

第2回再生可能エネルギー京都シンポジウム(出版記念)

「欧州の電力システム改革と再生可能エネルギー」

再生可能資源国家・アイスランドの緑化熱電戦略と「応戦」

2017年2月8日(水)

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 加藤修一

1. アイスランドの「応戦」

- (1) アイスランドの概要
- (2) エネルギー指令などの動きとアイスランド
- (3) アイスランドの政府・国会における再エネ関係の動き
- (4) アイスランドのエネルギー大転換と電力等の現況

2. 欧州の国際連系線 — 長期的にはEEHに統合化

- (1) EUの優先的な7エネルギー回廊と意義
- (2) entso-eの概要とデータにみる現況
- (3) entso-e加盟国35ヶ国の国際連系線
- (4) ヨーロッパ電力網のアップグレード
- (5) 英国の国際連系線の現況と今後

3. アイスランドの国際連系線: IceLink事業

- (1) IceLink事業の概要
- (2) 豊富な再エネ潜在量: 計500億kwh超
- (3) IceLinkの社会経済厚生効果

4. “極北”の再エネ開発構想

- (1) 膨大な再生可能資源が存在する“極北”空白域
- (2) グリーンランド～ノルウェーの“極北空白域”開発構想
- (3) 極北空白域の関係諸国の動向

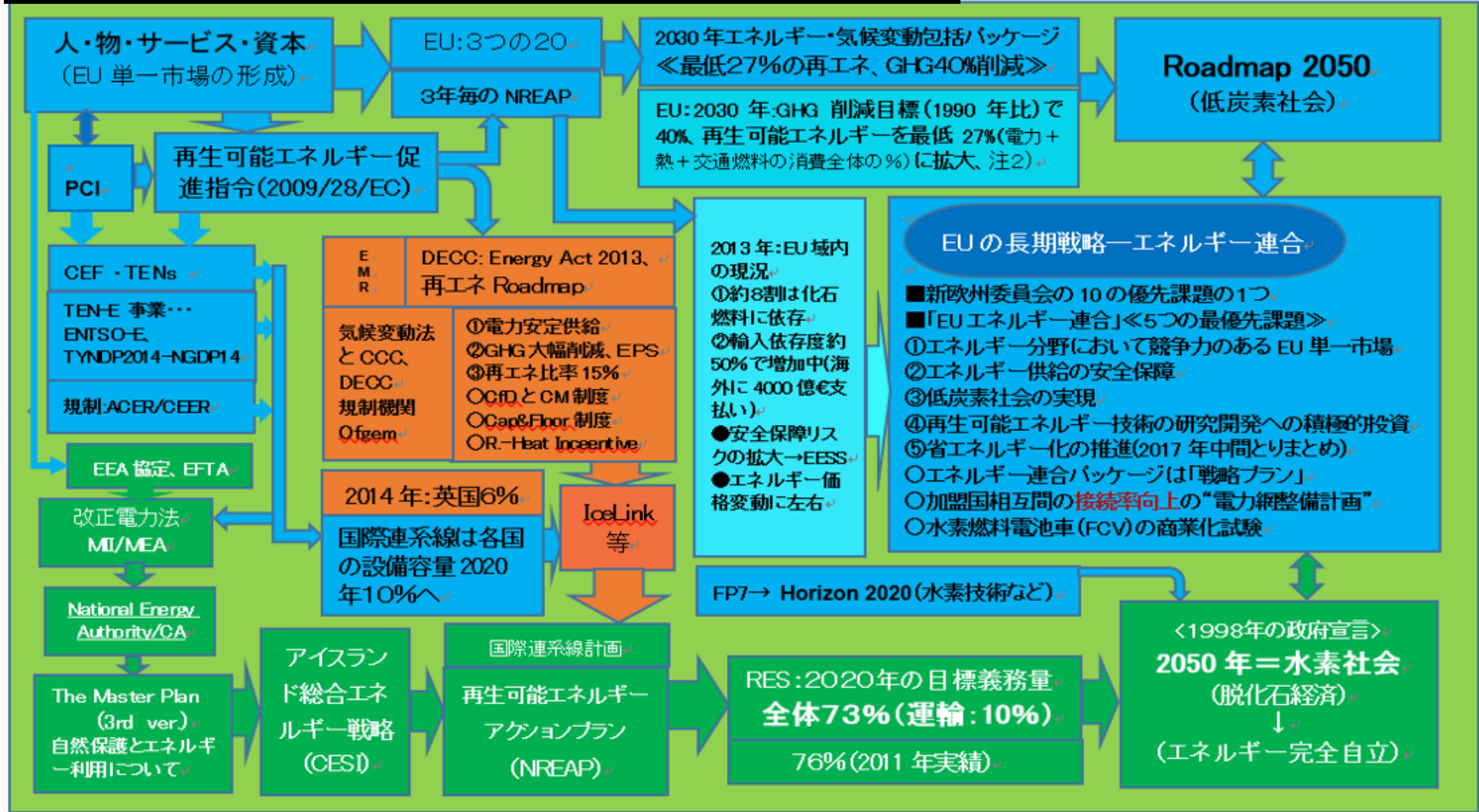
5. まとめ

1. アイスランドの「応戦」

(1) アイスランドの概要



(2) エネルギー指令などの動きとアイスランド



注1) 配色は、緑(アイスランド)、青(EU)、橙(英国)。PCI: Project of Common Interest, CEF: Connecting Europe Facility, RES: Renewable Energy Resource, ENTSO-E: European Network of Transmission System Operators for Electricity(送電会社団体: 欧州電力系統運用者ネットワーク)、TYNDP2014: Ten-Year Network Development Plan 20, TENs: Trans-European Energy Networks, NGDP14FP7: the 7th Framework Programme, TEN-E: Trans-European energy infrastructure, ACER: Agency for the Cooperation of Energy Regulators(?), CEER: Council of European Energy Regulators (エネルギー規制機関協会)、EMR(電力市場改革)、DECC: Department of Energy and Climate Change (エネルギー気候変動省)、EPS: Emissions Performance Standard (二酸化炭素排出基準)、Ofgem: Office of Gas & Electricity Market (ガス電力市場規制庁)、CCC: Committee on Climate Change (気候変動委員会)、NREAP: National Renewable Energy Action Plan (国家再生可能エネルギー行動計画)、CA: Competition Authority (競争庁)、EFTA (欧州自由貿易連合)、EESS: European Energy Security Strategy、注2) 電力独自の目標値はないがEUのHPのQ&Aは再エネ電力単独で「最低45%」を掲載。
 出典: EU及びアイスランド政府関係資料より、著者作成(2015)。

(3) アイスランドの政府・国会における再エネ関係の動き

■首相府—「Iceland 2020」を発表。

ダイナミックな社会を目指して持続可能性等の視点から15の数値的目標。
例えば5トン以下の新車は2020年までに再エネ利用75%等。

■国会—「アイスランドの持続可能な繁栄」と三つの柱

- ①クリーンな自然環境、
- ②持続可能なエネルギーの使用、
- ③持続可能な教育の3本柱。

1) 輸入エネルギーを再エネ転換

2) アイスランドのエネルギーは、社会や公共のためになる持続可能性の確保

3) 地熱や水力資源は、予防的かつ保護的アプローチに基づいた開発

4) エネルギー戦略は、分散型、エコロジカルで有益なハイテク産業の開発を目指し強化

5) エネルギー戦略は、持続可能な利用を優先し、地熱地域の酷使を避けること

6) より良いエネルギー利用を推進するために、持続可能な地熱蒸気を使用して、インダストリアル・パーク等、園芸ハウス、リサイクル等を開発すること

7) ヨーロッパとアイスランドとのエネルギー **国際連系線**は十分精緻な研究を進めること

(4) アイスランドのエネルギー大転換と電力等の現況

第一次エネルギー自給率が 16.4% から 85.4% (全て再エネ) に大転換。

年	ピート	水力	地熱	(ピ+水+地)	石油	石炭	(石油+石炭)	合計
2011	0.0	45.0(19.1)	156.1(66.3)	201.1(85.4)	30.5(12.9)	4.0(1.7)	34.5(14.6)輸入	235.6
2010	0.0	45.3(19.4)	155.2(66.3)	200.5(85.6)	29.6(12.6)	4.0(1.7)	33.6(14.3)	234.1
2000	0.0	22.9(17.9)	73.9(57.6)	96.8(75.5)	27.4(21.4)	4.0(3.1)	31.4(24.5)	128.2
1990	0.0	15.0(17.6)	44.2(51.8)	59.2(69.4)	23.4(27.4)	2.7(3.2)	26.1(30.6)	□85.3
1980	0.0	11.0(19.7)	26.7(46.5)	37.7(65.7)	18.8(32.8)	0.9(1.6)	19.7(34.4)	□57.4
1970	0.0	5.1(15.3)	11.4(34.1)	16.5(49.4)	16.8(50.3)	0.1(0.3)	16.9(50.6)	□33.4
1960	0.0	1.9(9.7)	4.4(22.4)	6.3(32.1)	12.6(64.3)	0.7(3.6)	13.3(67.9)	□19.6
1950	0.0	0.6(4.9)	3.0(24.4)	3.6(29.3)	6.1(49.6)	2.6(21.1)	8.7(70.7)	□12.3
1940	0.2(3.6)	0.2(3.6)	0.5(9.1)	0.9(16.4)	0.8(14.5)	3.8(69.1)	4.6(83.6)	5.5

100%が再生可能資源由来の電力□□□□□□□□□□ (2014年実績)

	設備容量・・・万 kw (%)	発電量・・・億 kwh (%)	消費電力構成率	備考
水力	198.6 万 kw (72.0)	128.73 億 kwh (71.0)	77%	火力発電は極小
地熱	66.5 万 kw (24.1)	52.39 億 kwh (28.9)	17%	
風力	0.3 万 kw (0.1)	0.08 億 kwh (0.08)		
化石燃料	10.6 万 kw (3.8)	0.02 億 kwh (0.02)	計 5%	
合計	276.0 万 kw (100)	181.00 億 kwh (100)	99%	1%:不明

