

特集Ⅱ

蓄熱技術の最前線

デンマークの太陽熱地域熱供給と季節間蓄熱

Solar District Heating and Seasonal Heat Storage in Denmark

松原弘直 *

1. はじめに

1970年代の石油ショック以降、欧州各国（特に暖房需要の大きい北欧）では化石燃料を有効にエネルギー利用するため地域熱供給（District Heating）が積極的に導入されてきた。2000年代に入り、気候変動対策として暖房や給湯などの熱利用の分野でもバイオマスや太陽熱などの再生可能エネルギーが積極的に活用されるようになった。デンマークでは2050年までに脱化石燃料を達成し再生可能エネルギー100%とすることを目指しており、全人口の約6割に地域熱供給が普及する中で、スマートエネルギーシステムの重要な要素として第4世代地域熱供給への移行に向けた研究や実証が進められている。その中で、特にデンマークで普及している地方部の地域熱供給の熱源として2010年頃から大規模な太陽熱設備が100基以上も積極的に導入され、合わせて大規模な季節間蓄熱も導入されてきた。そこで本論文では、デンマークのエネルギー政策と第4世代地域熱供給（4DH）への取り組みと、その中でも太陽熱地域熱供給（SDH）の現状および季節間蓄熱の事例について紹介する。

2. デンマークのエネルギー政策と地域熱供給

2.1 デンマークのエネルギー政策

欧州の中でも北欧は環境問題に積極的に取り組んでいることで有名だが、その中のデンマークでも1970年代のオイルショックまでは化石燃料に大幅に依存し、99%を中東の石油等の輸入に依存していた時代があった。その中で、日本と同様に化石燃料による大気汚染が大きな社会問題となり、国民の環境意識が非常に強くなった。その結果、1990年代以降は、エネルギー消費量やCO₂排出量と、GDPのデカップリングに成功している⁽¹⁾。

デンマークのエネルギー政策として、オイルショック以降、石油依存からの脱却の必要性からエネルギー構造転換が迫られたが、1980年代はまだエネルギー需要は右肩上がりで原子力の利用を想定したものだった。しかし、1990年には、デンマーク政府による持続可能な発展のための実施計画が採択され、脱大量生産、脱大量消費などの見直しが行われた。その時点で2030年までに二酸化炭素の排出量を半減させることが目標とされ、2025年までに再生可能エネルギーの割合を30%にまで高めるとされた。

さらに2011年には“Energy Strategy 2050”として、2050年までに化石燃料を使わない社会を目指すことを新たなエネルギー戦略としている。このエネルギー戦略を実現するため、2012年3月には新たな枠組みがつくられ、2050年までに化石燃料から完全に独立して再生可能エネルギー100%とすることが目標とされ、2035年までには発電と熱利用について再生可能エネルギー100%に移行している⁽²⁾。そのために既存の建物のエネルギー消費量を50%削減し、2030年までに石炭利用の中止などが決定されている。2020年までの目標値としては、最終エネルギー需要の約35%を再生可能エネルギーで賄い、電力の50%を風力発電で、最終エネルギー消費量を7.5%削減（2010年比）、温室効果ガス排出量を34%削減することを目指している。

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

* 認定NPO法人 環境エネルギー政策研究所

ルギー効率化の改善目標を 32.5% とする政策決定を行っている⁽³⁾。EU 各国は 2021 年以降 2030 年までのエネルギー・気候変動対策計画 (NECPs) を 2019 年末までに策定することになっており、デンマークから提出された計画 (NECP) では、2030 年までに温室効果ガスを 70% 削減することを政策決定したうえで、再生可能エネルギーの割合を 2030 年までに最終エネルギー需要の 55% 以上にすることを目標にしている。2018 年の最終エネルギー消費に占める再生可能エネルギー割合の実績は約 36% だったため、すでに 2020 年の目標を達成している。熱部門についても、すでに 47% に達している⁽⁴⁾。

2.2 デンマークの地域熱供給

デンマークの地域熱供給も古くは 1900 年に廃棄物を焼却する際の排熱を自治体施設の暖房に使っていた。オイルショック後の 1979 年に地域熱供給法が施行され、費用対効果に基づいたゾーニング（土地利用計画）を促進している。これまでにデンマーク全土の熱需要の約 50%，家庭用需要の約 63% を地域熱供給でカバーするまでになっている（首都のコペンハーゲンでは 98% に達する）。人口あたりの地域熱供給の普及率も EU 諸国の中で高いレベルにあり 64% に達している。地域熱供給の熱源に占める再生可能エネルギー（主にバイオマス）の比率も 1980 年代以降、石炭からの転換により、順調に上昇してきており、2015 年には約 48% に達している。

デンマークの地域熱供給法は、熱供給部門を規制するとともに、地方自治体が地域の熱計画やエネルギーインフラに関する意思決定を行い、エネルギーインフラに関する意思決定と利用資源の優先順位付けの権限を与えていた。地域熱供給法の主な原則は以下のとおりである。

