



自然エネルギー財団

RENEWABLE ENERGY INSTITUTE

アジア国際送電網研究会中間報告書 概要版

「アジア国際送電網研究会」（事務局 公益財団法人 自然エネルギー財団）

2016年7月設置

研究会開催7回、2017年1-2月に欧州調査実施

委員

大山 力 横浜国立大学 大学院工学研究院 教授 （座長）

高橋 洋 都留文科大学 社会学科 教授 （座長代理）

斉藤 哲夫 東京大学 生産技術研究所 特任研究員

新岡 卓 欧州ビジネス協会 エネルギー委員会 委員長

三輪 茂基 ソフトバンクグループ株式会社 CEO プロジェクト室長

大野 輝之 公益財団法人 自然エネルギー財団 常務理事

オブザーバー

岡本 浩 東京電力ホールディングス株式会社 常務執行役 経営技術戦略研究所長

顧問

田中 伸男 公益財団法人 笹川平和財団 会長

第1章：国際送電網の基本的考え方

送電網と電力の国際貿易、国際送電網の目的
国際送電網を巡る外交関係

欧州における近年の国際送電網の増加の背景

第2章：欧州における国際送電網の現状と課題

歴史的経緯、国際送電網が推進される背景
運用方法、投資形態、建設計画

国際送電網による便益、欧州各国の事例

第3章：北東アジアの国際送電網の現状と可能性

北東アジアの基本情報の整理

相互補完性と便益：電源構成、価格、需給パターン

北東アジアにおける国際連系の事例

日本を取り巻く国際送電網構想

第4章：日本における国際送電網の可能性と今後の検討課題

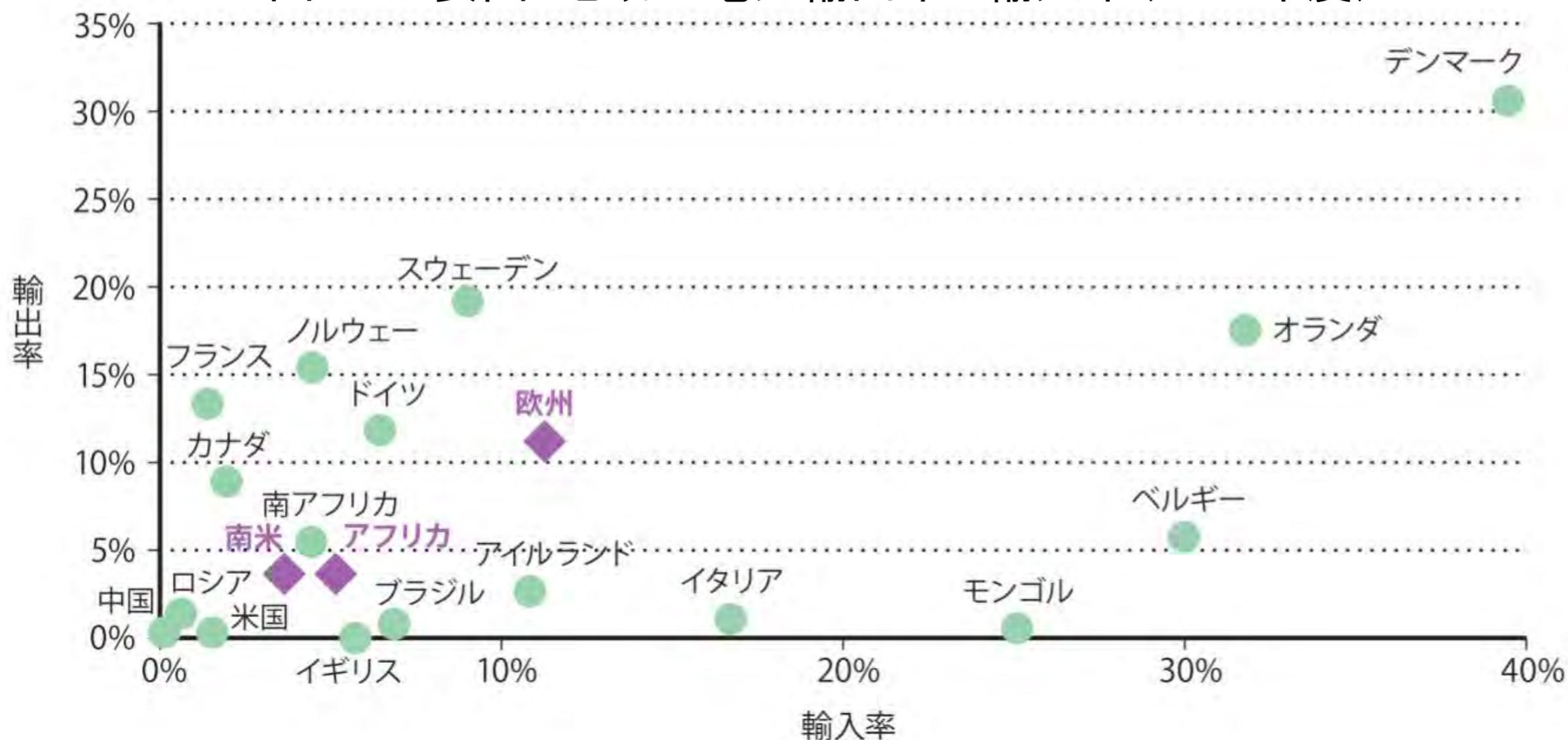
日本の電力システムと国際送電網

国内の系統運用の課題と電力システム改革の必要性和改革提案

法制度上の課題

- ・天然ガスはパイプラインを通して貿易され、電力は欧州や北米などで国際送電網を通じた貿易が日常的。
- ・欧州は輸入率11.3%・輸出率11.2%。国際連系が活発。
- ・電力も貿易が可能であり、一定の条件の下では十分に合理性がある。

図1 主要国・地域の電力輸出率と輸入率(2014年度)



国際送電網の目的・必要性

1. 国際競争による経済効率性の向上

- ・ 電力価格の安い国からの輸入により価格が下がる価格平準化効果
- ・ 平均価格とは別に、電力価格は時間帯や状況に応じて変動するため、ある国が相対的に安い時間帯もあれば高い時間帯もある。
- ・ 市場がつながることにより取引規模が拡大。
→競争の結果、両国ともに電力価格が下がる効果

