第６２次海外電設視察団報告書

2017年9月１6日（土）～9月２4日（日）

～スペインの再生可能エネルギーの実情について～

目 次

page

はじめに …… 1
Ⅰ．行程・団編成・訪問国の概要 …… 2
Ⅱ．アルメリア太陽熱発電 研究施設の視察 …… 5
Ⅲ．スペイン唯一の送電会社 REE 社の視察 ……15
Ⅳ．バルセロナ都市生態学庁の視察 ……21
まとめ ……25

一般社団法人 日本電設工業協会
Japan Electrical Construction Association

2017年１0月３0日

はじめに

当協会は、2017 年 9 月 16 日（土）から 9 月 24 日（日）までの 9 日間、「スペインの再生可能エネルギーの実情」を調査するため、アルメリアとマドリード、バルセロナに第 62 次海外電設視察団を派遣した。

国際交流の窓口である経営企画委員会・国際交流専門委員会（2016 年 11 月・2017 年 1 月、3 月の 3 回）において視察先の選定が進められ、2017 年 5 月から参加者の募集を開始し 7 月 7 日に募集を締め切った。最終的には、当協会の久米雄二副会長（人材委員会委員長）を団長とする総勢 17 名の視察団となった。

視察先の選定にあたっては、外務省の「海外安全ページ」などを注視し、海外諸国のテロや治安情勢の情報収集に努め、安全な地域を優先して視察先の選定を行った。その中で、日本の面積と比較的近いスペイン（日本の 1.3 倍の面積）が、再生可能エネルギー比率約 40%を占めている点に着目し、その実情を視察することに決定した。

くしくも、出発の 1 ヶ月前にバルセロナ市中心部のランブラス通りとカンブリスにおいて、歩行者に対する車両突入テロ事件が発生してしまった。当協会は、在バルセロナ日本国総領事館や旅行会社などを通じて現地状況の確認に努め、テロ発生の翌週には公共交通機関や観光施設への影響もなく日常の様子を取り戻していることが確認できたため予定通り催行することになった。

さて、国際エネルギー機関（IEA）の「Energy Balances of OECD Countries」によると、我が国の 2015 年の温室効果ガス排出量は世界全体の約 3.8%を占めており、国別では、中国、米国、印、露に次いで世界で 5 番目に多く、その責任は重い。2015 年 11 月に開催された気候変動枠組条約第 21 回締約国会議（COP21）では、2030 年度には 2013 年度比で温室効果ガスを 26%削減する約束草案を提出している（パリ協定）。

2012 年に導入された固定価格買取制度（FIT）等の取組みにより、太陽光発電を中心に再生可能エネルギーの設備容量は急速に伸びている。一方で、2016 年度の賦課金単価は 2.25 円/kWh（2012 年度は 0.22 円/kWh）と高騰し、平均的な家庭の賦課金は 675 円/月（2012 年度は 66 円/月）と国民負担が増大しており、再生可能エネルギーの最大限導入と国民負担の抑制の両立を図ることが課題となっている。

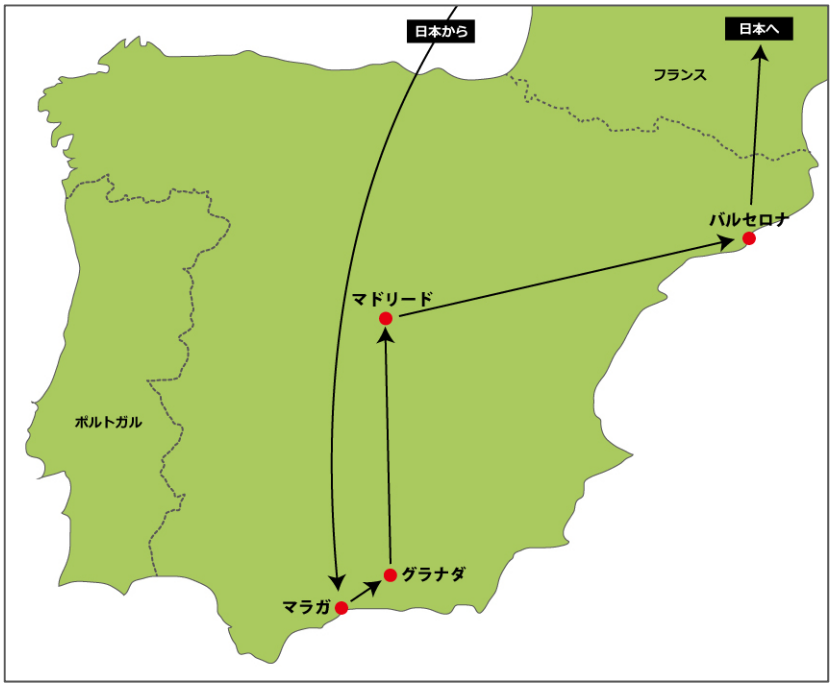
本報告書は、このような我が国の環境問題、エネルギー問題を踏まえ、再生可能エネルギーを世界に先駆けて導入し、高い再生エネルギー比率を維持しているスペインの取組みを視察・ヒアリングし、日本で活かせることはないかを探った詳細の報告である。

Ⅰ．行程・団編成・訪問国の概要

1．行程

月　日	滞在、移動	視察先
9 月 16 日（土）	東京（成田）発 → ブリュッセル空港→ マラガ空港	
9 月 17 日（日）	マラガ → グラナダ	
9 月 18 日（月）	グラナダ滞在	・Plataforma Solar de Almeria の視察
9 月 19 日（火）	グラナダ → マドリード	
9 月 20 日（水）	マドリード滞在	・REE（Red Electrica De Espana）社の CECRE（Control Centre of Renewable Energies）視察
9 月 21 日（木）	マドリード → バルセロナ	
9 月 22 日（金）	バルセロナ滞在	・Agencia de Ecologia Urbana de Barcelona の視察
9 月 23 日（土）	バルセロナ → ブリュッセル→	
9 月 24 日（日）	東京（成田）着	

［ルートマップ］



２．団編成

氏　名	会社名	所属・役職等
団長　久米　雄二	㈱トーエネック	相談役（電設協副会長・人材委員会委員長）

〔取材・報告書作成班〕（☆は班長）

◎第１班（Plataforma Solar de Almeria の視察）

☆　北村　啓明	大栄電気㈱	工事一部統轄工事統轄工事長
嘉悦　　崇	㈱土井製作所	取締役社長
佐藤　陽一	㈱九電工	執行役員営業本部副本部長
松尾　基之	八千代電設工業㈱	東京支店部長
山内　芳弘	㈱白川電機製作所	常務取締役

◎第２班（REE 社・CECRE の視察）

☆　長瀬　光司	因幡電機産業㈱	電設東日本事業部第３営業部２課課長
島　　啓介	ジェフコム㈱	代表取締役社長
白川　尚樹	㈱白川電機製作所	代表取締役社長
牧野　俊亮	㈱関電工	常務執行役員戦略事業本部長
吉村　光司	㈱八洲電業社	代表取締役社長

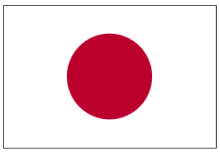
◎第３班（Agencia de Ecologia Urbana de Barcelona の視察）

☆　小倉　健一	八千代電設工業㈱	名古屋支店長
堀木　泰孝	㈱トーエネック	海外事業部総括グループ担当課長
國津　一洋	高柳電設工業㈱	代表取締役社長
福元　直樹	ネグロス電工㈱	営業企画部参与
山口　　裕	㈱電成社	代表取締役社長

