

経済学からみた電力システム改革の課題②

調査レポート

～発送電分離後の送電線投資問題について～

本シリーズでは、わが国の電力システム改革の問題および課題などについて経済学的視点から分析した結果について紹介をしている。

第1回の「Tirole 教授の研究業績と電気事業への示唆」に続き、第2回では、発送電分離などの電力システム改革が進む欧米で特に近年問題となっている送電線投資について紹介していく。

1. はじめに

送電線は、発電所で発電した電気を需要家に届けるために必要となる電気事業には欠かせない設備の一つである。送電線はいくらでも電気を送れるわけではなく、電気を送れる量、いわゆる送電容量は電気を送る際に発生する熱に各設備が耐えられる限界などで決められている。よって、送電事業者は、全ての送電線で容量を超えないように、発電量や電気の流れの調整を行いながら系統運用を行い、最大電力需要が増加すればそれに合わせて送電容量の拡張を行ってきた。

しかし、近年、わが国の人口は減少傾向にあり、省エネ技術の発展などからも最大電力需要が今後大幅に増加することは考えにくく、送電容量拡張の必要性もこれまでよりは低下するものと思われる。その一方で、わが国と同じく人口減少傾向にあり、需要の大幅な増加も考えにくいドイツにおいては、送電容量を拡張する必要性に迫られている状況にある。これは、自由化やエネルギー政策の転換、再生可能エネルギー電源（再エネ電源）の急増といった電気事業を取り巻く環境変化に伴う送電線利用形態の変化が背景にあると考えられている。

わが国においても自由化をはじめとする電力システム改革により、今後、事業環境が変化していくことが予想されている。また、東日本大震災

による計画停電の実施を契機に、全国大で広域的に電力融通が行える体制の整備が求められていることから、送電容量の拡張が重要な課題となっている。

一方、欧米の事例では、自由化し、さらに発送電分離された市場においては送電線投資が停滞するといった状況もみられている。例えばドイツでは、2020年までに約1800kmの送電線の新增設を計画し、法律も制定して国全体で拡張に取り組んできた。しかし、2014年9月時点で工事は計画の約24%しか進んでおらず、その遅れが社会問題となっている。

そこで、本レポートにおいては何故送電容量の拡張が必要となるのか、またその投資のあり方などについて欧米の状況も踏まえ紹介していく。

2. 送電混雑による問題

(1) 送電混雑とは

先述したように、送電線には運用可能容量があり、この容量を超えないよう、送電事業者が調整をしながら系統運用を行っている。しかし、例えば一部の送電線や発電所が故障により使用不能となったり、複数箇所で想定外の電力取引の実施、またはドイツのような再エネ電源の急増によって、運用上の調整では間に合わない量の電気が送電線に流れそうになってしまうことがある。そう

といった場合、送電設備が発生する熱に耐えきれなくなり故障することを防ぐため、電力取引の制限や時には一部を停電させるといった、電気の流れる量を調整する作業が必要となる¹。この

ような送電線に運用容量を超える電気が流れることを送電混雑といい、送電混雑が起きた場合は電力取引の制限や停電の発生といった経済面、そして安定供給面にも影響が及ぶこととなる。そこで以下では、送電混雑がもたらす主な問題である「社会厚生²の損失」「市場支配力の行使」「供給信頼度の低下」の3点について簡単に説明するとともに、自由化によって混雑頻度が増加した欧米の事例を紹介していく。