- 地方自治体は、新規の熱供給プロジェクトの承認に対して責任を負う。
- 地方自治体は、最も社会経済的な利点を有する熱供給プロジェクトを選択しなければならない。
- 可能な限り熱電併給 (CHP) を行う。
- 地域熱供給の熱価格は「必要経費」に基づいて設定する。

さらに、地域熱供給法では、国全域の熱供給におけるゾーニングを行なっており、各ゾーンによって異なる熱の供給方法が進められている。これらは以下の 4 つのゾーンに分類される。

- 個別暖房・給湯

- 天然ガス網を介して供給される天然ガスを活用した暖房・給湯
- 分散型地域熱供給
- 集中型地域熱供給

1979 年までにはデンマークで初めてとなる総合エネルギー計画が熱供給に関する最初の法律と共に策定され、実質的に熱電併給プラント “Combined Heat and Power” (CHP) が義務化された。そのため人口密度が高い都市では、工事費が高いが CHP を導入し、人口密度が低いところは天然ガスを直接利用することになった。CHP は、1980 年当初は集中型から始まり、1986 年頃からは石炭を熱供給計画から除外し、エネルギー税を増税し、小規模な CHP プラントを重視したため、国内の再生可能エネルギーを利用しやすいように分散型になっていった。さらに 1990 年には再生可能エネルギーを燃料とする地域熱供給を推進する政治的合意が行われ、熱供給に関する法改正で燃料の選択に関するガイドラインをすべての地方自治体に提供した⁽⁵⁾。

2050 年までに化石燃料を使う CHP は無くなる方針であり、現在、都市部の大型の CHP では石炭用のプラントを廃棄物やバイオマスを燃料としてできるように改修が始まっている。CHP を石炭からバイオマスに変えることにより、運搬など地域に雇用を生んでいるだけではなく、技術革新となり、国の競争力強化になる。2010 年に熱利用計画を策定し、2020 年までの需要側での省エネを進めており、各エネルギー供給者は毎年 2% のエネルギー削減が義務づけられている。さらに第 4 世代地域熱供給として、熱供給の温度を下げることで、エネルギー効率が向上すると共に太陽熱などの低温熱源の利用や地中熱利用などが可能となってきている。デンマークでは電力分野で風力発電を強力に推進してきているが、国内で余剰となった電気はドイツなどの隣国に売るとともに温水などのエネルギーとして貯めておくスマート化が進んでいる。現在、デンマークの熱需要の約 6 割を地域熱供給で供給しているため、この電力との連携が重要となってきており、余剰電力で加温するボイラーやヒートポンプなどの導入が始まっている。一方で経済活動に伴うエネルギー消費量は低下しており、CHP や地域熱供給により、エネルギー変換時の熱損失を抑制することができる。地域熱供給のうち、CHP が 73%。残りは熱のみのプラントで、近年は太陽熱を熱源とする太陽熱地域熱供給 (SDH) が増加している。

表1 デンマークの地域熱供給ネットワークの歴史的発展（出典：文献6）より作成

	第1世代	第2世代	第3世代	第4世代
年代	1880-1930年	1930-1980年	1980-2020年	2020-2050年
主な特徴	蒸気ベース、コンクリートパイプ	加圧温水、大規模な施設	断熱パイプ、サブステーション、計測・モニタリング	低いエネルギー需要、スマートエネルギー、双方向地域熱供給
供給温度	< 200°C	> 100°C	< 100°C	50~60°C(70°C)
エネルギー効率	とても低い	低い	中程度	高い
熱源	石炭、廃棄物	石炭・廃棄物、石炭・石油 CHP	天然ガス・廃油・石炭・廃棄物・石炭・石油 CHP、産業排熱、バイオマス、余剰風力発電、地中熱、大規模太陽熱	廃棄物・バイオマス CHP、集中型 HP、産業排熱、バイオマス、余剰風力発電、地中熱、大規模太陽熱
蓄熱槽	蒸気蓄熱	蓄熱槽	蓄熱槽	蓄熱槽、冷水槽、季節間蓄熱
太陽熱利用	無	無	有	有
冷房需要	無	無	無	有

2.3 第4世代地域熱供給

表1に示す通り最初の第1世代の地域熱供給は、100年以上前の1900年代の初期から行われていたものである⁽⁶⁾。石炭や廃棄物の焼却熱を熱源とする熱供給により、供給温度は200°C近くに達する蒸気を用いたもので、エネルギー効率もとても低かった。その後、1930年代以降に、高温(100°C以上)の加圧温水による第2世代の地域熱供給が始まり、従来の石炭や廃棄物の焼却熱利用だけではなく、石炭や石油などを燃料とする大型で集中型の熱電併給(CHP)プラントが主要都市に建設された。1970年代のオイルショックを経て、1980年代以降は、分散型の熱電併給(CHP)や熱供給の設備が主流となり、熱源として天然ガスやバイオマスが用いられるようになった。この第3世代の地域熱供給では、100°C以下の温水を用いて断熱パイプや断熱されたコンパクトなサブステーションにより、小規模でもエネルギー効率の高いシステムを目指し、計測やモニタリングを行っている。

