

都道府県単位の電力自給を想定した 最適電源構成のシナリオ分析

岩崎 堅太¹・天野 耕二²・吉川 直樹³

¹立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)
E-mail:rv0017xk@ed.ritsumei.ac.jp

²正会員 立命館大学 理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)
E-mail:amano@se.ritsumei.ac.jp

³正会員 立命館大学 理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)
E-mail:n-yoshik@fc.ritsumei.ac.jp.

東日本大震災を受け、災害時などの対策として、電力の地産地消が重要視されている。本研究では、電力取引全面自由化後、各都道府県が多様な発電所を持つことを想定し、家庭部門における都道府県ごとの電力需要特性や、各電源の導入ポテンシャルを考慮した上で、都道府県ごとの最適な電源構成を検討した。各都道府県の家庭部門における単位時間あたり電力需要を、安全性を前提に、経済性、環境性、安定供給性という観点からシナリオ分析を行い、線形計画法を用いて各指標を最適化したときの電源構成を導出した。分析結果から、3つの視点を組み合わせたシナリオにおける都道府県の総コスト、総CO₂排出量、総発電所数を日本の現状と比較すると、1時間あたり約1億3,000万円の削減、約4,500 t-CO₂の削減、約8,500基の増設が見込まれることがわかった。

Key Words : power generation mix, Japanese prefecture, power demand characteristics, linear programming.

1. はじめに

2011年の東日本大震災により、大規模停電や、計画停電といった電力使用への信頼が損なわれる事態が起きた。これを受け、電力の安定供給の重要性を再認識されることとなった。そこで注目されたのが、震災時に素早く復旧し、電力供給を行った、仙台のマイクログリッド(分散型電源)¹⁾である。震災後の数日間、電力会社からの供給が断たれている中、需要家に対して、電力供給を行ったからである。これにより、災害時などの対策として、今後の都市計画において、電力の地産地消が重要視されることとなった。ただし、電力の地産地消といっても、どの種の電源をどの程度保有するのか、また、それらをどう組み合わせるのか、電源構成を考える必要がある。

既往の研究では、立松ら²⁾による将来シナリオ別の我が国における最適電源構成の検討など、国単位での電源構成の研究は行っているが、都道府県単位、都市単位といった小さい単位での研究は行われていない。しかし、今後の都市計画において、電力の地産地消が行われていくことに加えて、再生可能エネルギーの導入ポテンシ

ルの違いや、電力需要特性の違いを考慮すると、都道府県単位、都市単位での研究が必要である。その中でも、都道府県単位での研究が特に重要であるといえる。なぜならば、導入ポテンシャルや、電力需要を都道府県内において均すことで、安定した需要と供給が望めるため、電力の地産地消を行いやすいからである。

そこで、本研究では、電力取引全面自由化後、各都道府県において家庭部門の電力を自給することを想定し、都道府県ごとの電力需要特性や、各電源の導入ポテンシャルなどを制約条件に、3E+S(経済性・環境性・安定供給性・安全性)を考慮した最適な電源構成を検討する。これにより、マイクログリッド導入の指針となり、防災の一助となることが本研究の目的である。

2. 研究概要

この研究では、各都道府県の家庭部門電力の供給について、安全性の確保を前提に、経済性、環境性、安定供給性という視点でシナリオ分析を行い、最適な電源構成を検討する。

(1) 各指標の定義

安全性とは原子力発電を用いないこと，経済性はLC-Cost，環境性はLC-CO₂，安定供給性は発電所数と，本研究では定義した。また，安全性を原子力発電を用いないと定義した理由は，東日本大震災により発生した重大な原子力事故，東京電力福島第一原子力発電所のメルトダウン，それによる大量の放射性物質の拡散を考慮し，原子力発電がなければ安全であると仮定したものである。経済性と環境性は，発電所の運用が単年度などの短い期間ではなく，20～40年といった長いスパンであること，また，燃料の必要，不必要を考慮した場合，LC-Costを経済性，LC-CO₂を環境性として扱うのが妥当であると考えたためである。安定供給性については，東日本大震災時の大規模停電のようなリスクを回避することを考える。大規模発電では，1つの発電所が止まることによる停電の影響が大きい，そこで発電所の数を増やすことにより，1つの発電所が止まることによる停電の影響を小さくする。このことから，安定供給が行われるものと想定する。

