

電力システムの技術的特 性と経済学の基礎

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

目次

- 電力自由化の背景
 - なぜ電力自由化？
 - 電力供給の構成要素
 - 電力市場における市場の失敗：概観
- 交流の電力供給システム
 - 送電制約
 - 貯蔵不可能性と瞬時瞬時の需給バランス
- 日本の電力システム
- 発電の費用構造
- 利潤最大化と需給均衡
- 電力市場における市場の失敗

I . 電力自由化の背景

なぜ電力自由化？

従来型電力システム：垂直統合地域独占（10電力体制）＋総括原価規制

- コストベースの規制は費用削減のインセンティブを薄れさせる。
- 規制者のインセンティブは必ずしも社会全体のものとは一致しない。
 - 政治的な圧力や組織利益の追求によって様々な規制の失敗が生まれる。
 - 効率的な料金（混雑料金、ピークロード・プライシング）の導入は政治的に困難

(p.11, Chapter 1-1, Stoft (2002))

課題

- 市場制度設計に不備があると電力自由化は大きく失敗
 - 2000年のカリフォルニア大停電。
 - 電力市場の制度設計は難しい。日本は大丈夫か？人材育成の必要性。

電力自由化：小売りと発電は競争，送配電部門は地域独占＋規制

- 費用削減とイノベーションのインセンティブを高める
- 競争圧力による価格低下
- 効率的なプライシング（ピークロードプライシング）
 - 電力供給の社会的費用はピーク時とオフ・ピーク時で大きく異なる。10倍から100倍。

背景

(p.12, Chapter 1-1, Stoft (2002))

- IT技術の発達
- 市場設計に関する経済学的发展

II. 交流の電力供給システム

交流の電力供給システム

- 電力 = 電圧 × 電流
- 交流：電気の流れる向きが周期的に変化
- 電圧と電流が同じ位相（左の図） ⇒ 電力がマイナスにならない。
- 電圧と電流の位相がずれる：右の図。マイナスの電力の部分が発生。有効電力（プラスの部分）と無効電力（平均するとゼロになる部分）に分ける。

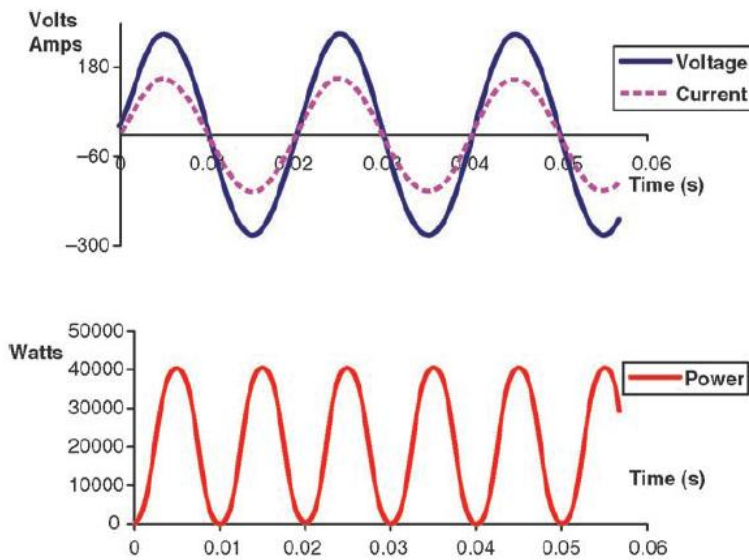
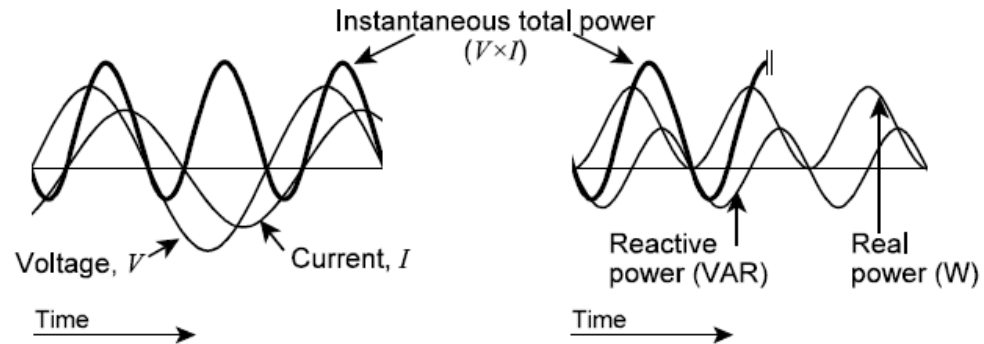


Figure 2.7 An AC network with voltage and current perfectly in phase

(p.39, Figure 2.7, Biggar and Hesamzadeh (2014))



(p.384, Figure 5-2.1, Stoft (2002))

電流戦争：1880年代の電力事業黎明期に、エジソンの直流システムとテスラの交流システムが争い、交流システムが勝利した。

物理的送電制約

- 熱容量制約
 - 流れる電流が大きくなると抵抗によって電線が発熱。電線が垂れ下がり、事故を引き起こす。
- 周波数制約
 - 発電設備や送電線の事故時には電力供給が瞬間的に低下し、周波数が下がる。その際に、周波数が下がりすぎると連鎖的に電源が脱落する。これが起きないようにしなければならない。
- 安定度制約
 - 電力の流れは発電所と需要者との間の位相のずれによる電圧差で起きる。
 - 電力需要が大きくなると位相差が大きくなる。距離が長くなると位相差が大きくなる。
 - ズレが大きくなりすぎて位相差が 90 度以上になると、電力供給システム全体が崩壊。

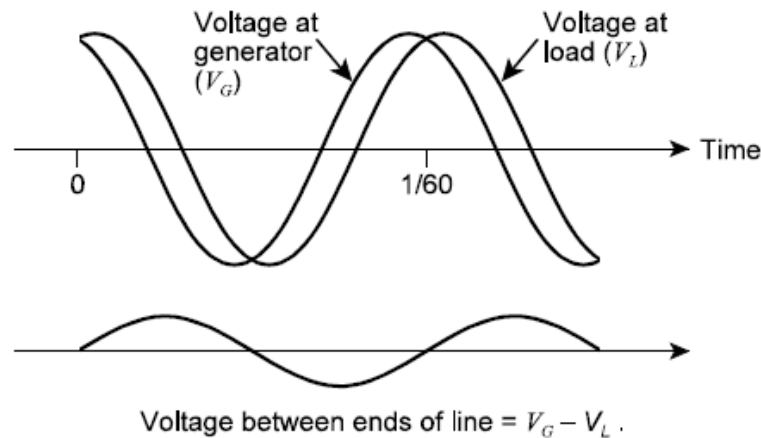


Figure 5-2.2, Stoft (2002)

交流電力潮流と直流近似

- 交流電力：有効電力（Active Power, P ），無効電力（Reactive Power, Q ），皮相電力（Apparent Power, S ）

$$S = P + jQ, j = \sqrt{-1}$$

- 交流システムにおいては有効電力と無効電力のそれぞれについて供給が消費に等しくなければならない。
- 最適電力潮流（Optimal Power Flow） = SCED（Security-Constrained Economic Dispatch）：送電網の制約の下での最適解を求める。
 - 交流最適潮流計算（ACOPF）：非線形かつ非凸であるので、解くのが困難。いまだに実用的な解法は存在しない。
 - 直流法最適潮流計算（DCOPF）：ACOPFの線形近似。全ての電圧の大きさが固定され、全ての電圧位相角がゼロに近い（ $\sin(\theta_i - \theta_j) \approx \theta_i - \theta_j$ ）と仮定。電力市場の約定計算において広く用いられている。

貯蔵不可能性と瞬時瞬時の需給バランス

- 貯蔵不可能性
 - 交流による電力供給システムでは、ネットワーク内の電力エネルギーは貯蔵できず、発電した電力は即座に消費されなければならない。
 - 揚水、蓄電設備等に貯蔵したエネルギーは交流に変換する必要がある。
- 瞬時瞬時の需給均衡の必要性
 - 交流送電線でつながっている電力供給システムは一体となって機能している。たとえ何百キロ離れていようともシステム内のすべての発電機は同期していなければならない。
 - 電圧と周波数を一定に保つためには、電力消費に見合った発電が瞬時瞬時に行われている必要がある。発電が消費量に追いつかない場合には、電力供給システム全体が崩壊し、全面的な停電が起きる。

