



京都大学再生可能エネルギー経済学講座(2017年2月28日)

土着技術から革新への途

～デンマークの風力産業技術史～

松岡憲司

龍谷大学経済学部



構 成

- はじめに
- デンマークの概要
- デンマークのエネルギー
- 世界の風力発電
- 風力発電発達の過程
- 風力発電の技術革新能力形成要因



構 成

- はじめに
- デンマークの概要
- デンマークのエネルギー
- 世界の風力発電
- 風力発電発達の過程
- 風力発電の技術革新能力形成要因



風力発電機産業

- 主要メーカー(上位10社)(2014年)
 - 金風科技(中国)
 - ヴェスタス(デンマーク)
 - GEウィンド(米)
 - ジーメンズ
 - ガメサ(スペイン)
 - エネルコン(ドイツ)
 - 国電聯合動力 United Power(中国)
 - 明陽 Mingyang(中国)
 - 遠景能源 Envision(中国)
 - 中船重工海装風電設備CSIC Haizhuang(中国)



世界上位 10 社メーカーのシェア(既設置機の累積出力)1998 年末

メーカー	国	シェア (%)
NEG Micon	デンマーク	23.4
Enron	アメリカ/ドイツ	16.3
Vestas	デンマーク	14.8
Enercon	ドイツ	12.8
Gamesa	スペイン	6.6
Bonus	デンマーク	5.7
Nordex	デンマーク	5.0
MADE	スペイン	4.0
Ecot?cnia	スペイン	1.8
三菱重工	日本	1.5
その他		5.4

デンマークのシェア 48.9%



構 成

- はじめに
- **デンマークの概要**
- デンマークのエネルギー
- 世界の風力発電
- 風力発電発達の過程
- 風力発電の技術革新能力形成要因



デンマークの経済情勢

- 経済成長率
 - 2016年 1.0%
 - 2017年 1.4%(見込み)
- 失業率 (2016年12月)
 - 4.1%
- 財政
 - 2008年から赤字
 - 政府債務残高 GDP比45.2% (2014年)
- 主要産業
 - 食肉、医薬品、流通・運輸



構 成

- はじめに
- デンマークの概要
- **デンマークのエネルギー**
- 世界の風力発電
- 風力発電発達の過程
- 風力発電の技術革新能力形成要因



デンマークの電力

- 発電量 30.6TWh(2012年)
- 発電会社
 - DONG Energy
 - Vattenfall
- 送電 Energinet.dk
 - 2005年にEltra, Elkraft System, Elkraft Transmission, Gastraを統合して設立
 - 1997年に 発送電分離
- 配電
 - 多くの配電会社



デンマークの電力

- DONG Energy
 - Dansk Olie og Naturalgas A/S
- 1972年設立の国有企業（デンマーク政府76%保有）
- 2000年代に入り電力産業へ進出
- Elsam ,Energy E2,NESA(公益配電会社)、Københavns Energi and Frederiksberg Forsyningを合併し、DONG Energyとなる
- デンマークの発電シェアの49%、熱供給の35%



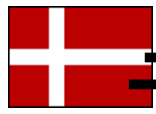
環境とエネルギー デンマーク

- 1991年より石油、天然ガス自給
- 1997年よりエネルギー自給
- 北海油田 1972年より開発開始
- 全国的な天然ガスパイプライン
- 原子力発電所なし
- 再生可能エネルギーを重視

