

緊急時対応と環境負荷低減を目的とした分散型エネルギー供給システムの構築と総合評価

田丸 裕昭¹・天野 耕二²

¹立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-0055 滋賀県草津市野路町小野山2185-108)

E-mail:rv005034@se.ritsumei.ac.jp

²正会員 立命館大学教授 理工学部

E-mail:amano@se.ritsumei.ac.jp

緊急時のエネルギーセキュリティの確保とコージェネレーション・自然・再生エネルギーの活用による環境負荷低減を目的とした分散型エネルギー供給システム(マイクログリッド)を様々な地域特性を持つ都市エリアに導入することを想定し、導入に伴う対象地域のエネルギー需給バランスと温室効果ガス排出量の変化を推計した。その結果、多くの地域で民生業務部門のエネルギー消費量とCO₂排出量が削減できることがわかった。また、マイクログリッドを総合的に評価する指標を作成し試算した結果、マイクログリッドは対象都市全体の総消費電力の8.4%を供給できること、マイクログリッド系統内の電力自給率は116%となり、分散型エネルギー供給システムが自立運転に適していることがわかった。

Key Words : microgrid, energy security, distributed generator, regional characteristics, new energy

1. はじめに

現在の日本では、電力を人里から離れた土地から、火力、水力、原子力発電所などの大規模な発電所で大量に生産し、遠方の生活圏へと送電する大規模集中型発電システムを中心に電力を供給している¹⁾。しかし、同システムでは、2006年8月14日に発生した東京大停電で広範囲の電力需要家が被害を被ったように、災害時・停電時などの、緊急時のエネルギーセキュリティが不安定であることが問題となっている。

また、日本は京都議定書²⁾の締約国であり、第一約束期間(2008年~2012年)に、温室効果ガスを1990年比で6%の削減が義務付けられているが、民生部門ではエネルギー消費量、温室効果ガス排出量ともに未だ増加傾向が続いており、民生部門における抜本的な温室効果ガス排出削減対策が求められている。

そこで、本研究では、都市域の民生業務部門における多様な電力・熱需要家、分散型電源、電力貯蔵装置を自営線で繋ぎ、電力を融通し合うことにより、リスク分散による緊急時のエネルギーセキュリティの確保や、分散型電源(コージェネレーション・自然・再生エネルギーシステム)によるエネルギーの効率的利用に伴う温室効果ガス排出削減などを実現できる、マイクログリッド³⁾を自治体主体で実在の都市に導入したケースを想定してシミュレーションを行い、導入に伴う対象地域のエネルギー需給バランスおよび温室効果

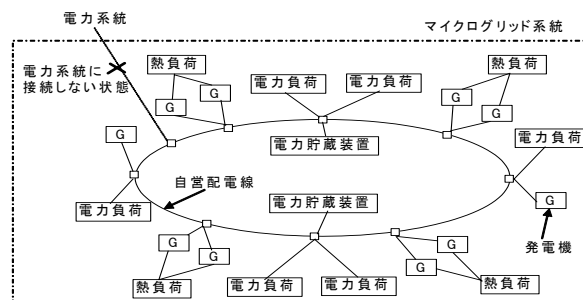


図-1 マイクログリッドの構成 (G: 分散型電源)

ガス排出量の変化を推計する。図-1 にマイクログリッドの構成を示す。

さらに、本研究で推計した結果に基づいて、対象となる地域の特性の相違により、マイクログリッドがどのような役割、意義を持つこととなり、どのような運転方法を取ることが効率的かなど、地域特性を考慮したマイクログリッド導入に関する総合評価を試みる。

2. 研究手法

(1) マイクログリッド導入対象エリアの設定

本研究では、大阪市を世帯数、土地利用状況、製造品出荷額などに基づいて地域特性の異なる4つのエリア分割した上で、これら4つのエリアに地域停電時や災害時などのエネルギーセキュリティの確保と環境負荷

