

# 1ZF-1201 東日本大震災を踏まえた 電源構成の転換を実現するためのシ ナリオと方策に関する研究

研究代表者 吉田好邦(東京大学)

研究実施期間 平成24年度～平成25年度

累積予算額 68,612千円

# 研究体制

- **サブテーマ1:再生可能エネルギー導入を中心とした電源構成の移行プロセス及び制度的課題に関する研究**
  - 東京大学大学院公共政策学連携研究部・城山英明
  - 東京大学大学院公共政策学連携研究部・本部和彦
  - 東京大学大学院公共政策学連携研究部・加治木紳哉
- **サブテーマ2:地理的・時間的解像度を高めた電力需給モデルの構築**
  - 東京大学大学院工学系研究科・藤井康正
  - 東京大学大学院工学系研究科・小宮山涼一
- **サブテーマ3:新しい電力供給システム実現のコストならびにこれがわが国の経済に及ぼす影響の評価**
  - 東京大学大学院新領域創成科学研究科・吉田好邦
  - 東京大学大学院工学系研究科・松橋隆治
  - 東京大学政策ビジョン研究センター・谷口武俊

# 研究開発目的

- 電源構成の転換における課題の克服

# 重要課題の選定

## ■ 目指す社会を設定

経済が活性化し、雇用が確保され、求められる環境等の制約を満たす中で、再生可能エネルギーを電源として最大限利用する社会

## ■ 移行プロセスを左右する4要素を抽出

供給：風力発電、太陽光発電、グリッド整備  
需要：事業用・家庭用の電力需要動向

## ■ 各要素の

### 戦略レベルの課題

### 1. 太陽光発電

選択肢1：投資インセンティブの付与  
選択肢2：耕作放棄地の活用  
選択肢3：コスト削減のための技術開発の支援

### 風力発電、太陽光発電、グリッド整備

#### ① 事故時周波数安定の問題

#### ② Ramping(短時間急変動発電)対応調整電源確保の問題

#### ③ 送電線建設の問題

### 2. 風力発電

選択肢1：陸上風力の環境影響評価の緩和  
選択肢2：洋上風力の活用  
選択肢3：浮体式風力の技術開発支援

### 3. グリッド整備

#### <事故時の周波数安定>

選択肢1：投資インセンティブの付与  
選択肢2：慣性モーメントを付与する技術開発の支援

#### <Ramping対応調整電源>

選択肢3：投資インセンティブの付与

#### <送電線建設>

選択肢4：投資インセンティブの付与

選択肢5：住民合意形成に向けた国の関与

### 4. 建物の省エネ

選択肢1：省エネ法の届出義務の適用範囲拡大

選択肢2：省エネ法の対象となる住宅建築事業者の規模を拡大

選択肢3：省エネ性能表示ラベルの統一と対象規模の拡大

選択肢1：省エネ法対象機器の対象機器の拡大、達成基準の更新

選択肢2：スマートメーターの設置と活用

# 地理的・時間的な解像度を高めた電力需給モデル構築

- 東日本70地点程度の地理的解像度と年間10分間隔の時間的解像度を以て、北海道・東北・関東地方を対象とした電力需給モデルを線形計画問題として定式化し、太陽光発電と風力発電を大量導入した場合の最適電源構成や送電網のあり方を解析する。
- 線形計画法
  - 与えられた線形不等式制約条件を満足しつつ、目的関数(線形関数)を最大(あるいは最小)にする変数の値を求める。
  - 本研究の場合、変数個数や制約条件式本数は1億のオーダー

$$z = \sum_{i=1}^n c_i x_i \rightarrow \min \text{ (or max)}$$

subject to

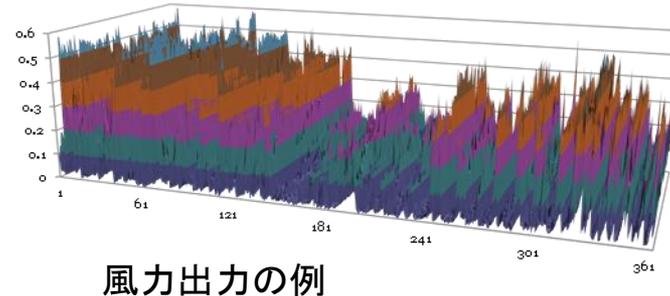
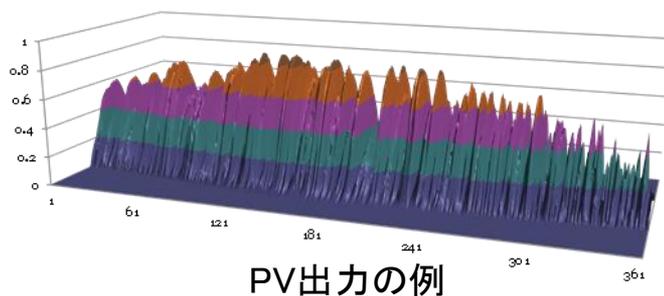
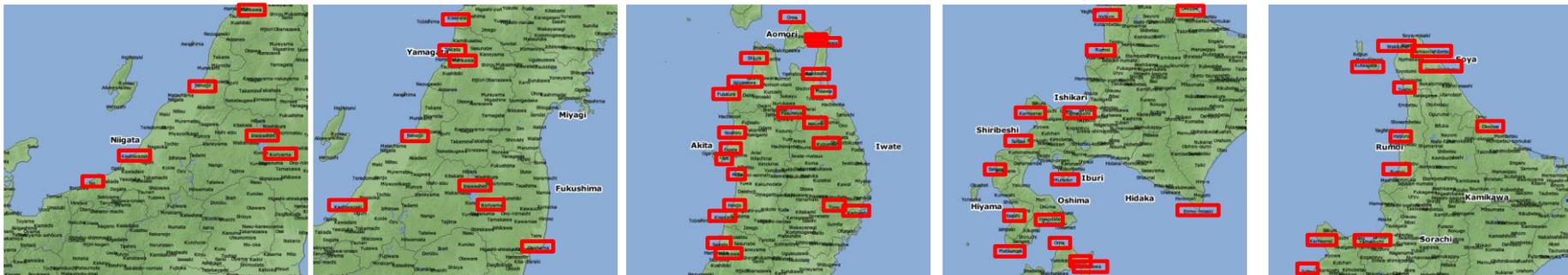
$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n \geq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n \geq b_2 \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n \geq b_m \end{cases} \quad x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0.$$

where  $x_i$  : variables,  $a_{ij}$  : coefficients,  $b_j$  : right hand side constants,  $c_i$  : cost coefficients



## 時間的解像度について

- 1年間を10分間隔で52,560等分し、1年間を通した最適化計算
  - 太陽光発電出力や風力発電出力の時系列データを直接与える。
    - 不規則変化等に関する確率分布を想定した期待値計算は行わない。
  - 火力負荷追従運転、電力貯蔵の適正な評価
    - 時間間隔を大きくすると、必要な設備容量が小さく評価される。
    - 充放電に伴う電池の劣化の影響も考慮
  - AMeDASデータによる推計  
(赤で囲んだ地点は風速データ利用サイト)