◎事務局

髙張　健太郎	(一社)日本電設工業協会	調査･技術課参事

３．訪問国の概要

		スペイン	日　本
			
面　　積		50.6 万 km² （第 52 位）※日本の約 1.3 倍	37.8 万 km² （第 62 位）
人　　口 〔2016 年 10 月〕		約 4,646 万人 （第 29 位）	1 億 2,686 万人 （第 11 位）
	人口密度	91.8 人/km²	340.8 人/km²
首　　都		マドリード	東京都
主 要 言 語		主にスペイン語	日本語
政 体・議 会		議会君主制、二院制	立憲君主制・二院制
主 要 産 業		自動車、食品、化学品、建設業、観光業	製造業、IT 産業、エネルギー産業、自動車、機械、航空宇宙、素形材、鉄鋼などの製造業、IT 産業
宗　　教		カトリック（約 75%）	神道、仏教が主
平均気温（月別）	最高	マドリード　（7 月）　31.2℃	東京　（8 月）　30.8℃
	最低	マドリード　（1 月）　2.6℃	東京　（1 月）　0.9℃
電　　圧 周 波 数		220V 50Hz	100V 50 Hz・60 Hz
通　　貨		ユーロ	円
		（1 ユーロ＝131.9 円）10/30 現在	
GDP ［2016 年］		1 兆 2,326 億米ドル （第 10 位）	4 兆 5,458 億米ドル （第 3 位）
経済成長率（実質）〔2017 年〕		3.1%	1.7%

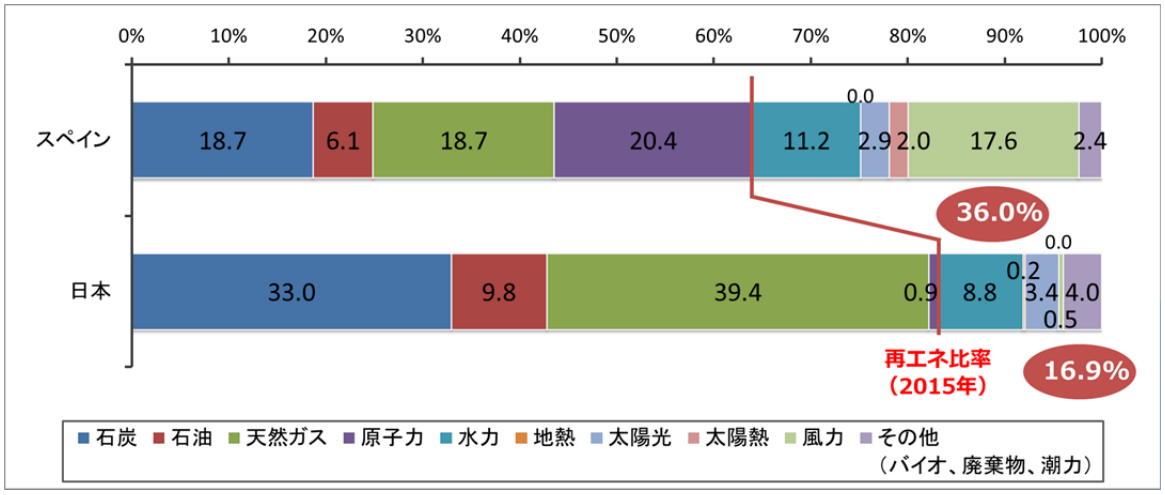
Ⅱ．アルメリア太陽熱発電研究施設（Plataforma Solar de Almeria）の視察

日　時	2017 年 9 月 18 日（月）　10 時 00 分～12 時 00 分
場　所	Ctra. de Senes, km. 4,5, 04200 Tabernas, Almeria
対応者	Ms. Samar Fayad Herreras（Visitors center Manager）

（1）背景と概要

スペインは日本と同様に化石燃料資源が乏しく、石油、天然ガスなどのエネルギーは輸入に依存してきた。そのため、将来の電力需要の増加に対応するため、1950 年代には原子力開発に着手し、1980 年代には 10 基の原子炉が稼働している。しかし、1979 年の米国スリーマイル島事故、さらには 1986 年のウクライナのチェルノブイリ事故を契機に、原子力の新規開発は止まっている。

1992 年には地球温暖化対策やエネルギーセキュリティの観点から、世界に先駆けて再生可能エネルギーの導入計画を策定している。その結果、2015 年の発電電力量に占める再生可能エネルギー電源の構成は 36%と世界有数の再生可能エネルギー大国なっている。その内訳は風力（17.6%）、水力（11.2%）、太陽光（2.9%）、太陽熱（2.0%）、その他（2.4%）である。



【図 1　スペインと日本の発電電力量の内訳比較】

※IEA「Energy Balances of OECD Countries(2015)」による。

（2）アルメリア太陽熱発電研究施設 設立の経緯と目的

安定したエネルギー需給構造を確立することを目的として、経済協力開発機構（OECD）枠内に「国際エネルギー機関（IEA）」が 1974 年 11 月に設立された。IEA では、太陽熱発電（集光を発電に変換する）のプロジェクトを進めるため、EU9 カ国とアメリカ合衆国が参加し活動を開始した。

太陽熱発電研究施設の選定にあたっては、日照時間が長く、降雨量が少ない（年間 4・5 日しか降雨が無い）こと、また、周りが山間部のため湿気が少ないなどの気候条件からスペイン・アルメリアの地が選定されたのである。

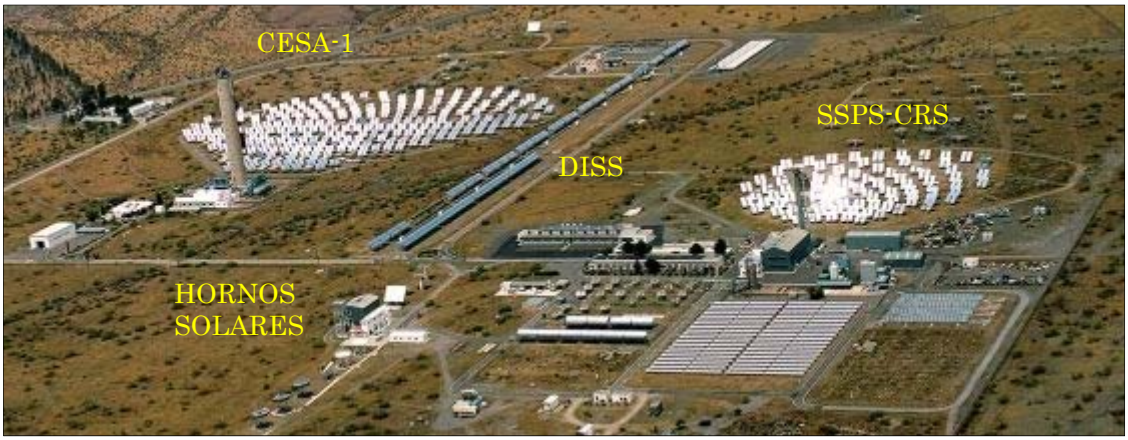
	日照時間	降 雨 量
アルメリア	3,000 時間	200mm
東　京	1,877 時間	1,529mm

【図２　アルメリアと東京の年間日照時間と降雨量の比較】

1979 年に建設を開始したアルメリア太陽熱発電研究施設（以下、PSA）は、集光技術を発電に変える研究を主目的として、コンクリート製のタワー集光（CESA-1・80m）と金属製のメタルタワー集光（SSPS-CRS・43m）の 2 つの集光システムを観測し比較するとともに、トラフ型集光システム等の研究を行っている。

1983 年には、メタルタワー集光システムで世界初となる発電に成功し、初期の目的を達成したことからプロジェクトは終了している。その後、PSA は 2000 年までスペインとドイツの 2 カ国が引継ぎ、2000 年以降はスペイン政府の管理※1 に移行された。

しかしながら現在でも、世界中の太陽光・熱技術の関係者が関与しており、一般の電力業者も新しいシステムを持参し試験・観測している。



【写真１　Plataforma Solar de Almeria 全景】

※１：PSA は、スペイン経済省（MINECO）の傘下にある公的研究機関であるエネルギー環境技術センター（CIEMAT）に属している。

◎施設の概要

・敷地面積：103 ヘクタール（東京ドーム 22 個分の広さ）
・従業員数：約 135 人
・総 工 費：35 年経っており詳細は不明。従来、ヘリオスタッドはスペインとドイツが生産していたが、最近は中国が生産したものを使用しておりコストダウンしているとのこと。