第4世代地域熱供給は、これまでの100年以上によぶ地域熱供給の経験の上に築かれ、より低温の温水を用いることでエネルギー効率が向上すると共にも、より多くの再生可能エネルギーや様々な排熱の利用を可能としている。将来、より低エネルギー化が進みエネルギー需要が低下する場合でも、配管システムなどの熱損失を最小限に抑えることができる。より柔軟なエネルギー貯蔵や供給側と需要側の双方向でのやり取りが可能となり、よりスマートで効率的なエネルギーシステムとなることを目指し

ている。これにより、地域熱供給システムがより多くの地域に適したものとなる可能性があるほか、既存の熱供給システムを拡大し、新たな機能をもたらすことができる。この第4世代地域熱供給やスマートエネルギーに関する研究や開発の成果に関する国際会議が2015年からデンマークで毎年開催されている。

デンマークの地域熱供給は、熱需要密度の低い農村部でも導入が進んでおり、そのために熱損失を低減することが課題となっている。また、風力発電の大幅な増加に伴い、電力市場の卸価格が低下してマイナスにまでなる時期があり、地域熱供給会社の天然ガス CHPは、卸電力価格の高い時期にのみ運転され、蓄熱の重要性が増している。デンマークにおいても現状では第3世代地域熱供給が主流であり、これらの経験の中でエネルギーの効率化や再生可能エネルギーへの転換第4世代地域熱供給への転換が進められている。

3. 太陽熱地域熱供給(SDH)の現状

3.1 SDHの導入状況

地域熱供給における再生可能エネルギー導入の一環として2010年以降、太陽熱を利用した地域熱供給(SDH:Solar District Heating)の導入がデンマークを中心に進んでいる。欧州各国の地域熱供給では、これまで再生可能エネルギーの利用としてバイオマスの利用を進めてきたが、国内バイオマスの資源制約や輸入バイオマスの持続可能性の懸念などから、様々な再生可能エネルギーの導入が可能な第4世代

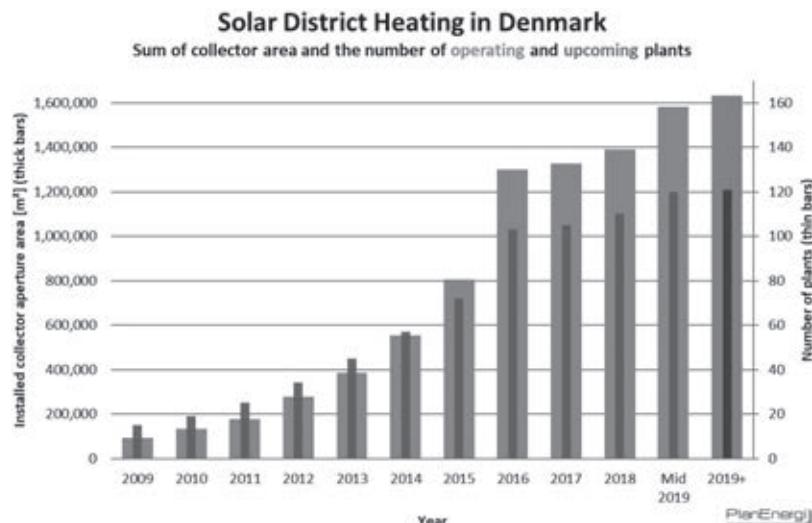


図1 デンマーク国内の太陽熱地域熱供給（SDH）の導入の推移（出所：文献7）

地域熱供給と共にバイオマス以外の再生可能エネルギーの導入が始まっている。2016年には、太陽熱地域熱供給（SDH）の施設数はデンマーク国内だけでも100か所を超え、太陽熱パネルの総面積は百万m²を超えており、図1に示すように2019年末には120カ所になると予測されており、その太陽熱パネルの総面積は160万m²を超えており⁽⁷⁾。欧州全体では、300以上のプラント（熱出力350kWth以上）があると言われており、その総出力は1100MWthに達し、年率35%のペースで増加をしている⁽⁸⁾。

太陽熱地域熱供給（SDH）はデンマークを中心にして発展してきたが、近年ではドイツ、オーストリアでも導入されており、2016年より2018年まで8カ国9の地域で市場拡大のためのプロジェクトSDHp2m（Solar District Heating from policy to market）が実施された⁽⁹⁾。SDHは欧州のエネルギー転換で重要な技術のひとつとなっており、過去5年間の市場の

年間成長率は35%、2018年の年間供給熱量は1TWhに達した。欧州で最大のSDH（デンマークSilkeborg）の規模は110MWth（太陽熱パネル15.7万m²）に達する。

3.2 太陽熱地域熱供給の実証事業

デンマークでは、EUからの助成事業による太陽熱地域熱供給（SDH）の実証プロジェクトSUNSTOREが2003年頃から2014年まで4期にわたり実施されている。SUNSTOREプロジェクトの基本的なコンセプトでは再生可能エネルギー100%で地域熱供給を目指すために太陽熱で50%以上の熱供給をカバーし、そのために大規模な季節間蓄熱を導入し、ヒートポンプを活用することでエネルギーの効率化を図っている⁽¹⁰⁾。デンマークのMarstalにおいて2010年から2014年にかけて実施されたSUNSTORE4では、それまでに導入されていた1.8万m²の太陽熱パネルとピット型蓄熱層

