

特 集 産業電化が拓く省エネ・低炭素社会

“産業電化”による省エネ・脱炭素イノベーションの実現

“Industrial Electrification” Creating Innovation for Energy Conservation and De-carbonization

内 山 洋 司*

Yohji Uchiyama

1. まえがき

日本政府は地球温暖化対策としてCO₂排出量を2030年度までに26%の削減を目標とした低炭素社会実行計画を策定し、さらに2050年までにカーボンニュートラルを目指している。目標を達成するには、エネルギー需給の両面での脱炭素化が不可欠となる。

産業部門は需要側で最も化石燃料を消費しており、これまで以上の省エネと脱炭素化が求められる。エネルギーの電力化は脱炭素化の有効な手段である。その中で電気加熱は、電気が持つさまざまな特性を利用することで、製品の加熱すべき部分を急速かつコンパクトに加熱し、加熱時間の短縮や製品ロット数の増加を図ることができる。一方、加熱工場では製造プロセスで利用されている熱は、利用後ほとんどが捨てられており、多くの熱が無駄にされている。電気を使って駆動する産業用ヒートポンプは、製造プロセスの排熱を回収し昇温することで再利用する技術である。その結果、熱のリサイクルが可能になり、化石燃料の消費が大幅に削減される。電気加熱と産業用ヒートポンプによる産業電化には、製造現場において生産性の向上と省エネ・脱炭素のイノベーションを起こす大きなポテンシャルがある。

本稿では、加熱に焦点をあてた産業電化について、その特徴と導入効果を解説する。最初に日本の最終エネルギー消費と熱利用の現状について述べ、次に誘導加熱、マイクロ波加熱、赤外線加熱などの電気加熱と産業用ヒートポンプの特徴、さらに実際に導入された工場での省エネルギーとCO₂削減の効果について説明する。

2. 最終エネルギー消費の現状

日本のCO₂排出量は、総合エネルギー統計の最終エネルギー消費ベースで11.45億トン（2016年度）になる。排出量をエネルギー形態別に見ると、電力部門の排出量が全体の40%で、残り60%は電力以外の部門から排出されている（図1）。

*筑波大学名誉教授、一般社団法人日本エレクトロヒートセンター
〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町13-7
E-mail: uchiyamay@nifty.com

一方、エネルギー消費で見ると、最終エネルギー消費に占める電力部門の割合は26%と、CO₂排出量の割合よりも少なく、電力以外の部門のエネルギー消費は74%にもなる。これは、一次エネルギーから二次エネルギーである電気に変換する際に大きなエネルギー損失が伴うためである。政府が掲げる高いCO₂削減目標を達成するためには、エネルギーを利用して最終需要における脱炭素化だけでなく省エネも重要となり、それには電力だけでなく電力以外でも大幅な省エネが求められる。

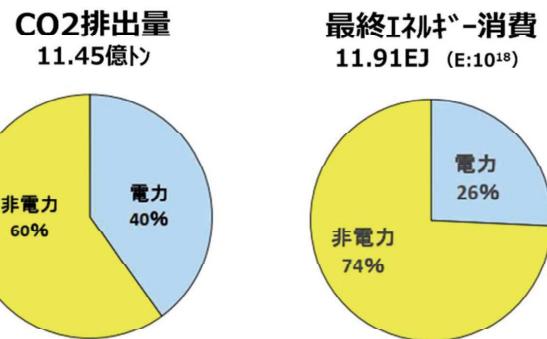


図1 CO₂排出量と最終エネルギー消費¹⁾

図2は部門別に見た最終エネルギー消費量である。図から、製造業が最も多く全体の43%を占め、次いで運輸、業務他、家庭、農林水産鉱建設業の順になっている。図には、電力以外で直接消費している化石燃料の消費量も示されている。化石燃料消費も製造業が最も多く、その割合は製造業全体のエネルギー消費量の63%にもなる。脱炭素化を図るには、製造業において化石燃料を削減する省エネが重要となる。