注) 風力発電は国営電力会社の実証事業。

資料: The Icelandic National Energy Authority (NEA)、ENERGY STATISTICS IN ICELAND 資料より著者作成。

緑化電力の基本数値と潜在量

	①設備容量 (万 kw)	②発電量(億 kwh/年)	平均設備利 用率(%)	潜在量	
				潜在発電量①注1)	潜在発電量②
水力資源	198.6	128.63	73.94	300 億 kwh・年	300 億 kwh・年
地熱資源	66.5	52.45	90.04	200 億 kwh・年	460 億 kwh 注 2)
Fuel 燃料	11.4	0.03	—	—	—
風力資源				現在、実証事業中	
廃棄物資源	メタン発酵の熱電併給			2016 年～	約 3 万トン資源
海洋資源	潮汐、波力、海流発電の膨大な潜在量				
合計	276.7	181.16		500 億 kwh・年	760 億 kwh

注1)政府 2002 年調査値、注 2)アイスランド政府サイトに潜在設備能力 580 万kwとある、注 3)①、②は 2013 年値。資料:国営電力会社資料。潜在資源量 2002 年値:「NEDO 海外レポート」(2007)より、著者作成。

風力発電の実証事業

	稼働風速(ピーク効 率)	平均設備利用 率	稼働率	停止速 度	備考
2基のタービ ン 計 1800kw	15~28m/s、 開始風速は3m/s 年間発電量=630 万 kwh	約 40%	98%	34m/s	高さ=77m

資料:国営電力会社資料より、著者作成。

地熱資源の活用：初期のGeoDH(Geothermal District Heating) + 後期の発電

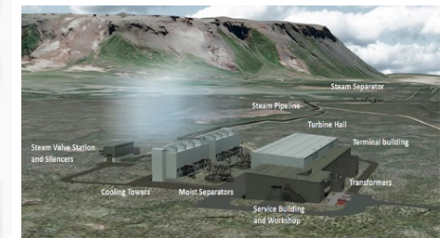
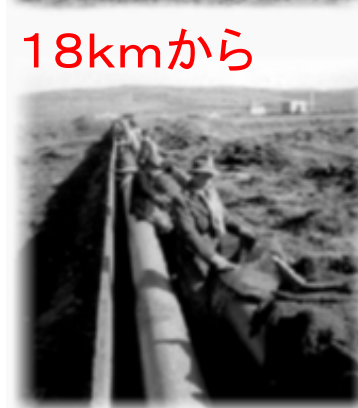
大寒波とエネルギー危機, 1917-1918



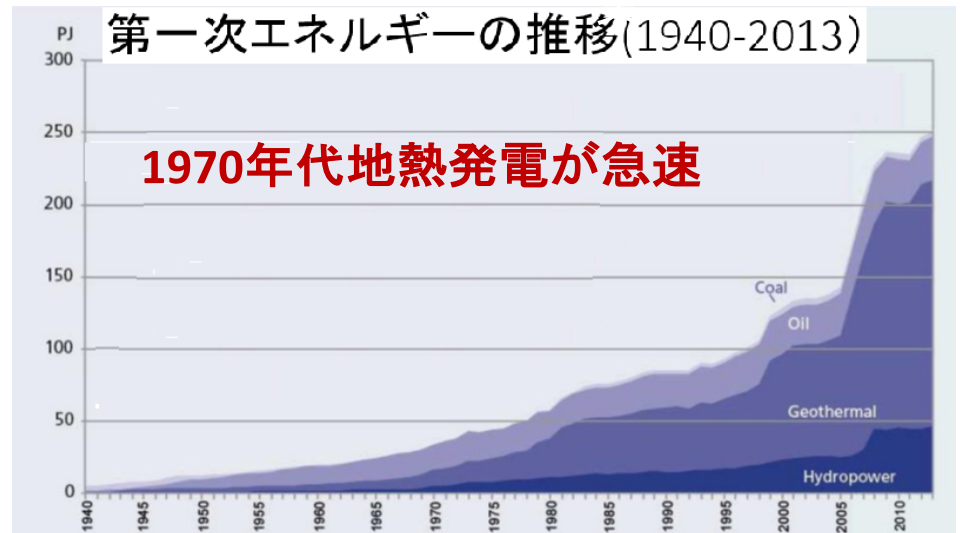
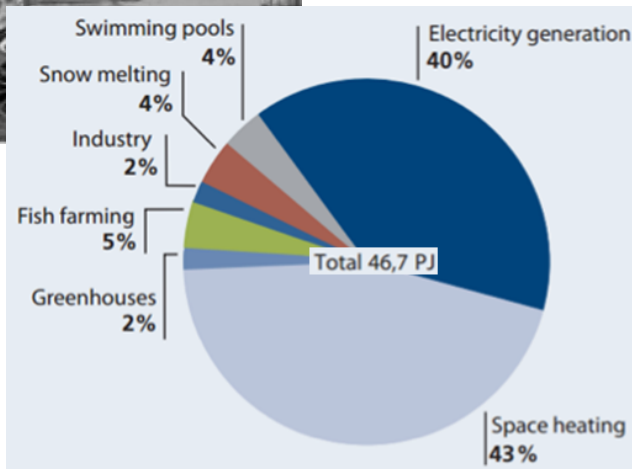
第1期のGeoDH, 1930



拡大期 1934-1955



現在、約1/3
の電気は地熱

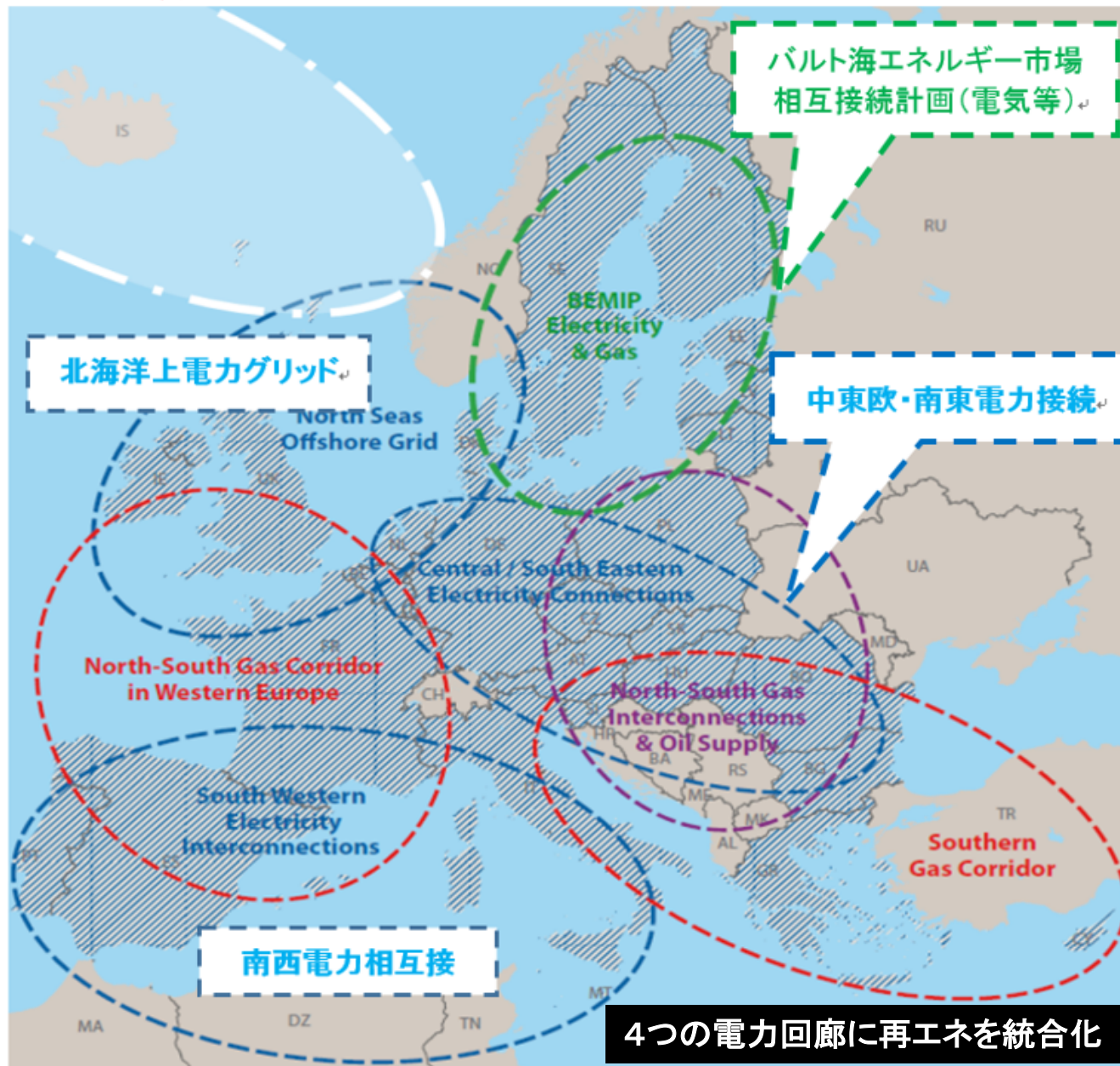
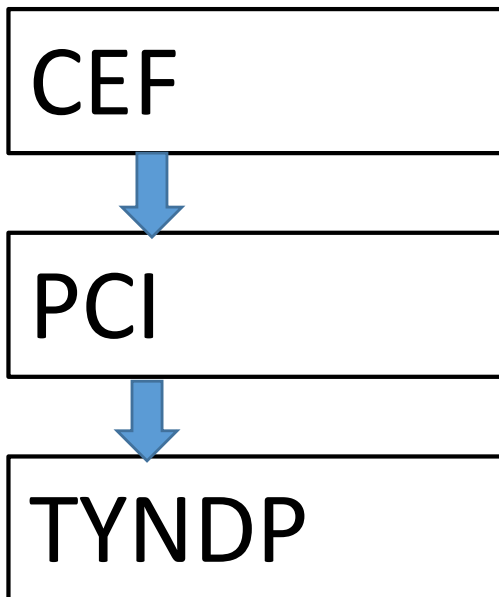


2. 欧州の国際連系線 — 長期的にはEEHに統合化

(1) EUの優先的な7エネルギー回廊と意義



出所: Google Mapを下地に筆者作成、2016.



