

熱分野の脱炭素化と蓄熱システムの可能性

Decarbonization of the heat sector and the potential of thermal storage systems

松原弘直*

1. はじめに

2020年は、新型コロナウイルスの影響で世界全体の経済活動が停滞し、一時的に化石燃料の消費量が減少することでエネルギー起源のCO₂排出量は約6%減少した。そのため、世界的にコロナ後の回復(リカバリー)の過程において積極的にエネルギーの効率化や再生可能エネルギーを取り入れた「グリーン・リカバリー」が提唱された。その中で、2020年の世界全体の発電電力量に占める再生可能エネルギーの割合は29%となり、2021年には再生可能エネルギー電力の割合は30%を超えたと推計されている。しかし、2021年は新型コロナウイルスの影響からの世界経済の回復により、世界全体のCO₂排出量は前年から約5%増加した¹⁾。2021年11月にイギリスのグラスゴーで開催されたCOP26のグラスゴー気候合意では、世界全体の産業革命以降の気温上昇を1.5℃に抑える努力をすることが合意された。その実現のためには、2021年8月に公表されたIPCCの第6次評価報告書第1作業部会報告書(自然科学的根拠)によれば、2030年までには化石燃料由来のCO₂排出量を世界全体で45%削減し、2050年には実質ゼロを目指す必要がある²⁾。

IRENA(国際再生可能エネルギー機関)は、気温上昇1.5度未満を達成する新たなシナリオ(1.5度シナリオ)を含むレポートを2021年6月に公表した³⁾。この中では、2050年カーボンニュートラル(脱炭素化)はもちろん、2030年の排出削減についても各国の現行政策や目標を前提とした「計画済エネルギーシナリオ」(PES)と世界の平均気温上昇で1.5度未満を達成する「1.5度シナリオ」(1.5-S)とを比較している。その結果、これまで世界各国で計画済みの政策では不十分で、よりエネルギー効率化や再生可能エネルギーの導入が世界全体で進む「1.5度

シナリオ」を目指すべきだとしている。この「1.5度シナリオ」では、2050年脱炭素化を達成するために必要なCO₂削減量を現在の年間排出量とほぼ同じ年間37ギガトンとしている。最も大きな役割を果たす手段が、再生可能エネルギーと省エネルギーである。需要側の電化を含めれば、その合計は必要な削減量全体の約70%に達する。残りの30%のうち、10%を水素関連技術、6%をCCUS(炭素貯蔵・リサイクル)技術、14%をバイオマスと炭素除去技術を組み合わせたBECCSの技術により達成するとしている。

本論文では、2050年カーボンニュートラルに向けて海外での熱分野の脱炭素化への取組みとスマートエネルギーシステムとして必要となる蓄熱システムの可能性について示す。

2. 熱分野の脱炭素化の重要性

2050年脱炭素化を目指すためには、電力分野だけではなく熱分野や交通分野を含む最終エネルギー消費全体に対する施策が重要になってくる。再生可能エネルギーは、電力分野において世界中で目覚ましい発展を遂げて来たが、熱分野や交通分野での再生可能エネルギーの普及は一部の国や地域に留まっており、世界全体でも熱分野の1割程度、交通分野の3%程度に留まっている(図1)⁴⁾。そのため世界的にもこれらの分野の省エネルギーや再生可能エネルギー普及を進めることが課題となっている。さらに電力分野と熱・交通分野を跨るセクターカップリングの技術やスマートエネルギーシステムにも注目が集まっている。2020年12月に発表されたIRENA、IEA(国際エネルギー機関)およびREN21(21世紀のための再生可能エネルギー政策