2. 広域運用による電力の安定供給への寄与

- ・ 電力ネットワークが大きくなり、多くの発電所と消費者を統合することで需給バランスは容易に。
- ・ 非常時等の予備力も共有できる。

3. 自然エネルギーの出力変動対策

- ・ より多くの太陽光発電、風力発電などの変動電源が系統で結ばれることで、「平滑化効果」が生じ、出力変動が緩和

国際送電網を巡る外交関係

1. リスク分散によるエネルギー安全保障への寄与

- ・現在の日本は電力の8割強は、海外から輸入する化石燃料電源。隣国との国際連系線による電力貿易というオプションを加えることで、リスク分散を図れる。

¥

2. 適切な電力輸出入規模と複数ルートの設定

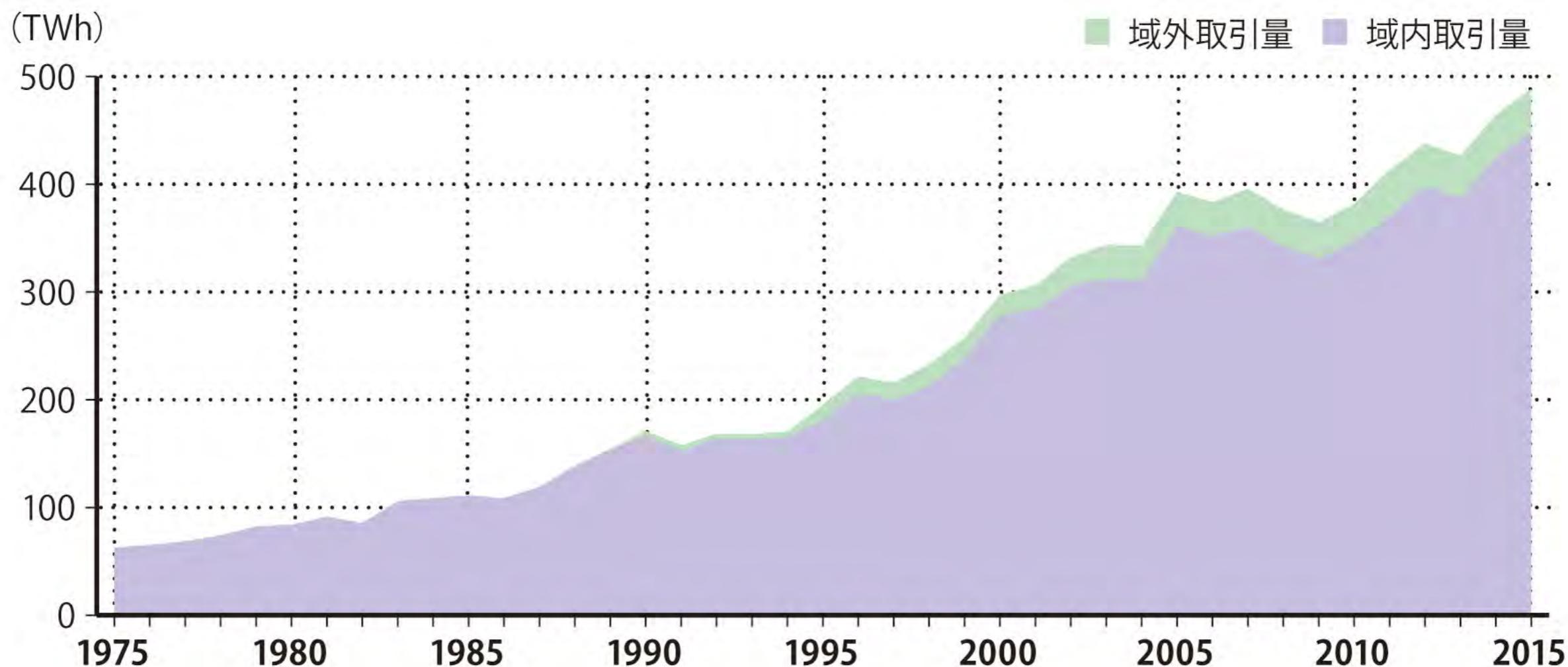
- ・通常の間際連系線の容量は1GW程度。これを数カ所建設しても、日本の最大需要の2、3パーセント。
- ・一国だけでなく複数の国と複数の連系線でつながることで安全保障の向上

3. 経済取引の拡大による互恵的関係の強化

- ・欧州では、域内で戦争をし合っていた第二次世界大戦前から国際送電網が存在。戦後は市場統合を政治的に推進することで、平和を維持。
- ・国際貿易などにより経済的相互依存を深めれば、お互いの便益が大きくなり、長期的に良好な外交関係を導くという考え

欧州における近年の国際送電網の増加の背景

1. 電力自由化の進展：電力自由化はより大きな市場を求め、国境を超えた電力取引を促進
2. 自然エネルギーの導入拡大：電力システムの「柔軟性」実現に最も効率的な手段として広域運用、国際送電が進む
3. 送電関連技術の進歩：高圧直流送電技術が飛躍的に進歩。低コスト・低送電ロスの長距離送電が可能に



【1910年代から開始】

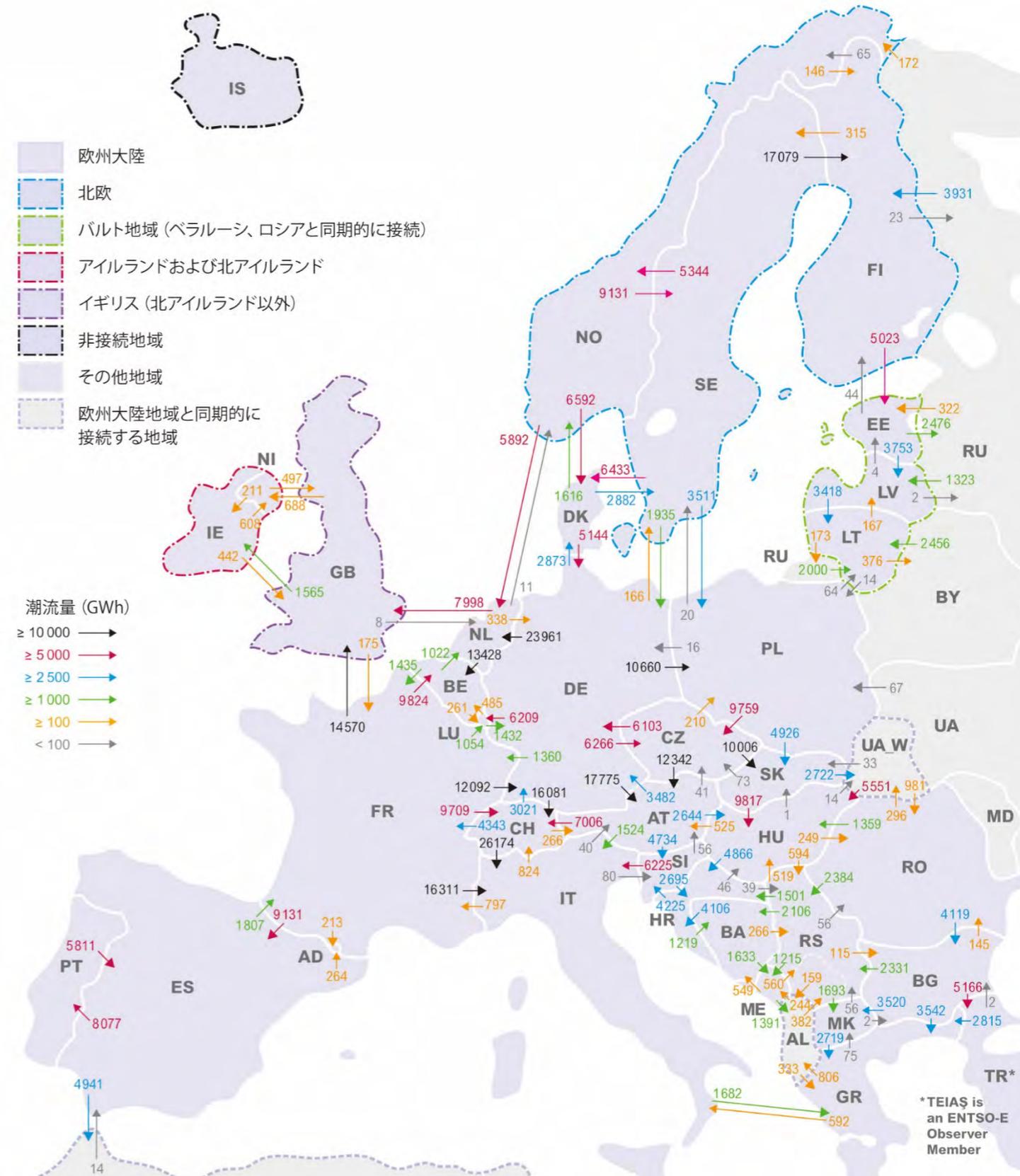
- ・ 1915年、デンマーク・スウェーデン間の国際連系線建設
- ・ 1920年、フランス、スイス、イタリア間の国際連系線建設

【第二次世界大戦後、欧州各国の国際連系の本格的開始】

- ・ 1951年、旧西ドイツ、フランス、イタリア等8か国UCPTE
- ・ 1963年、北欧諸国がNORDEL設立
フランス・スペイン・ポルトガルがUFIPTE設立

【現在】

同期系統地域は、欧州大陸系統、北欧系統、イギリス系統、バルト系統に分かれているが、各地域間は直流送電によって互いに非同期で連系され、電力取引が可能となっている。



欧州各国間の電力潮流状況（2015年）
出所 ENTSO-e, Statistical Factsheet 2015より引用
（凡例等の和訳は自然エネルギー財団による）

大規模直流送電の主な海外事例

NO.	プロジェクト	経路	亘長 (km)	海峡等横断部 (km)	送電方式	系統側電圧 (kV)	直流電圧 (kV)	送電容量 (MW)	稼働年	変電設備コスト	送電線コスト	総コスト	万円/MW・km (参考)※
1	SAPEI	イタリア	435	420	他励式	400	±500	1,000	2011	\$180m	€400m	€750m	20
2	BritNed	英国～オランダ	259	250	他励式	400 380	±450	1,000	2011	€220m	\$350m	€600m	26
3	Nemo Link	英国～ベルギー	141	130	自励式	400 380	±400	1,000	2019	—	—	€500m	40
4	Estlink 2	エストニア～フィンランド	171	145	他励式	330 400	450	650	2014	€100m	\$180m	€320m	32
5	NorNed	オランダ～ノルウェー	583	580	他励式	380 300	±450	700	2008	\$270m	€51m	€600m	17
6	Fenno-Skan 2	スウェーデン～フィンランド	196	194	他励式	400	±500	800	2011	\$170m	€150m	€315m	23
7	Skagerak 4	デンマーク～ノルウェー	243	140	自励式	400 300	±500	700	2014	\$180m	€87m	—	17
8	Nord.Link	ドイツ～ノルウェー	623	516	自励式	380 420	±525	1,400	2019	\$900m	€500m	€1.5— 2.0b	20～26

