

## 特別企画

# 産業電化が導くカーボンニュートラルの未来

## The future of carbon neutrality attained by industrial electrification

一般社団法人 日本エレクトロヒートセンター 代表理事・会長 内山 洋司

一般社団法人 日本エレクトロヒートセンター 業務部長 中谷 真幸

Japan Electro-Heat Center, Yohji Uchiyama, Masayuki Nakatani

〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町 13 番 7 号

e-mail: office@jeh-center.org

### 1. はじめに

世界で異常気象が多発している。2020 年は平均気温は平年よりかなり高い地域が増え、異常高温が世界の各地で頻繁に発生し、山火事を多発している。一方、逆に、中央アジア南部やその周辺では、異常低温に見舞われた。また、降水量を見ると、平年よりも多い地域が増えている。例えば、ヨーロッパは 7 月中旬の記録的な大雨によって洪水が発生し、死者の数は約 200 人、ドイツだけでも 150 人以上が行方不明となった。逆に、ヨーロッパ東部やアルゼンチン北部からブラジル南部では異常少雨となる月が多くあった。異常気象は、温室効果ガスがもたらしている気候変動が原因と考えられている。

本稿では、日本の産業分野におけるエネルギー消費の現状を概観し、省エネ・脱炭素に優れ、革新的な生産工程により生産性と品質の向上に貢献する様々なエレクトロヒート技術を紹介し、電気による加熱技術には省エネと脱炭素化の実現に向けたイノベーションを起こす大きなポテンシャルがあることを紹介する。

### 2. 温室効果ガス削減に向けた動き

世界中の科学者が集まって気候危機に関する研究成果をまとめている「気候変動に関する政府間パネル (IPCC) によって、2021 年の 8 月 9 日に第六次報告書が発表された。それによると、地球の平均気温は、人間活動によって約 1.1°C 上昇しており、熱波、激しい降水、干ばつ等に留まらず、氷河や北極圏の海氷の後退、海面上昇による頻繁な沿岸部の洪水や海岸浸食、海洋酸性化、熱帯低気圧の強大化等、人為的な気候変動の影響が認められると断言した。異常気象は、人類が排出している CO<sub>2</sub> 等の温室効果ガスの大量放出によるとされている。

人類は既に、産業革命以降、人間活動によって約 2 兆 4000 億トンの CO<sub>2</sub> を排出しており、気温上昇を 1.5°C に抑えるためには、残り後 4000 億トンの枠しか残っていない。すな

わち、排出量は今後ただちに急減させてネットゼロに持っていかなければ、1.5℃の気温上昇を抑えることができない。

気候変動対策に世界が動き出した。欧州委員会は、2050年までに気候中立達成を目指すとし、2030年にはCO<sub>2</sub>排出量を1990年比で55%削減する目標を掲げた。その対策予算として、今後7年間のEU予算で70兆円を「グリーンリカバリー」に、復興基金で35兆円をグリーン分野に投入する計画を立てている。

英国でも、気候変動法に2050年カーボンニュートラルを規定し、1.7兆円を脱炭素10分野に投資する。米国ではバイデン政権によって気候変動問題が最重要政策の1つに位置づけ、EV普及、建築のグリーン化、エネルギー技術開発など脱炭素分野に200兆円の投資を公約した（図1）。

わが国でも2020年10月に菅前首相が所信表明演説で「2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことを宣言した。その後、3月には2030年のCO<sub>2</sub>排出削減量をこれまでの26%から46%にまで高める目標を掲げた。

政府が掲げた削減目標を受けて、東京都・京都市・横浜市を始めとする自治体が「2050年までにCO<sub>2</sub>排出量実質ゼロ」を表明した。産業界も脱炭素化に向けて動き出した。日本経団連は、「低炭素社会実行計画」に引き続き、新たなイニシアティブとして「チャレンジ・ゼロ」を打ち出し、脱炭素社会の実現に向けたイノベーションを創出することを宣言した。また、一般企業でも既に複数社、CN宣言を行っている（図2）。

