

# 電力システムの経済理論： 送電投資

金本良嗣

日本卸電力取引所理事長

政策研究大学院大学客員教授，東京大学名誉教授

# アウトライン

1. 送電網投資に関する制度設計
2. 送電キャパシティーの最適解
3. 市場均衡における送電キャパシティー

# 1. 送電網投資に関する 制度設計

UTOL掲載資料：20250630\_送電網投資について（解説集）.pdf

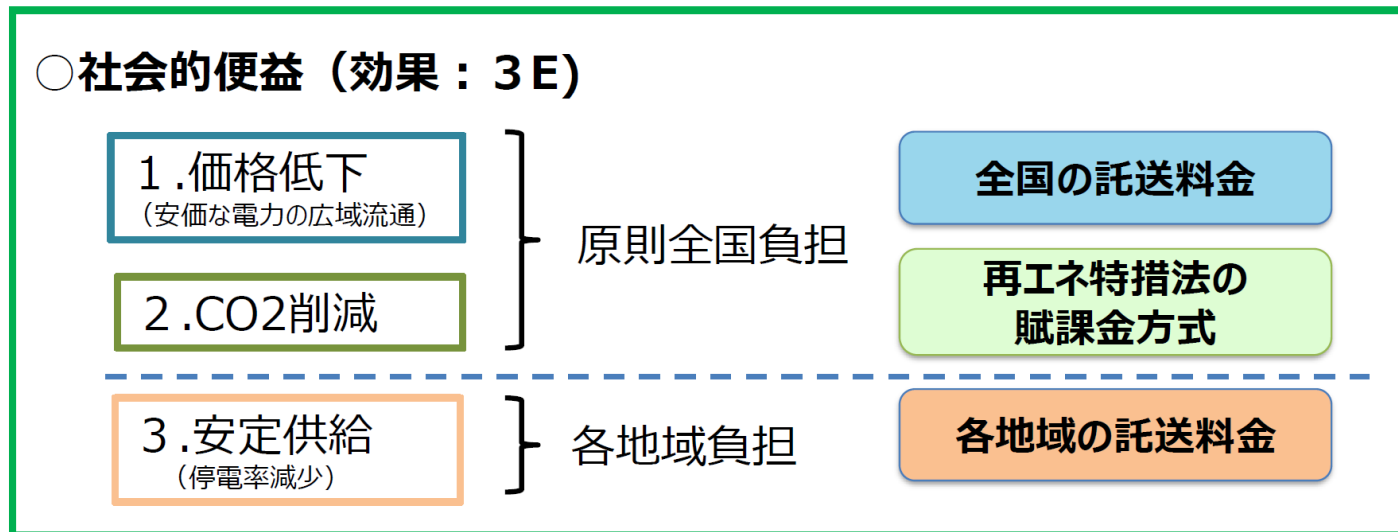
# 送電網投資とその費用負担に関する制度設計

- 送電網投資とその費用負担については様々な制度設計が可能。
  - 欧州ではTSOが送電網投資を行い、その費用は送電料金から回収されている。費用便益分析による投資判断。
  - PJMでは新規電源に増強費用を負担させ、その代わりに容量市場への参加を認めている。
- 送電権の設定
  - 物理的送電権 ⇔ 金融的送電権（値差収益を得ることができる権利）
  - 新規接続電源に増強費用を負担させ、その代わりに金融的送電権を与える仕組み。
  - マーチャント送電線：英国・オランダ間、ノルウェー・英国間
- 値差収益を用いた送電網投資：値差収益を連系線投資に充当
- 「均一価格＋再給電」のもとでのTSOによる送電網投資
  - 再給電コスト削減のために送電網投資を行うインセンティブがある。

# 送電網投資に関する全国調整スキーム

## 【参考】全国調整スキームについて

- マスタープランに基づく設備増強は、全国に裨益する便益を含めた社会的便益が費用を上回るとの判断に基づき実施されるもの。
- これを踏まえ、将来の電源ポテンシャルを踏まえたプッシュ型のマスタープランを策定した上で、その増強費用を全国で支える仕組みとして、再エネ由来の効果分（価格低下・CO2削減）に対応した負担について、①再エネ特措法上の賦課金方式（系統設置交付金）や、②JEPX値差収益の活用により確保するスキーム（全国調整スキーム）の大枠を、エネルギー供給強靱化法において実現。