(2) 対象とする電源

本研究の対象とする電源は，石炭火力，LNG火力，石油火力，一般水力，小水力，メガソーラー，風力（陸上），風力（洋上）とする。

3. 分析手法

各シナリオを線形計画法により定式化し，単位時間あたりの最適な電源構成を導出した。以下に各単独シナリオと，3つの視点を組み合わせたシナリオの式を示す。ただし，各都道府県の単位時間あたり電力需要を，ベースロード需要，ミドル需要，ピーク需要と分け，各需要で最適化を行い，積算することで単位時間あたりでの最適電源構成とした。また，各電源の建設数を変数として扱う。

(1) 各シナリオの制約式

a) 経済性優先シナリオ

経済性優先シナリオでは，LC-Costの最小化を目的関数とし，各都道府県の電力使用におけるCO₂排出量と，各電源の導入可能量を制約条件とした。

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & z_{\text{cost}} = \sum a_j b_j c_j X_j & (1) \\ \text{s.t.} \quad & \alpha = \sum a_j b_j X_j & (2) \\ & z_{\text{CO}_2} = \sum a_j b_j d_j X_j \leq \beta \sum a_j b_j X_j & (3) \\ & a_1 X_1 \leq e_1, a_2 X_2 \leq e_2, \dots, a_n X_n \leq e_n & (4) \\ & X_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n & (5) \end{aligned}$$

z_{cost} ：総コスト（円/h）， a_j ：各電源の1基当たり出力（kW/基）， b_j ：各電源の設備利用率， X_j ：各電源の建設数（基）， c_j ：各電源のLC-Cost（円/kWh）， α ：各都道府県の単位時間あたり電力需要（kw）， z_{CO_2} ：総CO₂排出量（g-CO₂/h）， d_j ：各電源のLC-CO₂（g-CO₂/kWh）， β ：供給中の各一般電気事業者のCO₂排出係数（g-CO₂/kWh）， e_n ：各電源の導入ポテンシャル（kW）

b) 環境性優先シナリオ

環境性優先シナリオでは，LC-CO₂の最小化を目的関数とし，各都道府県の事業予算と売電収入，各電源の導入可能量を制約条件とした。

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & z_{\text{CO}_2} = \sum a_j b_j d_j X_j & (6) \\ \text{s.t.} \quad & \alpha = \sum a_j b_j X_j \\ & z_{\text{cost}} = \sum a_j b_j c_j X_j \leq \gamma + O(\sum a_j b_j X_j) / P & (7) \\ & a_1 X_1 \leq e_1, a_2 X_2 \leq e_2, \dots, a_n X_n \leq e_n \\ & X_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

γ ：各都道府県の事業予算（円/h）， O ：標準的世帯の電気料金（円/世帯・月）， P ：標準的世帯の使用電力量（kWh/世帯・月）

c) 安定供給性優先シナリオ

安定供給性優先シナリオでは，建設数の最大化を目的関数とし，各都道府県の事業予算と売電収入，電力使用におけるCO₂排出量，各電源の導入可能量，を制約条件とした。

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & -z_{\text{construction}} = -\sum X_j & (8) \\ \text{s.t.} \quad & \alpha = \sum a_j b_j X_j \\ & z_{\text{cost}} = \sum a_j b_j c_j X_j \leq \gamma + O(\sum a_j b_j X_j) / P \\ & a_1 X_1 \leq e_1, a_2 X_2 \leq e_2, \dots, a_n X_n \leq e_n \\ & X_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

$z_{\text{construction}}$ ：総建設数（基）

d) 3つの視点を組み合わせたシナリオ

3つの視点を組み合わせたシナリオでは，LC-CostとLC-CO₂の最小化，建設数の最大化を目的関数とし，各電源の導入可能量を制約条件とした。

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & z_{\text{cost}} = \sum a_j b_j c_j X_j \\ & z_{\text{CO}_2} = \sum a_j b_j d_j X_j \\ & -z_{\text{construction}} = -\sum X_j \\ \text{s.t.} \quad & \alpha = \sum a_j b_j X_j \\ & a_1 X_1 \leq e_1, a_2 X_2 \leq e_2, \dots, a_n X_n \leq e_n \\ & X_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

