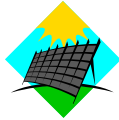


# 太陽光・風力発電の大量導入が 電力系統に及ぼす課題と対策



電力土木第20回会誌「講座」講習会

2015年7月16日



七原 俊也



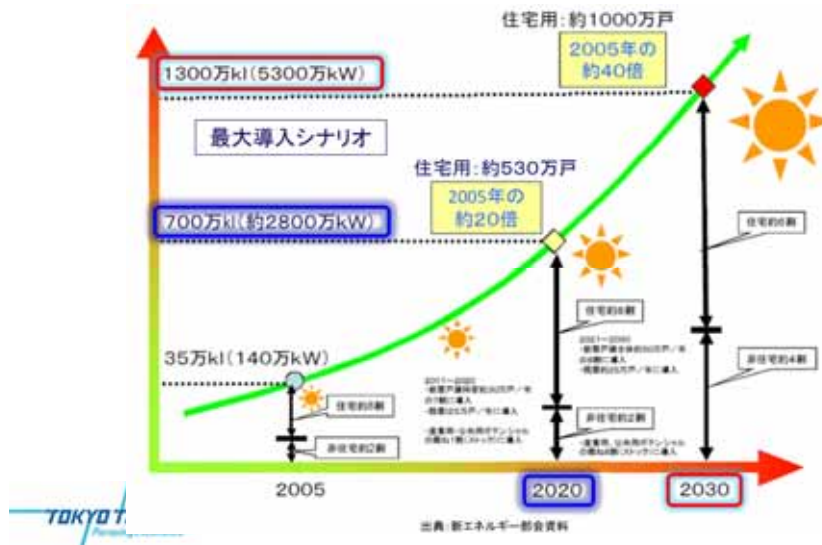
東京工業大学大学院 電気電子工学専攻

nanahara@ee.titech.ac.jp



## わが国の太陽光発電の見通し?

2



## 太陽光発電：5,300万 kW

- 太陽光発電：5300万 kW 系統連系
  - ピーク電力需要の30%
  - 半数以上の一戸建て住宅にPVを設置等



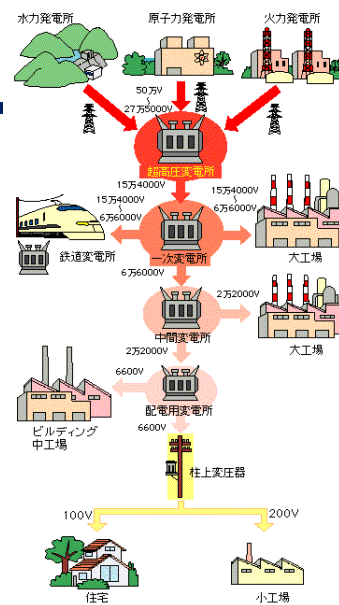
系統影響が正確に把握できるか？

一方，PV：基幹電源としての役割？

## 電力系統とは

- 発電所～送電線，変電所～配電線～負荷等からなるシステム
- 人工のシステムのうち最大のものの1つ
- 苛酷な自然環境にさらされる(雷，風，雪等)
- 特徴

- 現象の伝搬が高速(光速?)
- 瞬時瞬時に需給バランスを取る必要等



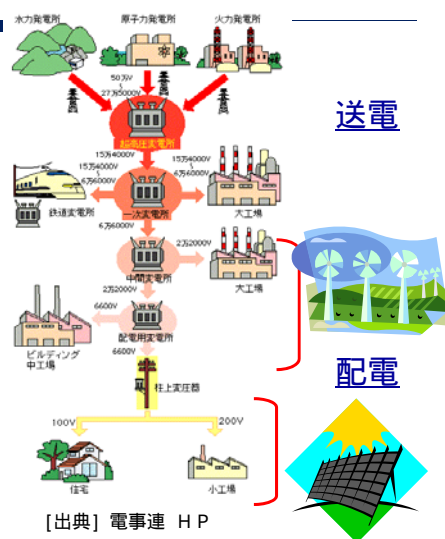
## 発表の流れ

1. はじめに
2. 太陽光・風力発電の大量導入が電力系統に及ぼす影響
  - ローカル影響
  - 全系影響
3. トピックス
  - ドイツの現状
  - 電力貯蔵設備による出力安定化
4. むすび



## 太陽光・風力の連系に関わる課題

- 弱い系統に連系されることが多い**分散形電源**  
(例) 低圧連系の太陽光発電
- 大きな出力変動を伴う**間欠電源**。またその出力の正確な予測は困難
- 従来型電源と違う発電機：(例) インバータ、誘導発電機



## P V, 風力発電の電力系統への影響 7

	影響の内容	影響を左右する要因		
		脆弱系統	出力変動	発電機種別
ローカル 影響	送電容量の上限			
	電圧変動			
	保護協調			
	単独運転			
	電力品質	---	---	---
	- 高調波			
	- 電圧フリッカ			
	その他	---	---	---
全系 への 影響	需給運用・制御(周波数影響)			
	バックアップ電源要			
	系統擾乱時の安定性			
	系統動特性への影響			
	その他	---	---	---

## 風力発電の系統影響（流れ） 8

導入	影響範囲	主な影響	主な対策
小	配電 系統	電圧などの 電力品質等	<ul style="list-style-type: none"> <li>• パワエレ応用（可変速化）</li> <li>• 出力抑制（WFの制御）</li> <li>• 一斉脱落対応</li> <li>• 系統サポート</li> <li>• 出力予測</li> <li>• 電力貯蔵 等</li> </ul>
↓	+ 二次 系統	電力潮流等	
大	+ 基幹 系統	セキュリティ 電力需給等	