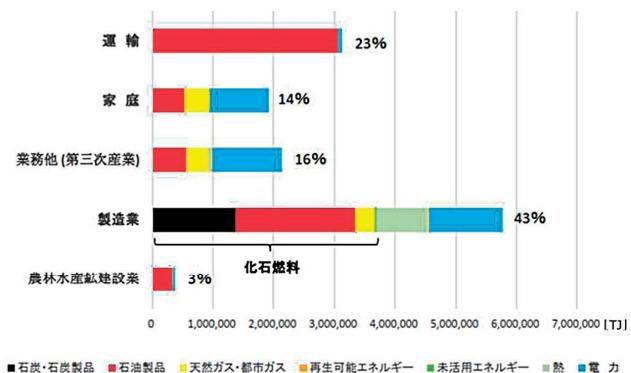


図2 部門別・エネルギー源別のエネルギー消費量¹⁾

化石燃料を消費する製造業の業種を見ると、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割を占める(図3)。両者が消費する化石燃料のうち、44%は原料用に使われている。原料用を除いた化石燃料は、直接加熱、ボイラ、コジェネレーションの熱源にそれぞれ31%、17%、3%が使われており、用途別に見ると直接加熱とボイラに使用される熱利用の割合は全体の48%と最も大きい。これから、化石燃料の削減ポテンシャルは熱利用において大きいことが分かる。

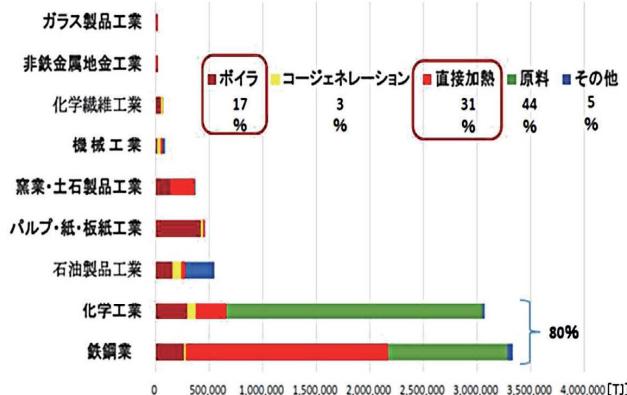


図3 製造業の業種別・用途別の化石燃料消費量²⁾

図4は、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たものである。直接加熱に消費されている化石燃料は、石油換算で6,500万キロリットルになる。直接加熱の消費量は、鉄鋼業が特に多く全体の75%を占めており、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。直接加熱は高温利用が多く、誘導加熱や赤外線加熱など電気加熱技術によって代替できる可能性がある。

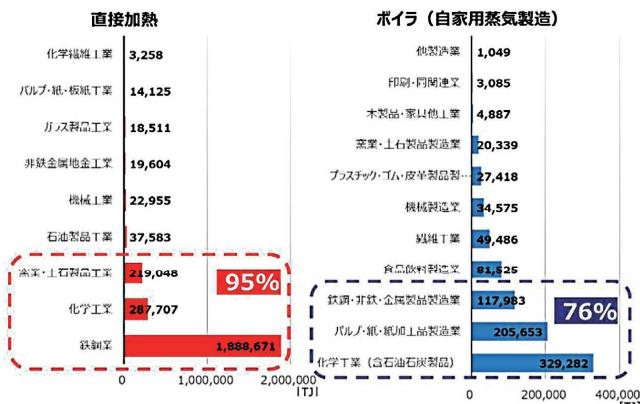


図4 直接加熱とボイラ(自家用蒸気)の業種別燃料消費量³⁾

一方、ボイラ(自家用蒸気製造)に消費されている化石燃料は、石油換算で1,900万キロリットルである。自家用蒸気の生産量が最も多い業種は化学工業で全体の38%を占め、次いでパルプ・紙・板紙加工品製造業と鉄鋼・非鉄・金属製品製造業の順で、上位3業種が占めている割合は76%

になる。自家用蒸気は主に150°C以下の比較的低い温度で利用されており、産業用ヒートポンプによって排熱のリサイクルが進めば化石燃料が大幅に削減されることになる。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(石油換算)の化石燃料が消費されている。それは、政府が掲げる2030年までの省エネ目標5,030万キロリットルをはるかに超えている。

3. 電気による加熱技術

化石燃料を利用している直接加熱や自家用蒸気の省エネをどのように達成するか。それには、これまでとは異なる革新的な製造技術の開発も必要となるが、電気加熱を利用することで加熱の仕方を変える方法もある。ここでは、後者の電気による加熱技術の特徴について解説する。

