

容量市場

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. 概要
2. 供給信頼性確保の枠組
3. 容量市場は必要か？
4. 上限価格と電源キャパシティー
5. 容量市場の設計
6. 電源コストを過大にする市場の失敗：参入障壁や金融市場の不完全性
7. 容量市場の設計における現実的な問題
8. 供給力確保における新しい課題
9. 送電容量制約と送電網増強の便益

教科書：「電力システムの経済学II：上限価格と容量市場」（金本良嗣）RIETI
Discussion Paper 22-J-026

<https://www.rieti.go.jp/jp/publications/nts/22j026.html>

1. 概要

- 電力システム改革における 3 市場：電力取引市場 (kWh) , 需給調整市場 (Δ kW) , 容量市場 (kW) . これらの組み合わせによって電力の安定供給と経済性を両立させる.
- 容量市場をごく単純な決定論的電力市場モデルによって分析する.
- モデルの特性：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
 - 供給信頼性確保のためには容量市場が必要か？
 - 容量市場の最適な設計はどういうものか？
 - 送電網増強のアデカシー便益はどう計測すれば良いか？

 2. 供給信頼性確保の枠組み

- 信頼性 Reliability：大規模停電を避けるためのアデカシーとセキュリティ。それでも起きてしまう可能性に対応するレジリエンス。
- アデカシー Adequacy：電力システムが需要を常時充たすように供給を行う能力。
 - ピーク需要に対応した供給設備容量 (kW) の確保：容量市場の創設
 - 新しい課題：燃料 (kWh) の確保。端境期の計画停止と災害・天候リスク。
- セキュリティ Security：送電線事故，電源脱落等の突発的な攪乱に耐える能力。
 - 予備力・調整力の確保：需給調整市場の創設
- レジリエンス Resilience (NAS)
 - 大規模で長時間の停電が発生する可能性を認識し
それに対処することができるように備える
実際に起きたときにはそのインパクトを最小化
速やかにサービスを再開
経験から将来のパフォーマンス向上のための教訓を学ぶ

3. 容量市場は必要か？

電力市場に対する政策介入の必要性

供給力確保政策のタイプ

容量市場の欠点

容量市場は必要か？

供給力確保における市場の失敗

- なぜ供給力確保のための政策介入（容量メカニズム）が必要なのか？
- 市場の失敗：(1)停電時の価格 ≠ 停電コスト（VoLL），(2)系統混雑
- 「停電時の価格 = 停電コスト」 + 「系統混雑時に地域間価格差」の政策介入 ⇒ 完全競争市場で最適な電源キャパシティが達成される。
- 市場支配力対策として上限価格が設定される（政府の失敗？） ⇒ 価格が十分に高くない。投資インセンティブが不足。
- 参入障壁や金融市場の不完全性による過大な参入コスト（市場の失敗）
 - 電力取引の流動性不足によって新規参入が困難。
 - 情報の非対称性による金融市場の不完全性
 - 過剰な環境規制や住民対応コスト

供給力確保政策のタイプ

- 容量メカニズム（Capacity Mechanism）
 - 容量支払（Capacity Payment）：供給力に対して一定の報酬を与える。ポルトガル。
 - 供給力確保義務（Capacity Obligation）：小売事業者に自らの需要に応じた供給力を事前に確保することを義務づける。フランス。
 - 容量オークション（Capacity Auction）：供給力を入札させる。日本、PJM、英国。
 - 戦略的予備力（Strategic Reserve）：需給逼迫時にだけTSOが稼働させる特別な予備力を調達する。ドイツ。
 - 信頼性オプション（Reliability Option）：エネルギー価格が一定額を超えたときにあらかじめ決められた価格で電力を買うことができるオプションを事前に調達。イタリア。
- エネルギー・オンリー市場（Energy Only Market）
 - 上限価格を高くして容量メカニズムを使わない。テキサス。
 - 逼迫時プライシング：逼迫時の価格を人為的に上げる。

容量市場の欠点

- 調達する供給力の定義が難しい
 - 容量市場では将来時点（日本では4年後の一年間）の供給力を調達.
 - 供給力として対価が支払われるための要件（リクワイアメント）の主たるものは、① 平常時は、年間で一定時期や一定時間以上の稼働が可能であること、② 需給ひっ迫のおそれがあるときは、電気の供給や卸電力市場等への入札を行うこと.
 - 火力電源を念頭に置いた供給力定義. それを自然変動電源、デマンド・レスポンス、蓄電池などにどう拡張していくか？
 - 将来時点の系統制約をどう組み込むか？ 将来時点の潮流を正確に予測することは困難.
 - PJMにおいては短期のオペレーションで用いているモデルよりはるかに単純化されたゾーン・モデルを用いて調達量を計算している.
- 容量市場は市場支配力の行使を招きやすい.
 - PJMの市場監視機関 Market Monitorは、エネルギー市場においては競争性が保たれているが、容量市場は市場構造と市場パフォーマンスの双方において競争性が保たれていないとしている.

4. 上限価格と電源キャパシティー

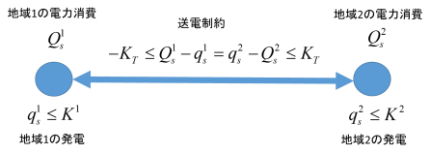
2地域電力ネットワークモデルにおける電源キャパシティーの最適化（復習）
スクリーニング曲線，フル稼働確率，負荷持続曲線，LOLP，EUE
最適解は停電コストと供給力確保コストの和を最小化している。
上限価格のもとでの市場均衡と容量支払

2 地域電力ネットワークモデル

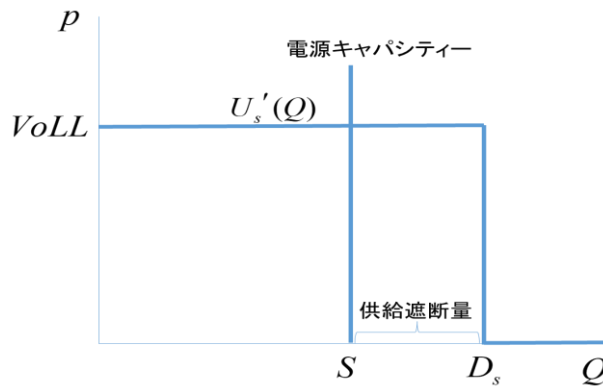
- 2 地域間の送電容量制約： $-K_T \leq e_s \leq K_T$ $e_s = Q_s^1 - q_s^1 = q_s^2 - Q_s^2$ $C_T(K_T)$
- 不確実性の存在しない確定論的なモデル。ただし，需要は時間帯，季節，経済動向等によって大きく変動。需要を大きい順に並べた負荷持続曲線。
- 供給力 S が不足する場合には負荷遮断（停電）：電力消費 < 電力需要
- 小売事業者が卸売価格の変動を吸収して，年間を通じて一定の小売価格を需要家に提示していると仮定。卸売価格に依存しない需要量： D_s
- 逆L字型限界費用曲線の様々なタイプの電源： $C_j^i(q_j^i, K_j^i) = c_j q_j^i + F_j^i(K_j^i)$ for $0 \leq q_j^i \leq K_j^i$

