

---

# 最適電力システムモデルによる自然変動電源 大量導入施策の分析

工学系研究科社会連携・産学協創推進室  
ワークショップ: エネルギー

平成30年3月30日

東京大学 大学院工学系研究科  
藤井・小宮山研究室

# 電力系統モデル(最適電源構成モデル)

分析手法： 線形計画法 (10分値での分析の場合、制約条件数：2億本、変数1.5億個)

- 目的関数：固定費（発電・電力流通設備）＋燃料費（火力・原子力）＋電力貯蔵設備運用費
- 制約条件：同時同量制約、発電出力制約、供給予備力制約、負荷追従制約、最低出力制約（火力・原子力）、送電容量制約、電力貯蔵設備制約、設置可能容量制約、SNSP制約など

地理的解像度：135地点、166本の基幹送電線(沖縄除く)  
→ **352地点、441本の基幹送電線(沖縄除く)へ拡張**

時間解像度： 6時点/時間(10分値)×24時間/日×365日=  
52,560 時点 / 年

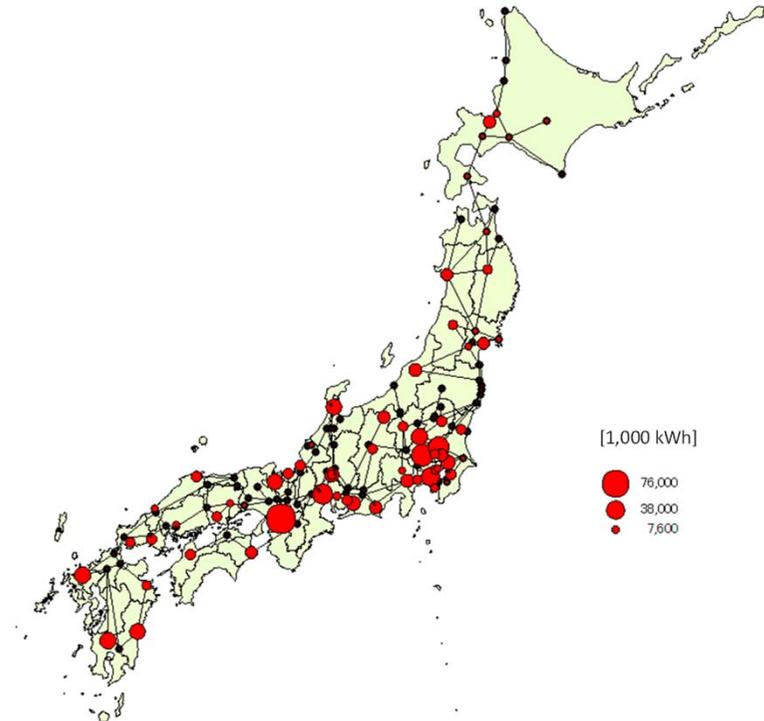
発電設備： 石炭, 天然ガス複合, 天然ガス汽力, 石油, 原子力, 水力, 地熱, バイオマス, 海洋, 太陽光, 風力

電力貯蔵設備： 揚水式水力, NAS電池(低Cレート、長周期変動用), Li-ion電池(高Cレート、短周期変動用)

(参考)

- 杉山, 小宮山, 藤井, 電気学会論文誌B, Vol.136, No.12, pp.864-875 (2016)
- Komiyama, R., Fujii, Y., *Energy Policy*, Vol.101, pp. 594–611 (2017)
- 経済産業省: 東京大学 藤井・小宮山研究室、平成28年度 産業経済研究委託事業調査(電力需給モデルを活用したシミュレーション調査) 調査報告書 (2016)

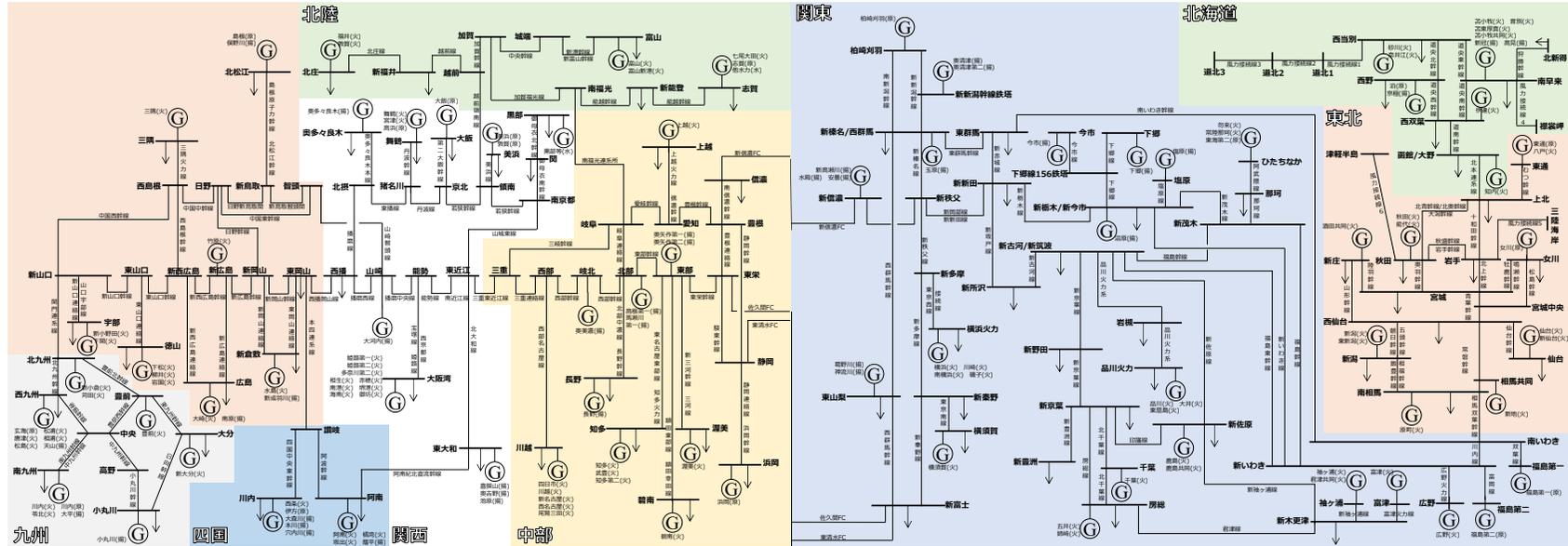
## 発電・需要ノードの地理的分布



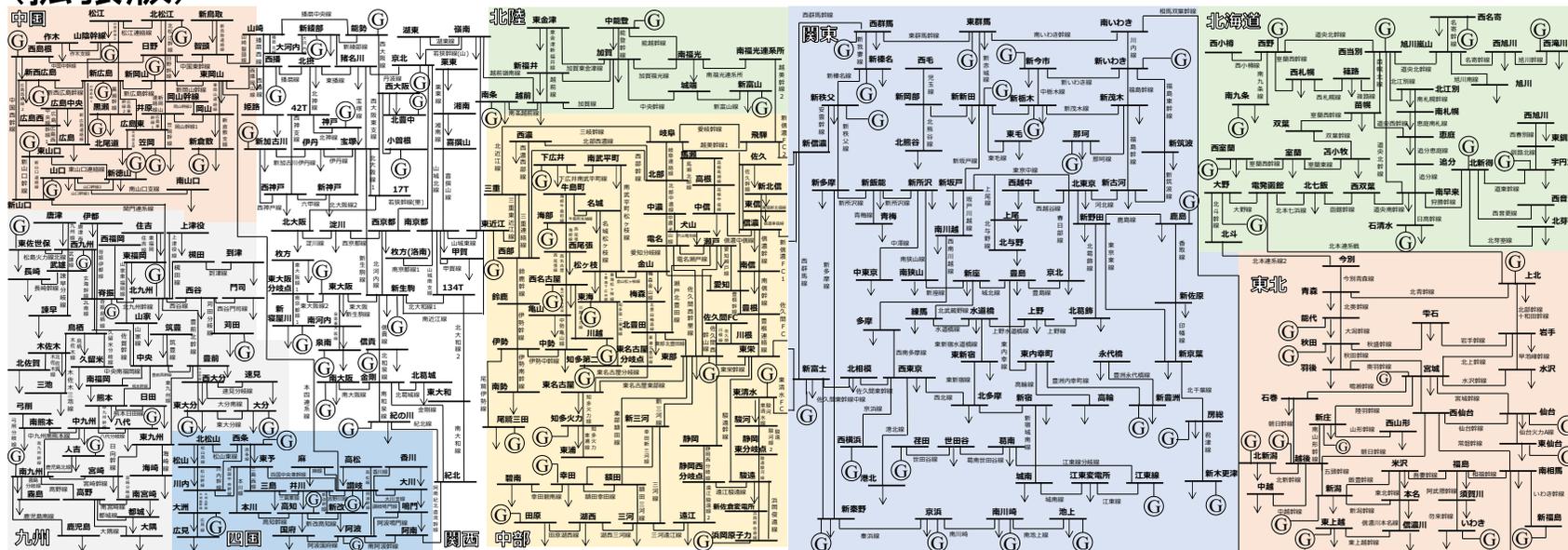
\* 全量メリットオーダー取引、連系線の間接利用オークションを想定

# 電力基幹流通システムモデル

(既存)



