

# CRPジャパン エネルギー転換アクショングループ カナダとデンマークでのエネルギー転換の最前線



## デンマークのエネルギー転換： 自然エネルギー100%への展望

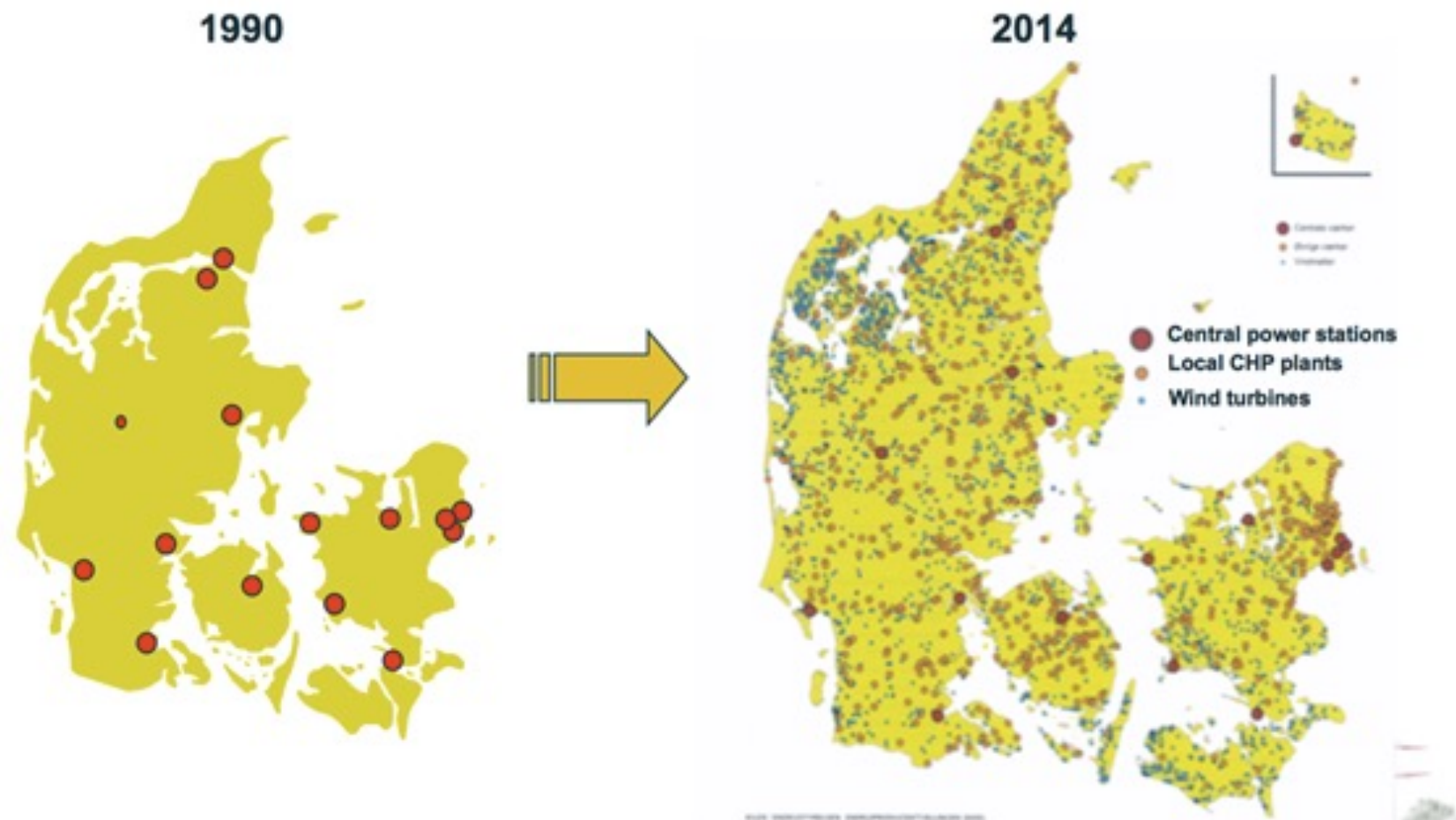
特定非営利活動法人 環境エネルギー政策研究所

松原弘直

2023年11月17日

# 自然エネルギー100%を目指すデンマーク

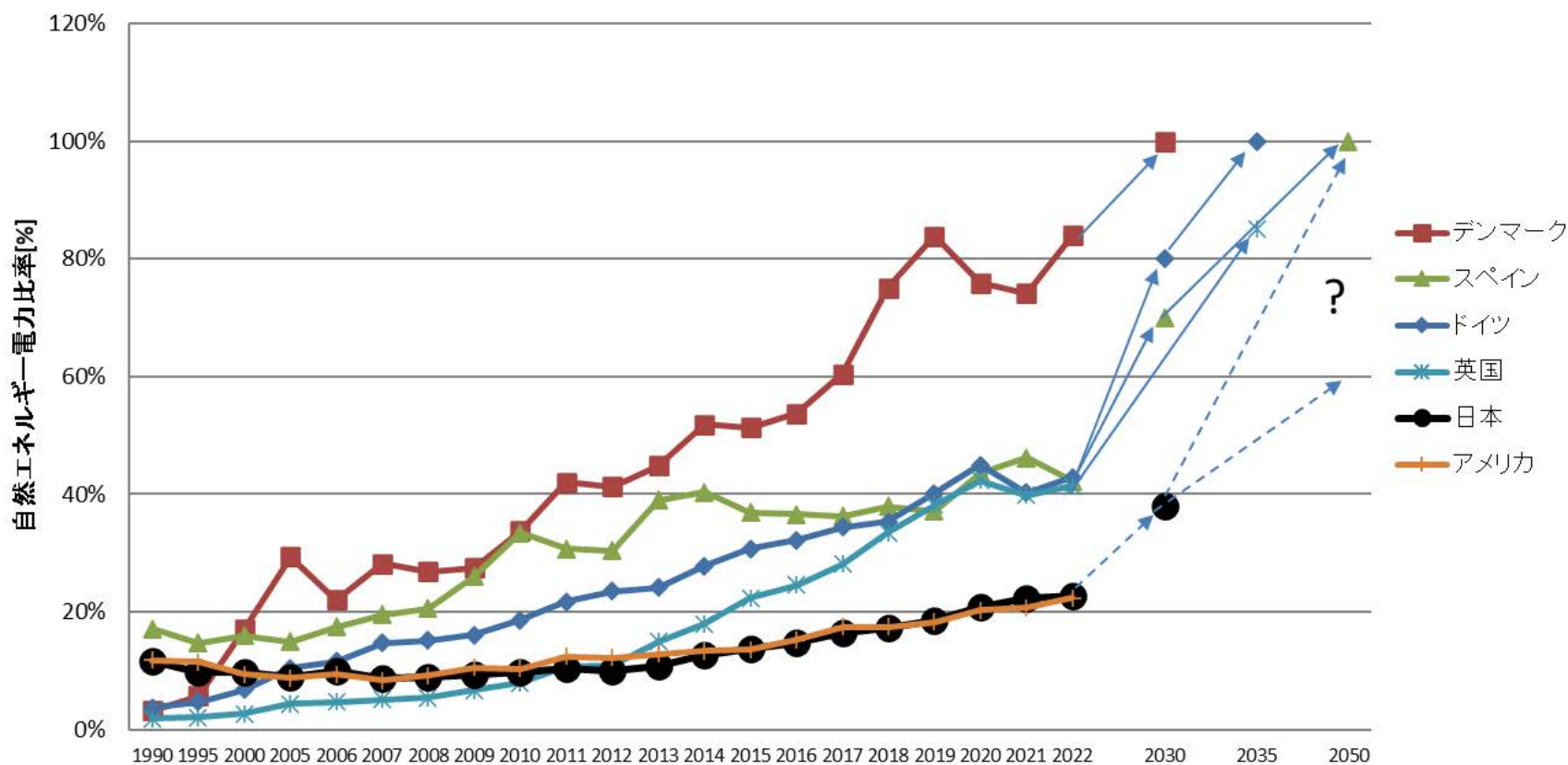
- 1990年代以降、環境を重視したエネルギー政策へ転換し、デカップリングに成功
- 2035年までには発電と熱利用は自然エネルギー100%に移行し、2050年までに化石燃料を使わない社会を目指す(Energy Strategy 2050, 2011年)。



出所: [Energinet.dk](http://Energinet.dk)

# 欧州各国と日本の自然エネルギー電力量比率の推移

- 欧州(EU28カ国)では自然エネルギー電力量比率の高い目標を定め、着実に増加しており、長期的には自然エネルギー100%を目指す国がある。
- 日本は2030年の自然エネルギー目標の見直しは？そして2050年の目標は？