*特定非営利活動法人 環境エネルギー政策研究所

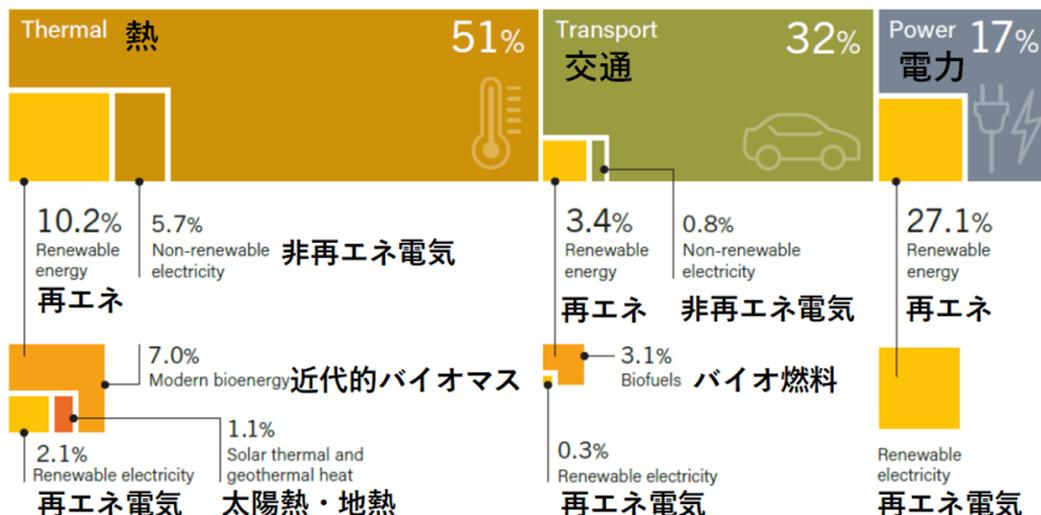


図1 世界のエネルギー需要に占める再生可能エネルギー割合 出所：文献4)

ネットワーク)の共同レポート“Renewable Energy Policies in a Time of Transition: Heating and Cooling”では、最終エネルギー需要の約半分を占めると言われる熱分野(特に冷暖房)でのエネルギー転換のための再生可能エネルギー政策の在り方をまとめて提言している⁵⁾。

熱分野(特に冷暖房)の脱炭素化に対するバリア(課題)は、政策や支援により解決できる可能性がある。最初のバリアとして一般的に運転費用は再生可能エネルギーの方が低いにも関わらず、化石燃料と比べて再生可能エネルギー導入の初期費用が高いことがある。そのための支援策として税額控除やローン、補助金などの金融的な支援のほか、導入目標を設定した上での導入の義務化などがある。さらにバリアとしてユーザにとって化石燃料の価格が再生可能エネルギーと比べて安くなっていることがあり、化石燃料への補助金がいまだに多くの国で存在する。そのため化石燃料の環境への影響などの外部性を如何に経済的に評価するかが問われている。その他、ユーザが再生可能エネルギーの優位性に気が付きづらいことや、信頼できるサプライチェーンの構築や必要なインフラの構築が必要となっている。これらのバリアを解決して再生可能エネルギーへの転換を進めるために、以下の5つの方策が示されている。

- ・再生可能エネルギーを使った電化
- ・再生可能エネルギーによるガス
- ・持続可能なバイオマス利用
- ・太陽熱の直接利用
- ・地熱の直接利用

さらに、熱分野のインフラの構築として再生可能エネルギーを大量に導入できる地域熱供給の重要性が指摘されている。現状の地域熱供給では、化石燃料が多く使われているが、欧州(特に北欧やバルト三国など)では、地域熱供給への再生可能エネルギーの導入が進んでいる⁶⁾。

3. 蓄熱システムの可能性

IRENAは、熱エネルギー貯蔵(TES: Thermal Energy Storage)のイノベーションに関する展望についてのレポートを2020年に公表している⁷⁾。その中で、熱エネルギー貯蔵(TES)は、エネルギーシステムにおける再生可能エネルギーの普及を促進する重要な手段となる可能性があるとしている。熱分野におけるTES導入の状況は、需要側で地域熱供給が105GWh、建築物が91GWh(貯湯タンクは含まれない)、産業が2GWhとなっている。その中で、冷房で使われるTESは現状は14GWh程度だが、2030年までに約2倍になると想定されている。電力供給の分野では、太陽熱発電(CSP)システムで熔融塩がTESとして21GWh程度がすでに使われており、2030年には20倍以上になるという予測もある。TESは、電力システムの柔軟性として、様々なベネフィットを提供できる可能性がある。需要側の温熱や冷熱を蓄熱することで需要の時間をシフトすることができる。変動性再生可能エネルギーVREが余剰になる時間にヒートポンプなどで温熱や冷熱を生成して蓄熱することで電力システムの柔軟性を確保できる。電力を熱に変換して蓄熱することでセクターカップリングが実現できる。さらに、