3つの視点を組み合わせたシナリオの式はこのように設定した。ここで，目的関数が複数出てくるが，先の各単独シナリオの結果を利用し，目的関数を統一した式を

以下に示す。これは、各シナリオにおいて最適化した時の各目的関数の値を足し合わせたものが、最も良い値となるように設定したものである。その際、各目的関数の単位が違うため、最適化したときの各目的関数の値を1とし、今回の値を割合で示すことで単位を統一した。

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_{\text{cost-co2-construction}} = & 3 - (z_{\text{cost}}^{\min} / \sum a_j b_j c_j X_j) \\ & - (z_{\text{co2}}^{\min} / \sum a_j b_j d_j X_j) \\ & - (\sum X_j / z_{\text{construction}}^{\max}) \quad (9) \\ \text{s.t. } & \alpha = \sum a_j b_j X_j \\ & a_1 X_1 \leq e_1, a_2 X_2 \leq e_2, \dots, a_n X_n \leq e_n \\ & X_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

これらを用い最適電源構成を導出した。

(2) 使用するデータ

a) 電力量データ

都道府県別の時間あたり電力需要は、都道府県別の家庭における年間電力需要³⁾を、供給している電力会社の年間電力需要で除し、供給している電力会社の時間あたり電力需要⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾を乗じて、推計した。また、ベースロード需要を各都道府県の時間あたり電力需要の最小値、ミドル需要を最小値から最大値の90%まで、ピーク需要を最大値の90%から最大値までと、本研究では定義した。

b) 電源データ

今回用いる電源の性能¹⁴⁾と運用方法を表-1に示す。本研究では、各火力発電が出力変動を行えることを考慮し、各都道府県で設備利用率を変動させることとする。電源の運用方法については、現在の運用方法を参考に設定した。LNG火力、石油火力、メガソーラーは2つの需要に対応して運用する。また、各電源の経済性と環境性は総

合資源エネルギー調査会¹⁴⁾、電力中央研究所のデータ¹⁵⁾から引用し、導入ポテンシャルは、環境省の再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書のデータ¹⁶⁾を引用した。

c) 発電予算データ

本研究では、各都道府県予算のうち、産業基盤投資に用いる予算¹⁷⁾を時間あたりに推計し、各都道府県の発電予算の制約として扱うこととする。また、各供給している一般電気事業者の電気料金を参照し、各都道府県の売電収入とした。使用した標準的世帯は、各一般電気事業者で一般的な契約形態のもと、契約アンペア30A、使用電力量290kWhとし、平成27年4月のデータを参照した。

d) CO₂排出量データ

各都道府県のCO₂排出量制約は、現状の電力供給に伴うCO₂排出量を想定した。供給中の各一般電気事業者のCO₂実排出係数に各都道府県の電力需要を乗じたものとした¹⁸⁾。

4. 分析結果

都道府県ごとに各シナリオの分析を行った。各シナリオ分析の結果を、都道府県の平均で示す。

(1) 経済性優先シナリオの結果

経済性優先シナリオによる電源構成は、どの都道府県も概ね同じであった。一般水力を最大限導入し、残りの需要を、各火力発電を用いることでコストを抑えている。ただ、各火力発電の設備利用率には、ばらつきがあった。そして、最大の特徴として一般水力を除く、再生可能エネルギーは導入されないことがわかった。表-2にその結果を示す。

表-1 電源の性能と運用方法

	1基当たり 出力(MW)	設備利用 率(%)	LC-Cost (円/kWh)	LC-CO ₂ (g- CO ₂ /kWh)	ベースロー ド需要	ミドル需要	ピーク需要
石炭火力	400.0	変動	12.2	942.7	○		
LNG火力	450.0	変動	13.7	473.5	○	○	
石油火力	750.0	変動	16.1	738.0		○	○
一般水力	12.0	60	10.8	10.6	○		
小水力	1.0	60	19.1	10.6	○		
メガソーラー	1.2	12	21.0	38.0		○	○
風力(陸上)	2.0	20	15.6	25.0		○	
風力(洋上)	2.0	30	23.2	25.0		○	