顧客の需要量を供給者がコントロールできない

- 需要量のコントロールができない。
 - 発電量が需要を下回る場合には、需要をカットする必要がある。
 - 通常の市場では、価格を上げて需要量を減らすか、供給の割当によって、需要を制限する。
 - 電力市場では現在のところこれが不可能。系統運用者は一部の地域への電力供給をストップするといった対応（計画停電）を取らざるを得ない。
 - 病院、交通信号等の停電による損害が大きいものも停電の被害に遭うため、「停電の社会的費用（VoLL, Value of Lost Load）」は非常に大きい。
- 系統運用者が予備力・調整力を確保して、変動する需要に対応している。

Ⅲ. 日本の電力システム

電力供給の構成要素

● 発電

- 規模の経済性が大きくないので、競争による効率性の向上が期待できる。

● 小売

- 小売サービスの主体は料金の請求や徴収等。
- 小売での競争が十分機能すれば、効率性向上の便益が消費者に帰着する。

● 取引市場

- 電力エネルギー市場、需給調整市場、送電権市場
 - 送電の混雑料金 = 地域間値差
- 相対の長期先渡し契約や先物取引を用いてリスク・ヘッジ。

● 送配電

- 自然独占性が強く、規制が必要。

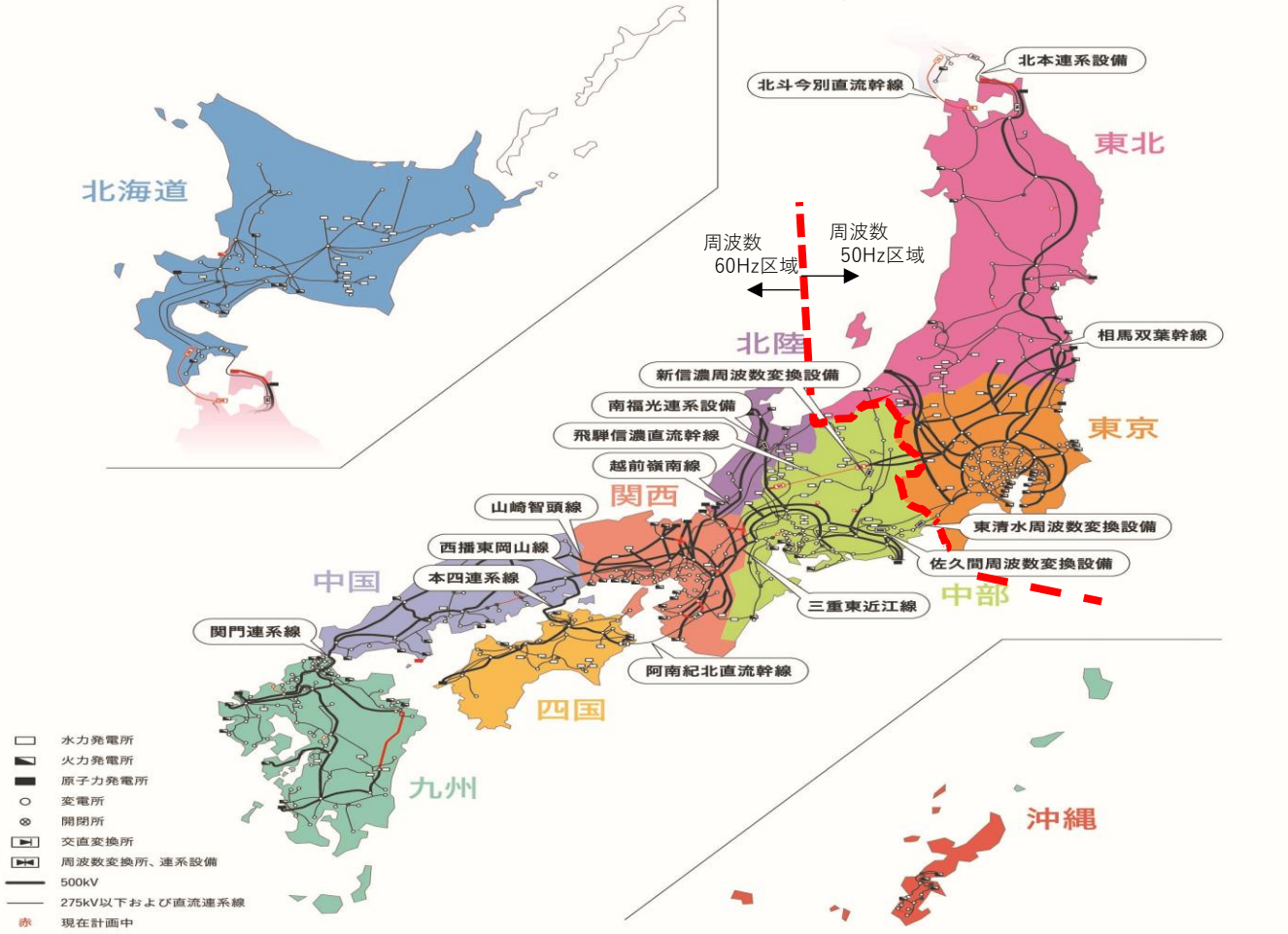
● 系統管理

- アンシラリー・サービス：需給バランス・サービス（予備力）、電圧維持サービス（無効電力）、ブラック・スタート・サービス
- ユニット・コミットメント・サービス：米国ISO市場では発電機の起動・停止を系統運用者が行うことができる。欧州と日本ではBG（バランシンググループ）が行う。
- 送電網の混雑管理：再給電。