可変費 固定費

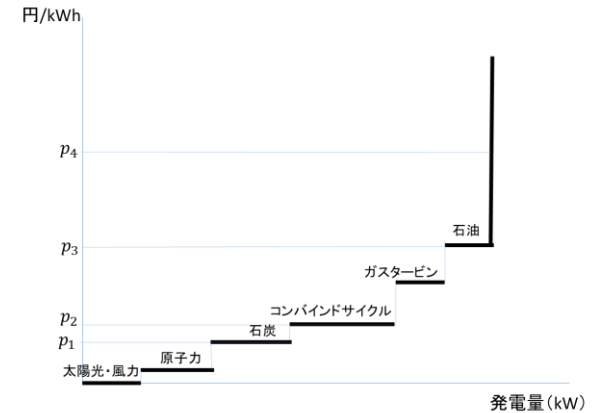
2地域電力モデル



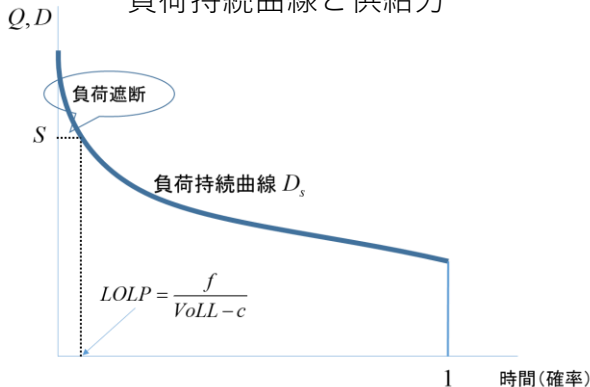
限界効用曲線



費用構造

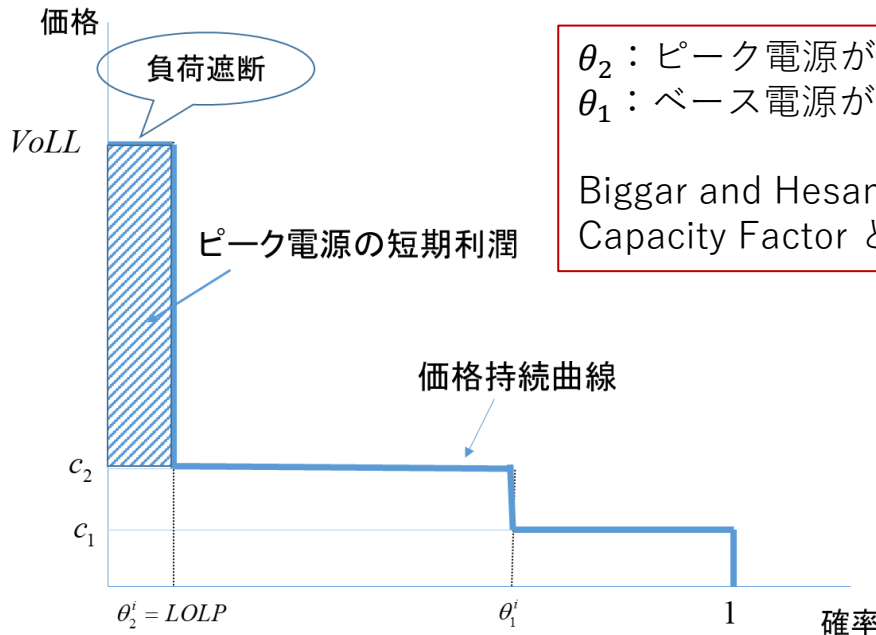


負荷持続曲線と供給力



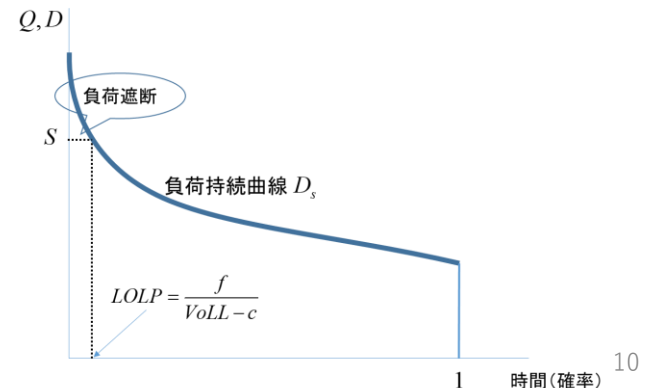
復習：電源キャパシティーの最適条件

- 短期利潤 = $\sum_{s, p_s \geq c_j} \pi_s [p_s - c_j]$; キャパシティー増加の限界費用 = $F_j'(K_j)$
- 最適電源キャパシティー：短期利潤 = キャパシティー増加の限界費用
- ピーク電源：負荷遮断時の短期利潤 = 限界キャパシティー費用
 $(VoLL - c_2)\theta_2 = F_2'(K_2)$ θ_2 : ピーク電源のフル稼働確率 = 負荷遮断確率
- ベース電源：ピーク電源稼働時の収益が追加される。
 $(VoLL - c_1)\theta_2 + (c_2 - c_1)(\theta_1 - \theta_2) = F_1'(K_1)$ θ_1 : ベース電源のフル稼働確率



θ_2 : ピーク電源がフル稼働する確率 = 負荷遮断確率
 θ_1 : ベース電源がフル稼働する確率

Biggar and Hesamzadeh (2014)はフル稼働確率を Capacity Factor と呼んでいる。



復習：市場均衡における電源キャパシティー

- 競争市場においては限界電源の利潤がゼロになるまでキャパシティーが増加：

$$\partial \Pi_j^i / \partial K_j^i = \sum_{s, p_s^i \geq c_j} \pi_s (p_s^i - c_j) - F_j^{i'}(K_j^i) = 0$$

- 市場価格が最適解におけるシャドープライスと等しくなっていれば，競争均衡で電源キャパシティーの最適条件が満たされる。
- ① 送電混雑時に地域間値差を発生させる，② 停電時の価格をVoLLに等しくするという2つの政策介入がなされていれば，電源キャパシティーが最適になる。
- 容量市場における電源キャパシティーの供給曲線：収入不足額 = Net Cone

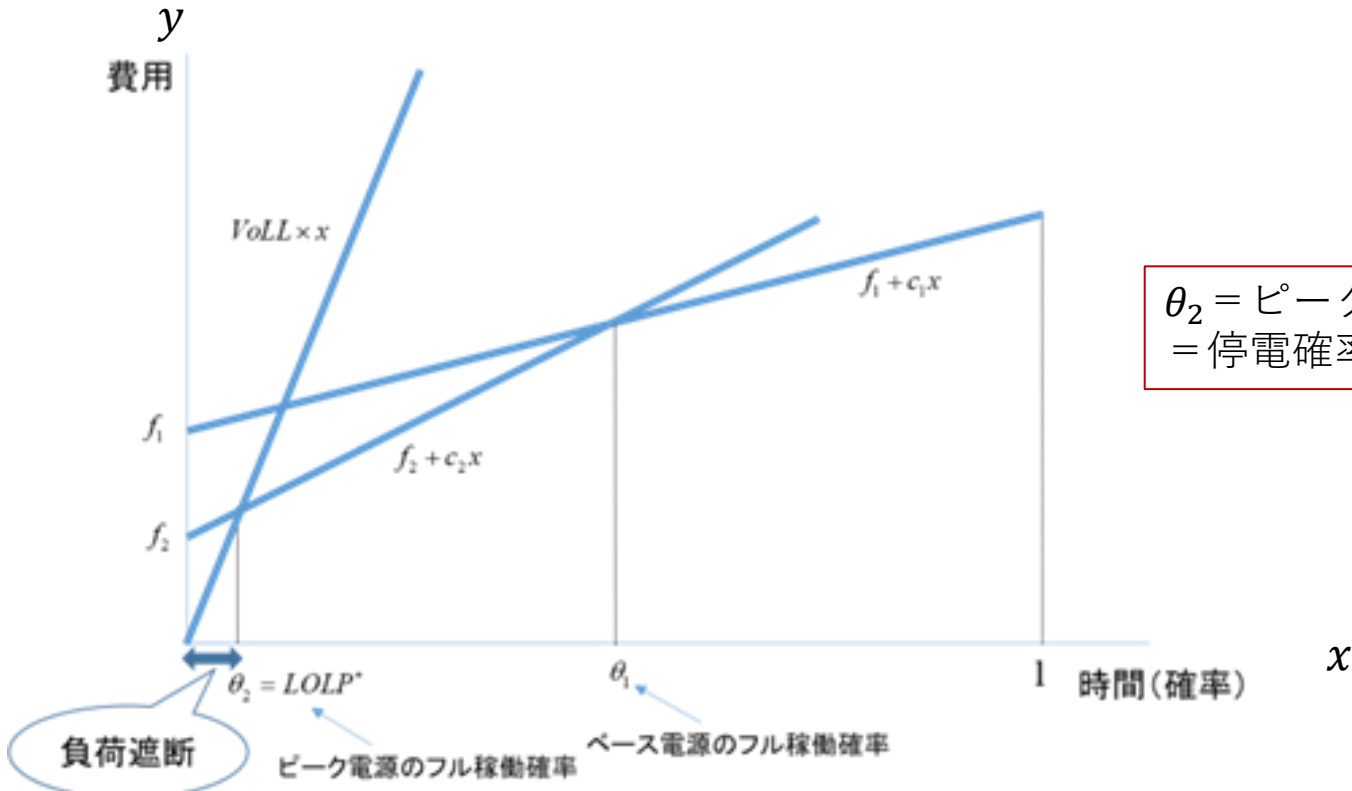
$$\text{収入不足額} = F_j^{i'}(K_j^i) - \sum_{s, p_s^i \geq c_j} \pi_s (p_s^i - c_j)$$

スクリーニング曲線とフル稼働確率

- スクリーニング曲線 (Screening Curve) : 発電コストと稼働確率 (時間) の関係.
 $y = f_j + c_j x, j = 1, 2, f_j = F'_j(K_j)$: 電源 j のスクリーニング曲線
 $y = VoLL * x$: 負荷遮断時のスクリーニング曲線
- 最適解の条件からフル稼働確率 θ_j はスクリーニング曲線の交点で与えられる.

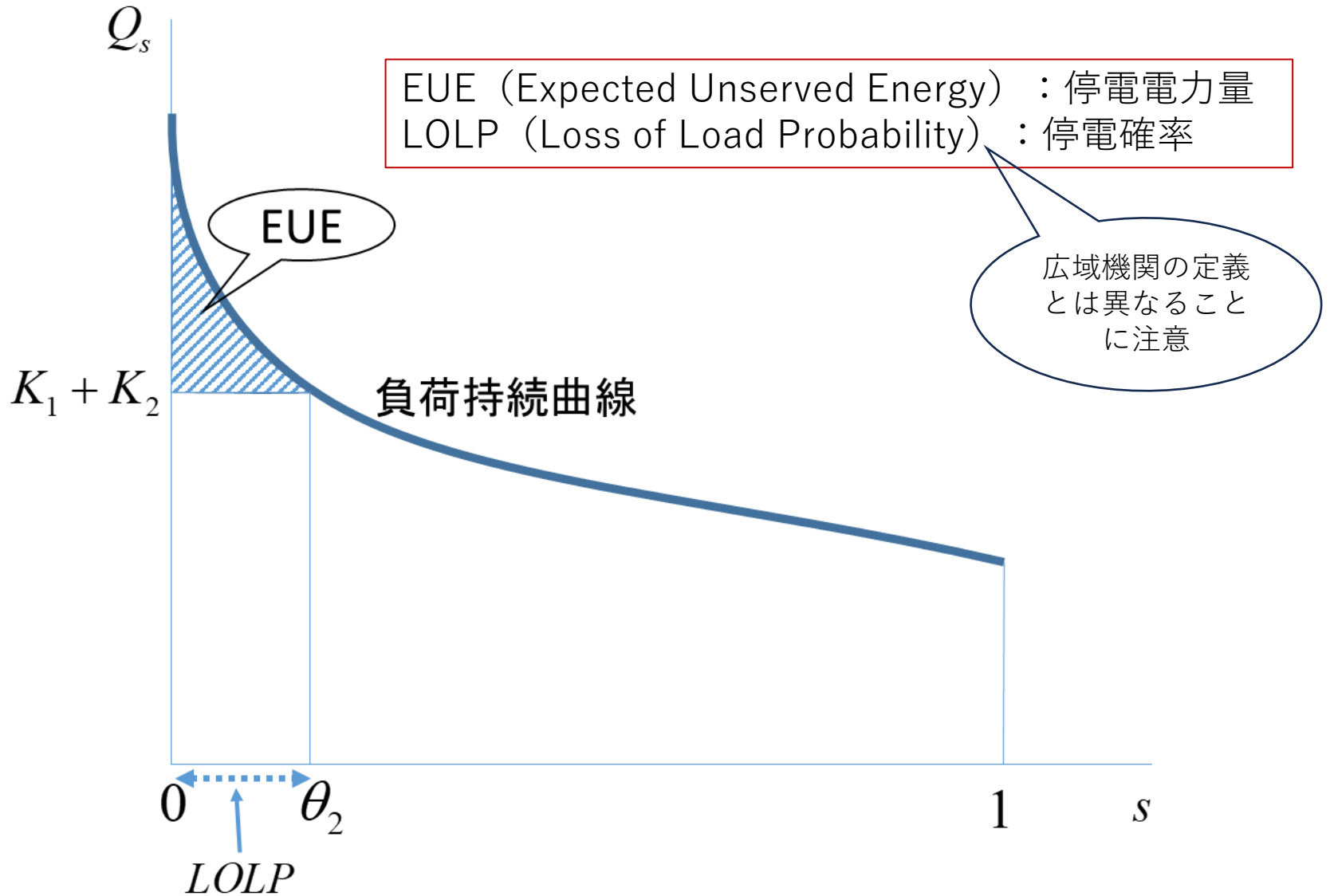
$$VoLL \times \theta_2 = f_2 + c_2 \theta_2$$