### 3. 日本のエネルギー消費の現状

#### 3-1 部門別の二酸化炭素排出量

日本のCO<sub>2</sub>排出量は、43%が電力部門から排出されており、残りは、電力以外の産業、家庭、運輸部門からの排出である。

電力以外では、運輸部門の19%、第一

脱炭素化への動き	EU	英国	米国	中国		
	● 2050年までに気候中立(Climate Neutrality)達成を目指す。 ● CO <sub>2</sub> 削減目標を2030年に1990年比で少なくとも55%とする。	● 気候変動法に2050年カーボンニュートラルを規定。 ● 長期戦略については、2021年提出に向けて準備。	● 民主党は気候変動の課題を最重要政策の1つに位置づけた。 ● 2035年に電力脱炭素の達成、2050年以前のネット排出ゼロの計画を発表。	● 国連総会一般討論で習近平主席が2060年カーボンニュートラルを目指すを表明。 ● EVやFCEV等の脱炭素技術の産業育成に注力、2020年の新エネ補助金予算は4,500億円程度。		
	EU 10年間で官民で120兆円の「グリーンディール」投資計画。うち7年間のEU予算で70兆円を「グリーンリカバリー」に、復興基金で35兆円をグリーン分野に投入する計画。	ドイツ 先端技術支援に2年間で約6兆円の予算。うち、水素関連に0.8兆円、充電インフラに0.3兆円、グリーン技術開発に約1兆円。	フランス グリーンエネルギーやインフラ等のエコロジー対策に2年間で3.6兆円の予算。	英国 脱炭素10分野に2030年までに政府支出1.7兆円を投資。誘発される民間投資は5.8兆円。	米国 EV普及、建築のグリーン化、エネルギー技術開発等の脱炭素分野に約200兆円投資を公約。	韓国 再エネ拡大、EV普及、スマート都市等のグリーン分野に5年間で政府支出3.8兆円。

図1 世界の脱炭素化と各国の気候変動対

業種	企業名	CN目標年
建設	西松建設	2030年
	大林組、鹿島建設、積水ハウス、東急建設	2050年
食料品	アサヒ、サッポロ、サントリー	2050年
自動車・部品	アイシン精機、いすゞ自動車、本田、ケーヒン、トヨタ、豊田自動織機	2050年
IT/ロボクス	エニックス、シネマス、日立製作所、日立インテリジェンス	2030年
	アズビル、私研、シャープ、ソニー、タケノ工業、NEC、Panasonic、富士通、マテル、リコー	2050年
化学・製薬	武田薬品工業	2040年
	小野薬品工業、栗田工業、積水化学工業、中外製薬、デンカ、富士フイルム、三井化学、アイト	2050年
その他製造業	王子HD、川崎重工業、住友大阪セメント、大日本印刷、帝人、アジクラ、北越コークレション、三菱重工業、エチカム、LIXIL	2050年
電気・ガス	沖縄電力、JERA、東京ガス	2050年
石油	E N E O S	2040年
運輸・商社	JR東日本、東急、日本航空、ヤマトHD、住友商事、三井物産	2050年
その他サービス	アスクル	2030年
	イトイ、伊藤忠テクノソリューションズ、セブン&7HD、Zホールディング、野村総合研究所、日本アググループ、日本エシス、日立キャピタル、ファミリーマート、ローソン	2050年

図2 CN宣言企業<sup>1)</sup>

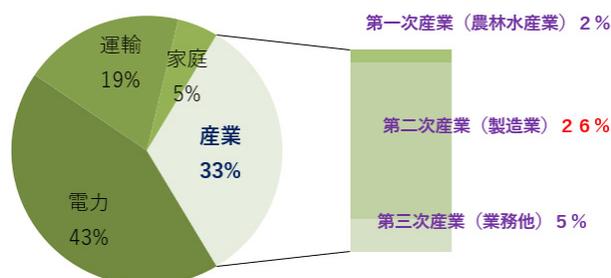


図3 部門別の二酸化炭素排出量<sup>2)</sup>

次産業の農林水産業、第二次産業の製造業、そして第三次産業の業務などのサービス業といった産業部門が 33%を放出している。中でも、第二次産業である製造業は 26%を占めている。製造業の脱炭素化は、電力部門と同様に、大きな課題になっている（図3）。