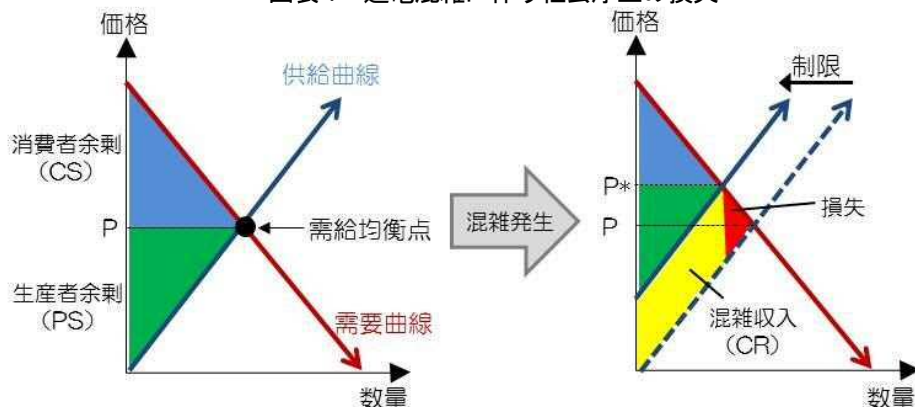
(2) 送電混雑による主な問題

① 社会厚生²の損失

ある地域 A と B において、地域 A のみに発電事業者、地域 B のみに消費者が存在し、地域 A から B に電気を送る送電線があるとします。この場合、電力価格は図表 1 の左側の図のように、地域 B の需要と地域 A の供給が釣り合う需給均衡点 P、つまり、社会厚生（消費者余剰²と生産者余剰³を足し合わせたもの）が最大となる点で決まることが望ましい。

しかし、送電混雑が発生すると地域 A から B への供給が制限され、需給均衡点が示す量の電気

図表 1 送電混雑に伴う社会厚生²の損失



を全量送ることが出来なくなる。そこで、制限された供給量に地域 B の需要量が等しくなるよう、消費者に混雑料金を課し、図表 1 右側の図のように、電力価格を送電混雑下で需給が等しくなる点 P* まで上昇させる必要が出てくる。すると、消費者余剰と生産者余剰の和（図表の青色と緑色で示している部分）は図表のように減少することになる。

消費者余剰と生産者余剰の和の減少分（図表の黄色と赤色で示している部分）のうち、黄色で示している部分は混雑収入（CR）として送電事業者が一旦留保した後、送電容量の拡張原資とするなど消費者及び発電事業者⁴に何らかの形で分配されるが、赤色で示した部分は純粹に失われる損失となる。つまり、混雑が発生するほど社会全体に損が発生することになる。

② 市場支配力の行使

送電混雑により特定の送電線利用が制限されると、その送電線を使って電力を送っていた地域に電力を供給できる事業者が限られることとなる。例えば図表 2 では、地域 A は発電事業者 C による供給を受けることが出来なくなり B と D といった限られた発電事業者の供給に頼ること

¹ 熱を制約とした送電線の運用可能容量の他に、電圧や周波数等の系統を安定的に運用するための制約も存在する。

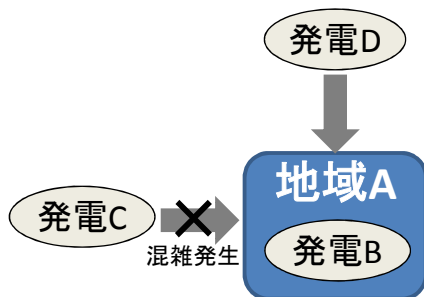
² ある財・サービスに対して消費者が支払ってもよいと考える対価の最大値と、その消費者が実際に払う代価との差額。

³ 企業がある財・サービスを買ってもよいと考える最低価格と、実際に受け取る代価との差額。

⁴ 分配がされないと、混雑が発生するほど送電事業者の便益が増えることになる。

となる。このような状況では、発電事業者 B や D が発電量を絞り、地域 A への供給量を減らせば、地域 A の需給は逼迫し、電力価格は上昇することになる。このように事業者 B と D の行動によって地域 A の電力価格を釣り上げること（市場支配力の行使）が可能な状況が生まれるということは、つまり、市場競争が阻害され、需要家に不利益をもたらす可能性が発生することになる。

図表 2 送電混雑による供給事業者の制限



③ 供給信頼度の低下

供給信頼度⁵も、送電混雑が発生することで低下することになる。2 地点間を直接繋ぐ送電線が 2 本あるとする。この場合、片方の送電線で混雑が起きてても、残る 1 本の送電線でカバーすることが出来れば問題がないように思える。しかし、残る 1 本の送電線で事故が起きてしまえば、2 地点を直接繋ぐ送電線を使っでの電力供給は出来なくなり、多地点を迂回した供給や、時には一部の需要家への供給が出来なくなる（停電）といったことも起こり得る。