## 系統連系と規格

ローカル影響については、概ね下記に規定あり（大量導入時等には課題もあり）

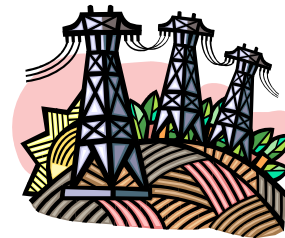
- 電気設備の技術基準の解釈
- 電力品質に係る系統連系技術要件ガイドライン

- 系統連系規程      +      民間自主規格 

## 課題1：送電線等の熱容量

下記の設備には許容電流があるため、それにより送電電力が制約される

- 送電線
- 変圧器      など



↑  
送電容量は、他に電圧、周波数、安定度により制約される場合有り

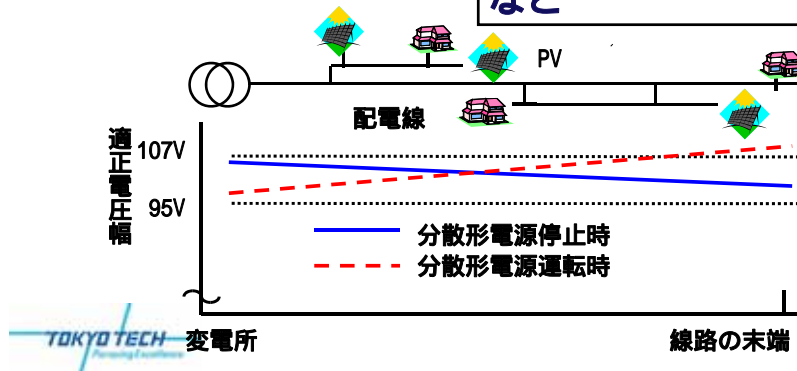
## 課題 2 : 電圧変動

課題

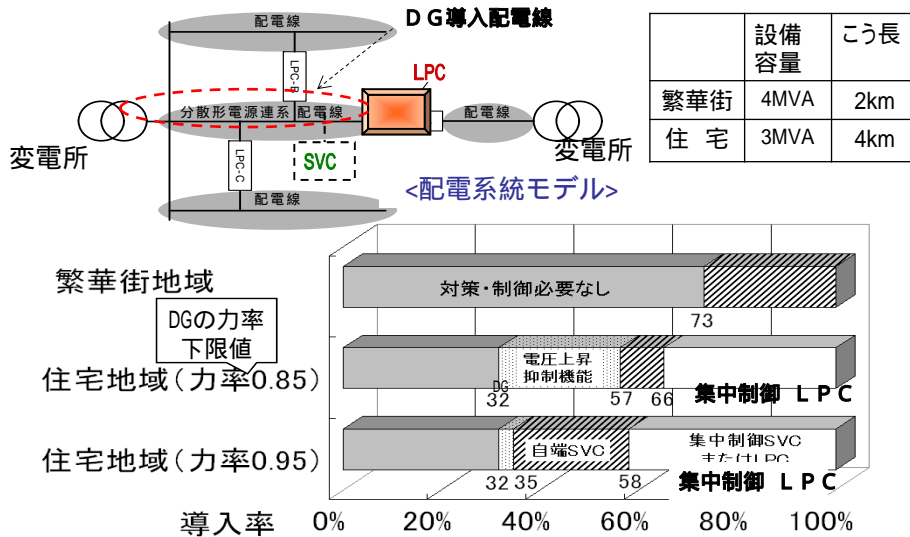
解決策

PV等の導入量が大  
供給電圧を適正  
範囲に維持困難

PV等に電圧調整機能  
を付加, 対策機器 (SVC  
等) の設置, 設備増強  
など



## DG導入地域・導入率に応じた電圧適正化方式<sup>12</sup>



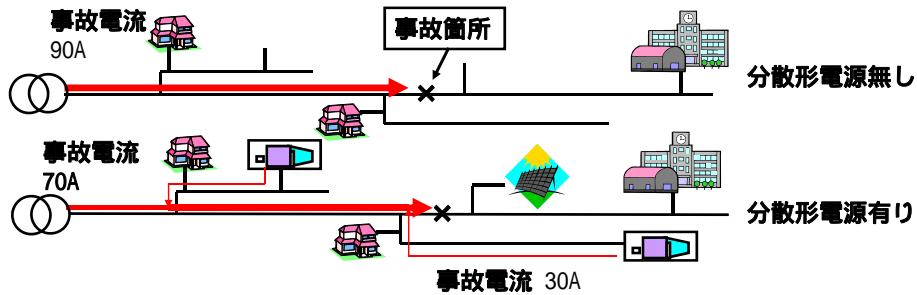
(注) 導入率: 配電線設備容量比

[出典] 上村敏, 電中研究報告R07018



## 課題 3 : 事故時のリレー誤動作

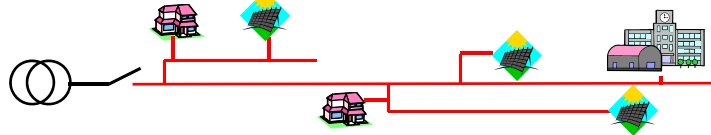
変電所に流入する事故電流が変化 → 保護装置の誤動作



## 課題 4 : 分散形電源の単独運転

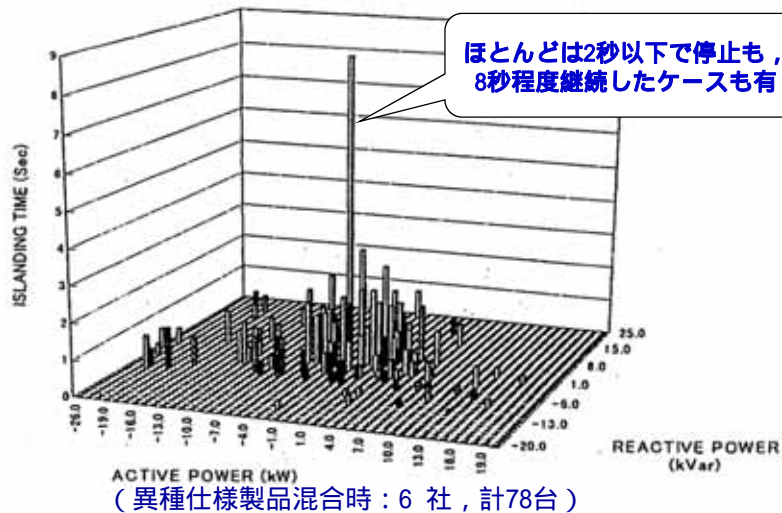
単独運転とは：

配電線が供給停止した後も分散形電源が継続して運転し、配電線を充電する



- 問題点
- 充電された電気の電圧，周波数は保証されない  
(接続されている電気機器の故障)
  - 保守要員が充電していることの確認に時間を要す  
(保守作業員の安全性の低下)
  - 再閉路時に電源側の電圧との位相差により問題を  
生じる

## PV用市販インバータ複数連系時の単独運転(例)



## 単独運転の検出方式

- 局限化リレー：電圧，周波数リレー  
 ←盲点(需給のバランス時)の存在
- 単独運転検出
  - 受動方式：位相跳躍，周波数変化率，3次高調波検出など  
 ←盲点の存在と不要動作の可能性
  - 能動方式：無効電力変動，周波数シフト，負荷変動など  
 ←大量導入時の干渉，動揺と系統擾乱？



## 発表の流れ

1. はじめに
2. 太陽光・風力発電の大量導入が電力系統に及ぼす影響
  - ローカル影響
  - 全系影響
3. トピックス
  - ドイツの現状
  - 電力貯蔵設備による出力安定化
4. むすび



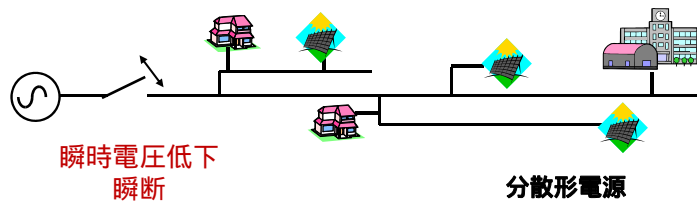
## PV, 風力発電の電力系統への影響

	影響の内容	影響を左右する要因		
		脆弱系統	出力変動	発電機種別
ローカル影響	送電容量の上限			
	電圧変動			
	保護協調			
	単独運転			
	電力品質	---	---	---
	- 高調波			
	- 電圧フリッカ			
その他	---	---	---	
全系への影響	需給運用・制御(周波数影響)			
	バックアップ電源要			
	系統擾乱時の安定性			
	系統動特性への影響			
その他	---	---	---	

## 課題5：系統擾乱による脱落

瞬時電圧低下などの系統擾乱

→ 分散形電源の安定運転？



## 瞬低による一斉脱落の例



[出典] Juan F. Alonso-Llorente, "Integration of wind Generation within the Power System Experiences from Spain," Eolica Mediterranean, Rome, September, 2005.