（３）タワー型集光システム（CESA-1）の視察

CESA-1 では、太陽光を集光する一般的なシステムと、空気を利用して水を加熱するシステムの 2 システムを同時に作動させ効率を比較している。

1）集光システム

ヘリオスタッドと呼ばれる鏡面ガラスパネルが 2 つの軸で太陽を追従し、タワー上部に設置されたレセプターと呼ばれる集光器の一点に太陽光を反射させることで集光し、その熱で流体動力源（オイルや水など）を加熱させた後、流体をタワー下部に送り、水を蒸発させて蒸気タービンを回す発電システム。

【写真 2　CESA-1 全景】

【写真 3　ヘリオスタッド】

2）空気を温めて水を加熱するシステム

タワー上部の黒い部分（気泡のあるセラミック）で空気を集め、1,000℃まで温めた後、その熱を利用して水を加熱し蒸気タービンを回す発電システム。

【写真 4　タワー上部の集光器】

【写真 5　黒い部分が空気を集める
セラミック】

視察では比較結果の説明はなかったため、CESA-1 としての機能や特長等を以下に記載する。

①発電能力

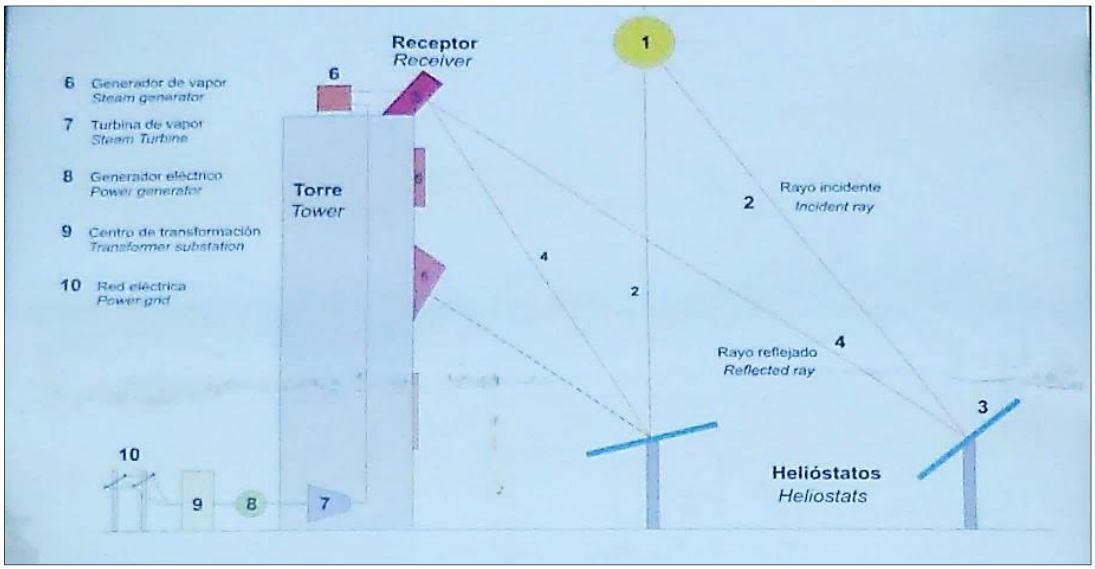
CESA-1 の発電能力は研究施設ということもあり 1MW 程度。スペインにおける太陽熱発電数は 51 箇所で総発電容量は 2,324MW。そのうち集光型太陽熱発電設備は 3 箇所・50MW であり、多くはトラフ型太陽熱発電設備の 46 箇所・2,242MW となっている。

②追尾機能

正確に太陽光を集中させるためには、太陽の動きに合わせて鏡を正確に動かさなければならないが、本システムには太陽の動きを正確に追従するための更正器（写真 4 の白いスクリーン。上部が 4m×4m、下部が 12m×12m のサイズ）を 2 つ備えており、アルゴリズムを

使って 50 年来太陽の動きを毎秒ごとに制御している。

微妙な差で発電効率が変わってしまうため、制御するための場所からタワーまでの距離に注意を払っているようである。



【写真 6　タワー型集光システムの構成】

③蓄熱機能

使われなかったエネルギーは流体として蓄熱が可能であり、タービンを 24 時間稼働できることが集光システムの大きな利点である。蓄電技術が未熟であるとともにコストも掛かるため、こうした蓄熱技術を研究している。

流体は溶融塩を使用しており、300℃に達すると気体になる。500℃まであげることができ、その状態で 7～8 時間保たせている。

当初は流体として熱伝導率が高いソリウムで実験を行っていたが、1985 年に火災が発生するなど危険で運用のリスクが高く、流体の選択がシステム運用上の鍵の一つであったが、現在は流体を空気や水といった環境負荷も無く、同時に水素を生み出す設備にするなど、太陽熱発電以外の効果も見込める試験が進められている。

④ヘリオスタッドの大きさ・素材・メンテナンス等

ヘリオスタッド 1 つの面積は約 40m^2 で 300 体である。鏡面素材は銀製のガラスで、酸化を防ぎ傷が付きにくい加工が施されている。集光効率は 97.7%と非常に高い。

下にはグラスファイバーが置かれており、最近では衝撃を防ぐためスポンジを充てて設置している。

ヘリオスタッドの清掃は、研究施設であることやコスト削減のため実施していないが、試験をする際には清掃をしているそうである。他の生産施設では、自動化された清掃システムがあり、頻度はその施設の条件（雨や砂嵐等）による。清掃には非イオン化された水を使用しており、それなりにコストが掛かっている。

⑤課題

一つ一つのヘリオスタッドの鏡面カーブが異なる（タワーに近いほど鏡面カーブが急であ

る）ため製造コストが高いことが課題である。また、鉛ではなく銀を使っていることもコストを押し上げる要因になっている。

（４）メタル型集光システム（SSPS-CRS）の視察

1983 年に世界で初めて太陽熱による発電に成功した集光システム（SSPS-CRS)。
現在は、ケーブルや配電設備を必要としない小型ソーラーレシーバの試験に専念している。

１）小型ソーラーレシーバ

ヘリオスタッドの太陽光追従には、通常、電源ケーブルや制御ケーブルが使われるが、この施設では、各ヘリオスタッド間に太陽光パネルを設置しソーラー電源を使用している。

情報通信ケーブルは光ファイバーを使用し、さらに発展した取組みとして、無線化で周波数制御を取り入れた研究も行っている。無線化はコスト削減のほか、ネズミなどの小動物対策にもなっている。

