

2024年8月22日



Tokyo Tech



Tokyo Tech

直流送電と広域系統連系の国内外の動向

分山達也

東京工業大学環境・社会理工学院 准教授

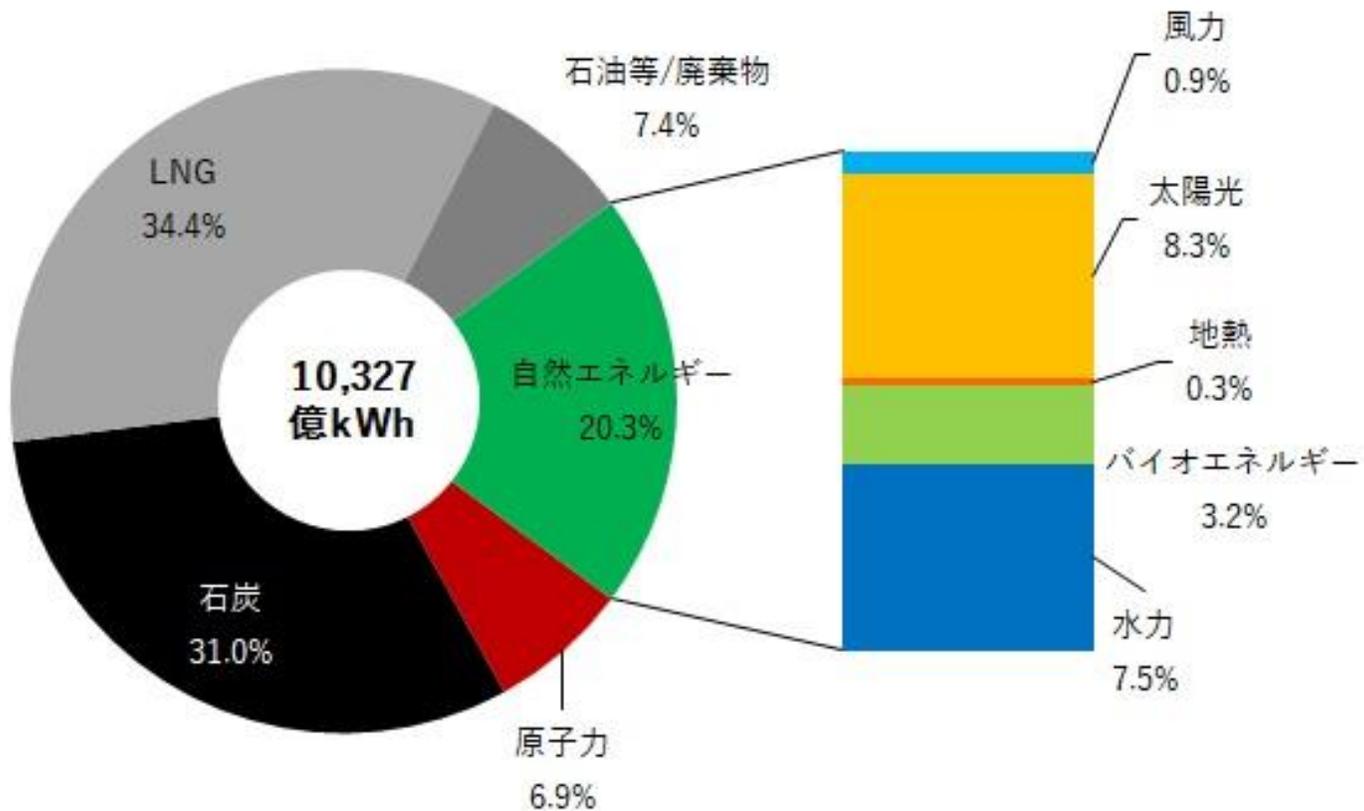
wakeyama.t.aa@m.titech.ac.jp

日本の発電電力量の構成（2021年度）

- 電力の約20%を自然エネルギーから供給している。

< 2021年度（速報値） >

更新日：2022年12月6日



出典：経済産業省資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」より作成。

日本のエネルギー需給の見通し

- 再生可能エネルギーの導入拡大は実現できる？

2030年度の発電電力量・電源構成

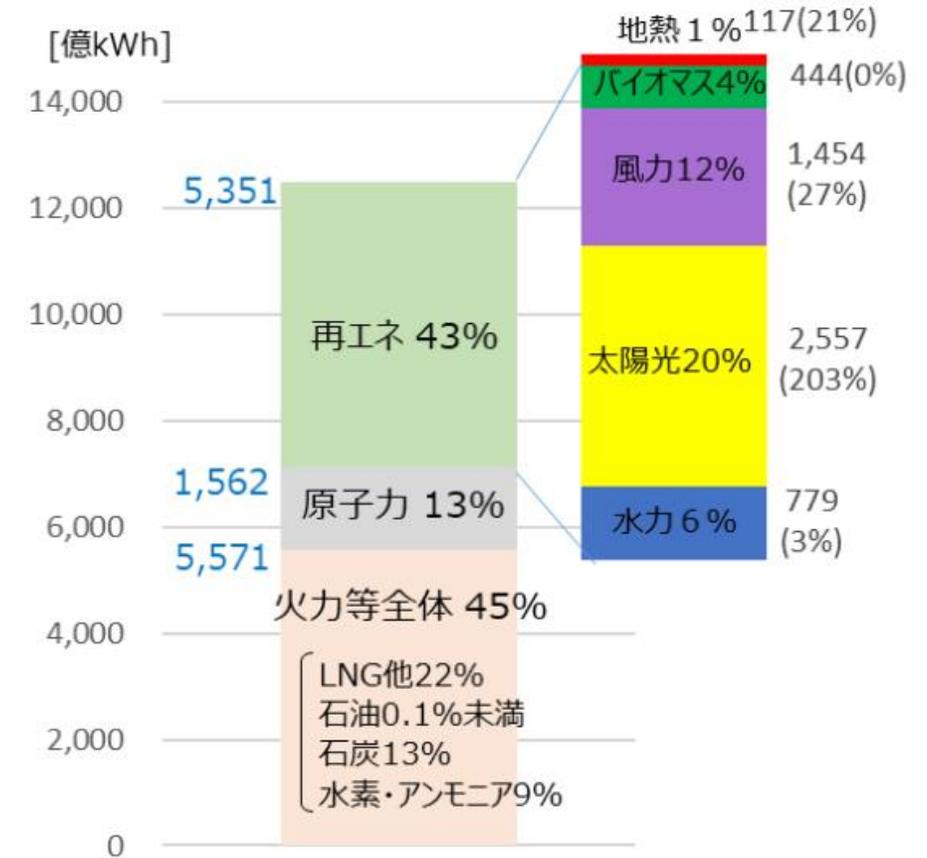
[億kWh]	発電電力量	電源構成
石油等	190	2%
石炭	1,780	19%
LNG	1,870	20%
原子力	1,880~2,060	20~22%
再エネ	3,360~3,530	36~38%
水素・アンモニア	90	1%
合計	9,340	100%

※数値は概数であり、合計は四捨五入の関係で一致しない場合がある

[億kWh]	発電電力量	電源構成
太陽光	1,290~1,460	14%~16%
風力	510	5%
地熱	110	1%
水力	980	11%
バイオマス	470	5%