脱炭素化は図4のとおり化石エネルギーからの脱却である。脱却の方法には、省エネ、非化石エネルギーの拡大、それにエネルギーの電化がある。

化石エネルギーを使わざるを得ない場合は、燃焼ガスからCO<sub>2</sub>を回収・貯留する方法もある。しかし、CO<sub>2</sub>回収貯留や非化石エネルギーである水素のインフラ整備には時間がかかる。

早期の脱炭素化となると、既にインフラが整備されている電力施設を活用するのが現実的である。太陽光や風力などの再生可能エネルギーや原子力といった発電時にCO<sub>2</sub>を排出しない電源の利用拡大によるエネルギーの電化が必要になる。電化は、脱炭素社会を早期に実現するエネルギー転換になる。

最終エネルギー消費に占める電気の割合である電化率は、年々、増加しており、現在、26%になる。部門別に見ると、家庭部門は51%と最も高く、それに対して運輸部門が僅か2%と最も低い。産業部門の電化率は、第一次・第二次・第三次産業全体で見ると28%だが、第二次産業である製造業の電化率は21%と、製造業は電化が進んでいるとは言えない（図5）。

これは、製造業には加熱用途が多く、その熱源に化石燃料を燃焼するボイラが使われるためである。ボイラは古くからある技術で、設備費が比較的安く、また安価な重油や都市ガスといった燃料が利用できる経済的な熱源設備になっている。図6は、最終エネルギー消費を部門別に見たもので、消費量は、製造業が最も多く全体の44%を占める。また、製

