



公開シンポジウム

北海道の自然エネルギー
拡大に向けた
電力システムの発展
—欧州の事例から—



2017年5月19日(金)

再エネと送電網の費用便益分析 ～欧州ではなぜ系統整備が進むのか～



京都大学大学院 経済学研究科
再生可能エネルギー経済学講座
特任教授

安田 陽

+ 日本と世界のギャップ

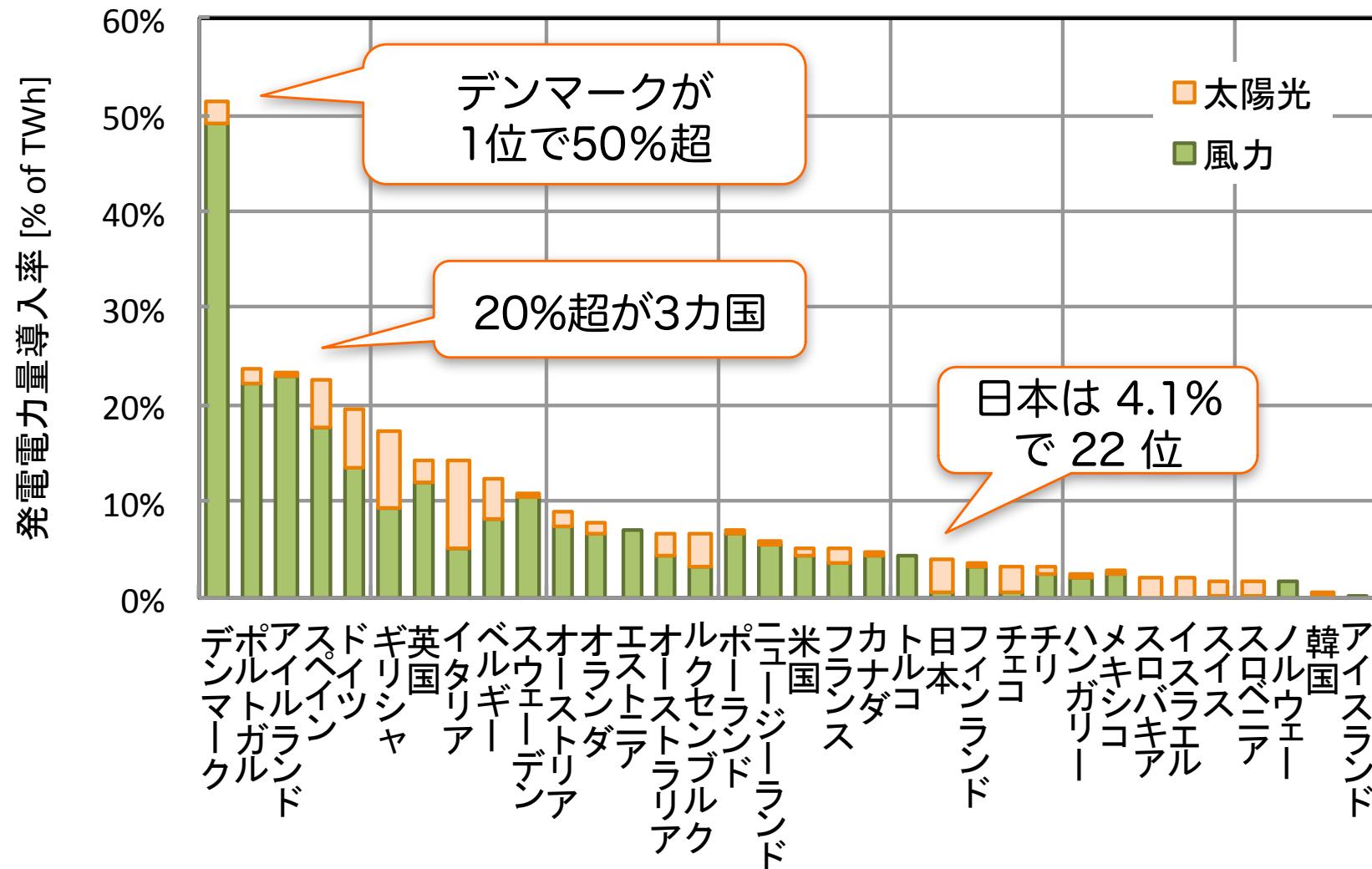
- なぜ日本では再エネ導入が進まないのか？
 - 再エネは高コスト、国民負担の増大(?)
 - 系統連系問題：もう一杯でつなげない(?)
 - 送電線：電力需要が伸びないので投資は手控え(?)



- なぜ世界では再エネ導入が進むのか？
 - 再エネは国民に便益をもたらす
 - 系統連系：技術的課題ではなく法制度の問題
 - 送電線：再エネのおかげで投資が活況

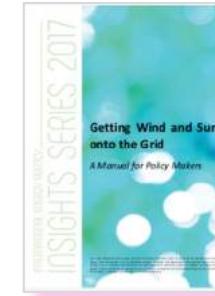
+ 風力+太陽光の発電電力量導入率 国際比較 (2015年)

3



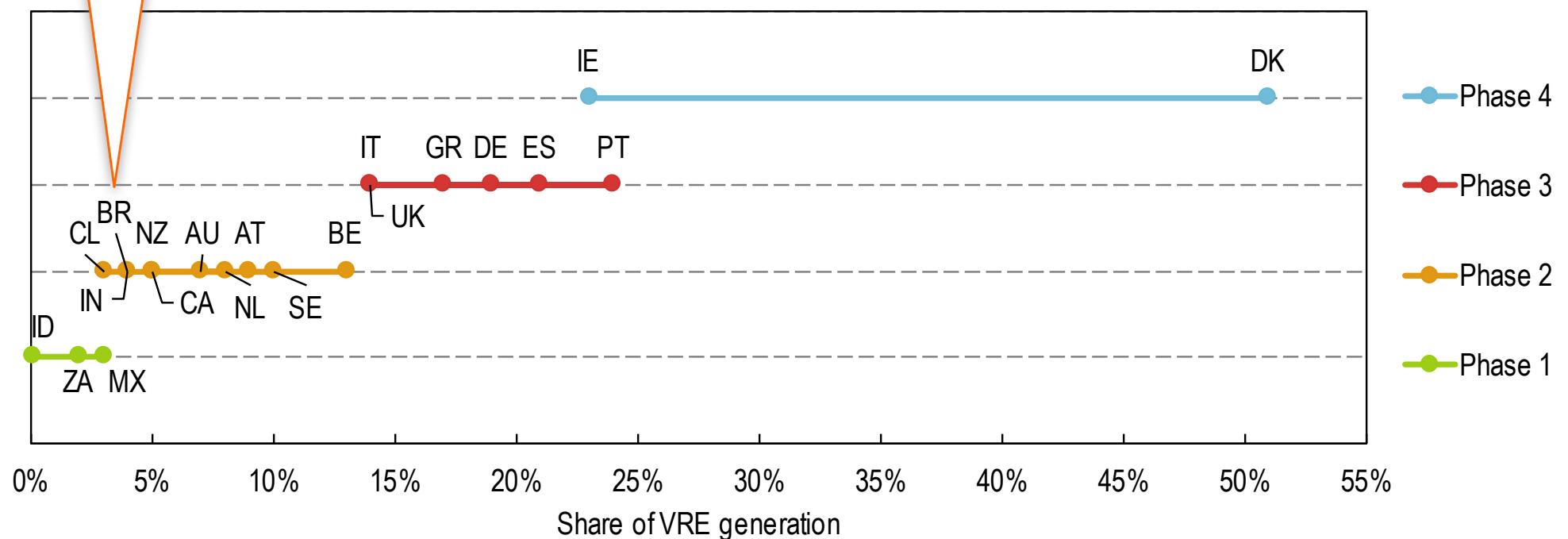
(data source) IEA Electricity Information 2016

+ 変動電源導入率のフェーズ
(IEAの最新の報告書より)



