

# 電力システムの経済理論： 需要，給電，送電

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. 電力ネットワークの理論モデル：2地域からなる可能な限り最も簡単な電力ネットワークをモデル化する。
2. 最適解：最適解を導出し，その特性を分析する。
3. 市場均衡：最適解を実現する市場制度設計を考える。

教科書：「電力システムの経済学Ⅰ：給電，電源接続，系統増強」  
(金本良嗣) RIETI Discussion Paper 22-J-013

<https://www.rieti.go.jp/jp/publications/summary/22030025.html>

# 1. 電力ネットワークの 理論モデル

2地域からなる可能な限り最も簡単な電力ネットワークをモデル化する。

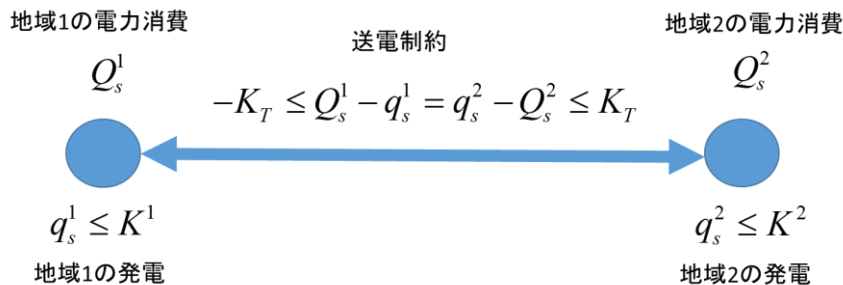
# 電力システムの理論モデルの特徴と扱うテーマ

- 自由化された電力システムの経済学的な特性と必要な政策介入を理解するための統一的な枠組みを提供.
- 可能な限り単純な決定論的電力市場モデル.
- モデルの特性：電力市場の特質をつかんだ理論モデル
  - 価格非弾力な需要.
  - 停電を避けるために供給側が需要に追随.
  - 不確実性を考慮しない決定論的モデル
- 扱うテーマ
  - 需要 (demand) , 給電 (dispatching) , 送電 (transmission) に関して最適解はどういうものであるのか？
  - 最適解を市場で達成するためにはどういう市場設計が必要なのか？

## 2 地域電力ネットワークモデルの構造

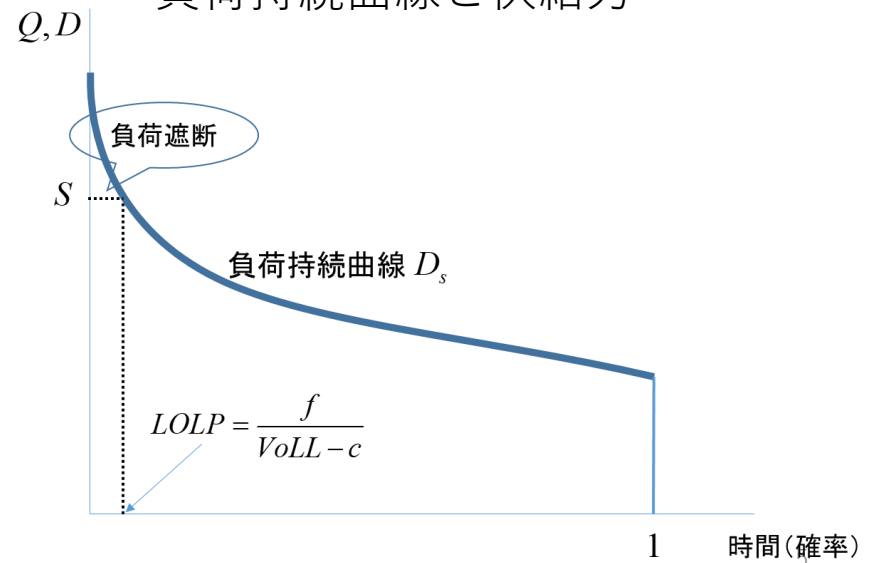
- 不確実性の存在しない確定論的なモデル。ただし，需要は時間帯，季節，経済動向等によって大きく変動。
  - $D_s = s$  時における需要。
  - 負荷持続曲線**：需要を大きい順に並べ替える。
- 供給力が不足する場合には負荷遮断（停電）
  - 電力供給  $S =$  電力消費  $Q \leq$  電力需要  $D$
- 2 地域 ( $i = 1, 2$ ) 間の送電容量制約： $-K_T \leq e_s \leq K_T$   $e_s = Q_s^1 - q_s^1 = q_s^2 - Q_s^2$

### 2地域電力モデル



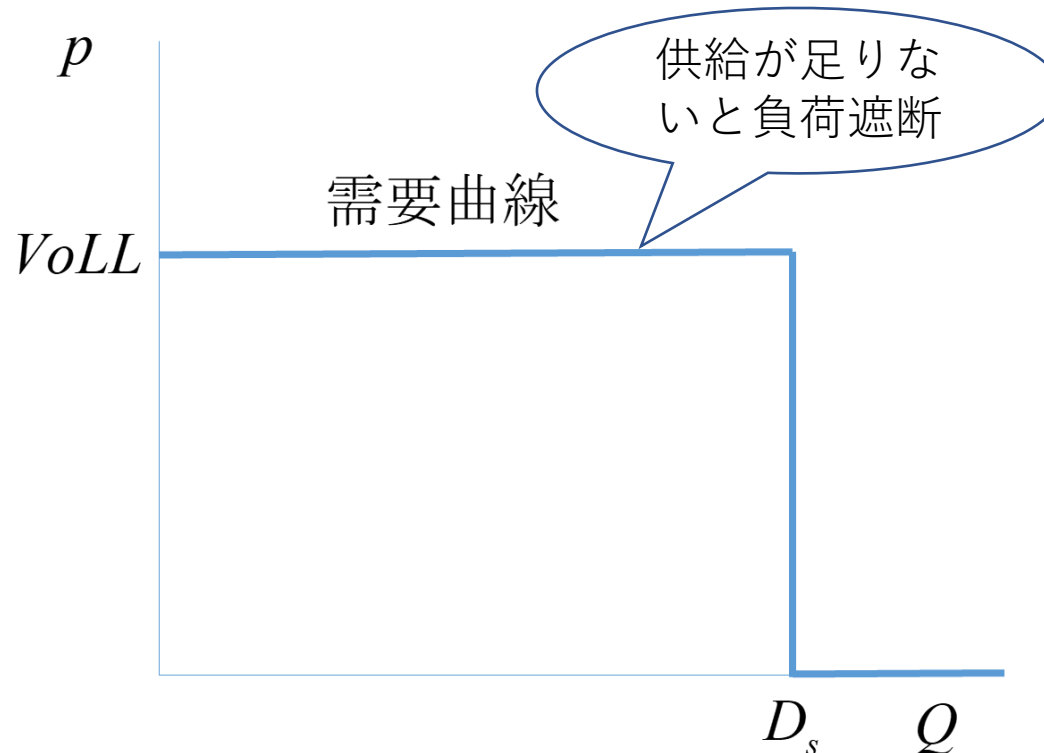
$e_s = Q_s^1 - q_s^1$  : 地域2から地域1への送電量

### 負荷持続曲線と供給力



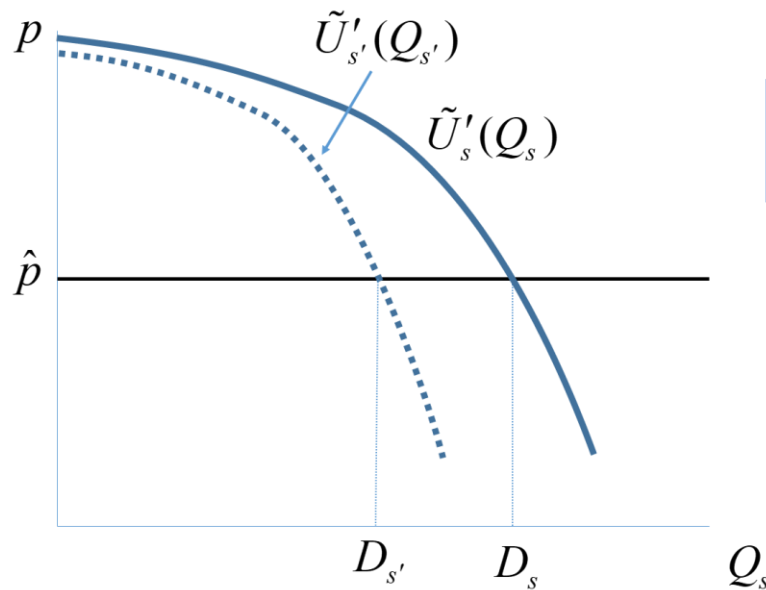
# 価格非弾力的な電力需要をモデル化

- 価格非弾力的な電力需要を経済理論と統合的な形でモデル化：社会的純便益最大化の定式化を可能にする。（他の教科書にはない）
- 小売事業者が卸売価格の変動を吸収して、年間を通じて一定の小売価格を需要家に提示⇒変動する卸売価格に反応しない需要



# 完全非弾力需要を小売価格年間一定のもとでの 需要モデルから導出

- 小売事業者が卸売価格の変動を吸収して、年間を通じて一定の小売価格  $\hat{p}$  を需要家に提示していると仮定.
- $s$  時における需要家の効用関数（準線形）： $\tilde{U}_s(Q_s) + z_s$   
 $\tilde{U}_s(Q_s)$ : 電力消費からの効用  $z_s$ : 電力以外の消費
- 所得制約：
$$I = \sum_s (\hat{p}Q_s + z_s)$$
  
 $I$ : 所得；  $z_s$  は電力以外の財でニューメール（価格=1）
- 消費者が選択する需要量  $D_s$  は卸売価格に依存しない.