$$f_1 + c_1 \theta_1 = f_2 + c_2 \theta_1$$

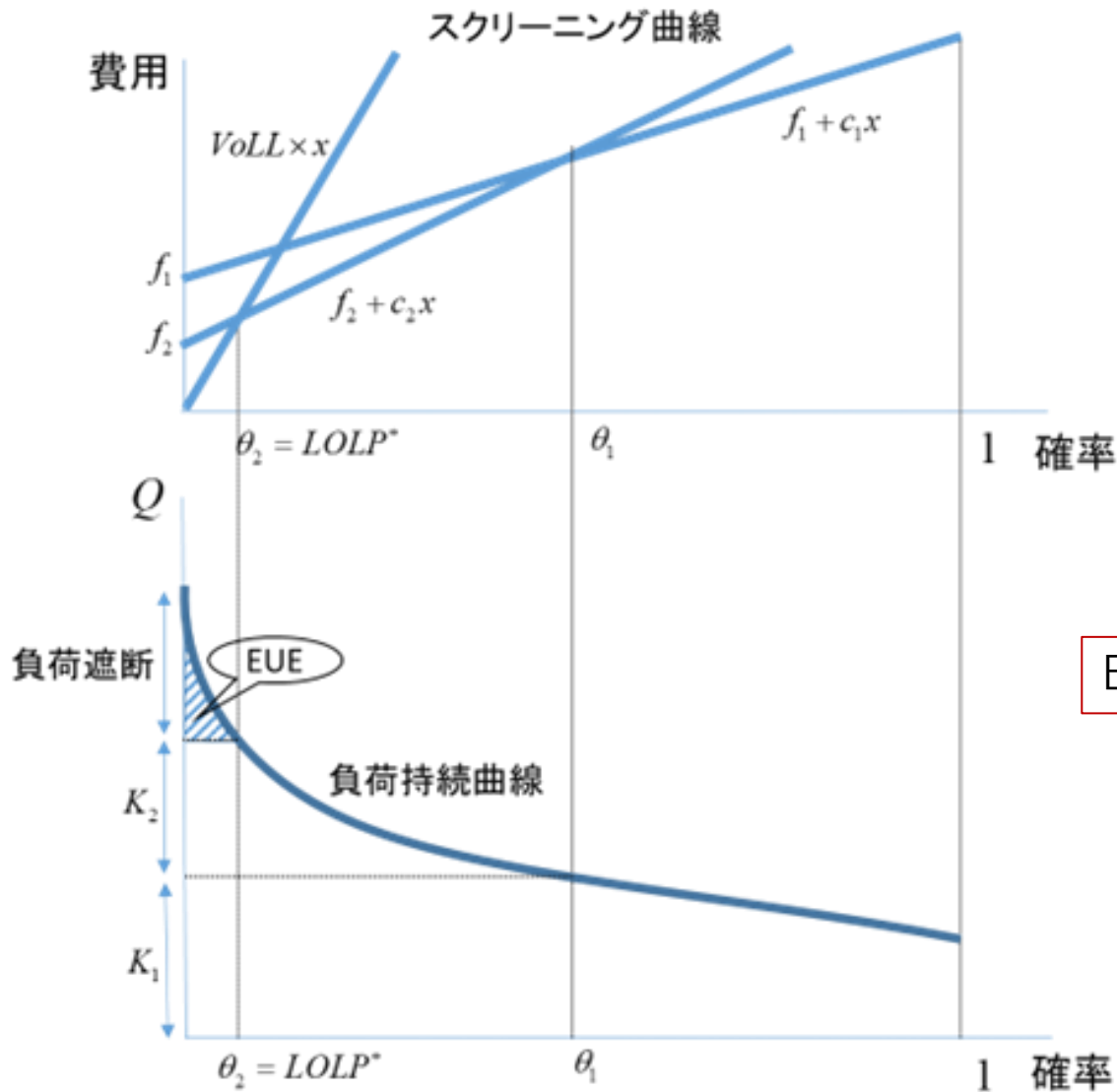


θ_2 = ピーク電源のフル稼働確率
= 停電確率 (LOLP)

LOLP, EUEと負荷持続曲線

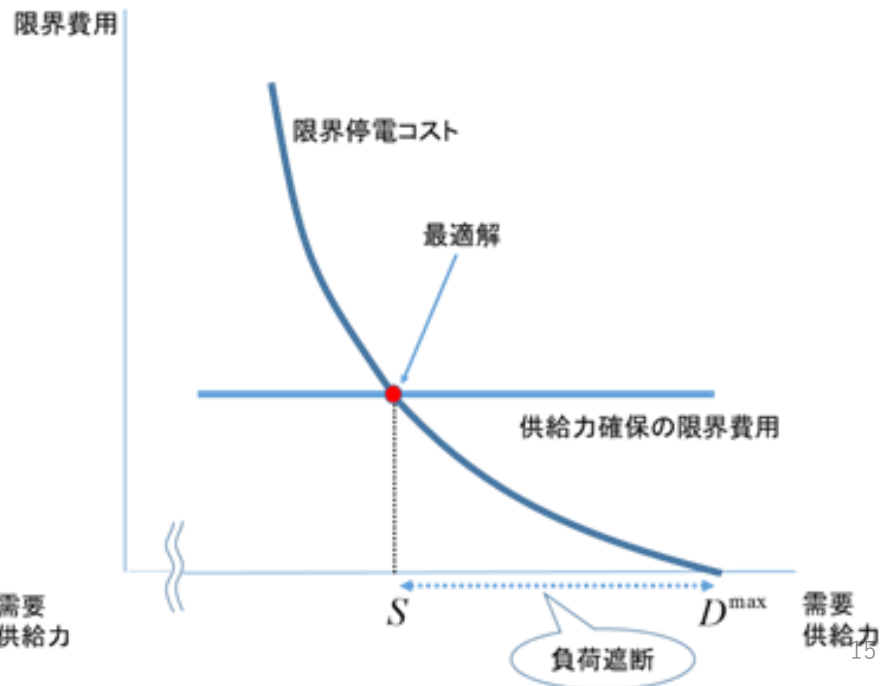
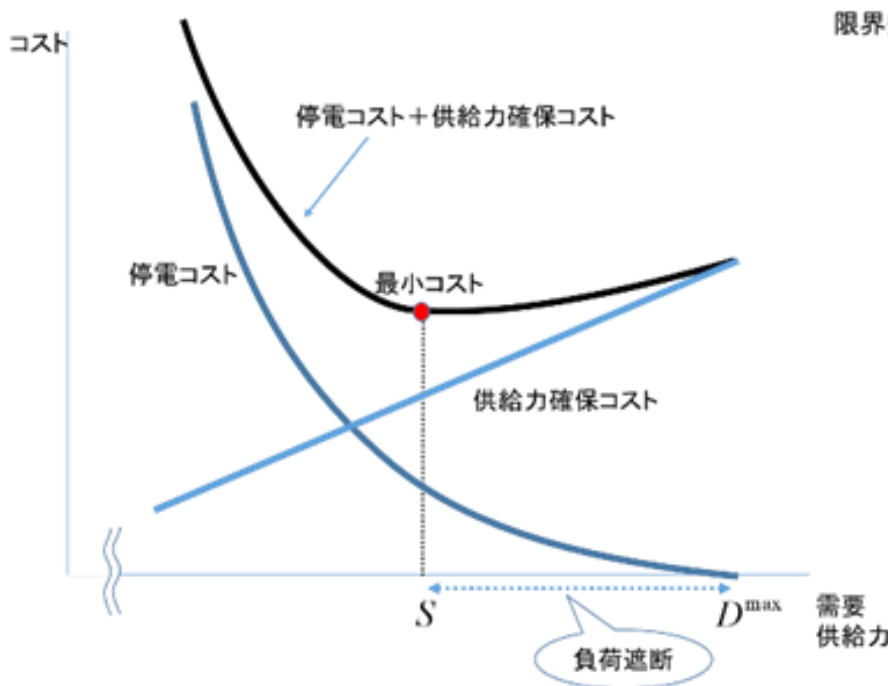


スクリーニング曲線と負荷持続曲線



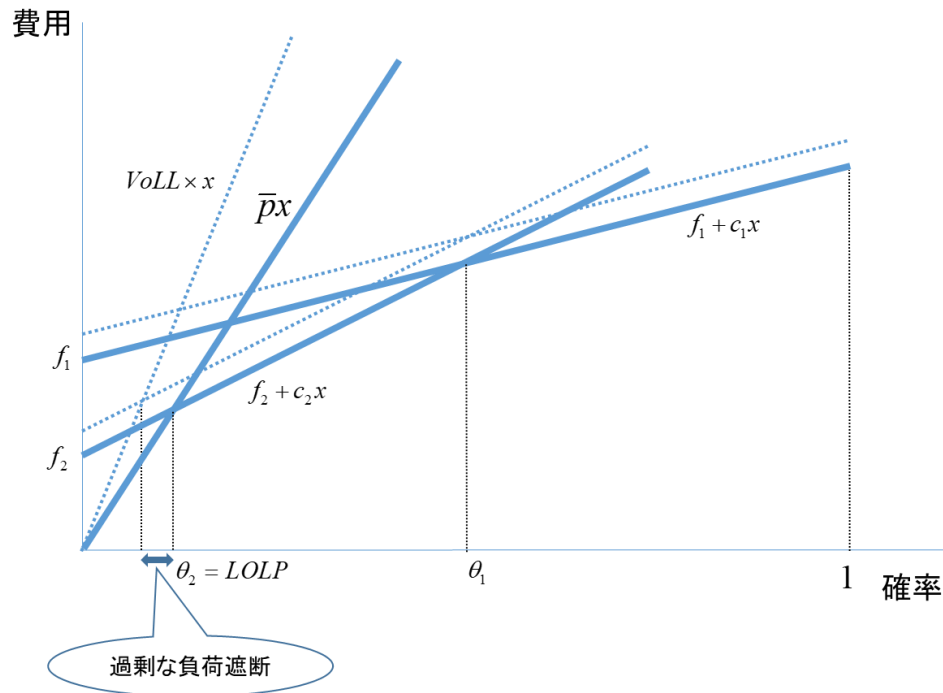
停電コスト + 供給力確保コストの最小化 ⇒ 最適解

- 停電コスト： $EUE \times VoLL$
 - 限界停電コスト：発電キャパシティの限界的増加による停電コストの減少 = $VoLL \times$ 停電確率 θ
- 供給力確保コスト：キャパシティ費用 + 可変費用
 - 供給力確保の限界費用：発電キャパシティの限界的増加によるキャパシティ費用と可変費用の増加： $c_2\theta_2 + F'_2(K_2)$
- 最適条件：限界停電コスト = 限界供給力確保費用
 $\Rightarrow (VoLL - c_2)\theta_2 = F'_2(K_2)$



