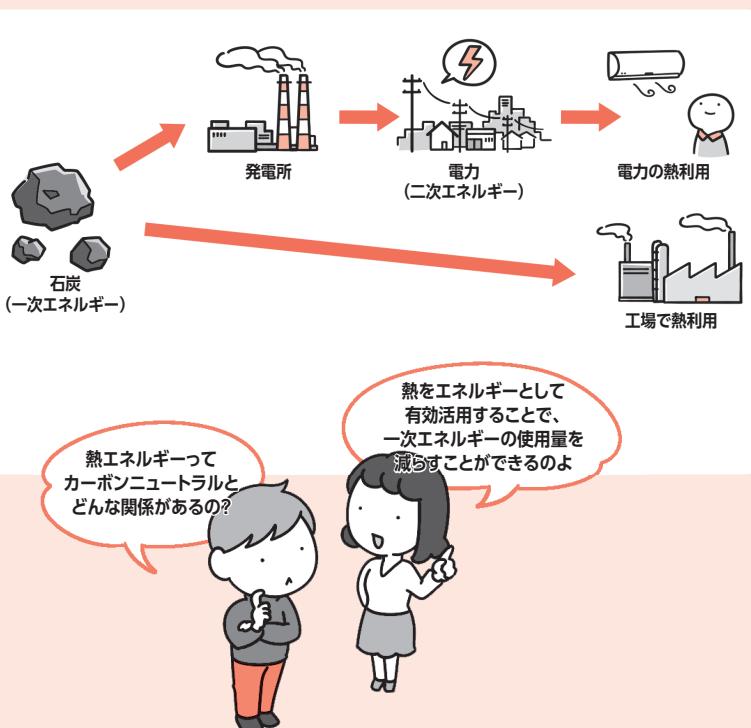


第1章 概要

第1章では、最初にカーボンニュートラルの実現に向けた世界の最新動向を解説する。次に、本題であるカーボンニュートラルに対するエネルギーの寄与について解説する。

熱エネルギーは産業部門、民生部門、運輸部門で利用される最終エネルギー消費の中でも大きな割合を占め、カーボンニュートラルの実現に向けて重要な役割を果たすと考えられる。



1.1 カーボンニュートラルに向けた世界の動向

1 パリ協定の1.5°C目標

1970年代以降、地球温暖化が深刻な問題として注目され、1988年には、国連環境計画(UNEP: United Nations Environment Programme)と世界気象機関(WMO: World Meteorological Organization)によって、地球温暖化に関する科学的側面をテーマとした政府間の検討の場として、気候変動に関する政府間パネル(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)が設立された^[1]。

1997年には京都で行われた気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP3)で「京都議定書」が採択され、先進国などに対して温室効果ガス(GHG: Greenhouse Gas)排出削減義務が課された。さらに、2015年のCOP21では、気候変動抑制に関するほぼすべての国が参加する多国間の国際的な協定である「パリ協定」が採択された。

パリ協定では、世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べて2°C未満に抑えること、加えて、1.5°Cに抑制する努力目標も規定された。これらの目標を達成するためには、21世紀後半までに人間の活動によるGHGの排出量を実質的にゼロにする、すなわちカーボンニュートラル達成に向けた目標が打ち出された。IPCCの第6次評価報告書で示されている2100年までの温度上昇目標に対応したシナリオ別のGHG排出量を図1.1に示す^[2]。

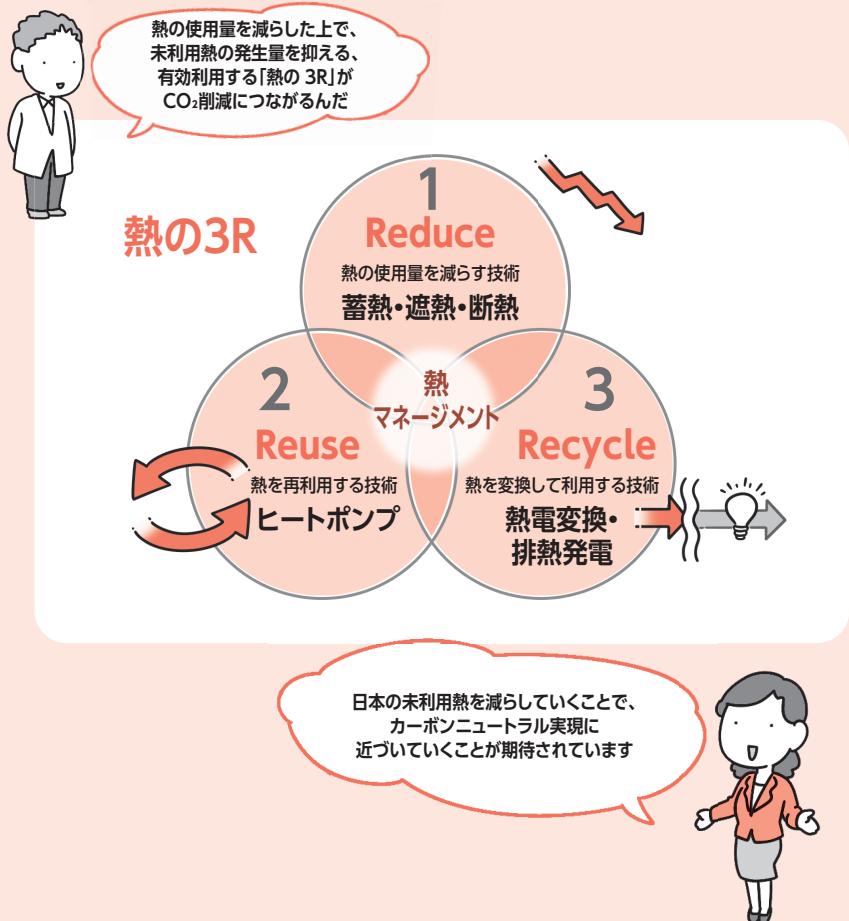
実績のGHG排出量は2000年の約40Gt-CO₂e／年から2015年の50Gt-CO₂e／年以上まで徐々に増加している。今後、GHG排出削減の行動が世界中で実施されている現行の政策にもとづいた場合(図1.1中の実施された政策)、GHG排出量は、2030～2050年頃で頭打ちとなり2100年まで約60Gt-CO₂e／年で推移する。このとき、産業革命以前のレベルから2.2～3.5°Cの範囲の平均気温上昇が起こると予想されている。