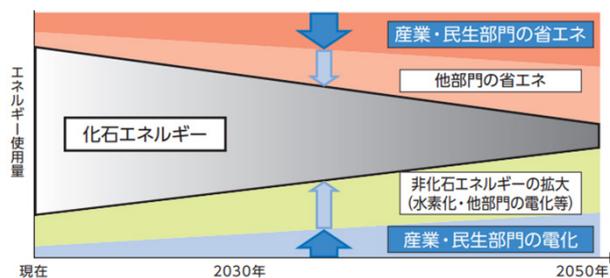


図4 カーボンニュートラルへの需要側の対策<sup>3)</sup>

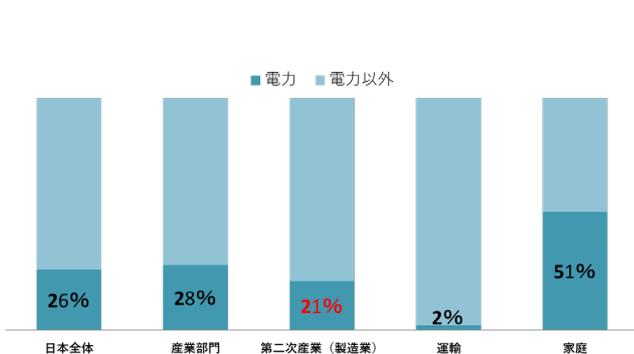


図5 部門別に見た電化率<sup>2)</sup>

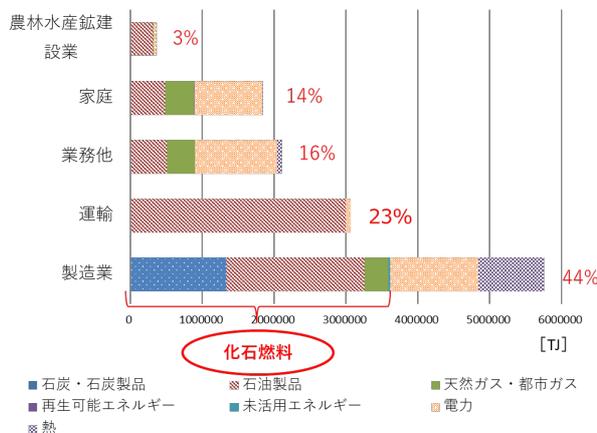


図6 部門別の最終エネルギー消費<sup>4)</sup>

造業の化石燃料消費は多く、その割合は製造業全体のエネルギー消費の63%になる。

図7は業種別に見たもので、鉄鋼業と化学工業が際立っており、その消費量は製造業全体の8割を占めている。2つの業種が消費する化石燃料のうち、44%は鉄や石油化学製品を製造する原料用の用途に使われている。原料用以外の用途では、直接加熱と自家蒸気製造であるボイラの熱源にそれぞれ31%、17%と全体の半分近くが使われており、用途別には熱利用の割合が大きいことが分かる。これは、熱利用における脱化石燃料のポテンシャルが大きいことを意味している。

さらに、直接加熱とボイラ（自家用蒸気製造）の化石燃料消費量を業種別に見ると、直接加熱で消費される化石燃料の量は、石油換算すると6,500万キロリットルになる。特に、鉄鋼業は直接加熱で消費する量の75%を占め、そこに化学工業と窯業・土石製品工業を加えた上位3業種だけで95%になる。

また、ボイラで作られる自家用蒸気は主に150℃以下の比較的低い温度で利用されるが、その製造には石油換算で1,900万キロリットルが消費されている。自家用蒸気の生産量が最も多い業種は化学工業で38%を占め、次いでパルプ・紙・紙加工品製造業と鉄鋼・非鉄・金属製品

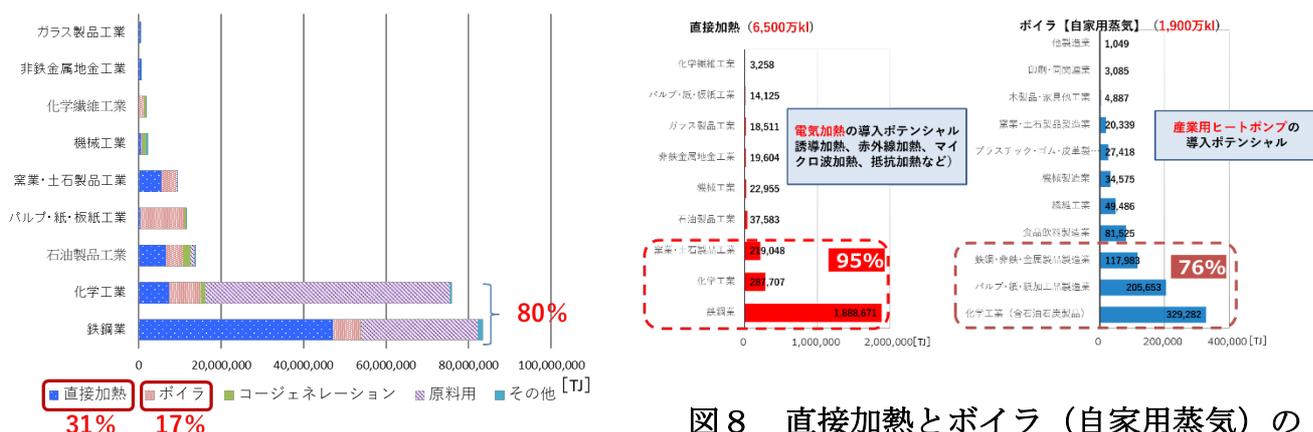


図7 業種別の最終エネルギー消費 5)

図8 直接加熱とボイラ（自家用蒸気）の業種別燃料消費量 4b)

製造業の順で、上位3業種の割合は76%になる（図8）。このように製造業の熱利用では直接加熱と自家用蒸気の製造に、実に8,400万キロリットルの石油が消費されており、その値は政府の2030年までの省エネ目標約6,200万キロリットルを大きく超えている。

