

再生可能エネルギー（RE）100%を目指す ドイツ、米カリフォルニア州の比較と未来の電力システム

2019/2

ドイツ三井物産新産業・技術室
吉沢洋一
米国三井物産新産業・技術室
伊達貴彦

Summary

- 欧州経済、米国経済をそれぞれ牽引するドイツとカリフォルニア州は、炭素ゼロ社会実現を目指し、RE100%に向けて本格的に取り組むが、地理的条件や政策は異なり、それぞれ課題を抱える。
- ドイツは9カ国と接し、電力の相互融通が可能であり、さらなるグリッド強化を進める一方、カリフォルニア州は隣接州と連系するグリッドがドイツと比べて脆弱であり、地産地消のモデルがベースとなる。
- RE100%の状況では、「供給>需要」の状態を前提として、供給の変動に合わせてタイムリーに需要を喚起するような電力システムへのパラダイムシフトが起こると考えられ、実質電気代ゼロの環境下、製造、農業、移動等による余剰電力のさまざまな活用策が求められる。

はじめに

GDP世界第4位のドイツと第5位に相当する米カリフォルニア（CA）州は、それぞれ炭素ゼロ社会の実現を目指し、再生可能エネルギー（RE）100%に向けた本格的な取り組みを始めている。ドイツは、2050年までに温室効果ガス排出量を1990年比で80~95%削減する目標を設定し、エネルギー大転換政策を進め、CA州では2045年までにRE100%を目指す画期的な州法（SB100）が2018年9月に法制化された。両者はRE100%を目標にしているが、地理的条件や置かれた状況は異なり、同じように扱うことはできない。例えば、ドイツは9カ国と隣接し電力グリッドも連系しているが、CA州は、西は太平洋、東はシエラネバダ山脈と接しており、他州との電力グリッドの連系はドイツと比べて脆弱だ。本稿では、このような両者のREに関する政策や状況を比較・分析し、RE100%を実現するための解決策とRE100%環境下での将来展望を考察する。

REに関する政策と最新状況の概略

ドイツ

2000年に現行の再生可能エネルギー法が施行されREを推進してきたドイツは、2011年の福島第一原発事故後、2022年までの脱原発と2050年までにRE比率を80%に引き上げるロードマップを柱とするエネルギー大転換政策を導入した。その後もパリ協定を受けて気候変動行動計画2050を承認するなど、政策主導によってREを推進する。原発比率の減少と相まってRE比率は年々上昇し、2018年には発電ベースで40%を超え

た。2020年に35%という当初目標を前倒しで達成したことから、連邦政府は2030年の目標を50%から65%に引き上げることを議論している。日本がエネルギー基本計画において2030年のRE比率を22~24%としていることと比較してもドイツのRE目標がいかに高いかが分かる。2050年にRE100%は実現可能という報告もある。

また、2018年元旦の早朝および5月1日の日中に一時的ではあるが、国内の電力需要がほぼ完全にREによって賄われるという状況が史上初めて生じた。両日とも祝日で電力需要が少なかったという事情はあるが、RE比率が40%でこのような状況が生じたことは、今後のRE比率の増大に伴い、このような状況が増えていくことを予感させる。

CA州

CA州は2006年から販売電力量のRE比率を定め、その達成を電力会社に義務付けている。RE比率は適宜、実現性を見極めながら改定してきたが、2018年9月に州法化されたSB100では、2020年のRE比率を48%に据え置くも、2030年に75%、2045年に100%とした¹。2017年時点で44%であり、2020年の目標達成は現実視されている。SB100を可決できた背景には、同州ではREを半導体と同様に指数関数的に進化する技術と位置付け、10~20年後にはさまざまなイノベーションが起こると想定していることが挙げられる。

同州には約60の電力会社が存在し、州内の電力需給調整はドイツ同様にTSO/ISO（系統運用機関）が行うが、最大都市のロサンゼルスは市営電力局が独自に行っており、州外から直流送電で安価な電力を調達するなど運用形態に統一感がない。しかし、SB100は原則、全ての電力会社に適用される。

