

連系線の制度改革の経済効果：間接オークションの実証分析

Interconnection Capacity Allocation Method:
First-Come-First-Served Rule to Implicit Auction

杉本康太

東京財団政策研究所 博士研究員

(sugimoto@tkfd.or.jp)

モチベーション

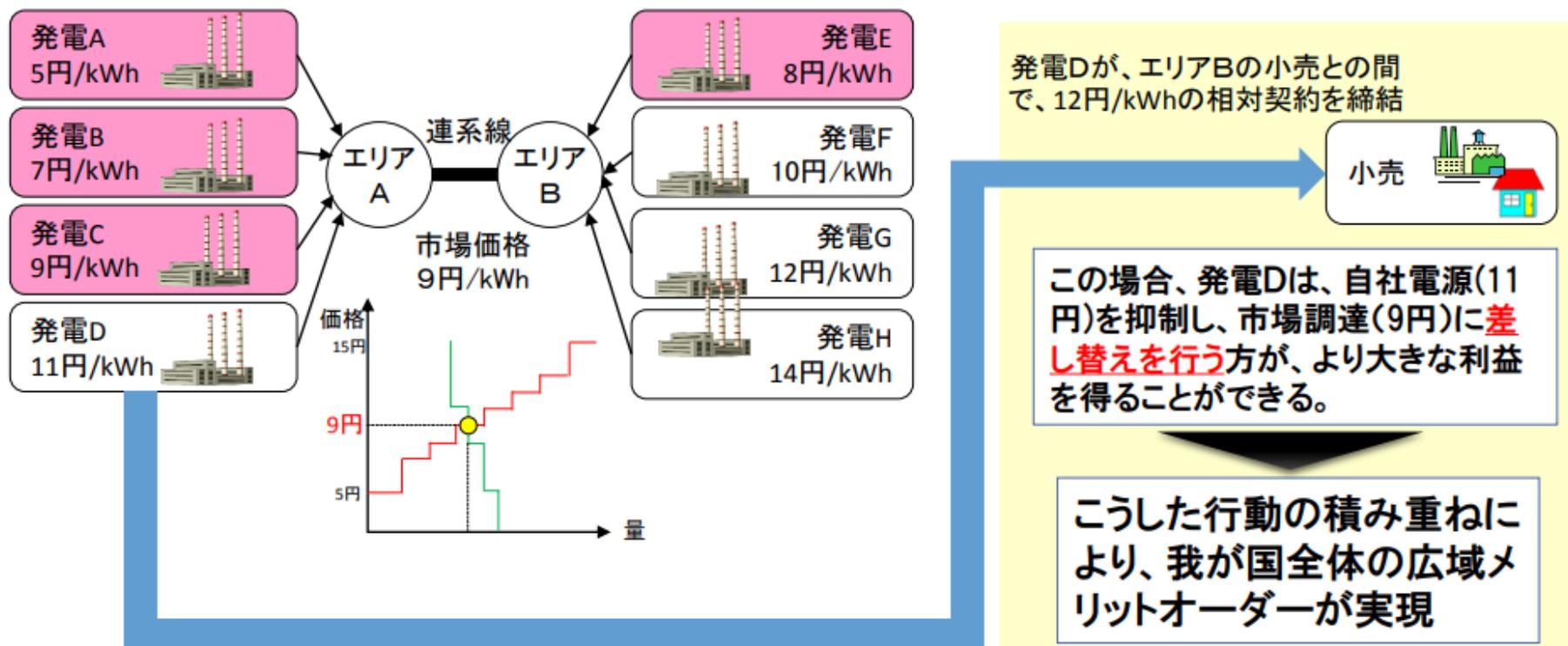
- 日本は震災後、様々な電力システム改革を実施してきた。
- しかしその改革の効果を事後的に検証した研究は少ない。
- 改革は成功だったのか？失敗だったのか？

イントロ

- 分析対象は、2018年10月1日から導入された、間接オークション制度
- 連系線の効率的な活用は、広域メリットオーダー実現にとって重要
- 北海道や九州に偏在する再エネ電気を需要地に輸送するためにも重要
- 新規参入者と既存事業者の公平な競争環境整備のためにも重要

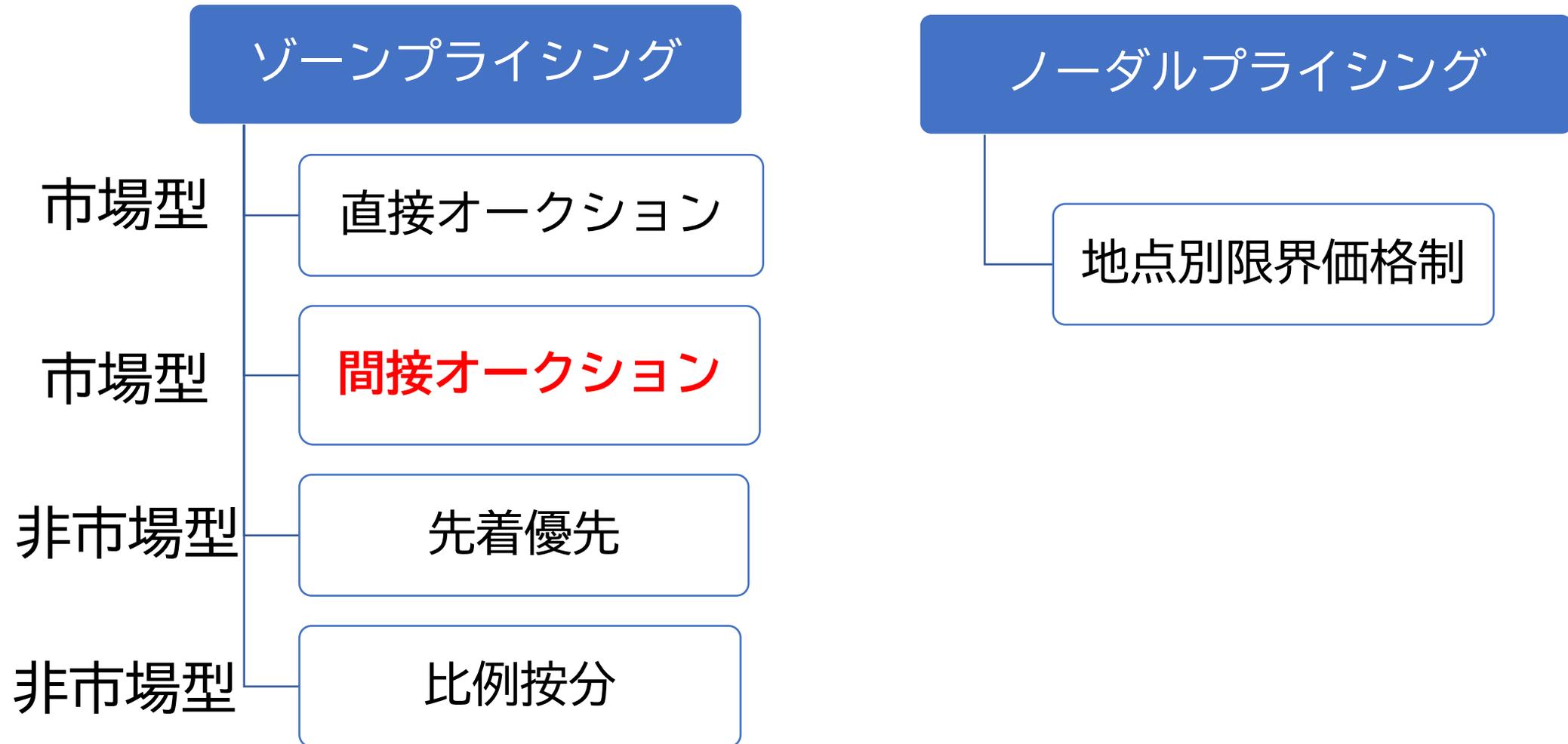
広域メリットオーダーとは

- 1) 広域メリットオーダーとは、エリアを越えて、限界費用の安い順に電源が稼働している状況をいう。
- 2) 例えば、下図のように、市場価格が、自社電源より安い場合、発電事業者は、市場電源への差し替えを行う方が、大きな利益が得られる。
- 3) 我が国では、卸電力市場が全国をエリアとする単一の市場として運営されているため、こうした、個々の事業者による経済合理的な行動(電源差し替え)の積み重ねが、我が国全体の広域メリットオーダーとへとつながる。



間接オークションの学術的位置づけ

電力市場設計における、連系線の混雑管理の一手法



先行研究の欠如

- (欧州で) 直接オークションから間接オークションに移行した場合の効果

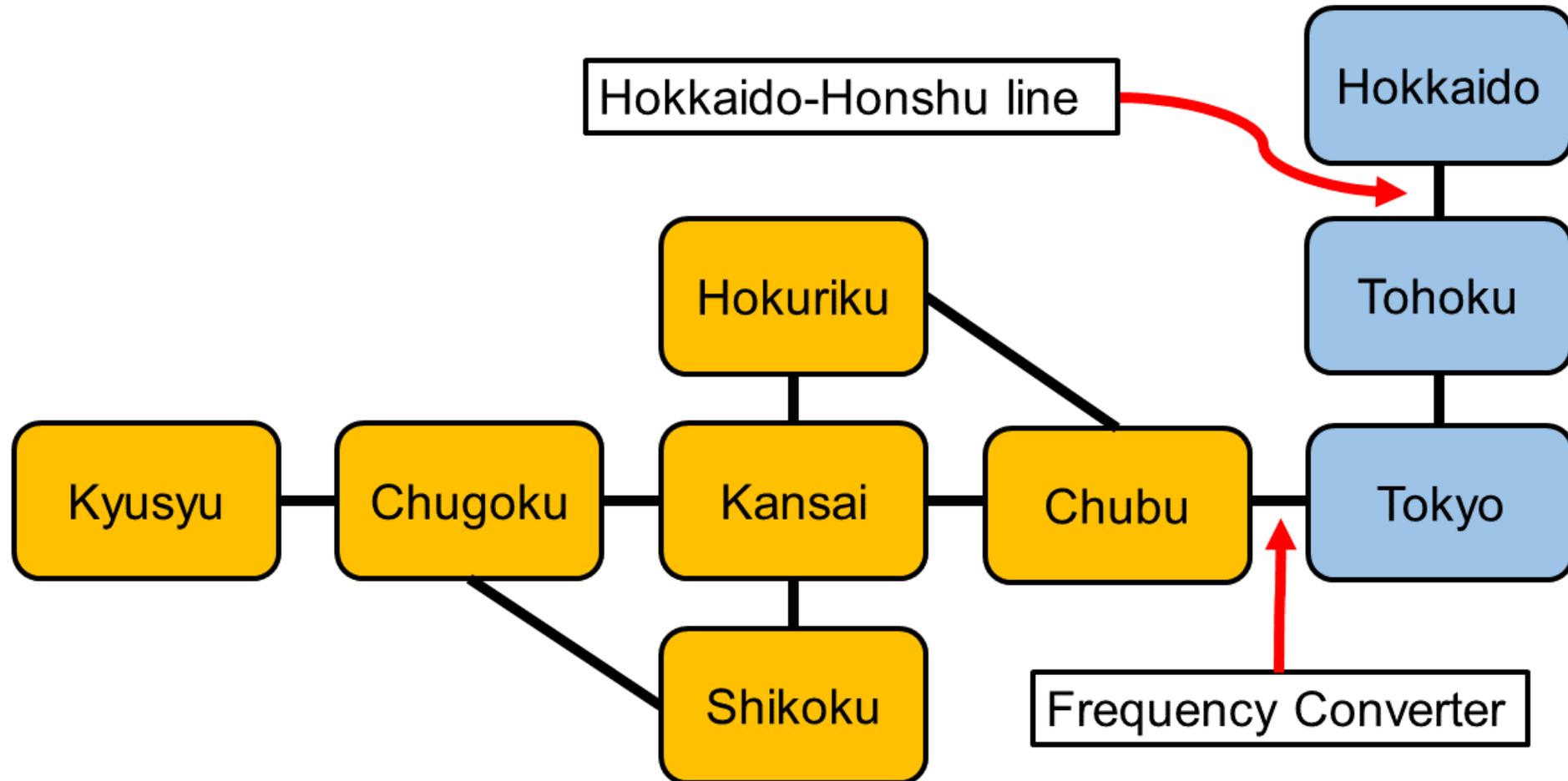
e.g., Bunn and Zachmann 2010; Keppler, Phan, and Le Pen 2016,