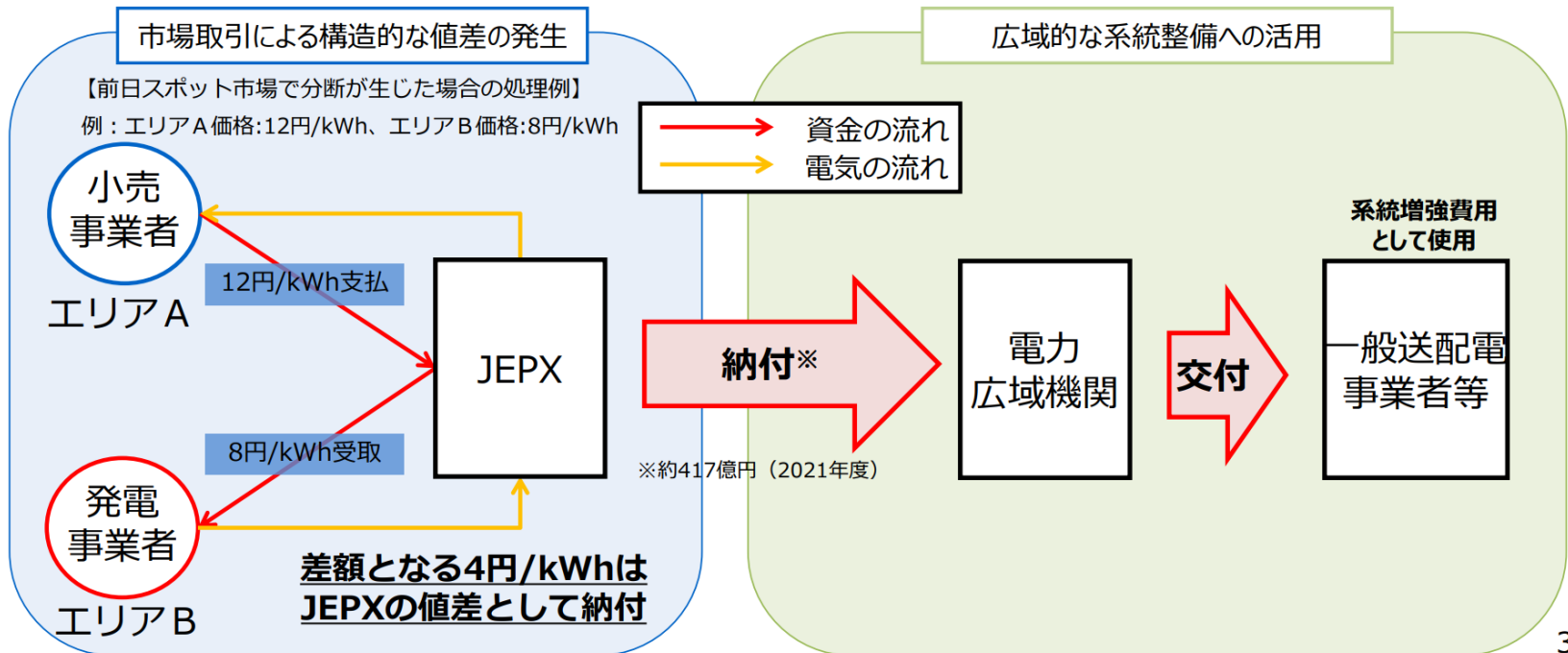


# 値差収益の活用

## (参考) 市場値差の構造

(出所) 第49回 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会 資料3

- 連系線混雑によって市場分断が起きると、分断されたエリア内で売買を成立させる処理がなされるため、**分断されたエリア間で構造的に値差が発生**する。市場値差の活用は、**計画的な連系線の増強費用に充てることで地域間値差の縮小を目指す**ことを目的とするため、その活用主体は**我が国全体の送配電網の整備に係る判断を適切に行うことができる電力広域機関が適切**とされた。
- このため、日本卸電力取引所（JEPX）において値差が発生した場合には、**毎事業年度、その金額を電力広域機関に納付**することとし、**電力広域機関が系統増強等の費用について広域系統整備交付金として交付を行う**仕組みとされている。