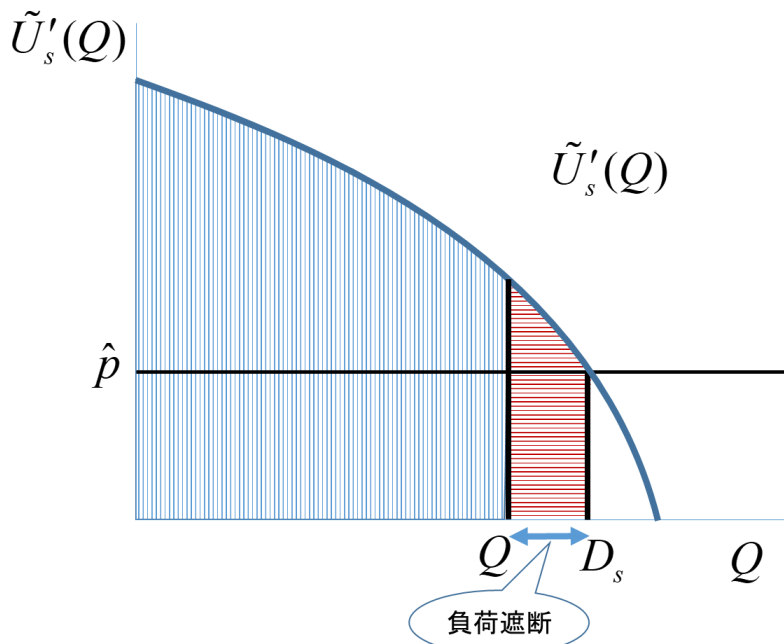


準線形の効用関数：貨幣単位での効用計測が可能。費用便益分析に直結。

# 停電コスト Value of Lost Load (VoLL)

- 供給力不足の場合には負荷遮断（停電）が発生
  - 限界価値が低い需要から順に負荷遮断できれば、停電のコストは下図の赤線網掛けの部分
  - 電力価値が低い顧客を狙って負荷遮断をすることは技術的に困難なので、青線網掛け部分の一部も負荷遮断.
- 単純化して、停電コストVoLLは一定と仮定.

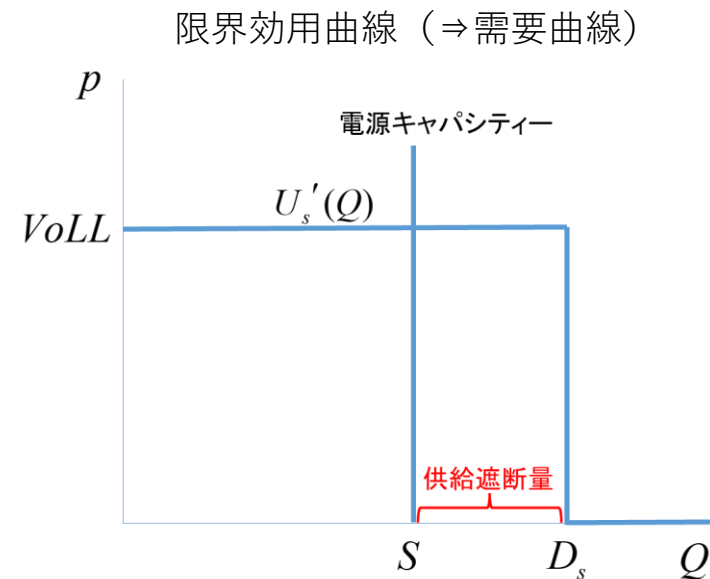
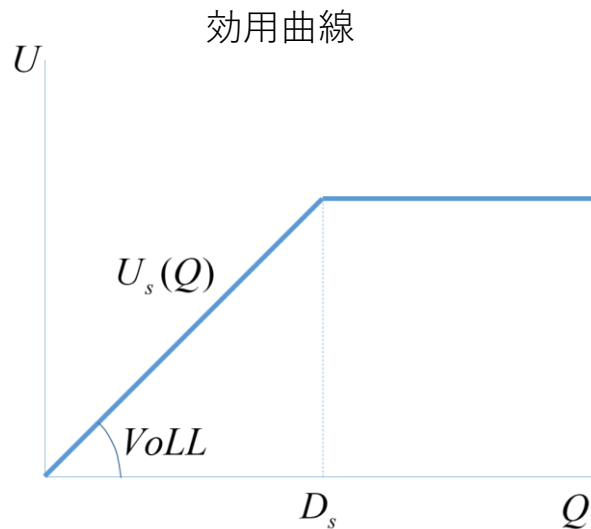
- 実際の停電事象はもっと複雑
  - 停電コストは用途，時間帯，季節などによって大きく異なる.
    - ESCJ（電力系統利用協議会）アンケート調査：3,050～5,890円/kWh
    - 停電コストが高い需要家は非常用電源やUPSなどで自衛.
  - 逼迫時には停電に至る前に様々な対応を行う．緊急時の増出力，電圧を下げる，等々.
  - 停電は確率的に発生する．価格＝停電コスト×停電確率．逼迫時プライシング（Scarcity Pricing, 補正インバランス料金）
- 英国のVoLL設定値（2013年）：17ポンド/kWh



# 非弾力需要と整合的な効用曲線と限界効用曲線

- 非弾力需要と整合的な効用曲線を定義：需要量  $D_s$  以下では勾配が  $VoLL$ . 上回ると水平.
- 限界効用：

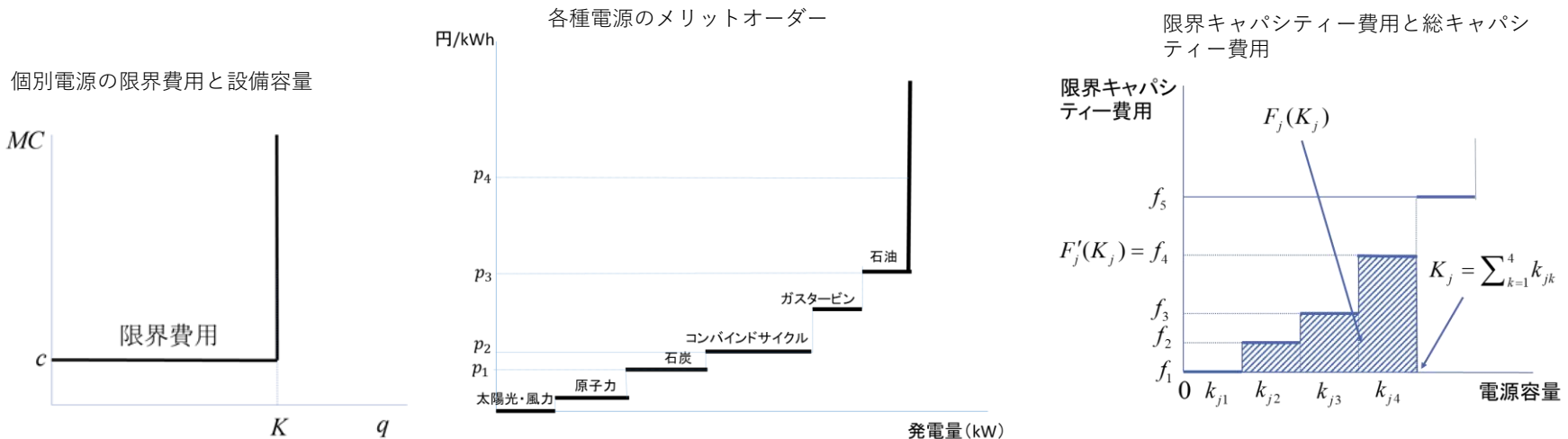
$$U'_s(Q_s) = \begin{cases} VoLL & \text{for } Q_s < D_s \\ [0, VoLL] & \text{for } Q_s = D_s \\ 0 & \text{for } Q_s > D_s \end{cases}$$



# 発電の費用構造

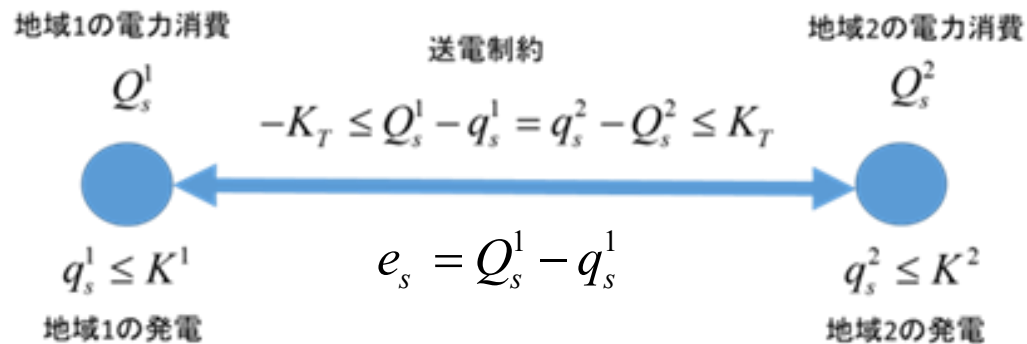
- 発電の費用構造に関する単純化の仮定：
  - キャパシティー制約に達するまでは限界費用が一定
  - キャパシティー以上の発電はできない。（実際には増出力運転は可能ではあるが、維持補修費の増加を招く。）
- コスト構造の異なる様々なタイプの電源： $j = 1, \dots, J$ 

$$C_j^i(q_j^i, K_j^i) = c_j q_j^i + F_j^i(K_j^i) \text{ for } 0 \leq q_j^i \leq K_j^i \quad c_1 < c_2 < \dots < c_J < VoLL$$
  - 限界キャパシティー費用： $f_j = F_j^{i'}(K_j^i)$
- 地域間送電線のキャパシティー費用： $C_T(K_T) \quad -K_T \leq e_s \leq K_T \quad e_s = Q_s^1 - q_s^1$



