

デンマークの再生可能エネルギーの取り組み ～熱利用を中心に

Renewable Energy in Denmark with a Focus on Heat Utilization

田中いずみ*

1. はじめに

デンマークは、世界で初めて2050年に化石燃料からの完全脱却を目標として掲げた国である（2012年エネルギー合意）。2030年までの温室効果ガス排出削減は1990年比70%減を掲げている。再エネの導入量は、2021年には消費電力の63%となっている。（図1）

しかし、エネルギー全体をしてみるとまだ化石燃料は六割を占めていて、2050年に目標としている化石燃料からの完全脱却までの道のりはまだ長い。また上記の消費電力の45%が風力発電が占めているが、エネルギー全体で見ると割合は低くなり、バイオマスの割合の方が高くなっている。（図2）

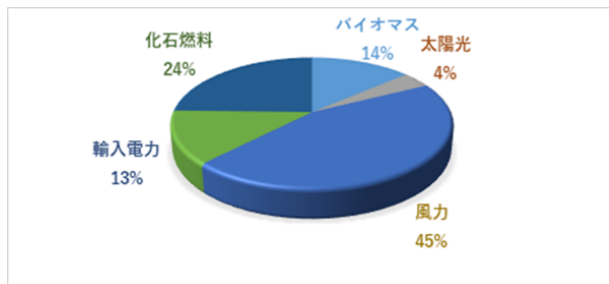


図1 消費電力（2021年）¹⁾

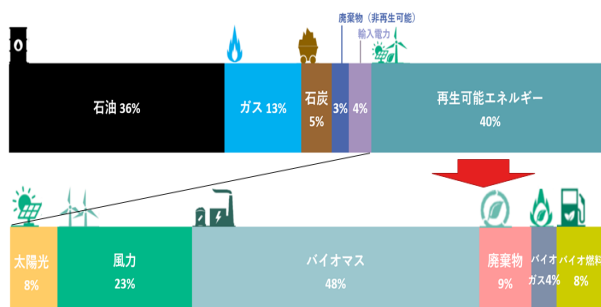


図2 最終エネルギー利用（上段），再生可能エネルギーの割合（下段）（2020年）

デンマーク政府はバイオマスの利用は完全なグリーン転換（green transition）に向けての暫定的な活用と捉えているが、現時点では発電の他、地域熱供給（日本では地域冷暖房とも言われている）で利用がされている。

地域熱供給はバイオマスをはじめ、再生可能エネルギーが活用されているが、（輸入電力を含めない、国内の）電力生産においての太陽光や風力等の変動性再生エネルギー（VRE）の比率が半分を上回っており、電力システムを柔軟に運用し、競争的で透明性の高い電力市場を基礎として、これまでVREの予測・スケジューリングの技術や地域間連系線の拡充など様々な方策が実施されてきたが、熱利用を含めたセクターカップリングもVREの変動の吸収に一躍買っている。

本稿では、デンマークが目指すエネルギー・システムの全体像を紹介し、セクターカップリングの具体例として熱（地域熱供給）及びPower-to-X（PtX）の取り組みについて述べる。

2. デンマークが目指すエネルギーシステム

デンマークが目指すエネルギー・システムは堅固（ロバスト）で、電力、熱、ガス、ガソリンなどの液体燃料のエネルギー媒体が相互融通可能であり、エネルギー効率も経済性も高いシステムである。エネルギー媒体ごとに効率と安定を追求するのではなく、包括的なアプローチを目指している。その中でセクターカップリングが重要な役割を果たしている。（図3）

現在もエネルギー・システムの柔軟性に寄与しているのが地域熱供給（地域冷暖房・給湯）である。

*デンマーク王国大使館 上席商務官（エネルギー・環境）

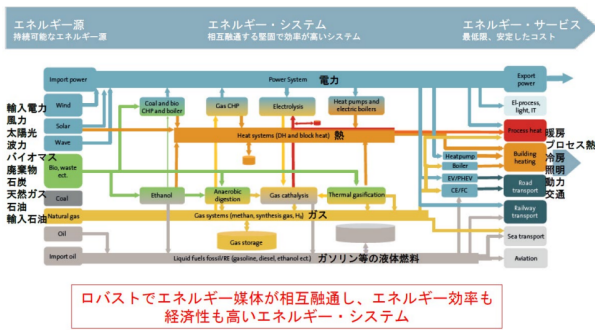


図3 デンマークが目指すエネルギー・システム

3. 地域熱供給システム

地域熱供給システムは、集中的に生産された熱(温水)を熱導管網を通じて多数の需要家に供給する。集中的に生産されるからこそ、バイオマス、太陽熱などの再生可能エネルギーで熱を生産、またある場所では価値の無い、あるいは非常に価値の低い熱、例えば産業活動による排熱などを、住宅、商業施設など熱の需要が高い場所で主に暖房と給湯の熱源として活用することを可能にしている。