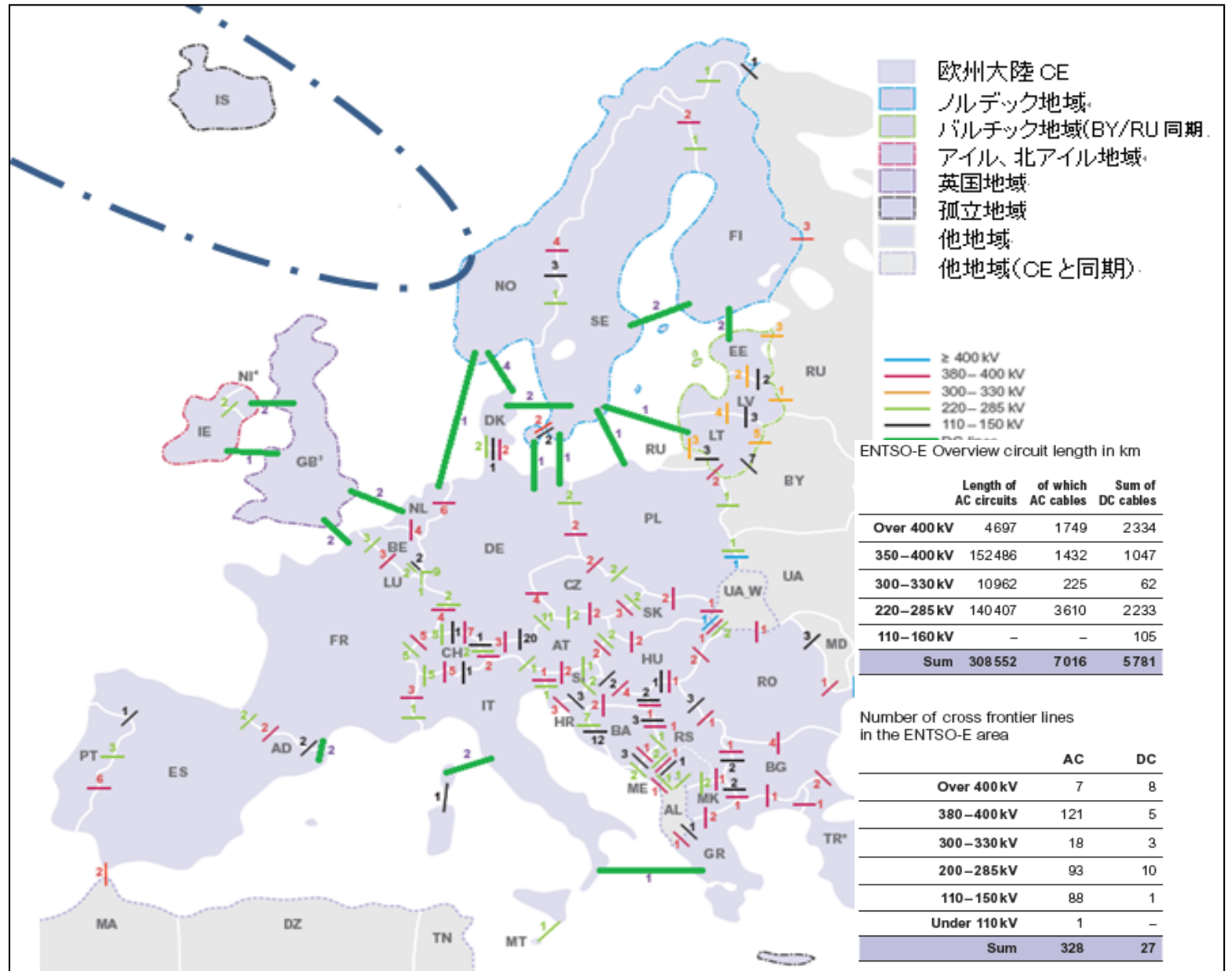
注: 灰色斜線部分はスマートグリッド、地図内白線楕円は筆者加筆。

出所: [EU Energy2020], priorities for 2020 and beyond — A Blueprint for an integrated European energy network' (COM, 2010) 677 final(2010)、EU.

エネルギーインフラ整備構想における 6 つの優先課題の概要

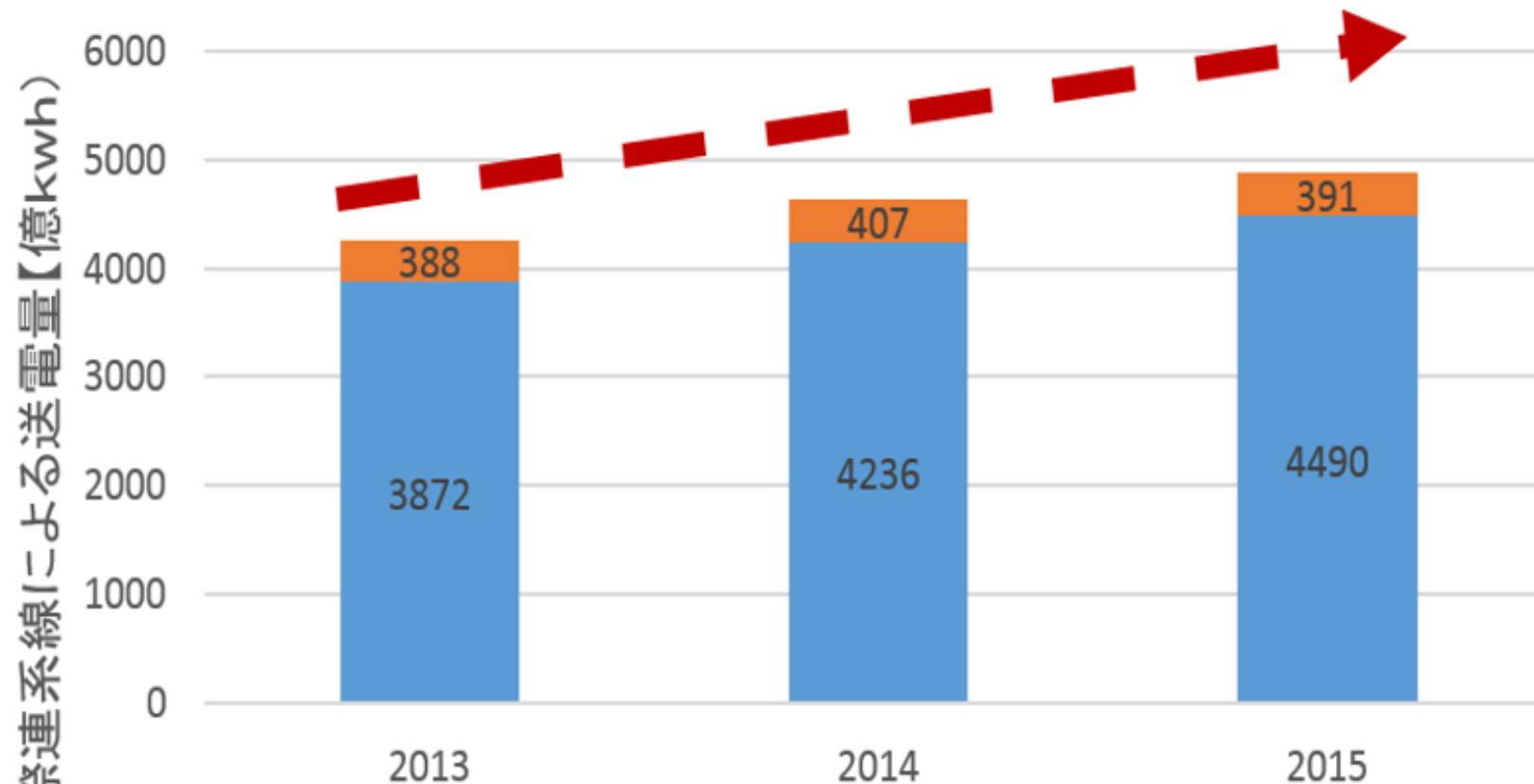
優先課題	インフラ整備を推進するエネルギー回廊およびその他施策	
短期優先課題	①2020年の目標に適切な欧州の電力グリッド North Seas Offshore Grid	<ul style="list-style-type: none"> ■ 北海・周辺海域における洋上風力発電能力を、北欧・中欧の電力消費の中心地やアルプス地方と北欧諸国の電力貯蔵地に接続・統合
	南西電力相互接続 South Western Electricity Interconnections	<ul style="list-style-type: none"> ■ 南西欧州（イベリア半島、フランスなど）で発電された再生可能エネルギー（風力、太陽、水力）電力を北欧と中欧に輸送するための相互接続 <ul style="list-style-type: none"> ■ 北アフリカにおける再生可能エネルギー資源と、北アフリカと欧州の間の既存インフラも活用
	中東欧・南東欧電力接続 Central/South Eastern Electricity Connection	<ul style="list-style-type: none"> ■ 中東欧・南東欧における地域電力網の接続を強化させ、市場統合と再生可能エネルギーのグリッドへの統合を支援 <ul style="list-style-type: none"> ■ 貯蔵施設と人工エネルギー島への接続含む
	バルト海エネルギー市場相互接続計画の完了 Baltic Energy Market Interconnection Plan (BEMIP)	<ul style="list-style-type: none"> ■ 下記の3点により欧州市場の統合を図る <ul style="list-style-type: none"> ■ バルト諸国内のエネルギーネットワーク強化 ■ バルト3国のエネルギー市場とフィンランド、スウェーデン、ポーランドの相互接続強化 ■ ポーランド国内エネルギーネットワークとその東西相互接続を強化
②～④	ガス、原油。スマートグリッドの展開	
長期優先課題	⑤欧州電力ハイウェイ European Electricity Highways <div style="border: 2px solid red; border-radius: 50%; width: 40px; height: 40px; display: flex; align-items: center; justify-content: center; margin: 10px auto;"> EEH </div>	<ul style="list-style-type: none"> ■ 北海、バルト海の風力発電や、南欧、北アフリカの太陽エネルギー発電により生産された余剰電力を、北欧諸国とアルプスの電力貯蔵施設に接続し、大規模な電力消費地である中欧に輸送 <ul style="list-style-type: none"> ■ 20年から電力ハイウェイを部分的に稼働させる目標 ■ 電力規制当局のフォーラム「フローレンス・フォーラム」がモジュール開発計画のフィージビリティを研究 <ul style="list-style-type: none"> ■ 潮力・波力などの発電技術への応用も研究
	⑥欧州 CO2 輸送網	<ul style="list-style-type: none"> ■ 将来的な CO2 輸送網の技術的、実地的な取り決め準備に 2020 年から着手