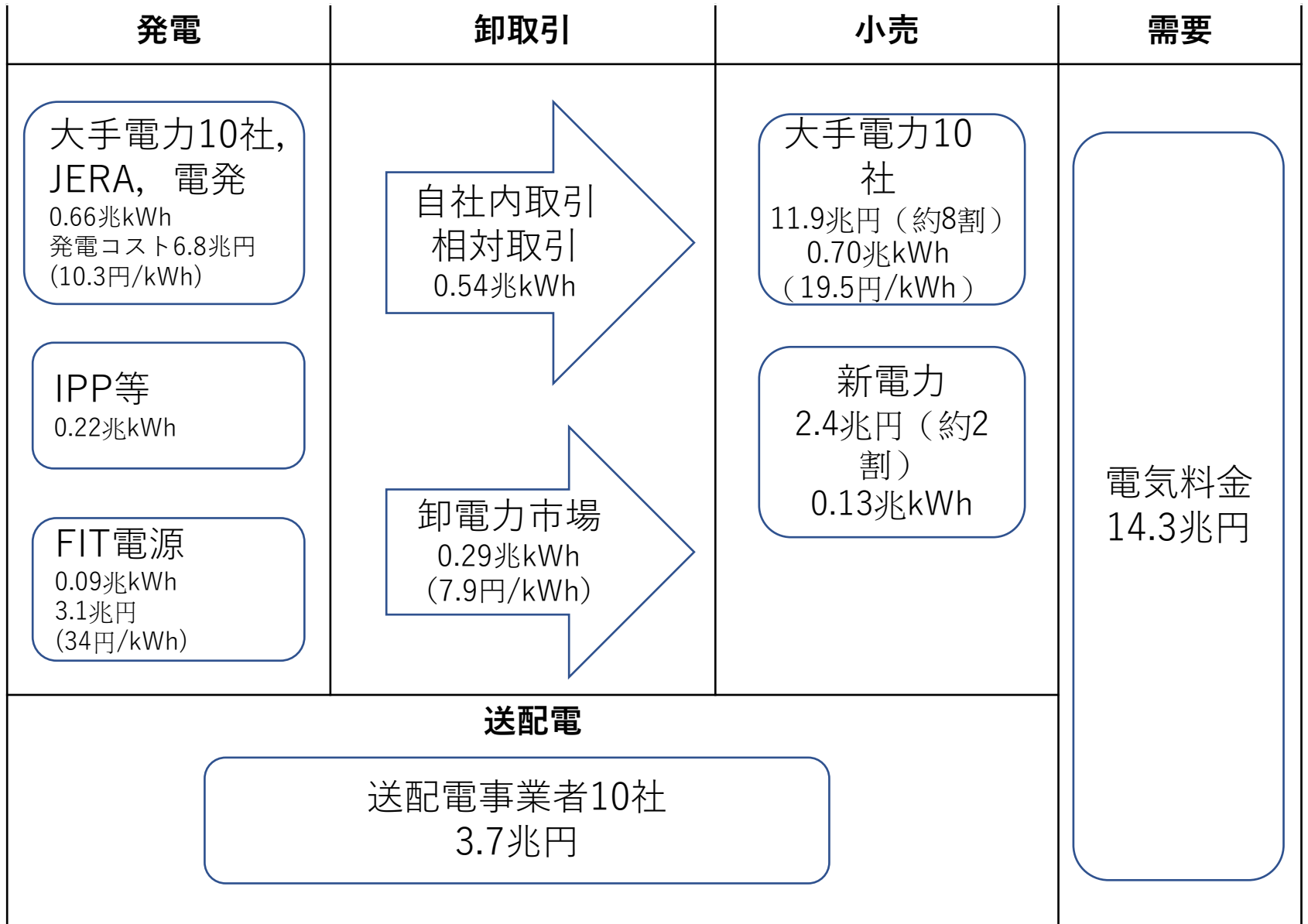
日本の電力システムの概要

● 広域連系系統〈連系線と各エリアの基幹送電線(上位2電圧)〉

吹き出しは連系線及び周波数変換所

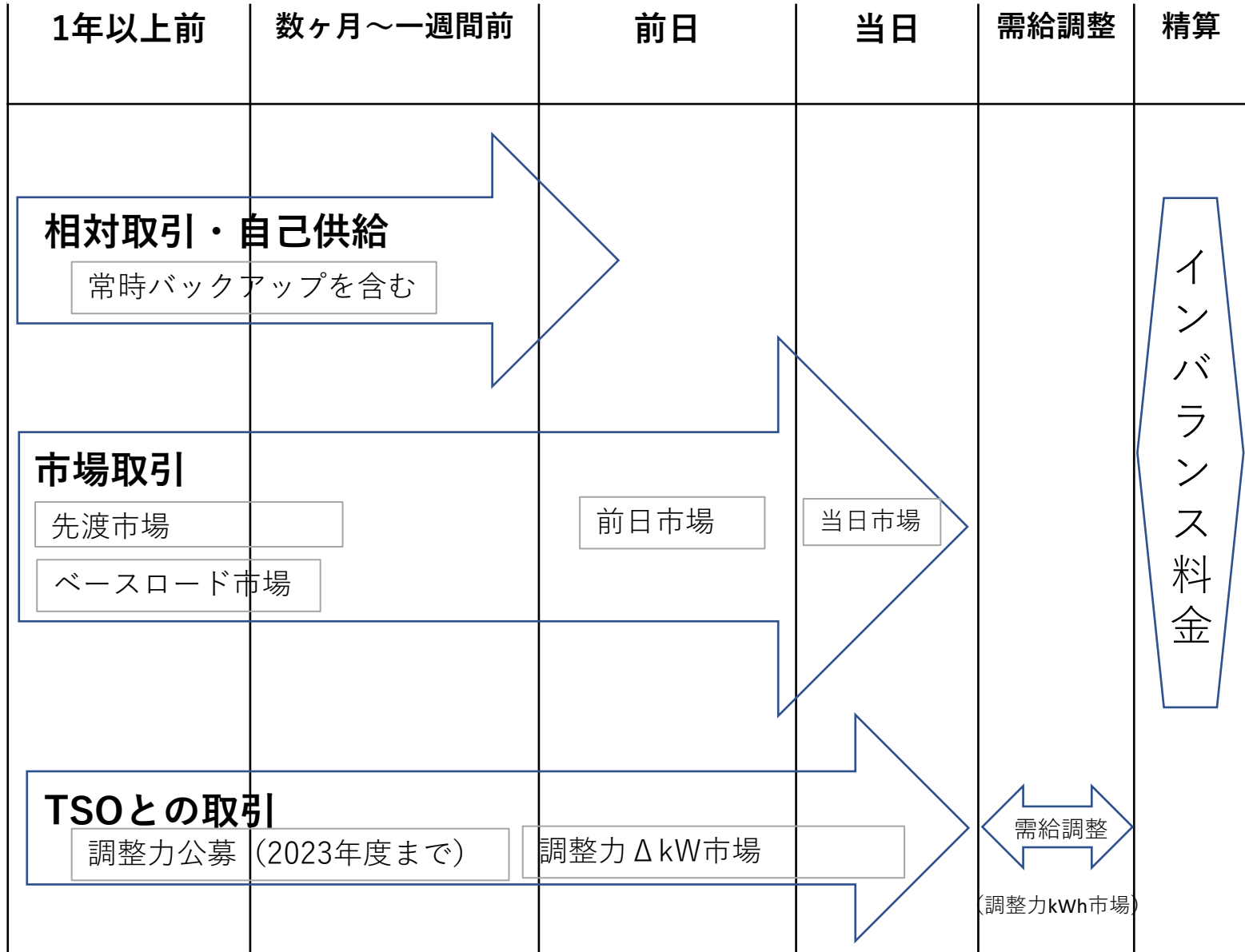


- 日本の電力システムは、10の電力会社がそれぞれの電力システムを持ち、沖縄電力を除く9の電力会社が連系線を介して近隣エリアの電力システムと接続している。
- 北海道電力、東北電力、東京電力エリアが50Hzであり、それ以外は60Hzである。これらの異周波数のエリア間には周波数変換所を介して接続している。
- 交流連系で同期しているのは3エリア：中西エリア（九州，四国，中国，関西，中部，北陸），東京東北エリア，北海道エリア



電力市場のタイムライン

1時間前 実需給



需給調整の仕組みと技術特性

- 電力のエネルギー市場と分離した需給調整市場（欧州，日本）
 - SOが発電&送電設備の故障，電力需要の変動，自然変動電源等に対応するための予備力を調達。
 - 電源をすみやかに動かせるだけの出力幅（ ΔkW ）が必要。設備容量をエネルギー供給と取り合う。
 - 供給者は電源とデマンドレスポンス。需要者は系統運用者（送配電事業者）。
 - 米国では同時最適化が行われている（同時市場）。
- 調整力の種類
 - EDC（Economic Dispatch Control：経済負荷配分制御）：数分先の予測需要に対して経済性を考慮して配分指令。5分程度。
 - LFC（Load Frequency Control：負荷周波数制御）：需給の不均衡を打ち消すように速い追従性を優先して指令。
 - ガバナフリー（Governor-Free）：発電機の回転速度（周波数）を一定に保つよう、同期発電機の調速機（ガバナ）が系統周波数の変化に追従して、発電出力を増減。
- 電源の起動停止計画が調整力（ ΔkW ）の確保と整合的になっている必要。
 - 日本では起動時間の長い発電機が多い。欧米のようなガスタービンはほとんどない。

	ΔkW を確保する（出力を調整できる状態にする） にあたり考慮すべき事項
コンバインド発電機	起動に4~5時間を要する
汽力発電機	起動に8~10時間を要する
揚水発電機	汲み上げに10~14時間を要する
（参考：欧米）ガスタービン	30分~2時間

