



技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight

Vol. **101**

熱エネルギー分野の 技術戦略策定に向けて

2020年11月

はじめに 2

1章 解決すべき社会課題と実現したい将来像 2

1-1 脱炭素社会に向けた将来像 2

1-2 省エネルギーにおける熱エネルギーの重要性 4

1-3 世界の熱エネルギー技術の研究開発政策動向 5

1-4 日本の熱エネルギー技術の政策動向 7

1-5 日本の熱エネルギー技術の研究開発政策の動向 8

2章 解決・実現手段の候補 9

2-1 省エネルギー技術における熱エネルギー技術の位置付け 9

2-2 熱供給の脱炭素化の必要性 10

2-3 技術開発の対象 11

2-4 低温排ガスの熱利用 14

2-5 高温排ガスの熱利用 16

2-6 関連技術の論文・特許動向 19

3章 おわりに 26

TSCとはTechnology Strategy Center（技術戦略研究センター）の略称です。

はじめに

化石燃料を利用した蒸気機関が発明された産業革命以降、二酸化炭素 (CO₂) 濃度は上昇し続けている^{※1}。2017年のCO₂平均濃度は405ppmとなっており、産業革命以前の278ppmの約1.5倍に到達している^{※2}。この状況下において、2015年には第21回気候変動枠組条約締約国会議 (COP21、開催地パリ) で、気候変動抑制に関する協定 (パリ協定) が締結された。締結国は、「温室効果ガス (GHG: Greenhouse Gas) について低排出型の発展のための長期的な戦略を立案し、及び通報するよう努力すべきである」ことが求められている。

本レポートはこのような動向に鑑み、低炭素社会、及び脱炭素社会へ転換するという社会課題を、省エネルギー技術、特に熱エネルギー技術により解決することを目的とするものである。

1章 解決すべき社会課題と実現したい将来像

1-1 脱炭素社会に向けた将来像

本レポートではIEA (International Energy Agency) のETP2017 (Energy Technology Perspectives 2017)^{※3}のシナリオを基に将来像を議論する。ベースシナリオのRTS (Reference Technology Scenario) は、省エネルギー技術の普及や再生可能エネルギーの導入により、CO₂排出量削減が進むシナリオであり、特別な対策がなされない場合のシナリオである6DS (6°C Scenario) に対し、2050年想定で150億トン／年程度のCO₂排出量削減が従来技術の普及によって達成されている。これに対し、2060年の脱炭素社会を実現するB2DS (Beyond 2°C Scenario) では、RTSから400億トン／年のCO₂排出量削減が必要とされている (図1)。

※1 "【2-1-3】化石燃料等からのCO₂排出量と大気中のCO₂濃度の変化". 原子力・エネルギー図面集.

<https://www.ene100.jp/zumen/2-1-3>

※2 WMO 温室効果ガス年報 (気象庁訳). 気象庁. 2018-11-22, 14号.

https://www.data.jma.go.jp/env/info/wdcgg/GHG_Bulletin-14_j.pdf

※3 <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017>

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

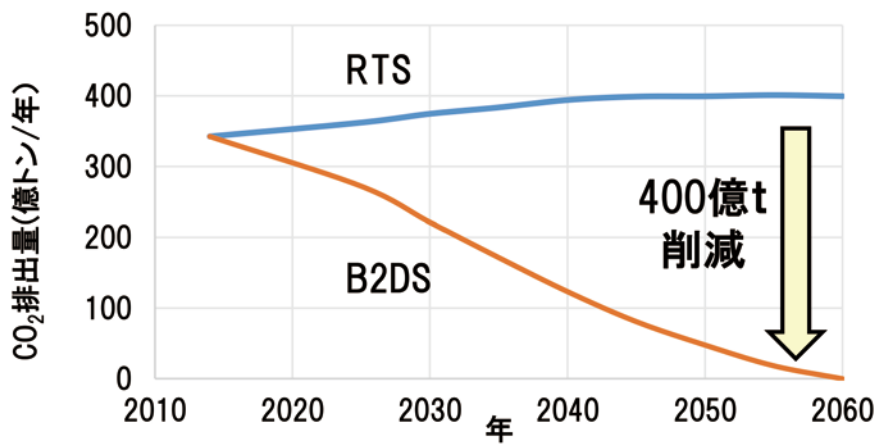


図1 IEA B2DSでのCO₂排出量

出所：IEA「Energy Technology Perspectives 2017」を基にNEDO技術戦略研究センター作成

次に、B2DSの実現に向けたCO₂排出量削減対策の将来像を図2に示す。本将来像においては、まずはエネルギー需要の削減を進め、再生可能エネルギーの導入やバイオエコノミーの推進、CCS (Carbon Capture & Storage) の利用による脱炭素社会の実現を目指している。

なお、エネルギー需要の削減には、サーキュラーエコノミーによる資源や素材需要の削減と省エネルギー技術の導入が必要不可欠となっている。特に、省エネルギー技術により、140億トン／年のCO₂排出量削減が期待されている。

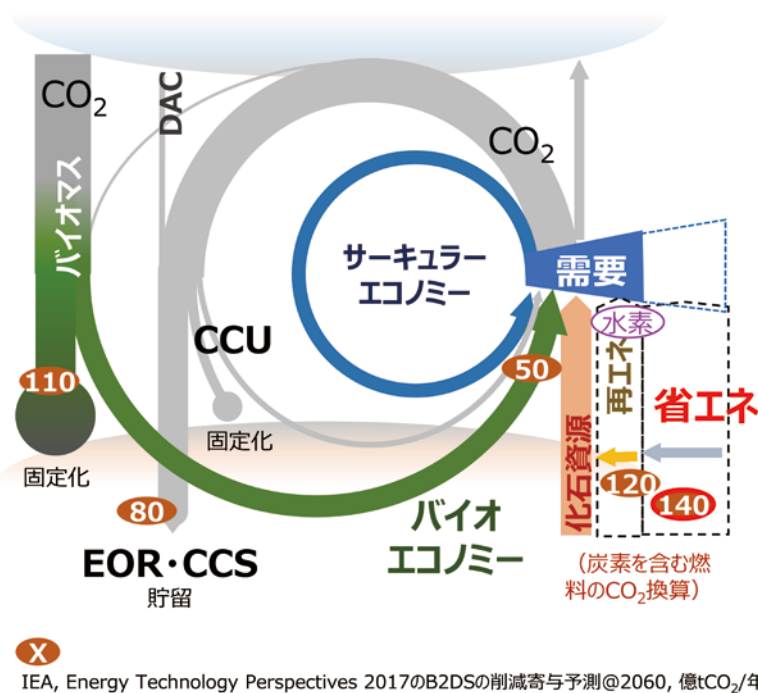


図2 CO₂排出量削減対策の将来像

出所：持続可能な社会の実現に向けた技術開発総合指針。NEDO技術戦略研究センター（2020）

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

1-2 省エネルギーにおける熱エネルギーの重要性

世界の最終エネルギー消費量の50%は熱エネルギーによるものであることが報告^{※4}されている。熱エネルギーは産業部門での利用が最も多く、様々な製品の加工での加熱や乾燥に利用されている。一方、民生部門においては、住居やオフィスビルでの暖房や給湯用に利用されている。これら部門からの熱エネルギー由来のCO₂排出量を図3に示す。

2017年時点の工業部門での熱供給によるCO₂排出量は50億トン／年にも達している。さらには、ビルディング（住居やオフィスビル）からも22億トンが排出され、これらの排出量の合計値は72億トン／年となる。IEAのETP2017によれば、全世界のCO₂の総排出量は342億トン／年に達しているが、このうち熱エネルギーに伴うCO₂排出量は21%を占め、輸送部門と比較しても同等の排出量となっている。すなわち、省エネルギーにおける熱エネルギーの脱炭素化はCO₂排出量削減への寄与が大きいことを示している。

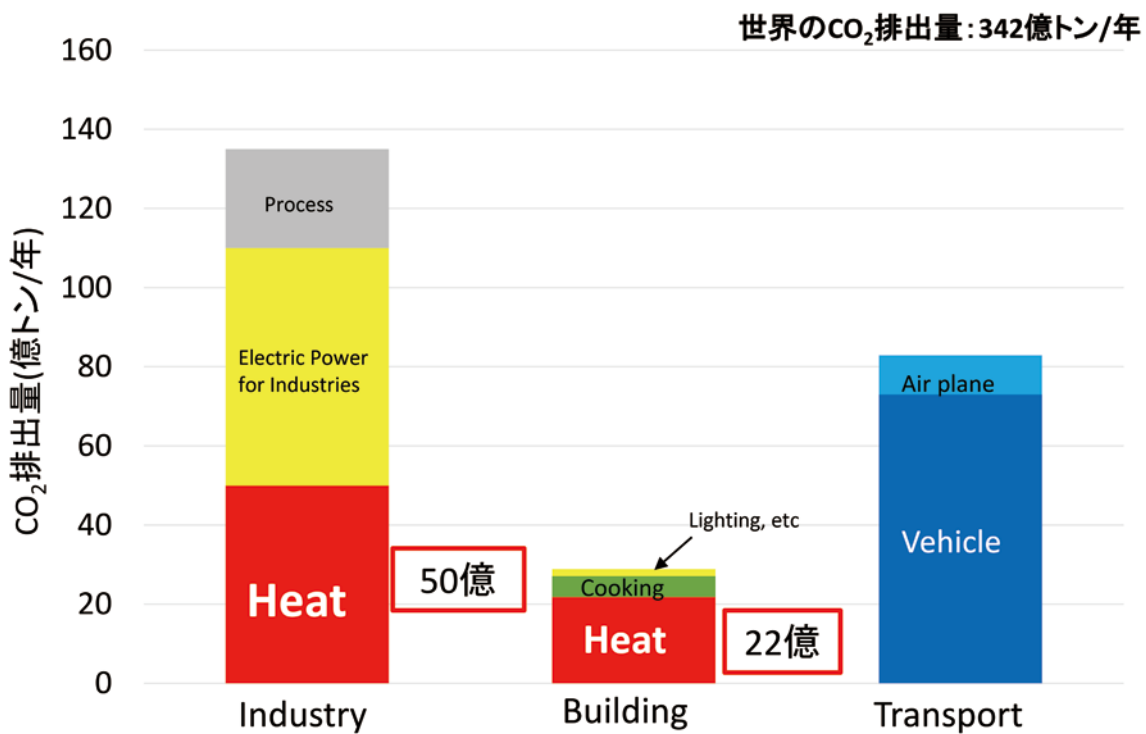


図3 各部門から排出されるCO₂排出量の内訳

出所：IEA「Energy Technology Perspectives 2017」等を基にNEDO技術戦略研究センター作成

※4 "World Energy Outlook". IEA. 2018. p.43.
<https://webstore.iea.org/world-energy-outlook-2018>