夏の時期の太陽熱や太陽光などの余剰のエネルギーを季節間蓄熱して、太陽エネルギーが小さくなる冬季に使うことができる。

TESには、様々な技術がすでに存在し、研究・技術開発が進められている(図2)。TESの技術としては、顕熱(Sensible)方式、潜熱(Latent)方式、熱化学(Thermochemical)方式および機械-熱(Mechanical-thermal)方式に分類することができる。顕熱(Sensible)方式には、蓄熱材(Solid-state)、温水タンク蓄熱システム(WTTES)および地下蓄熱システム(UTES)があり、短期(時間)から長期(数か月)まで幅広い蓄熱技術がある。UTESには、地下の構造によりピット式(PTES)、ボアホール式(BTES)、帯水層式(ATES)に分類される(図3)。WTTESとUTESは水を使っており、温度帯は0~60℃程度だが、蓄熱材(Solid-state)の場合は零下から高温(500℃以上)まで幅広い温度帯で

使われる。溶融塩(Molten salts)も500℃前後の温度帯で使われるが、1日前後の蓄熱期間となる。潜熱(Latent)方式を使った蓄熱システムには、様々な温度帯の技術があり、それぞれの温度帯に適したPCM(相変化材料)が使われるが、最も普及しているPCMは水の氷である。熱化学(Thermochemical)方式には、100℃以下の比較的低温が低い吸収式(Absorption system)と水和物(Salt hydration)による可逆な化学蓄熱反応を使ったケミカルヒートポンプ技術、および500℃以上の高温の酸化金属を使ったケミカルルーピング(Cheical looping)方式がある。電力システムの柔軟性におけるTES技術の適用としては、現状では溶融塩が太陽熱発電(CSP)で用いられている程度であるが、蓄熱材を用いた実証や、PCMおよび熱化学方式の研究開発が進められている。それらに加えて、機械-熱(Mechanical-thermal)方式として、LAES(液化空

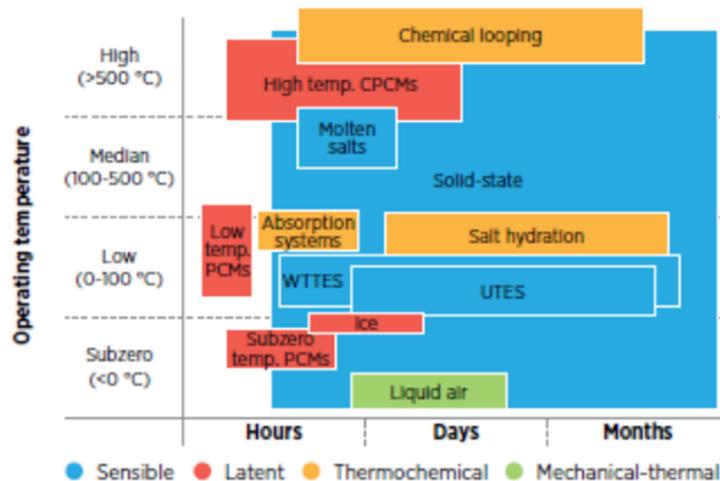


図2 TES技術の時間帯と温度帯 出所：文献7)