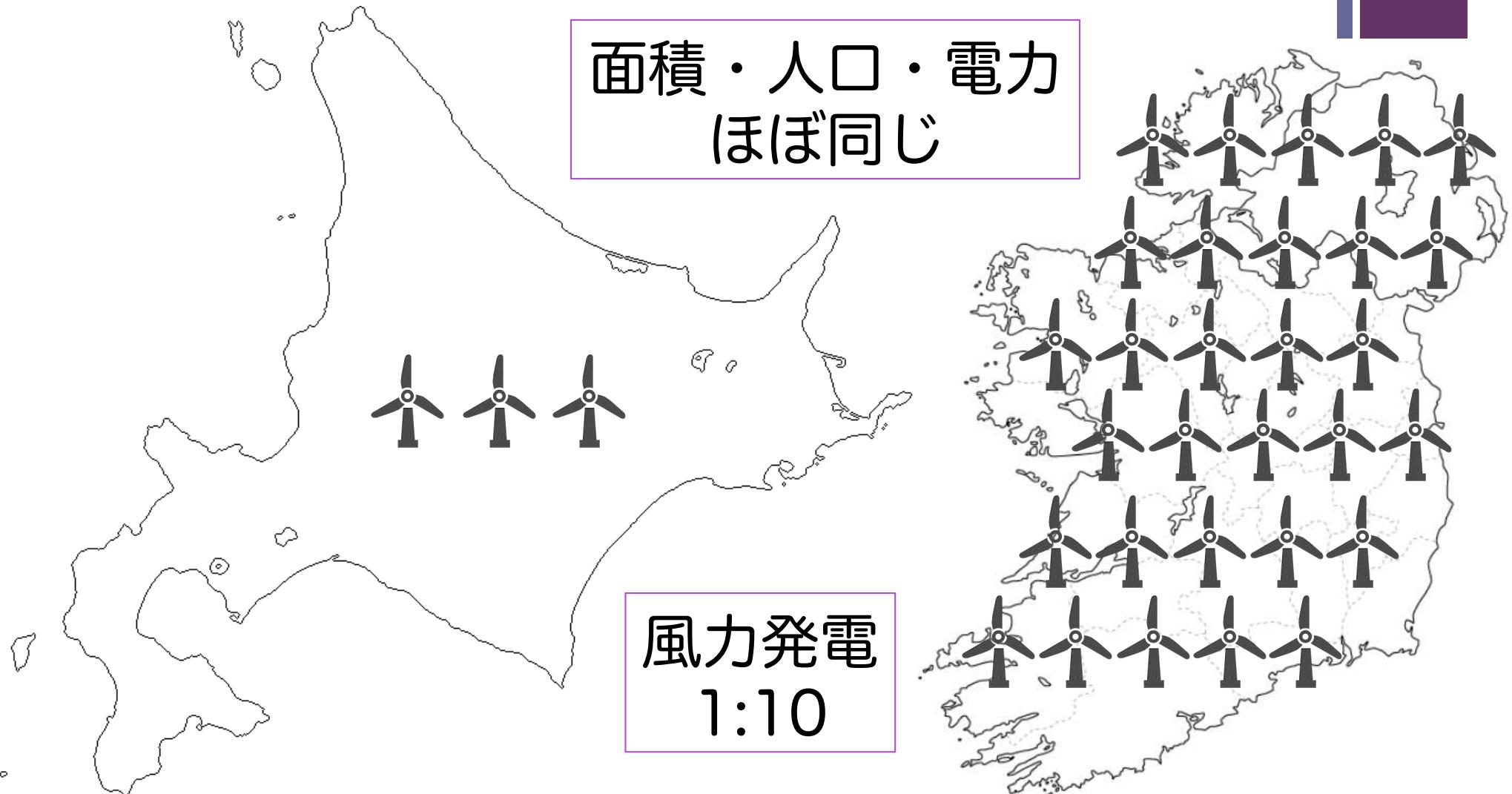
日本は
この辺り

世界の中の日本の位置付けは？
日本特殊論は世界に通用するか？



(出典) IEA: Getting wind and sun onto the grid – A manual for Policy Makers (2017)

+ 北海道とアイルランド島の比較



北海道とアイルランド島の比較

北海道 (2015年度)		アイルランド島 (2015年)
8.3	面積 [万km ²]	8.4
547	人口 [万人]	641
5.0	ピーク電力 [GW]	6.5
30.4	発電電力量 [TWh]	36
0.6	連系線容量 [GW]	1.0
0.3	風力	容量 [GW] 3.0
0.65 *1		電力量 [TWh] 8.2
0.97	太陽光	容量 [MW] 0
0.85 *2		電力量 [TWh] 0
5% *1*2	変動電源シェア [%]	22.8%

*1: 設備利用率25%と仮定した場合の推定値, *2: 設備利用率10%とした場合の推定値

+ なぜ世界中で再生可能エネルギーが促進されるのか？

日本では定量的議論
が非常に少ない

■費用便益比が大きいから。

- かけたコスト(費用)よりも市民にもたらされるリターン(便益)が大きい。
- コストはそれなりにかかる。コストが高いからといって投資を控えると、便益が得られない。

■外部コストが一番低い電源だから

- 外部コストはゼロではない(騒音・景観影響 etc.)
- 外部コストがゼロではないからと言って排除すると、更に外部コストの高い電源を選択しなければならなくなる。

+ 便益 benefit

8

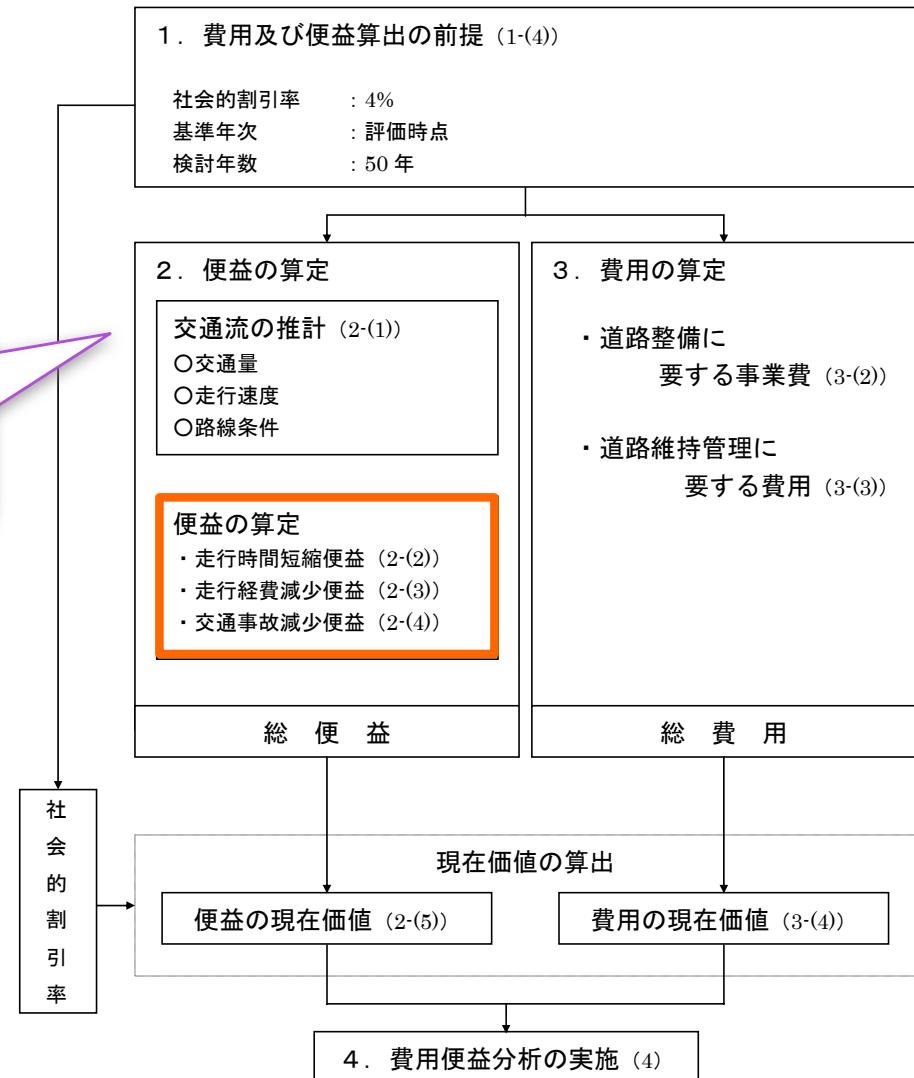
- コスト、コストと言われることは多いが・・・。
「便益」に関する議論は抜け落ちがち。
- 「便益とは」 ?
 - 人々が受ける恩恵の貨幣表現。コストの反意語。
 - 利益 profit と異なり、一部の人のみが得をするのではなく、ステークホルダー全員が共有できるもの。
- かけた費用(コスト)に対してそれに見合う便益が得られるか?が重要 (費用便益比)
- エネルギー問題のコスト・便益は社会化されるべき。

+ 再生可能エネルギーの便益

- 化石燃料の削減
 - 健康被害の抑制
 - 輸入依存度低減
 - 自然保護
- CO₂削減
 - 異常気象の抑制
 - 生態系への影響
- その他
 - 雇用創出

土木
分野
での例

欧米では
定量分析の
報告書も
多い



+ エネルギーの選択

- 費用便益分析 (CBA) の必要性
 - 費用 (コスト) > 便益 (ベネフィット)
 - 推進すべきではない。
 - コスト削減を努力する。
 - 費用 (コスト) < 便益 (ベネフィット)
 - コストが高くても推進すべき。
 - コストを支払う世代と便益を受け取る世代が異なる場合、どう合意形成を図るか…?
(例: 公害問題、地球温暖化)
- 費用便益の定量化が必要
- 費用には隠れたコスト(外部コスト)も含めるべき。



費用負担に関する発想の転換

■ 日本(従来)

■ 原因者負担の原則 *polluters-pay principle*

- 再エネの変動対策・系統増強は再エネ事業者が負担
- 一見公平に見えるが、
新規参入者に対する参入障壁に？

旧ESCJルール
に明記

■ 欧州・北米

■ 受益者負担の原則 *beneficiary-pay principle*

- 再エネの変動対策や系統増強は送電会社の責務
- コストの社会化・最適化
- 特定のセクターの利益ではなく、社会全体の**便益**
- 系統技術のイノベーション・投資が進む

