

新エネルギー大量導入と
系統安定化に向けた取り組みに関する
欧州現地調査報告

平成 21 年 4 月

目次

1. はじめに
2. 調査結果の概要
 - (1) 需給運用への影響
 - (2) 系統運用への影響
3. 再生可能エネルギー大量導入に関わる各国の状況
 - 3-1 スペイン
 - 3-2 ドイツ
 - 3-3 ベルギー
 - 3-4 フランス
4. 大規模太陽光発電所の概要
5. 規制当局の役割
6. おわりに

付録.

○訪問議事録

- ・ Red Eléctrica España 社 (REE, スペイン)
- ・ Vattenfall Europe Transmission 社 (VE-T, ドイツ)
- ・ Elia 社 (ベルギー)
- ・ RTE 社 (フランス)
- ・ Fotowatio 社 La Magascona 太陽光発電所 (スペイン)
- ・ スペイン産業観光通商省エネルギー総局 (MITYC, スペイン)

○資料

(プレゼン資料)

- ・ MITYC
- ・ VE-T
- ・ Elia
- ・ RTE

(その他)

- ・ スペインの電気料金請求票

1. はじめに

わが国では、低炭素社会の実現に向け、再生可能エネルギーの導入拡大が大きくクローズアップされており、その導入拡大が将来の電力系統の需給運用に及ぼす影響等についても検討が行われているが、現時点では一部を除きその影響は顕在化していない。

一方、ドイツやスペインをはじめとする欧州諸国では、風力、太陽光を中心とした再生可能エネルギーが大量に導入されており、系統運用面での課題が既に顕在化しているため、系統連系技術要件の整備や再生可能エネルギーの監視・制御など系統安定化に向けた種々の取り組みが行われている。

そこで、今回の調査では、再生可能エネルギーの導入拡大が進んでいる欧州における電力系統面から見た課題と系統安定化に向けた取り組みについて、わが国の電力系統の将来的な課題の検討に資するため、以下の各社を訪問し調査を行った。

- T S O (Transmission System Operator : 送電系統運用者)
 - ドイツ : Vattenfall Europe Transmission 社 (以下, VE-T 社)
 - スペイン : RED Eléctrica de España 社 (以下 REE 社)
 - フランス : RTE 社
 - ベルギー : Elia 社
 - 太陽光発電事業者
 - スペイン : Fotowatio 社の La Magascona ソーラーパーク
 - 規制当局
 - スペイン : 産業観光通商省エネルギー総局
- 本報告では、以下にその結果を記す。

[調査参加者]

	氏名	所属
団長	横山 明彦	東京大学大学院 教授
団員 (50音順)	天野 博之	電力中央研究所 電力システム領域 主任研究員
	阿部 公哉	電力系統利用協議会 事務局 技術グループ
	岡本 浩	東京電力(株) 技術部 系統技術G グループマネージャー
	斉藤 哲夫	有限責任中間法人 日本風力発電協会
	七原 俊也	電力中央研究所 システム技術研究所 副所長
	坂東 松夫	風力発電懇話会
	林 政義	電気事業連合会 電力技術部 副部長
	三根 浩二	電気事業連合会 技術開発部 副部長
	吉野 潤	資源エネルギー庁 電力需給政策企画室 室長

2. 調査結果の概要

新しい EU 指令（2008/12）では、2020 年に再生可能エネルギーが最終エネルギー消費に占める割合を 20%以上とすることが目標として掲げられている。これに伴い、再生可能エネルギー発電についても、たとえばスペインで 2020 年までに風力発電容量を 4,000 万 kW と年最大需要相当まで増やすなどの高い目標が掲げられており、各国とも今後一層増大する見込みである。

一方、再生可能エネルギー発電（特に風力発電）の大量導入に伴い、風力発電による系統の安定運用への影響も顕在化している。すなわち、元々欧州では、需給運用面から見た風力発電の出力変動については、連系線を介して、風力発電の連系量が少ない他の T S O が調整力を供給するという構図を採っていたが、風力発電の導入量増大に伴い、系統運用面からは系統信頼度（セキュリティ）面から見た課題が顕在化しているとともに、需給運用面で火力下げ代不足など従来とは異なる課題が現れてきている。

電力系統の需給運用および系統運用の両面から、調査対象とした各国における風力発電の系統の安定運用への影響について要約する。なお各国の系統事情にはかなりの違いがあるため、各国の詳細事情については 3 章以降を参照されたい。参考のため、対象各国の再生可能エネルギー電源と電力系統の概要を表 2.1 にまとめる。

表 2.1 各国の再生可能エネルギー電源と電力系統の現状

(注) 聞き取り調査および各 TSO が発行している年次報告等をもとに作成。ただし右肩に*を付したデータは Statistical Yearbook 2007(UCTE), **を付したデータは IEA PVPS の調査結果によった。

		ドイツ (VE-T 社) 注1	スペイン注2 (REE 社)	フランス (RTE 社)	ベルギー (Elia 社)	日本 (10 電力)
役割		T S O 注3	T S O	T S O	T S O+ D S O 注4	垂直統合型
需要	需要電力量 (億 kWh)	940 (2007)	2,740 (2007)	4,950 (2008)	880 (2008)	9,195 (2007)
	年最大需要 (万 kW)	1,100 (2007)	4,500 (2007)	9,200 (2009)	1,400 (2007)*	18,269 (2001.7月)
風力 発電	設備容量 (万 kW)	897 (2007)	1,560 (2008)	350 (2008)	38 (2008)	154 (2007)
	発電電力量 (億 kWh)	164 (2007)	311 (2008)	57 (2008)	5 (2007)*	26 (2007)
P V 設備容量 (万 kW)		N.A. 注5	310 (2009?)	5 (2007)**	8 (2008?)	192 (2007)
在来型電源容量注8 (万 kW)		2,290 (2007)	7,140 (2007)*	11,270 (2007)*	1,550 (2007)*	23,357 (2007)
風力発電買取制度		F I T 注6	F I T or 市場価格 +プレミアム	F I T	R P S 注7	R P S
再生可能エネの 導入見通し (例)		見通し：2,000 万 kW (2017) -1,800 万 kW 強が風力	目標：風力発電 を 4,000 万 kW (2020)	見通し：風力 650 万 kW (2010), 2500 万 kW(2020)	見通し：風力 300 万 kW (2020)	長期需給見通 し最大導入ケ ース(2030) 風力：600 万 kW 太陽光：5,300 万 kW

(注)

- 1：旧東ドイツ地域を制御エリアとする TSO
- 2：島嶼部を除く。3. Transmission System Operator
4. Distribution System Operator 5. ドイツ全体では 383 万 kW (2007 年, IEA PVPS)
- 6：Feed In Tariff 7：Renewable Portfolio Standard
- 8：水力、火力、原子力の合計

