

# Market Design for Electricity: Theory and Evidence

伊藤公一朗  
シカゴ大学公共政策大学院 准教授

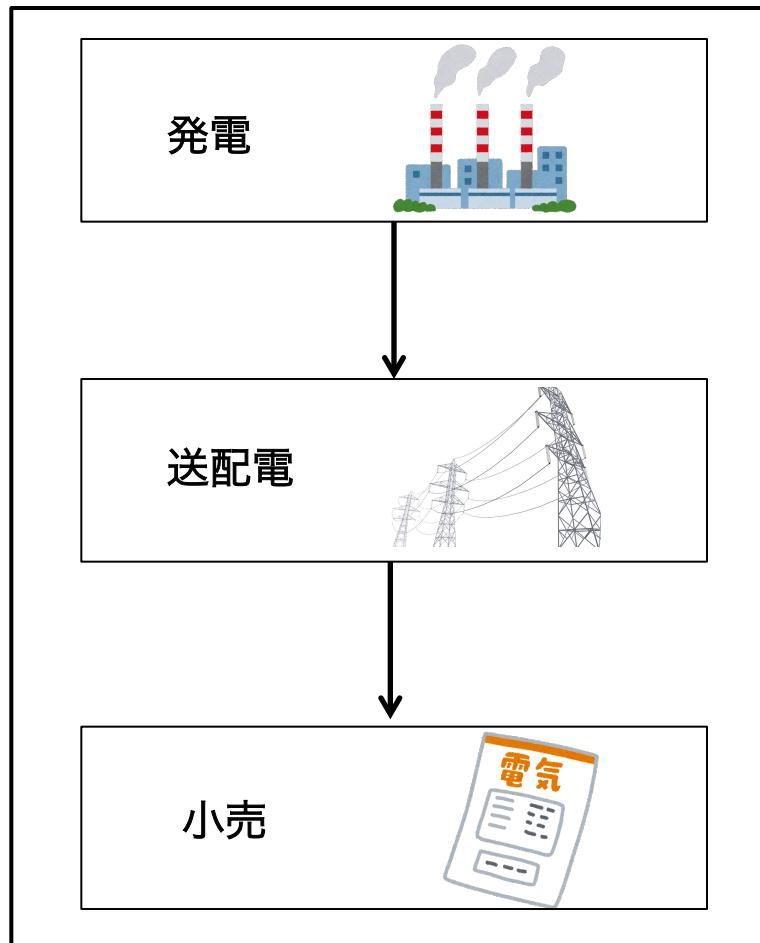
Email: [ito@uchicago.edu](mailto:ito@uchicago.edu)  
Web: [www.koichiroito.com](http://www.koichiroito.com)  
June 2020

# はじめに

- なぜ電力市場の経済分析が重要なのか
  - 電力は経済活動の基盤であり、市場規模も大きい重要な産業
  - 地球温暖化政策、原子力政策、再エネ政策など幅広い政策に関わる市場
  - 本稿で見るように、電力市場の設計には「ミクロ経済理論」が大きく関わる
- 本稿では近年の「電力市場設計の経済学」の発展をレビューする
  - 第一部：「市場を創設する」電力自由化の流れを概説
  - 第二部：電力市場設計で鍵となる数点の論点について理論と実証を交えて議論（時間の制約上、網羅的な論点整理ではないことに留意）

- 1990年代まで：垂直統合された地域独占企業による自然独占

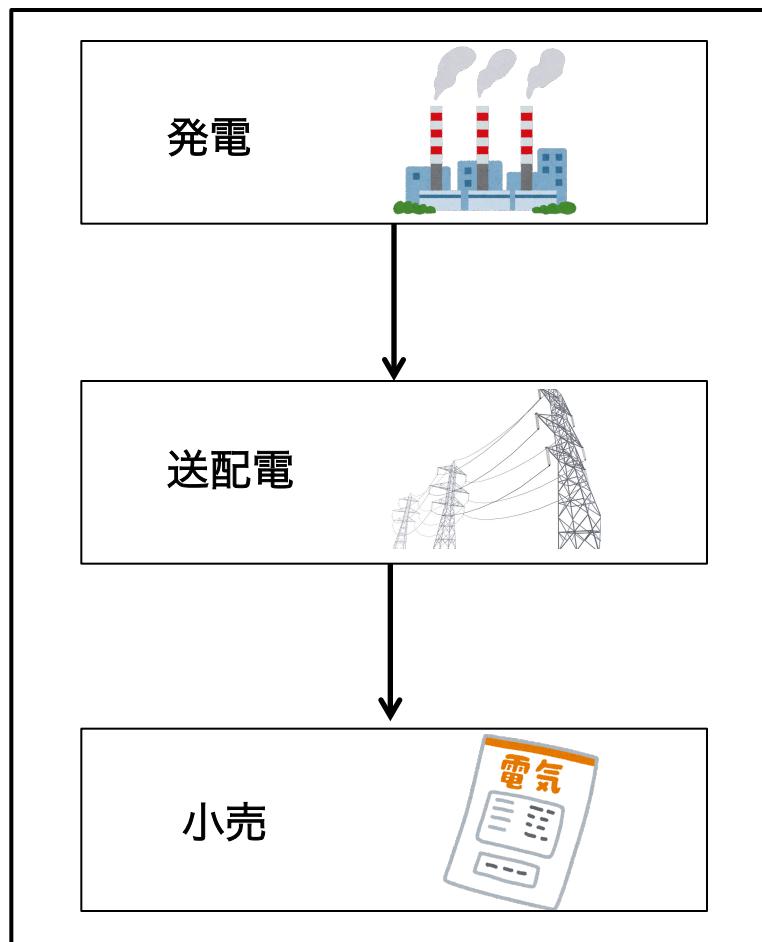
## 地域独占企業が垂直統合



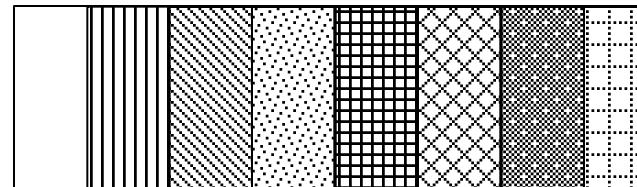
# 電力自由化：地域独占 → 送配電ネットワークへの公平なアクセスと市場創設

- 1990年代から：欧米で電力自由化：1) 送配電部門の分離→2) 市場の創設

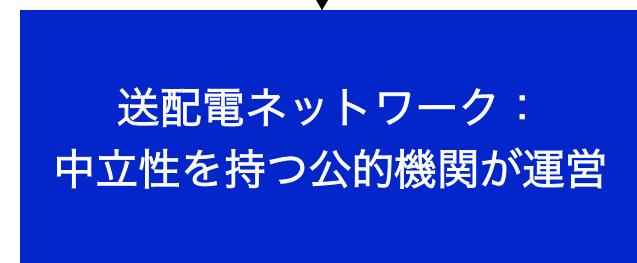
地域独占企業が垂直統合



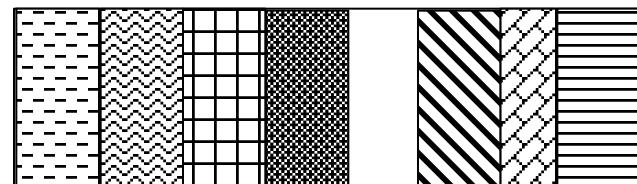
発電（卸売）市場：多数の企業が競争



送配電ネットワーク：  
中立性を持つ公的機関が運営



小売市場：多数の企業が競争



# 市場設計における論点

- 過去30年の間に各国で市場設計の試行錯誤が繰り返されてきた
- 今後の日本の電力市場設計を考える上で参考になる研究蓄積も多くある
- 本稿では以下の論点について議論したい
  - 1) 市場の基盤インフラ「送配電網」への公平なアクセスを実現する設計とは
  - 2) 電力自由化は「発電費用」や「電力価格」の低下をもたらすのか
  - 3) 価格が動的に変化するDynamic Pricingを導入する経済的便益とは？
  - 4) 先物取引市場とリアルタイム市場をどのように設計すべきか
  - 5) 地域間で断絶した市場を統合する、市場統合の便益とは？

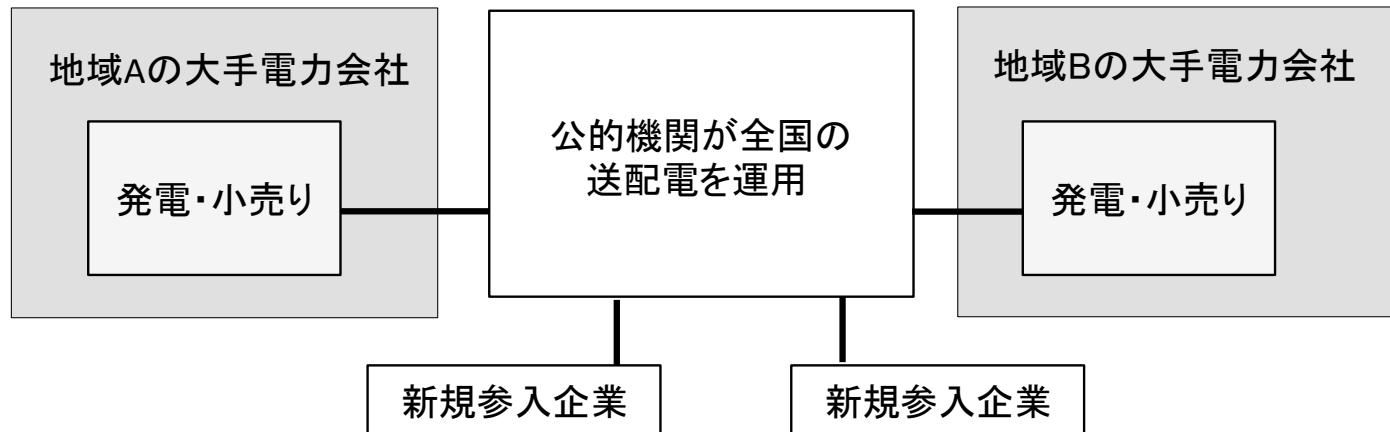
# 論点1) 市場の基盤インフラ「送配電網」への公平なアクセスを実現する設計とは

- 発送電分離が不可欠 (Joskow 1997, 2006)
  - 発送電分離=正確には「送配電部門」を「発電」と「小売」から分離すること
  - 「送配電網の運営」は大手電力会社から公的機関へ移行する必要がある
  - 発電や小売も抱える大手電力会社が送電網運営を行えば自由競争が阻害される
  - 発送電分離を行わずに市場創設をしても競争は進まない
- 欧米と日本の発送電分離の違い

	欧米諸国	日本
発送電分離時期	1990年代	2020年
改革の順序	発送電分離→市場創設	市場創設→発送電分離
送配電システムの運営	ISOなど公的機関	地域独占企業の子会社

