環境先進国デンマークのエネルギーシステム

～地域エネルギー資源の効率的な活用と分散型エネルギーインフラ～

株式会社H&Sエナジー・コンサルタンツ パートナー
石丸　美奈

目　次

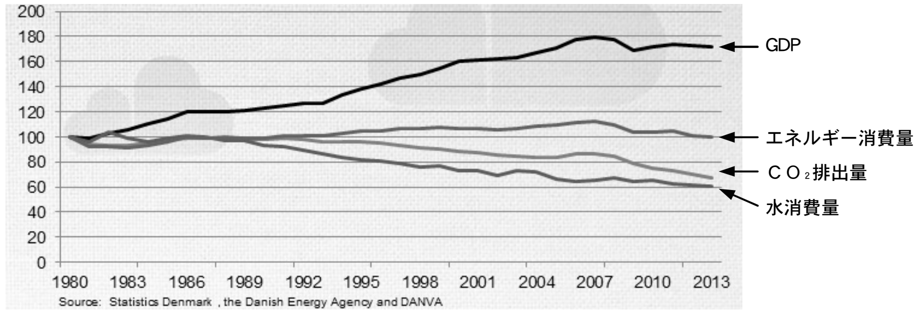
１．はじめに
２．エネルギー資源の多様化と再エネの活用
３．分散型エネルギーインフラ
４．先進的なハードとソフト

１．はじめに

ほぼ九州に匹敵するおよそ４万3,000㎢の国土に、北海道と同程度の約559万の人口を有する北欧の島国デンマークは、自国の原油・天然ガス開発[1]と、持てる再生可能な資源を徹底的かつ出来る限り効率的に活用することで、エネルギー自給率100％超のエネルギー安全保障を達成してきた[2]。また、同国のGDPは1980年から2013年までにおよそ80％の伸びを見せたが、これに伴うエネルギー消費量にはほとんど変化がなく、しかもCO_2排出量は30％以上減少している（**図表１**）。効率的なエネルギー利用により経済成長とエネルギー成長とのデカップリング（切り離し）が、そして積極的な再生可能エネルギー（再エネ）の活用で、エネルギー成長と環境負荷（温室効果ガス（GHG）排出量の増加）とのデカップリングが、それぞれ持続可能な形で実現している。

しかし、第一次石油危機（1973年）当時、デンマークはエネルギー供給の９割以上を輸入原油に依存していたため、石油価格が４倍にも跳ね上がり、経済活動や市民生活は大きな打撃を受けた。この苦い経験を教訓に、同国では国産エネルギーの開発とエネルギー源

（図表１）経済成長とエネルギー消費量／CO_2排出量のデカップリング



（1980年を100とする）
（出所）“Introduction to Denmark’s green transition”, State of Green

1　北海油田の原油は1972年、天然ガスは1984年から生産が開始されている。
2　1997年以降、100％を超えていたデンマークのエネルギー自給率だが、2004年の165％をピークに減少し、2013年には93％と再びエネルギー輸入国に逆戻りした。

の多様化、効率的なエネルギー利用、そして省エネによるエネルギー需要の削減のための様々な取り組みが始まった。

当初は原子力も化石燃料[3]を代替するエネルギー源としての利用が想定されていた。しかし、放射性廃棄物の処分問題などで国民的な反対運動が起こり、およそ10年間にわたる国を挙げての討論の末に1985年、デンマーク議会は原子力発電の選択肢を棄てる決断を下した。これ以降、同国では再エネ開発が加速することになる。

