

特集 産業電化が拓く省エネ・低炭素社会

# 産業用ヒートポンプの普及と将来動向

## The Spread of Industrial Heat Pumps and their Future Trend

渡 邊 激 雄\*

Choyu Watanabe

### 1. まえがき

投入エネルギーの何倍もの熱をくみ上げることのできるヒートポンプは、CO<sub>2</sub>排出量の削減、一次エネルギー消費量の削減および再生可能エネルギー使用量の増加を促すためのキーテクノロジーとして、世界で大きな注目を集めている。ヒートポンプは、家庭用・業務用・産業用の空調・冷凍・冷蔵・給湯や自動車の空調などに幅広く普及している。ヒートポンプの更なる普及が期待されている分野の一つが、産業用のプロセス加熱である。

これらの加熱には、蒸気が使用されることも多い。図1に示すように、蒸気は、広い事業所の一箇所のエネルギーセンターでボイラーによって製造され、各工場に長い配管を通して供給されることが多く、そのために熱損失が大きい。例えば、蒸気供給システムの総合熱効率が約27%であったものを約39%に改善したという報告がある<sup>1)</sup>。また、100℃以上の温度の蒸気を供給していても、実際に必要な温度は55℃から80℃の場合が大部分であったという報告がある<sup>2)</sup>。さらに、各工場のプロセスでは、制御性の良さから、電気ヒーターも多用されている。

蒸気による加熱や電気ヒーターによる加熱の一部でも、各工場に分散配置されたヒートポンプによる加熱に置き換えることができれば、大幅な省エネルギーを実現することができる。さらに、冷却と加熱を同時に行う冷温熱同時利用ヒートポンプや工場排熱を熱源として利用したヒートポンプにより、一層の省エネルギーが可能となる。

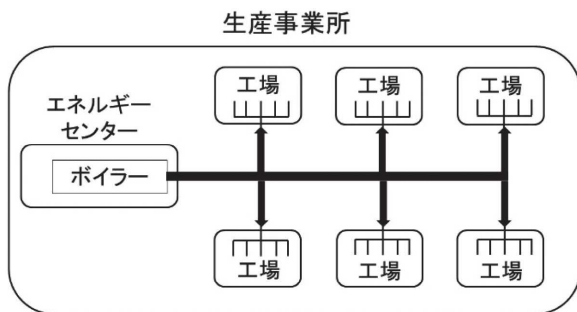


図1 工場における蒸気供給設備

### 2. ヒートポンプの原理

熱は高温から低温へと流れる。この自然現象の逆を行うのが、ヒートポンプであり、電力などのエネルギーが必要である。図2に示すクローズドサイクルのヒートポンプでは、冷媒の蒸発により低温で熱を吸収し、圧縮・凝縮により高温で熱を排出し、膨張により低温に戻ることを繰り返す。低温で吸収した熱と圧縮機に投入される電力との和が高温で排出される熱となる。この際に、高温と低温の温度差が、例えば、50℃程度と小さければ、消費電力の何倍もの熱を低温から高温へ汲み上げることができる。高温で排出される熱(加熱, Qh)を電力(E)で割った値を「加熱COP」、低温で吸収される熱(冷却, Ql)を電力(E)で割った値を「冷却COP」と呼び、ヒートポンプのエネルギー効率を表す指標とされる。COPは低温と高温の温度差に反比例する。COPは、Coefficient Of Performanceの略語であり、日本語では、成績係数と呼ばれる。