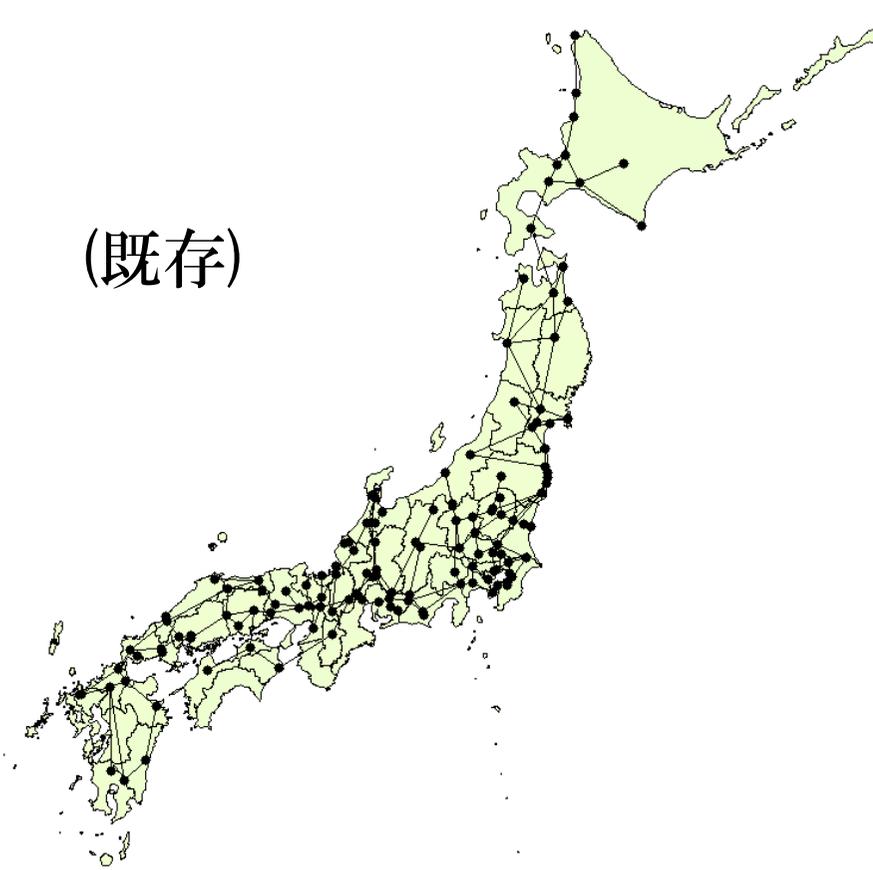
(拡張版)



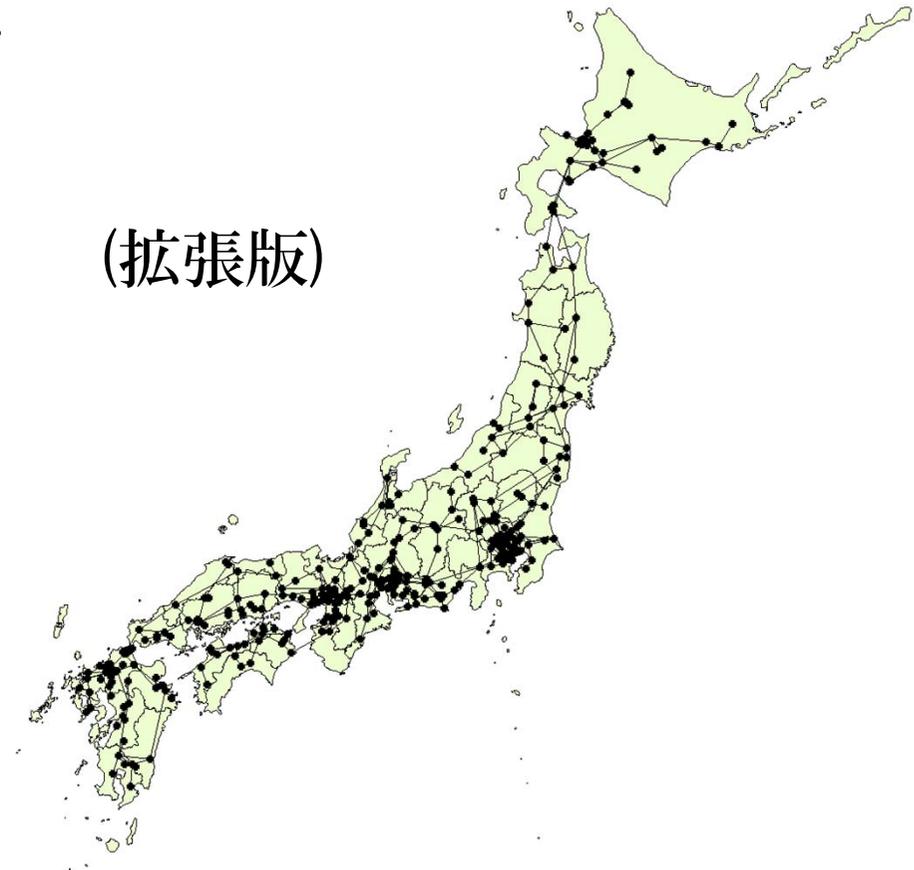
# 電力基幹流通システムモデル

## 発電、需要ノードの地理的分布

(既存)



(拡張版)

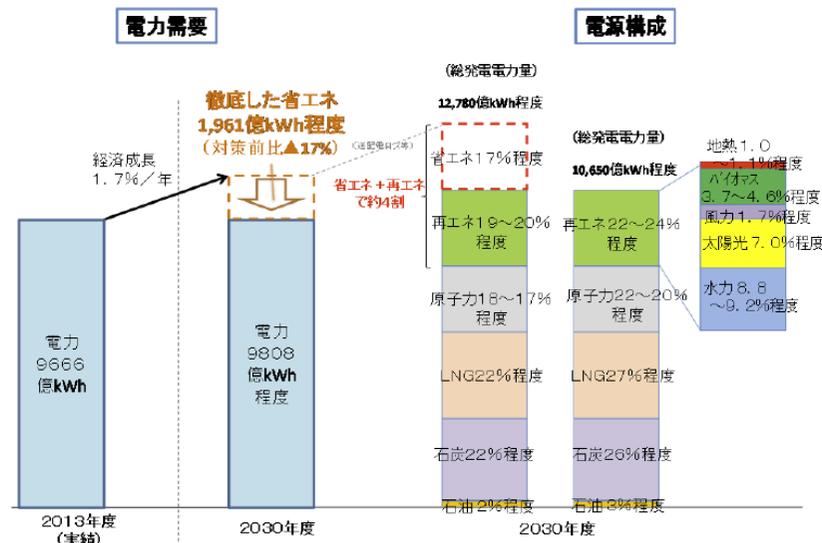


# 主な前提条件

需給の前提は、経済産業省 長期エネルギー需給見通し(2030年)に従い設定。

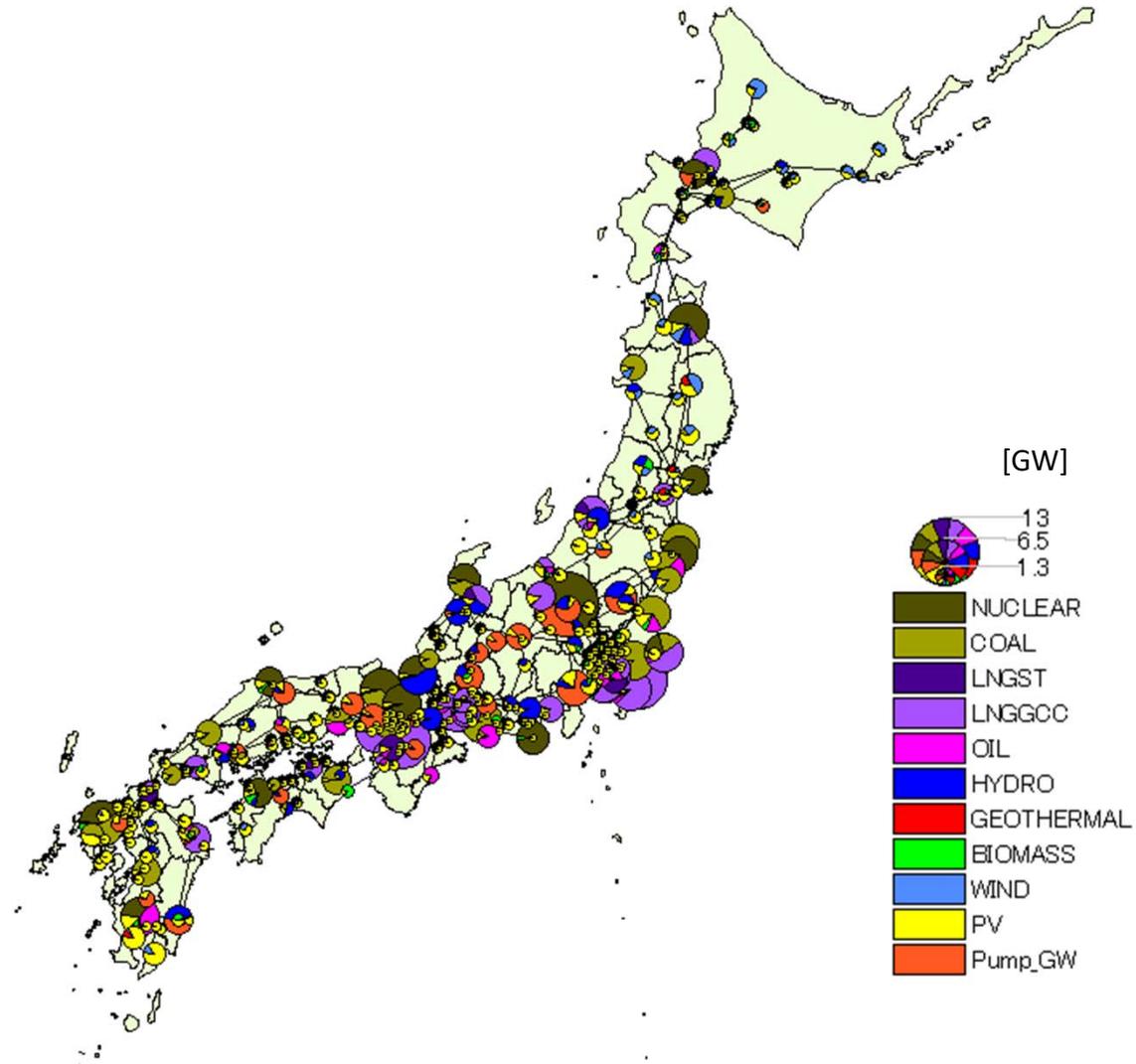
- 原子力：長期エネルギー需給見通しに準じて設定(各社および全国で発電量比率21%)
- 再エネ：長期エネルギー需給見通しに準じて発電量比率23%とする。
  - 風力発電は長期エネルギー需給見通しにおける導入見込量(1,000万kW)を設定(既導入量は286万kW)
  - 太陽光発電は長期エネルギー需給見通しにおける導入見込量(6,400万kW)を設定。
  - 太陽光、風力の地点別導入量はFIT認定容量、環境省によるポテンシャル推計を基に設定
  - 一般水力は長期エネルギー需給見通しにおける水力発電の導入見込量(4,900万kW)から揚水発電(2,600万kW)を差し引き2,300万kWを設定。
  - 地熱発電は長期エネルギー需給見通しにおける導入量(150万kW)を設定(既導入量は52万kW)
  - バイオマス発電は長期エネルギー需給見通しにおける導入量(600万kW)を設定(既導入量は267万kW)
- 火力：供給計画を基に、長期エネルギー需給見通しの発電量比率にて設定(石油3%、石炭26%、LNG27%)。
- 揚水式水力：供給計画等を基に設定。発電容量に加え、池容量も各エリアの情報を基に設定。
- 電力需要：長期エネルギー需給見通し、および自家発電比率を考慮して設定。
- 電力線容量：域内線容量は各社資料を基に設定。連系線容量は広域機関資料を基に設定。