表-2 経済性優先シナリオ結果

	建設数(基)	設備容量構成比率	発電量構成比率	設備利用率
石炭火力	1.0	40.2%	21.6%	18.7%
LNG火力	2.1	38.2%	66.4%	67.7%
石油火力	1.0	20.8%	10.4%	24.5%
一般水力	1.2	0.8%	1.6%	60.0%
小水力	0.0	0.0%	0.0%	60.0%
メガソーラー	0.0	0.0%	0.0%	12.0%
風力(陸上)	0.0	0.0%	0.0%	20.0%
風力(洋上)	0.0	0.0%	0.0%	30.0%

表-3 環境性優先シナリオ結果

	建設数(基)	設備容量構成比率	発電量構成比率	設備利用率
石炭火力	0.0	0.0%	0.0%	0.0%
LNG火力	2.1	43.7%	58.0%	58.5%
石油火力	1.0	24.6%	11.0%	24.4%
一般水力	1.3	1.2%	1.6%	60.0%
小水力	34.9	1.7%	4.2%	60.0%
メガソーラー	8.8	0.4%	0.2%	12.0%
風力(陸上)	53.0	4.9%	4.0%	20.0%
風力(洋上)	265.4	23.5%	21.0%	30.0%

表-4 安定供給性優先シナリオ結果

	建設数(基)	設備容量構成比率	発電量構成比率	設備利用率
石炭火力	1.0	24.4%	17.8%	19.4%
LNG火力	1.5	18.7%	23.3%	34.0%
石油火力	1.3	14.8%	16.9%	31.1%
一般水力	0.5	0.2%	0.6%	60.0%
小水力	67.8	2.4%	8.0%	60.0%
メガソーラー	551.4	17.2%	9.9%	12.0%
風力(陸上)	231.5	11.1%	10.3%	20.0%
風力(洋上)	241.5	11.2%	13.2%	30.0%

表-5 3つの視点を組み合わせたシナリオ結果

	建設数(基)	設備容量構成比率	発電量構成比率	設備利用率
石炭火力	0.9	27.6%	7.0%	7.6%
LNG火力	2.1	33.5%	59.4%	61.7%
石油火力	1.0	17.8%	10.1%	23.6%
一般水力	1.5	0.8%	1.9%	60.0%
小水力	76.8	3.1%	7.1%	60.0%
メガソーラー	42.0	1.6%	0.8%	12.0%
風力(陸上)	162.2	11.6%	9.9%	20.0%
風力(洋上)	31.6	1.6%	1.6%	30.0%

(2) 環境性優先シナリオの結果

環境性優先シナリオによる電源構成は、大きく2種類に分かれた。まず、LNG火力、石油火力、一般水力のみを導入している構成であり、14の都道府県でこの結果が得られた。さらには、石炭火力以外を地域特性に応じて導入している構成である。共通して石炭火力を導入しない結果となった。表-3にその結果を示す。

(3) 安定供給性優先シナリオの結果

安定供給性優先シナリオによる電源構成は、発電量構成比率で見れば、一般水力を除き、均等な配分になった。これは、各火力発電の導入を抑え、さらに設備利用率を抑えることで、他の電源を多く導入した結果である。また、一般水力を除く再生可能エネルギーの導入が爆発的に増加した。表-4にその結果を示す。

(4) 3つの視点を組み合わせたシナリオの結果

3つの視点を組み合わせたシナリオによる電源構成は、それぞれのシナリオの電源構成を反映した結果となった。表-5にその結果を示す。ただし、都道府県平均の目的関数の達成率は、環境性・安定供給性より経済性に重みを置いた結果であり、Cost達成率は89.3%、CO₂達成率48.4%、建設数達成率20.6%となった。達成率は今回導かれた目的関数の値を、指標ごとに着目した時、単独でシナリオ分析を行った場合と比べ、どの程度達成されたかを示している。また、各単独シナリオで最適化されたコスト・CO₂排出量・建設数を、今回導かれたコスト・CO₂排出量・建設数で除して求めた。