# デンマーク: 100%自然エネルギーシナリオ(CEESA)

電力・熱・運輸の各セクターの統合(セクターカップリング)が必要

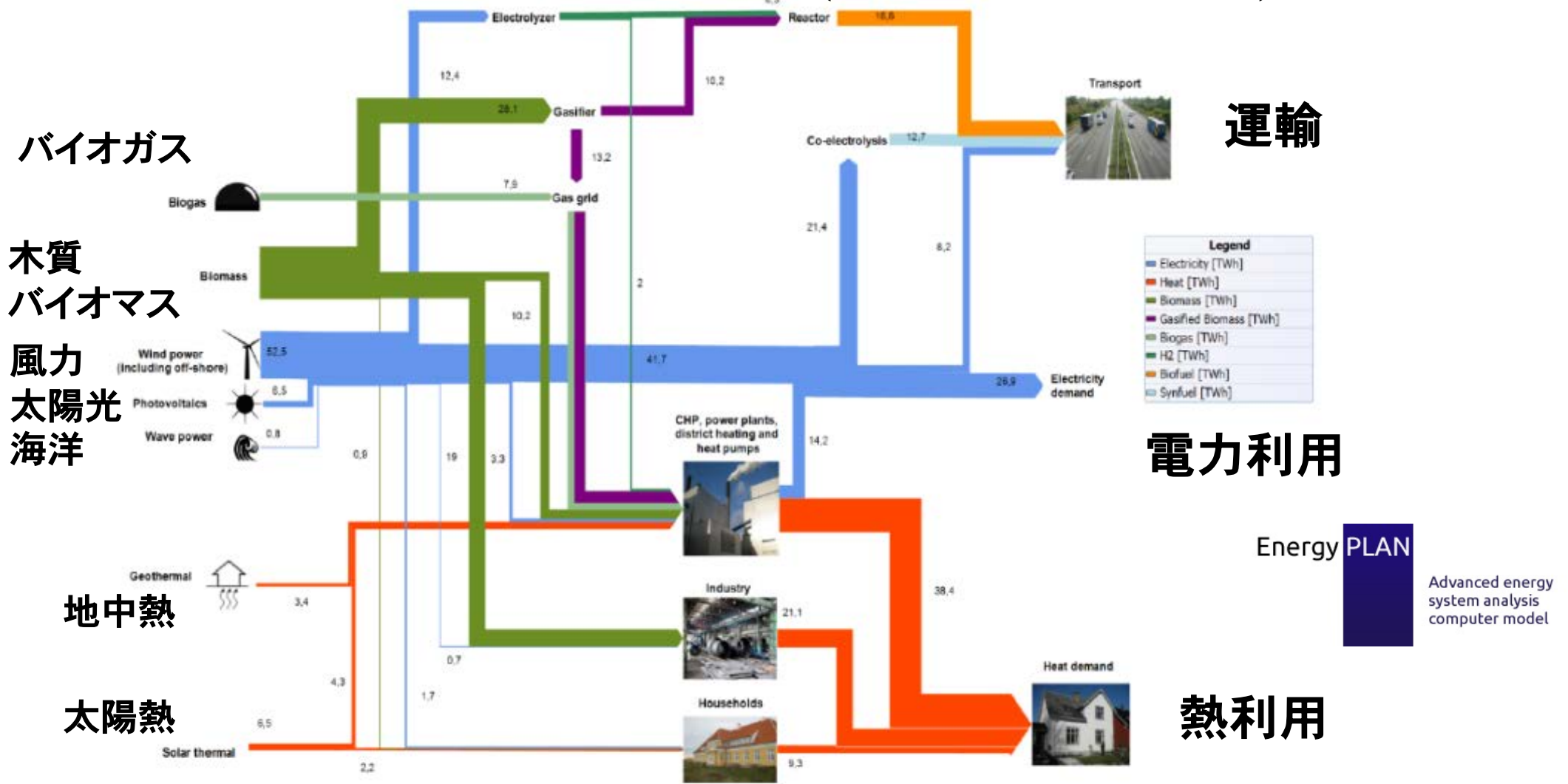
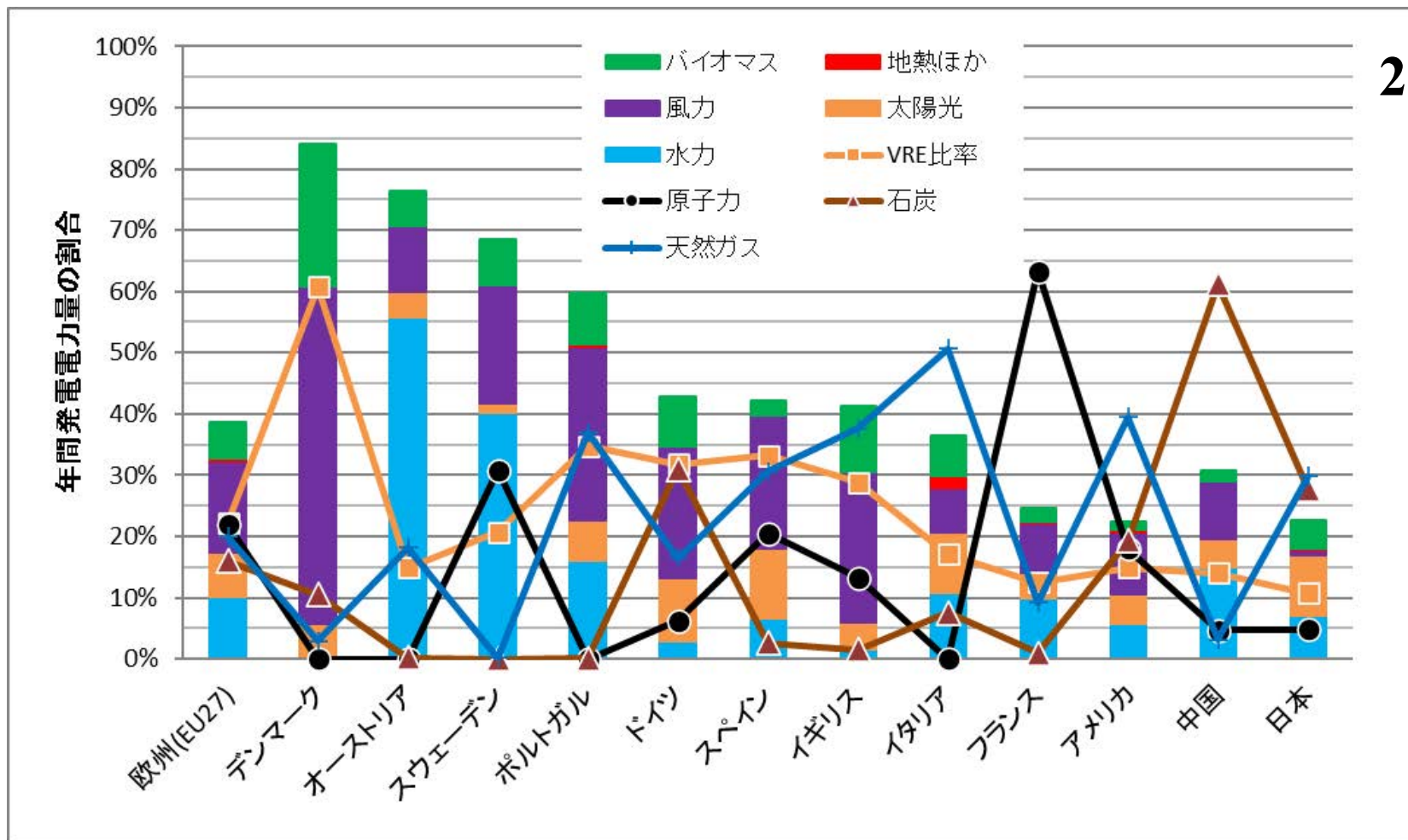


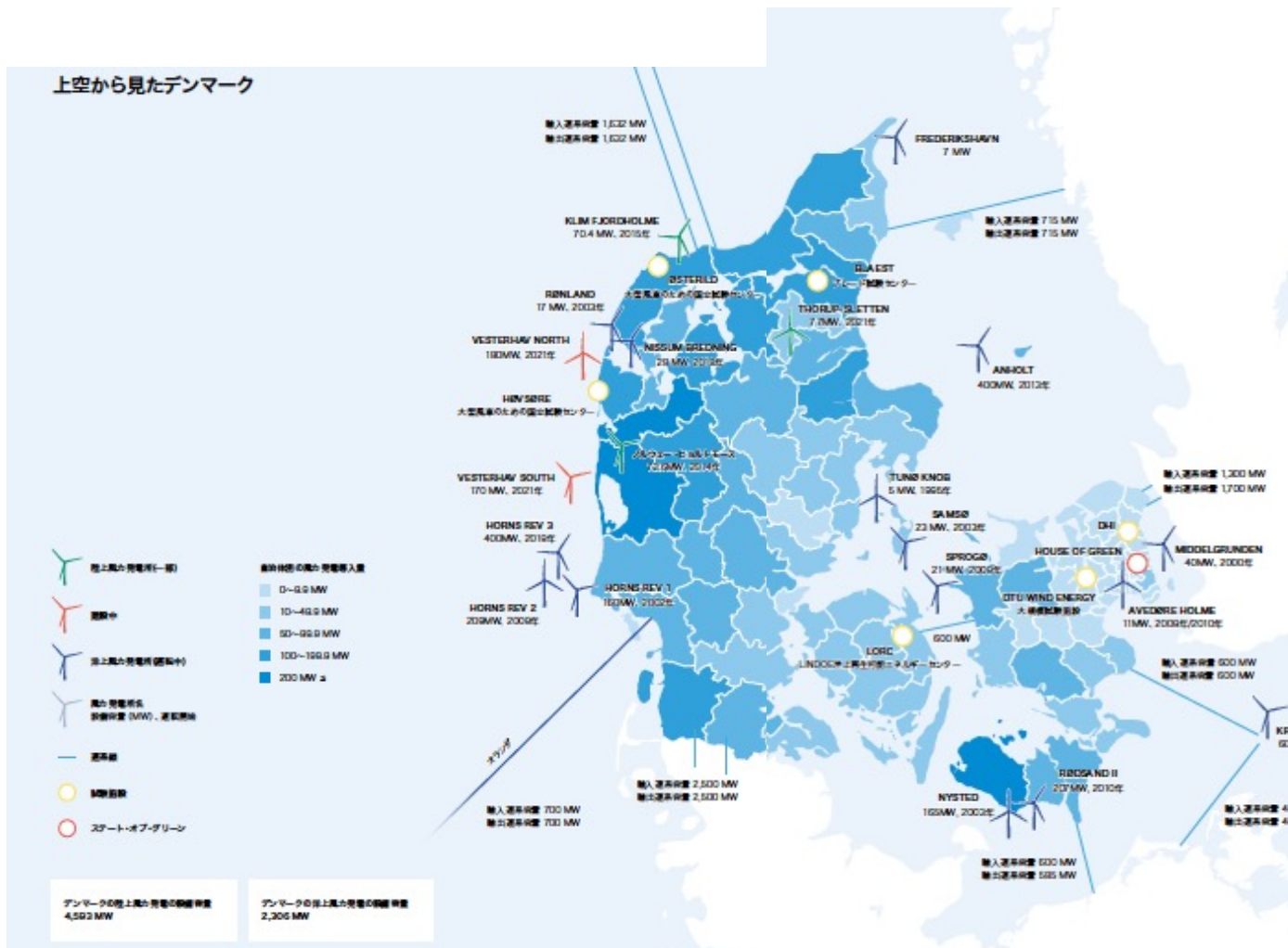
Figure 3.13, Sankey diagram of the CEESA 2050 100 % renewable energy scenario.