### 3-2 エレクトロヒートによるイノベーションの創出

直接加熱や自家用蒸気による加熱での省エネをどのように達成するか。直接加熱の場合、これまでとは違う革新的な製造技術の開発も必要になるが、加熱の仕方を変えることで省エネになる方法もある。製造工程で加熱時間を短縮する加熱方法にすれば、一日に製造できる製品ロット数が増加し、結果として生産性の向上による省エネを図ることができる。

電気を利用する加熱技術は、従来のガス・油等の燃焼による雰囲気加熱に比べ、製品を

直接加熱することができるため効率的で、生産性が向上する。また、製造工場の作業環境もクリーンで安全になる。

一方、ボイラで製造される自家用蒸気は、生産ラインで使われた後、すべての熱が廃棄されている。捨てられている熱をヒートポンプを使って加熱し再び利用できるようにすれば熱の有効利用が図れる。電気加熱とヒートポンプによるエレクトロヒートは、産業加熱分野でイノベーションを実現する強力な手段になると考えている。

#### 4. エレクトロヒートの優れた特性

##### 4-1 電気加熱の適用領域

エレクトロヒートの長所は、電気が持つさまざまな原理や特性によって多様に製品を加熱することにある。その多くが熱伝達による間接的な加熱ではなく、必要部分を直接、加熱するもので高い省エネ性を有している。また、制御性にも優れ急速かつコンパクトに加熱できることから、製品製造の生産効率を高めることができる。

加熱技術には、誘導加熱、赤外線加熱、マイクロ波加熱、ヒートポンプなど様々な方法があり、加熱方法は顧客のニーズに合わせて選ぶことができる。図9に電気加熱の各種方式の原理を示す。

抵抗加熱は、基盤産業から先端産業まで、幅広い業種の様々な工程において利用されている。放射熱伝達を応用した赤外加熱は、様々なヒーターの商品化によって、電気機械、食品など多くの業種で幅広く活用され、マイクロ波技術は、電子レンジ以外にも、工業利用としてマイクロ波のゴム加硫装置への適用や有機化学、化学合成などの分野への適用が進んでいる。誘導加熱は、1970年代に入ってから、低周波炉から高周波炉への技術発展によって、省エネルギーや生産性向上等の面から、鋳鍛造など素形材の発展に大きく貢献し、近年では塗装乾燥工程など、必要温度が100～200℃程度の比較的低温の加熱加工分野で、新たな誘導加熱装置が実用化されている。アーク放電は1980年代後半から、直流アーク炉の建設が世界的に積極的に進められてきた。プラズマ加熱は、1939年に発明されたプラズマ溶射法によって材料の切断溶接などに活用され、近年では、都市ごみ焼却灰や廃棄物の熔融処理等にも活用されている。

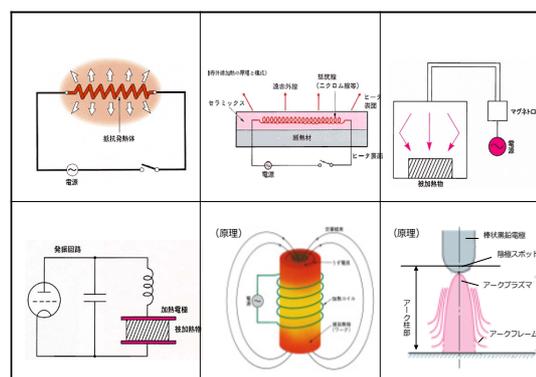


図9 電気加熱の原理

電気加熱の用途は、溶解、熱処理、乾燥、合成、調理、殺菌、解凍など多岐に亘っており、その温度域は、1万度を超える高温から数十度までの幅広い温度に適用可能であり、多様な工程にも対応できるため、様々な業種の生産工程に導入されており、今後、さらなる利用拡大が期待されている（図10）。