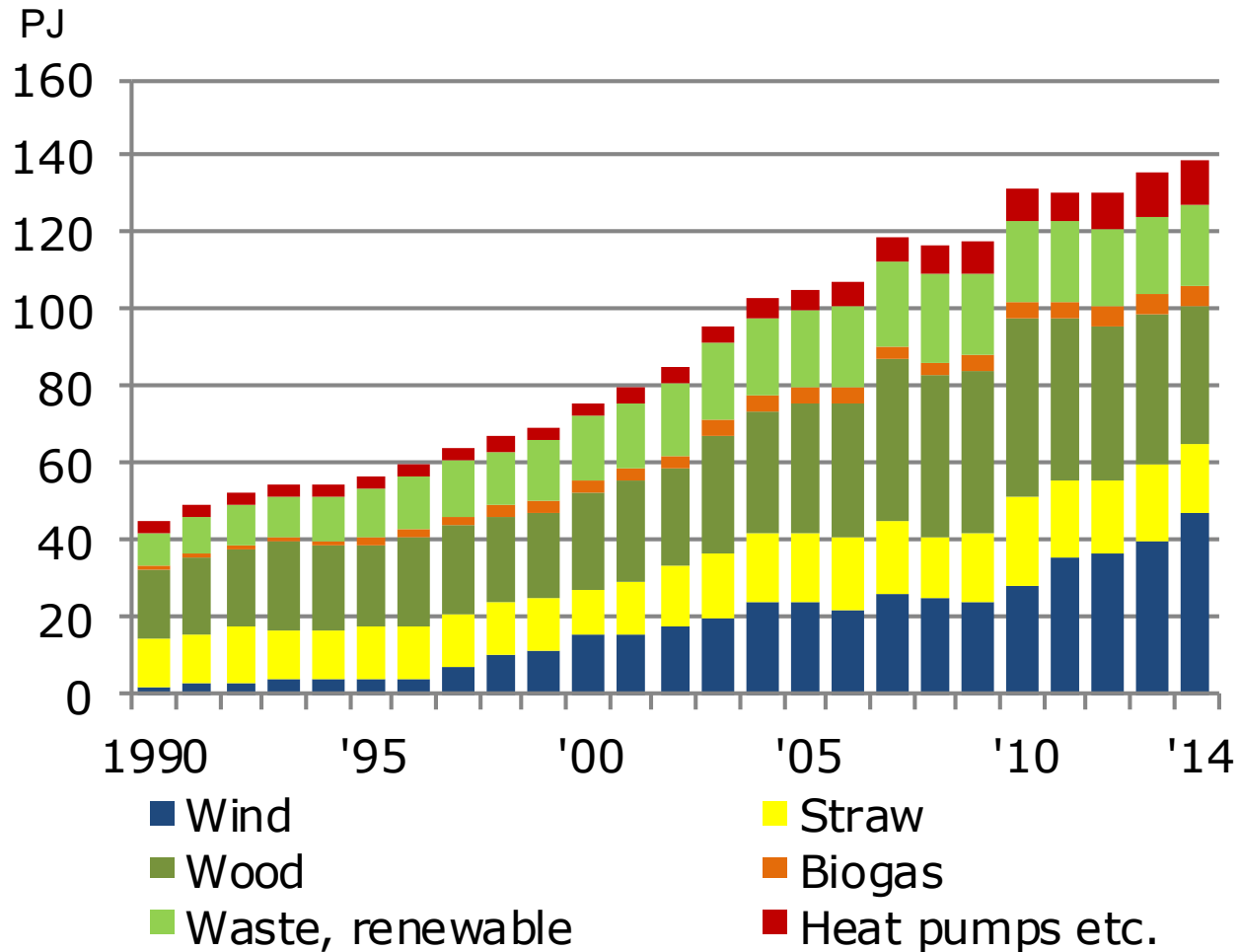


再生可能エネルギー

- 風力
- バイオマス
 - 麦わら
 - 木片
 - バイオガス(糞尿のガス化)
 - 廃棄物
- その他
 - 太陽光
 - 波力など

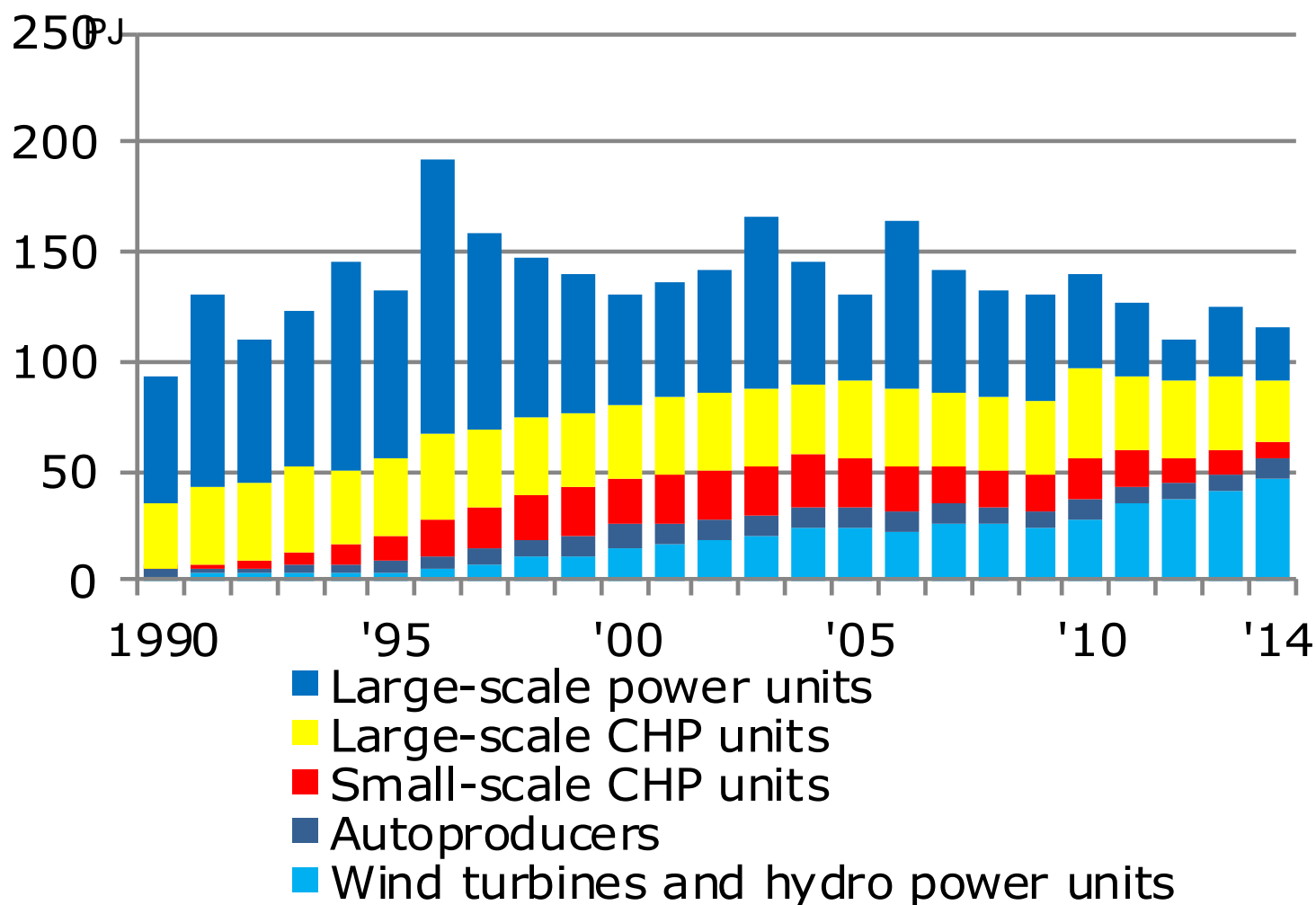


デンマークの再生可能エネルギーの構成