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

1-3 世界の熱エネルギー技術の研究開発政策動向

産業部門の脱炭素化を目指し、各国・地域での熱エネルギー技術の政策やロードマップが策定され、研究開発プロジェクトが実施されている（表1）。

表1 各国・地域での「熱関連技術」への政策・ロードマップや研究開発動向

	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Electrification of buildings and industry in the United States (LBNL, 2018) ※5 プロセス加熱の電化への転換の障害は経済性とのコメント。高温域の電化加熱は、チャレンジングな技術と位置づけ。 ✓ Low-Cost, High-Performance Polymer Composite Heat Exchangers Produced by Additive Manufacturing ※6 ポリマーコンポジット材料を用いた新しい熱交換器の研究開発を実施（2018～2021）
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 戦略的エネルギー技術計画（SET Plan：Strategic Energy Technologies Plan） 産業／民生部門、建物の省エネルギー化技術の研究開発に4億2,600万ユーロを投資※7（2018～2019）。 ✓ 工業プロセスの排熱を回収し、利用するTASIO ProjectやI-Thermo Projectを実施※8。 産業部門の低炭素化を実現するための技術開発。熱交換器が開発対象の一つ。
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 「グリーン産業指導目録（2019年版）」 「石炭のクリーンで高効率な利用と新型省エネ技術」の重要特別項目 空気熱利用ヒートポンプ応用やボイラー・工業炉の省エネルギー改造が研究開発の対象。
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ICEF Industrial Heat Decarbonization Roadmap (2019) ※9 高温利用かつCO₂排出量の多いセメント、鉄鋼、化学産業の脱炭素化のロードマップを作成。カーボンフリーな燃料利用、電化への転換、CCSを併用する方向性を示した。
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略（2019年6月）※10 「CO₂排出量の大幅削減に向けて推進すべき分野」として省エネルギー技術について言及。さらに、ボトルネック課題として、熱の有効利用が挙げられた。 ✓ 省エネルギー技術戦略2016（2019年7月）※11 2019年に重要技術の改定を行い、廃熱利用や熱システムの脱炭素化を促進するための技術を追加。 ✓ 革新的環境イノベーション戦略（2020年1月）※12 （未利用熱）工場における加熱工程等で有効に活用されずに捨てられている排熱を削減・回収・再利用するための技術開発が明記。

※5 <http://ipu.msu.edu/wp-content/uploads/2018/04/LBNL-Electrification-of-Buildings-2018.pdf>, Executive summary

※6 <https://www.energy.gov/eere/buildings/downloads/low-cost-high-performance-polymer-composite-heat-exchangers-produced>

※7 http://www.eem18.eu/gfx/eem-network/userfiles/_public/set_plan_lodz_27.06_final.pdf p.25.

※8 平成30年度 NEDO 調査事業「伝熱促進等技術の現状及び将来に関する展望調査」

※9 https://www.icef.go.jp/pdf/summary/roadmap/icef2019_roadmap.pdf

※10 https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/Long-term_strategy.pdf

※11 <https://www.nedo.go.jp/content/100895277.pdf>

※12 <https://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihui048/siryoe-2.pdf>

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

米国では、工業炉の電化やポリマーコンポジット材料利用の熱交換器開発研究プロジェクト^{※13}等、熱分野において先進的な研究開発が進められている。

欧州では、工業プロセス向けに、排熱を回収し、利用するプロジェクトが実施されており、産業部門の低炭素化に資する研究開発が複数実施されている。

中国では「グリーン産業指導目録(2019年版)」において、空気熱利用ヒートポンプ応用やボイラー・工業炉の省エネルギー改造が研究開発の対象となっている。

2019年にICEF (Innovation for Cool Earth Forum)

から「産業用途熱の脱炭素化」に関するロードマップが発行された。本ロードマップでは、世界のCO₂排出量の約10%を占める産業部門での熱供給の脱炭素化を議論している。特に、セメント、鉄鋼、石油化学での燃料の転換や将来の系統電力の脱炭素化を考慮し、製造プロセスの電化が対象となっている。例えば、大手石油化学メーカーのBASF(ドイツ)でナフサクラッカーやメタン分解による水素製造において、電化による加熱でのプロセス開発^{※14}を進めている。

※13 米国エネルギー省Webサイト

<https://www.energy.gov/eere/buildings/downloads/low-cost-high-performance-polymer-composite-heat-exchangers-produced>

※14 BASF Webサイト、スライド27、28参照。

https://www.basf.com/global/documents/en/investor-relations/calendar-and-publications/presentations/2019/190110_BASF_RD_Webcast_Presentation_Dr_Martin_Brudermueller.pdf

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

1-4 日本の熱エネルギー技術の政策動向

日本の政策として、2019年には「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」の策定、「省エネルギー技術戦略2016」の重要技術の改定が行われ、さらに2020年には「革新的環境イノベーション戦略」が策定された。以下に、これらを詳述する。

(1) 「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」 (2019年6月11日閣議決定)

イノベーションによるCO₂排出量の大幅削減に向けて推進すべき分野が特定され、そのうち1分野が省エネルギーとなっている。特に、(a) 熱の有効利用、(b) 電化、(c) パワーエレクトロニクスの3分野が例示され、いずれの分野においても熱に関する課題がある。

(a) 熱の有効利用

有効活用が進まない200℃以下や500℃の排熱を低コストで利用するために、非金属（プラスチック、セラミック）製の熱交換器、熱駆動型ヒートポンプ、スラリー等の熱輸送技術、熱整流、蓄熱技術、遮熱や断熱技術等が具体的な技術課題となる。

(b) 電化

熱源の電化は加熱や乾燥工程等での化石燃料消費を削減する可能性がある。さらに、プロセスの制御性を高め、エネルギー消費の低減だけでなく、少量多品種生産・自動化といった生産プロセスへの付加価値の提供も期待される。

課題としては、設備の低コスト化、電化によるプロセスやプロダクトの高付加価値化等が挙げられている。

(c) パワーエレクトロニクス

電化による省エネルギー効果を最大限発揮させる電力供給の上流から電力需要の末端までを支えるパワーエレクトロニクス機器を導入することが有効である。

省エネルギー性能を高めるため、パワー半導体の材料、デバイスのみでなく、周辺機器を含む汎用性のあるパワーモジュールや磁性体、熱設計、ノイズ対策まで含めたトータルシステム設計が重要となる。

(2) 「省エネルギー技術戦略2016」の重要技術の改定 (2019年7月)

NEDOと経済産業省資源エネルギー庁は、「第5次エネルギー基本計画」(2018年7月閣議決定)等を踏まえ、重要技術の改定を行った。追加された項目の一つには、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変換する技術や高効率な電気加熱技術等がある。

(3) 「革新的環境イノベーション戦略」(2020年1月)

2020年1月には、内閣府の統合イノベーション戦略推進会議で、「革新的環境イノベーション戦略」が決定された。本戦略は、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略（以下、長期戦略）」と「総合イノベーション戦略2019」に基づき、エネルギー・環境分野において革新的なイノベーションを創出し、社会実装可能なコストを実現し、これを世界に広めていくために策定されている。特に、世界のカーボンニュートラル、さらには、過去のストックベースでのCO₂排出量削減（ビヨンド・ゼロ）を可能とする革新的技術を2050年までに確立することを目指している。

本戦略の第2章イノベーション・アクションプランには、コスト目標、世界のGHG排出量削減量、技術開発内容、実用化・実証開発まで具体的なシナリオとアクションプラン等が示されている。なお、対象となる技術は5分野に大別されており、そのうち業務・家庭・その他・横断領域分野には未利用熱・再生可能エネルギー熱利用の拡大がある。特に、未利用熱においては、工場における加熱工程等で有効に活用されずに捨てられている排熱を削減・回収・再利用するための技術開発を行うことが明記されている。

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

1-5 日本の熱エネルギー技術の研究開発政策の動向

熱エネルギー技術の研究開発事業として、「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」が実施されている。本プロジェクトは、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」で言及されている技術のうち、熱の有効利用、熱の電化等が開発の対象となっている。実施されてきた研究開発課題は複数（2019年度で17テーマ）あ