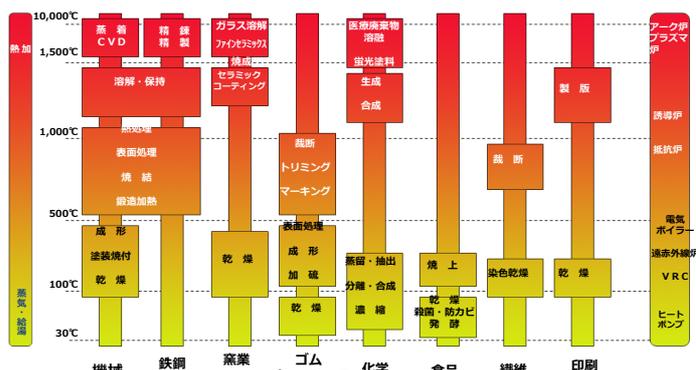


図10 電気加熱の適用温度域と業種

#### 4-2 赤外加熱の導入事例

赤外線加熱の特長は、大きく5つ挙げられる。

1つ目は、効率の高さ。放射エネルギーを直接加熱対象に与えるため、エネルギーの熱変換効率を高めることができる。2つ目は、急速な加熱。短時間での乾燥が可能であり、炉の長さを短くでき、省スペースと炉表面からの放熱ロスを低減できる。3つ目は、クリーン。非接触による加熱であるために、加熱対象物が汚れることなく、燃焼による副生成物もない。4つ目は、省電力。電気は、必要時にだけ通電し、不要時は全く通電せず、無駄なエネルギー消費がない。最後は制御性。電力出力を制御するだけで温度コントロールができ、容易かつ応答性に優れた高い制御が可能になる。

粉体塗装の乾燥工程に導入した事例では、従来の燃焼バーナーによる熱風循環方式に赤外線加熱を活用した乾燥炉をハイブリッドで組み合わせた（図11）。乾燥炉の前半では赤外線加熱による乾燥によりワークを短時間で均一に昇温、後半では従来の温度保持が特異な熱風で塗膜を硬化させた。この方式によりコンベアスピードを落とすことなく、炉長を52mから32mに縮小でき生産性の向上に加え、50%の省エネとCO<sub>2</sub>排出量を45%削減することができた。

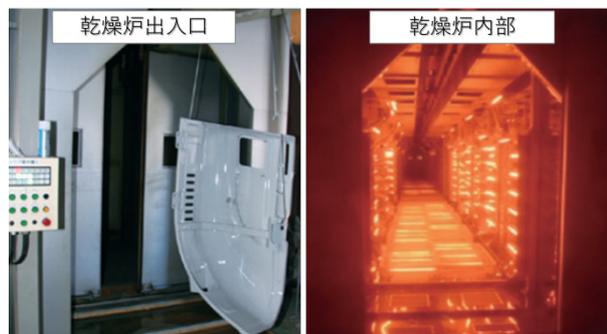


図11 赤外線加熱の導入事例

#### 4-3 誘導加熱の導入事例

電磁誘導を利用して製品に電流を流して直接加熱する誘導加熱の特長を紹介する。

まず、必要となる加熱部だけを非接触で急速に加熱するために、効率良く短時間に加熱することができ、酸化物といったスケールが生成しない。また、1,400°C以上の高温でも自動制御で無駄なく加熱でき、作業場の暑さを軽減し環境改善も期待できる。

誘導加熱は、金属の溶解、銅板などの熱加工、機械部品の焼き入れなどの分野で広く利用されている。

船舶用の電力ケーブルに亜鉛メッキ鉄線を編み込みんだ上に、塗布した塗料を乾燥させる工程に導入された事例では、誘導加熱コイルの中に鉄線が編み込まれたケーブルを通すことで、鉄線自体を加熱させ表面に塗布された塗料を効率よく内から乾燥させることができた。また、従来の熱風乾燥と異なり、予熱しなくても目標温度に直ぐに到達できた（図12）。加熱方法を誘導加熱に変更したことで、一次エネルギー使用量、CO<sub>2</sub>排出量、ランニングコストすべてにおいて70%削減と大きな効果が得られた。