新たな取組みとして、風力停止システムを開発し、強風時（70km/毎時）にパネルが飛ばないように個々に制御できるようになっている。

【写真７　SSPS-CRS】

【写真８　小型ソーラーレシーバー
ヘリオスタッド間に太陽光パネルを設置】

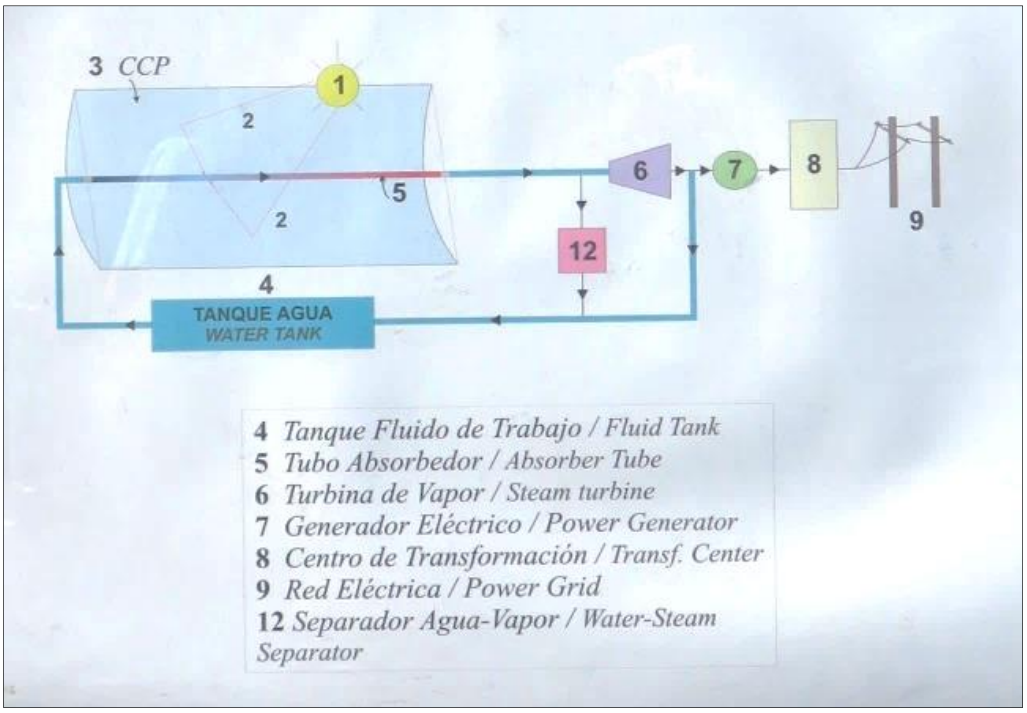
（５）トラフ型集光システムの視察

各曲面鏡で反射された太陽光が、鏡の前を横切るパイプを加熱し、そこで加熱された流体がタービンに送られて水を蒸発させ、タービンを回す発電システム。

太陽熱発電としては世界で最も運用されているシステムであり、上述のとおり、スペインでは 46 箇所で稼働している。

タワー型集光システムと比較すると、タワーの一点に光を集中させる必要が無く、鏡を単純に並べるだけで済み、また、鏡のカーブが一律であることから大量生産が可能でコストも安価である。従って、大規模施設の建設が容易なシステムである。

【写真９　トラフ型集光システム全景】



【写真 10　トラフ型集光システムの構成】

1）発電能力

エネルギー効率はタワー型集光システムより劣るが、設備が日陰を作るので駐車場や植物生育なども可能で、中東の国などで活用の機会がある。また、タワー型集光システム同様に蓄熱が可能である。

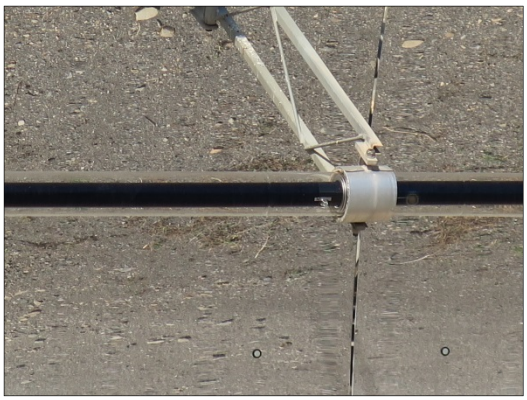
2）パネルの素材・機能

曲面鏡はガラスでできており、太陽を追従し熱でカーブが変わるようになっている。

3）集光パイプの素材・構造・オイル

集光パイプは鋼鉄でできており、太陽光から保護するため黒い特別の塗料が使用されている。その周りは透明のガラスのスリーブで覆われており、真空状態を保ち保護されている。

集光パイプ内の流体にはサーモオイルを使用しており、400℃に達すると、その熱で水を温めて蒸気を発生させ発電している。しかし、サーモオイルは石油を原材料とした鉱物を使用しているため、400℃以上に熱してしまうと劣化してしまうのが課題。従って、効率の良いオイル探しが各プラントのノウハウになっている。



【写真 11　集光パイプ拡大写真】

4）水を利用した実験（DISS：Direct Injection System）

集光パイプ内の流体にオイルではなく水を使用した実験を行っている。水が流体として有効であれば、オイルのように劣化することも環境汚染も無く、500℃まで加熱できるためエネルギー効率が良く、さらにはコストダウンにも繋がる。

しかし、水は 100℃を超えると蒸気になり、圧力が上昇してしまうので、強化パイプでなければ耐えられない。従って、水の温度変化や圧力変化に十分耐えられるパイプの研究を進めている。

5）その他の課題

温めるパイプは横のパイプに繋がっていくのだが、アームの繋ぎ目が劣化してしまい効率が落ちてしまうため、繋ぎ目の素材の研究を行っている。

（6）スターリング（ディッシュ）式集光システムの視察

スターリング（ディッシュ）式集光システムは、DISTAL Ⅰ、DISTAL Ⅱ、EURODISH の 3 種類、計 5 基がある。基本的な機能は変わらないため、まとめて特徴を記載する。

1）特長

六角形の放物曲面状の鏡を用いて、鏡の前に設置されたスターリングエンジン（直径 12cm）に太陽光を集中させ、発電する方式である。

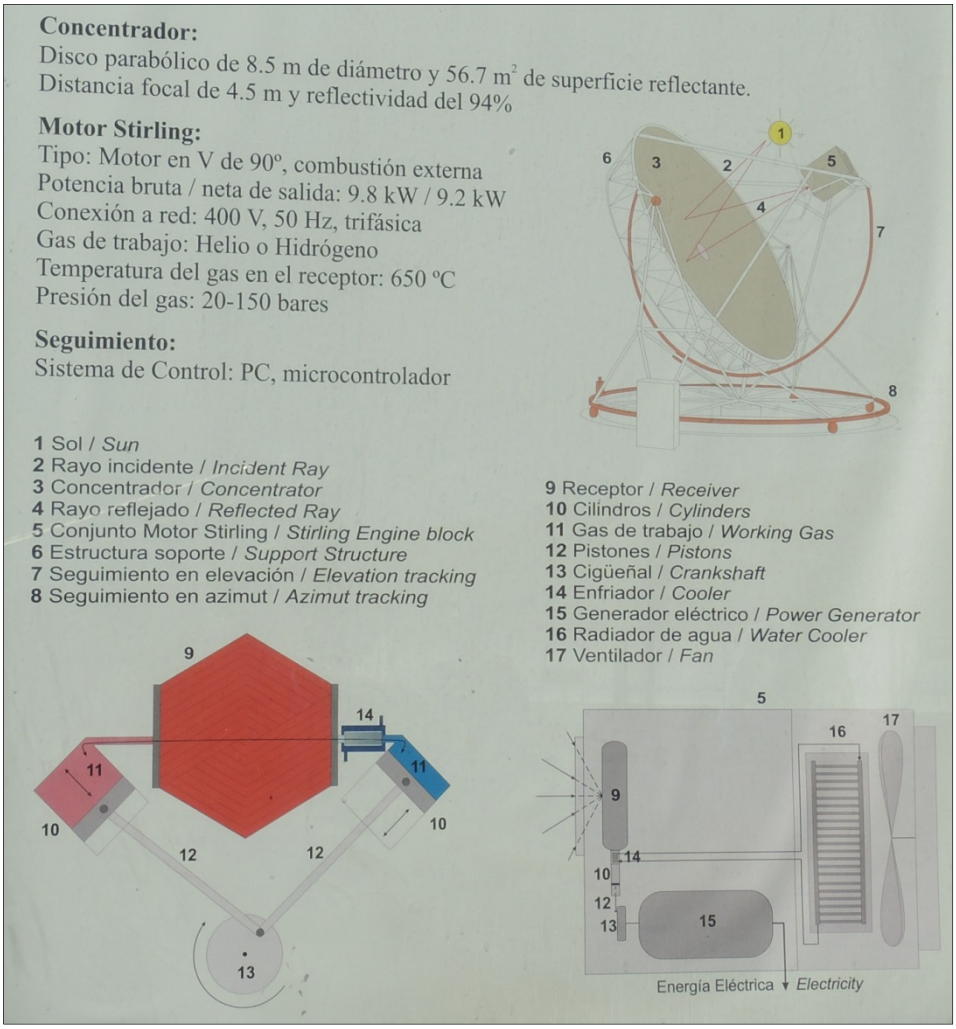
最高 3000℃まで達する本システムは、流体として水素を使用し、太陽熱の温度変化でスターリングモーターを爆発させ、自動車のピストンのように動かし、ダイナモに伝え作動している。1 基で 10kW の能力があるが、蓄電はできない。下には車輪が付いており、動かすことも可能。