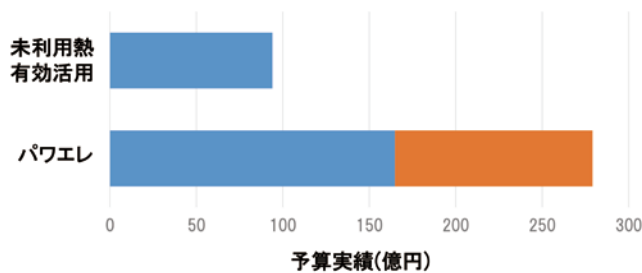


図4 研究開発プロジェクトでの予算実績の比較 (委託のみ)

出所：各事業の実施方針資料 (NEDO) や研究開発計画 (SIP) を基に事業開始から2019年度までの累積予算をNEDO技術戦略研究センターで算出

熱エネルギー技術によるCO₂排出量削減効果が大きいことが明示されているが、現状の研究開発・実証事業への国の支援は限定的になっている。これは、トップランナー制度等の規制により、機器の省エネルギーを実現し

るが、事業期間7年間で研究開発予算は94億円となっている。同様に長期戦略で言及されていたパワーエレクトロニクスの研究開発事業^{※15}と比較する(図4)と、1/3程度の研究開発予算にとどまっている^{※16}。

戦略的省エネルギー技術革新プログラムにおいても、119件の省エネルギーに資する技術開発が実施されている。その詳細を分析したところ、熱エネルギー技術の件数は全体の2割の25件にとどまっていた(図5)。

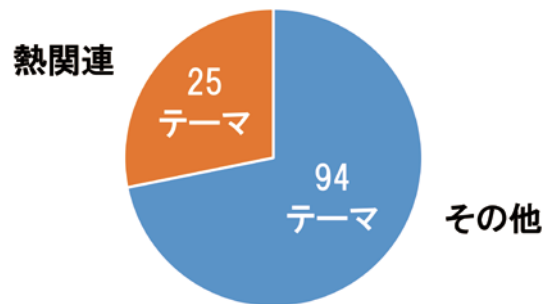


図5 戦略的省エネルギー技術革新プログラムのテーマの内訳

出所：採択テーマ概要資料を基にNEDO技術戦略研究センターで作成。熱関連には火力発電・自動車等の燃焼を含む。

できたことに起因している。したがって、本レポートにおいては、熱エネルギー技術の研究開発を国の支援による加速を狙い、CO₂排出量削減に資する技術の研究開発の方向性を整理する。

※15 NEDO事業「低炭素社会を実現する次世代/パワーエレクトロニクスプロジェクト」と、SIP事業「次世代パワーエレクトロニクス」が対象。

※16 EUのSET Planでは、省エネルギー技術の研究開発に4.2億ユーロ/年(483億円/年、1ユーロ=115円換算)。日本では、「未利用熱エネルギーの革新的活用技術研究開発」と「戦略的省エネルギー技術革新プログラム」の2事業で88億円/年(2019年度予算)。

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

2章 解決・実現手段の候補

2-1 省エネルギー技術における熱エネルギー技術の位置付け

2019年に改訂された「省エネルギー技術戦略」に定める重要技術(図6)は、計39項目ある。特に、熱エネル

ギー技術は10項目を占めており、省エネルギー技術の中で重要な技術群として位置付けられている。本レポートにおいては、熱利用製造プロセス、高効率加熱、熱エネルギーシステムを支える基盤技術、高効率給湯技術に関連し、産業部門や民生部門での熱供給に着目した。



図6 「省エネルギー技術戦略」に定める重要技術
(赤枠：本レポートが対象とする熱エネルギー技術、黒枠：その他の熱エネルギー技術)

出所：経済産業省・省エネルギー部『『省エネルギー技術戦略2016』の『重要技術』の改定』(2019年)を基にNEDO技術戦略研究センターで一部改変

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

2-2 熱供給の脱炭素化の必要性

熱供給における温度とCO₂排出量の関係を図7に示す。熱供給によって排出されるCO₂は5.5億トン／年に達し、日本の総排出量11.9億トン／年（2017年度実績）^{※17}の46%を占める。熱供給によるCO₂排出量の80%以上が化石燃料の直接燃焼によるものであり、熱供給の脱炭素化の実現は、大規模なCO₂排出量削減に寄与する。

熱の温度帯に着目すると、下記のことが明らかになった。

- ✓ 200℃以下の低温では、産業用の燃焼炉（熱処理炉等）、ボイラー、コジェネだけでなく、民生用途のボイラー、コジェネにおいて、化石燃料の燃焼に伴い、2億トン／年を超えるCO₂を排出している。
- ✓ 200℃から1700℃の高温では、重工業プロセスで利用される燃焼炉（高炉）やコジェネ等で、化石燃料を利用し、2.4億トン／年ものCO₂を排出している。

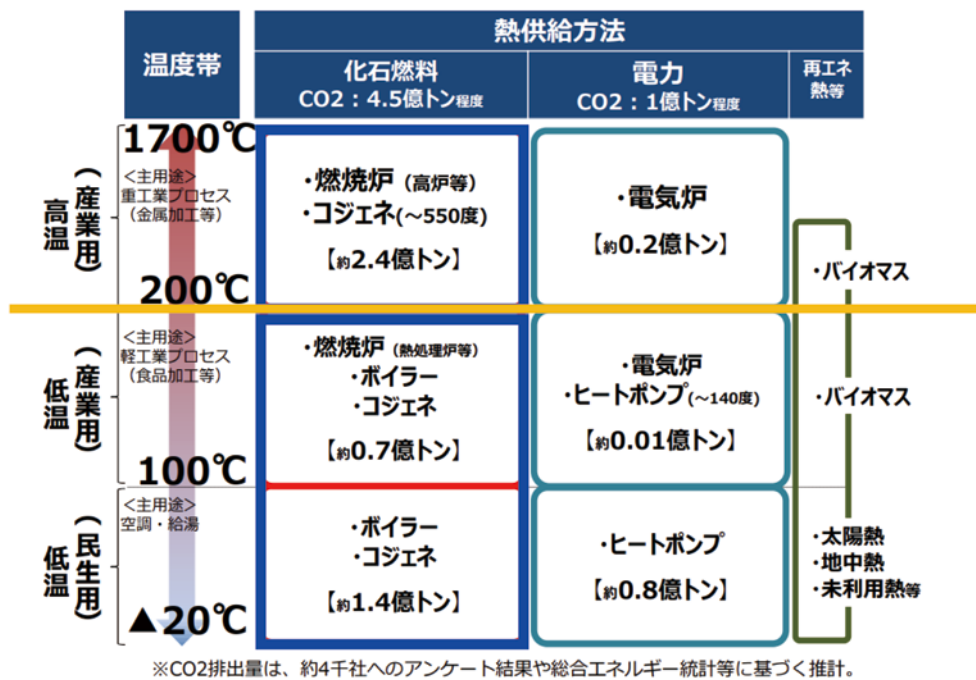


図7 熱供給における温度とCO₂排出量の関係

出所：資源エネルギー庁 第23回基本政策分科会「資料1. 2030年エネルギーミックス実現のための対策～原子力・火力・化石燃料・熱～」(2017年) p.56を基にNEDO技術戦略センター作成

※17 2017年度(平成29年度)温室効果ガス排出量概要資料. 環境省.
<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/emissions/results/gaiyou2017-2.pdf>

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

2-3 技術開発の対象

「熱供給の脱炭素化」の技術分野について、表2に整理した。特に、本レポートにおいては、未利用の排熱を活用する熱回収技術に着目した。

表2 熱供給の脱炭素化に関する技術分野の一覧

社会課題	技術分野	詳細
熱供給の脱炭素化	燃料転換	石炭から天然ガスや水素ガスへ
	高効率燃焼	酸素富化燃焼
	熱回収	未利用の排熱の回収・活用
	電化	誘導加熱などのエレクトロヒート

国内の一次エネルギー活用状況（図8）によれば、一次エネルギー投入量に比べ、最終エネルギー消費までにエネルギーロスが生じることが知られている。エネルギーロスの多くは熱として排出され、その総量は7.6EJに達し

ている。最終エネルギー消費のうち、熱利用での消費量は6.8EJ^{※18}で、エネルギーロスより少ない。すなわち、排熱を回収・利用することによって、熱需要に投入される一次エネルギーの削減に寄与することができる。

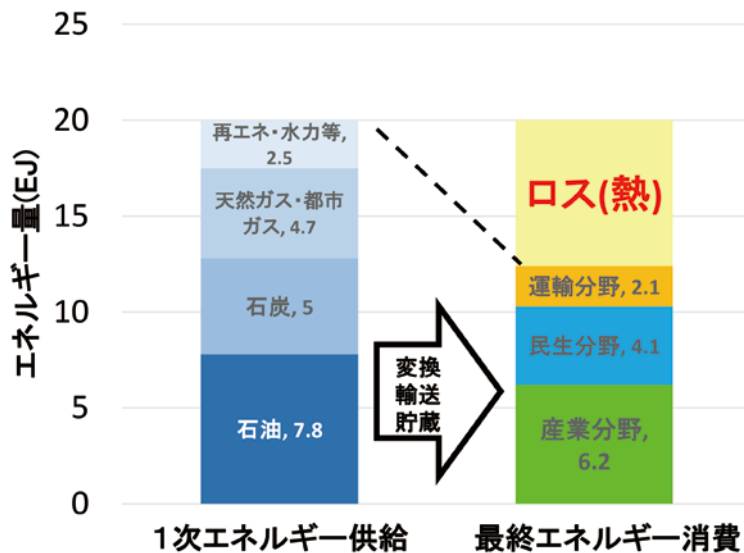


図8 国内の一次エネルギー活用状況

出所：資源エネルギー庁「平成29年度 エネルギー需給実績（速報）」を基に NEDO 技術戦略研究センター作成

※18 第5次エネルギー基本計画のp.10によれば、最終エネルギー消費3.4億kl（原油換算）のうち、熱利用が1.8億klとなっている。
https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