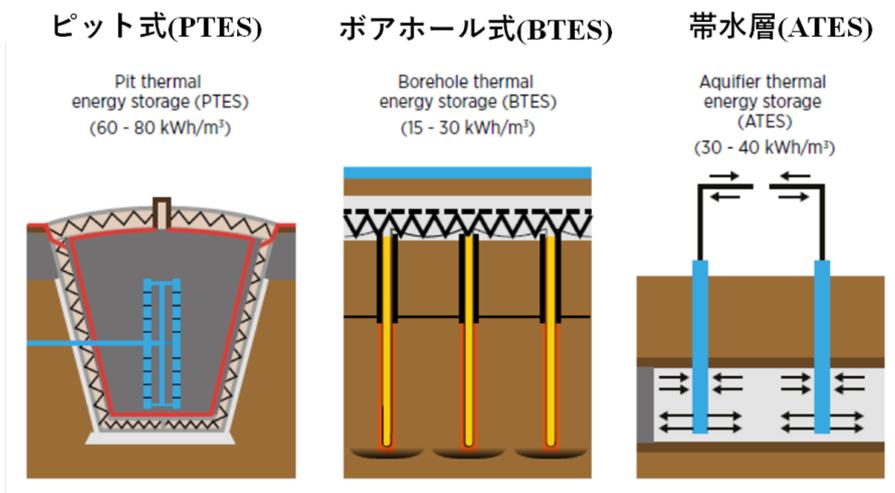


図3 地下蓄熱システム(UTES) 出所：文献7)

気エネルギー貯蔵) および A-CAES (断熱圧縮空気エネルギー貯蔵) のプロトタイプが開発されている。一方、地域冷暖房の分野では、顕熱方式として従来から水 (5℃～95℃) を使った蓄熱システムが一般的に採用されており普及しているが、熱密度や効率の観点から潜熱方式も氷蓄熱などで冷熱を中心に採用されている。

4. 欧州での脱炭素化への政策目標と取組み

EU (欧州連合) では、2050 年の気候中立やグリーン・リカバリーを目指すグリーン・ディール構想を実現するためにも、野心的な温室効果ガスの排出削減目標を目指す「欧州気候法」が 2021 年 6 月に欧州議会で承認された⁸⁾。その中では、2030 年の削減目標を 40% から 55% に大幅に引き上げた。それに伴い再生可能エネルギーの導入目標も最終エネルギー消費に対して従来の 32% から 40% 以上となる。そのため EU 委員会では、2021 年 7 月にはこの新たな目標を実現するための具体的な政策パッケージ⁹⁾ を策定した。欧州の排出量取引制度 (EU ETS)、吸収源としての土地利用・森林保全、エネルギー効率化などの政策強化が含まれており、再生可能エネルギーについては、すでに策定されている EU 指令 “REDII” の改訂が含まれている。今後、各国の目標値、エネルギー・気候変動対策計画 (NECPs) を含めてエネルギー政策の見直しが必要になってきている。

EU は、パリ協定における気候変動対策の長期戦

略を 2020 年 3 月に提出した。この中では、2050 年までに気候中立 (Climate Neutral) を目指すとしており、温室効果ガスの排出量を実質 (ネット) ゼロにすることを意味する¹⁰⁾。この気候変動対策の長期目標は欧州議会が 2020 年 1 月に発表した欧州グリーン・ディール構想¹¹⁾ にも含まれている。2020 年にスタートしたパリ協定に対して EU 全体では 2030 年までに温室効果ガスを 40% 削減 (1990 年比) する気候変動&エネルギー枠組みを 2014 年に策定し、2030 年までの再生可能エネルギー割合 (最終エネルギー消費) の目標を 32% 以上に、エネルギー効率化の改善目標を 32.5% とする政策決定を 2018 年に行った¹²⁾。EU 各国は 2021 年以降 2030 年までの NECPs をすでに策定している¹³⁾。各国の NECPs を見ると、2030 年に電力分野で再生可能エネルギー 100% を掲げる国 (デンマーク、オーストリアなど) もあり、50% を超える目標を掲げる国も多数ある (ドイツ 65%、スペイン 74%、ポルトガル 80%、オランダ 73%、アイルランド 70% など)。最終エネルギー消費に対しても 50% を超える目標を掲げる国もある (スウェーデン 65%、デンマーク 55% など)。

EU (27 개국) 全体の 2020 年の再生可能エネルギーの導入目標については、最終エネルギー消費に対して 20% としていたが、新型コロナの影響もあり、最終的には 22.1% と目標を達成した (図 4)。EU27 か国のうち目標が達成できなかった国はフランスのみであり、他の 26 か国は 2020 年の目標を達成している。目標を達成した上位 10 か国をみると、発電