2）課題

小スペースに設置でき発電効率が良いが、モーターのメンテナンスが必要であること、水素を取扱う熟練したオペレーターが必要であることが課題である。

【写真 12　EURODISH】

【写真 13　DISTAL】



【写真 14　スターリング式集光システムの構成】

（７）その他研究施設の視察

１）Hornos Solares

PSA では、太陽熱発電技術以外の研究も多様化の観点から行っており、2 つの太陽光ファーネス（炉）設備で、物質の構造などを研究している。

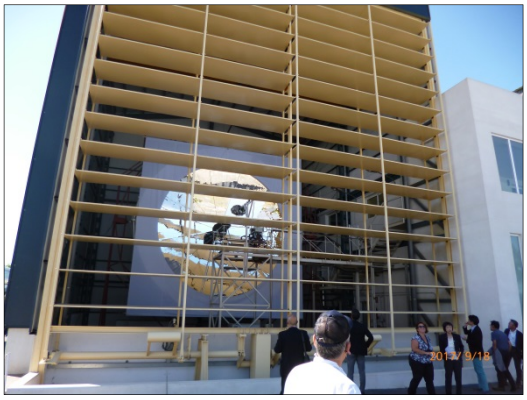
【写真 15　Hornos Solares】

①SF-60

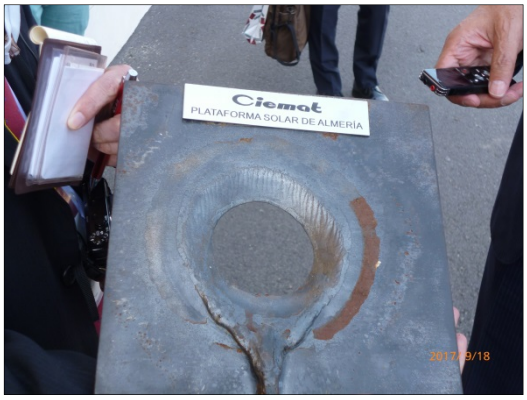
120m²の巨大な平面のヘリオスタッドで太陽光を反射させ、ファーネス（100m²）に当てた熱量を測っている。最高 2,500℃まで達することができ、ファーネスの熱で溶けて貫通した肉厚の鉄板を見せていただいた（写真 17）。

発電に使用される物質以外に、自動車のブレーキに使用されるセラミック材の耐熱実験や欧州宇宙機関（ESA）からの依頼で、ロケットが地球に帰還する際の大気圏との摩擦熱に耐

えられる材質の実験、民間会社からの依頼で、グラスファイバーやセラミック、鋳造物等の実験もおこなっている。



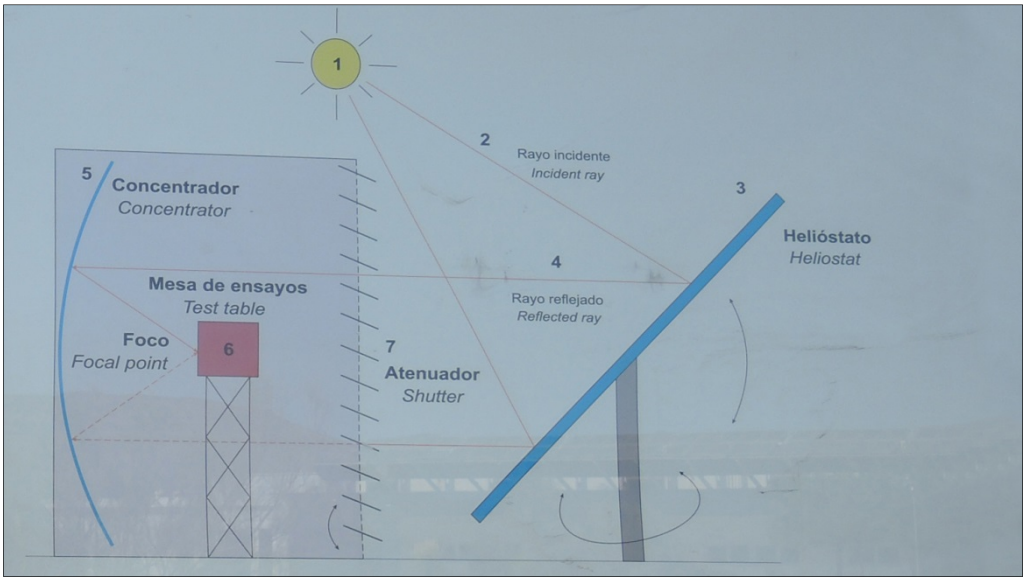
【写真 16　SF-60】



【写真 17　太陽熱で溶けた鉄板】

②SF-40

昨年稼働したファーネス（120m²）で、化学反応に特化して研究をしており、月の石から酸素を取り出す実験をおこなっている。月面の 60%は酸化鉄が含まれたレゴリスという鉱物で覆われており、水素を加えると水ができ、太陽光を与えるとまた水素と酸素に分解される。そこからできた酸素で 6 人の宇宙飛行士が呼吸することができるというプロジェクトのようである。SF-40 は写真撮影不可であった。



【写真 18　Hornos Solares システムの構成】

（８）他企業の試験・観測装置

PSA では、民間企業等から様々な形態の設備が持ち込まれ試験をしている。その中の一つに、スペインとイスラエルの合弁企業が持ってきた家庭用の装置、通称イエローチューリップがある。

発電能力は 100kW しかなく蓄熱もしないが、夜間に天然ガスの燃焼に使われている。

このように太陽熱発電と他の発電テクノロジーを併用した設備の研究もおこなわれている。

【写真 19　イエローチューリップ】

（９）一般的所感

スペイン南部のアンダルシア州は、年間を通して温暖で雨の少ない「地中海性気候」に分類される地域で、夏は 40℃を超える日もあり、ふんだんな太陽が降り注ぐ。

地の利を生かした太陽熱発電は安定した発電量が得られるが、我が国ではこのシステムを設置できる地は残念ながら無いだろう。しかし、環境問題や輸入に頼らざるを得ない化石燃料資源問題などをクリアにしたい我が国にとって、スペインの再生可能エネルギー比率 36%の成果は学ぶべきに値する。

スペイン同様官民一体となり、日本各地の風土を生かした再生可能エネルギーの研究をさらに推し進める必要性を感じた。

(10) 参考資料及びホームページ

・Plataforma Solar de Almeria

http://www.psa.es/es/index.php

・スペインの発電電力量（IEA「Energy Balances of OECD Countries(2015)」）

https://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=SPAIN&product=balances&year=2015

・再生可能エネルギー技術白書第 2 版（第 5 章太陽熱発電・太陽熱利用）

http://www.nedo.go.jp/content/100544820.pdf

【写真 20　PSA で集合写真】

Ⅲ．スペイン唯一の送電会社 REE（Red Electrica de Espana）社の視察

日　時	2017 年 9 月 20 日（水）　11 時 00 分～12 時 15 分
場　所	Paseo del Conde de los Gaitanes,177 28109 Alcobendas Madrid
対応者	Mr. Alberto Gil（Electrical Control Centre Dpt）