「産業分野の排熱実態調査 報告書」^{※19}では排熱の温度帯と有効熱量との関係が示されている。同報告書によれば、ボイラー等の100～250℃の温度範囲の排ガス（低温排ガス）、及び溶解炉等の500℃を超える排ガス

（高温排ガス）には、各々にエクセルギー量の大きい排熱がある（図9）。仮にこれらの排熱を全て回収・利用することができれば、天然ガス換算で2.4億トン／年^{※20}のCO₂排出量削減に寄与する。

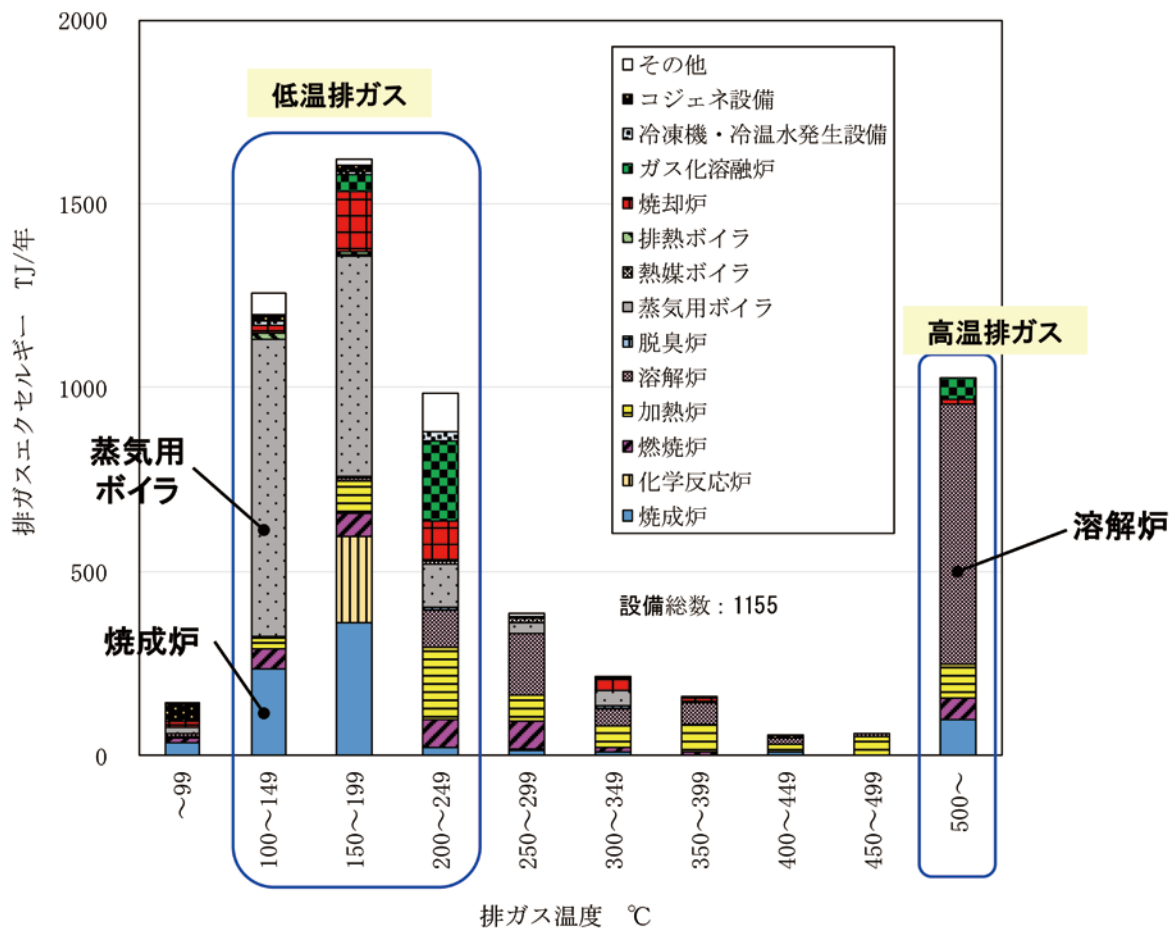


図9 排ガスのエクセルギー量の温度分布

出所：未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合技術開発センター

「産業分野の排熱実態調査 報告書」図119を基に NEDO 技術戦略研究センター作成

※19 "15業種の工場設備の排熱実態調査報告書を公表". NEDO・未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合. 2019-03-04.
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101074.html

※20 天然ガスの排出原単位 (HHV基準) : 49.4gCO₂/MJ、排ガスエクセルギー量 : 4,850TJより、49.4gCO₂/MJ × 4,850TJ=2.4億tCO₂を算出。

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

排ガスの熱を利用する上では、熱利用の需要に併せて、必要となる利用技術を選択し、組み合わせて設計する必要がある。

図10で示した概念図では、排熱源（原点）からの距離や時間差によって必要となる熱利用技術を示している。本レポートにおいては、発生した排熱をオンサイトで、短時間で利用する領域（図10の青色、赤枠部）を対象と

する。この領域では、熱利用に関わる機器の部品点数が少ないことから、導入コストが安く、早期の社会実装が期待できる。

一方、長距離の移動を伴うオフサイト利用は、熱輸送技術が必要となり、機器コストが高くなる。また、状況によっては異なる事業所や事業者間での熱を取引きする仕組みづくり等の環境整備も必要となる。

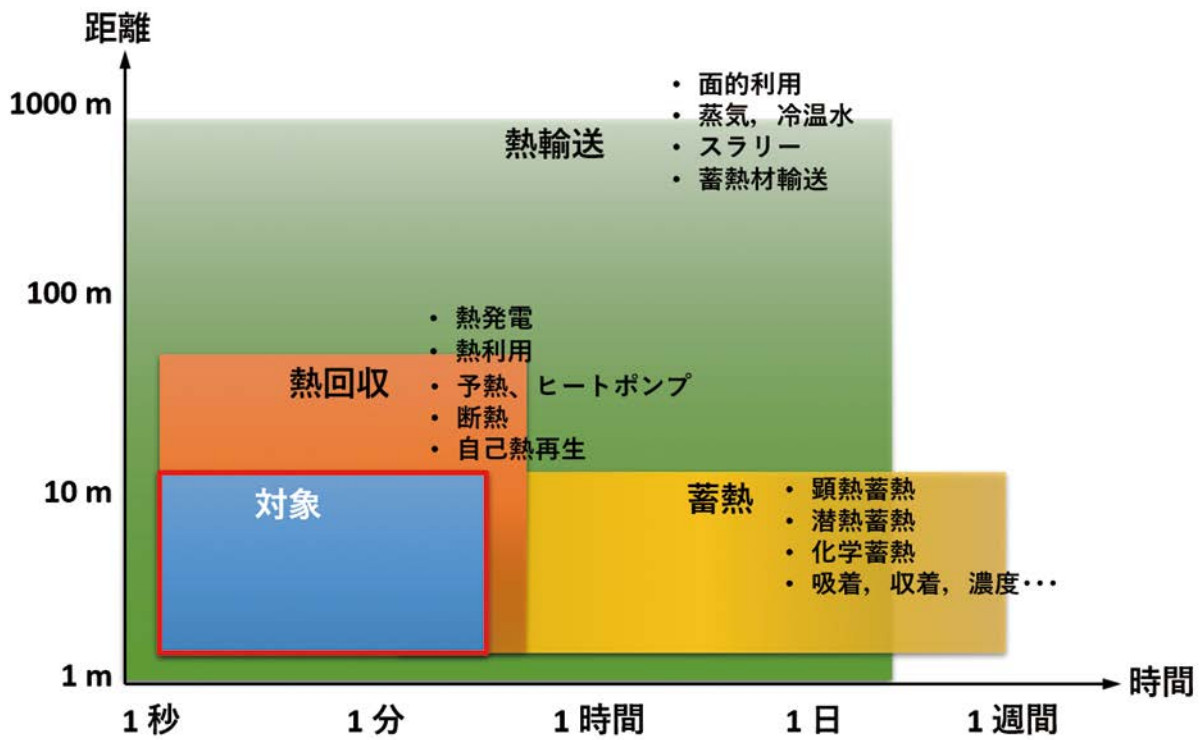


図10 排熱源から熱利用までの距離と時間差をつなぐ技術の例（概念図）

出所：東京大学鹿園教授提供資料を基に NEDO 技術戦略研究センター作成

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

2-4 低温排ガスの熱利用

2-4-1 現状と課題

「産業用ヒートポンプ活用ガイド」※21によれば、都市ガスやLPGの燃焼排ガスには、腐食成分であるNOx、SOxが含まれている。これらの成分を含む排ガスを冷却して熱回収を行った場合、結露水中に硝酸、硫酸が発生し、金属を腐食させる酸露点問題があることが知られている。そのため、チタン、セラミック、ステンレス等の高価で重い素材の熱回収器が必要になるが、実際は熱回収することなく排気していることが多い。

排ガス温度とエクセルギー量の関係（表3）からは、低

温排ガスの多くは機器1基あたりのエクセルギー量が小さく分散していることが分かる。例えば、給湯器からは0.00001TJ／年未満、蒸気ボイラー（150～199℃の温度帯）でも5TJ／年にとどまっている。