広域機関
ルールにも登場

+ 発送電分離後の世界

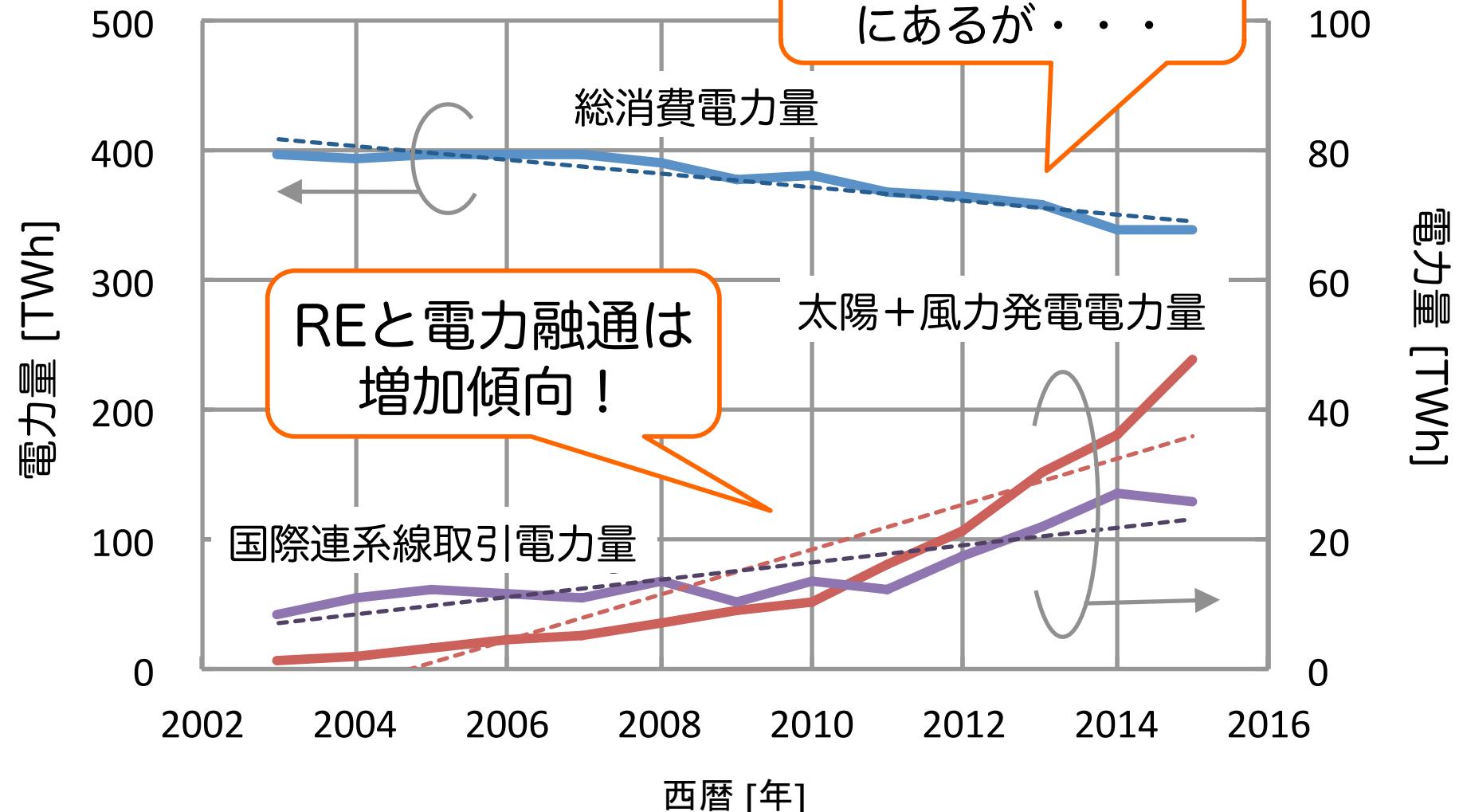
- 「電力会社」はもはや存在しなくなる
 - 発電会社、送電会社、小売会社に分離
- 発電会社
 - 市場メカニズムのもと、競争原理。
 - メリットオーダーによる競争下では、再エネが優位。
 - 火力はエネルギーでなく調整力を売るビジネスに。
- 送電会社
 - 電力系統の「監視」役。市場と二人三脚。
 - ネットワークコストの収入で経営。
 - 再エネを積極的に受け入れるようになる。



発送電分離後の 欧州の電力業界の再編

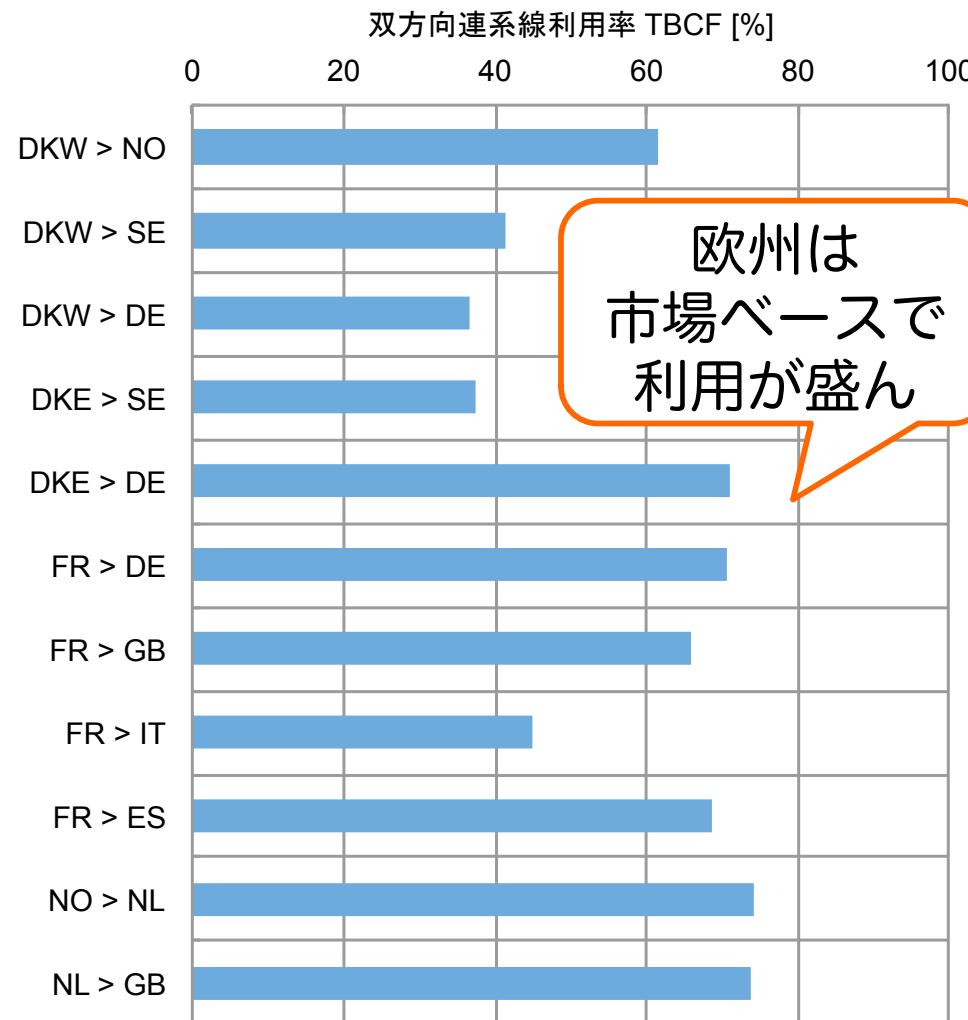
- ENTSO-E：欧州電力系統事業者ネットワーク
 - 送電系統運用者 (TSO) の協議会
 - 34ヶ国41事業者の巨大な団体
 - 2年ごとに「電力系統10ヶ年計画」(TYDNP)の公表が義務づけられている
 - ENTSO-Eに関する日本語情報は非常に少ない
- Eurelectric
 - 発電事業者および小売&DSOの連盟
 - 日本から電気事業連合会がオブザーバ参加。
 - Eurelectricの発信情報は比較的日本語になりやすい

+ 連系線の活用は増加傾向
(英國の例)