デンマーク国全体の熱需要の約半分、エネルギー需要全体の17%が地域熱供給によって供給されており、家庭部門に限ると全世帯の約64%が地域熱供給に接続して暖房用と給湯用の温熱が供給され、エネルギー利用にあたって地域熱供給は重要な役割を果たしている。お湯(70℃~)で供給されていて、コペンハーゲンなどの6か所の大模集中型地域熱供給が国内の供給量56%を占め、その他は400か所の中小規模分散型地域熱供給となっている。地域熱供給事業者の12.5%は自治体所有しており、85%は利用者組合など利用者が直接経営に携わっている。

4. 地域熱供給システムの制度

デンマークの地域熱供給1903年にコペンハーゲン近郊のフレデリクスベアで初めて導入され、廃棄物焼却炉から放出される熱を隣接する病院が活用することから始まった。

コペンハーゲンをはじめとする大都市では、発電所が都市の近くにあり1979年に施行された熱供給法が発電所からの余剰熱の活用を後押ししたこともあり、地域熱供給での発電所からの廃熱利用が進んだ。同年には天然ガス供給法も施工され、自治体に熱計画が義務づけられた。全自治体に熱需要(暖房、給湯)を満たすにあたり、社会経済的に最良のプロジェクトを選択するためのガイドラインを使うこと

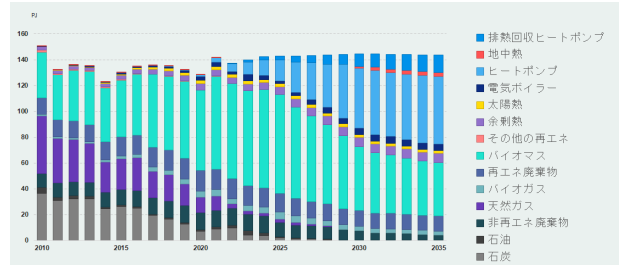


図4 地域熱供給のエネルギーの推移と予測²⁾

が義務化された。デンマーク・エネルギー庁(DEA)が中心的な役割を果たし、熱計画の制定を支援し、承認する機関となった。地域熱供給は自然独占であるため、消費者保護、価格規制、且つ事業者は非営利であることなどを担保している。2022年のウクライナとロシアの対立を受け、ロシアからヨーロッパへのガス供給を停止したため、天然ガスの価格が高騰し、デンマーク政府は2022年末までに各自治体に対し天然ガスで個別暖房・給湯を行っている建物に対して、地域熱供給への接続(または既存の地域熱供給網の拡張)または個別ヒートポンプ(日本で言うエアコン)に切り替える計画を立てるよう命じた。

5. 地域熱供給がもたらすメリット

地域熱供給がエネルギー・システムにもたらすメリットは多岐にわたるが、例として下記に3つ挙げる。

- ・熱を作るエネルギー源の柔軟性
- ・社会の余剰熱の利用
- ・変動性再生可能エネルギーの変動の吸収

熱源としては、2021年時点でバイオマスなどの再生可能エネルギーが70.4%活用されているほか、先述の通り今後はますます熱分野の電化が進展し、ヒートポンプや電気ボイラーの割合が増加していくと想定されている。

地域熱供給は社会の中の余剰熱の活用にも一役買っている。産業分野などで発生する余剰の温熱や冷熱は大気に放出されることが多いが、地域冷暖房システムで簡単に利用できる貴重な熱源である。廃棄物処理場、及び発電における廃熱の活用は進んでいる。

廃棄物処理場からの廃熱利用の特徴的な事例はコペンヒルである。コペンハーゲン中心部にある「廃棄物コジェネプラント」であり、建物の上ではス

キー、ボルダリング、トレイルランニングができる市民憩いの場となっている。400,000 トンのリサイクルできない廃棄物を燃料として、1 トンあたり 2.7 MWh 熱と 0.8 MWh 電力を生産し、550,000 人分の電力と 140,000 世帯に熱を供給していて、2021 年より CCS の実証を開始している³⁾。美しい建物にすることと、市民の憩いの場にする事によって街の中心部から近い立地し、熱需要に近くすることで効率高く熱供給をできるように工夫がされている。

その他最近ではスーパーの冷蔵・冷凍設備や、データセンターからの廃熱の活用も進んでいる。Meta のデータセンターが提供している約 125,000 MWh の熱はオーデンセ市の 7000 世帯に地域熱供給を通じて供給されている⁴⁾。