2．エネルギー資源の多様化と再エネの活用

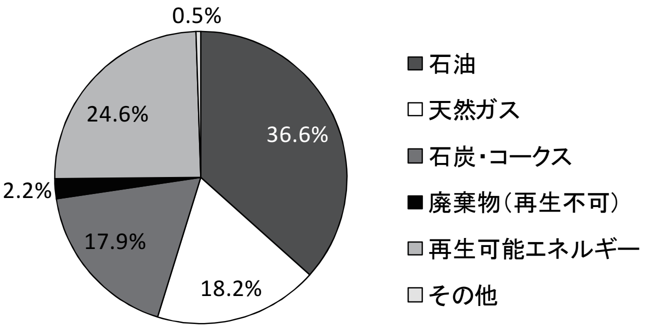
デンマークにおける2013年のエネルギー消費量（約759PJ[4]）の内訳は、化石燃料が約73％（原油36.6％、天然ガス18.2％、石炭・コークス17.9％）、再エネが約25％で（**図表２、３**）、再エネの比率は1980年の９倍近い伸びを見せている（**図表４**）。政府は再エネの割合を2020年までに少なくとも35％とし、2030年までに石炭利用を中止、2050年までには化石燃料からの脱却と100％再エネ化、という野心的な目標を掲げている。

デンマークの再エネの柱となっているのはバイオマス[5]と風力で、前者は2013年に生産

（図表２、３）2013年の総エネルギー消費量に占める燃料別エネルギー産出量（上）とその割合（下）

化石燃料		551.41
	石油	277.74
	天然ガス	138.09
	石炭・コークス	135.58
廃棄物(再生不可)		16.92
再生可能ｴﾈﾙｷﾞｰ		186.56
	バイオマス[6]	133.9
	バイオガス	4.64
	風力	40.04
	その他の再ｴﾈ	8.09
	統計上の調整等	−0.11
電力(輸出入)		3.89
地域暖房(輸出入)		0.16
総ｴﾈﾙｷﾞｰ消費量		758.94

（単位：PJ）



（出所）"Energy Statistics 2013", Danish Energy Agencyを基に作成

（図表４）総エネルギー消費量に占める再生可能エネルギーの推移

年	1980	1990	2000	2005	2010	2011	2012	2013
総ｴﾈﾙｷﾞｰ消費量	830	763	817	835	845	789	757	759
再生可能ｴﾈﾙｷﾞｰ	23	46	79	122	167	172	180	187
再ｴﾈの占める割合	2.8%	6.0%	9.7%	14.6%	19.8%	21.8%	23.8%	24.6%

（単位：PJ）
（出所）"Energy Statistics 2013", Danish Energy Agencyを基に作成

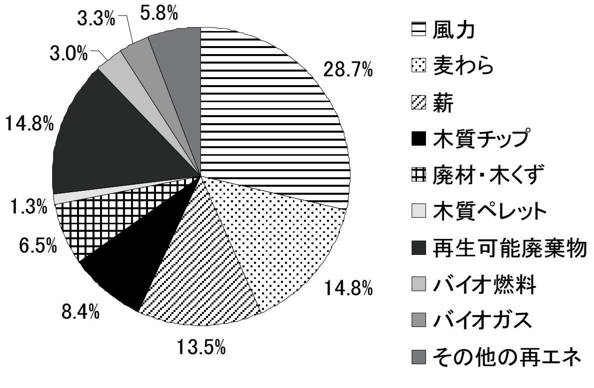
3　同国で石炭は100％輸入である。
4　ジュール（Ｊ）は仕事量やエネルギー量を表す単位。Ｐ（ペタ）は10の15乗、Ｔ（テラ）は10の12乗。
5　デンマーク・エネルギー庁（Danish Energy Agency）の統計では「バイオマス」と「バイオガス」に分かれているが、本稿では特筆しない限りバイオガスを含む。
6　本統計の「バイオマス」には麦わら、薪、木質チップ、廃材・木くず等、木質ペレット、再生可能廃棄物、バイオ燃料が含まれる。次頁図表５を参照。