Gugler, Haxhimusa, and Liebensteiner 2018; Newbery, Strbac, and Viehoff 2016

- 連系線の増強が再エネのメリットオーダー効果や電力市場の価格に与える影響

e.g., Annan-Phan and Roques 2018; Abrell and Kosch 2022; LaRiviere and Lyu 2022

日本のエリアと連系線



先着優先ルール

First-come-first-served (FCFS)

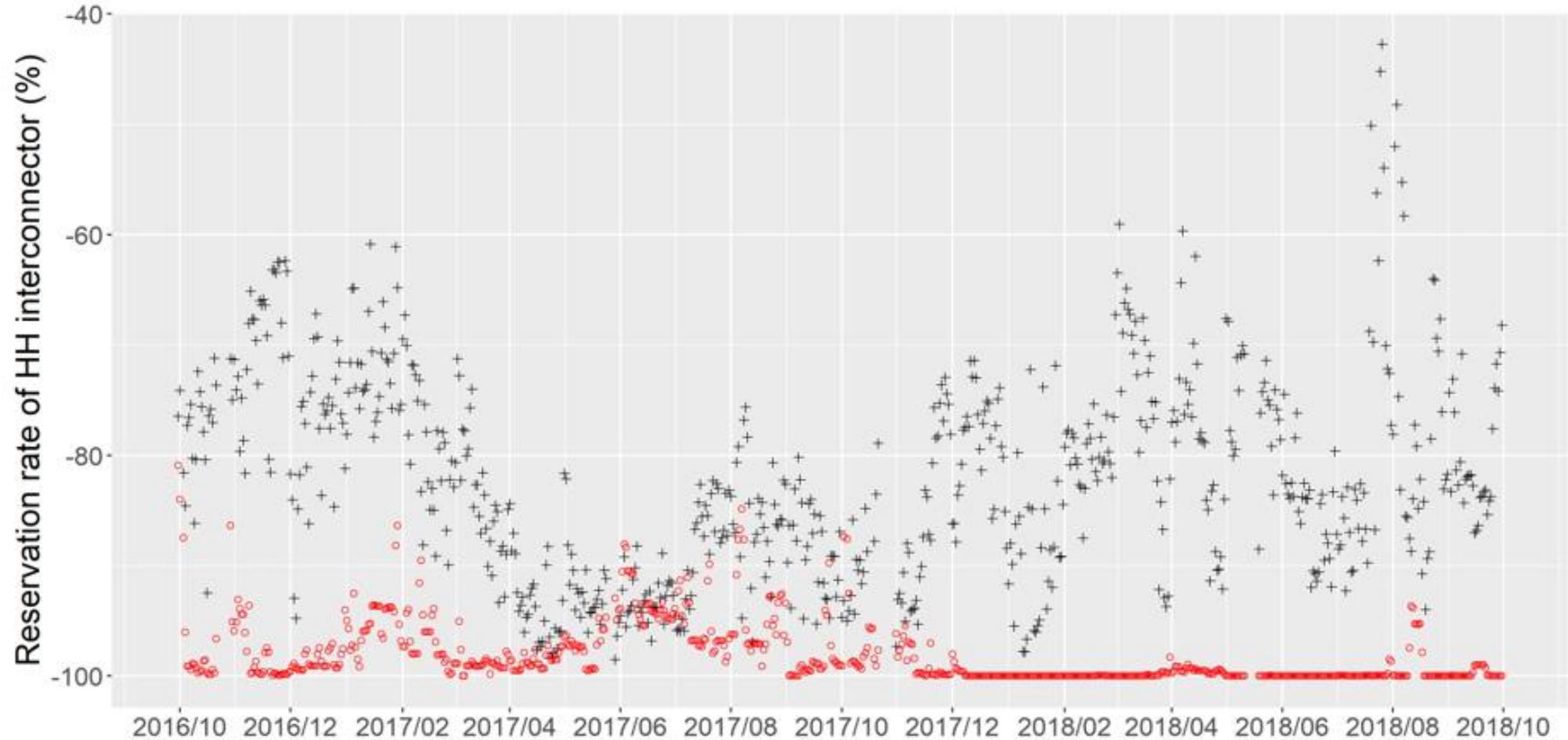
空き容量 = 運用容量 - マージン

先着順で
予約された容量

前日市場 + 時間前市場で
配分可能な容量

先着優先ルールの下では...