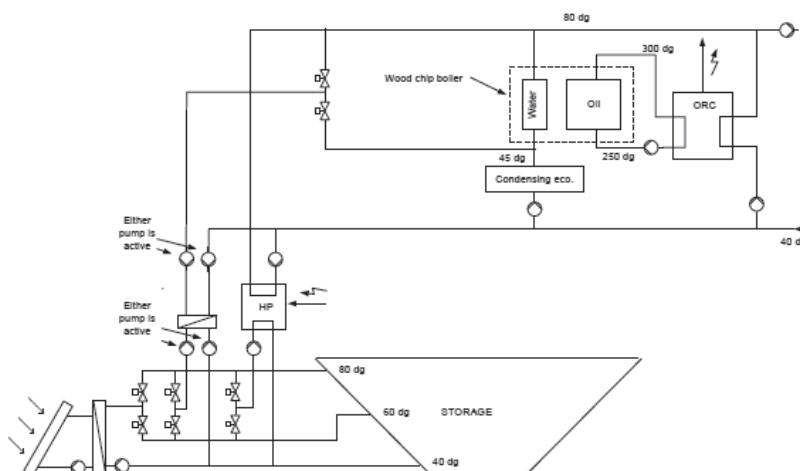


図2 MarstalでのSUNSTORE4プロジェクトの基本的なフロー図（出典：文献10）

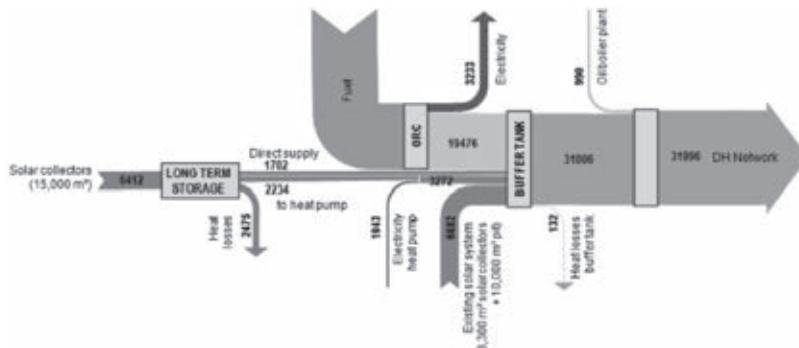


図3 Marstal の地域熱供給のエネルギーダイアグラム (Sankey Diagram) (出典：文献 10)

(10,000m³) に加えて、1.5万m²の太陽熱パネルと75,000m³の季節間蓄熱槽を導入して、太陽熱により地域熱供給の熱源として約34%を供給した。さらにバイオマス燃料を使ったORC(有機ランキンサイクル)によるCHPからの熱供給で約60%を賄い、ヒートポンプから熱供給を合わせて再生可能エネルギー100%による熱供給を実現している(図3)。

3.3 太陽熱地域熱供給の導入事例

ここでは2019年9月に実施されたデンマーク地域熱供給の視察ツアーで対象となった表2に示すデンマーク北部ユトランド半島の4カ所の太陽熱地域熱供給(SDH)の事例を紹介する。

(1) シルケボー (Silkeborg)

世界最大規模のシルケボー(Silkeborg)のSDHは、2016年から稼働し約2万世帯のユーザが利用する地域熱供給会社(自治体所有)が運営している。使われている太陽熱パネルは平板式で、総面積は約16万m²あり、熱出力は110MWthである(図4)。地域熱供給が地域の熱需要のうち90%を賄い、そのうち太陽熱が20%をカバーしており、数日分の蓄熱槽のみで季節間蓄熱は使われていない。

(2) ブロンダースレブ (Brønderslev)

ブロンダースレブ(Brønderslev)の地域熱供給会社(自治体所有)では、従来は天然ガスCHP(熱電併給)で4700世帯に熱供給を行い、需給調整用にガスボイラーや電気ボイラーも導入されている

表2 太陽熱地域熱供給 (SDH) 施設の事例

No.	自治体名	面積 [m ²]	出力 [MWth]	蓄熱槽 [m ³]	ユーザ数	特徴
1	Silkeborg	156,694	110	32,000	21,000	世界最大規模
2	Dronninglund	37,573	26	60,000	1,350	ピット型季節間蓄熱
3	Brønderslev	26,929	17	8,000	4,700	集光式パネル、ORC
4	Brædstrup	18,612	13	26,500	1,500	ボアホール型季節間蓄熱