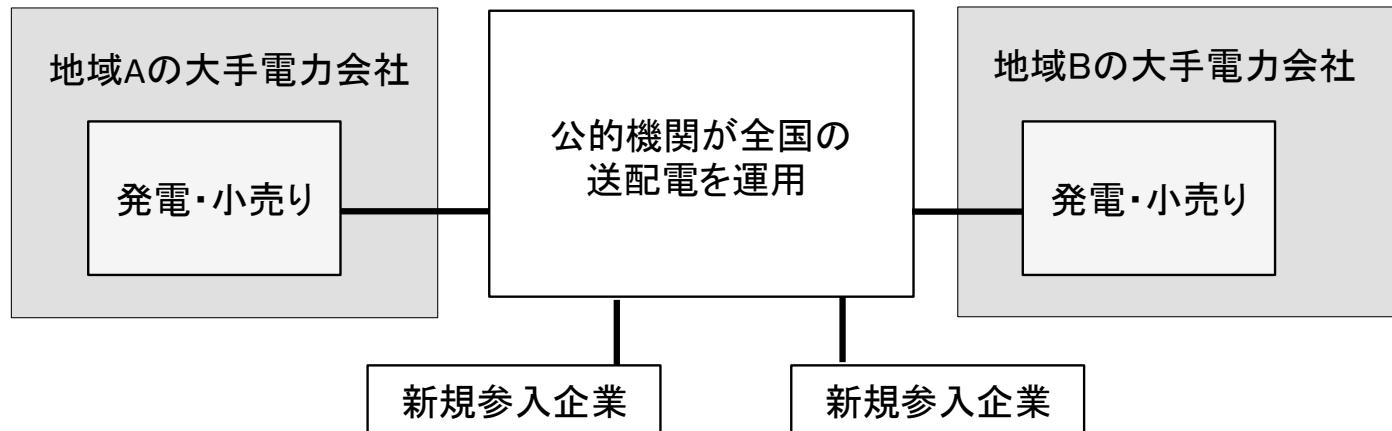
## 論点1) 市場の基盤インフラ「送配電網」への公平なアクセスを実現する設計とは

- 公的機関を設立し、独立性と網羅性を確保する「運用分離」が国際的な主流

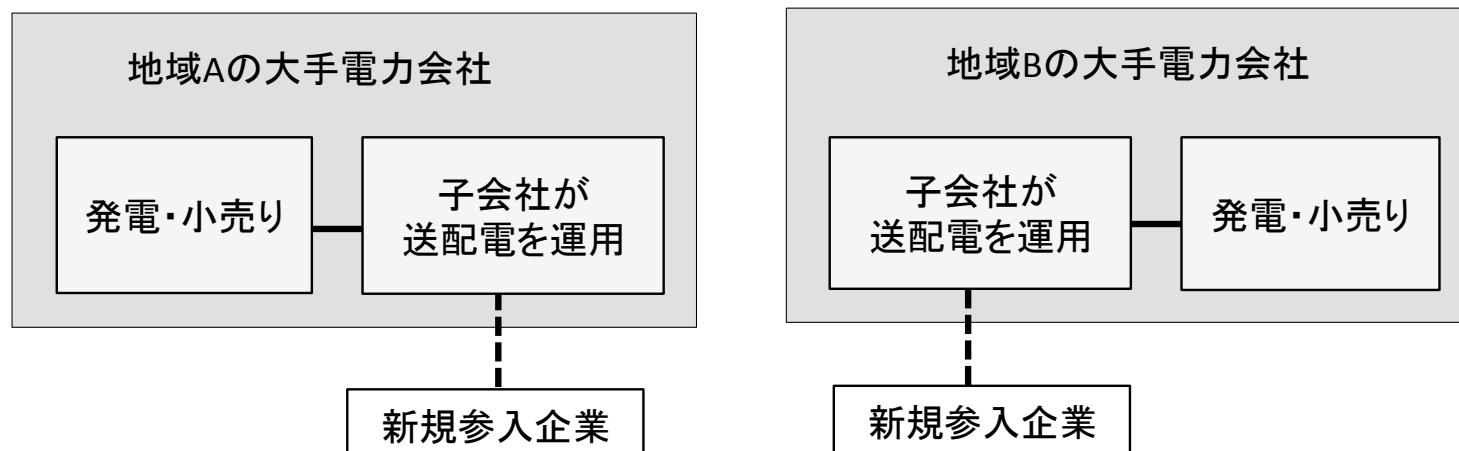


# 論点1) 市場の基盤インフラ「送配電網」への公平なアクセスを実現する設計とは

- 公的機関を設立し、独立性と網羅性を確保する「運用分離」が国際的な主流



- 日本の「法的分離」は独立性と網羅性の確保に課題が残る



## 論点1) 市場の基盤インフラ「送配電網」への公平なアクセスを実現する設計とは

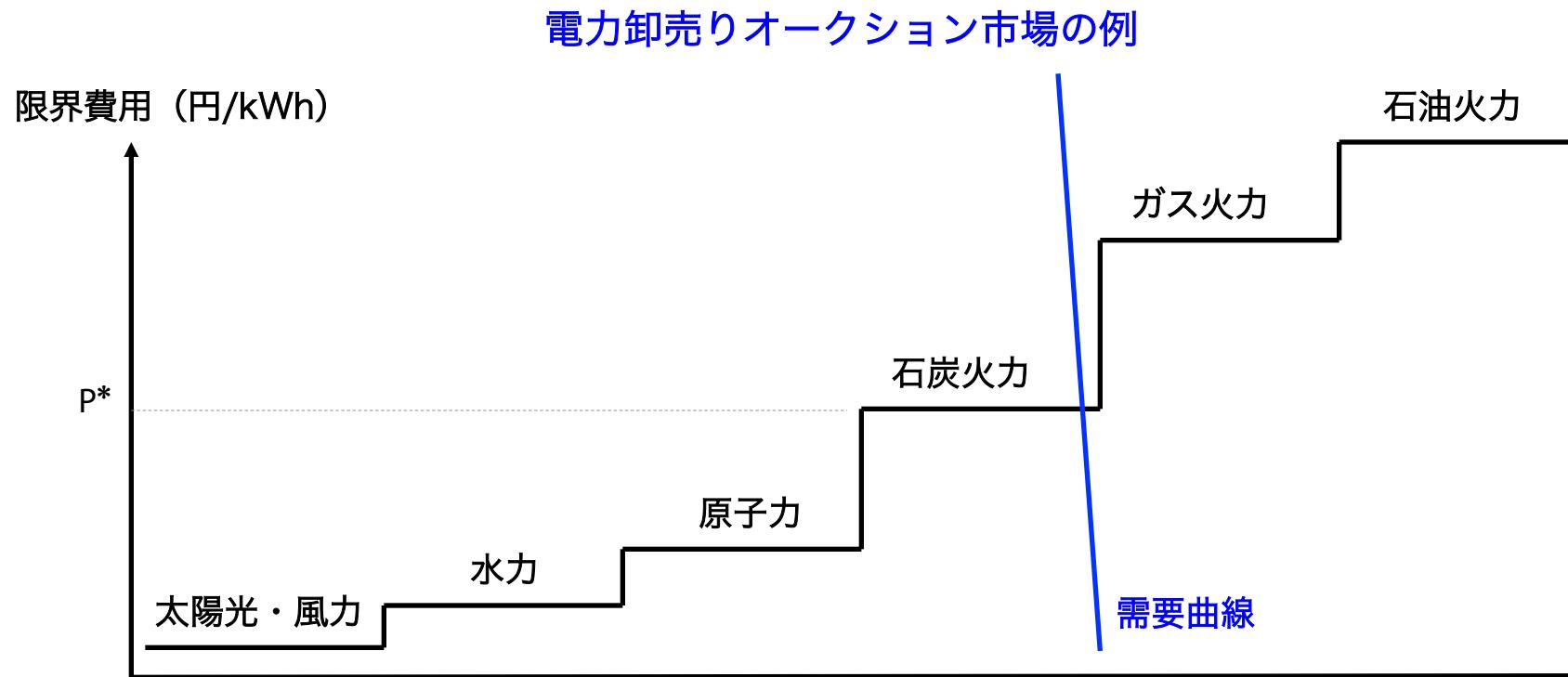
- 送配電運営の独立性に関する研究：Newbery(2001)
  - 発送電分離を行った英國と、行わなかったスコットランドを比較
  - 英国では新規参入の発電事業者が多数誕生
  - スコットランドでは新規参入者があまり生まれなかった
- 送配電運営の網羅性に関する研究：Gowrisankaran, Reynolds, Samano (2016)
  - 太陽光発電など再生可能エネルギーの問題は発電量が不確実で一定でないこと
  - 1つの解決策は広い送電網ネットワークで多用な場所の太陽光発電を含むこと

# 市場設計における論点

- 本稿では以下の論点について議論したい
  - 1) 市場の基盤インフラ「送配電網」への公平なアクセスを実現する設計とは
  - 2) 電力自由化は「発電費用」や「電力価格」の低下をもたらすのか
  - 3) 価格が動的に変化するDynamic Pricingを導入する経済的便益とは？
  - 4) 先物取引市場とリアルタイム市場をどのように設計すべきか
  - 5) 地域間で断絶した市場を統合する、市場統合の便益とは？

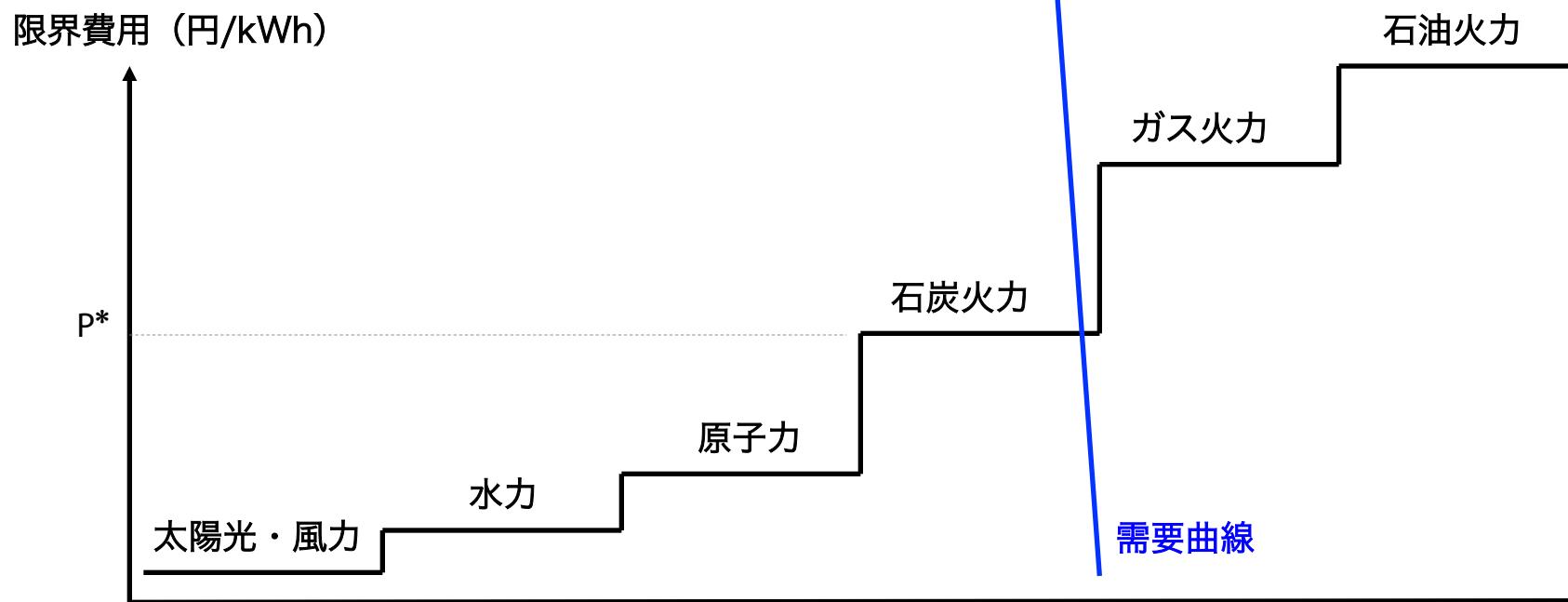
## 論点2) 電力自由化は「発電コスト」や「電力料金」を下げるか？

- 「発電コスト」については理論的にも・実証的にも明確な答えが出ている
  - 自由化前の「総括原価方式」は費用削減のインセンティブが非常に弱い
  - 自由化後の卸売市場では高コストの発電所はオークション市場で落札できない
  - 自由化が発電費用を下げた実証結果 (Fabrizio, Rose, and Wolfram 2007, Cicala 2021)