5. 考察

3つの視点を組み合わせたシナリオ時の最適化された電源構成を、日本の現状と分析していく。

(1) 発電量構成の比較

導出された都道府県平均の電源構成を、現在の我が国の電源構成¹⁰⁾と比較してみる(図-1、図-2参照)。石炭火力の発電量構成比率は、現在の我が国の比率と比べ、今回のシナリオでは、大きく下げる結果となった。それに代わり、LNG火力の比率、再生可能エネルギーの比率が大きくなった。しかし、石油火力はあまり変化がなかった。また、再生可能エネルギーが全体に占める比率が、2倍にものぼる結果となった。これは、CO₂排出量制約に加え、安定供給性による建設数の増加を目的としたことによるものと考ええる。また、石油火力に変化があまりなかったのは、調整電源として求められるだけであり、コスト削減、CO₂排出量削減を目的とした運用ではないため、ピーク需要への対応力が評価された結果と考える。

(2) 経済性、環境性、安定供給性の比較

3つの視点を組み合わせたシナリオ時の都道府県の総コスト、総CO₂排出量、総発電所数³⁾を日本の現状と比較した。すべてにおいて、現状よりも優れているため、都道府県ごとの電力の地産地消が期待される。

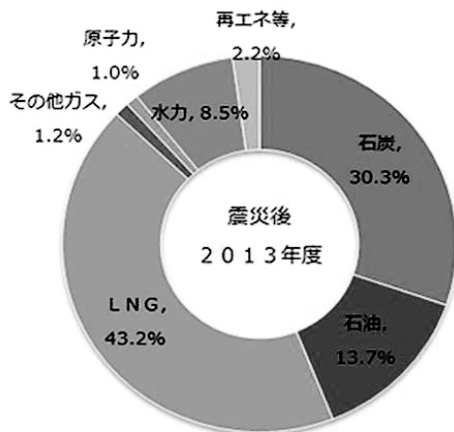


図-1 日本の電源構成¹⁹⁾

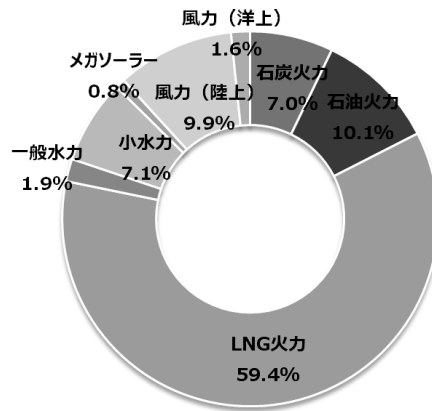


図-2 3つの視点を組み合わせたシナリオの電源構成

表-6 日本の現状との比較

	日本の現状	最適化の結果
総コスト(100万円/h)	784.7	655.1
総CO ₂ 排出量(t-CO ₂ /h)	25,471	20,930
総発電所数(基)	5,456	13,994

6. 結論

(1) 本研究の結論

シナリオ分析の結果得られた、マイクログリッドとしての各電源の運用の仕組み、特性を簡単にまとめる。どのシナリオにおいても、LNG火力の発電量が大きいことから、LNG火力はいずれの都道府県においても必要な電源であるといえる。また、一般水力においても、導入できる最大の導入量をほとんどのシナリオで導入されており、重要であることが分かる。そして、各再生可能エネルギーは、安定供給性、環境性を求める場合は重要であるため、各地域の導入ポテンシャルに合わせた導入が求められる。また、石油火力は、コスト削減、CO₂排出量削減を目的とはせず、機動的な調整電源としての運用に期待される。一方で、石炭火力はどのシナリオにおいても、設備利用率が低くなっており、一般電気事業者の供給圏より需要量の少なくなる都道府県の範囲、さらに家庭部門だけでは、本来の性能を生かし切れない可能性がある。

また、3つの視点を組み合わせたシナリオの分析の結果、現状よりも、都道府県別に電源構成を構築したほうが、経済性、環境性、安定供給性すべてにおいて優れており、電力の地産地消は行っていくべきである。

(2) 今後の課題

本研究では、各火力発電の設備利用率に、上限と下限を設定していないため、実際の運用に際し、非現実的な設備利用率になっている可能性がある。また、各火力発電は、設備利用率の変動による、LC-Cost、LC-CO₂の変動を行っていないため、本来の結果より、過剰または過小に導入されている可能性がある。これらに加え、本研究では今ある発電所を考慮せず、一から建設したときの分析を行っているため、現在稼働している発電所を考慮して行う必要がある。また、地域ごとの制約に、土地の制約がないため、実際に約8,500基の増設が見込めるかどうか検討する必要がある。