# 送電の費用構造

- 送電の費用構造
  - 可変費用はゼロと仮定
  - 送電のキャパシティー費用： $C_T(K_T)$
- 送電容量制約： $-K_T \leq e_s \leq K_T$        $e_s = Q_s^1 - q_s^1$



# 純便益の導出

- 消費者の総効用：準線形効用関数⇒貨幣単位で集計可能

$$W = \sum_s \pi_s \sum_i \left[ U_s(Q_s^i) + z_s^i \right] \quad \pi_s : s \text{ 時の時間 (事象 } s \text{ の確率)}$$

- 電力産業の総利潤

$$\Pi = \sum_s \pi_s \left[ \sum_i \sum_j \left( (p_s^i - c_j) q_{js}^i - F_j^i(K_j^i) \right) \right] - C_T(K_T)$$

- 消費者の所得制約：消費者が電力企業を所有

$$\bar{I} + \Pi = \sum_s \pi_s \sum_i \left[ p_s Q_s^i + z_s^i \right] \quad \bar{I} : \text{電力企業の利潤以外の収入 (一定と仮定)}$$

- 純便益 (社会的余剰)

$$W = \sum_s \pi_s \sum_i \left[ U_s(Q_s^i) - p_s Q_s^i \right] + \bar{I} + \Pi$$

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

電力消費から得られる便益

電力供給の総費用

# 純便益：社会的余剰

- 総便益  $TB$ ：電力消費から得られる効用の総和
- 総費用  $TC$ ：電力供給の総費用
- 純便益（社会的余剰） =  $TB - TC$

$$TB = \sum_s \pi_s \sum_i U_s(Q_s^i)$$

$$TC = \sum_s \pi_s \sum_i \sum_j c_j q_{js}^i + \sum_i \sum_j F_j^i(K_j^i) + C_T(K_T)$$

発電可変  
費用

発電キャパシ  
ティー費用

送電キャパシ  
ティー費用

$\pi_s$  :  $s$  時の時間（事象  $s$  の確率）

## 2. 最適解

最適解を導出し，その特性を分析する。

## 最適化問題

- 発電と送電のキャパシティー制約のもとで社会的余剰を最大化.
- すべての変数は連続的に変化させることができ、費用関数は微分可能であると仮定.
- KKT (カルーシュ・クーン・タッカー) 条件を導出.
- 準線形効用関数 ⇒ ラグランジュ乗数 = シャドープライス

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

s.t.

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

電力消費 = 地域内発電量 + 他地域からの融通量

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

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

地域内発電量合計 = 電源タイプ別発電量の合計

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

地域間送電量 ≤ 送電キャパシティー

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

発電量 ≤ 発電容量

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

発電量 ≥ 0

# 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：

1 階条件：ラグランジアンの偏微分 = 0

$$\begin{aligned} Q_s^i & : U_s'(Q_s^i) = P_s^i \\ q_{js}^i & : p_s^i - c_j - \delta_{js}^i + \lambda_{js}^i = 0 \\ q_s^i & : P_s^i - p_s^i = 0 \\ e_s & : P_s^1 - P_s^2 - \gamma_s^+ + \gamma_s^- = 0 \end{aligned}$$

相補性条件

$$\begin{aligned} \gamma_s^+ & \geq 0, \gamma_s^+ (K_T - e_s) = 0, e_s \leq K_T \\ \gamma_s^- & \geq 0, \gamma_s^- (e_s + K_T) = 0, -K_T \leq e_s \\ \delta_{js}^i & \geq 0, \delta_{js}^i (K_j^i - q_{js}^i) = 0, q_{js}^i \leq K_j^i \\ \lambda_{js}^i & \geq 0, \lambda_{js}^i (q_{js}^i - 0) = 0, 0 \leq q_{js}^i \end{aligned}$$

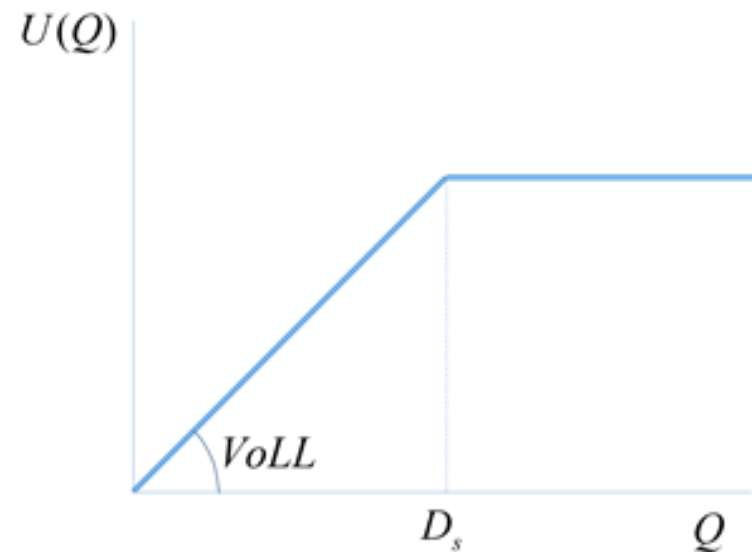
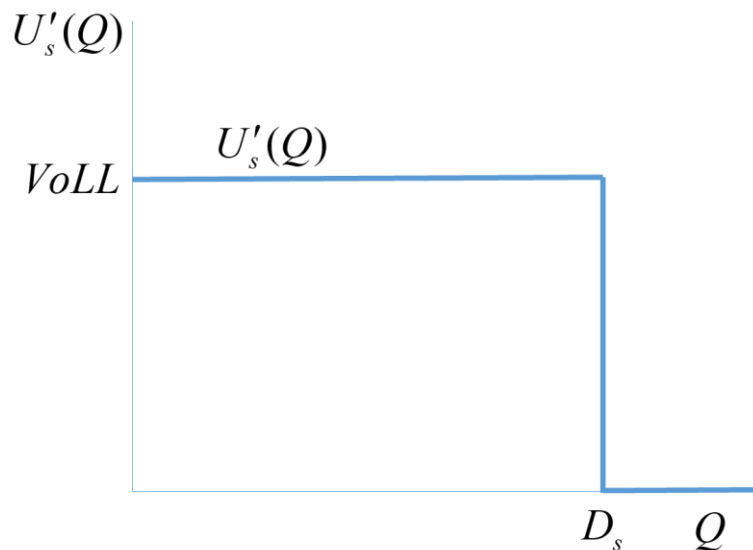
注：KKT条件が最適解の必要条件となるには、制約想定 (constraint qualification) が成り立っていないと成り立たない。

# 需要の最適条件

- 消費量に関する最適条件：限界効用 = 価格（シャドープライス）  $U'_s(Q_s^i) = P_s^i$
- $S = Q < D$ ：限界効用 = 価格 = VoLL
- 価格 < VoLL：  $S = Q = D$

$$P_s^i = VoLL \text{ for } Q_s^i < D_s^i$$

$$P_s^i \leq VoLL \text{ for } Q_s^i = D_s^i$$



# 給電 dispatch の最適条件

- 価格\* > 発電の限界費用：発電量 = キャパシティー
- 価格 < 発電の限界費用：発電量 = ゼロ
- $0 < \text{発電量} < \text{キャパシティー}$ ：価格 = 限界費用

\*価格 = シャドープライス

$$p_s^i - c_j - \delta_{js}^i + \lambda_{js}^i = 0$$

$$\delta_{js}^i \geq 0, \delta_{js}^i (K_j^i - q_{js}^i) = 0; \lambda_{js}^i \geq 0, \lambda_{js}^i (q_{js}^i - 0) = 0$$