出所: デンマーク環境庁 Energy in Denmark 2014

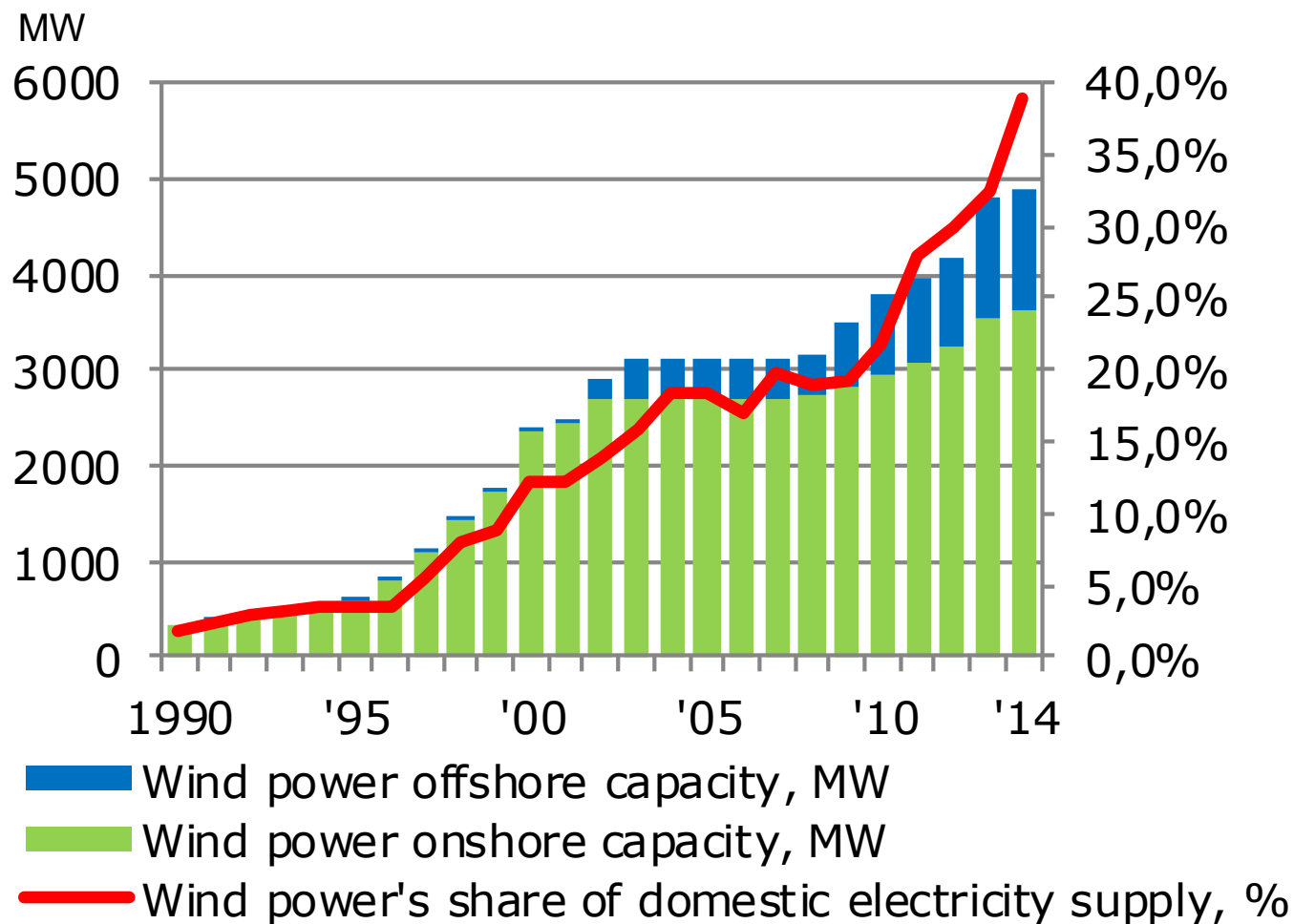
デンマークの発電所タイプ別発電量



出所: デンマーク環境庁 Energy in Denmark 2014



デンマークの風力発電の推移 (発電能力と電力に占める割合)