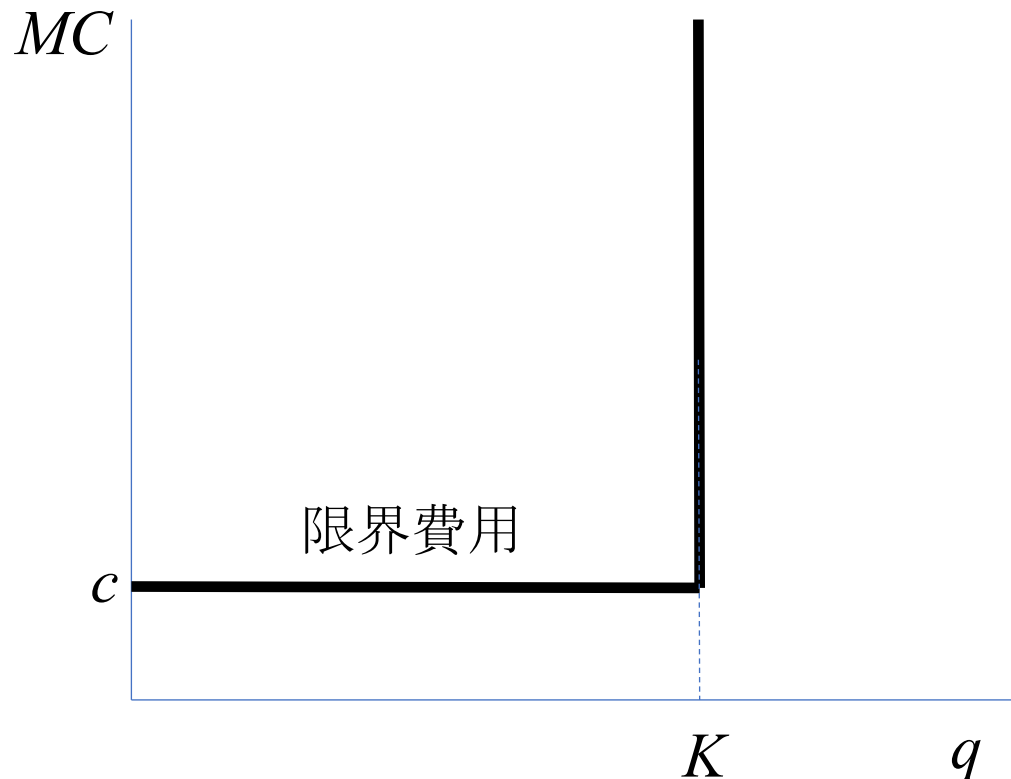
欧米のガスタービンは起動時間30分以内が多い

■ ※ 長期停止している場合はより時間を要する場合がある

IV. 発電の費用構造

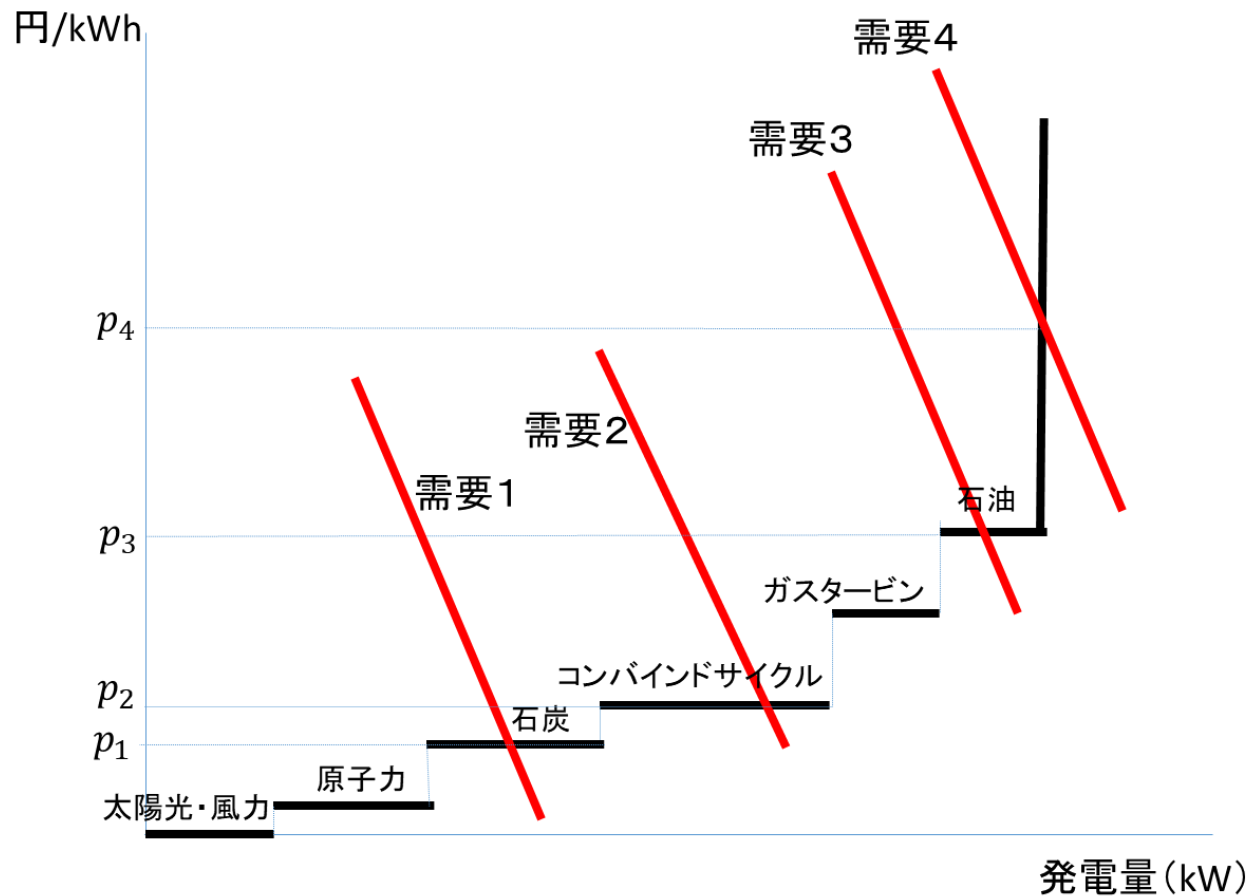
発電の費用構造

- 発電設備に大きな固定費用がかかる。
- 限界費用（燃料コスト等の変動費用）は発電量が発電設備容量（Power Generation Capacity）に達するまではほぼ一定。
- 容量を超えて発電することは不可能である



市場全体の費用構造：電力市場のメリットオーダー

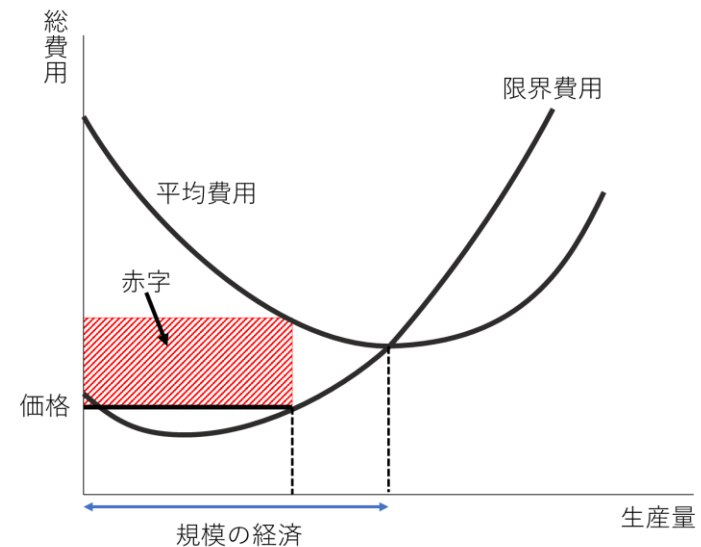
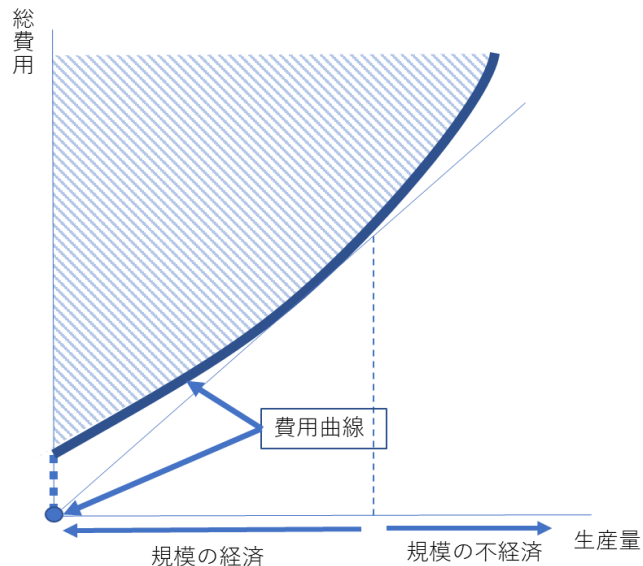
- 固定費と変動費用が異なる多種の電源が存在する。
- 電力システム全体の費用を最小化するように運用したい。