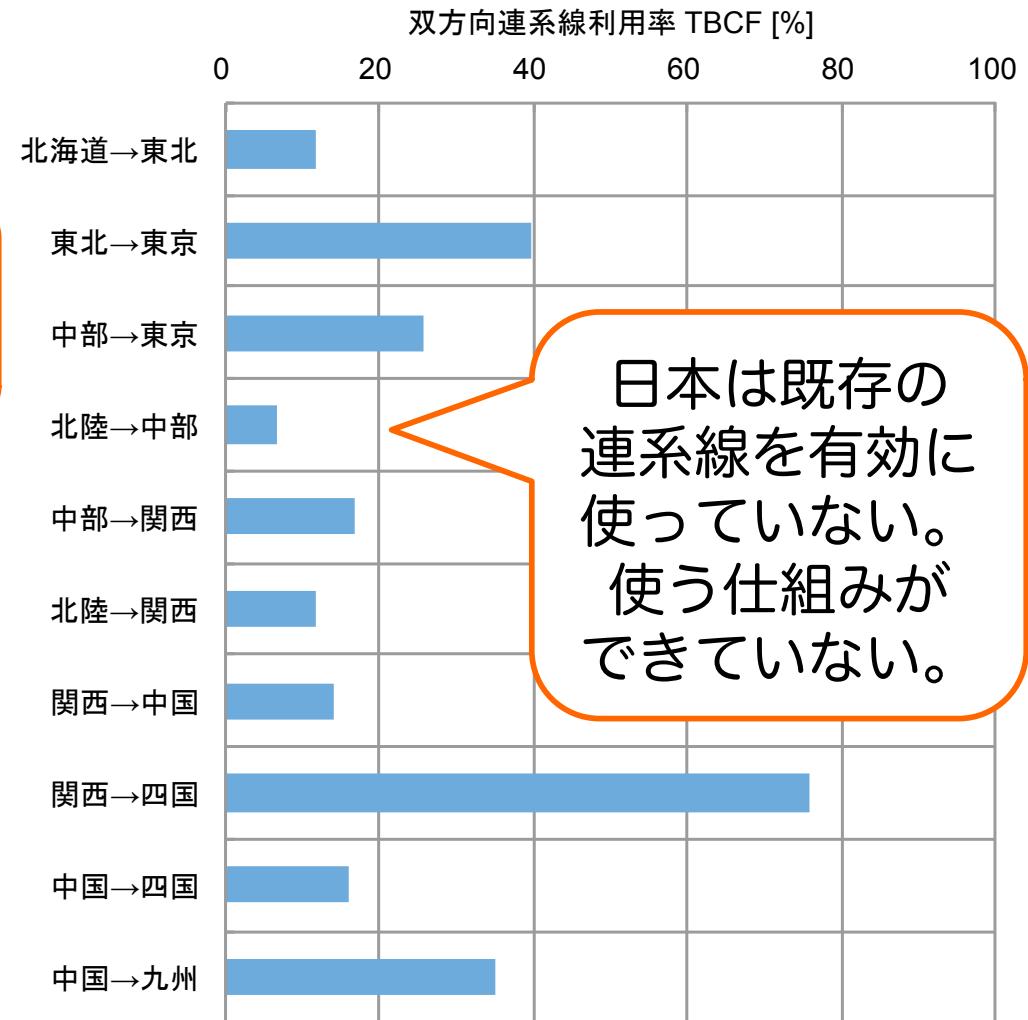


(初出) Y. Yasuda: "Does variable renewable energy promote grid expansion?",
Wind Integration Workshop (2016, 11, to be issued)

日本の連系線は使われていない。 (年間最大運用容量に対する比率, 2013年)



欧洲は
市場ベースで
利用が盛ん



日本は既存の
連系線を有効に
使っていない。
使う仕組みが
できていない。

+

ENTSO-Eの系統開発10ヶ年計画

16

The screenshot shows the homepage of the ENTSO-E TYNDP 2016 website. The URL in the browser bar is tyndp.entsoe.eu. The page features a large red banner with the text "USING CLEAN SOURCES" and "Ten Year Network Development Plan 2016". Below the banner, there's a green graphic of houses and wind turbines. A blue button labeled "Learn more about TYNDP" is visible. The main content area contains a paragraph about the plan being revised after public consultation. On the right side, there's a sidebar with the "TYNDP" logo and the text "Ten-Year Network Development Plan 2016". At the bottom, there's a footer with links to the "EXECUTIVE REPORT" and contact information for ENTSO-E.

← ENTSOE.EU EXECUTIVE REPORT INSIGHTS ALL RESULTS AND DOCUMENTS PROJECTS MAP STORAGE PROJECTS TYNDP 2018

USING CLEAN SOURCES

Ten Year Network Development Plan 2016

Learn more about TYNDP

This site presents the TYNDP 2016 (20 December 2016), revised after the public consultation. All comments have been reviewed. Some have changes in the reports and project sheets and some will be kept for consideration when preparing the TYNDP 2018. Each comment has received a specific answer by ENTSO-E. The reports and projects analysis have been submitted to ACER, for a regulatory opinion expected in Spring 2017.

TYNDP
Ten-Year Network Development Plan 2016

e

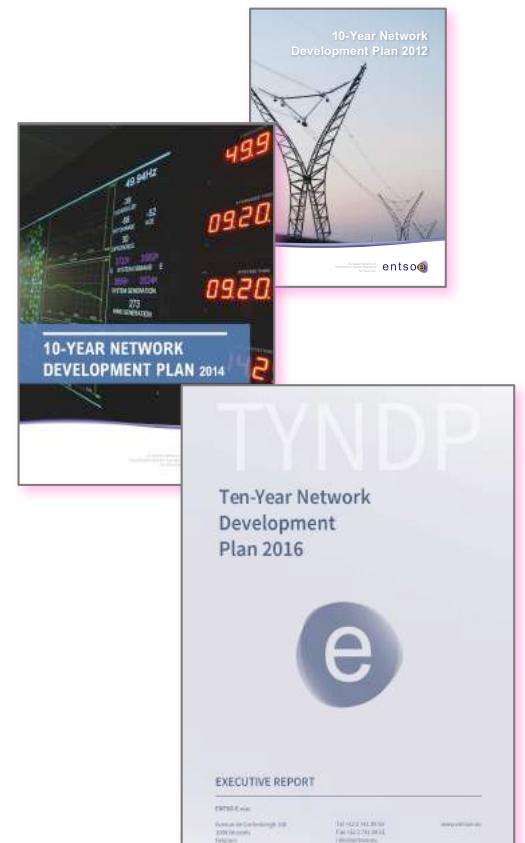
EXECUTIVE REPORT

ENTSO-E
Avenue de Cortenbergh 100
1000 Brussels
Belgium
Tel +32 2 740 88 00
Fax +32 2 740 88 01
info@entsoe.eu

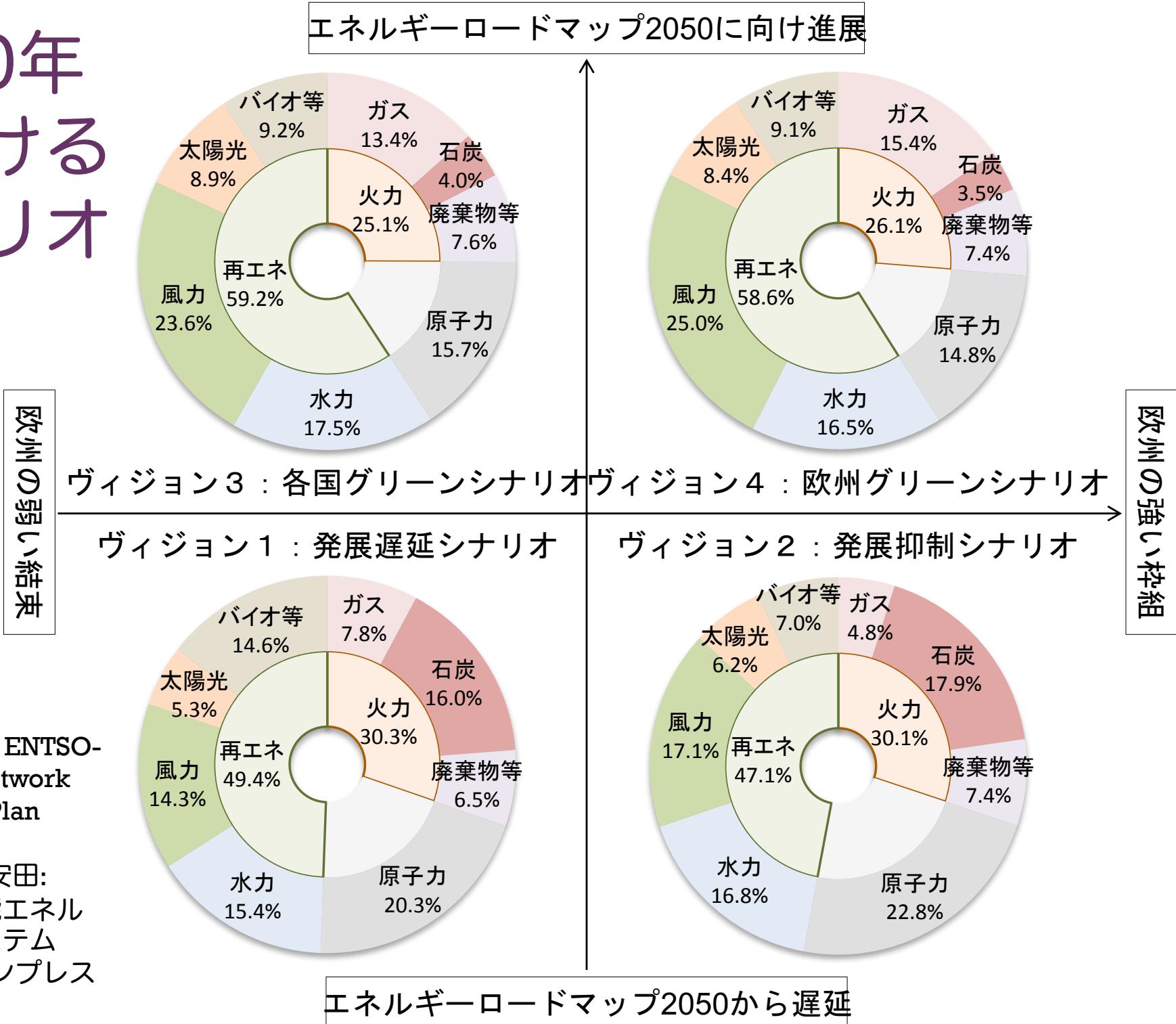
<http://tyndp.entsoe.eu>

+ ENTSO-Eの系統開発10ヶ年計画 (TYNDP)