※114.0円/€、103.8円/\$で換算 (10/19日現在の為替レート)

国際送電網の運用方法、投資形態、建設計画

1. 運用方法：従来は事業者間の相対契約に基づいて実施、卸電力取引の市場連結の拡大に伴い、2000年代に直接オークション (Explicit auction) 、さらに近年は間接オークション (Implicit auction) という市場を通じた取引へと移行。現在の欧州では、直接オークションと間接オークションを組み合わせることで国際連系線が運用されている。

2. 投資形態：連系線の利用形態が契約ベースから間接オークションへと変化する中、投資形態も、主に出資事業者がリスクを負う形態から、出資者のリスクを低減したスキームへと移行。例えば、商業スキーム (Merchant scheme) では、出資事業者は連系線の使用料を契約等によって定め、これにより投資を回収するため、出資リスクを負う。これに対して規制スキーム (Regulated scheme) では、当該連系線がEUや関連国の法律や規制に基づいて導入される代わりに、規制で許容されている報酬率を受け取ることができる。この他に、イギリス独自の規制スキームであるCap and Floorが適用される予定などもある。

3. 建設計画：2009年に設立のENTSO-eは、域内のすべての送電会社が参加している。加盟各国の計画を元に、すべての事業について費用便益分析(Cost-Benefit Analysis)を行い、各事業の国際的な影響や実施する関係国の費用配分を、各国規制機関の協力の下で明らかにする。これに基づいて、特に欧州大の観点から便益の高い事業が、2年毎にPCIsとして認定される。(この他、ENTSO-eは、系統運用に関する統一ネットワーク規程(Network Codes) を各国の送電会社の協力のもと策定する役割を担っている)。

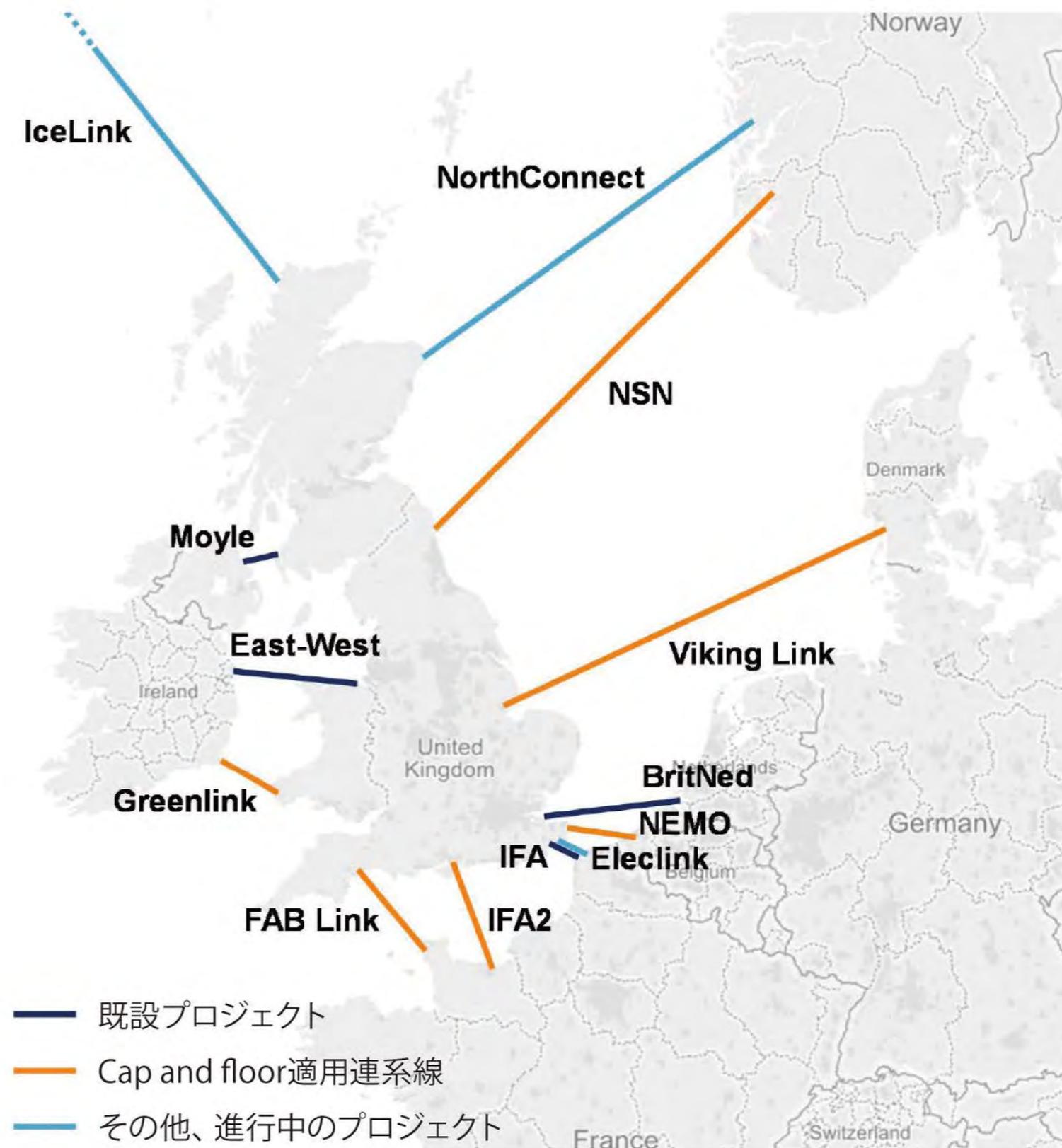
各国により異なる国際送電網の便益

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。	供給力向上 BritNed	安価な水力 NorNed	安価な余剰風力 COBRACable	—

1. イギリス

高い電力取引価格、原子力・石炭の停止による電源構成の変化を背景に、これまでの国際連系線による便益をより拡大するために国際連系線増強を実施中。

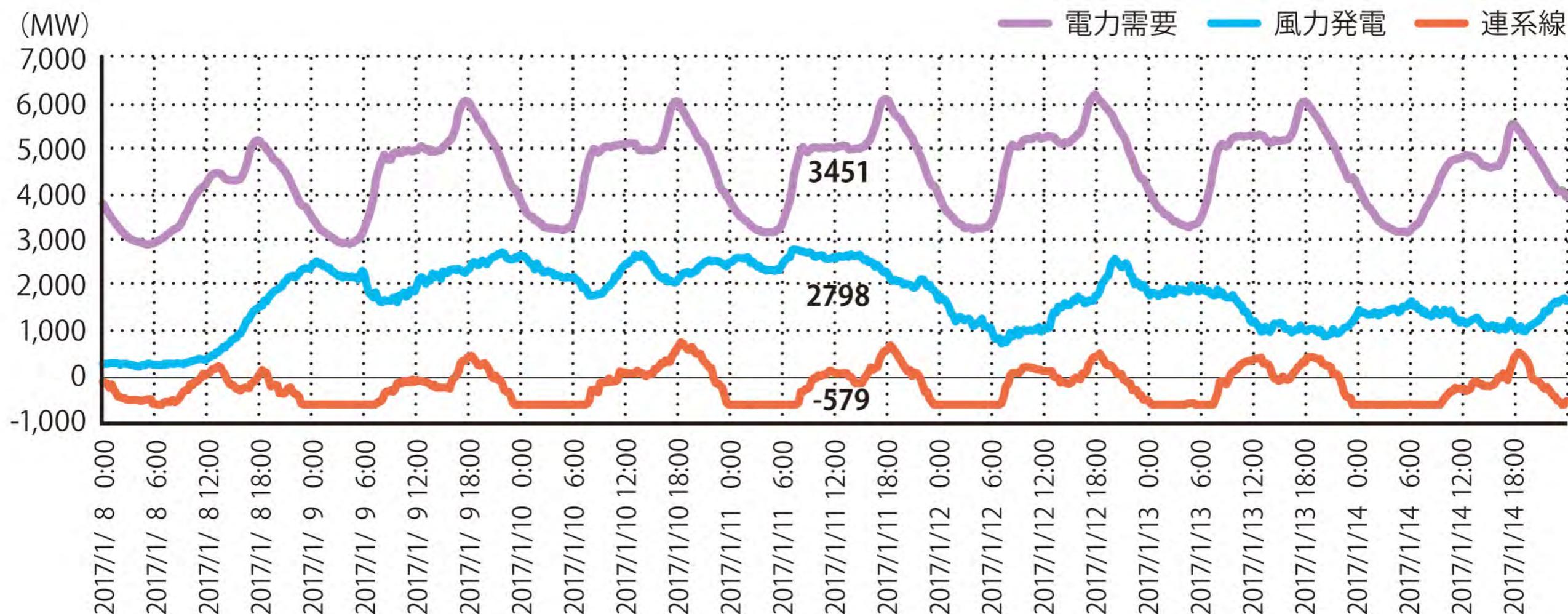
National Gridは、1GWの新規国際連系線がスポット価格を1~2%低下させると試算。