## PVの安定性(例)

項目	インバータ型電源
瞬時電圧低下試験 - 上位系統事故を模擬	5社のうち4社は残電圧約70%で瞬時停止 (主に機器保護の動作による)
電圧位相急変試験 - 系統切替を模擬	5社のうち4社は約10度で瞬時停止 (主に受動的単独運転検出機能の不要動作による)

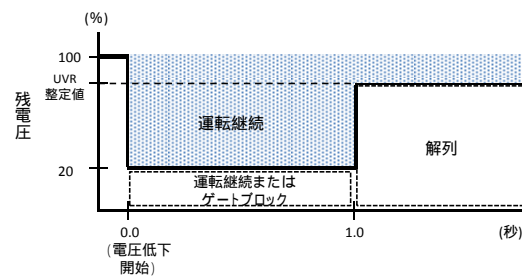
現状のインバータ型電源（太陽光発電用等）は常時起こりうる擾乱（瞬低，位相急変）に対して停止しやすい。

大量導入時には一斉脱落の可能性高  
PV，風力発電ともに規程改定

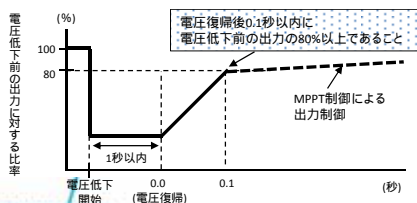


## PVに求められるFRT要件(連系2017/4～)

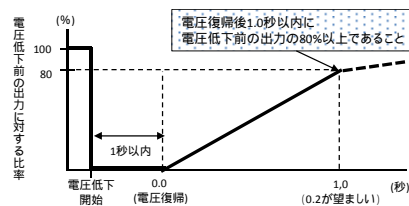
### 電圧低下耐量



#### 出力復帰動作(残電圧20%以上の場合)



#### 出力復帰動作(残電圧20%未満の場合)



## 課題 6 : 電力系統の需給バランスへの影響

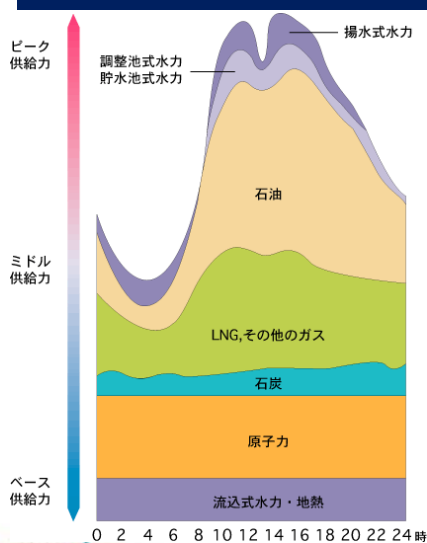
PV, 風力発電については,  
出力変動が大きく, 予測が  
困難であるため, 需給バラ  
ンスの維持が難しくなる