CA州の電力供給量は、東京電力のそれより少し大きい規模感で、2017年の実績は292TWhである。2012年の301TWhから減少しており、その理由を「経済の停滞で需要が減っているから」と専門家でも勘違いすることが多いが、実際には経済成長・人口増で電力需要は増えている。この事象はCA州が進めるエネルギー政策と関係している。CA州は、一般家庭の屋根置き太陽光（PV）パネルによる電力の地産地消²を推進しているが、PVはRE電源にもそれ以外の電力供給源にも加算されないため、見かけ上は、電力供給量が減っているのである。CA州は電力会社の化石燃料由来の電力比率の減少とPVの推進で、川上・川下の両方からRE化を推し進めている。

¹ 州法では、大規模水力15%分を含まない比率を明記しているが、本稿では、ドイツとの対比のためそれを含んだ比率を記載している。RE比率75%の達成後にはRE電源以外のCO₂フリーの電源を用いることもできる。

² 一般家庭PVの発電容量は約7GW（2017年末時）に到達。2020年からの新築住宅への太陽光パネルの設置を義務付けることを2018年12月に決定。

ドイツとCA州の対比

ドイツとCA州の電力関係データを下表にまとめた。本稿では着目すべき点を特筆する。最大の相違点は電力グリッド連系である。ドイツは欧州大陸の中心に位置し、電力グリッドはメッシュ型で隣接する9カ国と接続されている。従い、隣国との電力融通が容易で、欧州電力取引所でも15分単位でのフレキシブルな売買が可能であり、市場での取引も活発である。一方、西海岸に位置するCA州は3州およびメキシコ国境と隣接するのみで、州間の送電線インフラが脆弱かつ隣州との電力取引市場の規模が小さい。2017年にはドイツは隣国間で計110TWh（輸出80TWh、輸入30TWh）の輸出入が行われた一方、CA州は主に長期調達契約等の固定的な融通のため、ほぼ輸入のみ（約86TWh）で、隣州・国とのフレキシブルな協調が難しく地産地消による解決が求められる。

表 ドイツと米カリフォルニア州の比較

		ドイツ	カリフォルニア州
基礎データ	人口（万人）	8,270	3,950
	面積（万km ² ）	35.7	42.4
	人口密度（人/km ² ）	232	93
	GDP（兆米ドル）	3.77（欧州1位）	2.7（米国1位）
	一人当たりGDP（米ドル）	45,600	68,000
RE目標	最終消費ベースにおける比率*	2020年：35%	2020年：48%
		2030年：50%	2030年：75%
		2040年：65%	2045年：100%
		2050年：80%	
発電量と内訳	総発電量（TWh）	655	292
	比率 石炭・褐炭	37%	4%
	原子力	12%	9%
	天然ガス	13%	34%
	RE	33%	44%
	太陽光	6%	10%
	風力	16%（洋上風力3%）	9%
	バイオマス	7%	2%
	水力	3%	18%（小型水力3%）
	地熱	0%	4%
その他	5%	9%	
電力の輸出入量	輸出（TWh）	80	0
	輸入（TWh）	30	86
セクター別電力消費比率	産業	49%	25%
	商業	27%	42%
	家庭	24%	33%

注：データは2017年の値。1ユーロ=1.15米ドルで換算。*カリフォルニア州法では大規模水力15%を含まない比率を明記しているが、本稿では、ドイツとの対比のためそれを含んだ比率を記載

出所：OECD、独連邦統計局、独工エネルギー・水道事業連盟、米国国税調査局等のデータを基に筆者作成

また、産業構造の違いに起因する電力需要ピークの違いもある。ドイツの電力需要の内訳は、工業用49%、商業用27%、家庭用24%で、自動車、機械、化学といった重厚長大な製造業で日中に工場が稼働するため、ピークが昼過ぎである。一方、CA州の需要の内訳は工業用25%、商業用42%、家庭用33%で、工業用がドイツに比べ低い。製造業が少なく、ハリウッドに代表されるエンタメ産業やITといったソフト産業が主流であるため、一日の電力需要のピークは昼間ではなく、労働者が帰宅後に家庭で電力を使用し始める夕方に生じる。