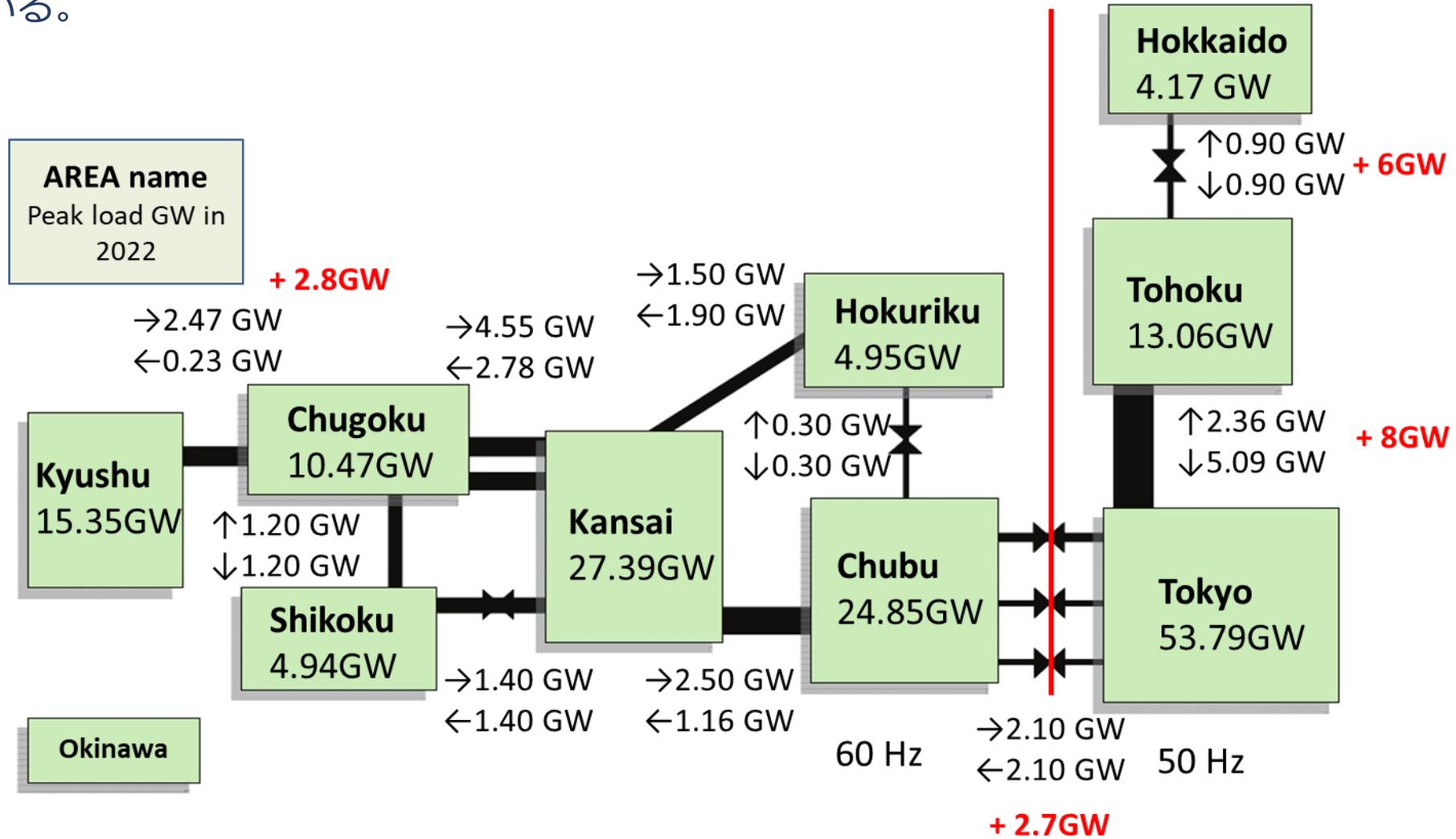
※数値は概数。

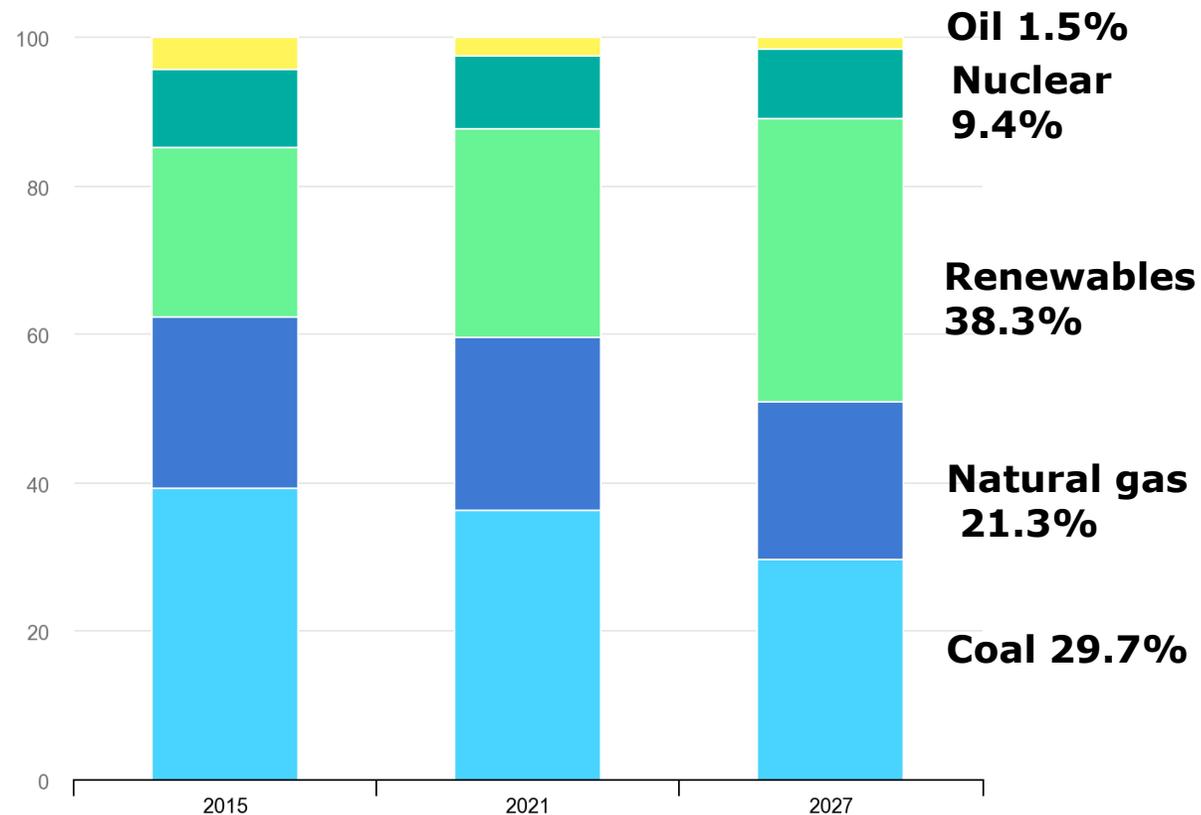
2050年度の電源構成の見通し



国内の連系線増強

- 北海道～東北～東京間の日本海海底ケーブルルート 2 GWの地域間連系線増強の費用便益分析等が実施されている。





- 世界の発電電力量において太陽光や風力など再生可能エネルギーが2025年に石炭を抜いて最大の電源になる見通し。
- 再生可能エネルギーは主力電源の一つとなっている。

Global electricity generation by technology, 2015, 2021 and 2027

欧州の動き – 将来シナリオに関する議論

- 欧州の2040年のシナリオでは電力需要比で52%を風力, 20%を太陽光で賄う見通し。
- 再エネの大幅な利用を前提に、どうやって増やしていくのかの議論が行われている。

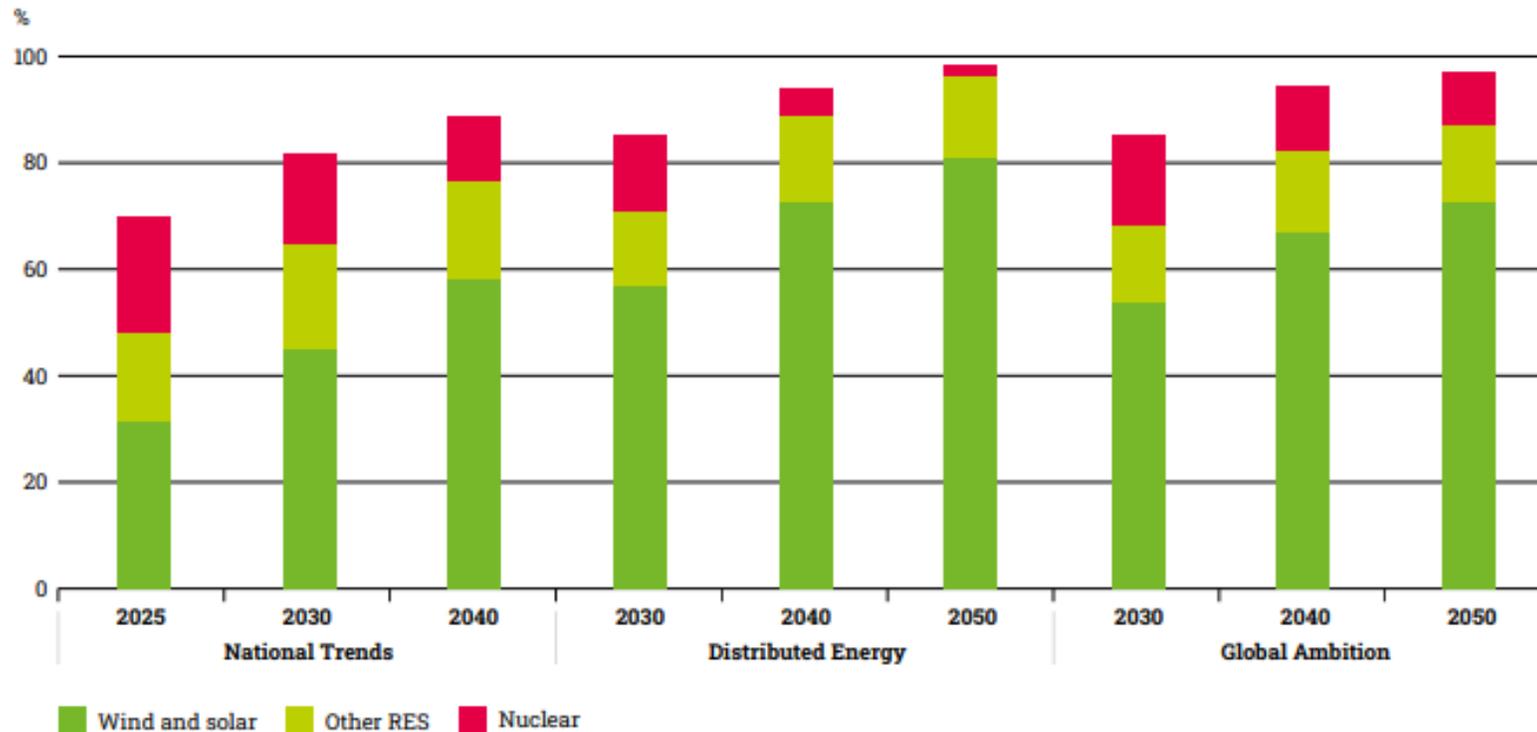


Figure 23: Share of electricity demand covered by low carbon generation in EU27

Source: https://2022.entsos-tyndp-scenarios.eu/wp-content/uploads/2022/04/TYNDP2022_Joint_Scenario_Full-Report-April-2022.pdf

欧州における国際的な系統整備の経緯

欧州における同期連系地域の拡大

- 国際的な送電線の建設は1910年ごろから始まり、北欧では1915年にデンマークとスウェーデンが、欧州大陸では1921年にフランスからスイスを経由してイタリアがつながった（水力の活用）。
- 中欧・西欧地域や北欧地域のように、各地域において同期連系地域が拡大した。各地域では、系統運用者による協調機関が設立。

年	協調機関の設立内容等
1951	UCPTE（ベルギー、西ドイツ、フランス、イタリア、オーストリア等）が設立。その後周辺国と共に拡大。（1999年にUCTEに再編）
1963	NORDEL（ノルウェー、スウェーデン、デンマーク、フィンランド、アイスランド）設立
1986	UCPTEがスカンディナヴィア諸国や英国と直流送電によって連系
1999	英国の系統運用者の協調機関であるUKTSOAが設立
1999	アイルランドと北アイルランドの系統運用の協調のためATSOIが設立
2006	バルト三国の系統運用の協調のためBALTSOが設立

欧州の単一エネルギー市場創設

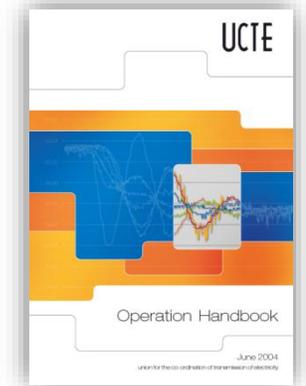
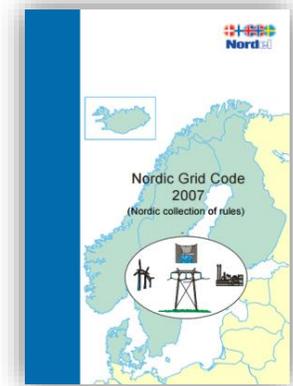
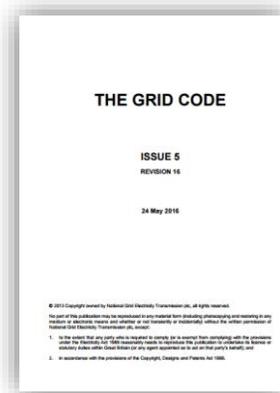
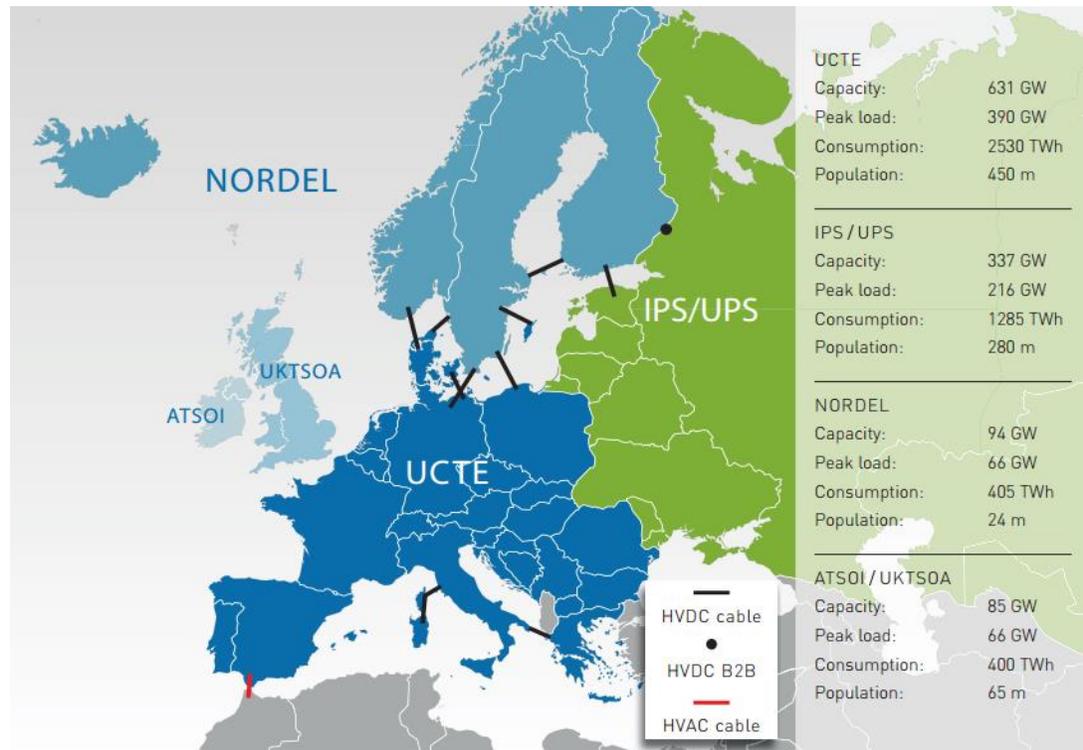
- 背景：欧州共同体（European Communities）、欧州石炭鉄鋼共同体（ECSC）、欧州原子力共同体（EAEC）、欧州経済共同体（EEC）が1993年のマーストリヒト条約により欧州共同体（EC）に改称され、欧州連合（EU）が発足。交通、エネルギー、通信の3つのインフラの統合を目指す。
- 域内のエネルギー統一内部市場構想は1987年に提唱され、1996年以降3次にわたるEU指令・規制に基づく電気事業制度改革を実施。EU域内単一エネルギー市場創設へむけた電力セクター改革、小売自由化、送配電網の開放（Third party access）、送配電のネットワーク部門の所有権分離（または機能分離）等が実施された。
- 2009年7月に発効された第3次電力指令ではAgency of the Cooperation of the Energy Regulators (ACER)とEuropean Networks of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E)が設立された。
- ACERの役割：電力国際取引に関連する市場枠組みのガイドライン、Network Codes (系統連系技術要件)の策定、各国の規制機関と共に領域レベルでの統一市場に向けた取り組みの促進、EUにおける送電網インフラ形成や電力取引による損失などをカバーする仕組みの確立に関する活動、市場監視など。
- ENTSO-Eの役割：Network Codes(系統連系技術要件)の策定、汎欧州送電網整備計画（TYNDP）の策定、系統運用者（TSO）間の技術協力の推進、アデカシー評価、TSO間のR&D計画の協調等。

