

低炭素社会における電力システム



荻本 和彦



地球環境問題，エネルギー技術戦略，省エネルギー，再生可能エネルギー，不確実性

1. はじめに

1990年代以降，イギリスで始まった電気事業の規制緩和は，安定したエネルギー資源価格や天然ガス複合サイクル発電による経済性の高い供給力などを背景とし世界に広まり，電気事業の設備形成，運用は規制に基づく計画型から市場型の方向へ移行した。

これに対し，ここ数年，石油ピーク論や中国・インドなど新興諸国の経済発展に伴う需要増などにより，エネルギー資源価格が高騰し，量的な制約も懸念されている。

また，地球温暖化問題については，2008年より京都議定書目標達成計画の第一約束期間が始まり，IPCC（気候変動に関する政府間パネル），COP（気候変動枠組条約国会議），G8サミット，APP（クリーン開発と気候に関するアジア太平洋パートナーシップ），EU，各国別等のさまざまな議論が平行して進められている。

このような中，2008年6月，福田前首相は，『低炭素社会・日本』を目指して¹⁾において，2050年までの長期目標として現状から60～80%の削減，2020年までの目標として2005年水準から14%の削減の可能性を述べるなど，低炭素社会への取り組みは現実の課題となりつつある。

本稿では，このような背景のもと，長期的なエネルギービジョンを踏まえ，低炭素社会に向けた電力システムの方向性と課題について述べる。

2. エネルギー技術戦略の視点

本章では，筆者が参加した「エネルギー技術ビジョン⁽¹⁾」などの検討結果を踏まえ，将来の電力システムを考える視点について述べる。

おぎもと・かずひこ（正員） 1979年3月東京大学電子工学科卒業。同年4月電源開発(株)に入社。系統解析，系統計画海外技術協力，技術開発などに従事。2008年1月より，東京大学エネルギー工学連携研究センター所属。

（1）エネルギー技術ビジョンの手法と前提条件

2100年までを検討対象とする「エネルギー技術ビジョン」は，「どのような将来になるか」ではなく「資源制約・環境制約するためにはどうすべきか」を見出すため，将来のあるべき姿を設定する「バックキャストリング」手法により検討が行われた。

検討の前提条件は，資源制約として，石油生産ピークを2050年，天然ガス生産ピークを2100年と想定した。環境制約としては，経済を成長させながら将来のCO₂排出量を現状並みに抑え大気中のCO₂濃度を550ppmで安定化するように，世界共通の目標として，GDPあたりのCO₂排出量（CO₂/GDP）を2050年に1/3，2100年に1/10以下に改善することを目標とした。日本は技術革新によって世界をリードし続けるとの考えから，同等の原単位改善率を目標とした。これは，日本のGDPの伸びを2050年に1.5倍，2100年に約2倍とした想定のもとでは，CO₂排出量のそれぞれ50%削減，80%削減に相当する。

2100年で可能性のあるエネルギー需給構造を包含しそのすべての実現に必要な技術を見出すため，図1に示すケースA～Cの，三つの極端なエネルギー需給構造のシナリオを設定した。図1の三角形の頂点にあたる三つのケースを包含する技術戦略は，それらの組み合わせによるシナリオに対応することができる。

エネルギー技術の摘出は，民生，運輸，産業，および大規模発電や燃料の製造・供給を行う転換分野の4分野に分けて，式（1）に示すように，（1）一次エネルギー需要が増加してもCO₂排出量を増加させない技術（例：再生可能エネルギー導入，電化），（2）最終エネルギー需要が増大しても一次エネルギー需要を増加させない技術群（例：発電効率向上），（3）効用を向上しても最終エネルギー需要を増加させない技術群（例：需要機器の効率向上）により，効用の増大からCO₂の排出量の増加への連鎖を切る/細くするという，エネルギーコストの上昇や環境対策コスト上昇を抑える総合的な観点で行われた。