(3) 自由化による送電混雑の増加

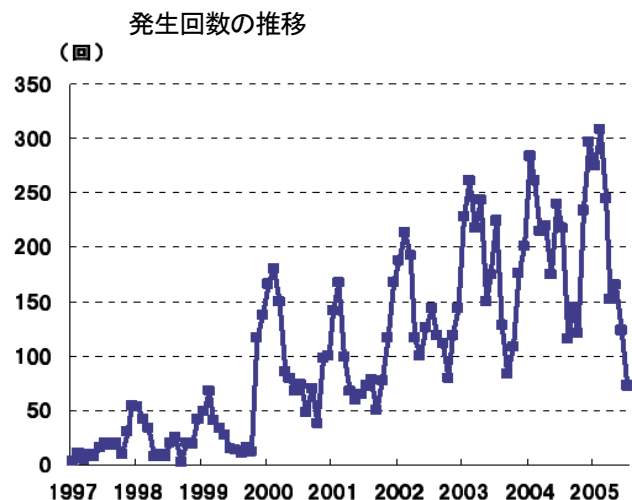
このように、送電混雑による影響は大きく、その発生頻度を抑制することが求められている。しかし、自由化先進国である欧米諸国では、その発生頻度が電力自由化によって増加するといった

⁵ 停電の発生頻度、継続時間、発生範囲によって表される電力供給の信頼性。

状況がみられている。

図表 3 に米国における自由化前後の送電混雑発生回数の推移を示している。米国では州により自由化の実施状況が異なるが、1998 年から自由化が開始されており、ちょうどこの頃から混雑発生回数が急増しているのが分かる。これは、小売自由化により事業者間競争が進んだ結果、より安価な電力調達を行うため州をまたいだ電力取引が活発化したこと、さらには送電設備がこういった自由化による影響を想定し建設されていたものではなかったことなどが背景にあると考えられている。なお、欧州においても同様に、自由化後には国をまたいだ電力取引の活発化による送電混雑の増加がみられている。

図表 3 米国の TLR (Transmission Loading Relief)



注：1. 図表の数値は、送電混雑の発生回数として、NERC（北米信頼度協議会）が公開しているレベル 2 以上の TLR の発令回数。TLR はレベル 0 からレベル 6 まで設定されており、レベル 2 は、現状を凍結し、これ以上新しい託送サービスを受け付けないレベル。
2. TLR とは、混雑が発生した際に系統運用者が用いる混雑解消手法の一つ。

資料：和田謙一「電力自由化と信頼度維持」

3. 送電線の投資価値評価

送電混雑は、供給信頼度の低下や市場支配力の行使といった市場競争を阻害する事態を招く可能性があり、また社会厚生も失われることになる。故に自由化を成功させるためにも、また社会厚生

を最大とするためにも、運用による混雑抑制の他、送電容量そのものの拡張、つまり送電線投資が必要となっている。

しかし、送電線の投資には当然費用が発生することになり、その費用は最終的に需要家の電気料金から回収されることとなる。過剰な送電線投資を行うことは需要家の不利益となるため、送電事業者は、送電線の建設により発生する便益（社会厚生が増加あるいは供給信頼度の向上）を評価し、投資を行う必要がある。

（１）社会厚生を用いた経済性評価

まずは、送電線の投資により社会厚生がどれだけ増加するのかを、発電事業者、小売事業者の便益（余剰）の変化から評価する方法「経済誘因型の送電ネットワーク投資」について説明する。

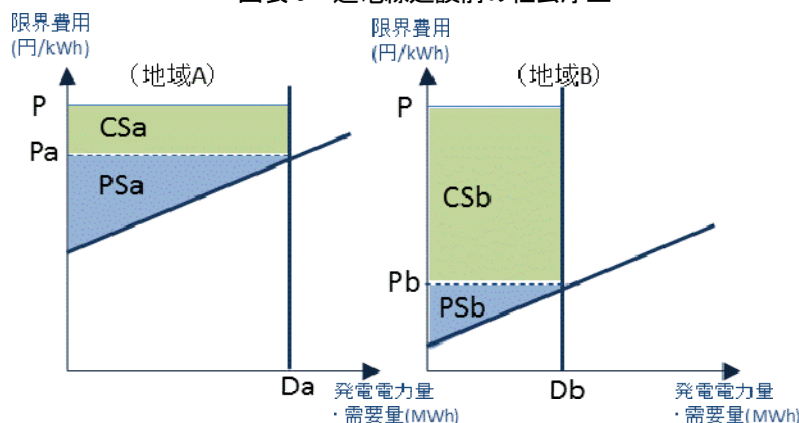
なお、以下では、ある1時間断面の便益の変化について説明していくが、送電線を建設した場合その設備は数十年利用し、便益も数十年に及ぶこととなる。そのため、実際の投資判断では利用期間分を考慮した便益と建設コストとを比較することになる（図表4）。