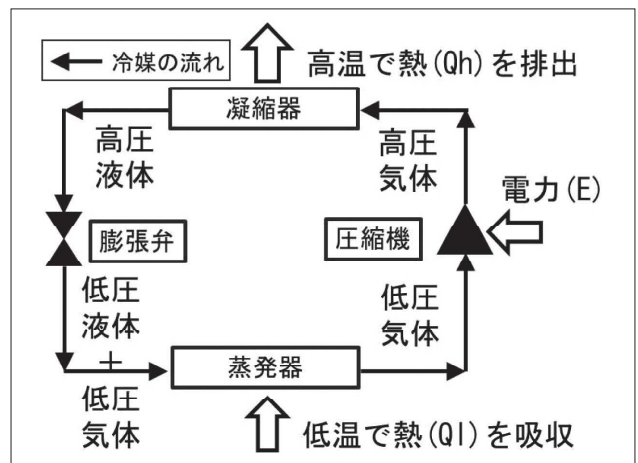


図2 クローズドサイクルのヒートポンプ

ヒートポンプサイクルの作動流体である冷媒には、HFC(ハイドロフルオロカーボン)、HFO(ハイドロフルオロオレフィン)、HCFO(ハイドロクロロフルオロオレフィン)などの合成冷媒、CO<sub>2</sub>、アンモニア、炭化水素などの自然冷媒が使用される。ここで、オレフィン是不飽和炭化水素とよばれ、炭素の二重結合(>C=C<)を持ち、大気中で分解しやすく、大気寿命が短く、従って、地球温暖化係数(Global Warming Potential, 以下、GWPという)が小さい。モントリオール議定書は、1987年の当初、オゾン保護を対象にした

\*国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院  
工学研究科 創造工学センター 客員教授  
〒464-8601 名古屋市千種区不老町  
E-mail: watanabe.choyu@g.mbox.nagoya-u.ac.jp

ものであって、オゾン層を破壊するCFC（クロロフルオロカーボン）、HCFC（ハイドロクロロフルオロカーボン）が規制された。2016年にモントリオール議定書のキガリ改正が行われ、2019年1月に発効した。これにより、地球温暖化の抑制を対象として、GWPの大きいHFCが段階的に削減されることとなった。



図3 地球温暖化効果の低い冷媒の採用

### 3. 産業用ヒートポンプ普及の代表事例

図4に示す産業用ヒートポンプは、金属部品の洗浄工程用の加熱（65℃）と切削工程用の冷却（15℃）を同時に行うことができる。加熱COPが3、冷却COPが2であり、両者を加算した総合COPは5に達する。このヒートポンプは、同時加熱冷却モードに加えて、加熱専用モードおよび冷却専用モードの三つの運転モードを負荷に応じて切り替えることができる。2010年に14台が自動車部品工場で採用され、蒸気加熱に比べて、一次エネルギー消費量を73%削減した<sup>3)</sup>。このヒートポンプは、この後も国内外の工場に採用され続け、2020年11月までに120台が設置されて稼働しており、産業用ヒートポンプ普及の代表的な事例の一つとなっている。

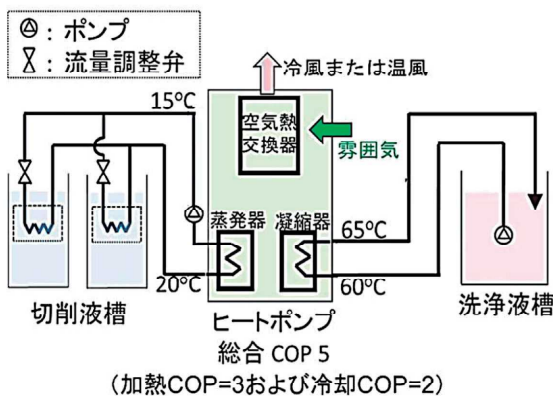


図4 切削・洗浄工程に適用されたヒートポンプ<sup>3)</sup>

### 4. エネルギー多消費工程へのヒートポンプの適用

我が国の産業部門において、更なる省エネルギーを推進するための一つの着眼点は、エネルギー多消費工程へのヒートポンプの適用である。2015年度における産業用ヒートポンプの市場ポテンシャルとしての産業分野別年間熱需要（蒸気加熱）を図5に示し、同じく産業分野別年間熱需要（直接加熱）を図6に示す。図5および図6から、化学関連、パルプ・紙

および鉄鋼・非鉄金属は、エネルギー多消費工程を持つ産業ということができる。また、食品・飲料もエネルギー多消費工程が多い。

これらの産業・工程にヒートポンプを適用するには、図2に示したクロードサイクルのヒートポンプの高温化に加えて、図7に示すようなオープンサイクルの蒸気再圧縮式ヒートポンプの適用も必要となる。図7の事例では、砂糖溶液の濃縮を行うために、水蒸気を投入する工程で、上部の水蒸気出口から、圧力と温度の低下した水蒸気を回収し、モーターで駆動される蒸気圧縮機で水蒸気を圧縮して、再度プロセスで使用する。プロセスで使用した水蒸気を廃棄する場合に比べて、蒸気圧縮機で回収した蒸気を再利用する場合には、消費エネルギーを10分の1かそれ以下にすることができる。