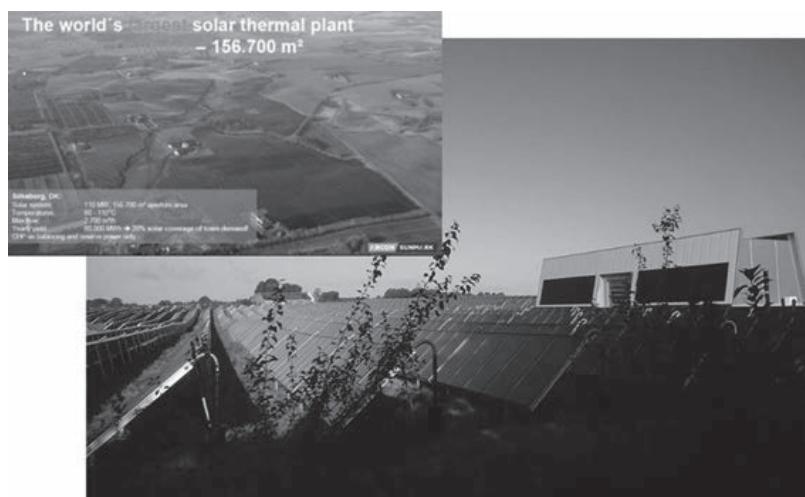


図4 Silkeborg の太陽熱地域熱供給施設 (ARCON-SUNMARK 社資料ほか)

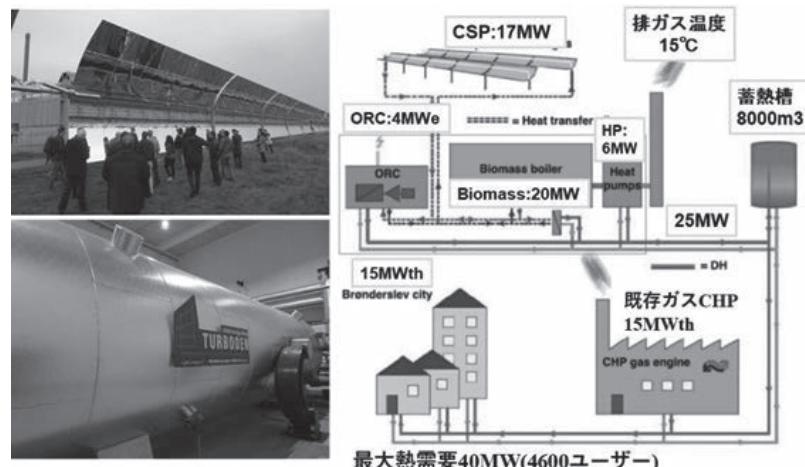


図5 Brønderslev の太陽熱およびバイオマス CHP による地域熱供給設備
(出典：Brønderslev 地域熱供給会社の資料に加筆)

(図5)。2018年には再生可能エネルギーの利用割合を増やすため太陽熱とバイオマスを組み合わせたORC（有機ランキンサイクル）によるCHP（熱電併給）システムを導入した。太陽熱パネルは太陽熱発電(CSP)で用いられる集光式を採用し、総面積は2.7万m²あり、熱出力は17MWthある。一方、バイオマスCHPでは地域(50km圏)の森林からの木材資源を使い、熱出力20MWthのボイラーとORCの組み合わせにより4MWの発電出力、15MWthの熱出力がある。さらにボイラー排熱からの6MWthの潜熱回収が行われており、エネルギー効率の高いシステムになっている。夏季を中心に太陽熱を主に使用していますが、季節間蓄熱は使用されておらず、太陽熱が使えない冬季を中心にバイオマスが使用されており、最大25MWthの熱出力が得られる。



図6 Dronninglund の太陽熱地域熱供給の外観
(出典：文献11))

(3) ドロンニングルント (Dronninglund)

図6に外観を示すドロンニングルント(Dronninglund)の太陽熱地域熱供給プラントでは、大量の温水を地下ピットに貯めるピット型蓄熱槽(PTES)が用いられている⁽¹¹⁾。図7には、ドロン



図7 Dronninglund の太陽熱地域熱供給の配置図 (出典：文献11))

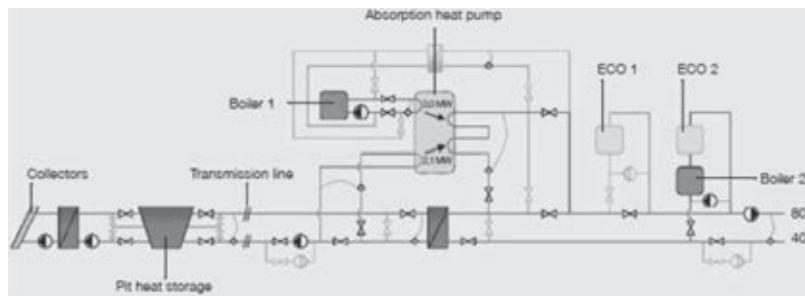


図8 Dronninglund の太陽熱地域熱供給のフロー図（出典：文献11）

表3 Dronninglund 地域熱供給の諸元（出典：文献12）ほか)

項目	数値
ユーザ数(供給エリア面積)	1350世帯(30万m ²)
熱導管距離	46km
年間供給熱量	38,700MWh
年間販売熱量	29,700MWh
熱販売価格	71ユーロ/MWh
ガス CHP 発電出力	6MW
ガスボイラー熱出力	8MWth
バイオ燃料吸収式 HP 热出力	2.1MWth
SDH 運転開始	2014年
太陽熱パネル面積(熱出力)	37,573m ² (26MWth)
化石燃料削減率(2016年実績)	41%(目標50%)
ピット型蓄熱槽(PTES)	60,000 m ³
蓄熱容量(温度帶)	5400MWh(12°C - 89°C)
最大熱供給容量	27MWth
年間蓄熱量	11,855 MWh(2016年)
年間熱供給量	10,716MWh(2016年)
熱損失	1,020MWh(2016年)
コスト(投資額)	0.43ユーロ/kWh(232万ユーロ)