構 成

- はじめに
- デンマークの概要
- デンマークのエネルギー
- **世界の風力発電**
- 風力発電発達の過程
- 風力発電の技術革新能力形成要因

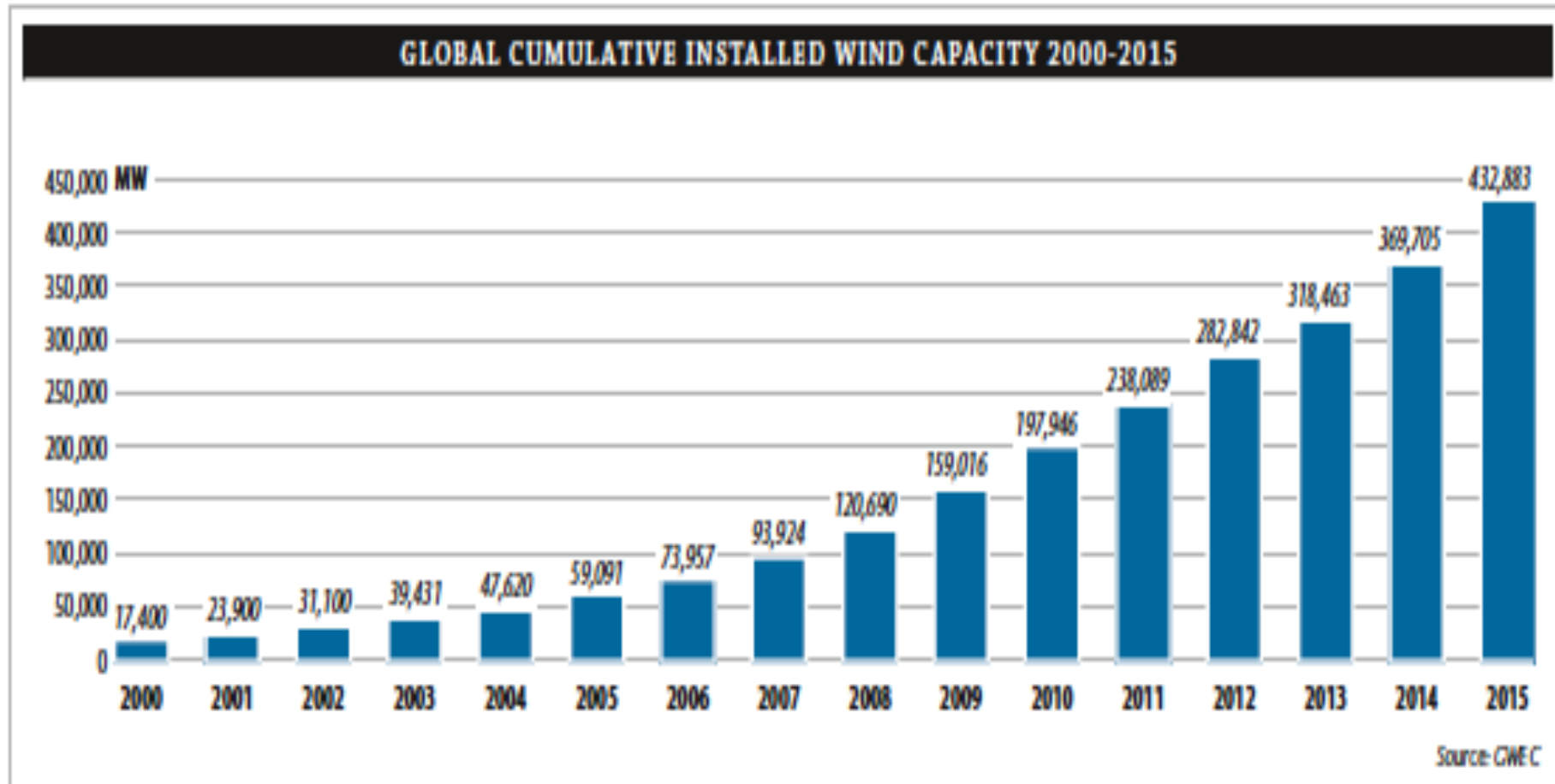


世界の風力発電

- 世界の市場
 - 2015年末累積設備容量
 - 432,883MW
 - 2015年、単年の設置量
 - 63,467MW



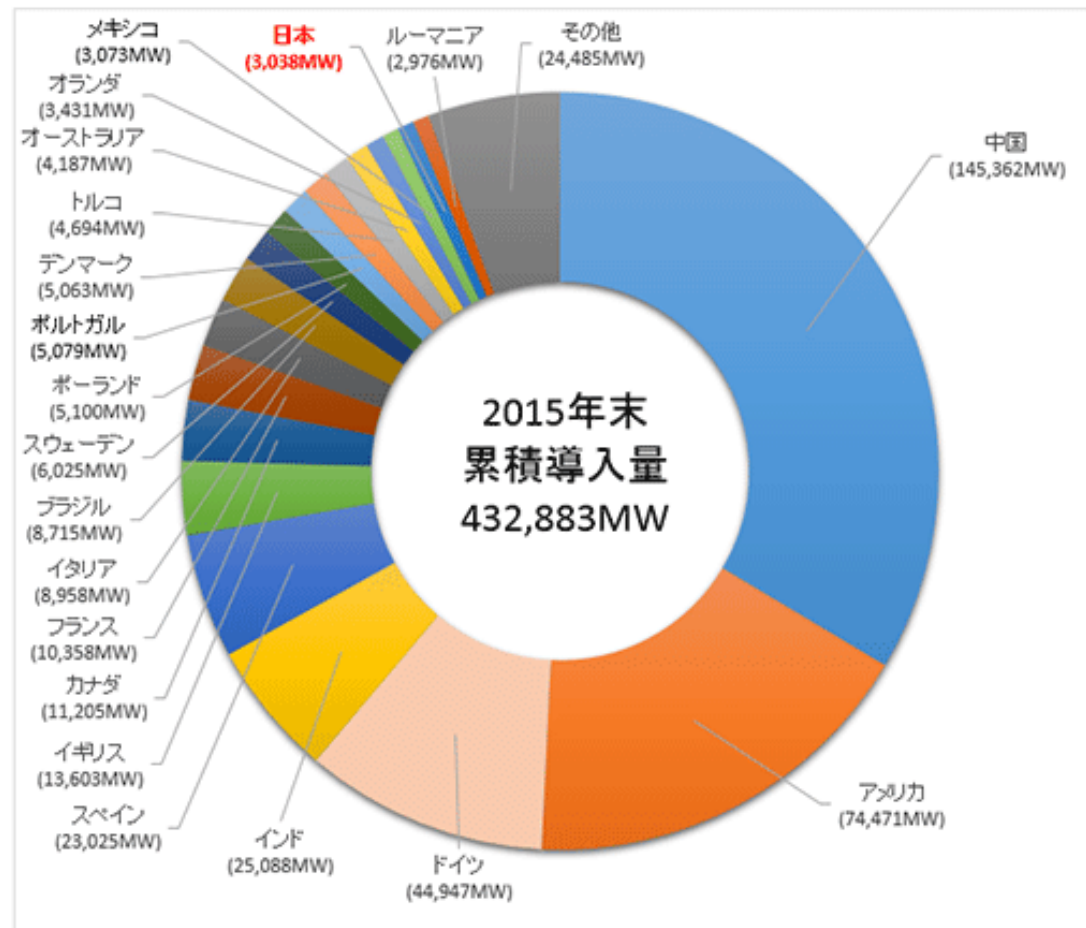
世界の累積導入量の推移



出所：GWEC, Global Wind Report 2015, p.14



世界の風力発電累積導入量 (2015年末)



出典: GWEC Global Wind 2015 Report

出所: NEDO (元はGWEC, Global Wind Statistics 2015)



構 成

- はじめに
- デンマークの概要
- デンマークのエネルギー
- 世界の風力発電
- **風力発電発達の過程**
- 風力発電の技術革新能力形成要因



デンマークの風力発電機産業

- 1990年代、世界の約半数がデンマーク製
- なぜデンマークの風力発電機産業は発達したのか。
 - 元々農業関連の中小企業
 - ヴェスタス 農業用輸送機器＋貯水用タンク
 - ボーナス(現ジーマンス) 散水機
 - 1980年代 アメリカの巨大メーカーに勝つ



デンマークにおける風力発電機の の発達

- 1891年 ポール・ラ・クーア
– 最初の風力発電機建設
- 1940年代 FLスミト社のエアロモーター
- 1957年 ゲッサー風車
- 1975年 リーセーアの22kW風車
- 1978年 ツヴィン風車
- 1979年 ヴェスタスなどの参入