## 2030年の3シナリオ

	再エネ比率	電力需要
ベースシナリオ	9% (平成20年5月長期エネ需給見通し努力継続シナリオ)	2010年比5%増
中庸シナリオ	12% (平成20年5月長期エネ需給見通し最大導入シナリオ)	2010年相当
最大導入シナリオ	20% (平成24年9月革新的エネルギー・環境戦略慎重ケース)	2010年比10%減

### ■ 東日本大震災前の2009年の需要負荷パターンを仮定

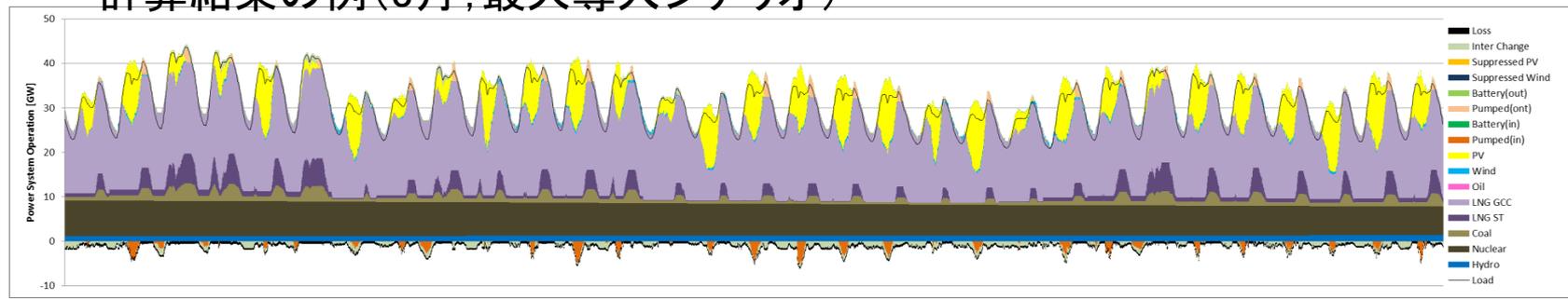
単位: 万kW

	ベースシナリオ					中庸シナリオ					最大シナリオ				
	太陽光		風力			太陽光		風力			太陽光		風力		
	屋上	メガ	陸上	着床	浮体	屋上	メガ	陸上	着床	浮体	屋上	メガ	陸上	着床	浮体
北海道	54	92	38	145		96	184	76	288		181	368	148	554	
東日本計	538	295	136	145	15	948	594	264	288	25	1,796	1,189	516	564	50
全国総計	1,588	659	290	145	15	2,799	1,319	577	289	25	5,300	2,637	1,125	563	50