ニングルント (Dronninglund) 地域熱供給の配置図を示す。2014年に運転を開始した施設では、図8のフロー図に示すように熱出力 26MWth、総面積 3.8 万平米の太陽熱パネルが導入され、町の地域熱供給による熱需要の 50% を太陽熱で賄う計画となっている。夏季に太陽熱の供給量が熱需要量を大きく上回る場合、その余剰熱を蓄熱して、秋季以降に利用できるようにしている。ドロンニングルント (Dronninglund) の太陽熱地域熱供給プラントの諸元を表3に示す。ピット型蓄熱槽の容積は約 6 万 m³で運転を開始した時点では世界最大級の規模だった。太陽熱が不足する時期には、バイオ燃料の熱で駆動する吸収式ヒートポンプで夏季以外に必要な熱を供給している。2016年の実績では太陽熱により地域熱供給の年間熱量の 41% を供給し、蓄熱槽の損失は年間約 9% 程度で、90% 以上の熱が利用された。将来の計画では、風力発電からの余剰電力を活用した地中熱ヒートポンプを導入して、化石燃

料をほぼゼロ（再生可能エネルギー 100%）にすることを目指している。

(4) ブレドストラップ (Brædstrup)

ボアホール型 (BTES) の季節間蓄熱槽 (2.7 万 m³) を採用しているブレドストラップ (Brædstrup) では、1.9 万 m² の太陽熱パネル (平板式) で最大 13MWth 热出力があり、天然ガス CHP (発電出力 4MW、熱出力 4MWth) やヒートポンプ (1MWth) と合わせて地域熱供給を行っている。ボアホール型はピット型と比べて管理は容易だが、熱損失が比較的大きく、デンマーク国内でも採用事例は多くはない。

4. 季節間蓄熱の利用形態

デンマークの地域熱供給で用いられている地域熱供給のための蓄熱技術としては、容積が数千 m³ の温水によるバッファーア蓄熱槽により、一般的には短期間のピーク需要対応や燃料や電力市場の需給関係

に対応して数日分の熱供給が可能である。太陽熱や排熱を地域熱供給で利用するために必要な長期間の季節間蓄熱としてはいくつかの種類があり、主にボアホール型 (BTES : Borehole Thermal Energy Storage) とピット型 (PTES : Pit Thermal Energy Storage) がある(図9)。図10には、Dronninglund の太陽熱地域熱供給で用いられている容積6万m³のピット型の季節間蓄熱槽の構造と工事の様子を示す。ピット型蓄熱槽内の1年間の温度変化(計算値)を図11に示す。ピット上部の温

水の温度は夏期に最大90°Cに達するが、冬期には20°C程度まで低下する。ピット底部の温度は最大で50°C程度で冬期においても最低10°C程度である。

図12に示すように地域熱供給での太陽熱の利用は熱需要の小さい夏季が中心となるが、大型の蓄熱槽を活用することで夏季には100%近い太陽熱の利用も可能である。さらにヒートポンプを利用することで太陽熱が不足するときの熱供給を補い、戻り温度を下げて蓄熱槽の利用効率を高めることが可能である。通常の鉄製の蓄熱槽ではなく、埋設式の巨大

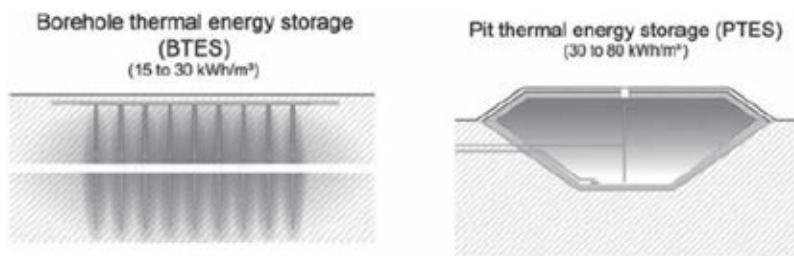


図9 季節間蓄熱槽の種類(出典:文献13))

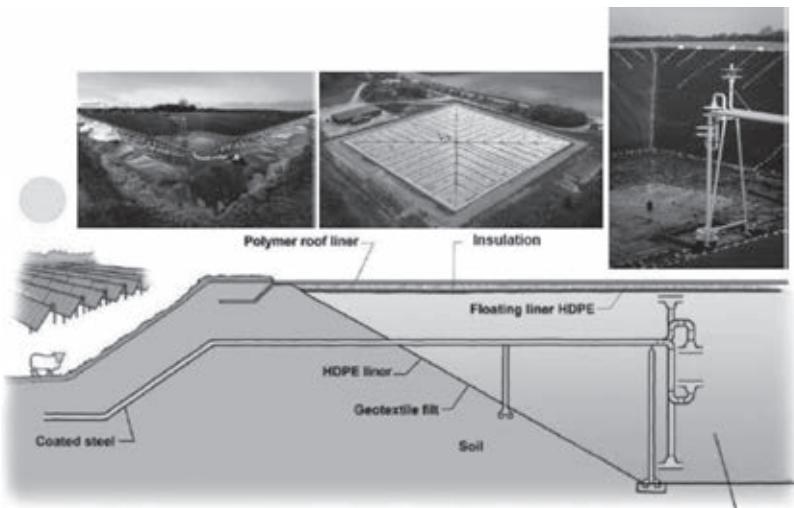


図10 Dronninglund の太陽熱地域熱供給におけるピット型季節間蓄熱槽(出典: ARCON-SUNMARK 社資料)