上限価格のもとでの市場均衡

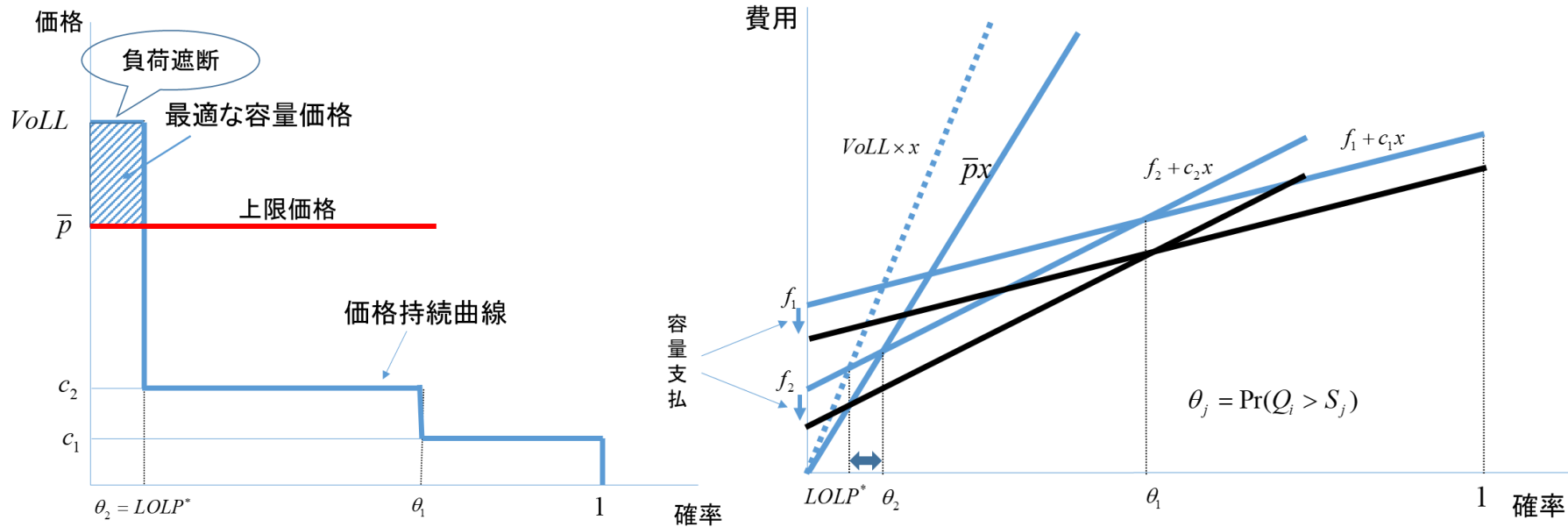
- 仮定：ピーク電源の限界費用 < 上限価格 < 停電コスト
- 停電時の短期利潤が低下：低下額はすべての電源で同じ。
- 上限価格は需要，発電，送電の最適条件を変化させない。電源キャパシティが同じならば，需要量，発電量，送電量は最適解と同じ。
- 上限価格は停電時の収入をすべての電源について低下させるので，ピーク電源とベース電源双方のキャパシティが小さくなる。 $f_j = F'_j(K_j)$ が増加するので，スクリーニング曲線が上方にシフトする。
- LOLPが最適解より高くなる。過剰な停電が発生する。



$$LOLP = \frac{F_2'(K_2)}{\bar{p} - c_2} > LOLP^*$$

上限価格と容量支払

- 容量支払：供給力に対して行政的に定めた一定の容量価格（補助金）を与える
- 容量支払を導入して容量価格を上限価格による収入不足分にちょうど等しくすれば、上限価格のもとでも電源キャパシティは最適解と一致する。
- 最適な容量価格はすべての電源について同じ。
- 最適な容量価格 = 停電確率 × (停電コスト - 上限価格) : $p_K = (VoLL - \bar{p})LOLP^*$



5. 容量市場の設計

日本の容量オークション市場

容量市場の供給曲線と需要曲線

最適電源キャパシティを達成する容量市場の需要曲線

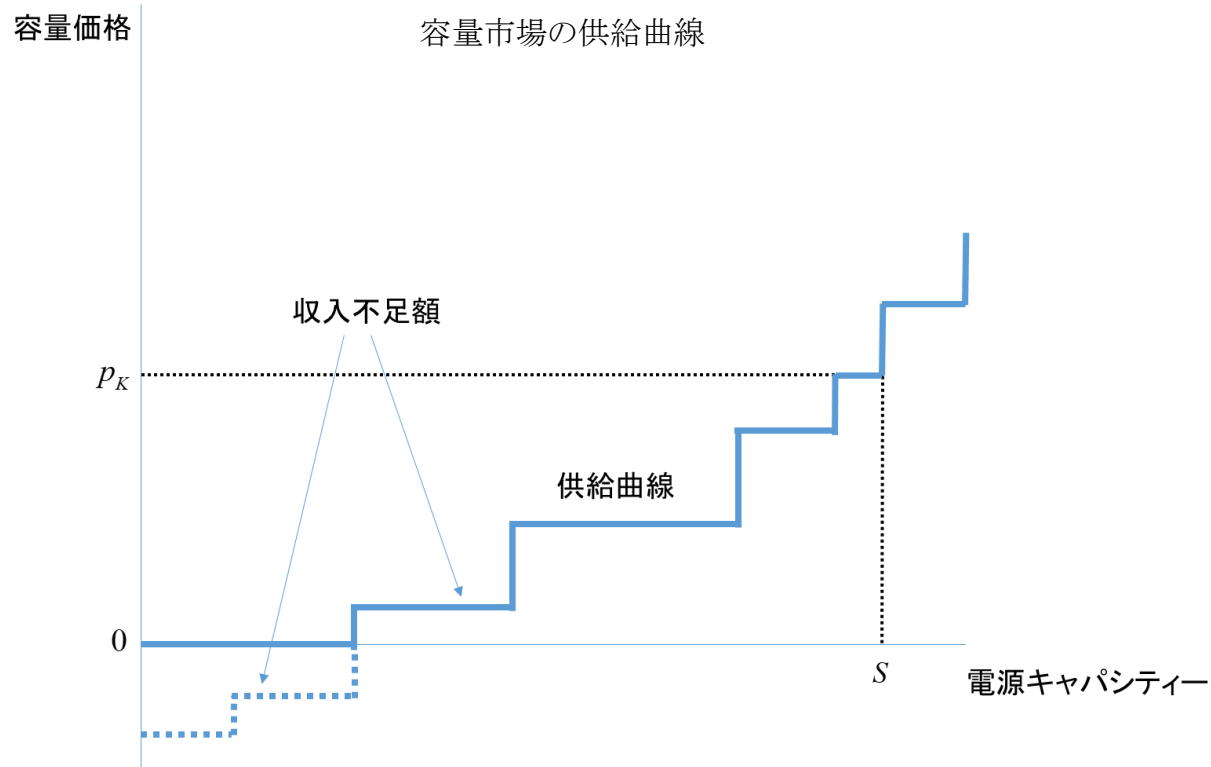
調達コストと停電コストの和を最小にするのは最適か？

容量（オークション）市場：日本のケース

- 4年後の1年間に供給力を提供できる電源やデマンド・レスポンスが入札。落札できれば容量価格を受け取る権利が発生。
- 容量価格を受け取るためには4年後に供給力を提供しなければならない。
 - 平常時は、年間で一定時期や一定時間以上の稼働を可能にする、
 - 需給ひっ迫のおそれがあるときは、電気の供給や卸電力市場等への入札を行う。
- 容量市場における入札は個別電源毎に行われる。
- 需要曲線は市場管理者（広域機関）が設定。
- 市場管理者が落札者に容量価格を支払う。小売事業者が（ピーク）需要量に応じて財源を拠出する。

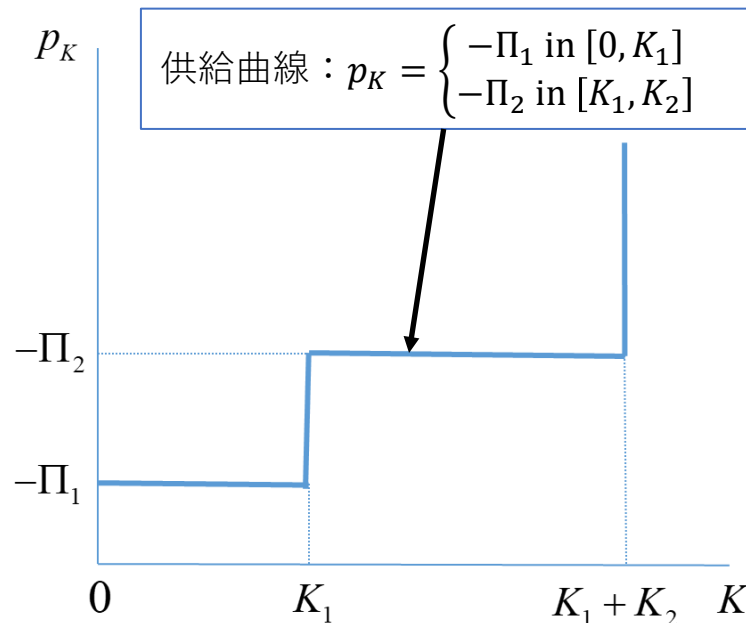
容量市場の供給曲線

- 容量市場参加者が競争的で、プライステイカーとして行動すると、入札価格は各電源ユニットの「収入不足額」（赤字額）に等しくなる。（[次スライド](#)）
- 既設電源については初期建設費用が埋没費用になっているので、健全な既設電源（老朽電源以外）は収入不足が発生しないことが多い。こういった電源の入札価格はゼロになる。