参考：第一次～第三次欧州電力指令

第一次欧州電力指令1996年 Directive 96/92/EC	第二次欧州電力指令2003年 Directive 2003/54/EC	第三次欧州電力指令2009年 Directive 2009/72/EC
大口消費者への小売り自由化	2007年までの小売全面自由化	消費者の権利の強化
送配電部門の会計分離	送配電部門の法的分離	所有権分離、ITO、ISO方式のいずれかによる送電部門の分離
送配電網の第三者への開放 (Third party access)	各国に独立規制機関の設置を義務付け	ACERとENTSO-Eの設立
	欧州各地域の市場統合 (EC) No 1228/2003	欧州単一市場統合 (EC) No 714/2009

連系線運用ルール国際協調

- 各同期エリア内（外）との国際連系線の運用ルールは、各Regional groupのGrid CodeやOperation hand bookに規定されている。これらは、加盟国間の合意（Multilateral agreement等）に基づいて運用されている。
- 同期エリアを越えたルール(Network code on HVDC) 策定をENTSO-eが主導。



欧州電力市場の連結 (European Market Coupling)

※前提としてEU 第一次電力指令 Directive 96/92/EC (1996 年)における送配電網のThird party access



1990s – NORD POOL



2006



2011



FEBRUARY 2014



MAY 2014



FEBRUARY 2015

各国際連系線では、相対取引向けの容量と市場取引向けの容量が分けて設定されている。

- 卸売電力市場取引 (前日スポット)
 - 入札エリアを越えて、各地の電力売買の入札の取引を成立させるために、連系線の利用可能量が活用されるため、入札者自身が連系線の容量を確保する必要はない。間接オークション (Implicit auction) と呼ばれる。
- 相対取引
 - 入札エリアを越える取引を行う場合、関係する連系線の容量をオークション (Explicit auction) 等によって確保する必要がある。
 - 入札エリア内の取引では連系線容量確保は不要。

参考：国際連系線の取引ルール

Regulation (EC) No 1228/2003

- 2003年の第2次電力指令を受け、EC regulation 1228/2003では、市場メカニズムを通じて送電網の利用の混雑の解消をすることを要求した。混雑発生に伴う優先的送電線の利用権をオークション (Explicit auction) 等の市場メカニズムを使って決定し、それを発電事業者や小売業者に売ることによって利益を得る。送電権の落札価格が送電線所有・運用者の収入となり、新規送電線建設の原資を回収する手立てとなる。

Commission decision 2006/770/EC

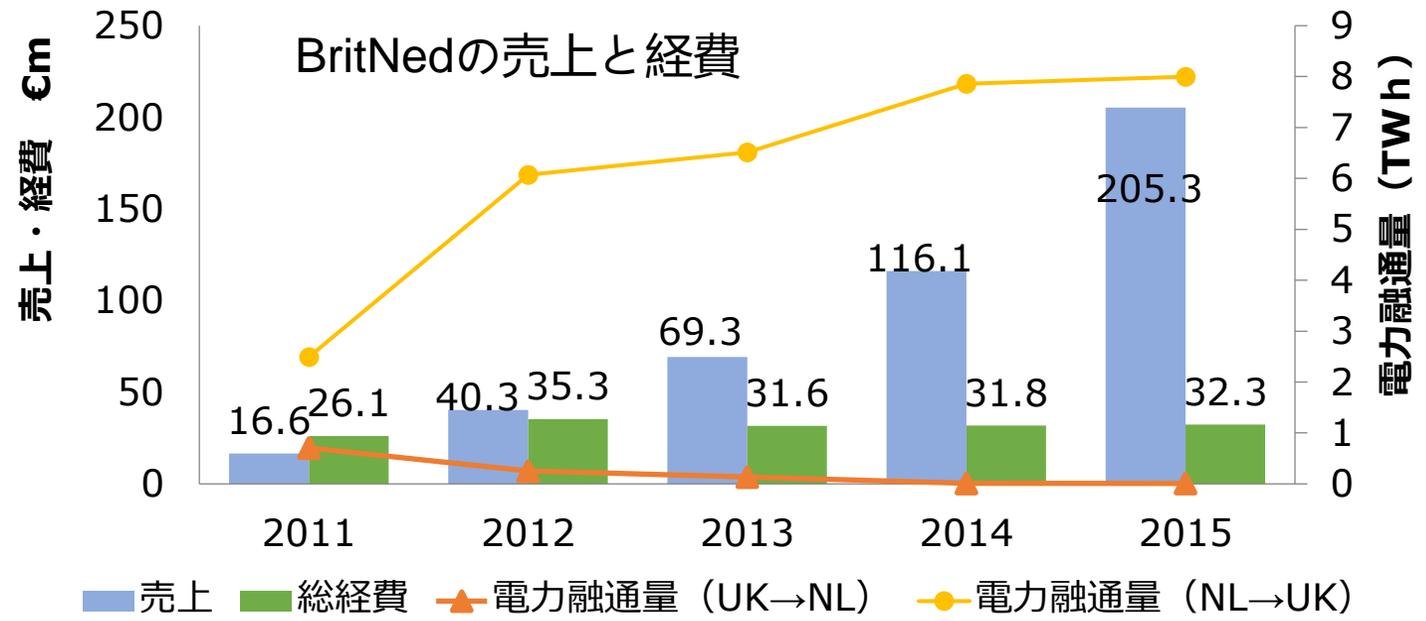
- 送電網利用の市場メカニズムとして、直接競売の送電権オークション (Explicit Auction) か、間接競売の送電権オークション (Implicit Auction) が適切であると決定した。

Regulation (EC) No 714/2009

- 全ての市場参加者に効率的な市場シグナルを送るために、非差別的な市場メカニズムを取り入れることといった明確な規定が成されている。
- 混雑収入は、実際の託送容量の保証、または、送電網整備の投資（特に新しい国際連系線への投資）という2つの目的以外に使わないことが決定された。

連系線の混雑と価格差

- 欧州では、全体の電力市場価格と連系線上の電力融通量を計算する共通のアルゴリズムを用いて各市場の連結を進めてきた。
- 連系線の運用を市場と連動させた間接オークション (Implicit auction) では、潮流が利用可能な送電容量の上限に達すると地域間で市場の価格差が生じる。価格差のある地域間で連系線を運用することで価格差から収入が生じる (混雑収入)。
- nationalgrid (英国) とTenneT(オランダ)の50 : 50の合弁会社であるBritNedでは、総事業費€600mに対して、2015年の売り上げが205€mに達している。



Source : BritNed, "Annual Report and Financial Statements For the year ended 31 December 2015" などより作成
<http://www.britned.com/~media/BritNed/Files/Finance/BritNed%20Development%20Limited%202015.pdf>

国際連系線の規制と投資スキーム

規制スキーム

- 規制スキームとは、送電線の開発者が、送電インフラに関するEUや関係する国の法律・規制の全てに従う代わりに、規制で許容されている報酬率（リターン）を受け取る。
- 規制を受けるため、規制料金で投資の回収が行なわれ、投資に対するリターンが確実に見えることがメリットとなる。
- TSOによって開発され、送電料金によってコスト回収を行う。