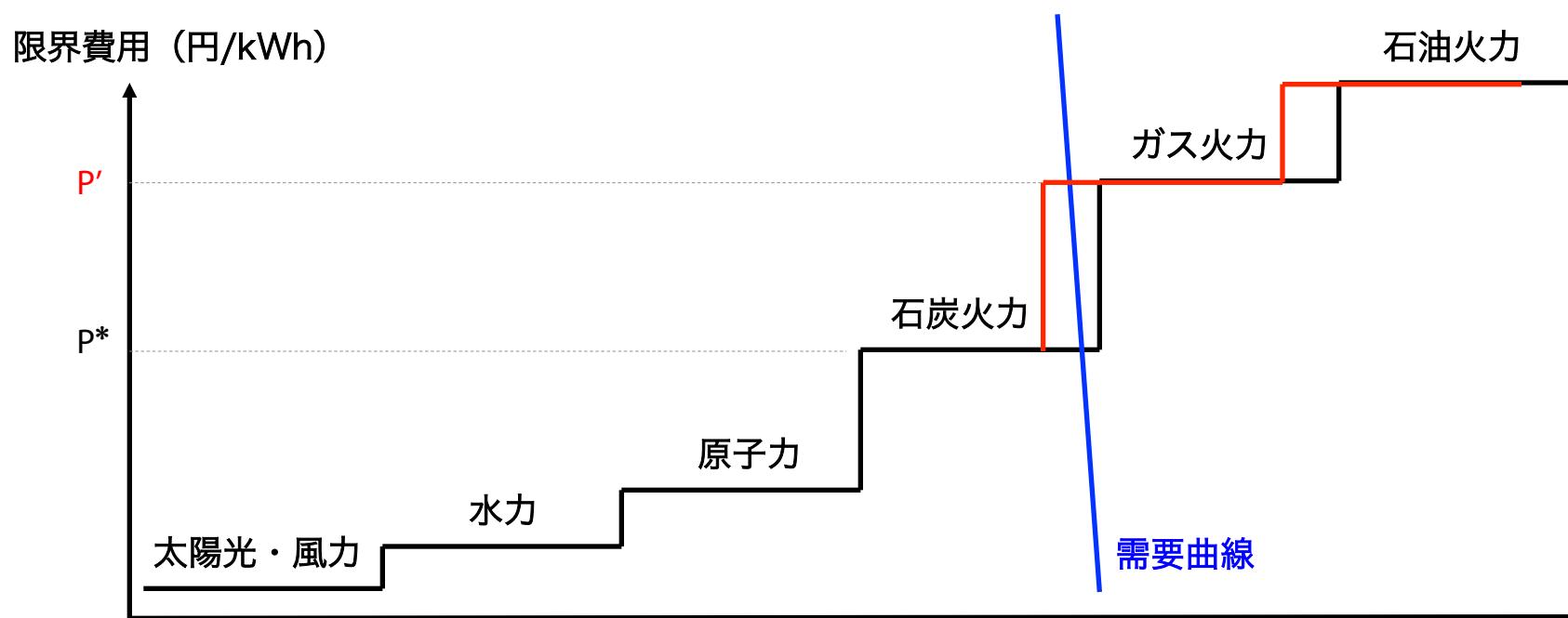
## 論点2) 電力自由化は「発電コスト」や「電力料金」を下げるか？

- 「価格」への影響は理論的にも実証的にも、議論はより複雑になる
- 視点1) 規制手法と市場手法にはそれぞれに不完全性がある
  - 規制（総括原価方式）の弱点：費用最小化のインセンティブが弱い
  - 卸売市場の弱点：[市場支配力](#)を持つ企業が発電量を減らし価格を上げる危険性



## 論点2) 電力自由化は「発電コスト」や「電力料金」を下げるか？

- 「価格」への影響は理論的にも実証的にも、議論はより複雑になる
- 視点1) 規制手法と市場手法にはそれぞれに不完全性がある
  - 規制（総括原価方式）の弱点：費用最小化のインセンティブが弱い
  - 卸売市場の弱点：**市場支配力**を持つ企業が発電量を減らし価格を上げる危険性

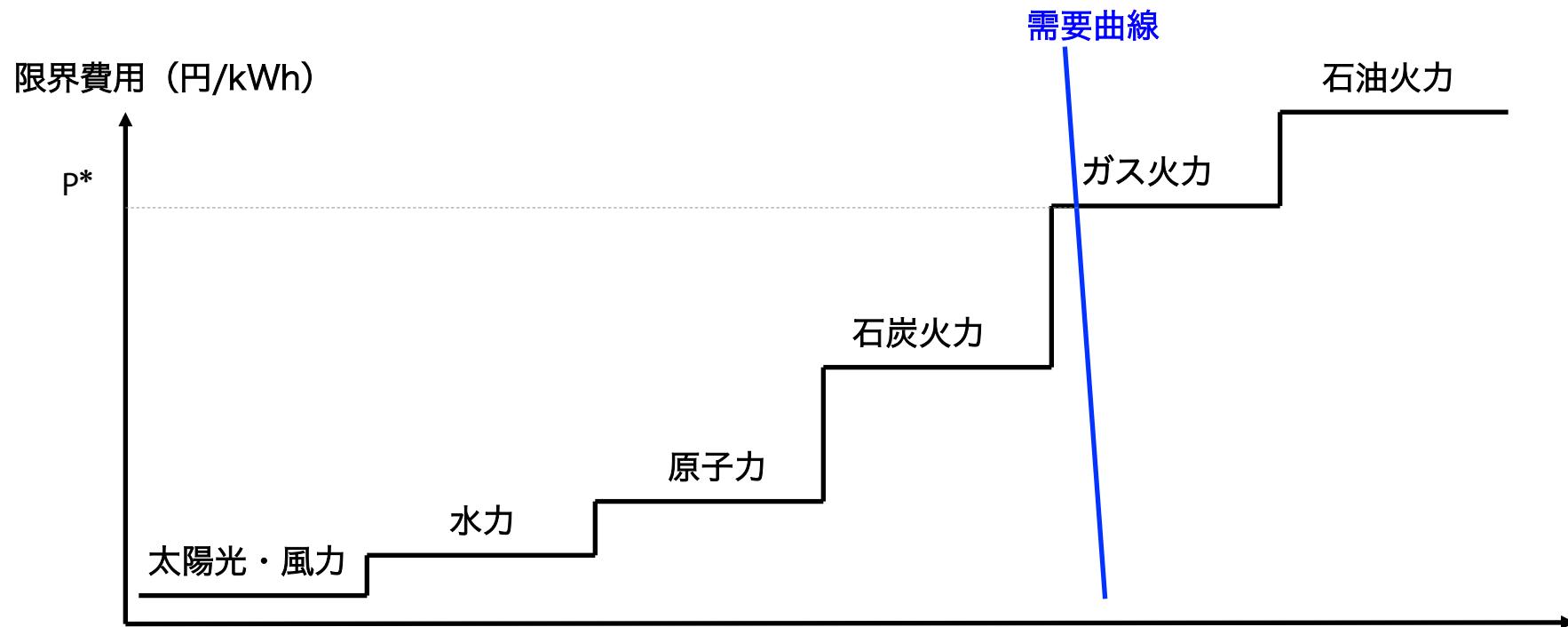


## 論点2) 電力自由化は「発電コスト」や「電力料金」を下げるか？

- Ito and Reguant (2016)
  - スペイン・ポルトガル市場のデータを用いて市場支配力を推定
  - 市場支配力を持つ数社がピーク時に発電を減らし、価格を上げたことを示した
- 市場支配力の問題を是正する方法は現在も模索されている
  - 1) 需要の価格弾力性を上げる（後に詳述）
  - 2) オークション市場開始前の先物契約促進で市場支配力を弱めることが可能
  - 3) 規制当局や経済学者による卸売市場の監視

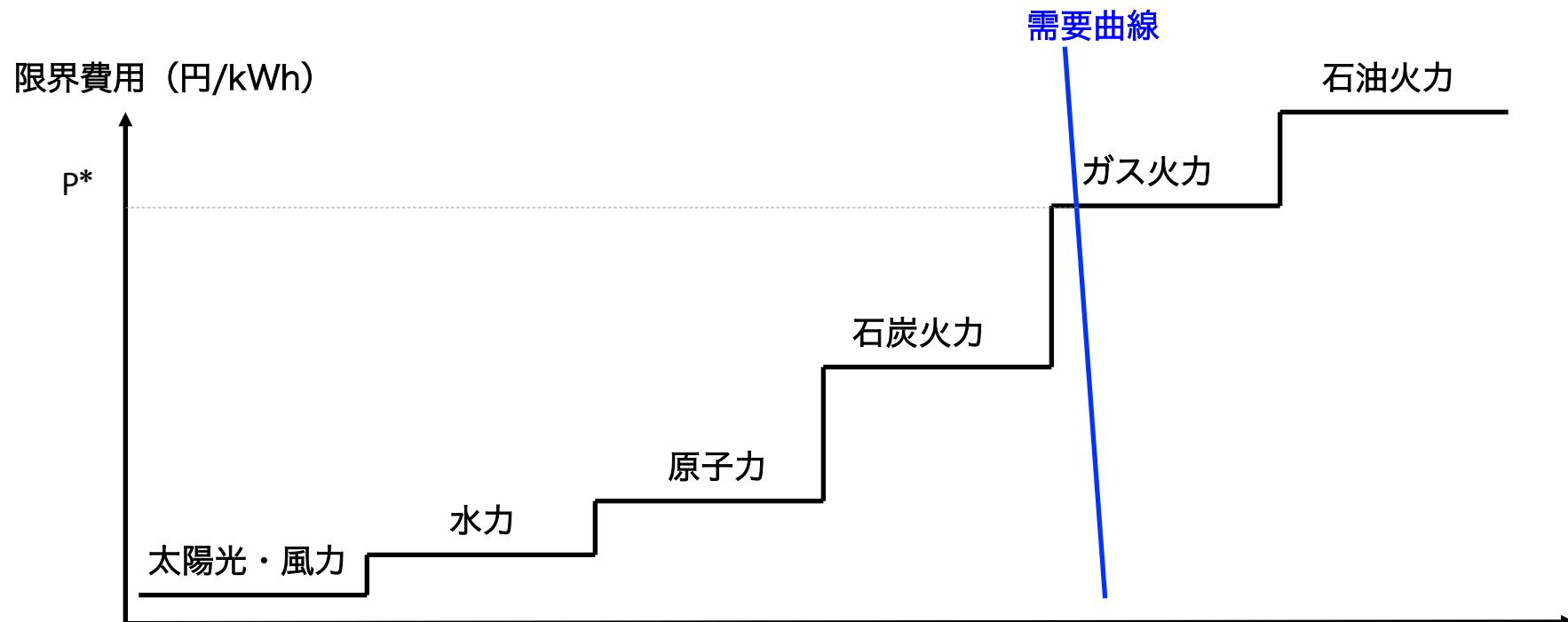
## 論点2) 電力自由化は「発電コスト」や「電力料金」を下げるか？

- 視点2) 「価格」への影響を考える上では「平均費用」と「限界費用」が鍵に
  - 規制（総括原価方式）では、価格は発電の「平均費用」を反映する
  - 卸売市場では、価格は発電の「限界費用」を反映する
  - 自由化は、「価格=平均費用」から「価格=限界費用」という移行をもたらす



