

# 東京都の電気エネルギー確保のあり方についての考察 ~ シンガポールとの比較を通じて ~

著者名(日)	藤田 正典, 木下 倫太郎, 町田 巧実, 小袖 義貴, 小笠原 祐樹, 遠山 恭司
雑誌名	東京都立産業技術高等専門学校研究紀要
巻	8
ページ	7-17
発行年	2014-03-01
URL	<a href="http://id.nii.ac.jp/1282/00000156/">http://id.nii.ac.jp/1282/00000156/</a>



# 東京都の電気エネルギー確保のあり方についての考察 ～シンガポールとの比較を通じて～

## Study on How to Secure Electric Energy in Tokyo Metropolitan Area ～From Comparative Standpoint of Singapore～

藤田 正典<sup>1)</sup>, 木下 倫太郎<sup>2)</sup>, 町田 巧実<sup>3)</sup>, 小袖 義貴<sup>4)</sup>, 小笠原 佑樹<sup>5)</sup>, 遠山 恭司<sup>6)</sup>

Masanori Fujita<sup>1)</sup>, Rintaro Kinoshita<sup>2)</sup>, Takumi Machida<sup>3)</sup>,  
Yoshiki Kosode<sup>4)</sup>, Yuki Ogasawara<sup>5)</sup>, Kyoji Toyama<sup>6)</sup>

Abstract : The aim of this paper is to present the way of thinking how to secure sustainable electric energy in Tokyo metropolitan area, the capital of Japan, after the Great East Japan Earthquake and the accidents of Fukushima Daiichi nuclear Power Plant from our comparative study of Singapore by GCP project. As Tokyo has faced with big challenge to introduce the whole renewable energy systems, it is very effective to maintain good situations in not only environment but also in economic competitiveness and supply electric power sustainably in the capital sphere by developing smart grid, electricity market mechanism, and demand response scheme. In result, the crucial point is to control electric energy strategically and comprehensively from technological and social standpoints.

Keywords : GCP, Smart Grid, Demand Response, Singapore, Tokyo

### 1. はじめに

本稿は、公立大学法人首都大学東京に属する大学・高専連携事業基金による国際化推進事業プロジェクトにもとづいて実施した、東京とシンガポールにおける電力供給システムの比較調査報告である。このプロジェクトはグローバル・コミュニケーション・プログラム（GCP）とよばれ、首都大学東京、産業技術大学院大学、産業技術高等専門学校<sup>3)</sup>の3つの教育機関の学生がチームを組み、国際的視野に立って都市問題を考えるべく、海外フィールドワークを通じて成果を報告し、学生の成長を促進することを目的としている。

2012年末に学生の募集を行い、2013年2月より選抜された学生が所属と学年を超えてチームを組み、4つのテーマに分かれて調査活動を開始した。テーマはそれぞれ、「空港機能の高度化」、「上下水道」、「電気エネルギーの確保に対する考え方」、「都市交通網の整備と災害時の対策」とされた。各チーム共に放課後や週末を利用して自主学習を継続して行い、2013年9月に10日間のシンガポール・フィールドワークに臨み、11月に企画主催側である首都大学東京・高専・産技大関係者に報告会を行った。

「電気エネルギーの確保に対する考え方」チームは、産

業技術大学院修士2年の藤田をリーダーに、高専4年の木下・町田、同3年の小袖・小笠原の5名で構成され、指導は遠山が担当した。

なお、GCPプロジェクトの到達点である首都大学東京・高専・産技大関係者への報告内容に含まれる本チームの提案については、未来型提案を旨としているため、概要を述べるにとどめている。

### 2. 分析視角

いうまでもなく、東京のエネルギー問題を考えるにあたり、2011年3月11日の東日本大震災を意識して臨むことは避けて通ることはできない。それにともない、日本政府による電力システム改革に関する閣議決定、電事法の改正・審議、福島第一原子力発電所事故にもとづく原子力政策なども無視することのできない重要な問題である。しかし、本調査研究活動では、それらの政府関係資料や法律、報道・学術資料は読み込むことにとどめ、東京の電力供給システムの考察について、技術的観点と社会的観点を切り口に海外事例との比較考察を行うことを主眼とした。GCPプロジェクト自体がシンガポールに

1) 産業技術大学院大学 産業技術研究科 情報アーキテクチャ専攻在学,  
2) 東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科 電気電子工学コース在学, 3) 同 航空宇宙工学コース在学,  
4) 同 電気電子工学コース在学, 5) 同 医療福祉工学コース在学,  
6) 東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科 一般科目

おけるフィールドワークを基本設計としていたので、シンガポールの電力供給システムの現状と制度設計、諸特徴を東京のそれと比較し、必要に応じて欧米の電力事情も追加的に参照した。

また、発電や送電にともなう従来型の技術体系と再生可能エネルギーやスマートグリッドなどの新しい技術体系からの観点にもとづいて、比較検討に臨んだ。

### (1) 技術的・社会的観点にもとづくエネルギーシステム

本稿で電気エネルギーの確保について論じるにあたり、技術的観点と社会的観点のふたつの観点で調査・考察を行った。電気エネルギーはひとつのシステム（体系）をなしており、これを技術的観点から見た場合、一般に、エネルギー資源（一次エネルギー）⇒ 発電（二次エネルギー）⇒ 送配電 ⇒ 消費 の4つの要素から構成されると考えられる（図1）。一方で、電気エネルギーシステムを社会的観点から見た場合、事業者や市場・価格といった構成要素が考えられる。

#### ■ 技術的観点からの電気エネルギーシステム



#### ■ 社会的観点からの電気エネルギーシステム



図1 電気エネルギーシステム

また、上記の2つの観点に加え、電気エネルギーシステムの構成要素を、新旧のふたつの観点でも考察を行った（図2）。技術的観点で、従来の構成要素（例えば、火力発電、階層的送配電網）はイノベーションによって新しい構成要素（太陽光発電、分散型送配電網等）に変化し始めており、また、社会的観点からみれば、従来の構成要素（例えば、独占的事業者、総括原価方式）は、制度改革によって新しい構成要素（多数の競争的事業者、電力市場）へと変化している。

### (2) シンガポールの概要

シンガポールを比較対象として積極的に取りあげる点には、疑問を呈する向きもあろう。シンガポールは面積が東京23区と同程度で、人口は約500万人の小さな都市国家である。