- 欧州電力系統事業者ネットワーク (ENTSO-E)が2年に1回発行を義務づけられた報告書
- 既設線のボトルネック分析
- 再エネ大量導入を想定した系統計画
- 2050年までのロードマップの中で今後10年間の短中期的計画を提案
- 系統新設・増強計画の費用便益分析 (CBA: Cost-Benefit Analysis)
- 系統拡張の正当性 (justification) を定量評価



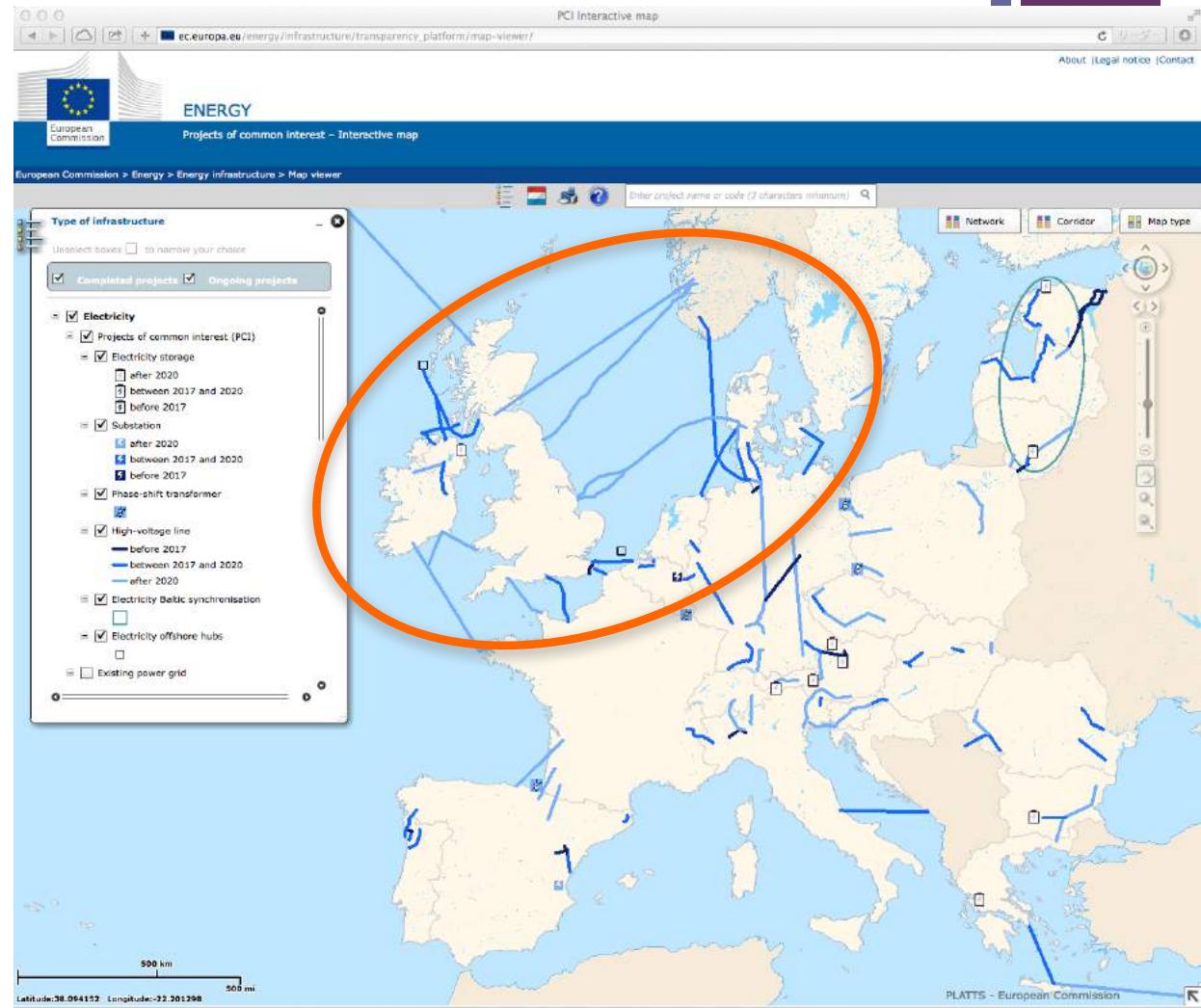
2030年におけるシナリオ



(データソース) ENTSO-E: "Ten Year Network Development Plan 2016" (2016)
 (グラフ出典) 安田: 世界の再生可能エネルギーと電力システム 風力発電編, インプレス R&D (2016)

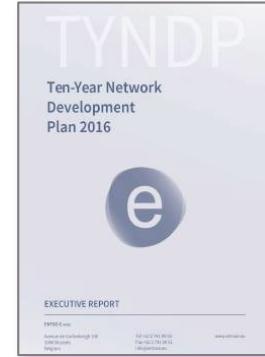
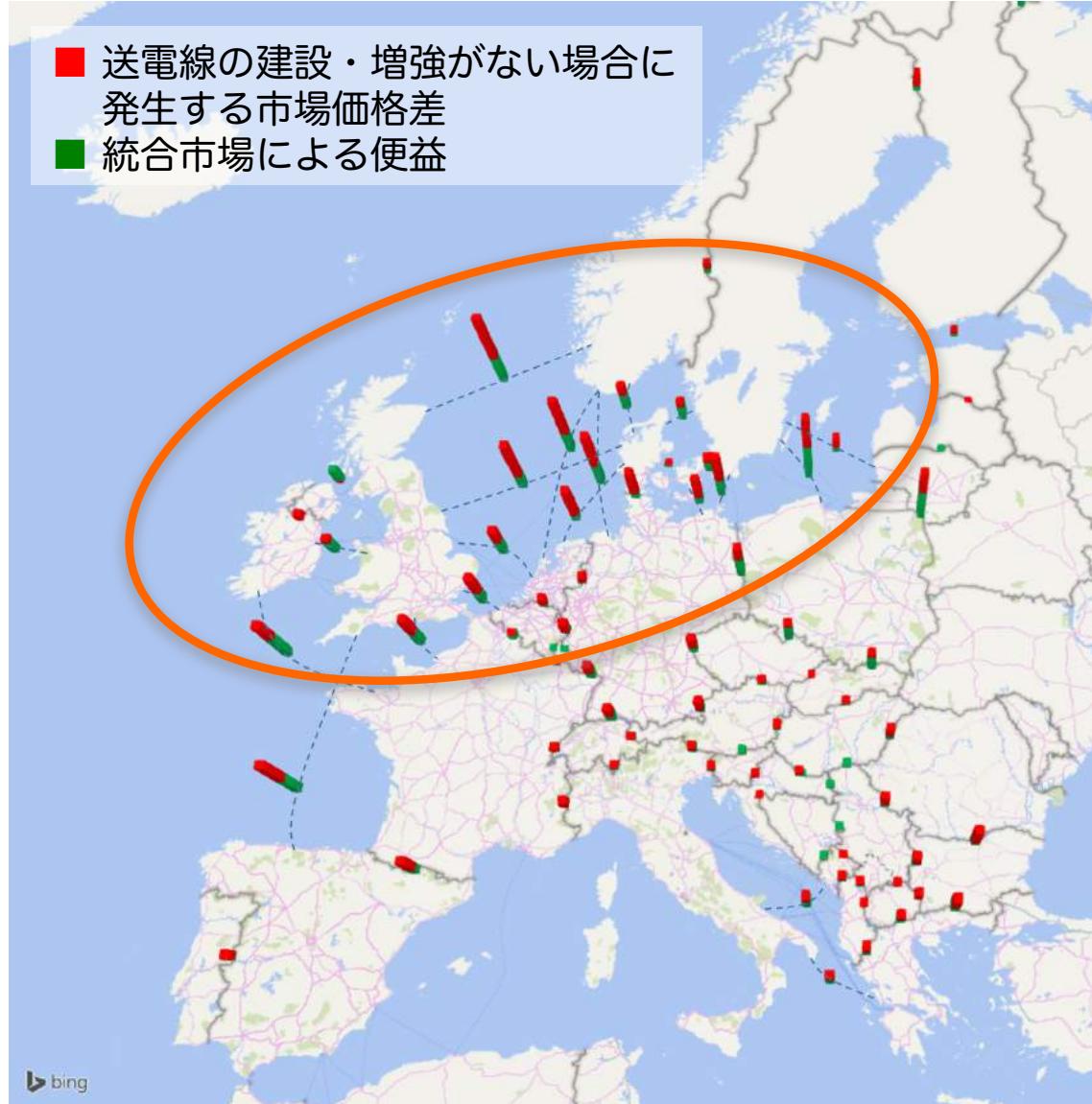
+ EUの共通利益プロジェクト (PCI)