## 論点2) 電力自由化は「発電コスト」や「電力料金」を下げるか？

- 視点2) 「価格」への影響を考える上では「平均費用」と「限界費用」が鍵に
  - 「限界費用 < 平均費用」であれば自由化は価格を下げる可能性が高い
  - 「限界費用 > 平均費用」であれば自由化は価格を上げる可能性が高い
  - また、自由化市場では電力価格が「限界電源の費用変動」に影響を受けやすい

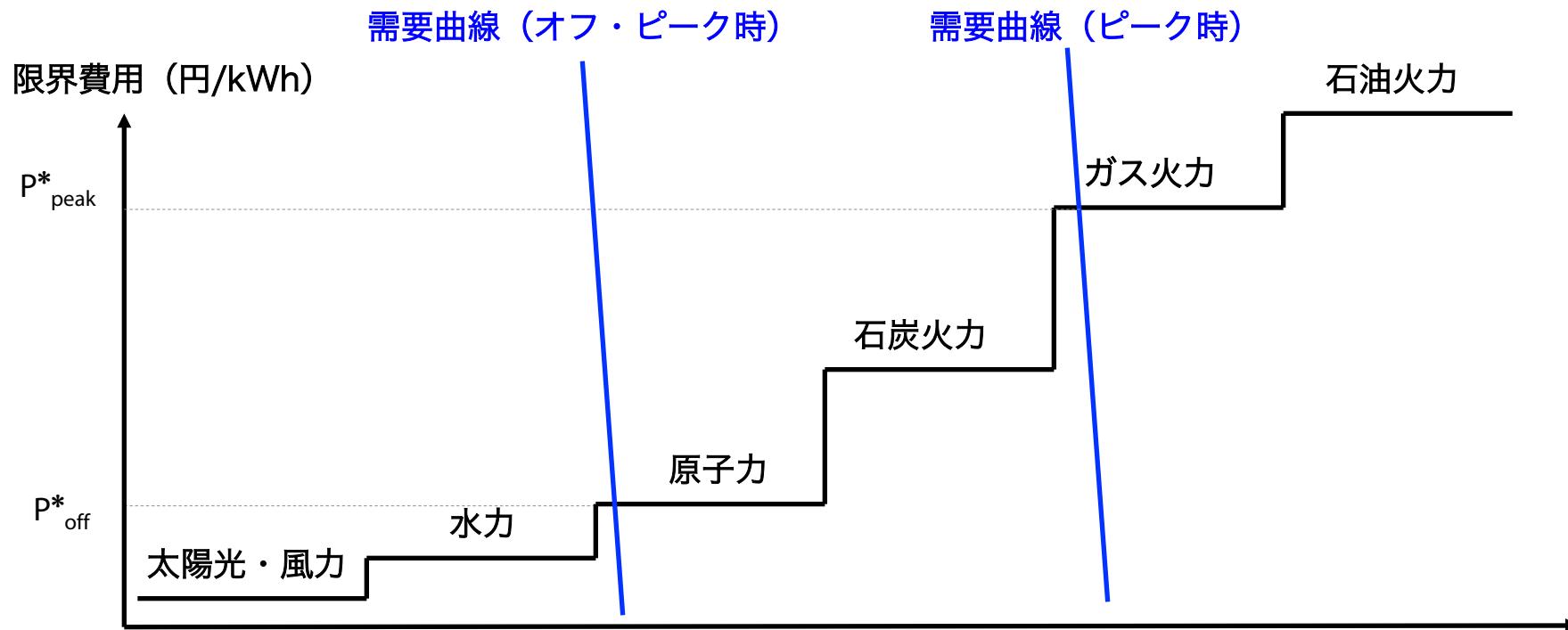


# 市場設計における論点

- 本稿では以下の論点について議論したい
  - 1) 市場の基盤インフラ「送配電網」への公平なアクセスを実現する設計とは
  - 2) 電力自由化は「発電費用」や「電力価格」の低下をもたらすのか
  - 3) 価格が動的に変化するDynamic Pricingを導入する経済的便益とは？
  - 4) 先物取引市場とリアルタイム市場をどのように設計すべきか
  - 5) 地域間で断絶した市場を統合する、市場統合の便益とは？

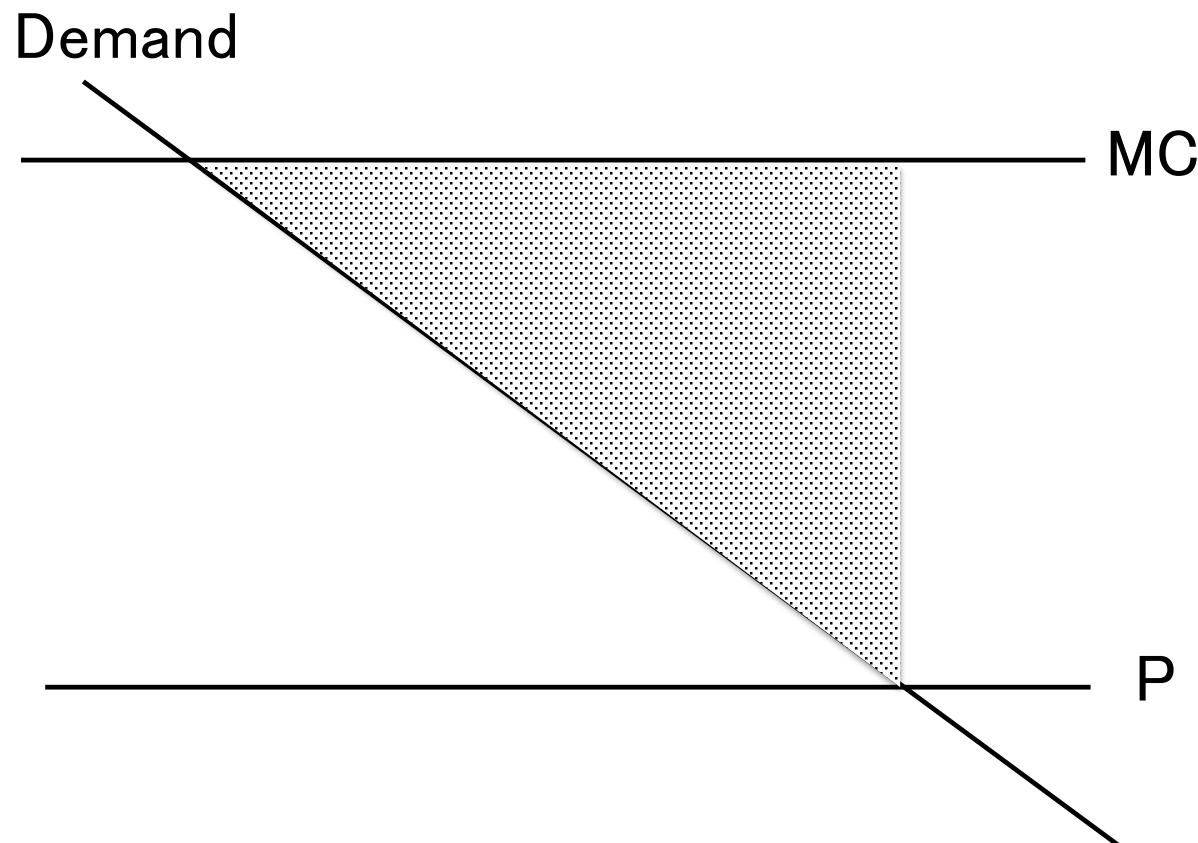
## 論点3) 価格が動的に変化するDynamic Pricingを導入する経済的便益とは?

- 電力の「限界費用」はピーク需要時とオフピーク需要時で大きく異なる
  - よって、「限界価格=限界費用」を達成する最適価格は( $P^*_{\text{peak}}$ ,  $P^*_{\text{off}}$ )である
  - しかし多くの消費者は「時間に応じて変動しない価格」を払っている



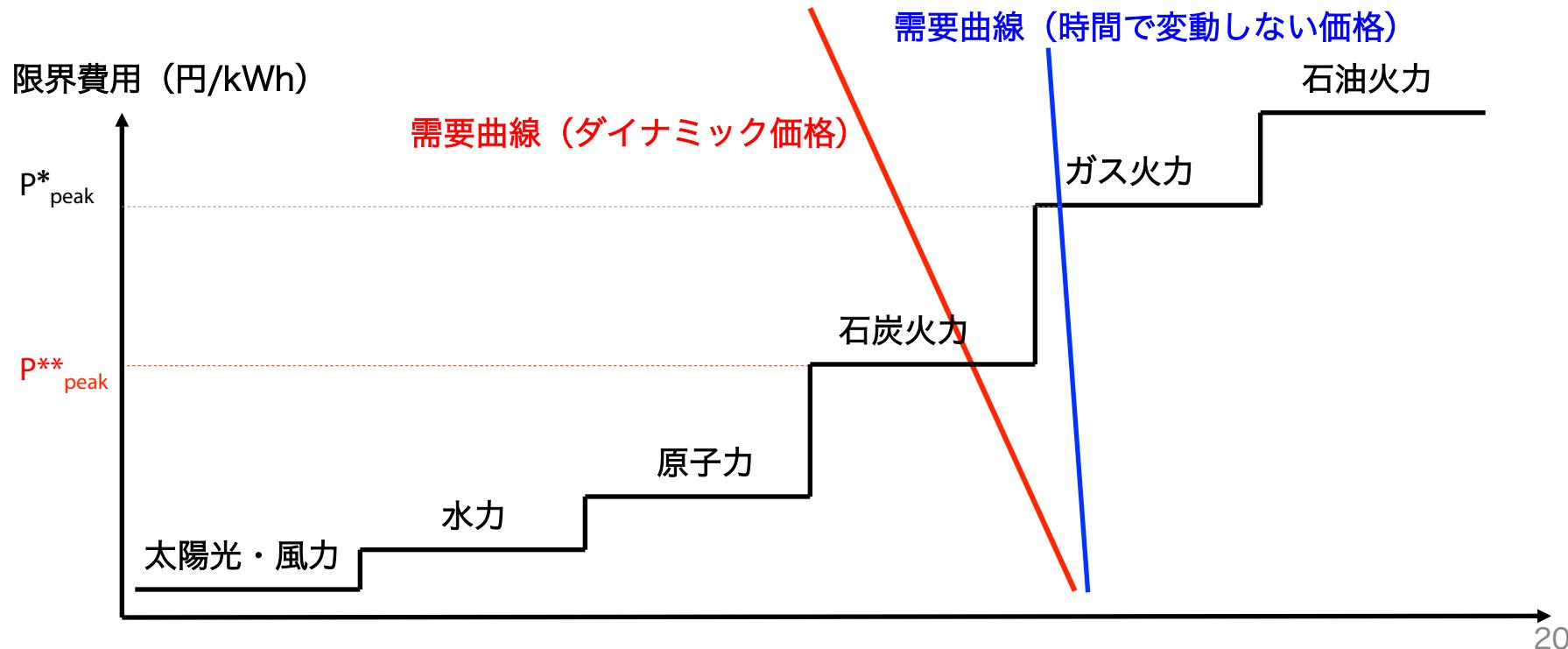
## 論点3) 価格が動的に変化するDynamic Pricingを導入する経済的便益とは?