パリ協定の努力目標である平均気温上昇を1.5°Cに抑制する^①ためには、GHG排出量を即時に減少に転じ、2090年ごろにGHG排出量をゼロにする(カーボンニュートラルを実現する)ことが必要である。さらに、モデルが示す幅によって

① 1.5°Cに抑制する 図1.1の「温暖化を1.5°Cに抑える」参照。

第2章 概要

第1章では世界のエネルギーの使われ方を解説したが、第2章では日本のエネルギーの使われ方とその特徴に着目し、特に熱エネルギーの使われ方から見た将来のカーボンニュートラルに向けての対策などを考察する。



2.1 日本のエネルギーの利用状況

1 化石エネルギーによる日本の現状

日本は周囲を海で囲まれ、自国のエネルギー資源に乏しく、エネルギー源を海外からの化石エネルギー（資源や燃料）の輸入に頼っている。図2.1に日本のエネルギーフロー図を示す。

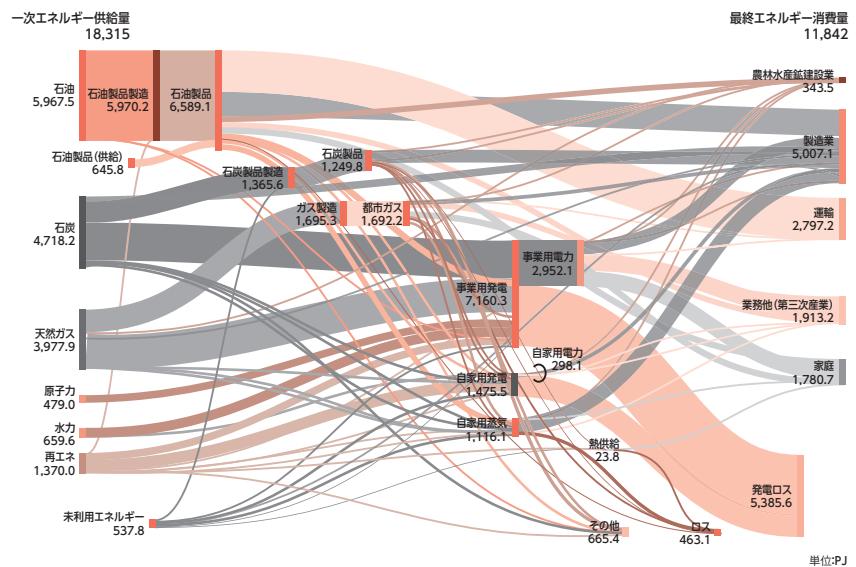


図2.1 日本のエネルギーフロー (2022年度)

出典：経済産業省・資源エネルギー庁「総合エネルギー統計 (2022年度詳細版)」(2024)^[1]をもとに作成

一次エネルギー供給量¹は約18,000PJだが、そのうち、石油が約6,600PJ、石炭が約4,700PJ、天然ガスが約4,000PJとなっている。すなわち一次エネルギーのほとんど（約85%）を化石エネルギーが占めていることがよくわかる。

¹ 一次エネルギー供給量 輸入量、在庫変動、国内産を含めたエネルギー供給量のこと。

第3章 概要

カーボンニュートラル社会を実現するためには、さまざまな技術オプションを開発し、組み合わせて、上手に運用することが求められる。

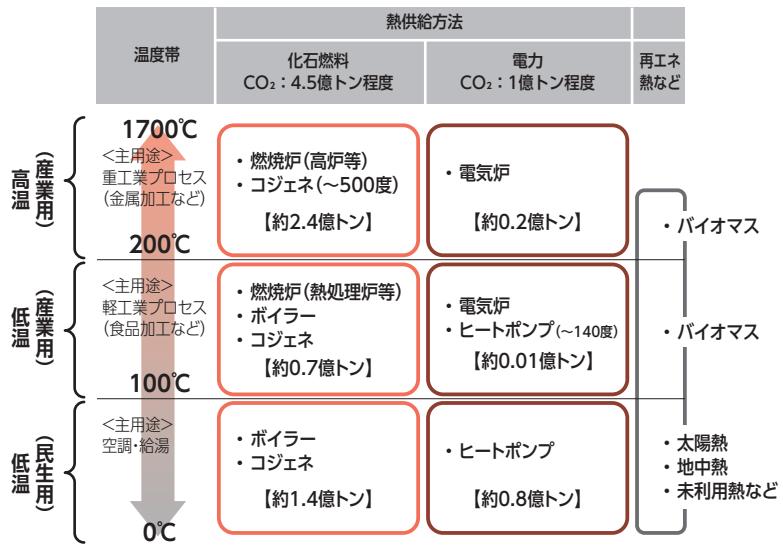
第3章では、産業分野で使用される熱の技術、熱供給や熱の電化についてなど、熱利用技術の全体像を解説する。