風力発電のはじまり

- 諸説
 - 1887年 J. ブライス
 - 3kW機を開発25年間使用
 - 垂直軸
 - 1887年 シャルル・ド・ゴイアン公爵
 - 1888年チャールズ・F・ブラッシュ
 - ローター径 17m
 - 144枚
 - 12kW



国民高等学校 (フォルケ・ホイスコーレ)

- 成人教育をおこなう学校
 - 主に寄宿制、長期コースと短期コース
- N・F・S・グロントヴィ
 - デンマーク的なものを教えるための学校として構想
 - 1848年、賛同していたクリスチャン8世急逝で挫折
- 1844年 最初のレズイング校設立
 - グロントヴィの構想挫折の4年前に、グロントヴィに共鳴していた人たちがスリースヴィに設立
- アスコウ国民高等学校
 - 1864年、プロイセン・オーストリアとの戦争に敗れスリースヴィはデンマークでなくなる。
 - 1865年 中枢校として設立

『デンマークを知るための68章』参照



Nikolaj Frederik Severin Grundtvig

1783-1872

- 神学者、教育学者
- 文献や知識に頼った神学を批判、「精神に自然に現れる情熱や意識にキリスト教の本質がある」(田渕2009)
- 多くの賛美歌を作製
- デンマーク語・デンマークの伝統を重視
 - デンマークの「生きた」民族意識
 - 都市ではドイツ文化・ドイツ語



南ユラン問題

- ユラン半島(ユトランド半島)南部の国境問題
- 「近代デンマークの文化ナショナリズムと民衆のアイデンティティ形成の社会的起源」(田渕宗孝 p.17)
- 1466年 スレスヴィ・ホルシュタインを永遠に分離しないと協定
- 1815年 ホルシュタイン ドイツ連邦に加盟
- 北スレスヴィ
 - 上流階級 ドイツ語
 - 農民 デンマーク語 → デンマーク人としてのアイデンティティ



スレスヴィ・ホルシュタイン戦争

- 1848年 第一次戦争
- 1864年 第二次戦争
 - プロイセン・オーストリア連合軍、デンマーク軍を撃破
 - ウィーン条約で3つの公爵領失う
- 国家の疲弊と再建
 - ダルガスによる開墾
 - 内村鑑三 「デンマルク国の話」
- 愛国運動
 - 国土を失ったことによる自信喪失、愛国心の高揚
 - 農民に自信を持たせる



Poul la Cour (ポウル・ラクーア)



- 気象学者、物理学者、発明家
(デンマークのエジソン)
- コペンハーゲン大学から、アスコウ国民高等学校の教師に
- 農村での啓蒙活動
 - グロントヴィ思想に共鳴
 - 農村の自立を目指す
- 自立のための一手段
 - 電気の普及
 - 農村では蒸気による発電は適さない
 - 伝統的な風車に注目