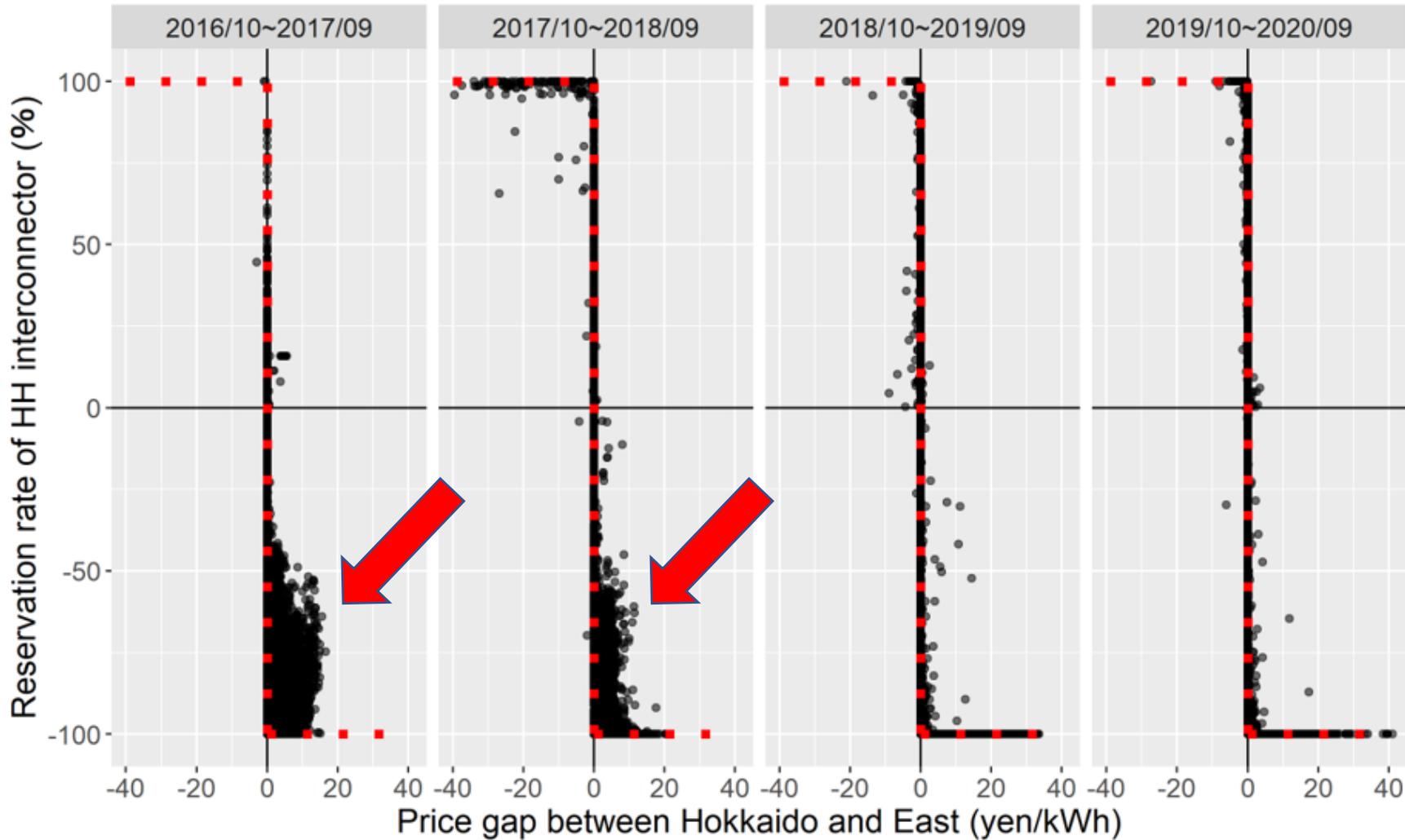
北本連系線の予約率



空き容量の大半が前日市場のゲートクローズ（前日午前10時）**以前**に予約されていた。

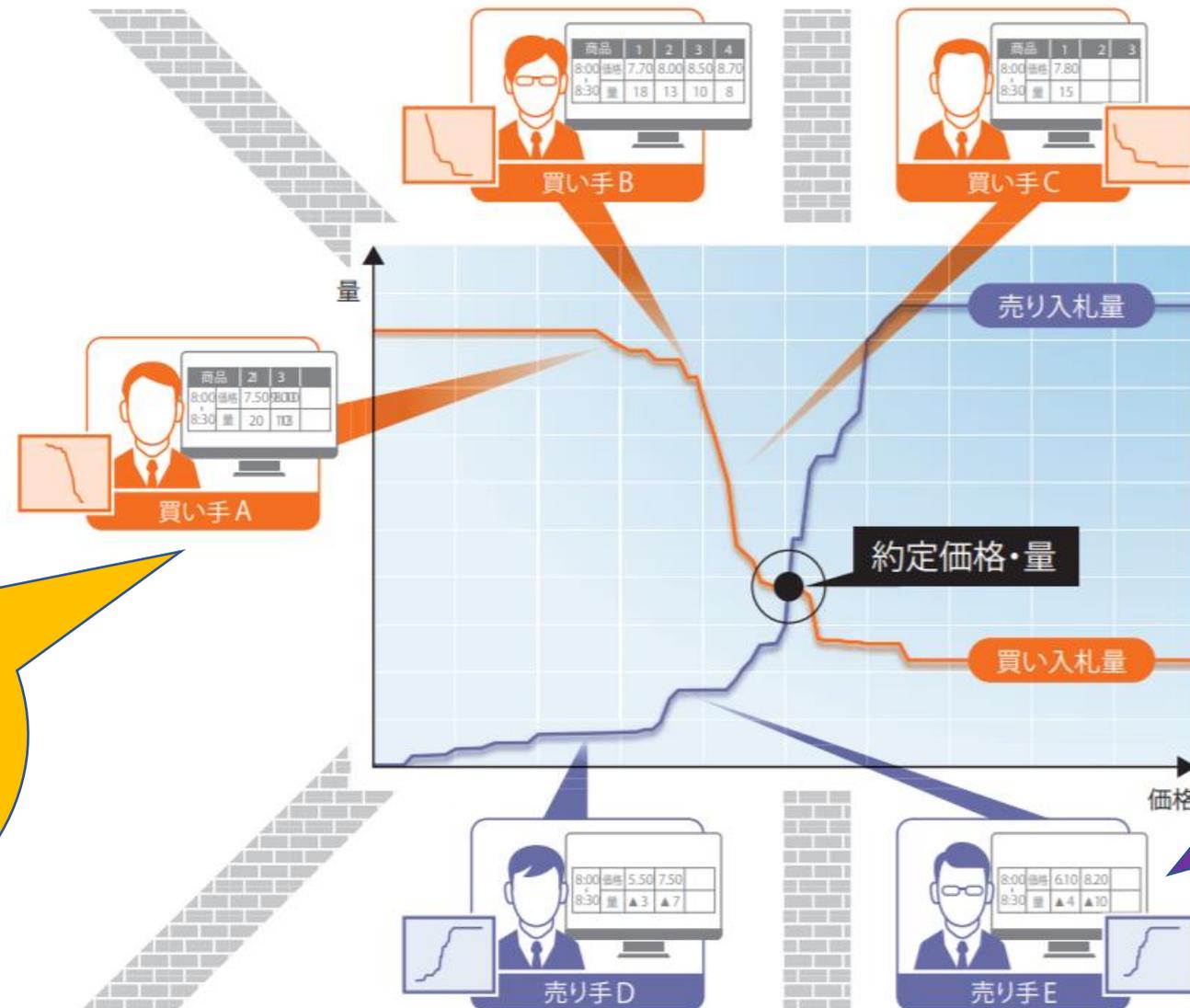
先着優先ルールの下では...

前日17時時点の北本の予約率



既存事業者は、空おさえを通じて戦略的に**市場分断**を引き起こすことができた。
 不要な予約量は、前日市場の約定後に**キャンセル**できた。

前日市場は、シングルプライス・オークション + 市場分断約定方式



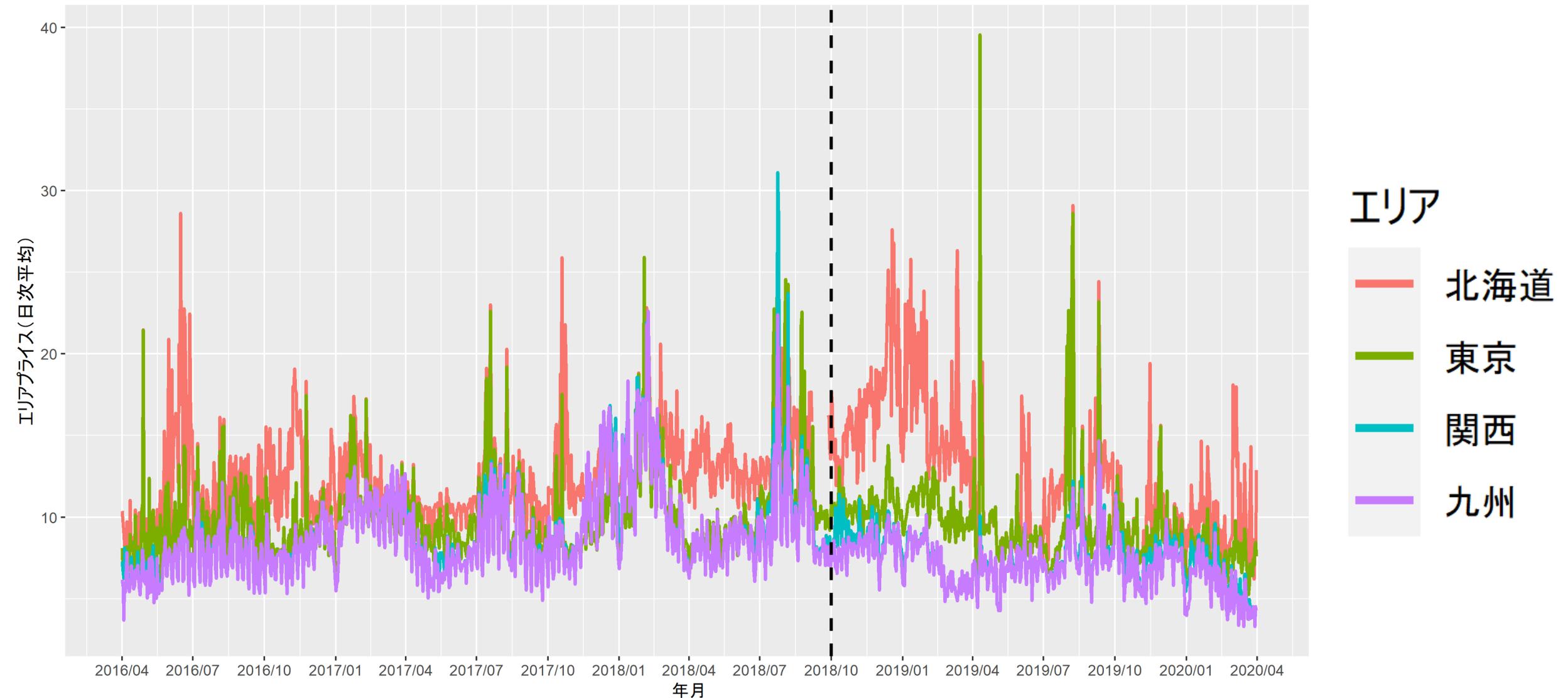
- ・ 買い入札価格
- ・ 買い入札量
- ・ 買うエリア

- ・ 売り入札価格
- ・ 売り入札量
- ・ 売るエリア

前日市場の約定の手順

- ① 日本全体でシングルプライスオークションを実施し、システムプライスを計算
- ② その場合に各連系線を流れる電気の方向・量を計算
- ③ もしその量が各連系線の**空き容量**をオーバーしなければ、
連系線は混雑せず、市場も分断しない。
- ③' もしその量が連系線の**空き容量**をオーバーした場合、
その連系線を境に市場を分断して、ミニ市場ごとにシングルプライス
オークションを**やり直し**、ミニ市場ごとに市場価格・約定量を決定する。

