

松下政経塾・塾生研究レポート 「わが国における国際送電連系の意義に対する一考察」

松下政経塾・第35期生・木村誠一郎

2016.10.03

本レポートは日本のエネルギー供給システムのうち、電力供給システムにおいて国際送電連系を導入すべきか否かを議論するため、これまで行われてきた議論および先行事例を調査・整理し、その上で、国際送電連系の意義について考察したものである。わが国の電力供給システムは東日本大震災を基点に大きく変容し始めた。その一つが市場の自由化であり、また、再生可能エネルギーの導入拡大である。それらの変化に伴い、電力供給システムにおいても国際送電連系の可能性が議論され始めている。しかし、その論点は定まっているとは言えない。

エネルギーは言うまでもなく国民生活の基盤であり、安定供給が求められる。戦後発展してきたわが国の電力供給システムはその安定供給に貢献し、経済成長を支えてきた。しかし現在、時代の変化に対応できなくなっている。太陽光発電や風力発電など、時間変動・季節変動を伴う再生可能エネルギーの導入が拡大したことで、いわゆる「不安定」な電源を活用しながら、「安定」に市場を通して電力を供給する時代に入ってきている。このような時だからこそ安定供給の取り組みはより重要になり、国際送電連系が議論されるとすれば、それが安定供給に資するかどうか重要な判断基準となるであろう。

本稿では国際送電連系の意義を明確にするため、過去の国際連系線の設置目的や利用実績を調査した。その結果、これまでの国際連系の取組みが、設置主体者の経済的メリット享受を目的として行われてきたことを明らかにした。すなわち、送電線設置に伴う予備力共有による電力の安定供給や信頼性確保の便益、また、取引市場の成熟、国際連系国同士の相互依存の進展による政治的関係の発展などの便益は、経済的利益が成立した上での付随的なものである。言い換えるならば、国際送電連系のようなエネルギーについての考え方の異なる2つ以上の地域を結ぶシステムを建設する場合、設置主体者の経済的利益がまず必要であり、その上に追加的な目的が加わる必要がある。

また本稿では、わが国において国際送電連系を行う候補国として韓国およびロシアとの連携についても考察した。その結果、韓国との国際連系は、送電線設置主体者の利益になると共に、両国の電力安定供給に寄与する可能性があるを得た。今後、日韓間の電力国際連系が本格的に議論される一助になればと考える。

The Matsushita Institute Discussion Paper

Significance of Cross-Border Interconnected Power System for Japan Electricity Grid

Seiichiro KIMURA, Ph.D.

This report discusses the significance of cross-border interconnection in the power supply system in Japan. Study objective is to suggest whether it should be promoted or not, from the investigation of preceding projects and previous studies. After the Great East Japan Earthquake in 2011, Japanese power supply system was forced to change. Examples include the deregulation of electricity market and expansion of renewable energy. The feasibility of cross-border interconnected electricity system has been discussed, however, the point of discussions was not clear enough.

Energy is essential for our lives, and stable supply of energy is always required. Japanese stable power supply system, which had supported Japan's economic growth, cannot respond to changes of social needs at this present. The use of renewable energy including PV and wind power generation involves fluctuation due to time and seasonal effects. Its expansion in recent years suggests a new era of turning "unstable" energy sources into "stable" power supply through market system. Therefore, today, efforts in realizing stable power supply are more important than ever. When cross-border electricity interconnection is discussed, the important factor is whether such system is effective enough for stable supply.

This study investigated the objectives and results of past models of cross-border power interconnection systems in order to clarify its significance. The result shows that the major objective of past efforts in interconnected electricity system was economic benefit for system providers. Other benefits such as stable power supply and high reliability owing to grid installation and subsequent surplus electricity sharing, as well as market maturity and development of political relationship between related countries, are incidental after the economic benefit is confirmed. In other words, providers' economic benefit has to be secured, followed by other additional objectives, when building a system that connects more than two countries whose perspectives on energy security related to interconnected power system are different.

In addition, this study analyzed future cross-border power interconnections between Japan and Korea, Japan and Russia. It is found that the partnership with Korea will benefit grid providers and is more likely to contribute to stable power supply for both countries. The results of this study will give some new perspectives on the future discussions of Japan's electricity power system in cooperation with Korea.

目次

要約	1
Abstract	2
1. はじめに	5
1.1 わが国のエネルギー供給システムの現状	5
1.2 再生可能エネルギー固定価格買取制度導入後の電力市場	8
1.3 わが国を含む電力の国際連系構想	12
1.4 本レポートの目的	21
2. 調査方法	23
2.1 国際連系実績・調査対象地域	23
2.2 わが国電力供給システムの将来想定	25
3. 調査結果および考察	29
3.1 既設国際連系線の意義に関する文献調査結果	29
3.2 わが国の国際連系接続先ならびにその意義についての考察	34
4. 結論	41
参考文献	43

白紙

1. はじめに

1.1 わが国のエネルギー供給システムの現状

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災は、地震や津波による直接の人的・物的被害に加え、電力、ガス、自動車用燃料など生活必需エネルギーの供給寸断をももたらした。石油や天然ガスなど化石資源のほとんどを海外からの輸入に依存するわが国はエネルギー資源の受け入れ基地を沿岸部に設け、そこに原油の精製や天然ガスの熱量や成分調整をおこなうプラント、また、発電所なども設置している。生活必需エネルギーはこれらエネルギー転換設備から送電網やガスパイプライン、タンクローリーなどを通じて内陸部、また都市部の消費者へ届けられる。震災は沿岸部に設置された製油所や LNG 受入基地、ガス製造所、また発電所の一部を機能不全とし、そこからのエネルギー輸送手段も破壊した。すなわち、消費者が使う形にエネルギーを加工し、輸送するサプライチェーンが上流から下流まで影響を受けたのである。

電力供給において 3 月は季節柄、年間を通した需要ピークではなく、数多くの発電所が保守作業に入っていた。そこに震災に伴う原子力発電所からの電力供給停止が発生し、その結果、電力供給の逼迫を招いた。ガス供給では仙台の LNG 基地及び仙台地区の都市ガスパイプラインが被害を受け、当初は 1 年以上のガス供給が難しいと見込まれた。結果的には日本海側からのパイプラインを通した天然ガス供給と、LP ガス供給により当座をしのごうことができたが、都市ガス供給における災害に対する脆さが明らかになった。自動車燃料については、製油所の被害、道路の寸断などにより被災地における供給不足が起こり、震災後しばらくの間、ガソリンや軽油などの供給を待つ行列が見られた。以上の経験から、2011 年以降、電力供給、ガス供給、自動車燃料供給において安定供給の脆さが指摘されることとなる。

一方で、震災前より気候変動対策として世界的な温室効果ガス削減の取り組みが進められている。わが国の温室効果ガス発生量のおよそ 90%近くをエネルギー起源二酸化炭素が占めるため、エネルギー消費からの二酸化炭素発生抑制が重要な課題である[1]。原子力発電や、太陽光、風力をはじめとするなどの再生可能エネルギーは発電時の二酸化炭素発生量がゼロであり、温室効果ガスの発生抑制の観点で有利と考えられてきた。しかし、原子力発電については福島第一原子力発電所事故後、世論に変化が生じ、当面の新增設の見通しは立っていない。また、震災後、再生可能エネルギー特別措置法（平成二十三年八月三十日法律第百八号）が制定され、以降、太陽光発電所を中心とした急速な導入が起こったため、一部の電力会社では再エネ電力の接続をおこなうか否かの回答を保留する状況ともなった[2]。さらに、福島第一原子力発電所事故に伴う東京電力の供給力不足は、他電力会社の東京電力管内の電力託送業務の停止を引き起こし、新電力などの業務展開に支障を生ずるとの見方も生まれ、低廉で安定的な電力供給を実現するため電力システム改革が開始された[3]。2016 年 4 月より、小口の低圧需要を含めた電力の小売り事業が自由化され、2020 年には旧一般電気事業者の発電部門と送配電部門が分離される予定である。同時に、同じエネルギー供給システムであるガス事業においても整合的であるべきであるとの考え方に

より、ガスシステムについても改革が検討され、2017年4月より小売り事業の全面自由化が始まる予定である[4]。このように、戦後一貫して築かれてきたわが国のエネルギー供給システムと、関連事業者は、現在、大きな変化の時を迎えている。

ところで、エネルギー供給システムのうち、本稿では電力供給システムについて、その国際送電連系の可能性を議論する。電力は一次エネルギー消費量ベースでわが国の全エネルギー消費量のおよそ半分を占めると共に、供給ネットワークが全国に張り巡らされていることから国際送電連系の可能性が考えられている。

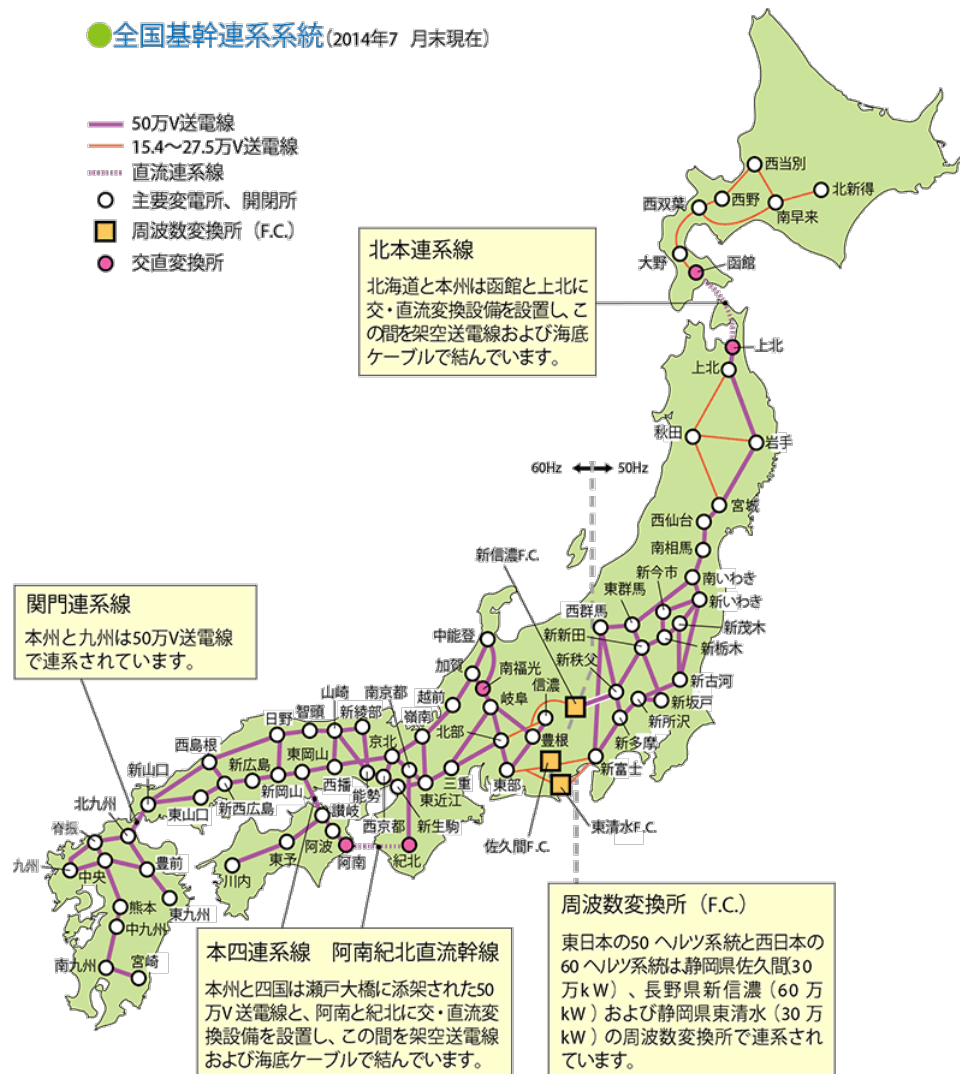


図1 わが国の送電系統[5]

図1はわが国の基幹送電系統を示したものである。わが国の電力供給システムは大きく東日本の50Hzエリアと西日本の60Hzとに分かれているが、それぞれのエリアにおいて154kV以上の基幹送電系統によって全国的なネットワークが構築されている。50Hzエリアと60Hzエリア間にも周波数変換所が設置され、容量制限はあるものの電力送電は可能となっている。図2は電気が発電所から需要地に届くまでの流れを示した図であるが、発電所

は 154kV 以上の基幹送電系統に接続され、いくつかの変電所を通した後、配電用変電所に一般的に 6.6kV に電圧降下される。図 3 に基幹送電線ならびに配電線の一例を示す。

私たちが電気を使う場合、この配電系統から供給された電力を 100V ないしは 200V に変換して使用する。配電系統の特徴は、バックアップ系統を除いて電力の流れが変電所から需要側への一方通行となるように設計されており、配電網から送電系統に電気を流すこと（逆潮）を想定されていないことである。一方で、送電系統は様々な方向からの発電電力が流れ込むことが想定され、基本的には両方向に電力を送ることが可能である。基幹送電系統に接続され発電された電力は、その送電線が繋がっている限り、送電ロスを気にしなければ理論的に日本中に送る事が出来る。つまり、国際連系線を敷設し、基幹送電系統のいずれかの場所に接続することが出来れば、海外の電力をわが国内で使用でき、同時に、わが国で発生させた電力を海外に送る事も可能となるわけである。幸いにして、図 1 に示したように、わが国では長年にわたり北海道から九州まで基幹送電系統が整備されていることから、国際送電連系が実現した場合の便益はネットワークが繋がる全国に及ぶことになる。