（１）系統運用への影響

欧州系統では、風力発電の増大などに伴い、長距離大電力送電の機会が増えてきている。これにより、たとえばドイツ周辺では、ループフロー*の存在も相まって、N-1基準†を満たせなくなる事態が頻発しており、大規模停電が引き起こされる可能性が増大している。これに対処するため、ドイツ（VE-T社）では、元々は緊急避難的な措置であったはずの系統構成の変更（変電所等の系統切替など）から風力発電の出力抑制に至る様々な運用対策を頻繁（2008年の対策発動回数175回）に実施せざるをえなくなっている。これへの根本的な対策は送電線の新設であるが、風力発電の新設に対して送電線新設に係るリードタイムが長いことに加え、住民の反対もあるため、その今後の展開は不透明である。なおループフロー問題については、ベルギーなどのドイツ周辺諸国では潮流制御のため移相変圧器‡を設置する事例が現れているとともに、関係国のTSOで協調機関を設け系統信頼度の解析を行う事例も出現している。

一方、瞬時電圧低下などの系統擾乱時における風力発電機の一斉解列も、系統の安定運用に対する大きな課題と認識されている。このため風力発電機の系統連系要件として、Fault-Ride-Through能力（瞬時電圧低下などの系統擾乱により一斉解列を起こさない能力）を求める事例が増えている。なお、フランスとの連系線を通じUCTE（欧州送電協調連盟）系統に連系しているスペインでは、風力発電の一斉脱落により同連系線のしゃ断をもたらすことのないよう、2006年に中央給電指令所に風力発電の制御センターを併設した。同センターでは、系統事故に伴う風力発電の停止量を予測計算し、それにより連系線しゃ断が起らないように、集中的に風力発電の出力を制限している。

（２）需給運用への影響

欧州では、需給運用面から見た風力発電の出力変動対策については、メッシュ状の送電システムを活用し、風力発電の少ない地域（TSO）の調整力を活用することで対処してきている。しかし風力発電の導入量が大量になることに伴い、最近では、需給運用面からも下記の問題が生じている。

スペインでは風力発電出力の予測誤差に起因し、火力の下げ代が不足し、風力発電の出力を抑制するなどの状況も発生している。同国のTSOであるREE社では、今後、風力発電が増加した場合に、その対策として風力発電の出力抑

* メッシュ系統など複数の送電経路が有る場合に、ある送電経路の電力潮流を増加させようとした時に、それ以外の送電経路へ一部の電力潮流が迂回して流れるために発生する潮流のことを指す。

† 機器や装置の単一故障（N-1故障：原則として送電線1回線、変圧器1台、発電機1台の故障）では、供給支障を生じさせないように運用するという考え方。運用での対応が困難な場合は、送電線や変圧器の新設・増設を検討する。

‡ 相電圧に対して直角となる電圧成分を重畳させることで位相を調整し、それによりループ潮流を制御する機器（PST:Phase Shift Transformer）。

制が重要度を増すと予想している。一方、ドイツ東部を管轄エリアとする VE-T 社では、既に管内の風力発電等の出力が需要を上回る時間帯も出現してきている。同国では T S O は風力発電の発電電力量を全量引き取ることが求められているため、風力発電の余剰電力吸収のための電力貯蔵設備（揚水式水力を含む）の利用等について検討が開始されている。

表 2.2 に自然エネルギー大量導入により考えられる欧州での課題、対策ならびに今後の見通しをまとめる。

表 2.2 風力発電大量導入による欧州での課題、対策ならびに今後の見通し

	課 題	対 策	今後の見通し
系統運用	重潮流により、N-1 基準を脅かす事態の頻発（ドイツなど）	<ul style="list-style-type: none"> 系統切替などの系統側対策、カウンタートレードなどの市場側対策。 やむを得ない場合に風力等の出力抑制（ドイツ） 風力発電の出力抑制（スペイン） 	抜本的には送電システムの増強が必要だが、住民の強い反対あり。今後の風力発電増により、事態が深刻化する可能性有
	風力発電の一斉脱落により国際連系線のしゃ断の可能性（スペイン）	<ol style="list-style-type: none"> Grid Code で風力発電機に Fault-Ride-Through 能力を要求 再生可能エネ中給による風力発電等の集中制御（出力抑制）（スペイン） 	フランスなど現在は Fault-Ride-Through 能力を要求していない国でもそれを要求する方向
	風力発電に起因するループフローの増大（ドイツ周辺）	<ol style="list-style-type: none"> 関係国の T S O で協調機関を設け系統信頼度の解析を実施（ドイツ、ベルギー等） 潮流調整のために移相変圧器を設置（ベルギー） 	国際協調のための組織の充実等が必要
需給運用	火力下げ代問題、余剰電力問題の出現（ドイツ、スペインなど）	出力抑制により対応（スペイン）	今後、風力発電の出力抑制の機会が増える可能性有
		再生可能エネルギーについては発電電力量を全量引き取ることが原則のため、電力貯蔵設備により吸収（ドイツ）	電力貯蔵設備を新設しても、全量引き取りは容易ではない可能性有

なお、太陽光発電（メガソーラ）については、日本に比べて十分に広大な土地の確保が可能であるため、日射条件が良い地点を選定することでの PV 発電事業の拡大の余地は残っており、訪問したスペインのメガソーラでは建設コストはわが国とほぼ同程度の価格ながらも、好日射条件と一軸太陽光追尾システムの採用により 22% といった高い設備利用率を確保していた。ただし太陽光発電については導入量が風力発電に比べ小さいため、T S O はまだ特段の影響を受けていない様子である。

また政策面では、スペインやドイツでは、高価格のフィード・イン・タリフ（FIT：固定買取価格）による太陽光発電設備の増加を果たしたが、当面の目標値を達成したことなどから、買取価格の引き下げが行われている状況にある。

〔所感〕

各国のT S Oとも、2020年の目標値達成のために前向きに取り組んでいるものの、困難な技術課題があるという点で認識は共通していた。ただし導入目標に対する各T S Oの対応には若干の違いがあるように感じられた。

たとえばスペインのT S Oは、再生可能エネルギー導入目標ありきで、現在は制御でカバーしているものの、将来は最終的には風力発電の出力抑制で乗り切っていく方針と感じられた。一方、網渡り運用が続いているドイツVE-T社では、目標ありきの点では同様であるが、抜本的な解決には送電システムの増強が不可欠とされている。しかしその増強に展望が開けないため、運用面で苦闘しているように見受けられた。またフランスのT S Oでは目標値の達成よりも電源全体で考えた自然エネルギー導入目標のあり方について問題視しており、目標導入量を実現するために過度な負担を自国民に強いることになることを危惧していた。

全体的に、T S Oと政府および消費者との間にはコミュニケーションギャップが感じられた。これまでは系統運用者の試行錯誤による対応で乗り切れたものの、さらなる高い導入目標に国レベルでチャレンジしていくためには、目標達成の意義そのものだけでなく、系統運用上の課題とその対策の必要性について、広く消費者の理解を得ていく必要がある。