民生用の給湯器は規格の統一がなされており、安価な熱回収器が開発されれば普及拡大する可能性が高いと考えられる。

産業部門の蒸気ボイラーは規格が統一されておらず多種多様であり、さらには焼成炉や化学反応炉は1基ごとに形状が異なる一品一様となっている。規格を統一化できない熱回収機器は導入・設置費用が高くなり、熱回収にかかるコストが増大する要因となっている。

表3 排ガス温度とエクセルギー量の関係

		温度帯(℃)	エクセルギー(TJ/年)		装置の規格化
			合計値	一基あたり	
低温	給湯器(民生)	約200	630	<0.00001	○
	蒸気ボイラー	100～149	810	3	△
		150～199	133	5	△
	焼成炉	100～149	250	10	×
		150～199	380	17	×
化学反応炉	150～199	234	59	×	
高温	焼成炉	500～	97	24	×
	溶解炉	500～	750	58	×

出所：未利用熱エネルギー革新的活用技術研究組合技術開発センター「産業分野の排熱実態調査報告書」
図119～123、128、129、132、133を基にNEDO技術戦略研究センター作成

※21 産業用ヒートポンプ活用ガイド、一般社団法人日本エレクトロヒートポンプセンター、p.16.
http://www.jeh-center.org/asset/00032/HeatPump_Guide/Heatpump%20Guide.pdf

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

2-4-2 研究開発の方向性

低温排ガスの熱利用に関する研究開発課題とその方向性について、有識者と議論しまとめた結果を表4に示す。

表4 低温排ガスの熱利用に関する課題と開発の方向性（分野／用途別）

部門	分野/用途	現状	開発の方向性
民生 産業	冷暖房/温水供給 (排熱回収)	食品工場などで温水供給で普及.	—
民生	給湯器 (潜熱回収)	SUS製で実装済み. コストが高く, 普及は限定的.	<ul style="list-style-type: none"> 熱交換器の性能向上 固液界面の伝熱促進 液の流動制御 金属腐食の抑制
産業	ボイラー (潜熱回収)	コストが高く, 普及は限定的.	
産業	焼成炉など (熱再生)	機器の設置容積が大きく, 普及を阻害.	
産業	化学プロセス (熱再生)	200℃前後の熱需要が 大きい産業.	

民生、産業部門の各機器での熱回収器の普及が進んでいないのが現状であるが、その原因は、機器の設置容積が大きいこと、熱回収器のコストが高いことにある。これらを解決するための研究開発課題の方向性として、固液界面での伝熱促進による熱交換器の性能向上と安価な

金属の腐食抑制が想定される。伝熱促進は熱交換器の小型化に寄与し、安価な金属材料を利用することで、熱回収器の設置容積の低減と低コスト化を同時に実現することが可能になる。

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

2-5 高温排ガスの熱利用

2-5-1 現状と課題

鉄鋼、非鉄金属、セメント、ガラス製造業等は、高温設備が多く、エネルギー消費量やCO₂排出量の多い産業で

ある(図11)。鉄鋼業からのCO₂排出量が最も多く1.7億トンに達している*22。また、鉄鋼業やセメント業*23においては、石炭由来のCO₂排出量の比率が大きく、これら産業での省エネルギー化、脱炭素化は喫緊の課題である。

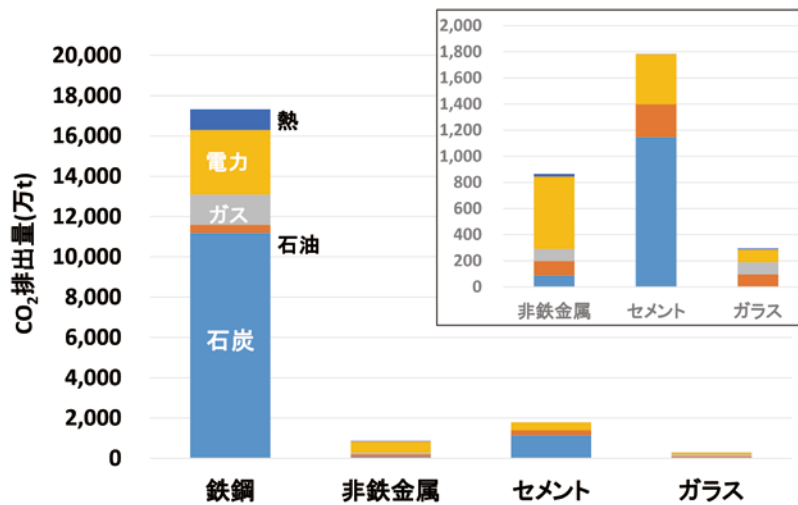


図11 国内の産業分野別のエネルギー由来のCO₂排出量

出所：資源エネルギー庁「総合エネルギー統計 詳細表 (2017年)」を基に NEDO 技術戦略研究センター作成

鉄鋼、非鉄金属、セメント、ガラスを含む製造業では、原料の溶融、反応や、部品の焼成等の高温処理のために工業炉が使用されている。工業炉は多量のエネルギー

を消費する機器であり、その消費量は2EJ /年に達しており、製造業での全消費量の33%を占める(図12)。

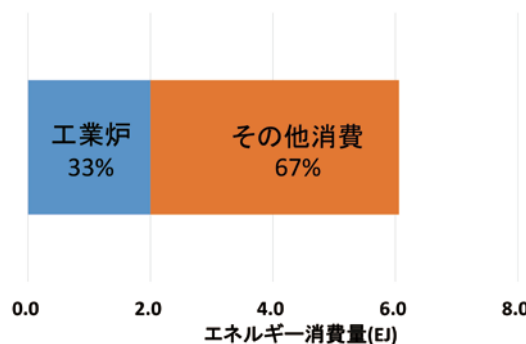


図12 国内の製造業における工業炉のエネルギー消費量の割合 (2012年度)

出所：日本工業炉協会調べのデータを基に NEDO 技術戦略研究センター作成

*22 還元剤として利用された化石燃料からのCO₂排出を含む。

*23 石灰石からの脱炭酸によるCO₂排出は含まず。

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

工業炉のエネルギー消費量を削減するための省エネルギー型工業炉として、誘導加熱型、金属溶解型、断熱強化型、原材料予熱型、排熱回収型がある。排熱回収型としては、リジェネレイティブバーナーを搭載した工業炉が開発され^{※24}、実用化されている。リジェネレイティブバーナーとは、セラミックからなる蓄熱材を一体化したバー

ナーであり、排熱回収型工業炉ではこのバーナーを2基搭載している。バーナーでの燃焼は交互にバルブで切り替えしており、燃焼側に空気供給を、他方には排ガスを通過させる。排ガスから蓄熱体に回収された熱は、燃焼時の空気の予熱に使用される(図13)。その結果、工業炉の省エネルギー化を実現している。

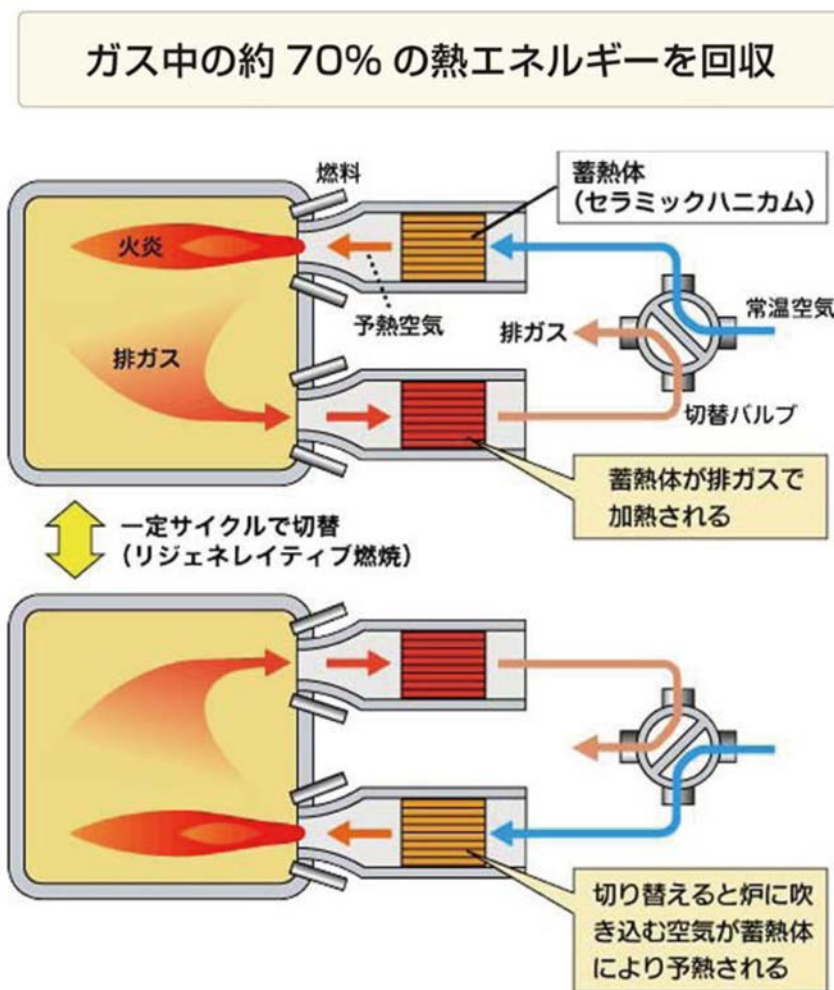


図13 リジェネレイティブバーナーの動作原理

出所：NEDO 実用化ドキュメント「産業界の省エネルギー／環境負荷低減に大きく貢献する高性能工業炉」図2より

※24 "NEDO 実用化ドキュメント：産業界の省エネルギー／環境負荷低減に大きく貢献する高性能工業炉". NEDO. <https://www.nedo.go.jp/hyoukaku/articles/201203jifma/index.html>