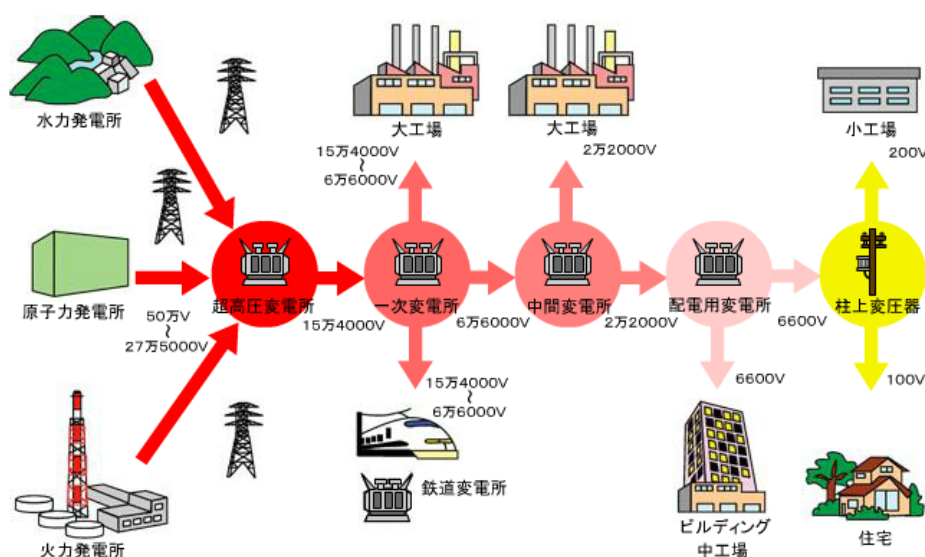


図 2 わが国の電力供給システムイメージ[6]

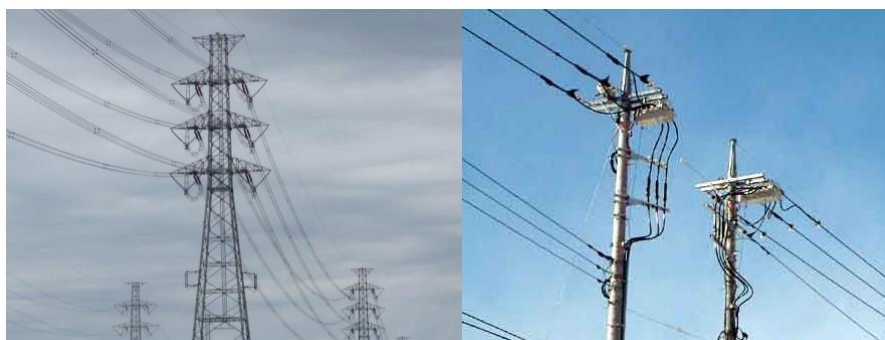


図 3 154KV 以上の基幹送電線例（左）／6.6kV の配電線例（右）

1.2 再生可能エネルギー固定価格買取制度導入後の電力市場

電力供給システムは、再生可能エネルギー固定価格買取制度（FIT）の導入後、大きく変化しはじめた。そこでまず、電力供給システムに関し、わが国の電力市場を俯瞰する。

図4はFIT導入後の買取電力量と、旧一般電気事業者の総販売電力量に対するFIT買取電力量の割合を示したものである。2012年に制度が開始されて以降、太陽光発電を中心に急速に導入が進んだ。特に、10kW以上の太陽光発電設備は制度開始以降に導入されたものがほとんどであり、2015年度末現在でわが国の販売電力量の5%に達している。FITによる買取金額を図5に示すが、既に1兆5千億円を超え、全消費電力量で按分される再エネ電力賦課金は制度導入前の電気料金の1割に達している。

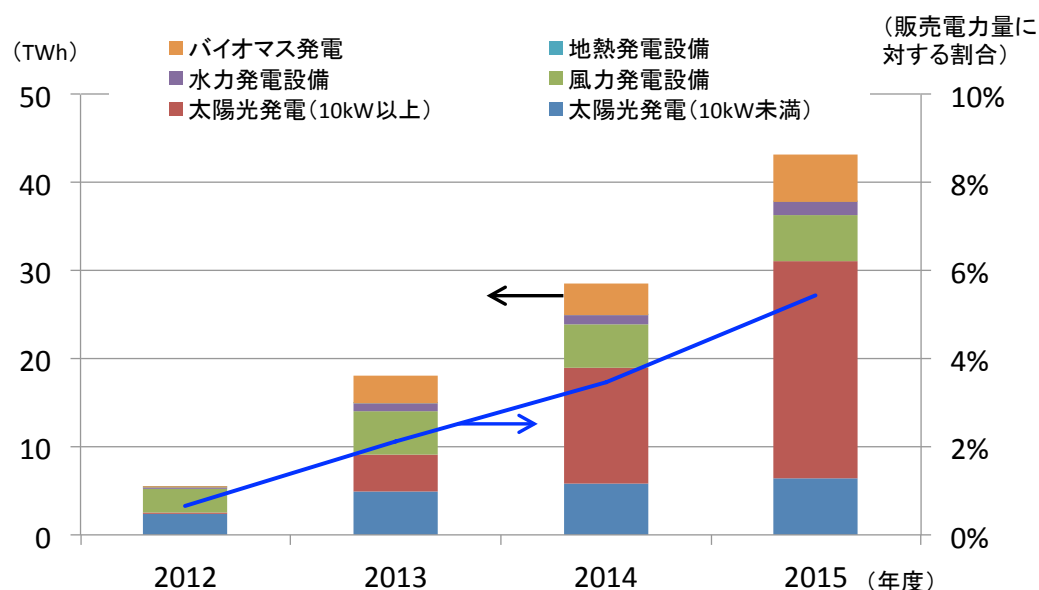


図4 再生可能エネルギーの固定価格買取制度による買取電力量（[7]より筆者作成）

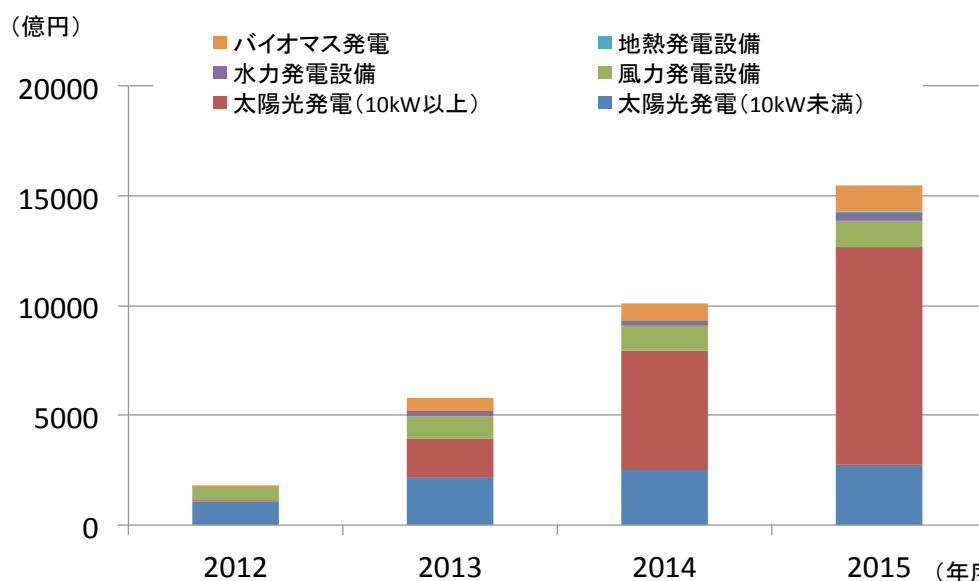


図5 再生可能エネルギーの固定価格買取制度による買取金額（[7]より筆者作成）

再生可能エネルギーの導入拡大は電力市場にも影響を与えている。図 6 は FIT によって太陽光発電が急速に導入される前の日本卸電力取引所 (JEPX) の前日スポット市場価格(平日)である。電力需要と連動し需要が増加する 9 時から 12 時までと、13 時から 15 時頃に価格のピークが発生していることがわかる。また、ピーク時の卸価格は最大 18 円程度であった。この価格は、2011 年にコスト等検証委員会が示したピーク電源コスト水準であり、需要のピーク時にはそれら電源による取引が行われていることが示唆される。

一方で、図 7 は 2016 年の同時期(平日)における前日スポット市場価格である。4 年前にはピークとなっていた時間帯にピークが見られず、16 時から 18 時の間にピークが見られる。この理由は次の二つが考えられる。一つは、9 時から 15 時頃の日中に価格の安い電源から市場に電源が提供されたこと、もう一つは同時刻帯の需要が減少し、それに伴い取引価格が低下したことである。

9 時から 15 時は太陽光発電による電力供給が増加する時間と一致するため、翌日の気象条件から発電量の予測が立つ場合には、旧一般電気事業者によって一旦買い取られた電力が市場で売り渡された可能性も考えられる。しかし、図 8 で示す通り、FIT を通して旧一般電気事業者が手に入れた電力の平均発電単価は 10 円/kWh 程度であり、それを同程度の価格で市場を通じて売却することはあまり考えられない。なお、FIT 電力の発電単価は、賦課金にて回収される費用を除く、買取主体が支出する費用を発電電力量で除して求めている。

米国では太陽光発電電力量の低下に伴って夕方の時間帯に電力需要が急増する「ダックカーブ」と呼ばれる現象が起きているが、2016 年の卸価格の傾向はそれに類似しているようにも見える。このことから、2016 年のスポット価格が 2012 年と変化した要因は、太陽光発電の導入増加に伴う需要変化が影響していると考えることが適当と思われる。

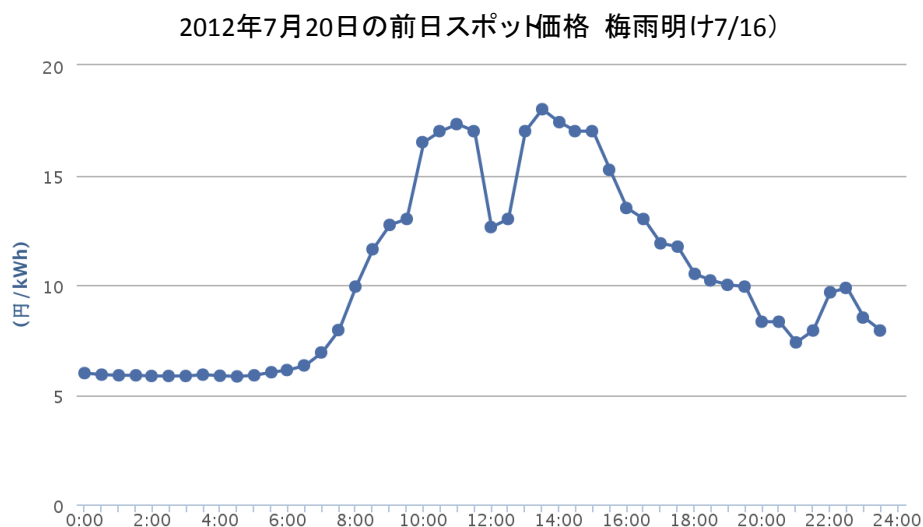


図 6 2012 年時点における代表的電力取引価格の一日推移[8]

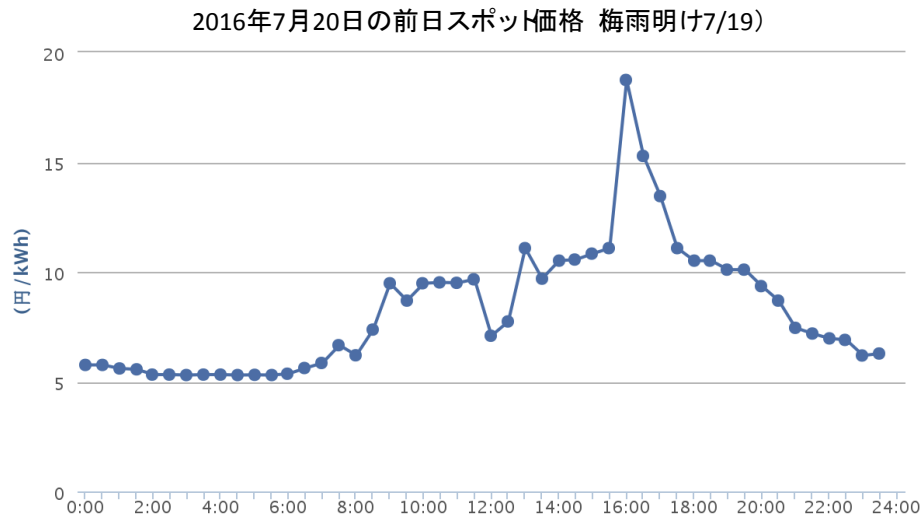


図 7 2016 年時点における代表的電力取引価格の一日推移[8]