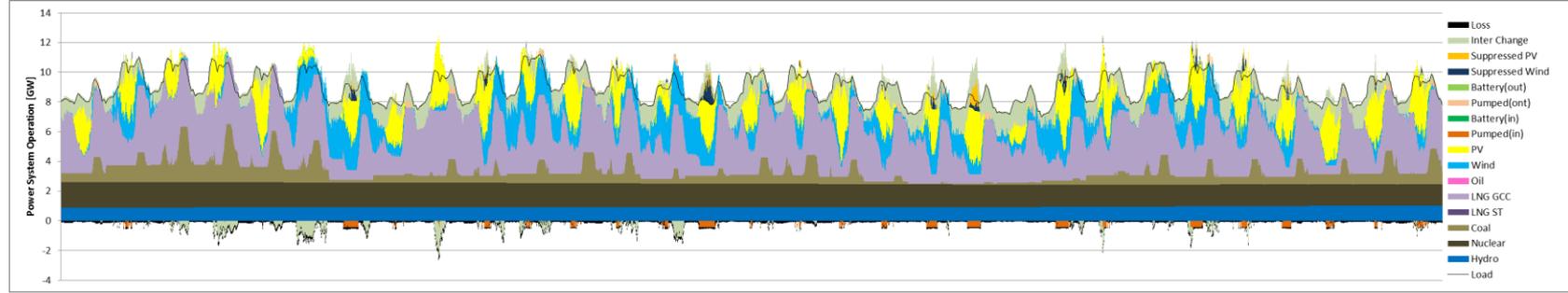
### ■ 風況の良い北海道に多くの風力立地を仮定

# 計算結果の例(3月;最大導入シナリオ)

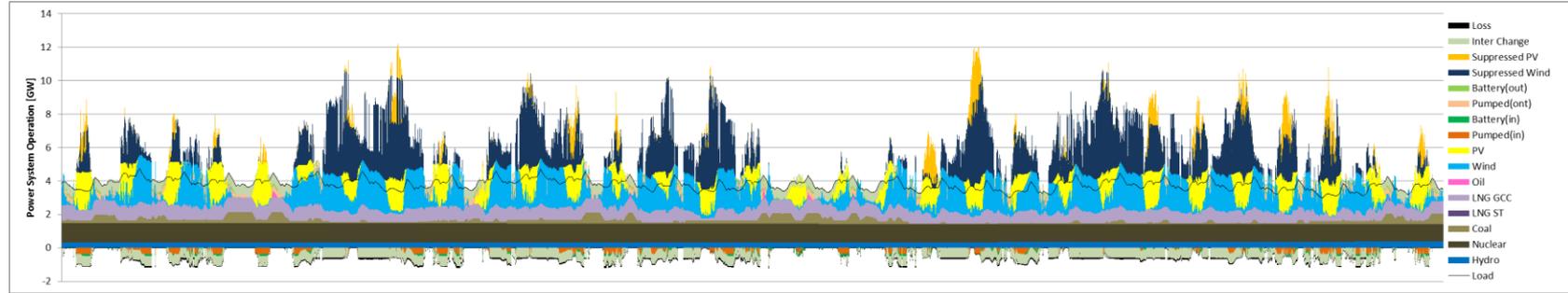
関東



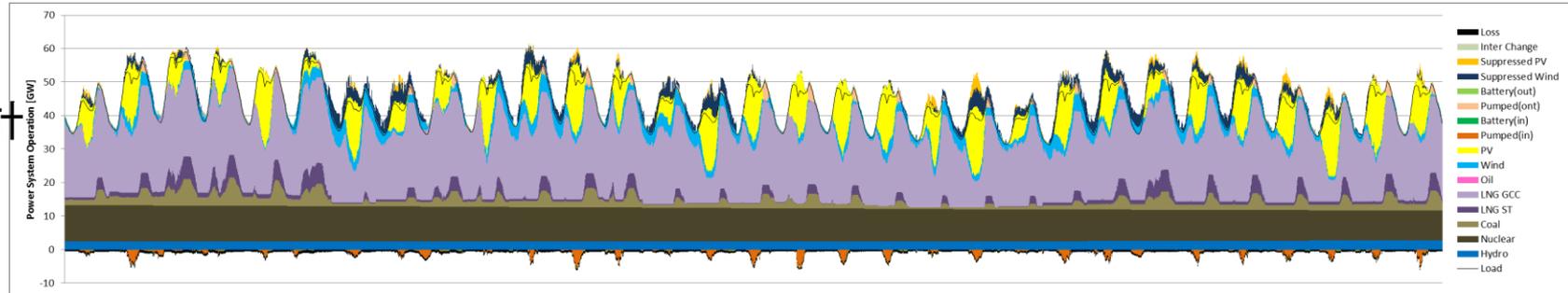
東北



北海道

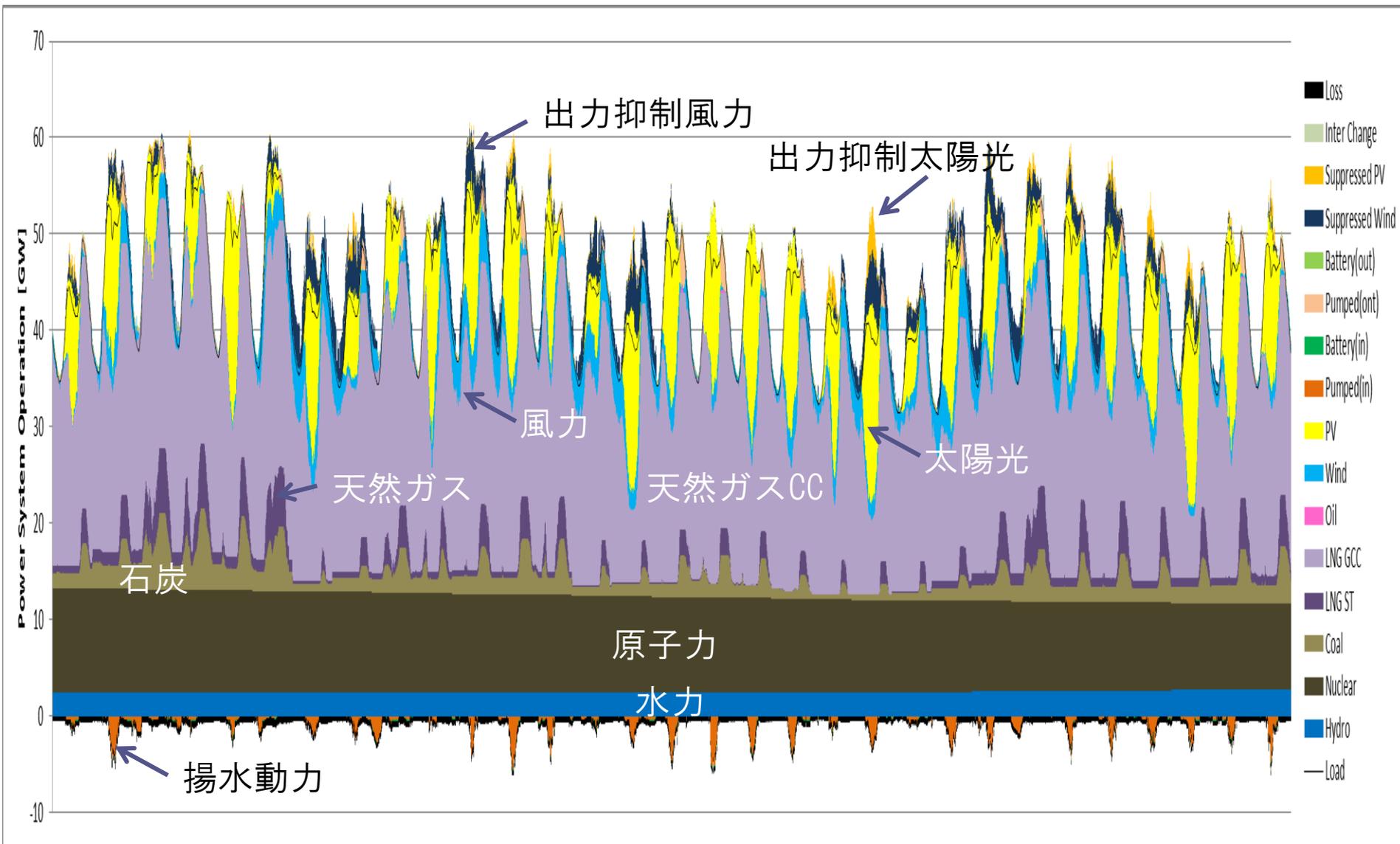


東日本合計



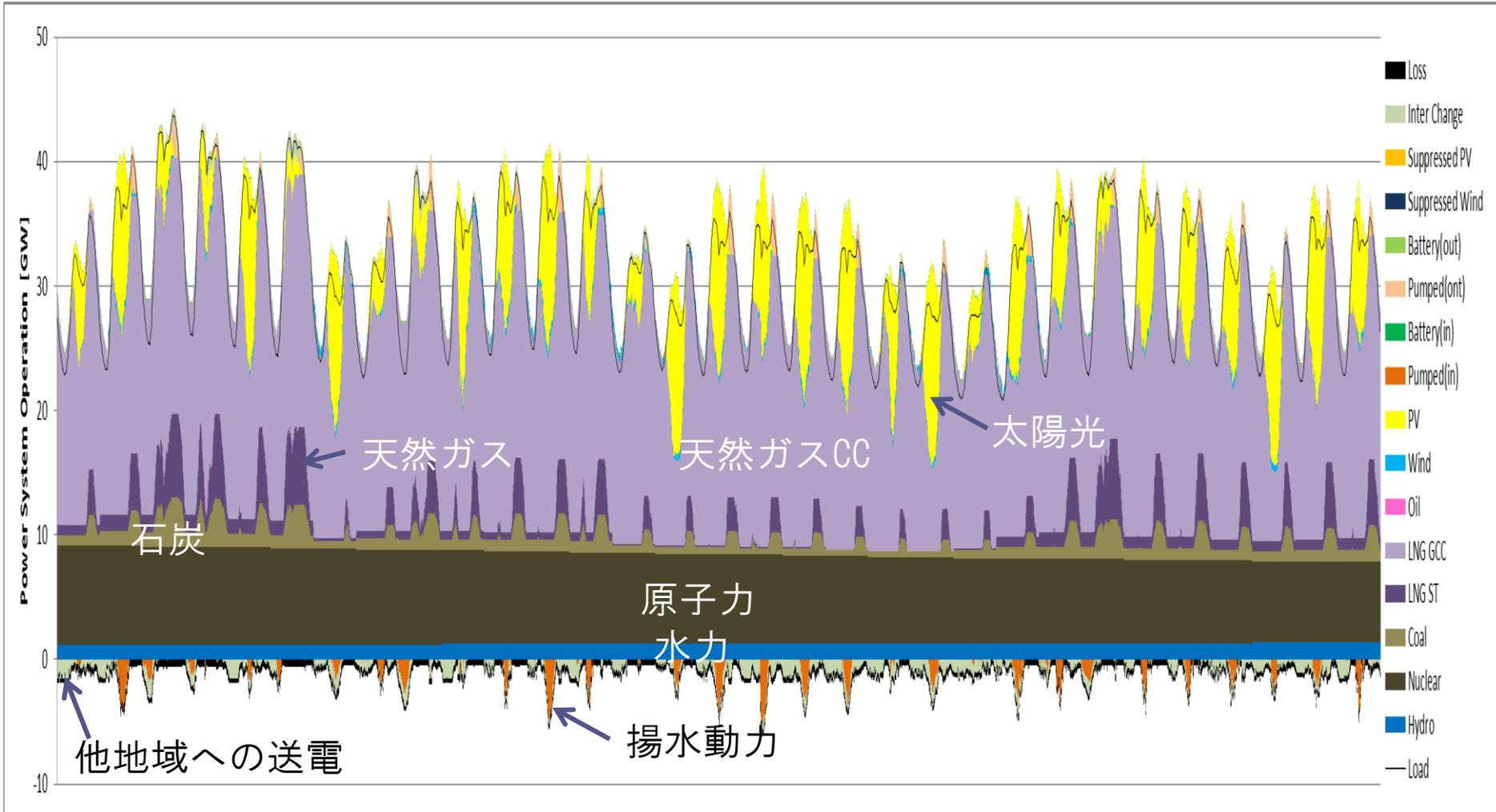
# 計算結果の例(3月;最大導入シナリオ)