参考文献

- 1) 廣瀬 圭一、島陰 豊成、James T. Reilly、入江 寛：東日本大震災直後の仙台マイクログリッドの運用経験、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構、2013、<http://www.nedo.go.jp/content/100640511.pdf>
- 2) 立松 研二：長期エネルギー需給シナリオのマッピング法を用いた電源構成の選択肢評価、JAEA-Research 2012-042、2013
- 3) 電気事業連合会統計委員会編、電気事業便覧 平成26年度版、p72-73、p18-19
- 4) 北海道電力 HP：過去の使用電力実績データ、<http://denkiyoho.hepco.co.jp/download.html>
- 5) 東北電力 HP：過去の使用電力実績データ、<http://setsuden.tohoku-epco.co.jp/download.html>
- 6) 東京電力 HP：過去の使用電力実績データ、<http://www.tepco.co.jp/forecast/html/download-d-j.html>
- 7) 北陸電力 HP：過去の使用電力実績データ、<http://www.rikuden.co.jp/denki-yoho/csv/juyo-rikuden-2015.csv>
- 8) 中部電力 HP：過去の使用電力実績データ

- タ,http://www.chuden.co.jp/resource/corporate/datalist_03.pdf,http://www.chuden.co.jp/resource/corporate/datalist_04.pdf,http://www.chuden.co.jp/resource/corporate/datalist_07.pdf,http://www.chuden.co.jp/resource/corporate/datalist_08.pdf,http://www.chuden.co.jp/resource/corporate/datalist_09.pdf
- 9) 関西電力 HP：過去の使用電力実績データ,http://www.kepco.co.jp/energy_supply/supply/denkiyoho/download.html
 - 10) 中国電力 HP：過去の使用電力実績データ,<http://www.energia.co.jp/jukyuu/download.html>
 - 11) 四国電力 HP：過去の使用状況データ,<http://www.yonden.co.jp/denkiyoho/download.html>
 - 12) 九州電力 HP：過去の使用電力実績データ,http://www.kyuden.co.jp/power_usages/history/201512.html
 - 13) 沖縄電力 HP：過去の使用電力実績データ,<http://www.okiden.co.jp/denki/index.html>
 - 14) 総合資源エネルギー調査会:発電コスト検証ワーキンググループ（第1回会合）, 参考資料1-2 ,http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/001/pdf/001_11.pdf
 - 15) 電力中央研究所：研究報告書 Y09027 日本の発電技術のライフサイクル CO2 排出量評価, 2010 年 7 月,
 - 16) 環境省 HP：再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書,<https://www.env.go.jp/earth/report/h23-03/>
 - 17) 総務省統計局 HP：地方財政，都道府県，事業目的・経費負担区分別投資実績,<http://www.stat.go.jp/data/nenkan/05.htm>
 - 18) 環境省 HP：平成 25 年度の電気事業者ごとの実排出係数・調整後排出係数等の公表について,<http://www.env.go.jp/press/19006.html>
 - 19) 資源エネルギー庁 HP：日本のエネルギー情勢,<http://www.enecho.meti.go.jp/about/faq/001/>

(2016. 8. 26 受付)

SCENARIO ANALYSIS OF OPTIMUM POWER GENERATION MIX ASSUMING POWER SELF-SUFFICIENCY IN JAPANESE EACH PREFECTURE

Kenta IWASAKI, Koji AMANO and Naoki YOSHIKAWA

Local generation for local consumption of the electricity should be countermeasures against disaster importance because of the Great East Japan Earthquake. After electric deregulation, we assumed that each prefecture in Japan has a variety of power stations with due of power demand characteristics each prefecture of household and the potential of each power generation and examined the optimum power generation mix each prefecture in Japan. We performed analysis of economic efficiency, environment and energy security based on the premise of safety about electric energy usage per hour of household in each prefecture and derived power generation mix when we optimized each index using linear programming. From analysis, we could find that reduction of about 130 million yen per hour, reduction of about 4,500t-CO₂ per hour, about 8, 500-unit enlargement in comparison with the Japanese present conditions.