低減を目的として構築するマイクログリッドを導入することを想定し、エネルギー需給バランスと温室効果ガス排出量の変化を推計する。導入対象エリア（図-2）の特徴は、以下の通りである。

- ◇**エリア1**：大阪市中央部に位置する、北区等、7区から成る、商業・業務中心地
 - ◇**エリア2**：大阪市西北部に位置する、淀川区等、6区から成る、阪神工業地帯を形成する工業中心地
 - ◇**エリア3**：大阪市南部に位置する、阿倍野区等、6区から成る、世帯数の多い住宅地中心地
 - ◇**エリア4**：大阪市東部に位置する、城東区等、5区から成る、他の地域と比べて特性が平均的な地域
- また、各々のエリアに導入したマイクログリッドを相互接続することにより、大阪市全体としてマイクログリッドを導入する意義についても考察する。

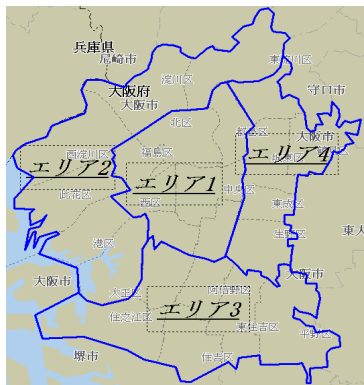


図-2 マイクログリッド導入対象エリア

(2)マイクログリッドに接続する分散型電源の種類と、設置場所の設定

本研究では、緊急時のエネルギーセキュリティの確保を主たる目的としたマイクログリッド構築を想定するため、災害時の救護施設(病院)や収容避難所となる施設(小中高等学校)への設置を想定する。さらに、温室効果ガス排出量の削減、未利用エネルギーの効率的利用、エネルギーセキュリティの更なる強化を目的として、大阪市の自治体管轄の都市基盤施設(ごみ焼却工場および下水処理場)に分散型発電源設備を設置する。表-1に分散型電源の種類と設置施設の詳細を示す。

表-1 マイクログリッドに接続する分散型電源の設置施設、種類および設置目的

設置施設	種類	設置目的
病院	コージェネレーションシステム	エネルギーセキュリティ・効率的エネルギー利用
学校	太陽光発電	防災拠点としての機能の強化
ごみ焼却工場	廃棄物発電	未利用エネルギーの有効利用
下水処理場	下水汚泥 消化ガス発電	未利用エネルギーの有効利用

(3)マイクログリッドに接続する需要家の設定

マイクログリッドに接続する需要家は、(2)の分散型電源の設置場所に連動し、災害時の救護拠点となる病

院、収容避難所となる学校、加えて東京大停電でも顕著な被害を被った地下鉄の駅舎と電車本体として、都市のエネルギーセキュリティの強化を図る。

各々の需要家の消費電力については、病院と学校は今枝らの原単位⁴⁾に基づいて、地下鉄の駅舎と電車本体は、大阪市交通局電力課の統計⁹⁾に基づいて算出する。

次章でマイクログリッド導入に伴うエネルギー需給バランスの変化およびCO₂排出量の削減効果を推計する。

3. 推計結果

(1)各発電方式によるエリア別の発電電力量

各発電方式により新たに発電される電力量の値を表-2および図-3に示す。

表-2 エリア別 各発電方式による発電電力量(TOE)

発電方式	エリア1	エリア2	エリア3	エリア4	大阪市全体
CGS	11,490	4,446	7,686	2,979	26,601
太陽光	294	358	444	317	1,414
廃棄物	0	36,253	25,982	18,521	80,756
消化ガス	626	1,041	3,342	1,223	6,232
合計	12,410	42,098	37,455	23,039	115,002