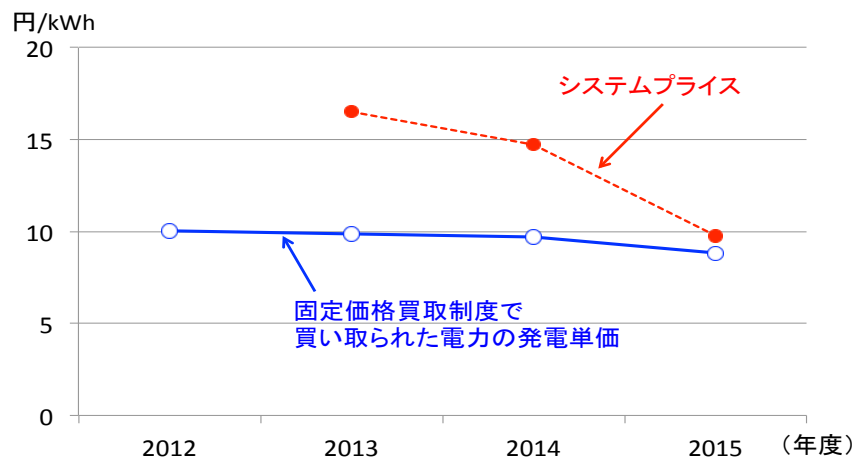


図 8 日本卸電力取引所の年間平均システムプライスと

固定価格買取制度対象電力の発電単価の比較（[7, 9]より筆者作成）

図 8 で示した FIT 導入以降の市場の年平均システムプライスは、FIT によって買い取られた電力の平均価格に漸近している。言い換えると、国の制度によって経済的支援を受け、かつ優先給電される電源が kWh あたりの電力市場価格に影響を及ぼしているように見受けられる。優先給電される再生可能エネルギー電力が市場価格に影響を与えることは、2014 年の総合資源エネルギー調査会・基本政策分科会・電力システム改革小委員会・制度設計ワーキンググループ（第 5 回）[10]や、2016 年の同調査会・電力ガス事業分科会・電力基本政策小委員会（第 5 回）[11]においても指摘されている。FIT 制度を通じて供給される電力は調整力の必要性を増加させる一方、kWh あたりの電力価格を押し下げ、火力発電などの調整電源の固定費を回収できない、いわゆる「ミッシングマネー問題」の一因になることも指摘されている[12]。これをメリットオーダーのイメージ図として表したものが図 9 であるが、需要カーブが変わらない場合、または需要が低下する場合において、優先給電された再生可能エネルギー電力の供給が増えることでシステムプライスを下げることが理解できる。

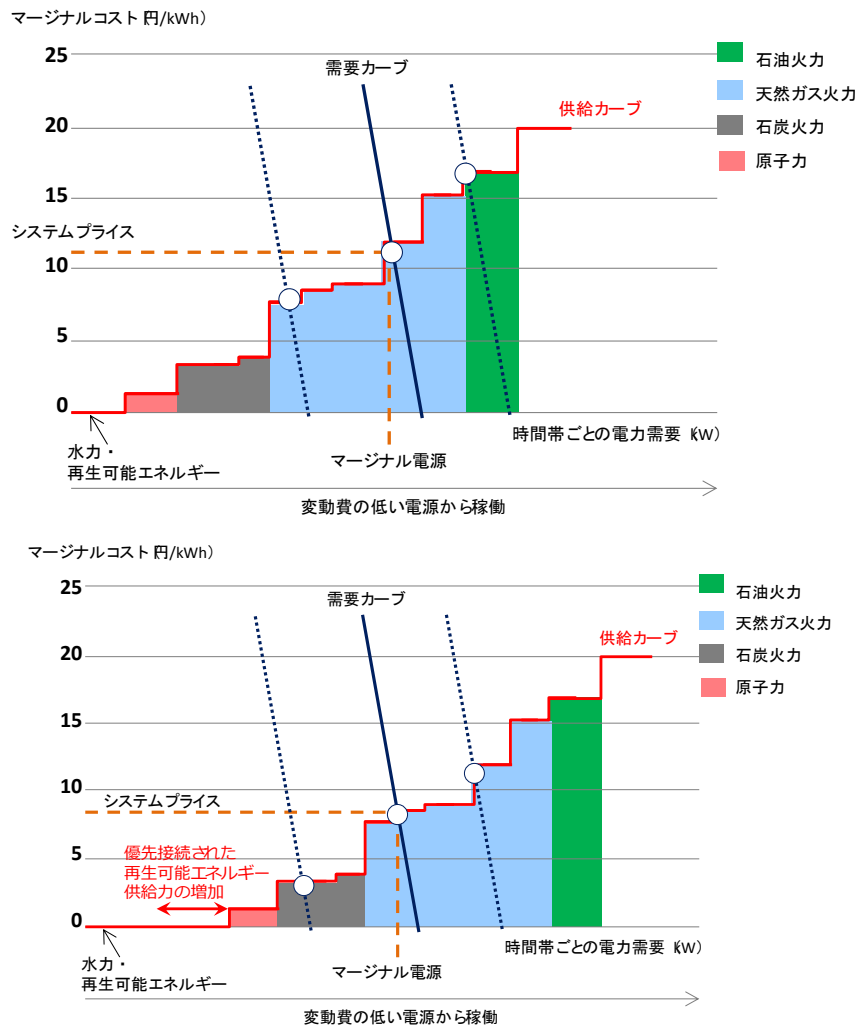


図9 再生可能エネルギーによる供給力増加前後のメリットオーダーのイメージ
(上：供給力増加前、下：供給力増加後) ([10-12]より筆者作成)

既に、電力自由化において先行し再生可能エネルギー電力の優先接続義務のあるドイツでは、需要の少ない時間帯において風力発電による電力供給が増加する場合において kWh あたりの卸電力価格が一時的にマイナスになるなど、状況においては価格の振れが大きくなる状況が生じている[12,13]。

また、今年 4 月に行われた総合資源エネルギー調査会・基本政策分科会・再生可能エネルギー導入促進関連制度改革小委員会（第 8 回）において示された「FIT 制度見直しの検討状況の報告」では、今後、新たに FIT で買い取られた電力は一般送配電事業者が買い取った上で卸市場に供給することが示された[14]。今後、ますます JEPX の卸市場価格が再生可能エネルギー由来電力の影響を受ける可能性が考えられる。

1.3 わが国を含む電力の国際連系構想

これまで、わが国を含む国際連系の検討は国内外で広く行われてきた。本節ではそれらの検討や構想がいかなる理由から行われてきたのかを明らかにする。本節ではそれらのうち、主たる以下 12 点について、構想が最初に発表された順に述べる。

- (1) 【1998 年】ロシアの Belyaev 氏、韓国電力研究所 KERI ならびにロシア企業 En+ などによる NEAREST (Northeast Asian Electrical System Ties) 構想
- (2) 【1998 年】イギリスの Hammons 氏などによる PEACE ネットワーク (Power, Economy And Clean Environment) 構想
- (3) 【2000 年】日本エネルギー経済研究所アジア太平洋エネルギー研究センターによる北東アジア電力連系
- (4) 【2004 年】韓国の Bae 氏による北東アジア平和ネットワーク (Peace Network in North East Asia) 構想
- (5) 【2010 年】豪州 GRENA TEC によるアジア太平洋エネルギーネットワーク (Pan-Asian Energy Infrastructure) 構想
- (6) 【2011 年】自然エネルギー財団によるアジアスーパーグリッド (Asia Super Grid) 構想
- (7) 【2011 年】日本創成会議によるアジア大洋州電力網 (Asia Pacific Power Grid) 構想
- (8) 【2012 年】経済産業省総合資源エネルギー調査会総合部会電力システム改革専門委員会地域間連系線等の強化に関するマスタープラン研究会
- (9) 【2014 年】韓国電力公社による北東アジアスーパーグリッド (North East Asia Super Grid) 構想
- (10) 【2014 年】エネルギー憲章条約事務局によるゴビ砂漠およびアジアスーパーグリッド (Gobitec and Asia Super Grid) 構想
- (11) 【2014 年】フィンランドの Breyer 氏らによる北東アジアスーパーグリッド (North-East Asian Super Grid) 構想
- (12) 【2014 年】ロシアの Skoltec ならびに韓国エネルギー経済研究所 KEEI による北東アジアスーパーグリッド (Northeast Asia Super Grid) 構想

(1) ロシアの Belyaev 氏、韓国電力研究所 KERI ならびにロシア企業 En+などによる NEAREST (Northeast Asian Electrical System Ties)構想[15-19]

検討対象	ロシア、モンゴル、中国、韓国、北朝鮮、日本
年	1998 年～2012 年
検討目的	広域連系効果の検討
検討内容	ピークロード分析、費用対効果分析、エネルギーロス及び信頼性分析等から以下の項目について効果的であると結論。 a) 電力需要の時間変動ならび季節変動に対応する追加容量の削減効果 b) 接続された領域の電力安定供給の信頼性向上 c) 多数の国が水力発電に代表される再生可能エネルギーへ関与可能 d) 電力貿易取引による収益確保 e) 電力価格の低減



図 10 NEAREST 構想[19]

(2) イギリスの Hammons 氏などによる PEACE ネットワーク (Power, Economy And Clean Environment) 構想[20-22]

検討対象	ロシア、モンゴル、中国、韓国、日本
年	1998 年
検討目的	東アジアの電力需要の増加をロシアおよび中国西部のエネルギーポテンシャルによって賄うことを想定し、そのプロジェクトの優先順位を選定
検討内容	費用対効果分析、商業的・技術的実現可能性の詳細分析、CO2 などの温暖化ガスを用いないエネルギー供給分析を提案。

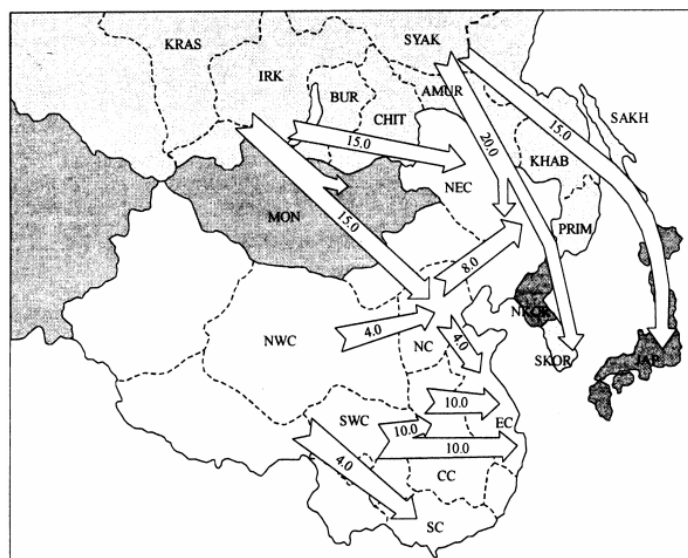


図 11 Hammons 氏の PEACE ネットワーク構想[20]

(3) 日本エネルギー経済研究所アジア太平洋エネルギー研究センターによる北東アジア電力連系検討[23]

検討対象	ロシア、中国、韓国、日本
年	2000 年
検討目的	ロシアのエネルギー資源の北東アジア地域における活用
検討内容	ロシアシベリア～中国北東部ならびにロシア極東から日本の電力系統接続について検討し、それらの間で発電源と需要とをどのようにマッチさせるかが重要との結論。日本との接続はロシアの季節変動と反対である事からピークロード分散に貢献。また水力による CO2 フリー電源を入手できる観点で便益があることを確認。



図 12 北東アジア電力連系検討 [23]

(4) 韓国の Bae 氏による北東アジア平和ネットワーク (Peace Network in North East Asia) 構想[24]

検討対象	ロシア、中国、北朝鮮、韓国、日本
年	2004 年
検討目的	北東アジア地域の繁栄と平和のためのエネルギー連系
検討内容	天然ガス、石油、電力などのエネルギー供給システムの連系が地域の繁栄と平和に貢献するとの考えのもと、その課題抽出ならびに解決策を提案。

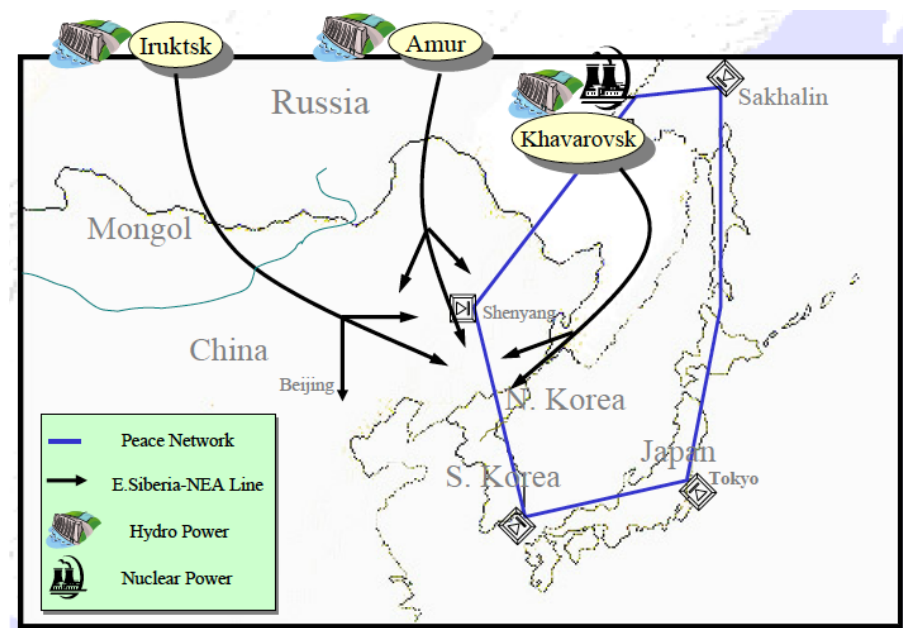


図 13 Peace Network in North East Asia 構想[24]

(5) 豪州 GRENADEC によるアジア太平洋エネルギーネットワーク (Pan-Asian Energy Infrastructure) 構想[25]

検討対象	中国、韓国、日本、台湾、フィリピン、マレーシア、インドネシア、オーストラリア、タイ、ラオス、ベトナム他
年	2010 年
検討目的	オーストラリアの天然ガスや太陽光などの豊富なエネルギー資源を東南アジア地域に供給
検討内容	石炭起源のエネルギーから天然ガスおよび地域特有の再生可能エネルギーへシフトするためのエネルギーネットワークを提案。高圧直流送電線およびガスパイプラインの連携も検討。定量的な評価などはないが、再生可能エネルギーとしては水力、地熱、風力、太陽光、バイオマス、海洋エネルギーを考慮。