3.1 産業分野で使用される熱利用技術

1 热供給の現状

第1章で述べた通り、日本の産業分野では、使用エネルギーの約60%が熱として利用されている。図3.1に、主な熱供給方法を示す^[1]。



熱は、天然ガスや重油などの化石燃料を燃焼させてつくることが多い。その場合、求められる温度帯により、燃焼炉やボイラーなどが使用される。また、電気を使用して電気炉¹やヒートポンプ²、電熱ヒーターなどで熱を発生させる方法もあり、近年は増加傾向にある。その電気は、天然ガスなどの化石電源であったり、再生可能エネルギーや原子力といった非化石電源であったりする。さらに、バイ

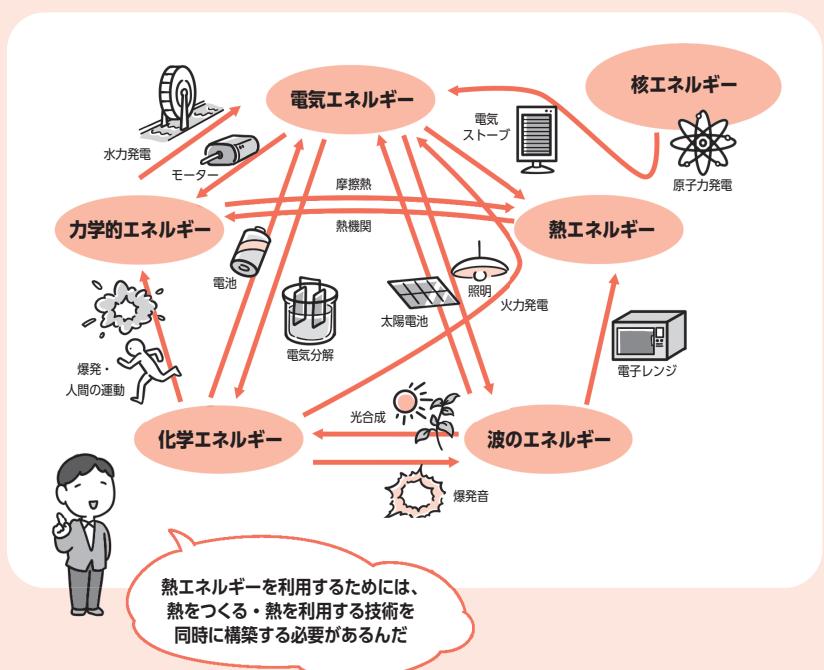
¹ 電気炉 電気を利用して加熱処理を行う炉の総称。電気抵抗、高周波誘導などの方式があり、金属やセラミック、ガラスなどの溶解や焼成に用いられる。

² ヒートポンプ 熱媒体や半導体などの電力を用いて低温部分から高温部分へ熱を移動させる技術。方式は気体の圧縮・膨張と熱交換を組み合わせたものが主流。ヒートポンプを使っているものとして冷凍冷蔵庫、エアコン、ヒートポンプ式給湯器などがある。

第4章 概要

本書で掲げるカーボンニュートラルな熱利用を目指すには、熱をつくるための投入エネルギー自体と、熱の利用における搬送や制御に用いられるエネルギーが全てカーボンニュートラルであることが求められる。