- 欧州の政府に相当する欧州委員会が主導
- EU Decision
「汎欧州エネルギーネットワークのガイドライン」(2006)
- 欧州の送電線・ガスパイプラインの優先順位を決定
- 費用便益分析



(出典) European Commission: Projects of Common Interest – Interactive Map
http://ec.europa.eu/energy/infrastructure/transparency_platform/map-viewer/

ENTSO-E TYNDP2016



20

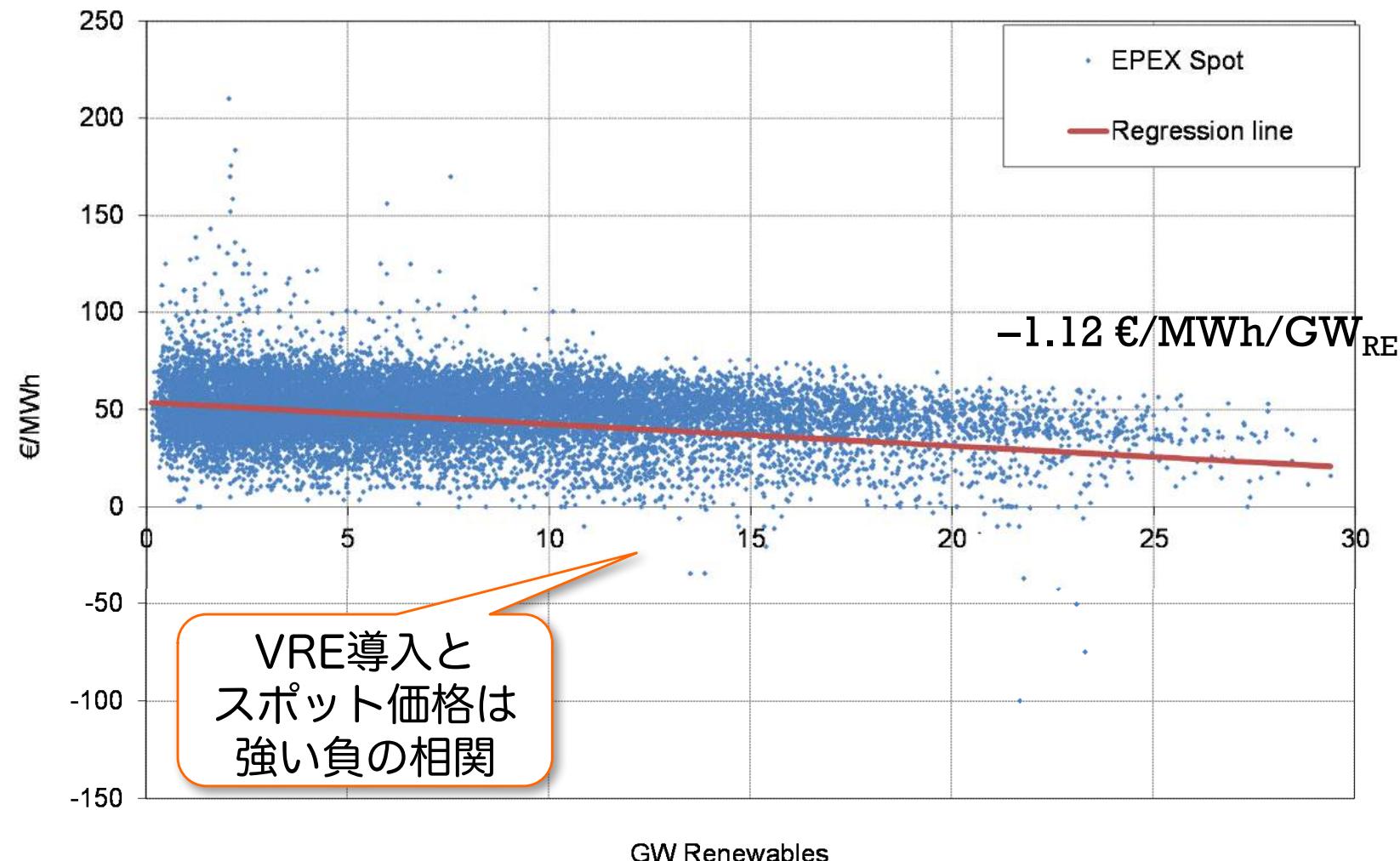
■ TYNDP2016

- 2016年12月に公表
- 2030年までに欧洲全域で約200件の送電線計画
- その多くが北海・バルト海のオフショアグリッド

(出典) ENTSO-E: "Ten Year Network Development Plan 2016" (2016)