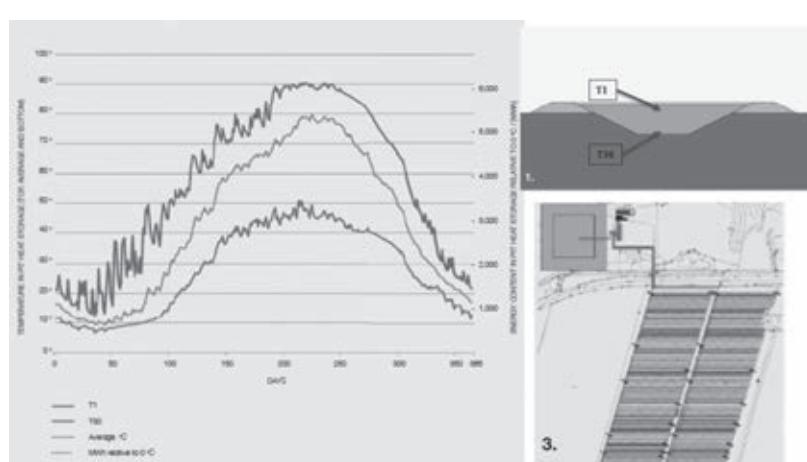


図11 Dronninglund 太陽熱地域熱供給の季節間蓄熱槽の温度変化(出典:文献11))

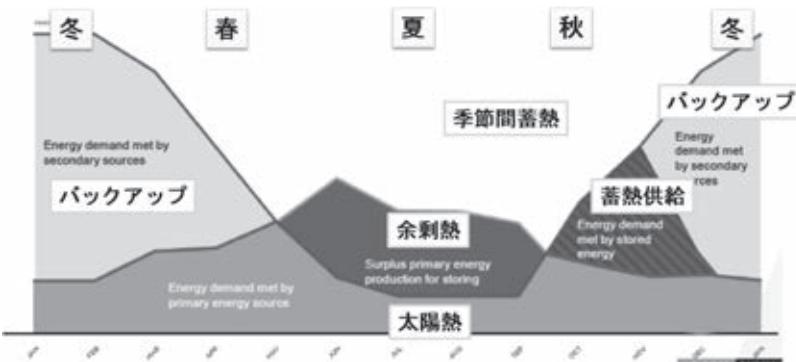


図 12 太陽熱利用と季節間蓄熱のコンセプト（出典：ARCON-SUNMARK 社資料に加筆）

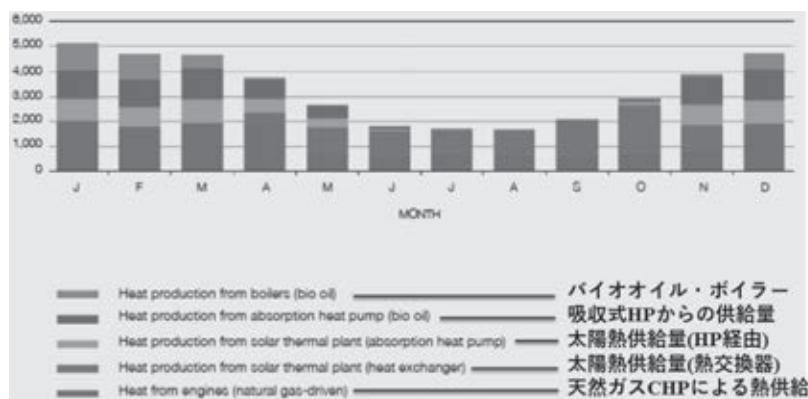


図 13 Dronninglund 太陽熱地域熱供給年間月別の熱供給量（出典：文献 11）

な蓄熱槽を導入することで季節間の蓄熱も可能となる。夏に蓄熱した太陽熱を秋まで使い、さらにヒートポンプを使うことで冬季にも利用が可能となる。図 13 には、Dronninglund 太陽熱地域熱供給での年間月別の熱供給量（設計値）を示す。太陽熱による熱の直接利用は 4 月から始まり 11 月まで続くが、吸収式ヒートポンプを介して年間を通じて利用することが可能になる。通常の太陽熱地域熱供給では年間を通じた太陽熱の利用割合は 40% 程度が最大となるが、季節間蓄熱槽やヒートポンプを活用することで 100% に近づけることが可能となる。ヒートポンプについては、風力や太陽光からの余剰電力を利用して、ヒートポンプや蓄熱などによる電気と熱のスマート化（セクターカップリング）を実現する検討が始まっている。