（１）概要

「Red Electrica de Espana（以下、REE 社）」は、スペイン最大の電力会社エンデサ（Endesa S.A.）や水力発電会社エンハー（Enher S.A）、イベルドゥエロ電力会社（Iberduero S.A.）などが出資し 1985 年 1 月に設立された。世界初となる独立型送電網所有企業及び送電システム操業企業であり、送電網の操業範囲は、スペイン本土、カナリア諸島、バレアレス諸島、北アフリカ・セウタ、メリリャを含む地域である。

その役割は、スペイン全土の送電網を一元管理するとともに、電気の需要と供給のバランスをとることで、国家の電力供給を保障する責任が与えられている。

【写真 21　REE 社外観】

なお、視察をした中央制御指令室の表示盤は写真撮影が不可であったことから、本報告書に記載の写真はホームページ・パンフレット等から引用している。

※資本は、一般の投資家が 80%、政府所有の SEPI（Sociedad Estatal de Participaciones Industriales）が 20%。従業員数は 1,700 人。

（２）中央制御指令室（コントロールセンター）の視察

中央制御指令室にはスペイン全土の系統別、電源別発電量がリアルタイムでわかる巨大な表示盤があり、電力系統全体の制御をおこなうとともに、その配下にある「CECRE（Control Centre of Renewable Energies [再生可能エネルギーコントロールセンター]）」で、変動する再生可能エネルギーを最大限活用できるよう電力システムと統合し、需要と供給のバランスをとっている。

訪問したコントロールセンターは、主にスペインの北部と北東部を監視・制御しており、それ以外の地域は、20 km 離れた同様のコントロールセンターで監視・制御をしている。

一方が故障した際にはスペイン全体の監視・制御が可能で、バックアップの役割も果たしている。そのため、オペレーター対応チームがオペレーションシフトと呼ばれる 3 交代制（12 名～15 名）で 365 日 24 時間監視している。

【写真 22　中央制御指令室】

1）送電網系統監視表示盤

送電網系統監視表示盤（以下、表示盤）に表示されている線は送電網を表しており、400kV の送電線が赤、220kV の送電線が緑、停止中はグレー、メンテナンス中は白と一目で分かるようになっている。

各発電所・変電所は囲って表示されており、そのうち青で塗られているのが水力発電所、グレーで塗られているのが火力発電所、グレーで塗られ白で囲ったものが原子力発電所となっている。

表示盤の左のモニターは、現在の電力需要（視察当日 31,950MW）、余剰電力、周波数（50Hz）を表示している。右のモニターは、時間ごとの電力需要のグラフを表示しており、現在の電力消費量が黄、REE の予測需要が緑、市場予測が赤となっており、いずれも朝の 9 時と夜の 21 時がピークになっていた。

近隣国であるフランス、ポルトガル、モロッコへの国際連携もこの表示盤で見ることができる。特に、スペイン国内で事故等により電力供給が難しくなった際、一番頼りにしているのはフランスであるため、フランスとの国際連携の状況が表示されている。フランスへの系統は 6 本、うち 4 本が交流で 2 本が直流である。2 本が直流なのはフランスとの国境にピレネー山脈があり、電圧線を地中で這わすのに交流では難しいからである。

（単位：km）

	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
400kV	20,109	20,639	21,094	21,184	21,620
220kV	18,779	19,053	19,192	19,386	19,496
150 - 132 - 110kV	272	272	272	398	523
< 110kV	2,014	2,014	2,014	2,022	2,025
計	41,174	41,978	42,572	42,989	43,664

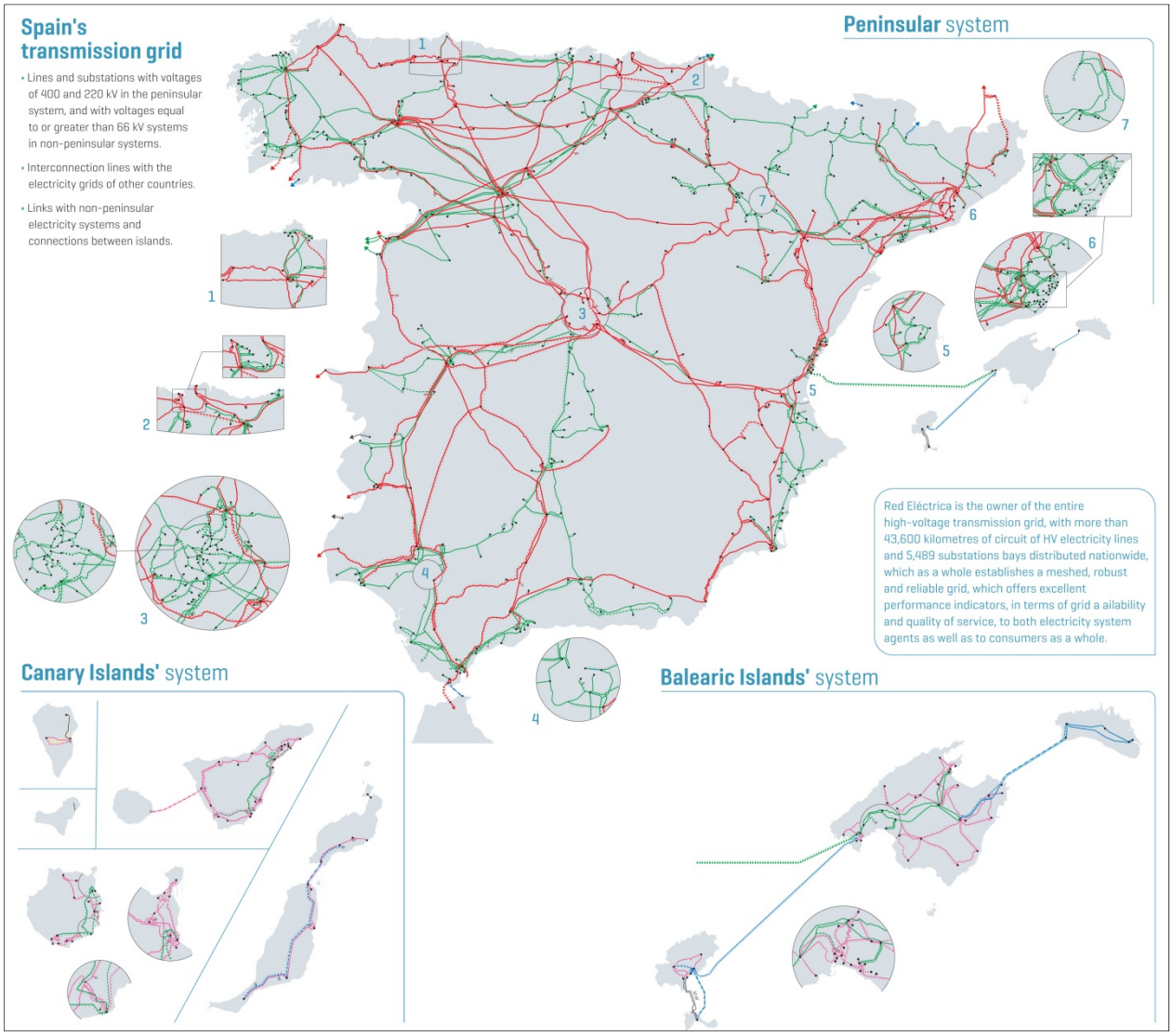
【図 3　REE 社の電圧別送電網距離の推移（2016 年 12 月 31 日現在）】

日本の送電網は約 4 万 km

（単位：変電所数）

	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
400kV	1,319	1,374	1,394	1,441	1,458
220kV	2,936	3,026	3,077	3,124	3,150
150 - 132 - 110kV	52	52	52	84	90
< 110kV	743	745	769	779	791
計	5,050	5,197	5,292	5,428	5,489