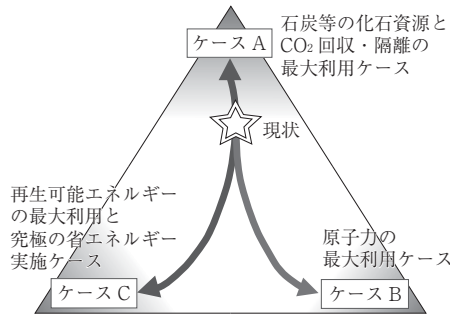


図1 エネルギー技術ビジョンの三つの需給シナリオ

$$\frac{\text{CO}_2}{\text{GDP}} = \frac{\text{CO}_2}{\text{一次エネルギー需要}} \times \frac{\text{一次エネルギー需要}}{\text{最終エネルギー需要}} \times \frac{\text{最終エネルギー需要}}{\text{効用}} \times \frac{\text{効用}}{\text{GDP}} \dots (\text{式 1})$$

(2) エネルギー技術ビジョンの検討結果

エネルギー技術ビジョンの検討結果のうち、電力システムと関係の深い分野の結果は以下のとおりである。

全分野を通じ、個別技術における省エネルギーが重要であり、各種の集中型および分散型の発電技術の効率向上と、民生分野の暖房・給湯および産業分野の熱需要など、灯油、石油などの化石燃料の燃焼から電気を使用したヒートポンプへの転換の効果が大きい。また、住宅などの断熱性能向上など、総合的な視点も重要である。

環境制約と石油、天然ガスの資源制約から、カーボンフリーの原子力発電、および太陽光発電、風力発電などの再生可能エネルギー発電への期待が大きい。化石燃料のうち石炭は、CO₂発生原単位は大きいが生産安定性が高く、高効率化を前提にその活用が重要である。

運輸部門については、プラグインハイブリッド自動車、電気自動車での電化などにより一次エネルギー消費量およびCO₂排出量の大幅削減が期待される。

産業分野では、さまざまな生産形態に合わせた省エネルギー技術の導入に加え、物質とエネルギーの生産/再生を最適に行う技術として、発電、熱供給、生産を最適に組み合わせ合わせたコプロダクションなどが重要である。

発電、製鉄などで化石資源の利用を続けるためには、環境制約などの状況により、CCS(二酸化炭素回収・隔離)の導入が必要である。ただし、CO₂の地中隔離の量的限界と石炭等の化石資源の有限性から、CCSを必要とするケースAは中期的な解決であり、長期的には再生可能エネルギーを最大限活用しつつ、省エネルギーを究極的に行い(ケースC)、原子力を活用する(ケースB)ことが、持続性の観点から望ましい姿と考えられた。

2008年6月の国際エネルギー機関(IEA)のEnergy Technology Perspective⁽²⁾においても低炭素社会に向けた技術の重要性が述べられ、原子力、再生可能、CCS付火

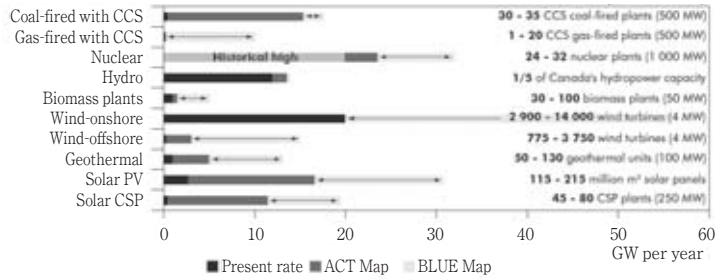


図2 IEA Energy Technology Perspective より、2050年に向けた世界の電力部門の年間追加開発量

力発電などカーボンフリーの電源の2050年までの開発必要量が試算されている(図2)。

以上のエネルギー技術戦略の結果を電力システムの視点から見ると、(1)低炭素の一次エネルギー供給としては原子力、再生可能エネルギーによる発電が期待され、(2)省エネルギーに対してはヒートポンプやプラグインハイブリッド/電気自動車などの電化技術の適用の効果が大きく、(3)再生可能エネルギー発電などにより需要側で分散的なエネルギー供給が可能となるなどの特徴がある。さらに、エネルギー需給における電力などの二次エネルギー利用の増加は、一次エネルギーの代替性を向上させ、エネルギーの供給安定性を向上させる効果を持つ。