## 東日本合計



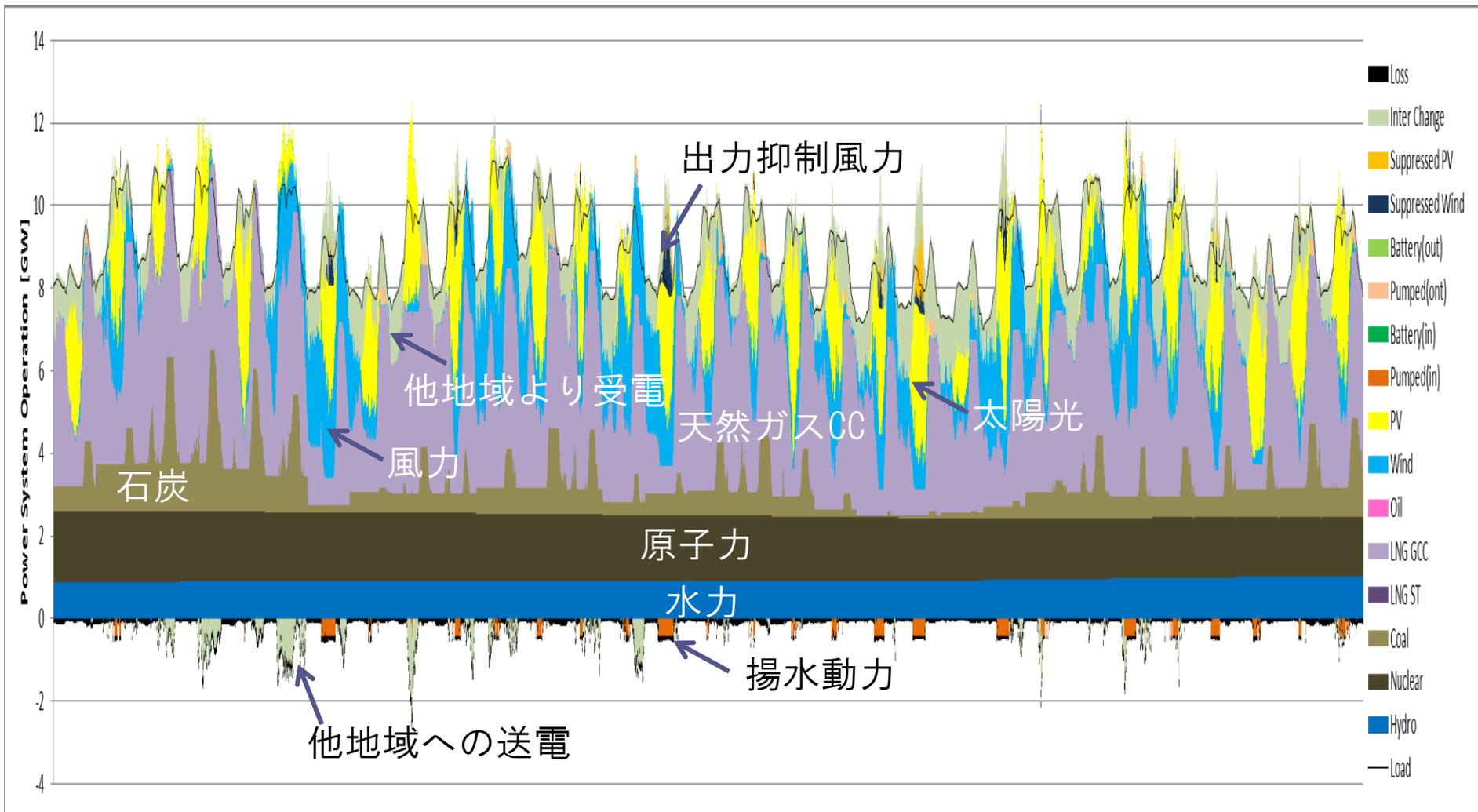
# 計算結果の例(3月;最大導入シナリオ)

## 関東



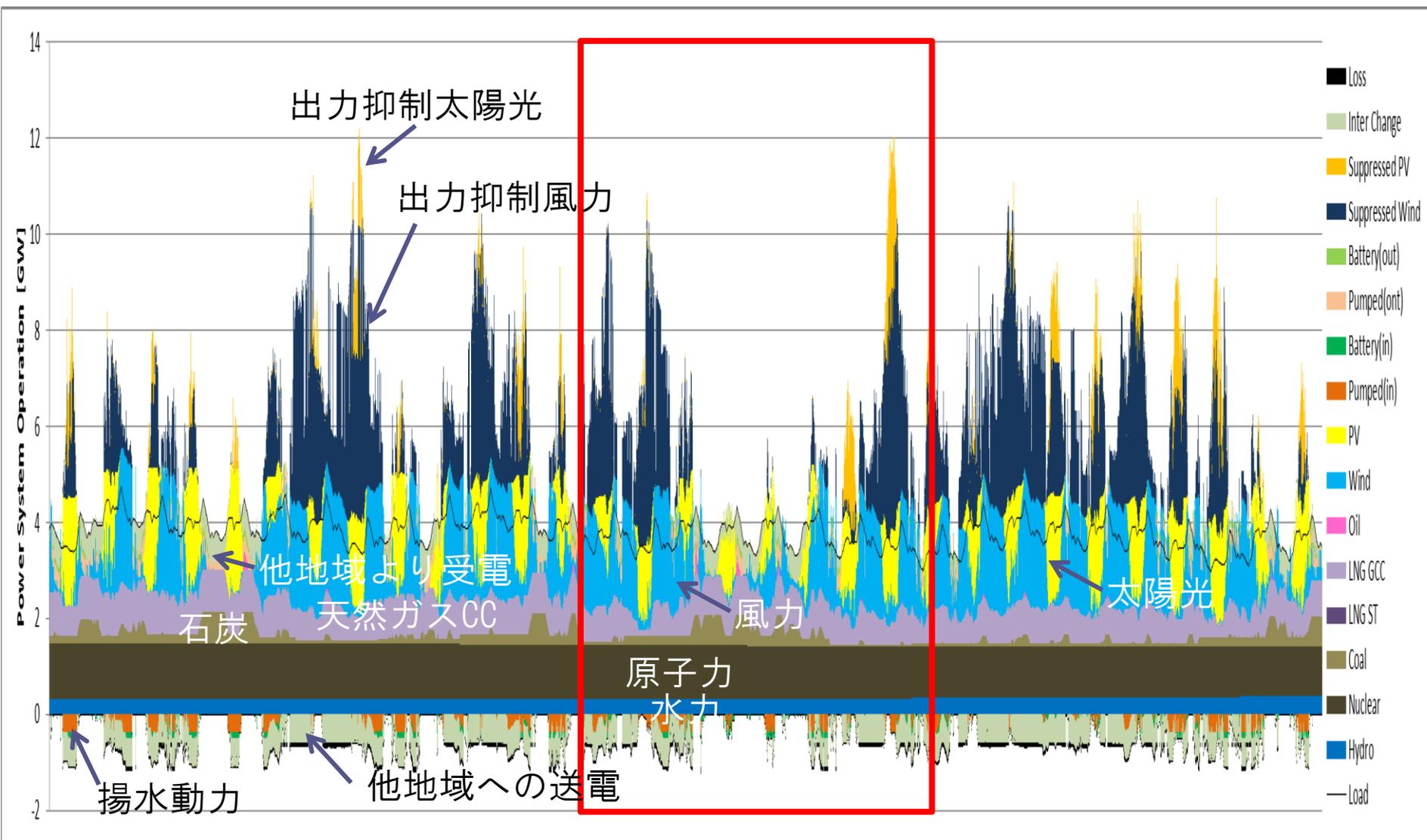
# 計算結果の例(3月;最大導入シナリオ)