(2) entso-eの概要とデータにみる現況



国際連系線の相互送電量(億kwh/年)

—上端域外送電、下端entso-e加盟国域内—

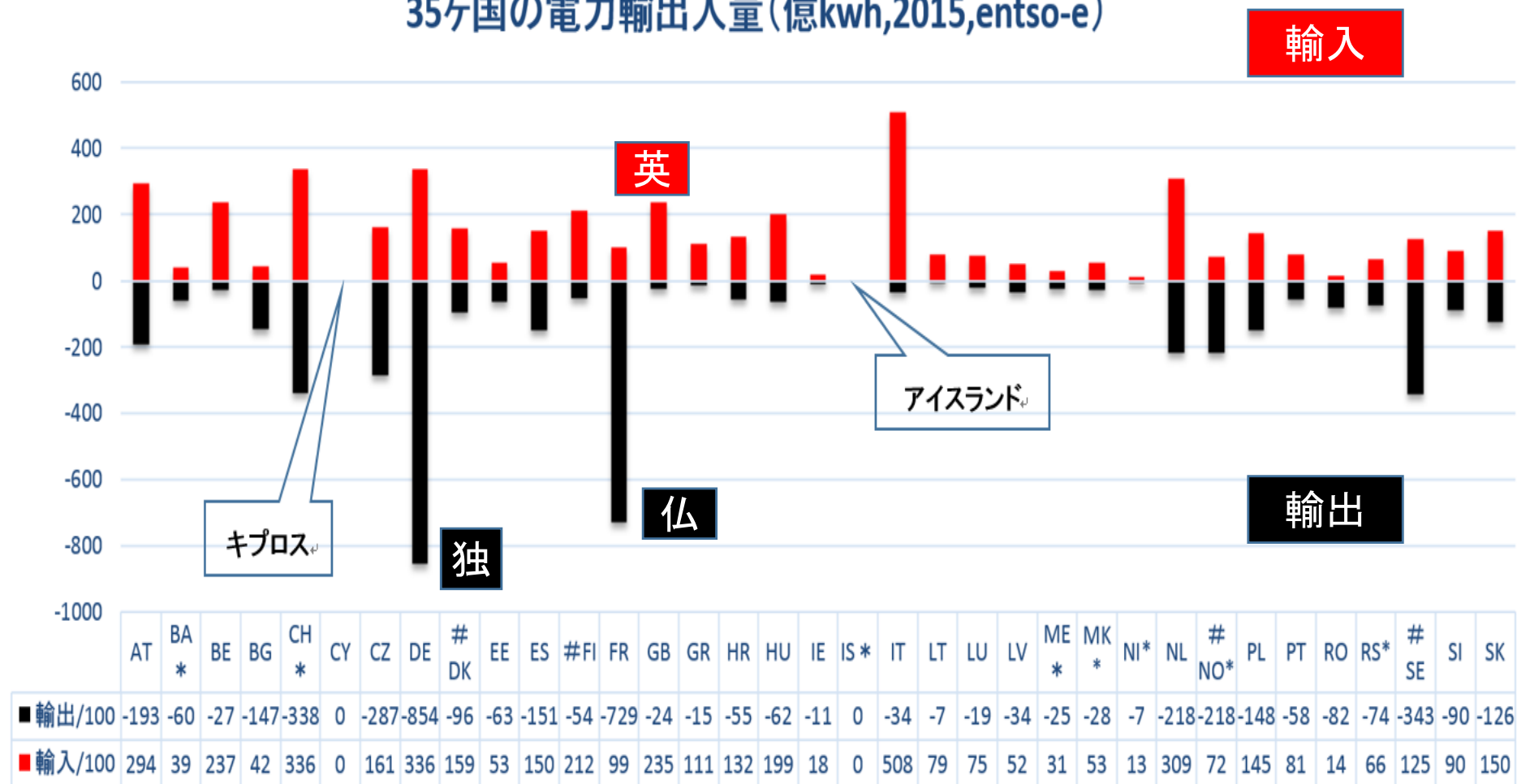


国際連系線による送電量【億kwh】

アルバニア、ベラルーシ、モルダビア。モロッコ、ロシア、トルコ、ウクライナ、ウクライナ-西

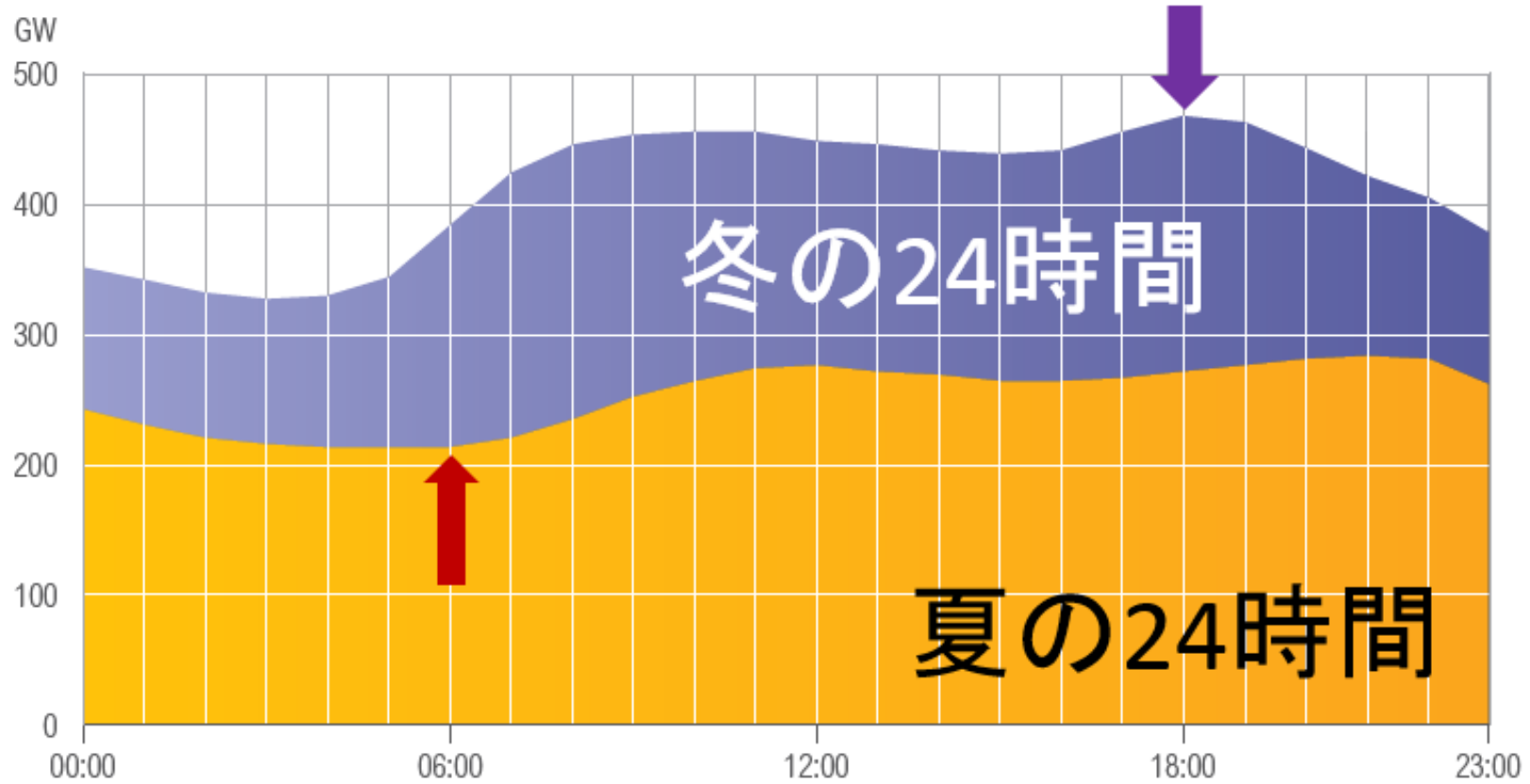
総発電量(3兆3305億kwh)一約14%の輸出入量

35ヶ国の電力輸出入量(億kwh,2015,entso-e)