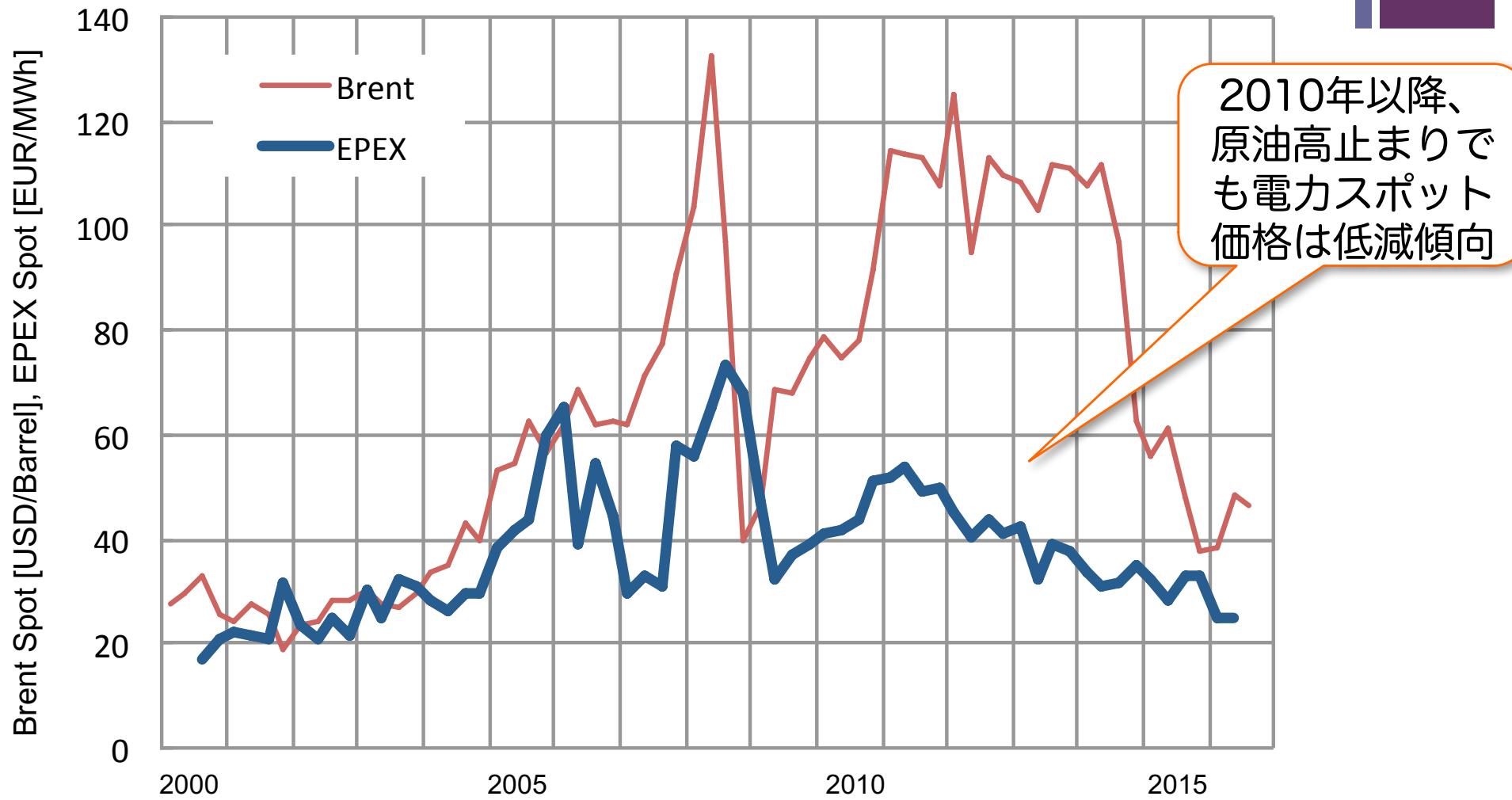


再エネ大量導入とスポット価格下落



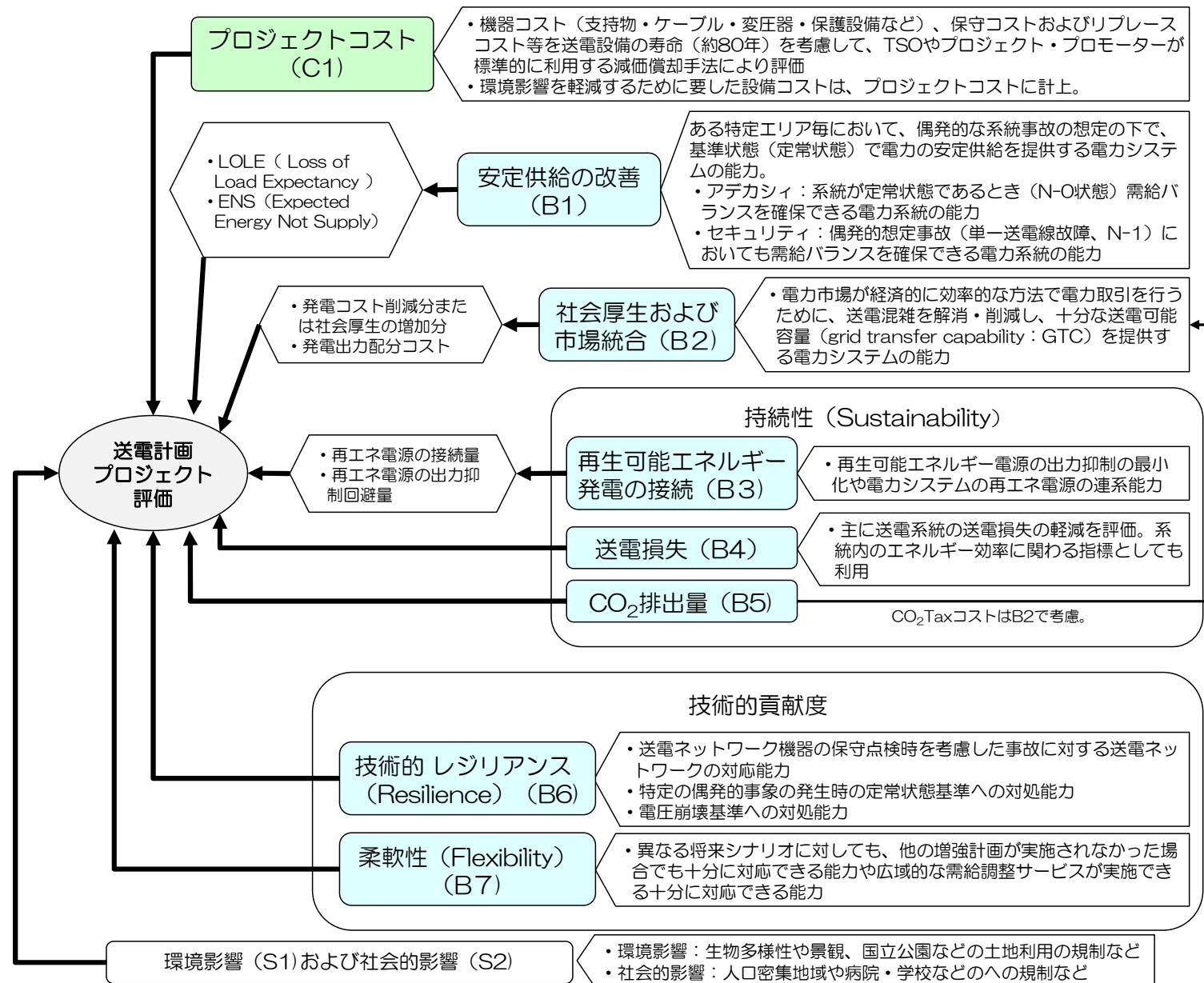
(source) J. Cludius et al: The Merit Order Effect of Wind and Photovoltaic Electricity Generation in Germany 2008-2012, Centre for Energy and Environmental Market (2013)

+ 再エネ大量導入による 欧州電力市場の卸価格の推移



(データソース) U.S. Energy Information Administration (EIA): Petroleum & other liquid
および European Power Exchange (EPEX): KWK Price より筆者作成

+ TYNDPの費用便益分析の手法



(出典) 岡田, 丸山:
「欧州における発送電分離後の送電系統増強の仕組みとその課題」,
電力中央研究所報告
Y14019 (2015)

+ TYNDPの費用便益分析の手法

比較項目	指標	単位	対象範囲	評価結果		
				区分1	区分2	区分3
C1 プロジェクトコスト	総プロジェクトコスト	ユーロ	プロジェクト	10億ユーロ以上 (Light green)	3億ユーロ～10億ユーロ (Green)	3億ユーロ以下 (Dark green)
B1 安定供給の改善	LOLE	時間 または MWh	国別	安定供給に支障が発生し ない場合 (Light green)	年間3TWh以上の電力需 要の年間電力消費量の 0.001%以上 (Green)	年間3TWh以上の電力 需要の年間電力消費量 の0.01%以上 (Dark green)
	ENS	MWh				
B2 社会厚生および市場 統合	発電コスト削減分または 社会厚生の増加分	ユーロ	EU大	年間で3億ユーロ未満 (Light green)	年間で3億ユーロ～ 10億ユーロ (Green)	年間で10億ユーロ以上 (Dark green)
	域内の配分コスト	ユーロ	国別			
B3 再生可能エネルギー 発電の接続	再エネ電源の接続量	MW	EU大	100MW未満の系統の直接 接続、あるいは再エネ電 源出力増加の許容値が 50GWh未満 (White)	100MW～500MWの系統 の直接接続、あるいは再 エネ電源出力増加の許容 値が50GWh～100GWh (Light green)	500MW以上の系統の直 接接続、あるいは再工 ネ電源出力増加が 300GWh以上 (Dark green)
	再エネ電源の出力抑制回 避量など	MW	EU大			
B4 送電損失	送電損失	MWh	EU大	送電ネットワーク内の送 電損失量が増加 (Red)	ある送電ネットワーク状 態のみで送電損失が減少 (Whit)	送電ネットワーク内の 送電損失が減少 (Light green)
B5 CO2排出量	CO2排出量	tons	EU大	CO ₂ 排出量への効果なし (Whit)	年間CO ₂ 排出削減量が 500キロトン未満 (Light green)	年間CO ₂ 排出削減量が 500キロトン以上 (Dark green)
B6 技術的 レジリエンス (Resilience)	KPI (Key Performance Index)	0, +, ++		KPIが0の場合 (Whit)	KPIが3+以下の場合 (Green)	KPIが3+超過の場合 (Dark green)
B7 柔軟性 (Flexibility)	KPI (Key Performance Index)	0, +, ++		KPIが0の場合 (Whit)	KPIが3+以下の場合 (Green)	KPIが3+超過の場合 (Dark green)

(出典) 岡田, 丸山: 「欧州における発送電分離後の送電系統増強の仕組みとその課題」 ,
電力中央研究所報告 Y14019 (2015)

+ TYNDPの費用便益分析例 1

General CBA Indicators

Delta GTC contribution (2020) [MW] DE-NO: 1400

NO-DE: 1400

Delta GTC contribution (2030) [MW] DE-NO: 1400

NO-DE: 1400

Capex Costs 2015 (M€)
Source: Project Promoter 1850

Cost explanation

S1 50-100km

S2 Negligible or less than 15km

B6 +

B7 ++



Scenario specific CBA indicators	EP2020	Vision 1	Vision 2	Vision 3	Vision 4
B1 SoS (MWh/yr)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
B2 SEW (MEuros/yr)	110 ±20	100 ±10	100 ±20	120 ±10	70 ±10
B3 RES integration (GWh/yr)	100 ±20	220 ±170	<10	890 ±180	350 ±70
B4 Losses (GWh/yr)	350 ±35	350 ±35	350 ±35	350 ±35	350 ±35
B4 Losses (Meuros/yr)	15 ±1	19 ±2	16 ±2	21 ±2	23 ±3
B5 CO2 Emissions (kT/year)	-400 ±80	±100	-500 ±500	-700 ±100	-100 ±800