【図 4　REE 社の電圧別変電所数の推移（2016 年 12 月 31 日現在）】



【図 5　REE 社が管理するスペインの送電網】

2）CECRE（再生可能エネルギーコントロールセンター）

再生可能エネルギー電源の導入量を増やすためには気候変動などの問題に対応し、コントロールできる設備を作る必要があり、2006 年に CECRE は設置された。

【写真 23　CECRE のモニター】

①再生可能エネルギー発電の管理・制御

風力発電の状況をメインに、太陽光、太陽熱、コジェネ等の状況を表示している。風力発電所はスペイン全国に 850 箇所あり、それを個々に制御するのは大変であるため 33 箇所のコントロールセンターで有効・無効電力、風速などの情報を CECRE に送り、CECRE が管理・制御している。

モニターには、各再生可能エネルギーの発電可能電力と実際の発電電力が表示されており、視察当日の風力発電は、発電可能電力 22,832MW に対して 683MW（3%）を示していた。

②発電予測システム（SIPREOLICO）

REE 社独自の気象予測に基づく発電出力予測システム「SIPREOLICO」は、48 時間先までの予測（15 分更新）と 10 日先までの予測（1 時間更新）が可能で、2001 年に開発された。

送電網系統監視表示盤と同様に、現在の発電量が黄、CECRE の予測が緑、市場予測が赤で表示されていた。5 時間ごとにアップデートされる市場予測に対し、CECRE の予測はスペイン全体を見ており 1 時間ごとにアップデートされるため信頼が高い。

【写真 24　9 月 20 日の発電量と予測発電量】

なお、REE 社のホームページからリアルタイムの電力消費量、予測需要が確認できる。https://demanda.ree.es/movil/peninsula/demanda/total

③再生可能エネルギーの余剰電力の調整

電力系統に再生可能エネルギーの余剰電力がある場合には、発電量を下げるなどの調整が可能である。しかし、再生可能エネルギー発電を優先的に使用することが第一であるため、まずは従来型発電電力で調整を行い、それでも調整ができなかった場合に再生可能エネルギーで調整をおこなう。

④風力発電量の調整

風力発電機が大量に止まると電圧が下がり問題があるので、電圧降下を予測し不足分が表示されるようになっている。風力発電量の調整は、33 箇所のコントロールセンターへ指示し実行される。なお、指示があった時点から 15 分以内に実行しなければならなく、その際は価格の 15%が補償される。

⑤その他

CO2 の排出量をどれだけ下げられたか、需要に対する再生可能エネルギー電力の割合が表示される（計 28%）。

（３）質疑応答

Q1：需要予測と実際の需要の差はどのように埋めるのか？ A1：オペレーターが各発電所との調整を行っている。1 時間先ぐらいであれば概算市場調整を偏差管理でおこなう。また、需要が不足しそうな時には風力発電の需要を考慮したり、風力発電の需要がない時は水力発電で調整をおこなう。
Q2：送電設備や変電設備も保有しているのか？ A2：400kV・220kV の送電線と変電所の全て及び国際連携線の 99%を REE 社が保有している。
Q3:余剰電力の調整を再生可能エネルギーでおこなう場合の優先順位及び補償はあるのか？ A3：特に区別はしていない。補償は発電会社をローテーションして対応している。
Q4：大きな事故があった場合の投入操作はオペレーターがおこなうのか？ A4：そうである。ただし、自動化されており、どこかが落ちた場合、一箇所ではなく数箇所で相殺し、一時調整・二次調整が行われる。
Q5：日本では電圧・周波数の変動率は法律で決まっているがスペインはどうなのか？ A5：REE 社から数値を管轄省庁へ提案・報告し決定される。管轄省庁で認可された数値は守る義務がある。

（４）一般的所感

風力発電や太陽光発電など天候により出力変動する電源が大量に電力系統に連系すると、系統運用上の問題を引き起こす可能性があり、場合によっては大停電を引き起こす。

しかし、欧米諸国ではこのような変動電源の導入が拡大傾向にあり、今回訪問したスペインは、再生可能エネルギー発電電力量が約 40%、そのうち風力発電は約半数を占め、問題も起きていないという。それを可能にしているのが、REE 社・CECRE の気象予測に基づく再生可能エネルギーの管理だ。

日本では 2008 年に気象予測を使った発電予測システムの実証実験が行われているが、その誤差はまだ大きい。現在、産学官が連携し、気候変動電源を電力系統に連系拡大した場合の需給運用の課題や解決策を明らかにするべく、「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」が平成 26 年度から 5 年間の計画で進められているところであり、誤差の少ない発電予測システムの早期運用に期待したい。

（5）参考資料及びホームページ

・REE 社ホームページ
http://www.ree.es/en/about-us/ree-2-minutes

・国際環境グリーンピース
http://www.greenpeace.org/japan/ja/

・エコめがねエネルギーBLOG
https://blog.eco-megane.jp

・(一社)日本風力発電協会報告書
http://jwpa.jp/2011_pdf

・REE 社パンフレット
http://www.ree.es/en/publications/ree-activities/towards-a-sustainable-energy-future

【写真 25　REE 社の Alberto Gil 氏と記念撮影】

Ⅳ．バルセロナ都市生態学庁（Agencia de Ecologia Urbana de Barcelona）の視察

日　時	2017 年 9 月 22 日（金）　10 時 00 分～12 時 00 分
場　所	C. Escar1,3er, 08039 Barcelona
対応者	Mr. Francisco Cardenas Ropero（Head of planning）

（１）背景・概要

バルセロナの人口は 163 万人で東京 23 区の人口（921 万人）の約 18%の規模である。一方、人口密度を比較すると、バルセロナは 15,805 人/km² で東京 23 区の人口密度（14,891 人/km²）よりも高いのである。そのため、交通渋滞や排気ガス・騒音などが社会問題となり、バルセロナ市の都市再生を目指して「バルセロナ都市生態学庁（Agencia de Ecologia Urbana de Barcelona）（以下、同庁）」が設立した。

同庁はバルセロナ県とバルセロナ市、バルセロナ市議会との公共コンソーシアムで構成され、モビリティ、エネルギー、ゴミ、水、都市計画、多文化共生などの分野をそれぞれ体系的に捉えマネジメントすることで、都市の持続可能性を高める施策の研究を行っている。

視察では「バルセロナ都市生態学庁」の概要を説明していただくとともに、取組みの一部である「スーパーブロック」という根本的に道路が再編された現場を視察した。

	人口	人口密度
バルセロナ	163 万人	15,802 人/km²
東京 23 区	921 万人	14,891 人/km²

【図 6　バルセロナと東京 23 区の人口・人口密度比較】

※：東京都の統計、urban audit より。

（２）視察内容

１）「バルセロナ都市生態学庁」の取組みヒアリング

同庁では、バルセロナだけではなく、ヨーロッパ、南アメリカ、カナダの都市マネジメント戦略プランも練っており、他都市へ戦略プランを導入してもらう（売る）ことにより収入を得て、その費用で運営している。

戦略プランは、スマートシティの実現や社会の課題解決を目的として「Digital City」や「City OS」といったコンセプトを打ち出し、多種多様な ICT（情報通信技術）データの活用に取組んでいる。このコンセプトにおいて中心的な役割を果たすのが「Sentilo」というプラットフォームで、街中に設置されたセンサーからデータを収集し、目的別に必要なデータビジュアライズが表示されるのである。このプラットフォームを整備して各企業に新技術の活

【写真 26　フランシスコ・カルデナス氏による説明】

用を促すことで、企業には自社の新技術実証とプロモーションの場として、バルセロナ市には効率的都市運用という、双方のニーズがマッチする形となっている。

実際にデータが活用されている例として、交通問題（渋滞）や環境問題（ゴミ）が挙げられる。街中の至るところにセンサーが設置されており、センサーを通じて得た市内交通状況は、渋滞緩和策に活用されたり、駐車場の混雑状況の提供に用いられている。

また、街中のゴミ箱に設置されているセンサーから得られる重量や熱などの情報により、収集順序や収集物の有無などの判断、さらにはエリアごとの樹木による二酸化炭素吸収量予測など、あらゆる面で活用されている。