ENTSO-E peak load 2015

—最高負荷は冬・夜18:00、最低負荷は夏・朝6:00—

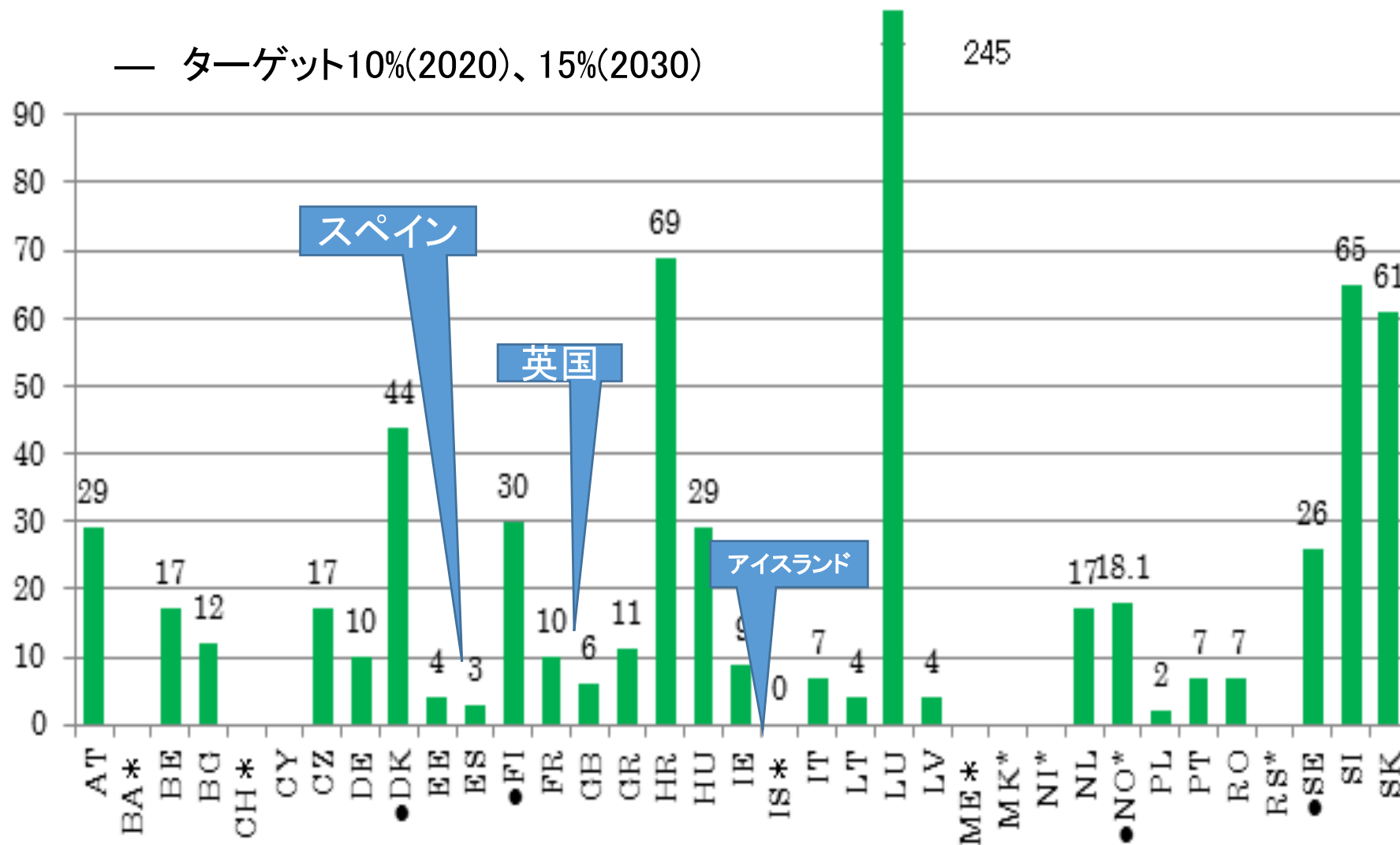


- Load curve on 5 February 2015
- Load curve on 16 August 2015

単位: 百万kw

(3) entso-e加盟国35ヶ国の国際連系線

— ターゲット10%(2020)、15%(2030)

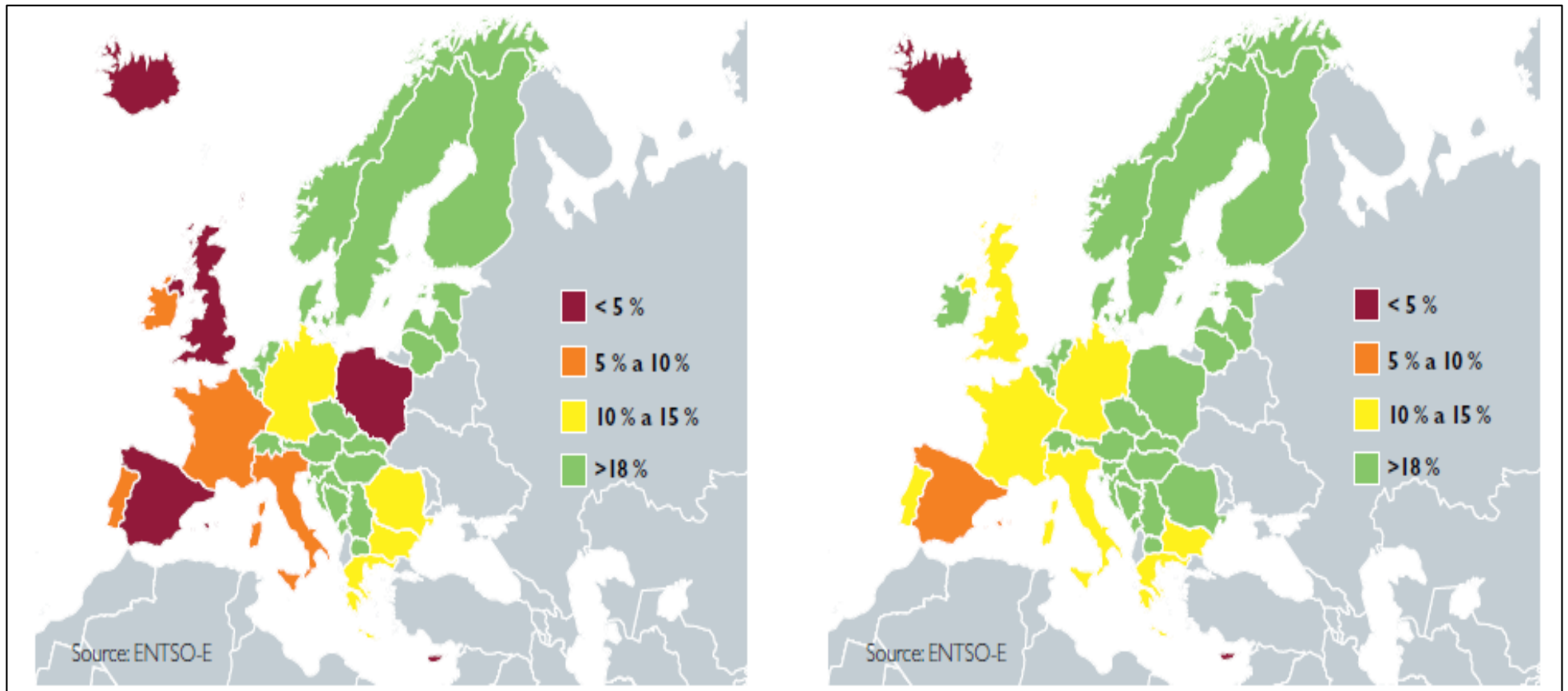


注) * EU未加盟国、*国のアイスランドは0%、ノルウェーは18.1%、EU27ヶ国が加盟・マルタは未加盟、●:北欧4ヶ国

出所: EC, COM(2015)82final, ENERGY UNION PACKAGE, Achieving the 10% electricity interconnector target, Making Europe's electricity grid fit for 2020.ENTSO=E, Scenario Outlook and Adequacy Forecast 2014より、筆者作成、2016.

孤立系統のアイスランド、キプロスなど……相互接続していても電力系統的に”陸の孤島“である英国、スペイン等の遅滞

改善される国際連系線（接続率）（2011） → 依然として孤立系統のアイスランド（2020）



出所：RED ELECTRICADEESPANA, Dep. Of Communication and Responsibility (2012)、Corporate Electricity Interconnections: a step forward towards a single Integrated European Single Market

(4)ヨーロッパ電力網のアップグレード



資料：ENTSO-e, energynautics より

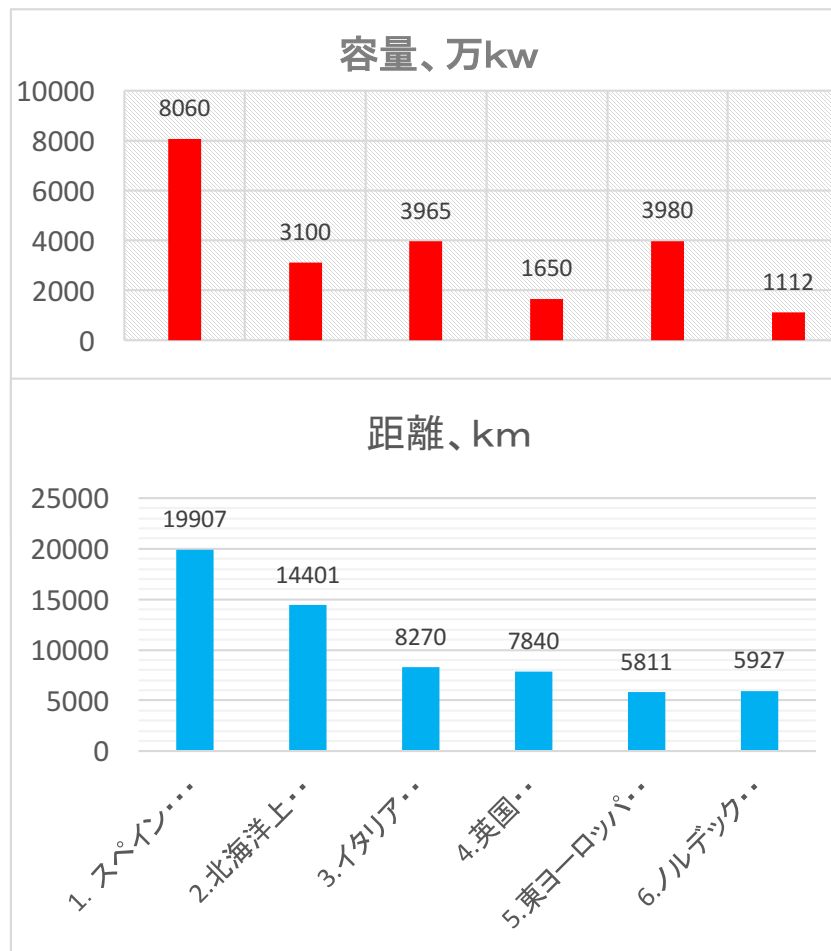
■ 地域強化.....