費用 Costs

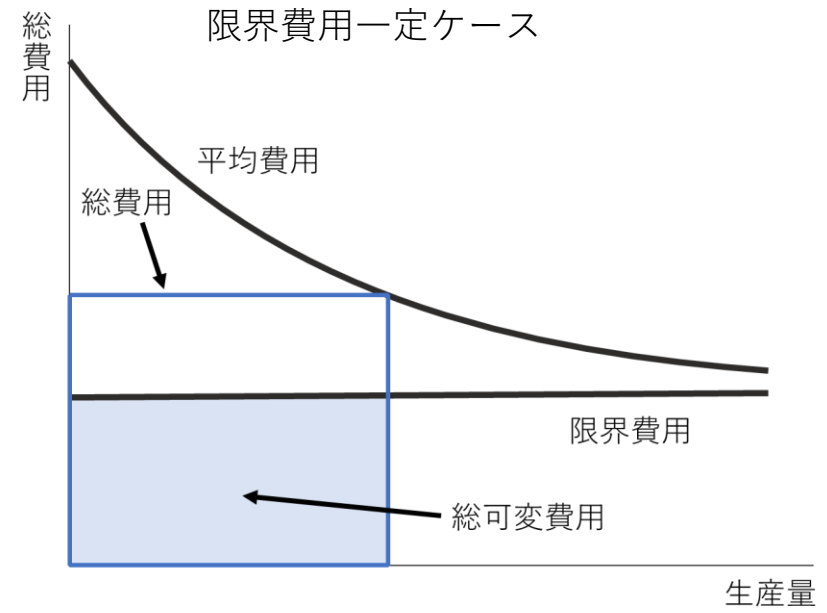
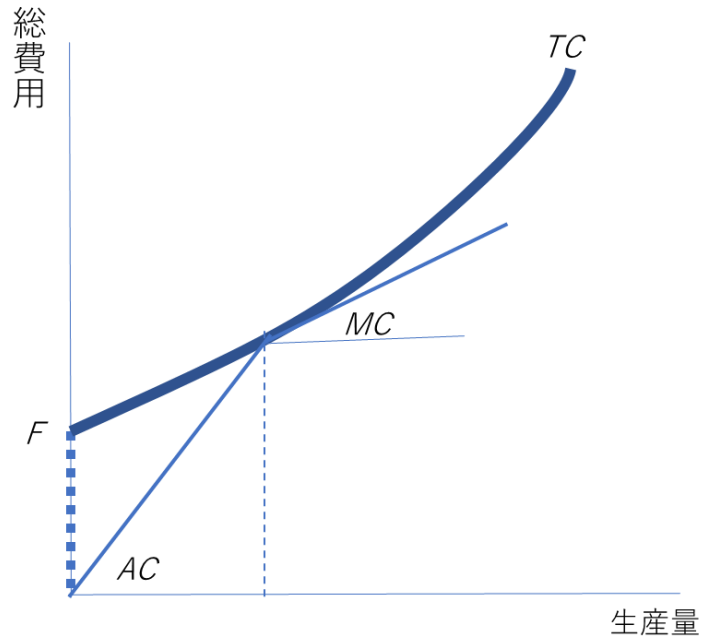
- 総費用 Total Costs : 例) $TC(Q) = 「Q \text{ kWh} \text{ の電力を生産するための総費用}」$
- 短期的には、固定されている費用（固定費用）と生産量に応じて変化する費用（可変費用、変動費用）がある。
- 可変費用 Variable Costs
 - 燃料費，材料費，輸送費等
- 固定費用 Fixed Costs
 - 設備，土地，間接諸経費等
- 例： $TC(Q) = cQ + F(K)$

- 準固定費用 Quasi-fixed costs : 例) 発電機の起動費用
- 埋没費用と回収可能費用 (Sunk Costs vs. Recoverable Costs)
- 平均費用，平均可変費用： TC/Q
 - 平均エネルギー費用：1 kWhの電力を生産する費用
- 限界費用 MC (= 限界可変費用)： $\Delta TC / \Delta Q$
 - 限界エネルギー費用：追加的に1 kWhの電力を生産する費用



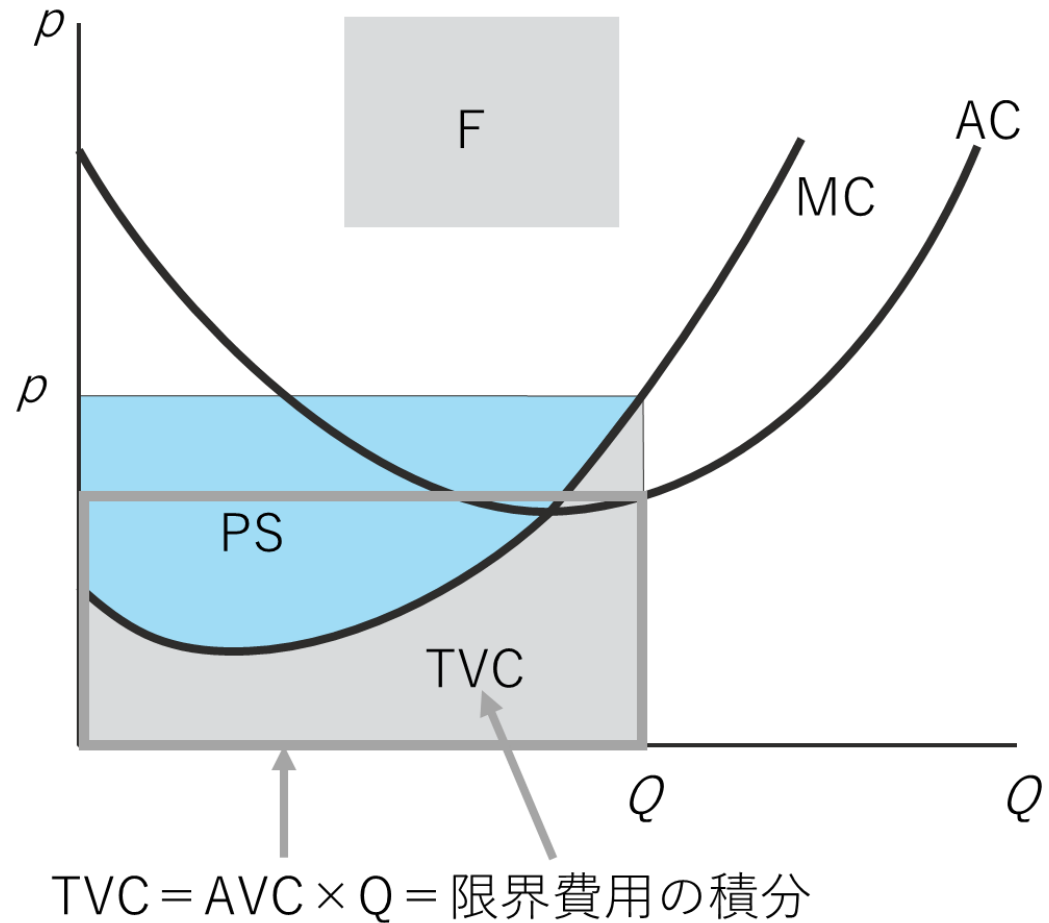
総費用, 平均費用, 限界費用, 固定費用の関係

- 総費用 (TC) = 固定費用 (F) + 総可変費用 (TVC)
- 平均費用 (AC) = TC/Q
- 限界費用 (MC) = dTC/dQ
 - 増分費用 (Incremental Cost) = $\Delta TC/\Delta Q$
- 平均可変費用
 - $AVC = TVC/Q = (TC - F)/Q$
 - $MC = \Delta TC/\Delta Q = \Delta TVC/\Delta Q = MVC$



参考：総可変費用（TVC）と供給曲線の下の面積

- 費用は限界費用を用いても、平均費用を用いても表現できる
 - 便利な方を使う
- $TVC = \int MVC \, d q = \int MC \, d q$
- $TVC =$ 限界費用曲線の下での面積（グレー部）
 $=$ 平均可変費用 \times 供給量（太枠長方形）
- PS（生産者余剰）
 $=$ 収入 - 総可変費用



参考：発電コストの推計値（日本）

- 発電コストの推計値は経済学における各種費用概念に対応しないことが多い。定義に遡って推計し直す必要がある。
 - 火力発電の短期限界費用 = 燃料費 + 運転維持費の一部
- 起動コスト等の期間を跨ぐ費用は重要な市場設計上の課題をもたらす。

電源	石炭火力	LNG火力	原子力	石油火力	陸上風力	洋上風力	太陽光 (事業用)	太陽光 (住宅)
政策経費		0.1	1.3	0.2	5.2	9	0.9	0.6
社会的費用	3.9	1.7	1.7	3.5				
燃料費	4.3	6.4	3.7	14.8				
運転維持費	2.3	1.2		3.3	4.7	8.6	3.2	2.5
資本費	2	1.3	4.2	4.9	10	12.5	8.8	14.6
発電コスト (円/kWh)	12.5	10.7	11.5 ~	26.7	19.8	30	12.9	17.7

基本政策分科会に対する 発電コスト検証に関する報告

令和3年9月

発電コスト検証ワーキンググループ

https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/pdf/cost_wg_20210908_01.pdf

参考：PJMにおける短期限界費用

電源タイプ	短期限界費用 (\$/MWh)	熱効率 (BTU/kWh)	変動運転維持費用 (\$/MWh)
ガスタービン	\$19.38	9.241	\$0.36
コンバインドサイクル	\$13.41	6.296	\$1.41
石炭	\$27.63	9.250	\$4.21
ディーゼル	\$96.01	9.660	\$0.25
原子力	\$0.00	NA	\$0.00
風力	\$0.00	NA	\$0.00
太陽光	\$0.00	NA	\$0.00

Monitoring Analytics (2021), Table 7-4, p. 338.