なお、ここで述べた「エネルギー技術ビジョン」を含むエネルギー技術戦略には、前提とする環境制約、資源制約、技術開発、社会経済条件の見通しなどに大きな不確実性がある。さらにはライフスタイルや価値観についてより幅広い視点に基づく検討結果もあり⁽³⁾、技術の導入普及の時期や量について大きな不確実性があることは、当然とはいえ、十分留意する必要がある。

3. 電力システムの方向性と課題

2008年5月発表の2030年までの「長期エネルギー需給見通し⁽⁴⁾」では、「エネルギー技術ビジョン」に基づいた2030年までの「技術戦略2007⁽⁵⁾」のエネルギー技術を踏まえ、現状固定、努力継続、最大導入の3ケースでの見通しが示された。このうち、「実用段階にある最先端技術で高コストであるが省エネ性能の格段の向上が見込まれる機器・設備を各種政策を講じ最大限普及させた『最大導入ケース』」では、原子力発電、再生可能エネルギー発電の増加、需要低減により、原子力および再生可能のカーボンフリー電源の一般電気事業者の発電電力量に占める割合は2005年の約40%から2030年で60%超となる。しかし、この場合でもCO₂排出量は1990年比で13%の低減にとどまる。さらに、最大導入ケースの実現にはさまざまな課題があることから、低炭素化社会の実現は長期的かつ挑戦的

な取り組みと言えよう。

このような長期的取り組みの必要性を前提として、以下、電力システムの長期的な方向性と課題について述べる（以下導入量などの数値は「長期需給見通し」の最大導入ケースの2030年の値）。

（1）需要

既存の需要の省エネルギー化が進んでも、一方でヒートポンプ空調・給湯・加熱、プラグインハイブリッド/電気自動車に代表される新たな需要増加が見込まれ⁽⁶⁾、エネルギーの最終消費に電力が占める割合は着実に増加すると考えられる。また、後述のエネルギー貯蔵の機能を持つ新たな需要については使用時間帯を選択できることから、深夜から朝にかけて割安な電気料金制度による深夜帯の需要増など、需要カーブが大きく変化する可能性がある。

さらに、分散電源の導入を背景に、家庭・業務施設などの建物単位のエネルギーマネジメント（HEMS/BEMS）が核となり、分散電源、エネルギー貯蔵機器および需要機器が自律・分散的に制御されるようになると、需要は、電力システムから見てより動的な特性を持つ可能性がある。

（2）供給

火力発電については、天然ガス複合サイクル発電のガスタービンの高温化、石炭ガス化複合発電の導入により一層の高効率化が図られる。原子力発電については現行計画に基づく着実な開発とともに、2030年以降の既設更新に向け、安全性・経済性・信頼性等の向上を目指した次世代軽水炉の技術開発が進められる。この結果、原子力は2005年の4,958万kW（21%）から2030年の6,150万kW（27%）に増加し、原子力発電、系統側の火力発電は、中期的に電力供給の主要な位置を占め続ける（発電電力量のそれぞれ49%、38%）。

太陽光、風力、バイオマスなどの再生可能エネルギー発電は、今後経済性の向上とともに導入普及の拡大が期待される（太陽光発電5,300万kW、風力6,600万kW）。しかし、太陽光発電については、昼間のみの発電のため利用率が低く（10%程度）、発電電力量に対し大きな設備容量が必要で、その大量導入は供給力（系統からは需要の変化とも見える）の特性を大きく変える。さらに、風力発電、太陽光発電とも天候により個別の出力が大きく変動する間欠性の電源であり、従来の需要変動に加えて大きな変動を電力システムの需給調整に与える可能性がある。従来型の再生可能エネルギー発電である一般水力で、河川の流量と貯水池の調整力を分析・予測し、きめ細かい運用が行われているように、太陽光発電、風力発電などの間欠性と電力システムの地域的および系統全体に対する影響を分析し対策を用意する必要がある⁽⁷⁾。