地域熱供給も電化が進んでおり、余剰電力が発生し、電力価格の低下（もしくはネガティブ・プライス）時に電力で温水を作り、それを蓄熱して、地域熱供給網に熱として供給している。即ち、電気を電気として電池に貯めると言うエネルギー貯蔵の代替として、電気を熱（温水）として蓄熱槽に貯めることになる。熱としてエネルギーを貯めるメリットは電池で貯めるよりエネルギー効率が高く、コストも抑えられる。地域熱供給は再生可能エネルギーの大量導入にあたって重要な役割を果たしている。

熱電併給（コジェネ）設備を所有する地域熱事業者は売電価格を見ながら、天然ガスやバイオマスボイラーの稼働の調整を行い、売電価格が高い時にはボイラーを稼働させ、熱は蓄熱設備に貯めておき、売電価格が低い時はボイラーを停止させ、蓄熱設備から熱供給を行う。最近では電気ボイラーと大型のヒートポンプを活用し、売電価格が安価、もしくは供給過剰の際にネガティブ・プライスになる余剰電力の有効活用が進んでいる。これは変動型再生可能エネルギーの変動の吸収にも役立っており、「電気」



図5 コペンヒル

と「熱」のセクターカップリングを実現している。

ここまで述べてきた通り、デンマークにおけるセクターカップリングは、再エネ電源による発電電力を余すことなく活用する「電化」の展開が著しいが、地域熱供給による余剰熱利用も積極的に展開されている。例えば後述する PtX は、これ自体やはり再エネ余剰電力を船舶・航空燃料に転換するという意味で間接的な「電化」であるが、電気分解の際に発生する排熱の地域熱供給への活用も今後大いに期待されている。

6. 事例：コペンハーゲン広域の地域熱供給

コペンハーゲン広域の地域熱供給はデンマークで最大の地域熱供給システムとなっている。2020 年には 38PJ の熱を供給しており、デンマーク全体の熱需要の約 25% を担っている。合計 2150MW 集中型コジェネプラント、50W のヒートポンプ、その他産業排熱・下水排熱を活用し、2700MWh の蓄熱層も備えている。上記のコペンヒルもコペンハーゲン広域の地域熱供給網に熱を供給している。この熱供給網には 22 自治体の 100 万人が接続している。特記すべきなのが、その熱を提供している設備の構成であり、熱の 95% が廃熱の活用となっている。

コペンハーゲン広域地域熱供給に熱を供給するプラントで特徴的な Avedøre コジェネプラントについても紹介する。2 基のコジェネプラントから構成されているが、1 号機は 1990 年に石炭コジェネとして運転を開始し、2 号機は 2002 年に天然ガスコジェネとして運転を開始。但し後者はガス、石炭、石油、バイオマスに対応可能なプラントとして設計

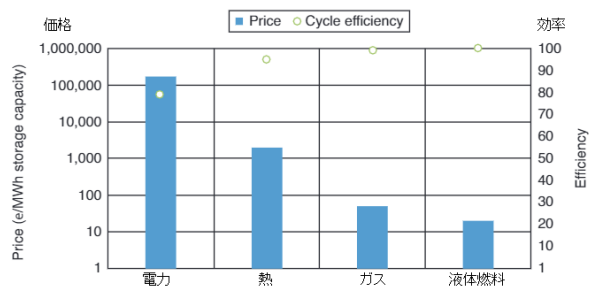


図6 エネルギー貯蔵の比較⁵⁾

表1 コペンハーゲン広域地域熱供給の熱供給設備

| | |
|---------|-----|
| 廃棄物焼却炉 | 25% |
| 発電所＝CHP | 70% |
| ボイラー | 5% |

されていた。2003年には2号機が天然ガスと木質ペレットの混焼をはじめ、その後2008年には木質ペレットと麦わらを燃料として運転を開始。2016年には石炭を使っていた1号機の燃料を木質ペレットに変更し、運転から26年をかけ、燃料のグリーン化を成し遂げた⁶⁾。