図表4 送電投資コストの便益評価



資料：電力中央研究所にて作成

図表5 送電線建設前の社会厚生



注：小売事業者の便益（CSa,CSb）の上限を定めることは難しいため、Value of Lost Load(VOLL)を仮想的な上限とみなす考え方がある。本稿では、VOLLが地域A,Bで同一かつ、送電線の建設前後で変化しないと想定する。この想定ならば、図表7から、送電線建設による便益はVOLLの大きさに依存しないことがわかる。

資料：電力中央研究所にて作成した資料をもとに筆者作成

① 送電線で連系されていない場合の便益

図表5のように、送電線で連系されていない地域Aと地域Bを想定する。地域Aでは、地域内の需要と供給が均衡する価格Paで電力が取引されており、この価格で小売事業者は電力を仕入れ、発電事業者は電力を販売することになる。その場合、発電事業者の便益は、売上（卸売販売価格Pa円/kWh×販売電力量DaMWh）から費用（発電限界費用×発電電力量DaMWh、白抜き部分）を差し引いた、図表でPSaと記載している青色部分になる。一方、小売事業者の便益は売上（小売販売価格P円/kWh×販売電力量DaMWh）から費用（発電事業者の売上）を差し引いた、図表でCSaと記載している緑色部分になる。地域Bも同様の考え方をすると、地域AとB全体の便益、つまり社会厚生は各地域の青色と緑色部分を足し合わせたPSa + CSa + PSb + CSbとなる。

② 送電線で連系された場合の便益

ここで、地域Aと地域Bの間に容量T MWhの送電線が建設されたとする（図表6）。地域Bの方が地域Aよりも卸売電力価格が安価である

ため、地域間の価格差が埋まるまで、地域 B から A に T MWh 分だけ電力が融通されることになる。すると、地域 B で発電される電力に対する需要が増えるため、地域 B の需要と供給の均衡価格は P_b から P_b^* へと上昇することになる。結果、地域 B の発電事業者の便益は PS_b^* へと変化し、増加することとなる。小売事業者は卸売販売価格つまり仕入価格が上昇するため、便益は CS_b^* へと減少することになる。

一方、地域 A では、地域 B から融通された電力 T MWh 分だけ、地域 A で発電される電力に対する需要は減少することから、均衡価格は P_a から P_a^* へと低下する。結果、発電事業者の便益は PS_a^* へと変化し、減少することになり、小売事

業者の便益は CS_a^* へと変化し増加することになる。また、地域 B の発電事業者は P_b^* 円/kWh で T MWh の電力を地域 A へと融通するが、地域 A の小売事業者は P_a^* 円/kWh で市場から電力を仕入れるため、その差分 $(P_a^* \text{円/kWh} - P_b^* \text{円/kWh}) \times T \text{ MWh}$ は混雑収入として送電事業者が受け取る便益となる。これらすべての便益を足し合わせた、各地域の青色、緑色、黄色部分の合計 $PS_a^* + CS_a^* + PS_b^* + CS_b^* + CR$ が送電線建設後の社会厚生となる。