ここでは、その変換技術や熱の有効利用技術について解説する。



4.1 > 热のもとになる投入エネルギー

「熱」とは、図4.1に示すように「投入エネルギー（化石燃料、再生可能エネルギー、これらから得られる電力など）」を「変換」することで得られる。

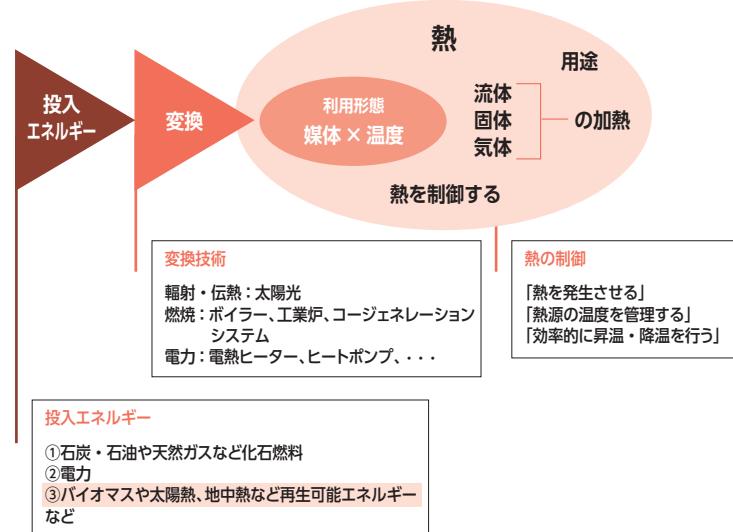


図4.1 「熱をつくる」概念

1 投入エネルギーと熱への変換

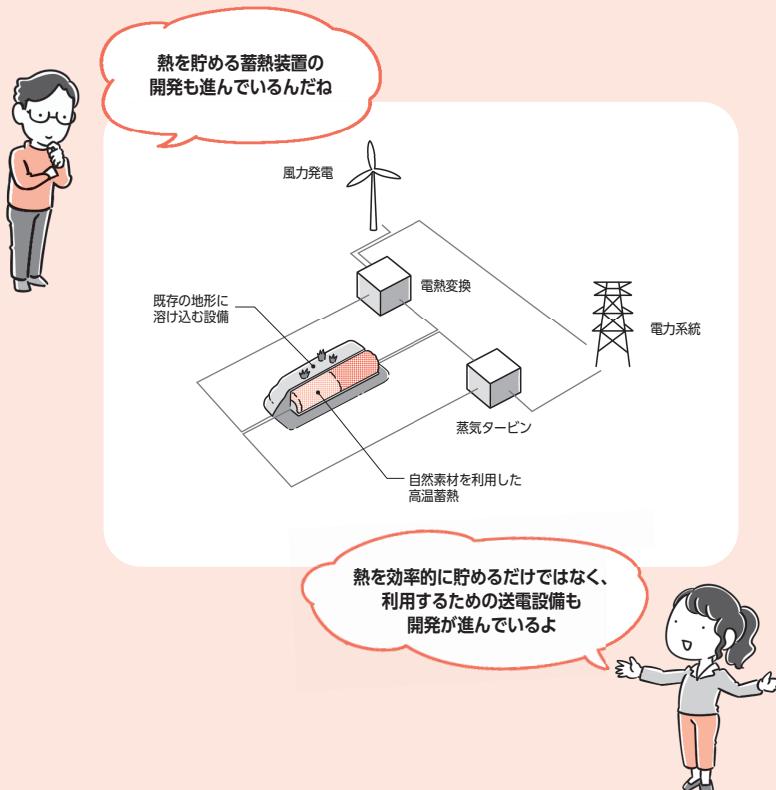
熱エネルギーを供給するための投入エネルギーは、図4.1に示したように次の通りである。

- 1 石炭・石油や天然ガスなどの化石燃料
- 2 電力
- 3 バイオマス¹や太陽熱、地中熱など再生可能エネルギー

¹ **バイオマス** 生物資源 (バイオ: bio) の量 (マス: mass) を示す概念で、「動植物に由来する有機物である資源 (化石資源を除く)」である。

第4章では熱をつくる技術を解説したが、つくった熱を利用する場合、熱が発生する時間や場所と、それを使用したい時間や場所にズレが生じる場合がある。そのため蓄熱技術が必要となり、また、パイプラインなどで輸送する技術は、熱を無駄なく利用し、脱炭素化を目指していくうえで非常に重要となる。

第5章では産業用途での熱の直接利用目的の蓄熱と、発電目的の蓄熱について解説する。産業用途の中でも、発電用途となると温度帯は400°C以上、600°C近辺が多くなり、規模的には数十MW以上となる。熱の直接利用目的であれば、100°C以上で、kWオーダーの規模感からある。温度帯・規模・用途によりかなり設備イメージも異なるので、注意が必要である。



5.1 热を貯める蓄熱方式の種類

1 热の蓄熱方式

熱を貯める製品でもっとも身近なものは、湯たんぽだろう。しかし湯たんぽは、夜には熱かったものが朝にはぼんやりとぬくなっている。湯たんぽはシンプルだが、この方式ではさまざまな産業用途には使いにくい。

時間が経過してもあまり温度が変化して欲しくない。そこで、供給する流体の温度変化がないように、表5.1に示すような蓄熱方式が開発されている。

表5.1 蓄熱の方式

名称／別名称	原理	蓄熱密度(kWh/m ³)	温度範囲	技術レベル
サーモクライン蓄熱	固体顕熱(温度差)で蓄熱	25～30	-200°C～1,000°C	商用/開発段階
硝酸塩2タンク蓄熱	液体顕熱(温度差)で蓄熱	50～80	290°C～600°C	商用
潜熱蓄熱	物質の相変化時の潜熱で蓄熱	50～150	0°C～600°C	開発段階
化学蓄熱	可逆化学反応で蓄熱	80～400	0°C～1,000°C	研究段階

出典：Rainer Tamme他「Thermal Energy Storage」(2012)^[1]をもとに作成

2 現状の蓄熱方式の課題

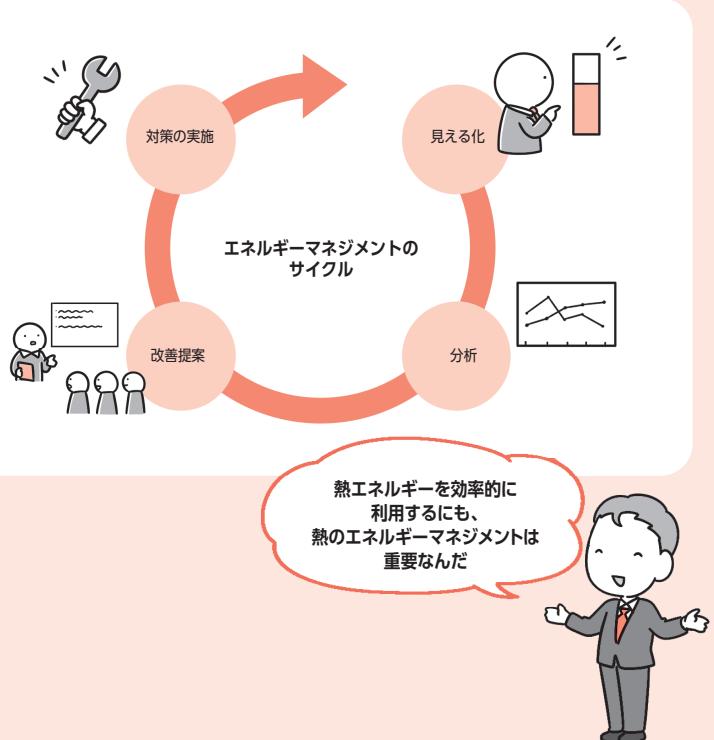
表5.1には代表的な蓄熱方式をまとめている。ただし、数値は蓄熱材そのものの蓄熱密度であり、周辺機器は含んでいない。

たとえば化学蓄熱は比較的大きな反応器を必要とするため、短時間・大出力を狙った仕様にすると、システムとしては大きくなる可能性があるため、長期間向けのシステムとなる。