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

「工業炉等における省エネルギー技術に関する実態調査^{※25}」によれば、省エネルギー型工業炉の普及率は24%（台数ベース、約3.7万台あたり）にとどまっている。さらに、排熱回収型工業炉の普及率は9%（対象となる工業炉の約1万台に対する比率）と極めて低い。この要因として、バルブ切替えの頻度が多くメンテナンスを頻繁に行う必要があること、潜熱回収部の容積が大きく小型の工業炉に導入できないこと、がアンケート調査から明らかになっている。

2-5-2 研究開発の方向性

高温排ガスからの熱利用に関する研究開発の方向性について、産業分野別に表5に整理した。本レポートでは、化石燃料が継続利用され、かつ研究開発プロジェクトが未実施の産業分野に着目した。金属部品加工分野では、主に燃料ガスを用いて、高温の熱供給とともに、炉内を還元雰囲気維持することで金属の酸化や変色を防いでいる。そのため、燃料ガスの利用が継続される可能性が高く、小型の排熱回収型工業炉の普及拡大が必要となるが、蓄熱部の小型化のためにより熱容量の大きい蓄熱材を開発することが重要となる。また、セメント分野においても、石炭からの天然ガスへの燃料転換のほか、大型工業炉での熱回収も必要になると想定される。

表5 高温排ガスの熱利用に関する課題と開発の方向性（産業分野別）

産業分野	現状	研究開発PJ動向	開発の方向性
製鉄	エネルギー源、還元剤としての石炭利用量が多い	水素還元 CO ₂ 分離回収 (COURSE50)	現行PJの社会実装の促進
非鉄金属 (アルミ等)	ガスと電化の併用したプロセスを確立		代替手段:リサイクルの促進
金属部品加工	エネルギー源、還元剤としての燃料ガスの利用		排熱回収型工業炉の小型化 熱容量の大きい蓄熱材の開発
セメント	石炭利用量が多い		大型工業炉(キルン)での熱回収 天然ガスへの転換
ガラス	溶解炉での化石燃料利用	燃焼の効率化 (戦略的省エネルギー技術革新プログラム)	現行PJの社会実装の促進

※25 平成26年度エネルギー使用合理化促進基盤整備事業（工業炉等における省エネルギー技術に関する実態調査）報告書。経済産業省。2015, p.15, 27, 51.
<https://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11280804/1>

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

2-6 関連技術の論文・特許動向

2-6-1 論文動向

2005年～2019年（期間15年）間に発表された熱エネルギー技術の論文について、(1) 熱交換技術と(2) 蓄熱技術に分類した上で、論文を投稿した機関が設置された国・地域ごとの掲載件数と5年ごとの掲載件数の推移

に関する分析を行った。なお、学术论文のみを分析対象とした。

(1) 熱交換技術

国・地域ごとの掲載件数（図14）からは、欧州や中国からの掲載が1,000件を超えており、次いで米国、ロシアが続き、日本は5番目の278件にとどまっていた。

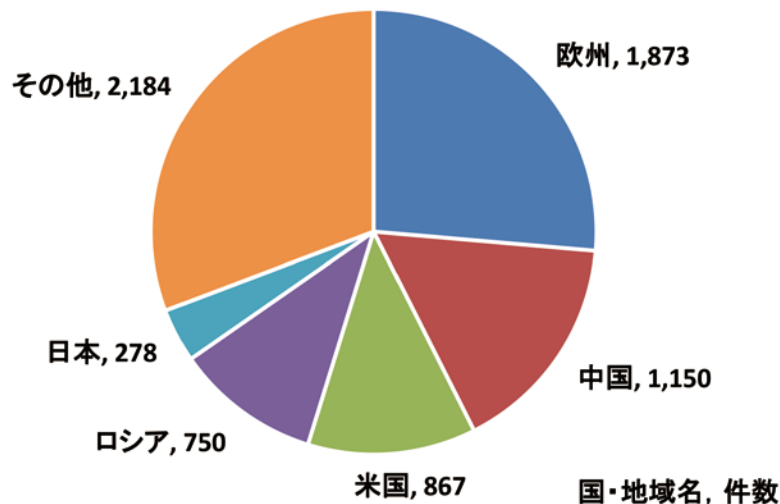


図14 熱交換技術に関する国・地域別の論文掲載件数

出所：Web of Science TM の検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成

さらに、5年ごとの掲載件数の推移（図15）からは、2005年～2009年では1,071件であったが、2015～2019年では2,997件と約3倍に増加している。国・地域ごとに詳細に分析すると、欧州や中国からの掲載件数が大きく増加していた。特に、中国は2005年～2009年に112件であったが、2015～2019年が795件に達してお

り、7倍を超える増加となっていた。このことから、本技術分野での研究開発が近年活発化していることが明らかになった。一方、日本の5年ごとの件数の変化はほとんど無いことから、研究開発は維持されているものの、欧州や中国との技術競争力が低下しつつあることが示唆された。

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

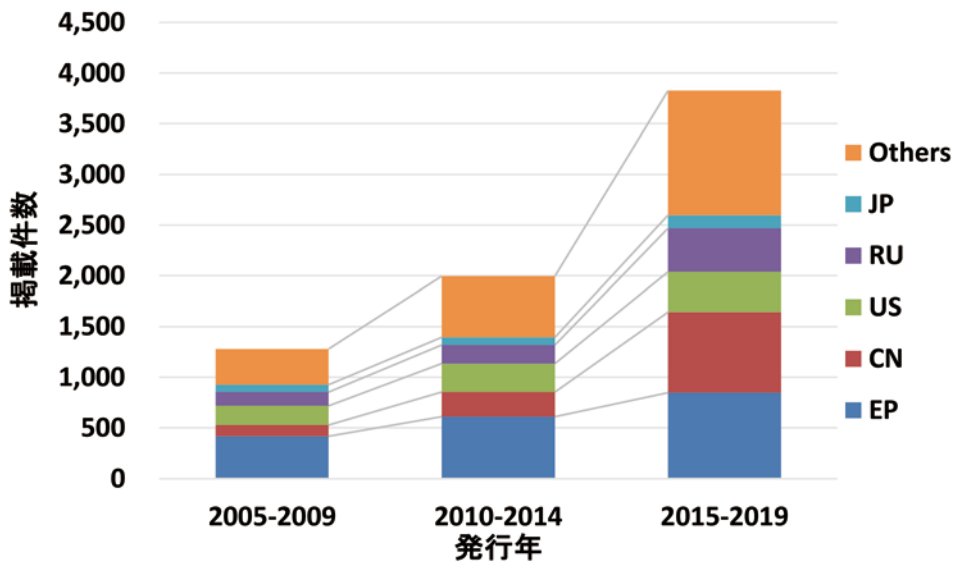


図15 熱交換技術に関する論文掲載件数の推移 (5年ごと)
 出所：Web of Science TM の検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成

(2) 蓄熱技術

国・地域ごとの掲載件数 (図16) からは、欧州や中国からの掲載が1,000件を超えており、次いで米国、日本、

インドが続いていた。なお、日本からは296件と、欧州や中国のおよそ1/6と極めて少ない。

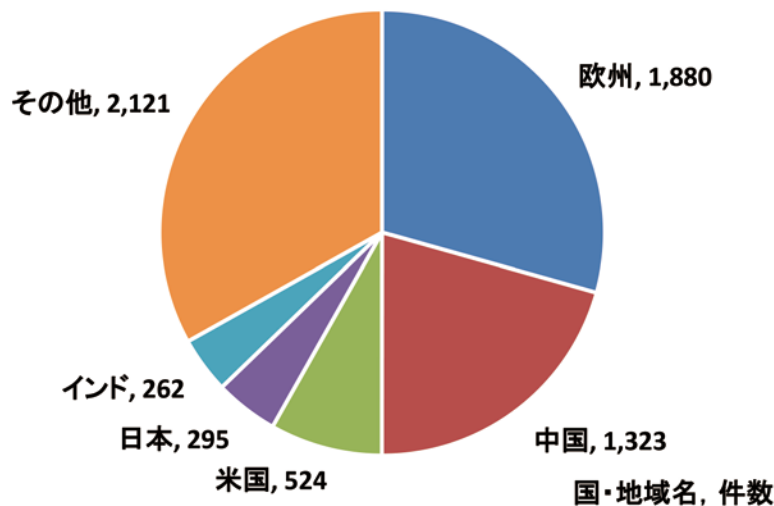


図16 蓄熱技術に関する国・地域別の論文掲載件数
 出所：Web of Science TM の検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

さらに、5年ごとの掲載件数の推移（図17）からは、2005年～2009年では709件であったが、2015～2019年では2,841件と約4倍に増加している。国・地域ごとに詳細に分析すると、欧州や中国からの掲載件数が大きく増加していた。特に、欧州は2005年～2009年に

112件であったが、2015～2019年が795件に達しており、7倍を超える増加となっていた。このことから、本技術分野での研究開発が近年活発化していることが明らかになった。日本の5年ごとの件数の変化はほとんど無く、研究開発は維持されている。