先進各国の電力供給システムは多様性に富んでおり、発電に要する資源を域内調達がある程度可能で、州ごとに制度の異なるアメリカや多国間電力取引が定常の欧州各国との比較は容易ではない。

#### ■ 技術的観点からの電気エネルギーシステム



#### ■ 社会的観点からの電気エネルギーシステム



図2 電気エネルギーシステムの変化

東京とシンガポールは、資源の調達を外部（輸入）に完全に依存し、巨大都市の中核管理機能および居住・生活エリアを安定した電力供給システムによって維持・管理しなければならない存立条件という点で、比較するには適しているといえるだろう。さらに、シンガポールは1990年代から電力供給システム改革、すなわち電力自由化を推し進めており、日本政府の電力システム改革を考える際に大いに示唆に富んでいるともいえる。

### (3) 東京都の電気エネルギーの課題

東日本大震災では、大規模停電、原発問題、電気料金の値上げといった問題が発生した（図3）。

一般に、エネルギーの基本的な政策課題は、「エネルギー安定供給」「環境保全」「経済的競争力確保」のバランスを維持することであると考えられるが、上記の問題は、まさにこれらの政策課題に対応するものであった。

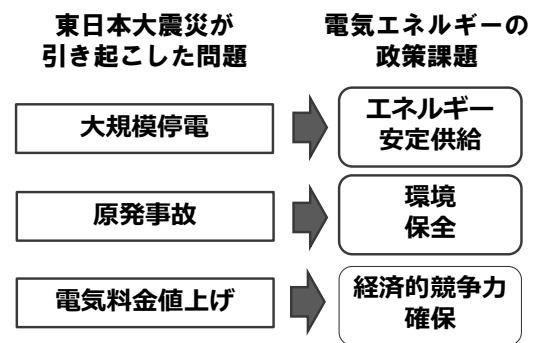


図3 電気エネルギーの課題

東京都の抱える電気エネルギーの課題は、「エネルギー安定供給」「環境保全」「経済的競争力確保」に沿って以下のようなものがあげられる。

#### <エネルギー安定供給>

##### 課題①：資源の安定確保

東京都に供給される発電に使用される資源（一次エネルギー）のほとんどは海外からの輸入で賄われており、もし（国際紛争等で）資源の輸入が停止した場合、電力の長期安定供給は困難である。東京都を含め、化石資源の乏しい日本は、電力の長期安定供給を行うために、資源の安定確保を図る必要がある。

##### 課題②：域内電力の安定確保

資源（一次エネルギー）の確保ができた場合でも、東京都では、先の東日本大震災において停電や夏季の節電を余儀なくされ、電力（二次エネルギー）供給が不安定となった。その理由のひとつに、東京都の電力供給は、北関東や北陸等の他地域の発電に依存していることがあげられる。東京都は、電力の安定供給を行うために、域内での電力の安定確保を図る必要がある。

#### <環境保全>

##### 課題③：地球温暖化対応

東京湾においては、多くの火力発電所が稼働している。化石燃料を使用する火力発電所は、CO2排出等の地球温暖化問題を抱えており、この問題への対応が必要である。

##### 課題④：原子力発電対応

東京都が依存する北関東や北陸等、他地域の発電の多くが原子力発電である。原子力発電は、資源対策やCO2排出削減への対策の一つとして検討され、これまで日本政府の国策として推進されてきたが、3.11以降、原子力発電の安全性に疑問が投げかけられており、この問題への対応が必要である。

#### <経済的競争力確保>

##### 課題⑤：競争力のある電力料金

東京都（日本）の電力料金は、隣国の韓国をはじめとする他国と比較して高い。電気料金は、一般家庭の消費者に影響するだけでなく、産業の国際競争力にも大きく影響するため、経済的競争力の確保が必要である。

上記のような課題を解決し、「環境」と「経済的競争力」を維持しつつ、電気エネルギーを「安定的に確保・供給」するにはどうすればよいか、これが本稿における考察テーマである。

#### （４）フィールドワーク（東京・シンガポール）

東京とシンガポールの比較に入る前に、文献やホームページなどの既存情報では得られにくい情報を収集する

ために行ったフィールドワーク活動の全容を紹介する（表1）。

日本および東京・シンガポールの電力制度・政策については経済産業省・資源エネルギー庁、東京都環境局、Energy Market Authority (EMA)、スマートグリッド関連については東京電力(株)、日本IBM(株)、大崎電気工業(株)、デジタルグリッドソリューションズ(株)（東京大学阿部研究室）、電力事情については日本原子力発電(株)・原電情報システム(株)、シンガポール国立大学 Energy Studies Institute、ナンヤン工科大学 Energy Research Institute、世界の資源ビジネス関係ではMitsubishi RtMにて、それぞれインタビューを実施した。

表1 フィールドワーク先一覧（2013年6月～9月）

東京	シンガポール
経済産業省 資源エネルギー庁	Energy Market Authority (EMA)
東京都環境局	シンガポール国立大学 Energy Studies Institute
東京電力(株)本店 技術統括部 スマートグリッド戦略グループ	ナンヤン工科大学 Energy Research Institute
日本IBM(株)	Mitsubishi RtM Co. Ltd.
大崎電気工業(株)	
デジタルグリッドソリューションズ(株) (東京大学阿部研究室)	
日本原子力発電(株) 原電情報システム(株)	

注：フィールドワーク先の確保と実現は、研修支援のハバタク(株)の協力によるところが大きい。

以下の記述において、とくに出典明記のない場合は、これらのインタビュー成果にもとづくものである。ただし、解釈と記述については筆者らの理解にもとづくものであり、その文責は筆者に帰属する。

### 3. 比較

#### （１）電力供給（資源および発電）

都市と産業の構造が異なるため、単純な比較はできないが、直近データによる東京とシンガポールの発電容量と電力消費量をみてみよう。シンガポール（2011年）では発電量が460億kWh、販売電力量は418億kWhで（EMA: 2013a）、東京電力（2012年）の発電電力量は2,897億kWh、販売電力量が2,690億kWhである（東京電力: 2013a）。