なお、太陽光発電（PV）については、国際競争力のあるPVパネルメーカーが少ないためか、欧州では再生可能エネルギーの主流とは捉えていない模様である。スペインでのフィード・イン・タリフの見直し[§]は、想定よりも自国産業が育たないためなどの事情も背景にあると推察される。

[§] ドイツでも、2009年1月以降の設備に対して太陽光発電の買取価格引き下げが行われたが、産業政策の面ではなく、風力に対してCO₂削減量あたりで見たコストが7.5倍であるなど、太陽光発電に対する優遇が行き過ぎているとの批判を受けたものと考えられる。

3. 再生可能エネルギーの大量導入に関わる各国の状況

3-1 スペイン

スペインでは風力発電の導入がエネルギーセキュリティや持続可能性の向上を目指し促進され、その容量は2007年に1,560万kW(年最大電力の35%程度)に達している。また2020年にこれを4,000万kWまで増やすことを目標としている。また同国では太陽光発電の導入も2006年以降急増し、310万kW(うち6.1万kWは太陽熱発電)に達している。

電力系統の観点からは、同国の系統はフランスとの連系線を介しUCTE系統に連系しているが、フランスとの連系線がしゃ断されると系統の安定運用への影響が大きい。ことに系統故障に伴う瞬時電圧低下により引き起こされる風力発電の一斉脱落(図3.1参照)

に伴い、フランスとの連系線が過負荷によりしゃ断に至ることを懸念している。これを避けるために既設機を含む風力発電機にFault-Ride-Through能力(図3.2参照)を具備するよう、2007年にGrid Code(系統連系技術要件)が改正された。またREE社では、風力発電を含む1万kW以上の再生可能エネルギー発電等

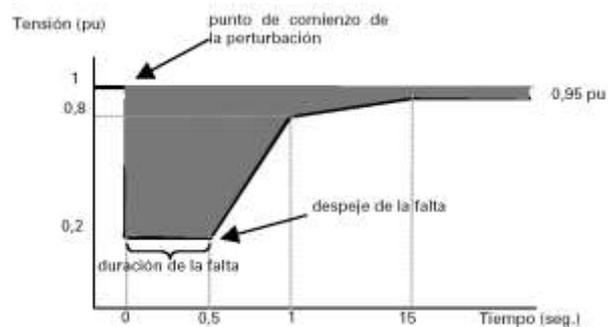
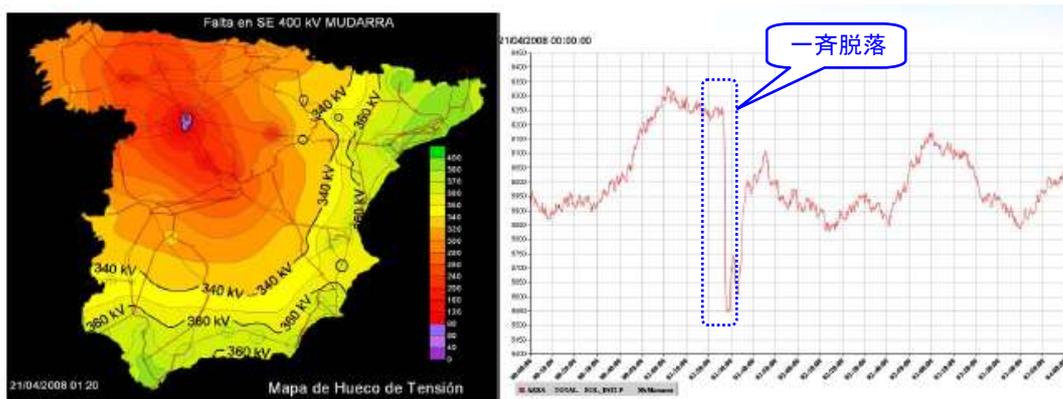


図 3.2 REE 社が風力発電機に求めている Fault-Ride-Through 能力
[出典] スペイン産業観光通商省資料



(a) 系統故障による瞬時電圧低下の
の拡がりの範囲

(b) 瞬時電圧低下による
風力発電機の脱落の例

図 3.1 REE 社が懸念する課題：瞬時電圧低下に伴う風力発電機の脱落
[出典] Miguel de la Torre Rodríguez, “Impact on the Power System Control,” August 25, 2008, Paris, CIGRE Plenary session.

に対する制御センターを 2006 年に新設し、送電システムのセキュリティ解析結果に基づいて風力発電などの出力抑制を行うようになった（図 3.3 参照）。ここでは、系統事故に伴う風力発電の停止量を予測計算し、それにより連系線しゃ断が起こらないように、集中的に風力発電の出力を制限している。

一方、需給運用面からは、2008 年には、風力発電の出力予測誤差が 300 万 kW に達したため、風力発電の出力増に伴い火力発電の下げ代不足が発生し、風力発電の出力抑制を行う事例が出現した。また再生可能エネルギー発電や需要の伸びに伴い電力流通設備の拡充が必要となっているが、住民の反対等により送配電線の新設が進まないこともあり、系統混雑も問題となっている。これらを解決するためにも、風力発電の出力抑制が実施されている。（TSO はこれらの出力抑制に対する補償は行わない。）

今後、同国に 4,000 万 kW の風力を導入する見通しがあるが、REE 社はその場合、セキュリティ確保のために風力発電の出力抑制が重要度を増すと考えている。また風力発電 4,000 万 kW 導入時には、風力発電に瞬動予備力機能を要求するなど、風力発電機に在来型電源の特性に類した特性を具備させることも必要となると考えている。さらに、揚水式水力の開発など種々の方策も必要と考えているが、揚水式水力の開発については、責任主体が明確でないため、今後の展開は不透明であるとしている。

なお、風力発電機からの無効電力供給についても現行の制度に問題があり、系統電圧にスパイク状の変動が見られた。このため、現在は REE 社より風力発電機の力率についても指令を与える方式が採用されている。