された再エネの65.6%、後者は28.7%を占めている（図表５、６）。

（図表５、６）2013年の燃料別再生可能エネルギー生産量（上）とその割合（下）

風力		40,044
バイオマス		86,970
	麦わら	20,625
	薪	18,851
	木質チップ	11,746
	廃材・木くず	9,111
	木質ペレット	1,778
	再生可能廃棄物	20,683
	バイオ燃料	4,175
バイオガス		4,642
その他の再生可能ｴﾈﾙｷﾞｰ		8,083
	ヒートポンプ	4,917
	太陽光	2,889
	地熱	229
	水力	48
再生可能ｴﾈﾙｷﾞｰ生産量		139,739

（単位：TJ [4]）



（出所）“Energy Statistics 2013”, Danish Energy Agencyを基に作成

⑴　バイオマス

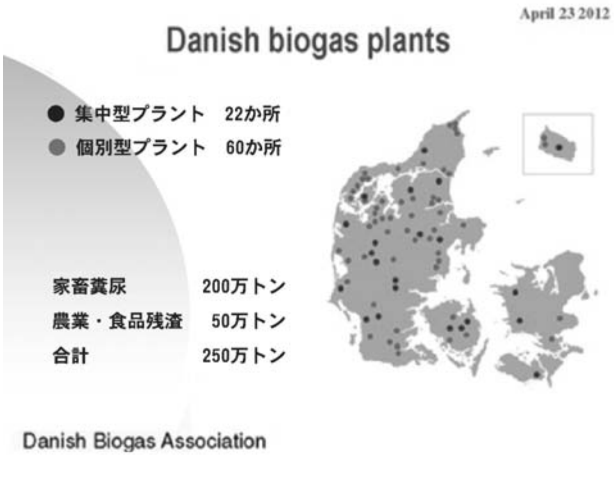
バイオマスの供給基地として重要な役割を果たしているのはデンマーク農業である。国土の約66%が農地で、毎年、人口の３倍にあたる1,500万人を養うに足る農畜産物生産がおこなわれ、その３分の２が世界100か国以上に向けて輸出されている同国には、自然の資源を活用するエネルギー生産も農業が牽引すべきという考え方が根付いている。

2013年には収穫された580万トンの麦わらのうち142万トンがエネルギー生産のために利用され、これにより産出されたエネルギーは再エネ全体の14.8%（図表６）を占めた。

畜産部門からの家畜糞尿は、農業・食品残渣と合わせてバイオガスプラントで活用されており、メタン発酵により生成されたバイオガス（メタンガス）は2013年の再エネ生産量の3.3%（図表６）を産出している。なお、2012年のデンマーク・バイオガス協会の資料によると、全国82か所のバイオガスプラントで、家畜糞尿200万トンと農業・食品残渣50万トンを合わせた250万トンが活用されている（図表７）。

このようなエネルギー生産は農業残渣や家畜糞尿の処理問題の解決に役立ち、農家・酪農家に新たな収入源をもたらすとともに、自家消費によるエネルギーコストの削減で資金の域外流出を防ぎ、地域経済の活性化に貢献している。またエネルギー生産の副産物である灰や液肥の活用は、生産性の向上や肥料コ