- 1) 限界価格が限界費用から乖離することによる「死荷重」を減らす



## 論点3) 価格が動的に変化するDynamic Pricingを導入する経済的便益とは?

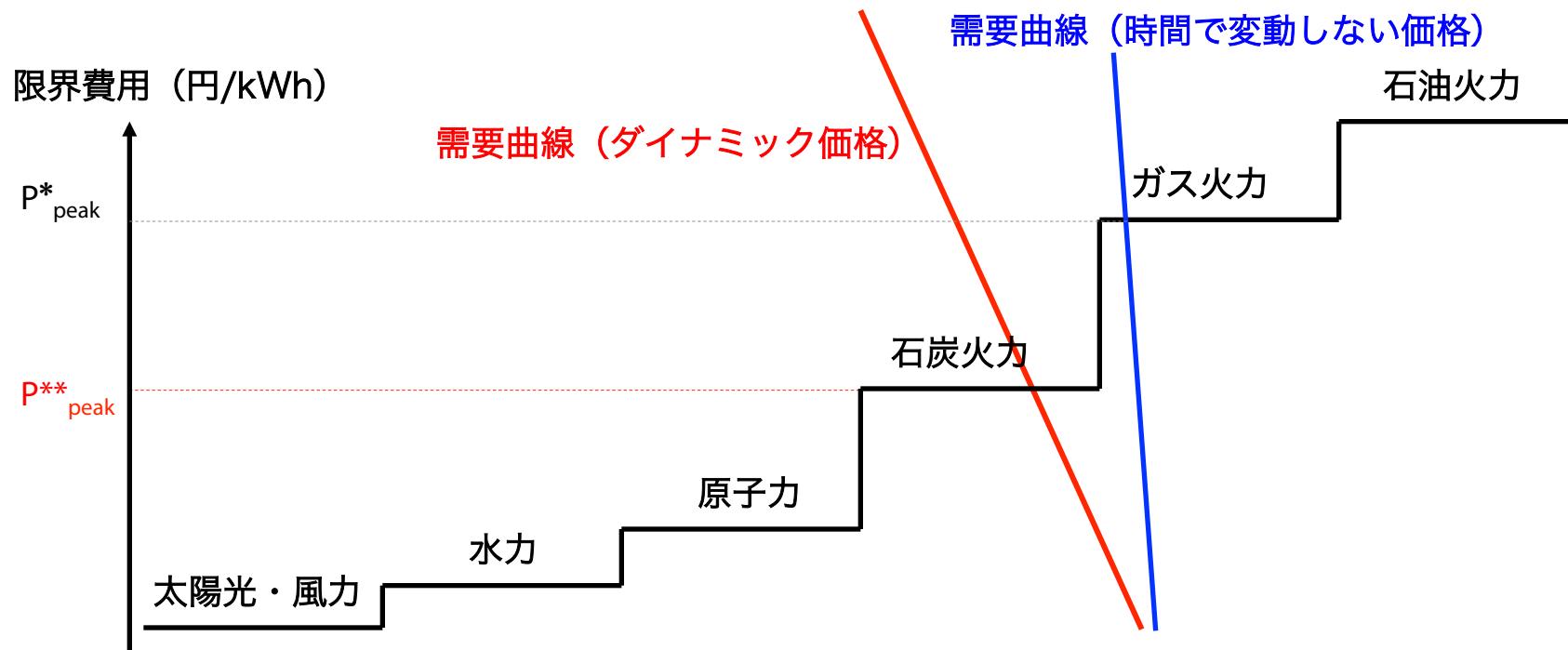
- 2) ピーク時の限界費用を下げる、電力料金低下へつながる
  - 時間に応じない価格を払っている消費者の価格弾力性はゼロに近い
  - 時間帯別の価格を払うことになれば価格への反応が生まれる
  - 高コストな発電所の運用をせずに済み、電力料金低下へつながる



## 論点3) 価格が動的に変化するDynamic Pricingを導入する経済的便益とは?

- 3) 市場支配力行使を防ぐことができる

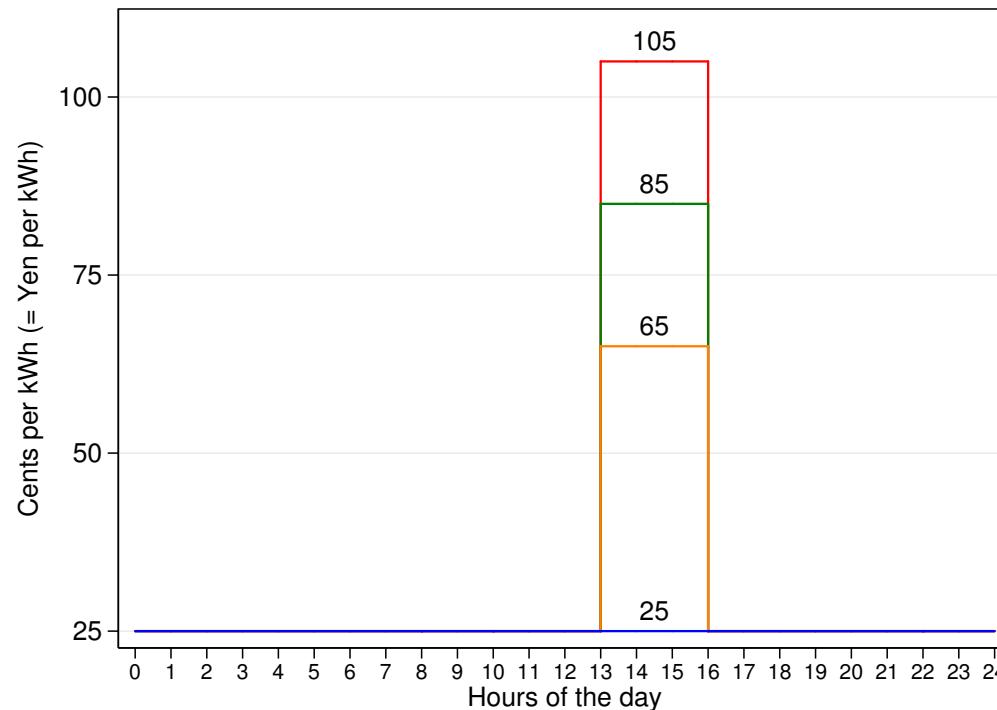
- 需要が弾力的なほど独占・寡占企業の市場支配力は弱まる (Lerner's index)
- 理由: 「生産量を減らす」ことで得られる「価格の上昇」は小さくなるため



## 論点3) 価格が動的に変化するDynamic Pricingを導入する経済的便益とは?

- Ito, Ida, and Tanaka (2018)

- 京都けいはんな地区でのフィールド実験
- ランダム化比較試験によりDynamic Pricingの効果を検証
- 価格の変動に応じてピーク時の消費量が減少（価格弾力性：-0.14）
- 死荷重減少による社会厚生の向上は年間153億円に上ることが示唆された

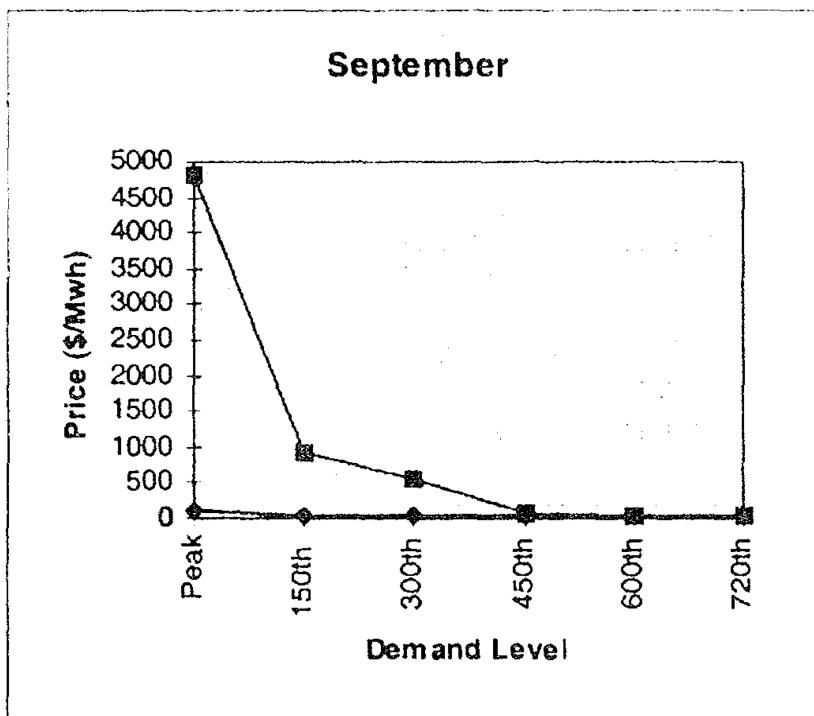


## 論点3) 価格が動的に変化するDynamic Pricingを導入する経済的便益とは?

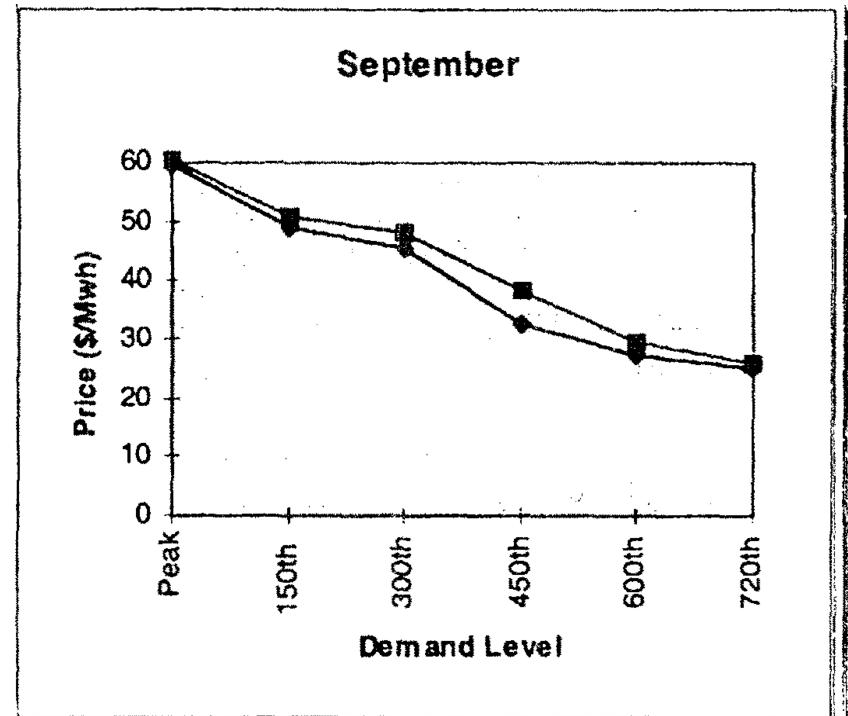
- Borenstein and Bushnell (1999)

- カリフォルニア電力市場における費用構造データを収集
- クールノー競争モデルを用いて、市場均衡価格の政策シミュレーション分析
- 結果：仮想的に価格弾力的な需要を想定→市場支配力の影響は大きく軽減

### 1) 需要が**非弾力的**な場合の市場均衡価格推定値



### 2) 需要が**弾力的**な場合の市場均衡価格推定値



# 市場設計における論点

- 本稿では以下の論点について議論したい
  - 1) 市場の基盤インフラ「送配電網」への公平なアクセスを実現する設計とは
  - 2) 電力自由化は「発電費用」や「電力価格」の低下をもたらすのか
  - 3) 価格が動的に変化するDynamic Pricingを導入する経済的便益とは？
  - 4) 先物取引市場とリアルタイム市場をどのように設計すべきか
  - 5) 地域間で断絶した市場を統合する、市場統合の便益とは？