左図は欧州電力網でアップグレード(赤色)が必要とされる位置を示している(2030年)。

主要なアップグレード地域（基本シナリオ2030）

必要なアップグレード		
	容量 (万kw)	距離 (Km)
1. スペイン・仏・欧州中央	8060	19907
・スペイン国内	1000	2730
・スペイン-フランスNTC	1955	6546
・スペイン-フランス回廊(仏国内)	2625	5849
・フランス他	2480	4782
2. 北海洋上グリッド	3100	14401
・洋上グリッド	1650	7250
・陸上グリッド	1450	7151
3. イタリア-欧州中央	3965	8270
・イタリア国内	1620	4529
・イタリア-フランスNTC	800	1259
・イタリア-欧州中央回廊 (スイス・オーストリア経由)	1545	2482
4. 英国	1650	7840
・英国内	700	1850
・英国-欧州中央NTC	600	865
・英国-ノルウェーNTC	350	5125
5. 東ヨーロッパ	3980	5811
6. ノルデック諸国	1112	5927

21867 62156



基本シナリオ/最適シナリオのアップグレード概要（2010年量と比較）

	アップグレード(2010年比較)				-アップグレード- 総コスト(億ユーロ)	
	容量(万 kw)		距離(km)		HVAC+ 地中 HVDC	HVAC+ 架空 HVDC
	HVAC	HVDC	HVAC	HVDC		
①基本シナリオ 2030	20400	5800	44731	25841	70.34	50.86
②最適シナリオ	25800	8600	60794	38678	98.32	69.98
②-①最適化増分	5400	2800	16063	12837	27.98	19.12

資料：Thomas Ackermann 等, European Grid Study 2030/2050(2011)、energynautcs GmbH, Germany

(5) 英国の国際連系線の現況と今後

英・他国間(4国際連系線,400万kw)の純輸入力量(億kwh)と設備利用率(%)¹⁾

	France -UK	Ireland -N. Ireland	Netherland -UK	Ireland -Wales	合計
	200万kw	50万kw	100万kw	50万kw	400万kw(6%) ²⁾
2013	103.02 (60.3)	-0.45	63.35(73%)	-21.61	144.31
2014	149.51 (85%)	1.21	78.56(90%)	-24.08	205.20
2015	138.38 (79%)	1.67	79.99(91%)	-10.65	209.38

注 1)設備の利用率は純輸入力量に基づく値, 2)2014年値、entso-e に基づく国際連系水準(当該国の発電設備容量に対する比率)、2020年までにすくなくとも10%ターゲット

出所: National Statistics, Energy Trends:electricity,GOV.UK,より筆者作成、2016.

明確に低減した炭素排出原単位CO₂・t/百万kwh

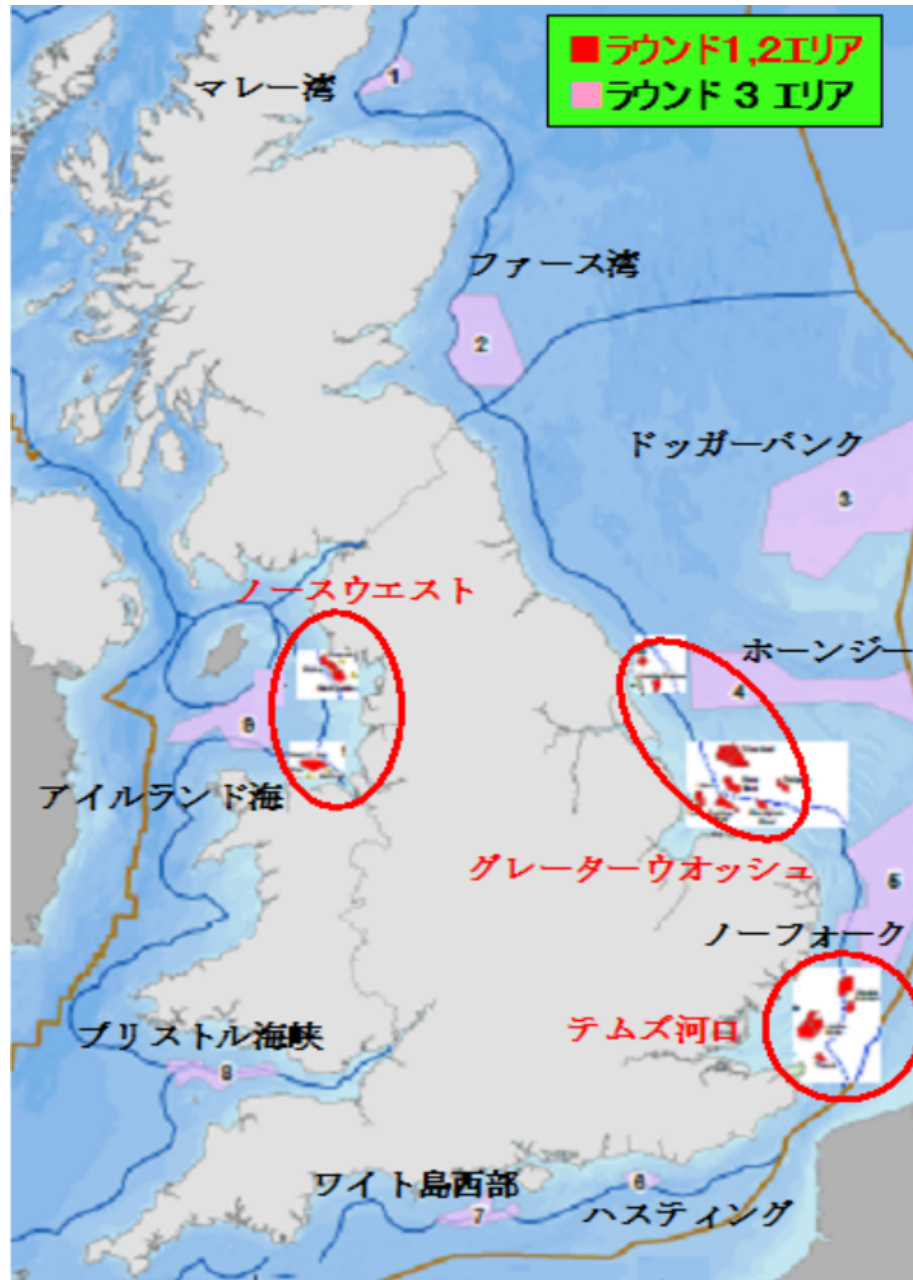


現行4本(400万kw)
→増大が必要

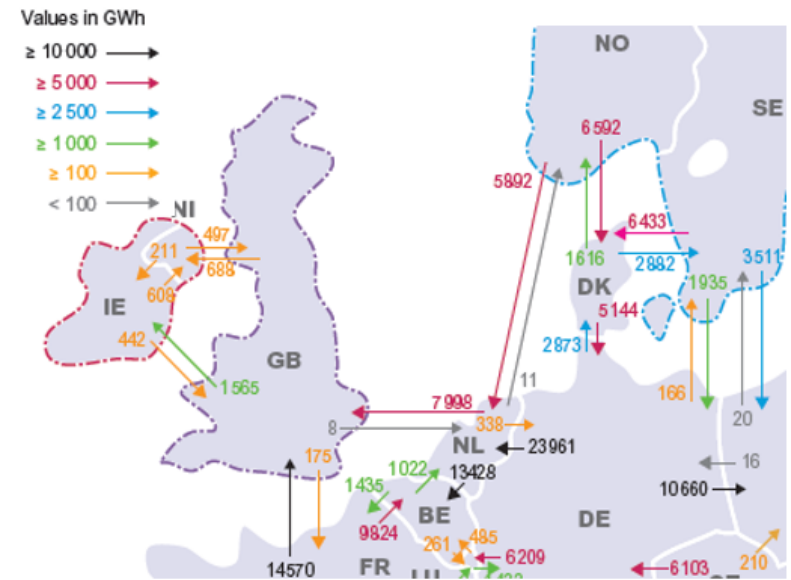
注)2015年は、速報値

出所: National Statistics, Chapter 5 electricity, GOV.UK,より筆者作成、2016.

英国: Round-1,2,3プロジェクト区域



資料: The Crown Estate社等



資料: STATISTICAL FACTSHEET "entso-e"