化石燃料分散電源については、従来のエンジン発電機、ガスタービンなどによるコジェネレーションと併せ固体高分子あるいは固体酸化物による燃料電池（PEFC、SOFC）の導入が進むとされている。化石燃料分散電源は熱主体の運用などその運用形態に応じた供給力となる。

（3）エネルギー貯蔵

電力貯蔵技術としては、揚水発電、一部の定置式二次電池などが実用化されているが、これらに加え、電気自動車などの実用化に向けた蓄電池技術の急速な進歩により、分散設置を含め電力システムの需給調整に効果が期待できる規模の二次電池の導入が期待される。

また、貯湯槽付きのヒートポンプ給湯システムや建物の躯体蓄熱を利用した空調システムなどは、直接電気エネルギーを貯蔵しないが、電力を利用する時間をある程度選択できるという意味で、電力貯蔵に準じた効果が期待される。

（4）流通

風力、メガソーラーを含めた系統電源の開発および系統の信頼度維持に対する送電システムの整備などは従来と同様に必要である。これに加え、需要端の分散電源の導入普及が進むと、需要に向け一方向に流れていた配電あるいは低圧送電部分の電力潮流が場合によっては別地点の需要あるいは電力貯蔵装置に向け逆方向に流れる可能性が発生する。流通設備としては、これらの条件下での電圧、停電復旧など一定の品質の維持のための太線化、電圧調整機器などの設備対応を含めた対応が求められ、配電電圧昇圧も一つの選択肢となる。また、後述の電力システムにおける需給調整機能の向上のために、系統間連系線の新たなニーズが発生することも考えられる。

さらに、分散電源および需要機器の直流化に合わせ、需要側の給電部分を直流化が検討されているほか、EUでは、洋上風力からの海底ケーブル送電や地中ケーブル送電に対応して、直流で送電する検討も行われている。

（5）CCS（CO₂回収・貯留）

CCSは発電プラントにCO₂の回収、輸送、貯蔵などの諸設備を付加し、排出されるCO₂を直接処理する技術である。電力システムへの影響としては、排出権取引などの他制度との組み合わせにより石炭火力発電などの化石発電の利用可能性が変わることと、これを導入した場合に、回収などに伴う効率低下、燃料使用量の増加が考えられる。

（6）電力需給

電力システムの設備形成は、従来、需要の伸びに対応した電源・流通設備の拡充で計画されてきた。しかし、低炭素社会に向けた長期の電力システムでは、省エネルギーと電化の進展を含めた需要の変化、再生可能エネルギー発電の導入、集中/分散の発電設備の構成・配置、既設設備の

老朽化などを考慮して、設備計画を策定する必要がある。

運用については、従来、需要予測に基づき需給調整、周波数制御などを火力・水力を主体とする系統側の電源により行ってきた。今後、再生可能エネルギー発電の導入普及に伴う間欠性による出力変動の補償と、原子力、石炭などのベース電源の効率的な運用のため、再生可能エネルギー発電の供給予測を含め、需給の予測と調整をよりきめ細かく行う必要があると考えられる。

さらに、先に述べた集中/分散の電力貯蔵およびそれに準じる技術の普及は、電力システムの需給調整能力を飛躍的に高め、再生可能エネルギーの間欠性、原子力、石炭ガス化発電の定格運転継続など、同時同量制約に起因する課題解決に貢献する可能性は大きい。ただし、需要端に設置され自律・分散的に運用される機器は、系統の需給調整という意味での制御性には一定の限界があり、ITを含めた技術、制度の検討が今後必要と考えられる。

欧米においては小売の規制緩和に伴い導入が進んだ「デジタル式多機能電力量計（スマートメータとも呼ばれる）」を活用し料金制度との組み合わせで需給調整を行う「デマンドレスポンス」、再生可能エネルギー発電を含む分散電源・電力貯蔵技術をIT技術などにより地域ネットワーク的に制御する「スマートグリッド」、また、その応用として自動車などの電力貯蔵機能を電力の需給調整に活用する研究（V2G：Vehicle to Grid）も早くから着手されている。