図 14 A Pan-Asian Energy Infrastructure [25]

(6) 自然エネルギー財団によるアジアスーパーグリッド (Asia Super Grid) 構想[26]

検討対象	中国、韓国、日本、台湾、インド、ブータン、バングラディッシュ、シンガポール、マレーシア、タイ、モンゴル、ロシア
年	2011 年
検討目的	電力の供給安定化、電力価格低減、時差および季節変動の違いによるピークシフト、再生可能エネルギーの導入拡大
検討内容	アジア各国との接続を行う事で、自然エネルギーの大量導入時の供給安定化に貢献できると共に、電気料金の適正化に資すると主張。

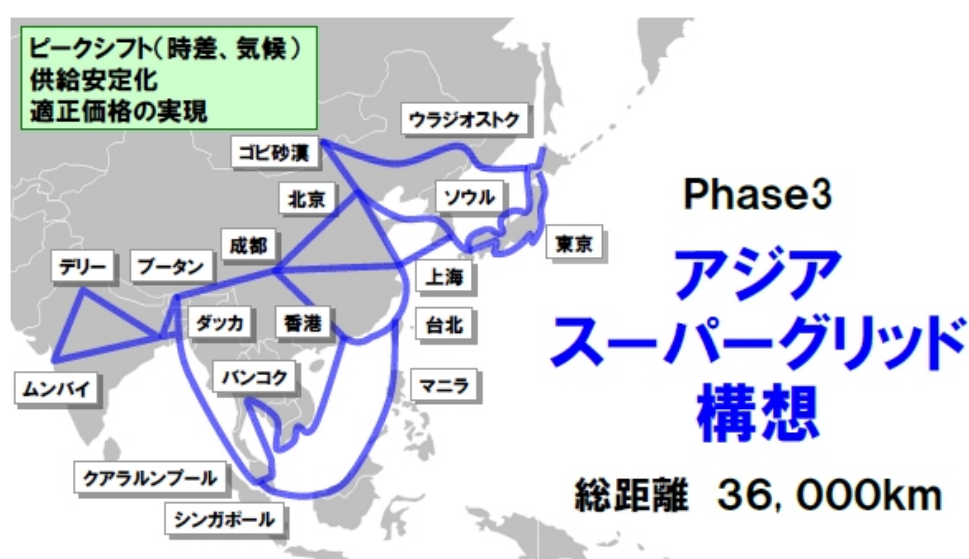


図 15 Asia Super Grid [26]

(7) 日本創成会議によるアジア大洋州電力網（Asia Pacific Power Grid）構想[27]

検討対象	韓国、日本、台湾、フィリピン、オーストラリア、ASEAN 内送電網
年	2011 年
検討目的	再生可能エネルギーの導入拡大
検討内容	日本の外交戦略として、再生可能エネルギーの自然変動性を克服するための送電ネットワーク構築を提案。送電ネットワークにより CO2 排出削減とアジアの電力供給体制の強化、日本の再生可能エネルギーをアジアに移転。あわせて、グリーンエネルギーグリッド推進機構の創設を提案。

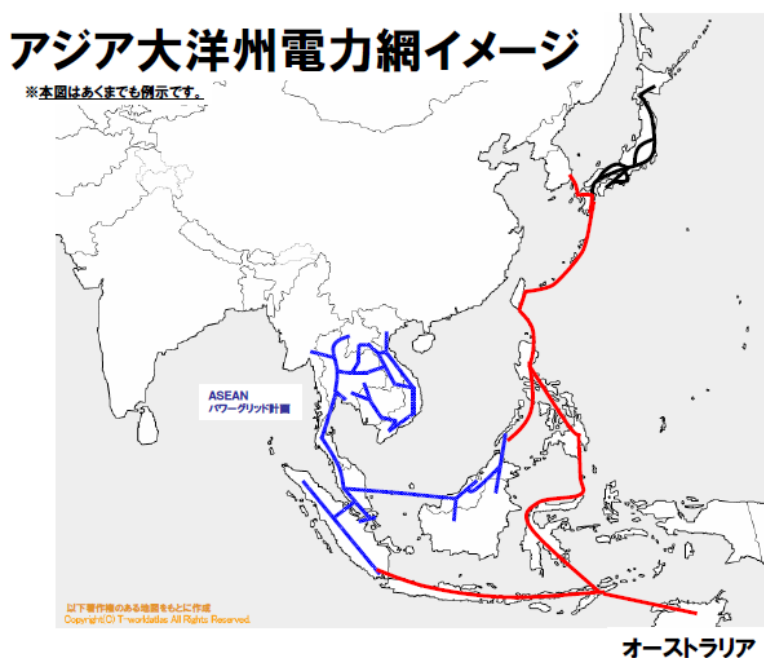


図 16 Asia Pacific Power Grid [27]

(8) 経済産業省総合資源エネルギー調査会総合部会電力システム改革専門委員会地域間連系線等の強化に関するマスタープラン研究会[28]

検討対象	日本と海外とを結ぶ国際連系線
年	2012 年
検討目的	電力の安定供給確保ならびに再生可能エネルギーの導入促進のための連系線検討
検討内容	電力に係るエネルギー・セキュリティ上の観点、安全保障上の観点、法制的な観点など多面的な観点から課題を検証すると共に、費用対効果を考慮して、国内地域間連携線の整備と比較した上で、優先順位を整理する必要性を提示。

(9) 韓国電力公社による北東アジアスーパーグリッド (North East Asia Super Grid) 構想[29]

検討対象	韓国、日本、中国、モンゴル、ロシア
年	2014 年
検討目的	エネルギー資源の共有、電力システムの信頼性向上、需要の平準化
検討内容	技術検討、ルート検討およびロシア～韓国間のフィジビリティスタディ状況の報告。



図 17 Northeast Asia Super Grid [29]

(1 1) ロシアの Skoltec ならびに韓国エネルギー経済研究所 KEEI による北東アジアスーパーグリッド (Northeast Asia Super Grid) 構想[30]

検討対象	ロシア、北朝鮮、韓国、日本（北海道）
年	2014 年
検討目的	ロシアの水力発電起源電力の韓国への輸出
検討内容	ロシアから韓国への送電ルートが検討。具体的に、大連経由、平壤経由、ロシア～北朝鮮の日本海沿岸経由の 3 ルートが提案。経済性分析モデル構築後、今後、サハリン～日本経由についても検討予定。

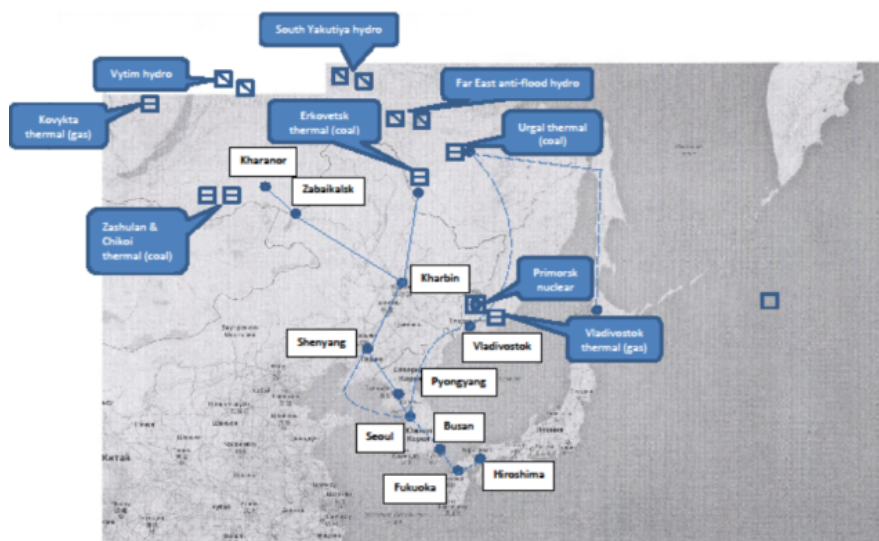


図 18 Northeast Asia Supergrid [30]

(11) フィンランドの Breyer 氏らによる北東アジアスーパーグリッド（North-East Asian Super Grid）構想[31]

検討対象	中国、北朝鮮、韓国、日本
年	2014 年
検討目的	北東アジアにおける各地域別の特徴を考慮した、再生可能エネルギーの導入拡大
検討内容	電力需要の多くを各地域の再生可能エネルギーを組み合わせることで賄うことを想定し、バッテリーや揚水発電、Power to Gas を考慮した上でのガスタービン発電を駆使したシナリオを設定。時間帯別の電力需要を地域別に導出。その結果、北東アジアにおいて 100%再生可能エネルギーが可能なオプションであることを提示。

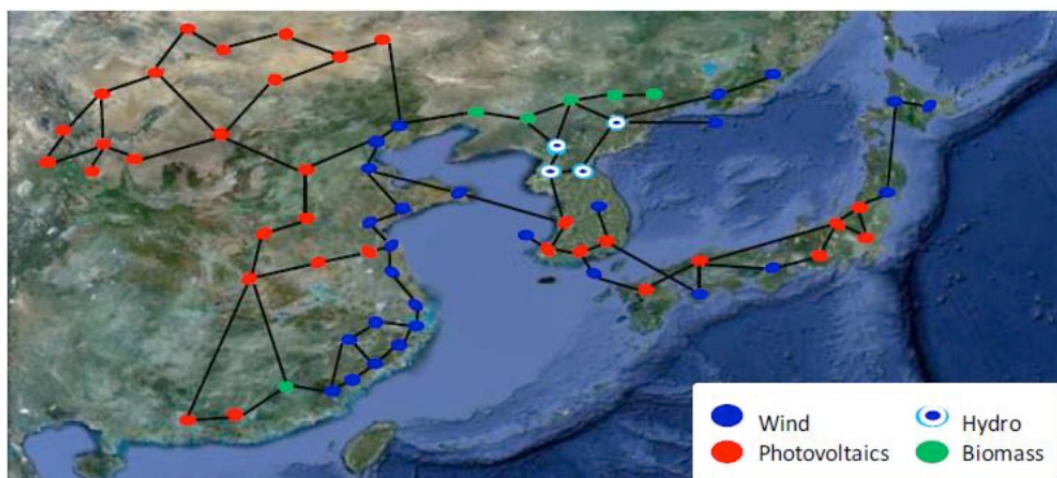


図 19 North-East Asia Super Grid [31]

(12) エネルギー憲章条約事務局によるゴビ砂漠およびアジアスーパーグリッド (Gobitec and Asia Super Grid) 構想[32]

検討対象	中国、日本、ロシア、北朝鮮、韓国、モンゴル
年	2014 年
検討目的	再生可能エネルギーの導入促進、ゴビ砂漠における風力と太陽光の活用
検討内容	現在の法的枠組みならびに技術水準を勘案した上で、ゴビ砂漠で風力発電および太陽光発電から発電されうる 2600TWh の電力をスーパーグリッドを通して、ロシア、中国、韓国、日本、モンゴルで活用した場合、それぞれの国での経済的便益、社会的便益（エネルギー安全保障・地域間連携など）、環境的便益について分析。今後、それらを議論するプラットフォーム設立の必要性を結論の一つとして得る。



図 20 Gobitec and Asian Super Grid [32]

以上、これまで検討されたわが国を含む北東アジア地域の国際連系構想に関して、主たる 12 点について整理した。その結果、国際連系を行う上での目的に、大きく以下 4 つが考えられていることがわかった。

- (目的 1) 接続当事国に賦存する再生可能エネルギーの導入拡大
- (目的 2) 電力の安定供給および供給信頼性向上
- (目的 3) ロシアやゴビ砂漠の豊富な再生可能エネルギー
(水力・太陽光・風力) の利用
- (目的 4) 地域の平和および安定への貢献

このうち、1.2 節で述べたとおり、わが国が置かれている電力供給システムの現状を考慮すると、目的 1 ならびに目的 2 がわが国にとって国際連系を行う動機となりうる。一方、これまでの検討の多くが、二国間連系などを通り越し、一足飛びにモンゴルから日本、またロシアから日本をつなぐような構想であることが多いことにも気づかされる。一部の文献で指摘されている通り、このような大規模プロジェクトは本来、**Step by Step** で進むものである。北東アジア全体での広域最適の観点も重要であるが、その一方で、二国間連系のような個別最適も起こらないと、現実のプロジェクトは進まない。従って、国際連系構想を議論する場合、まずは、日本と隣国との間の国際連系による便益が必要であり、それが拡大した先に、より広域の便益があると考えることが妥当である。すなわち、個別の二国間連系プロジェクトによって連系国同士に便益がもたらされた延長に、上記のような構想に発展していく可能性があると考えられる。

1.4 本レポートの目的

本レポートでは、日本のエネルギー供給システムのうち、電力供給システムについて国際連系を導入すべきか否かを議論するため、これまで行われてきた議論を調査・整理し、その上で、国際連系の意義についてあらためて考察するものである。その際、1.3 節で整理した際に多く見られた、北東アジア全域などの広範囲な視点ではなく、日本とその接続先となる隣国との二国間でメリットが生じるか、便益が享受できるかを議論する。