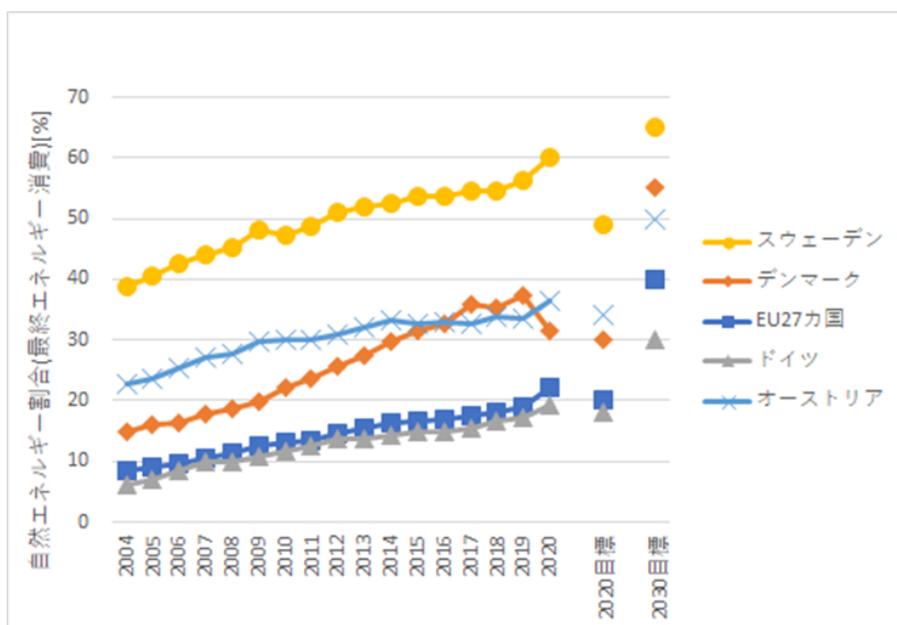


図 4 欧州各国の再生可能エネルギー割合 (最終エネルギー消費) と目標
出所: eurostat データ 14) より作成

電力量に占める再生可能エネルギーの割合が高いだけでなく、熱分野における割合も高く、スウェーデンをはじめ50%を超える国が6か国あることがわかる(表1)。

デンマークでは、2030年までには年間電力消費量に対して再生可能エネルギー100%を目指すことが目標になっており、さらに2050年までの長期目標として脱化石燃料や全エネルギー消費に対して再生可能エネルギー100%を目指している。デンマークの電力システムにおいては、2020年の段階ですでに風力を中心としたVRE(変動性再生可能エネルギー)の割合が50%を超えており、VREの割合が比較的高い欧州各国の中でも最も高いレベルとなっている。この経験を活かすことが欧州各国、ひいては世界各国での再生可能エネルギー導入に対してとても有効な取り組みになる。デンマークエネルギー庁が2021年6月に公表した最新レポート「デンマークの電力システムにおける柔軟性の発展とその役割」では、風力・太陽光で電力の50%をまかなうための統合ソリューションと100%の未来に向けた可能性が示されている¹⁵⁾。

デンマークでは、2010年頃までに地域熱供給と共にCHP(熱電併給, コージェネレーション)設備が導入されてきたが、電力市場の価格変動に対応して運用することになった。VREの供給量が多いときには、CHPの発電出力を大幅に減らすインセンティブが働き、熱と電気のセクターカップリングで発電出力と熱供給の比率を変えることで調整していた。2010年から2015年には、VREの割合は20%から44%に急増したため、柔軟性への投資が必要となり、CHPの電気と熱を分離するタービンの完全バイパス運転、そして電気を熱に変換するPtH(パ

ワーツーヒート)と呼ばれるセクターカップリングの技術として電気ボイラーやヒートポンプが導入された。ここでも、地域熱供給が持つ蓄熱システム(主に温水蓄熱)が有効に活用されている。さらに、デンマークを中心に本格的に導入されている太陽熱地域熱供給(Solar District Heating)では、長期間にわたり余剰熱を季節間で蓄熱する巨大なピット式蓄熱(PTES)が採用されている¹⁶⁾。

5. スマートエネルギーシステムの可能性

2015年から毎年デンマークで開催されているスマートエネルギーシステムと第4世代地域熱供給に関する第6回の国際会議¹⁷⁾が2020年10月には新型コロナウイルスの影響で完全オンラインで開催され、22か国から240名が参加して150以上の発表が行われた。翌年の2021年9月にはデンマークのコペンハーゲンにおいてハイブリッド形式で開催され、160名のリアル参加と70名のオンライン参加者により124の発表が行われた。会議のセッションのテーマは、「スマートエネルギーシステム」「第4世代地域熱供給」「第5世代地域熱供給」「蓄エネルギー」「電化」「再生可能エネルギー」「エネルギー効率化」など多岐に渡る。