# 2. 送電キャパシティ の最適解

## 送電キャパシティー最適化問題

- 送電キャパシティーを最適化.
- 送電キャパシティー  $K_T$  に関するKKT条件を導出.

$$\text{Max} \sum_s \sum_i \pi_s \left( U_s(Q_s^i) - \sum_j c_j q_{js}^i \right) - \sum_i \sum_j F_j^i(K_j^i) - C_T(K_T)$$

s.t.

$$(P_s^1) \quad Q_s^1 = q_s^1 + e_s, \text{ for any } s$$

$$(P_s^2) \quad Q_s^2 = q_s^2 - e_s, \text{ for any } s$$

$$(p_s^i) \quad q_s^i = \sum_j q_{js}^i, \text{ for any } i \text{ and } s$$

$$(\gamma_s^+, \gamma_s^-) \quad -K_T \leq e_s \leq K_T, \text{ for any } s$$

$$(\delta_{js}^i) \quad q_{js}^i \leq K_j^i, \quad i = 1, 2, \text{ for any } j \text{ and } s$$

$$(\lambda_{js}^i) \quad 0 \leq q_{js}^i, \quad i = 1, 2, \text{ for any } j \text{ and } s$$

# ラグランジアンとKKT条件

ラグランジアン：

$$\begin{aligned} \Omega = & \sum_s \pi_s \sum_i \left( U_s(Q_s^i) - \sum_j c_j q_{js}^i \right) - \sum_i \sum_j F_j^i(K_j^i) - C_T(K_T) \\ & + \sum_s \pi_s \left\{ P_s^1(q_s^1 + e_s - Q_s^1) + P_s^2(q_s^2 - e_s - Q_s^2) \right\} + \sum_s \pi_s \sum_i P_s^i \left( \sum_j q_{js}^i - q_s^i \right) \\ & + \sum_s \pi_s \left\{ \gamma_s^+(K_T - e_s) + \gamma_s^-(e_s + K_T) \right\} + \sum_s \pi_s \sum_i \sum_j \left\{ \delta_{js}^i (K_j^i - q_{js}^i) + \lambda_{js}^i (q_{js}^i - 0) \right\} \end{aligned}$$

KKT条件：

$$K_T : \sum_s \pi_s \gamma_s^+ + \sum_s \pi_s \gamma_s^- = C_T'(K_T) > 0$$

送電の最適条件 + 相補性条件

$$q_s^i : P_s^i - p_s^i = 0$$

$$e_s : P_s^1 - P_s^2 - \gamma_s^+ + \gamma_s^- = 0$$

$$\gamma_s^+ \geq 0, \gamma_s^+(K_T - e_s) = 0, e_s \leq K_T$$

$$\gamma_s^- \geq 0, \gamma_s^-(e_s + K_T) = 0, -K_T \leq e_s$$

$$\sum_{s, p_s^1 > p_s^2} \pi_s (p_s^1 - p_s^2) + \sum_{s, p_s^2 > p_s^1} \pi_s (p_s^2 - p_s^1) = C_T'(K_T)$$

kWあたりの地域間値差収入 = 送電容量増加の限界費用

# 送電キャパシティの最適条件

- 送電容量の最適条件：単位送電容量あたり地域間値差収入 = 送電容量増加の限界費用

$$\sum_{s, p_s^1 > p_s^2} \pi_s (p_s^1 - p_s^2) + \sum_{s, p_s^2 > p_s^1} \pi_s (p_s^2 - p_s^1) = C_T'(K_T) > 0$$

- 地域間値差収入は送電網増強の限界便益と解釈できる。

$$MB_T = \sum_{s, p_s^1 > p_s^2} \pi_s (p_s^1 - p_s^2) + \sum_{s, p_s^2 > p_s^1} \pi_s (p_s^2 - p_s^1)$$