## 経済産業省 長期エネルギー需給見通し



# 前提条件(発電設備)

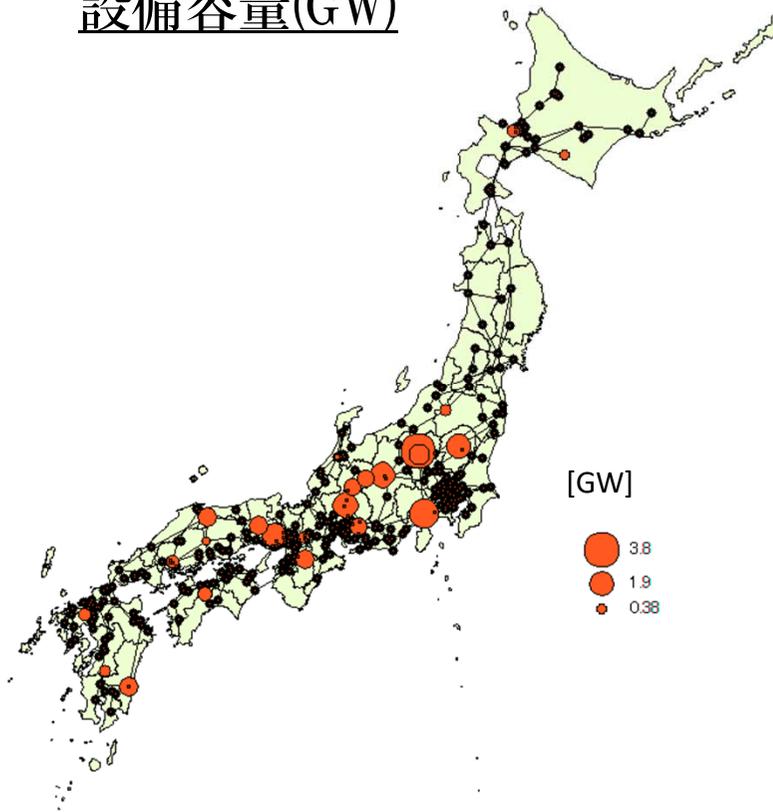
経済産業省の長期エネルギー需給見通し、広域機関の供給計画を基に設定



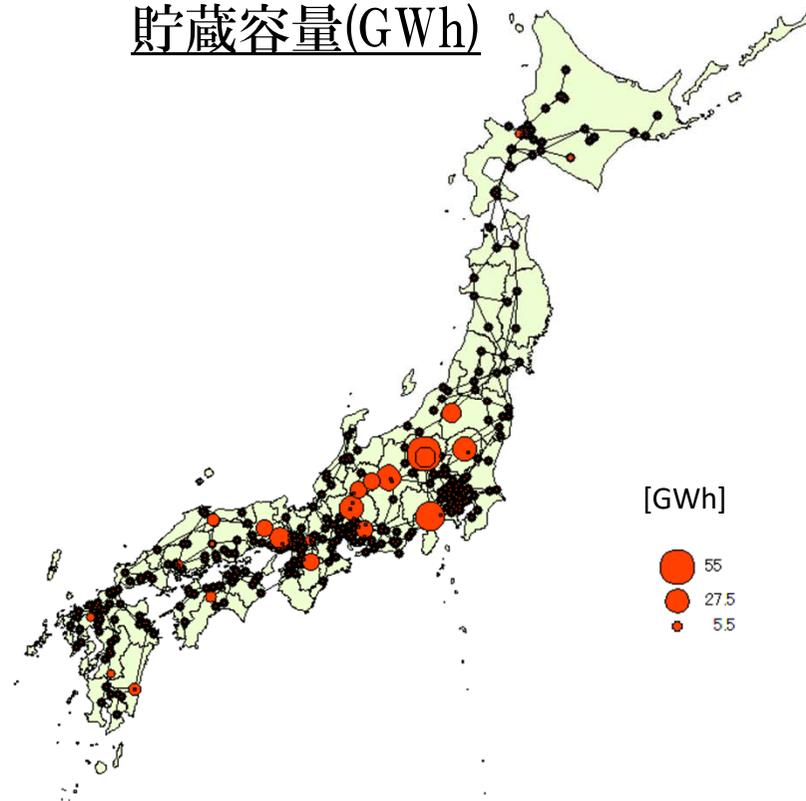
# 前提条件(揚水発電)

設備量は供給計画を基に設定。池容量は、経済産業省(系統WG)の各社資料より設定。

設備容量(GW)



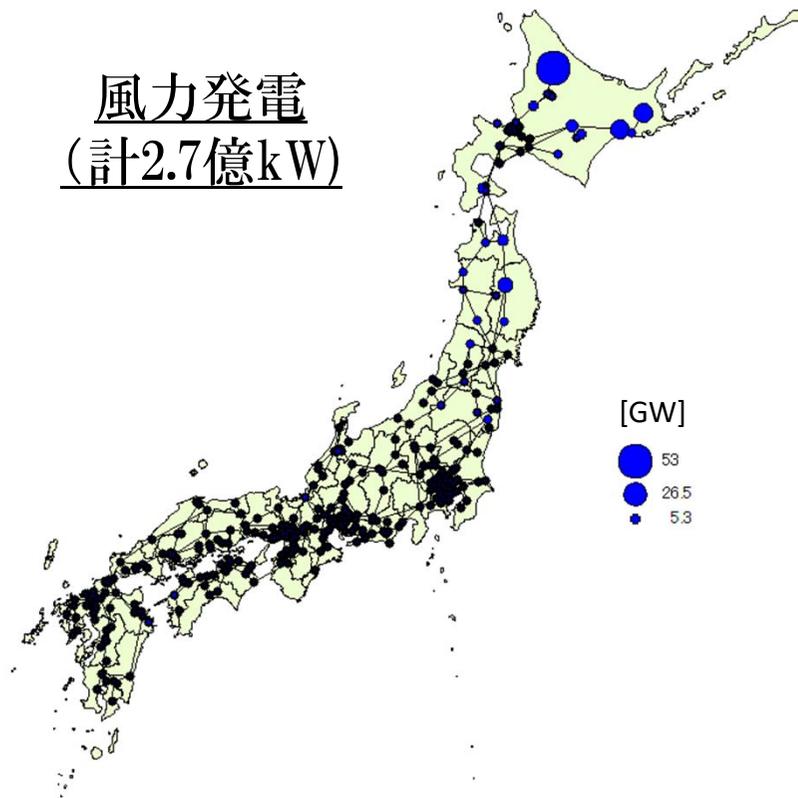
貯蔵容量(GWh)



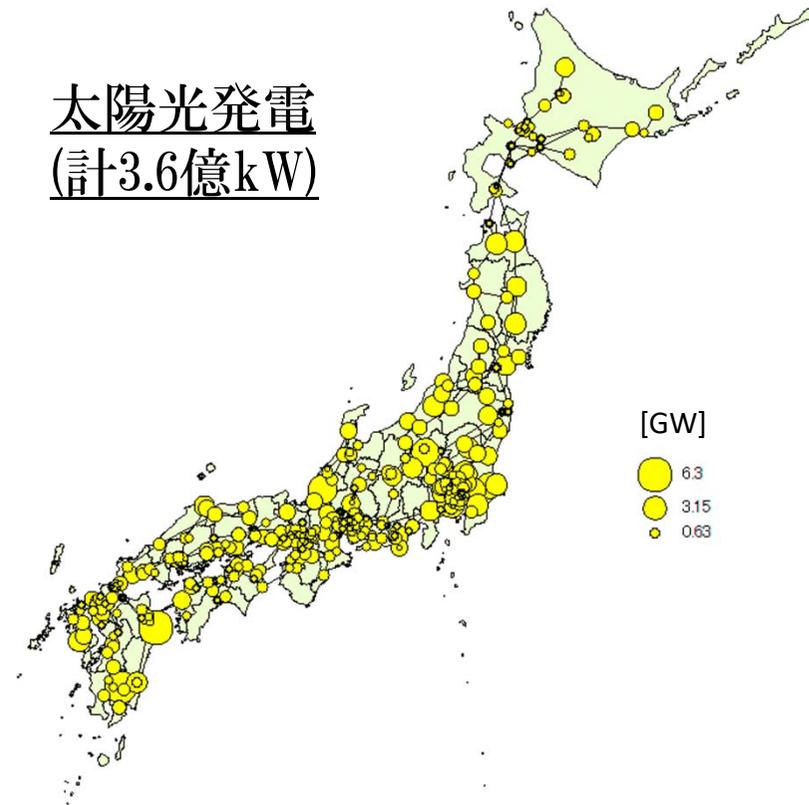
# 太陽光発電・風力発電ポテンシャル

環境省 再生可能エネルギー導入ポテンシャルマップを基に、再生可能エネルギー導入シナリオを作成し、最適電源構成モデルにより分析

風力発電  
(計2.7億kW)