その発電に要する資源の構成を比較したのが、図4である。2000年代に入って以降、シンガポールは発電用資源を戦略的に石油から天然ガスへシフトを強め、2007年以降は全体のほぼ8割を天然ガスによる火力発電に依存している。シンガポールにおける天然ガスの調達、近隣のマレーシ

アおよびインドネシアからのパイプラインによって直接供給されている。高騰する石油への依存度を下げ、かつ、新しいコンバインドサイクルによるガスタービン発電（CCGT）を積極的に導入し、効率的な発電体制を政策的に推進してきた結果である。同国では今後、天然ガス発電の比率を9割近くまで引き上げることが想定されている（EMA: 2013a）。

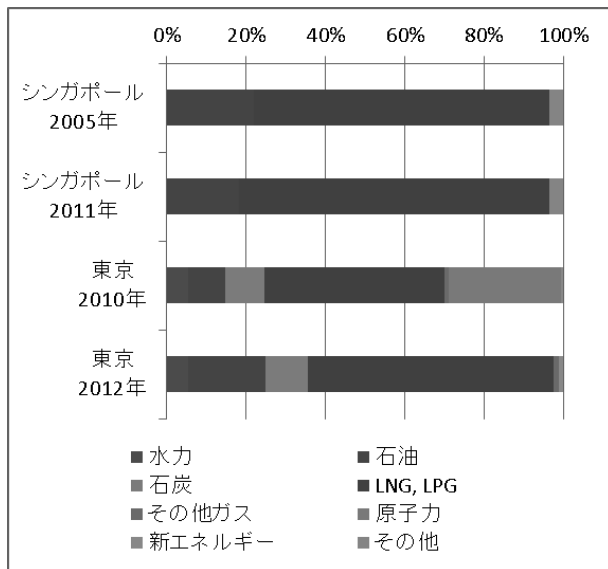


図4 東京とシンガポールの発電資源別構成

資料：東京電力（2013b），EMA(2013b)

一方、東京電力管轄内の発電資源別構成は、3.11後の福島第一原発事故が影響し、2010年から2012年の間に劇的に変化している。まず原子力発電が28.2%からゼロになり、天然ガス（LNG, LPG）の比率が45.4%から62.1%へ、石油が9.2%から19.3%へ、いずれも火力発電への依存度が急上昇した。他方、石炭（約10%）と水力（約6%）、新エネルギー（1%）では大きな変化がみられない。このように、東京の電源別の発電にはシンガポールに比べて多様であるが、原子力発電が使えない現在、やむを得ず天然ガスと石油への依存を高めている。積極的な戦略をもった天然ガスへの切り替えではない。えに、東電のLNG・石油等の火力発電設備は投資抑制によって旧型設備が多い。よって、低熱効率のものをフル稼働させて、原子力の代替を行っているのが現状である。そのため、東電および東京都では、旧型火力発電所のリプレースを積極的に行っていく事業計画を公表している。

発電主体においても大きな違いがみられる。シンガポールの発電会社は主要3社であるPower Seraya, Tuas Power, Senoko Energyがそれぞれほぼ25%ずつの電力を発電、販売する鼎立状態で競争している（EMA: 2013a）。これは政府系企業が民営化されると同時に、新規参入を促し、さらには、外国資本による出資も認可するなど、大幅な自由化

が推進された結果である。例えば、主要3社のひとつSenoko Energyは、もともと政府系ファンドのテマセックホールディングスが所有株式を売却する際、丸紅、関西電力、九州電力、国際協力銀行、仏GDFスエズによる国際コンソーシアムによって2008年に落札されて今日にいたっている。現在では、ライセンスを受けて発電事業を行っている民間事業者数は13を数える。

世界最大級のメガロポリスを擁する東京電力管轄下の発電事業は、シンガポールほど劇的な自由化路線は実現するにいたらない。東京電力は自社で8割を発電しているが、約2割を外部から調達している。2割のうち24%が「地帯間購入」といわれる他の電力会社からの購入で、残りの76%は公営電気事業者や民間事業者（IPP）からの購入によっている。とくに、3.11以後は東電の経営不安定化にともなって、他社購入への依存度が上がったという要因と、IPP事業者らが発電ビジネスを強化・参入している事情にもとづいている。日本における部分的自由化の進展や、競争の結果によってそうになっているわけではないことが重要である。

ところで、東京とシンガポールの双方に共通しているのは、ドイツや北欧諸国で一定のシェアを確立した太陽光や風力を利用した再生可能エネルギーによる発電比率がきわめて低い点である。現状ではシンガポールでも、今までのところ積極的な導入は進んでいない。また、東京電力管轄内においても、土地利用の制約や既存送配電網の利用勝手の悪さが原因で、震災が起こるまで官民共に再生可能エネルギーの導入を積極的に行う動機が弱かった。

もちろん、高騰する天然資源価格や環境保全の観点、さらに東京においては原子力発電の代替手段として再生可能エネルギーの利用と普及は必要かつ有効な手段といえる。とはいえ、自然条件に大きく左右されるために発電量が不安定であること、その変動量の大きい状態で既存の系統電力網へ送電することで周波数調整に悪影響をおよぼすなど、大規模な導入と実現は単純ではない。

こうした点を踏まえると、分散発電と電力の地産地消を一定程度、東京エリアで実現することは、首都東京の電力の安定供給体制を補完する可能性はあるといえる。現実的には、旧式で効率の劣る火力発電設備を高効率で環境配慮型の新型設備にリプレースを進めて系統電力網で安定的な電力供給を図り、小さな地理的スケールで電力の自給自足を再生可能エネルギーで補完しう方向性が導出される。

## （2）電力消費と供給信頼度

次に、電力エネルギーシステムのもっとも下流に位置づけられる電力消費について比較してみよう。

電力の需要部門を単純に家庭用と産業用に分けると、シンガポールはそれぞれ15.7%、84.3%、東京は35.7%、64.3%という構成になっている（2011年）。ここでいう東

京は、東京電力管轄区内全体をいうため近隣 8 県を含んだデータに注意を要する。また、産業用とは製造業ばかりをいうのではなく、公的セクター・商業・運輸・サービスなどが包摂されている。