参考：発電コストの推計値（米国）

Table 5.1: Typical capital and operating costs for power plants. Note that these costs do not include subsidies, incentives, or any "social costs" (e.g., air or water emissions)

Technology	Capital Cost (\$/kW)	Operating Cost (\$/kWh)
Coal-fired combustion turbine	\$500 — \$1,000	0.02 — 0.04
Natural gas combustion turbine	\$400 — \$800	0.04 — 0.10
Coal gasification combined-cycle (IGCC)	\$1,000 — \$1,500	0.04 — 0.08
Natural gas combined-cycle	\$600 — \$1,200	0.04 — 0.10
Wind turbine (includes offshore wind)	\$1,200 — \$5,000	Less than 0.01
Nuclear	\$1,200 — \$5,000	0.02 — 0.05
Photovoltaic Solar	\$4,500 and up	Less than 0.01
Hydroelectric	\$1,200 — \$5,000	Less than 0.01

Book: Energy Markets, Policy, and Regulation

Seth Blumsack, Pennsylvania State University via John A. Dutton: e-Education Institute

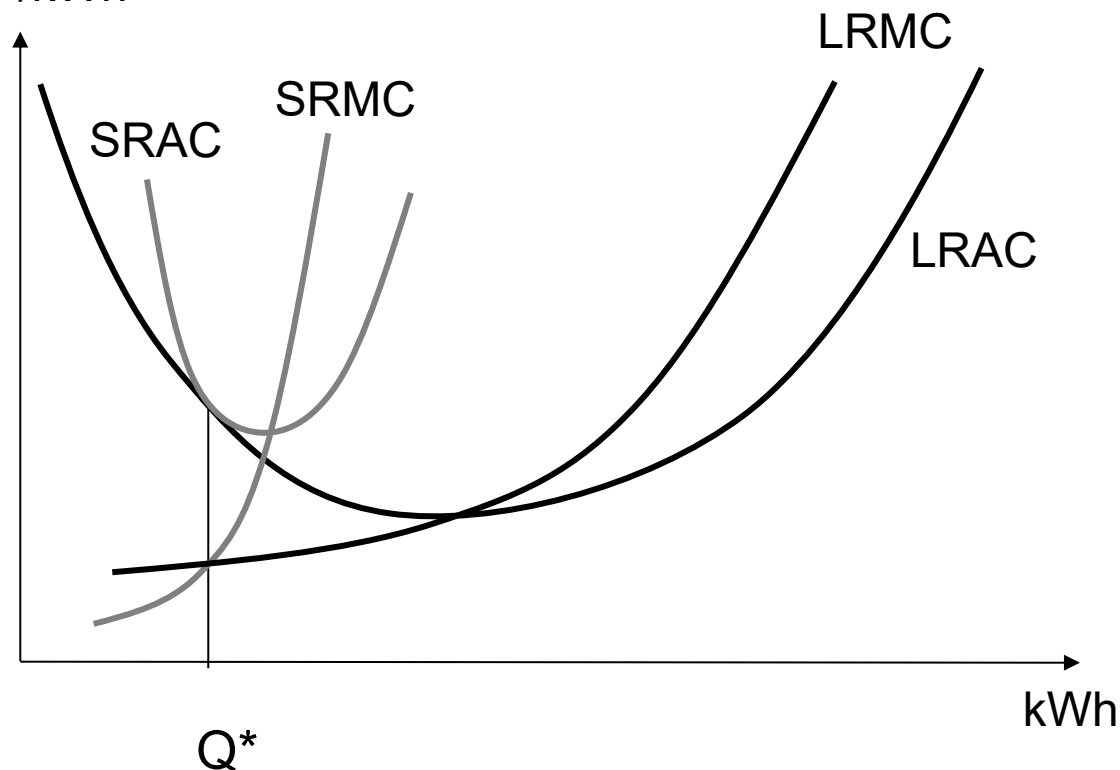
[https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Environmental_Engineering_\(Sustainability_and_Conservation\)/Book%3A_Energy_Markets_Policy_and_Regulation](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Environmental_Engineering_(Sustainability_and_Conservation)/Book%3A_Energy_Markets_Policy_and_Regulation)

長期費用と短期費用

- 短期：キャパシティーが固定
- 長期：キャパシティーが可変
- 長期発電費用：LCOE (Levelized Cost of Energy, 均等化発電原価)：投資の純現在価値がゼロになるエネルギー価格

$$\sum_{t=0}^T \frac{C_t + M_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=0}^T \frac{\text{LCOE} \times Q_t}{(1+r)^t} = \text{LCOE} \sum_{t=0}^T \frac{Q_t}{(1+r)^t}$$