# 世界各国と日本の再生可能エネルギー一年間発電電力量の割合

- 欧州では再生可能エネルギー一年間発電電力量の割合が40%を超える国が多数ある。
- EU全体で再生可能エネルギーの割合は約39%(化石燃料40%と同程度)。
- 中国の再生可能エネルギー割合も約31%に達するが、日本はまだ23%程度



# 参考: デンマーク風力白書 世界市場を牽引する風力エネルギー(2022年11月)



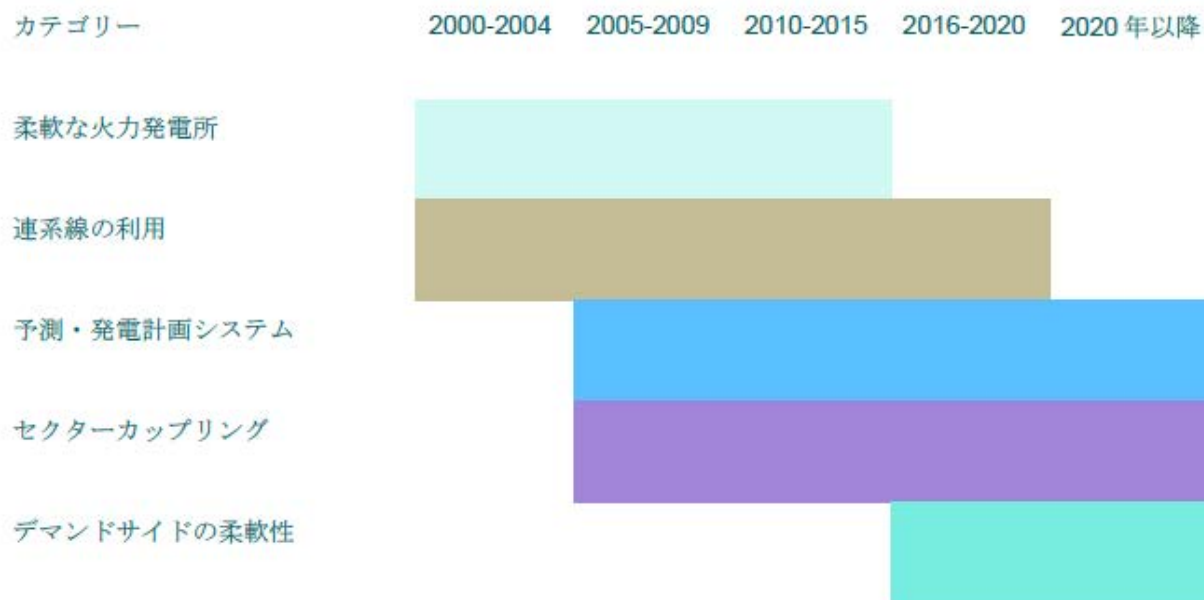
出所: State of Green「世界市場を牽引する風力エネルギー」

<https://stateofgreen.com/jp/publications/%e4%b8%96%e7%95%8c%e5%b8%82%e5%a0%b4%e3%82%92%e7%89%bd%e5%bc%95%e3%81%99%e3%82%8b-%e9%a2%a8%e5%8a%9b%e3%82%a8%e3%83%8d%e3%83%ab%e3%82%ae%e3%83%bc/>

# 「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」

## 参考：デンマークエネルギー庁(2021)レポート日本語版

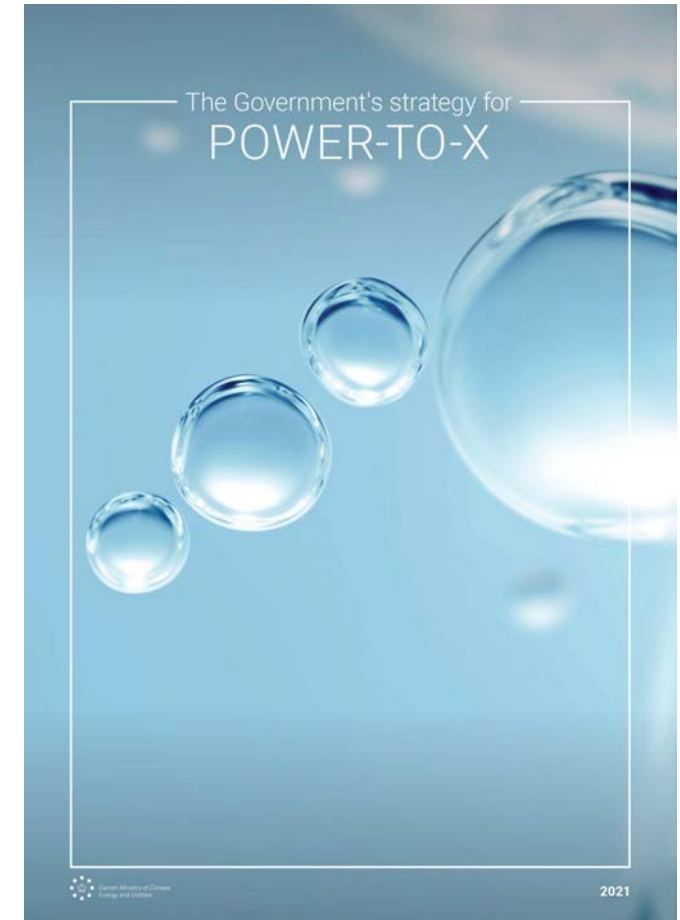
- 変動性再生可能エネルギー(VRE)で電力の50%をまかなう:デンマークの電力システムにおける柔軟性の役割
- 柔軟性の鍵としての電力市場
- 得られた知見:2000年から2020年までの柔軟性ソリューションを時系列で振り返る



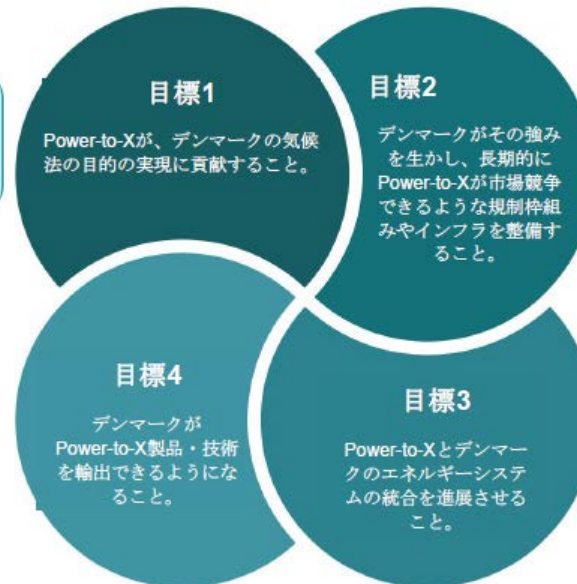
<https://www.isep.or.jp/archives/library/13612>



# 参考：デンマークのPower-to-X戦略



<p>RE</p> <p><b>Vestas</b></p> <p>be</p> <p>SIEMENS Gamesa</p>	<p>電解プラント</p> <p>GREEN HYDROGEN SYSTEMS</p> <p>HALDOR TOPSOE</p> <p>DynElectro</p> <p>SIEMENS energy</p>	<p>燃料電池 (水素/メタノールを電気に変換する)</p> <p>IRD</p> <p>Blue World</p> <p>ADVENT</p> <p>BALLARD</p>	<p>水素インフラ</p> <p>Everfuel</p> <p>evida</p> <p>ENERGINET</p> <p>STRANDBØLLEN</p>	<p>さらに変換 (X)</p> <p>RE-integrate</p> <p>Electrochaea</p> <p>HALDOR TOPSOE</p>
<p>工場オーナー/デベロッパー</p> <p>equinor</p> <p>Crossbridge</p> <p>ENERGY FREDERICIA</p> <p>Orsted</p>	<p>nature energy</p> <p>EUROWIND ENERGY A/S</p> <p>CIP</p> <p>VATTENFALL</p> <p>EUROPEAN ENERGY</p>	<p>エンドユーザー</p> <p>DRIVER</p> <p>MÆRSK</p> <p>CPH</p> <p>SAS</p> <p>DFDS</p> <p>DSV</p> <p>CIRCLE K</p>		
<p>利害関係者</p> <p>Brintbranchen</p> <p>CONCITO</p> <p>vind denmark</p> <p>Biogas Denmark</p> <p>DANSK ENERGI</p> <p>DANSK FJERNVARME</p> <p>Dansk Industri</p> <p>Dansk Fjernvarme</p> <p>Drivkraft Danmark</p>	<p>アドバイザー</p> <p>RAMBØLL</p> <p>COWI</p> <p>FORCE</p> <p>BCG</p> <p>NIRAS</p>	<p>大学、ナレッジセンター、産業</p> <p>DTU</p> <p>Technical University of Denmark</p> <p>SDU</p> <p>HYDROGEN VALLEY</p> <p>AALBØRG UNIVERSITET</p> <p>Greenlab skive</p>		