電力供給計画では、需要・消費のピークに合わせて投資と発電が行われる。シンガポールは空港・港湾・建設現場など、あらゆるところで 24 時間営業・操業が行われ、かつ、学校・公共施設や商業施設で強烈的な冷房に大量の電気が消費されている。他方、シンガポールの消費者はすでに成熟しているため家庭内での節電意識は高く、より教育費用に資金を充てるために冷房利用を控える声も聞かれる。こうしたことが要因で、東京に比べて家庭部門の電力利用比率が低く、反対に産業部門比率が高いといえる。

それ以上に、シンガポールと東京の電力消費における違いは、季節要因による電力消費ピークの変動の有無にある。周知のように、日本には四季があり、赤道直下のシンガポールは一年中真夏である。つまり、日本では一般的に夏と冬の電力消費が急激に上昇し、春と秋には需要量が減退する。これを月別の電力負荷曲線（ロードカーブ）で両者を比較して図示したのが図 5 である。

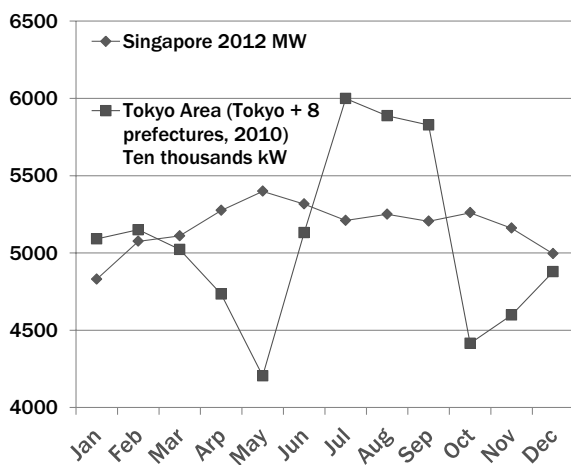


図 5 電力負荷曲線（東京とシンガポール）

資料：東京電力（2013a），NEMS(2013)

一見して明瞭であるが、シンガポールの年間を通じた電力負荷曲線が平坦なのに比べて、東京電力のそれは季節変動による振幅が大きい。東京では春と秋になると電力需要が急落し、5月と10月を底に、6月から9月にかけての夏季に急上昇している。もちろん、これが程度の差はあるにせよ毎年繰り返される。つまり、東京の電力の安定供給においては、この夏季需要に対して十分な発電容量と送配電を担保しうる設備投資が電力供給事業者には課されることになる。この投資負担と回収を計画的に実現し、さらに、需要減退期にあたる春と秋の適正な発電量に対応しうる設備能力と経営体力の両立を図ることが求められる。

このような季節変動に対応するためには、長期の計画にもとづいた投資と回収、経営バランスの維持を可能とする「地域独占」体制は有効であった。首都圏の生産とサービスを担う産業部門に対して高品質で安定した電力を生産・供給するとともに、4,000万人を超える家庭部門へ電気を供給するには、安易な重複投資や新規参入は現実的ではなかった。

発電方式も特定の設備・技術を用いればよいというわけにはいかない事情もある。昼間電力需要対応力にすぐれる水力発電（揚水式）を活用し、常時安定的な需要に対しては稼働を維持すれば維持するほど高効率で発電できる原子力や火力でベース供給力を日中・季節ごとに対応する必要がある。東京電力をはじめとする日本の電力会社は、安定した資源調達、電源の多様化、柔軟で高い発電効率、環境保全対策を最適に管理し、かつ季節変動による大きな需要変化に柔軟かつ適正な料金設定で経営を成り立たせてきたといえる。

繰り返しになるが、3.11以後の東電は、ベース供給力を原子力発電に頼ることができなくなった。そのため、ベース供給力とミドル供給力を天然ガスと石油、石炭による火力発電で、それも旧式に属する設備まで活用して現状に対応しているのである。

ところで、シンガポールは先述のように、1年を通じてロードカーブが平坦で、季節要因による需要変動が小さいため、電源の多様化を図る必要性が小さい。つまり、設備や技術、投資と回収について東京のように複雑な経営環境におかれていない。また、地理的、地形的な点で水力発電は同国には不向きである。したがって、シンガポールが天然ガスを近隣諸国から比較的安価で安定期に調達できる環境を利用し、コンバインドサイクル方式の高効率ガスタービン発電に傾注するのは、戦略的にきわめて合理的であるといえよう。狭い国土にすべての機能が集中するシンガポールでは、国民意識の観点から原子力発電という選択肢は忌避されてきた経緯もある。

ともあれ、電力消費事情に以上のような違いはあるにせよ、東京とシンガポールの電力供給信頼度は世界最高水準にある。よく利用される指標に、SAIDI（需要家一軒あたりの年間停電時間）とSAIFI（需要家一軒あたりの年間停電回数）がある。東京のSAIDIは通常では10分以下の水準であるが、2011年は東日本大震災の影響で152分と異常値を検出している（表2）。シンガポールは驚くべきことに、5年間の平均値がわずかに0.48分にすぎない。もっとも短い2011年の年間停電時間は、たったの13秒程度という。

SAIFIについても、東京とシンガポールは1回にも満たない。2012年でみても、東京が0.07回、シンガポールが0.009回という低さである。自然災害にさらされることのほとんどないシンガポールの信頼度に軍配が上がるにせ

よ、両国ともに世界最高水準を実現している。参考までに、IEEEの公表しているアメリカの2011年のSAIDIが143分、SAIFIが1.29回であり、それらを裏付けている。

表2 需要家一軒あたりの年間停電時間（分）SAIDI

	2008	2009	2010	2011	2012
東京	3	4	152	9	5
シンガポール	0.53	0.45	0.76	0.23	0.44

注：SAIDI: System Average Interruption Duration Index

資料：東京電力（2013a），EMA（2013c）

表3 需要家一軒あたりの年間停電回数 SAIFI

	2008	2009	2010	2011	2012
東京	0.12	0.05	0.33	0.1	0.07
シンガポール	0.012	0.011	0.042	0.008	0.009

注：SAIFI: System Average Interruption Frequency Index

資料：東京電力（2013a），EMA（2013c）

以上のように、東京とシンガポールは電力消費事情が大きく異なることが発電方式や電力業界規制に関係し、一方でそうした違いにもかかわらず世界で最高水準の電力供給信頼度を実現している点に特徴がある。ただ、EMAが指摘しているように、シンガポールは高い信頼性の上に国際競争力のある電気料金を実現し、東京では信頼性は高いが料金も高いという点に違いがある。