- 火力等で変動を補償要
- 蓄電池の活用：新技術等

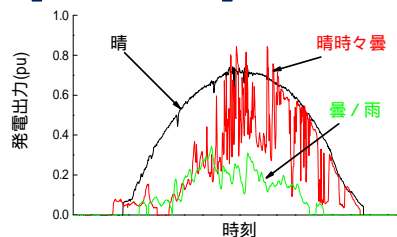


## 自然エネルギーと電力需要

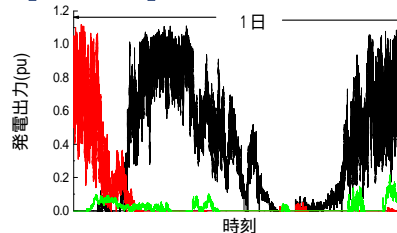


[負荷分担図の出典] 電気事業連合会HP

### [太陽光発電]

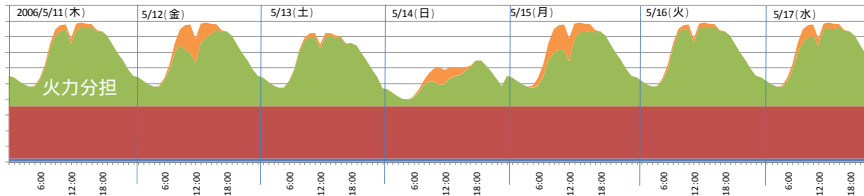


### [風力発電]

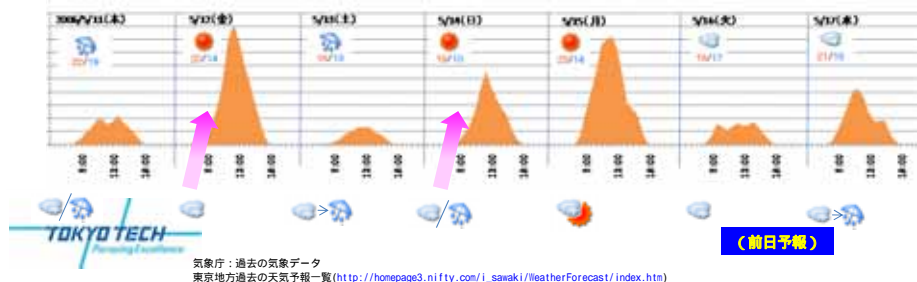


## 需給運用上の課題

### ● 需給調整上の問題



### ● 予備力確保の問題



## PV, 風力大量導入の需給への影響

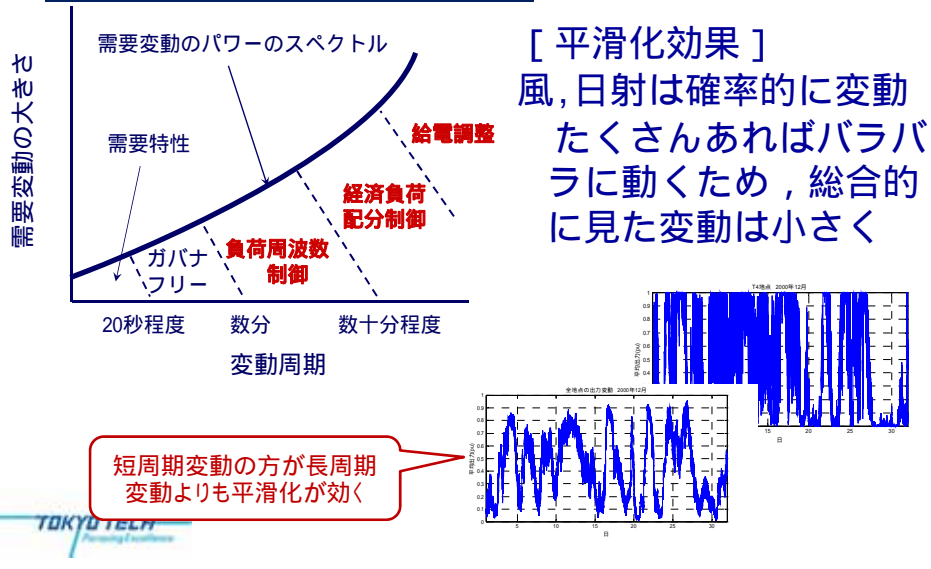
- 需給計画（翌日等）：予測の可能性
- 需給運用での懸念：
  - 余剰電力：PV等の出力大×軽負荷時
  - 急激かつ大きな出力変動
- 需給制御での懸念：
  - 負荷周波数制御等への影響



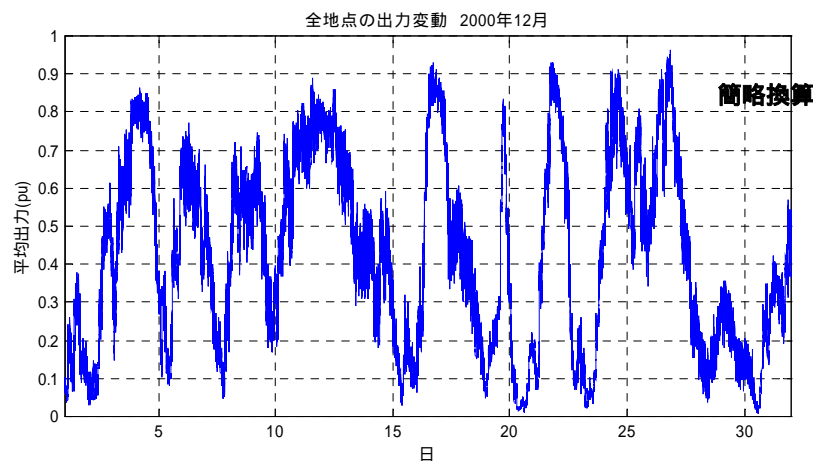
+

火力の運用には大きな影響？

## 需給制御と平滑化効果



## 30地点平均出力(2000/12)



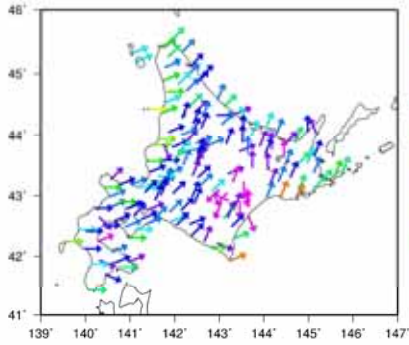
広域に分布していても,出力はほぼ零~フルまで

[出典]NEDO:風力発電電力系統安定化等調査

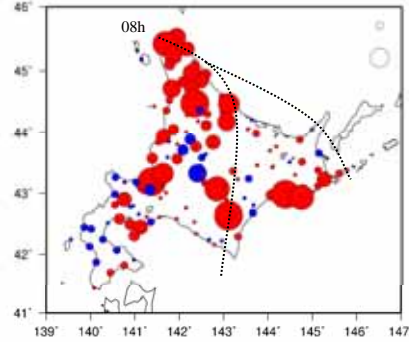
# 地方全体での風速急増事例

[2003年11月16日]

Amedas ws data( 2003111608 )



Amedas ws data( 2003111608 )



● 風速増 ● 風速減

8時における風速

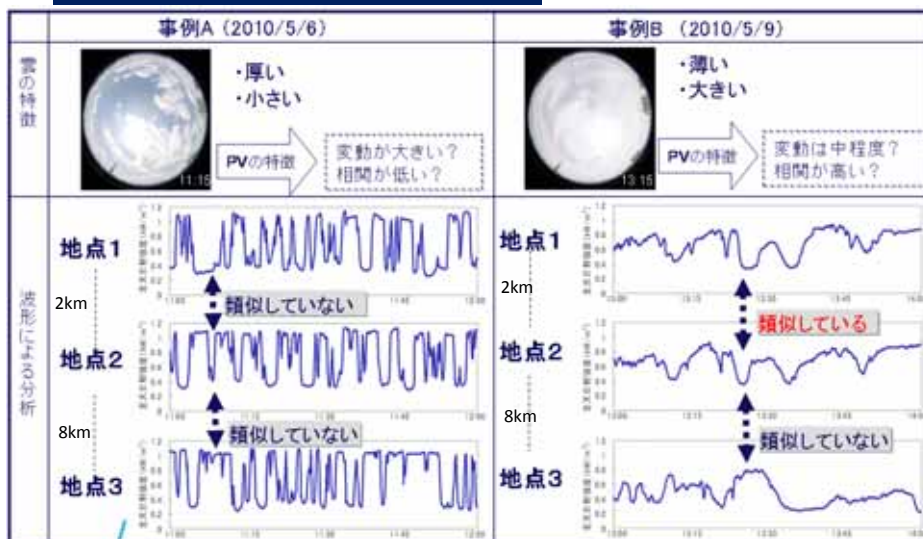
8~9時における風速の変化

**寒冷前線, 温暖前線の直接同時影響**



[出典]加藤央之, 電中研報告T03030

# 異地点での日射強度の相関の例



[出典]七原, 平成25年電気学会全国大会, 6-123

## 平滑化効果:まとめ

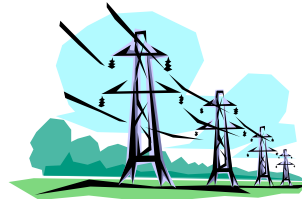
- WF内の平滑化効果
  - 周期1分程度以下の変動:ほぼ独立  
← $1/\sqrt{N}$ 則が成立(N:風車基数)
  - 周期10分程度以上の変動:相関が高い場合有
- 広域での平滑化効果
  - 周期1時間オーダまでは平滑化がかなり効く
  - 前線の通過などに左右されるため,気象現象の視点から見る必要あり



## 課題6:基幹系統の動特性への影響

事故時の動特性:風力が増大した場合どう変化?