（図表７）バイオガスプラントの設置状況（●集中型プラント、●個別型プラント）



（出所）デンマーク・バイオガス協会資料、2012年４月を一部改変

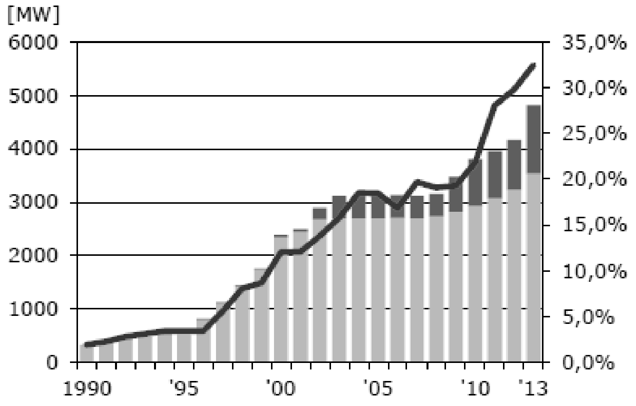
ストの削減につながり、循環型農業による環境負荷の低減にも役立っている。

⑵ 風力

海に囲まれた平坦な地形で、一年を通じて同一方向から強い風が吹く地理的条件を生かした同国の風力発電は、1990年頃から拡大を続けている。当初は陸上での整備が進んだが、適地が少なくなっている近年は洋上での開発へとシフトしており、発電所の規模が大型化している。2013年は国内での電力供給量の32.5％を生産し、前年比で2.7ポイント上昇した（**図表８**）。

最新の数字によると、2014年の同国の電力消費量の実に39.1％を風力発電が占め、一国としては世界記録を達成した。これは2013年の32.7％に対して6.4ポイントの大幅な上昇となっている[7]。

（図表８）風力発電の設備容量（累積）と国内の電力供給に占める割合の推移（単位：MW＝1,000kW）



■洋上風力の設備容量、■陸上風力の設備容量

━━ 国内の電力供給に占める風力発電の割合

（出所）“Energy Statistics 2013”, Danish Energy Agency

風力エネルギーが地域住民固有の財産と見なされているデンマークでは、2000年の初めまで風力発電への投資に地元住民の出資を優先する規制があった。そのため、陸上風力発電が中心であった1990～2000年代半ばに建設された風力発電の所有者には、設置場所やその周辺の住民、こういった人々の協同組合、地方自治体が多い。こうした風車のほとんどは農地に設置されたため、バイオマスと同様にこの分野でも、農家は極めて主体的な形で同国のエネルギー供給に関わっている。

また、風力発電の発展による風車技術の向上で、ヴェスタス（Vestas）という世界シェア１位[8]のタービン会社も生まれ、デンマークでは風力産業という主要な輸出産業が創出された。

３．分散型エネルギーインフラ

バイオマスや風力といった再生可能な地域・自然資源の活用に加えて、デンマークに特徴的なのは熱電併給施設（コジェネレーション／CHP）と地域熱供給（ＤＨ）の普及による分散型エネルギーインフラの整備である。

⑴ 熱電併給（CHP）

発電の際の排熱／廃熱を利用するCHPは電力と熱を合わせたエネルギーの総合効率が90％台と極めて高く、デンマークではその導入が促進されている。火力発電の中でCHPが占める割合（発電量ベース）は61.1％であり、過去20年強の間におよそ1.5倍になった（**次頁図表９**）。

図表10（次頁）は同国の電力供給施設（CHPと風力発電のみ）の分布を示したものだが、1985

7 数字はいずれも国営送電公社エナジーネット発表のもの。この大幅増の一因は、設備容量400MWで、現在稼働中の洋上風力発電所では世界５位のアンホルト（Anholt）が2013年後半に稼働したことにある。

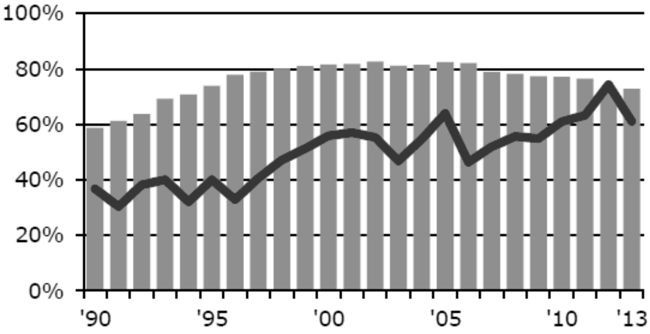
8 “Top 10 Wind Turbine Suppliers”, Energy Digital, 2014年11月号による。しかし市場の成熟とともに総合メーカーの攻勢が強まっており、風車専業メーカーであるヴェスタスは三菱重工業との合弁で、2014年４月に洋上風力発電設備専業の新会社を設立している。