### （3）電力供給制度

世界各国の電力供給制度は、規制と自由化の間で、その国の事情にもとづいて設計されている。発電や電力の卸売・小売事業、送電事業において自由化が行われれば、市場のプレーヤーが複数参入し、競争によって技術進歩や電気料金の低下が期待される。

日本はすでに部分的な発電、卸売、小売事業において自由化が制度的には行われているものの、実質的には地域電力会社の独占状態が継続しているのは周知の通りである。アメリカの一部の州では規制緩和と自由化が行われ、競争促進策が導入されているイメージが強いが、実際には50州のうち15州にすぎない（服部；2012）。さらに、自由化を行ったからといって電気料金が下がったという有意な傾向もみることができないし、全米規模の信頼度は日本に比べて著しく低い。シンガポールは発電、電力の卸売・小売において自由化を大胆に推し進めて、世界トップの高度な電力供給信頼性を確保している（図6）。

では、ここで東京とシンガポールの電力供給制度を比較してみよう（図7）。

すでにみたように、東京では原発が停止した以後も東京電力が80%の発電を担い、電力会社グループや公営発電を除けば10%程度に民間事業者の発電は抑制されてい

る。シンガポールでは大手3社のほか、10社がライセンスにもとづいて発電事業に参入して競争している。

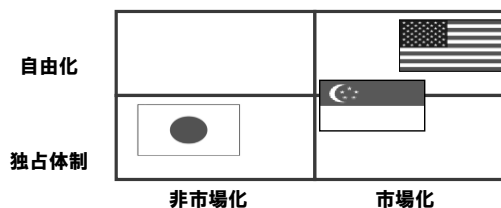


図6 電力事業の自由化と市場化状況

資料：電力システム改革専門委員会（2013），服部（2012）

	東京		シンガポール		
発電	東電80%	20%	26%	26%	24%
卸電力取引所	JEPX 0.5%		EMC100%		
送電	東電 100%		SP Power Asset100%		
小売	東電94%	6%	36.7%	16.7	15.3

図7 電力供給制度の比較

資料：東京電力（2013a），EMA(2013a, 2013b, 2013c)

発電された電力は、シンガポールでは取引市場においてすべて売買されており、取引市場の運営管理はエネルギー市場監督庁（EMA）傘下の公営企業 EMC（Energy Market Company）が担当している。一方、東京（日本）でも卸電力取引市場（JEPX：一般社団法人 日本卸電力取引所）が2003年に設立されたが、そこで取引される電力量は小売販売電力量のわずか0.5%で（2010年）、なきに等しいといわざるを得ない。

送配電事業に関しては、東京電力が全面的に管理運営しているのと同様に、シンガポールでは国営 Singapore Powerの系列会社 SP PowerAssetsが単独でライセンスを受けて送配電施設を独占所有して管理運営に当たっている。つまり、両国では送配電部門の自由化は行っておらず、安定供給と価格統制が実現されている。

小売部門では、東京とシンガポールともに大口需要先に対する小売事業への参入が制度として存在する。東京では卸売市場取引もごくわずかで、また、市場を介さずに直接取引されている電力も全体のわずか6%にすぎない。よって、94%という圧倒的なシェアの電力小売を東電1社が独占している状態である。

シンガポールでは家計部門や小口需要家に対しては、国策企業 Singapore Power傘下の SP Serviceのみによって電力が小売販売されている。その市場シェアは、規制緩和の拡大によって、この10年間で約60%から37%まで低下している。居住用途以外で、月平均10,000kWh以上の電力を消費する大口需要家は、同社以外の6社の民間電力小売事

業者から選択的に購入することが可能となっている。6社の民間小売事業者は主に発電会社系列が名を連ねており、Seraya Energy (16.9%)、Senoko Energy (15.6%)、Tuas Supply (シェア 12.8%)、Keppel Electric (11.2%)、Sembcorp Power (6.6%) が小売市場で競争している (NEMS; 2013)。

#### 4. 考察

本章では、本稿における考察テーマである「環境」と「経済的競争力」を維持しつつ、電気エネルギーを「安定的に確保・供給」するにはどうすればよいかについて、考察する。前章であげた東京における電気エネルギーの課題を整理すると、以下の様になる。

- 原子力発電の代替手段として有望視されるが発電量が不安定で大規模化が困難な再生可能エネルギーの安定的供給体制の整備
- 季節や昼夜で変動の大きい電力消費量の平準化
- 安定的電力供給とその経済的競争力のバランスがとれた制度設計・運用

これらの課題を解決するためにはどうしたらよいかについて、技術的観点と社会的観点から考察する。

##### (1) 技術的観点からの考察

技術的観点から問題解決を図るためには、スマートグリッドの導入促進が望ましいであろう。

スマートグリッドは、情報通信技術 (IT) を活用して電力供給、需要に係る課題に対応する次世代電力システムとされる概念である。一般に再生可能エネルギー等の分散型電源の大規模導入に向けて、従来からの大規模電源と送配電網との一体運用に加え、通信ネットワーク技術を活用し、分散型電源、蓄電池や需要側の情報を統合活用して、高効率、高品質、高信頼度の電力供給システムの実現を目指すものとされる (次世代エネルギーシステムに係る国際標準化に関する研究会 ; 2010)。

従来の電力システムは、電力消費地と離れた大規模発電所から長距離送電により安定的に電力供給する場合に適した階層型システムである。したがって、東京が遠方の原子力発電所や大規模な火力発電所から電力供給を受ける場合に適したシステムであった (図 8)。

一方、スマートグリッドは、情報通信技術を利用して分散して存在する様々な電力供給源と、電力需要の状況をリアルタイムに把握し、蓄電設備と組み合わせて制御することにより、一般に小規模で気象条件により発電量が変動する再生可能エネルギーをも取り込むことが可能な分散型電力システムである (図 9)。