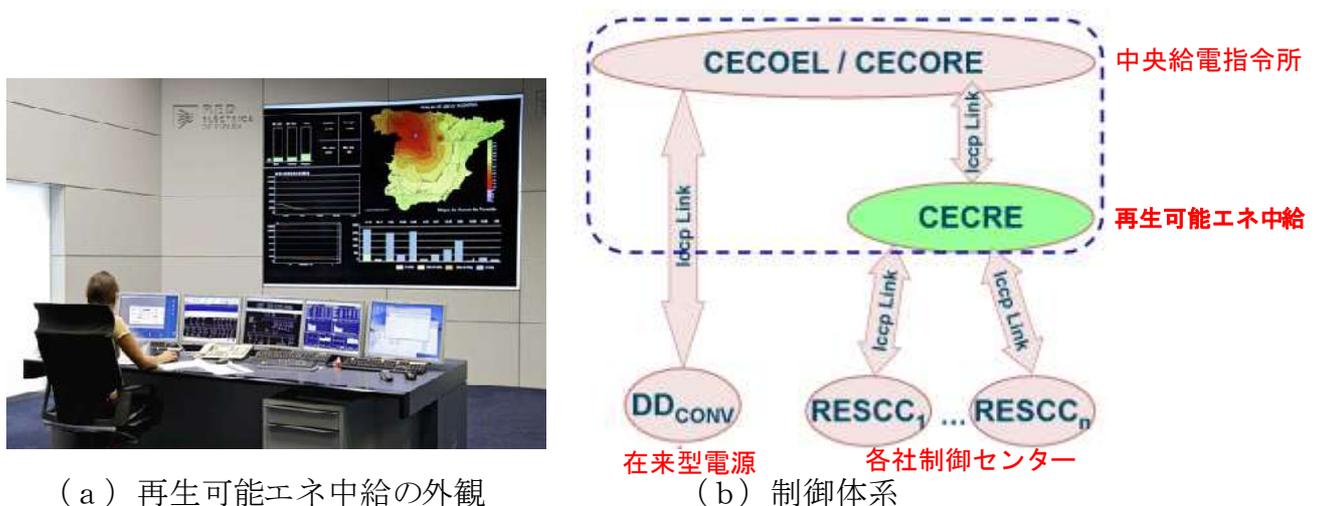


図 3.3 REE 社が新たに導入した再生可能エネルギー中給

[出典] Miguel de la Torre Rodríguez, “Impact on the Power System Control,” August 25, 2008, Paris, CIGRE Plenary session.

3-2 ドイツ

ドイツでは EEG (再生可能エネルギー法) のもと、再生可能エネルギーの固定価格買取 (FIT) と優先接続を定めることで風力発電を大幅に拡大しており、2008 年末におけるドイツの風力発電容量は 2,354 万 kW (VE-T 社管内は 968 万 kW) に達している。またドイツ政府は、2020 年までに再生可能エネルギーを 30%以上 (ほとんどは風力) とし、かつ再生可能エネルギーを優先活用する目標を立てている。ただし今後の風力開発の主流は洋上風力に移ろうとしている。

技術面では、TSO 間の連系線を通じて風力の少ない制御エリアの短周期・長周期変動への調整力も活用することで、風力発電の出力変動に対処している。例えば VE-T エリアの需要は 94.7TWh でドイツ全体の 18%に過ぎないが、風力はドイツ全体の 41%を占めるため、風力発電電力量の 50%程度を導入量の少ない他エリアに需要あたりの風力導入量が 15分ごとに均等になるように融通することで対応している。しかし、昨今の風力発電の拡大により、TSO 間や国際連系線の容量不足が顕在化、系統運用者は限界に近い運用を余儀なくされており、風力発電に起因した計画外のループフローにより、N-1 条件を満たすことが困難となる事態も発生している。たとえば 2008 年 11 月 19 日には、周辺の TSO とともに系統セキュリティが脅かされ、管内の時間前市場取引を停止した (図 3.4 参照)。

電気事業法 (EnWG) 第 13 条によれば、このように系統セキュリティが脅かされた場合には、例外的措置として①送電系統の切替などの系統側での過負荷対策、②需給調整契約を締結した需要家の負荷制限などの市場による対策、③最終手段として再生可能エネルギー発電の出力抑制などを実施し対応することと



図 3.4 系統セキュリティが脅かされ時間前市場取引市場を停止した事例 (2008 年 11 月 19~20 日)

[出典] VE-T 社資料, ” Security of supply - the highest priority ”

している（表 3.1 参照）。これらの対策の発動回数は近年増加しており、2008年には175回に達している（図 3.5 参照）。またカウンタートレード（送電線混雑を解消するために TSO が実施する電力取引）などに要する費用は TSO の負担となっており、その額も相当（VE-T 社年間コストの 20%程度を占める）となってきた。最終的に一般需要家が負担するが、需要家があまりその点を認識していないことを TSO は懸念している。

このような綱渡りの運用を解決するには、送電容量の拡大が急務である。しかし、ドイツ国内での架空送電線建設には 10～15 年程度を要する上、建設に

表 3.1 電気事業法（EnWG）第 13 条に示された系統セキュリティ対策

[出典] VE-T 社資料, "Security of supply – the highest priority"

優先順位	対策(13条による)	系統側対策 13条(1)項	市場側対策 13条(1)項	13条(2)項の 適用
1	系統構成変更	○		
	運用裕度の活用(電圧, 電流)	○		
2	調整力の活用		○	
	負荷の抑制		○	
	予防混雑管理		○	
	TSO による追加予備力の起動		○	
	カウンタートレード		○	
	再給電		○	
3	既決定の計画の見直し			○
	DSO での負荷遮断, 電圧低減			○
	発電事業者への直接指令(風力発電など EEG 電源を含む)			○

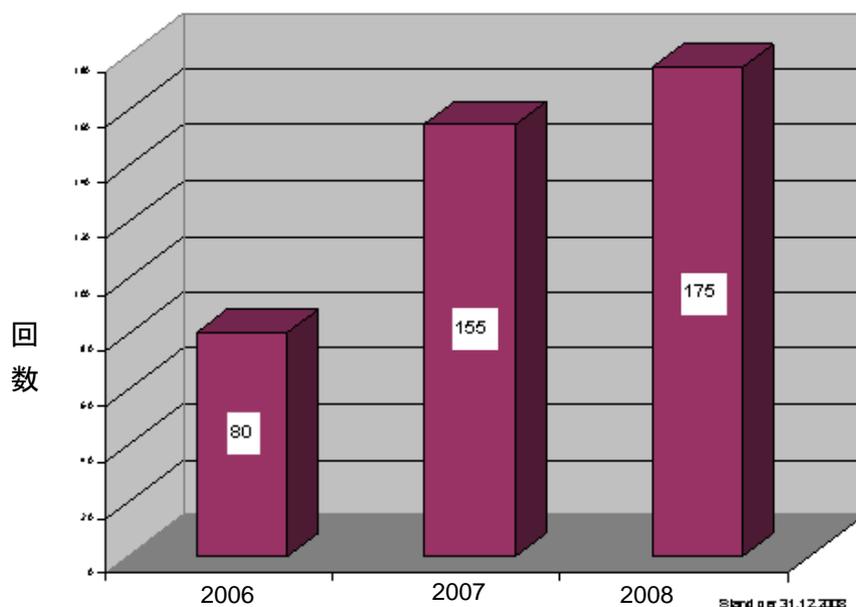


図 3.5 電気事業法（EnWG）第 13 条の例外的系統セキュリティ対策の発動回数

[出典] VE-T 社資料, "Security of supply – the highest priority"