+ TYNDPの費用便益分析例 2

General CBA Indicators

Delta GTC contribution (2020) [MW] DE intern: 5750

DE intern: 5750

Delta GTC contribution (2030) [MW] DE intern: 5750

DE intern: 5750

Capex Costs 2015 (M€)
Source: Project Promoter

7000 ± 1000

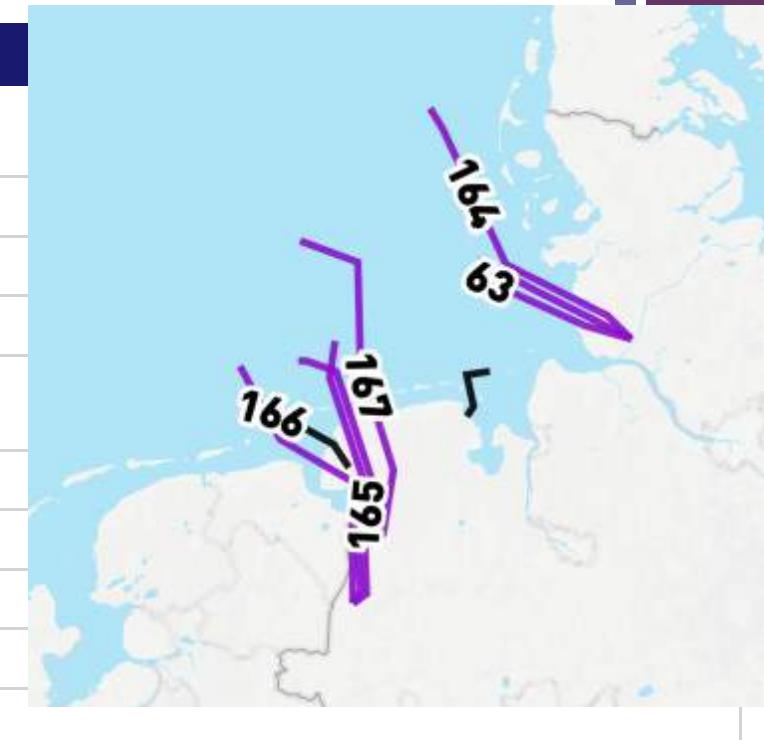
Cost explanation

S1 More than 100km

S2 Negligible or less than 15km

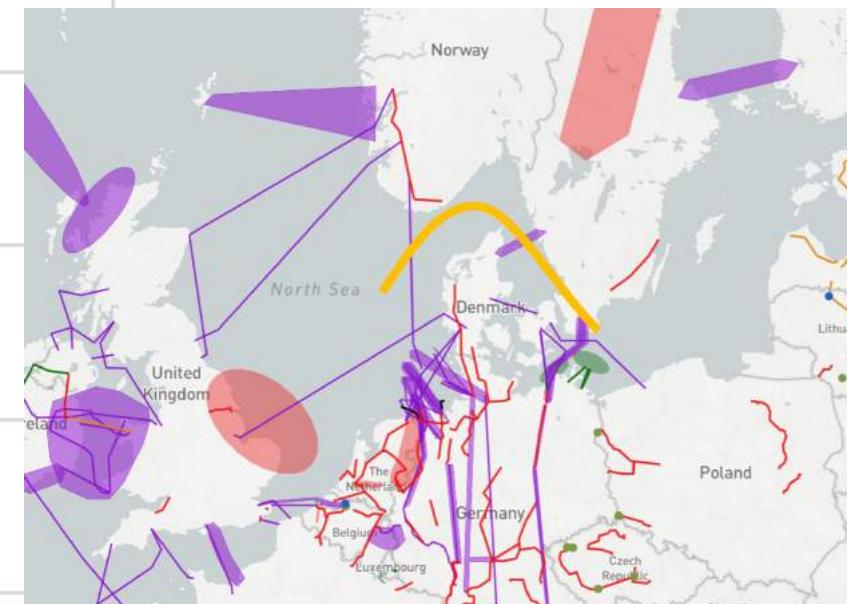
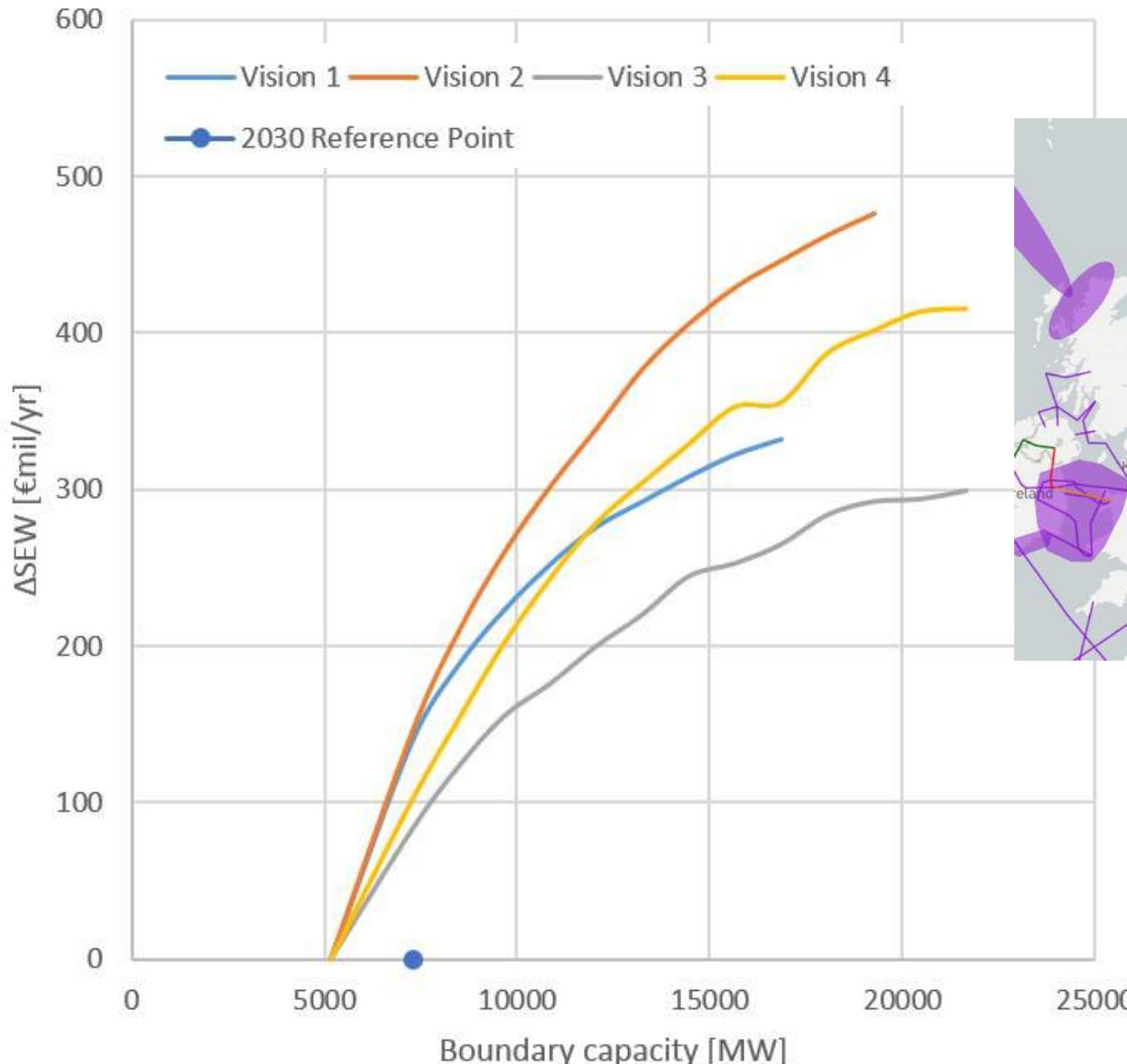
B6 +

B7 +



Scenario specific CBA indicators	EP2020	Vision 1	Vision 2	Vision 3	Vision 4
B1 SoS (MWh/yr)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
B2 SEW (MEuros/yr)	670 ± 140	1220 ± 90	1060 ± 80	1350 ± 70	1520 ± 90
B3 RES integration (GWh/yr)	15550 ± 3110	20640 ± 10	20650 ± 20	19200 ± 150	20180 ± 70
B4 Losses (GWh/yr)	550 ± 55	925 ± 92	1000 ± 100	1300 ± 130	1825 ± 182
B4 Losses (Meuros/yr)	23 ± 3	50 ± 5	46 ± 5	77 ± 8	122 ± 13
B5 CO2 Emissions (kT/year)	-12200 ± 1830	-11700 ± 200	-15800 ± 2000	-7300 ± 1000	-8400 ± 1300

+ TYNDPの費用便益分析例

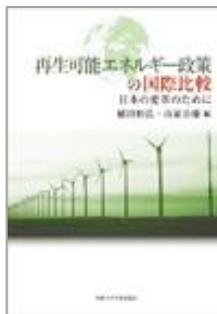


(出典) ENTSO-E: “Ten Year Network Development Plan 2016” (2016)

- なぜ世界中で再エネが促進されるのか？
 - かけた費用に対して便益が大きいから
- 電力自由化/発送電分離後の送電系統
 - 送電会社は中立なインフラ会社に
 - 電力消費が減る中で電力流通は増加
- ENTSO-Eの系統開発10ヶ年計画 (TYNDP)
 - 複数のシナリオ
 - 費用便益分析
 - 200もの送電線増強・新設プロジェクトの正当性



本日の参考文献



- 安田陽: 「世界の再生可能エネルギーと電力システム: 風力発電編」, インプレスR&D (2017)
- 安田陽: 「日本の知らない風力発電の実力」, オーム社 (2013)
- 植田和弘・山家公雄編: 「再生可能エネルギー政策の国際比較」, 京都大学学術出版会 (2017)
- 安田陽: 風力発電大量導入を実現する電力システムとは, 太陽エネルギー, Vol.41, No.4, pp.25-32 (2015)
- T. アッカーマン編著, 日本風力エネルギー学会訳: 「風力発電導入のための電力系統工学」, オーム社 (2013)



再エネと送電網の費用便益分析 ～欧州ではなぜ系統整備が 進むのか～

ご清聴有り難うございました。

yasuda@mem.iee.or.jp

公開シンポジウム

北海道の
自然エネルギー
拡大に向けた
電力システムの発展
—欧州の事例から—