ドイツの課題と解決策 –他国と連系するグリッドの強化–

ドイツのグリッドは国際的に見て堅強であるが、主な電力需要地は産業が集積する南部のため、北部に多い風力発電の電力を南部へ送電するグリッド（「南北グリッド」）の増強が必要である。送電能力超過を防止するため、最近、TSOが発電事業者に対して発電量を調整する再給電指令が問題となっている。例えば、風が強い日に、TSOは北部の発電事業者に発電量を減らす指令を出し、南部の発電事業者に発電量を増やす指令を出して、南北グリッドの送電能力を超過しないよう調整する。再給電指令に係るコストが年々上昇しており、連邦ネットワーク庁が警鐘を鳴らしている。2030年までに風力発電を現状の約50GWから約100GWに倍増させると、さらに南北の需給のインバランスが拡大するが、10年単位のグリッド増強計画で対応し、再給電指令問題と合わせて解決する方針である。

EUに目を向けると、欧州経済共同体（EEC）の時代から単一市場の創設を目指してきた長い歴史があり、エネルギー分野でも単一市場の実現が進められている。国家間のグリッド連系はEU以外でも構想されてきたが、利害関係の問題でほとんど進捗していないのが実状で「言うは易く行うは難し」である。単一市場という基本理念を掲げるEUだからこそ、グリッド連系の推進が可能といえるだろう。現在、北海、バルト海では洋上風力発電開発が進められており、電力を周辺国と融通するためのさらなるグリッド連系も必要である。ドイツ・ノルウェー間の海底送電線敷設計画が進行中であり、風力発電の余剰分をドイツからノルウェーに送電し、揚水で電力貯蔵し、ドイツの需要が多い時に揚水発電から逆送することも想定される。ドイツの電力輸出量は増加傾向にあるが、グリッド整備はドイツがRE拡大に伴って電力輸出大国となる布石とも考えられる。

CA州の課題と解決策 –地産地消型モデルの追求–

ドイツと違い系統連系が脆弱であり、日中にピーク需要が生じないCA州では、日照条件が良くてもPVでオフセットができないため、フレキシブル電源やピークシフトのためのエネルギー貯蔵が不可欠である。その代表的技術が電力貯蔵であり、CA州は世界で初めて電力会社に一定の電力貯蔵容量の保有を義務化する州法を施行している。ただし、RE比率が7割を超える2030年代を見据えるとそれだけでは不十分で、電力業界外との連携が求められる。特に電力余剰時の周波数安定化という大きな課題に対し、最も期待されるのはフレキシブルな充放電が簡単にできる電気自動車（EV）の電池である。2017年時点でEV普及台数は37万台と州内の乗用車全体の約1.2%で、年間の消費電力量全体に占めるEVの電力消費量の割合は1%に満たないが、ZEV（ゼロ・エミッション・ビークル）規制³により2030年までに500万台の普及を目標に掲げている。そのときには、EVの電力消費量は全体の5~10%程度と無視できないレベルになり、EVを電力貯蔵として見た場合、揚水発電所数個分の規模に達する。日中の余剰時に充電、不足時に充電停止や逆に電力需要家である建物やグリッドに戻す逆潮流などをすることで周波数のバランスに大きな役割を果たすこと