対する反対運動もあるため、送電系統の新設は容易ではない。また現在計画されている大規模な洋上風力を送電するのもにも系統増強が必要であるが、同様に整備できるかどうかは不透明な情勢である。

系統運用面では、再生可能エネルギーの導入拡大に対処するため、TSO間のさらなる協調が必要であり、VE-T社を含む欧州の11のTSO**が、共通のITプラットフォームを開発し、広域的な系統のデータ連携とセキュリティ解析（潮流計算によるN-1チェック）を行えるようにするとの申し合わせに合意している。

なお需給運用面では、現在でも、VE-T社管内で風力発電の出力が負荷を上回る状況が発生している（図3.6参照）。同国では、やむをえない場合を除いては風力発電の出力を抑制してはならないこととなっているため、この余剰電力の吸収のために揚水式水力などの電力貯蔵設備の導入についても議論されている。これに伴い、風力発電、電力貯蔵（揚水、EV等）および制御可能需要（家庭、産業等）を組み合わせた制御実証プロジェクトが政府主導で始まっている。

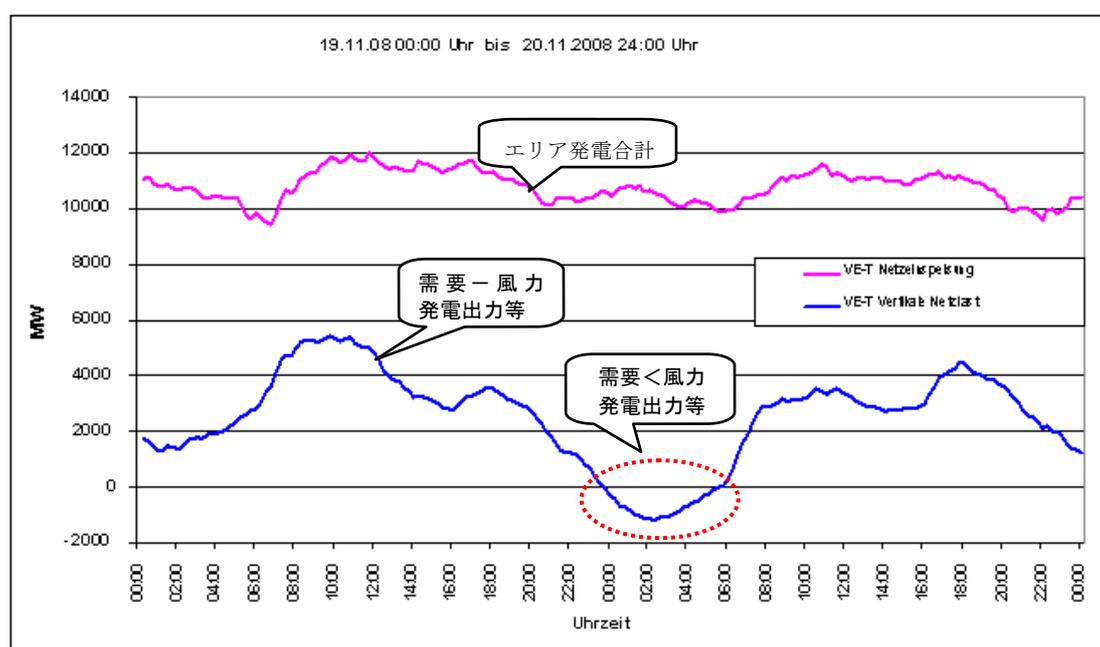


図 3.6 VE-T 社で風力発電等の出力が需要を上回った事例

(2008年11月19日(水)0時~20日(木)24時)

[出典] VE-T 社資料, ” Security of supply - the highest priority ”

** オーストリア 3 社 (Verbund APG, TIWAG-Netz, VKW Netz)、スイス 1 社 (swissgrid)、ドイツ 4 社 (EnBW, E.ON Netz, RWE TSO, VE-T)、オランダ 1 社 (TenneT TSO)、ポーランド 1 社 (PSE Operator)、チェコ 1 社 (CEPS) の計 11 社が参加。

3-3 ベルギー

ベルギーの風力発電導入量は現在 30 万 kW 程度（年最大電力の 2% 程度）であるが、今後 2020 年には洋上風力 180 万 kW、陸上風力 120 万 kW まで増加することが見込まれている。ただし、洋上風力の導入拡大については沿岸部までの 380 kV 送電線および変電所新設が必要なため、それが完了する 2015 年頃から大きく伸びる想定となっている。

一方、太陽光発電は政府の補助により容量が増加し始めているものの、2008 年時点では 8.2 万 kW とわずかな値にとどまっている。

ベルギーでは、風力発電に対して国民の理解が得られにくく、洋上風力 20 MW の建設計画が 6 MW に変更されるなど、ドイツとは対照的な状況であり、現時点では自国内の風力発電による影響は限定的と言えるが、近接国（特にドイツ北部）に大量導入された風力発電の影響を大きく受け、ループフローの問題が顕在化している。

ドイツ北部の風力発電量が大きい場合は、オランダからベルギーを經由してフランス向けの南向き潮流（南流）が生じ、逆の場合には、北向き潮流（北流）が生じ、ループフローの変動幅は ±200 万 kW 程度まで拡大した（図 3.7 参照）。

この国際連系を通じたループフローを抑制するため、ベルギーでは潮流のバリアとして移相変圧器を 4 カ所に設置（図 3.8 参照）し、南流 120 万 kW ～ 北流 100 万 kW 以内に収まるようにしている。（図 3.9 参照）なお、移相変圧器