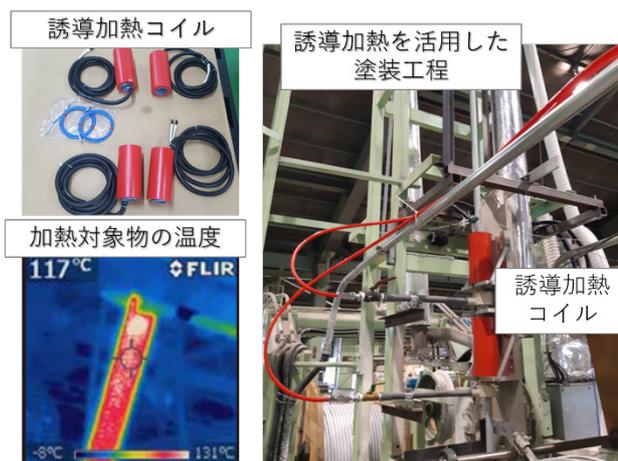


図12 誘導加熱の導入事例

#### 4-4 蒸気利用における熱供給の課題

蒸気を利用している工場での熱供給には大きく4つの課題がある。

1つ目は、大量の低温排熱が放出されている点である。工場の生産プロセスで使われた熱は、まだ温度が高い状態にあるにも係らず、全て捨てられている。2つ目は、燃焼ボイラで蒸気を生産する場合、ボイラ、配管、ドレインなどで熱損失が発生する点である。発生蒸気のおよそ50%近くが無駄になっている。3つ目は、生産プロセスは、乾燥、殺菌、洗浄など、様々な用途に異なる温度レベルの熱を使用するにも拘わらず、蒸気供給では、全てに一定の高い温度で熱を供給している点である。そのためエクセルギーロスが発生している。最後に、生産プロセスには「加熱」と「冷却」が両方存在する工程が多くあるが、加熱と冷却が異なるプロセス方法を使って別々に供給されている点である。

### 5. ヒートポンプの省エネ・環境優位性

#### 5-1 ヒートポンプによる省エネと再エネ活用

既存の蒸気ボイラを産業用ヒートポンプに置き換えることにより、熱の無駄が大幅に改善される。図13の左図は、ヒートポンプ導入による省エネ性能を計算したものである。工場における熱損失を実測した結果によれば、平均的な熱損失はボイラの燃焼ロスが10%、配管ロスが26%、ドレンロスが10%となり、実際に使われている熱は投入エネルギーの54%に過ぎないことが分かった。

この実際に使われている熱をヒートポンプに置き換えたシステムを図で示している。ヒートポンプの成績係数を実績値の4と仮定すれば、電気エネルギーは13.5が必要とな

る。13.5の電気エネルギーを作るには、電力変換ロス等を考慮すると、35の一次エネルギーが必要となる。この値は、ボイラで必要な一次エネルギー100に比べて65も少ないことが分かる。すなわち、蒸気ボイラをヒートポンプに置き換えることで65%の省エネが達成されることになる。

また、ヒートポンプは再生可能エネルギーが利用できるシステムでもある。右図は、同じく成績係数4のヒートポンプを熱需要が100のシステムに適用したものである。必要な電気は25になる。電源構成を火力60%、原子力20%、再生可能エネルギー20%と仮定すれば、火力発電と原子力発電による一次エネルギー消費量は35と15を足した50となる。その結果、残りの50が空気中の熱も含めた再生可能エネルギーとなる。将来、電源構成が再生可能エネルギーと原子力によって供給されるようになれば、再生可能エネルギーの活用量はさらに増え、同時に二酸化炭素を排出しない加熱方法となる。