- 地域間値差が発生していなければ，送電網増強の便益はゼロ。
  - 混雑が発生しないレベルまで送電網整備を行うことは過剰投資になる。

# 3. 市場均衡における送電キャパシティー

# 市場均衡における送電キャパシティー

## 送電網増強の限界便益と地域間値差収入：

- 送電網増強の限界便益 = 単位送電容量あたり地域間値差収入
- TSOが値差収入で送電網の増強費用をまかない、価格を所与として利潤最大化を行うと送電網投資が最適。
  - ただし、TSOは独占が許されているので、プライステイカーの仮定は成立せず、政策的な介入が必要である。通常は費用便益分析と義務づけ。
- 地域間の値差が発生していなければ送電網増強の便益はゼロ ⇒ 混雑が発生しないレベルまで送電網整備を行うことは過剰投資。
  - ただし、実際の送電網増強には大きな不可分性がある。増強後に混雑が発生しない場合でも増強の純便益がプラスである可能性がある。
- 均一価格制 + 再給電：競争市場における電源キャパシティーが最適ではない ⇒ 死重損失が発生。
  - 送電網の増強はこの死重損失を変化させるので、便益を推定する際には死重損失の変化を地域間の値差収入に加える必要が出てくる。
  - 直観的には、送電網増強は送電制約を緩和させて死重損失を減少させるので、プラスの追加的便益が発生すると推測される。ただし、厳密な分析が必要。

# 送電網投資に関する制度設計

## ゾーン間値差収入による送電網投資

- TSOがゾーン間の値差収入を受け取り，それで整備費用をまかなう仕組み.
  - TSOが価格を所与として利潤最大化を行うと，送電線整備が最適になる.
  - 独占であるので，プライステイカーの仮定は成立せず，政策的な介入が必要.
- 利潤最大化によって送電線の最適容量が達成されたとしても，TSOの収支が均衡しない可能性.
  - 規模の経済一定  $\Rightarrow$  収支均衡
  - 規模の経済  $\Rightarrow$  赤字，規模の不経済  $\Rightarrow$  黒字.

## ディープ接続

- 新規接続電源が増強費用を負担 + 金融的送電権
- 増強費用を負担する電源の利潤 = エネルギー市場における利益 + 金融的送電権による利益
- 増強を行う前の状態において電源キャパシティーが自由参入で決定されていたとすると，エネルギー市場における利益はゼロ. したがって，増強費用を負担する電源は金融送電権による利益がゼロになるまで参入する. これは送電容量最適化の条件と同じである.

$$\Pi_j^T = \left[ \sum_s \pi_s (p_s^1 - p_s^2) - C_T'(K_T) \right] \Delta K_j^2$$

PJMでは金融的送電権は需要側（ネットワーク送電サービス利用者とfirm point-to-pointサービス利用者）に与えられる. 増強費用を負担した電源は容量市場収入を得る.

# 「均一価格 + 再給電」のもとでの送電網投資

- 均一価格，地域2から地域1への送電量 > 送電容量のケースを考える。
- TSOによる再給電：地域2の電源を抑制，地域1の電源が追加の発電。
- TSOは赤字：(地域2の限界電源の限界費用 - 地域1の限界電源の限界費用) \* 再給電量 < 0
- 送電容量の増加によるTSOの限界利益：-(地域2の限界電源の限界費用 - 地域1の限界電源の限界費用) x 送電容量の増加 - 送電容量増加の限界費用
- TSOがプライステイカーであると，利潤最大化送電容量は最適解と一致する。
- ただし，均一価格のもとでは電源キャパシティが最適解から乖離するので，この歪みによる死重損失の変化を考慮した次善の最適解を考える必要がある。
- TSOの収益最大化は次善の最適解とはならないが，死重損失の変化が小さければ最適解 & 次善解の良い近似となる。
- TSOの収益はマイナスであるので，託送料金等からそれを補填する必要がある。

- 再給電を市場化できないか？：ドイツでは，再給電指令への参加は義務であり，コストベースでかかった費用が払い戻される。
- 市場化するとゲーミングの弊害が発生。
- 供給不足の地域では，再給電の価格が（均一の）市場価格より高くなる。市場に高い価格を入札して落札しないようにして，再給電の方に供給しようとする。
- 余剰地域では再給電の価格が市場価格より低くなる。限界費用より低い価格で入札・落札して，再給電市場の価格で買い戻すと利益をあげることができる。
- カリフォルニアにおける電力危機（2000年～2001年）や2010年頃の英国において実際にこういった行動が観察された。  
[Hirth, Lion; Schlecht, Ingmar \(2020\) : Market-Based Redispatch in Zonal Electricity Markets: The Preconditions for and Consequence of Inc-Dec Gaming, ZBW – Leibniz Information Centre for Economics, Kiel, Hamburg](#)