この国際会議を主催するオールボー大学のHenrik Lund教授は第4世代地域熱供給(4GDH)を提唱し、再生可能エネルギー100%に向けたスマートエネルギーシステムの展望について講演をしている。スマートエネルギーシステムの中で、変動性再生可能エネルギー(VRE)が大量に導入されるに従って蓄電や蓄熱のようなエネルギー貯蔵は重要な役割を果たしており、その中でも蓄熱システムはコスト面からも有効なソリューションである¹⁸⁾。

表1 欧州各国の再生可能エネルギー導入目標(2020年)の達成国トップ10
出所: eurostat データ¹⁴⁾より作成

目標達成国	2030年 目標	2020年 目標	2020年 実績	電力	熱	交通
スウェーデン	65%	49%	60.1%	74.5%	66.4%	31.9%
フィンランド	51%	38%	43.8%	39.6%	57.6%	13.4%
ラトビア	50%	40%	42.1%	53.4%	57.1%	6.7%
オーストリア	50%	34%	36.5%	78.2%	35.0%	10.3%
ポルトガル	47%	31%	34.0%	58.0%	41.5%	9.7%
デンマーク	55%	30%	31.6%	65.3%	51.1%	9.6%
クロアチア	36%	20%	31.0%	53.8%	36.9%	6.6%
エストニア	42%	25%	30.2%	29.2%	57.9%	12.2%
リトアニア	45%	23%	26.8%	20.2%	50.4%	5.5%
EU27カ国	40%	20%	22.1%	37.5%	23.1%	10.2%

2020年の基調講演では、EU委員会が2020年7月に発表した「EUエネルギーシステム統合戦略」¹⁹⁾が紹介された。従来の垂直統合型で、一方向で無駄の多いエネルギーシステムを、将来の統合されたエネルギーシステムに変える戦略である。すなわちエネルギーのユーザーと供給者との間で資源的にも経済的にも無駄のないエネルギーフローに変えるとしている。この戦略はグリーン・エネルギー転換のフレームワークにもなっており、全エネルギー分野を統合する「循環型」エネルギーシステムや消費者側での「電化」や「グリーン燃料」（水素等を含む）を含んでいる。いわゆる全分野（電力分野、熱分野、交通分野）を横断するセクター・カップリングを推進している。

個別セッションでは、欧州の熱分野の脱炭素化プロジェクトが多く紹介されている（図5）。Hotmapsプロジェクトは、地域、地域、国の冷暖房計画プロセスを支援するツールボックスを開発している²⁰⁾。ヨーロッパの7つのパイロットエリア（ドイツのフランクフルト、デンマークのオールボー、イタリア

のジェネバ等）との緊密な協力関係のもとで開発、実証、検証されており、最終的にオープンソースライセンスでEU加盟国すべてで使用できることを目指している。第5世代地域熱供給（5GDH）に関する発表も多く行われた。特にイギリスではこれまで地域熱供給の普及が欧州の中でも遅れていたが、ロンドンなど都市部での熱分野の脱炭素化に向けて5GDHの研究や実証が始まっている。5GDHでは、都市部にも大きいポテンシャルがある排熱が積極的に活用される。排熱には多くの種類があり、低温の産業排熱（スーパーマーケット、データセンター、飲食店など）、配電設備（変電所など）、下水道、地下鉄などの利用が検討されている。これらの低温の排熱を熱源とする排熱ネットワークを蓄熱機能と合わせて整備し、地域あるいは各建物に設置されたヒートポンプにより必要な温度で冷熱および温熱を供給する。この5GDHの排熱のネットワークにおいても、比較的長期の季節間での蓄熱も可能な大規模な蓄熱システムの利用が必要とされている。

季節間蓄熱の技術開発プロジェクトとしては、



図5 欧州の熱分野の脱炭素化プロジェクト 出所：文献 17)