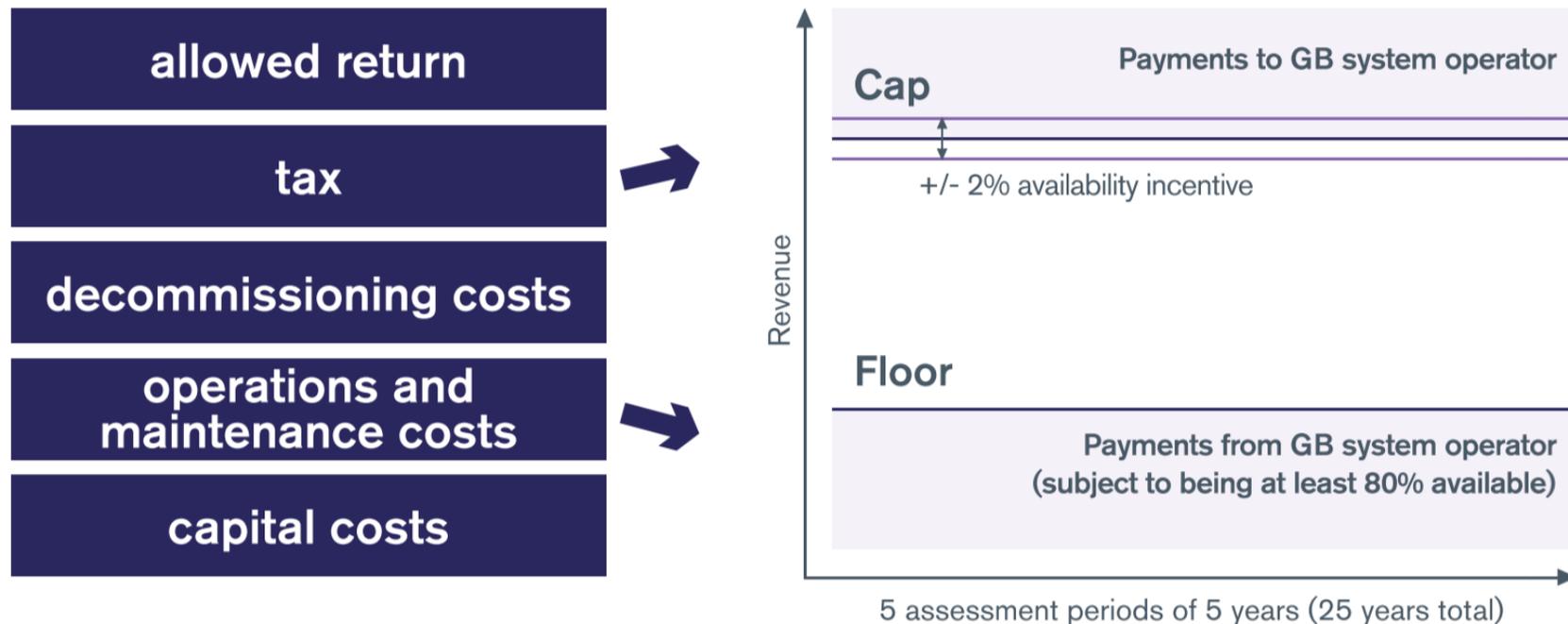
商用スキーム（マーチャント・スキーム）

- 英国で用いられるマーチャント・スキームは、送電線の開発者が、送電インフラに関するEUや関係する国の法律・規制の枠組み（第三者アクセスの規制や送電権からの収入に対する制限）から解放され、送電線の使用料金も事業者が独自に設定できる。
- 国際連系線のマーチャント事業開発者に対して、ある利用者との長期契約を結ぶ場合、連系線の設備容量の何割かを上限とする条項を免責条件として盛り込む。市場に開放する割合は総じて、長期契約に許された割合よりは低く、マーチャント線の事業者が、市場の状況に左右されない安定した収入を得られるように配慮されている
- 2003年の第2次指令以降は例外的なものとなっている。

Cap and Floor regime (2014)

- 商用スキームでは、EU規制からの免除を適用する必要があるが、BirdNed国際連系線のケースでは、欧州委員会から免除の条件として収入のキャップを設定することが求められた。
- Cap and Floor スキームでは、収入上限（Cap）と収入の下限（Floor）が Ofgem（英国の規制機関）によって設定され、もし送電事業者の収入がこの上限を超えた場合は、その超えた分がそのまま需要家に還元される。逆に収入が下限を下回ってしまった場合は、需要家が下限レベルに達するまでの収入を埋め合わせる。

Cap and floor building blocks



汎欧州エネルギーネットワーク戦略

- 汎欧州エネルギーネットワーク戦略

Trans-European Networks (TEN-E) strategy

- 欧州の統一内部市場の創設と経済的、社会的な統合の強化を目指して、欧州全体の利益となる国際連系ルートを指定し、EUによる支援を実施する。

- 国際連系の増強目標 Electricity interconnection target

- 2002年に合意され、各国において発電設備容量の2020年に10%、2030年には15%をこえる国際連系設備の整備の目標を設定し、TYNDPなどを策定。目標自身も更新されている。

- 10 年ネットワーク開発計画 Ten-year Network Development Plan: TYNDP

- 個別の系統増強プロジェクトの費用便益分析を行う。

- 共通利益プロジェクト PCIs: Projects of common interest

- 優先度の高い系統増強プロジェクトはEU財政支援が与えられる。

10 年ネットワーク開発計画 (TYNDP)

- ENSTO-eによって、TEN-E事業の推進のために必要な系統拡大計画の概要が整理される。各プロジェクトにおけるコスト便益の分析が含まれる。PCIs選定のよりどころとなる。

4.3 Main Bottleneck locations and typologies

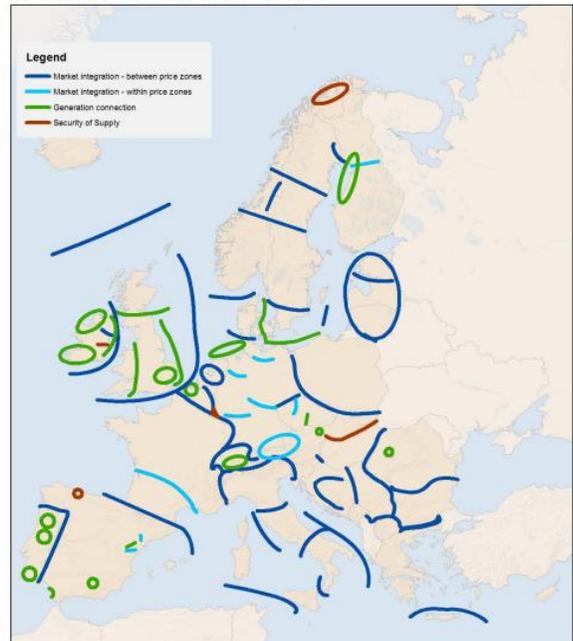
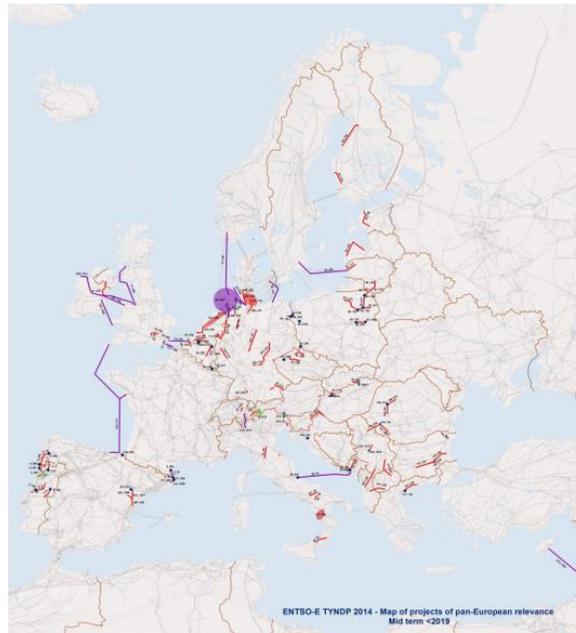
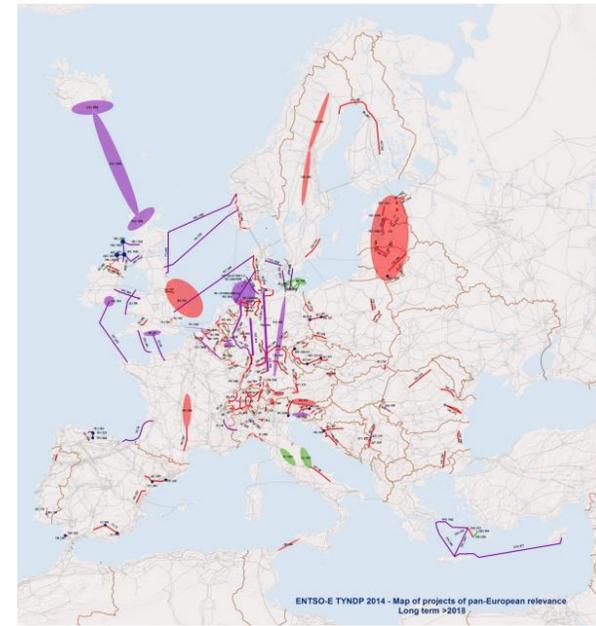


Figure 4-2 Map of main bottlenecks in the ENTSO-E perimeter



ENTSO-E TYNDP 2014 - Map of projects of pan-European relevance Mid term <2019

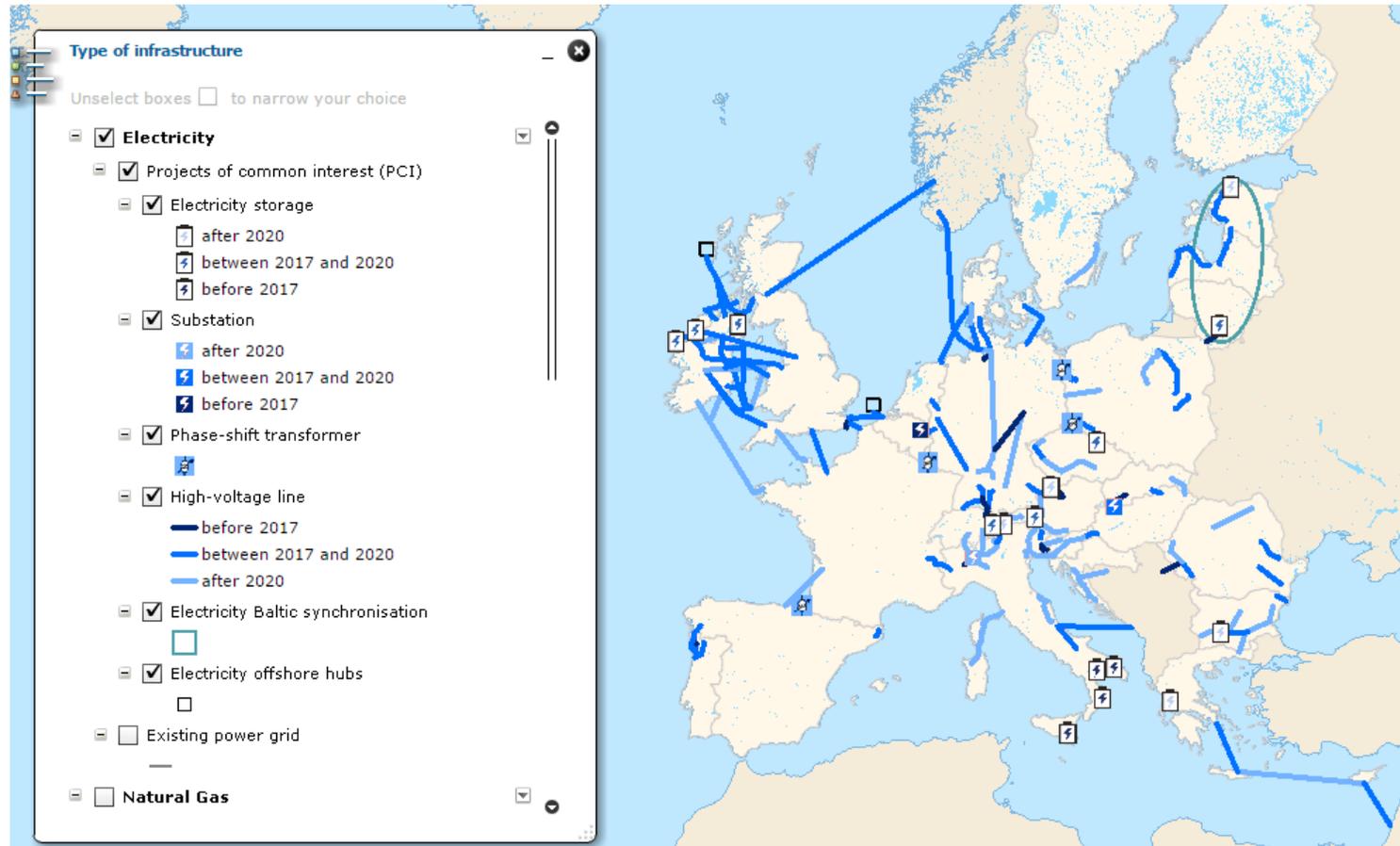


ENTSO-E TYNDP 2014 - Map of projects of pan-European relevance Long term >2019



共通利益プロジェクト (PCI s)

- PCI に選ばされると、1)許認可プロセスの効率化、2)規制の枠組みの改良、3) Connecting Europe Facility (CEF) からの助成、を受けることが可能となる。助成金は調査費や建設費の50%が上限となっている。