太陽光発電  
(計3.6億kW)



# 再エネ導入量の感度分析

---

▶ 基準ケース

長期エネルギー需給見通しに準拠して設定 (再エネ電力比率23%)

▶ 再エネ3割ケース

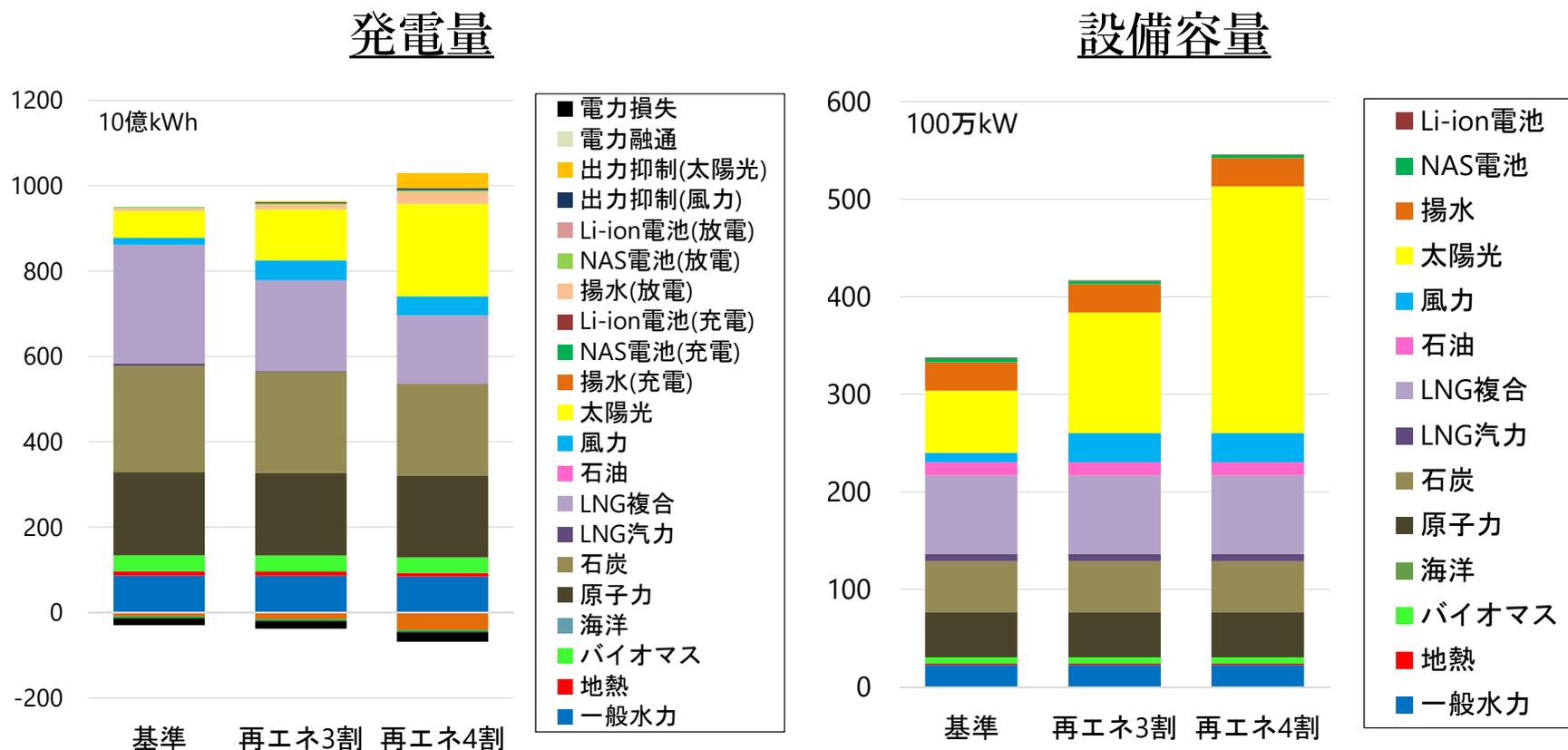
再エネ電力比率を約3割に設定 (風力3000万kW, 太陽光1.28億kW)

▶ 再エネ4割ケース

再エネ電力比率を約4割に設定 (風力3000万kW, 太陽光2.56億kW)

# 発電量構成(地域別)

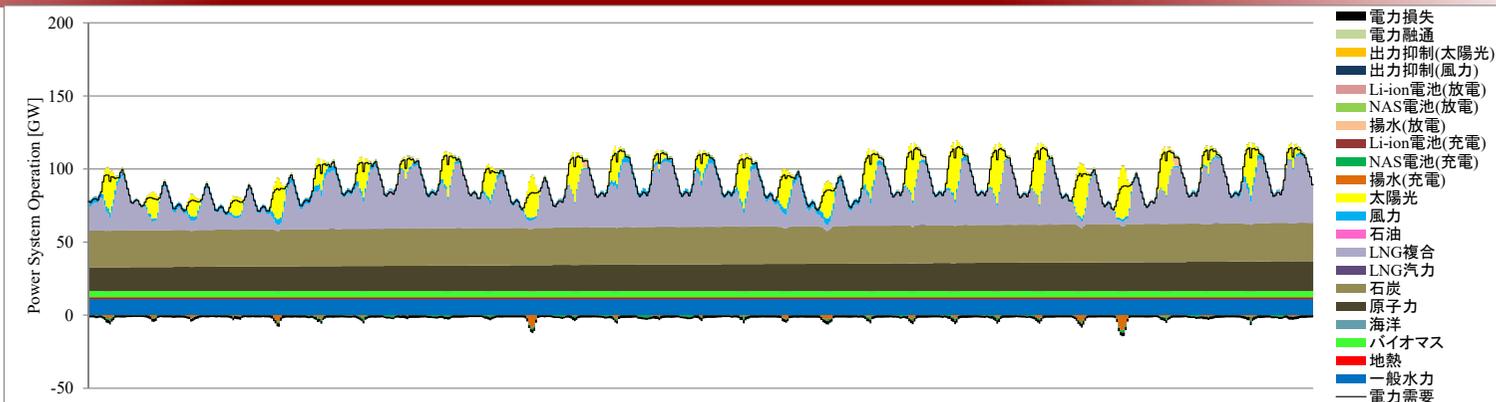
- 再エネ導入比率増加に伴い、火力(LNG複合火力)の発電量の低下、出力制御の増加、揚水充放電の活用が見られる。
- 稼働率の低い太陽光の増加に伴い、発電設備容量が大きく増加する。



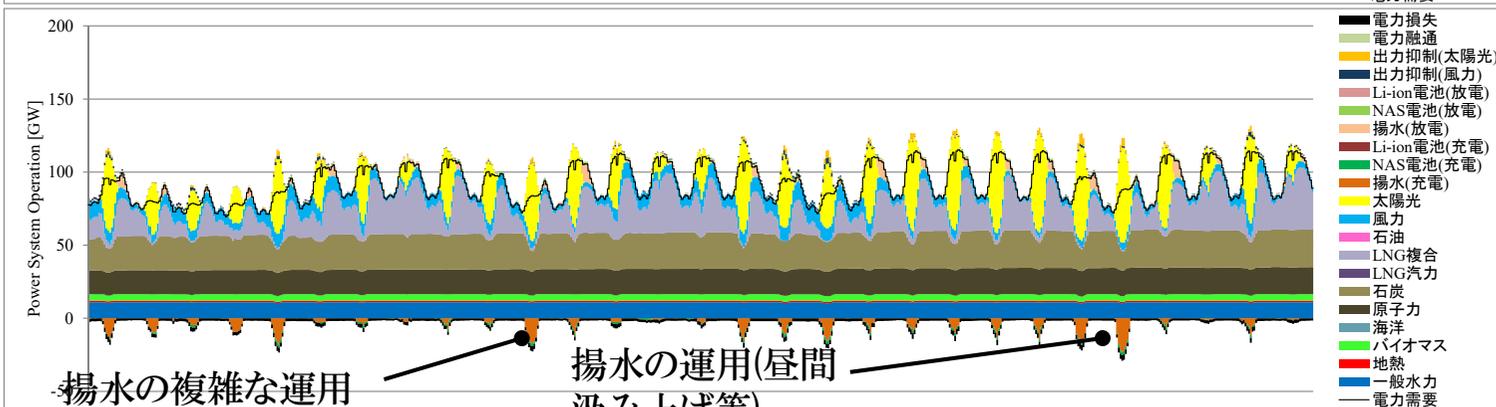
# 需給運用(5月、日本)