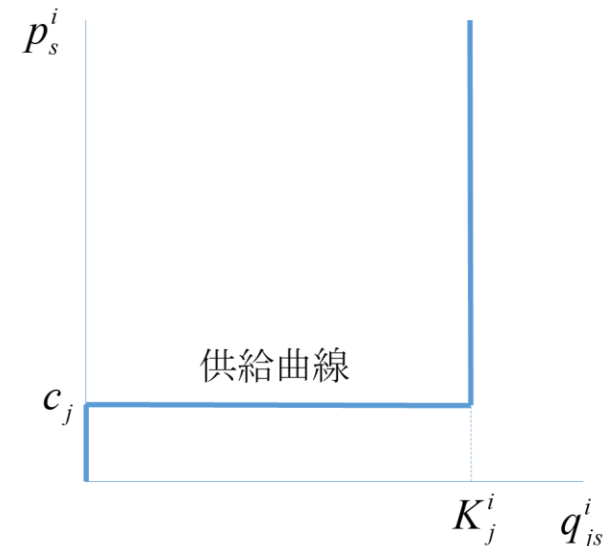
$$q_{js}^i \leq K_j^i; q_{js}^i \geq 0$$



$$p_s^i > c_j \Rightarrow q_{js}^i = K_j^i$$

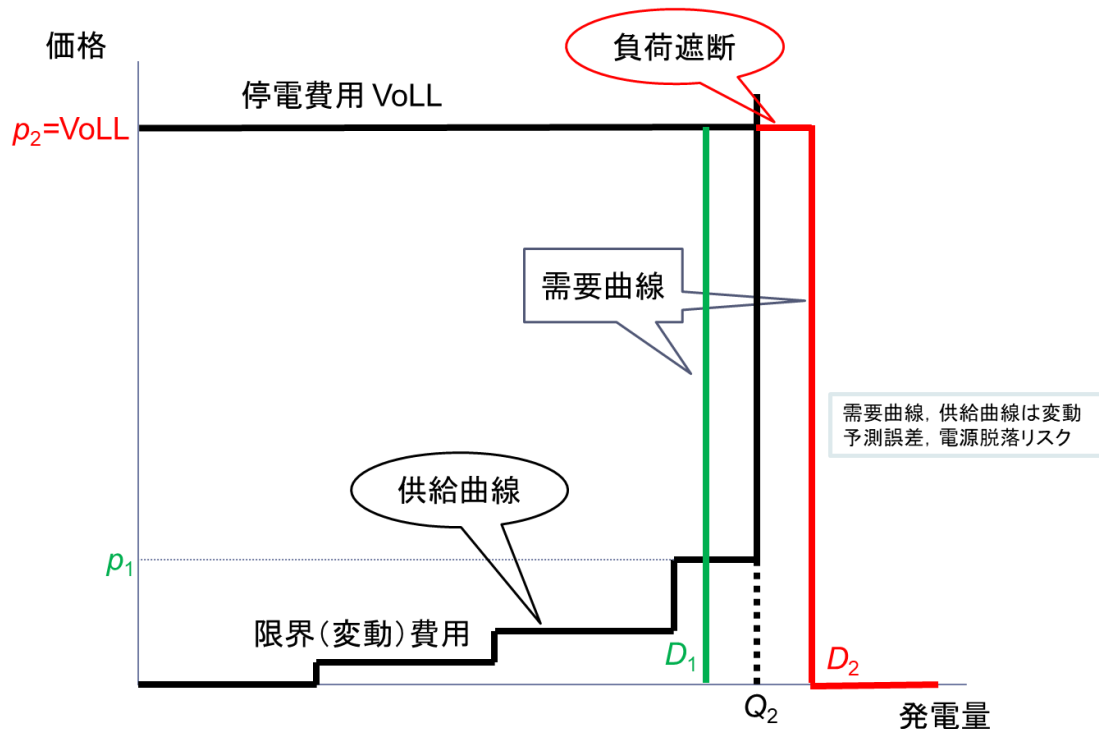
$$p_s^i < c_j \Rightarrow q_{js}^i = 0$$

$$0 < q_{js}^i < K_j^i \Rightarrow p_s^i = c_j$$



# 需要の最適条件 + 給電の最適条件

- 供給力不足（総供給力 < 需要）のケース：価格 = VoLL（停電コスト）
- 供給力が十分な（需要  $\leq$  総供給力）ケース：価格 = 限界電源の限界費用
  - 価格 > 発電の限界費用：発電量 = キャパシティー
  - 価格 < 発電の限界費用：発電量 = ゼロ
  - $0 <$  発電量 < キャパシティー：価格 = 限界費用



# 送電の最適条件

- 送電の最適条件：混雑時には地域間の価格差
  - 送電量 < 送電キャパシティー ⇒ 両地域の価格が等しい
  - 地域1の価格 > 地域2の価格 ⇒ 送電量 = 送電キャパシティー

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

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



$$P_s^1 > P_s^2 \Rightarrow e_s = K_T; P_s^1 < P_s^2 \Rightarrow e_s = -K_T$$

$$-K_T < e_s < K_T \Rightarrow P_s^1 = P_s^2$$

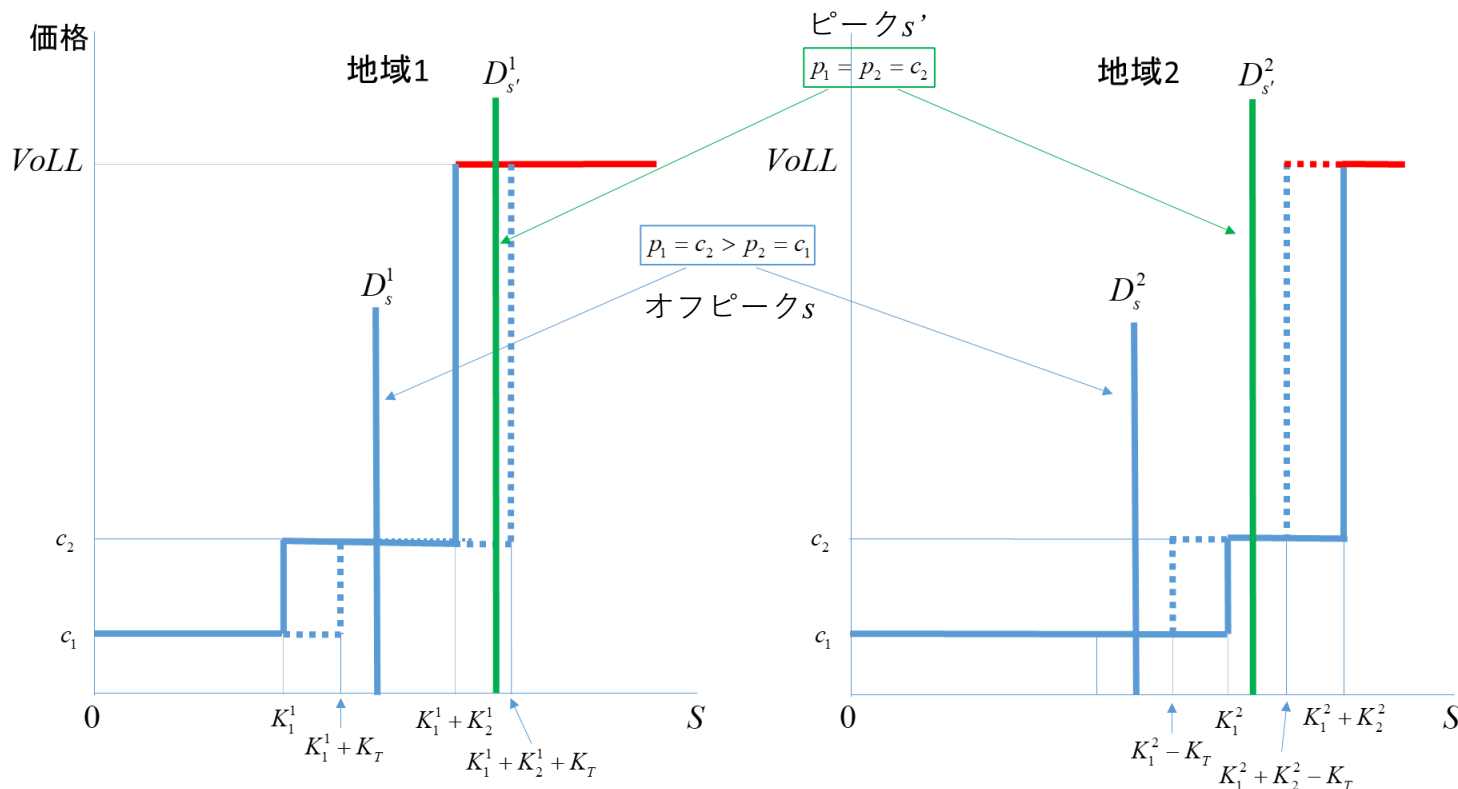
# 送電の最適条件：例) 2タイプの電源

## • 地域間送電キャパシティー=0

- オフピーク時：地域1の価格=ピーク電源の限界費用，地域2の価格=ベース電源の限界費用
- ピーク時：地域1の価格=VoLL，地域2の価格=ピーク電源の限界費用