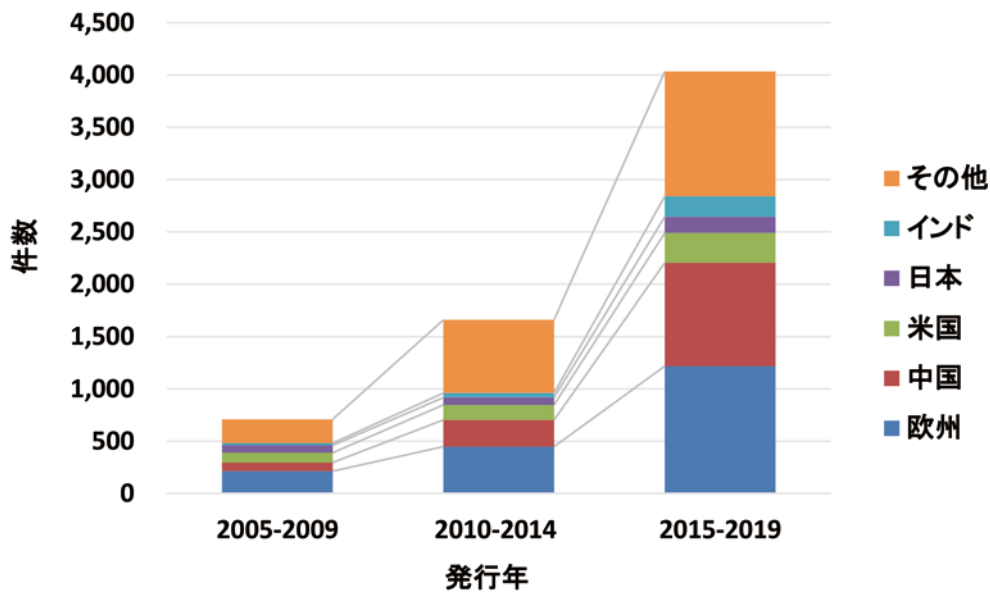


図17 蓄熱技術に関する論文掲載件数の推移（5年ごと）

出所：Web of Science TMの検索結果を基にNEDO技術戦略研究センター作成

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

2-6-2 特許動向

2003年～2017年（15年間）に出願された熱関連技術に関する特許について、(1) 熱交換技術と、(2) 蓄熱技術に分類した上で、主要国・地域（日本、米国、欧州、中国、韓国）からの出願件数の推移と、用途及び材料／手段に関する動向について詳細に分析した。なお、実用新案については、評価対象から除外している。特許検索のデータベースとして、クラリベイト・アナリティクス社の Derwent World Patents Index を使用した。

(1) 熱交換技術

主要国・地域別の出願件数の推移について、図18に示す。日本の出願件数は減少傾向であるものの、2017年時点でも中国に次いで出願件数（732件）が多い。中国、欧州、韓国は出願件数を伸ばしている。特に、中国からの出願件数は大きく増加しており、直近3年間では1年あたり1,500件を超えており、研究開発が活発に行われていることが示唆された。

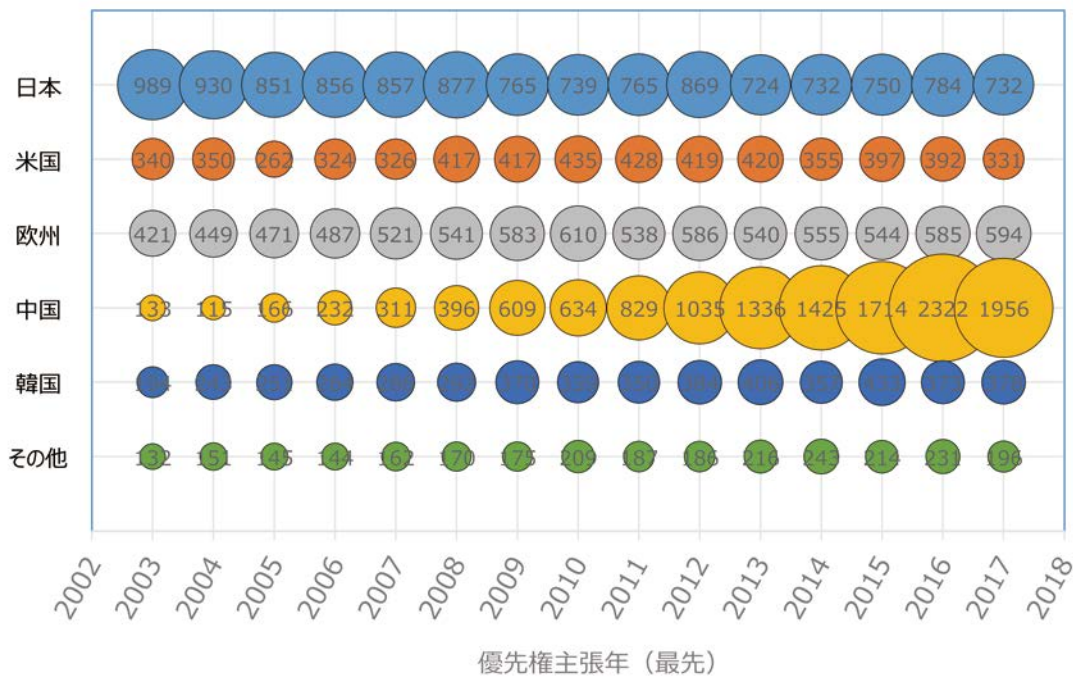


図18 熱交換技術の出願人国・地域別の出願件数の推移

出所：NEDO 調査事業「2019年度 出願特許分析による俯瞰情報収集」より

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

次に、熱交換器の用途と材料の動向について、詳細に分析を行った(図19)。用途の観点から分析すると、空調・換気や輸送関連に比べ、ボイラー・加熱の特許出願が少ない傾向にあった。

材料の観点から分析すると、ボイラー・加熱分野での

アルミニウムに関する特許出願数は、他分野と異なり鉄・ステンレスに比べて少ない傾向にあった。すなわち、ボイラー・加熱分野でのアルミニウムの研究開発の加速が必要と推測されるものであった。

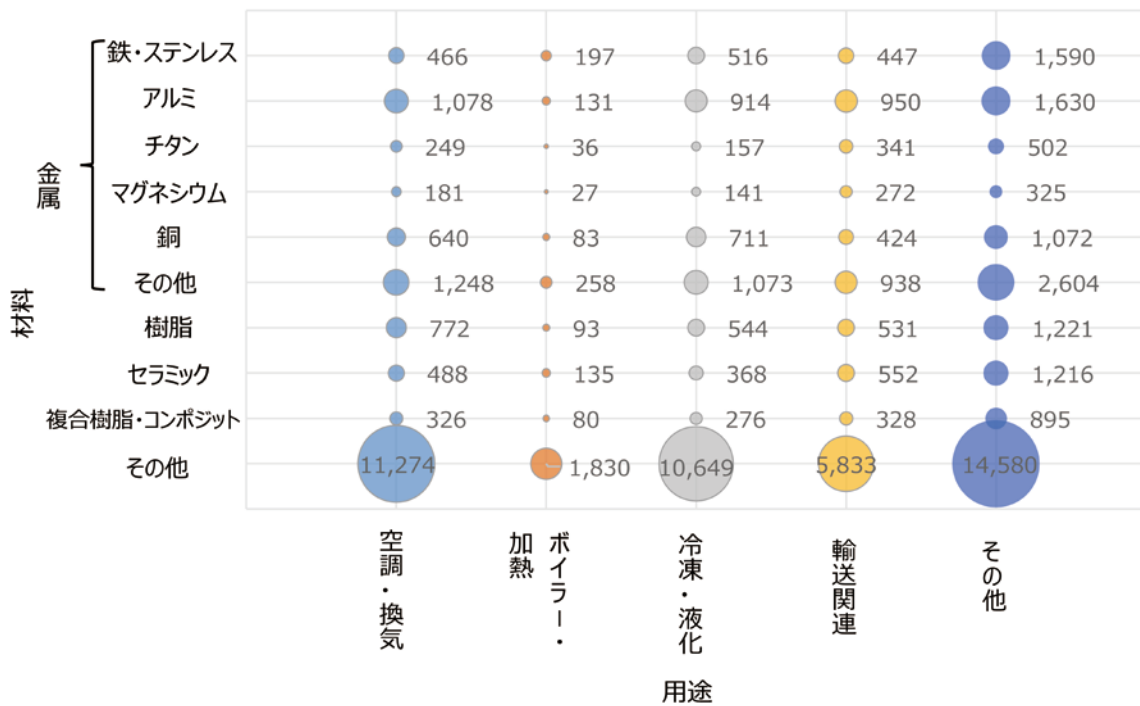


図19 熱交換技術の用途と材料に関する動向分析結果

出所：NEDO 調査事業「2019年度 出願特許分析による俯瞰情報収集」より

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

(2) 蓄熱技術

主要国・地域別の出願件数の推移について、図20に示す。日本、欧州、中国からの出願件数が多い。日本からの出願件数は、2000年代前半には他の国・地域よりも多かったが、近年は1年あたりの出願件数は減少している。2008年以降は中国、欧州からの出願が増加し、特

に中国からの出願件数は近年100件／年を超え、日本の3～5倍に達している。以上のことから、本技術分野において、日本国内の政策提案や研究プロジェクト等により、他国・他地域との技術競争力を獲得することが重要との示唆が得られた。