## デンマークにおけるPtXのバリューチェーン

<https://www.isep.or.jp/archives/library/14207>

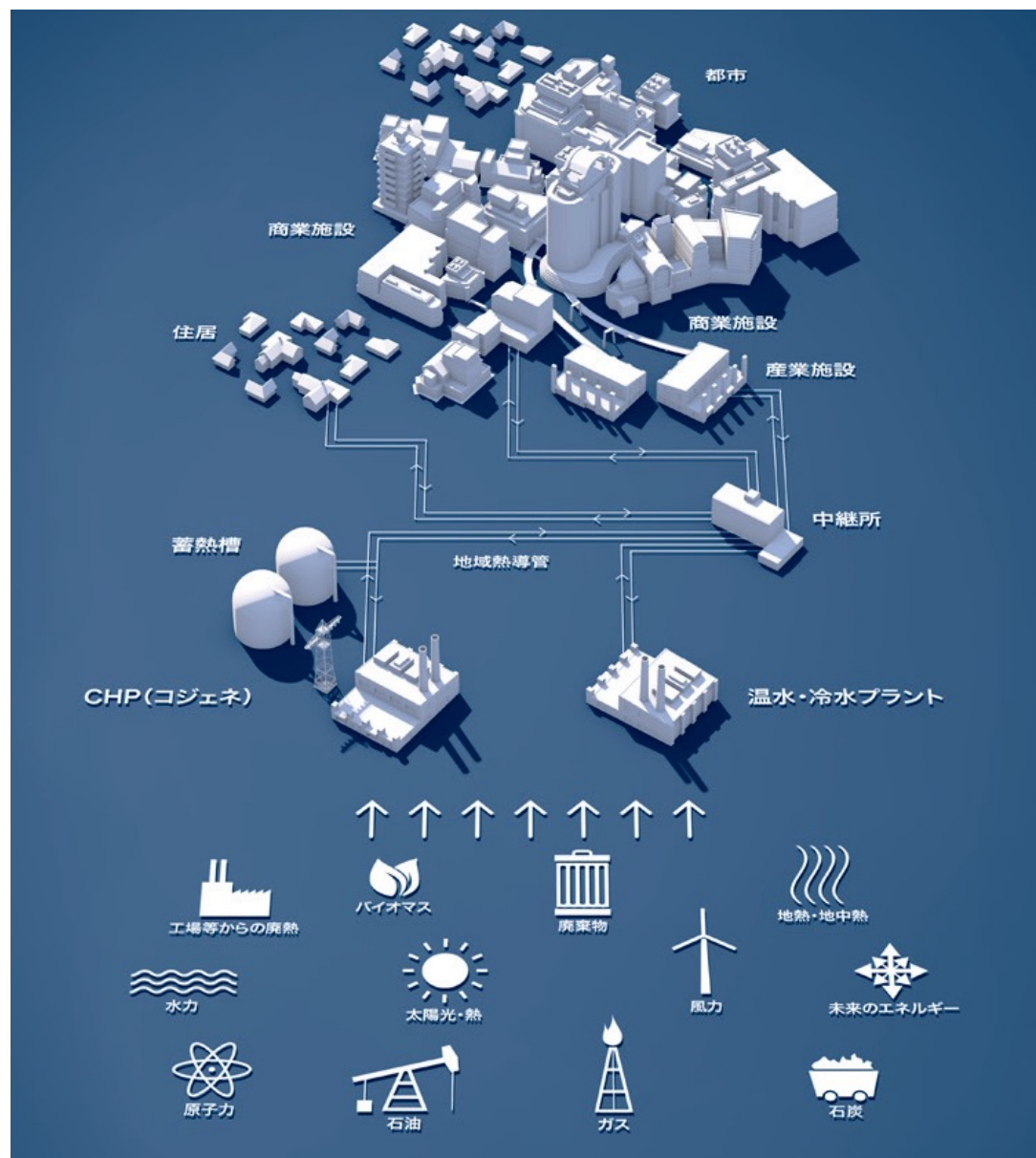


# 地域熱供給システムとは？

- 熱は、多くの供給源から生産または余剰熱として集められ、断熱された温水や冷水の熱導管を通して需要家に送られる。
- 蓄熱設備を利用することで、短期間またより長期間にわたって熱の生産と供給のタイミングを場合によっては数か月もずらすことが可能。
- 複数の熱の生産設備があれば、地域熱供給システムの経済性を継続的に最適化することができる。
- 需要家は、利用可能な最適の供給源からの熱を利用でき、1つの燃料の選択に縛られることはない。

出所：地域熱供給白書

<http://communitypower.jp/5740>



# 参考: 地域熱供給白書(日本語翻訳版)

デンマークをはじめ、世界中で100年以上にわたって地域エネルギーを利用してきた経験をもとに、「地域熱供給白書」では、制度・規制の枠組み、計画、エネルギー源の効率と柔軟性、貯蔵、将来の展望など、地域エネルギーの利用を拡大する際に考慮すべき主要な学習項目が、世界中の関連する事例を交えて紹介しています。



Danish Energy Industries Federation

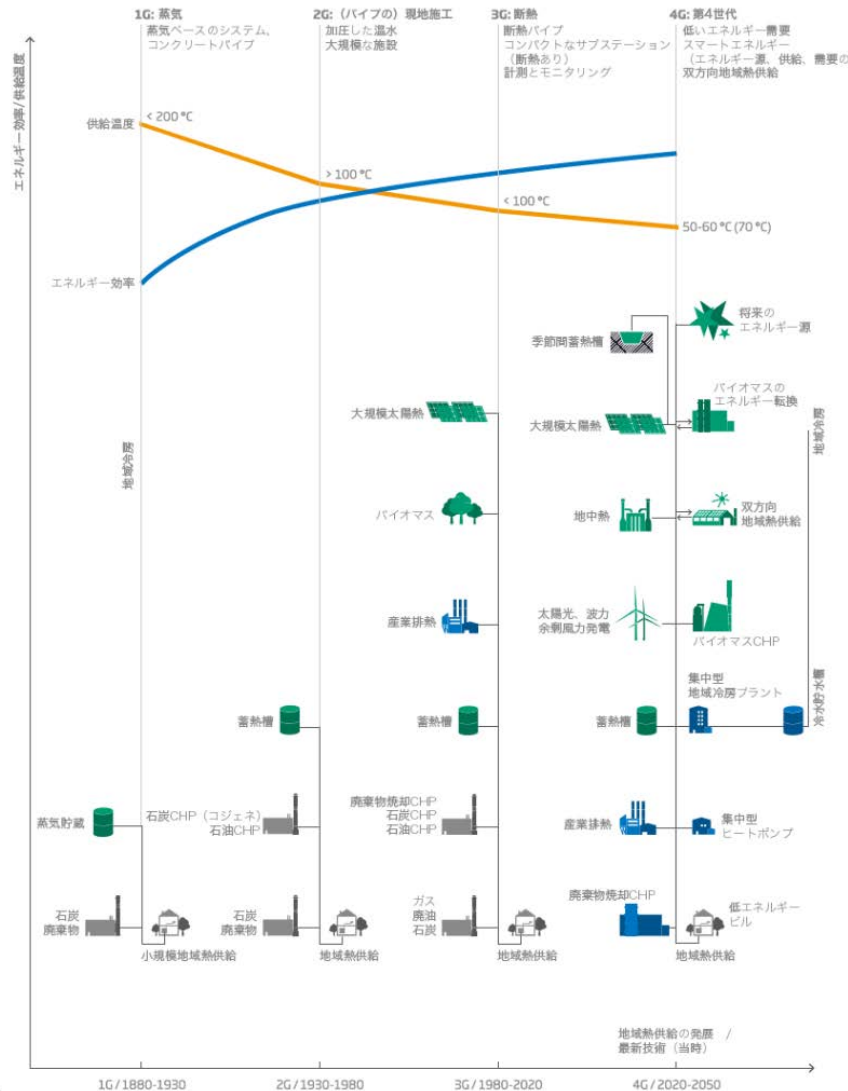


環境エネルギー政策研究所

<http://communitypower.jp/5740>

# 第4世代地域熱供給(4DH)とは

- 管理のしやすさコスト削減のため、熱供給システムの温度を下げている、低温熱源の利用や地中熱利用などが可能となっている(第4世代地域熱供給)。



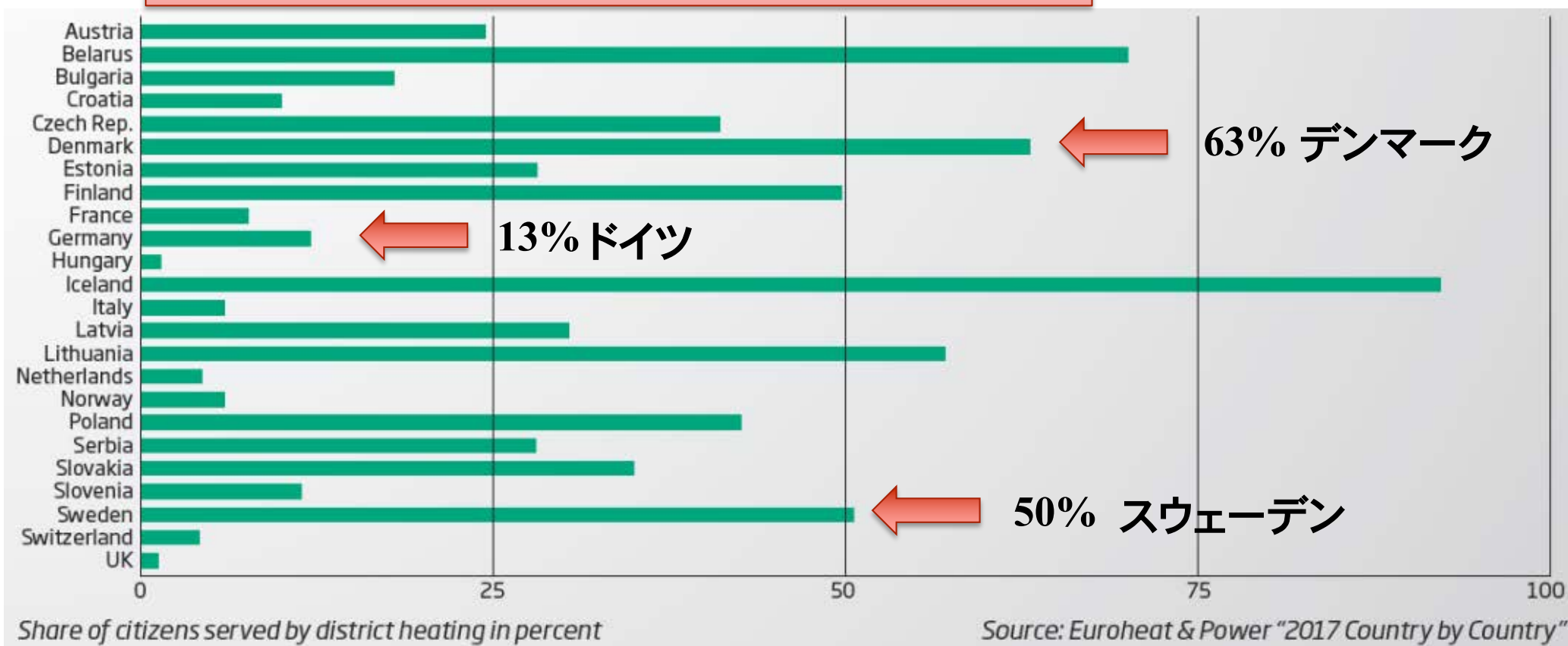
- 供給温度の低温下による高効率化
  - システム全体の高効率化
  - 往復温水間の大きな温度差
  - 潜熱回収による更なる高効率化
- 熱源の多様化
  - 低温下による利用資源の拡大
  - 工場排熱、廃棄物焼却熱活用
  - 大規模太陽熱の活用と季節間蓄熱
- 熱・電双方向の「スマート化」へ
  - 電力市場を介した熱電市場の連動
  - 温水タンクによる「蓄電」
  - ヒートポンプによる電熱転換 (風力の温熱化など)

出所: State of Green「デンマーク地域熱供給白書」  
 Henrik Lund, et. al “4<sup>th</sup> Generation District Heating(4GDH) Integrating smart thermal grids into future sustainable energy system” Energy 68(2014) 1-11