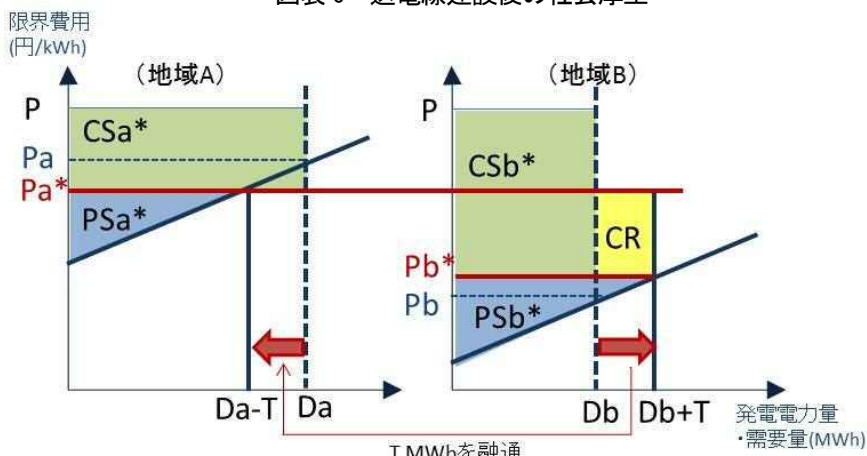
つまり、送電線建設によって変化した便益は図表 6 の送電線建設後の便益の合計 $(PS_a^* + CS_a^* + PS_b^* + CS_b^* + CR)$ から図表 5 の送電線建設前の便益の合計 $(PS_a + CS_a + PS_b + CS_b)$ を差

し引いた、図表 7 の黄色で示した部分となり、投資評価の際には、この変化した便益と投資コストとを比較することになる。

(2) 供給信頼度を基準とした技術的評価

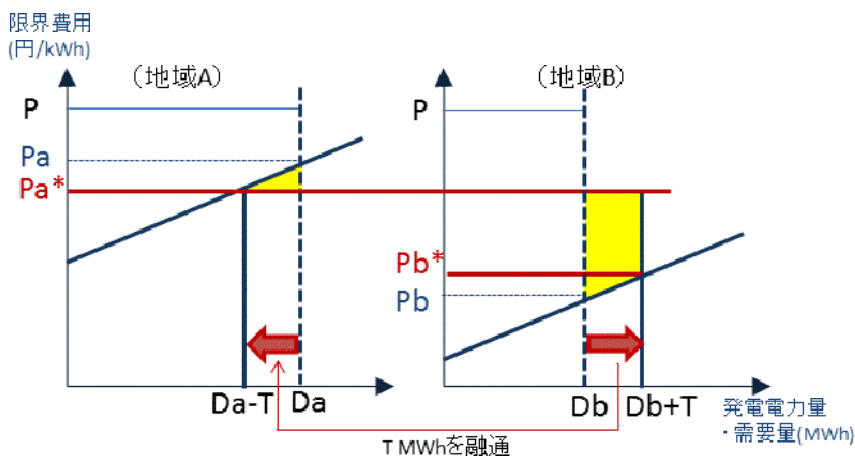
しかし、経済誘因型の投資評価ではあくまで社会厚生の増加による経済的価値のみしか評価が出来ず、送電線建設による供給信頼度上昇といった安定供給のための価値が評価に含まれていないという問題がある。よって現実では、経済誘引型の投資では送電事業者の最も重要な役割である安定供給を確実に保つことが出来るか分からないため、供

図表 6 送電線建設後の社会厚生



資料：電力中央研究所にて作成した資料をもとに筆者作成

図表 7 送電線建設による社会厚生の変化



資料：電力中央研究所にて作成した資料をもとに筆者作成

給信頼度基準を満たすことを評価基準とした、技術的要素を誘因とする投資が主に行われている。本レポートではその詳細を説明しないが、こういった投資方法を「技術誘因型の送電ネットワーク投資」という。なお、将来的に送電線建設による供給信頼度上昇の価値も含めた経済性を評価できるようにになれば、無駄のない効率的な送電線設備形成にも繋がると思われる。

4. 発送電分離による送電線投資への影響と送電権

(1) 発送電分離による送電線投資への影響

欧米諸国では、経済的または技術的な要素を評価基準とした投資価値評価の考え方のもと送電線の建設に取り組んできたわけだが、冒頭ドイツの事例で述べたように、実際はあまり送電線投資が進んでいない状況にある。その原因の一つが発送電分離による不確実性の増加であるとされている。

① 意思決定主体の分離

従来、送電設備は発電所と一体的に計画・開発されてきた。しかし、発送電分離により、各設備の開発立案主体は送電事業者と発電事業者に分かれ、発電事業者は自身の戦略に基づいて発電所の建設を計画することになる。よって、その計画に関する情報は送電事業者が送電線開発の計画時に必ず入手できるとは限らず、また情報が入手できたとしても、発電事業者の戦略変更により、発電所の建設計画が変更・中止される可能性もある。つまり、どこにいつ頃発電所が建設されてどの送電線に連系されるのかといった、送電線開発計画の策定において重要な前提条件が発送電分離により非常に不確実なものになる。

