミー」「バイオエコミー」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。

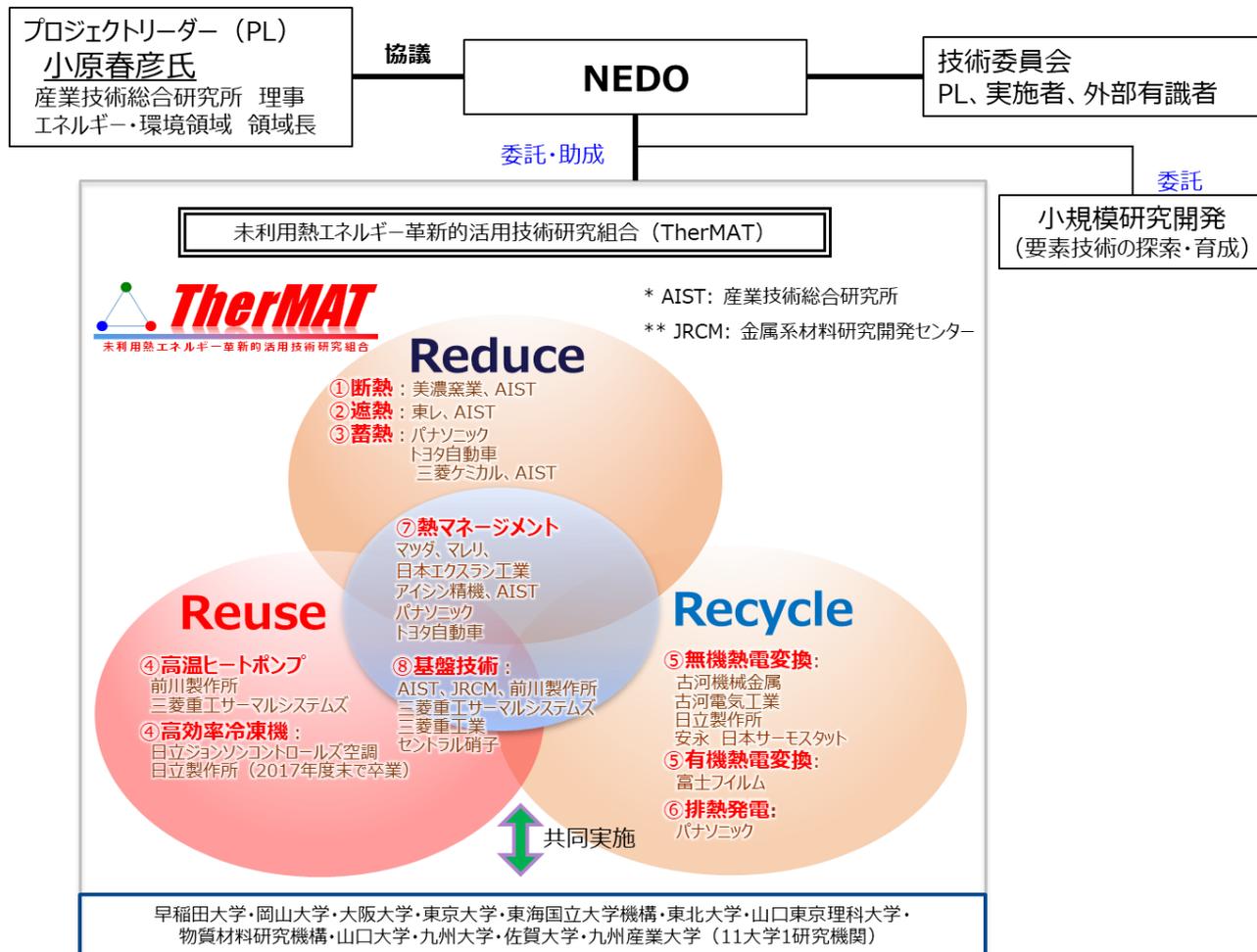


図 12 実施体制

#### 【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)		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
①断熱技術の研究開発									
②遮熱技術の研究開発									
③蓄熱技術の研究開発									
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									

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( $\mu$ W/cm <sup>2</sup> )、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。

<p>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)</p>	<p><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。</p>
<p>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)</p>	<p>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。</p>
<p>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)</p>	<p>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。</p>
<p>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)</p>	<p>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</p>

### 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にするため、広島分室を中心とした All TherMAT の取り組みとして、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/cm<sup>2</sup>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/cm<sup>2</sup>)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少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課題となっており、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/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。
- ・長期蓄熱材料:温度 90°C 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°C 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°C(目標値 60°C 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°C(被加熱媒体 80°C→180°C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/cm<sup>2</sup>、耐熱性 600°C、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/cm<sup>2</sup> 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 /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)

- ・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。

小型で軽量の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°Cから 120°C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、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