容量市場の供給曲線（例）：2電源タイプ、限界キャパシティー費用一定

- 限界キャパシティー費用一定を仮定： $f_i = F'_i(K_i)$
- ピーク電源の利益： $\Pi_2 = (\bar{p} - c_2)\theta_2 - f_2$
- ベース電源の利益： $\Pi_1 = (\bar{p} - c_1)\theta_2 + (c_2 - c_1)(\theta_2 - \theta_1) - f_1$
- プライステイカー電源の利潤最大化：入札価格 = 収入不足額 ($-\Pi_i$)。収入不足額がマイナスの時は0円。
 - 収入不足額より高い入札をすると、約定価格が入札額と収入不足額の間に来たときに損失が発生。
 - 収入不足額より低い入札をすると、約定価格が収入不足額より低く入札額より高い場合には損失が発生。

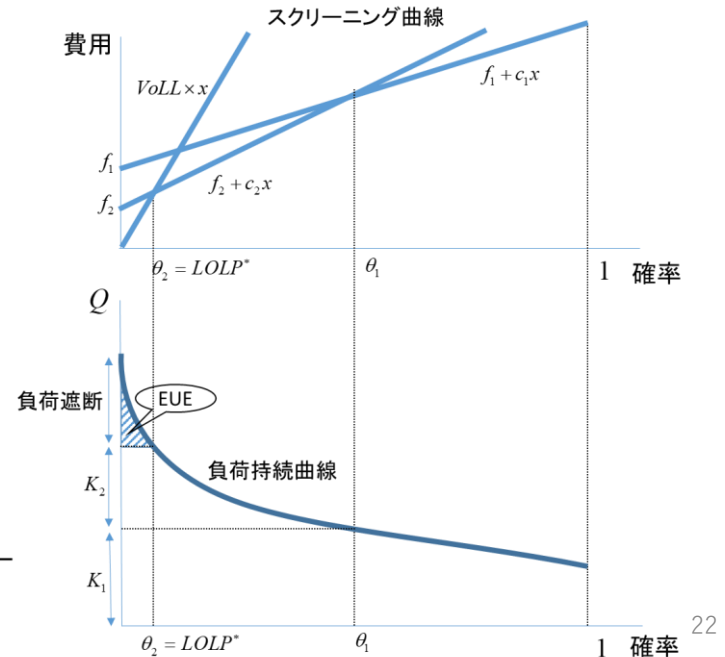
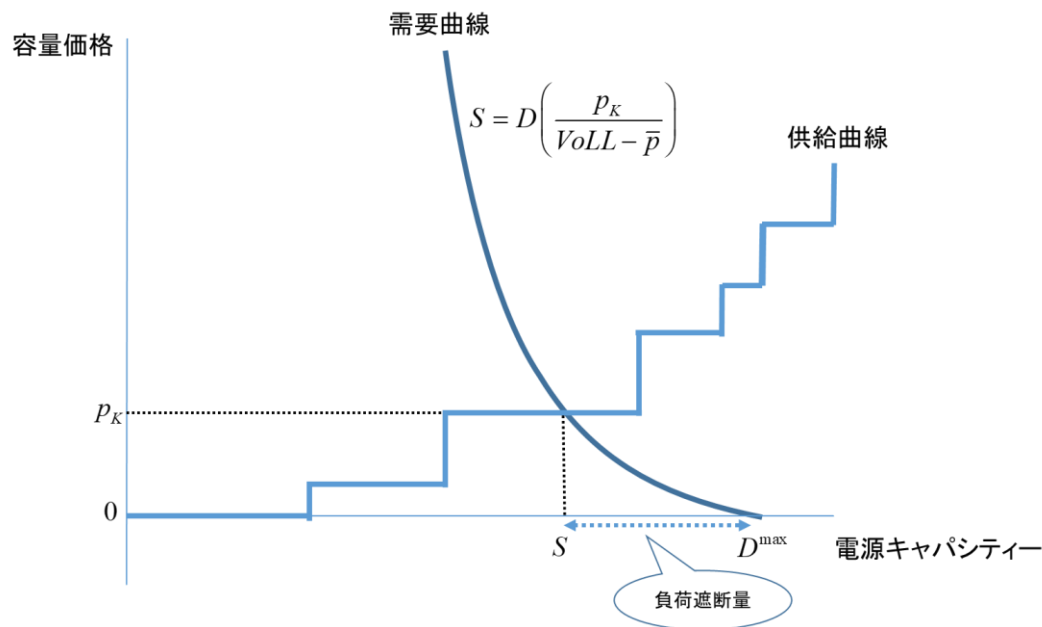


最適電源キャパシティーを達成する容量市場の需要曲線

- 最適な容量市場価格： $p_K = (VoLL - \bar{p})LOLP$
- 電源キャパシティーと容量価格を最適にする需要曲線：

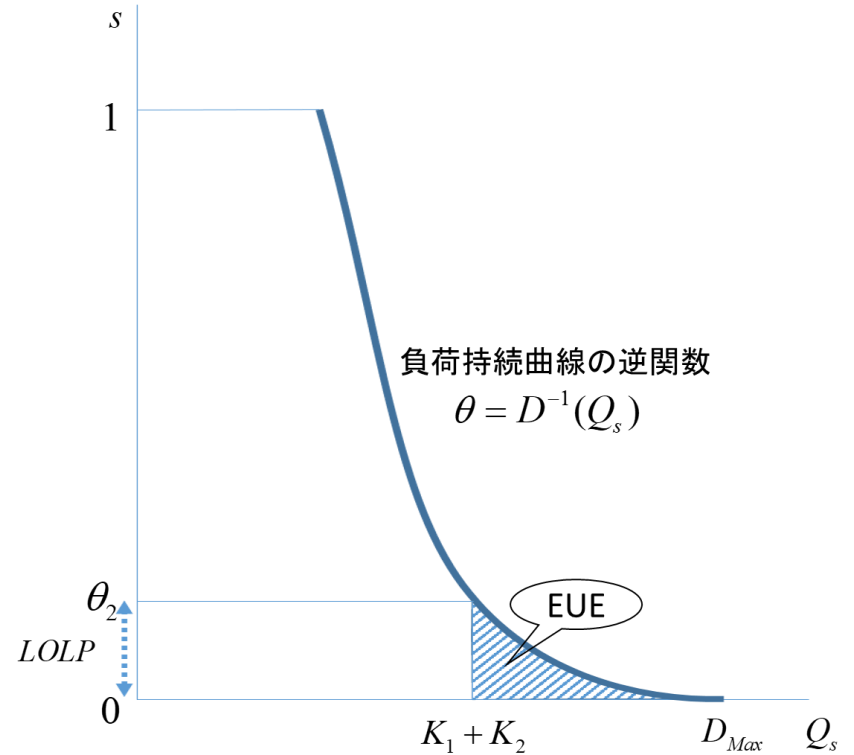
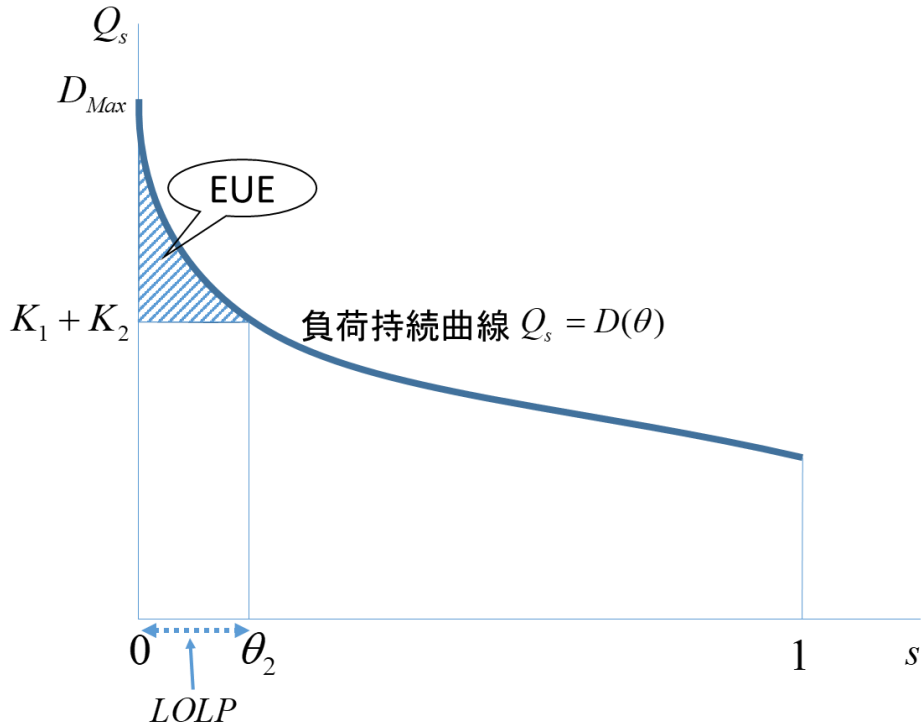
$$S = D_K(p_K) \equiv D\left(\frac{p_K}{VoLL - \bar{p}}\right)$$

- $D(\theta)$: 負荷持続曲線, $\theta = \frac{p_K}{VoLL - \bar{p}}$



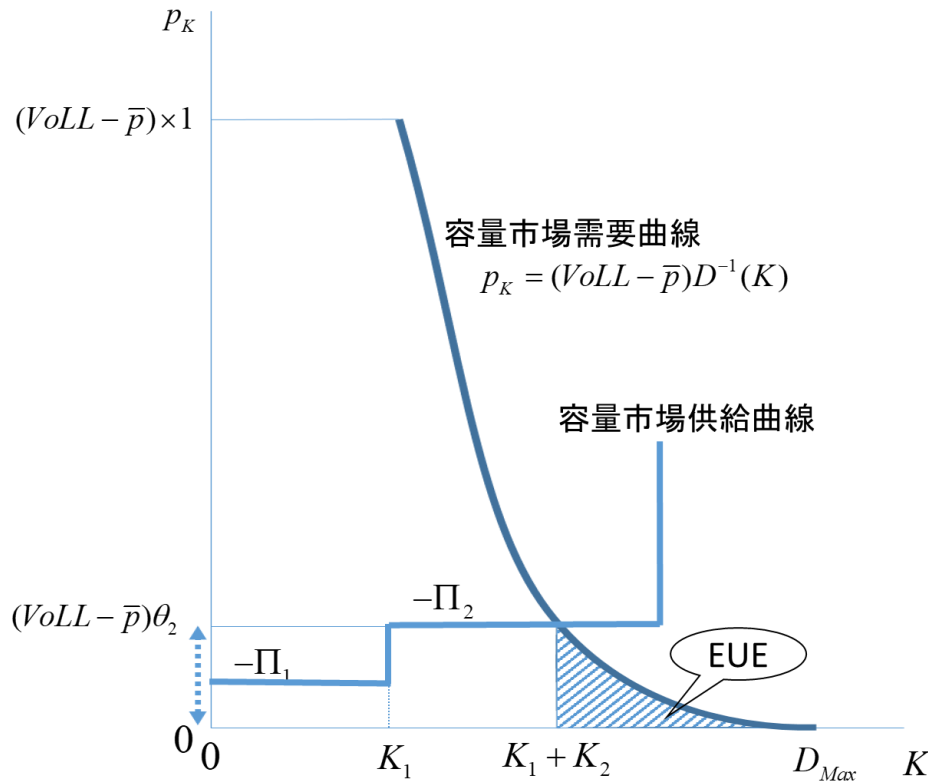
負荷持続曲線と容量市場需要曲線

- 負荷持続曲線の縦軸と横軸を入れ替えると下の右図になる。この縦軸に $VoLL - \bar{p}$ をかけたものが最適解を達成する容量市場需要曲線。
- 前スライドの需給均衡点で $p_K = (VoLL - \bar{p})LOLP^*$ が成立。