再エネ大量導入下では、再エネ出力抑制、電力貯蔵、火力の負荷追従運転、ベースロード電源(石炭)の出力抑制、地域間電力融通(送電ロス増加)など総合的な対策が必要

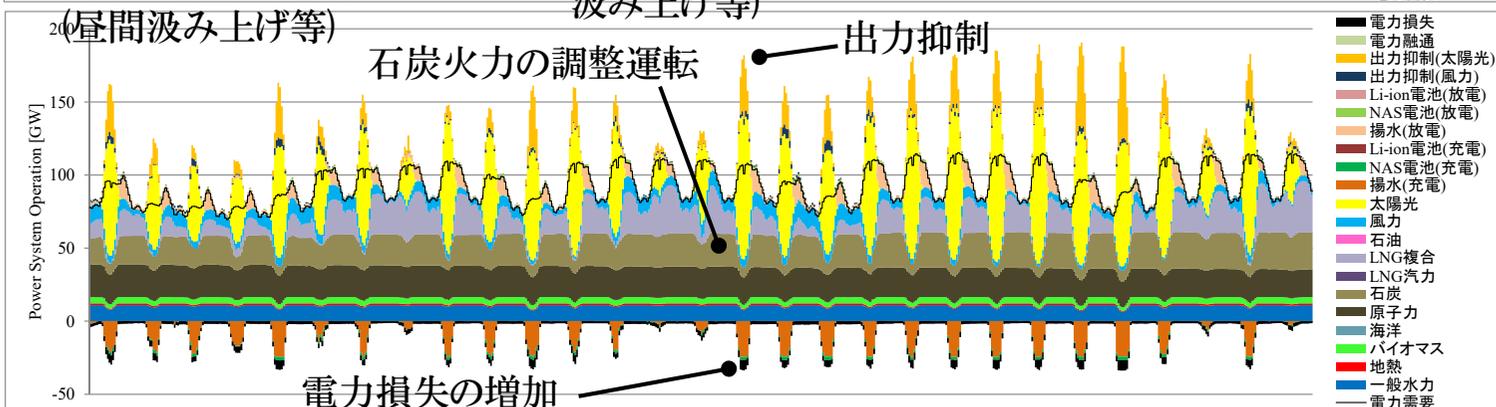
基準



再エネ3割



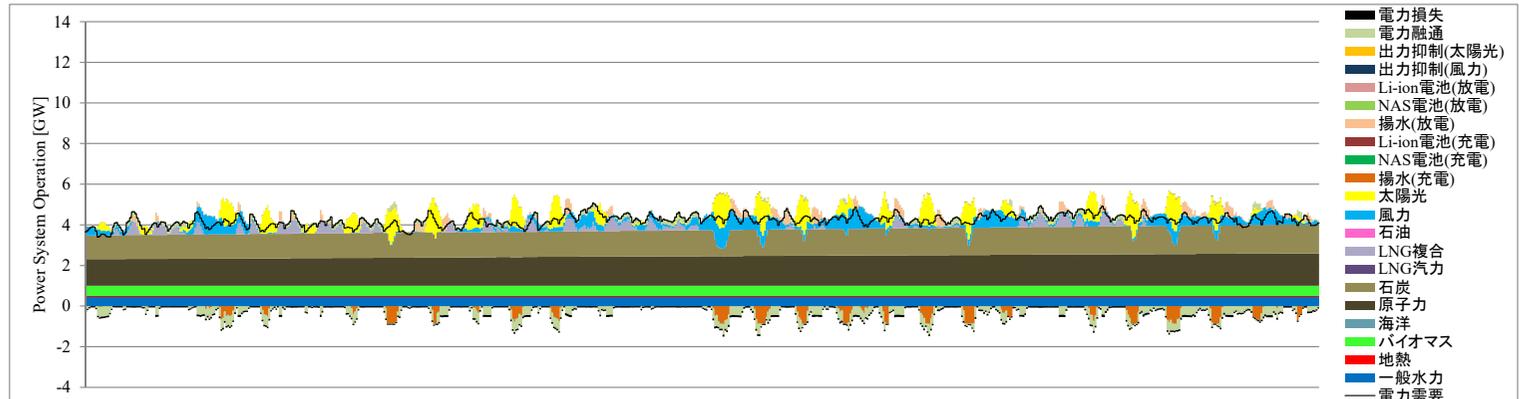
再エネ4割



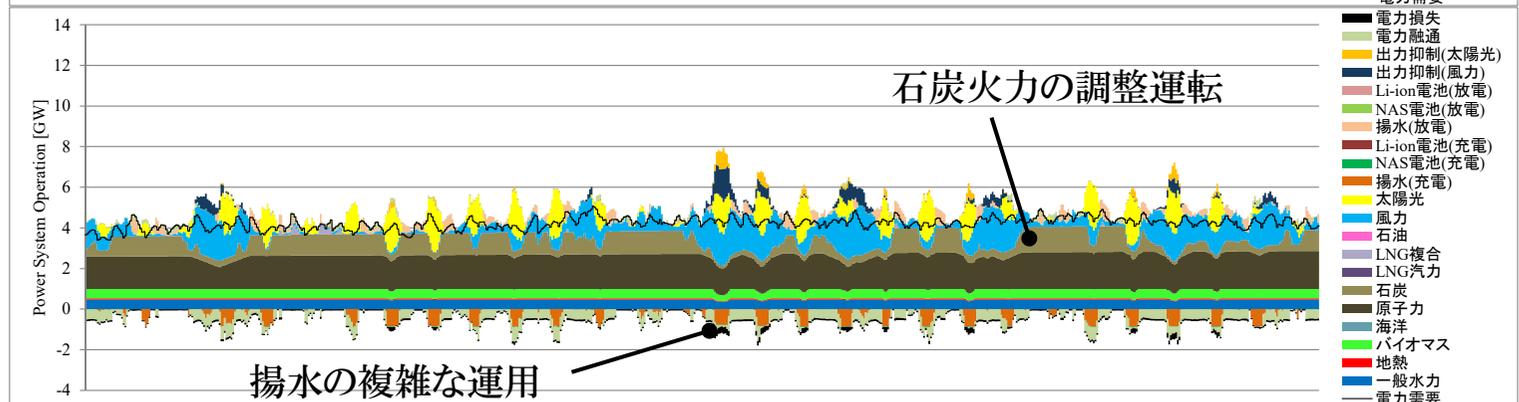
# 需給運用(12月、北海道)

再エネ大量導入下では、電力貯蔵(揚水)の容量制約、連系線(北本連系線)の容量制約、火力の最大限の最低出力運転により、太陽光・風力の大規模な出力制御が行われる。

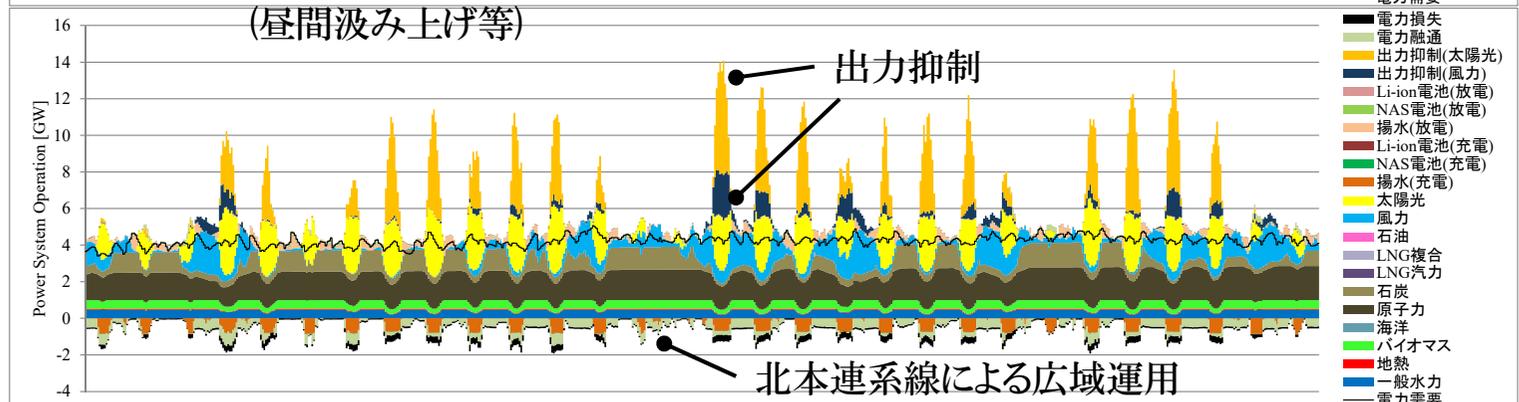
基準



再エネ3割



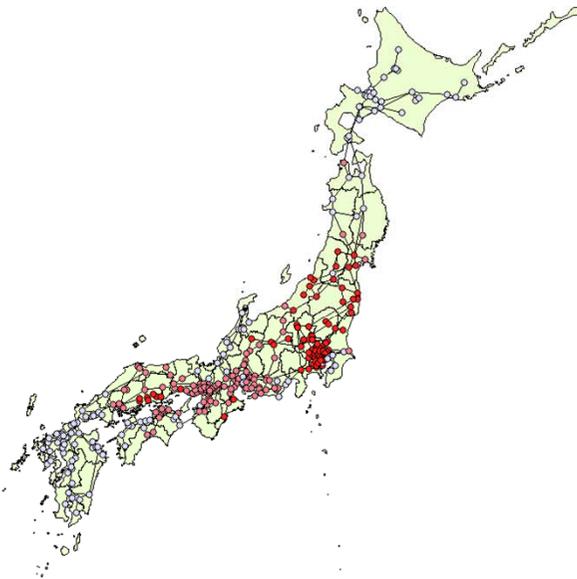
再エネ4割



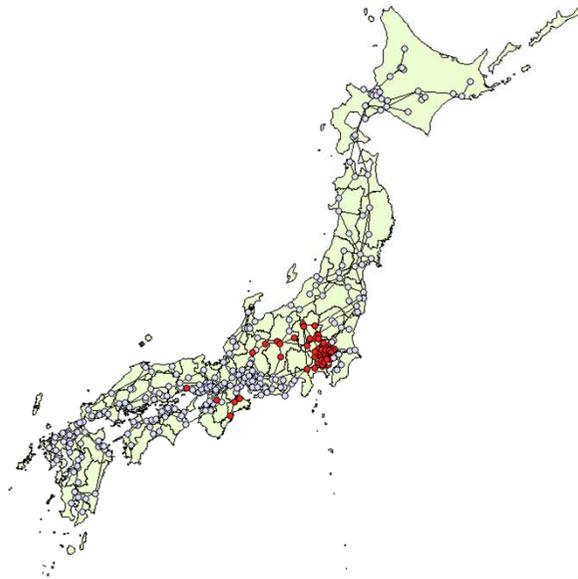
# 地点別電力限界価格(ノーダルプライス)