3.1 電気加熱の原理と特徴⁴⁾

誘導加熱やマイクロ波加熱、赤外線加熱といった電気加熱技術は、従来の化石燃料の燃焼ボイラによる雰囲気加熱と異なる。それは、酸素を使わず被加熱体の必要な部分を直接、加熱できるため、周囲への排熱も少なく、製品を急速かつ短時間に加熱することができる。加熱時間が短縮されることで一日に製造できる製品ロット数が増加し、省エネと生産性の向上、さらにクリーンで安全な作業環境が得られる。図5は、各種電気加熱の原理を示したものである。

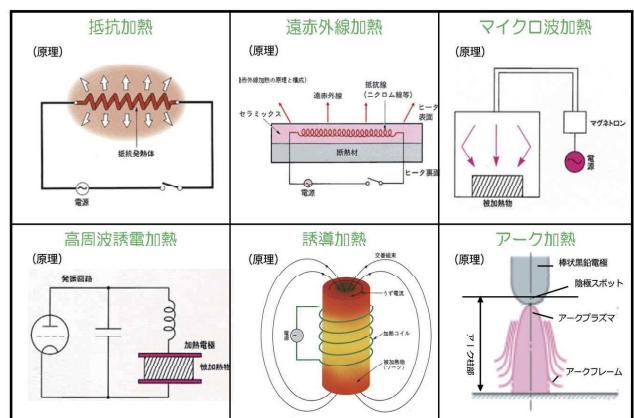


図5 各種電気加熱の原理

①抵抗加熱

抵抗加熱は、物質(物体)に直接電気を流してジュール熱を発生させることで加熱する方法で、投入された電力が加熱に直接利用できるという特長がある。加熱の仕方には、被加熱体に対して材質や雰囲気に合わせて、直接、または間接、あるいは媒体を介して加熱する方法がある。また、高周波電源のような特別な電源を必要とせず、効率良く、比較的安価な装置で加熱できる。

②赤外線加熱

赤外加熱は赤外・遠赤外線放射による熱エネルギーを利用する加熱方法の一つである。プラスチック、ゴム、塗料、

繊維、食品など高分子物質は、 $2.5\sim30\text{ }\mu\text{m}$ 程度の波長領域に赤外・遠赤外線を吸収しやすい吸収帯がある。吸収された赤外・遠赤外線は、物質の分子運動を激しくし熱を発生する。赤外線は可視光線とマイクロ波の間に位置し、波長は $0.78\text{ }\mu\text{m}\sim1\text{mm}$ で、このうち、 $3\text{ }\mu\text{m}$ (マイクロメートル) $\sim1\text{mm}$ の波長帯を遠赤外線と呼んでいる。

赤外加熱は放射による直接加熱であるため、被加熱物の表面温度や雰囲気温度に影響されることなく加熱量をコントロールすることができる特長がある。また、熱風加熱のように熱流を伴わない為、ダスト対策が容易であり、よりクリーンな加熱方法である。

赤外加熱の利用は、放射される赤外線波長と被加熱体の吸収波長を一致させることができることが効率的かつ効果的である。短時間での加熱が要求される場合は、より放射エネルギーの大きい近赤外線を使う場合が適していることもあり、被加熱物の要求仕様(材質、温度、スピード、形状、均一性など)と加熱ヒータの特性(波長、出力密度、即応性、放射形状など)を勘案して赤外線を選択することが重要となる。

③マイクロ波加熱(高周波誘電加熱)

被樹脂や木材などの電気不導体(誘電体)は、電界内に置かれると内部に電気的平衡状態からの歪みである分極を発生する。マイクロ波加熱はマイクロ波オーブンのような 2450MHz のマイクロ波による放射電界の変化を利用して誘電体を加熱する方法である。一方、並行する電極間に挟まれた誘電体に $4\sim80\text{MHz}$ の高周波電圧の交番電界をかけると、誘電体内に発生した双極子は反転して周囲の分子との間で摩擦を起こし、その結果、摩擦によるエネルギーは誘電体内で熱となる。この誘電損失によって発生した熱によって誘電体を加熱する方法を誘電加熱という。

誘電加熱は被加熱物内部に直接エネルギーを与えられ、またエネルギー密度も上げられることから、被加熱物の加熱要求仕様に合うように投入エネルギー密度や周波数などを調整して、あるいは熱風等他の加熱方法と組み合わせて適用することで有効な加熱をすることができる。