国際連系線の費用負担

- 連系線が直接結ばれる二国間で50 : 50 の費用負担が原則。
- しかし、二国間の電力価格や電源のCO₂ 排出量などを総合的に勘案すると、どちらかの国が、もう一方の国よりもより多くの便益を得ることになる。
- そこで2013 年EIR (TEN-E ガイドライン) では、生じる便益を鑑みて、それが大きい方が多くの費用負担をすべきという費用負担の原則が明確にされた。
- 国際連系事業のプロセスでは、1) 当事国二国の規制を協調させ、2) 国際連系線の位置を定め、3)最後に二国間での費用負担を決める。
- 費用負担の算定には、ENTSO-E のTYNDP のCBA が用いられる。
- 最後の費用負担の決定は困難になりがちなので、二国間で費用負担の合意が得られない場合には、ACER が介入することも決定された。この場合ACER はまず、二国間の交渉を促し、それでも決しない場合は、最終の費用負担を決定する権限を与えられている。

主な評価項目	内容
安定供給の改善 Improved Security of Supply	通常的环境下で、電力システムが適切で安定した電力の供給を提供することが出来る能力
社会的・経済的福祉または 市場の統合 Scio-economic Welfare	電力システムが、混雑を削減できる能力、つまり、経済的に効率のよい方法市場が電力を取引できるような適切なGTC (Grid Transfer Capability) を提供できる能力
再生可能エネルギー統合 RES Integration	電力システムが、出力制御や解列を最小化しながら、新規の再生可能エネルギーや将来のグリーン電源を接続できる能力
損失変動 Variation in losses	電力システムにおける、熱損失の変遷で、エネルギー効率の指標で、SEW とも相関
CO2 排出量の変動 Variation in CO2 Emissions	電力システムのCO2 排出量の変遷で、B3 の結果
技術的な弾性・システムの安全性 Technical Resilience/ System Safety	電力システムが、ますます極端になっていく状況で、絶えうる能力
柔軟性 Flexibility	提案されている送電網の強化が、電力取引やバランシング・サービスを含めて、こういった将来の開発経路やシナリオに適切に適応できるか、の能力
総事業コスト Total Project Expenditures	TSO 各社管轄区域内における、大まかな、しかし送電線の長さなどで一貫した事業コスト

この他に周辺環境、住民への影響や託送能力について評価を行う。

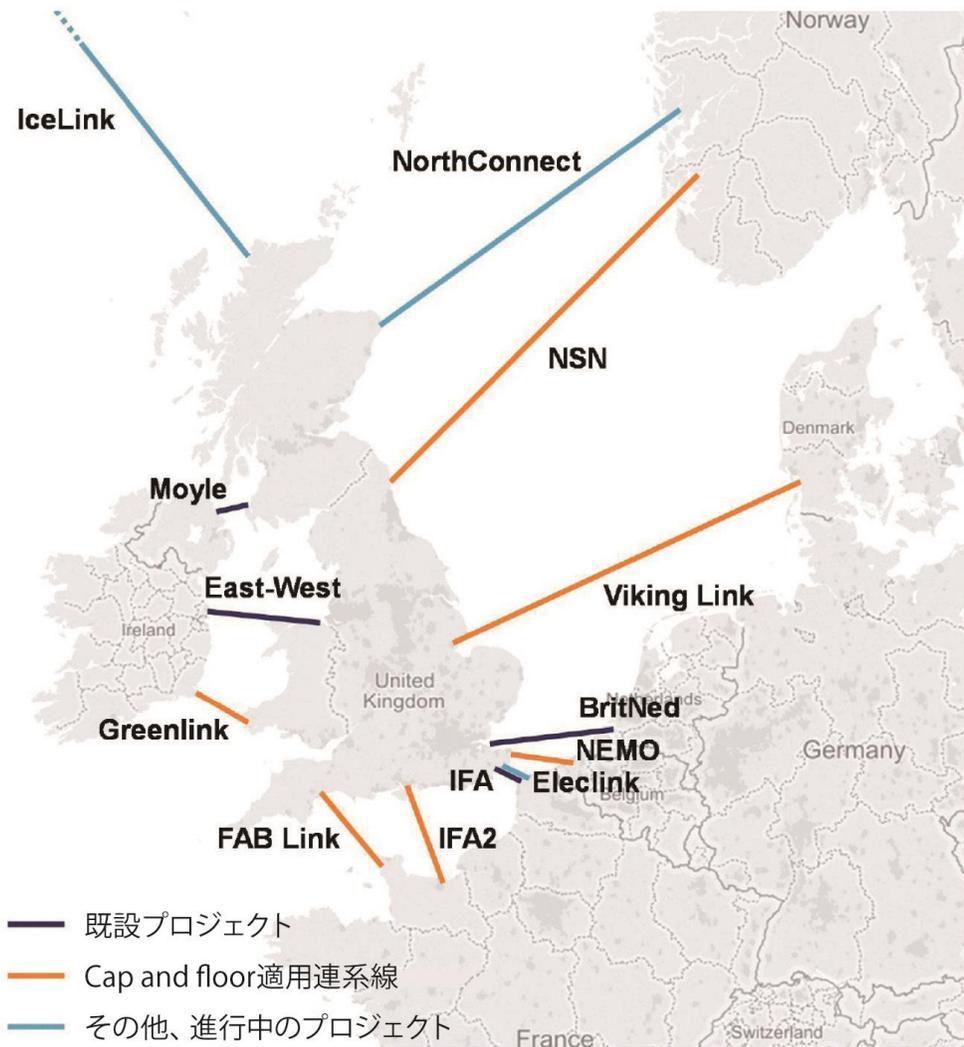
各国の課題と連系線による便益

- ・ 欧州全体では広域運用による電源の効率的運用、欧州電力市場統合、自然エネルギーの統合に向けて国際連系が進められている。各国では、電源構成や課題を背景に、それぞれの国に応じた国際連系の便益を期待したプロジェクトが実施・計画されている。

表 国際連系によって各国に期待されている主な便益（HVDCケーブルの事例）

国	課題	相手国との連系によって期待される主な便益			
		英国	ノルウェー	デンマーク	オランダ
英国	火力や原子力発電の比率が高い。将来的なこれらの代替が課題。北欧、欧州大陸と比較して卸売電力価格が高い。	—	安価な水力 NSL	安価な余剰風力 Viking Link	安価な電力 BritNed
ノルウェー	98%の電力を水力によって供給。水力発電は非常に安価な一方で、渇水時の供給力確保が課題。	渇水時の供給力 NSL	—	渇水時の供給力 安価な余剰風力 Skagerrak	渇水時の供給力 安価な時間帯の ガス火力 NorNed
デンマーク	風力発電の最大出力は時間帯別で需要を上回る。風力発電利用の最適化が課題。	調整力向上 Viking Link	安価な水力 調整力向上 Skagerrak	—	調整力向上 COBRACable
オランダ	主に、ガスや石炭火力によって電力を供給している。周辺国（ドイツやフランス）と比較して卸売電力価格が高い。中継点としての役割も。	供給力向上 BritNed	安価な水力 NorNed	安価な余剰風力 COBRACable	—

国際連系線の拡大 (UK)



Great Britain's electricity market currently has 9.8GW of electricity interconnector capacity:

- 4GW to France (IFA, IFA2 and ElecLink)
- 1GW to the Netherlands (BritNed)
- 1GW to Belgium (Nemo Link)
- 500MW to Northern Ireland (Moyle)
- 500MW to the Republic of Ireland (East West)
- 1.4GW to Norway (NSL)
- 1.4GW to Denmark (Viking Link)

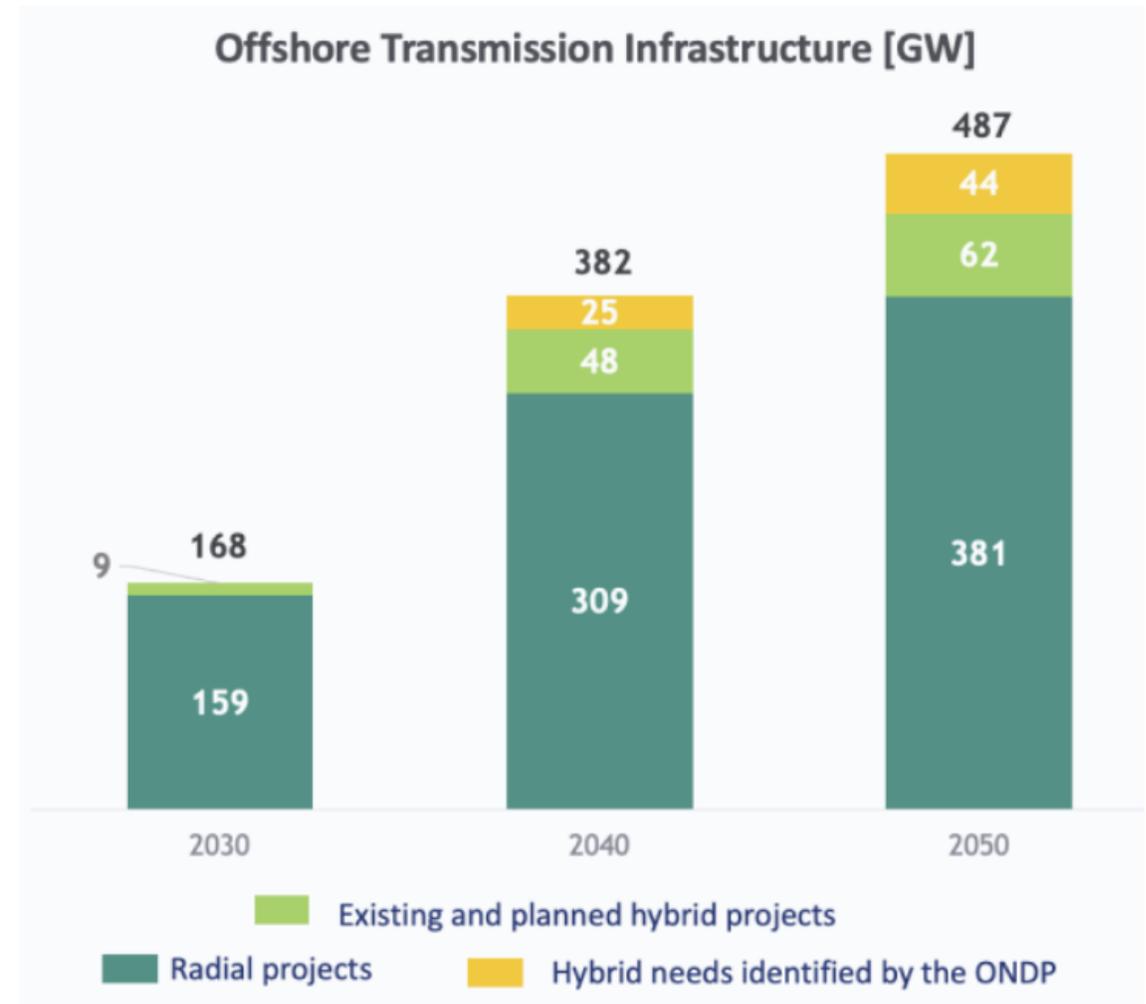
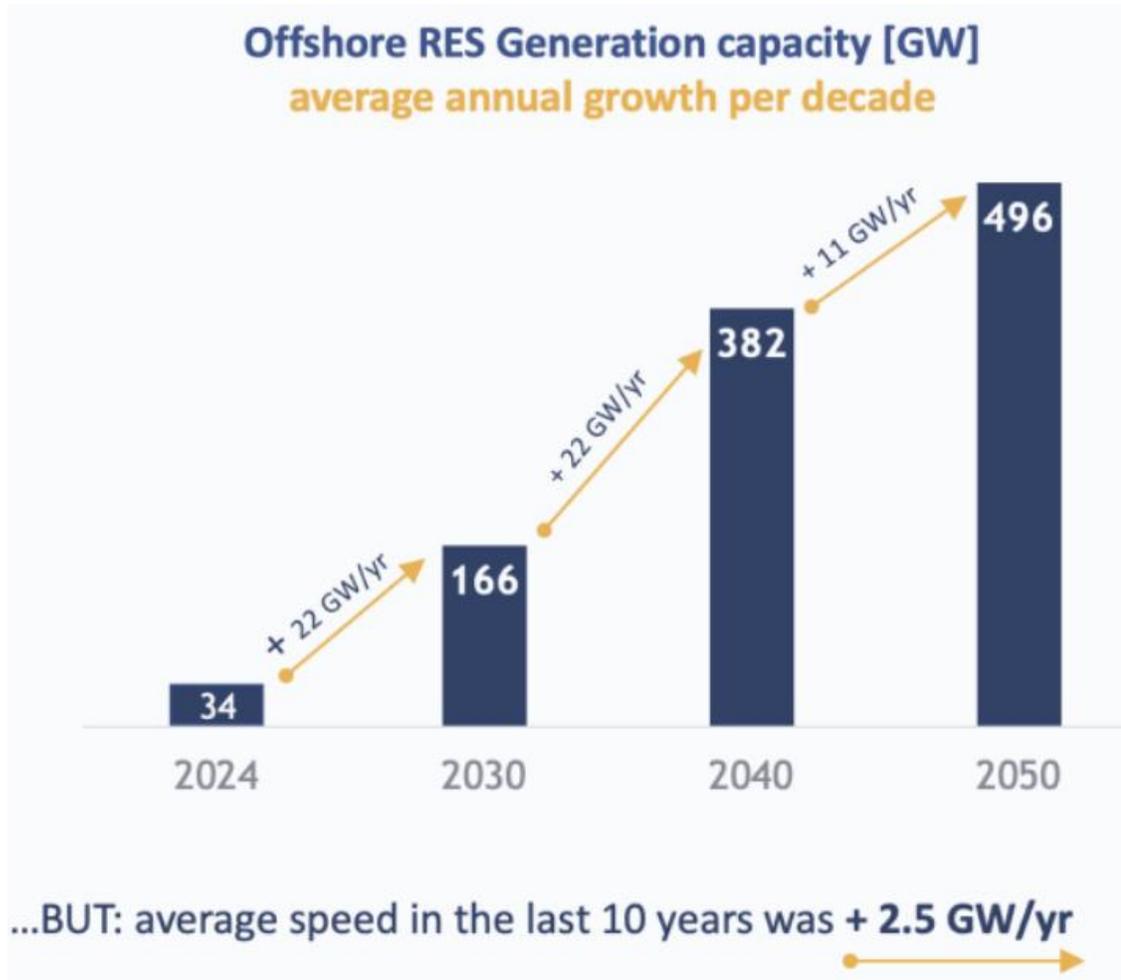
欧州における洋上風力ネットワーク開発計画