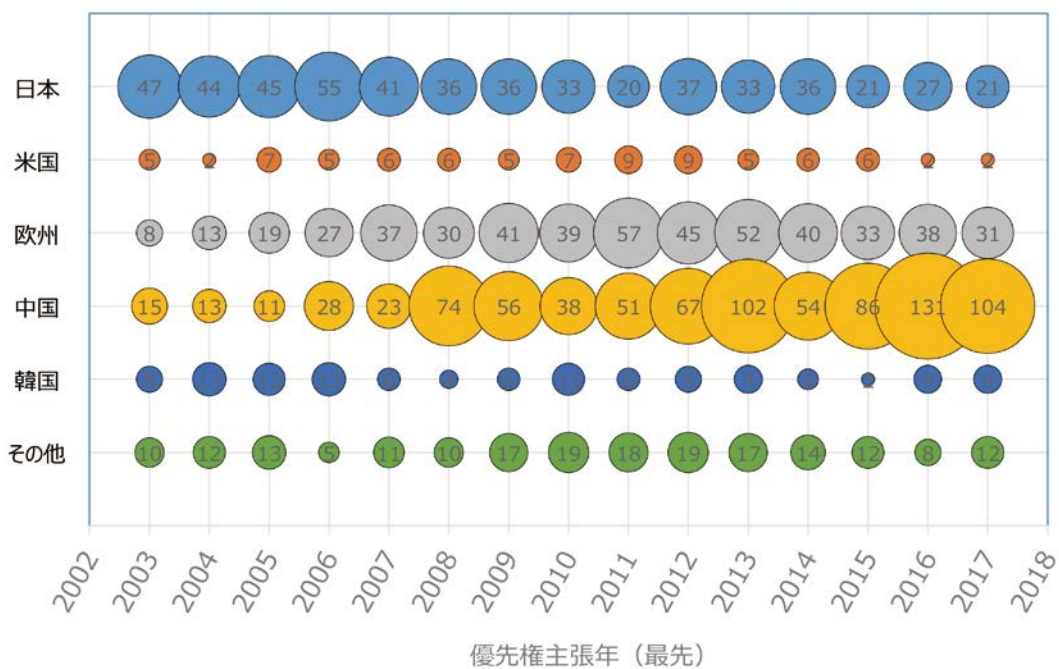


図20 蓄熱技術の出願人国・地域別の出願件数の推移
出所：NEDO調査事業「2019年度 出願特許分析による俯瞰情報収集」より

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

次に、蓄熱材の用途及び材料の動向について、詳細に分析を行った(図21)。用途の観点から分析すると、空調・換気や熱交換器に比べ、ボイラー・加熱や輸送関連の特許出願が少ない傾向にあった。

材料の観点から分析すると、顕熱蓄熱材料の特許出

願数が多い一方で、化学蓄熱材料は少ない傾向にあった。以上のことから、熱マネジメントが重要になるボイラー・加熱や輸送関連での蓄熱技術、蓄熱性能の面で注目される化学蓄熱材料での、研究開発テーマの設定が重要との示唆が得られた。

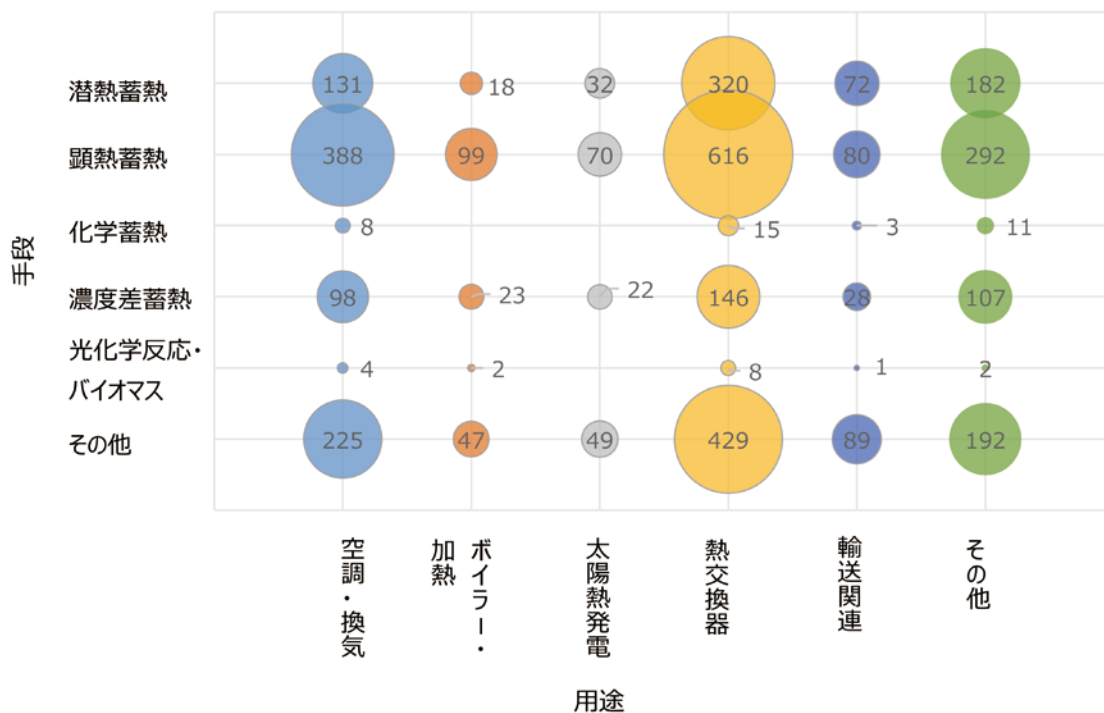


図21 蓄熱技術の用途と手段に関する動向分析結果

出所：NEDO調査事業「2019年度 出願特許分析による俯瞰情報収集」より

3章 おわりに

IEAのETP2017でのCO₂排出量削減対策においては、サーキュラーエコノミーによる資源や素材需要の削減と省エネルギー技術の導入によるエネルギー需要の削減が必要不可欠である。うち、省エネルギーは140億トン／年のCO₂排出量削減の寄与が期待されている。

2017年時点の熱供給によるCO₂排出量は年間72億トン／年（工業部門50億トン／年、ビルディング22億トン／年）であり、省エネルギー技術の普及拡大でのCO₂排出量削減には熱関連技術が有効な手段の一つとなる。

世界の各国・地域では、熱関連技術の政策・ロードマップの策定や研究開発プロジェクトが実施されている。日本においても、ICEFロードマップ「産業用途熱の脱炭素化」、「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」、「省エネルギー技術戦略2016」の重要技術の改定、「革新的環境イノベーション戦略」の政策文書において、熱関連技術の重要性が明示されている。

しかし、日本における熱エネルギー技術の研究開発・実証事業への国の支援は限定的になっている。これは、トップランナー制度等の規制により、機器の省エネルギーを実現してきたことに起因している。こうした現状に鑑み、本レポートでは、熱エネルギー技術の研究開発を国の支援により加速することを狙い、その方向性を整理した。

「省エネルギー技術戦略」に定める重要技術では、熱関連技術は10項目を占めており、省エネルギー技術の中

で重要な技術群として位置付けられている。さらに、日本国内において、熱供給によるCO₂排出量は5.5億トン／年に達し、総排出量11.9億トン／年（2017年度実績）の46%を占めており、特に熱供給の脱炭素化について着目した。

熱供給の脱炭素化の実現には、未利用の排熱を回収することが重要である。最終エネルギー消費までに生じたエネルギーロス7.6 EJの多くは熱として排出されている。熱利用での消費量は6.8 EJとエネルギーロスより少ないことから、発生した排熱を回収・利用すること、熱需要に投入される一次エネルギーの削減に寄与することができる。ボイラー等の250℃以下の低温排ガスや、溶解炉等からの500℃を超える高温排ガスにエネルギーの大きな排熱があり、これを全て回収・利用することができれば、天然ガス換算で2.4億トン／年のCO₂排出量削減に寄与できる。

低温排ガスからの熱利用においては、排熱回収器の普及に向けて、熱回収器のコストと機器の設置容積の低減が課題であり、これらを解決するための研究開発課題の方向性として、固液界面での伝熱促進による熱交換器の性能向上と安価な金属の腐食抑制が想定された。

一方、エネルギー消費量の多い工業炉の高温排ガスでの熱利用に対しては、金属部品加工分野では小型の排熱回収型工業炉の普及拡大が必要となる。そのためには、蓄熱部の小型化を図るべく、より熱容量の大きい蓄熱材を開発することが重要となる。また、セメント分野でも、大型工業炉での熱回収が必要と想定される。

技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight Vol.101

熱エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

2020年11月16日発行

TSC Foresight Vol.101 熱エネルギー分野 作成メンバー

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
技術戦略研究センター (TSC)

■ センター長 岸本 喜久雄

■ センター次長 西村 秀隆

■ 環境・化学ユニット

・ユニット長 土肥 英幸

・主任研究員 山下 勝

水野 紀子 (2020年6月まで)

・研究員 林 直之

定兼 修 (2020年3月まで)

柳田 泰宏

・フェロー 府川 伊三郎 株式会社旭リサーチセンターシニアリサーチャー、
元旭化成株式会社取締役／中央技術研究所所長

・客員フェロー 島田 広道 国立研究開発法人産業技術総合研究所フェロー

指宿 堯嗣 一般社団法人産業環境管理協会技術顧問

室井 高城 アイシーラボ代表、神奈川大学非常勤講師、
元エヌイー・ケムキャット株式会社執行役員

■ 省エネルギー部

・主査 近藤 篤 (2020年3月まで)

・主任 小笠原 有香

● 本書に関する問い合わせ先
電話 044-520-5150 (技術戦略研究センター)

● 本書は以下URLよりダウンロードできます。
<https://www.nedo.go.jp/library/foresight.html>

本資料は技術戦略研究センターの解釈によるものです。
掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。
引用を行う際は、必ず出典を明記願います。