④誘導加熱

誘導加熱は、電磁誘導を利用して加熱する方法で高周波誘導加熱、電磁誘導加熱とも呼ばれている。交流電源に接続されたコイルに電流を流すと、その周りには磁力線が発生する。コイルの中あるいはその近くに電気を通す金属を置くと、金属内には磁束の変化を妨げる方向に「うず電流」が流れる。金属には電気抵抗があるため、「電気エネルギー = 電流² × 抵抗」に相当するジュール熱が発生して金属が加熱される。この現象を誘導加熱といいう。

金属の溶解や調理器具などの加熱装置では、うず電流ができるだけ多くする必要があり、被加熱体に鉄やステンレスなどが使われる。誘導加熱を使った加熱方法は、品質や

生産性の向上、作業環境の改善、それにクリーン性や安全性に優れた特性を持ち、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。

誘導加熱は、被加熱体自体を非接触で自己発熱させるため、エネルギー交換効率が高く、単位面積当たりの電力密度を高くできるので急速加熱が容易になる。また、加熱制御の応答が速いため操作性が良く加熱精度が上げられる特徴を有している。被加熱体が導電体の場合は、被加熱体に電流を流す直接加熱方式を用い、セラミックなどの絶縁体を加熱する場合は、それらを導電性の容器に入れて容器を誘導加熱して熱伝達させる間接加熱方式をとる。

⑤アーカー加熱

アーカー加熱は、電極からアーカー放電を発生させ、放電の発熱や生成された高温プラズマのエネルギーを被加熱物へ伝えて加熱する方法である。アーカー放電内部には、電子、中性粒子、イオンなどのプラズマが形成されており、大きな運動エネルギーをもった電子が衝突によって中性粒子やイオンにエネルギーを与えていている。

アーカーとプラズマによる加熱は、 $5,000\sim20,000^{\circ}\text{C}$ の超高温と高エネルギー密度が得られることから局所加熱や急速加熱が可能になり、また装置を小型化できる一方で大容量化が容易になる特徴がある。

3.2 産業用ヒートポンプ

(1) ヒートポンプの原理

低温から高温に熱を輸送する装置で、低温熱は冷房・冷凍・冷却等に利用され、高温熱は暖房・給湯・加熱等に利用される。その原理は、基本的には凝縮器と蒸発器で構成されており、凝縮器では加熱、蒸発器では冷却が行われる(図6)。蒸発器では作動媒体の蒸発による吸熱現象、また凝縮器では凝縮による発熱現象が生じている。低温から高温に熱をくみ上げるには仕事が必要となる。仕事を駆動する方法は、一般的には圧縮機が使われており、冷媒にはフロン、 CO_2 、アンモニアといった物質が用いられている。し

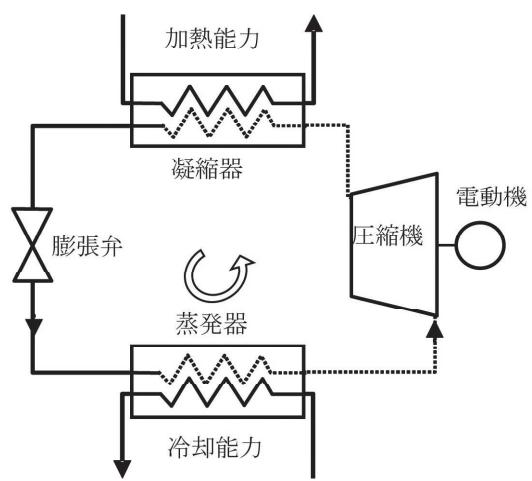


図6 ヒートポンプの原理

かし、フロンはオゾン層破壊から使用が禁止され代替フロンに置き換えられてきたが、最近は地球温暖化対策として代替フロンの使用も厳しくなり新冷媒の開発が進んでいる。

ヒートポンプの性能は、成績係数 (COP, Coefficient of Performance) で評価され、熱力学の理想的な熱サイクルから求められる成績係数を COP_{Carnot} という。この成績係数は、可逆的な圧縮と膨張、また蒸発器と凝縮器の絶対温度については等温の熱吸収と熱廃棄によって定義されている。

$$\text{COP}_{\text{Carnot}} = T_h / (T_h - T_L)$$

例えば、冷媒がR717のヒートポンプ・サイクルで蒸発温度20°C、凝縮温度80°Cの場合は、COP_{Carnot} = 5.9となる。

しかし、蒸発器と凝縮器のソースとシンクの温度は実際の熱伝達過程で変化しており一定ではない。ローレンツ成績係数COP_{Lorenz}は、ソースとシンクの熱力学的な平均温度から求まる成績係数である。