## • 地域間送電キャパシティー= $K_T$

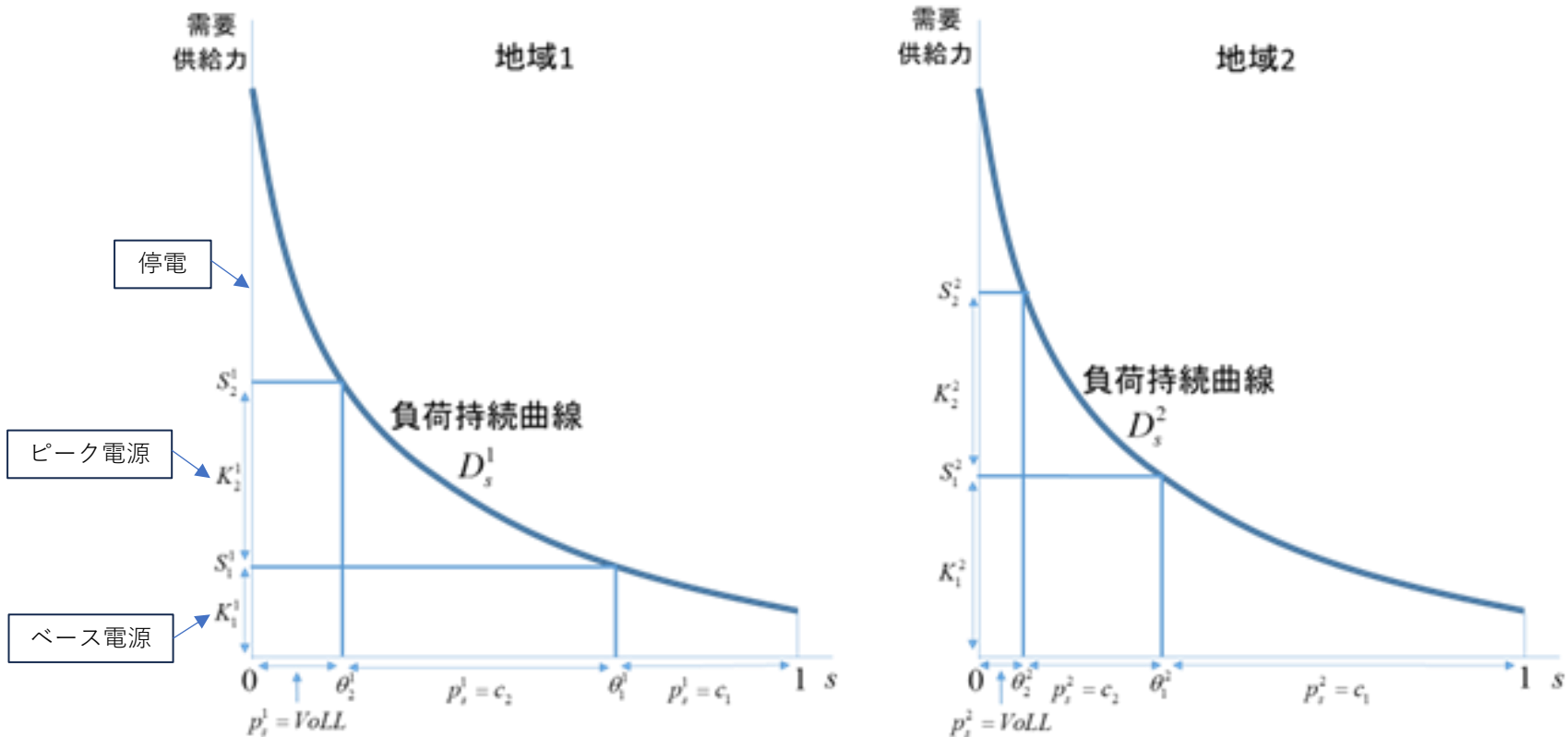
- オフピーク時：地域1の価格=ピーク電源の限界費用，地域2の価格=ベース電源の限界費用
- ピーク時：地域1の価格=地域2の価格=ピーク電源の限界費用



# 需要量の変化と最適解：負荷持続曲線，送電容量 = 0

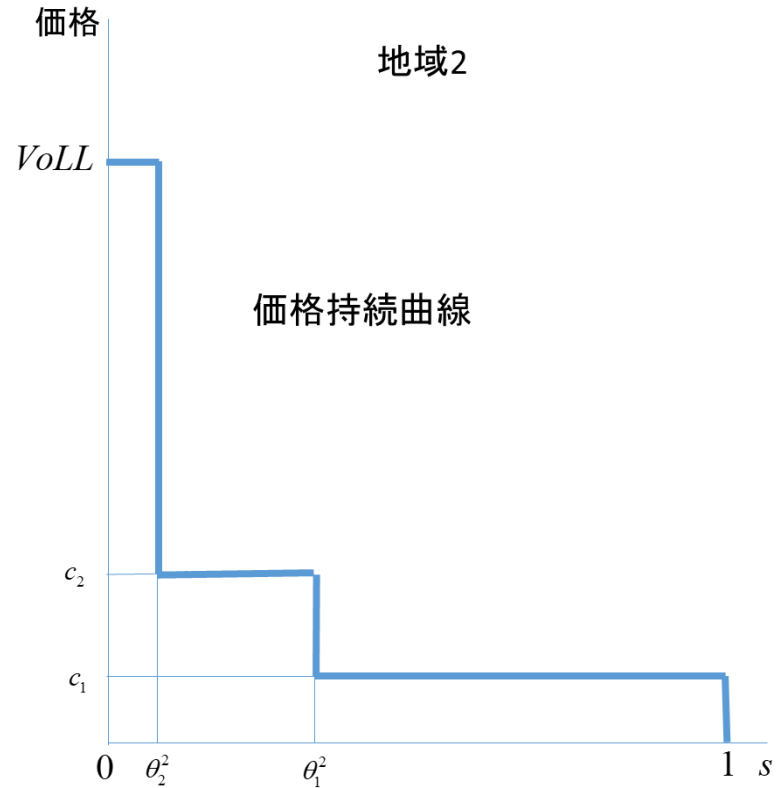
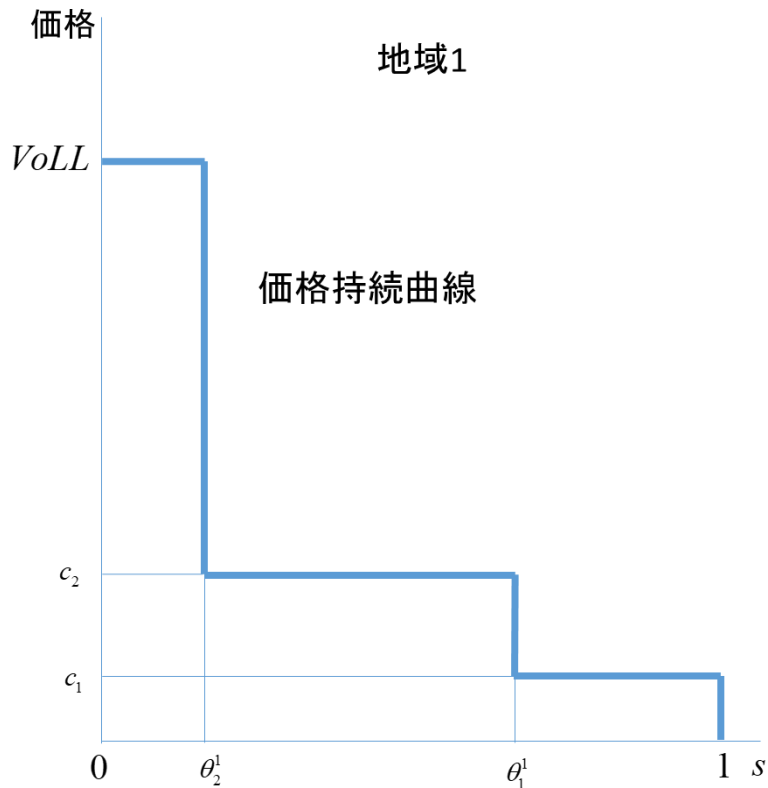
- 負荷持続曲線 (load duration curve)：需要量を大きい順に並べ替えたもの。
- 需要プロフィールは両地域で同じと仮定。
- 電源キャパシティーは地域2の方が地域1より大きいと仮定。

$\theta_j^i = \Pr(Q_s > S_j^i)$ : 地域  $i$  の電源タイプ  $j$  がキャパシティー一杯で稼働している確率 (時間)