わが国ではこれまで、電力供給システムを国家の範囲内で提供することを前提に制度設計が行われてきた。しかし、東日本大震災を基点にわが国の電力供給システムは大きく変化し始めている。既に電力市場は自由化され、また、再生可能エネルギーが急速に導入されている。今後もしばらくは同様の状況が続くと考えられ、それに応じた電力の安定供給システムをこれまでの固定観念に縛られず考えて行かなければならない時期に差し掛かっているのではないだろうか。そしてもし、電力供給システムの国際連系が有効であれば、さらなる研究を進めるべきである。本レポートではその指針を得ることを最終的目的とし、検討を実施する。

白紙

2. 調査方法

2.1 国際連系実績・調査対象地域

国際連系とは、エネルギー政策についての考え方が同じではない地域同士が、何らかの便益をお互い享受することを目指し、国境を越えてエネルギーを連系することと定義できる。従って、これまで国際連系が行われた地域を調べることで、国の考え方を越えた共通利益が見えてくる。1.2 節で示したわが国の現状を考慮すると、わが国にとっての関心事項は国際連系線が連系国の風力や太陽光などの自然変動電源の導入拡大に貢献したか、また、それに付随する需要・供給変動に対して電力の安定供給および信頼性向上につながったかとなる。つまりそれら二つが、わが国において国際連系を行うかどうか議論する指標となる。そこで、本稿において、既に敷設されている以下の国際電力連系線を対象に、太陽光発電や風力発電などの自然変動電源の拡大効果と、電力の時間変動、季節変動などの平準化および緊急時供給を含む、安定供給・信頼度向上効果を調査する。なお、調査は文献によって行うこととし、主に世界各国の国際連系の現状について整理されている一般財団法人日本エネルギー経済研究所の平成 25 年ならびに平成 26 年の報告書[33,34]を参考とし、必要に応じて追加文献調査を行うこととする。

調査対象とする国際連系線は以下の通りである。

(北米)

- カナダケベック系統 - 米国東部系統連系
- 米国テキサス系統 - メキシコ系統連系
- 米国西部系統 - メキシコ系統連系
- カナダ西部系統 - 米国西部系統連系
- カナダマニトバ水力電力庁 - 米国東部系統連系

(欧州)

- 英国 - フランス連系
- 英国 - オランダ連系
- オランダ - ノルウェー連系
- ドイツ - ノルウェー連系
- ドイツ - ポーランド連系
- フランス - スペイン連系
- フィンランド - ロシア連系
- UCTE 欧州大陸同期系統
- NORDEL 北欧系統
- フィンランド - エストニア連系

(中南米)

- ブラジル - アルゼンチン連系
- アルゼンチン - チリ連系
- ブラジル - ベネズエラ連系
- エクアドル - コロンビア連系

- グアテマラーエルサルバドルーホンジュラスーニカラグアーコスタリカー
パナマ連系

(中東)

- 8ヶ国系統連系 EIJLLPST (エジプト、イラク、ヨルダン、シリア、トルコ、
レバノン、リビア、パレスチナ)
- 6ヶ国 GCC 系統連系 (クウェート、カタール、オマーン、サウジアラビア、
バーレーン、アラブ首長国連邦)

(アフリカ)

- スペインーモロッコ連系
- モロッコーアルジェリア連系
- アルジェリアーチュニジア連系
- リビアーエジプト連系

(東南アジア)

- ラオスータイ連系
- ミャンマーー中国雲南省連系
- ベトナムーカンボジア連系
- 中国雲南省 - ベトナム連系
- ラオスーベトナム連系
- カンボジアーベトナム連系
- ラオスータイ連系

(中国・ロシア)

- アムールー黒河線
- ブラゴヴェシチェンスクー愛光線
- ブラゴヴェシチェンスクー黒河線

(中国その他)

- 中国ー北朝鮮連系
- 中国ーモンゴル連系

なお、旧ソ連時代に付設されたロシアの国際連系線については、国内送電線が分割されたとの認識のもと、国境をまたいで新たに接続された国際連系線とは考えにくいことから、本調査では取り扱わない。

2.2 わが国電力供給システムの将来想定

ここで、わが国において電力供給システムの国際連系の意義を考える前提となる将来想定を行う。わが国は島国であり、他国と国際連系を行うには少なくとも 100km 以上の送電線の敷設が必要となることから、直流送電線となるであろう。一般的に直流送電線を敷設するにはフィジビリティスタディから数えて 5～10 年程度の歳月を要する。図 21 は北海道と本州とを結ぶ北本連系線の工事スケジュールであるが、2010 年に増強の意志を北海道電力が示してから、実際に運転が開始されるまで 8 年の歳月がかかることがわかる。従い、わが国と隣国との国際連系を仮に 2016 年に意思決定を行っても、実際に運転が開始されるのは早くても 2020 年代の中頃以降となる。そこで、国際連系を行う時代を 2020 年代中頃以降と想定する。

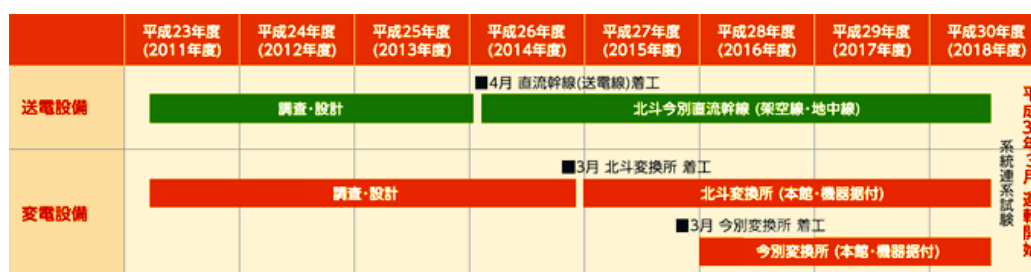


図 21 北本連系線工事スケジュール [35]

2020 年代中頃における太陽光発電や風力発電など、自然変動のある再生可能エネルギー発電設備の導入量は、FIT 制度が維持され、また、ある程度の導入鈍化を考慮してもなお、数十 GW に至るであろう。わが国の電力の最大需要が 150GW 程度[36]であることを考慮すれば、天候や気象条件によっては電力需要 (kW ベース) の半分程度が再生可能エネルギーに供給されるような時間帯の発生も考えられる。また、総電力量 (TWh ベース) では 10% 程度が FIT 対象の再生可能エネルギーによって賄われると予想される。

次に、2020 年代中頃以降のわが国の電力価格を想定する。まず始めに、卸電力価格について想定を行う。1.2 節で述べた通り、今後は優先給電される再生可能エネルギーの導入拡大は卸電力価格の低下をもたらすことが予想される。図 22 は JEPX のスポット市場において約定されたシステムプライスの 2012 年度および 2015 年度の比較であるが、FIT の影響によって 2015 年度のシステムプライスが低下していることがわかる。さらに、2015 年度における特徴は、台風や寒気の影響などにより価格の瞬時的な上昇の発生が見られることである。これらは、再生可能エネルギーの導入拡大のみの影響とは断定できないが、少なくとも 2012 年度においては見られていない。ただし、ドイツにおいては再生可能エネルギーによる発電が主となっている時間帯において、急激な需給変化が起こった場合、価格の急変化が確認されている[12,13]。

一方、システムプライスの統計的バラつきは 2015 年度の方が 2012 年度に比べて小さくなっていった。図 23 は 2012 年度と 2015 年度の 30 分毎価格の頻度であるが、平均値に加え、標準偏差についても 2015 年度の方が小さくなった。つまり、優先給電される再生可能エネ

ルギーの導入拡大は、天候変化などによる短時間の電力供給逼迫の可能性はあるものの、卸価格の変動幅が増えるとは必ずしも言えず、多くの時間帯において一定範囲内でおさまることが予想される。

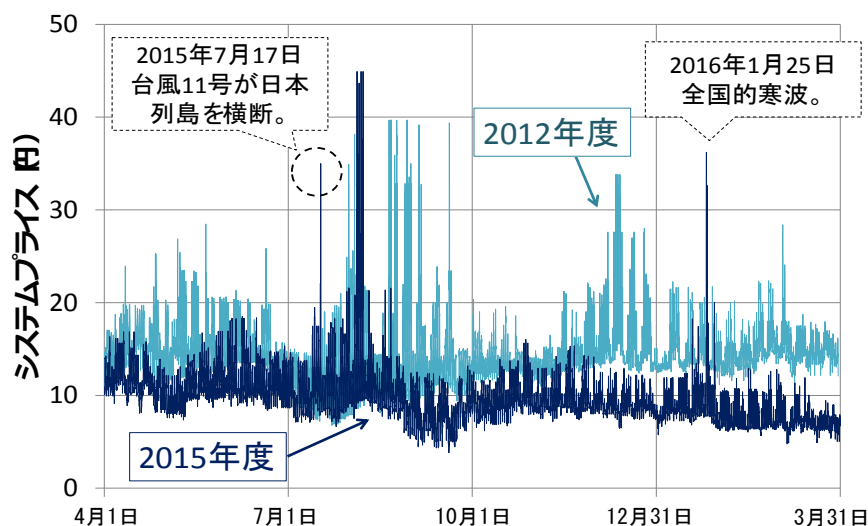


図 22 2012 年度と 2015 年度のシステムプライス比較（[8]より筆者作成）

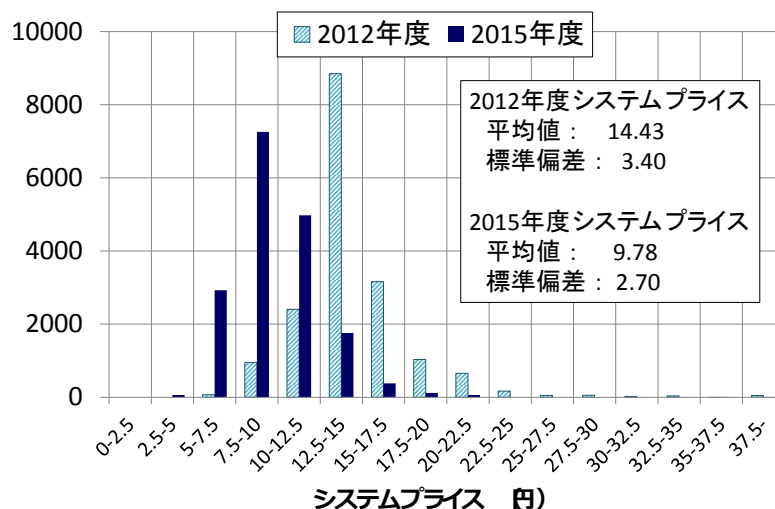


図 23 2012 年度と 2015 年度のシステムプライス頻度分布（[8]より筆者作成）

続いて、電力小売価格について想定する。再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、さらなる賦課金の増加が発生する。現在の 2 倍程度の電力が FIT 制度対象の再生可能エネルギーより発生されるとすれば、賦課金総額は 4～5 兆円に達し、電力価格は現在よりさらに 1～2 割上昇すると考えられる。

また、1.2 節で述べた通り、優先接続される再生可能エネルギー電源の拡大は、石油火力発電などの調整電源の維持を困難にする可能性があり、調整力確保のための容量市場の創設も考えられる。わが国においてどの程度の調整力を維持するかについては議論が必要な

ところであるが、例えばスペインの場合、2013 年に容量メカニズムに 75,800 万ユーロの費用が費やされ、その分は電力の小売価格に上乗せされている[37]。それらに加え、これまでベース電源と位置づけられてきた石炭火力発電などについても、JEPX の時間前市場に対応可能な時間単位ランピングの適用が技術的にも求められ、発電出力をギリギリまで絞った運転が求められる可能性がある[38]。

以上、わが国において国際連系が開始され得る 2020 年代中頃以降の状況を次のように想定する。

- 再生可能エネルギー発電設備導入量が増加し、瞬時的には電力需要（kW ベース）で半分に達するような時間帯が発生する。また、電力量（TWh ベース）では年間発電量の 10%を越える。
- 再生可能エネルギーの優先接続によって卸電力価格は低下する。
- 急激な天候変化などにより再生可能エネルギーによる供給が出来ない場合において、卸電力価格の価格急上昇が発生する場合がある。
- 再生可能エネルギー賦課金により電力小売価格は値上がりする。
- 石油火力など発電コストの高い電源が市場から追放され始め、供給力を維持するために容量市場の導入が始まり、小売価格に転嫁され始める。
- 石炭火力発電など、これまでベース電源と設定されてきた電源も時間単位ランピングに対応し、時間前市場などで取引されるようになる。

なお、結果的に本稿で想定する 2020 年中頃シナリオは、2016 年 3 月 30 日に行われた経済産業省・総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会電力基本政策小委員会（第 5 回）において ATKearny が有識者意見として示した「わが国電力競争環境の将来シナリオ B」[39]に比較的近い想定となった。「わが国電力競争環境の将来シナリオ B」とは、電力需給が供給過剰気味となり、卸市場への参加が増加することで小売価格が市場価格プラス諸経費になるような状態であり、小売市場において競争環境が成立している状況である。

白紙

3. 調査結果および考察

3.1 既設国際連系線の意義に関する文献調査結果

電力供給システムの国際連系は電力市場の統合も誘うことになる。世界銀行による電力市場の統合に関する報告書[40]によると、これまでの市場統合の事例を観察し、経験的に市場統合のメリットとして一般的に指摘されるものとして以下 10 点を挙げている。

- ① 短期的なエネルギーコストの低減
- ② 供給予備力の確保による、ピーク電力需要の伸びに対応するための設備投資抑制
- ③ 統合により市場規模が拡大し、大規模な電力供給設備が導入されることによる規模の経済性
- ④ 需給ひっ迫時に緊急用電源として輸入が可能になる事による供給安定性の向上
- ⑤ 統合により電力市場への参入が進み、競争が促進されることによる国内電力市場の成熟
- ⑥ 未電化地域の電力アクセス改善による社会的便益
- ⑦ エネルギー供給が効率化することによる大気・水質汚染や森林伐採の回避
- ⑧ 電力部門における民間投資が行われることによる財政制約の軽減
- ⑨ 国家間の相互依存の深化・協力進展による政治的関係の改善
- ⑩ 電力市場統合を支える法・精度の整備による行政スキルの向上、結果としてのインフラ投資促進