## 東北



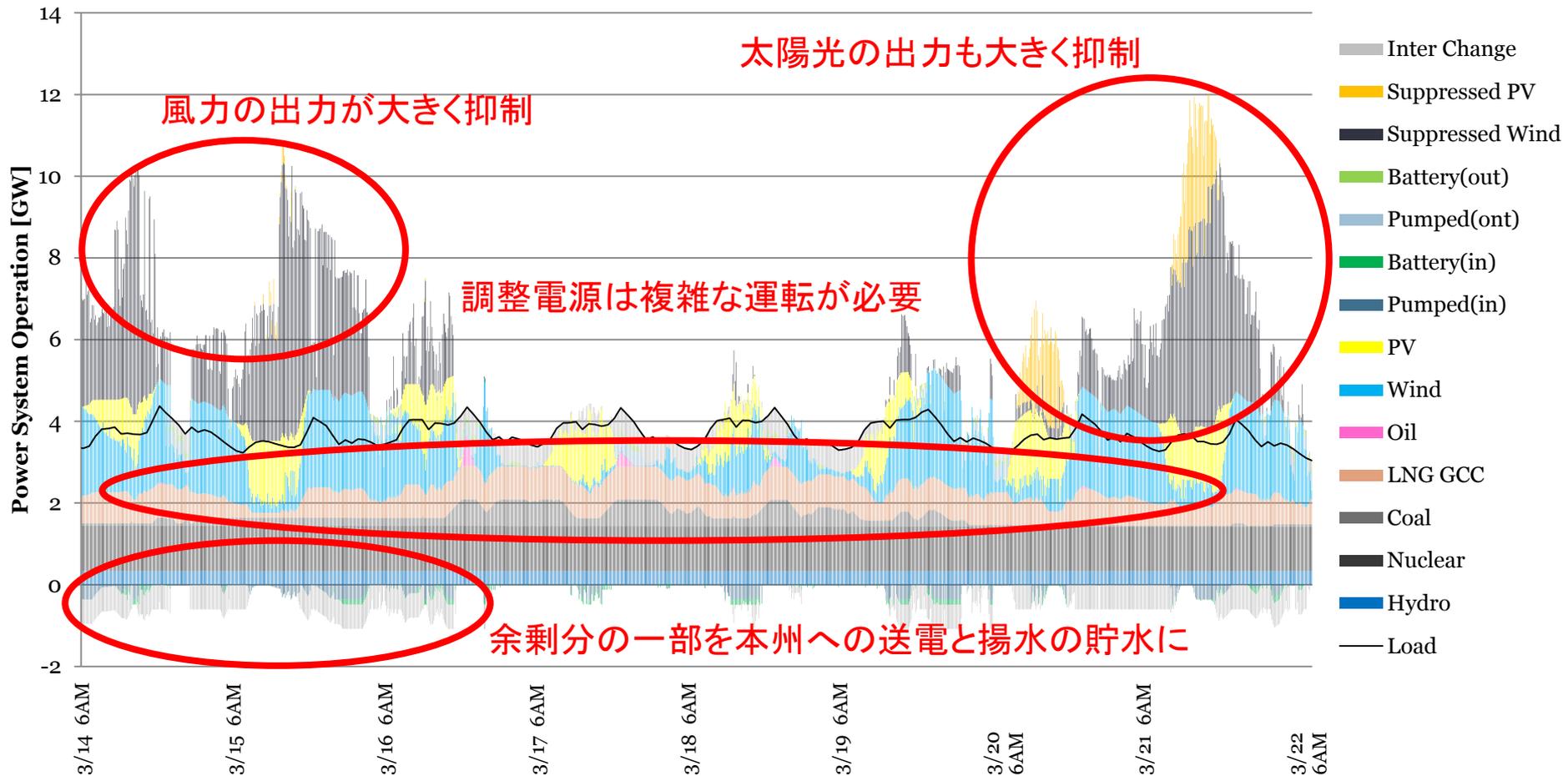
# 計算結果の例(3月;最大導入シナリオ)