5. おわりに

本論文で紹介したデンマークなど欧州での先進的な地域熱供給の技術やノウハウを日本国内で展開する試みが始まっている。その多くはまだ FS（実施可能性調査）の段階であるが、今後、具体的に事業として実施されていくと期待されている。デンマークの地域熱供給の技術展開については、デンマーク

の環境技術の海外展開を進める産官連携組織 State of Green (SOG) やオールボー大学や関連企業の产学連携コンソーシアム FleksEnergi などがある。環境エネルギー政策研究所 (ISEP) でも非営利エネルギー設計会社 PlanEnergi と提携して秋田県大潟村など国内数か所で第 4 世代地域熱供給の技術をベースにした FS（実施可能性調査）を進めてきている⁽¹⁴⁾。

さらに、再生可能エネルギーの熱政策の実現や熱利用の普及のための調査・研究・意見交換・交流の場として、環境エネルギー政策研究所 (ISEP) では、欧州の中でも先行して第 4 世代地域熱供給に取り組んでいるデンマーク関係機関との協力のもとで、関連する研究者・行政・NGO などで構成される「第 4 世代地域熱供給フォーラム」（略称：4DH フォーラム）を 2018 年 10 月に立ち上げた⁽¹⁵⁾。パリ協定の実現に向けた EU 温熱ロードマップの基礎を担ったデンマーク・オールボー大学とその関連機関が提唱する「第 4 世代地域熱供給」について、直接的な交流、国内外での会議への参加や研究会・ワークショップなどを開催することで知見・経験の共有を図るとともに、国内での再生可能エネルギー熱利用普及のためのネットワーク形成や知見の共有を目指

している。

6. 謝辞

本論文の内容は、環境エネルギー政策研究所とデンマーク大使館がState of Greenなどの関係機関と協力して進めてきたデンマーク技術移転プログラムの成果の一部であり、関係者に感謝する。デンマークでの国際会議・視察調査等および第4世代地域熱供給フォーラムの運営においては独立行政法人環境再生保全機構地球環境基金の助成を受けている。

なお、本論文の一部は筆者の論文⁽¹⁶⁾より許可を受けて転載している。

7. 参考文献

- 1) 松原弘直、自然エネルギー100%を目指すデンマークで進む第4世代地域熱供給への展開、木材情報、2017年8月号、1-5 (2017)
- 2) Danish Energy Agency “The Danish Energy Model - Innovative, Efficient and Sustainable” (2015)
- 3) EU委員会“2030 Climate & Energy Framework”, https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en (2020年2月1日アクセス)
- 4) eurostat Statistics Explained “Renewable energy statistics” <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/> (2020年2月10日アクセス)
- 5) Danish Board of District Heating (DBDH) “District Heating history” <https://dbdh.dk/dhc-in-denmark/district-heating-history/> (2020年2月1日アクセス)
- 6) State of Green「地域熱供給白書」(2016) <https://stateofgreen.com/jp/publications/333/> (2020年2月1日アクセス)
- 7) PlanEnergi “Solar District Heating” <http://planenergi.eu/activities/district-heating/solar-district-heating/> (2020年2月10日アクセス)
- 8) SDH (Solar District Heating) <https://www.solar-district-heating.eu/en/about-sdh/> (2020年2月10日アクセス)
- 9) SDH “SDHp2m : solar district heating ... from policy to market” <https://www.solar-district-heating.eu/sdhp2m-2/> (2020年2月10日アクセス)
- 10) EUROHEAT&POWER “SUNSTORE4 : Project Final Report” <https://www.euroheat.org/our-projects/sunstore4-100-renewable-district-heating/> (2020年2月10日アクセス)
- 11) PlanEnergi and Niras “Dronninglund Solar thermal plant” (2015) <http://planenergi.eu/activities/district-heating/seasonal-heat-storage/> (2020年2月10日アクセス)
- 12) PlanEnergi “Long Term Storage and Solar District Heating” <http://planenergi.eu/activities/district-heating/seasonal-heat-storage/> (2020年2月10日アクセス)
- 13) PlanEnergi “Design and Construction of Large Scale Heat Storages for District Heating in Denmark” (2018)
- 14) Hironao Matsubara, et. al. “The 1st application of 4th Generation District Heating in Japan, its outcomes and lessons”, 3rd International Conference on Smart Energy Systems and 4th Generation District Heating, (2017)
- 15) 環境エネルギー政策研究所 (ISEP) 「特集：第4世代地域熱供給フォーラム（4DH フォーラム）」 <https://www.isep.or.jp/4dh-forum> (2020年2月10日アクセス)
- 16) 松原弘直、再生可能エネルギー100%に向けた第4世代地域熱供給の動向と国内への展望、廃棄物資源循環学会誌、30 (4), 253-263 (2019)

著者紹介



松原 弘直（まつばら ひろなお）

E-mail : matsubara_hironao@isep.or.jp
認定NPO法人 環境エネルギー政策研究所 理事、主席研究員、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、第4世代地域熱供給）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、地域主導型の地域エネルギーの事業化支援にも取り組む。