Offshore Network Development Plan (ONDP)

- オフショアネットワーク開発計画（ONDP）は、TEN-E規則（2022/869 EU規則第14.2条）によって義務付けられたTYNDPの新しい構成要素である。主に洋上風力開発目標に向けた洋上送電インフラのニーズに焦点を当てたもの。TYNDPと同様に洋上ネットワークインフラのニーズやコストを分析している。

Key messages

- 洋上風力開発目標に向けて大きな洋上送電インフラのニーズを明らかにしている。



Source: <https://www.entsoe.eu/outlooks/offshore-hub/tyndp-ondp/>

Offshore grid expansion model

Priority Offshore Grid Corridors

- 1 Northern Seas Offshore Grids (NSOG)
- 2 Baltic Energy Market Interconnection Plan (BEMIP offshore)
- 3 Atlantic Offshore Grids (AOG)
- 4 South and West Offshore Grids (SW offshore)
- 5 South and East Offshore Grids (SE offshore)

ENTSO-E Member
 ENTSO-E Observer Member

TEN-E Priority Offshore Grid Corridors	Countries involved
1. NSOG	BE, DK, FR, DE, IE, LU, NL, SE
2. BEMIP offshore	DK, EE, FI, DE, LT, LV, PL, SE
3. AOG	FR, IE, PT, ES
4. SW offshore	FR, GR, IT, MT, PT, ES
5. SE offshore	BG, CY, HR, GR, IT, RO, SI

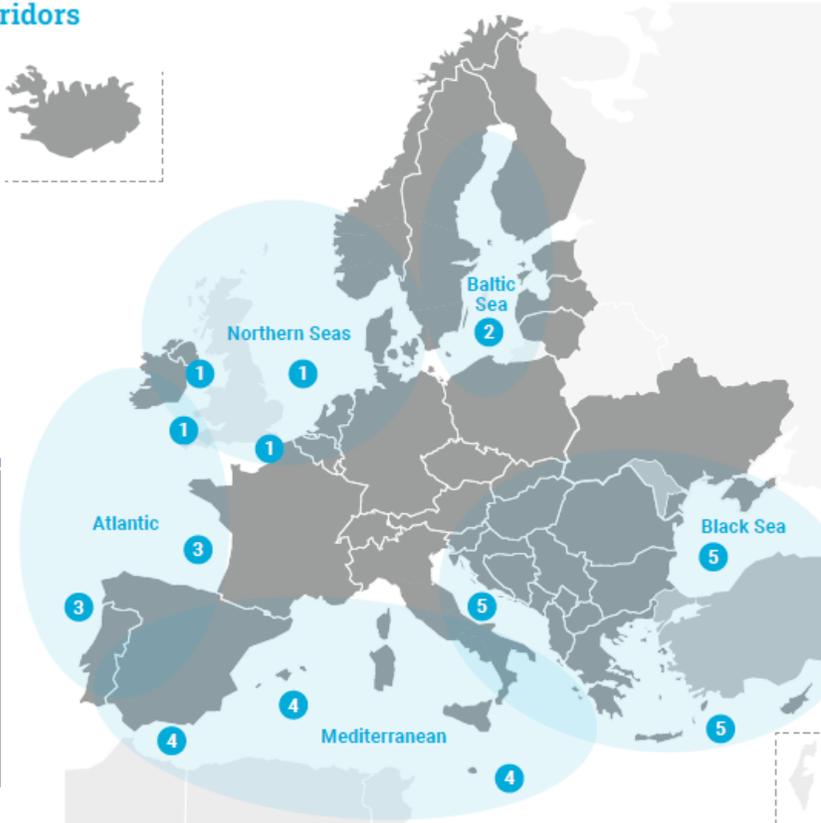


Figure 3 – TEN-E Priority Offshore Grid Corridors as laid down in Regulation (EU) 2022/ 869.

Zone \ Size of the RES cluster	Size of the RES cluster		
	Up to 1 GW	Between 1 and 2 GW	Above 2 GW
Zone I 0–22.2 km	HVAC	Single HVDC	Multiple HVDC (max size per connection, 2 GW)
Zone II 22.2–50 km	HVAC	Single HVDC	Multiple HVDC (max size per connection, 2 GW)
Zone III 51 km – EEZ border	Single HVDC	Single HVDC	Multiple HVDC (max size per connection, 2 GW)

Table 2 – Criteria for choosing the transmission technology to connect an Offshore RES cluster. Zones consider the distance-to-shore, while related cable lengths include the assumption of an additional 30 km onshore connection to a standard node.

Single or multi purpose

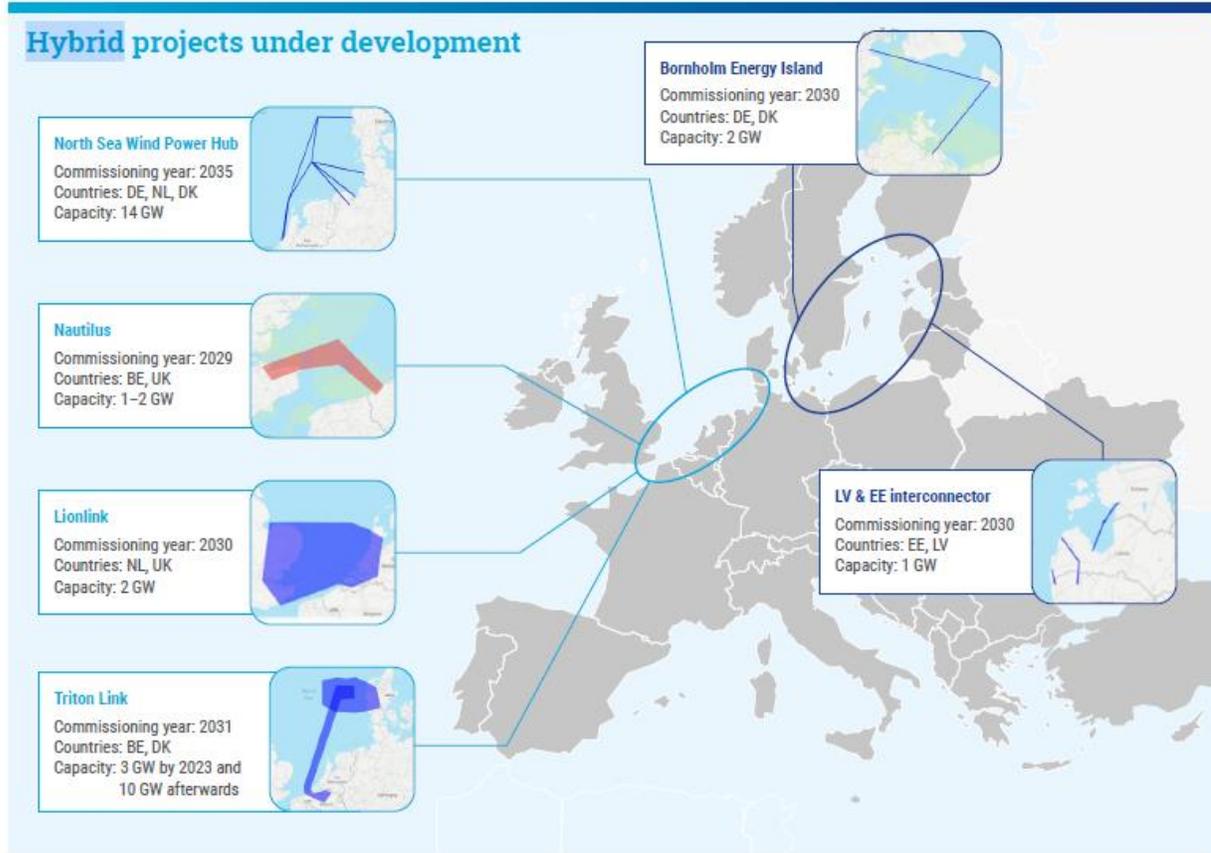


Figure 5 – TYNDP 2022 offshore hybrid projects (NOTE that the TYNDP 2024 will include additional offshore hybrid projects.).