国内でも、化学工場において、排水の濃縮・減容工程で、オープンサイクルの水蒸気再圧縮式ヒートポンプが採用され、同工程で使用されていたエネルギー使用量の95%（石油換算で、1,184 kL）を削減した<sup>6)</sup>。これは、同工場全体エネルギー使用量の6.5%に相当する。

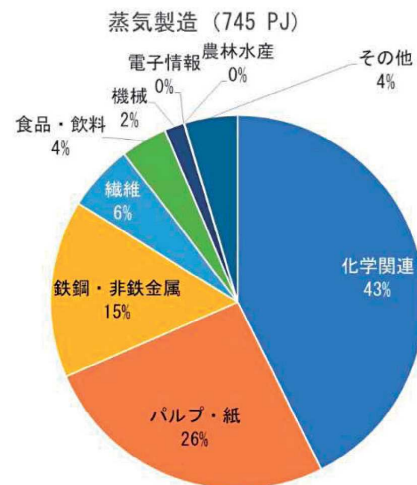


図5 産業用ヒートポンプの市場ポテンシャルとしての産業分野別年間熱需要（蒸気加熱）<sup>4)</sup>

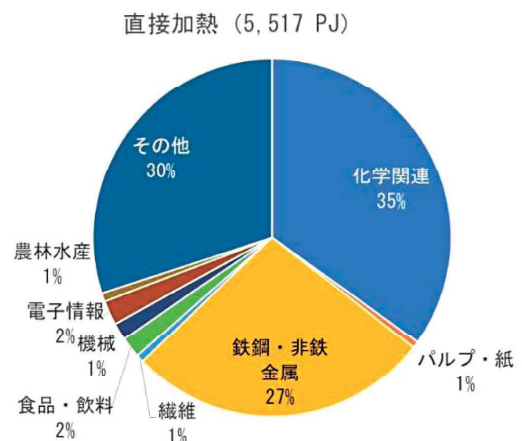


図6 産業用ヒートポンプの市場ポテンシャルとしての産業分野別年間熱需要（直接加熱）<sup>4)</sup>

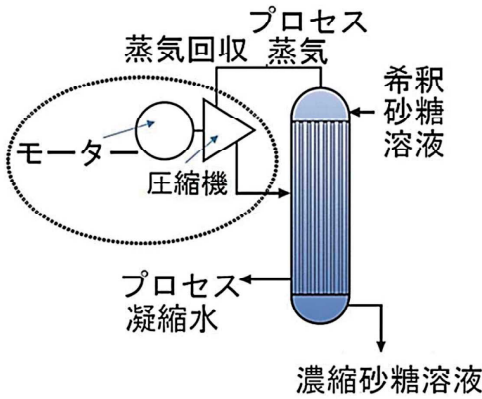


図7 オープンサイクルの水蒸気再圧縮式ヒートポンプ<sup>5)</sup>

5. EUにおける研究プロジェクト

EUにおけるエネルギー多消費工程へのヒートポンプの適用を目指した研究開発プロジェクトを紹介する。EUの産業プロセスにおける消費エネルギーの最大25%が乾燥に使用されている。排気からの熱回収は十分でなく、11,300PJのエネルギー損失に至っている。オーストリア技術研究所において、“DryFiciency”という名称の研究プロジェクトが実施されている。これは、乾燥に伴う排熱の80%を回収するために、高温空気乾燥と過熱水蒸気乾燥の二つの高温産業用ヒートポンプシステムを実証するプロジェクトである。このプロジェクトには、エネルギー効率と革新的な行動のための基金“European Union's Horizon 2020 programme”から6.5 million EUROが支出され、ノルウェー、デンマーク、ベルギー、ドイツおよびオーストリアの5か国が参加し、コンソーシアムには、12の企業・研究所が参加している。図8に産業用乾燥工程と三つの実証サイトを示す。澱粉の乾燥をAGRANA社で、レンガの乾燥をWIENERBERGER社で、そして、ペットフードの乾燥をMARS社で実証する。このプロジェクトの目標は、①エネルギー効率を80%まで改善すること、②1kgあたりの製造コストを20%低減すること、③CO<sub>2</sub>排出量57%から73%低減すること、④産業的に関連した環境で完全に機能する産業用ヒートポンプシステムの中で個々の構成要素とそれらの統合を確認すること、⑤工業化のために許容できる高い費用