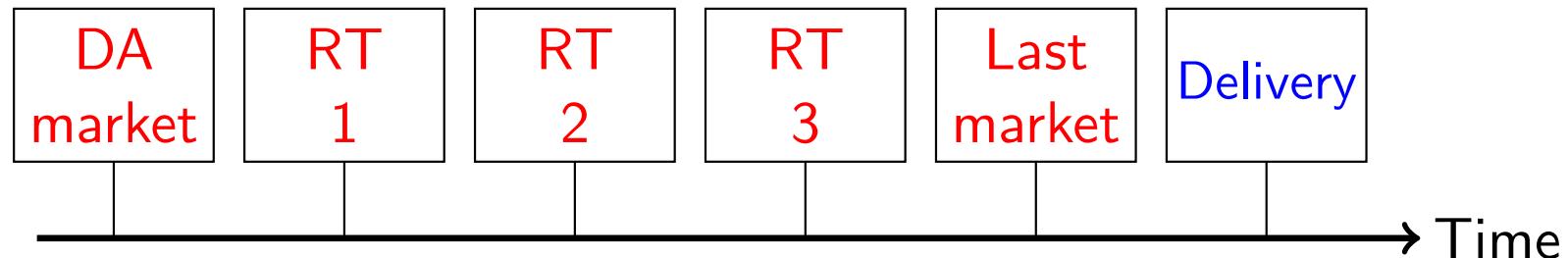
## 論点 4) 先物取引市場とリアルタイム市場をどのように設計すべきか

- 電力の卸売市場では、まずは 1 日前の先物市場が開かれる
  - この市場をDay-ahead Market (DA)と呼ぶ
  - 売り手と買い手の入札で市場価格が決まる



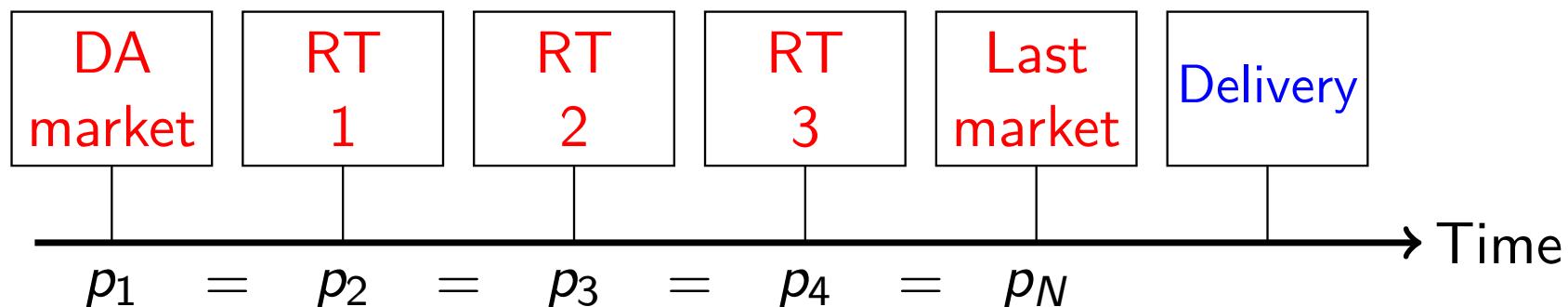
## 論点4) 先物取引市場とリアルタイム市場をどのように設計すべきか

- DA市場終了後、売り手と買い手が再度取引できる市場が開かれる
  - この市場をReal-time Market (RT)もしくはスポット市場と呼ぶ
  - ここでも売り手と買い手の入札で市場価格が決まる
  - DA市場とRT市場が存在することで不確実性への対処がしやすくなる



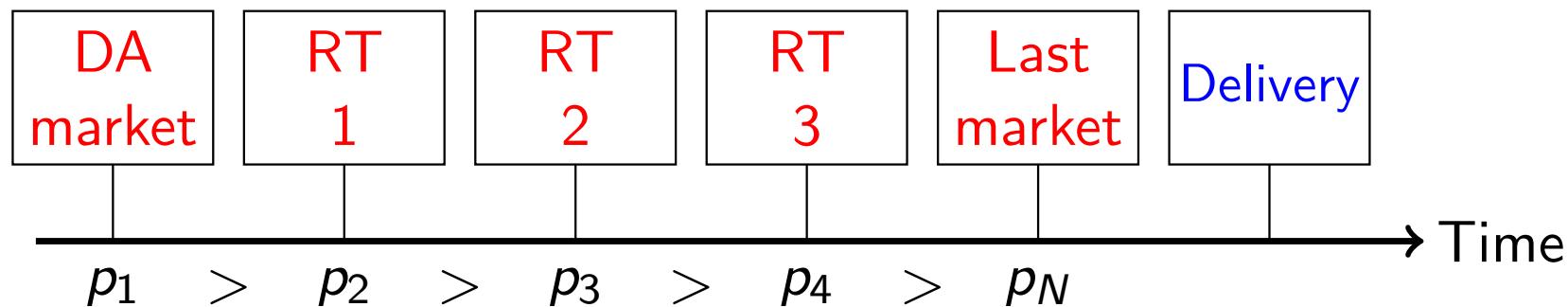
## 論点 4) 先物取引市場とリアルタイム市場をどのように設計すべきか

- 通常の経済理論で予測されること
  - DA市場とRT市場の価格は、平均的には収束して、同一価格になる



## 論点 4) 先物取引市場とリアルタイム市場をどのように設計すべきか

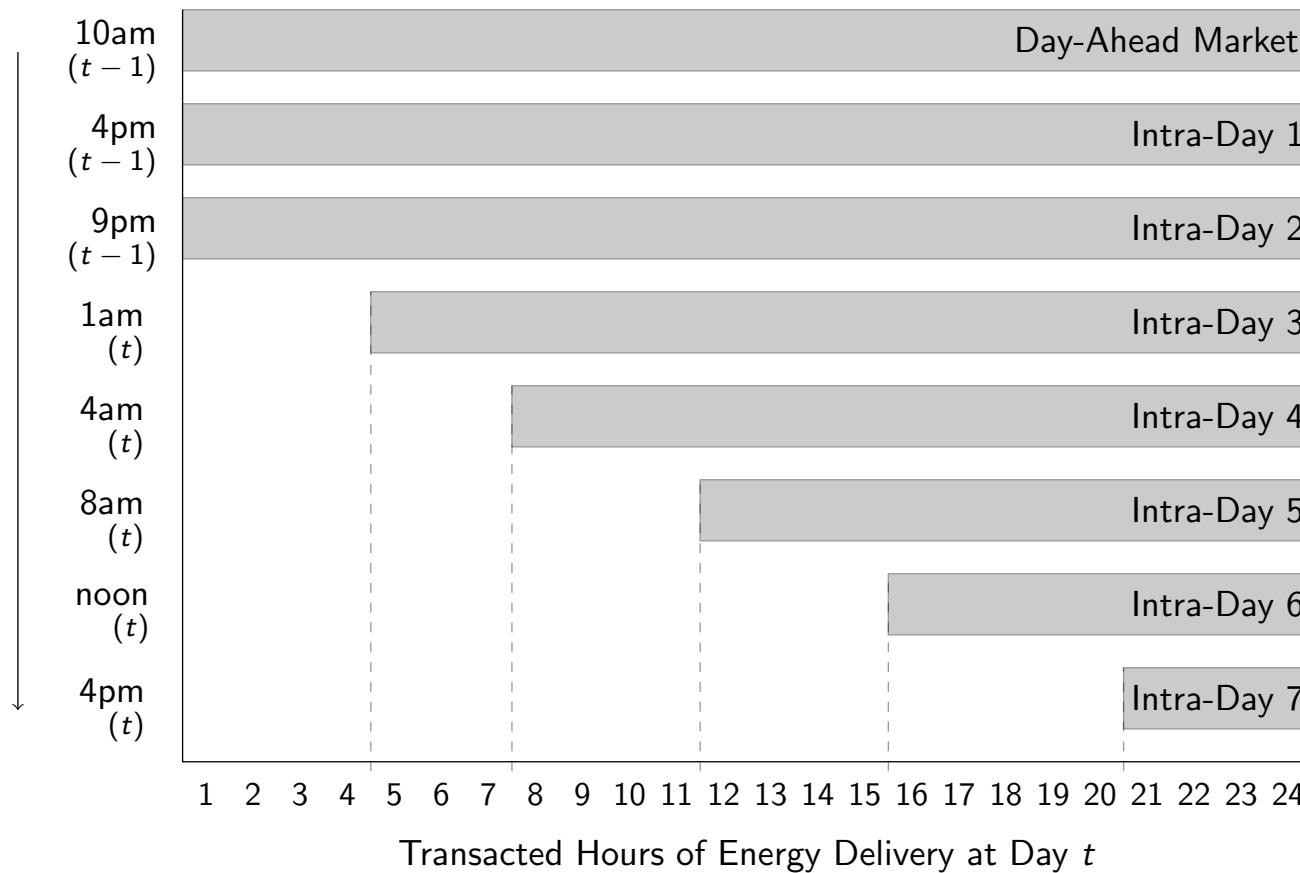
- ところが世界中の多くの電力市場のデータを見ると
  - 「DA価格>RT価格」 となっている。つまり、先物価格プレミアムが存在する