容量市場の需給均衡： 2電源タイプ

- 需要曲線： $p_K = (VoLL - \bar{p})D^{-1}(K)$ $p_K = (VoLL - \bar{p})\theta_2$
- 供給曲線： $p_K = \begin{cases} -\Pi_1 & \text{for } 0 \leq K \leq K_1 \\ -\Pi_2 & \text{for } K_1 \leq K \leq K_2 \end{cases}$ $\Pi_2 = (\bar{p} - c_2)\theta_2 - f_2$
- 需給均衡点： $p_K = -\Pi_2 \rightarrow (VoLL - \bar{p})\theta_2 = -\{(\bar{p} - c_2)\theta_2 - f_2\}$
- 需給均衡点で最適解が達成される： $(VoLL - c_2)\theta_2 = f_2$



調達コストと停電コストの和の最小化

- 容量市場における調達コストと停電コストの和を最小化するアプローチが提唱された。
- Zachary et al. (2022), 電力広域的運営推進機関 (2021), 岡本浩 (2018)
- 「日本全体として最適な電源コストを求めるという考えとは違う」大山力の指摘

Stan Zachary, S., Wilson, A., Dent, C., 2022. The integration of variable generation and storage into electricity capacity markets, *Energy Journal* Vol. 43, No. 4.

DOI: 10.5547/01956574.43.4.szac

岡本浩 (2018) 「容量オークション方式の違いによる信頼度の比較及びkW価値(調整係数)の考え方について」第8回 容量市場の在り方等に関する検討会 追加資料.

https://www.occto.or.jp/iinkai/youryou/kentoukai/2017/files/youryou_kentoukai_08_06.pdf

電力広域的運営推進機関 (2021b) 「2021年度メインオークション需要曲線作成要領」2021年7月1日.

[https://www.occto.or.jp/market-](https://www.occto.or.jp/market-board/market/oshirase/2021/files/210701_mainauction_jyuyoukyokusen_sakuseiyouryou_jitsujukyu2025.pdf)

[board/market/oshirase/2021/files/210701_mainauction_jyuyoukyokusen_sakuseiyouryou_jitsujukyu2025.pdf](https://www.occto.or.jp/market-board/market/oshirase/2021/files/210701_mainauction_jyuyoukyokusen_sakuseiyouryou_jitsujukyu2025.pdf)

電力広域的運営推進機関 (2018a) 「第8回 容量市場の在り方等に関する検討会 議事録」

https://www.occto.or.jp/iinkai/youryou/kentoukai/2017/files/youryou_kentoukai_08_gijiroku.pdf

調達コストと停電コストの和を最小にするのは最適か？

- 容量市場における調達コスト：限界電源のNet CONE x 調達キャパシティー ($-\Pi_2 \times S$)
 - Net CONE：電源建設の総コスト (Gross CONE) - 容量市場以外の収益 = $-\Pi_2$
- 停電コスト： $VoLL \times EUE(S)$
- 調達コスト + 停電コストの最小化 $\Rightarrow LOLP = NetCONE / VoLL$:
 - $\frac{\partial}{\partial S} (-\Pi_2 \times S + VoLL \times EUE(S)) = 0 \Rightarrow -\Pi_2 = VoLL \times LOLP$
- 調達コスト + 停電コストを最小にすることは最適な電源キャパシティーをもたらさない。
 - 最適電源キャパシティーの条件：供給力確保コストと停電コストの和を最小化

容量市場の設計：まとめ

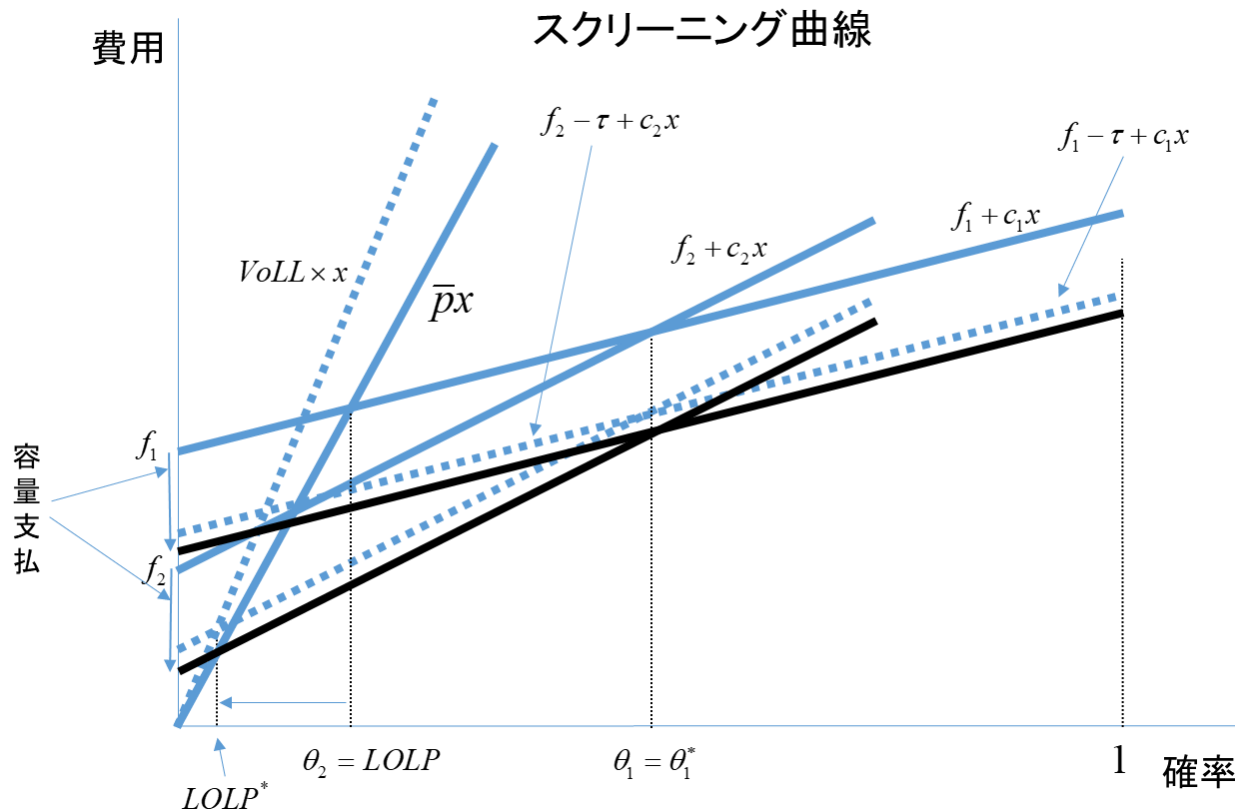
- 容量市場参加者が競争的で、プライステイカーとして行動すると、入札価格は各電源ユニットの「収入不足額」（赤字額）に等しくなる。
- 電源キャパシティーと容量価格を最適にする需要曲線は負荷持続曲線から描くことができる。
- 最適電源キャパシティーは、供給力確保コストと停電コストの和を最小化することによっても得られる。
 - $LOLP = \text{限界キャパシティー費用} / (\text{VoLL} - \text{限界電源タイプの限界費用})$.
- 容量市場における調達コストと停電コストの和を最小にすると、電源キャパシティーは最適にならない。
 - $LOLP = \text{NetCONE} / \text{VoLL}$.