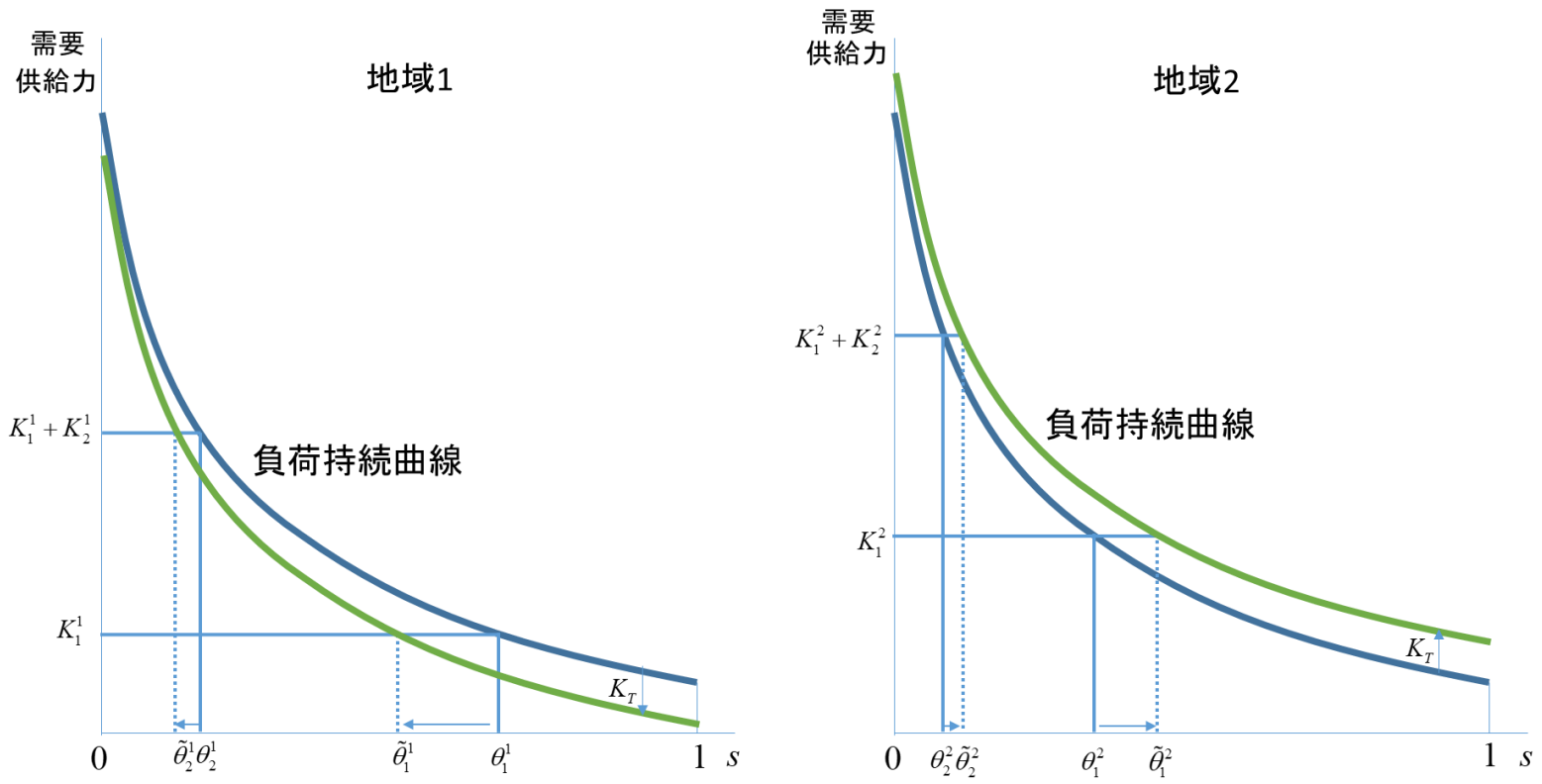
# 送電容量ゼロの場合の価格持続曲線

- 価格持続曲線：価格を価格が高い順に並び替えたもの
- 地域1の価格が地域2より高い時期がある。



# 送電容量増加の効果：電源キャパシティー固定ケース

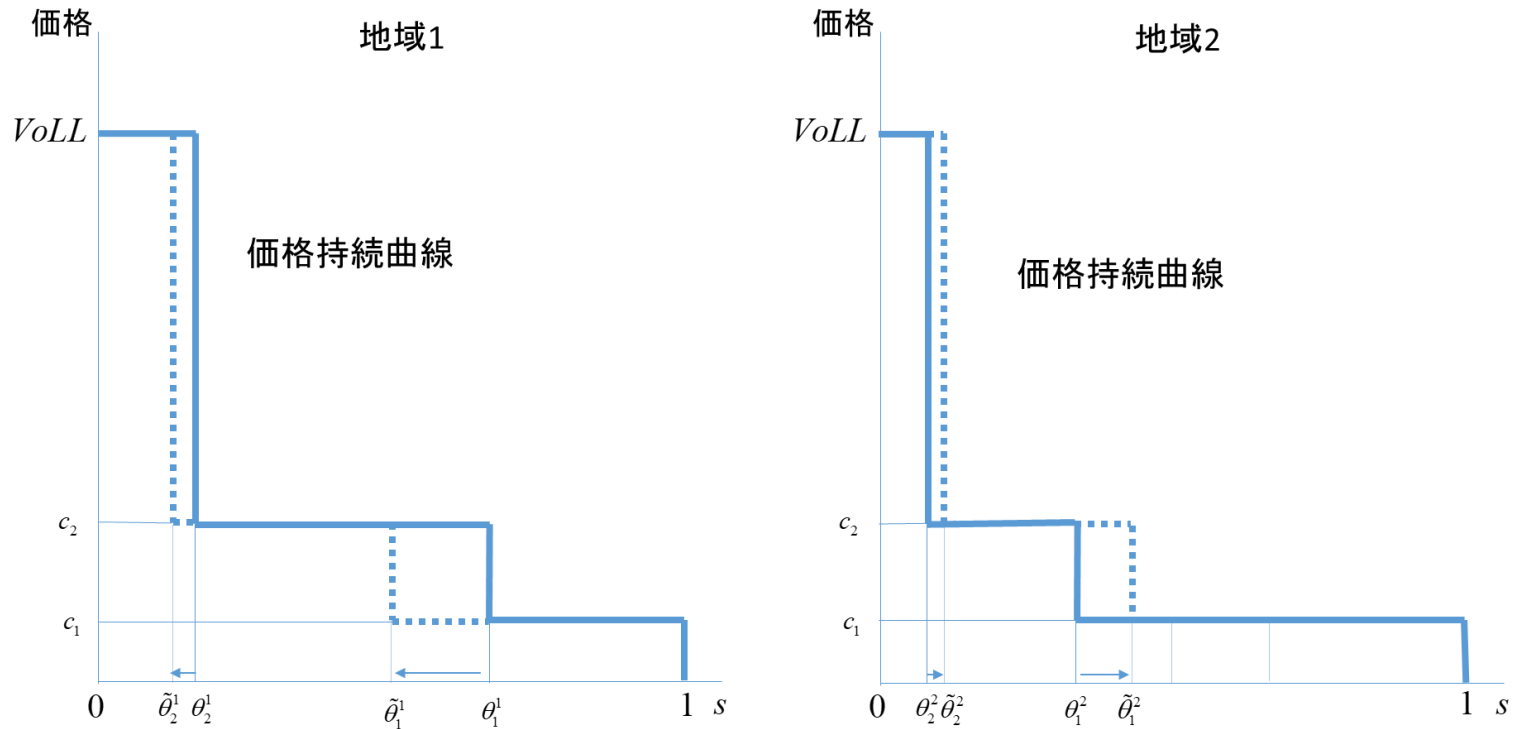
- 地域2から地域1に電力が流れる。
  - 地域2にとっては需要が送電容量だけ増えたことと同じ
  - 地域1にとっては減ったことと同じ