352地点の年平均電力価格を分析すると、再エネ3割、4割ケースでは、再エネ余剰電力の影響により、北海道や東北、九州など全国的に電力価格が低下

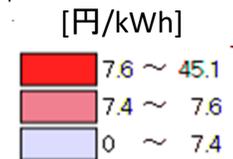
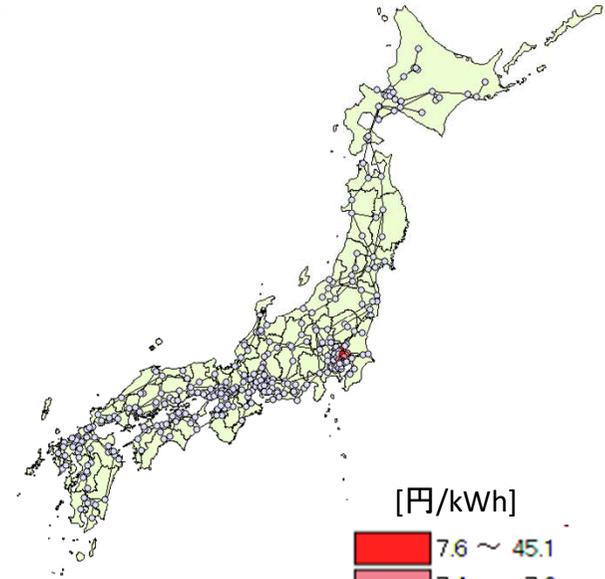
基準ケース



再エネ3割ケース



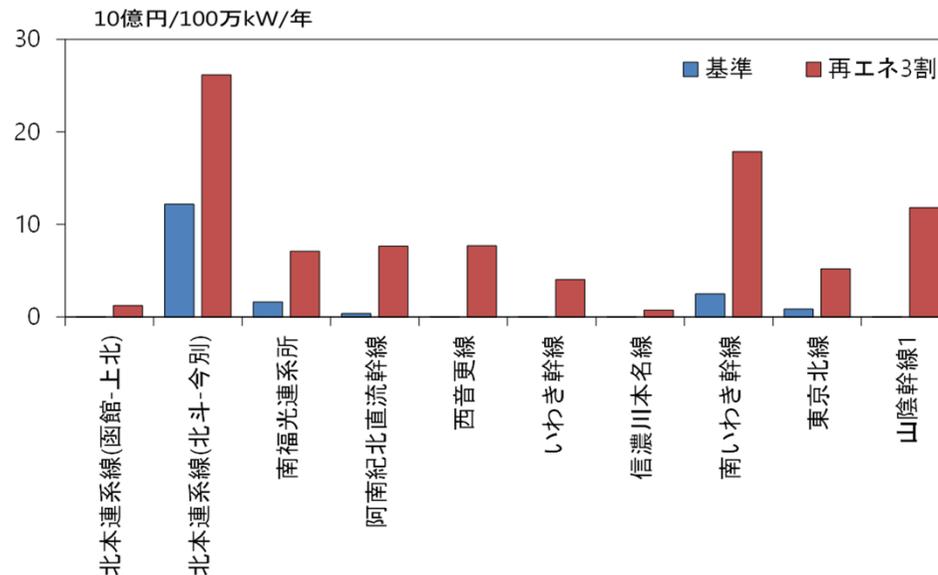
再エネ4割ケース



# 送電線増強のシャドープライス(費用対効果)

- 電力流通システムの増強は、系統安定化や再エネ連系可能量拡大等に貢献する可能性がある。各流通系統増強の経済合理性を踏まえた系統拡張計画の策定が重要となる。
- 送電容量が単位容量(100万kW)増加した際に削減される電力システム総コスト(10億円/100万kW/年)を計算 (各流通系統のシャドープライスを計算)。
- 北本連系線等の連系線や域内線では、再エネ導入量増加に伴い負荷率が高まること等の理由より、コスト削減効果が大きくなる。これらの送電線は増強を検討する意義が経済的に見て相対的に大きい。

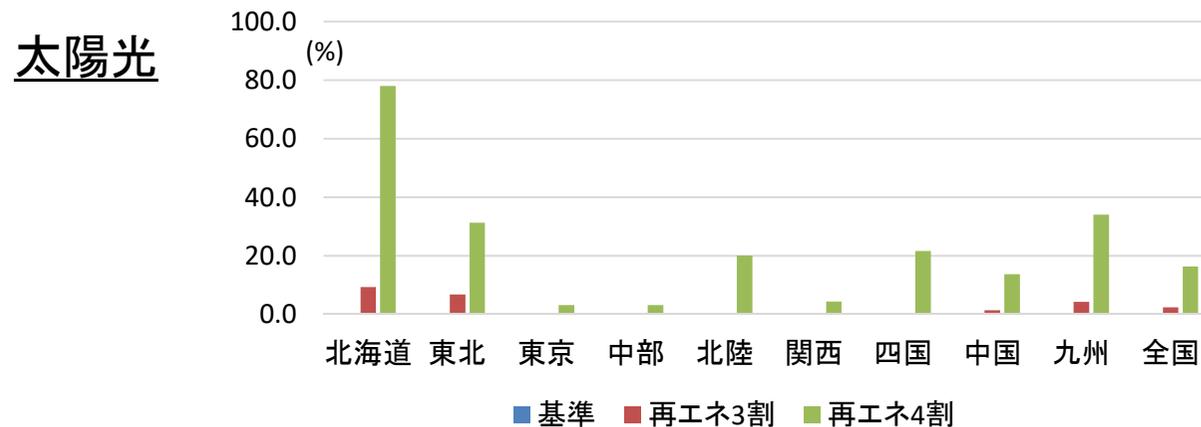
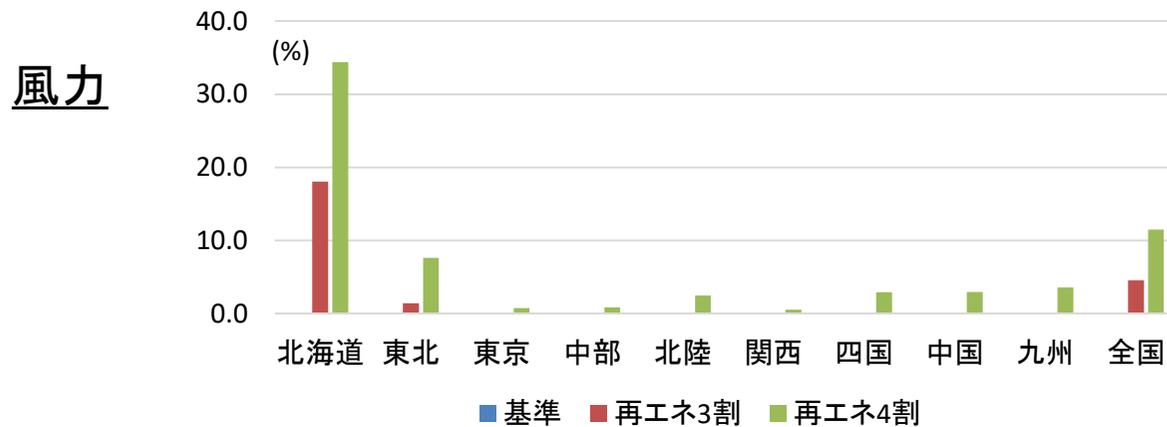
送電線増強に伴う電力システム総コスト削減額  
(送電線増強のシャドープライス)(441本の電力線より一部抜粋)



# 出力制御(出力抑制率)

再エネ比率拡大に伴い、再エネポテンシャルが大きく系統容量の小さい北海道、東北、九州等で出力制御量が増加

\* 出力抑制率：年間出力制御量÷年間発電量



# おもな課題

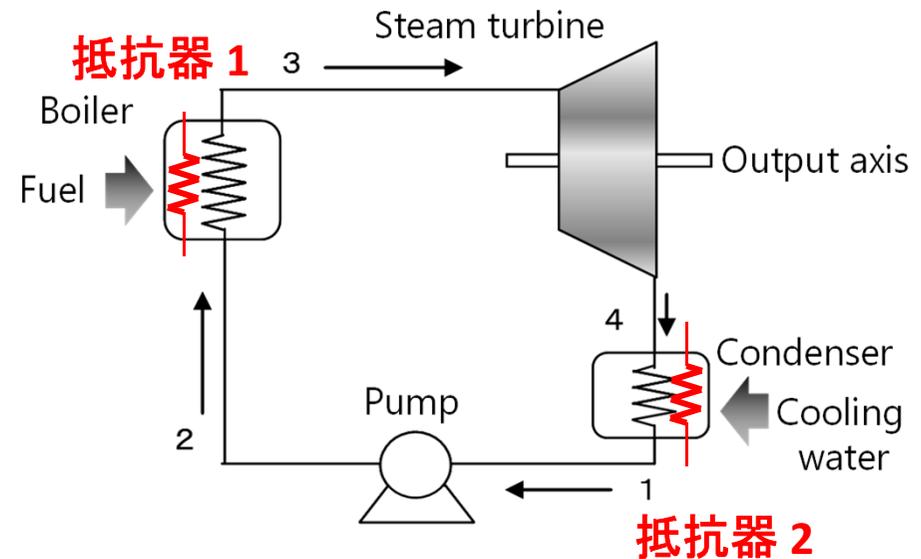
---

- 火力発電の起動停止の考慮
- 不確実性の考慮
  - 自然変動電源の出力予測誤差
  - 事故や故障
- 自然変動電源の余剰電力活用
  - 電熱利用
  - 燃料合成
- 新電力システム？
  - 配電のデジタル化(情報だけでなくエネルギーも)
  - AIによる分散高速取引