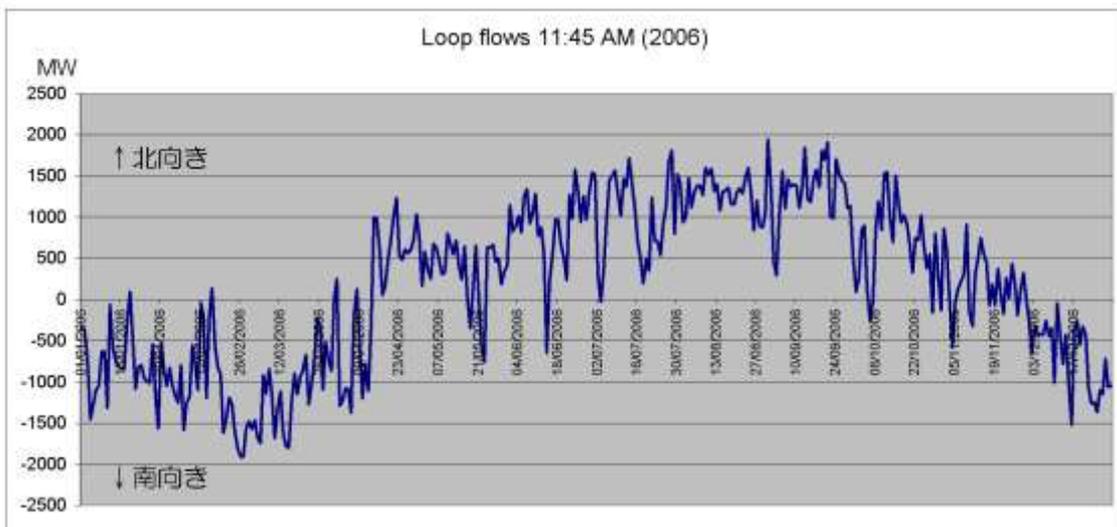


図 3.7 2006 年におけるループフローの実績
[出典] Elia 社資料

は送電線の容量と整合を図り、1400MVA としたということである。

風力起因の送電混雑への対応として以下のふたつについて説明があった。ひとつは、送電線 1 回線故障等の N-1 事象で風力発電の出力を 60% まで抑制す

ることによるベルギー国内の対応であり、TSOは契約に基づき事故時に出力を60%まで抑制することができ、補償も求められないというもの。もうひとつは、国際間のTSOの協調であり、その取り組みとして、2009年2月、ベルギーにCoresoと呼ばれる共同の系統監視センターを設立した。CoresoにはベルギーのElia社のほか、RTE（フランス）、ナショナルグリッド（英国）およびVE-T（ドイツ）が参加し、計画時からリアルタイムの運用までの混雑管理を効果的に行うことが期待されているものの、隣接系統のうちオランダやドイツ西部のTSOが参加していないため、体制としては不十分な状況である。



図 3.8 移相変圧器の設置状況（※：2008年設置分）
 [出典] Elia 社資料

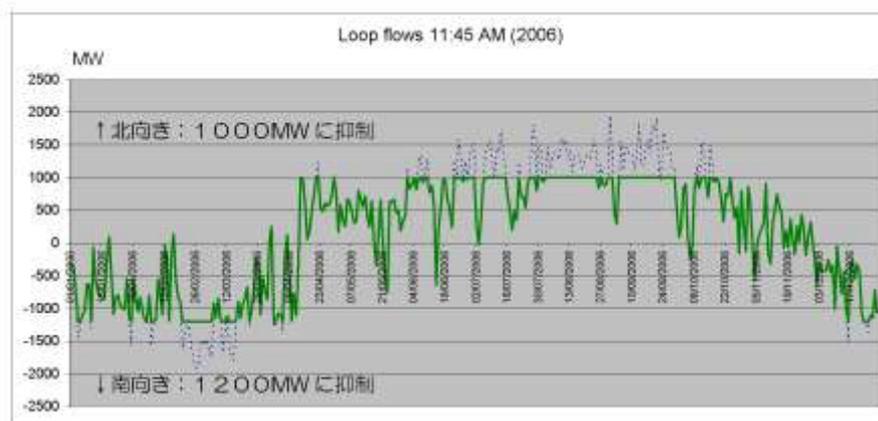


図 3.9 移相変圧器によるループフロー抑制イメージ
 (2006年実績に基づく概念図) [出典] Elia 社資料

3-4 フランス

フランスでも風力発電は急増しており、その総設備容量は 2008 年に 350 万 kW（年最大電力の 3%程度）に達し、2010 年にはこれが 650 万 kW 程度になると予想している。また洋上風力についても、現在は存在しないものの、RTE 社は 2008 年に総容量 410 万 kW に及ぶフィージビリティスタディを要請されるなど、今後の導入に向けた動きがある。一方、太陽光発電については技術的に開発途上で高価格のため、まだ導入量は限られている。

フランス国内の風力発電については、同国内に風力発電が地域的に分散している（図 3.10 参照）ため、これまでのところ基幹系統への影響は顕在化していない。

RTE 社としては、地域的に分散して導入されるなら 600~700 万 kW の風力発電であれば歓迎するが、それが 500~1000 万 kW となった場合は予備力の増加が必要となるであろうと予想している。また、風力発電容量が 2,000 万 kW 程度となると送電系統の増強が不可欠となり、そのために 10 億ユーロを要するであろうと予想している。

ただし風力建設は送電線建設に比べリードタイムが短く、風力建設は概して住民に好意的に受けとめられるのに対し、送電線建設に対しては反対が多いという事情もある。一方、今後は、送電容量が不足している地域に建設される場合が出現することが予想される。加えて、風力発電所が実際に建設されるかどうかについてはかなりのリスクがある。このような中で、どのように系統増強

Wind power in France

- **A suitable wind farm location**
 - ✓ Notably the length of the Channel and around the Gulf of Lion
- **A geographically balanced distribution of wind farms:**
 - ✓ Allows for benefits from working with other wind regimes
 - ✓ More rapid growth in the East and the North for 3 years



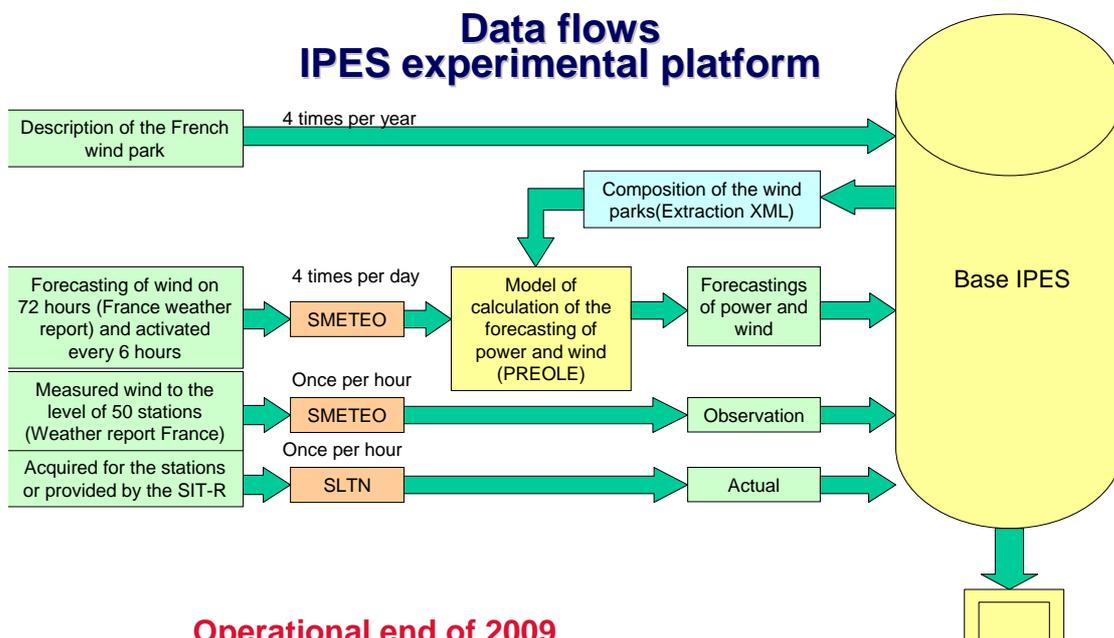
図 3.10 フランスにおける風力発電の導入状況

[出典] RTE 社資料

を図るかはT S Oにとっての非常に難しい課題としている。このため RTE 社では、風力発電の立地について「ウェルカム・ゾーン」を設けることも必要であろうと考えている。