# 欧州(EU)の地域熱供給

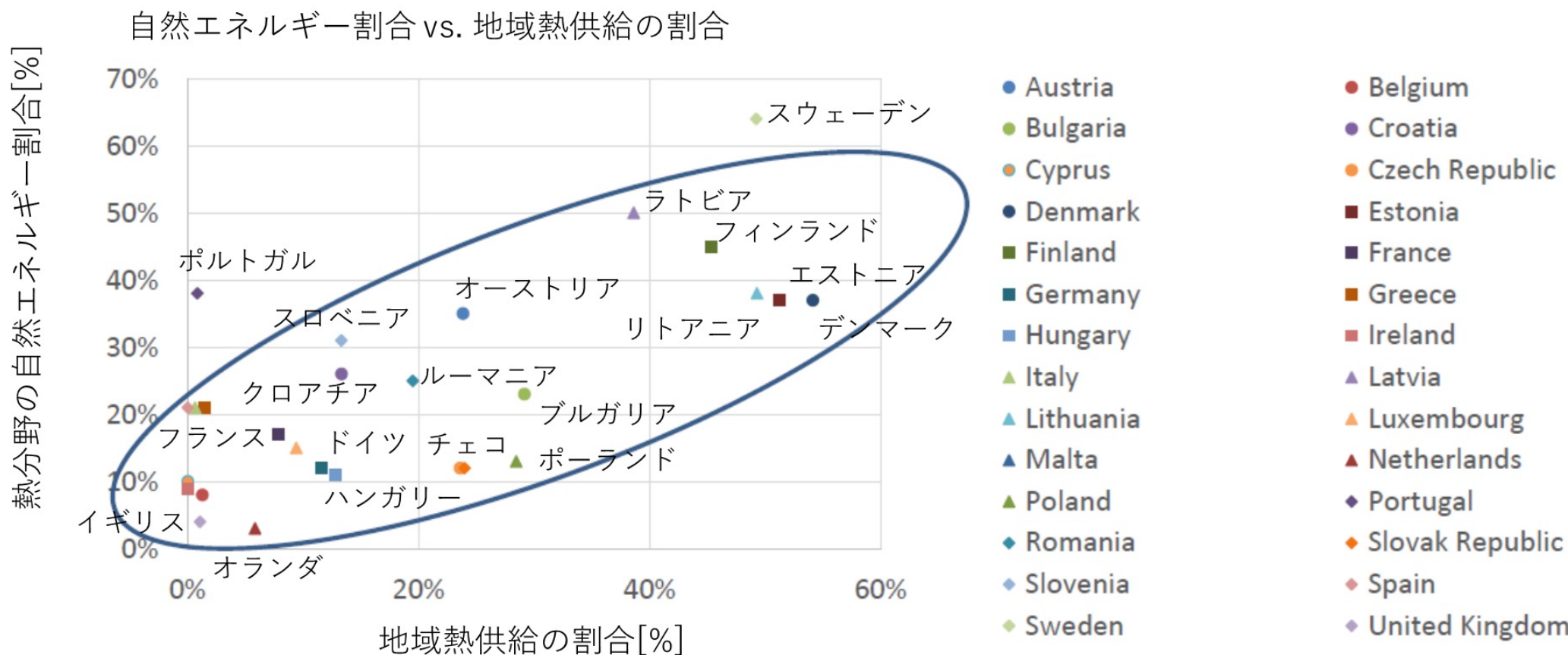
- 人口あたりで最も地域熱供給の普及率が高いアイスランド(90%以上)
- デンマークは60%以上で、ベラルーシ(70%以上)に次ぐ普及率

## 地域熱供給の普及率(人口あたり)2015年



# 地域熱供給の導入率と自然エネルギー熱の割合

## 地域熱供給の導入率が高い国ほど自然エネルギー熱の割合が高い



出所:Heat Roadmap Europe2050

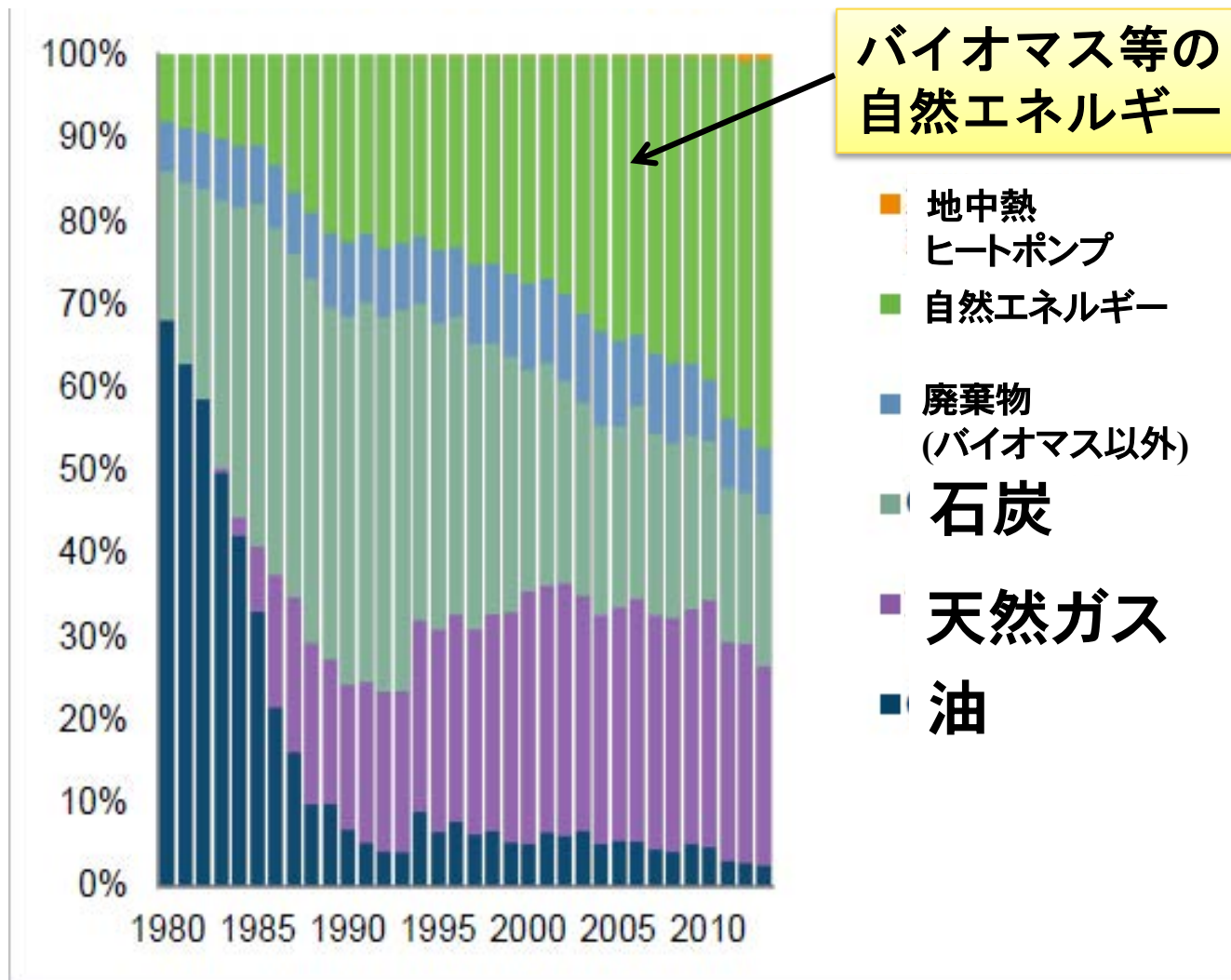
<https://heatroadmap.eu/>

# デンマークと日本の地域熱供給の比較

- デンマークの人口あたりの地域熱供給の使用量は日本の100倍
- 日本の地域熱供給の線熱密度はデンマークの約10倍

指標	デンマーク	日本	デンマーク/日本
人口(2016年)	5,710,000	127,000,000	0.04
面積	43,094 km <sup>2</sup>	377,972 km <sup>2</sup>	0.11
販売熱量(2013年)	105,563 TJ/a	22,902 TJ/a	4.6
年間売上額(2013年)	2,945 M EUR	1,103 M EUR	2.7
熱導管総延長2013年 (2009年)	29,000 (28,000) km	672 (736) km	43 (38)
DH総数	394	139	2.8
線熱密度	3.6 GJ/年 m	34.1 GJ/a年 m	0.11
人口当たり導入量	18.5 GJ/Capita	0.18 GJ/Capita	103
熱平均価格	0.028 EUR/MJ	0.048 EUR/MJ	0.58

# デンマークの地域熱供給の歴史



- オイルショック後の1979年に熱供給法が制定され、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(熱導管の総延長3万km)。
- デンマークの火力発電はCHP(熱電併給)のみであり、燃料としては、石炭が減少し、バイオマスの利用は増加しており、天然ガスは横ばい。
- 地域熱供給のうち、CHPが73%。残りは、電気だけのプラントか、太陽熱プラントであり、太陽熱プラントは増えている。