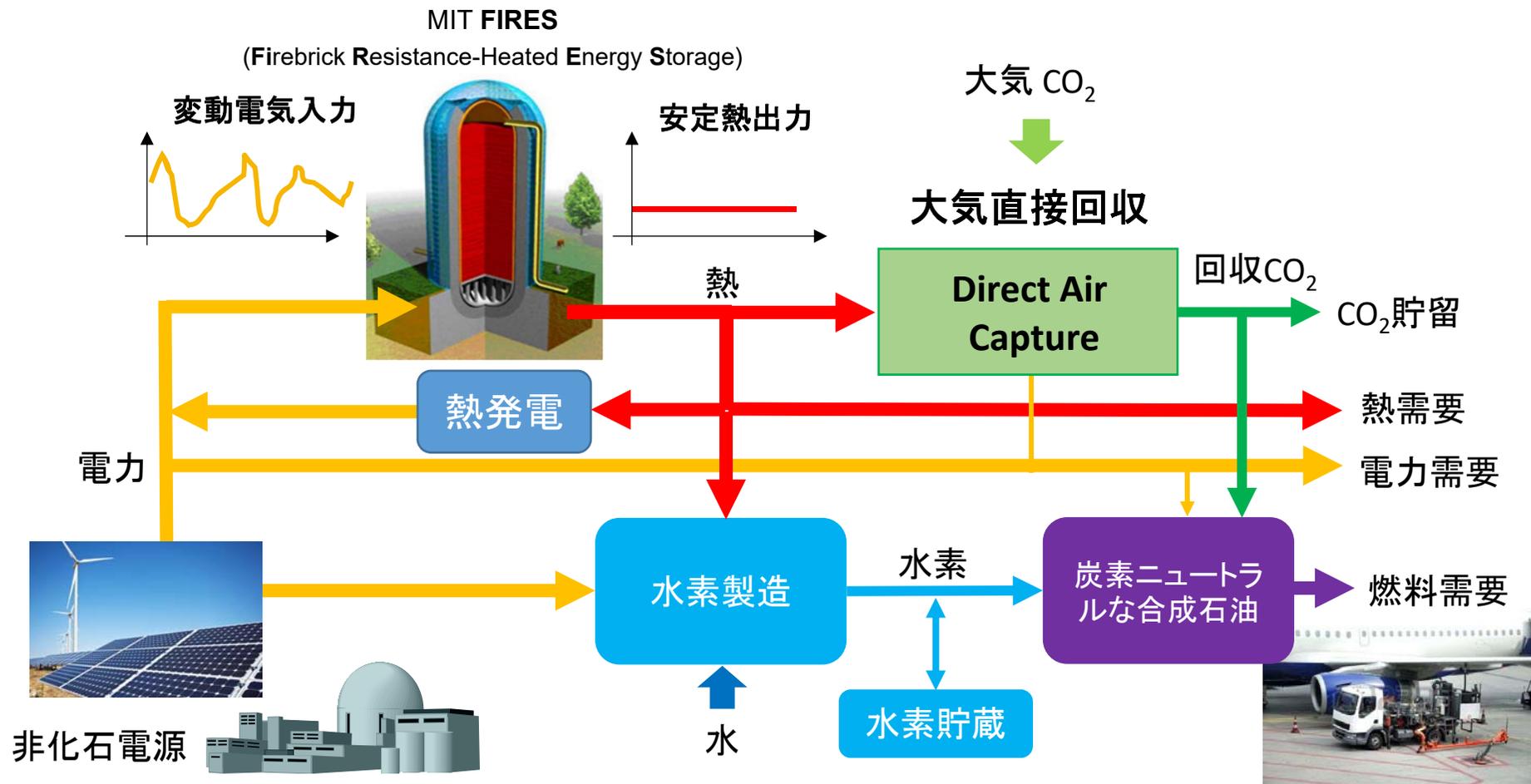
# 短期的なアイデア

## □ 火力と自然変動電源の共存

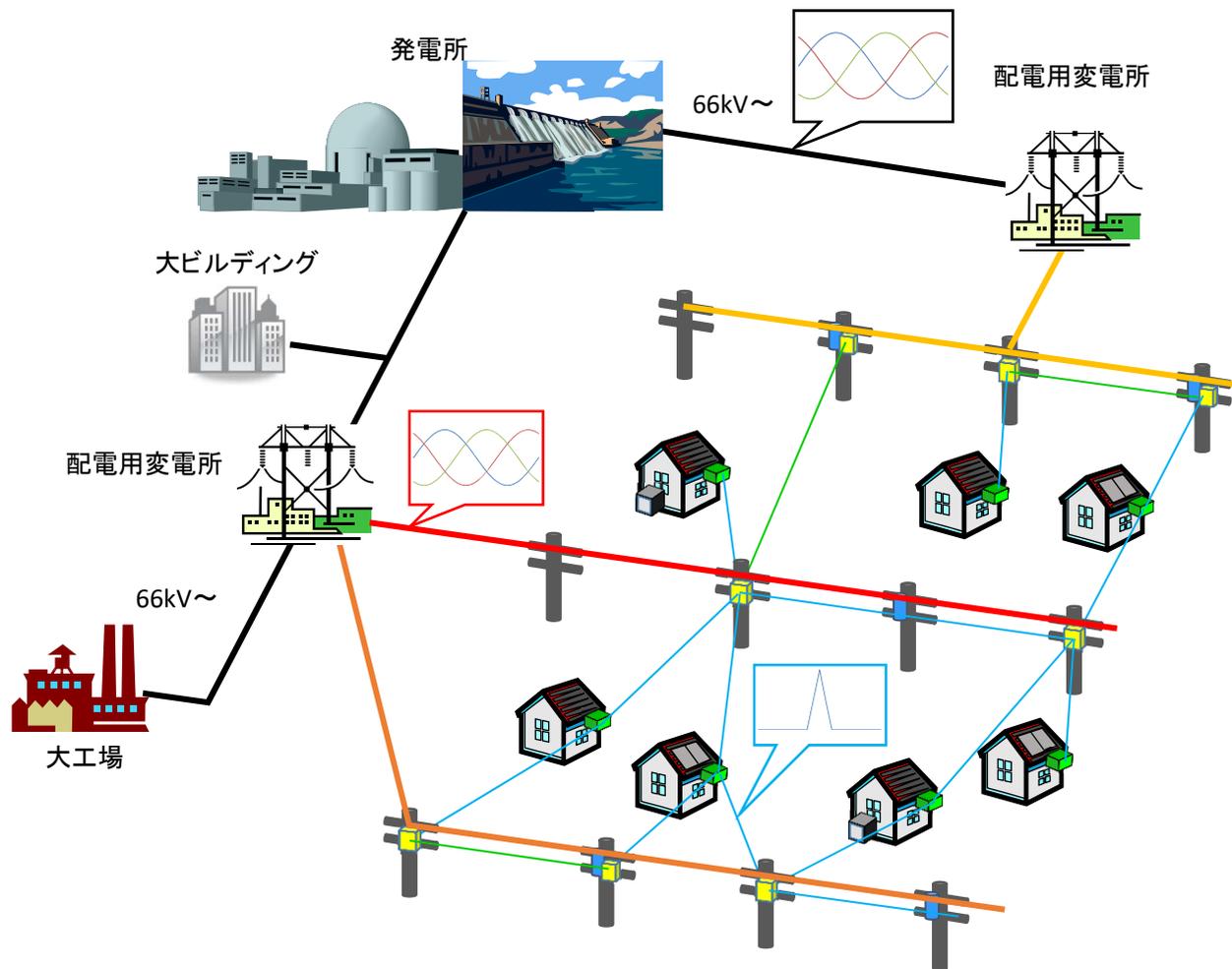
- 火力発電プラントの**ボイラー内**と**復水器内**へ抵抗器を設置し、余剰電力を消費することも考えられる。
  - **ボイラー内**: 最低負荷運転時の燃料費節減
  - **復水器内**: 余剰電力の緊急処理(電力価格がマイナスの時)



# 中長期的なアイデア



# 新電力システムのイメージ



	PV導入家庭
	燃料電池導入家庭
	系統インターフェイス
	アダプタ
	分散高速取引市場

-  三相高圧送電線
-  6.6kV三相配電線
-  パルス配電線
-  市場間接続線

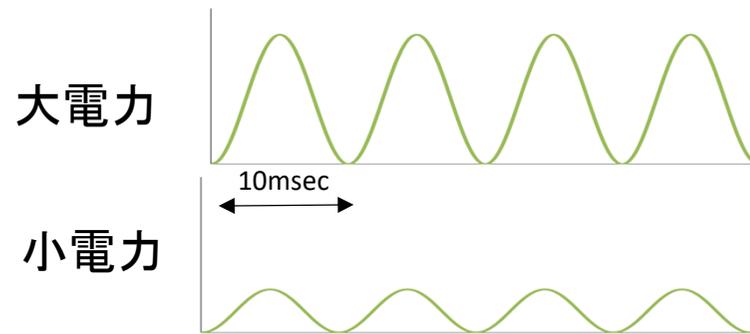
井上 淳, 藤井 康正, 「パケット電力取引に基づく革新的配電システムの提案」, 電気学会  
論文誌. B, (電力・エネルギー部門誌), Vol. 131 (2011) No. 2 pp.143-150