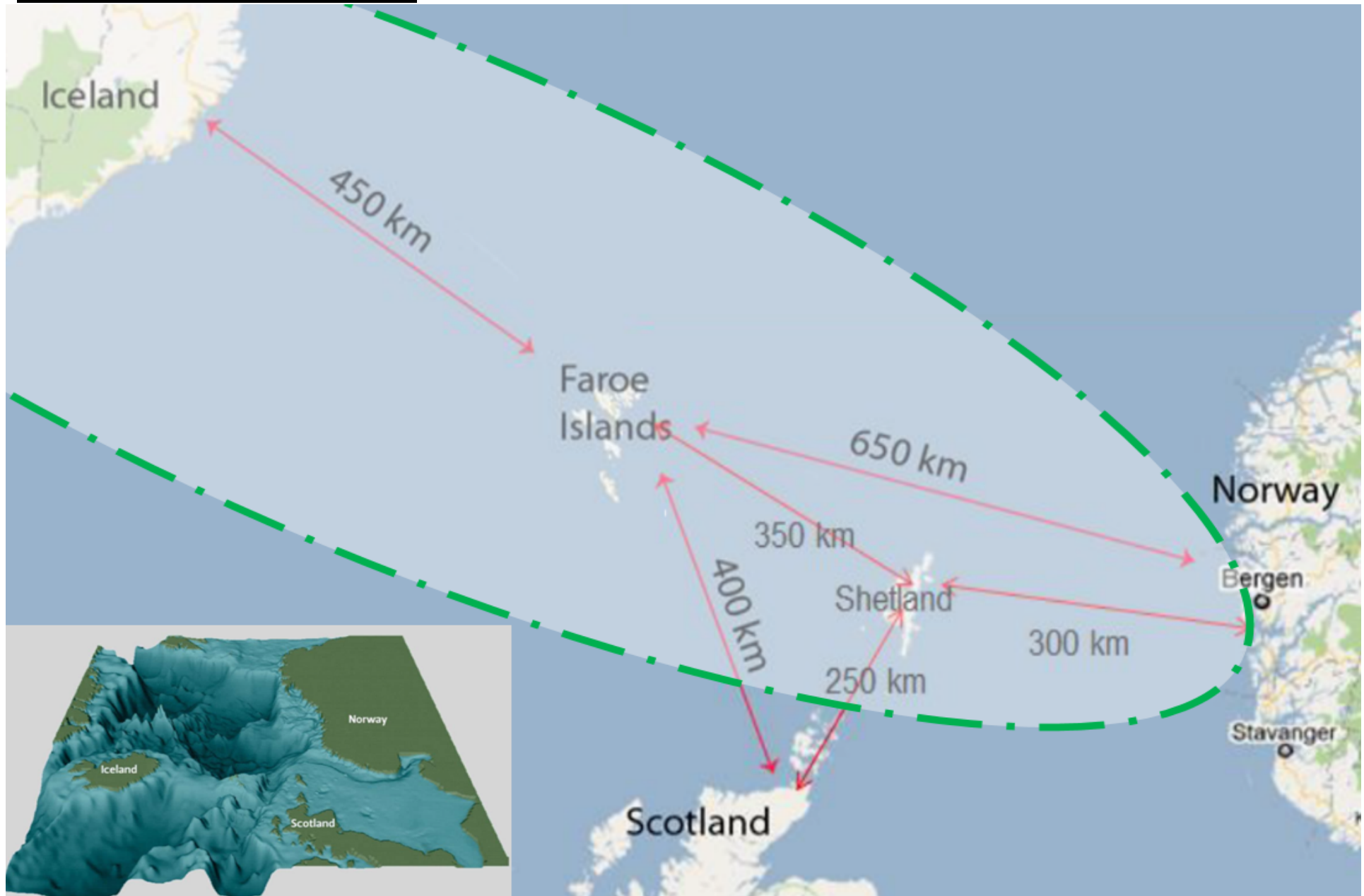


英国 現行の400万kw⇒400+730=**1130万kw**
国際連系線のターゲットは、2030年15%。

事業名	開発者	接続国	容量:万kw	運開年	
IFA	National Grid Interconnector Holdings (NGIH) and RTE	フランス	200	400	1986
Moyle	Mutual Energy	アイルランド	50		2002
BritNed	NGIH and TenneT	オランダ	100		2011
EWIC	EirGrid	アイルランド	50		2012
ElecLink	Star Capital Partners Limited and Groupe Eurotunnel	フランス	100	730	2019
NEMO	NGIH and Elia	ベルギー	100		2019
NSN	NGIH and Statnett	ノルウェー	140		2020
FAB Link	Transmission Investment and RTE	フランス	140		2022
IFA2	NGIH and RTE	フランス	100		2020
Viking	NGIH and Energinet.dk	デンマーク	100		2022
Greenlink	Element Power	アイルランド	50		2021

3. アイスランドの国際連系線:IceLink事業

(1) IceLink事業の概要



(2) 豊富な再エネ潜在量: 計500億kwh超

緑化電力の基本数値と潜在量

	①設備容量 (万 kw)	②発電量(億 kwh/年)	平均設備利 用率(%)	潜在量	
				潜在発電量①注1)	潜在発電量②
水力資源	198.6	128.63	73.94	300 億 kwh・年	300 億 kwh・年
地熱資源	66.5	52.45	90.04	200 億 kwh・年	460 億万kwh 注 2)
Fuel 燃料	11.4	0.03	—	—	—
風力資源				現在、実証事業中	
廃棄物資源	メタン発酵の熱電併給			2016年～	約3万トン資源
海洋資源	潮汐、波力、海流発電の膨大な潜在量				
合計	276.7	181.16		500 億 kwh・年	760 億 kwh

注1)政府 2002 年調査等、注 2)アイスランド政府ネットに潜在設備能力 580 万kwとある、注 3)①、②は 2013 年値。資料:国営電力会社資料。潜在資源量 2002 年値:「NEDO 海外レポート」(2007)より、著者作成。

風力発電の実証事業

	稼働風速(ピーク効 率)	平均設備利用 率	稼働率	停止速 度	備考
2基のタービ ン 計 1800kw	15~28m/s、 開始風速は 3m/s 年間発電量 = 630 万 kwh	約 40%	98%	34m/s	高さ = 77m

資料:国営電力会社資料より、著者作成。

(3) IceLinkの社会経済 厚生効果

アイスランドとEU間の国際連系線の想定ルート(赤色ルート)と事業効果



資料: 国営電力会社資料(2012)、一部著者加筆作成

IceLink 国際連系線の社会経済厚生効果

英国側の期待

- ・RES 目標値への削減費用、EU削減量目標
- ・エネルギー安全保障の向上
- ・ベースロード電源の調整能力や信頼性
- ・水力による風力・太陽光の中断対応
- ・価格変動の平滑化
- ・分かりやすい再エネと統計的な移転
- ・EUのグリーン目標値への再エネ達成
- ・風力、太陽光の安価な電力
- ・収入最大化のための柔軟性担保(貯水池利用)

アイスランド側の期待

- ・エリア内エネルギー市場における競争の強化
- ・エネルギー安全保障の向上
- ・エネルギーシステムにおける増加効率性
- ・最大に使用できる水力発電の柔軟性の向上
- ・より可能な高価費用の発電所の立地
- ・アイスランドの増大する電力需要対策

資料: アイスランド国営電力会社等資料より、著者作成、2015

英国に対して比較優位にあるアイスランドの電気料金(US\$/千kwh)

	英 国		アイスランド	アイスランド	
	電気料金	卸売料金			
産業用電気料金	126US\$	55US\$	英国より高い	-	
家庭用電気料金	236US\$	100US\$		-	
PLATTS 資料より (卸価格) 注1)	-	70US\$	80US\$	卸値、注2	注3
				25US\$	35~40 US\$
				上記の合計 60~65(US\$)	

注1) PLATTS, (McGRAWHILL FINANCIAL), 2011、注2)アイスランド多消費産業卸売料金、注3)国際連系線利用コスト、注4)原文£表示、為替変換 US\$ (=1.57×£)表示。資料: Posts from the 'Wind Power' Category, THE INDEPENDENT ICELANDIC ENERGY PORTAL, 2014 資料より著者作成

提案中の国際連系線の容量・総事業費用と IceLink 事業

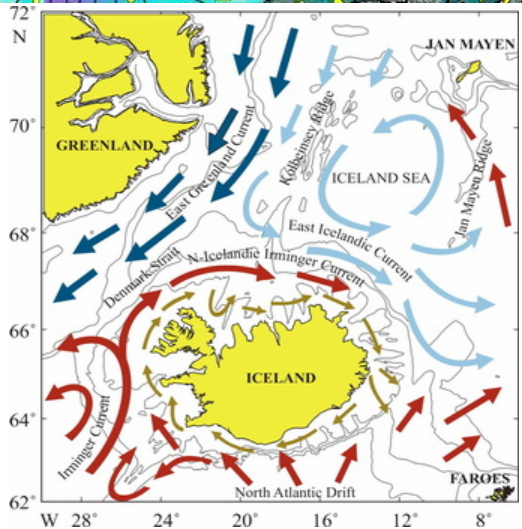
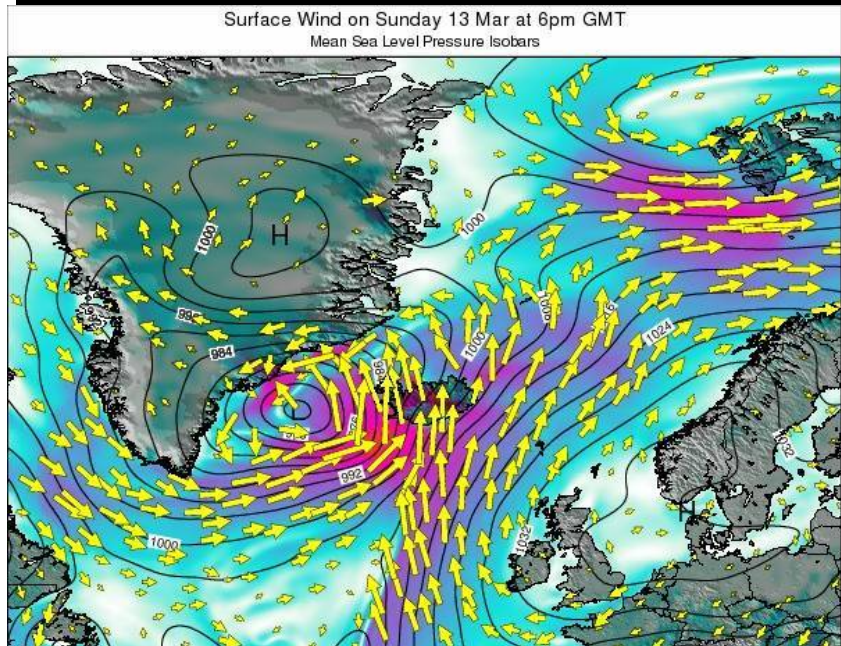
提案されている国際連系線	送電容量 (万kw)	総事業費 (百万 US\$)	千kw当りのコスト (百万 US\$)
①IceLink	100 の場合	2543	2.54
②HVDC Norway-UK(akaNSN)	140	1947~2590	1.38~1.85
③Denmark Interconnector	140	2198	1.57
④NorthConnect	140	1947	1.38
⑤IFA2	100	911	0.91
⑥Project NEMO /Belgium Int.	100	816	0.82
⑦ElecLink	100	518	0.52