# デンマークの地域熱供給の事例

**Dronninglund村**

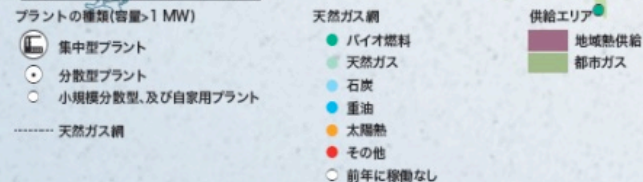
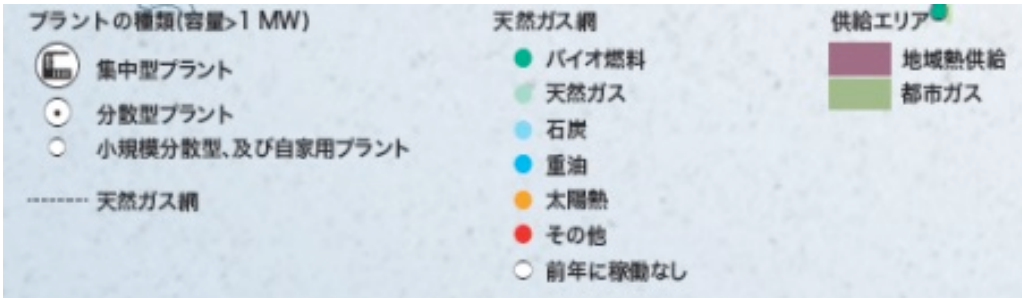
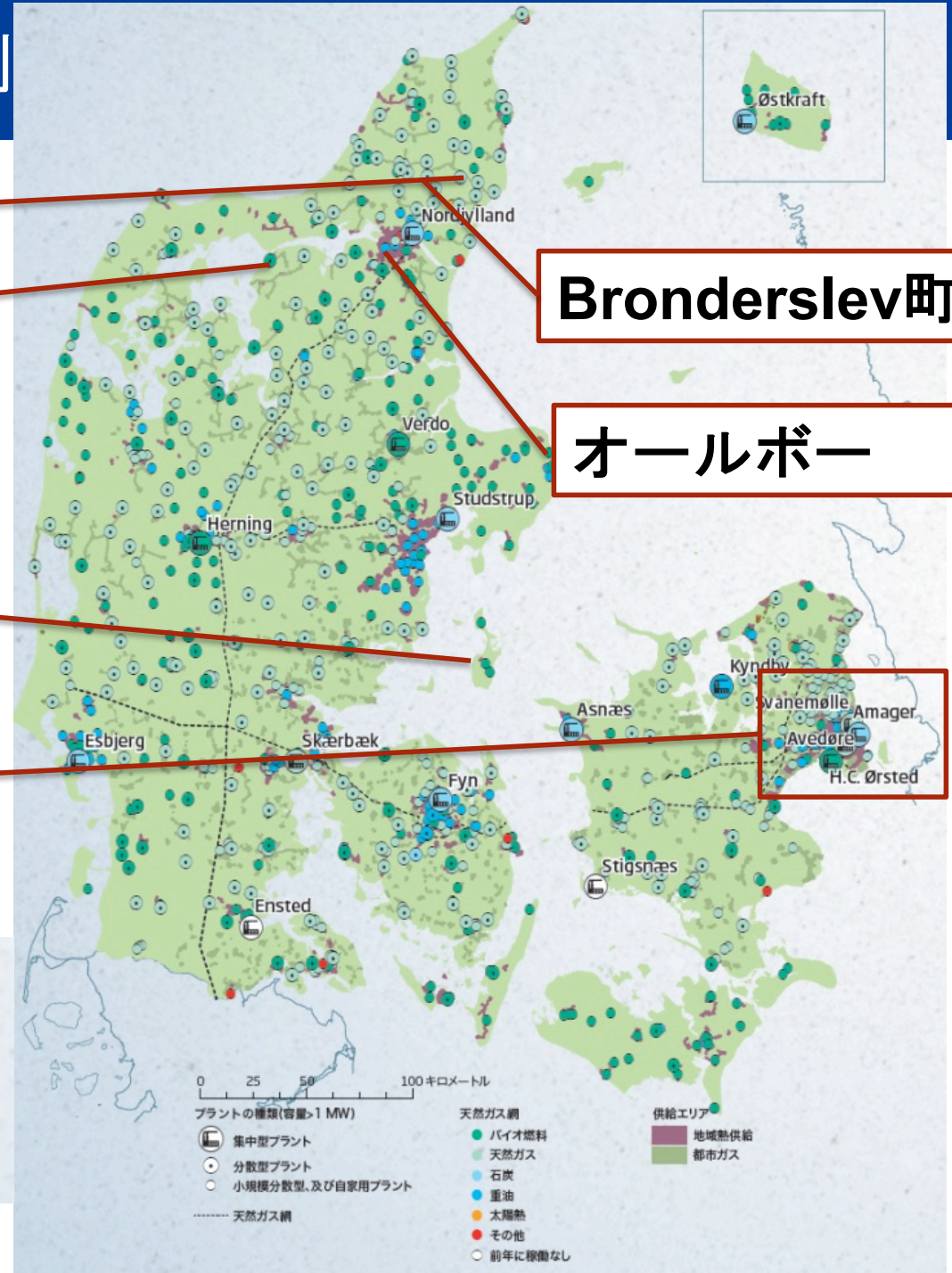
**Løgstør町**

**Nordby/Mårup  
(サムソ島)**

**コペンハーゲン  
周辺地域**

**Brønderslev町**

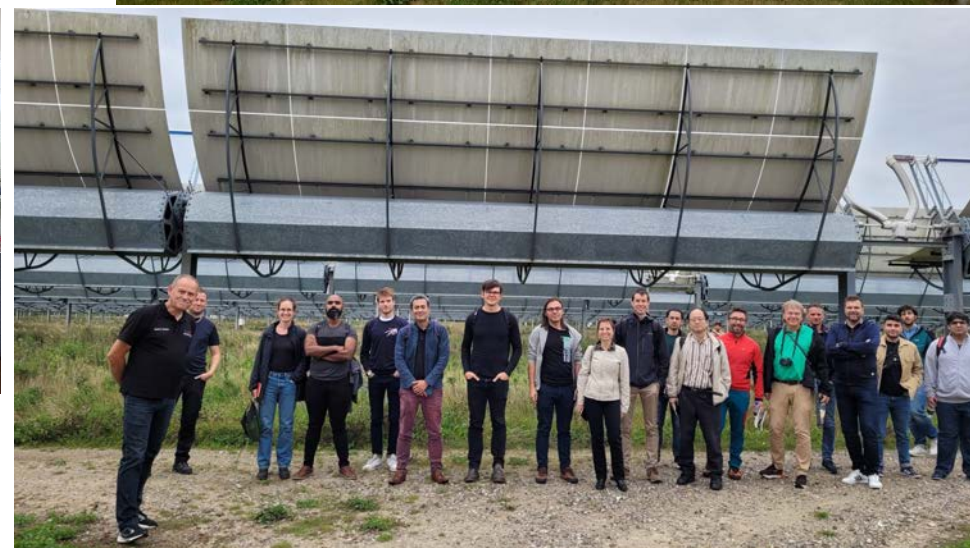
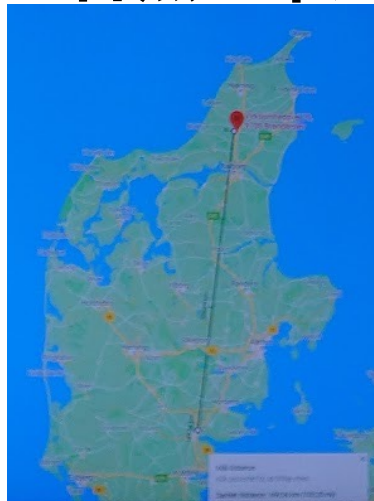
**オールボー**



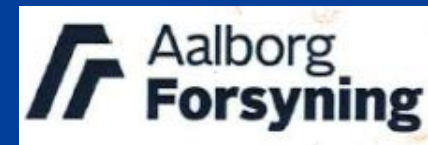


# デンマークの地域熱供給: Broenderslev 地域熱供給(太陽熱+バイオマス)

## 太陽熱+バイオマスCHPによる自然エネルギー100%地域熱供給



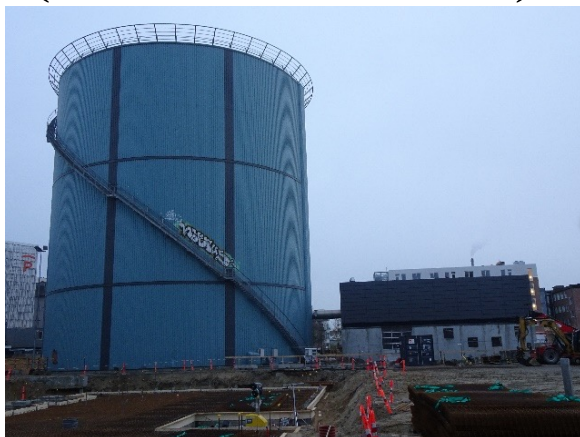
# デンマークの地域熱供給: オールボアの地域熱供給システム



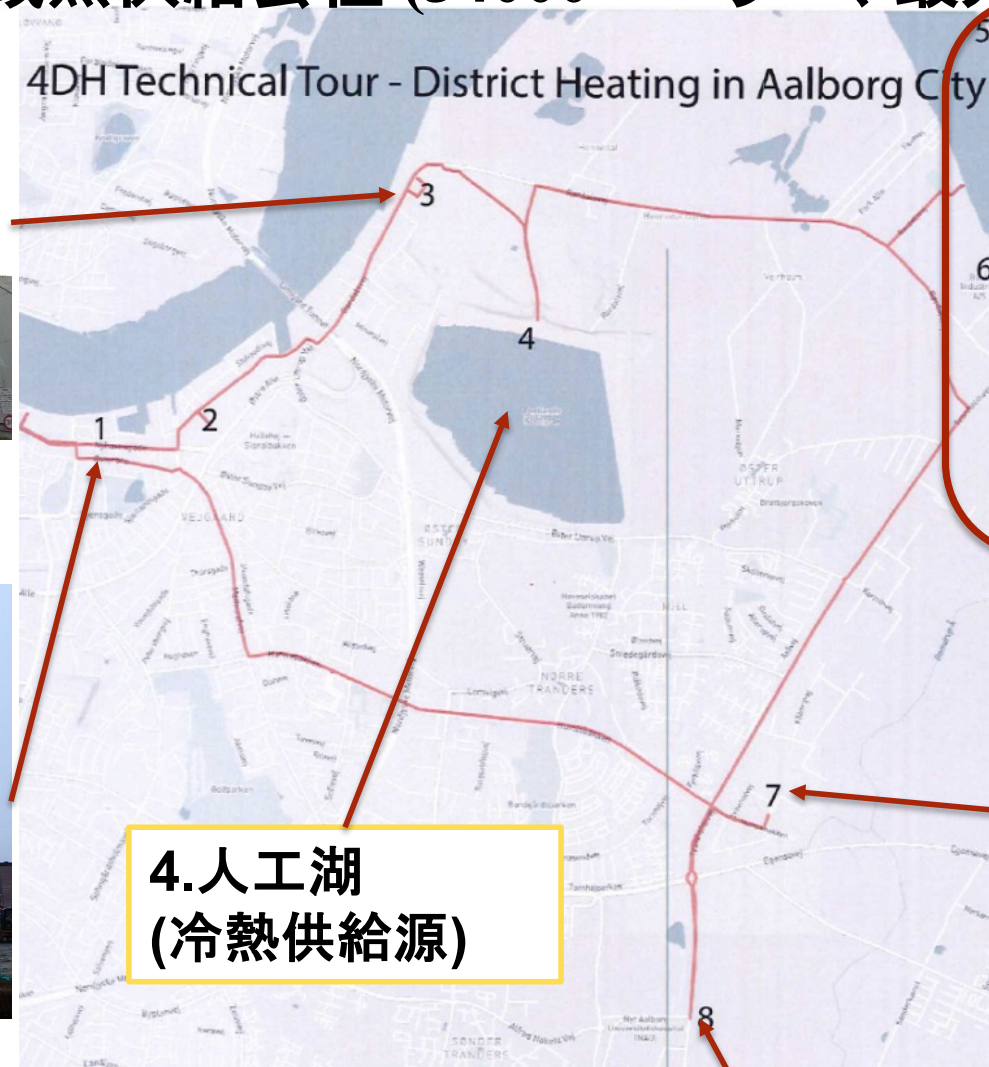
オールボア地域熱供給会社 (34000ユーザー、最大需要800MW)