2. アイルランド

高い電力取引価格、大きな風力資源の賦存量を活かすためのイギリスや欧州との国際連系線計画。2020年までに40%の風力を導入するという目標を掲げ、風力発電の出力抑制を年間5%程度以内と設定。時間別で75%を風力発電でまかなう必要があり、国際連系線の増強による柔軟性の確保に大きく期待。

イギリスと同様、国際連系線への取組は遅く、島国であることの影響も考えられるが、自然エネルギーの大量導入と海底送電ケーブルの技術革新が、国際送電網を実現可能とした事例である。





- ・ 距離的にも近接（宗谷岬-サハリン 43km、福岡-釜山 200km）
- ・ 「大規模需要地（経済活動の中心地）」が隣接
- ・ 日中韓モンゴルの四か国で、アジアの発電量の76%、電力消費量の77%を占める

	GDP (単位:10億ドル) カッコ内は一人あたりGDP (単位:1,000ドル)	人口 (百万)	発電電力量 TWh	CO ₂ 排出量 百万トンCO ₂
中国	8,909 (6.5)	1,376	5,811	9,154
日本	5,986 (47.2)	127	1,036	1,208
韓国	1,267 (25.0)	50	522	649
モンゴル	12 (3.9)	3	5	18
ロシア	1,616 (11.0)	143	1,063	1,483
北東アジア全体	17,790 (~10.5)	1,699	8,437	12,512
世界全体	74,889 (10.2)	7,349	24,098	33,508
北東アジアシェア	20-25%	20-25%	30-35%	~37%
出所	World Bank *2010年のレート	United Nations	BP、モンゴルのみIEAで 2014年の数値。	BP、モンゴルのみIEAで 2014年の数値。

第3章 北東アジアの国際送電網の現状と可能性



	発電	送電	配電	小売り	卸電力取引市場	電力貿易
中国	国営企業 (5大電力:発電設備容量で 全体の5割超) 地方政府所有企業 民間企業	国営送電会社 (中国国家電網公司:中国全土の88%を占める地域で 送配電網管轄) *一部地域は別会社管轄 *一部発電所と需要家の直接取引あり			なし	国営送電会社 (中国国家電網公司) *一部地域は 別会社管轄
日本	大手電力事業者 (発電設備容量約8割) 独立系発電事業者 等	2020年までの発送電法的分離プロセス進行中。 *「東京電力パワーグリッド」社はすでに分離		小売電気事業者	あり 全需要の 2~3%	実績なし
韓国	国営企業 (韓国電力公社グループ: 発電設備容量75%) 民間企業	国営送電会社 (韓国電力公社)			あり ¹⁸ 約95%	実績なし
モンゴル	国営企業 民間企業	国営送電会社 (The National Transmission Company)	国営配電・小売会社 民間配電・小売会社		なし ¹⁹	国営送電会社 (The National Transmission Company)
ロシア	国営企業 (発電設備容量6割超) 民間企業	国営送電会社 ²⁰ (ロスセチグループ)	国営配電会社 (ロスセチグループ) 民間配電会社	国営小売会社 (ロスセチグループ) 民間小売会社	あり ²¹ 約97% (2015)	国営電力商社 (インターラオ)

18 韓国卸電力取引市場 (KPX) は、強制型プール市場ゆえ市場取引量は多いが、規制料金がベースであり、実質上自由な卸売市場価格は存在しない。
 19. 実際の発電量と給電指令所が示す電力供給計画の差分を発電所間で取引する「スポット市場」、計画を超えた余剰発電分をオークションで取引する「オークション市場」があるが、これらは発電所間の取引であり、需要家が参入し自由に取引できる市場ではない。
 20 ロシア極東では国営電力企業ルスギドログループが発送電・配電一体の事業を独占している。
 21 ロシア極東では地方政府が規制料金を適用しており、実質上自由な卸売市場価格は存在しない。

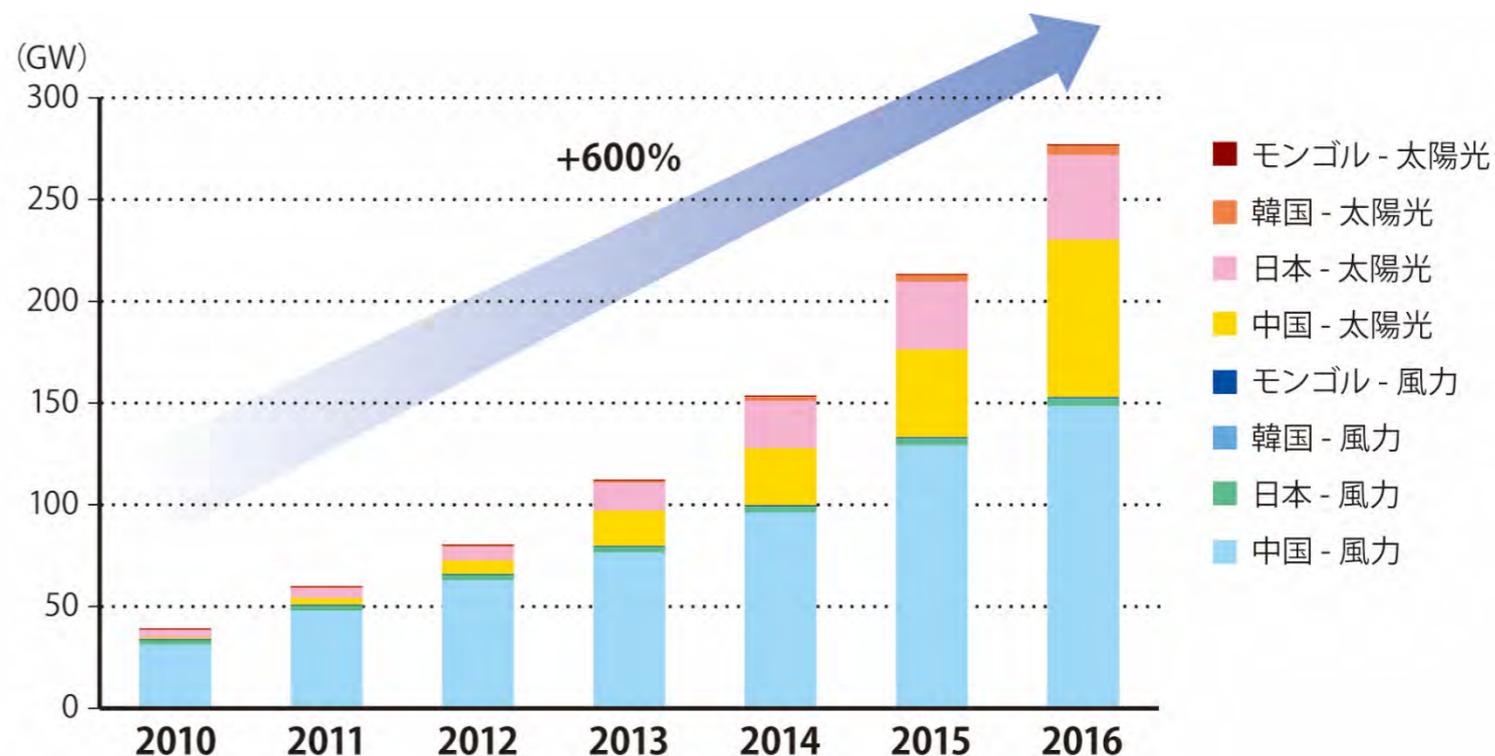
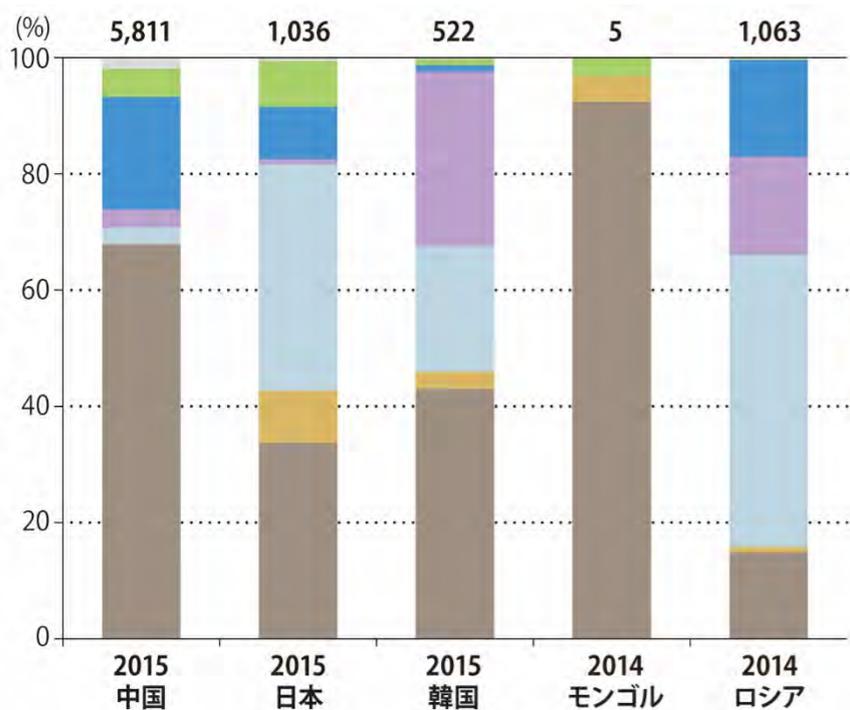