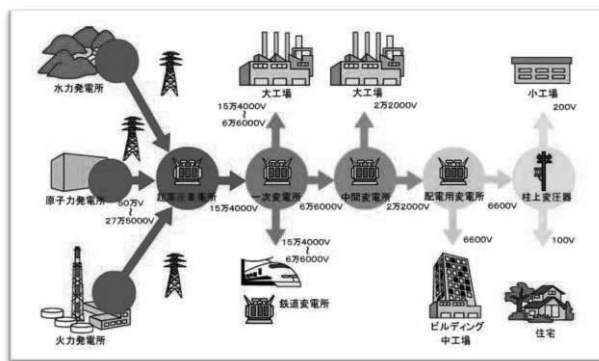


図 8 従来の電力供給システム

資料：電気事業連合会

<http://www.fepec.or.jp/enterprise/souden/keiro/index.html>

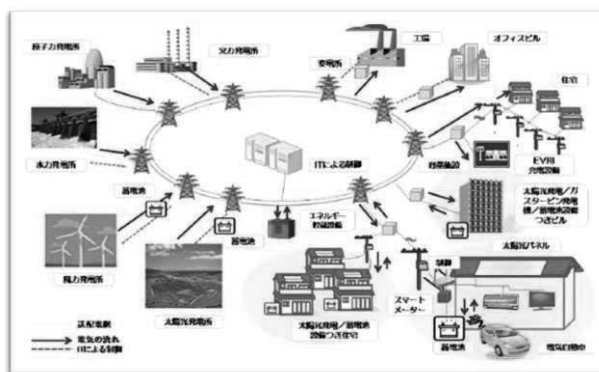


図 9 スマートグリッドの概念図

資料：次世代エネルギーシステムに係る国際標準化に関する研究会 (2010)

したがって、東京が従来の化石燃料や原子力のみならず再生可能エネルギーを活用し、地産地消の自律型電力システムを実現するためには、このようなスマートグリッドの導入推進が必須となるであろう。また、従来の需要者側に設置する電力計に通信機能をもたせたスマートメーターにより消費者の電力消費量をリアルタイムに把握して、後述するように、電力需要に合わせた価格設定を行うこと (デマンドレスポンス) により、電力需要の平準化や省エネルギー化を推進することも可能である。

さらに、スマートグリッドの一形態であり、既存の大規模発電所からの送電電力には依存せず小規模な発電設備と消費者から構成される分散型のエネルギーシステムであるマイクログリッド (小規模地域送電網) の概念は、災害時に地域の非常用電力供給や、島嶼地域の効率的で自足的な電力供給に適用できるであろう。

しかし、このようなスマートグリッドの取り組みは、東京、シンガポールともに、現時点では実証実験の段階である。経済産業省の旗振りのもと 2011 年度以降、東



京電力では横浜市の4,000世帯でピーク電力抑制のための実証実験を行っており、北九州市、豊田市、けいはんな地域においてもスマートグリッドの実証実験が展開されている。一方、シンガポールでも、Ponggol地区において2,000世帯を対象にデマンドレスポンスの実証実験を行っており、また同国北東沖の離島であるUbin島では、シンガポール本島の送電網と接続されていない太陽光発電や風力発電を利用したマイクログリッドの実証実験が進められている。

東京電力では、今後2020年度までに管下の全2,700万戸にスマートメーターを導入すると発表している。スマートメーターが保有している通信機能により、電力会社による遠隔検針用通信（Aルート）と需要家内部の電力使用管理通信（Bルート）を連携させ、エネルギー使用情報を管理することが可能となる。実は、すでにオフィスビルや工場など大規模電力需要家では、ほとんど遠隔検針が導入済みで、電力使用管理が行われている。

ここでいうBルートは、50kW以下の契約となる一般家庭での通信が想定されている。家庭内のどこで、どれくらいの電気が使用されたか集計され、居住者がPCやスマートフォン、タブレット等で簡単に閲覧でき、リアルタイムで電力使用状態を手軽に知ることが可能となって、節電意識をより高められると考えられている。その際、スマートメーターおよびそのインターフェースの仕様が地域や会社によってばらばらだと経済効率に劣るため、標準化が不可欠となる。

再生可能エネルギーの推進、電力消費のピーク抑制による電力設備投資計画の最適化とそれにもなう電力料金の競争力強化、さらに省エネによる環境保全に向けて、スマートグリッドの推進が望まれる。

## （2）社会的観点からの考察

社会的観点からは、電気事業への参入の自由化推進や電力市場の活性化、およびこれらの電力制度改革下におけるスマートグリッド技術にもとづいたデマンドレスポンスの推進が望まれる。

デマンドレスポンス（Demand Response：DR）とは、「卸市場価格の高騰時または系統信頼性の低下時において、電気料金価格の設定またはインセンティブの支払に応じて、需要家側が電力の使用を抑制するよう電力消費パターンを変化させること」（経産省）とされる。

これまで、日本における電力供給は1950年に電力事業の民営化が実施されたが、地域ごとに1社ずつの地域独占体制が続いた。1995年に新規参入者を認めて電力の自由化が始まり、さらに2005年には卸売電力市場が開設されて電力の市場取引が開始されている。とはいえ、実質的には地域独占と、供給原価にもとづいて料金が決定さ

れる総括原価方式による硬直的で管理型の電力供給システムが維持されている。

前述のスマートグリッドの構築により、インテリジェントな電力の送配電システムが構築されても、電力供給サイドで、再生可能エネルギーの発電事業者を積極的に新規参入させてエネルギー供給の多角化を推進するとともに、電力需要サイドで、電力需給に応じた意識的な電力消費（消費抑制）行動、つまりデマンドレスポンスの推進がなければ、電力の安定供給と経済的競争力における最適化は実現されない。スマートメーターによって計測し集められた電力需要情報にもとづいて電力市場で価格を設定し、需要側に電力の利用や節約のインセンティブを与え、電力需要の平準化や省エネルギー化を推進することは、電力の安定供給とさらには競争力を維持するうえで非常に有効であると考えられる。

一方で、過度な自由化と市場化は、2001年の米国エンロン社の不祥事や、同時期に多発したカリフォルニア州の大規模停電の例をあげるまでもなく、公共インフラたる電力の安定供給と価格競争力をかえって低下させる可能性を内包する。

シンガポールでは、送配電部門は1社独占体制であるが、発電された電力はすべて卸売市場で取引されており、また小売部門も実質的に競争原理が導入され、需要家は電力小売事業者を選択することができるようになっている。これらの競争原理の導入は、EMAをはじめとする政府機関による適切なガバナンスが働いており、過度な自由化と市場化による弊害を巧妙に回避して運営されている。