## 北海道



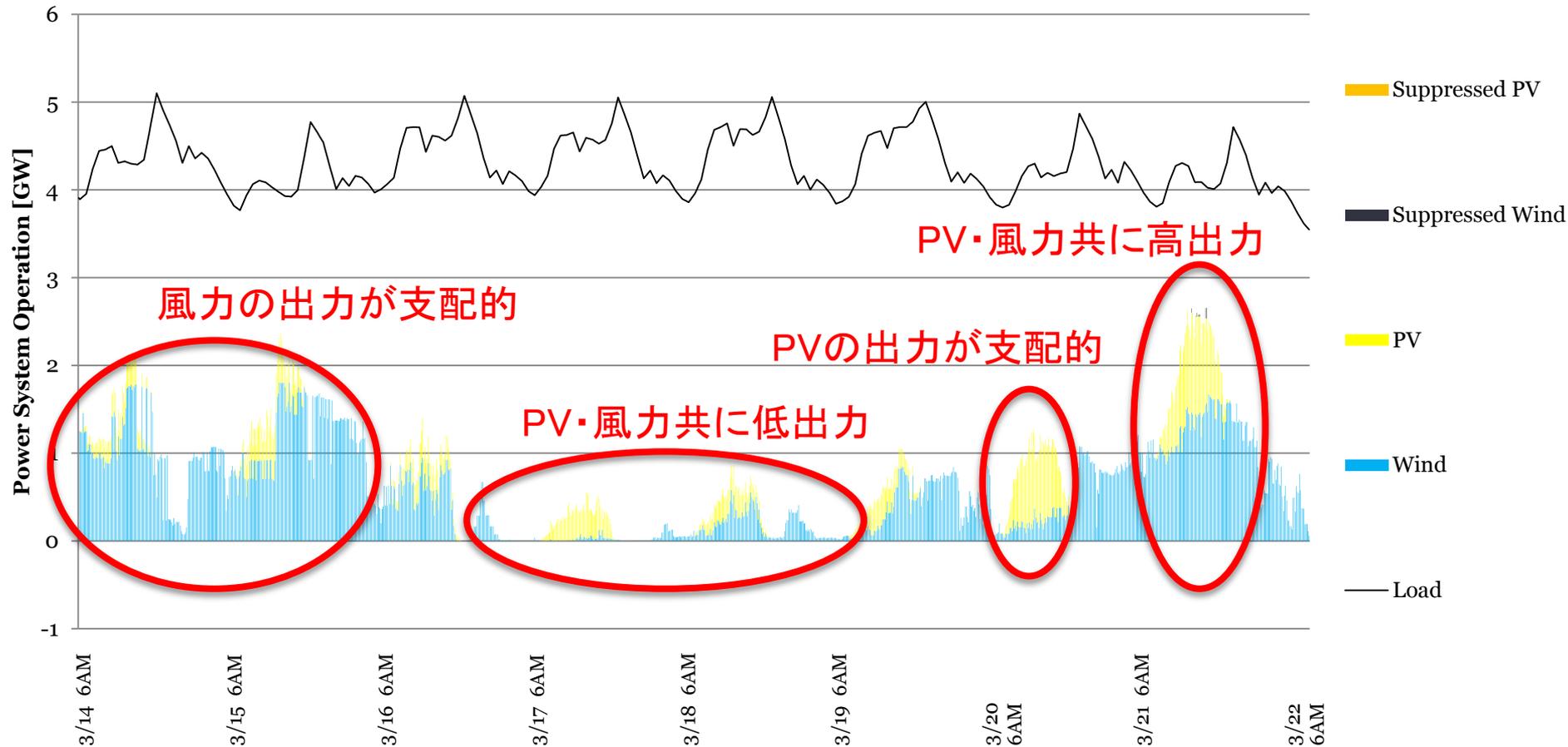
# 最大導入シナリオでの北海道の需給バランス

- 2009年3月14日～22日の気象データをもとに推計
- 太陽光と風力の発電量が大きく変化。調整電源も複雑な運転が必要
- 周波数安定度制約のため太陽光と風力の出力抑制が大幅に発生



# ベースシナリオでの北海道の再エネ発電

- PVと風力の出力の組み合わせは複雑で、これまで経験しなかった不規則なパターンの需給調整が必要
- 風力発電には、急激なRamp-upとRamp-down現象が発生



## 各シナリオの結果

シナリオ	需要 (2010 年比)	炭素 税 [万円 /t-C]	年間 コスト [兆円]	年間 CO <sub>2</sub> [Mt- C]	太陽 光 [TWh]	風力 [TWh]	再エネ 比率 (kWh ベース)	課題
ベース シナリオ	5% 増	5	6.2 (8.0)	37.0	10.4 (0.0)	6.4 (0.0)	8.3%	問題なし
中庸 シナリオ	0%	5	6.4 (8.0)	33.1	19.3 (0.0)	10.3 (1.0)	11.9%	北本連系線がボトル ネックとなり、北 海道で風力に出 力抑制
最大導入 シナリオ	10% 減	5	6.8 (8.1)	25.8	34.4 (1.5)	6.7 (8.7)	18.5%	北海道で風力と太 陽光の双方に大 量の出力抑制

- 太陽光、風力は正味供給量。()内は出力抑制量。
- 年間コストの()内は炭素税を含む場合。

## 考察：事故時周波数安定問題

**課題：**落雷などの起因事象は、全国どの需要家についても年複数回発生。再エネなどの**非同期電源の導入が、電源・系統事故による出力低下にどの程度の影響を与えるか？**

**モデル結果：**北海道において、ベースシナリオから中庸シナリオの間で、**供給電源に占める非同期電源の比率が(アイルランド基準の)50%を超える**。最大導入シナリオでは同比率が50%を超える時間が約5000時間(約200日)になり、大規模な出力抑制が必要となっている

### **考察：**

1. 本問題を緩和するには、同期力を有する風力発電(例えば、可変速風力)の技術開発とともに、FIT等での優遇措置が考えられる。
2. 電力市場設計に当たっては、アンシラリーサービス市場を整備し、同期電源に市場価値を付与する仕組みが必要。

## 考察：Ramping対応調整電源確保問題

**課題：**風力等の短時間出力変動に対応する調整電源を確保できるか？

### モデル結果：

1. 2009年の実データに基づくと、北海道では、
  - Ramping現象により、調整電源に需要の変化を超えた出力調整が求められるケースが、年間を通じて発生。(計202回)
  - 低気圧が通過する1月～4月には頻繁に発生。(計110回)
2. 北海道と東北では、石炭火力にも出力調整が求められるなど、**調整電源には厳しい運転対応が求められる**。この結果、**再エネの導入量の増加に伴い火力発電の稼働率は低下**。
3. 最大導入シナリオでは、風力の出力抑制によって、影響がむしろ緩和。

### 考察：

1. Ramping の発生を気象データから詳細に予測するシステム開発が必要。
2. キャパシティ市場の整備は喫緊の課題。
3. 再エネの出力を最大限活用するには、東日本全体での系統運用体制の整備が必要。

## 考察：送電線建設問題

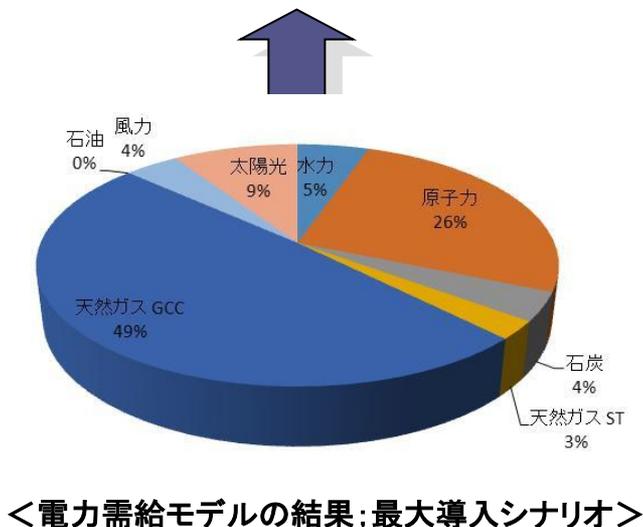
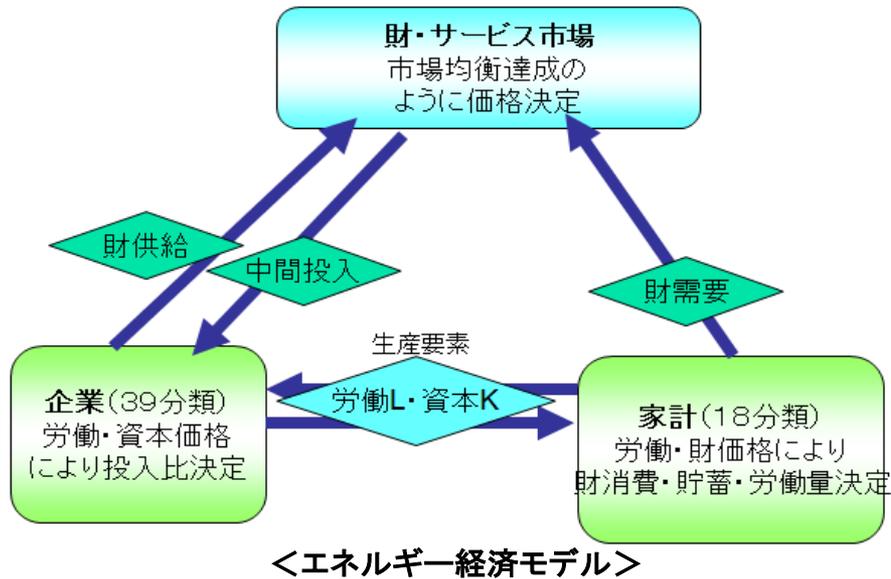
**課題：**再エネの新設を想定した時、送電線の容量は十分か？