第6章 概要

第2章でも解説したように、省エネルギーの取り組みはカーボンニュートラルの実現に向けて重要である。

本章では、工場・ビル・住宅などで、熱を合理的に利用するための活動である「エネルギー・マネジメント」について解説する。



6.1 熱を管理する技術とは

1 未利用熱を熱エネルギーとして利用

産業では省エネルギー（省エネ）化は時代とともに変遷し、特に1970年代のオイルショック以降では、個々の装置やプロセス単位ではかなりの省エネ化が図られ、現在では個別事業所やコンビナート単位でエネルギー使用の見える化や省エネ価値の市場化などが展開されている。

しかし、これまでの章で解説した通り、一次エネルギー供給のうち、電力への転換や各部門で使用可能な資源やエネルギーに変換する過程では変換ロスが生じる。さらに、エネルギーの最終消費時にも廃熱が発生するため、未利用熱として捨てられている熱エネルギーは一次エネルギー供給の半分以上にも相当する。

一方で、産業部門では化学工業やパルプ・製紙業、業務部門では事務所の冷房、スポーツ施設、ホテルや病院では給湯需要が多いというよう、熱エネルギーを大量に必要とする業種もあることが示された。

2 热エネルギーのエネルギー・マネジメント

こうした熱の需給ギャップを緩和し、省エネ化・脱炭素化を進めるためにも、産業・熱エネルギー分野のエネルギー・マネジメントはさらに発展させていく必要があり、そのためには次の2点がポイントであると考えられる^[1]。

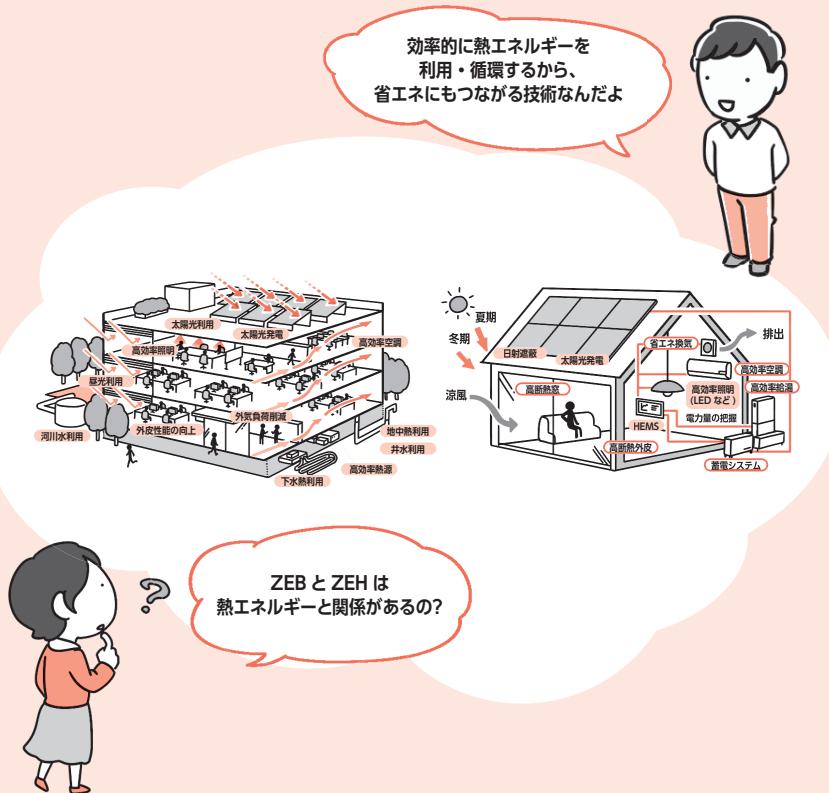
- ① 空間、時間の扱う範囲の拡大
- ② IoT/AI利用による省エネ、電化などのスマート化

①の「空間的」とは、たとえば、異なる生産プロセス間、生産部門と動力部門、廃棄物処理部門といった工場内の異なる部門間、企業の枠を超えた連携、地域社会と企業の連携、そして隣接するエネルギー面で補完関係にある地域間を指す。また、「時間的」とは、エネルギー貯蔵、エネルギー需要の時間的調整などを指す。エネルギーを管理する技術であるエネルギー・マネジメントでは、家庭単位のHEMSから、ビル単位のBEMS、地域全体のエネルギーを管理するCEMSのよ

第7章 概要

民生部門の建築物や住宅に対する省エネ化と、生活・ビジネスの利便性との両立を目指した技術がZEBやZEHである。

第7章ではこれらの技術について紹介する。



7.1 民生部門でのエネルギーの使われ方

1 民生部門のエネルギー使用量

民生部門は、家庭部門と業務部門¹から成る。たとえばエアコンや照明機器は、室内環境を快適に保つため、家庭でも商業施設でも常に利用されていて、大量の電力を消費する。このような生活やビジネスの利便性や快適性の追求は、エネルギー消費量を増加させるため、消費電力が少ない機器に変更するような対策はとても有効である。

図7.1(図2.1の再掲)に示すように、実際に民生部門で消費されているエネルギー量は合計約3,700PJであり、最終エネルギー消費量(約12,000PJ)の約30%に相当する。そしてこの部門でのCO₂排出量(2022年度)は、年間約3.4億トン(電力・熱配分後)に達する^[2]。