北東アジア 4 国の電力制度、市場の特徴

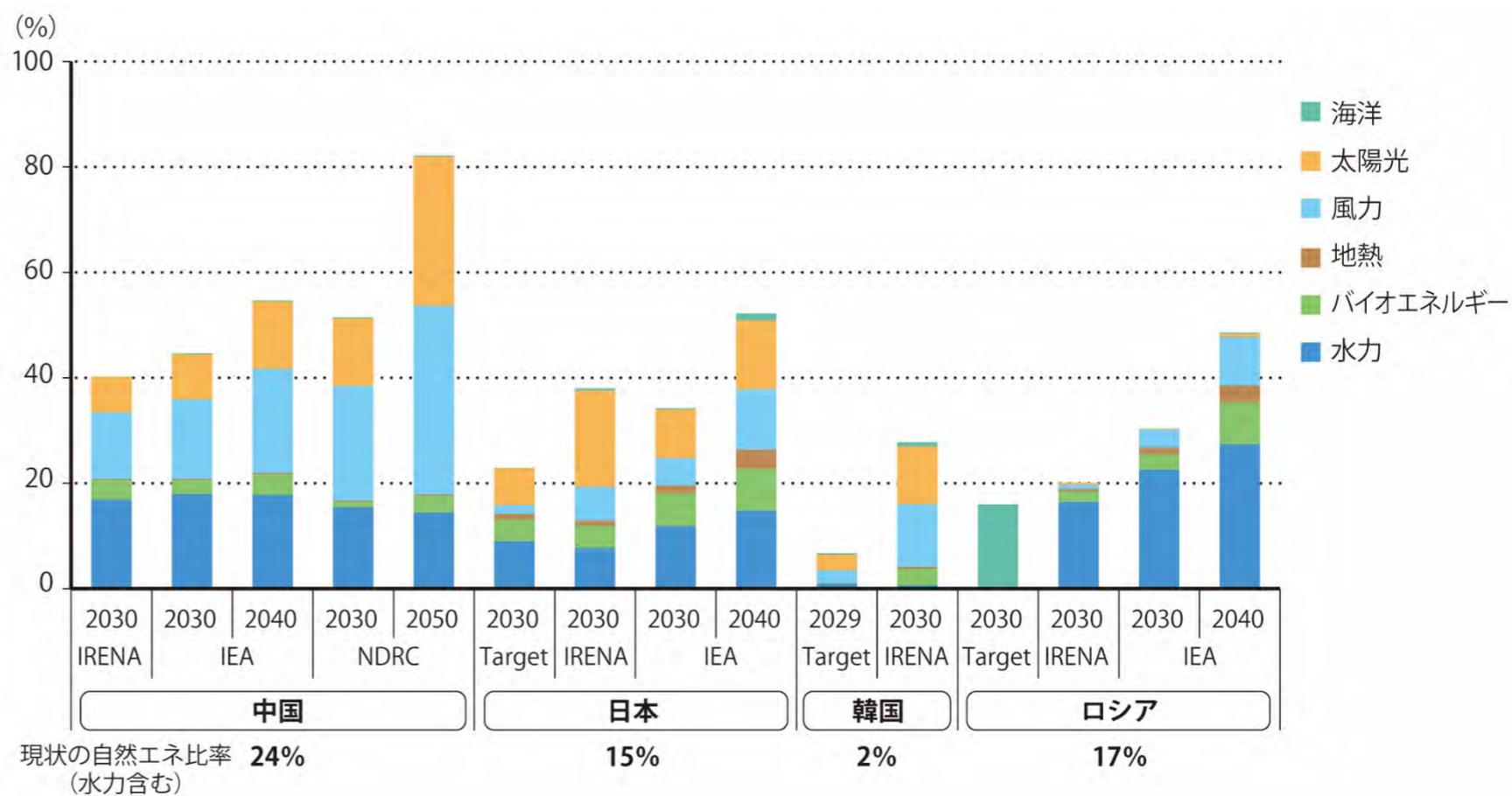
1. 各国とも発電部門に外資を含む民間参入が可能である。
2. 日本以外の各国は発送電分離が完了し、系統運用の主体は国営送電会社である。日本は2020年までの法的分離プロセスが進行中。
3. 北東アジアには国際的な卸電力取引市場は存在しないが、日韓露には卸電力取引市場があり、各国で市場自由化に向けた取り組みが進められてきた。
4. 電力貿易を行うのは、中国とモンゴルでは国営送電会社、ロシアでは電力商社（実質上の国営・独占）インターラオ。韓国では電力貿易の実績はないが、国営の韓国電力公社が主体となる可能性が高い。

欧州と比べれば電力規制改革の歩みは遅いが、日本以外の国では送電会社が独立し、国際連系にも積極的な姿勢を示している。国営ということもあり、各国政府間で合意すれば、異なる規制や制度を調整することは可能である。