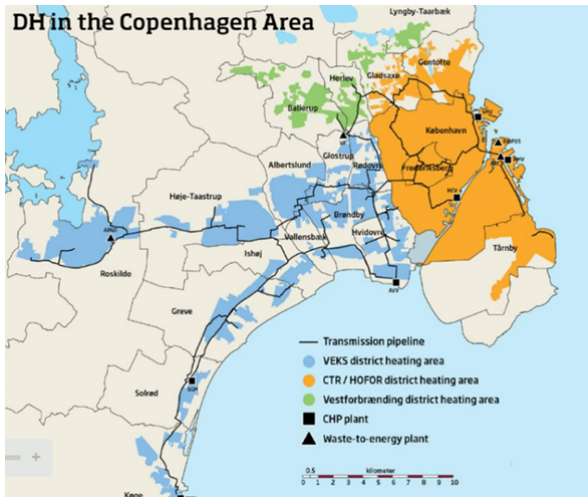


図7 コペンハーゲン広域地域熱供給



図8 Avedøre コジェネプラント⁶⁾

7. 水素と熱

デンマークのPtX戦略の中では、PtXのバリューチェーンの各段階、とりわけ電気分解から多くの余剰熱が発生することに着眼し、その熱の活用可能性について次のように言及している。「PtXプラントから発生する余剰熱は、地域の状況に応じて、地域の地域熱供給網で利用するか、バリューチェーンや産業界でプロセス熱として利用できる可能性がある。余剰熱の価値は、温度と利用可能頻度によって大きく異なる。(中略)温度が十分に高く、年間を通じて多くの時間に熱を利用できるのであれば、地域熱供給網にとって価値あるものになる可能性がある。」⁷⁾

デンマークエネルギー庁(DEA)では既存技術や将来技術の技術特性やコスト構造等を取りまとめた「技術カタログ」を公開しており、この中では電解技術別の排熱利用の可能性についても言及している。同技術カタログ内では、アルカリ電解やPEM水電解ではそれぞれ投入エネルギー(電気)のうち16.4%、26.4%が「回収可能な熱損失」としてアウトプットされるとしている⁸⁾。

今後はPtXの立地を検討するにあたって、必要なグリーン電力即ち風力・太陽光発電が多い地域に近いほど安価な再エネ電力へのアクセスが良く、送電網強化の必要性を低減できるが、地域熱供給に立地が近いほど余剰熱の活用による熱収入が見込め、バイオマスプラント等からの生物由来炭素の回収に有利になる為、(グリーンエネルギーの)供給と、廃熱の需要の両側面を鑑みながら行われることになる。

参考文献

- 1) <https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Statistik/statistikdkeng.xlsx> 2023年12月にアクセス
- 2) <https://ens.dk/service/fremskrivninger-analyser-modeller/klimastatus-og-fremskrivning-2023> 2023年12月にアクセス
- 3) <https://www.ramboll.com/projects/energy/amager-bakke-leader-in-waste-to-energy> 2023年12月にアクセス
- 4) https://sustainability.fb.com/wp-content/uploads/2020/12/FB_Denmark-Data-Center-to-Warm-Local-Community.pdf 2023年12月にアクセス

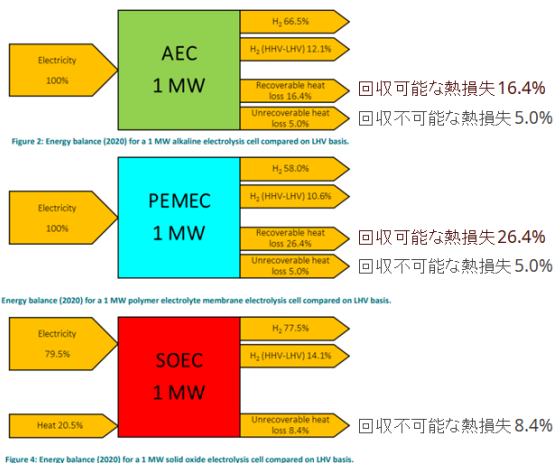


図9 1MWの設備における熱損失⁸⁾

- 5) 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>
- 6) <https://www.ramboll.com/projects/energy/conversion-to-renewables-avedore-plant> 2023年12月にアクセス
- 7) PtX 戦略（日本語版）<https://stateofgreen.com/jp/publications/> % e3% 83% 87% e3% 83% b3% e3% 83% 9e % e3% 83% bc % e3% 82% af % e6% 94% bf % e5% ba % 9c % e3% 81% aepower-to-x % e6% 88% a6% e7% 95% a5// 2023年12月にアクセス
- 8) <https://ens.dk/en/our-services/projections-and-models/technology-data/technology-data-renewable-fuels> 2023年12月にアクセス

著者略歴



田中 いずみ（たなか いずみ）
カリフォルニア大学バークレー校天然資源学部環境科学政策マネジメント学科卒業。東北大学大学院環境科学研究科修士課程修了。修士。（株）東芝入社。スウェーデン大使館を経て現在、デンマーク王国大使館上席商務官。エネルギー・環境分野企業の日本進出・市場拡大の支援に従事。