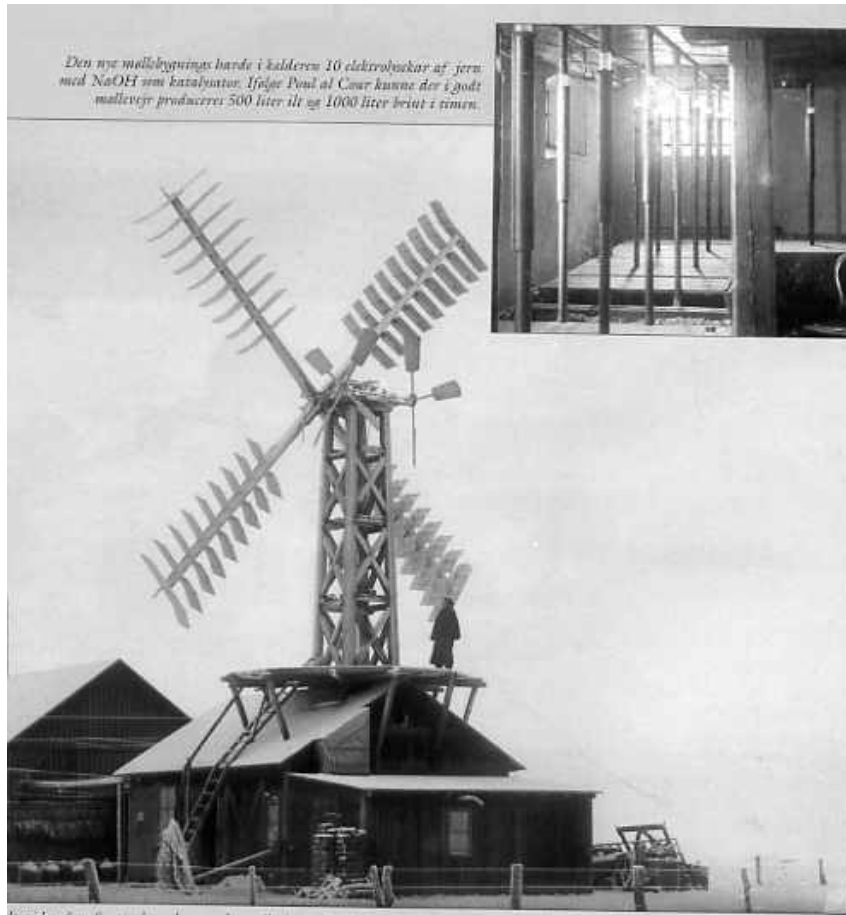


ポール・ラクーアによる風力発電

- 1891年 最初の実験風車
 - 世界初の風力発電機という定説
 - 4枚のよろい戸式の板羽根
- 1897年
 - コーン型の6枚羽根
- 1900年
 - 通常の4枚羽根に交換
- 1928年
 - 火災で焼失



ラ・クーアによる世界最初の発電用風車



1891年 アスコウ

翼径 11m

発電した電力、水を電気分解し、水素として保存。水素ランプで照明

風の変動には独自の調速装置



1900年の風力発電機





ラクーアの風力発電の特徴

- ラクーアの鍵
 - 風車の発電機と蓄電池の接続を切るリレー
- 出力安定のための機械的な工夫
 - クラトースタット
- 発電した電力によって水を電気分解。水素としてエネルギーを保存
 - 水素をガスランプによって照明として利用
 - 7年間無事故で利用



ラクーアによる風力発電普及活動

- 1903年 デンマーク風力発電会社設立
 - 約60箇所 of 風力発電所を設置
 - ディーゼル発電の普及によって1916年に解散
- 1904年 地域のための電気技術者養成学校
 - ヨハネス・ユールもここで学ぶ

La Courの電気技術者学校、中列左端がla Cour,
後列右から2番目がJuul





ラクーアの影響

- リュゲゴー風車
 - 羽根板式、4枚羽根
 - ヒュン島
 - 全国で65機(1945年)
 - 南米にまで販売
- フレゼリック・デールゴー
 - シェラン島



アグリコ風車

- 1918年
- 40kW
- プロペラ式の揚力を利用した最初の風車
- 自動ヨー
- 自動ピッチ制御
- 発電用意外にも揚水などに多くのアグリコ風車が使われる



F.L.スミト社のエアロモーター

- 第二次大戦による石油不足で、再度風力に注目
- F.L.スミト社
 - セメント製造機器メーカー
 - コンクリート製タワー
- 1940年代
 - 1944年までに88基
- 2枚翼
 - ローター径17.5m
- 3枚翼
 - ローター径24m



ヨハネス・ユール(1887-1969)

- ラ・クールの電気技術者養成学校で学ぶ。
- その後、デンマーク内外で経験を重ね
- 1914年 技師となる
- 1926年 SEAS(電力会社)で研究に従事
- 1947年より風力発電の研究に取り組む
- 1957年 ゲッサー風車完成
 - ローター径 24m
 - 定格出力 200kW
- 今日の風力発電機の基本モデル



今日につながる風車の基本モデル

- 3枚翼
- アップウィンド
- ストール制御
- ティップブレーキ



Christian Riisager (クリスチャン・リーセーア)



- 大工・家具職人
- 1975年 ゲッサー風車をモデルとして、22kW機を建設、系統接続。
- 1980年までに約70基を建設。



リーセーアの影響による新規参入

- 1976年 S.J.ウィンドパワー
- 1977年 ソーネベア
- 1978年 ウィンドマティック
- クリアント
- 1977年 エケア(風車翼メーカー)
- 1978年 同社、ヘアボー風力に改組
- 1979年 ヘアボー、ヴェスタスと提携



ツヴィン風車

- 1975年 ツヴィン国民高等学校で大型風車建設計画
- 原子力発電へのプロテストとして計画
- 多くのエンジニア、職人が結集、協力
- タワー高さ 53m
- 公称出力 2MW
- ダウンウィンド



大型風車開発プロジェクト

- ニーベ風車
- ヴィンデーン40とチェーアボー風車
- 小型に比べ、大型風車開発では、よい成果が得られなかった。



現存メーカーの参入

- 1979年
 - ヴェスタス
 - ノータンク
 - ボーナス



ヴェスタス

- 1898年 H.S.ハンセン鍛冶屋開業
- 1945年 H.S.ハンセンの息子、ペザー・ハンセン、VEstjysk STaalteknik A/S(西ユトランド鉄工技術会社)設立。頭文字をとってVestasと称する。
- 1979年 最初の風車設計・生産
- 1986年 前年に倒産、再建してヴェスタス・ウィンド・システム設立。
- 1998年 コペンハーゲン証券取引所に上場
- 2004年 NEGミーコンと合併



ヴェスタス(2)