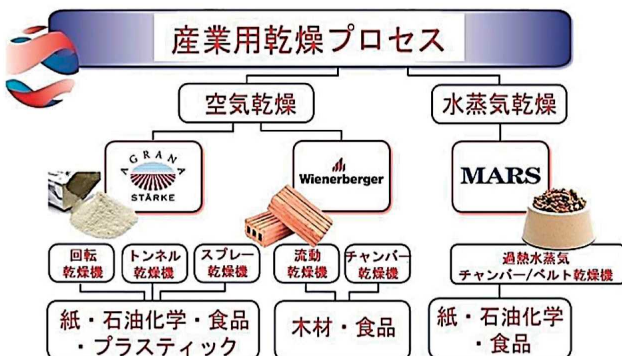


図8 “DryFiciency” 研究プロジェクトにおける産業用乾燥工程と三つの実証サイト<sup>7)</sup>

対効果 (ROI) につながる省エネルギーを達成すること、および、⑥統合された技術的解決案のプロジェクト後の水平展開を確実にするため、ビジネス・モデル、適切な知的財産の保護および開発計画を確立することとされている。

図9に、高温空気による澱粉の乾燥に使用されるレシプロ式圧縮機を示す。冷媒はHFO系の低GWP冷媒であるR1336mzz (Z) が使用され、圧縮機の排除容積は55 m<sup>3</sup>/h、吸込ガスの最高温度は100℃、吐出ガスの最高温度は160℃、加熱能力は50 kWである。図10に温水直列熱源水並列ツインヒートポンプシステム (レシプロ式) のフローを示す。このシステムにはレシプロ式圧縮機が8台使用される。図11に高温空気による澱粉の乾燥工程を示す。30℃で供給された空気 (200 t/h以下) は、まず、90℃の温排水で加熱され、次に、70℃の温排水を熱源としたヒートポンプにより製造された140℃の高温水で加熱され、最後は、ボイラー蒸気によって、158℃まで加熱される。湿った (水分割合35-40%) 澱粉は、158℃の空気により、14 t/hの乾燥した (水分割合10%) 澱粉が製造される。



図9 澱粉の乾燥に使用されるレシプロ式圧縮機<sup>7)</sup>

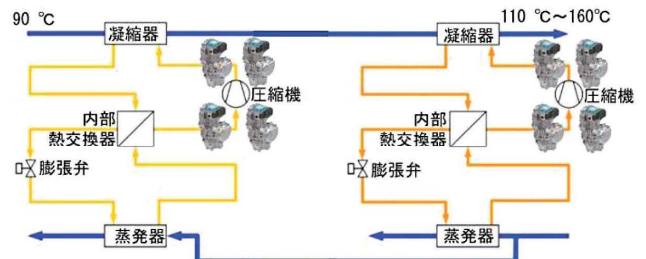


図10 温水直列熱源水並列ツインヒートポンプシステム (レシプロ式) のフロー<sup>8)</sup>

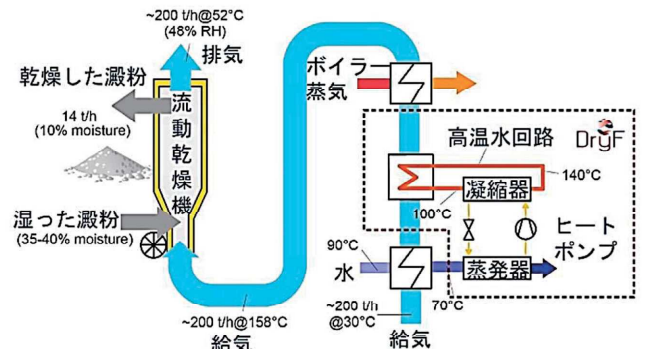


図11 高温空気による澱粉の乾燥工程<sup>8)</sup>

図12に、高温空気によるレンガの乾燥に使用されるスクリー圧縮機を示す。冷媒はR1336mzz (Z) が使用され、圧縮機の排除容積は300 m<sup>3</sup>/h、吸込ガスの最高温度は100℃、