送電事業者がこういった不確実な送電線利用

に備え、事前に各地で送電線を整備することが出来れば問題はないが、整備した送電線が利用されない場合は整備費用の確実な回収が出来なくなる可能性がある。このため、実際に事前整備を各所で行うということは難しく、送電線の建設が進まない要因の一つといわれている。

また一方で、送電線の建設には相当な期間とコストが必要となるため、送電線整備が事前に行われていない場合、発電事業者が望んだ際にすぐ送電線が利用できるわけではなく、発電事業者は送電線の整備が行われるまで、電気の販売が出来ないといった状況が発生することも懸念されている。特に、近年導入が進んでいる再エネ電源は、建設期間が石炭やLNG火力といった従来型の電源に比べ短いため、こういった状況が発生しやすいと考えられる。このような送電線整備を先にすべきか、送電線利用の確定を先にすべきかといった議論は海外諸国でもなされているが、その解は未だに出ていない状況にある。

② 潮流状態の想定困難化

これまで各発電所の出力（運転パターン）は送電事業者（系統運用者）の指示に基づき管理されてきたわけだが、発送電分離後は発電事業者が自身の戦略に基づき、各発電所の出力を多様化させることも考えられる。結果、どれくらいの量の電気がどの地点からどの地点に向けて流れるのかといった、いわゆる電気の潮流の想定が困難となり、計画潮流と実潮流に乖離（計画外潮流）が生じることで送電事業者による安定的な運用に影響を及ぼす可能性がある。

また、最近では太陽光や風力など天候により出力が大きく変動する変動性電源が増加したため、潮流の不確実性は非常に高くなっている。

なお、潮流の不確実性が高いということは、各

送電線に流れる電気の量、送電線の利用量の予測が出来ないということである。つまり、どれだけ利用者に課金をして投資費用を回収すべきかといったことも予測しにくくなり、確実な費用回収が出来なくなることが懸念される。

また、再エネ電源は先述した電力潮流の予測の不確実性を高めるだけではなく、投資費用の増加にも影響を与えている。再エネ電源は、都市部よりも送電線設備が脆弱な過疎地に立地されやすい。そのため、再エネ電源の立地に伴い送電線設備の増強および、そのための費用が発生する可能性がある。また、家庭の屋根に付けるような自家消費型の再エネ電源の場合は、電力会社から購入する電力量自体は減る、つまり送電線利用料も減ることになるため、送電事業者の費用は増える一方収入は減ることになる。このように、投資費用の増加及びその回収が困難になっていくことへの懸念が投資を抑制しているとも考えられる。

(2) 送電権を用いた混雑解消の取組み

これまで説明したように、欧米諸国においては発送電分離などによって送電線投資が難しい状況にある。そんな中、欧米諸国は、既存の電源や流通設備の効率的な活用を促して混雑を解消しようとしている。その中の一つが送電権を用いた手法になる。

なお送電権は、送電線を物理的に利用する権利「物理的送電権」と、送電設備の使用において金融上の便益を受ける権利「金融的送電権」がある。

① 物理的送電権

物理的送電権は主に欧州の国境をまたぐ送電線（国際連系線）の混雑解消に用いられている。例えば、混雑が発生する可能性のある国際連系線の送電容量をオークションで各利用者に事前に

配分する仕組みにおいては、容量を獲得した事業者、つまり物理的送電権を保有する事業者以外は、送電線を利用することが出来ない。このように優先順位を付けることで混雑を発生させない仕組みになっている。

なお、物理的送電権を保有する事業者は、送電線の利用を確実に行うことが出来る、つまり電力取引を確実に実施することは可能となるが、送電線を使わないことが判明したら、利用権を解放することになる。しかし、物理的送電権は、送電混雑発生時に金融的な補償を受ける仕組みにはなっていない。

② 金融的送電権

金融的送電権は、物理的送電権とは異なり、経済的なリスクへの対応をするために主に米国の PJM⁶などで用いられている。

米国では前日およびリアルタイムの卸電力市場取引において送電混雑が発生した場合は、その混雑に伴い発生した機会費用を取引参加者に負担させる仕組みが多く採用されている。