## 論点4) 先物取引市場とリアルタイム市場をどのように設計すべきか

- スペイン・ポルトガル市場の例
  - DA市場と最大7回のRT市場 (intra-day market) が開かれる

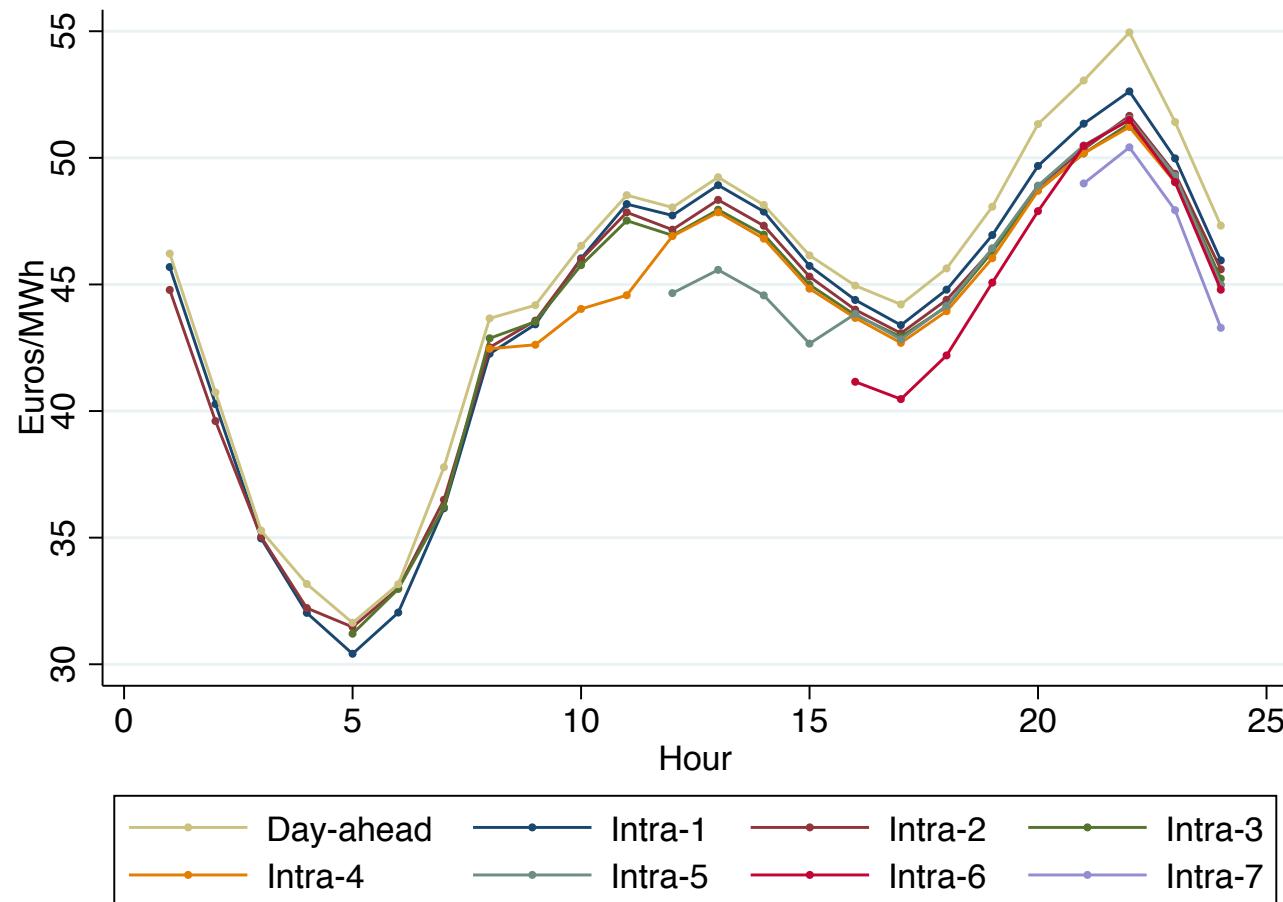
Transaction Time



## 論点4) 先物取引市場とリアルタイム市場をどのように設計すべきか

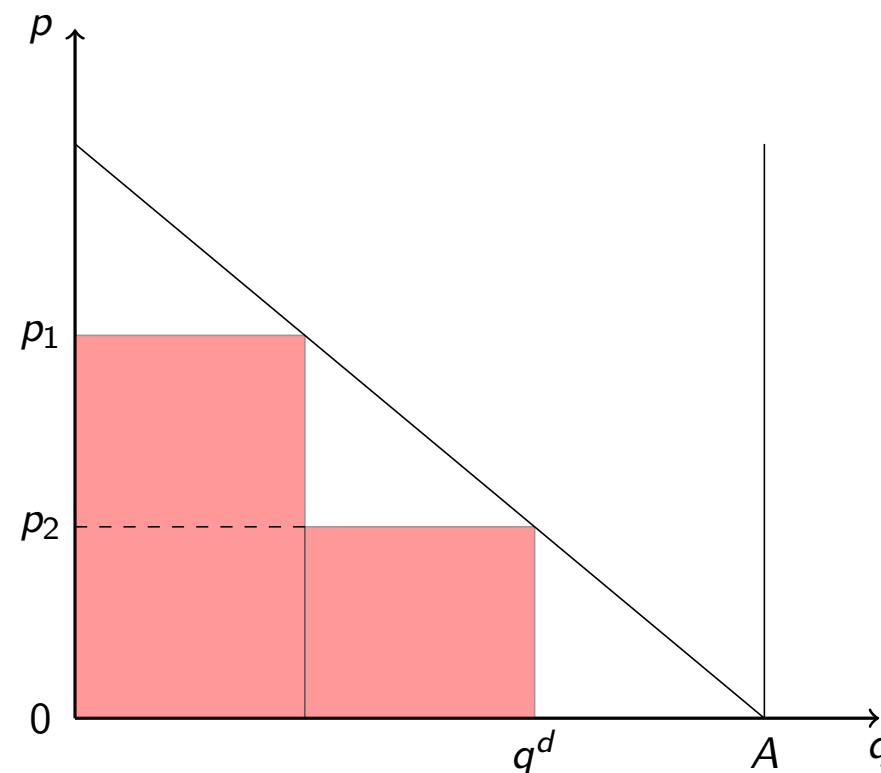
- スペイン・ポルトガル市場の例

- DA価格が最も高く、だんだんと価格が低くなることがデータから観測できる



## 論点4) 先物取引市場とリアルタイム市場をどのように設計すべきか

- Ito and Reguant (2016) : 理論と実証で以下を示した
  - 市場支配力を持つ企業の利潤最大化が「先物価格>リアルタイム価格」を招く
  - 企業行動を「動的独占行動」としてモデル化すると説明がつく
  - 複数回の市場に直面する企業は、徐々に価格を下げる事が利益最大化になる
  - 実証：寡占企業が理論の予測通りの行動をしていることをデータ分析で示した



## 論点4) 先物取引市場とリアルタイム市場をどのように設計すべきか

- 価格差で利鞘を得る (Arbitrage) 金融企業の参入は社会厚生を上げるか?
  - スペイン・ポルトガル市場では電力事業を行わない金融機関の参加は不可
  - NY市場、カリフォルニア市場では、近年、金融機関の参入を開始
  - 金融機関の参入後、DA市場とRT市場の価格は均一化 (Jha and Wolak, 2020)

## 論点 4) 先物取引市場とリアルタイム市場をどのように設計すべきか

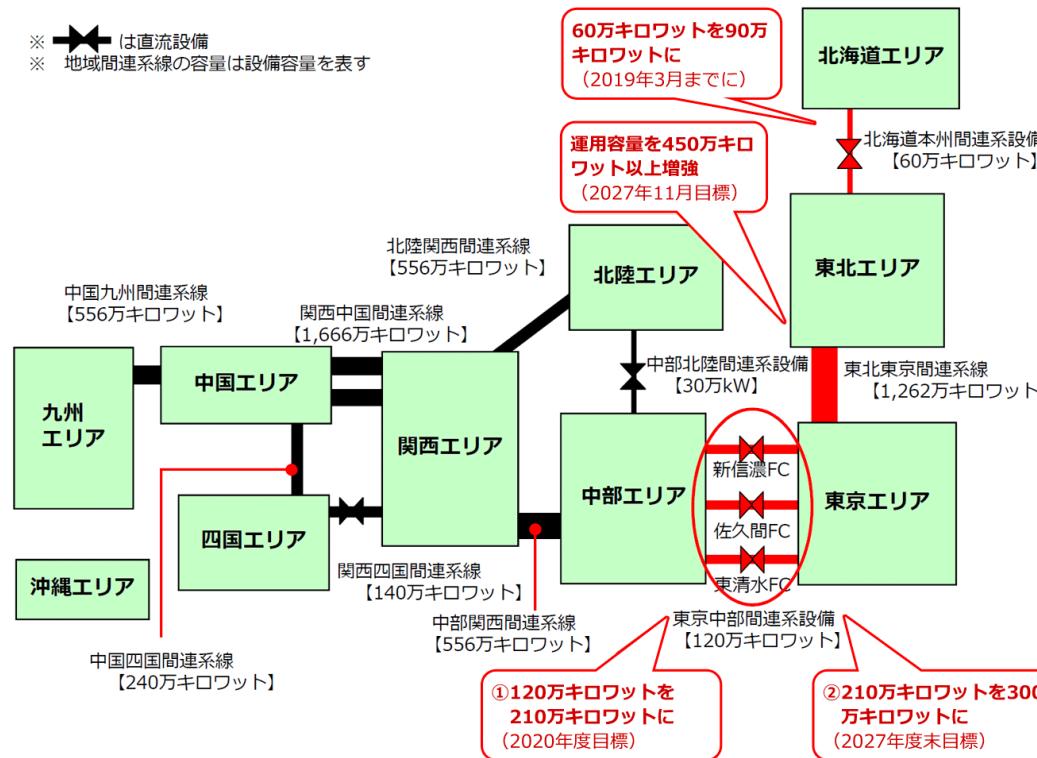
- 価格差で利鞘を得る (Arbitrage) 金融企業の参入は社会厚生を上げるか?
  - スペイン・ポルトガル市場では電力事業を行わない金融機関の参加は不可
  - NY市場、カリフォルニア市場では、近年、金融機関の参入を開始
  - 金融機関の参入後、DA市場とRT市場の価格は均一化 (Jha and Wolak, 2020)
- Ito and Reguant (2016) : 構造推定と政策シミュレーションで分析
  - 市場支配力がない市場では、DA市場とRT市場の価格均一化は社会厚生改善
  - ただし、市場支配力が存在する場合、社会厚生改善が悪化する可能性がある
  - 独占企業は複数回の市場を持つ場合、生産量を上げるインセンティブができる
  - Arbitrageによる価格均一化は、複数回の市場を実質 1 つにすることになる
  - そのため、市場支配力を持つ企業の生産量が落ち、社会厚生を下げる可能性

# 市場設計における論点

- 本稿では以下の論点について議論したい
  - 1) 市場の基盤インフラ「送配電網」への公平なアクセスを実現する設計とは
  - 2) 電力自由化は「発電費用」や「電力価格」の低下をもたらすのか
  - 3) 価格が動的に変化するDynamic Pricingを導入する経済的便益とは？
  - 4) 先物取引市場とリアルタイム市場をどのように設計すべきか
  - 5) 地域間で断絶した市場を統合する、市場統合の便益とは？

## 論点5) 地域間で断絶した市場を統合する、市場統合の便益とは？

- 日本の電力市場は実質的に「地域で分断された市場」が形成されることが多い
  - 地域間の送電線の容量が大きくない（東西では周波数も異なる）
  - 需要が高まるピーク時間帯では、地域別に分断された市場が形成される
  - 論点：地域間の送電容量を増強する経済的便益は？



出典：資源エネルギー庁資料

## 論点5) 地域間で断絶した市場を統合する、市場統合の便益とは？

- 理論的には少なくとも3つの便益が考えられる
  - 1) 貿易による利益（各地域の費用が低い発電所が発電量を伸ばせる）
  - 2) 各地域での市場支配力を阻止できる可能性
  - 3) 再生可能エネルギーの発電不安定性を是正できる（先述）