このうち、2.2 節で述べたわが国の将来想定において関連すると考えられる項目は②、④、⑤、⑩である。②は当事国同士において予備力を共有できることで、追加投資が削減できることを意味する。④は電源脱落や震災などによる電源逸失時において緊急輸入によって対応できることを指す。⑤は国内外の事業者の参入により電力市場がより成熟し、より安価で安定的な電力供給に資することができる可能性を示している。そして、⑩は⑤とも関連し、外国資本が参入できるよう法や制度が整備され、その結果、国際的な競争環境が整うことである。例えば、わが国のシステムを海外に輸出し、その市場に日本企業が新たに参入する機会を増やすことなどがそれに当たる。

2.1 節において想定した 2020 年中頃以降のわが国において重要と考えられるのが、②および④である。自然変動のある再生可能エネルギー電力の導入量が増加することによって、電力供給の変動が大きくなる場合があり、安定供給のためには予備力の確保および緊急用電源確保が重要な課題となる。もし国際送電連系を変動吸収のために活用することができれば、その有効な解決策となり得る。

供給予備力に関しては、これまでわが国では揚水発電や石油火力発電などの調整電源を活用し、その確保を行ってきた。しかし、1.2 節、2.2 節で述べた通り、優先給電される再生可能エネルギーが多量に入ると、需給調整を担う調整電源の維持が困難になる。その結果、予備力を維持するための容量市場などが開設されることになるが、電源維持のための

費用は電気料金に上乗せされる。電気料金抑制のためには、容量市場メカニズムの対象となる電源を少なくすることが望ましく、その意味で、国際連系線を通じて他国の設備容量が利用可能となり、経済的合理性が伴うならば、国際送電連系を行う意義はあると言える。

一方で、参考文献[33]が指摘するように、世界銀行の報告書はこれまでの事例について纏めただけであり、その理論的研究が十分では無い。また、参考文献[33]でもブラジルーアルゼンチン連系線や大メコン連系など一部の連系線について、その意義や実現に至った推進要因、所期に期待したメリットを分析しているが、一部の国際連系線についての分析に留まっている。そこで、2.1節で示した各連系線に対し、国際連系が太陽光発電や風力発電などの自然変動電源の導入拡大に貢献したか、また、緊急時の電力輸入など電力の安定供給・信頼性向上に寄与したかの観点で三段階評価を行った。なお、評価軸は○、△、×を設定し、○は、観点とする項目について計画段階から計画されたプロジェクト、△は観点とする項目について計画時には考慮していなかったが、結果的に実績があるプロジェクト、×は計画も実績も無いプロジェクトとした。表1に調査結果を示す。

表1 既設国際連系線についての文献[33, 34, 41, 42, 43]調査結果

北米			
番号	系統	自然変動電源の拡大に貢献したか	電力の安定供給・信頼性向上に寄与したか
北米-1	カナダケベック系統 - 米国東部系統連系	×	×
北米-2	米国テキサス系統 - メキシコ系統連系	×	○
北米-3	米国西部系統 - メキシコ系統連系	○	不明
北米-4	カナダ西部系統 - 米国西部系統連系	×	○
北米-5	カナダマニトバ水力電力庁 - 米国東部系統連系	×	○
欧州			
番号	系統	自然変動電源の拡大に貢献したか	電力の安定供給・信頼性向上に寄与したか
欧州-1	英国 - フランス連系	×	○
欧州-2	英国 - オランダ連系	×	△
欧州-3	オランダ - ノルウェー連系	×	△
欧州-4	ドイツ - ノルウェー連系	○	△
欧州-5	ドイツ - ポーランド連系	○	△
欧州-6	フランス - スペイン連系	○	○
欧州-7	フィンランド - ロシア連系	×	×
欧州-9	UCTE 大陸欧州同期系統	○	○
欧州-10	NORDEL 北欧系統	△	△
欧州-11	フィンランド - エストニア連系	△	△

中南米			
番号	系統	自然変動電源の拡大に貢献したか	電力の安定供給・信頼性向上に寄与したか
中南米-1	ブラジルーアルゼンチン連系	×	○
中南米-2	アルゼンチン - チリ連系	×	△
中南米-3	ブラジルーベネズエラ連系	×	×
中南米-4	エクアドルーコロンビア連系	不明	不明
中南米-5	グアテマラーエルサルバドルーホンジュラスーニカラグアーコスタリカーパナマ連系	×	○
中東			
番号	系統	自然変動電源の拡大に貢献したか	電力の安定供給・信頼性向上に寄与したか
中東-1	8ヶ国系統連系 EIJLLPST（エジプト、イラク、ヨルダン、シリア、トルコ、レバノン、リビア、パレスチナ）	不明	不明
中東-2	6ヶ国 GCC 系統連系（クウェート、カタール、オマーン、サウジアラビア、バーレーン、アラブ首長国連邦）	不明	○
アフリカ			
番号	系統	自然変動電源の拡大に貢献したか	電力の安定供給・信頼性向上に寄与したか
アフリカ-1	スペインーモロッコ連系	×	○
アフリカ-2	モロッコーアルジェリア連系	×	○
アフリカ-3	アルジェリアーチュニジア連系	×	○
アフリカ-4	リビアーエジプト連系	不明	○
東南アジア			
番号	系統	自然変動電源の拡大に貢献したか	電力の安定供給・信頼性向上に寄与したか
東南アジア-1	ラオスータイ連系	×	×
東南アジア-2	ミャンマーー中国雲南省連系	×	×
東南アジア-3	ベトナムーカンボジア連系	×	×
東南アジア-4	中国雲南省 - ベトナム連系	×	×
東南アジア-5	ラオスーベトナム連系	×	不明
東南アジア-6	カンボジアータイ連系	×	不明
東南アジア-7	ラオスータイ連系	×	不明
中国・ロシア			
番号	系統	自然変動電源の拡大に貢献したか	電力の安定供給・信頼性向上に寄与したか
中国・ロシア-1	アムールー黒河線	×	×
中国・ロシア-2	ブラゴヴェシチェンスクー愛光線	×	×
中国・ロシア-3	ブラゴヴェシチェンスクー黒河線	×	×

中国その他			
番号	系統	自然変動電源の拡大に貢献したか	電力の安定供給・信頼性向上に寄与したか
中国その他-1	中国－北朝鮮連系	×	不明
中国その他-2	中国－モンゴル連系	×	不明

文献調査の結果、国際連系線の敷設目的として、太陽光発電・風力発電などの自然変動電源導入拡大を意図しているところは限られることがわかった。それら意図をもって敷設されたのは米国カリフォルニア州やドイツ、デンマーク、スペインなど、再生可能エネルギーの導入が拡大している地域において、さらなる導入拡大のために国際連系線が近年、敷設されるプロジェクトであった。例えば、表中の欧州-6 で示したスペイン-フランス連系線は 2014 年に運転開始、表中の欧州-4 のノルウェー-ドイツ連系線は 2017 年の運転開始を目指し工事が行われている。また、表中の欧州-5 のドイツ-ポーランド連系線は 2020 年の運転開始を目指して工事が進められている状況にある。他にも、欧州の送電会社からなる団体 ENTSO-E は、再生可能エネルギーの導入拡大を目的として 10 ヶ年ネットワーク開発計画に基づく送電系統の増強プロジェクトを行う計画を検討しており、そこにはバルト海ならびに北海の洋上風力を利用する国際連系プロジェクトなども含まれている。

一方、太陽光発電や風力発電などの自然変動の伴う再生可能エネルギーの導入とは関連なく、国際連系線が電力需要の急増などに対する予備力確保を目的として活用されている例は多数存在した。一例に米国テキサス-メキシコ連系（表中の北米-2）における 2007 年、2011 年の緊急融通や、ブラジル-アルゼンチン連系（表中の中南米-1）における 2004 年の緊急融通が挙げられる。これらのケースにおいて、国際連系線は連系当事国内で何らかのトラブルが発生した場合、さらに状況が悪化する最悪の状況を防ぐ有効な手段となっていた。

ところで、これまでに設置された多くの国際連系線の所期の建設目的は、電力不足の緩和や、水力発電・石炭火力発電などの安価な電源を需要地に送るため、もしくは、系統接続国同士の季節変動・時間変動に伴う電力価格差を用いた収益獲得のためであった。表中の欧州-3 のオランダ-ノルウェー連系線はオランダがノルウェーの水力発電電力を輸入すると共に、オランダとノルウェーの電力需要の時間変動、季節変動による電力価格差の違いによる経済メリットを得るために敷設されたマーチャント送電線である。同じく、電力需要の季節変動などに応じて連系国同士の経済的利益増進のために敷設されたのが中南米-1 のブラジル-アルゼンチン連系や欧州-1 や欧州-2 の英国の国際連系線である。

また、表中の北米-1、北米-4、北米-5 はいずれもカナダの水力発電電力を米国が輸入するための連系線である。同様に、豊富な水力発電の輸入目的で建設された国際連系線としては、表中の中南米-3、中南米-5、東南アジア-1、東南アジア-2、東南アジア-5、東南アジア-7、中国-ロシア間の連系線などもそれにあたる。

すなわち、これらの既設ないしは建設が進む国際送電連系プロジェクトを整理したことで、それらのいずれもが経済性の観点から投資効果が見込めると判断されたものについて

建設が行われ、連系線がもたらす便益の一部として自然変動電源の導入拡大や、電力の安定供給・信頼性向上につながってきたことがわかった。要するに、設置主体者にとって、国際連系線が経済的メリットを生み出すことが何よりも前提として必要であり、その上でさらに、国際送電連系が当事国の電力供給システムの予備力向上による信頼性向上や電力の安定供給に貢献する場合、優先して敷設・運用されることが明らかになった。

従って、わが国において国際連系を行う場合においても、国際連系線を運用する設置主体者が送電線を使うことによる経済的メリットを得られることが基本条件として必要であり、その上で、再生可能エネルギーの導入拡大や、電力の供給安定・信頼度向上などの便益を、当事国双方にもたらす場合、その設置の動機が強まると言える。

3.2 わが国の国際連系接続先およびその意義についての考察

3.1 節の調査結果から、国際連系線を新たに設置する場合、設置主体者の経済的メリットがまず必要であり、その上で、当事国同士の電力安定供給や信頼性向上に貢献する場合、連系線敷設が進む場合が多いとわかった。本節では、それぞれの国の電力供給体制を整理した上で、2.2 節で示した想定状況において設置主体者の経済的メリットと、わが国および接続候補国の双方に便益が見いだせるか、国際連系の意義について考察する。なお、1.3 節で示した通り、これまで北東アジア地域において検討されたわが国を含む国際連系線は、日本・韓国ルートもしくは日本・ロシアルートの二つが提案されていた。そこで本稿においても、これまでの議論に従い、具体的な接続候補国を韓国とロシアに設定し議論する。

(1) 韓国

韓国はわが国と対馬海峡を隔てた 220km 程度に位置する半島国家である。日本側は福岡市・北九州市・下関市を含む人口 550 万人が韓国に面し、韓国側は釜山広域市・蔚山広域市を含む人口 800 万人が日本に面している。対馬海峡を挟む半径 150km の範囲内に 1000 万人以上の人口が集まっていることから一定の電力需要が見込め、また陸上には両国とも基幹送電網が整備されている。

図 24 は韓国全体の電力消費量とその発電源別の割合の年次変化を示したものであるが、韓国は水力ならびに再生可能エネルギーの割合が小さく、安定電源と言われる石炭火力発電や原子力発電の比率が高い。2013 年に韓国通商産業資源部が発表した第 6 次・長期電力需給計画（2013～2027）では、今後も韓国では電力需要の伸びが見込まれ、それに応じて原子力発電所をはじめ再生可能エネルギーを含む電源開発が進められると共に、DSM（Demand Side Management）を通じた電力需要のピークシフトが進められることが計画されている[44]。

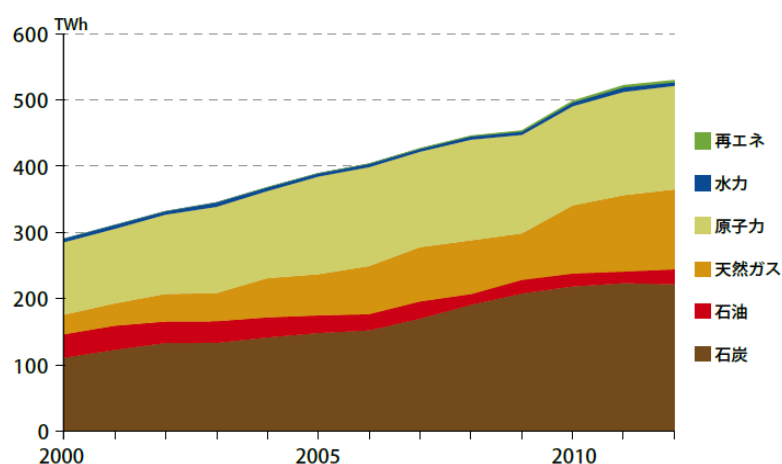


図 24 韓国の一次エネルギー別発電量の推移[44]

韓国の電力供給体制を図 25 に示す。1998 年のアジア通貨危機に伴う経済危機の影響で行政機構改革が行われ、国有会社であった韓国電力公社（KEPCO）は分割民営化された。発電は KEPCO の発電子会社ならびに IPP によって行われ、再生可能エネルギーなどの一