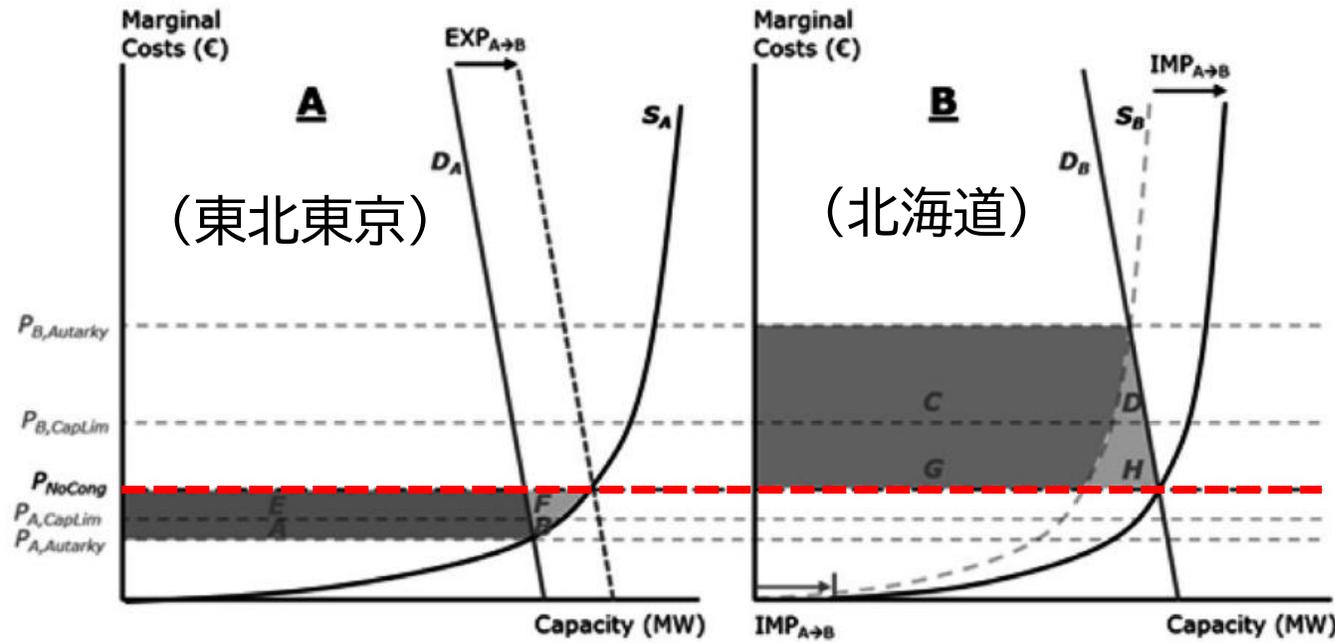
エリアプライスの乖離＝市場分断が発生している



北海道 > 東北・東京 > 西日本のとき、北本とFCで分断

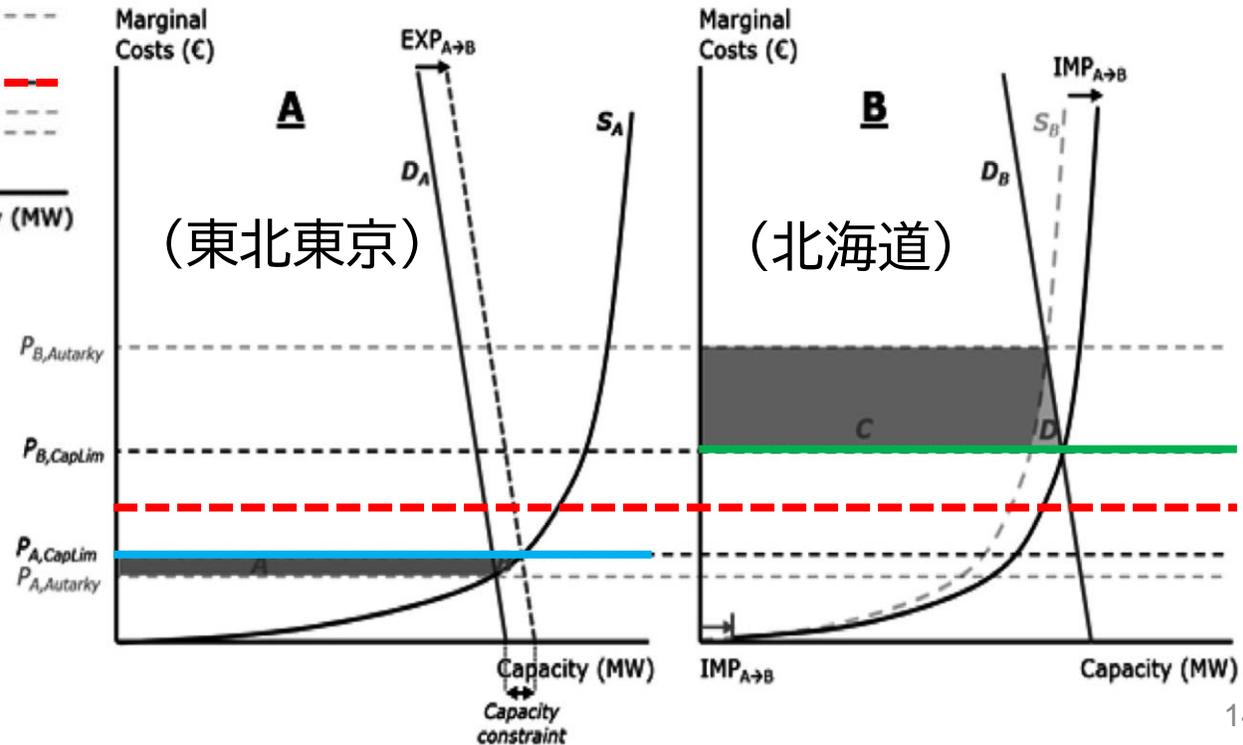
連系線に混雑が無い場合

エリアプライス=システムプライス



連系線に混雑が有る場合

エリアプライス≠システムプライス



先着優先ルールの下で、前日に何が起きていたのか



10時

- 前日市場の入札締切
- 10分程度で約定処理完了
- **市場分断**すると、**連系線の予約率は100%になる。**



12時

- 事業者が翌日計画をOCCTOへ提出する期限
- 既存事業者は事前に予約していた容量を**キャンセル**できる。
- すると空き容量が増加する



17時頃

- OCCTOからTDSOに、翌日の連系線の計画潮流を通知
- **連系線の予約率が100%未満に低下**

先着優先ルールで起きていたこと

前日 10時以前



前日 10時～前日 17時

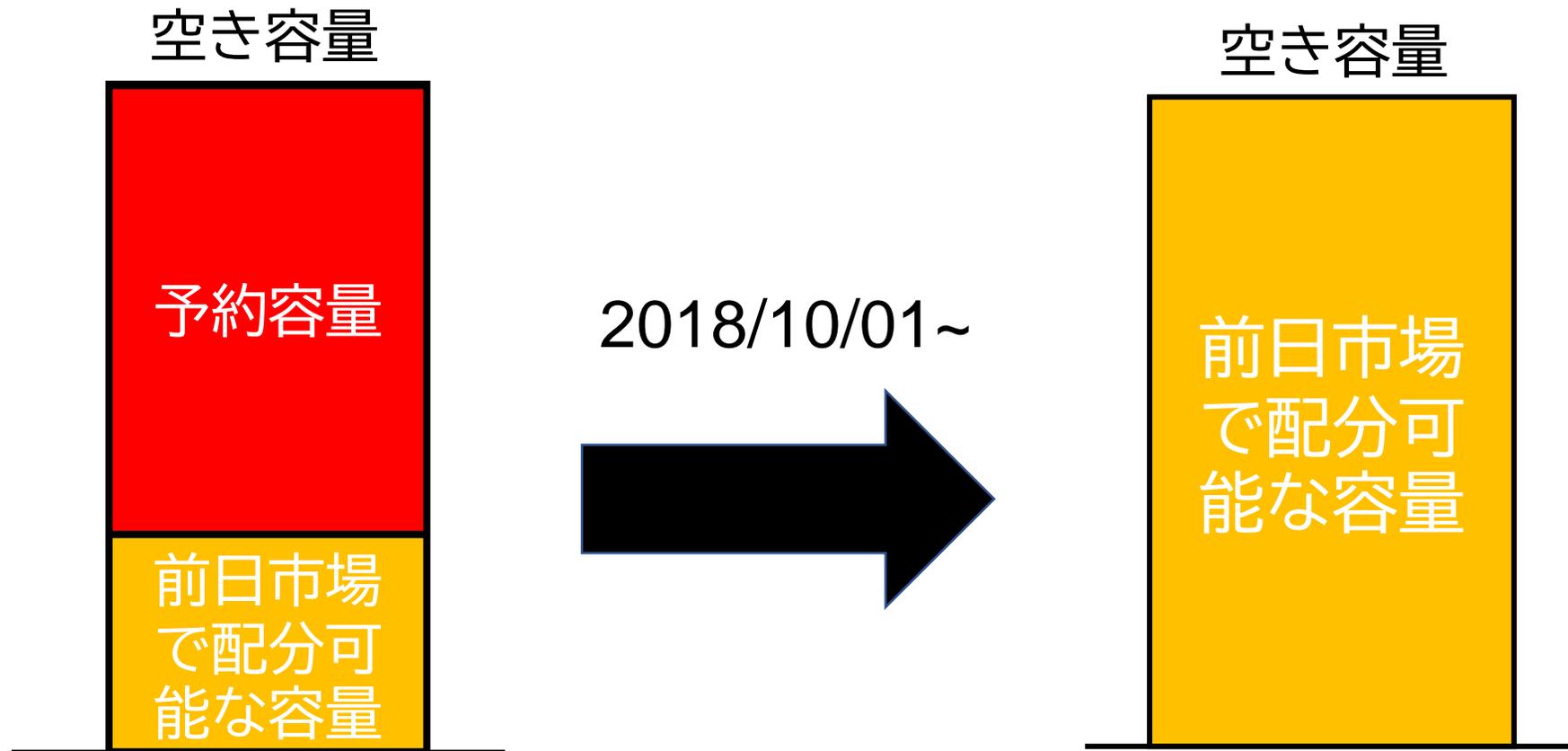


変更賦課金制度による空抑え防止効果？

- 目的：連系線容量の空おさえ防止
- 実需給7日前の17時～前日の12時（または前日17時以降）に、
- 連系線利用計画を10%以上減少した場合、
- 連系線利用者は、
- 計画（通告）変更賦課金 = $0.01 \text{円/kWh} \times 10\%$ を超える分の減少量を支払わなければならない。

先着優先ルール (FCFS)

間接オークション(IA)