6. 電源コストを過大にする 市場の失敗

参入障壁や金融市場の不完全性による市場の失敗は電源コストを過大にして、その結果、供給力が過少になる。その場合の容量市場はどうなるか？

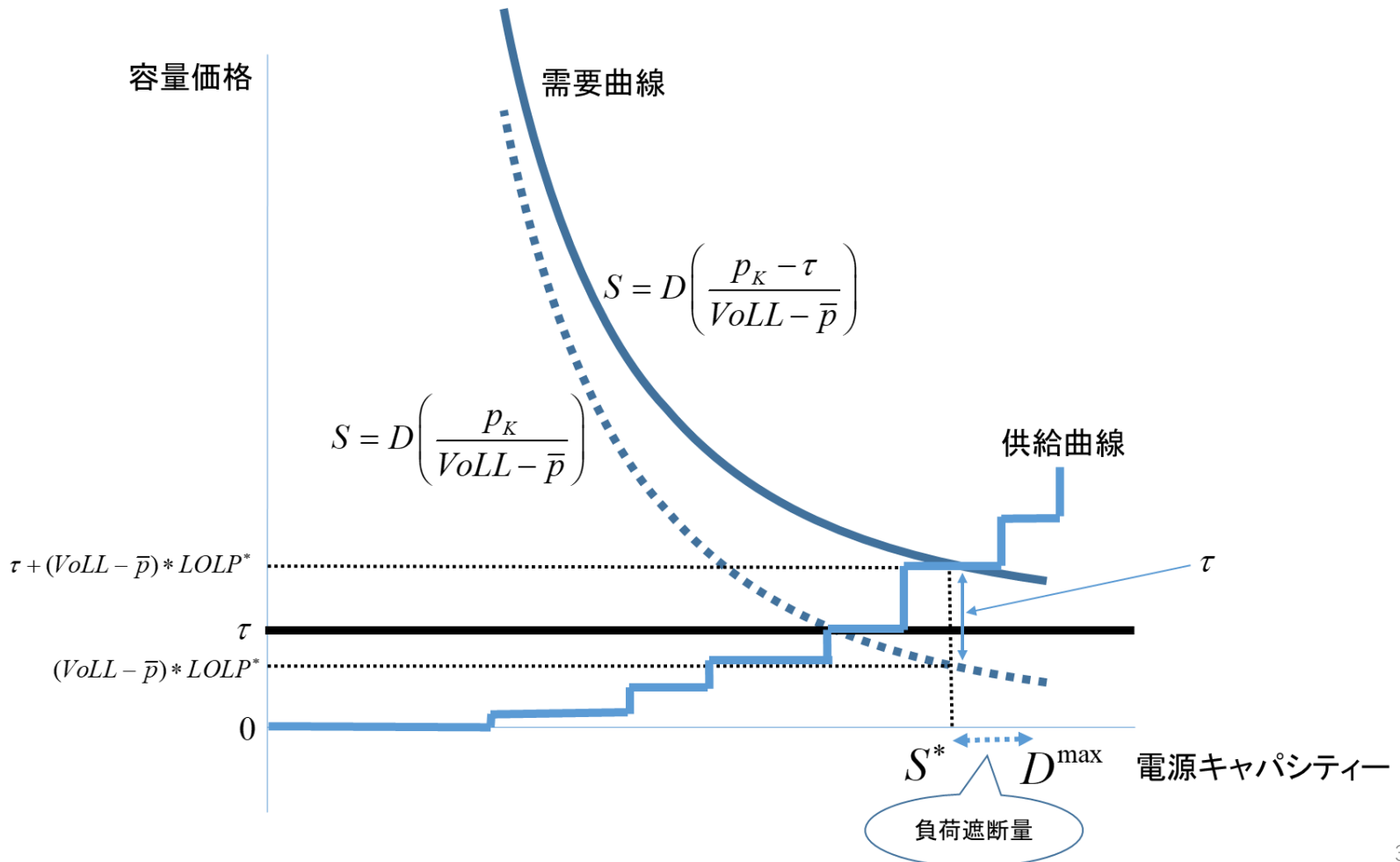
電源コストを過大にする市場の失敗：スクリーニング曲線と容量価格

- 参入障壁や金融市場の不完全性等の市場の失敗によって電源コストが過大になっているケース
- 電源コストが過大で、かつ上限価格が設定されているケース。キャパシティ増加の社会的限界費用： $f_j - \tau$, $j = 1, 2$
- 最適な容量価格： $p_K = \tau + (VoLL - \bar{p})LOLP^*$



電源コストが過大な時の容量市場需要曲線と供給曲線

- 容量市場の需要曲線を固定費の歪み分だけ上にシフトさせなければならない。
- 上限価格が存在せず，固定費の歪みだけの場合の需要曲線は水平． $\bar{p} = VoLL$



7. 容量市場の設計における 実際的な問題

信頼度基準は適切か？

市場支配力対策

既存電源と新規電源

電源キャパシティー以外の要因：燃料制約等

容量市場の設計における信頼度基準は適切か？

- 容量市場における需要曲線は実際には最適な停電確率を達成するように設計されていない。
 - PJMでは容量市場における調達量はLOLEが10年に1回以下という基準（1-in-10 基準）から算定される。
 - 1-in-10 基準は過剰な供給力をもたらす：Newell, et al. (2018)によるシミュレーション（テキサス州）では、経済的に最適な予備率は9.0%。1-in-10基準を満たすために必要な予備率は13.5%。
- 信頼度基準と停電コストは表裏の関係だが、それを明示しているケースは多くない。
 - 例外は英国。停電コストを17ポンド/kWhと設定し、信頼度基準はLOLEが3時間/年である。
 - 停電コストの推計値には大きな不確実性がある。
- 自然変動電源のような不確実な供給力の評価
 - 安定電源代替価値（ELCC：Effective Load Carrying Capability）をモンテカルロ・シミュレーションを用いて計算。

容量市場の設計における実際的な問題

- 需要曲線の形状を設定する際には，市場支配力対策の側面も重要。
 - 目標調達率の点で垂直な需要曲線⇒市場支配力による高値入札で，大きく価格が上昇⇒右下がりの需要曲線を設定
- 固定費を全部あるいは一部回収済みの既存電源：減額措置？
 - 総括原価のもとですでに固定費を回収した電源に対して，追加で容量価格を支払うのか？
 - 老朽化した電源で発電を継続するための維持補修費がかさむものについては，非効率な退出の恐れ.
 - 2010年度末までに建設された電源は発電事業者の受取額（容量確保契約金額）を減額.

供給力確保における新しい課題

- 容量市場は長期を要する電源の新設に有効か？
 - 長期脱炭素電源オークションの創設（2024年）
https://www.occto.or.jp/capacity-market/decarbonation_know
- 発電キャパシティーの不足以外による需給ひっ迫への対応は容量市場では対応できない。
 - 2021年初頭に日本で発生した燃料不足. 同年2月にテキサス州で発生した大寒波による設備トラブル.

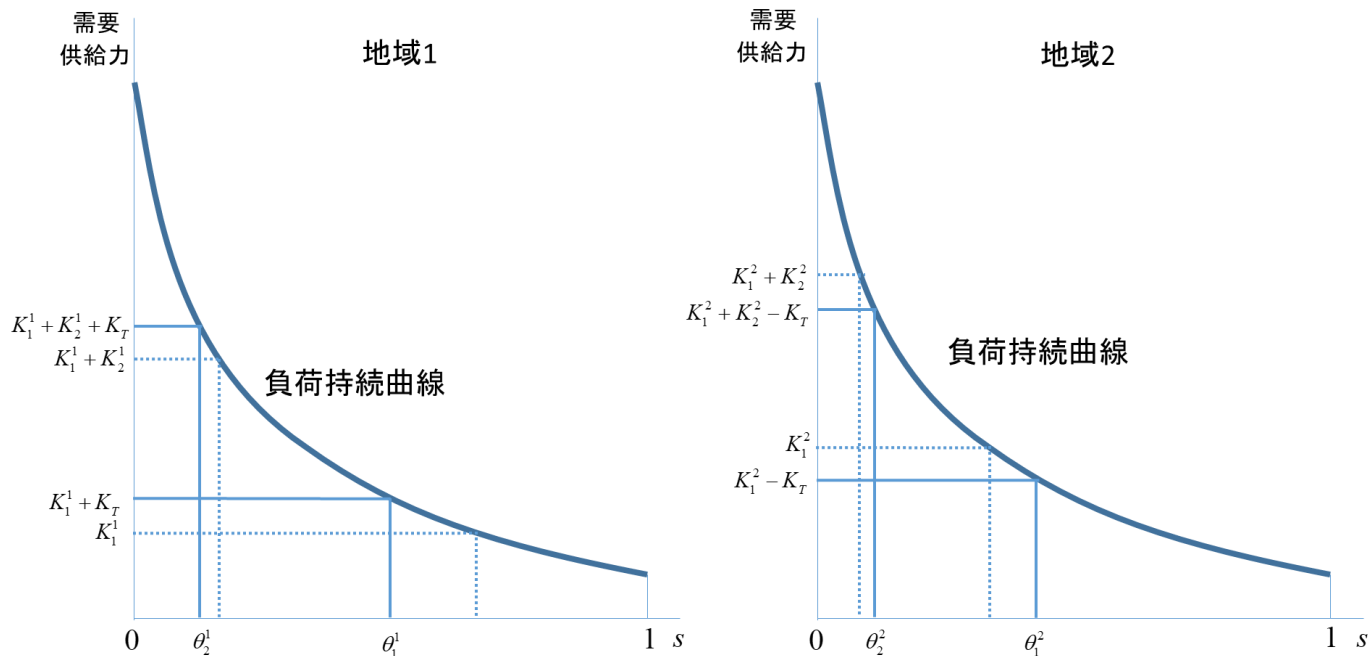
8. 送電容量制約と送電網増強の便益

送電制約のもとでの最適電源キャパシティーと送電網増強の限界便益
上限価格のもとでの送電網増強の便益
送電網増強のアデカシー便益の推定

復習：送電制約のもとでの最適電源キャパシティーと送電網増強の限界便益

- 最適電源キャパシティーの条件：短期利潤 = 限界キャパシティー費用
- 2つの政策介入が必要：①送電混雑時に地域間値差，②停電時の価格 = VoLL
- 最適な停電確率は地域によって異なる． $LOLP^{i*} = \frac{F_2'(K_2^i)}{VoLL - c_2}$
- 送電容量の最適条件：地域間値差収入 = 送電容量増加の限界費用 $\sum \pi_s (p_s^1 - p_s^2) = C_T'(K_T) > 0$
- 送電網増強の限界便益 = 競争均衡における単位送電容量あたり地域間値差収入

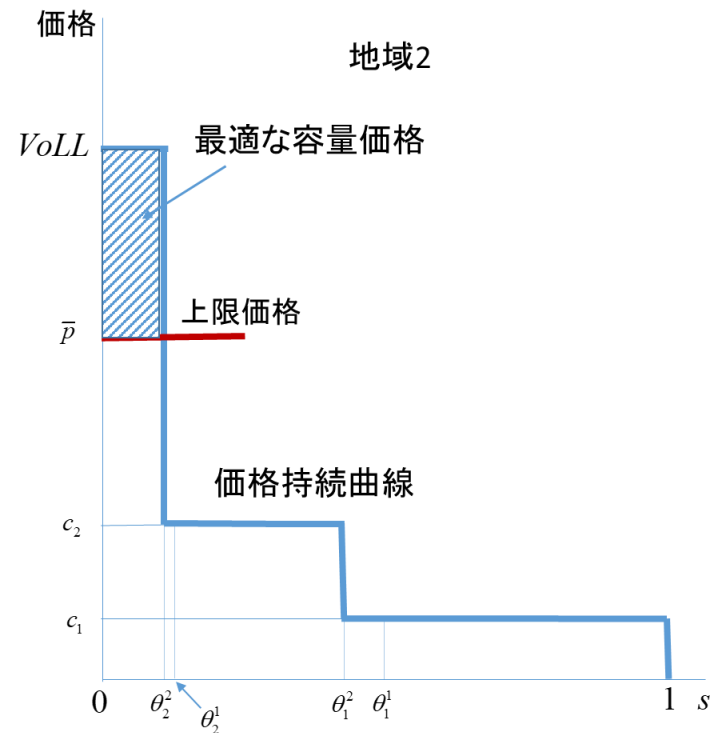
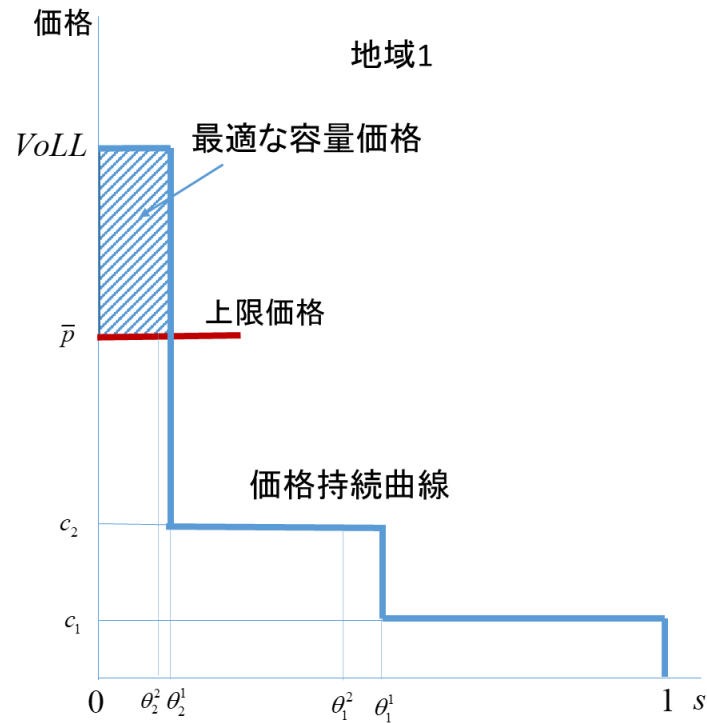
地域間送電が可能な場合の負荷持続曲線と電源キャパシティー：潮流が単一方向のケース $K_1^2 > K_1^1$