**モデル結果：**北本連系線については、現状の0.6GWであれば、ベースシナリオでもボトルネック。最大導入シナリオになると、2GWに増強することでボトルネックは多少解消されるが、道南幹線が新たなボトルネック。

### 考察：

1. 北海道に立地を進める場合は、**早めに北本連系線と道南幹線の能力増強に着手する必要。**
2. 周波数安定度問題が一定程度解決され風力・太陽光の出力抑制が大幅に緩和されると、2GW以上の増強が必要。
3. しかし送電線の建設には時間を要することから、問題が顕在化するまでの時間的余裕を確保するために、**風力発電の北海道への集中立地を避け、北東北の着床式の立地を促進することも有効。**

# わが国の経済に及ぼす影響の評価



## 採用した省エネ等の取組

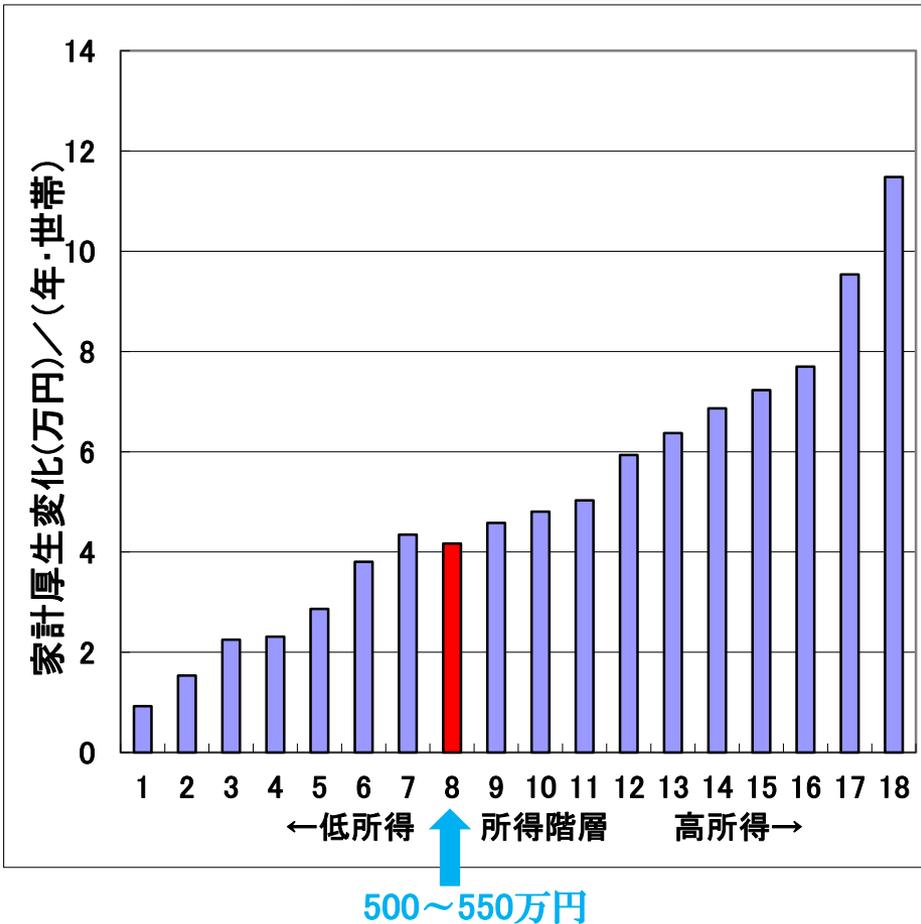
温暖化対策に効果のある取組

- ① 産業部門では各業種が省エネ法の努力目標に従い、年当たり1%のエネルギー原単位の改善を実施(2030年)
- ② 石油化学を除く産業部門において2005年の重油等石油製品燃料利用の80%が天然ガスに転換(2030年)
- ③ 物流の効率化により、輸送部門のCO<sub>2</sub>排出量を最大44%削減(2030年)
- ④ 住宅用太陽電池、メガソーラーを含め、太陽光発電の容量はサブテーマ2に準拠(2030年)
- ⑤ 風力発電の容量はサブテーマ2に準拠(2030年)

家庭での省エネの取組

- ⑥ 次世代省エネ住宅(平成11年基準)は、建築研究所の推定を基にして2030年に存在する住宅の約48%まで増加
- ⑦ 家電製品、自動車のトップランナー制度を継続
- ⑧ 次世代自動車の普及加速(2030年において自家用乗用車の51%)
- ⑨ LEDの普及による照明の効率化
- ⑩ 住宅用太陽光発電を1600万世帯(2030年)に導入
- ⑪ 家庭用燃料電池を720万世帯(2030年)に導入
- ⑫ ヒートポンプ給湯を530万世帯(2030年)に導入

# エネルギー・経済モデルを用いた試算結果 (2030年)



エネルギー起源CO <sub>2</sub> 排出量 (1990年比) 基準値:10.6億トン-CO <sub>2</sub>	▲27.3%
実質GDP (2005年実績値:506兆円)	617兆円
家計の厚生額変化	2.61兆円