- 周波数異常の連鎖
- 電圧異常の連鎖
- 同期運転の不安定化(脱調)

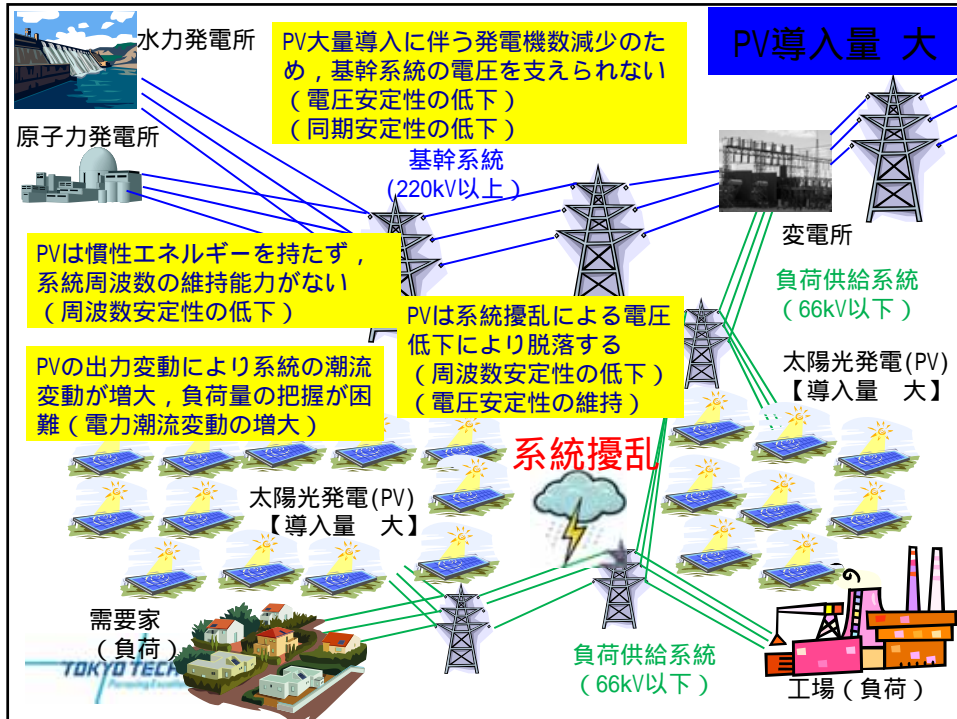


[ PV, 風力発電機 の特性 ]

- 有効電力供給 (例: inertia response, GF, ...)
- 無効電力供給 (事故時を含む)
- 系統擾乱時の一斉脱落

Fault Ride Through  
等





## 電力系統シミュレータへ導入した設備

**パワーコンディショナ (市販品および改造品)**  
市販品 約4.5kW × 3相 × 4社 (12台)  
改造品 4.5kW × 3相 × 8セット (24台)  
新形FRT対応品 4.0kW × 3相 × 3セット (9台)

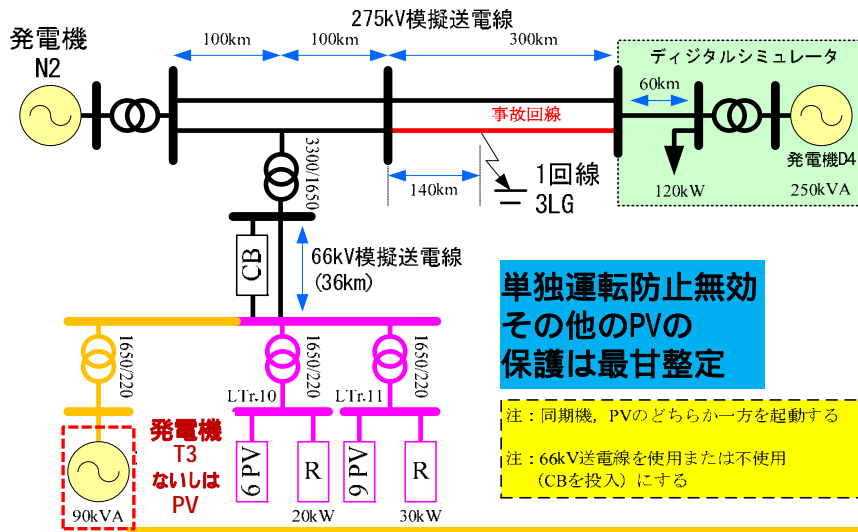
**PVパネル模擬電源**  
11kW × 36台  
PVパネルのI-V特性を模擬

**66kV送電線模擬装置**  
40km × 6組

**負荷用変圧器**  
60kVA × 3台  
3.3kV/1.65kV/200V  
負荷時タップ切替器付 (9タップ)

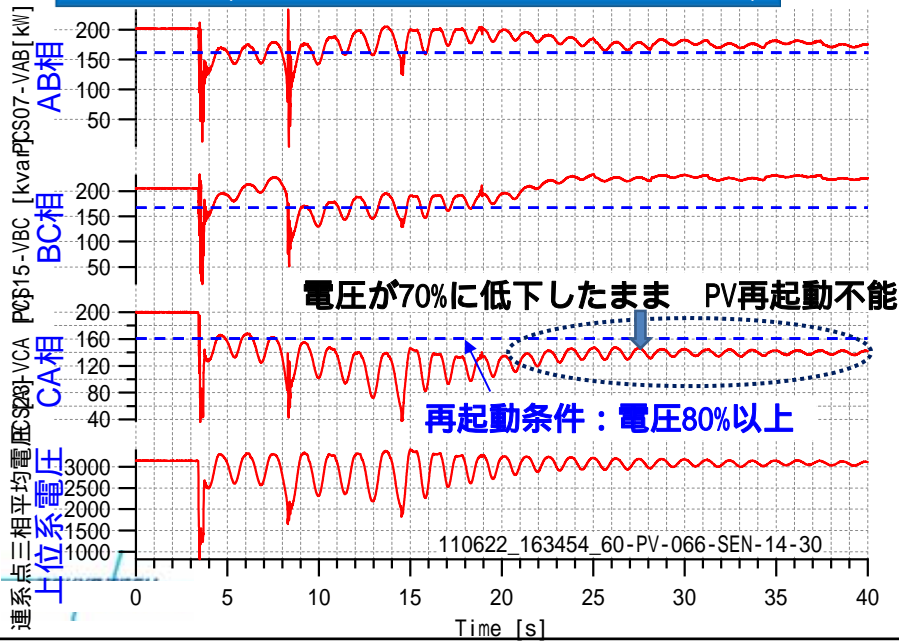
経済産業省補助事業: '分散型電源大量導入系統影響評価基盤整備事業'

# 電力系統シミュレータ試験の例



発電機T3ないしはPVを接続し安定度を比較

# 実験結果 (パワーコンディショナの各相電圧)



## 発表の流れ

1. はじめに
2. 太陽光・風力発電の大量導入が電力系統に及ぼす影響
  - ローカル影響
  - 全系影響
3. トピックス
  - ドイツの現状
  - 電力貯蔵設備による出力安定化
4. むすび