従来、集中型の系統電源で行われてきた需給調整を、需要側のエネルギーマネジメントによる自律・分散的な制御と協調して行うことも、今後の検討課題と考えられる。

4. 低炭素社会実現のための電力システムに向けて

(1) 不確実性への対応

低炭素社会を支える電力システムの形成には数十年という長い年月が必要であり、電力の利用範囲の拡大に伴い、電力システムが包含する需給構造はより多様性を増す。この形成過程においては、資源制約、環境制約、技術進展などのさまざまな要素が不確実であり、全体の方向性はほぼ一定であるとしても、電力システムが各時点で求められる姿にも大きな不確実性が存在する。

他方、電力システムのエネルギーシステム全体に占める割合の増加に伴い、エネルギーの安定供給や環境・資源制約などの克服への電力システム責務は増大する。

このため、電力システムの長期的な形成においては、個別の確定条件下の最適化ではなく、資源、技術などの代替性を確保し各時点で想定される不確実性の顕在化に柔軟に対応できるロバスト性⁽⁸⁾を備えた最適化と、将来の電力システムのあるべき姿を予見し、技術研究開発、設備形成、

制度整備を戦略的に実施することが必要であろう。

ロバストな電力システムを設計するためには、将来の姿を可能な限り定量的に想定し、境界条件の変化に伴うリスクの分析・評価を行い、かつ各分野で意見を交換することが重要と考えられる。このためには、従来行ってきた長期の設備計画、運用計画の考え方や手法⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾を、先に述べた電力システムの方向性と課題、不確実性に対応できるよう拡張することが必要であろう。

(2) 国際的視点

低炭素社会に向けた電力システム構築は日本だけではなく世界共通の課題である。各国、各地域の資源、気象、社会条件などにより電力システムのあるべき姿は異なるが、日本のニーズに合わせて開発した電力技術、あるいは国内にはないニーズであっても日本発の技術で海外に貢献することは重要な取り組みである。

また、欧米の風力の導入拡大や自由化を契機としたスマートグリッド、スマートメータの取り組みの場合のように、我が国の将来の電力システムに共通する課題について海外での検討が先行する場合もある。電力システムの将来像については、国際学会に加え国際機関などでの情報共有、討議の内容も参考となる⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

5. おわりに

電力システムは人間が作った最大の多様性と規模を持つシステムの一つであり、エネルギーシステムの電力化の趨勢のもと、低炭素社会の実現に向けて、不確実な環境下における技術・研究開発、設備形成、運用と制度整備が必要となる。この取り組みを大きな不確実性のもとで効果的かつ効率的に進めるためには、各時間断面の状況を可能な限り正確に予見することが重要であろう。

(2008年10月14日受付)

文 献

- (1) 経済産業省：「超長期エネルギー技術ビジョン」（2005-10）
<http://www.meti.go.jp/materials/g51013aj..html>
- (2) IEA：“Energy Technology Perspective”（2008-6）
- (3) 国立環境研究所、他：「2050 日本低炭素社会シナリオ：温室効果ガス 70%削減可能性検討」（2008-6）
- (4) 経済産業省：「長期エネルギー需給見通し」（2008-5）
- (5) 経済産業省：「技術戦略マップ 2007」（2007-4）
- (6) 石井勝、他：「特集 省エネルギー技術戦略への電気学会からの提言」、電学誌 **128**, 8（2008-7）
- (7) 資源エネルギー庁低炭素電力供給システムに関する研究会（2005-9）
- (8) 持続型社会研究協議会：「持続型エネルギービジョン」（2005-9）
- (9) 「電力系統の利用を支える解析・運用技術」、電学技報, 第 1100 号（2007-9）
- (10) 荻本和彦：「特集解説 電源計画手法の統合化と高機能化（海外の例を中心として）」電学論 B, **114**, 12, pp ()
- (11) IEA News+Events
- (12) EV: European Technology Platform for the Electricity Network of the Future