Q. 間接オークションの経済的な効果は何か？

①貿易効果

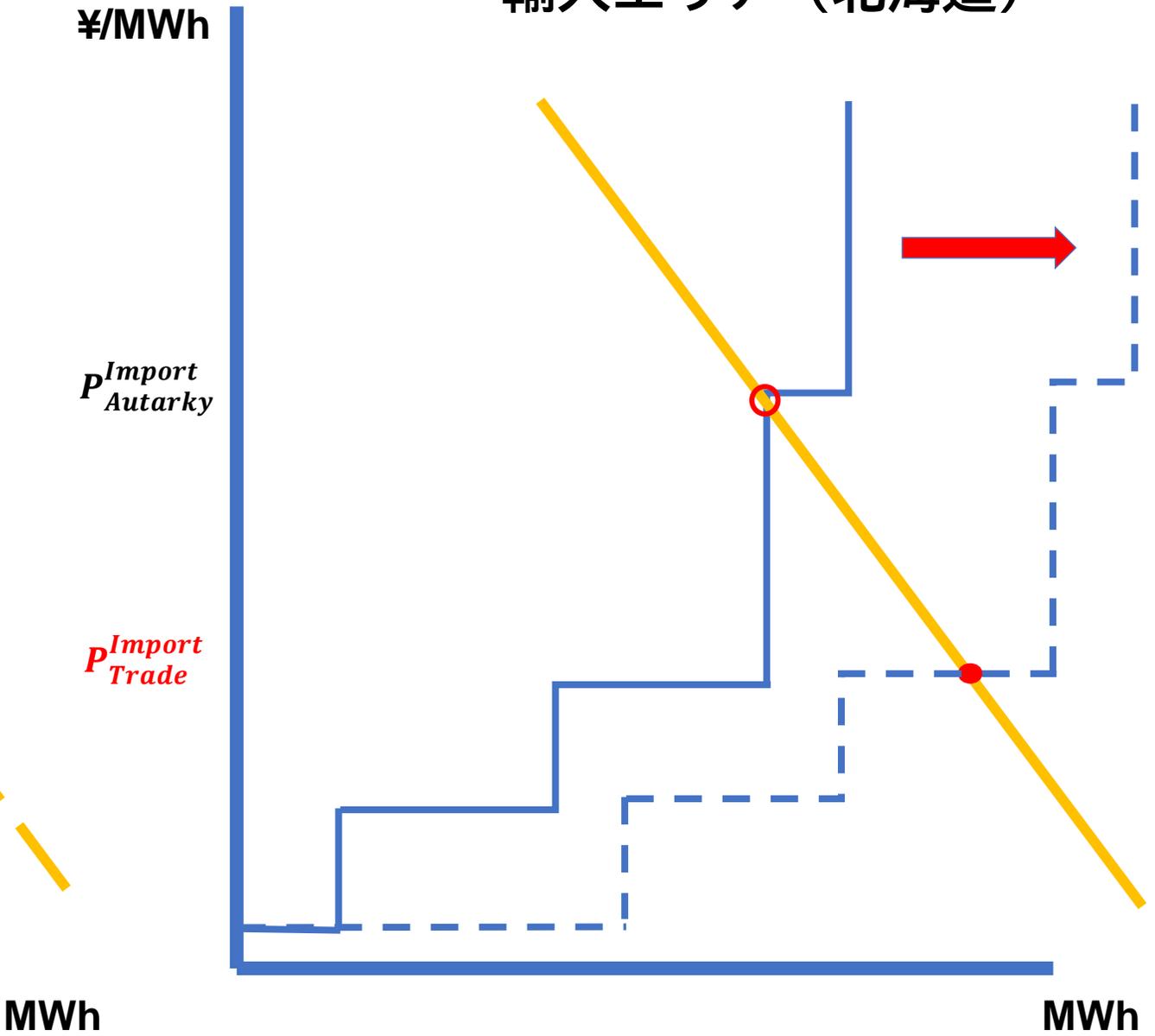
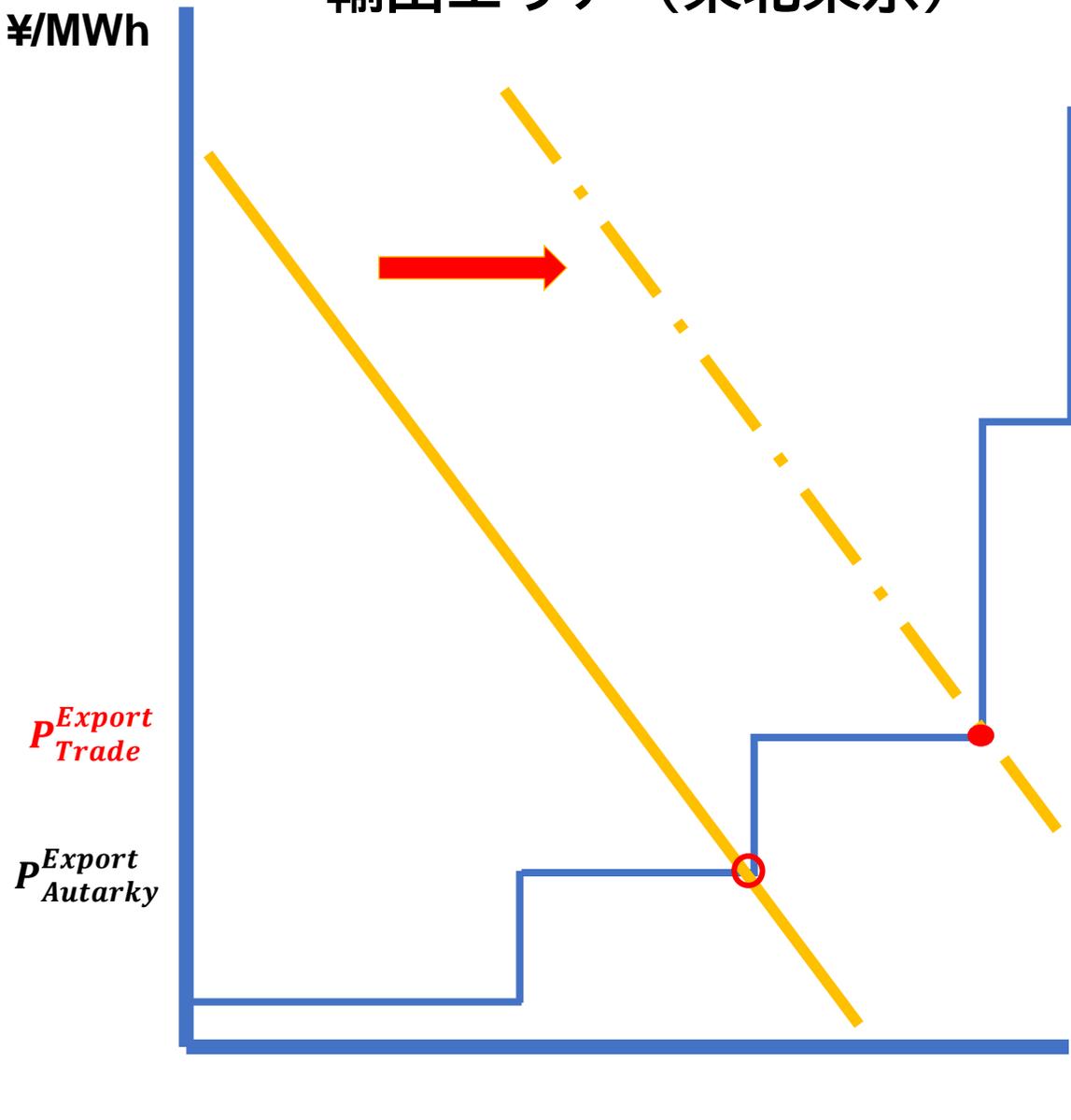
- 間接オークションによる、
- 前日市場での貿易（エリアを越えた電気の輸出入）量の増加は、
- 輸入エリアと輸出エリア間のエリアプライスの差を**減少**させる。

- なぜなら、
- 輸出エリアの限界費用の低い発電機が、追加的にエネルギーを生産し、連系線を通じて輸入エリアに送電するから。
- 同時に、輸入エリアの限界費用の高い発電機が、発電電力量を減らすから。

貿易効果

輸出エリア (東北東京)

輸入エリア (北海道)