- 製品
 - 2.0MW、3.0MW
 - 比較的保守的な設計
 - 非同期発電機
 - 増速ギア
 - 軽量
- 販売先: ほぼ100%輸出。中国にも進出。
- 洋上風車へも積極的



ヴェスタス(3)

- 2014年 三菱重工と合併企業、MHI Vestas 設立。洋上専門。
- 3.3MW
 - V112
- 8.0MW
 - V164



MHI Vestas 本社(オフィス)





ノータンク (Nordtank)

- タンク車のメーカー
 - 主に石油輸送用
- 1980年 風力発電機製造開始
- 1983年 ノータンクとミーコンに分離
- 1997年 両社再合併してNEGミーコン
 - Nordtank Energy Group (NEG)
 - Moerup Industrial Windmill Construction Company (Micon)
- 2004年 ヴェスタスによって吸収合併



ジーメンス・ウィンド

- 元、ボーナスエナギ (Bonus Energy)
 - 農地用灌漑機器メーカー (Danregn社)
 - 1980年風車に参入**Danregn Vindkraft A/S**
 - 1983年 ボーナス・エナギに社名変更
 - 2004年ドイツ、ジーメンスによって買収される



構 成

- はじめに
- デンマークの概要
- デンマークの電力
- 世界の風力発電
- 風力発電発達の過程
- **風力発電の技術革新能力形成要因**



風力発電機開発の技術革新能力形成要因： 研究者・技術者

- ・ Poul la Cour (ポウル・ラ・クーア)
- ・ Johannes Juul (ヨハネス・ユール)
- ・ その他
 - Claudi Wesh:FLSmidth社のエンジニア
 - Christian Riisager (クリスチャン・リスエア) : 風車大工からJuul型の生産に進出



風力発電機開発の技術革新能力形成要因: 教育

- ・ 国民高等学校
 - 神学者、詩人のGrundtvigの思想による成人学校
 - 都市のエリート校に対して、農民教育を重視
- ・ Poul la Cour と Askov
 - 代表的な国民高等学校
 - 高い教育水準(国民高等学校はレベルが低いという評判を覆す)
- ・ Tvind
 - 社会主義教育
 - 抵抗運動の一環として、1975年に大型風車建設
 - 現在はカルト的団体として、非難されている



風力発電機開発の技術革新能力形成要因: 研究機関

- ・ Risø国立研究所
 - 1958年 原子力の研究施設として設立
 - 1978年 風車のテストセンター設置
 - ・ 補助金(後述)を受けるための認証機関
 - 現在、風況調査用のソフトウェア(WASP)の開発機関として世界中に知られる



風力発電機開発の技術能力形成要因: 国の支援

- ラ・クアに対する支援
- 1950年 デンマーク公共電気協会・公共事業省
 - 風力委員会設置:風力発電の可能性を検討
 - 1954年 30万クローネ(マーシャル・プラン)
 - 1956年 22.5万クローネ
 - (参考:Risøでの原子力研究には1.5億クローネ)
- 補助金
 - 1979年 風力発電機設置者への補助金制度
 - 1989年 廃止



設置補助金

年	1979	1985	1987	1988	1989
補助金率(%)	30	25	15	10	廃止



風力発電機開発の技術革新能力形成要因: 需要

- アメリカ
 - 1978年 PURPA法によって、風力発電機の設置者へ40-45%の税控除
 - カリフォルニア・ブーム
- 電力買い取り制度
 - 配電会社の小売価格の85%で買い取り義務
 - 99年より0.33クローネ/kWhの固定価格
 - 電気税、炭素税の還元
- 環境への関心の高まり
 - ドイツ 再生可能エネルギー法(2000年4月施行)



風力発電機開発の技術革新能力形成要因: 需要(2)

- 協同組合: デンマークは協同組合が活発
 - 90年代まで
 - 協同組合による共同所有が一般的
 - 1983-92 全体の57.8%が共同所有、個人所有 18.9%
 - 90年代以降
 - 個人所有の増加
 - 1998年 全体の80.4%が個人所有、10.9%が共同所有
 - 2000年
 - Middelgrunden 都市型の協同組合所有
 - 協同組合: 地域住民から出資者募集



所有形態による発電設備量 (MW)

	•個人所有	•協同組合
•1995	•43.9	•6.8
•1996	•197.3	•7.4
•1997	•249.5	•16.4
•1998	•256.1	•32.3



産業の成功の要因

- 伝統文化（風車）
- 地縁技術
 - 農機具鉄工所（鍛冶屋） → 技術者間のネットワーク
 - 技術的には保守的だが、頑丈
- 教育
 - 徒弟制、職業教育、国民高等学校
- 協同組合



産業の成功の要因(続き)

- ・ 政府の支援
 - リソによる認証システム
 - 風車設置者への補助金
- 発電電力の購入価格
 - 固定価格
- アメリカの風車ブームも追い風となった



ご静聴ありがとうございました

MANGE TAK!