注)原文£表示、US\$ = 1.57×£。

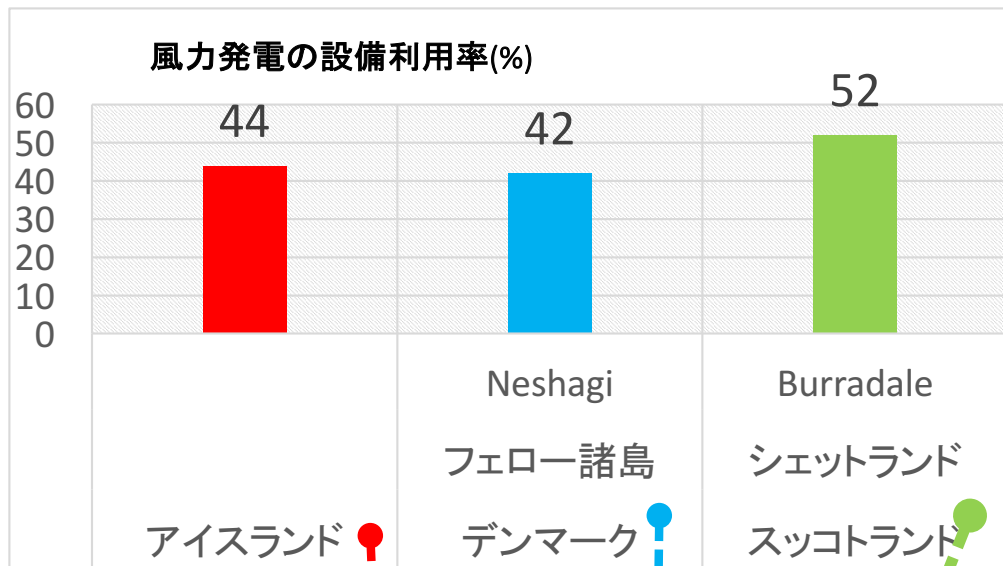
資料: British think tank Policy Exchange, Getting Interconnected-How can Interconnectors compete to help lower bills and cut carbon?, 2014 等より著者作成

4. “極北”の再エネ開発構想

(1) 膨大な再生可能資源が存在する“極北”空白域



海洋エネルギー(波力、潮汐)



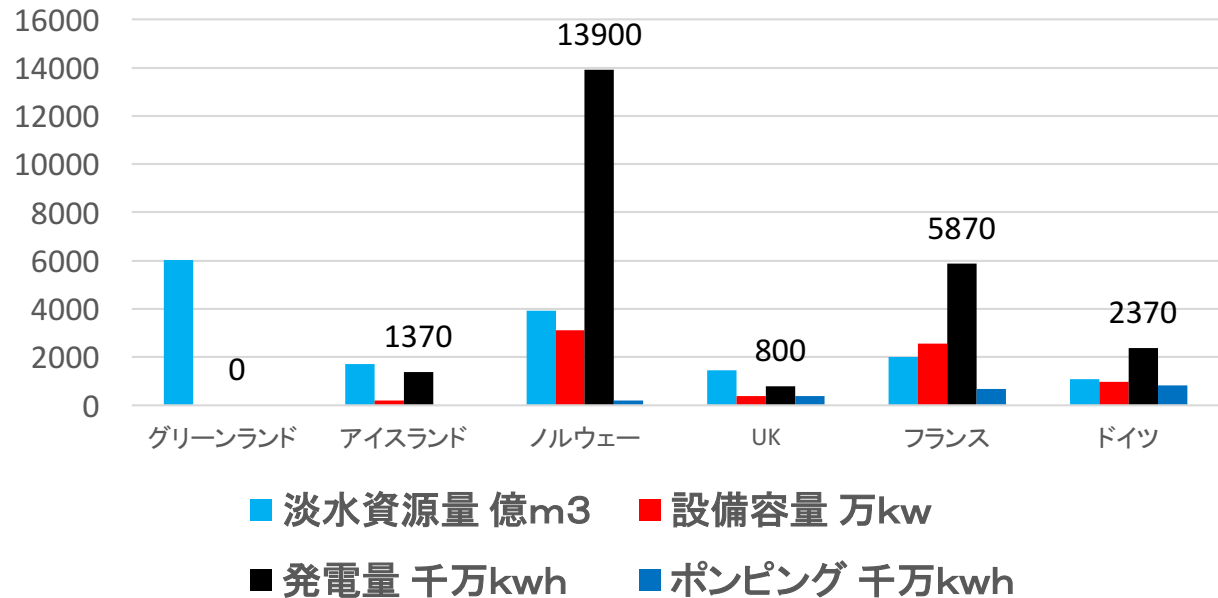
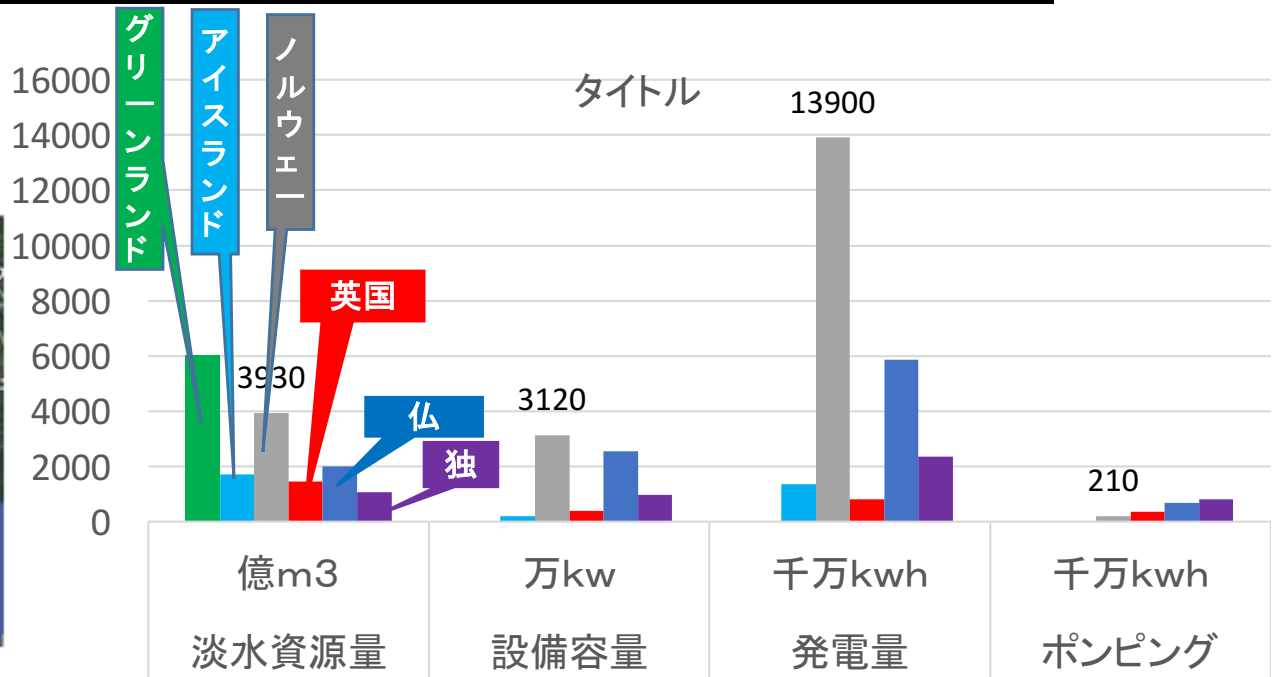
出所: Google Mapを下地に筆者作成、2016. 27

(2) グリーンランド～ノルウェーの“極北空白域”開発構想

膨大な“水資源”が存在する“極北”空白域



出所: Google Mapを下地に筆者作成、2016.

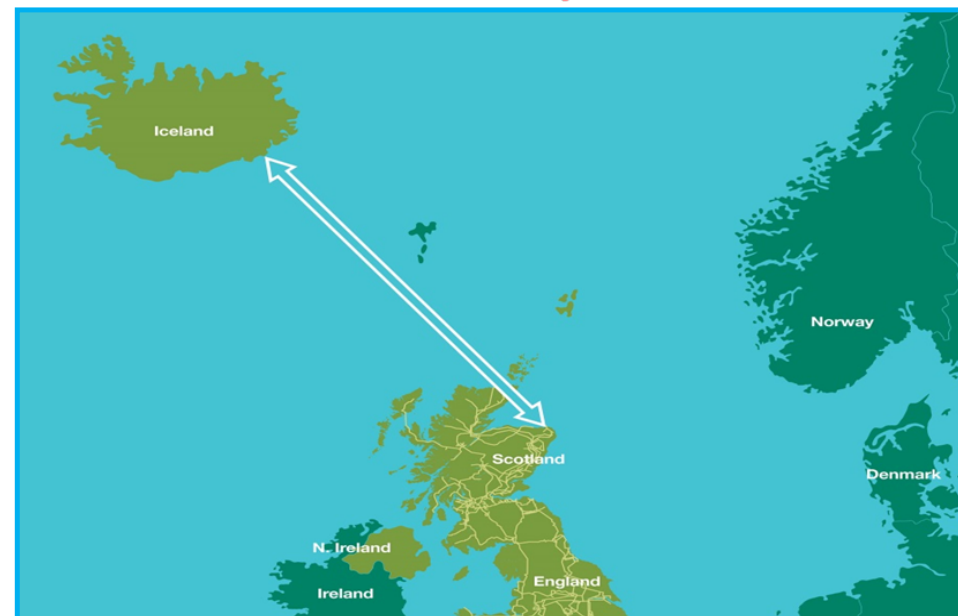


(3) 極北空白域の関係諸国の動向

- (1) アイスランド
- (2) フェロー諸島(デンマーク)
- (3) シェットランド島(スコットランド)
 - ・Malliプロジェクト(本島ーノルウェー)
- (4) ノルウェー(2016年初頭の会合)
 - ・Malliプロジェクト(本島ーノルウェー)

- (5) 英国: NationalGridのネット上
- (6) EESS, エネルギー同盟、MEP等の動き、
- (7) 国際的会計監査法人
- (8) PCIに基づく...

“Ice Link - in development”



nationalgrid 画面

PCIに基づく「TYNDP16」に掲載された国際連系線 IceLink プロジェクト

国境	Index	名前	プロジェクトの概要	送電容量	分類	事業者
Iceland	2	Interco	アイスランド・英国間の国際連系線(海底ケーブル)。80~120万kw・直流・1000km超。99.98%は再エネ発電、アイスランド水力発電の高い柔軟性により急成長する英国の風力発電の間欠性を理想的に対応。	100万KW。	Future Project 注)	LANDSNET (NGIHL)
- Great	1	Iceland				
Britain	4	-UK				

注) 中期、長期、未来の3分類。PCI(Project of Common Interest), TYNDP16(Ten Year Network Development Project 2016)

資料: entso-e(2016), TYNDP2016 Projects matching EC draft guidelines より作成。

5. まとめ

(1)

(2)

(3)

最後まで御静聴ありがとうございます