部を除くほぼ全発電量が韓国電力取引所 (KPX) にて取り引きされている。つまり、KEPCO の送配電部門も KPX から電力を調達している[44]。

分割民営化以降、送配電部門および小売りの自由化も段階的に進められる予定であったが、労働組合の強い反対を受け長年中断したままであり、今後も大きな政治的決断が行われない限り進展が見込めない。また、韓国では電気料金に対して政策的意向が強く働き、低く抑えられていることから、燃料費上昇の影響は KEPCO の赤字として現れている。また、安価な電気料金は需要を拡大させ、結果的に電源開発が継続的に行われる状況を生じさせた。それでもなお、韓国では供給予備力が十分ではないと言われている[44,45]。

KPX はコストプール制を採用しており、発電事業者は発電所単位で変動費に固定費を加えて入札を行う。そして、KPX が前日に作成した 1 時間毎発電量に応じ、登録された発電事業者の中から発電コストが安い事業者を選定して KEPCO の送配電部門が発電事業者に運転指令を出す。卸電力価格はその時点の電力需要に対して最も高いプラントの価格になるため、固定費の回収も市場を通して行う事ができる一方、需要逼迫の際などに KPX の価格が高騰（プライススパイク）するようなことはなく、IPP を含めた発電事業者が自ら電源開発を行って稼ごうとするインセンティブは働きにくい状況にある。



※ KHNP が水力と原子力の発電事業者であり、それ以外の 5 社は火力と再生可能エネルギーの発電事業者

図 25 韓国の発送電構造[44]

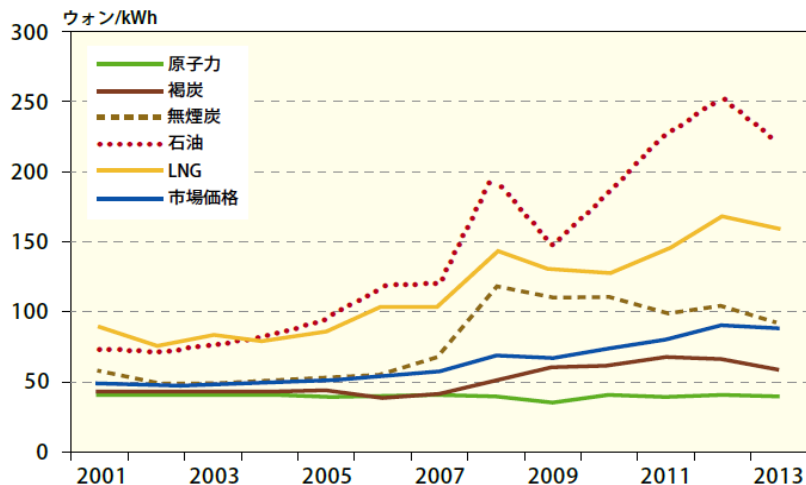


図 26 韓国の卸電力取引所の取引価格の推移[44]

翻って、日本の JEPX はシングルプライスオークション方式を取っているため、供給力が増加し卸市場での取引が活発になると変動費主体の入札になってくる。図 26 は KPX の電力取引価格の推移であるが、2.2 節の想定の下では、将来、わが国において再生可能エネルギー電力によって供給力が増加すると発電単価が下がると考えられ、その場合、韓国の卸電力価格と比較して価格競争力をもつ電力が生み出される可能性が考えられる。さらに、日本では 50Hz/60Hz の周波数変換所の容量制限から、西日本で発生した余剰供給力は周波数変換所の 3GW を上限にそれ以上を東日本に供給できない。つまり、再生可能エネルギーの導入拡大によって、時間帯によっては供給力に余剰が生まれる 2020 年以降、売り先が確保できない小売事業者、一般送配電事業者が韓国市場に電力を販売することは、売り先確保の観点から候補先の一つと考えられる。

ここで、日韓を 1GW の直流送電線で結び、両国の卸電力価格の差によって取引が行われると仮定し、両国の卸市場価格差によって電力融通が発生するかを試算する。データとして JEPX ならびに KPX の前日市場における卸価格を用いる。図 27 にそれぞれの価格を示す。ただし、韓国ウォンの為替変動については、各取引日の前営業日の終値を適用し日本円に換算し、また、JEPX のシステムプライスについては韓国と距離的に近い九州エリアの数値を採用することとした。

試算の結果、両国の卸電力価格差のみによって得られる年間売上高はおよそ 240 億円と得られた。平均的に日本の方が卸電力価格は安いのだが、時間帯によっては韓国の方が安くなる場合も多々見られ、双方向に電力が行き来することが確認された。一方で、送電ケーブル価格であるが、電力広域的運営推進機関 (OCCTO) が公表したわが国の送変電設備の標準的単価および参考文献[33]の海外事例を参考にすると、1GW 級の海底直流送電ケーブル (2 回線) の 1km あたりのコストは最大 6 億円程度とみられ、250km の距離を敷設する場合、総費用は 1500 億円程度となる。他に必要な費用として、国内託送料や運営諸経費なども考えられるが、仮に 25 年程度の運用を考えれば、割引率 0%において総収益は 6000 億円となり、プロジェクトとして十分に採算が合う可能性がある。

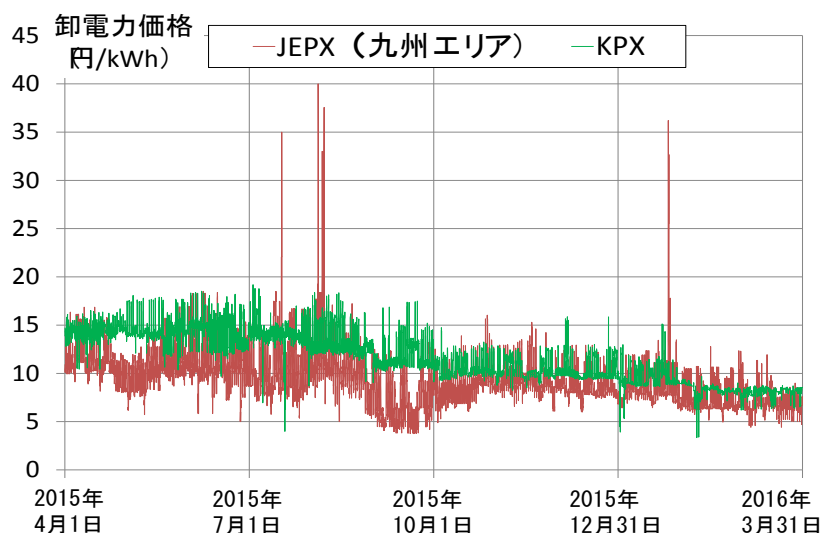


図 27 JEPX ならびに KPX の前日市場卸価格の推移 ([8, 47]より筆者作成)

安価な電力を日本から韓国に送ることは、政策的要因によって赤字体質となっている KEPCO にとっても利益があると考えられる。電力料金が国によって規定されている KEPCO の赤字改善をするには、より安い電源からの電力調達が有効である。韓国は水力や再生可能エネルギーなど変動費の低い電源の導入が日本に対して進んでおらず、仮に今すぐ FIT のような制度を導入したとしてもそれら電源の普及には数年以上を有する。従って、当面は KEPCO がより低コスト電源を調達したいとの思惑が続くことが予想され、特に電力ピーク時を中心とした高コスト電源の活用を避けられることは KEPCO にとって魅力的なプロジェクトとなり得る。なお、電源開発は国家のエネルギー政策にも関連するところであるが、上述の 1GW 級送電線による送電能力は韓国の全消費電力量の 1%程度であり、エネルギーの安全保障上からも大きな議論では無いと思われる。

以上から、日韓国際連系線は送電線敷設主体者に経済的利益を与える可能性があり、加えて、日本国内の発電事業者や KEPCO の双方にとっても経済的メリットが享受できる可能性を示唆している。

続いて、経済的メリット以外の国際連系線による便益として、わが国における再生可能エネルギーの導入拡大と、電力の安定供給・信頼性向上の可能性について考察する。

2.2 節で述べた通り、FIT は再生可能エネルギー電力の導入を拡大させた。しかし、参考文献[2]で示したように、送電線への接続容量、特に旧一般電気事業者エリア間の送電制約から、一定以上の導入に今後、制限が設けられる可能性もある。しかし、そのような場合においても、国際連系線は新たな電力需要の獲得を意味するため、再生可能エネルギーの導入拡大に一定程度有効となる可能性が考えられる。

電力の安定供給・信頼度向上についても、国際連系線は災害や需要予測に反する電力供給不足に対して有効であると言える。2011 年 9 月 15 日、韓国では多数の発電所が定期点検に入中、突然気温が上昇し、当日の予想最大電力 64GW に対して 69GW の最大需要が発生した。その際の運用予備率は 5%以下 (3GW 程度) となり、KEPCO は輪番停電に踏み切った。わが国においても 1.1 節で述べた東日本大震災後、供給予備力不足から輪番停電および節電要請が各方面に実施された。このような緊急の状況において、国際連系線を用いて電力を輸出入することは、大停電など最悪の事態の発生防止に貢献する。さらに、1.2 節ならびに 2.2 節で示した通り、優先接続される再生可能エネルギーの導入は需給調整を担ってきた石油火力などの電源を市場から追いやる可能性があり、容量市場の創設がわが国においても今後必要となる可能性が高い。そのような場合でも、予備力確保の一手段として国際連系線を用いることは、コストが見合うのであれば、有力な候補となり得る。

以上から、日韓国際連系線は、2.2 節で想定する状況において、以下の意義があると言える。

- ① 送電線設置主、日本国内の再生可能エネルギー電力を取り扱う事業者および KEPCO の双方に経済的メリットを生む可能性がある
- ② 緊急時の電力の輸出入だけではなく、平常時においても供給予備力確保のための有効な手段となる可能性がある

(2) ロシア

1.3 節で示した通り、これまで検討されたわが国とロシアとを国際電力連系線でつなぐ目的は、ロシアの豊富な水力による安価な電力をわが国に導入し、経済的メリットを享受しようとするものであった。すなわち、3.1 節で調査した、カナダと米国間、ノルウェーと欧州諸国間、ロシアとフィンランド間、ラオスと東南アジア諸国間の国際連系と同様のプロジェクトと言える。

しかし、2.2 節で想定した状況においてロシアの水力発電をわが国に導入する意義を考えると、経済的には若干の優位性を持つところに留まると想定される。図 28 はロシア連邦極東サハ共和国における電力の小売価格であるが、2015 年時点の 110kV 高压電力でも 5.5 ルーブル/kWh、すなわち 11 円/kWh（1 ルーブル=2 円換算）となった。参考文献[33]によれば、中国との貿易では CIF 価格が 6 円/kWh 程度となっている事例も見られるが、それでもなお、FIT 電力によって卸電力価格が低下する将来の日本の状況を想定すれば、ロシアの電力を調達することは将来の日本にとってあまり魅力的であるとは言い難い。

さらに、日本で発電された電力を、国際連系線を通してロシア側に輸出する場合、競合電源は水力発電による電力になるため価格競争力を持つことは容易でない。ロシア極東地域の電力卸価格は連邦反独占局の定めた価格で取引される[48]ため、ロシア極東の電力市場において日本の発電事業者が利益を上げることは容易ではないだろう。従って、本稿で想定した状況下では、日露国際連系線について、それを敷設する設置事業者が経済的メリットを得られることは難しい状況であろう。

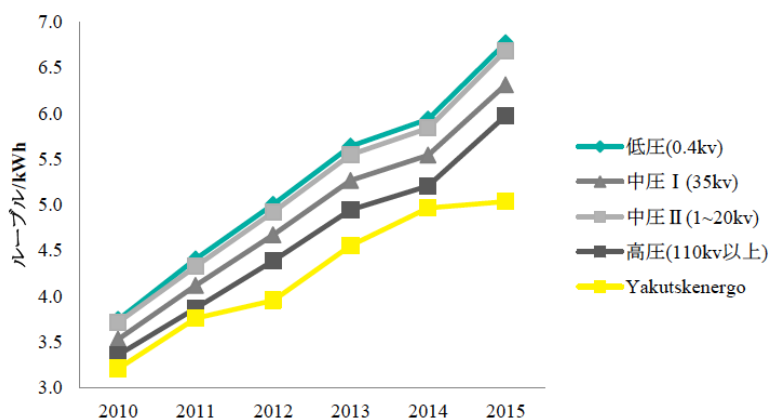


図 28 シベリアサハ共和国の電力価格推移[48]

日露間で国際送電連系を行う場合、これまでの検討から、連系ルートはサハリン・稚内間での国際連系線が現実的となるだろう。しかし、サハリンと北海道稚内市の最も近いところが 43km であるのに対し、日本国内の基幹送電線は図 1 に示した通り札幌郊外までしか引かれていないことから、日露国際連系線を敷設するには、国内において札幌から稚内までの 300km 程度の送電線を新たに敷設する必要がある。さらに、サハリンと大陸間のおよそ 80km も新たに接続する必要があり、札幌以北のみで 500km 以上の送電線敷設が必要となることが考えられる。日韓連系線の考察と同様、1GW 送電線を敷設し、1km あたり 6

億円で 25 年運用、運用率 75%として見積もると、およそ 2 円/kWh 程度の送電コストとなる。これら費用に加えて、北海道から本州への連系線増強などの費用も新たに必要になってくることが想定され、本州に供給される電力価格としては 10 円/kWh 程度になると考えられる。参考までにロシア極東の送電系統を図 29 に示す。