上限価格のもとでの送電制約と容量価格

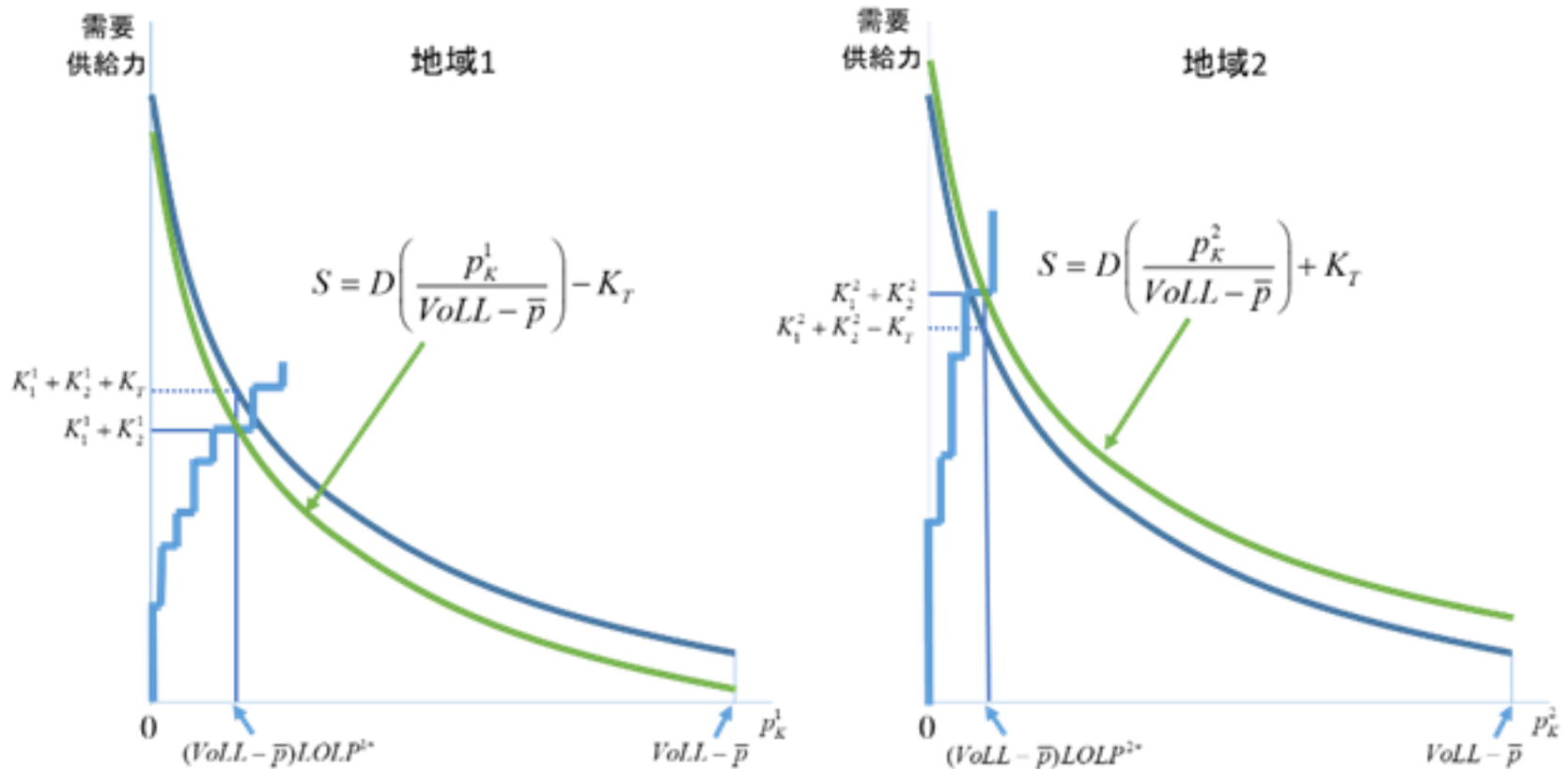
- 各地域の容量価格が上限価格による収入不足分にちょうど等しくなれば、電源キャパシティーは最適解と一致する。
- 送電制約が有効な場合には最適な容量価格にも地域間で価格差が発生。

$$p_K^i = (VoLL - \bar{p})LOLP^{i*}$$



容量市場：送電制約と上限価格

- 最適な電源キャパシティを達成するための容量市場
 需要曲線：送電制約のもとでは地域毎に設定



送電制約が存在する場合に最適電源キャパシティーを達成する容量市場の需要曲線

- 電力が常に地域2から地域1に流れる場合に電源キャパシティーと容量価格を最適にする需要曲線：

$$S^1 = D\left(\frac{p_K^1}{VoLL - \bar{p}}\right) - K_T \quad S^2 = D\left(\frac{p_K^2}{VoLL - \bar{p}}\right) + K_T$$

- 容量価格： $p_K^i = (VoLL - \bar{p})LOLP^{i*}$

- 停電確率： $LOLP^{i*} = \frac{F_2^i'(K_2^i)}{VoLL - c_2}$

上限価格のもとでの送電網増強の便益

- 上限価格が設定されないケース：送電網増強の限界便益 = 地域間値差収入

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

- ハット記号は上限価格がないときの最適解を表す
- 上限価格が設定されたときの値差収入

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

- ハット記号がない価格は上限価格が設定されたときの最適解を表す。
- エネルギー市場の値差収入 < 送電網増強の限界便益
- アデカシー便益 = 送電網増強の便益のうちで地域間値差収入に反映されない部分：

$$R_T^K = MB_T - R_T^E$$

アデカシー便益と停電コストの減少

- 送電網増強の限界便益：値差収入 + 上限価格超過分

$$MB_T = R_T^E + \sum_{s, \hat{p}_s^1 > \hat{p}_s^2, \hat{p}_s^1 > \bar{p}} \pi_s (VoLL - \bar{p}) + \sum_{s, \hat{p}_s^2 > \hat{p}_s^1, \hat{p}_s^2 > \bar{p}} \pi_s (VoLL - \bar{p}) \geq R_T^E$$

- 送電網増強の便益のうちでエネルギー市場に反映されないアデカシー部分：

$$R_T^K = \sum_{s, \hat{p}_s^1 > \hat{p}_s^2, \hat{p}_s^1 > \bar{p}} \pi_s (VoLL - \bar{p}) + \sum_{s, \hat{p}_s^2 > \hat{p}_s^1, \hat{p}_s^2 > \bar{p}} \pi_s (VoLL - \bar{p})$$

- 直観：送電網増強は負荷遮断量を減少させる。上限価格以下の部分は値差収入に反映されているので、アデカシー便益は「停電コスト - 上限価格」。
- 欧州の推計手法：アデカシー便益 = 送電網増強による停電量の減少 × 停電コスト
- 上限価格をVoLLから差し引く必要。

送電網増強のアデカシー便益と容量価格：結論

- 上限価格が設定されると、
エネルギー市場の値差収入 < 送電網増強の限界便益
- 送電網増強のアデカシー便益 = 送電網増強の限界便益 - エネルギー市場の値差収入
- 送電網増強のアデカシー便益 = 停電量の減少 ×
(停電コスト - 上限価格)
 - 欧州方式の便益推計手法に類似

送電網増強のアデカシー便益と容量価格

- 送電網増強による容量価格の減少：

$$R_T^C = -\frac{\partial P_K}{\partial K_T} = (VoLL - \bar{p}) \sum_i \left(-\frac{\partial \theta_2^i}{\partial K_T} K^i - \frac{\partial K^i}{\partial K_T} \theta_2^i \right)$$

- アデカシー便益 \neq 送電網増強による容量価格の減少

金本 (RIETI DP 22-J-026)

- 電気が一方向にしか流れない特殊ケース：容量価格が最適であれば，容量市場における地域間価格差が送電網増強のアデカシー便益に等しい：

$$R_T^K = p_K^1 - p_K^2$$

欧州とPJMにおけるアデカシー便益の推計手法

欧州の推計手法：

- 市場モデルかネットワークモデルを用いて、送電網増強プロジェクトが停電量の期待値をどれだけ減少させるかを推計し、これに停電コスト（VoLL）をかけて便益を計算。
- 停電量の推計値がゼロの場合には、プロジェクトによって停電量ゼロを維持するために必要な発電キャパシティーがどれだけ減少するか（Additional adequacy margin）を推計し、それに発電キャパシティーのコスト（通常はピーク電源の投資コスト）をかけて算出する。
- アデカシー便益を計算するには停電コストから上限価格を差し引かなければならないが、上限価格がVoLLと比較して十分に小さければ、欧州型の推計手法がアデカシー便益の良い近似になる。

PJMの推計手法：

- 送電容量増加による容量価格の変化を最も最近の容量市場オークション（Base Residual Auction）の約定ツール（engine）を用いて推計。
- PJMの推計手法で用いられている容量市場収入の減少は一般にはアデカシー便益とは等しくならない。電源キャパシティーが最適になるように容量価格が設定されていても、PJMの推計手法は正しい答えを与えない。金本（RIETI DP 22-J-026改訂版）