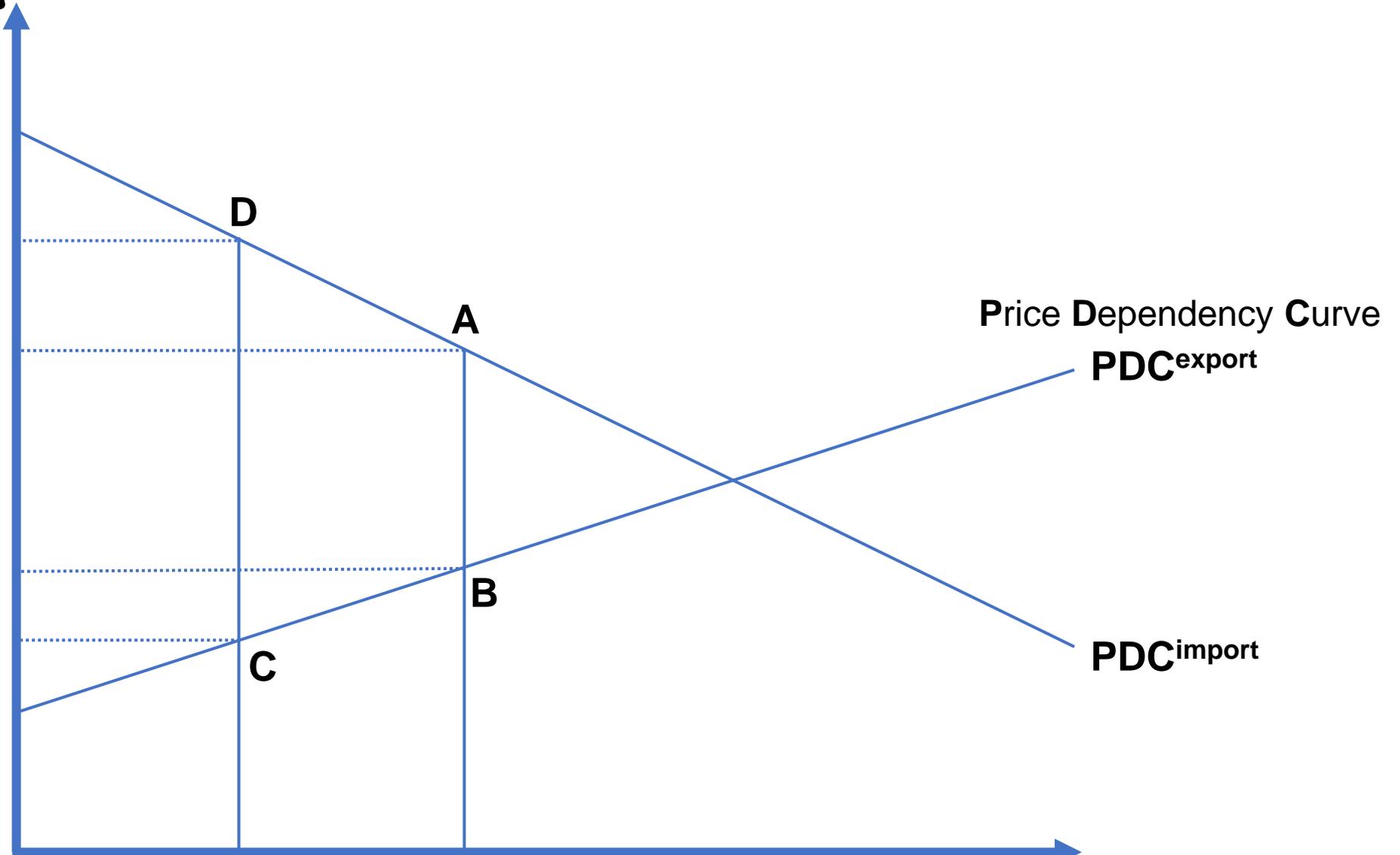


貿易効果

エリアプライス

P_{FCFS}^{import}
 P_{IA}^{import}

P_{IA}^{export}
 P_{FCFS}^{export}



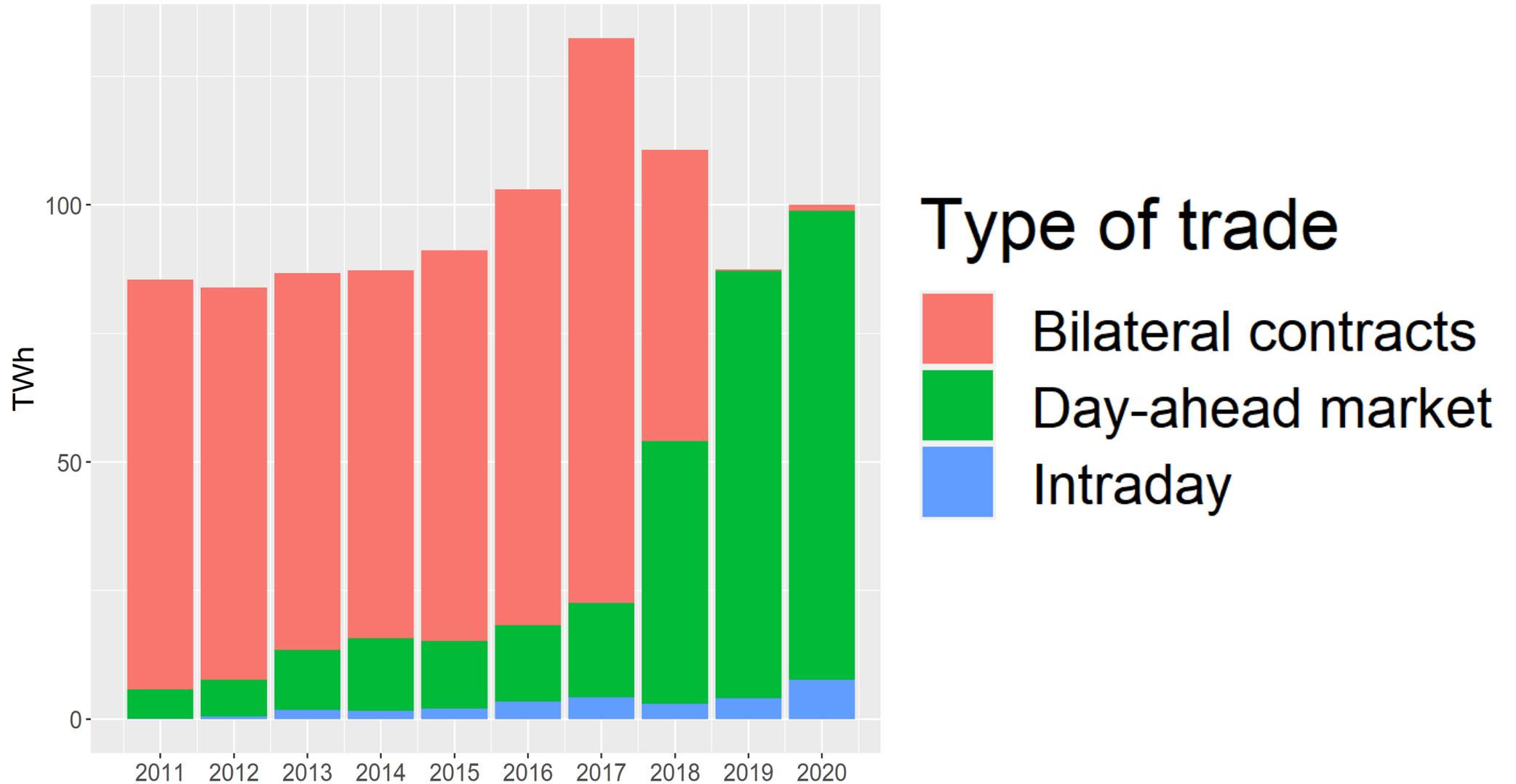
Q_{FCFS} → Q_{IA}

前日市場での貿易の量

②前日市場への入札量増加効果 (ボリューム効果)

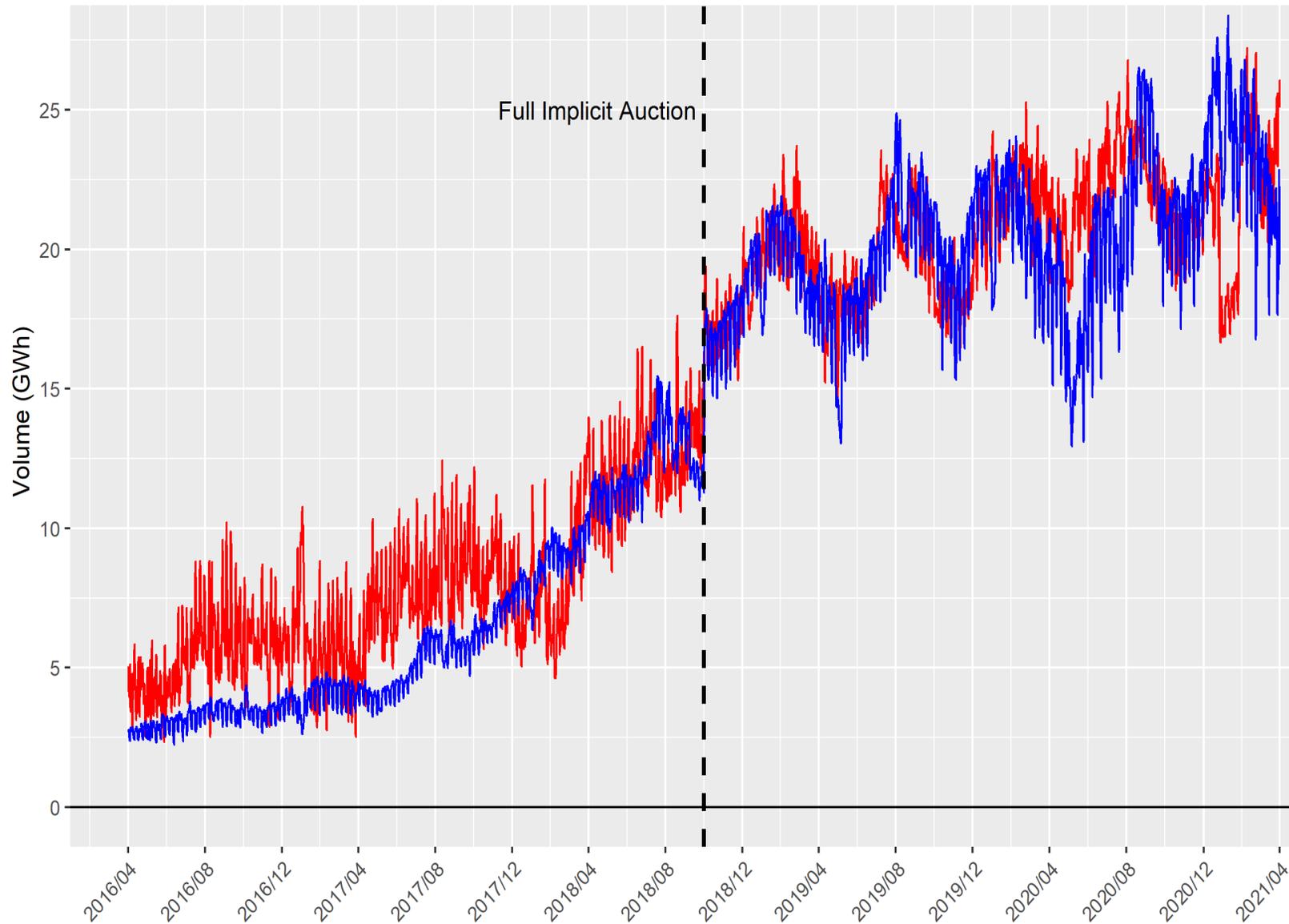
- 間接オークションは、
- 輸出エリアの売り入札量増加により、輸出エリアの市場価格を**低下**させる。
- 輸入エリアの買い入札量増加により、輸入エリアの市場価格を**増加**させる。
- その結果、エリア間のエリアプライスの差を増加させる (⇔貿易効果)。

連系線を流れる電気の量（取引の種類別）



先着優先ルールの下では、年間70～100TWh程度の電気が**相対契約**で連系線を流れていた。これは年間電力消費量の7～10%に相当する。

前日市場の**売り**・**買い**入札量



赤線は**売り**入札量、青線は**買い**入札量の日次移動平均値。

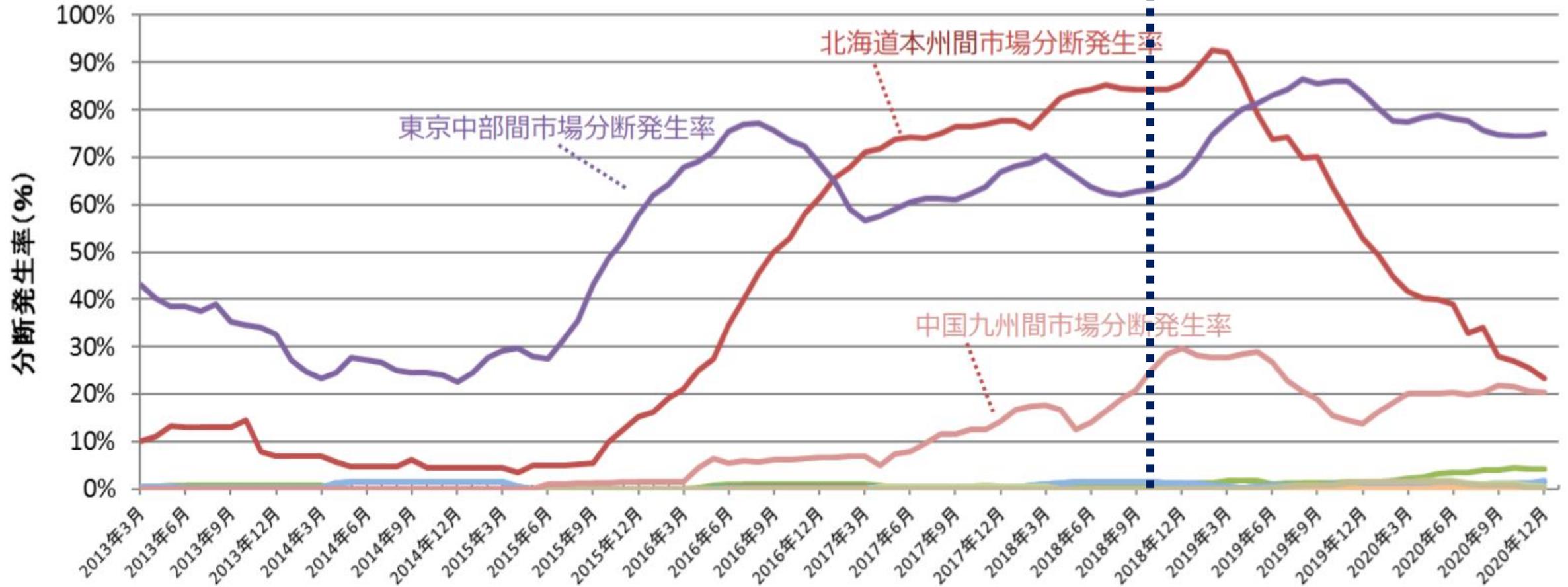
(再掲) 前日市場の約定の手順

- ① 日本全体でシングルプライスオークションを実施し、システムプライスを計算
- ② その場合に各連系線を流れる電気の方向・量を計算
- ③ もしその量が各連系線の空き容量をオーバーしなければ、連系線は混雑せず、市場も分断しない。
- ③' もしその量が連系線の空き容量をオーバーした場合、その連系線を境に市場を分断して、ミニ市場ごとにシングルプライスオークションをやり直し、ミニ市場ごとに市場価格・約定量を決定する。