WEDISTRICT: reneWable Energy DISTRICT Heating & cooling solutions

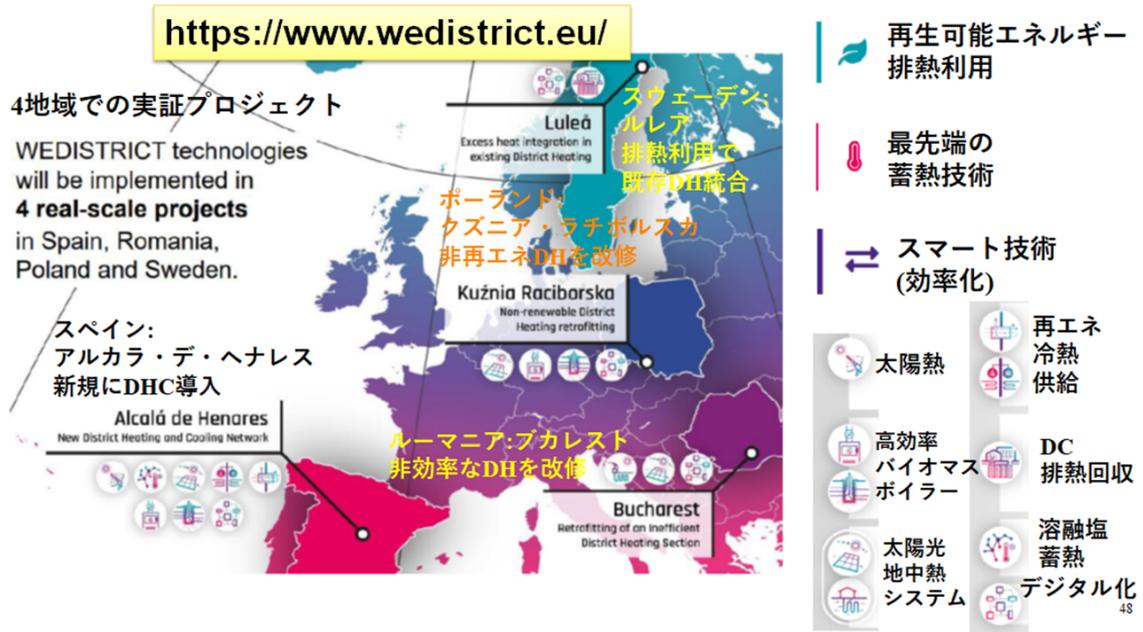


図6 WEDISTRICT プロジェクトの概要 出所：文献 22)

オーストリア企業や研究機関を中心とした gigaTES²¹⁾ プロジェクトがあり、デンマークで導入されている SDH (太陽熱地域熱供給) のためのピット式蓄熱層 (PTES) の最大規模 (約 20 万立米) のさらに 10 倍の規模 (200 万立米) の技術開発が進められている。地域熱供給の脱炭素化のために再生可能エネルギーなどの適用を進める実証プロジェクトとしては、WEDISTRICT (reneWable Energy DISTRICT heating & cooling solutions) が欧州各国 (スペイン、ポーランド、ルーマニア、スウェーデン) の 4 地域で進められている²²⁾。ここでは再生可能エネルギーおよび排熱の活用、最先端の蓄熱技術およびスマート技術 (エネルギー効率化) が主要なテーマであり、様々な技術オプションが各地域で実証されている (図 6)。

6. おわりに

電力に比べて国際的にも遅れている熱分野の脱炭素化と蓄熱システムの可能性について、欧州を中心とした 2050 年カーボンニュートラルに向けた政策とスマートエネルギーシステムの研究開発の動向を国際機関のレポートや国際会議から情報を元にまとめて紹介した。欧州各国においても、熱分野の脱炭素化は政策面でも技術面でも様々な課題があり、まずは政策面での再生可能エネルギーの導入目標から、再生可能エネルギーを大量導入することができ

る電力システムと第 4 世代以降の地域熱供給を連携したスマートエネルギーシステムが必要となる中で、蓄熱システムは重要な役割を果たし、カーボンニュートラルの実現に向けて大きな可能性がある。