3.セメント工場の排熱  
(DHの約20%を供給)



1. 蓄熱槽(1.2万m3)と  
ポンプ室



4.人工湖  
(冷熱供給源)

8.大学病院  
(新規需要先)



5.石炭火力CHP(500MW)  
DHの約50%を供給



7.廃棄物CHP(60MW)  
DHの約25%を供給

# デンマークの地域熱供給: オールボー地域熱供給の脱炭素化ロードマップ

- 2028年までの石炭CHPの廃止
- 2050年までの脱化石燃料(脱炭素化)

120 MW sea water heat pump (put out to tender)  
海水熱源  
ヒートポンプ(120MW)

Increase in surplus heat from Aalborg Portland, PtX and others  
排熱利用(セメント工場, PtX施設など)

Purchase of windmills and solar heating  
再エネ余剰電気

Solar power

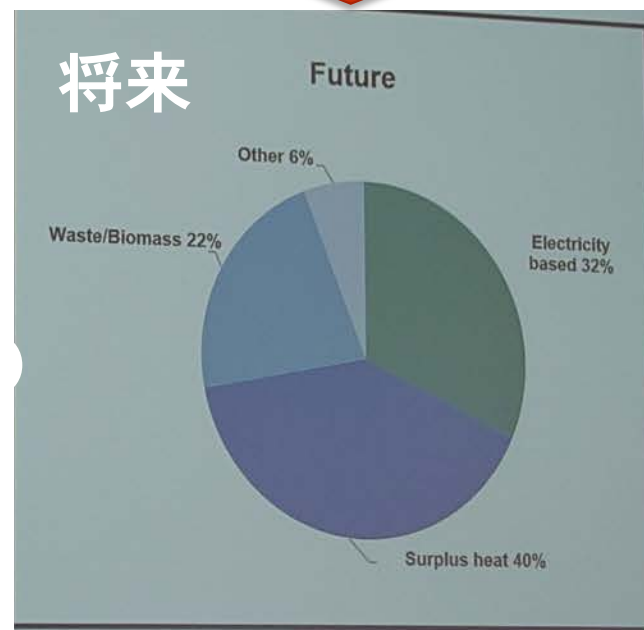
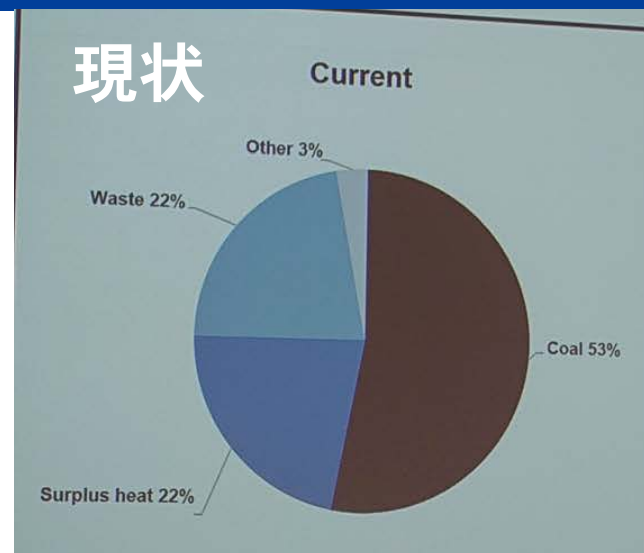
Waste

200,000 m3 storage tank (put out to tender)  
蓄熱槽(20万立米)

Biomass

Biogas

150 MW boiler (put out to tender)  
電気ボイラー(150MW)



# デンマークの地域熱供給: 太陽熱地域熱供給(4DH)

The world's **largest** solar thermal plant  
**Silkeborg, Denmark** – 156.700 m<sup>2</sup>



**Silkeborg, DK:**  
Solar system: 110 MW, 156.700 m<sup>2</sup> aperture area  
Temperatures: 80 - 110°C  
Max flow: 2.700 m<sup>3</sup>/h  
Yearly yield: 80.000 MWh → 20% solar coverage of town demand!  
CHP as balancing and reserve power only

ARCON SUNMARK

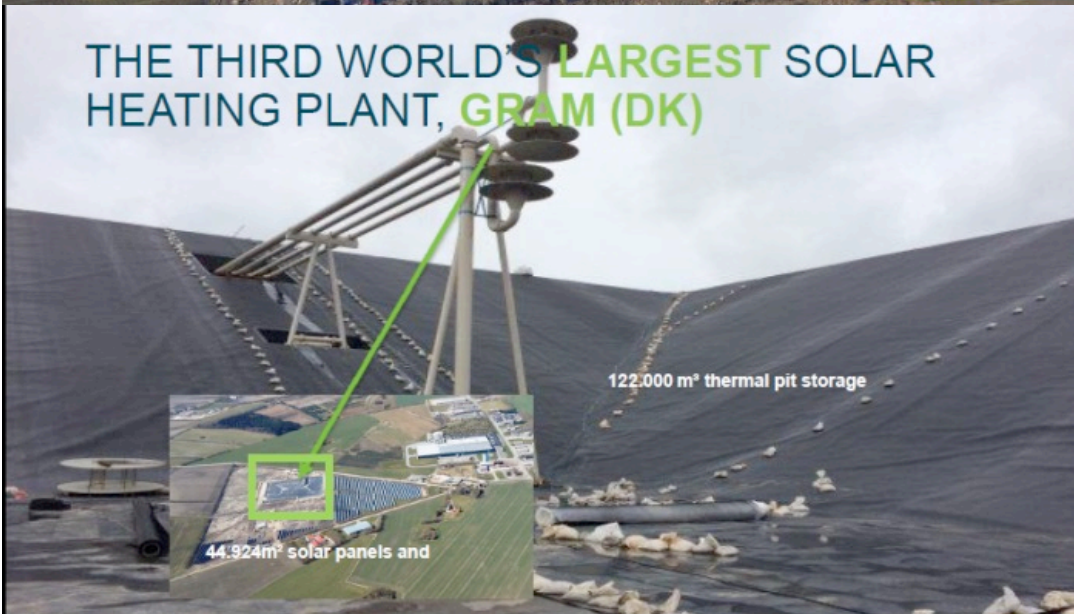
THE SECOND WORLD'S **LARGEST**  
SOLAR HEATING PLANT, **VOJENS (DK)**



**Vojens, DK:**  
Solar system: 49 MW, 70.000 m<sup>2</sup> aperture area  
Pit storage: 200.000 m<sup>3</sup> water with 70cm floating insulation at the top.  
Storage temp. at end of summer: 90°C  
Yearly yield: 28.000 MWh → 45% solar coverage of town demand!  
Heat cost: 42 €/MWh (2% interest rate, 25a, no subsidy)  
CO<sub>2</sub>-saving: 6.000 ton/year  
CHP as balancing and reserve power only