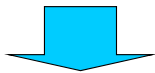
## 1. ドイツ等での電力系統への影響

1. 送電線の混雑
  - 周辺諸国を含めたループフローによるN-1基準抵触
2. 火力再給電, 風力発電等の出力抑制
3. 大きな需給インバランスの事例(予備力不足)
  - 2012/12/24: 800万kWの余剰→50.13Hz
  - 2013/10/28: 312万kWの不足→49.864Hz
4. 火力発電の設備利用率低下 等



# 需給バランスへの影響

風の強い良い時間帯は風力による供給により 大量の供給過剰が発生

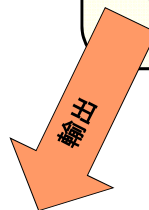
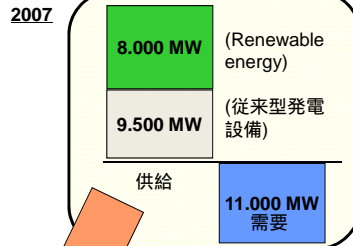


VE-T(旧)はエリアの需給バランスを保つため、風力による電気をエリア外に **輸出** する必要



地域間連系線の送電容量に大きな余力が必要

## ピーク時需給バランス(風が強い場合)



ドイツ南部へ

ピーク時に最大で650万kWが供給過剰

【出典】VE-T社プレゼン資料

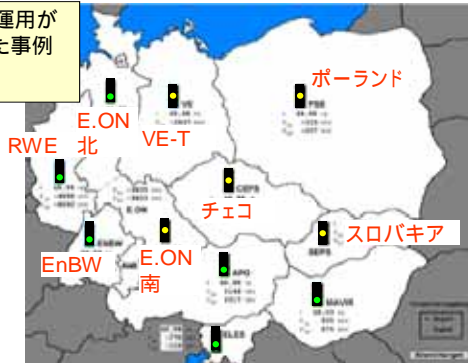


# 送電網への影響と対応(ドイツ等)

- 2008年11月19日～20日には特に状況が厳しく、E.Onおよびポーランドの系統運用者との再給電(E.Onでは発電出力を増加、ポーランドでは逆に抑制して、E.On→VE→ポーランド方向の潮流を流した)、当日市場停止やRE出力抑制も実施。
- 風力が連系されている配電系統運用者DSOとの調整に20～30分程度を要するため、この間、**系統のセキュリティ基準違反状態(\*)**が継続し、**安定供給に「黄信号」**がとまった。

(\*) 万一、単一事故が生じれば、波及して系統分離に至る状況

中東部欧州(CEE)の系統運用が広域的に「黄信号」となった事例  
(2008/11/19-20)



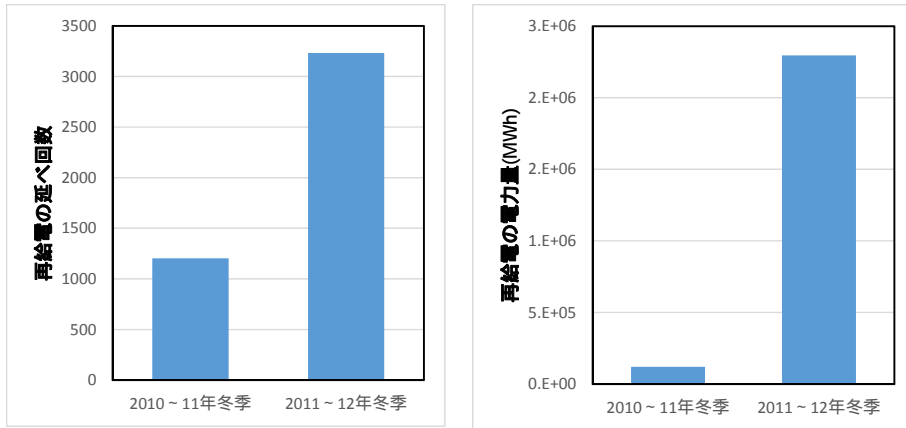
19.11.08 00:00 a.m. traffic light was set on „Warning“ (yellow)

20.11.08 24.00 p.m. traffic light was set on „Normal“ (green)

【出典】VE-T社プレゼン資料

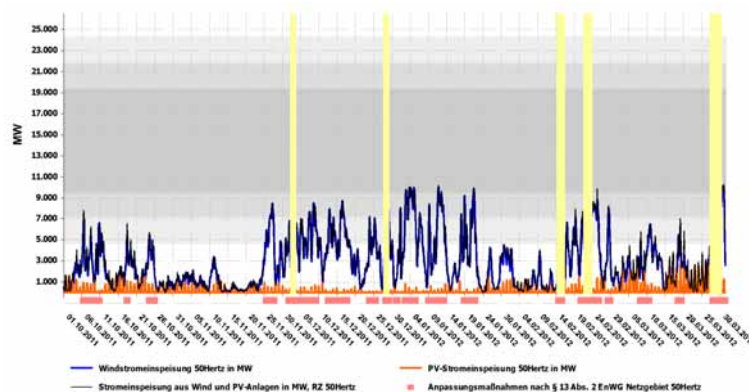


## 混雑が著しい送電線での再給電(ドイツ)



[ データ出典 ] Bundesnetzagentur: "Bericht zum Zustand der leitungsgebundenen Energieversorgung im Winter 2011/12," 20. Juni (2013).

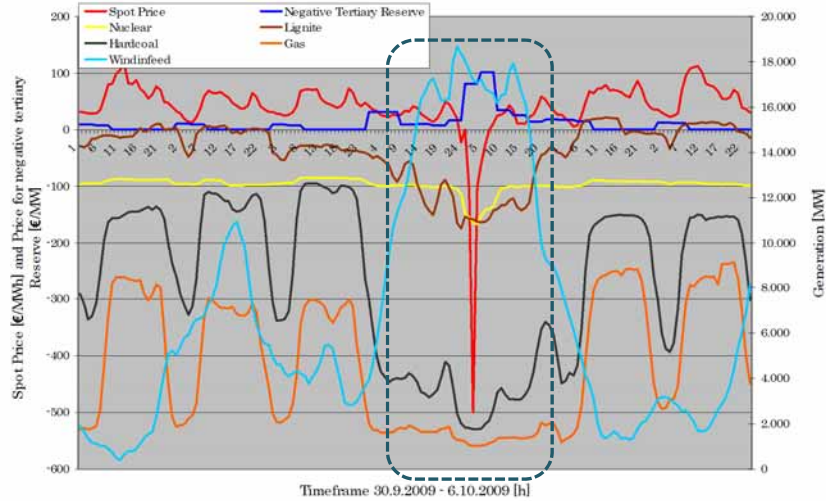
## 風力発電の出力抑制(ドイツ)



50Hz transmissionエリアでのPVと風力発電出力の変動(2011/1/10 ~ 2012/3/31): 黄色部は広域的の事由から出力抑制が行われた時間帯

[ データ出典 ] Bundesnetzagentur: "Bericht zum Zustand der leitungsgebundenen Energieversorgung im Winter 2011/12," 20. Juni (2013).