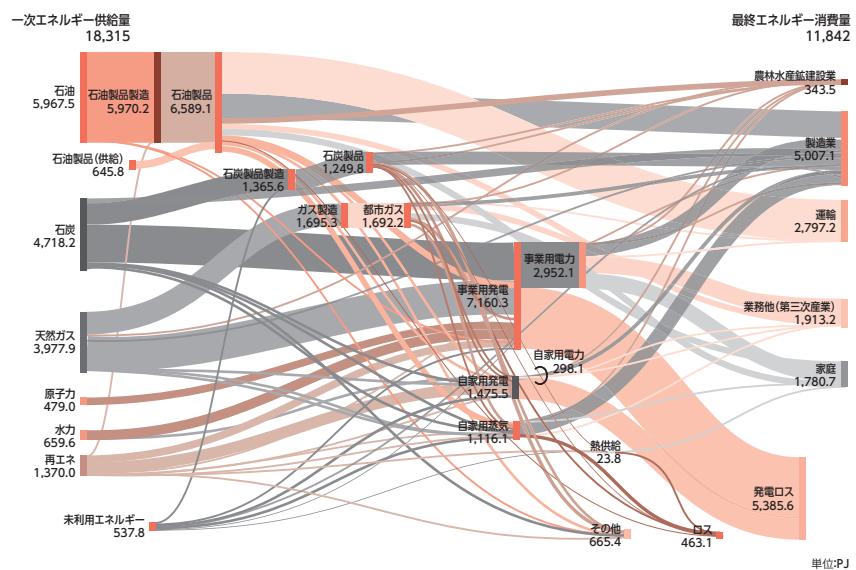
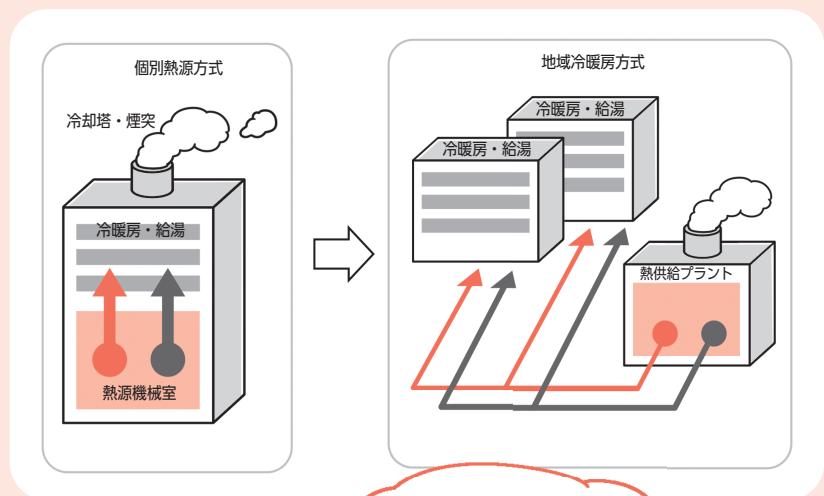


図7.1 日本のエネルギーフロー(2022年度)(図2.1の再掲)
出典：経済産業省・資源エネルギー庁「総合エネルギー統計 2022年度詳細版」(2024)^[1]をもとに作成

熱の複合システムとして、地域の冷暖房や給湯の熱をまとめて製造し、地域全体に供給する地域熱供給の導入も進められている。時代の要請や地域の特長に応じた多様なアプローチを組み合わせて、2050年の脱炭素社会の実現、新しい街づくり、街の防災機能の強化への貢献が期待される。



熱供給事業は地域で熱をつくり、
さらに供給も行えるから、
街の防災機能の強化も
期待できるんだ



8.1 地域熱供給の熱供給事業

1 热供給事業とは？

熱供給事業は地域冷暖房とも呼ばれ、一定地域内の建物群に対して蒸気・温水・冷水などの熱媒を一箇所でまとめて製造^①し、導管を通じて供給するシステムを運用する事業のことを言う。

個々の建物で熱源設備を設置する「個別熱源方式」に比べて「地域熱供給」は、省エネルギー性・環境保全性・防災性に優れており、また、スマートシティや業務継続地区 (BCD: Business Continuity District) の構築に必要不可欠なエネルギー供給システムとして期待される（図8.1）。