³ 自動車メーカーに対して販売台数の一定割合をZEVにすることを義務付ける規制。

は間違いない。まずは既存電力設備への影響が軽微なEV充電制御が普及し、逆潮流による建物内消費、そして系統へ戻して全体で使用するソリューションへ進化していこう。

2030年代にはワイヤレス充放電も普及していると予想され、自動運転車との協調もシームレスとなり、AIを駆使して、いつ充電・放電するのかを計画的かつ自動的に実行することができる。例えば、夜間に変動する電力料金の予測を元に、最適な時間帯に自動充電を完了するソリューション（「ダイナミックチャージング」）の技術が実用化される。また、電池の残存容量の変動幅が大きくなるような計画的充電は、充放電の繰り返しによるEV電池の性能劣化という課題の解決に寄与できる。このようなサービスが普及することで、EVの充電が地消に一役買うことが期待される。

また2020年以降の新築住宅には、太陽光パネルの設置が義務付けられるため、住まいという個人レベルでの地産も当然のことながら、食洗器、温水器、空調など家電レベルでも、ネガティブプライス（次項参照）の時間帯に稼働し、電気代の負担がほぼゼロとなることが常態化するかもしれない。このような使用形態は、IoT・AI・コネク社会では難しくないだろう。

共通の課題と解決策 -ネガティブプライスの発生と破棄される電力-

共通の課題として、ネガティブプライスの発生と破棄電力の増加が挙げられる。ネガティブプライスとは、電力取引市場において電力価格がマイナスで取引されることを指す。天候に左右されるREにより電力供給が一時的に過剰になると、REの系統への優先接続という政策のため、石炭火力などの従来型発電設備を有する発電事業者が対応を迫られる。従来型発電事業者は、発電所を停止、再稼働するよりも低コストとなるよう、稼働を継続し電力取引市場にて需要家にお金を支払い、余剰電力を引き取ってもらうこと（ネガティブプライス）を選択する。近年、ネガティブプライスの発生頻度は増加しており、2017年、ドイツでは、欧州電力取引所（EPEX SPOT）の前日市場にて24日間に合計146時間、当日市場にて34日間に合計185時間発生した⁴。CA州でも2017年に前日市場にて114時間発生し、当日市場の15分取引では全取引の約5%相当がネガティブプライスで取引された。RE増大に伴い、今後もしばらくはネガティブプライスが頻発することが予想されるが、RE100%に向け従来型発電が減少していく長期的な過程で、いずれかの段階で、電力取引市場における電力価格設定等のルールの見直しが必要とされるであろう。

グリッドの送電容量が限度を超える際には、RE由来の電力も送電できず、破棄されることとなるが、破棄電力量も増加傾向にある。ドイツでは2017年には5.5TWh（前年比50%増）が破棄され、大半が風力由来の電気である。CA州でも、同年401GWh（同30%増）のREが破棄され、その9割以上はPV由来であり、日中の電力貯蔵が求められる。このような状況下、破棄される電力を有効利用する新たな仕組みが必要となる。例えば、現在はCSR的にREを使用する企業にクレジットが付与され、環境配慮型企業として認められる仕組みが各国で普及しつつあるが、REの利用が当たり前となれば、破棄電力をフレキシブルに有効利用する電

⁴ 2017年に生じたネガティブプライスの平均は、kWh当たり▲2.65セントユーロ。

力安全システム貢献型企業として、新たなクレジット（「新クレジット」）を付与するような仕組みが構築される可能性もある。この仕組みは、電力の安全供給が第一であることから余剰電力を破棄せざるを得ない現在の状況を変え、余剰電力の利用を加速させるであろう。

将来展望の考察

ドイツ、CA州それぞれの課題解決のために、前述のとおり、ドイツでは国内外と連系するグリッドの強化、CA州では地産地消型モデルの追求を中心に進めていこう。そのような状況下、ドイツとCA州は近年、エネルギーや交通分野での脱炭素に向けた会議を定期的に共催し、それぞれの課題・解決策の共有や、ネガティブプライスといった共通課題への対策を検討している。