連系線ごとの前日市場での市場分断

(2013年3月～2020年12月)

- 北海道本州間
- 東北東京間
- 東京中部間
- 中部北陸間
- 北陸関西間
- 中部関西間
- 関西中国間
- 関西四国間
- 中国四国間
- 中国九州間

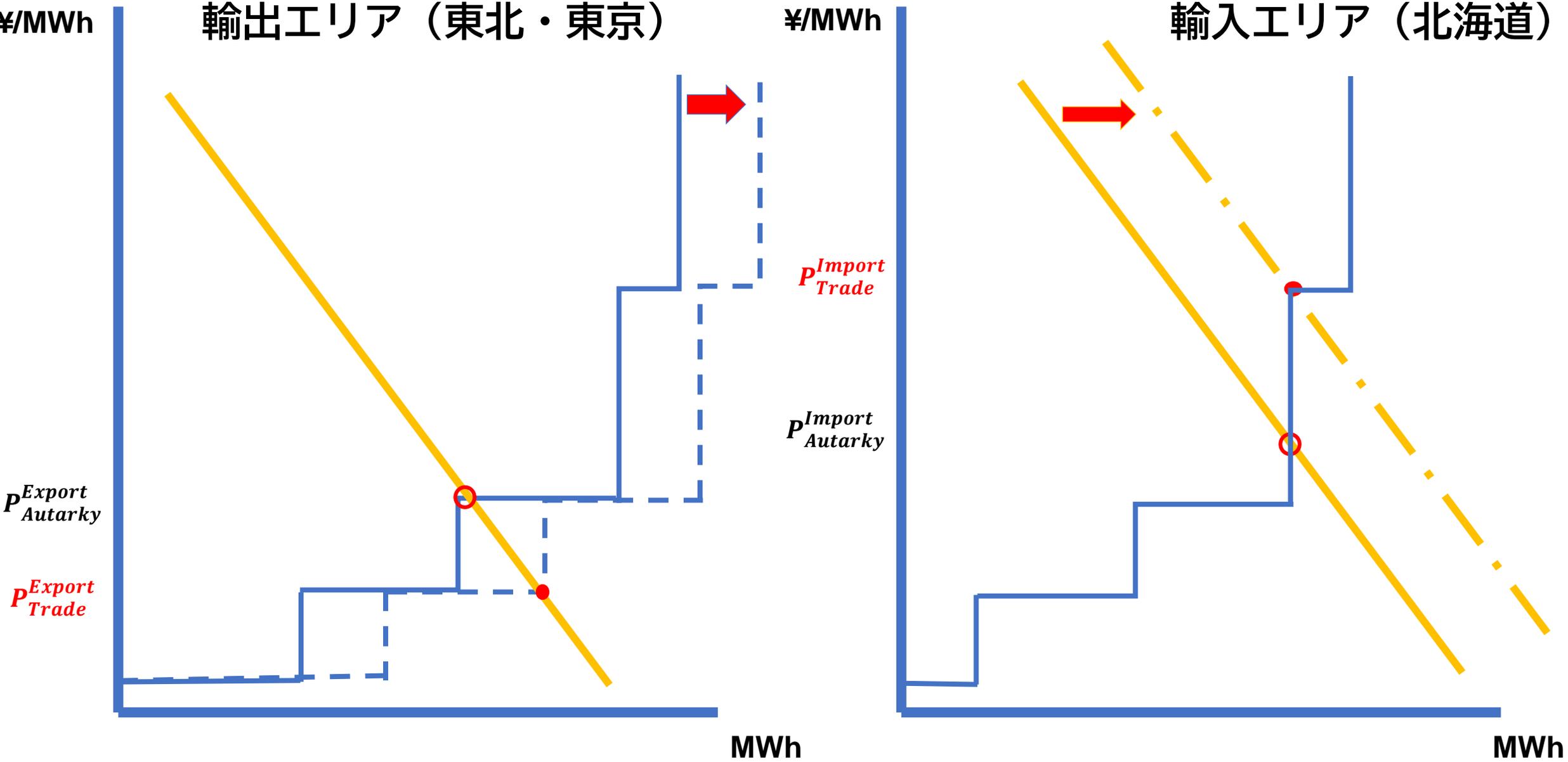


入札量追加効果

(⇒が北本の予約量)

輸出エリア (東北・東京)

輸入エリア (北海道)

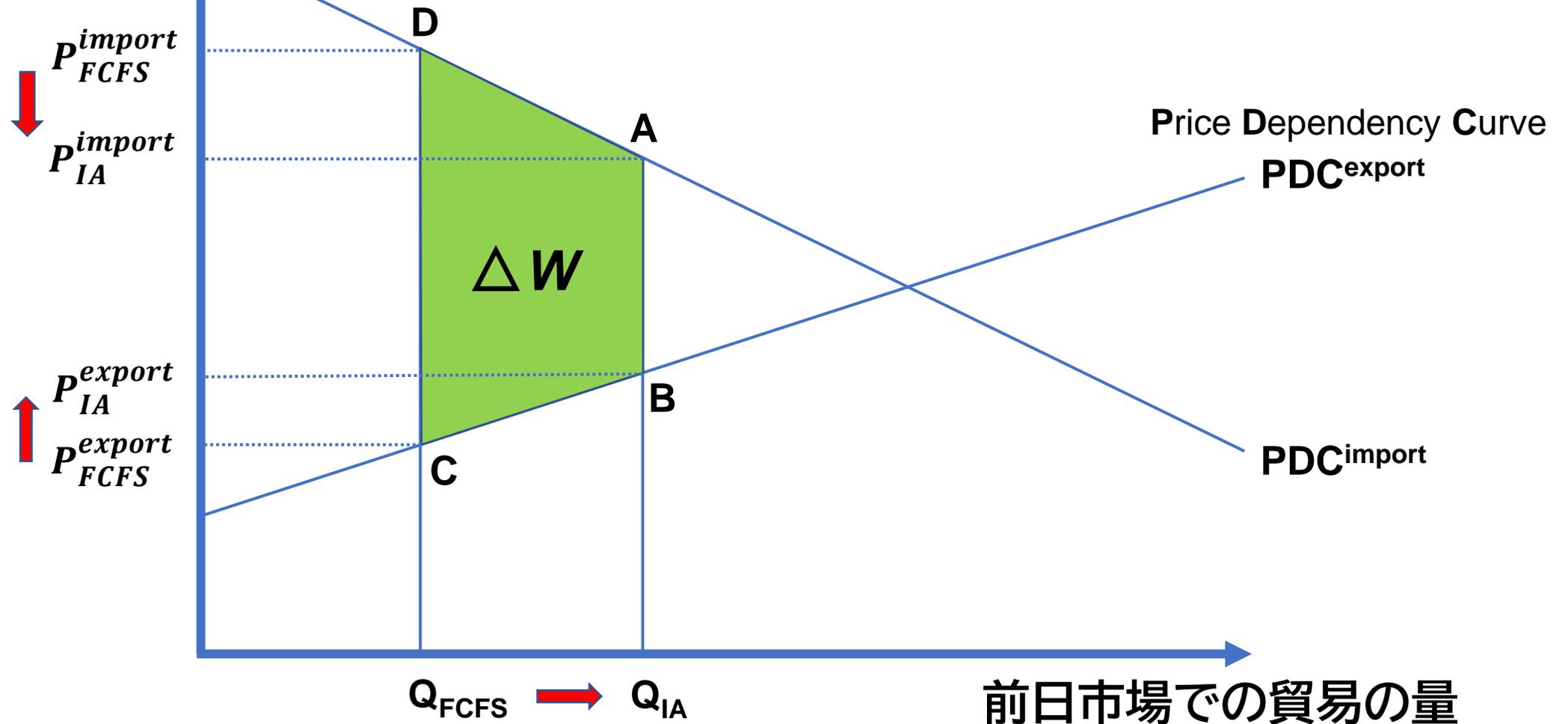


間接オークションの 経済効果

$$\Delta W = \frac{1}{2} \left\{ (P_{FCFS}^{import} - P_{FCFS}^{export}) + (P_{IA}^{import} - P_{IA}^{export}) \right\} * (Q_{IA} - Q_{FCFS})$$

エリアプライス

2018年10月以降の仮想的な $(P_{FCFS}^{import} - P_{FCFS}^{export})$ と Q_{FCFS} を推定する必要



2018年10月以降の仮想的な貿易量 \hat{Q}_{FCFS} の推定

- 2018年10月以前のデータを訓練データと検証データにランダムに2分割し、
- 訓練データを用いて2018年10月以前の連系線予約量を推定:

$$q_{reserve,t}^{pre} = \alpha_0 + \beta_1 Net\ Transfer\ Capacity_t + FE_t + e_t$$