これらを活用したバルセロナ市のスマートシティ計画・戦略の説明を受けた後、市内の「スーパーブロック」の現状を担当者の案内の下視察した。

【写真 27、28　スーパーブロックの実際の使用状況の説明】

2）市内の「スーパーブロック」の現場視察

従来の道路網では特別な制限がない限り、乗用車やバス、トラック、自転車、歩行者など全てが通行可能となる。それを 400m×400m 程度に街を区画し、その外周のみ全ての通行を可とし、内側には住民の自家用車や緊急車両以外の自動車を進入させない措置と通行制限を講じ、道路や交差点などを公共の空間として活用できるようにしたのが「スーパーブロック」である。

自動車の乗り入れが制限されることで利用可能空間が増えるとともに、環境問題にも効果を発揮できることになる。すなわち、自動車の利用が減り、徒歩や自転車、公共交通の利用が増え、空間を公園にしたり緑の設置が可能となるのである。

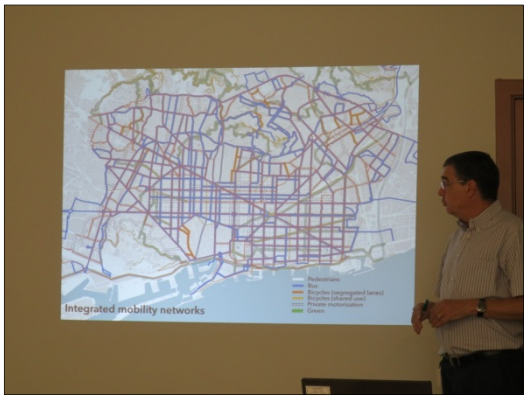
また、バスのネットワークも見直しが行われ、地元の方でも日常利用している路線以外は把握不可能なほど複雑だったものが、水平・垂直方向の単純な路線に再編された。これにより、路線数や走行距離などを増減させなくとも、運行頻度を増やしながら、アイドリングも今までの半分に減らすなど環境への負荷も低減できた。

実際に現地を歩いてみたが、イベントが行われていたり、元の道路部分にベンチが置かれ、寛いでいる人や子供が走り回っていたりと様々に空間の活用がなされていた。それが街の魅力となり、学校が新設されたり子育て世代が好んで転入してきたりもしているとの説明もあった。

【写真 29　実際の市街地の道路
（ベンチ・大型樹木などを設置）】

【写真 30　実際の市街地の道路
（陸上用のトラックを設置）】

【写真 31　実際の市街地の道路
（貸し自転車を設置）】



【写真 32　バス路線再編後の路線図】

（３）質疑応答

Q1）「バルセロナ都市生態学庁」にはどれくらいの職員がいるのか？ A1）25～30 人くらいである。それぞれの分野のエキスパートが在籍している。
Q2）「スーパーブロック」導入で反対意見はなかったのか？ A2）反対意見はあった。粘り強く交渉を重ね、理解してもらうことが大事である。 当初、商店から商売に影響が出ると反対があったが、導入以降、逆に通行人が増えるなど感謝されている。
Q3）「スーパーブロック」導入で経済効果はどれくらいあったか？ A3）一定の成果は上がっていると感じているが、実験中のためまだ不明である。

（４）一般的所感

バルセロナ都市生態学庁を訪問し、まず驚いたのが外観のこじんまり感である。「庁」というからには相当な規模の組織を想像したが、実際には雑居ビルの一部を使用しているような感じで、職員数も驚くほど少なかった。また、その分野のエキスパートが少数精鋭で事案に対処し、予算も自らの「商品」の対価で賄っているのには驚きであった。

スペインは意外にもヨーロッパの国々で一番大気汚染がひどいそうである。その理由の一つとして、他のヨーロッパの都市に比べて雨や風が少ないといった気候が関係しており、こ

の大気汚染の低減に一役買っているのが「バルセロナ都市生態学庁」である。

自動車利用の削減や都市交通の効率化で大気汚染の低減を図り、また、都市運用の効率化を進めるとともに、スマートサービスの提供で省エネや経費の削減も実現している。その取組みも多種多様な ICT（情報通信技術）の活用がなされており、最新事例として世界中のメディアなどに取り上げられるなど、非常に興味深い視察であった。

（５）参考資料及びホームページ

・バルセロナ都市生態学庁ホームページ

http://www.bcnecologia.net/es

・スーパーブロック紹介ページ

https://www.vox.com/2016/8/4/12342806/barcelona-superblocks

まとめ

我が国の再生可能エネルギー発電量（水力除く）のうち最も多いのは太陽光発電である。太陽の国スペインも同様かと思ったが風力発電量が最も多く全電力量の約 2 割を賄っている。小説「ドン・キホーテ」の時代より風と風車に縁が深く、風力発電に適した条件下にあるのだろう。

スペインの太陽光発電は、発電能力が政府の目標を大幅に超過したことから、固定価格引下げや買取対象稼働時間に制限をおこなう等の対策が講じられ縮小していく。一方、世界で最も多く稼働しているスペインの太陽熱発電は、自然条件や地理等をうまく活かした発電方法であり、更なる導入が期待されている。蓄熱が可能で夜間でも発電ができるというメリットはあるものの、山地が多く気候条件が適していない我が国での導入は難しいと感じた。

再生可能エネルギーの課題は、変動電源が増加し、さらには需要地から離れた地点に導入されていくことで、送電網（系統）の増強に伴う追加コストや出力変動に対応するためのコスト増などが挙げられるが、欧州各国では再生可能エネルギーの導入拡大が進んでいる。その理由の一つとして、周辺国との密接な国際連系が挙げられる。しかし、スペインはピレネー山脈で分断され他の欧州諸国から孤立しているため、隣国フランスとの国際連系線接続率は 4.1%と非常に低く、余剰電力の輸出量に限りがある。従って、再生可能エネルギーの出力変動を自国内で調整せざるを得ないのだ。ここで大きな役割を果たすのが今回視察した REE 社の「CECRE」である。電力、電圧、気温、風況などの情報を逐一収集し、集約したデータを基に出力予測をおこない、他の電源と調整し需要と供給のバランスを保っているのである。

全世界的に、平均気温の上昇、暴風、台風等による被害、農作物や生態系への影響等が観測されるなど、地球温暖化は待ったなしだ。「パリ協定」では、産業革命前からの地球平均気温上昇を 2℃以内に抑える世界共通の長期目標が採択され、温室効果ガスを排出しない再生可能エネルギーの導入拡大が進んでいくことであろう。

約 400 年前、島国 日本がヨーロッパの異質な文明に接し、それを我が国の実情に合わせて取込み歴史を切り拓いていったように、気候条件や立地など我が国の実情に合わせて取込み、展開していくことが必要だ。我が国では、2017 年 4 月に改正 FIT 法が施行され、再生可能エネルギーの発電コストの引下げや賦課金制度の見直しなどの議論が進められている。引き続き、政府の積極的な政策に期待するとともに、それぞれの企業のさらなる努力と個々人の意識向上を図ることが、低炭素社会の実現へ向けた第一歩であると感じた。

今回の視察団は年齢、業種、担当業務など幅広い多くの方に参加いただいたが、久米団長を中心として有意義に所期の目標を達成することができた。視察期間中に、バルセロナでカタルーニャの独立運動（遭遇はしていない）があったが、怪我人も病人も出ることなく、予定通りに進めることができ、また、各団員が楽しい雰囲気で視察ができた。それぞれの方が、今後とも色々なところでお会いすると思うが、この思い出とご縁をいつまでも大切にしていただきたいと思う。団員の皆様の益々のご活躍、ご発展をお祈りする。

最後に、今回の視察において我々を受け入れていただいた現地企業の方々や事前準備に御尽力いただいた方々に対して厚く御礼を申し上げたい。

以上

一般社団法人 日本電設工業協会
〒107-8381　東京都港区元赤坂 1-7-8
TEL：03-5413-2161（代表）　FAX：03-5413-2166
URL：http://jeca.or.jp/