$$\text{COP}_{\text{Lorenz}} = \bar{T}_h / (\bar{T}_h - \bar{T}_l)$$

ここで、平均温度 \bar{T} は一定の熱容量の流れに対する対数平均温度で、 $\bar{T} = (T_{in} - T_{out}) / \ln(\frac{T_{in}}{T_{out}})$ となる。例えば、ソースが 45°C から 25°C に冷却され、シンクが 55°C から 75°C に加熱されて運転するサイクルでは、COP_{Lorenz} = 11.3 となる。ローレンツ成績係数は、ヒートポンプによる性能改善のポテンシャルを示しており、その値はヒートポンプの配置を工夫することで大きく改善される。これらの配置には、マルチステージサイクル、連系ヒートポンプ、ゼオトロピク混合体、システム構成の非可逆性を最小にするなどの方法が挙げられる。

(2) 産業用ヒートポンプの省エネ性能と再エネ活用量

燃焼ボイラで製造された自家用蒸気は、生産ラインで使われた後、まだ高い温度であるにも係らず排熱のほとんどが廃棄されている。産業用ヒートポンプは捨てられている排熱を再び利用できる温度まで昇温し熱の有効利用を可能にする技術である。ヒートポンプを電気を使って電動機で駆動すれば、再生可能エネルギーや原子力により発電した電気が利用でき化石燃料の大幅な削減になる。

図7は、電動式ヒートポンプによる省エネ性能と再生可能エネルギー活用量を示したものである。

29か所の工場を対象に蒸気ボイラによる熱供給の熱損失の実測調査によると、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、使える熱は投入エネルギーの54%になると報告されている⁴⁾。すなわち、燃焼ボイラに投入される一次エネルギーを100とした場合、有効な利用エネルギーは54となる。

この熱エネルギーを成績係数が4のヒートポンプによって供給すると、必要な電力は13.5となる。13.5の電力を生産するための一次エネルギーは、発送電の電力損失を考慮すると35となる。この値は、燃焼ボイラの一次エネルギー100に比べて65も少ない。すなわち、ヒートポンプに代替することで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活用にもなる。同図右側は、成績係数が同じ4のヒートポンプを熱需要が100のシステムに適用した例である。必要な電力は25となり、電源構成を火力60%，原子力20%，再生可能エネルギー20%と仮定すると、火力発電と原子力発電に投入する一次エネルギーの合計は50になる。その結果、残りの50は空気中（熱源）に含まれる熱や排熱を含めた再生可能エネルギーとなる。このようにヒートポンプは、省エネ技術であると同時に再生可能エネルギー活用技術でもある。

4. 電気加熱の適用温度域と用途

電気による加熱技術には、誘導加熱、赤外線加熱、マイクロ波加熱、ヒートポンプなどの方法があり、顧客のニーズに合った加熱方法を選ぶことができる。その用途は、溶解、熱処理、乾燥、合成、調理、殺菌、解凍など多岐に亘っている。

電気加熱は、1万度を超える高温の加熱にも対応でき、幅広い温度域への適用が可能であること、さらに、多様な工程に対応し、様々な業種に導入できることから、多くの分野で“生産工程”に組み込まれており、今後、さらなる拡大が期待される（図8）。

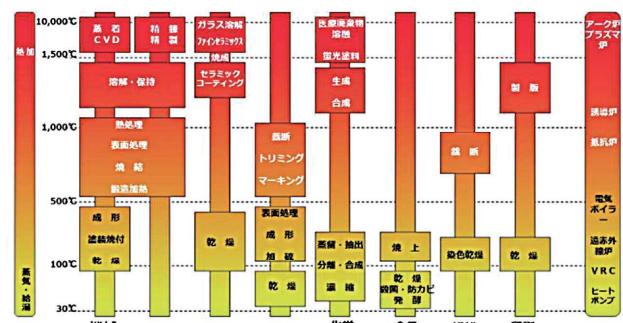


図8 電気加熱の適用温度域と用途

本特集の総論の後に、実際に工場に導入された誘導加熱と赤外線加熱の事例を取り上げ、生産性と省エネ性について具体的な効果を紹介する。

産業用ヒートポンプの特徴は、マイナス数十℃から100℃以上まで、幅広い温度域への適用が可能である(図9)。用途には、空調用、プロセス冷却、加温・乾燥などがあり、各種業種において幅広い工程に普及することが期待される。