Source: <https://www.entsoe.eu/outlooks/offshore-hub/tyndp-ondp/>

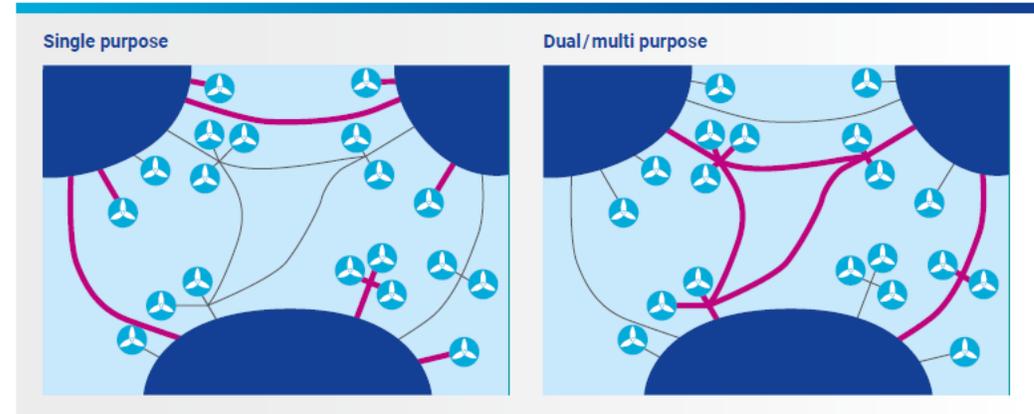


Figure 4 – Connection categories.

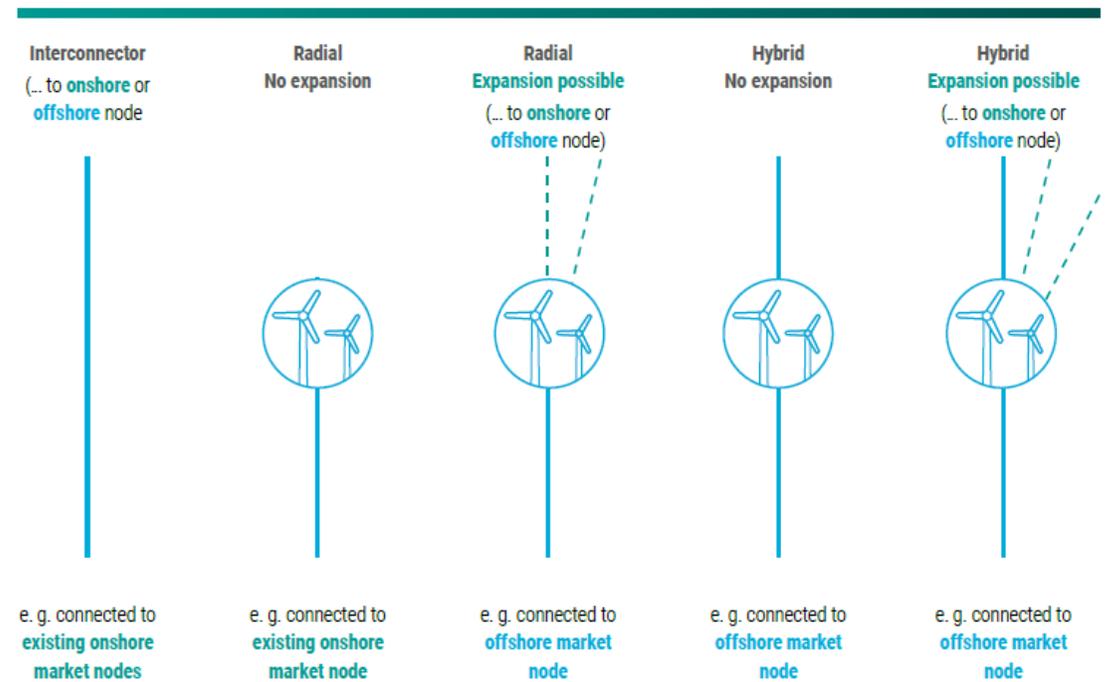


Figure 8 – Representation of node-connection-options (to be specified by the RGs).

Optimization

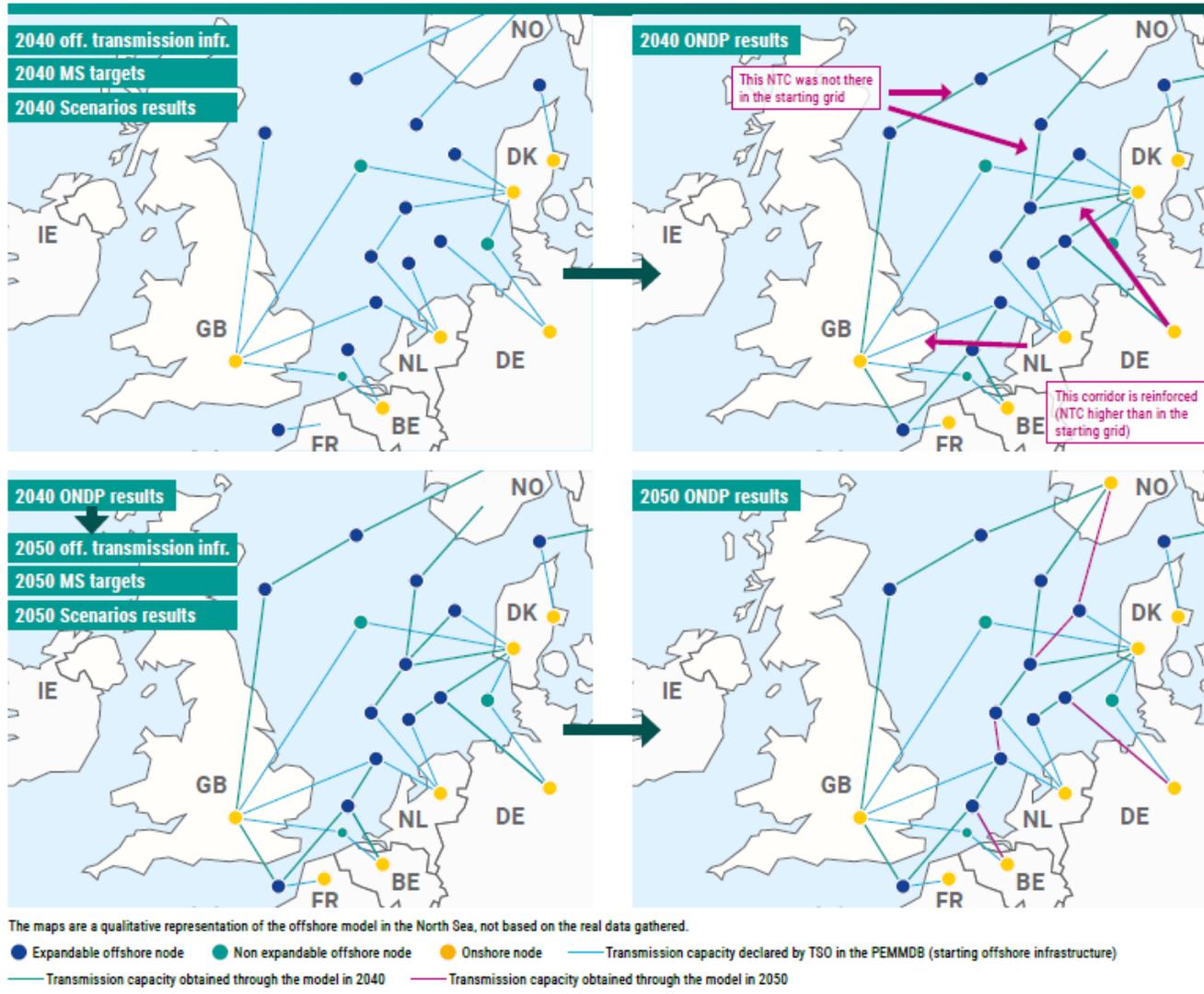


Figure 10 – Step 2 – The optimiser expands NTCs of existing links between nodes and creates new links.

Evolution of generation cap. (connection type)

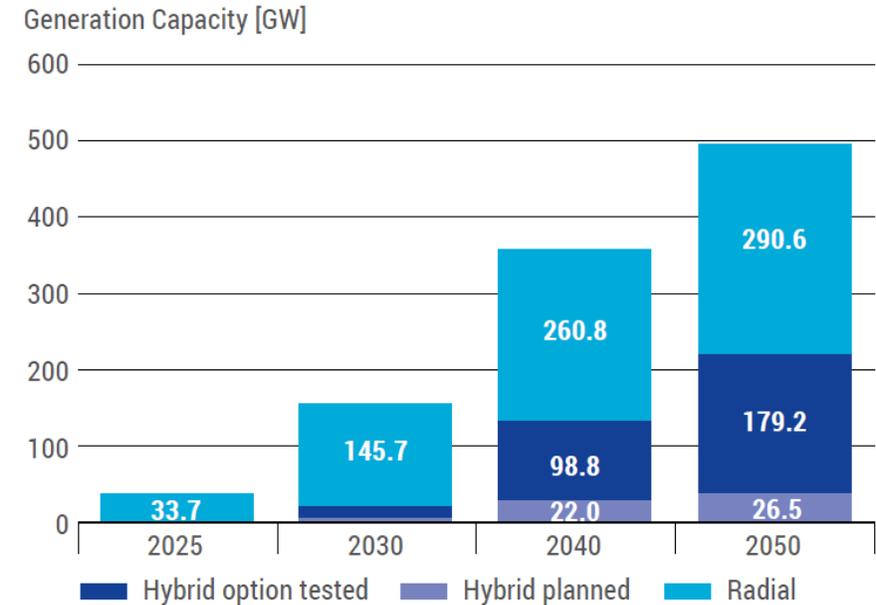


Figure 18 – Input data (EU+NO+GB): Generation capacity and their connection type.

Results

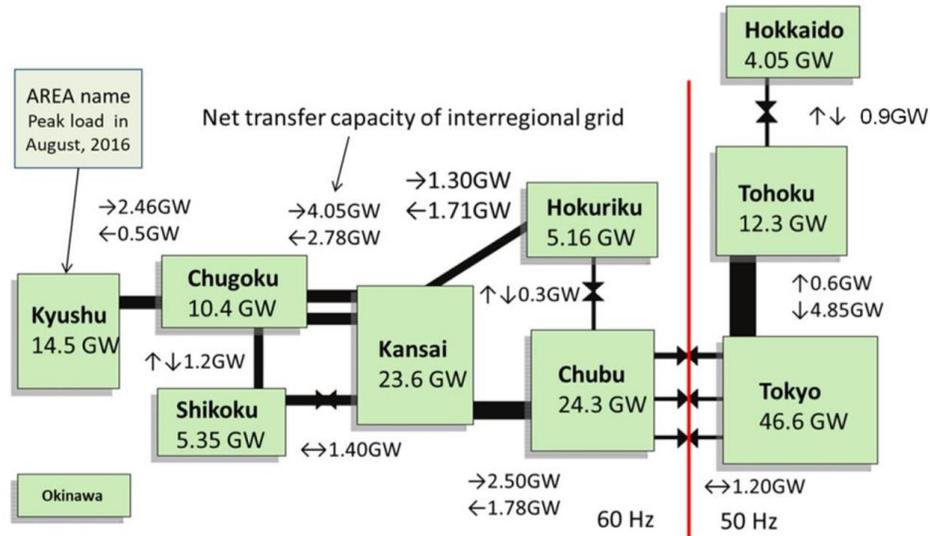
		New links	Transmission Capacity [GW]	Route length [km]	Costs [bn€]
2040 expansion results only					
Candidate links for expansion		108	/	35,032	/
Corridors selected	With DC circuit breakers	18	25	5,900	23
	Without DC circuit breakers	6	7.5	2,300	12
2050 expansion results only					
Candidate links for expansion		266	/	70,200	/
Corridors selected	With DC circuit breakers	16	19	4,600	18
	Without DC circuit breakers	7	6.4	2,700	13

Table 2 – Results of the 2040 and 2050 hybrid expansion simulations.