謝辞

本論文のための研究調査にあたり第 4 世代地域熱供給フォーラム (事務局：特定非営利活動法人環境エネルギー政策研究所)²³⁾ の関係者および活動助成を受けた地球環境基金に感謝します。デンマークでの調査にあたり、デンマーク大使館、State of Green およびオールボー大学の関係者にも感謝します。

参考文献

- 1) Global Carbon Project : Carbon Budget 2021
<https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/>
- 2) 環境省「気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第 6 次評価報告書 (AR6) サイクル」<http://www.env.go.jp/earth/ipcc/6th/index.html>
- 3) IRENA (2021) “World Energy Transitions Outlook : 1.5°C Pathway” <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook>

- 4) REN21 (2021) “Renewables 2021 Global Status Report” <http://www.ren21.net/gsr>
- 5) IRENA, IEA, REN21 (2020), “Renewable Energy Policies in a Time of Transition : Heating and Cooling” <https://www.ren21.net/heating-and-cooling-2020/>
- 6) 松原 (2020a) 「熱分野の脱炭素化を目指す欧州の熱ロードマップと第4世代地域熱供給」太陽エネルギー (日本太陽エネルギー学会誌) **46**(5), No.259, 47-55 (2020)
- 7) IRENA (2020), Innovation Outlook : Thermal Energy Storage, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Innovation-outlook-Thermal-energy-storage>
- 8) EU 委員会 (2021a) “European Climate Law” https://ec.europa.eu/clima/policies/eu-climate-action/law_en
- 9) Clean Energy Wire (2021) “Covering the EU’s “Fit for 55” package of climate and energy laws” <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/covering-eus-fit-55-package-climate-and-energy-laws>
- 10) EU 委員会 (2020a) “2050 long-term strategy” https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en
- 11) EU 委員会 (2020b) “EU Green Deal” https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- 12) EU 委員会 (2018) “2030 Climate & Energy Framework” https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en
- 13) EU 委員会 (2021b) “NECPs” https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/national-energy-climate-plans_en
- 14) Eurostat (2022) “Renewable energy statistics” https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title = Renewable_energy_statistics
- 15) デンマークエネルギー庁 (2022) 「デンマークの電力システムにおける柔軟性の発展とその役割」日本語版 <https://www.isep.or.jp/archives/library/13612>
- 16) 松原 (2020b) 「デンマークの太陽熱地域熱供給と季節間蓄熱」太陽エネルギー (日本太陽エネルギー学会誌), **46** (2), 55-64 (2020)
- 17) Smart Energy Systems International Conference <https://smartenergysystems.eu/>
- 18) Lund (2016) Lund, H., Østergaard, P. A., Connolly, D., Ridjan, I., Mathiesen, B. V., Hvelplund, F., Thellufsen, J. Z., & Sorknæs, P. (2016). Energy Storage and Smart Energy Systems. International Journal of Sustainable Energy Planning and Management, 11, 3-14. <https://doi.org/10.5278/ijsepm.2016.11.2>
- 19) EU 委員会 (2020c), EU Strategy on energy system integration https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-system-integration/eu-strategy-energy-system-integration_en
- 20) Hotmaps プロジェクト <https://www.hotmaps-project.eu/>
- 21) gigaTES “Giga-scale Thermal Energy Storage for Renewable Districts” <https://gigates.at/index.php/en/>
- 22) WEDISTRICT “renewable Energy DISTRICT heating & cooling solutions” <https://www.wedistrict.eu/>
- 23) 第4世代地域熱供給フォーラム <https://www.isep.or.jp/4dh-forum>

著者略歴



松原弘直 (まつばら ひろなお)

E-mail : matsubara_hironao@isep.or.jp

特定非営利活動法人 環境エネルギー政策研究所 理事, 主席研究員, 日本太陽エネルギー学会理事, 工学博士.

東京工業大学においてエネルギー変換工学の研究で学位取得後, 製鉄会社主任研究員, IT・環境技術コンサルタントなどを経て, 現職. 自然エネルギー政策の研究 (エネルギー永続地帯, 自然エネルギー100%シナリオ) などに取り組み, 日本初の自然エネルギー白書の編纂のほか, 第4世代地域熱供給フォーラム事務局, 地域主導型の地域エネルギーの事業化支援等にも取り組む.