第3章 北東アジアの国際送電網の現状と可能性



現在の電源構成からは相互補完性が低いが、膨大な自然エネルギーのポテンシャルと拡大可能性を考えると、相互融通のできる国際送電は非常に重要なオプション。



南部ゴビ砂漠周辺地域の風力発電・太陽光発電のポテンシャル

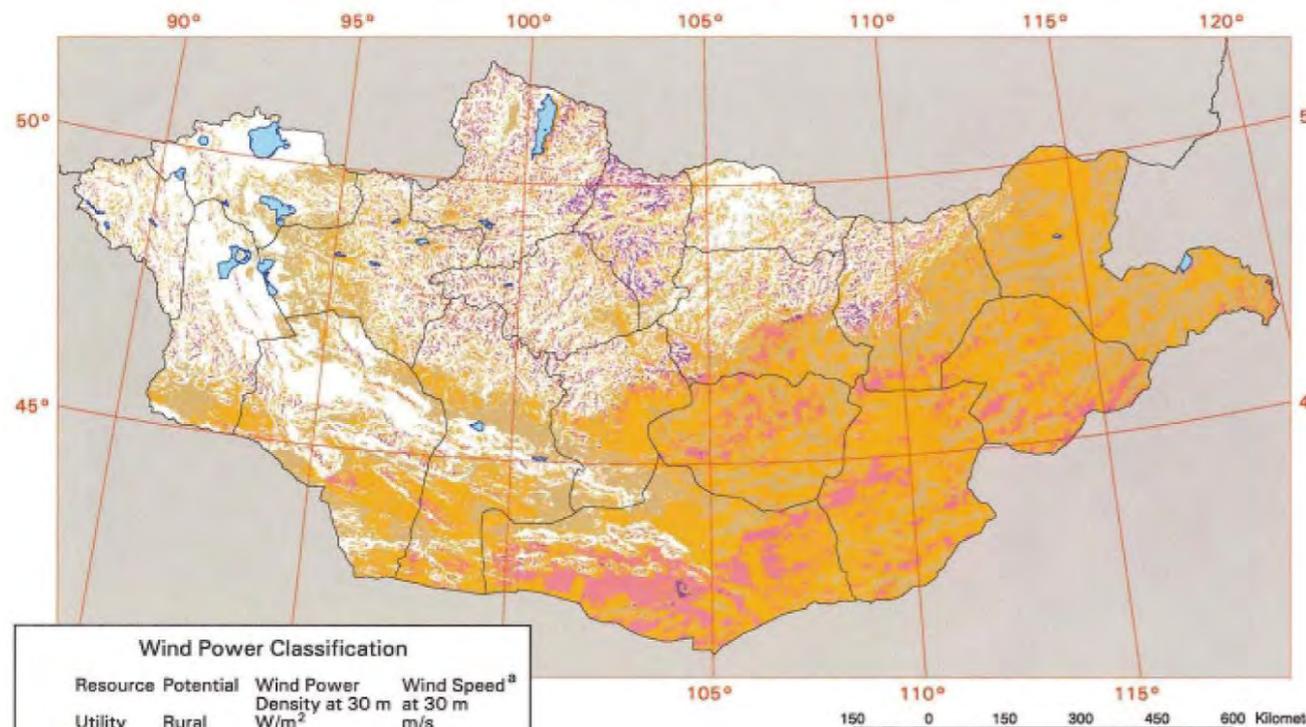
- 2001年の米国立再生可能エネルギー研究所（NREL）の報告書

モンゴル南部から中部に風力発電の適地が広がっており年間10,673TWh

- 2016年の国際再生可能エネルギー機関（IRENA）の報告書

10,673 TWh（風力）+4,777TWh（太陽光）で、合計15,000TWh以上の発電ポテンシャル。これは2015年時点の中国（5,693TWh）と日本（949TWh）の総需要の合計よりも大きい。

Mongolia - Wind Resource Map



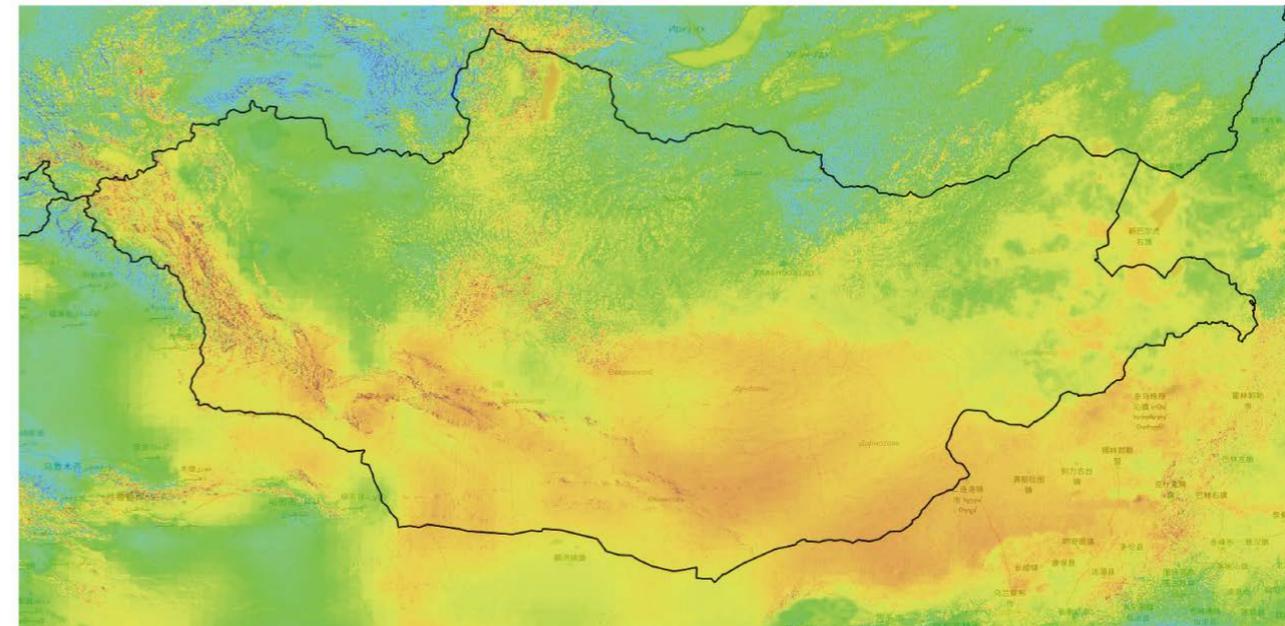
^aWind speeds are based on an elevation of 1400 m and a Weibull k value of 1.8

The wind resource classification is specific for both utility scale and rural applications and applies to areas with low surface roughness, e.g. grassland.