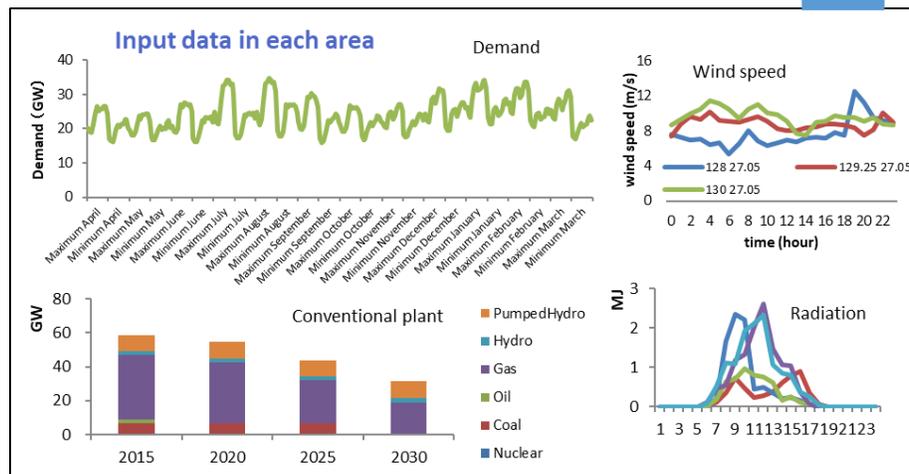
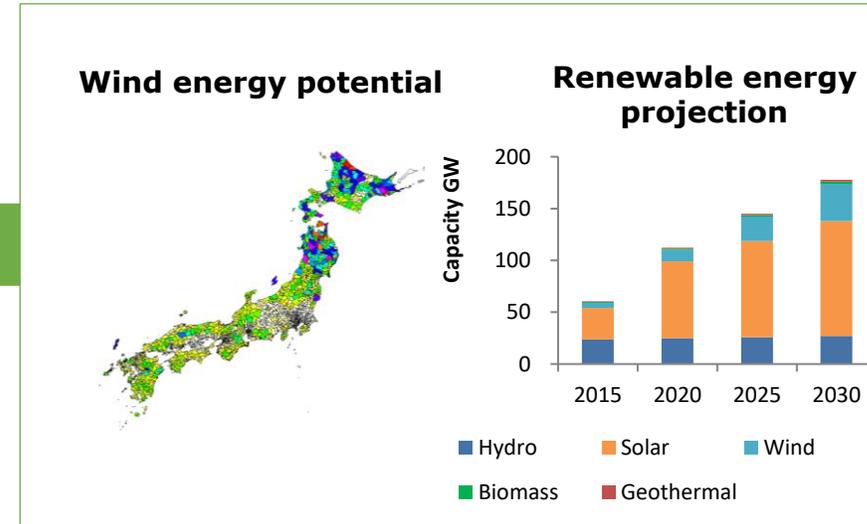
	2025–2030		2031–2040		2041–2050		Total 2025–2050	
	w/o DC breakers	w. DC breakers						
Cable routes (both AC and DC)	11,600 km	11,600 km	24,000 km	27,600 km	12,800 km	14,700 km	48,292 km	53,904 km
Offshore DC converter stations	39	39	82	76	51	43	172	158
Offshore AC substations	67	67	47	41	23	15	137	123
Onshore DC converter stations	39	39	79	83	49	54	167	176
DC circuit breaker sets	0	0	0	18	0	16	0	34
Costs (depending on technology and configuration)	85 bn €	85 bn €	196 bn €	201 bn €	112 bn €	117 bn €	393 bn €	403 bn €
Cost range due to uncertainties	+30 % ... +100 %		+30 % ... +100 %		+30 % ... +100 %		+30 % ... +100 %	

Table 3 – Equipment and costs needs from 2025 to 2050.

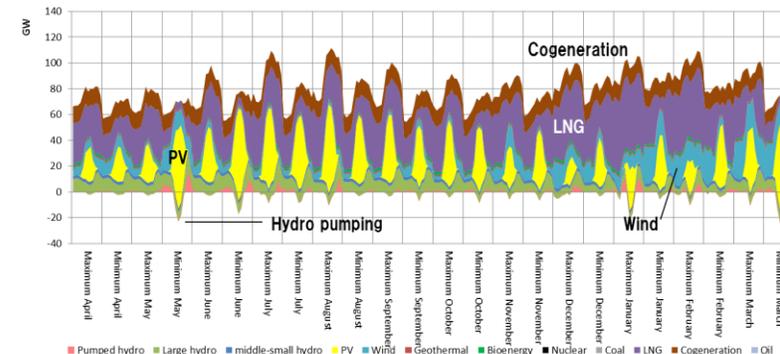
将来シナリオ分析の概要



Constraints

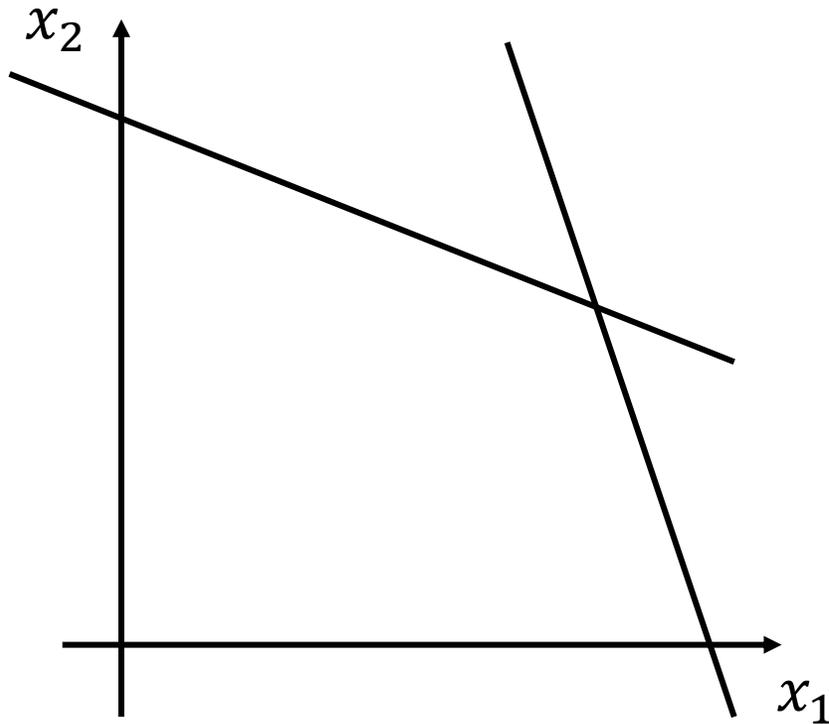


Output:
RE distribution, hourly dispatch, transmission, curtailment and total cost



線形計画法

- 線形（1次式）の制約条件式の下で、一次の目的関数の値を最大化（あるいは最小化）する変数の組み合わせを求める方法。



Constraints.

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 \leq b_2$$

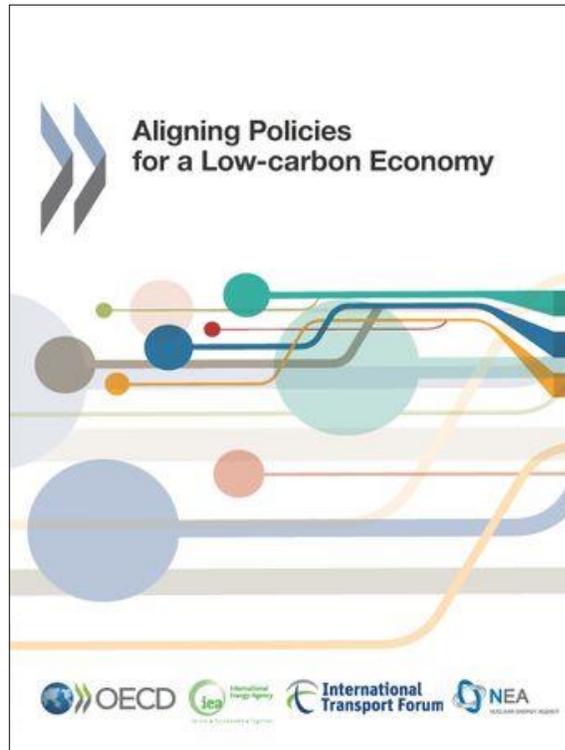
Maximize.

$$c_1x_1 + c_2x_2$$

技術者の求められるより広い視野

政策調和 (Aligning Policies for a low carbon society)

- 脱炭素・ゼロカーボンという大きな目標や政策だけではなく、新技術の障壁となる課題に対して、具体的な政策措置をとっていくことが必要。さらにその政策が合理的であることをモデルなどを用いて示すことが重要。
- 現状の政策は既存技術を運用する上で最適化されており、その中で新しい技術の普及拡大を目指す上では、経済的な助成などだけでなく、広い分野にわたる既存政策との調和が求められる。



- 新しい技術やビジネスモデルに対する、新しい政策や市場の実証試験 (Innovation Sandbox) を提案できる取り組みも行われている (英国、系統運用機関ofgem)。

Source: <https://www.ofgem.gov.uk/publications/innovation-sandbox-service-overview>

社会的受容・地域受容の視点 (social acceptance, local acceptance)

1. 手続き的正義

- 諸影響を受ける人々の意見や要望が適切に扱われるような社会的合意形成過程が存在するかを問う視点。

2. 配分的正義

- 誰にとってどのような利益や負担が存在するかを明らかにし、そのバランスの妥当性を問う視点。

3. 個人合理性と全体合理性

- 合意形成の結果は、社会的便益が最大化されることが望ましい（全体合理性）が、それぞれ個人が利益を追求した結果（個人合理性）到達する合意（均衡）は、全体合理的なものとは限らない。どのような時に全体合理的な判断が生じうるか（利他性）。

自然環境（自然資源）の自治と共有地の悲劇

- 共有地の悲劇：多数者が利用できる共有資源は乱獲によって枯渇してしまうリスクを持つ。
- 温泉資源など、共有資源の維持は地域の自治管理によって成立している。
 - ーエリノア・オストロム（2009年ノーベル経済学賞）
 - 行政による管理や、私有地化だけでは資源の枯渇を回避できない。
- 歴史的に自治管理によって維持されてきた自然資源において、新しい利用形態（自然エネルギー利用、文化、価値）を導入することは、非常に難しい問題である。
- 分散型の発電設備が増えることによって、自然環境管理の困難さが増す（空間計画や土地計画での管理機能を高める必要がある）。
- 環境保全のため・未来のためだけではない、「自然資源の一部をエネルギーのために利用させていただくこと」、「自然エネルギーによる環境影響に対する自治管理の在り方」に対する新しい文化や価値観を築いていかなければならない。



Tokyo Tech



Tokyo Tech

Contact:

Tatsuya Wakeyama

Associate professor, Tokyo Institute of Technology

wakeyama.t.aa@m.titech.ac.jp