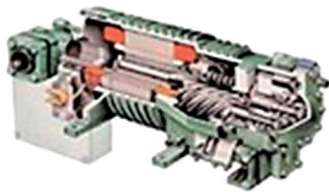


図12 レンガの乾燥に使用されるスクリー圧縮機<sup>7)</sup>

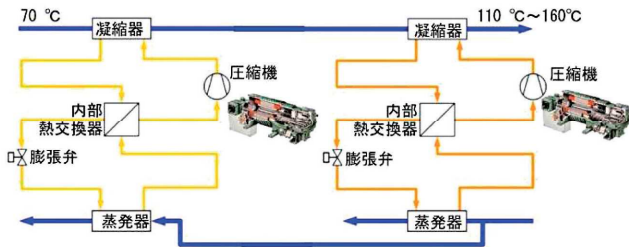


図13 温水直列熱源水並列ツインヒートポンプシステム (スクリー式) のフロー<sup>8)</sup>

吐出ガスの最高温度は160℃であり、加熱能力は200kWである。図13に温水直列熱源水並列ツインヒートポンプシステム (スクリー式) のフローを示す。このシステムにはスクリー式圧縮機が2台使用される。図14に高温空気によるレンガの乾燥工程を示す。トンネル乾燥機内で乾燥されるレンガは、乾燥する空気と対向して移動する。水分割合が28%の湿ったレンガの供給量は10t/hであり、トンネル乾燥機で水分割合が2%まで乾燥される。焼成炉からの高温空気やトンネル乾燥機の排気から熱回収する温水回路があり、60℃の温水を90℃まで加熱し、その温水はヒートポンプの蒸発器で熱源となり、さらに、トンネル乾燥機に送られ、内部の空気を加熱する。

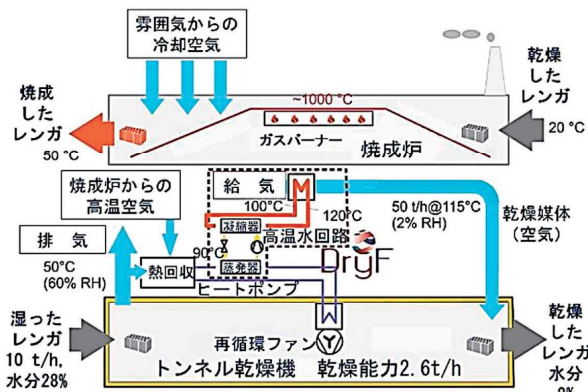


図14 高温空気によるレンガの乾燥工程<sup>8)</sup>

図15に、過熱水蒸気によるペットフードの乾燥に使用されるターボ縮機を示す。量産型空気ターボ圧縮機に基づく無潤滑の多段圧縮システムであり、最高供給温度は150℃である。図16に過熱水蒸気によるペットフードの乾燥工程を示す。乾燥機内では、湿ったペットフードがベルトコンベアで運ばれ、155℃の過熱水蒸気で乾燥される。その際に、過熱水蒸気は120℃まで温度が低下する。戻った水蒸気の一部を2段のターボ圧縮機で圧縮して、熱交換器内で、残りの戻り水蒸気を加



図15 ペットフードの乾燥に使用されるターボ圧縮機<sup>7)</sup>

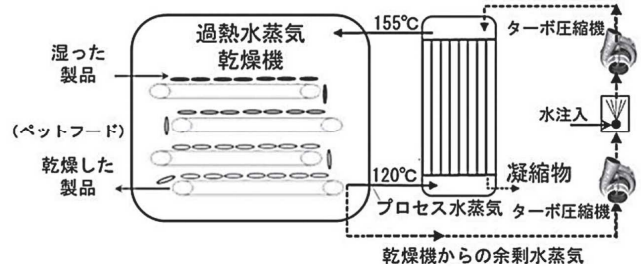


図16 過熱水蒸気によるペットフードの乾燥工程<sup>9)</sup>

熱して凝縮する。155℃まで加熱された残りの戻り水蒸気は、また、乾燥機に供給される。

図11、図14および図16のシステムは、実証試験中であり、試験結果の発表が待たれる。

## 6. 未利用熱・再生可能エネルギー熱の活用とグリーン冷媒の採用

我が国の産業部門において、更なる省エネルギーを推進するためのもう一つの着眼点は、未利用熱・再生可能エネルギー熱の活用である。

統合イノベーション戦略推進会議決定<sup>10)</sup>によれば、革新的技術の2050年までの確立を目指す具体的な行動計画として、業務・家庭・その他・横断領域における最先端のGHG削減技術の活用として、「未利用熱・再生可能エネルギー熱利用の拡大」が挙げられ、さらに、ヒートポンプに関しては、「温室効果の極めて低いグリーン冷媒の開発」が挙げられている。

ヒートポンプの熱源として、工場排熱に加え、工場の立地により、地中熱、地下水熱の活用が考えられる。また、寒冷地でも、高い温度の温水が得られる太陽熱集熱器を利用できれば、その温水を直接利用する、または、ヒートポンプの熱源にすることが考えられる。