U.S. Department of Energy
National Renewable Energy Laboratory



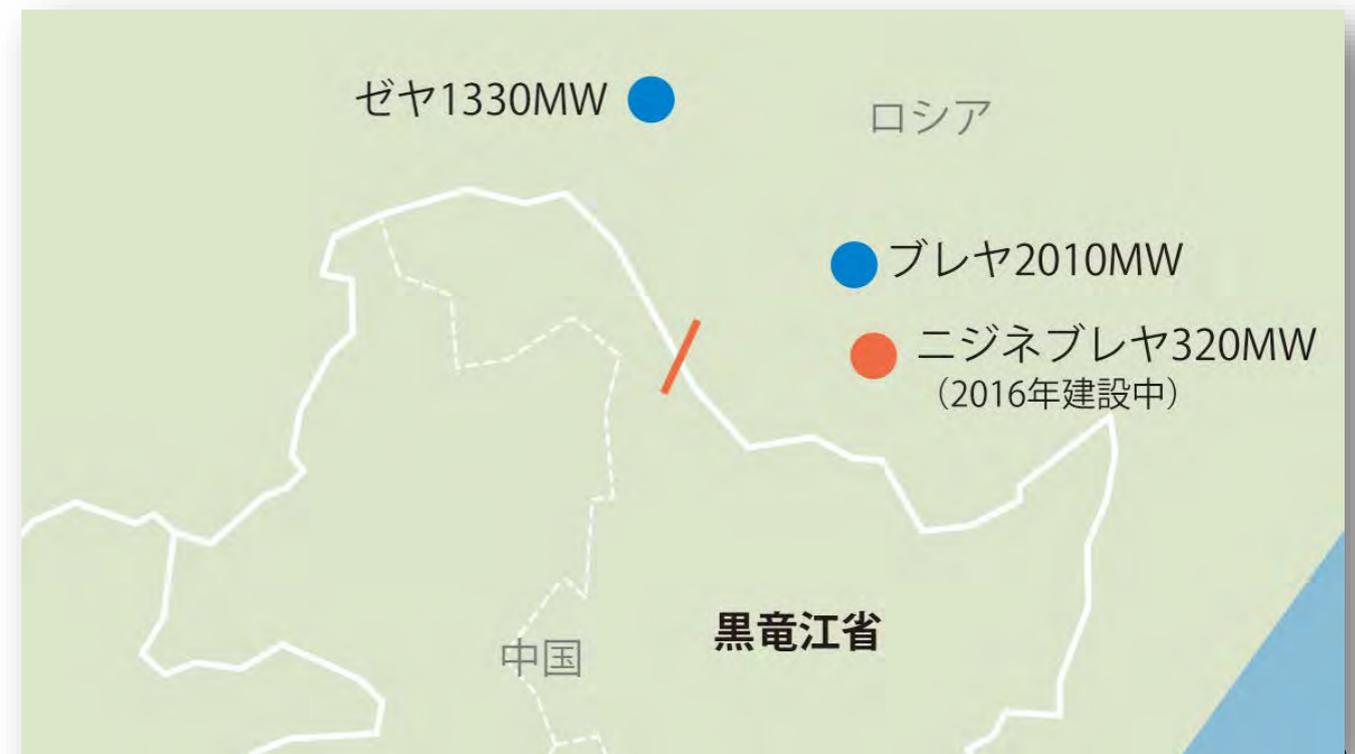
27-DEC-2000 1.6.1



ロシアーモンゴルー中国間国際連系線の位置



ロシア極東ー中国東北部間国際連系線と水力発電所の位置



隣国の水力発電を共同活用：

ロシア極東アムール州から

中国東北部の黒竜江省へ、

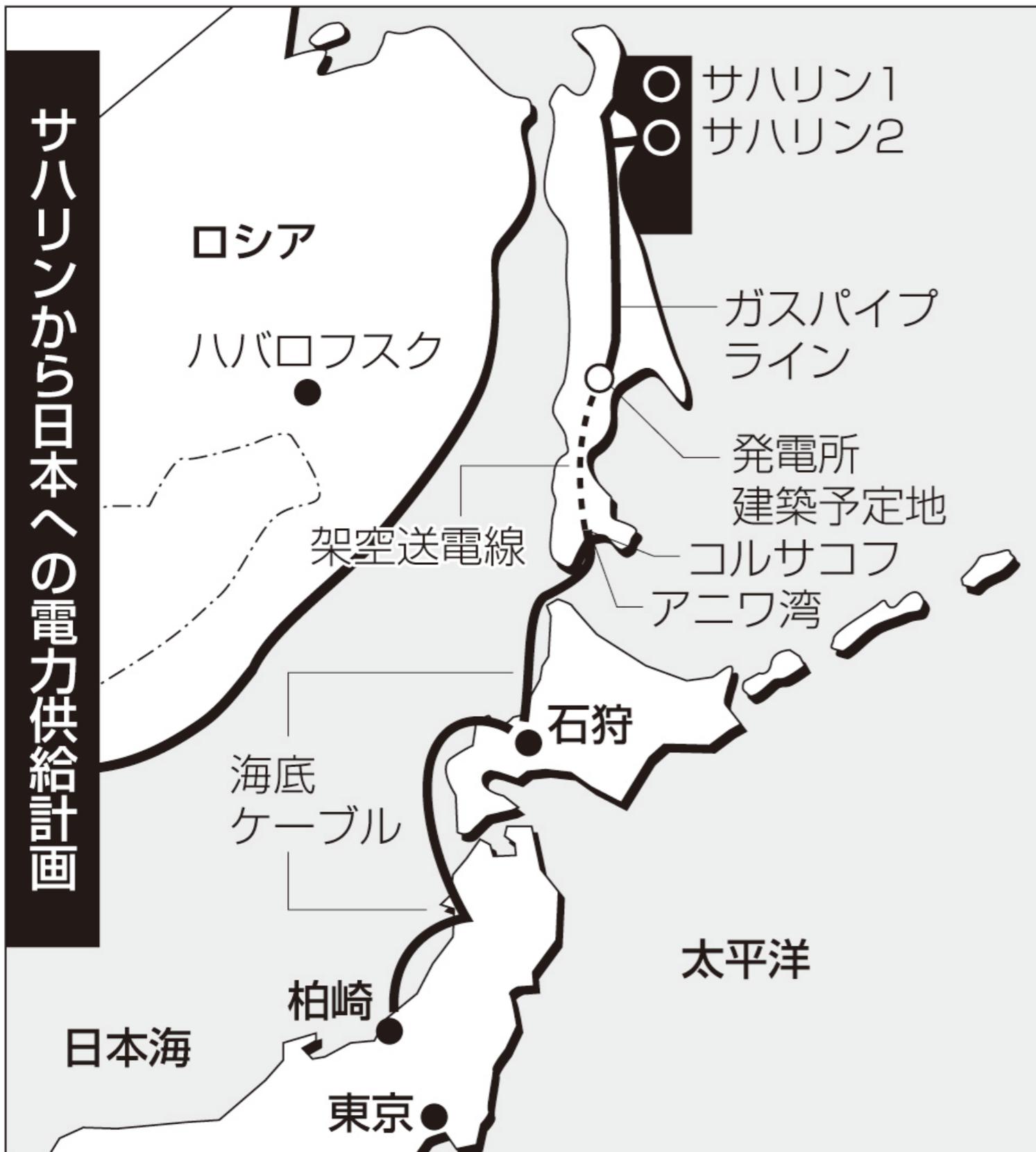
アムール河を横断する国際連系線を通じて電力輸出を実施

構想名	構想者	構想年
北東アジア電力システム統合プロジェクト North East Asian Electrical System Ties	韓国電力技術研究所、ロシアESI	2002年
ゴビテック構想 Gobitech	ハンス・ザイデル財団ソウル支部等	2009年
アジア・スーパーグリッド Asia Super Grid	自然エネルギー財団	2011年
アジア太平洋州電力網構想 Asia Pacific Power Grid	日本創生会議	2011年



自然エネルギー財団は、自然エネルギーを軸にした「アジア・スーパーグリッド」を提唱。

モンゴルの太陽光発電・風力発電を主な供給源とし、中国、韓国、ロシア、日本を国際送電網でつなぎ、自然エネルギーのアジア全域での活用を目指すもの。



「日露パワーブリッジプロジェクト (Power Bridge Project)」調査

ロシア極東サハリンの火力発電所を、北海道経由で新潟まで海底送電線でつなぐ。

丸紅、住友電工、ロシア統一電力システムによる事業可能性調査



日本を取り巻く国際送電網構想：構想から現実の計画へ

“グローバル・エネルギー・インターコネクション発展協力機構 (GEIDCO)”：

2016年3月、中国国家電網のGEI構想の実現に向け、国際非営利機関「GEIDCO」が発足。各国の研究機関、関係企業が参加し、自然エネルギーの活用のために世界的な送電網の構築を目指すもの。

“日露エナジーブリッジ（アジア・スーパーリンク）”：

ロシア政府からは日本に対して具体的な提案がなされている。2016年9月に極東ウラジオストクで「東方経済フォーラム」が開催され、その総会でプーチン大統領自らが、「ロシア、日本、韓国、中国の企業による、我々の国を結ぶ電力スーパーリンク創設に向けたイニシアチブを支持します」と表明、政府間協議のワーキンググループ設立を提案。

2016年以降、アジア国際送電網構想の実現に向けた企業主体の動きが加速、これまでの構想と比較して、国際連系の当事者が直接関わり、政府間合意や事業の具現化を目指し、また自然エネルギーの活用を大きな目的の1つと位置付けるようになってきた。

日本に国際送電が存在しない理由とその変化、打開の可能性

- | | | |
|--------------------------|---|----------------------------------|
| 1. 島国という地理的条件 |  | ・ 海底送電線技術の進展 |
| 2. 北東アジアの外交関係 |  | ・ 外交関係の改善、経済交流の活性化 |
| 3. 電力自由化の遅れ
地域独占と地域分割 |  | ・ 電力制度改革の進展、
電力ビジネスの国際化 |
| 4. 自然エネルギー導入の遅れ |  | ・ 自然エネルギー拡大の開始、
電力網広域化による変動対策 |