この取引参加者が支払う機会費用（混雑費用）は送電事業者（系統運用者）が一旦回収し、送電容量拡張のための投資や金融的送電権保有者への支払に充当される。つまり金融的送電権の保有により混雑費用の一部を受け取ることが可能になるのである。

金融的送電権の保有者は、権利を有する地点間の始点と終点の混雑状況に応じて取引参加者が支払った混雑費用の一部を受け取ることが出来る（状況によっては費用が受け取れない場合もある）。この混雑費用の受け取りにより、混雑発生

⁶ 米国東部の13州とワシントンD.C.を管轄する地域送電機関（RTO）。RTOであると同時に、前日・当日市場やリアルタイム市場、発電容量市場等の運営も行っている。

に伴う追加の費用負担リスクを軽減することが可能になるのである。

しかし、混雑発生に伴う追加の費用負担リスクを軽減させるということは、混雑費用の抑制、つまり金融的送電権の保有者に、送電混雑を削減させるような行動を促す仕組みが働きにくくなるといった指摘もされている。

このように、欧米諸国においては様々な取組みがなされているが、各取組みには改善が必要とされる点もあり、完全な解決策はまだ見つからない。

5. おわりに

自由化及び発送電分離の目的の1つである、電気料金の低減及び安定的な電力供給を実現するためには、発電事業者及び小売事業者が自由に電力取引を行える環境が必要となる。そしてそのためには、送電混雑といった送電線利用を妨げるような事態をなるべく抑制し、全ての送電線利用者が自由かつ公平に送電線を利用できるよう、送電線の整備をすることが送電事業者に求められる役割である。

しかし、欧米諸国においては先述したように自由化及び発送電分離によって従来に比べ送電線の建設は難しい状況にあり、様々な手法を用いて送電線投資に取り組んでいる状況にある。

わが国においても、今後欧米諸国と同様に自由化及び発送電分離を行うことが決まっており、送電線の建設に関しては広域的運用推進機関が全国の電力供給計画を基に送電線の整備計画を立て、各送電事業者が計画に基づき建設を進めていくことになっている。電力システム改革により電気事業を取り巻く環境は変化し、これまでわが国においては想定していなかったような事態が発生すること等により、送電線投資が進まず安定供

給に懸念が生じるといった事態が起きる可能性もある。そういったことを未然に防ぐためにも、欧米諸国の取組みを参考にしながら、わが国に合った送電線投資のあり方を検討し、確実に送電線投資を進めていくことが求められる。

なお、欧米諸国においては、送電線投資を促すため国や規制機関が送電線投資計画に関わるといった事例が多くみられているが、国や規制機関、わが国においては広域系統運用機関に送電線投資判断などを委ねてしまうことで、各送電事業者によるコスト削減や経済合理性の判断が行われなくなるといったことも懸念される。よって、投資のあり方の検討においては、送電事業者が引き続きコスト削減に取り組めるような仕組みを保持することなどにも留意していく必要がある。

レポート作成にあたっては（一財）電力中央研究所 服部上席研究員、古澤主任研究員に多大の協力をいただいた。この場を借りて御礼を申し上げます。また、本レポートの内容に関しては、すべて著者が責を負うものとする。

経済産業グループ 舩岡 紅実

《参考文献》

- 穴山悌三 (2005) 『電力産業の経済学』 NTT 出版
- 岡田健司「電力流通設備のアセットマネジメント」『DEN-CHU-KEN TOPICS』(2011年6月号)
- 岡田健司・丸山真弘(2015)「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』
- 調整力等に関する委員会事務局 (2015)「第2回調整力等に関する委員会資料4 海外事例の調査について」(平成27年6月11日)
- 戸田絢史 (2015)「送電線の建設における市民合意に向けた考察(欧州)」『海外電力』(2015年8月)
- 服部徹 (2004年)「電力再編下の米国における送電投資に関する実証分析」『電力中央研究所報告 Y03025』
- ハバード, R.-G・オプライエン, A.-P 竹中平蔵・真鍋雅史訳 (2014)『ハバード経済学 I 入門編』
- 和田謙一(2006)「電力自由化と信頼度維持」