風力発電の大量導入に伴う技術的な課題としては、需給運用の面からは風力発電出力のリアルタイムでのモニタリングや風力発電の出力予測，系統信頼度確保の面から風力発電機の電圧・周波数変動に対する Fault-Ride-Through 能力などが重要としている。前者については，試験的な監視・予測システム（IPES：フランス語の略称）を 2008 年に新設し，2009 年時点で約 80%の風力発電機出力をリアルタイムでモニターしている。また後者については技術的には可能であるが，連系要件に織り込むことを課題としている。

なおドイツの風力発電出力が大きい場合に，フランス，ベルギー，オランダ，ドイツの間には，大きな計画外のループフローを経験してきた。これへの対策のため，ドイツ，ベルギー等のT S Oとの共同の系統監視センター（Coreso，詳細は前項に記載）を設置した。



Operational end of 2009

図 3.11 RTE 社の試験的な風力発電の監視・予測プラットフォーム

[出典] RTE社資料

4. 大規模太陽光発電所の概要

スペインのマドリッドから西南西に約 300km, 中世の佇まいが今も残る Trujillo という町の郊外にある La Magascona 太陽光発電所を訪問した。この太陽光発電所は, スペイン国内の企業である FOTOWATIO 社が経営するメガソーラの一つで, 2007年11月よりフェーズ1:定格 20MW (ピーク 23MW) が, 2008年7月よりフェーズ2:定格 10MW (ピーク 11MW) が運用開始した総出力 30MW のメガソーラである。ここでは1軸追尾システムが採用され, スペインでは3万世帯に相当する年間 60GWh を発電している。また, 二酸化炭素排出量で評価すると, ここでの発電により年間 6.3 万トンの削減に相当するということである。最終的な総出力は 40MW を予定しており, 今後, 第3フェーズで 10MW (追尾機能なし) を建設する計画である。



図 4.1 発電所全景



図 4.2 発電所全景

(1)建設について

建設費は 6 ユーロ/W (1 ユーロ 130 円換算では 78 万円/kW)。ROE は 6 ~ 8 % で 25 年の固定価格買取 (以下 FIT) が保証されている。FOTOWATIO 社の試算では, 20 年で投資回収可能と判断しており, PV の設備寿命としては 40 年を期待していた。

総敷地面積は 165 ヘクタール (第 1~3 フェーズ) 全て借地で, 土地を借りて発電事業をするというビジネススタイルである。構内に REE 社の送電線が通過し, その線下の土地の利用制限などもあり若干広めの用地となっているものの, このサイトでは 41 m²/kW を確保しており, 日本の敷地面積 (20 m²/kW 程度以下) に比べると実に 2 倍以上広大な土地が確保されている。建設にあたっての地元住民の反対運動などはなかったが, 現在は, 一部住民から景観に関する苦情があるとのことである。

(2)設備概要について

PV 設備の構成としては, 1 ユニットを 100kW 単位として, これを 300 ユニット設置している。計量の単位が 100kW のため 1 ユニットを 100kW としているとのことである。2004 年に発令された Royal Decree (王室令)436 によるとス

ペインの太陽光発電に関する FIT では 100kW 以下と 100kW 以上で買取価格に差が設けているため、100 kW を 1 ユニットとして、この単位で計量している。ちなみに、100kW 以下の太陽光発電では設置後 25 年までの FIT は平均電力価格の 575% であるが、100kW より大きくなると FIT は平均電力価格の 300% に低減される。

表 4.1 スペインにおける太陽光発電の固定買取価格
(Royal Decree 436/2004 の Article33)

設備量	設置後 25 年まで	設置後 26 年目以降
100kW 以下	平均電力価格の 575%	平均電力価格の 460%
>100kW	平均電力価格の 300%	平均電力価格の 240%

※平均電力価格はスペイン政府により毎年見直し
(約 7.7 ユーロセント/kWh : at2006)

100kW の構成は、16 枚の PV パネル×2 列×15 段であり、1 枚の PV パネルの大きさは、縦 2 m × 1 m 程度で多結晶系の PV パネルで定格最大出力は 260W である。製造メーカーは中国のサンテックであり、25 年間のメーカー保証がついているとのことであった。また、ここでは GPS を用いた一軸追尾型のシステムを採用しており、100kW の PV ユニットの 1 台のモータ (定格 370W) により 30 秒ごとに光の入射角度を調整している。その構造は、モータにより縦方向の 1 軸を稼動し、段ごとにあるリンク機構を通じて各段の横方向軸を回転させて、PV 面が東⇒西に稼動する仕組みになっている。追尾システム導入による期待される増分電力量は 30% 程度とのことであり、我が国の実績よりも高い値を示している (日本での 1 軸追尾での利用率向上は 18~20% との報告事例あり^{††})。また、追尾に掛かる増分のメンテナンスコストについて、大幅に増加することはないとのことであった (実績としては、運転開始後約 1.5 年間で 200 台ある駆動モータの内 2 台を取替え)。



図 4.3 駆動モータ



図 4.4 リンク機構及び軸

^{††} わが国に比べ高いことには、スペインの方が全天日射量に占める直達光の割合が大きいことも影響していると推察される。

このメガソーラ発電所は傾斜面に建てられており、架台の脚の長さで水平面を調整しており、設計風速は 33.3m/秒であった。PV パネルを多段積みで設置したものでないためであろうか、設計風速の割には架台の設計は簡素である印象を受けた。

各 PV パネルが発生した電力は、100kW ユニット単位に施設された DC 回路により集められる。これをインバータにより 230V の交流に変換し、各ユニットに設置された変圧器によって 22kV へ昇圧し、構内に施設された 22kV の中圧線を通してこのメガソーラの送電用変電所に送られる。送電用変電所では、35MVA の変圧器(1 台)により 22kV から 132kV へ昇圧され、5km先の Trujillo にある変電所へ 1 回線で送電されている。なお、この連系送電線は発電事業者が建設している。