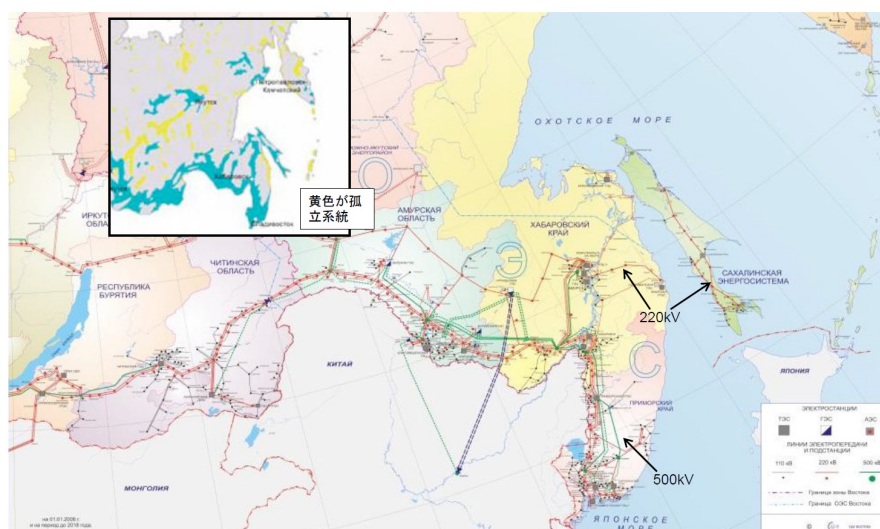


図 29 ロシア極東の送電網[34]

他方、日露国際連系線が日本国内の再生可能エネルギーの導入拡大に寄与するかについては、電力の安定供給・信頼性向上の観点からある程度効果が見込まれる。なぜなら、水力発電は起動停止が 15 分以内で行え、また、出力調整が容易であることから、太陽光発電や風力発電などの自然変動電源の時間変動の吸収に効果的であるからである。従って、日本国内の再生可能エネルギーの補助的電源としてロシアの水力発電を位置づけるのであれば、その部分で意義は生まれる。しかし、ロシアから送られる水力発電による調整力は、連系線容量の大きさから数 GW 以下であり、わが国の水力発電設備 48GW と比べても小さい。すなわち、調整電源としての規模も限られると言わざるを得ない。よって、電力の安定供給・信頼性向上には一定の貢献があると考えられるものの、そのためだけに国際連系線を敷設することは、本稿の想定下では意義が薄いと言わざるを得ない。

なお、緊急時の電力輸出入ならびに、平常時のわが国供給予備力確保の点については、韓国の場合と同様、両国において意義があると考えられる。

以上、日露国際連系線は、2.2 節で想定する状況において、以下のことが言える。

- ① 日本国内の発電事業者にとって、ロシア市場において電力を販売することは容易ではなく、また、わが国にとってもロシアの水力発電起源の電力を導入する経済的メリットは大きくない
- ② わが国の再生可能エネルギーの導入拡大に対し、ロシアの水力を調整電源として活用する事は意味があるが、それだけのための連系線敷設については意義は薄い

白紙

4. 結論

本稿は、電力供給システムについて国際送電連系を導入すべきかについて議論するため、これまで行われてきた議論を調査・整理し、わが国にとっての国際送電連系の意義をあらためて考察したものである。その際、これまで各方面で提案されたような、東アジア全域を結ぶような国際連系線ではなく、まずは二国間連系に対象を絞り、日本とその接続先となる隣国との二か国間でメリットが生じるか、便益が享受できるかを考察した。

便益については、これまでの議論から、①再生可能エネルギー資源の導入拡大、②電力の安定供給および供給信頼性向上とし、既設もしくは計画中の国際送電連系がそれらを得るものであるかを文献調査によって明らかにした。

ところが、調査の結果、これまでの国際送電連系プロジェクトが、上記①、②の便益以上に、設置主体者の経済的メリットに主眼を置いて行われてきたことが明らかになった。すなわち、国際連系線の設置には、設置主体者に経済的メリットが得られることが必要条件であり、それが確保された上で、再生可能エネルギーの導入拡大や、電力の供給安定・信頼度向上などの便益がもたらされる場合、プロジェクトが比較的進みやすくなることがわかった。

また、わが国において国際連系が開始され得る年代として 2020 年代中頃を想定、その際のわが国の電力供給システムの状況を次のように設定し、具体的な国際連系候補国として韓国およびロシアとの国際連系の意義について考察した。

(想定条件)

- 再生可能エネルギー発電設備導入量が増加し、瞬時的には電力需要 (kW ベース) で半分に達するような時間帯が発生する。また、電力量 (TWh ベース) では年間発電量の 10% を越える。
- 再生可能エネルギーの優先接続によって卸電力価格は低下する。
- 急激な天候変化などにより再生可能エネルギーによる供給が出来ない場合において、卸電力価格の価格急上昇が発生する場合がある。
- 再生可能エネルギー賦課金により電力小売価格はさらに値上がりする。
- 石油火力など発電コストの高い電源が市場から追放され始め、供給力を維持するために容量市場の導入が始まり、小売価格に転嫁され始める。
- 石炭火力発電など、これまでベース電源と設定されてきた電源も時間単位ランピングに対応し、時間前市場などで取引されるようになる。

考察の結果、日韓国際連系線は日本および韓国の双方に経済的メリットがあると共に、再生可能エネルギー電力の導入拡大に伴う電力変動を緩和させる効果があることを得た。一方で、日露国際連系線は、日本およびロシアの双方の経済的メリットが薄く、加えて、ロシアの水力発電をわが国の調整電源として活用する場合でも効果は一部に留まるとの結論を得た。

これまで、わが国を含む韓国、中国など東アジア諸国は、それぞれの国境内だけで電力

供給システムを形成してきた。電力供給システムは国家存立基盤の一つであり、その意味で他国とのインターフェースが新たに生まれることは、安全保障面から危惧される部分もある。しかしながら、3.2 節で述べたように、仮に 1GW の日韓送電線で電力融通を行った場合の融通量は両国の年間電力消費量の 1%以下であり、直ちに国家存立基盤を揺るがすようなものではない。よって、国際送電連系を行う当事国の政治的関係がある程度安定する担保があれば、両国の経済的利益から、プロジェクトを行う事に合理性があると言える。

なお、今回実施した海外の国際連系調査は国内で調達可能な文献から行った事から情報の正確性などにも課題が残り、さらに詳細を詰めるためには、現地語の文章や現地調査なども必要である。さらに、時間別の電力需要・供給を想定した日本韓国電力系統モデルを作成しそれに基づく定量的経済性分析に基づく丁寧な議論が行えていないことから、今後の課題である。次稿にて取り組みたいと考える。

参考文献

- [1] 環境省：2013 年度（平成 25 年度）温室効果ガス排出量（確報値）（2015）
- [2] 九州電力株式会社：2014 年 9 月 24 日プレスリリース九州本土の再生可能エネルギー発電設備に対する接続申込みの回答保留について（2014）
- [3] 野口貴弘：リファレンス, 2013 年 5 月号, 2-51（2013）
- [4] 経済産業省総合資源エネルギー調査会基本政策分科会：ガスシステム改革小委員会 報告書（2015）
- [5] 電気事業連合会：FEPC INFOBASE 2014（2014）
- [6] 電気事業連合会ウェブサイト：<http://www.fepc.or.jp/enterprise/souden/keiro/>（アクセス日：2016.08.10）
- [7] 経済産業省固定価格買取制度情報公開用ウェブサイト：http://www.fit.go.jp/statistics/public_sp.html（アクセス日：2016.07.21）
- [8] 日本卸電力取引所ウェブサイト：<http://www.jepx.org/>（アクセス日：2016.09.25）
- [9] 経済産業省総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力基本政策小委員会（第 6 回）：配布資料 5-2（2016）
- [10] 経済産業省総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 電力システム改革小委員会 制度設計ワーキンググループ（第 5 回）：配布資料 4-4（2014）
- [11] 経済産業省総合資源エネルギー調査会 電力ガス事業分科会 電力基本政策小委員会（第 5 回）：配布資料 6（2016）
- [12] トマ・ヴェラン, エマニュエル・グラン：ヨーロッパの電力・ガス市場（第 7 章），日本評論社（2014）
- [13] 古澤 健：ドイツの再生可能エネルギー電源普及に伴う影響—卸電力市場の価格と系統運用の再給電指令—，電力中央研究所報告 Y12009（2013）
- [14] 経済産業省総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 再生可能エネルギー導入促進関連制度改革小委員会（第 8 回）：配布資料 2（2016）
- [15] Asia Pacific Energy Research Centre of IEEJ：Electric Power Grid Interconnections in Northeast Asia（2015）
- [16] Belyaev, L., Voropai, N., Podkovalnikov, S. & Shutov, G.: Problems of power grid formation in Northeast Asia (in Russian)”, Elektrichestvo (Electricity), Volume 2, pp. 15-27（1998）
- [17] Korea Electrotechnology Research Institute: Power Interconnections in Northeast Asia（2003）

- [18] EN+: Electric Power Grid Interconnections in the APEC Regions Feasibility Study's Update, Presentation Material for the APEC 44th EWG Meeting (2012)
- [19] D. Park: Current status and future electricity industry in Northeast Asia, Proceedings of KEEI and IEA Joint Conference on Northeast Asia Energy Security and Regional Cooperation, pp. 211-220 (2004)
- [20] T. J. Hammons: Accessing Renewable Energy Resources and Electrical Integration in the Asian Region, Rev. Energ. Ren.: Power Engineering, pp.17-27 (2001)
- [21] T. J. Hammons, et al.: International High Voltage Grids and Environmental Implications, IEEE Power Engineering Review, Vol. 18, No. 8, pp.4-20 (1998)
- [22] T. J. Hammons, et al.: Environmental Effect and Strategy of Power Generation in Asia to the Year 2030, IEEE Power Engineering Review, Vol. 18, No. 11, pp.8-21 (1998)
- [23] Asia Pacific Energy Research Centre of IEEJ : Power Interconnection in the APEC region – Current Status and Future Potentials– (2000)
- [24] S. Bae, et al.: Prospects of energy cooperation in Northeast Asia, Proceedings of KEEI and IEA Joint Conference on Northeast Asia Energy Security and Regional Cooperation, pp. 19-27 (2004)
- [25] GRENATEC ウェブサイト: <http://grenatec.com/> (アクセス日 : 2016.08.10)
- [26] 孫正義: エネルギーのパラダイムシフトへ, 自然エネルギー財団設立イベント資料 (2011)
- [27] 日本創成会議 : 第 1 回提言「エネルギー創成」 (2011)
- [28] 経済産業省総合資源エネルギー調査会総合部会 電力システム改革専門委員会地域間連系線等の強化に関するマスタープラン研究会 : 中間報告書 (2012)
- [29] 韓国電力公社 : KEPCO's Future Plans of Northeast Asia Supergrid, 国際シンポジウムアジアスーパーグリッドによる国際連系の可能性・韓国電力公社資料 (2014)
- [30] Skoltech: Northeast Asia Supergrid: Japan, South Korea and Russia mull Interconnected Power System at Skoltech Seminar (2014)
- [31] C. Breyer et al.: North East Asian Super Grid Renewable Energy Mix and Economics, Proceedings of the 6th World Conference of Photovoltaic Energy Conversion (2014)
- [32] Energy Charter, et al.: Gobitec and Asian Super Grid for Renewable Energies in Northeast Asia (2014)
- [33] 一般財団法人日本エネルギー経済研究所 : 平成 24 年度エネルギー環境総合戦略調査 (国際連系に関する調査・研究) 報告書 (2013)
- [34] 一般財団法人日本エネルギー経済研究所 : 平成 25 年度電力系統関連設備形成等調査事業 (国際連系に関する調査・研究) 報告書 (2014)

- [35] 北海道電力ウェブサイト：<http://www.hepco.co.jp/>（アクセス日：2016.08.10）
- [36] 一般社団法人 日本電気協会：電気事業便覧 平成 27 年版（2015）
- [37] 服部徹：容量メカニズムの選択と導入に関する考察，電力経済研究，No.61（2015）
- [38] エリック・マーティノー：自然エネルギーの系統への大量導入と需給バランスの現状 ドイツ、カリフォルニア、デンマークの事例，自然エネルギー財団報告書（2015）
- [39] 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力基本政策小委員会（第 5 回）：配布資料 5-1（2016）
- [40] Economic Consulting Associates: The Potential of Regional Power Sector Integration（2010）
- [41] 国際協力銀行開発金融研究所：インドシナ域内協力（電力セクター），JBICI Research Paper, No.18（2002）
- [42] 一般社団法人日本電機工業会：風力発電の市場統合と系統連系—風力発電の大規模系統連系のための欧州電力市場の発展—（2013）
- [43] 欧州風力エネルギー協会：風力発電の系統連系～欧州の最前線～，日本風力エネルギー学会（2010）
- [44] 筒井美樹，古澤健：世界の電力事情 日本への教訓 韓国編，電力中央研究所，pp.43-46（2013）
- [45] 一般社団法人海外電力調査会ウェブサイト・各国の電気事業（韓国）：<https://www.jepic.or.jp/data/global11.html>（アクセス日：2016.08.10）
- [46] 韓国卸電力取引所ウェブサイト：<http://epsis.kpx.or.kr/>（アクセス日：2016.09.25）
- [47] 電力広域的運営推進機関：送変電設備の標準的な単価の公表について（2016）
- [48] EY アドバイザリー株式会社：経済産業省資源エネルギー庁・平成 27 年度国際エネルギー使用合理化等対策事業・ロシア極東地域における熱及び発電分野のエネルギー効率改善に係るビジネス可能性共同調査報告書（2016）