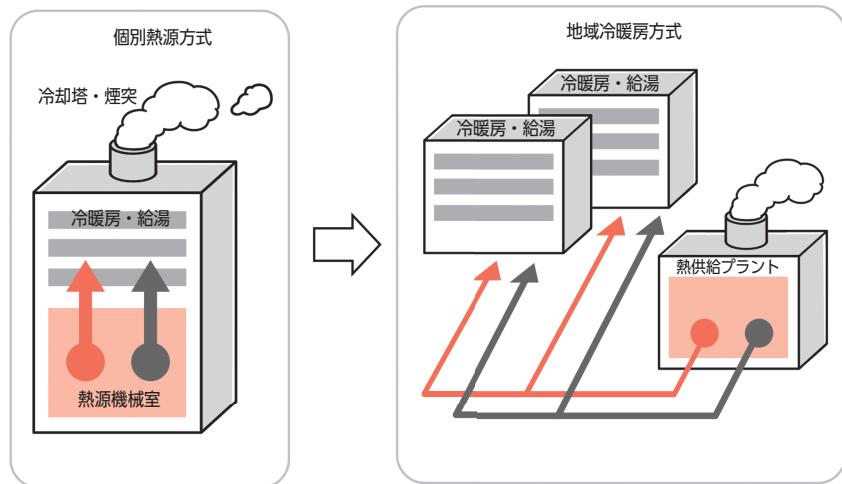


図8.1 個別熱源方式と地域冷暖房方式

出典：経済産業省・資源エネルギー庁「『熱供給事業』とは？」(2023)^[1]をもとに作成

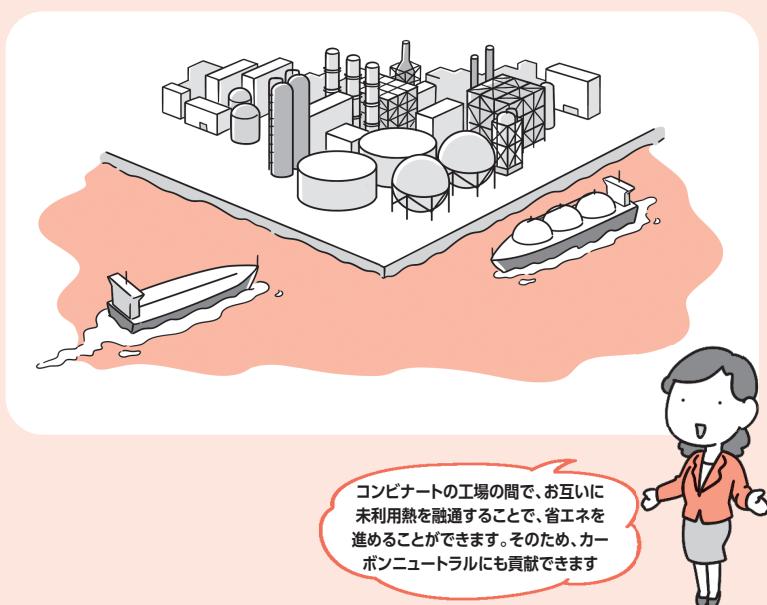
第9章 概要

第9章では、重化学工業分野の多数の工場が集積する石油化学コンビナートについて解説する。

第1次、2次石油ショックを契機として、燃料ガスや燃料油などのエネルギー価格が高騰したため、工場は急速に省エネを推進した。しかし、1990年代に入ると、石油化学コンビナートに立地する個別工場の省エネの余地はなく、「省エネはやりつくした、これ以上は乾いた雑巾を絞るようなものだ」とよく言われた。

本章では、石油化学コンビナートの個々の工場の努力は認めたうえで、A工場の排熱（未利用熱）は、近隣のB工場ではまだまだ有効利用できるのでは、という観点で、コンビナート内での熱連携を考えれば、まだまだ大きな有効利用のポテンシャルが存在するということを解説する。

すなわち、コンビナート単位での熱エネルギーの需要量、その理論的な削減余地の把握、有効利用策、そして新たな方策などを紹介する。



9.1 > コンビナート熱の有効利用

石油コンビナートとは、石油製品や石油から得られる中間製品を利用してさまざまな石油化学製品を効率的に生産するために多数の工場が集積する工業地帯を指す。それら工場はいずれも大規模な設備が多いため、コンビナートはエネルギーの大量消費地域として知られる。

石油化学コンビナートはその特性として、電力エネルギーの消費量に比して熱エネルギーのそれが多いため、従来から熱エネルギーの有効利用とその削減（省エネの推進）が常に検討され、実践されている。

工場の中で熱エネルギーを処理するヒーターとクーラーについて紹介し、次に鹿島コンビナートと水島コンビナートで収集されたデータについて解説する。

1 工場での熱エネルギーの利用状況

① ヒーターの役割

図9.1は、工場の中を簡単に示すものである。工場は、プロセスシステムとユーティリティシステム（エネルギーシステムとも呼ぶ）で構成される。

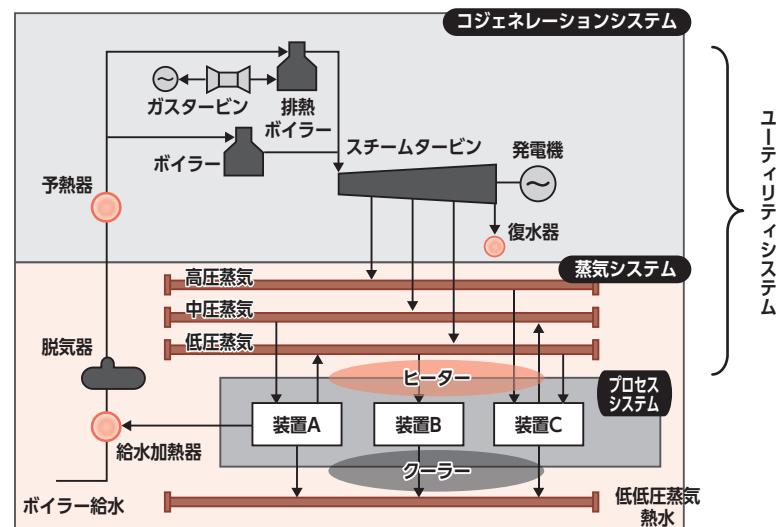
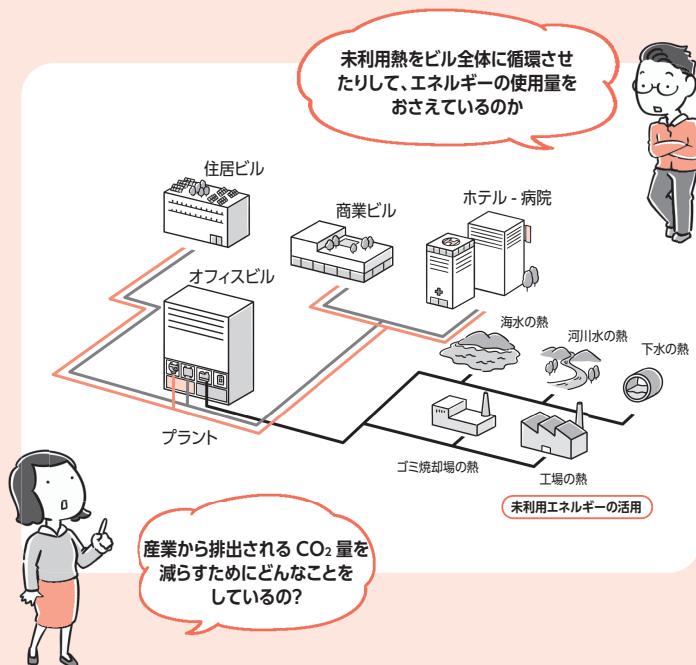