総じて、現在の電力システムは、需要に合わせて供給が常に一致するように発電側主導で維持されているが、RE100%に近づくにつれて「供給>需要」が生じる時間が増えることが予想され、RE由来の供給変動に合わせて需要をタイムリーに喚起し、一致させるような電力システムへとパラダイムシフトが起きると考えられる。変動性の高いRE電力供給システムでは、供給が需要を下回るのが最も危険なため、従来よりも十分な供給余力（「リザーブ電源」）を確保してスポット市場等で売買できるようにしておく必要があるためだ。しかし、RE比率が高まり、需要量に近づくにつれ、発電事業者の安定的な収益の確保が難しくなり、発電事業者が設備投資を手控えることも予想される。そこでCA州ではRE比率が75%（2030年目標）を超えた場合はRE電源以外のCO₂フリー電源の利用も認めており、例えばCCS（CO₂回収・貯蔵）付き火力発電や小型原発等も技術革新により商用電源として選択肢の一つになることも十分考えられる。その場合、リザーブ電源は使用量（kWh）に応じた従量課金だけでなく、系統安定化の対価として月額固定の基本料金からも投資回収するスキームを導入するなど、課金体系の見直しが行われるだろう。

高RE比率の世界では電力需要家はダイナミックに電力消費量を変動させることが求められ、その調達手段を柔軟にする必要も生じよう。加えて2030年代までに実現するAI・IoT等の新技術や新クレジットを活用することで、いろいろな産業での用途が開発されていくと考えられる。例えば、ホテル等の商業施設において、タイムリーに電気を消費してお湯や冷凍・冷蔵用途などの異なる熱源に置き換えて貯蔵し、必要な時に利用しトータルコストを抑える仕組みが活性化するだろう。また、製造業ではドイツのIndustry4.0のようなスマートファクトリーで、電気料金に応じて、タイムリーに生産量を自動調整するフレキシブル製造といった生産手法が実現していくであろう。さらに、化学品業界では電気反応で水と窒素から直接アンモニアを合成する研究が行われており、このアンモニアを農業分野で肥料として活用することも将来的に考えられる。水と窒素の原価はほぼゼロなので、ネガティブプライスの余剰電力⁵を活用すれば、肥料の製

⁵ 発電コストはゼロまたはネガティブプライスで、この場合の電気料金は送電コストや税金等の諸費用のみとなる。

造原価はほぼゼロとなる。同様のことは、水とCO₂と電気エネルギーで有機物を合成する人工光合成にもいえる。これはCO₂排出権取引市場が活性化すれば、CO₂消費の1つの手段になる可能性もあり、CO₂ニュートラルと見なされるバイオマス発電の電力を利用すれば、究極のゼロエミッションが実現できる。そのほかには、電動化の進む交通分野では、余剰電力でEVを自動充電することが当たり前となるほか、自動車に限らず船舶等でも、移動コスト・ほぼゼロを元にした各種サービス事業も創出されるであろう。

このように、RE100%の世界では、「供給>需要」を前提として、供給変動に合わせてタイムリーに需要を喚起するような電力システムとなると考えられ、実質電気代ゼロの環境下、製造、農業、移動等による余剰電力のさまざまな活用策の発展可能性がある。

主要参考文献

1. Burger, B. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (2019) Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland im Jahr 2018.
2. California Energy Commission Database.
3. California ISO (2018) Annual report on market issues & performance 2017.
4. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (2017) Electricity 2030. Long-term trends-tasks for the coming years.
5. Fraunhofer ISE (2018) Recent facts about photovoltaics in Germany.
6. Governor's Interagency Working Group on Zero-Emission Vehicles (2018). 2018 ZEV action plan priorities update.

当レポートに掲載されているあらゆる内容は無断転載・複製を禁じます。当レポートは信頼できると思われる情報ソースから入手した情報・データに基づき作成していますが、当社はその正確性、完全性、信頼性等を保証するものではありません。当レポートは執筆者の見解に基づき作成されたものであり、当社及び三井物産グループの統一した見解を示すものではありません。また、当レポートのご利用により、直接的あるいは間接的な不利益・損害が発生したとしても、当社及び三井物産グループは一切責任を負いません。レポートに掲載された内容は予告なしに変更することがあります。