このように、省エネ性を向上し再生可能エネルギーを活用できるヒートポンプは、脱炭素社会の構築に欠かせない技術システムであることが分かる。

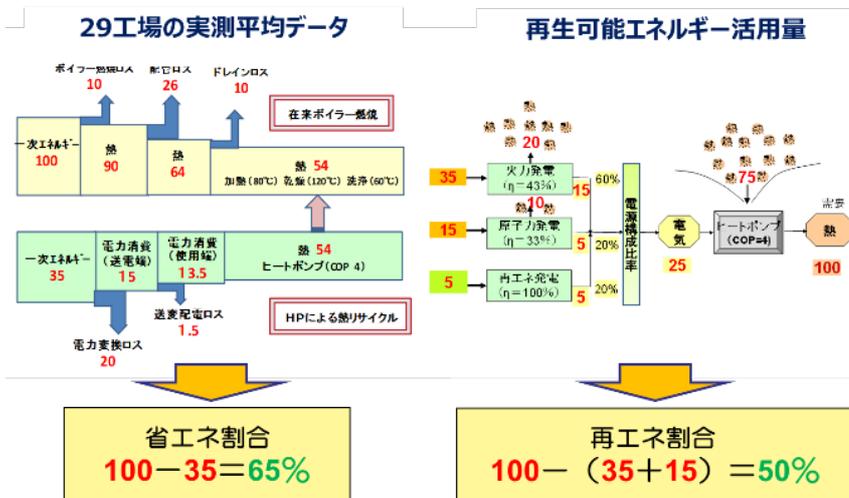


図13 ヒートポンプの省エネ性と再エネ

### 5-2 産業用ヒートポンプの導入事例

化学製品の乾燥工程にヒートポンプが適用された事例を紹介する(図14)。

乾燥に必要な熱風は、従来、蒸気ボイラからの蒸気熱により供給されていた。これを、熱風発生ヒートポンプとのハイブリッド化により、ボイラで消費されていた化石燃料の削減と蒸気ドレインの排出量が抑えられ、省エネとCO<sub>2</sub>削減が実現できた。さらに、ヒートポンプから同時に発生する冷水を空調用冷水に利用することで空調用冷水チラーの消費電



図14 産業用ヒートポンプの導入事例

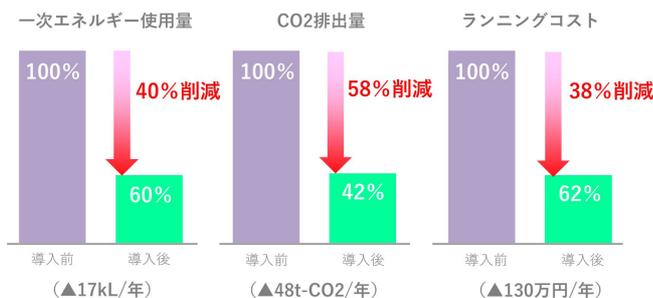


図15 産業ヒートポンプ導入効果

力を低減、加熱と冷却、両方のシステムに対しCO<sub>2</sub>削減に貢献した。削減効果についてはエネルギー消費を40%、CO<sub>2</sub>排出量は58%削減できた。また、従来のシステムに比べ、エネルギーコストも38%削減することができた（図15）。

## 6. さいごに

ここまで、エレクトロヒート技術には大きく次の3つの特長があることを示した。

- ・ 様々なユーザのニーズ・用途に応じた加熱方法を導入することで電気加熱の利点が生かされ工場の省エネと生産性を高めることができる。
- ・ 燃焼排ガス、輻射熱等による周囲温度上昇も少なく、工場の作業環境を改善し、安全性を高めることができる。
- ・ 産業用ヒートポンプは熱のリサイクルにより、省エネルギーだけでなく、再生可能エネルギーも活用できる。

エレクトロヒートが普及することにより、日本の製造業には省エネ・脱炭素におけるイノベーションの創出が期待できる。エレクトロヒートが普及していくためには、それぞれの加熱技術をお客さまの素材・製品とお客さまのニーズに、いかにマッチングさせるかが重要となる。

日本エレクトロヒートセンターは、メーカーとユーザ双方の豊富な情報を集め、シンポジウムの開催など、効率的なマッチングサービスをこれからも提供していく。

## 参考文献

- 1) 令和2年度環境省温室効果ガス排出量算定方法検討会（第1回）資料を参考
- 2) 総合エネルギー統計（2019）から作成
- 3) 資源エネルギー庁作成資料
- 4) 総合エネルギー統計（2018）から作成
- 5) 産業別石油等燃料統計（2018）から作成