日本でも国際送電網実現に向けた環境が整いつつあるのではないか



国際連系に向けた国内電力システム改革の提案

1. 先着優先ルール改革

- ・国内の新規電源の広域運用と系統接続を容易にする運用ルール改革（間接オークション導入、コネクト&マネージ等）と国際連系実現に必要な改革は共通

2. 卸電力取引の活性化

- ・日本全体のスポット市場取引量：15.4TWh/年
- ・BritNed(1GW)の電力輸出量：8TWh/年

3. 送電網の抜本的な拡充と送配電事業の再編・統合

欧州：欧州全域の電力市場の連結強化、大幅な自然エネルギー導入を前提とした系統増強計画の検討

日本：「広域系統長期方針」は国の2030年電源構成見通しが前提

→ 自然エネルギー大量導入には未対応

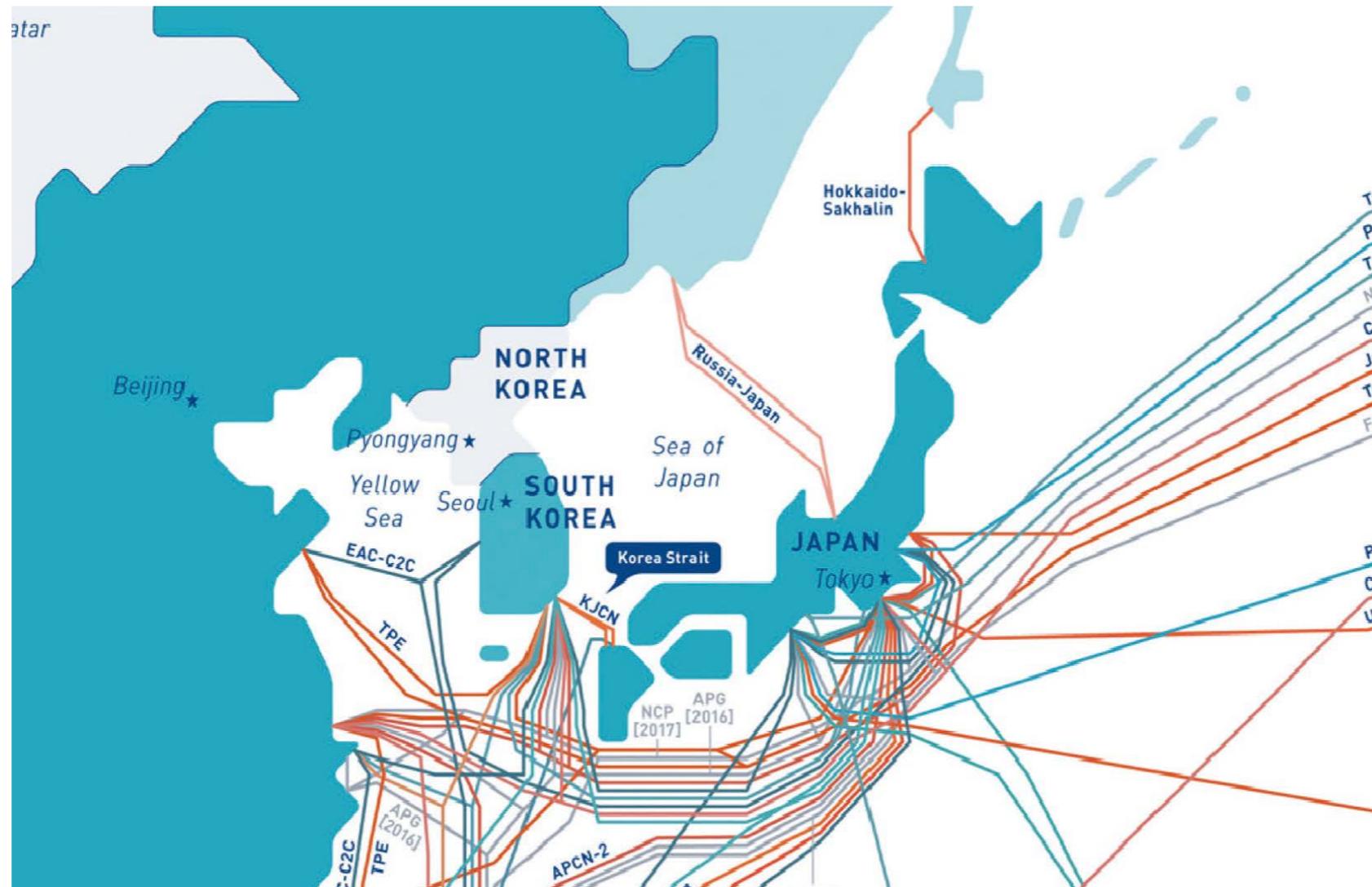
日本でも自然エネルギー資源の豊富な地域と大都市の電力需要をつなぐ長距離高圧送電網整備が必要

送電事業は、運用技術面、事業基盤強化面からも全国一体運用が合理的

国際送電に取り組む際の法制度上の検討事項

国際連系線の敷設

- ・ 各国は、海底ケーブル敷設の自由あり（国連海洋法条約が規律）
- ・ 電事法上、海底送電線に関する特別規定はないが、建設を妨げるものではない（国内に敷設例あり：北本連系線等）。



日本周辺の海底通信ケーブル



国家間の国際合意

諸外国では、国際連系を開始するにあたり、国家（国家機関）が主体となった合意（MoU等）が締結される例も多い

国名	合意例	合意内容の一例
アイルランド／イギリス	All-Island Energy Development Framework (2004.11) ³⁹ Memorandum of Understanding between the Government of the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland and the Government of Ireland THE SINGLE ELECTRICITY MARKET (SEM) ARRANGEMENTS (2006.12) ⁴⁰	統一電力市場の創設及びルール の策定
米国／カナダ	Principles for an electric reliability organization that can function on an international basis (2005.8) ⁴¹ 米国の北米電力信頼度協会（NERC）が策定した規準をカナダ連邦及び各州がMOU等で承認 ⁴²	広域運用のためのルール共通化
米国／メキシコ	Principles to promote the reliability and security of the interconnected power system of the United States of America and the United Mexican States (2017.1) ⁴³	広域運用のためのルール共通化 に向けた協力関係
フランス／イギリス／ アイルランド	FRANCE-UK-IRELAND ELECTRICITY REGIONAL INITIATIVE WORK PLAN 2011-2014 (2011.11) ⁴⁴	広域運用のためのルール共通化 に向けた作業とスケジュール
中国／ロシア	Memorandum about mutual understanding between Ministry of Energy of Russian Federation and China National Energy Administration for development of Power Grid sector (2010.9) ⁴⁵	政府機関同士の協力
南部アフリカパワープール (SAPP)参加国	Southern African Power Pool 創設に向けた The Intergovernmental Memorandum of Understanding (1995.8) ⁴⁶	紛争解決手段の指定



国内法体系の整備（国際送電事業のライセンス）

オプション1 現行法上の送電事業ライセンスの活用

- 一般送配電事業者が、その事業の延長として国際連系線の運用を行うことも想定可能
 - ＋ 海外との接続の許認可制度の創設（cf. 電気通信事業法）

オプション2 国際連系に特化した新たなライセンスの創設

- ・ 諸外国では、事業法上明文で国際送電事業ライセンスと送電事業ライセンスを別々に設けている国（イングランド・ウェールズ、アイルランド等）と、特段の区別のない国（北アイルランド、フランス、米国、カナダ等）がある。
- ・ 後者の場合でも、国際送電事業を営むことが特例事項として個別のライセンス内容に記載されている場合や、国際連系線の設置や国際電力取引に別途政府の許可を求める国もある。国の既存の制度や政策に応じたさまざまな規制の仕方があり得る。



国内法体系の整備（考えられるその他の事項）

1. 海底送電線の敷設に関する規定

- ・電気通信事業法には、漁業権との調整や海底ケーブル保護等に関する規定がある。

2. 電力取引市場への海外からの参加

- ・日本卸電力取引所取引規程等で、海外の事業者や電力商社の参加を明示的に認めるような変更を検討。

3. 関税に関する規定

- ・電力も財であり関税の対象となりうるが、現在の関税定率法では電力の項目がないため、これを法律で規定する必要がある。
- ・多くの国で電力に対する関税率は0%である。

- 一般的に国際送電網には高い経済合理性があり、技術的にも国内の送電網と比べて格別の困難さがあるというものではない。
- 欧州だけでなく東南アジアや南アジアなどでも国際連系線が活用。
- 今後世界的に自然エネルギーが拡大していくことも踏まえ、世界各地で建設計画が多数ある。
- 自然エネルギーについては中国が世界一の導入量を誇り、ロシアやモンゴルにも膨大なポテンシャルがある。
- 21世紀は、北東アジアからアジア全域、さらに世界規模で、電力の貿易が行われる時代になるのではないか。日本以外の北東アジア諸国の送電会社等から、国際送電網構想が提案されている事実を、重く受け止めるべき。

- 今後は具体的な国際連系線の建設計画を想定しつつ費用と便益を定量的に示し、様々な課題やリスクもさらに整理していく。
- 実現のために必要な日本の政策的な対応案を具体的に検討する。
- 北米や東南アジアなどの事例も参考にし、アジア全域との関係も考察していく。