コスト/kWh

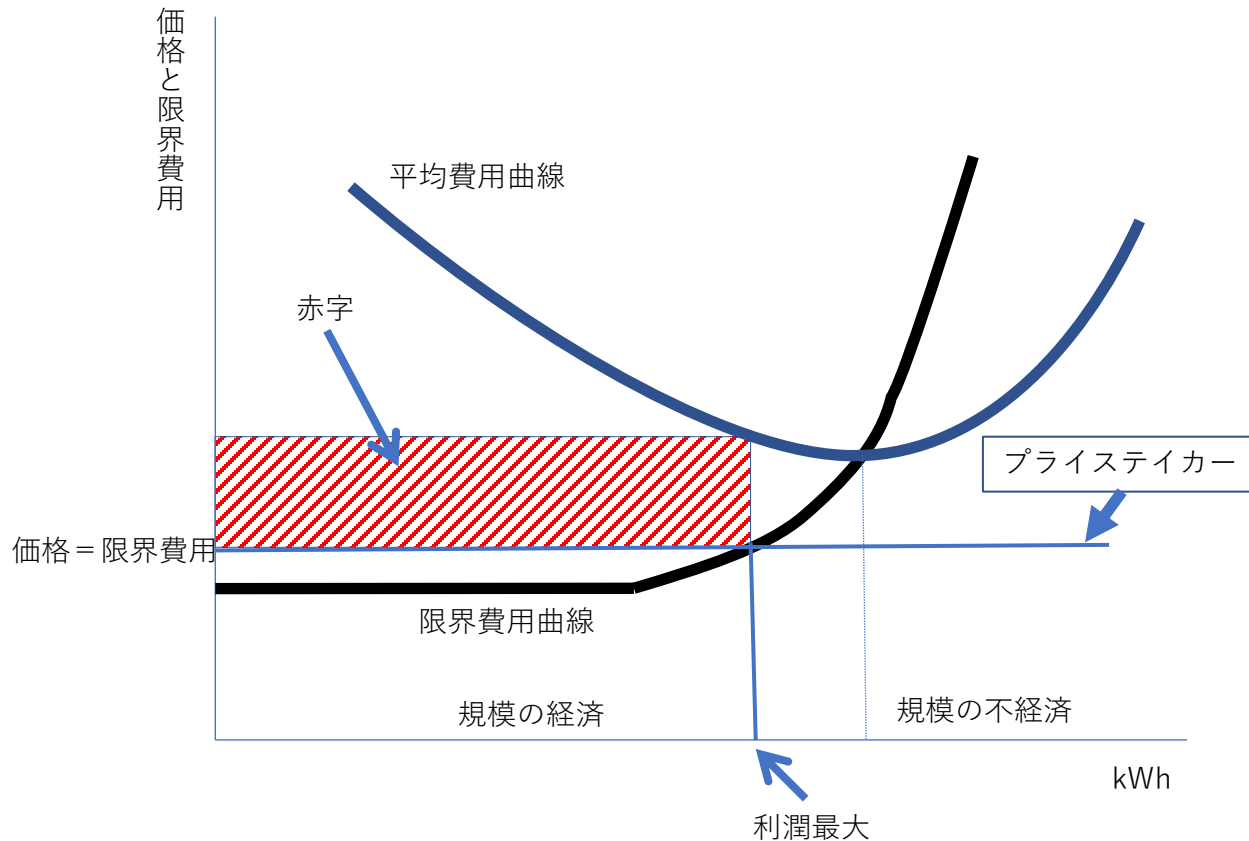


V. 利潤最大化と需給 均衡

競争市場における利潤最大化：価格 = 限界費用

- 競争市場：プライス・テイカー
- 競争的企業の利潤最大化：価格 = 限界費用

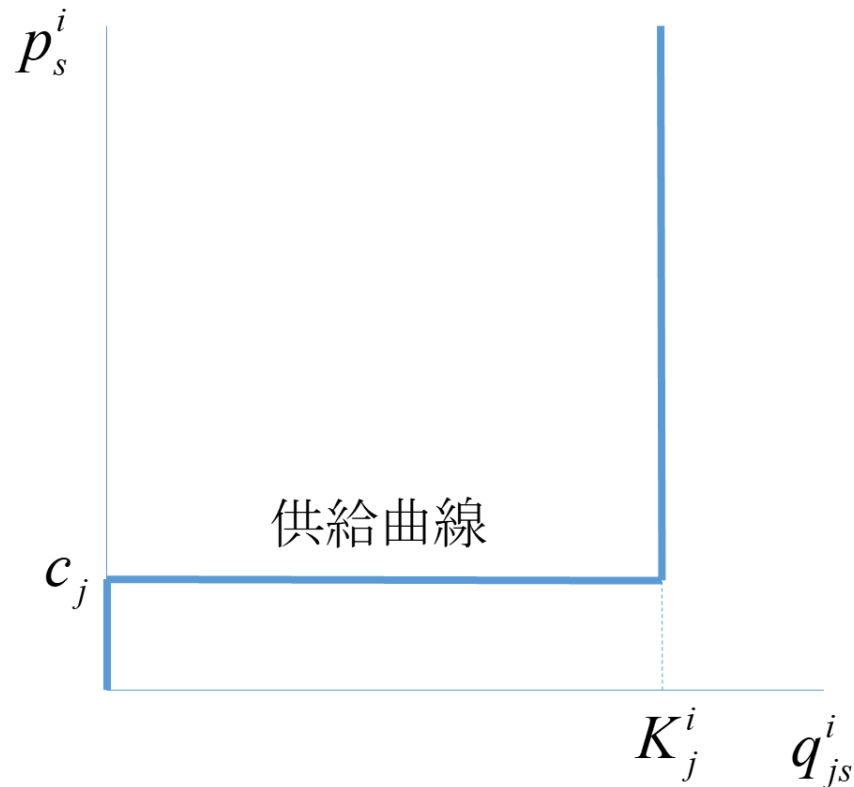
$$\max_Q \{pQ - C(Q)\} \Rightarrow p = C'(Q) = MC$$



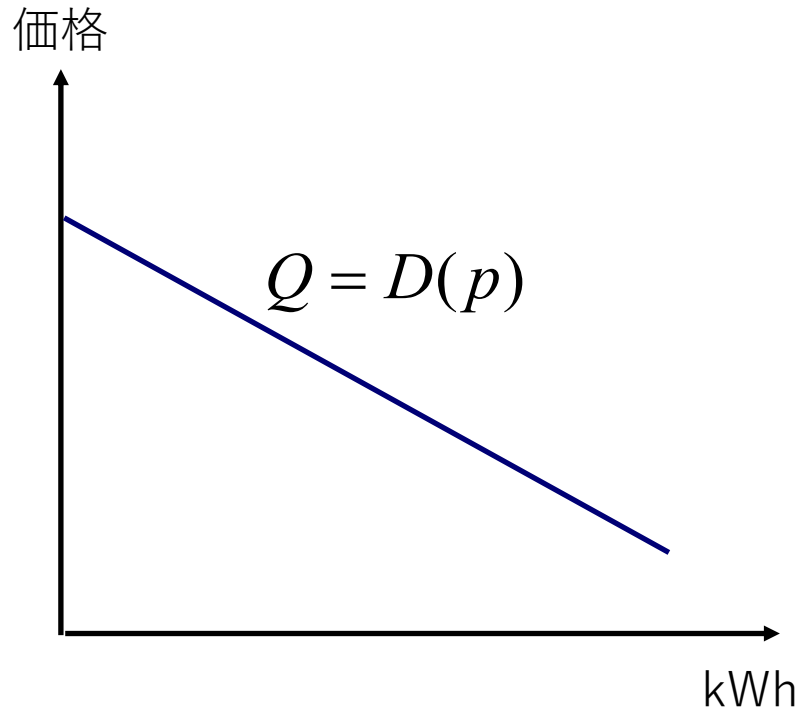
供給曲線

- 供給曲線は価格を所与と考えるときの利潤最大化供給量を表す。

限界費用一定 + キャパシティ制約のケースの供給曲線



需要曲線



- 消費者（プライス・テイカー）の効用最大化→需要曲線
- 市場需要曲線：個々の需要曲線の集計

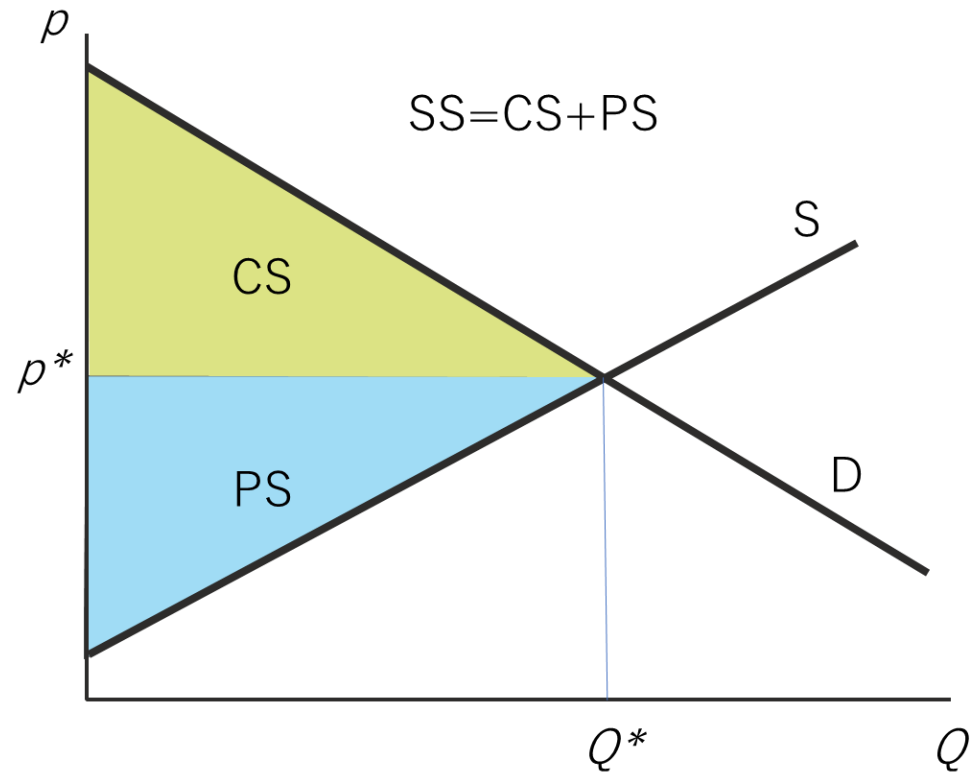
$$Q = D(p)$$

- 逆需要曲線:

$$p = D^{-1}(Q)$$

消費者余剰と生産者余剰

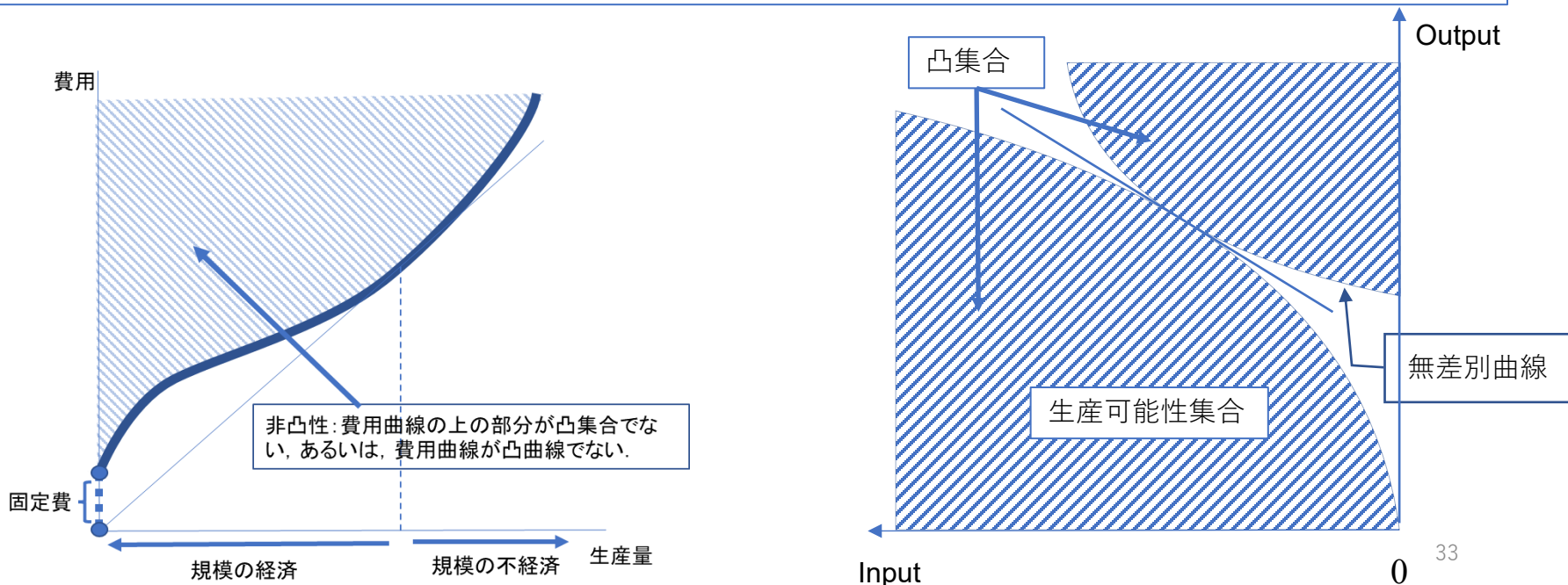
- 消費者余剰：需要曲線の左側の面積（消費者の便益）
 - 需要曲線の高さ = 支払意思額
- 生産者余剰：供給曲線の左側の面積（供給者の便益）
 - 供給曲線の高さ：機会費用 = 限界費用
- 社会的余剰 (SS)：消費者余剰 (CS) + 生産者余剰 (PS)
- 競争市場均衡は社会的余剰を最大化する。
- 電力取引市場アルゴリズムの目的関数 = 社会的余剰の最大化



VI. 電力市場における市場の失敗

厚生経済学の基本定理

- 厚生経済学の第一基本定理：主体間のすべての相互作用（interaction, goodsとbads）について価格がついて、完全競争均衡が成立していれば、パレート効率性が達成される。
 - パレート効率性：誰かの効用を犠牲にしなければ他の誰かの効用を高めることができない
 - 凸性の仮定は不要
- ただし、凸性が満たされていないと完全競争均衡が存在しない可能性がある。
 - 完全競争：すべての主体が価格を所与として行動する（プライステイカー）。
 - 完全競争均衡の存在：凸性（生産と消費）が満たされていれば、完全競争均衡が存在する。
 - 凸性が満たされていない場合には、競争均衡解は存在しない可能性がある。



厚生経済学の基本定理と市場の失敗

- 厚生経済学の（第一）基本定理：すべてのgoodsとbadsについて、完全競争均衡が成立 \Rightarrow パレート効率
- 厚生経済学の基本定理の仮定
 - すべてのgoodsとbadsについて価格がついている
 - 需要者、供給者双方がプライステイカー
 - すべての市場財について、売り手と買い手が同じ情報を持っている
- 大前提
 - 完全競争均衡が存在しなければ意味がない
 - 消費者と企業が合理的行動をしていると仮定されている
- パレート効率性は社会的な最適ではない可能性
 - 公平性の問題

市場の失敗

- 外部性：市場の欠落、価格がついていない goods and badsが存在する.
- 公共財：集合消費，非排除性
- 情報の非対称性
 - 情報の優位性を自分の有利になるように使う ⇒ 非効率性
 - 行動に関する情報の非対称性（モラル・ハザード），状態に関する情報の非対称性（逆選択、自己選択），当事者間の情報の非対称性 ⇔ 第三者（裁判所）との非対称性
- 非凸性：規模の経済，起動コスト，最低出力制限
- 公平
 - 貧困、犯罪
- 合理的でない行動
 - 行動経済学、経済心理学の研究
 - 人間は合理的でない行動をする
 - 非合理的な行動にはパターンがある

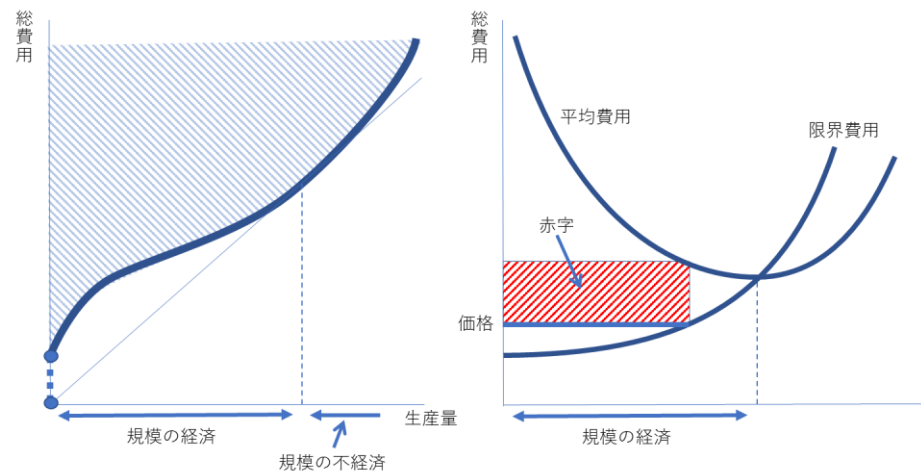
政府の失敗

- 経済活動は極めて複雑に入り組んでおり，政策担当者の理解を超えている可能性。
- 多数の利害関係者の中での調整が必要であり，複雑な政治的プロセスを経ることになる。政治的意思決定メカニズムは極めて不完全なシステムであり，最適性は保証されない。
- 市場の失敗と政府の失敗：
 - 介入した時の社会的便益と社会的費用をケース・バイ・ケースで評価しなければならない。
 - 政策対応の多様性：
 - 例) 住宅の品質の不確実性に伴う「市場の失敗」に対処する方策：
 - 建築基準法等の政府による品質規制
 - コンシューマー・ユニオンのような民間団体による品質情報の提供
 - 生産者による品質保証
 - 製造物責任（P L）制度の導入

電力市場における市場の失敗

- 需要量コントロール：各顧客の実需要を供給者がコントロールできない。
 - 通常の商品では供給力が不足する場合には、需要が削減される（割り当て、売り切れ等）。
 - 電力市場では超過需要（供給<需要）が発生すると、全面的な停電。
 - ⇒ 供給を需要に常時追従させる必要。対応策：逼迫時プライシング、デマンド・レスポンスの導入。
- 非凸性（nonconvexity）①：送配電網における規模の経済性
 - 競争の導入が不可能。
 - ⇒ 送配電は独占部門として公的規制。送配電分離。発電と小売には競争を導入。
 - ⇒ 送配電網投資に費用便益分析。
 - ⇒ 送電容量不足の際にはゾーン制や地点別限界価格制による価格差を発生させる。
- 非凸性（nonconvexity）②：発電における起動コスト、最低出力制約。
 - 競争的市場均衡が存在しない可能性。
 - ⇒ ブロック入札（欧州、日本）や3 part offer（限界費用、起動コスト、最低出力コスト）。混合整数計画法による最適化。

- 供給信頼性は公共財
 - ⇒ 一元的な系統運用。
 - ⇒ アデカシー、セキュリティ、レジリエンス確保のための政策介入
- 外部性：適切なプライシングができていない。
 - 例) 温暖化費用
 - ⇒ 排出権取引、炭素税
 - ⇒ 次善の政策：FIT, FIP



市場の失敗に対する政策対応（プレビュー）

- 送配電と系統運用における規模の経済性
⇒ 送配電は独占部門として公的規制。送配電分離。
- リアルタイムの需要をコントロールできない
⇒ 供給を需要に追従させる。逼迫時プライシングの政策介入。
- 供給信頼性は公共財
⇒ アデカシー，セキュリティ，レジリエンス確保のための政策介入
- 起動コスト，最低出力制約：非凸性
⇒ ブロック入札（欧州，日本），3 part offer（限界費用，起動コスト，最低出力コスト）と混合整数計画法による最適化（米国ISO）
- 温暖化費用のプライシングができていない：外部性
⇒ FIT，排出権取引，炭素税