日本政府は、3.11以後の原子力以外による電力の安定的確保、電気料金高騰の抑制、需給調整、多様な電源の確保を図るために、広域系統運用の拡大、小売および発電の全面自由化、法的分離方式による送配電部門の中立性確保を推進することを閣議決定した（経済産業省；2013）。今後、改正電気事業法の成立と規制緩和によって、安定供給と経済競争力のバランスを図りながら、シンガポールのような信頼性の高い電力供給制度の設計と構築がわが国でも目指されるべきであろう。

さらに、このような電力供給制度とスマートグリッド技術の導入と普及によって、デマンドレスポンスが実現し、電力の安定供給と経済競争力の強化が図られるものと考えられる。

## （3）東京都への提案

東京都環境局によれば、東京都の電力政策の優先順位は、まず、都民への電力の安定供給、次に価格競争力、さらに環境対策である。これまでの考察から、東京都にとって有効であると考えられる電力システムについて、

とりわけ安定供給に関する部分で、以下の3点をGCP最終報告会（2013年11月3日）で提案した。

#### ① 災害時の電力バックアップシステム

東日本大震災では原発や火力発電所の停止にともない、一部の電力網が寸断され、東京都は電力不足に陥った。交通網は激しく混乱し、一部の病院や避難所は計画停電の運用に翻弄された。防災対策には力を入れてきたはずの東京都でも、電力ライフラインに関しては、東京電力の復旧を待つしか方法がなく、対応は後手に回った。このことから、災害時に東京都が独自に運用できる電力ネットワークの整備を提案するにいたった。

具体的には、病院や重要な行政施設、避難所に非常用電源と自律的発電・蓄電システムを導入・強化し（マイクログリッド化）、それらを鉄道や地下鉄の送電網を使って電力を相互に融通し合えるシステムである。スマートグリッドの技術を活用して独自の送電網を鉄道送電網に併設して敷設し、災害時のバックアップ電力供給装置とすることで、電力融通が可能になると考えた。余剰電力のある施設から電力不足の病院や避難所に電気を融通し合い、東電に頼らず生命基盤を確保することができる。こうして、災害に強く、ひとびとが安心して暮らせる首都東京を世界にアピールすることができる。

#### ② 島嶼地域へのマイクログリッドの導入

現在、東京都の島嶼地域では、各島内の電力は各島に1～2基、独立して存在する発電所に依存している。その場合、台風や地震などの自然災害によって電力供給が分断されてしまうリスクにさらされている。

そこで、島嶼地域へのマイクログリッド導入を提案するにいたった。これは、島嶼地域において、既存の火力・地熱発電に加えて太陽光発電や風力発電を利用した自律分散型の電力供給体制を推進し、各島内全域の病院や学校、家屋・事務所などを結ぶマイクログリッドを導入することで、非常時に様々な施設・建物間での電力相互融通を図るというものである。病院や学校などの建物に自家発電設備や蓄電装置を導入することで、限られた発電所へ過度に依存せずにマイクログリッドへ接続することも可能となる。さらに、島嶼間の電力網を接続することにより、リスクの分散を図ることができ、不測の事態や急な電力不足に対応することが可能となる。

#### ② 都営住宅のデマンドレスポンス導入

現在、実証実験が行われているマンション・集合住宅では、そのエネルギー管理者が電力会社と大口需要者として電力の購入契約を結ぶことができ、管理者は各世帯と電力の分配交渉を行っている。各世帯では、スマートメーターによる電力の「見える化」によって使用量や予

定をみずから計画・制御でき、節電意識の向上と費用の節減を図ることが可能となる。

ところで、都営住宅の全世帯は電力会社とそれぞれ契約を結んでいる。もし東京都が各地区の都営住宅のエネルギー管理者になることができれば、高圧一括受電事業者との連携によって入居者が電力消費のピークシフトを行うことで電力使用を抑え、かつ、料金を節減することが可能となる。2020年度までに既設の電力計がスマートメーターに置き換えられれば、すべての都営住宅が地区ごとに需給調整・管理されることになる。そこで、東京都が都営住宅内で使用される電力を適切に管理することが可能となり、電力消費のピークカットやピークシフトを促し、節電対策にもつながると考えられる。

その結果、電力消費量が平準化されて、電力会社は発電所の操業を効率化することができる。生産コストの削減や料金の引き下げによって国際競争力を保持し、より一層の安定供給を行うことが可能であると考えられる。

## 5. おわりに

本稿では、首都大学東京・高専・産技大連携事業GCPにおいて設定されたテーマである、「電気エネルギーの確保に対する考え方」への調査活動の成果と考察を取りまとめた。シンガポールと東京の電力供給システムの比較は所与の条件で、みずから選んだ比較対象ではなかったが、結果としては非常に示唆に富むケースであることが判明した。とりわけ、電力供給システムの自由化、戦略的資源調達と発電技術の選択、競争力のある価格、世界最高レベルの電力信頼度の実現などは、大いに参考になるだろう。

シンガポールは自然災害のなさや季節変動によらない環境にあるため、そのどちらをも抱えている東京に課された対応策と課題解決は容易ではない。

今回の調査活動を通じて、発電量の変動が大きい再生可能エネルギーを活用する一方、季節の変動等による電力需要の平準化を図るためには、情報通信技術を用いた電力網であるスマートグリッドの導入をはじめとするエネルギーマネジメントシステムの高度化が必要であることがわかった。

消費サイドで、スマートメーターを導入し消費電力の測定や可視化を図る一方、供給サイドでは、スマートグリッドを構築することで電力供給や送配電を制御し、電力システム全体の管理レベルを効率化させる。さらに、これら技術的対応に加え、需要にもとづいて電力の供給量や価格の決定メカニズムを構築することで、結果として、電力のピークカットとそれにとまなう電気事業者のコストダウンや電気料金の値下げ、省エネ促進、さらに再生可能エネルギ

一の活用促進等、多くの課題が解決されるものと期待される。

つまり、持続可能で、安定的な電気エネルギー確保のためには、技術的観点および社会的観点の両面から戦略的かつ総合的な電力の管理が必要と考えられる。首都東京が安全で安心、高い経済的競争力をもった、世界のモデル都市たらんためには、困難だが挑戦しがいのある大きな課題であろう。