図 4.5 変電所外観

(3)保守・運転概要について

運用効率は概ね 80%である。20%の損失の構成要素は、PV パネルの表面汚れ、PV 表面の温度上昇による出力低下 (90°C以上で低下)、モジュールの不整合損 (モジュール間での特性バラツキに起因した損失)、基準太陽光とのスペクトルの違い、インバータを含む回路損失などである。一方、設備利用率は概ね 22%程度であり、日本に比べて高い設備利用率を確保している。この地方はスペイン国内でも最も PV 立地に適した地点のひとつであり、晴天日は年間 300 日程度であることや広大な土地を利用した 1 軸追尾システムを採用することにより日間の出力カーブが台形状の形状を示していることがその理由として挙げられる。現在は発電量を単に売電すれば良いが、今後は毎日の発電予測提出が必要となり、予測発電量から実績が乖離するとペナルティを取られる制度が今年から開始されるとのことである。

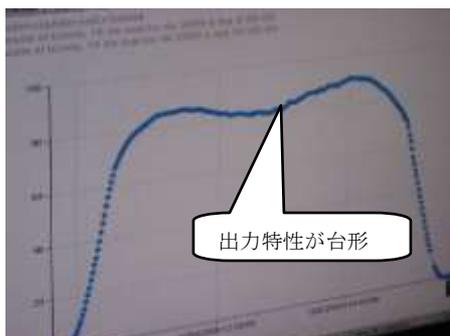


図 4.6 1 ユニットの日間出力カーブ

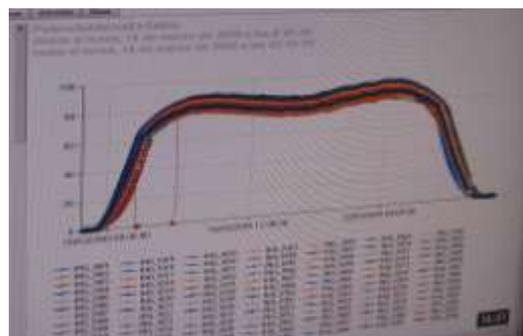


図 4.7 全ユニットの日間出力カーブ

運転については、昼間は運転員 2 名が常時監視しており、夜間及び週末は故障警報が発生すれば Trujillo より運転員が出動する体制をとっている。保守実態としては、巡視は毎日、定期点検は 2 回／年とのことであったが、これは PV パネルの洗浄等がメインであり、検査／測定などは定期的には行われていない（常時各ユニットの状況を監視・数値管理しているのでその必要はないとの認識）。

障害実績については、部分加熱による障害実績がある。この原因は、この地方に多数生息するコウノトリの糞が影響しており、コウノトリの糞が PV パネルに付着し PV パネル内での発電のアンバランスにより過熱するとのこと。その他は、前述した追尾装置のモータ故障が 2 件あったのみで、雷害などの実績はない。

スペインでの再生可能エネルギー導入が成功している要因は、次の3点であるとのことであった。

要因①：企画面

- ・再生可能エネルギーの導入目標を設定と目標達成に向けた政策の立案
- ・ポテンシャル分析、技術面や手続き面の分析など

要因②：法制度面

- ・優先的な取扱い（法制度の整備、財政・税制面でのインセンティブなど）
- ・既存電源との競争力を確保するためのFIT価格の設定
- ・電力系統への優先接続 など

要因③：IDAEに代表される研究開発の推進

- ・特に初期段階におけるサポート、推進的な役割

このうち、FIT価格の設定については投資家の利益率が6～8%となるように価格を設定しているとのことであり、技術の成熟に応じて料金は低下させるという説明であった。FIT価格の設定は規制当局により行われ、定期的に見直されている。

また、電力における再生可能エネルギー比率を40%以上とする目標に対して問題はないのか尋ねたところ、その目標は系統運用者（REE社）が調査、検討のうえで、系統の責任者として受け入れたものであるから、彼らが対応の責を負うべきであるとのスタンスであった（REE社の認識とは異なる）。政府としては、長期的な再生可能エネルギーの導入促進の観点から、必要に応じて新規送電線建設や電力貯蔵（揚水発電等）設備などの建設を求めていくとのことであった。

国内の再生可能エネルギー産業を発展させる必要性がある一方で、現状では国際連系線が不足しており、系統事故により風力発電が一斉に運転を停止して需給バランスが崩れた際に他国から受給できる融通量が限定されているという問題があるため、連系線建設を優遇する法律の成立により国際連系容量の拡大を図るなど規制当局としての後方支援は行っているとのことであった。2020年の風力導入目標の4000万kWを達成するためには、当局としては2016年までに約7,000kmの送電線建設が必要と考えているが、REE社が投資を行い託送費用として回収するため、最終的には消費者の負担となる。消費者に転嫁される料金は、今後、政府が決定していくとのことであった。

6. おわりに

本報告では、再生可能エネルギーの導入拡大が進んでいる欧州における電力系統面から見た課題と系統安定化に向けた取り組みについて調査を行った結果の概要をまとめた。調査時のやり取りと入手資料については、参考のため付録に示す。

今回訪問した国のうちドイツ、スペインでは、風力発電などの再生可能エネルギー開発について、地球環境問題の解決のために政府主導できわめて積極的な計画が実現に移されている。しかし今回の調査の目的である電力系統の安定運用の観点から見ると、新たな技術課題が現れていることも明かとなった。すなわち、元々欧州では、需給運用面から見た風力発電の出力変動については、連系線を介して、風力発電の連系量が少ない他のTSOが調整力を供給するという構図を採っていたが、風力発電の導入量増大に伴い、系統信頼度などに関わる種々の様々な系統運用面の課題とともに、需給運用面で従来とは異なる課題も顕在化している。

一方、太陽光発電については、まだその導入量が風力発電に比べ小さいため、TSOは特段の影響を受けていない様子であった。ただし政策面では、近年、急速に導入が進んでいるスペインやドイツなどの国では、最近FITの価格が見直されたなどの変化もあった。

欧州では風力発電が今後さらに増大することが予想されるが、これに伴い、今回の調査からうかがわれる次の懸念については、今後さらに厳しさを増す可能性がある。今後の動向を見守る必要があろう。

- ・ドイツでは、電力系統の信頼度基準を満たすために、各種の対策を駆使し、運用面で対処している。その根本的な解決のためには、また今後の風力発電のシェアを増すために必要な洋上風力開発のためにも、送電系統の増強が必要であるが、その今後の見通しは不透明である。
- ・今回の調査では、各社の責任範囲がアンバンドリングにより限られているため、「それは当社の責任範囲外である」という趣旨の発言を何回か耳にした。系統影響対策では発電、送電、系統運用などでの対策が適切に協調され実施される必要があるが、上記の送電線増強の困難さと相まって、今後の系統信頼度の推移についても不確実性が高い。
- ・スペインでは、今後の風力発電増大対策として、出力抑制の重要性を指摘していた。このため、新設の風力発電機については、今後、系統サイドの事由により出力抑制の機会が増す可能性がある。これはCO₂の排出低減、一般消費者の費用負担などの面から見て不適切な状況である。

なお特に、今回、訪問した各社の方々には本調査に対し多大なるご協力を頂いた。末筆ながらここに深く感謝の意を示します。