図9.1 工場中のヒーターとクーラー

第10章 概要

10章では産業部門でのエネルギー起源CO₂排出量の多い業界に注目し、業界ごとの熱の利活用に関する取り組み事例を紹介する。

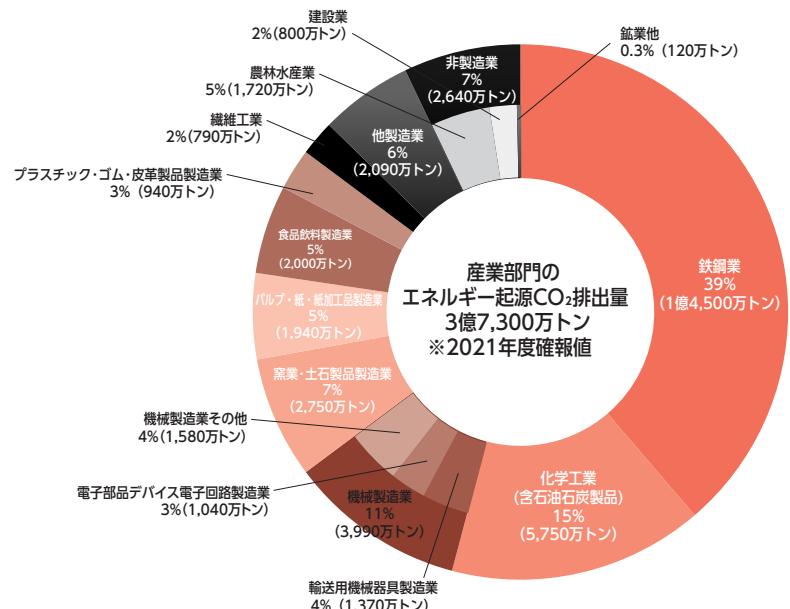
各業界では、カーボンニュートラル達成に向けた計画やビジョンが公表され、動きが加速している。



10.1 産業部門のエネルギー起源CO₂排出量

日本の2021年度エネルギー起源CO₂排出量は9億8,800万トンで、そのうちの4割弱にあたる3億7,300万トンが産業部門からの排出となる。

産業部門のCO₂排出量を業種別に見ると、鉄鋼業がもっと多く、約39%を占めている。次いで化学工業(含石油石炭製品)、機械製造業、窯業・土石製品製造業、パルプ・紙・紙加工品製造業が排出量の多い業界となっている(図10.1)。



※四捨五入の関係で、合計が100%にならない場合がある。

図10.1 産業部門での業界別エネルギー起源CO₂排出量
出典：環境省「2021年度(令和3年度)温室効果ガス排出量」(2023)¹¹⁾をもとに作成

第11章 概要

第11章では、これまでに述べてきた熱エネルギーのGHG削減に向けた技術や動向を整理することに加えて、将来期待される技術といった展望について述べていく。



11.1 日本のエネルギー利用状況

本書の1章でも述べた通り、2015年のCOP21¹で採択された「パリ協定」で定められた努力目標である1.5°C目標を達成するためには、21世紀後半までに人間の活動による温室効果ガス(GHG: Green House Gas)の排出量を実質的にゼロにする、すなわちカーボンニュートラルを実現することが必要である。

1 現状のエネルギーバランスと熱エネルギーの利用量

図11.1に日本におけるエネルギー供給量と最終エネルギー消費量を示す。図11.1は左側がエネルギー源(一次エネルギー)、右側が最終エネルギーを表している。

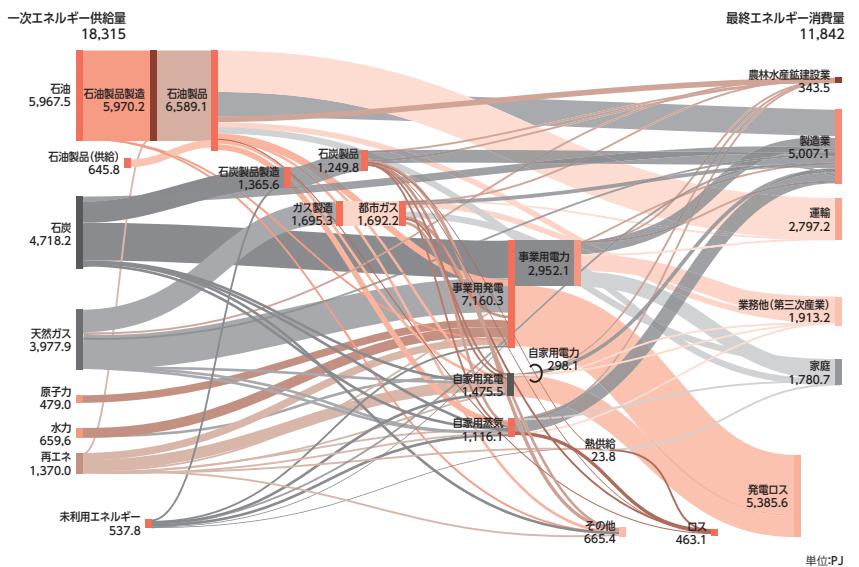


図11.1 日本のエネルギーフロー(2022年度)(図2.1の再掲)

出典：経済産業省・資源エネルギー庁「総合エネルギー統計 2022年度詳細版」(2024)^[1]をもとに作成