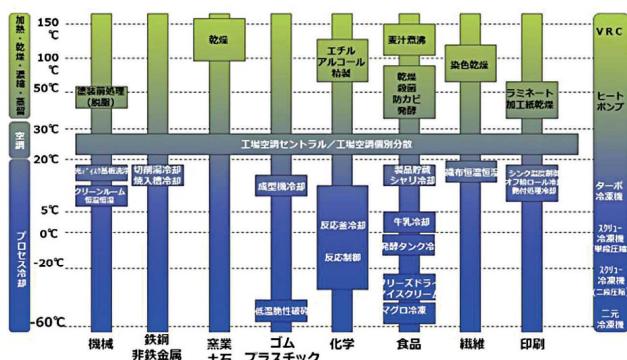


図9 産業用ヒートポンプの適用温度域と用途

産業用ヒートポンプは、国内では既に累積で4,600台(2018年現在)が導入されている。図10は、その中から98の調査事例を取り上げて、それぞれの一次エネルギー、CO₂、エネルギーコストの削減効果を分布図によって示したものである。図から、一次エネルギー削減率は5%から89%まで広く分布し、平均値は42%である。また、CO₂削減率の平均値は49%、エネルギーコストの削減率は平均値で52.5%になる。この調査から、導入効果は一般に省エネ、CO₂削減、エネルギーコスト削減の順に高まることが分かる。

一次エネルギー削減率
(平均値=42%) CO2削減率
(平均値=49%) エネルギーコスト削減率
(平均値=52.5%)

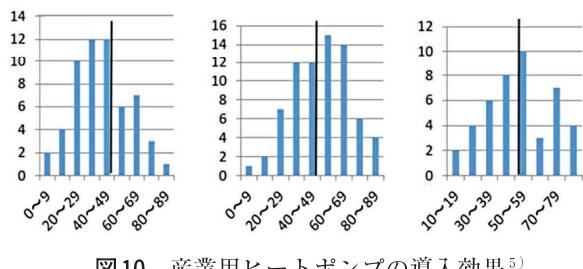


図10 産業用ヒートポンプの導入効果⁵⁾

5. おわりに

ここまで、電気加熱には大きく次の3つの特徴があることを示した。①様々な加熱方法を用途に応じて利用することで工場の省エネ・脱炭素だけでなく生産性を向上する。②燃焼排ガス、輻射熱等による周囲温度上昇も少なく、現場の作業環境を改善し安全性を高める。③ヒートポンプは、熱リサイクルによって再エネを活用できる。

しかし、電気加熱技術を実際に工場に導入する上で、次に示す課題も残されている。

- ・一般に、ユーザーは電気を使った加熱技術への関心が低く、電気加熱の最新知識が不足している。
- ・経営者や現場担当者は、熱などのユーティリティへのエネルギー利用改善に関心が低い。
- ・現場責任者は、熱供給システムの新たな整備による既存の生産ラインの停止によって発生する経済損失を恐れる。
- ・生産工程の熱バランスを外部に知られたくないために熱需要と排熱の空間的かつ時間的な実態が明らかにされない。
- ・多くの電気加熱技術は、設備の投資コストが高いために導入が敬遠される。

こういった障害を乗り越えていくためには、国の補助金等の支援制度を活用するとともに、優れた技術とノウハウを有するメーカー、プロセス設計者、エンジニアリング担当者が実際の生産工程に使われている素材・製品だけでなく正確な熱需要を理解するなど、ユーザーと積極的なコミュニケーションを築いていくことが大切になる。

参考文献

- 1) 総合エネルギー統計(2016)から作成。
- 2) 石油等消費動態統計年報(2017)から作成。
- 3) 石油等消費動態統計(2017), 総合エネルギー統計(2016)から作成。
- 4) 一般社団法人日本エレクトロヒートセンター; 産業の発展に貢献するエレクトロヒート技術, (2018).
- 5) Y.Uchiyama, T.Kaida and C.Watanabe, "Evaluation of Good Practices for Industrial Heat Pump", the 25th IIR International Congress of Refrigeration, Montreal, Canada, (2019).