ARCON SUNMARK

THE THIRD WORLD'S **LARGEST** SOLAR  
HEATING PLANT, **GRAM (DK)**



122.000 m<sup>3</sup> thermal pit storage

44.924m<sup>2</sup> solar panels and

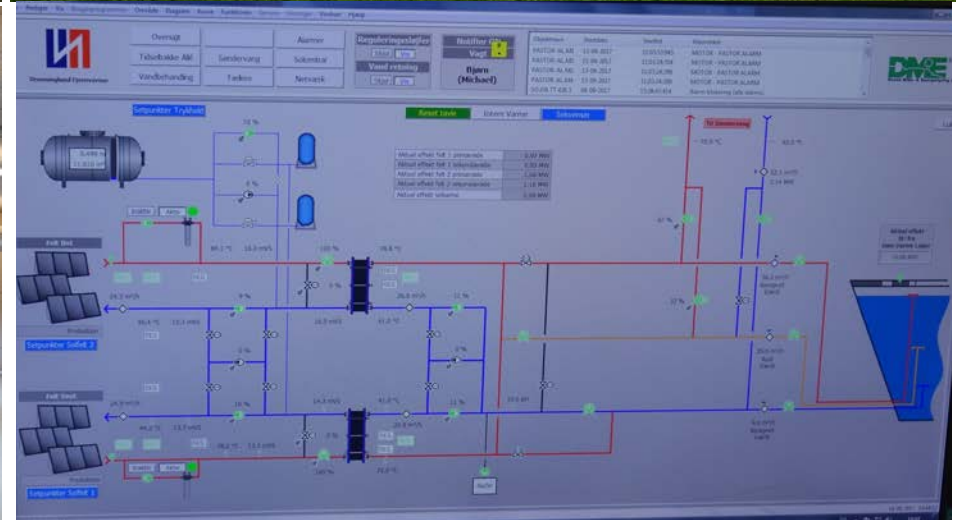
THE FOURTH WORLD'S **LARGEST** SOLAR  
HEATING PLANT, **DRONNINGLUND (DK)**



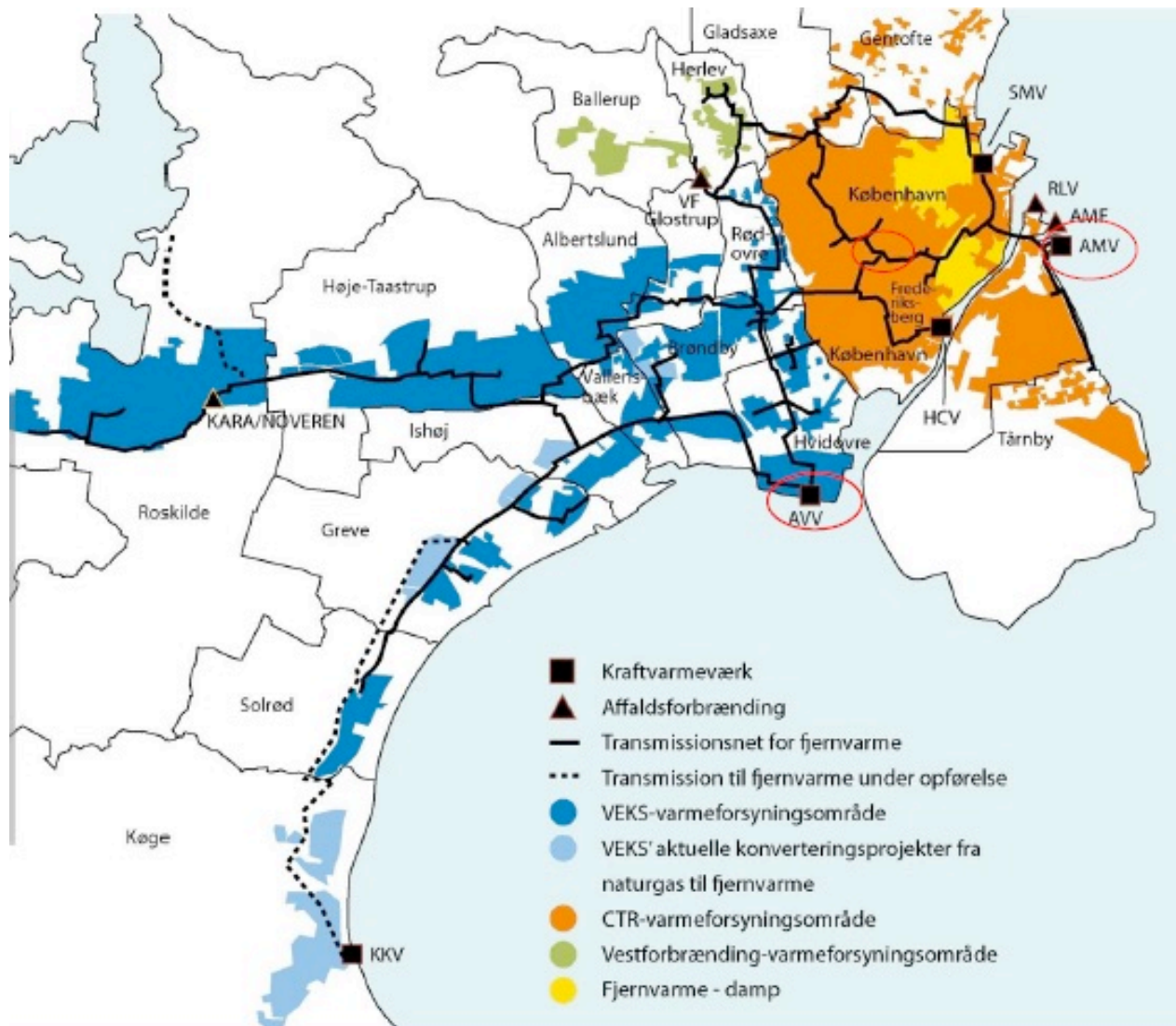
37.573 m<sup>2</sup> solar panels  
62.000 m<sup>3</sup> thermal pit storage

ARCON SUNMARK

# デンマークの地域熱供給： Dronninglund村(デンマーク北部)太陽熱地域熱供給



# デンマークの地域熱供給： コペンハーゲン周辺地域



- 17自治体
- 25地域熱供給会社
- 送熱会社：CTR
- ユーザー数：50万人
- 年間熱量：  
34PJ(9.6TWh)
- デンマーク全体の熱  
需要の約20%
- コペンハーゲンの熱  
需要の98%をカバー

# コペンハーゲンの地域熱供給の供給源+洋上風力発電



- Copenhill(Amager Bakke): 廃棄物処理  
CHP(熱電併給)+スキー場
- HOFORバイオマスCHP
- 洋上風車(Middelgrunden wind farm)

# コペンハーゲン市内の海水浴場と洋上風力





# コペンハーゲン市内のグリーン燃料ステーション



# 第9回スマートエネルギー・第4世代地域熱供給国際会議 2023年9月12日～13日(ハイブリッド開催)全体概要



- スマートエネルギーシステム
- 第4世代地域熱供給
- 蓄エネルギー
- 再生可能エネルギー
- エネルギー効率化
- 電化

参加者 : 330名(リアル)+20名(オンライン)  
参加国 : 25カ国  
発表数 : 200

<https://smartenergysystems.eu/2023-2/>



# 4DHからスマートエネルギーシステムへ

- 4DHからセクターカップリングそしてスマートエネルギーシステムへ  
電力供給と熱供給さらに輸送エネルギーも供給

## Smart Energy Systems

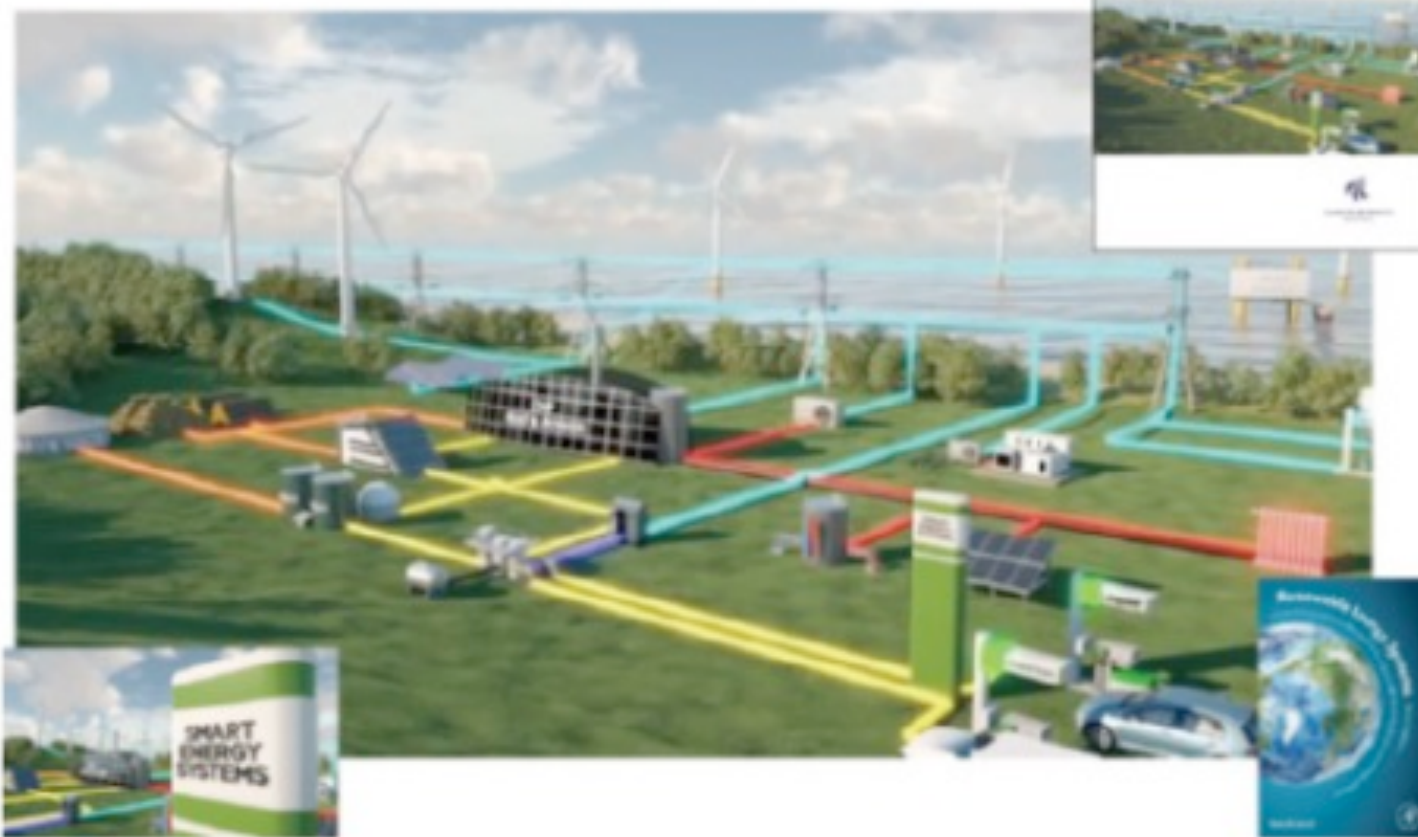


図38: スマートエネルギーシステムのイメージ(出所: IDA's Energy Vision 2050, オールボー大学(2015))

# 第4世代地域熱供給フォーラム(4DHフォーラム)の取組み

- 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、ISEPでは、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。
- パリ協定に基づく欧州の熱戦略やロードマップに基づく第4世代地域熱供給の知見・経験の共有を図るとともに、国内外での会議への参加や研究会・シンポジウムを開催し、国内での自然エネルギー熱利用普及のためのネットワーク形成を目指す。

4DHフォーラム <https://www.isep.or.jp/4dh-forum/>



# 参考：第4世代地域熱供給4DHガイドブック

## 目次：

### はじめに

1. 第4世代地域熱供給(4DH)とは
2. 第4世代地域熱供給の背景
3. 第4世代地域熱供給の設計コンセプト
4. エネルギー需給の脱炭素化とスマート化
5. 日本での第4世代地域熱供給の展開に向けて
6. 自然エネルギー100%への展開
7. 参考資料

ダウンロード：

<https://www.isep.or.jp/4dh-forum/4dh-guidebook>



# ご清聴をありがとうございました！



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

松原弘直(まつばら ひろなお) 工学博士

- 環境エネルギー政策研究所: <https://www.isep.or.jp/>
- Energy Democracy: <https://www.energy-democracy.jp/>
- 自然エネルギー100%プラットフォーム: <https://go100re.jp/>
- 新エネルギー新聞コラム: <http://www.newenergy-news.com/category/02/>
- やちよ自然エネルギー市民協議会: <http://yachiyorecc.net/>
- 自然エネルギーを広めるネットワークちば: <https://www.renet-chiba.net/>
- Facebook: <https://www.facebook.com/hironao.matsubara/>
- Twitter: [http://twitter.com/matsubara\\_hiro](http://twitter.com/matsubara_hiro)