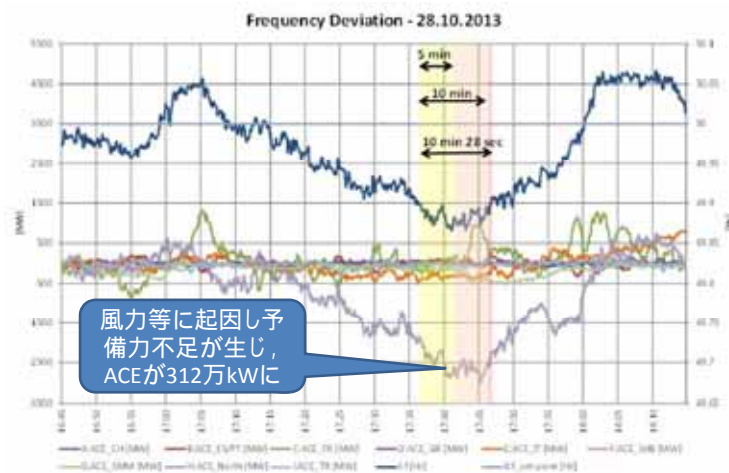
## 風力発電と負の電力市場価格(ドイツ)



[Source] Marco Nicolosi, "Wind Power Integration, negative Prices and Power System Flexibility - An Empirical Analysis of extreme Events in Germany," March 2010



## ドイツ2013.10.28の周波数低下



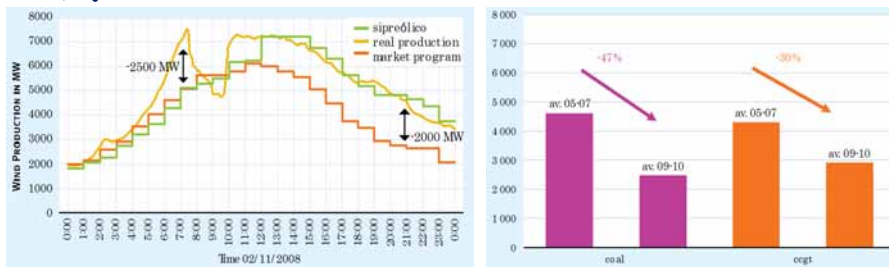
風力等に起因し予備力不足が生じ、ACEが312万kWに



[出典] Entos-e, System Operations Committee, "Incident Classification Scale - 2013 annual report," Dec. 2014.

## バックアップ電源の設備利用率低下

風力発電の出力は不安定かつ予測誤差を伴うため、火力発電等によるバックアップが必要。しかしこれは火力発電等の低利用率等をもたらす。



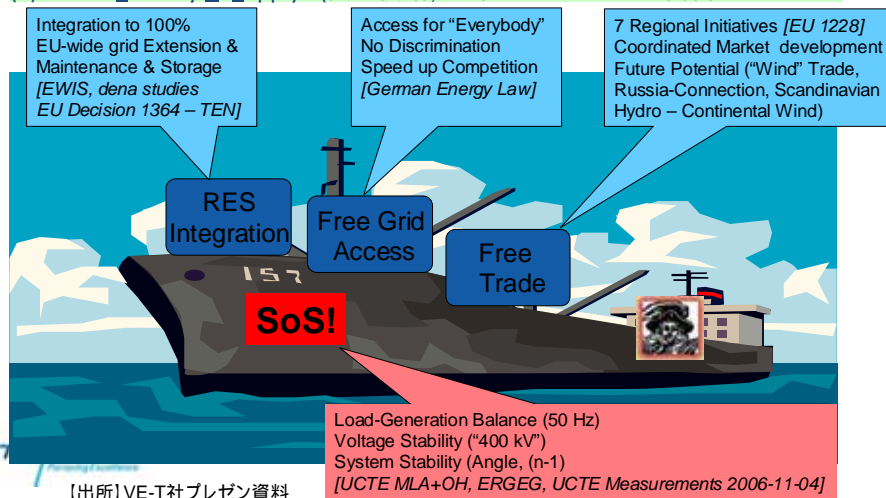
[出典] Eurelectric, "Flexible generation: Backing up renewables," October, 2011.