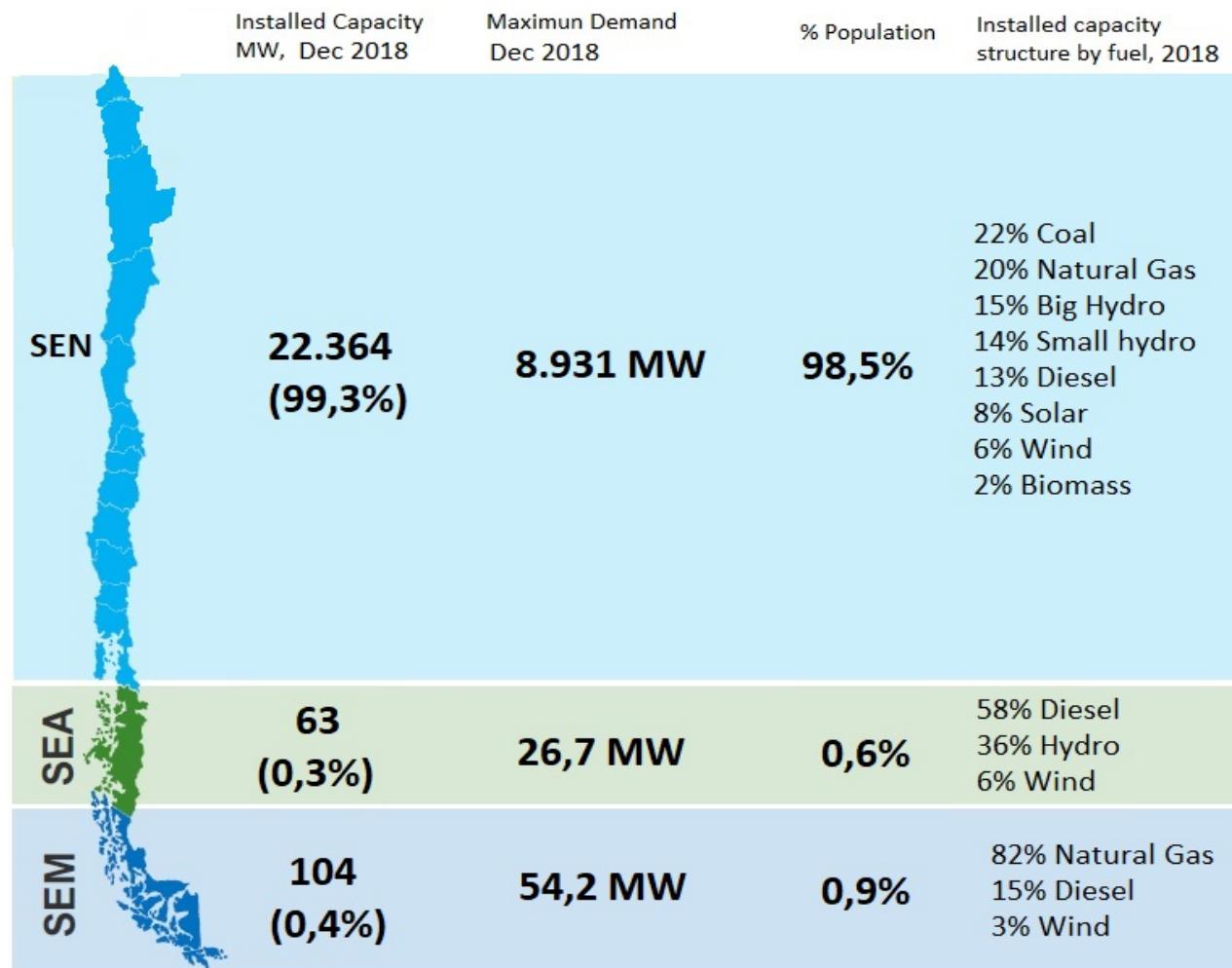
## 論点5) 地域間で断絶した市場を統合する、市場統合の便益とは？

- Gonzales, Ito, and Reguant (in progress)ではチリの電力市場を分析
  - 2017年以前までチリ北部と中部はの電力ネットワークは物理的に独立

	Installed Capacity MW, May 2016	Maximum Demand Dec 2015	% Population	Installed capacity structure by fuel, 2015
SING	<b>4.719,5</b> (22,4%)	<b>2.465 MW</b>	<b>6,3%</b>	50,7% Coal 35,1% Natural Gas 8,7% Diesel + Fuel Oil 4,6% Solar and Wind 0,9% Hydro + co-gen
SIC	<b>16.169,5</b> (76,8%)	<b>7.577 MW</b>	<b>92,2%</b>	26% Big Hydro 21% Diesel 15% Small Hydro 15% Coal 12% Natural Gas 5% Wind 3% Solar 3% Biomass
SEA	<b>54,2</b> (0,3%)	<b>23 MW</b>	<b>0,6%</b>	53% Diesel 43% Hydro 4% Wind
SEM	<b>101,7</b> (0,5%)	<b>53 MW</b>	<b>0,9%</b>	98% Natural Gas 2% Diesel

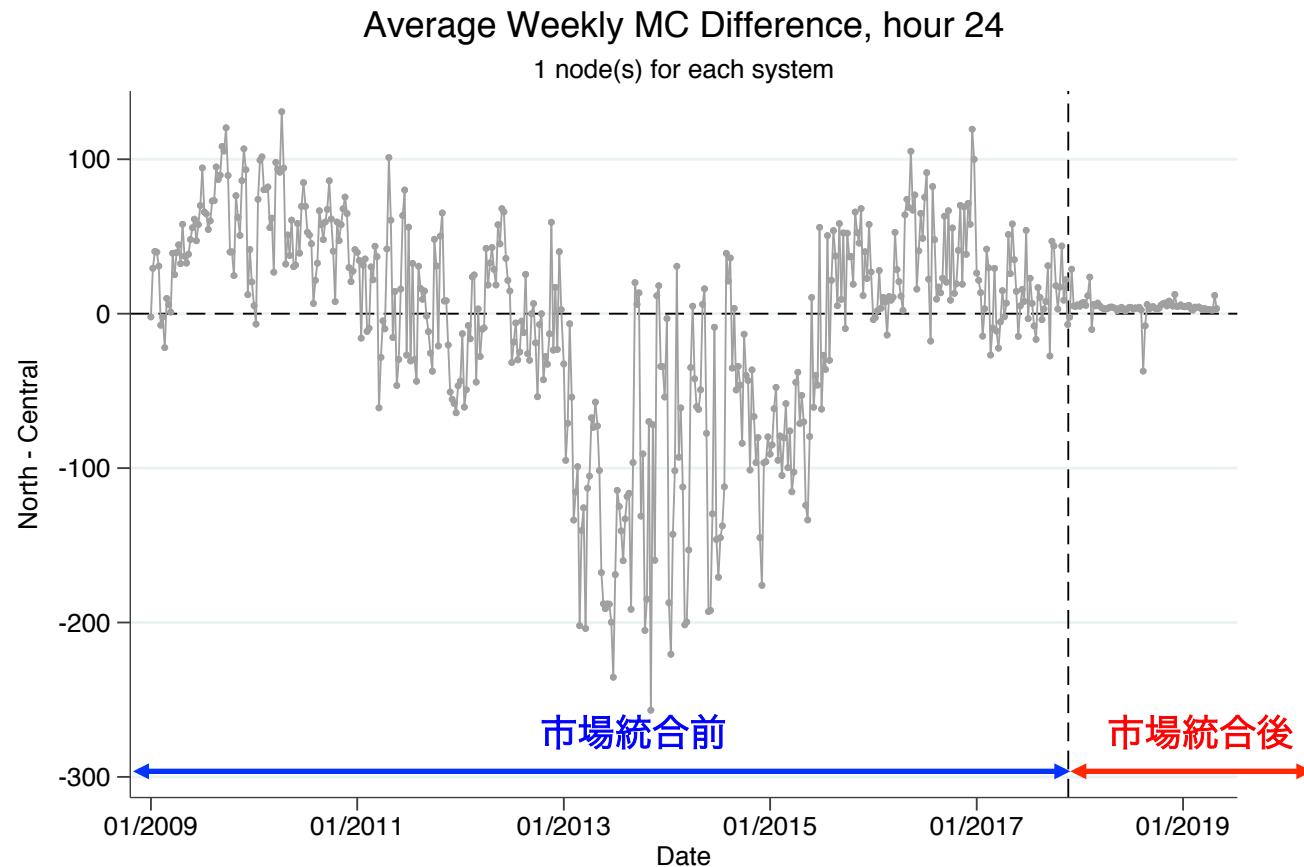
## 論点5) 地域間で断絶した市場を統合する、市場統合の便益とは？

- Gonzales, Ito, and Reguant (in progress)ではチリの電力市場を分析
  - 2018年以降、北部と中部の電力ネットワークが統合された



## 論点 5) 地域間で断絶した市場を統合する、市場統合の便益とは？

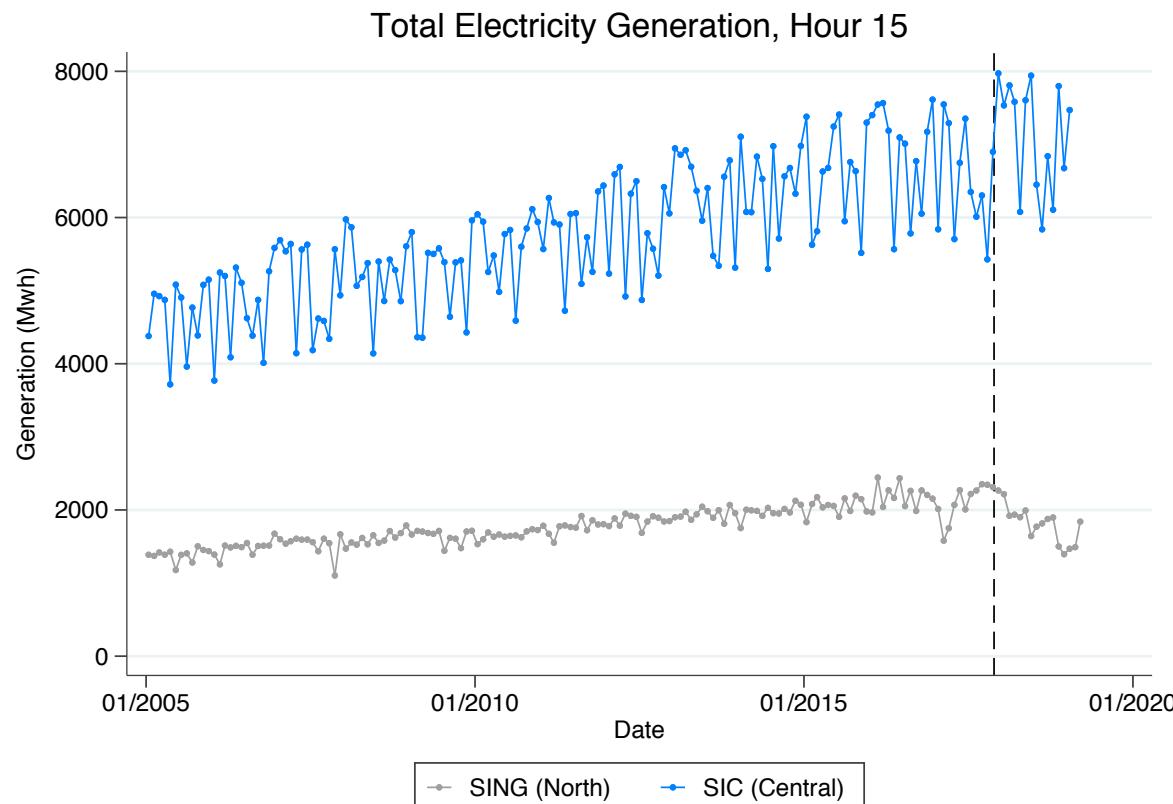
- 分析結果 1) 市場統合が地域間価格差に与えた影響
  - 図：北部と中部の卸売電力「価格の差」をプロット
  - 結果：統合後に価格差がゼロに収束しているのが見える（law of one price）



## 論点 5) 地域間で断絶した市場を統合する、市場統合の便益とは？

- 分析結果 2) 市場統合が発電所の生産量に与えた影響

- 統合後に中部（青）が発電量を伸ばし、北部（灰色）が発電量を落としている
- 理由：北部は高コストな火力発電所が大半で、中部は低コストな水力や再生可能エネルギー（太陽光、風力）がメイン→低コストの中部が発電量増加



- 再生可能エネルギーを取り込むための市場設計
  - 再生可能エネルギーは従来の電源と異なる経済的インプリケーションを持つ
  - 例) 発電の不確実性と不連續性
  - 従来型の市場設計では対応できない可能性が高く、新たな市場設計が必要
- 自動車市場との融合
  - 電気自動車・ハイブリッド車の普及で、自動車と電力網がつながる
  - 例) 同一の時間帯に沢山の消費者が充電を行うと、送配電に負荷がかかる
  - 従来型の市場設計では対応できない可能性が高く、新たな市場設計が必要

ご静聴ありがとうございました。質問・コメントはこちらへお寄せください。

シカゴ大学公共政策大学院准教授  
伊藤公一朗

Email: [ito@uchicago.edu](mailto:ito@uchicago.edu)

Web: [www.koichiroito.com](http://www.koichiroito.com)