# パルス送電による高速取引

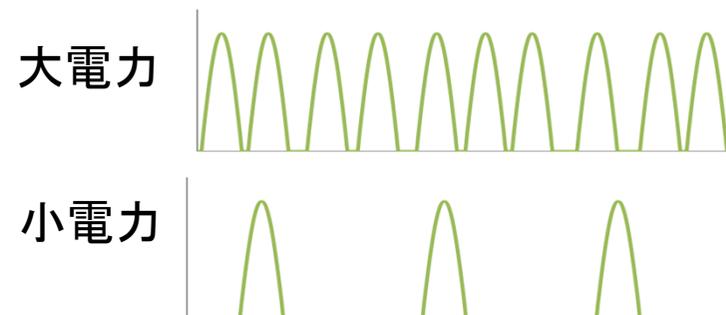
## □規格化された電流・電圧波形によるパルス状の電力による取引

- パルス単位の**高速取引**が可能か？(1秒間に100回など)
- 断続的な送電となるため、時間的に連続的な電力供給等のためには、短時間の**バッファ**が必要
- バッファ導入により「**同時同量**」の桎梏からの解放
- 低電圧の小容量送電であれば、現状の技術でも実現可能ではないか。

ただし、現状での**スイッチング損失は大きい**。



交流送電取引



パルス送電取引

# 分散高速取引市場

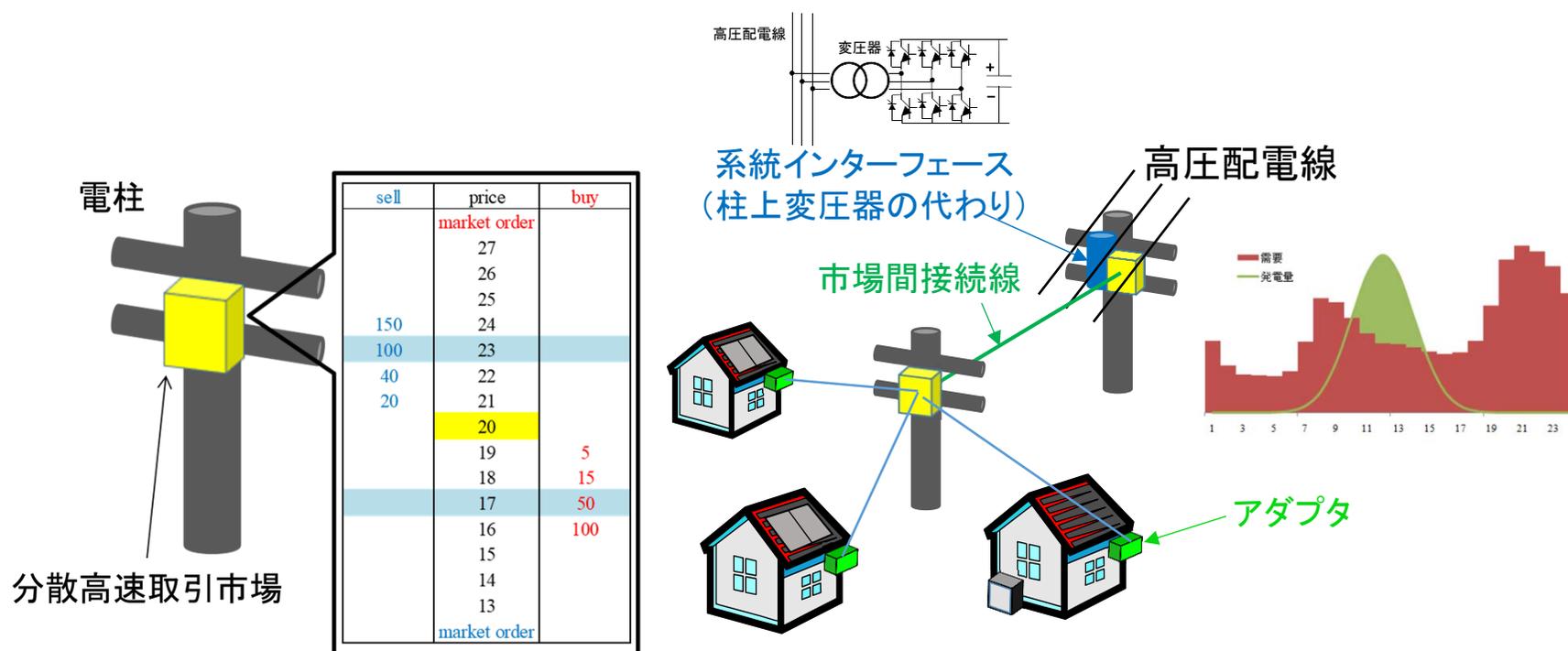
## □ 低圧配電網のノードに高速取引可能な分散型市場を多数配置

### ● 分散高速取引市場への参加者

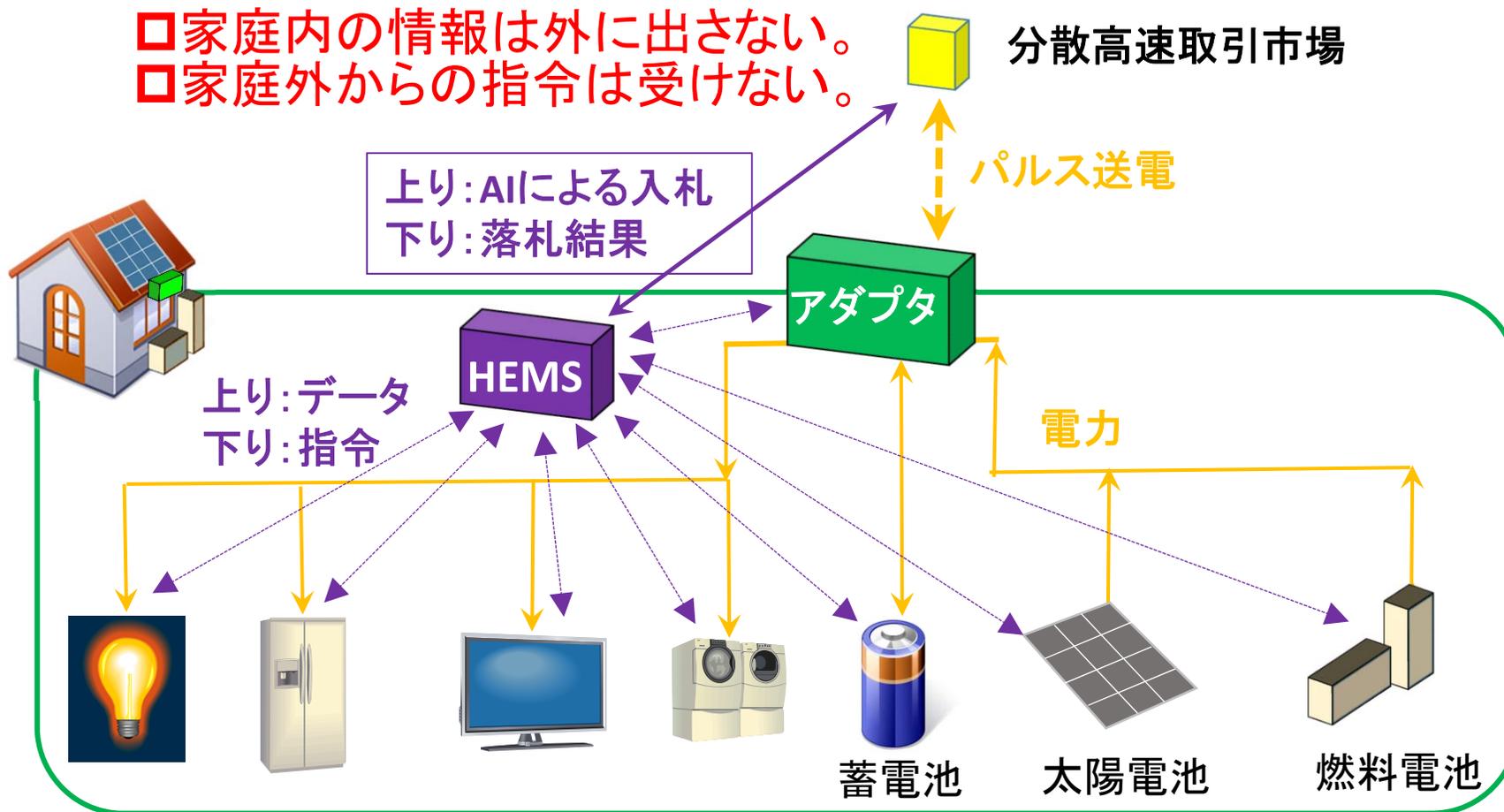
- ・ 家庭等の小口需要家、低圧送電事業者、上位系統運用者

### ● ザラバ仕法

- ・ 価格優先・時間優先、非同期取引



# 家庭と分散高速取引市場



# 関連分野1

---

- 発熱体技術(導電性セラミックスなど)
- 高温蓄熱・放熱技術(構造、断熱、材料、熱流体など)
- 高温熱源の利用技術(鉄鋼やセメント産業での利用や発電など)
- 大気や海水からのCO<sub>2</sub>直接回収技術(化学吸収、物理吸着、膜など)
- 高温を活用した高効率水素製造技術(電気化学、熱化学など)
- 炭化水素合成技術(フィッシャー・トロプシュ法など)
- CO<sub>2</sub>貯留技術(地中貯留など)
- 電力・熱源となるその他の非化石エネルギー利用技術
- 技術導入に関するシナリオ分析(エネルギーシステム評価など)

# 関連分野2

---

- パワーエレクトロニクス(高効率半導体スイッチ、共振回路)
- 電力貯蔵(流通バッファ、戦略的貯蔵)
- IoT技術(HEMSによる家電の制御)
- 人工知能(HEMS、市場入札、電池・家電最適運用計画)
- 金融技術(分散電力市場の高速取引、約定、決済)
- 新・電力系統工学(電力市場入札による基幹系統の需給制御)
- 心理学?(家電利用の効用計測など)
- 経済学?(社会的弱者への配慮と、料金制度設計など)
- 公共政策?(インフラ未開発の発展途上国等での展開など)