年には集中型であった電力供給システムが、地域CHPや風力発電所の激増で、地域分散型に変化を遂げていることが一目瞭然になっている。

風力発電のように発電量が天候に左右される電源からの供給割合が増えると電力システムは不安定になる。このような分散型の地域CHPは、熱と電力を供給するのみならず、不安定電源である風力発電の出力変動を吸収する重要な調整弁の役割も担っている[9]。

なお、電力分野の総発電量の燃料別内訳（2013年）は化石燃料が51.9％（石炭41.1％、天然ガス9.8％、石油1.0％）、再エネ46.0％となっており、石炭の使用が４割を超えているが、これに次ぐのが風力（32.0％）で、バイオマスは11.4％と天然ガスをしのいでいる。

（図表９）地域熱供給に占めるCHPシェアと火力発電に占めるCHPシェアの推移（発電量ベース）

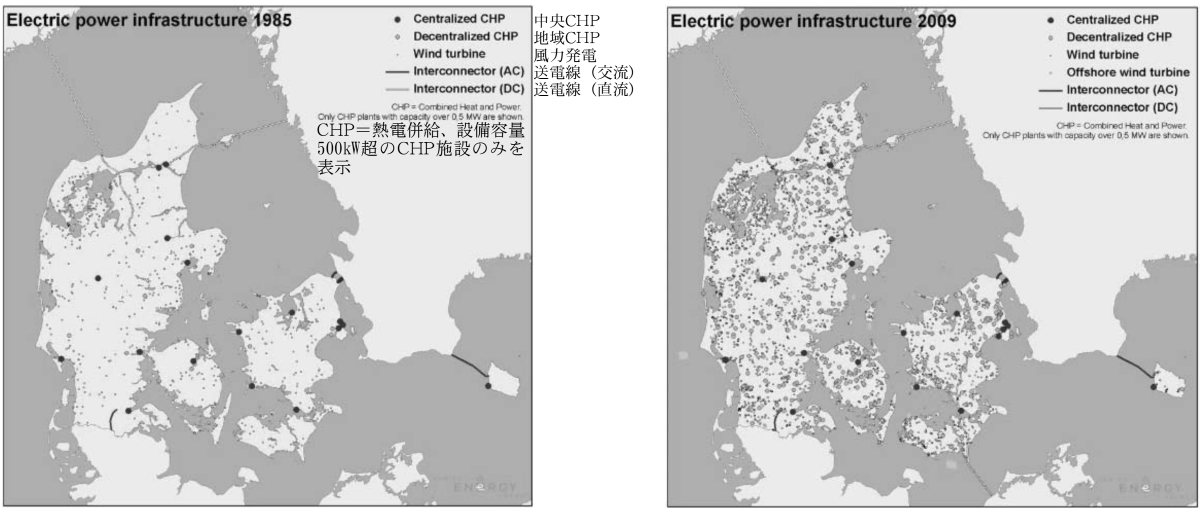


■地域熱供給、■火力発電
（出所）“Energy Statistics 2013”, Danish Energy Agency

(2) 地域熱供給（ＤＨ）

緯度が高く、冬場の熱需要が多いデンマークでは、日本のように各家庭や企業が個々に電気や化石燃料系の暖房を使用するのではなく、地域内の地下配管を通じて供給される温水による暖房が一般的である。都市化に伴うゴミ処理問題の解決策[10]として始まったデンマークの地域熱供給（ＤＨ）の歴史は100年以上前にさかのぼり、現在ではデンマークの熱需要全体の50％、家庭用需要の63％がＤＨによってカバーされており、首都コペンハーゲ