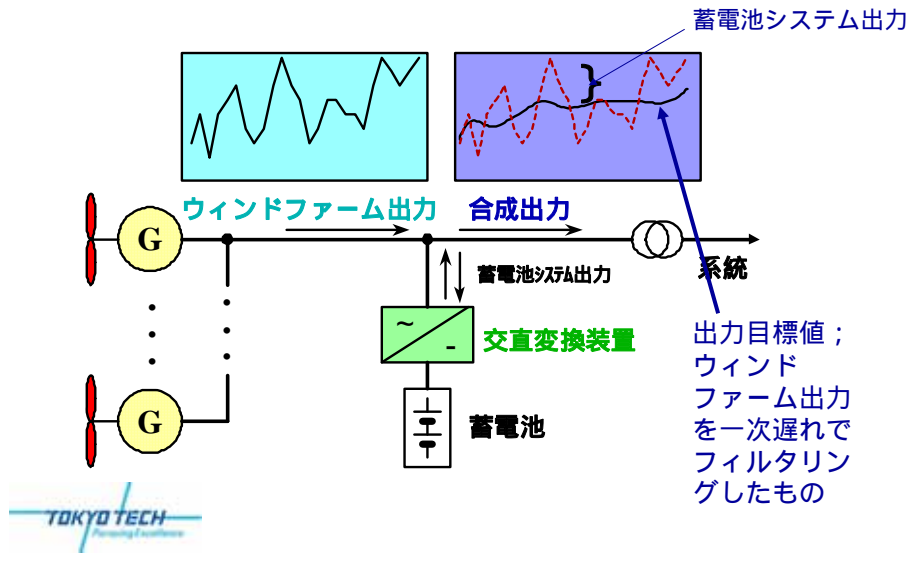
## EU政策とTSOの認識ギャップ

TSO(VE-T)は、EUの3政策を同時に満たすために、すでに送電系統がSoS(\*)状態にあると認識

(\*)TSOが“Security of Supply!”(安定供給)を叫んでいることとの掛合せ



## 2 電力貯蔵 (WF 併設蓄電池)



## 実証試験設備

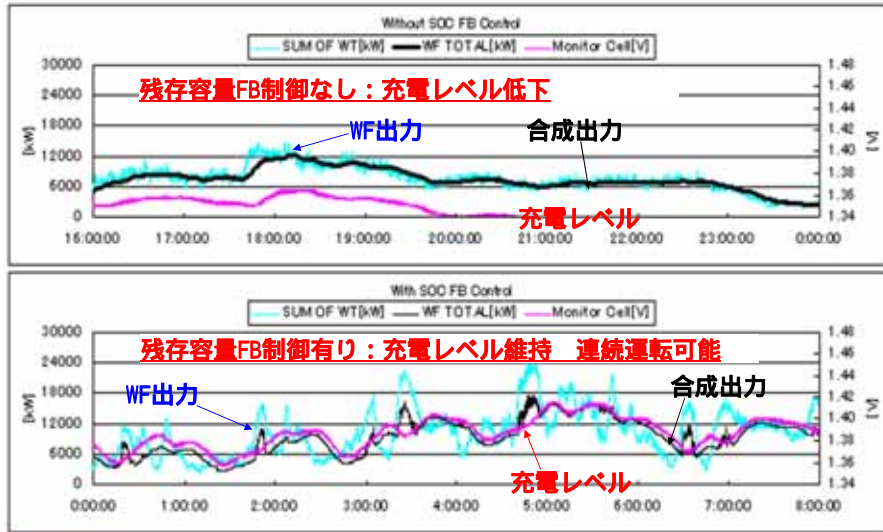


RF電池：4MW, 6MWh





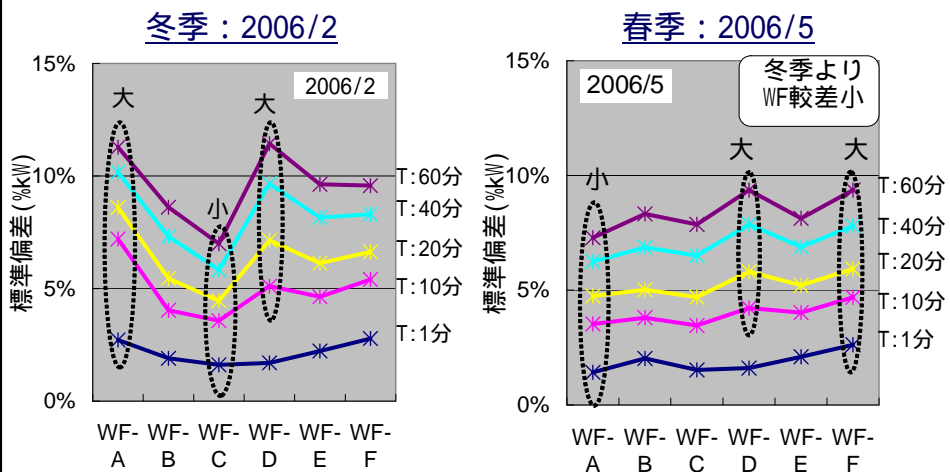
# 蓄電池システムの損失補償制御



[ 出典 ] NEDO : 風力発電電力系統安定化等技術開発



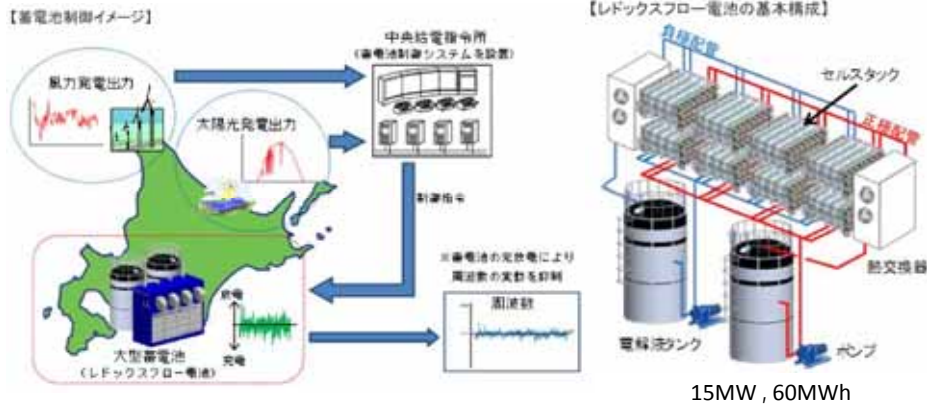
# 蓄電池出力(シミュレーション)の標準偏差



[ 出典 ] NEDO : 風力発電電力系統安定化等技術開発



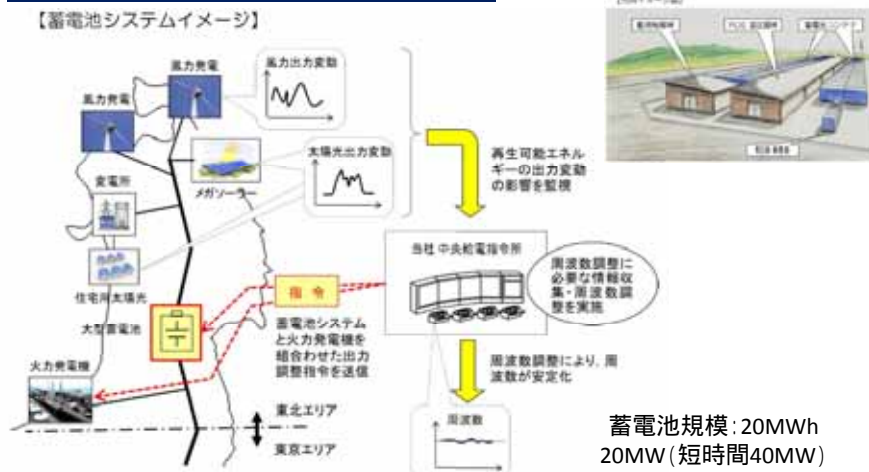
## 経産省:大型蓄電システム緊急実証事業(1)



[出典]「平成24年度大型蓄電システム緊急実証事業」の採択について(北海道電力プレスリリース, 2013年7月31日)



## 経産省:大型蓄電システム緊急実証事業(2)



[出典]「平成24年度大型蓄電システム緊急実証事業公募における当社申請事業の採択について」(東北電力プレスリリース, 2013年7月31日)



## WF用の電力貯蔵装置:まとめ

- 蓄電池, FW等の応動は風力発電の出力変動に比べ十分に速い
- 貯蔵装置が所要の機能を果たすため次が必要
  - 充電レベルの適切な管理
  - 温度管理 など
- 経済性を考えると, 最小限の設備 (kWh, kW) で最大の効果を得るよう, 運用方法に工夫が必要
- 貯蔵設備自身のコスト, 特性向上も



## むすびにかえて(私見)

- 再生可能エネルギー  
: 将来の重要なエネルギーの1つ



大量導入のためには

- 電力系統への連系の課題  
研究を続けていく計画
- PV, 風力発電も「普通の電源」に
- 原点に戻ってみる必要もある? (例: 電力システム, 効率的なエネルギー利用?)



ご清聴ありがとう  
ございました