さらに、ヒートポンプには、自然冷媒やHFO (ハイドロフルオロオレフィン) などのGWPの低いグリーン冷媒を利用する技術開発が重要となる。

## 7. おわりに

産業用ヒートポンプの普及と将来動向と題して、ヒートポンプの原理、産業用ヒートポンプ普及の代表事例、エネルギー多消費工程へのヒートポンプの適用について述べるとともに、EUにおける産業用乾燥プロセスの研究プロジェクトを紹介した。この研究プロジェクトでは、ヒートポンプの最高供給温度が160℃に達した。さらに、未利用熱・再生可能エネルギー

熱の活用およびグリーン冷媒の採用など、今後の方向性を示した。

エネルギーミックスにおける省エネ対策の進捗状況（2017年度）<sup>11)</sup>によれば、産業用ヒートポンプの導入効果については、2030年までに石油換算で87.9万kl（この値を100%とする）の省エネを目標としている。欧州での先進的な取り組みも参考に、この目標を達成したい。

#### 参考文献

- 1) (財)省エネルギーセンター；蒸気系統あるべき姿への追求と改善，平成19年度省エネルギー優秀事例全国大会（2007）。
- 2) 井場 功；圧縮機工場における洗浄工程用ヒートポンプとハイブリッド高周波誘導加熱の導入事例，ヒートポンプセミナー第7弾産業界におけるヒートポンプ活用事例，(社)日本冷凍空調学会（2011）。
- 3) 柴 芳郎，谷藤浩二，中山 浩，櫻場一郎；2012年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集，pp.263-266，東京，（2012.9）。
- 4) Yohji UCHIYAMA, Takenobu KAIDA, Katsumi HASHIMOTO, Choyu WATANABE；“Good and Best Practices of Industrial Heat Pumps in Japan (Japanese Report for Task 1 and 2)”，IEA TCP HPT Annex48 Tokyo Workshop, Japan, May 14th, 2019.
- 5) U.S. Department of Energy, Industrial Heat Pumps for Steam and Fuel Savings, DOE/GO-102003-1735, (2003), available from <<http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/33971.pdf>> (accessed on November 15, 2020).
- 6) 松永裕衣，坂口勝俊，福永 浩；“熱のリサイクル”を応用した排水濃縮・減容工程での省エネ革新，D231, 2020 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集（2020.9.8-11, 津）。
- 7) Austrian Institute of Technology GmbH, DryFiciency presentation, available from <[http://dry-f.eu/Portals/0/DryF\\_General%20presentation.pdf](http://dry-f.eu/Portals/0/DryF_General%20presentation.pdf)>, (accessed on November 15, 2020).
- 8) Veronika WILK, Michael LAUERMAN, Franz HELMINGER, “Decarbonization of industrial processes with heat pumps”, Manuscript ID : 832 DOI : 10.18462/iir.icr.2019.0832.
- 9) Michael BANTLE, Christian SCHLEMMINGER, Cecilia GABRIELII, Marcel AHRENS, “Turbo-compressors for R-718 : Experimental evaluation of a two-stage steam compression cycle”, Manuscript ID : 973, DOI : 10.18462/iir.icr.2019.0973
- 10) 統合イノベーション戦略推進会議決定，革新的環境イノベーション 戦略，2020年1月21日，available from <<https://www8.cao.go.jp/cstp/siry0/haihui048/siry06-2.pdf>> (accessed on November 15, 2020) .
- 11) 資源エネルギー庁；エネルギー消費の動向等について，2019年6月24日，available from <[https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene\\_shinene/sho\\_energy/pdf/028\\_01\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/sho_energy/pdf/028_01_00.pdf)> (accessed on November 15, 2020)

協賛行事ごあんない

## 第49回ガスタービンセミナー 「ガスタービンの最新技術動向および 低炭素社会に向けた技術開発」

〔会 期〕2021年1月29日（金）

〔主 催〕公益社団法人日本ガスタービン学会

〔場 所〕Zoomによるオンライン開催

〔U R L〕[http://www.gtsj.org/html\\_calender/seminar49.html?select=2020](http://www.gtsj.org/html_calender/seminar49.html?select=2020)

〔問合せ先〕日本ガスタービン学会 事務局 E-mail : [gtsj-office@gtsj.org](mailto:gtsj-office@gtsj.org)