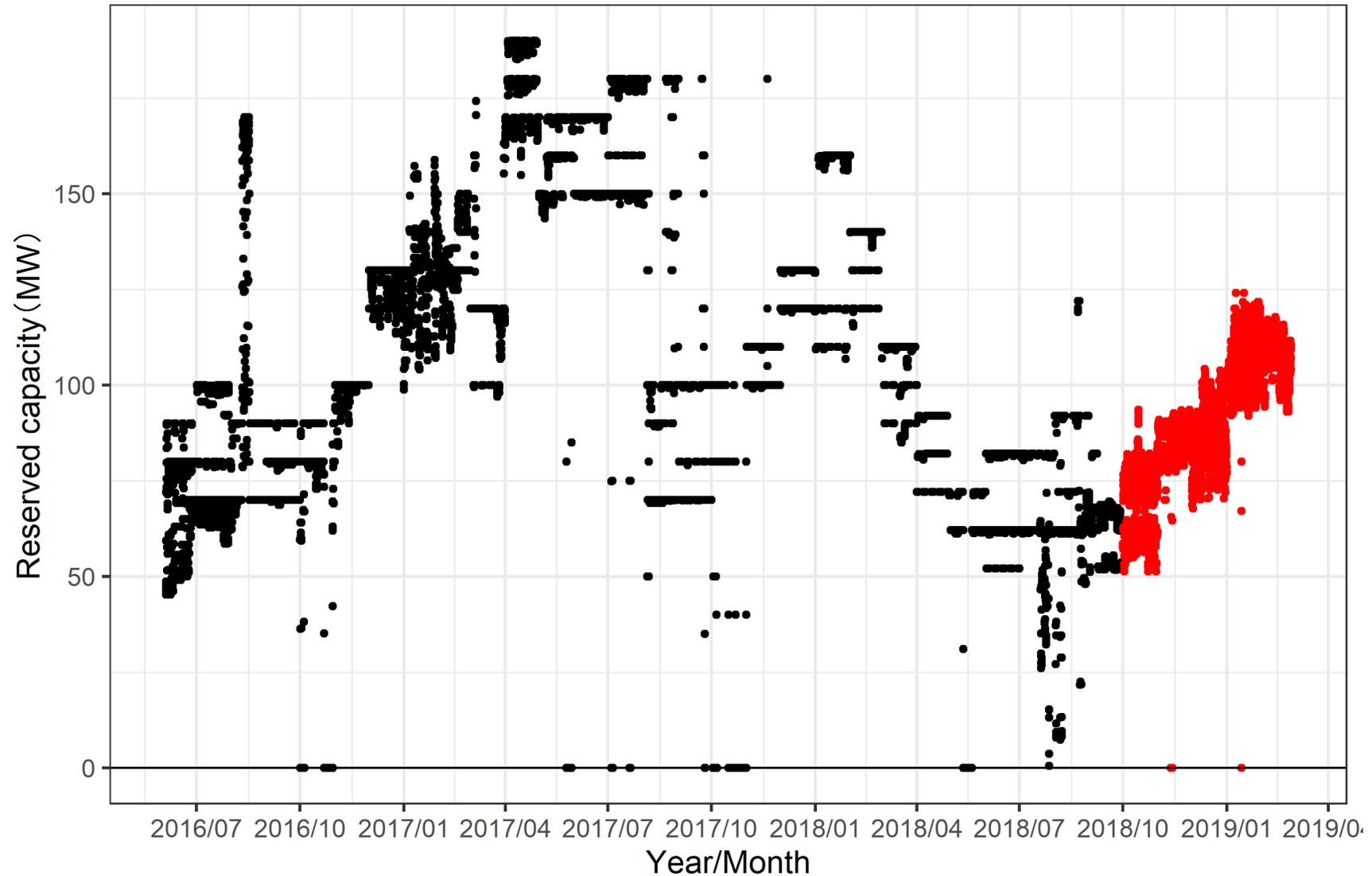
- 推定して得たモデルに、検証データを代入してテスト予測誤差 (MSE) を推定

	(1)	(2)	(3)
	OLS	LASSO	Random forest
テスト予測誤差	271.76	272.08	71.46

Note: In the Lasso regression, 10-fold cross validation is used to select an optimal lambda.
In the random forest, the number of variables randomly sampled as candidates at each split is six.

- RFのモデルを用いて、2018年10月以降の仮想的な予約量 $\hat{q}_{reserve,t}$ を予測

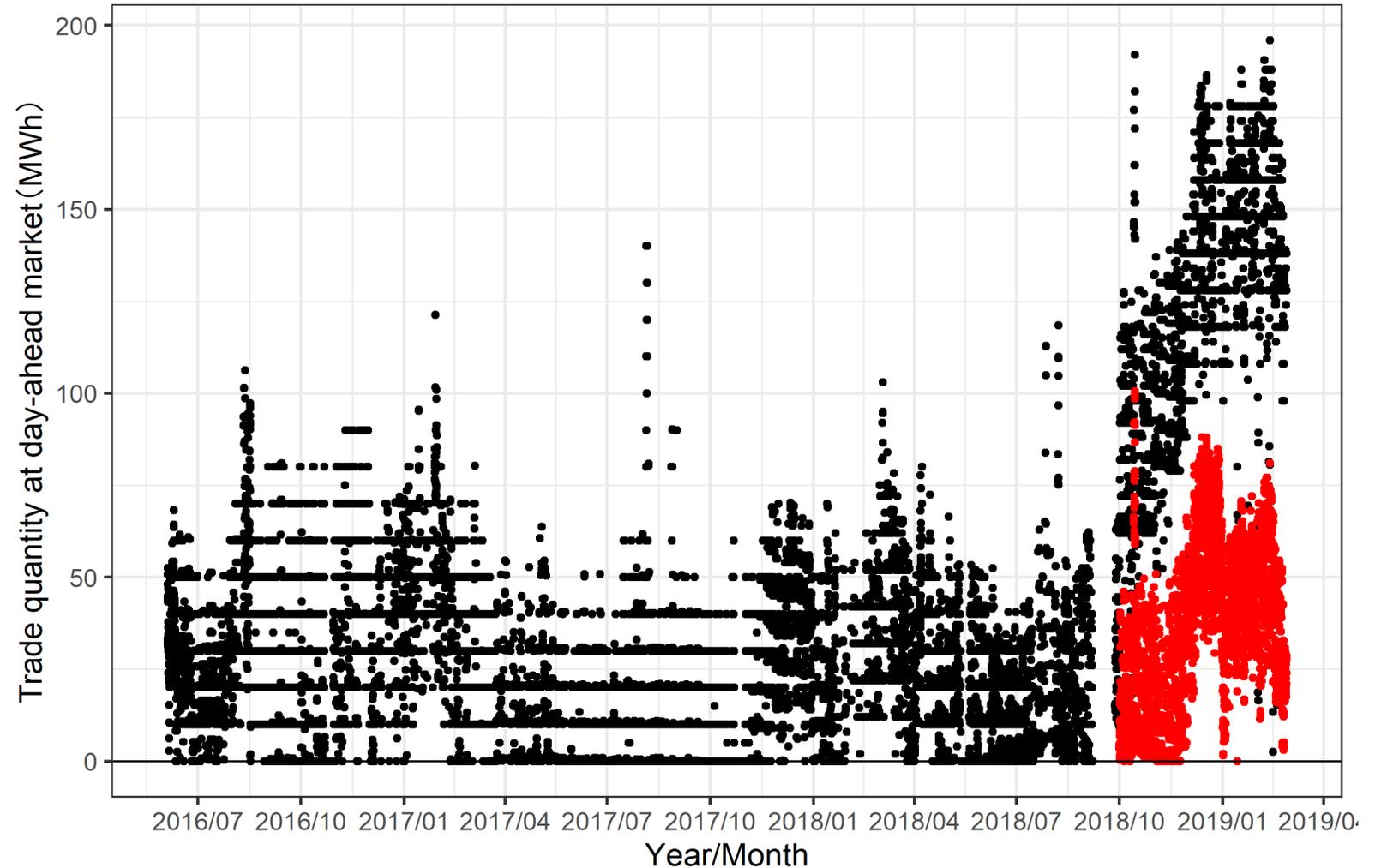
実際の (推定した仮想的な) 北本連系線の予約量



- 実際の（**仮想的な**）前日市場での貿易量を計算:

$$q_{DA,t} = q_{NTC,t} - q_{reserve,t} \text{ if } \Delta p_{DA} > 0$$

空き容量: q_{NTC}



2018年10月以降の仮想的な $\hat{P}_{FCFS}^{import} - \hat{P}_{FCFS}^{export} = \Delta \hat{p}_{DA,t}$ の推定

- 前日市場での貿易量と輸入エリアの追加買い入札量が、
- 輸入・輸出エリア間の市場価格の差に与えた効果を推定：

$$\Delta p_{DA,t} = \alpha_0 + \beta_1 q_{DA,t} + \beta_2 q_{bid@import} + \beta_3 Supply_t + \beta_4 Demand_t + FE_t + \varepsilon_t$$

- β_1 は貿易効果、 β_2 は入札量追加効果をそれぞれ示す。
- 輸入輸出エリア間の市場価格 $\Delta p_{DA,t}$ と前日市場での貿易量 $q_{DA,t}$ は同時に決定される。
- 前日市場での貿易量 $q_{DA,t}$ の操作変数として、連系線の空き容量を使用

2018年10月以降の仮想的な $\hat{P}_{FCFS}^{import} - \hat{P}_{FCFS}^{export} = \Delta \hat{p}_{DA,t}$ の推定

- 前日市場での貿易量と輸入エリアの追加買入札量が、
- 北海道と東北・東京間のエリアプライスの差に与えた効果を推定

	(1)	(2)	(3)
β_1	-0.036***	-0.022***	-0.020***
	(0.007)	(0.005)	(0.005)
β_2	0.016*	0.067**	0.046*
	(0.009)	(0.007)	(0.025)
F-test	266.851	200.874	186.366
Month × Year FE	No	Yes	Yes
Hour × Month FE	No	No	Yes

標準誤差は日レベルでクラスタリング。 *** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

貿易効果と入札量追加効果は、打ち消し合っている。

Welfare Analysis	HH	FC
△エリアプライスの差の平均値 (yen/kWh)		
先着優先		
2018/10前 (actual)	2.74	1.17
2018/10後 (counterfactual)	4.22	2.19
間接オークション		
Post 2018/10 (actual)	6.20	2.38
差	+1.98 円/kWh	-0.17 円/kWh
貿易量の平均値 (MW)		
先着優先		
2018/10前 (actual)	19.04	61.31
2018/10後 (counterfactual)	49.80	51.72
間接オークション		
2018/10後 (actual)	124.48	470.85
差	+74.68MW	+419.13MW
経済効果 (億円/5か月間)		
△W	13.8億円	35.6億円

間接オークションの経済効果

$$\sum_t^T \Delta W = \frac{1}{2} \left\{ \left(P_{FCFS}^{import} - P_{FCFS}^{export} \right) + \left(P_{IA}^{import} - P_{IA}^{export} \right) \right\} * (Q_{IA} - Q_{FCFS})$$

t = 2018/10/01 T = 2019/02/28.

北海道エリアの石狩湾新港でLNGが運転開始したため、貿易効果の計算は、IAから2019年2月末までの5か月間とした。

連系線	北本	FC
経済効果 (億円/年)	33.1	85.5

結論

- 間接オークションには、貿易効果だけではなく、入札量追加効果がある（⇔増強）。
- IAの発電費用の削減効果は、実施から5か月間で、北本で13.8 億円、FCで35.6 億円。年間換算では計118.6億円。
- 間接オークションは、増強と違って投資費用はほぼないため、費用対効果は高いと考えられる。