（図表10）デンマークの電力生産インフラ分布（1985年（左）および2009年（右））



（出所）Danish Energy Agencyの資料を一部改変

9　このような調整に加えて、他の北欧諸国（ノルウェー、スウェーデン、フィンランド）やドイツ、エストニア、リトアニアなどとの間で電力の融通による調整が行われている。
10　第一世代のＤＨはゴミ焼却時の蒸気を利用した地域暖房

ンでは98％もの地域でＤＨが使われている。

石油危機後の1979年、熱需要の石油依存からの脱却を主たる目的とした熱供給法が制定され、自治体が中心となって熱供給計画を策定し地域熱供給システム作りを推進することになった。計画作りにあたっては費用対効果を考慮し、ＤＨ地区と天然ガス供給地区の厳格なゾーニング（区分け）が行われている。1980年代の終わりから90年代の初めにかけて、様々な支援策が導入されたこともあり、とりわけ90年代には各地でＤＨが普及した。

こういった地域エネルギーインフラは、多くの陸上風力発電所と同様に、自治体や地域の協同組合のような団体の所有となっており、上下水道やガスと同等の社会インフラとして認識されている。

ＤＨの熱源となる施設は様々（発電所、ゴミ焼却所、工場、太陽熱、地熱、大規模ヒートポンプなど）だが、その中心となっているのはCHPで、2013年には熱のみを生産する施設からＤＨへ熱を供給する割合が27.6％であったのに対し、CHPからの熱供給は72.8％**（図表９）**を占めている。

ＤＨの熱源別シェアを見てみると、1994年には化石燃料が77％以上を占める一方で、再エネは15％にも満たなかった。しかし、2013年の後者のシェアは42.8％[11]と、化石燃料から再エネへの転換が着実に進んでいる。

４．先進的なハードとソフト

エネルギー集約型産業や製造業が中心の産業構造ではないデンマークの例が、日本などにどこまで通用するか疑問視する意見もある。しかし、石油危機後、政府のゆるぎないエネルギー政策のもとで、自治体や地域住民が主体となり、長い年月をかけて構築してきた地域所有・分散型エネルギーシステムを支えるデンマークの再エネやエネルギーの効率的利用に関連する技術・ノウハウには学ぶべきものが多い。

たとえば、すでに同国では30年以上の歴史がある潜熱回収木質ボイラーの技術を使えば、日本では今のところ効率よく燃やすことができない、水分を多量に含む木質バイオマス[12]でも、バイオマスボイラーのみでは85％にしかならない熱効率を、燃焼の際に発生する水蒸気からの潜熱[13]を回収することで、最終的に115％程度にまで高めることができるという[14]。また、農業が主体であるデンマークならではの麦わらを使ったボイラーやCHP設備、世界トップレベルのバイオガス生成技法や様々なバイオマスのガス化技術、効率的な地域熱供給のシステム設計や運用ノウハウ、そしてスマート熱・電メーター[15]を活用したネットワーク構築といった個々の技術やノウハウに加えて、地域の持てるポテンシャルを最大限に引き出す総合的なエネルギーシステムデザインの手法などに、今、日本で持続可能な地域資源の活用と地域社会活性化の先進的な取り組みを行っている自治体からの熱い視線が注がれている[16]。

11　再エネの内訳は木質バイオマス22.7％、廃棄物（再生可能）9.7％、麦わら８％などとなっており、バイオガスのシェアは１％に過ぎない。なお、化石燃料の内訳は石炭23.9％、天然ガス22.1％、石油1.5％。
12　含水率100％（木材に含まれる水の重量と、その木材を完全に乾燥させた時の重量が同じ）程度
13　蒸気が水に変化する際に得られる凝縮熱
14　ただし出力1,000～2,000kW程度以上の比較的大型の設備
15　通信機能を備えたメーターで、エネルギー使用量などのデータのやり取りや、接続されている機器の制御が可能になる。
16　NPO法人環境エネルギー政策研究所（ISEP）はデンマーク大使館の協力のもと、こうした地域での取り組みを技術面から支援している。