## 6. 参考文献

- [1]阿部力也・田岡久雄：デジタルグリッドが拓く新しい電力流通の姿-デジタルグリッドの基本概念，電気学会論文誌 B 133 -2, 2013
- [2]伊佐治光男：次世代エネルギーインフラがもたらす「スマートシティ」-低炭素化と経済成長の両立-，『スマート革命』の衝撃-図解 スマートグリッド-，エネルギーフォーラム出版社，2010
- [3]小田原洋一：シンガポールのエネルギー動向，日本エネルギー経済研究所，  
<http://eneken.ieej.or.jp/data/pdf/635.pdf>，2003
- [4]経済産業省：閣議決定 電力システムに関する改革方針，経済産業省，2013
- [5]在シンガポール日本国大使館：シンガポールの概況，2012
- [6]スマートメーター制度検討会：スマートメーター制度検討会報告書，経済産業省，2011
- [7]資源エネルギー庁：最近の卸電力取引における現状等について，2012
- [8]次世代エネルギーシステムに係る国際標準化に関する研究会，経済産業省，2010
- [9]石油エネルギー技術センター：資源のない国，シンガポールのエネルギー政策と産業，JPEC レポート第 14 回，2011
- [10]電力システム改革専門委員会：電力システム改革専門委員会報告書，経済産業省，2013
- [11]東京電力：平成 25 年度 数表でみる東京電力，2013a
- [12]東京電力：東京電力ファクトブック，2013b
- [13]東京都：「2020 年の東京」へのアクションプログラム 2013，2013
- [14]日本政策金融公庫・国際協力銀行フランクフルト事務所：EU のスマートグリッド政策と EU 諸国における対応-スマートグリッド：技術革新から導入へ-，2011
- [15]服部 徹：米国における発送電分離が電気事業に与えた影響-主要な自由化州を対象とした事例調査-，電力中央研究所報告，2012
- [16]林 泰弘：スマートグリッド実現に向けた電力系統技術，電気学会論文誌 B 133 -4, 2013
- [17]福地 学：国内外におけるスマートシティの動向，知的資産創造 2011 年 5 月号，2011
- [18]EMA：An Intelligent Energy System, Singapore's Smart Grid Initiative, 2011
- [19]EMA：Annual Report 2011-2012, 2013a
- [20]EMA：Energising Our Nation, Singapore Energy Statistics 2012, 2013b
- [21]EMA：Fact and Figures, 2013c
- [22]Hogan Lovells Lee & Lee：Singapore Energy Market, 2012
- [23]Low, M.: Liberalized Electricity Market? A Case Study of Singapore, International Conference on Applied Energy 2012, 2012
- [24]National Electricity Market of Singapore (NEMS)：Market Report 2012, 2012
- [25]Tan, D., EMA：Singapore's Electricity Market after Market Reform, 2008

## 【謝辞】

フィールドワークで面会に応じてくださった官公庁・企業の関係者、高専・首都大学東京・産技大の管理職・事務、高専品川キャンパス・電気電子工学コース山本研究室・進藤研究室、高専荒川キャンパス医療福祉工学コース吉村拓巳准教授、ハバタク(株)の丑田俊輔氏・長井悠氏、英語プレゼンテーションを指導してくれた(株)シェーンコーポレーション、シンガポール研修で交流したニーアンポリテクニクの教職員および学生ほか、ご支援くださった多くのみなさまに感謝申し上げます。

## 【チーム学習活動記録】

キックオフ：2013年1月19日：高専品川キャンパス

- 1) 2月3日：高専品川キャンパス
- 2) 2月23日：秋葉原サテライトキャンパス
- 3) 3月10日：高専荒川キャンパス
- 4) 3月24日：秋葉原サテライトキャンパス
- 5) 4月6日：秋葉原サテライトキャンパス
- 6) 4月14日：秋葉原サテライトキャンパス
- 7) 4月27日：秋葉原サテライトキャンパス
- 8) 5月11日：中間報告会：秋葉原サテライトキャンパス
- 9) 5月19日：秋葉原サテライトキャンパス
- 10) 6月15日：秋葉原サテライトキャンパス
- 11) 6月20日：日本IBM(株)訪問
- 12) 7月2日：デジタルグリッドソリューションズ(株)・  
東京大学阿部研究室訪問
- 13) 7月18日：東京都環境局訪問
- 14) 8月10日：秋葉原サテライトキャンパス
- 15) 8月14日：高専品川キャンパス
- 16) 8月19日：シェーン飯田橋研修後
- 17) 8月20日：シェーン飯田橋研修後
- 18) 8月23日：シェーン飯田橋研修後
- 19) 8月24日：秋葉原サテライトキャンパス
- 20) 8月29日：経済産業省・資源エネルギー庁訪問
- 21) 8月29日：高専品川キャンパス
- 22) 8月30日：大崎電気工業(株)訪問
- 23) 9月4日：高専品川キャンパス
- 24) 9月4日：日本原子力発電(株)・原電情報システム  
(株)訪問
- 25) 9月6日：東京電力(株)本店技術統括部訪問
- 26) 9月6日：高専品川キャンパス
- 27) 9月7日：秋葉原サテライトキャンパス
- 28) 9月9日：高専荒川キャンパス
- 29) 9月20日：Nanyang Technological University,  
Energy Research Institute 訪問
- 30) 9月20日：Mitsubishi RtM Co. Ltd.訪問
- 31) 9月23日：National University of Singapore,  
Energy Studies Institute 訪問
- 32) 9月24日：Energy Market Authority (EMA)訪問
- 33) 9月25日：Ngee Ann Polytechnicにて英語プレゼン  
テーション
- 34) 10月19日：高専荒川キャンパス
- 35) 10月26日：都内某所
- 36) 11月3日：最終報告会：高専荒川キャンパス
- 37) 11月10日：チーム打ち上げ：すし小袖

※小グループ単位のミーティングとシンガポール研修中の連夜のミーティングは除く。



National University of Singapore,  
Energy Studies Institute



Nanyang Technological University,  
Energy Research Institute



最終報告会：荒川キャンパス