$$0 < K_T < \frac{K_1^2 - K_1^1}{2}$$

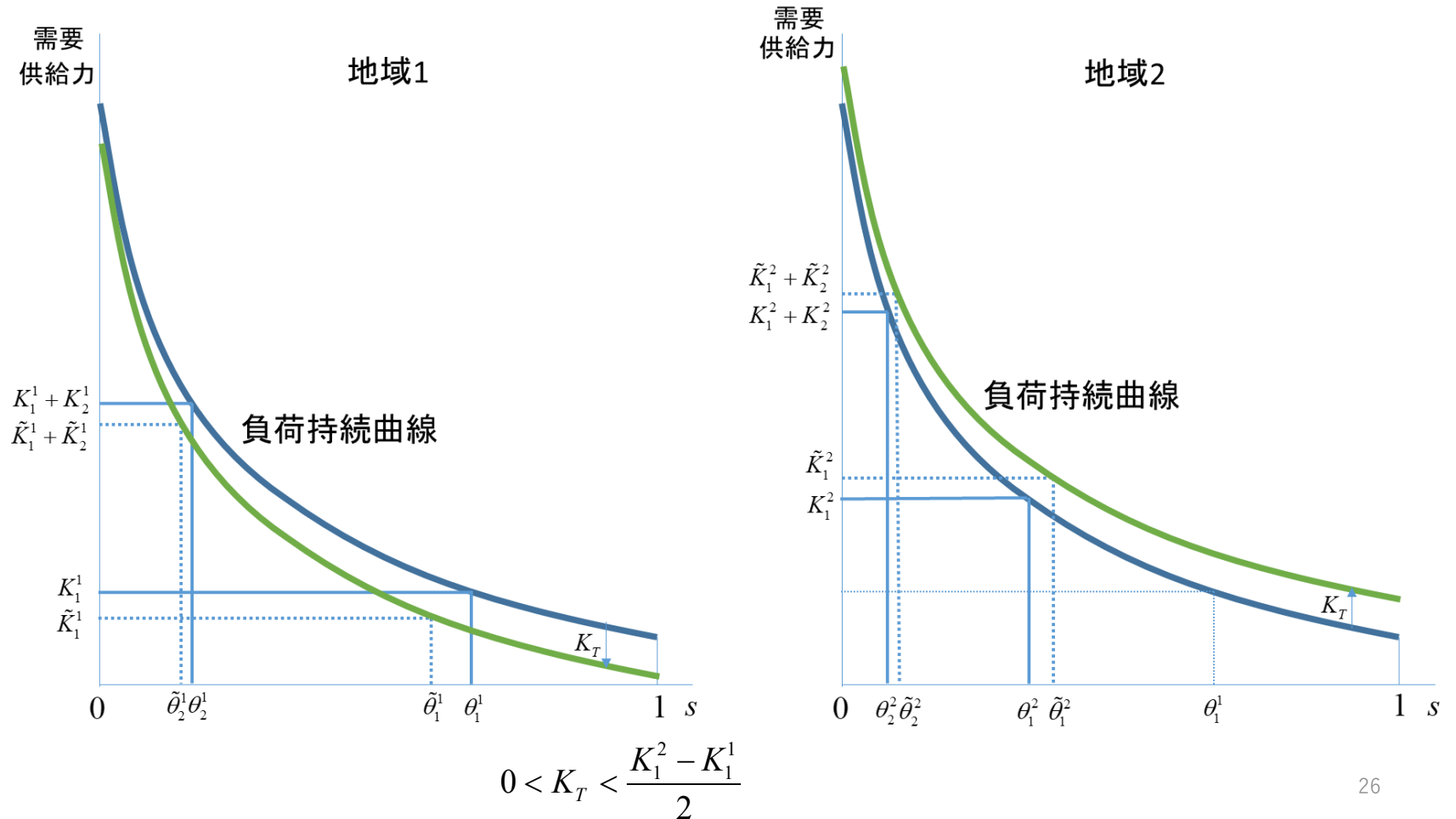
# 送電容量増加の効果：価格持続曲線

- 地域1の価格が低下する期間と地域2の価格が上昇する期間がある。
- 地域1の停電確率は低下，地域2の停電確率は上昇。



# 送電容量増加の効果：電源キャパシティーの変化

- 送電容量増加によって価格は地域2で上昇し，地域1で低下。
- 電源キャパシティーは地域2で増加し，地域1で減少。



# 需要，給電，送電の最適条件：まとめ

- 発電側電力価格 = 消費側電力価格
- 需要と給電の最適条件：
  - 限界費用が立地地域の電力価格より低い電源タイプは発電キャパシティー一杯に発電.
  - 限界費用が立地地域の電力価格より高い電源タイプの発電量はゼロ.
  - 発電量がゼロとキャパシティーの間になっている電源タイプがあれば，価格はその電源タイプの限界費用に等しい.
- 供給力不足時の最適条件
  - 各地域の総供給力 = 地域内供給力 + 他地域からの融通量.
  - 各地域の総供給曲線と需要から各地域の価格が決定される.
  - 需要 > 総供給力の場合には，価格 = 停電費用VoLL
- 送電の最適条件：
  - 送電容量制約が有効でない場合には両地域の価格が等しい.
  - 価格差がある場合には送電容量一杯に送電.

# 3. 市場均衡

最適解を実現する市場制度設計を考える。

# 需要, 給電, 送電の市場均衡

効用最大化 ⇒ 需要の最適条件

$$\text{Max } \{U_s^i(Q_s^i) - P_s^i Q_s^i\}$$



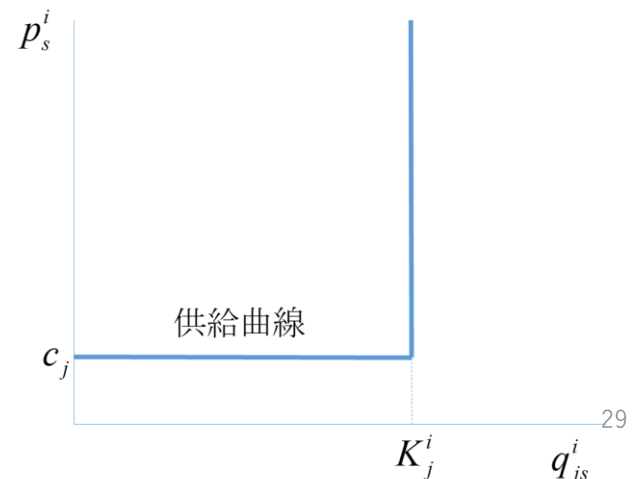
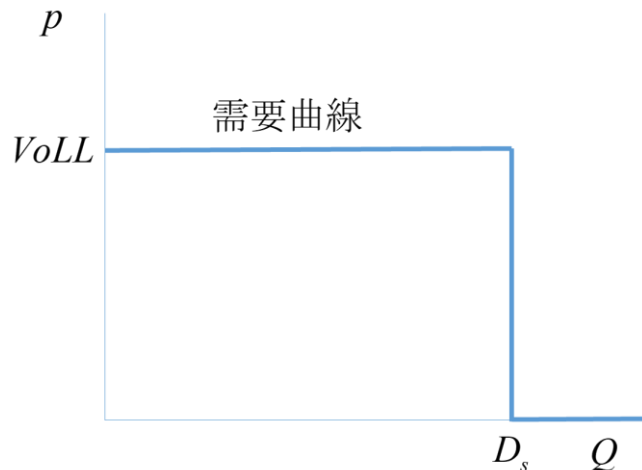
$$U_s'(Q_s) = P_s^i = \begin{cases} VoLL & \text{for } Q_s < D_s \\ P_s^i \leq VoLL & \text{for } Q_s^i = D_s^i \end{cases}$$

発電事業者の利潤最大化 ⇒ 給電の最適条件

$$\text{Max } \left\{ \sum_s \pi_s [p_s^i - c_j] q_{js}^i - F_j^i(K_j^i) : 0 \leq q_{js}^i \leq K_j^i \right\}$$



$$\begin{aligned} p_s^i > c_j &\Rightarrow q_{js}^i = K_j^i; \\ p_s^i < c_j &\Rightarrow q_{js}^i = 0; \\ 0 < q_{js}^i < K_j^i &\Rightarrow p_s^i = c_j \end{aligned}$$



# 送電の市場均衡

## ゾーン制：

- 送電量 < 送電キャパシティー ⇒ 両地域の価格が等しい
- 地域1の価格 > 地域2の価格 ⇒ 送電量 = 送電キャパシティー

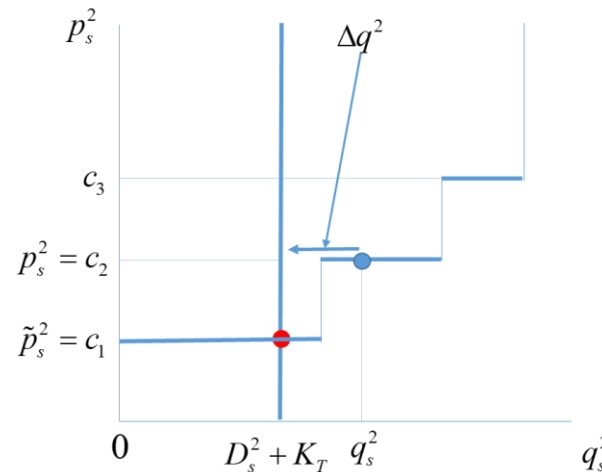
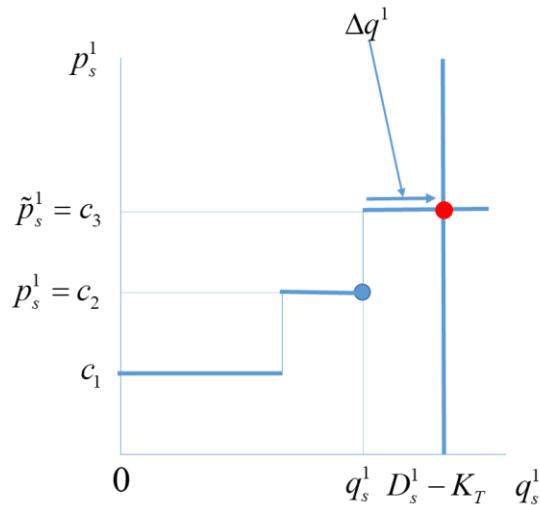
$$P_s^1 > P_s^2 \Rightarrow e_s = K_T; \quad P_s^1 < P_s^2 \Rightarrow e_s = -K_T$$

$$-K_T < e_s < K_T \Rightarrow P_s^1 = P_s^2$$

## 均一価格制 + 再給電

- TSOはゲートクローズ後に再給電を行って混雑を解消.
- 再給電のコストはTSOが負担.

再給電



# 市場均衡と最適解：需要，給電，送電

- 「停電時の価格 = VoLL」 + 「送電混雑時に市場分断」 ⇒ 競争市場が需要，給電，送電の最適条件を達成.
  - 政策介入1：供給力不足時の価格を停電コストVoLLに等しくさせる. **逼迫時プライシング (Scarcity Pricing)**.
  - 政策介入2：送電混雑時の市場分断（価格差）. ゾーン制あるいはLMP.
  - 電源キャパシティーや送電容量が最適になっていない場合でも成り立つ.
    - 変動電源が過剰に接続されていたとしても，限界費用が高い火力電源より前に抑制することは最適でない.
    - コネクト&マネージで送電網増強の完成前に暫定接続させる場合に，混雑時にそれらの電源だけを抑制することも最適でない. メリットオーダーを守る必要.
- 「均一価格制」 + 「再給電」 ⇒ 需要，給電，送電の最適条件を達成.
  - 英国やドイツ：TSOは再給電に際してそのコストを補償. 運用効率化のインセンティブ.
  - 日本：地内の系統混雑を発生させないように系統接続を制限. 非効率性が発生.
    - 2021年から導入されているノンファーム型接続はこの問題を改善.
    - 当初は混雑発生時の出力抑制はノンファーム型接続電源のみ. 短期効率性が損なわれる.
    - 2022年から移行した再給電方式：再給電の費用は託送料金による一般負担.
  - 日本と欧州では送電ロス（送電ロス）のプライシングがなされていない.
    - 送電ロスは電流の2乗に比例するので，送電ロス価格は送電ロスの2倍にする必要がある.