年収500～550万円の家庭への経済的影響

家計全体で年間約4.2万円の得



# 新しい電力供給システム実現のコスト

## 1. 関東圏のオゾン・PM2.5発生シミュレーションによる火力発電所増設の外部費用推計

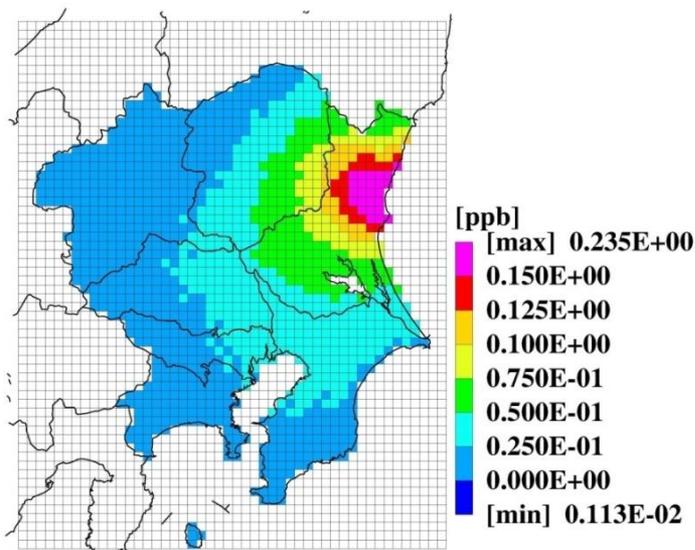


## 2. 選好調査に基づいた原子力発電の事故リスク削減への支払意思額推計

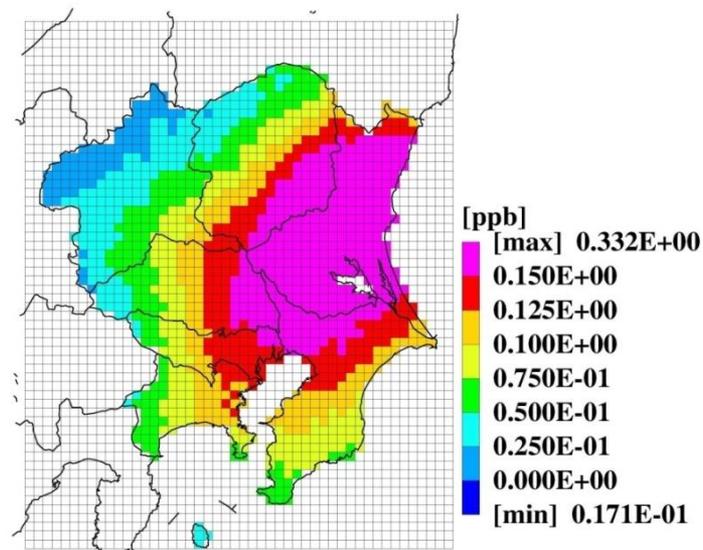
次の現状の維持、対策1、対策2のうちどれを選びますか？

	項目	現状	対策1	対策2
原子力発電	(a)年間の大事故発生確率	500分の1	1000分の1	800分の1
	(b)大事故が発生したとき、あなたを含む100万人での死者数	4000人	4000人	3000人
	(c)一年あたりの死者数 (a)×(b)=(c)の計算結果	8人	4人	3.8人
火力発電	(d)あなたを含む100万人における毎年の死者数	6人	4人	2人
1年あたりの死者数削減の合計		—	100万人あたり6人削減	100万人あたり8.2人削減
世帯あたりの年間の税金の上昇 (新たな対策のための費用)		1年あたり0円	1年あたり800円	1年あたり1500円

# PM2.5発生シミュレーション



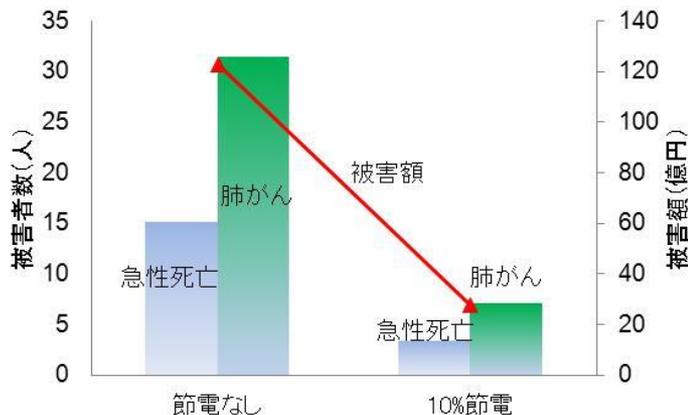
PM2.5大気濃度差分(節電あり, ベースの差)



PM2.5大気濃度差分(節電なし, ベースの差)

- ①ベース
- ②節電なし
- ③節電あり

2010年(原発稼働中)  
2020年(原発停止・増設火力建設後)  
2020年(原発停止・増設火力建設後) \* 10%節電



**10%の節電で健康被害額を74%削減**

# 原発事故リスク削減への支払意思額

- アンケート調査に基づいた事故リスク削減の支払意思額の全国計



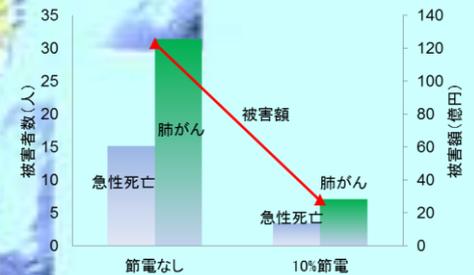
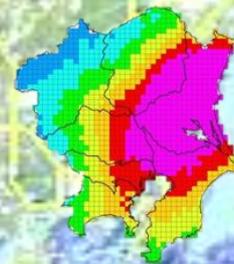
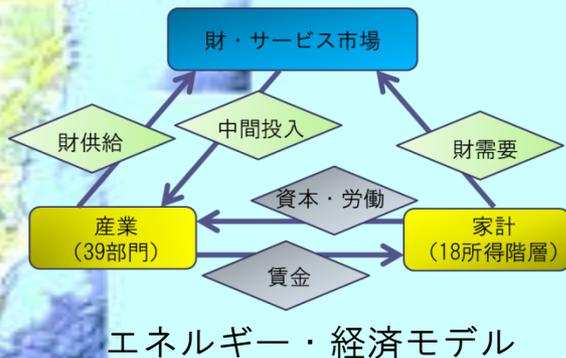
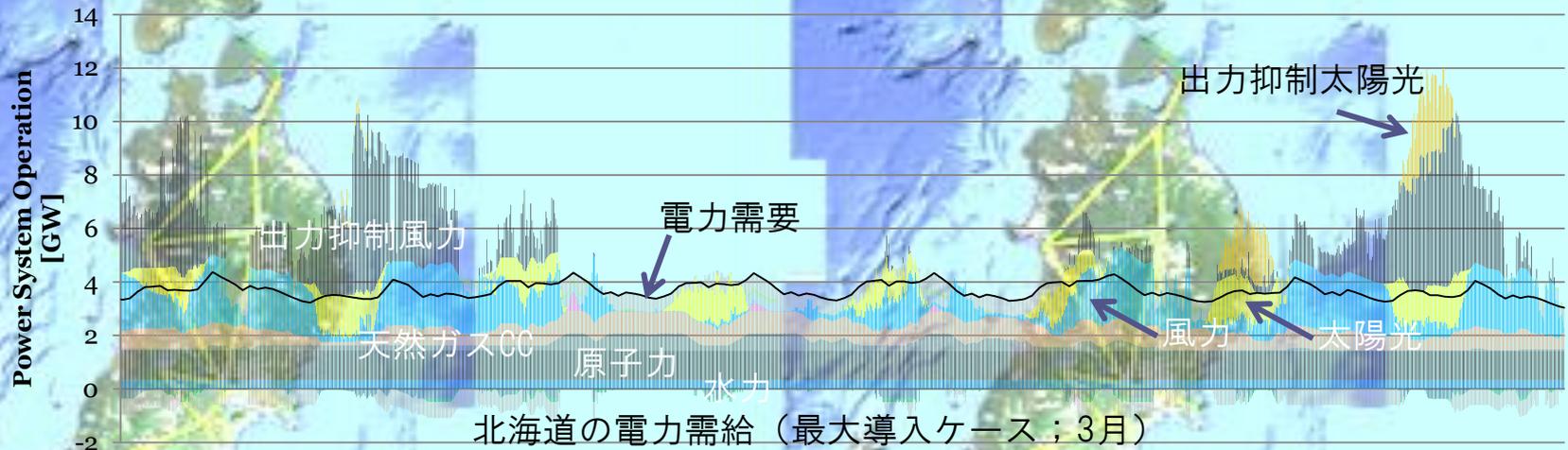
- 費用便益分析での活用

稼働原発の事故リスク削減への費用支出

原発停止での化石燃料輸入増への費用支出

# 本研究の成果

1. 東日本70地点・年間10分間隔の電力需給モデルを構築
2. モデルでの最適化計算より、風力発電・太陽光発電・グリッド整備についての課題を整理
  - ① 事故時周波数安定問題
  - ② 短時間急変動発電への調整電源確保問題
  - ③ 送電線建設問題
3. 日本経済への影響と外部コストを推計



火力増設とPM2.5シミュレーション