# 逼迫時プライシング：MISO

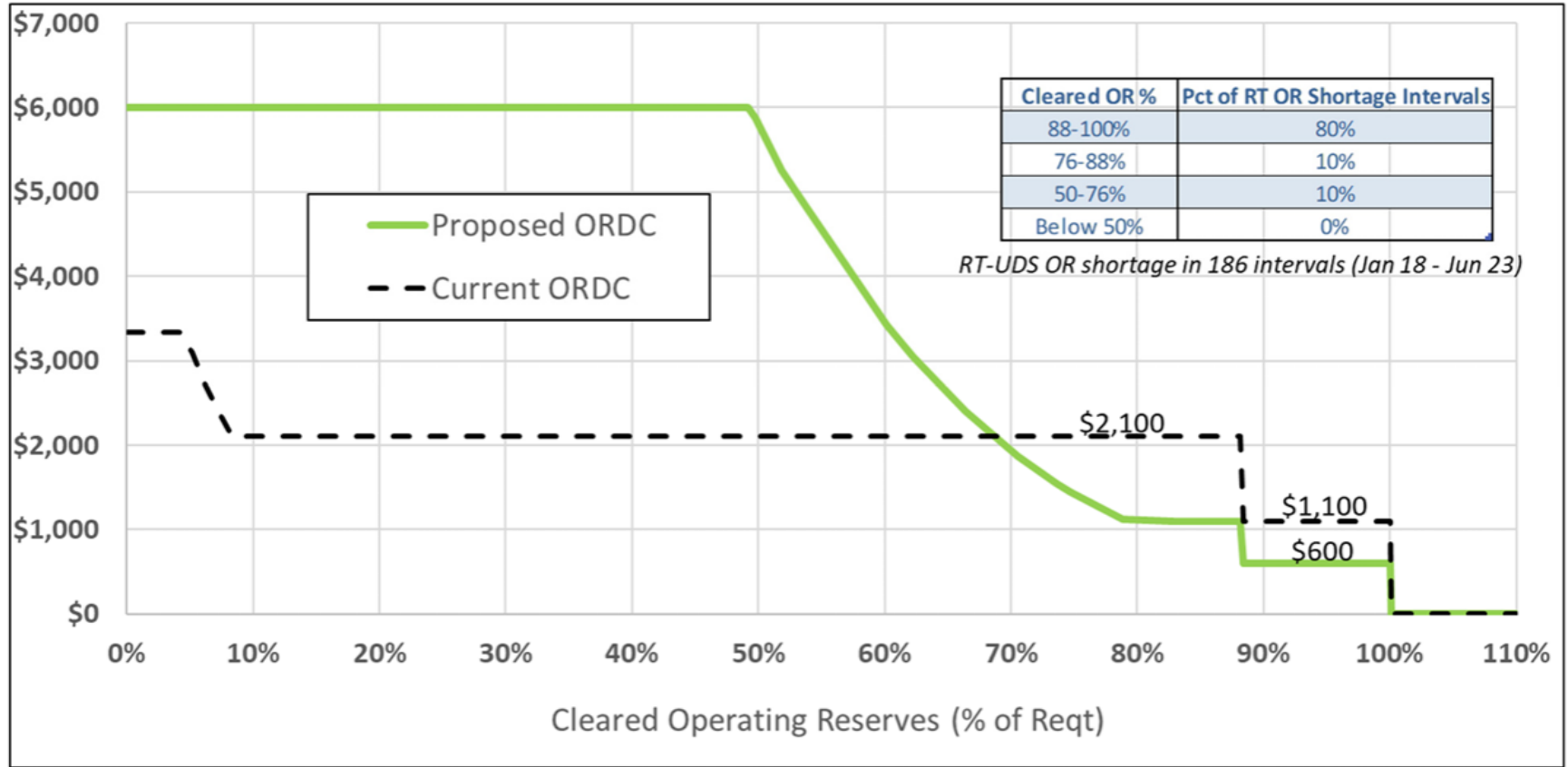


Figure 6 MISO Proposed Operating Reserve Demand Curve (ORDC)

[MISO, Scarcity Pricing White Paper: Value of Lost Load and Operating Reserve Demand Curve, March 2024](#)

# 需給ひっ迫時補正インバランス料金

- 需給ひっ迫時の不足インバランスは、一般送配電事業者がリスクに備えて緊急的に追加の供給力を確保する必要性を高めるとともに、それ以降の備えを強化する必要性を高めるもの。
- 一般送配電事業者が活用可能な「上げ余力」が減少するにつれ、リスクに備えた緊急の供給力追加確保や将来の調整力確保量の増加といった追加的コストが上昇していくと考えられる。
- そのため、補正インバランス料金の算定諸元として、kWのポテンシャルを評価する指標である「補正料金算定インデックス※1」を一定の式（下図のような直線）で表し、上げ余力の低下をインバランス料金に反映させることとした。
- インバランス料金が上昇する仕組みとすることで、需給ひっ迫時には時間前市場の価格も上昇し、この価格シグナルによるDRや自家発など追加的な供給力を引き出す効果や、需要家が節電する効果も期待される。

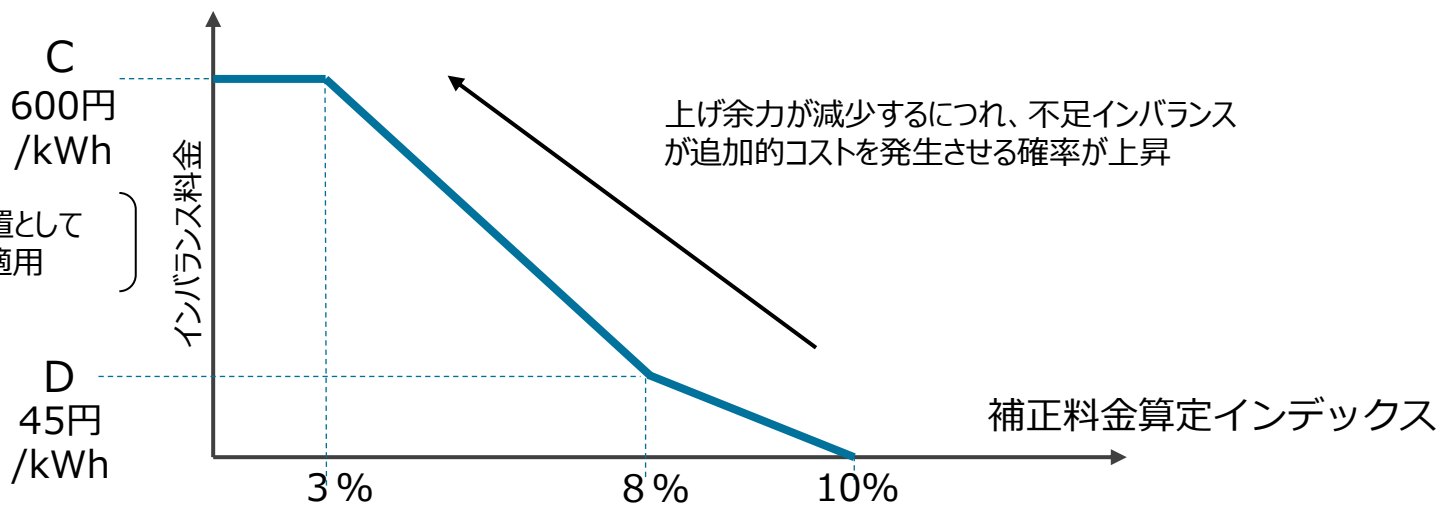
(※1) 補正料金算定インデックスは各一般送配電事業者等の予備率（広域予備率）を参照。

## 需給ひっ迫時の補正インバランス料金

緊急的に供給力を1kWh追加確保するコストとして、市場に出ていない供給力を新たに1kWh確保するために十分な価格として、新たにDRを追加的に確保するのに必要な価格。

（現在は、暫定的措置として200円/kWhを適用）

確保済みの電源 I' のkWh価格を参考に決定。



# ノンフレーム型接続適用と再給電

	基幹系統混雑			ローカル系統混雑			系統図
	①適用系統	②適用電源	③制御対象	①適用系統	②適用電源	③制御対象	
基幹系統 (上位2電圧)	2021.1 ↓ 基幹系統	2022.4 ↓ 全電源	↑ (調整電源活用) 2022.12 (一定の順序) 2023.12				<p>上位2電圧送電線 (沖縄は132kV) 154, 110kV 送電線 77,66kV 送電線 33,22kV 送電線 需要電源 (L, G) 配電用変電所 高圧系統 (6.6kV) 低圧系統 (110V)</p> <p>基幹系統 ローカル系統 配電系統</p>
ローカル系統 ※上位2電圧以外かつ配電系統として扱われない系統		2023.4 ↓ 全電源	↑ ローカル系統	2023.4 ↓ 全電源	2023.4 ↓ 全電源		
配電系統 (高圧以上)			2023.12以降 必要に応じて拡大				
配電系統 (低圧)		10kW未満		10kW未満			
④制御方法	再給電方式 (一定の順序)			再給電方式 (一定の順序) の出力制御順に基づく制御 (一律制御の対象は計画値変更)			

(出典) 第44回 電力・ガス事業分科会電力・ガス基本政策小委員会 系統ワーキンググループ 資料1-1