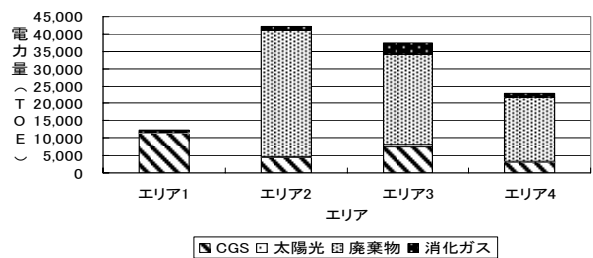


図-3 エリア別 各発電方式による発電電力量(TOE)

廃棄物発電による発電電力量が発電電力量合計の大部分を占めることから、ごみ焼却工場が多い工業中心地であるエリア2で発電電力量が最大となることがわかった。また、商業・業務中心地であるエリア1では、病院数の多さからコージェネレーションシステムによる電力量が11,490(TOE)と、比較的多く確保できることがわかった。

(2)各発電方式によるエリア別のマイクログリッド系統内融通電力量

融通電力量とは、エリア別の総発電電力量からごみ焼却工場と下水処理場で消費される電力量を減じた値であり、2. 研究手法の(3)で指定した需要家間で融通し合いながら消費できる電力量のことである。表-3および図-4に融通電力量を発電方式別に示す。

表-3 エリア別 各発電方式によるマイクログリッド系統内融通電力量(TOE)

発電方式	エリア1	エリア2	エリア3	エリア4	大阪市全体
CGS	11,490	4,446	7,686	2,979	26,601
太陽光	294	358	444	317	1,414
廃棄物	0	26,071	17,069	13,834	56,975
消化ガス	-263	148	129	-423	-410
合計	11,521	31,023	25,329	16,706	84,579

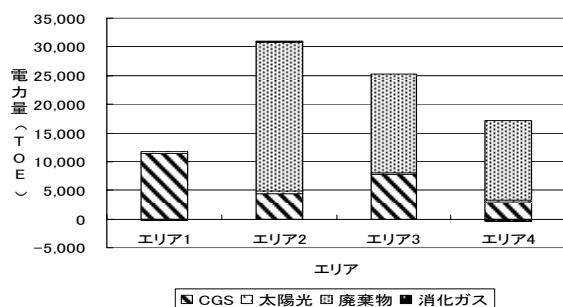


図-4 エリア別 各発電方式によるマイクログリッド系統内融通電力量(TOE)

下水処理場では大量の電力が消費されるため、消化ガス発電による融通電力量はエリア1とエリア4ではそれぞれ-263、-423(TOE)と負値になり、エリア2とエリア3においてもそれぞれ148、129(TOE)と低い値にとどまっていることから、下水汚泥消化ガスからの融通電力量は多くは期待できないことがわかった。

(3)マイクログリッドの導入に伴うCO₂排出削減量

マイクログリッドの導入に伴うCO₂排出削減量をエリア別・発電方式別に表-4および図-5に示す。なお、CO₂排出削減評価に適用する系統電力CO₂排出量原単位については、火力電源平均値 [7.8(t-CO₂/TOE)]⁶⁾と関西電力の全電源平均値 [3.0(t-CO₂/TOE)]⁷⁾の2通りの排出量原単位を考慮している。

表-4 エリア別 各発電方式によるCO₂排出削減量(t-CO₂)

発電方式	エリア1		エリア2		大阪市全体	
	火力平均	関電平均	火力平均	関電平均	火力平均	関電平均
CGS	34,608	-10,134	10,212	-6,059	74,515	-27,854
太陽光	2,042	639	2,485	778	9,807	3,068
廃棄物	0	0	58,180	22,577	216,140	83,875
消化ガス	4,874	1,891	8,109	3,147	43,619	13,151
合計	41,524	-7,603	78,987	20,443	344,081	72,240

発電方式	エリア3		エリア4	
	火力平均	関電平均	火力平均	関電平均
CGS	22,127	-7,767	7,567	-3,895
太陽光	3,083	964	2,196	687
廃棄物	65,901	25,574	92,058	35,724
消化ガス	26,035	6,327	4,602	1,786
合計	117,146	25,098	106,424	34,302

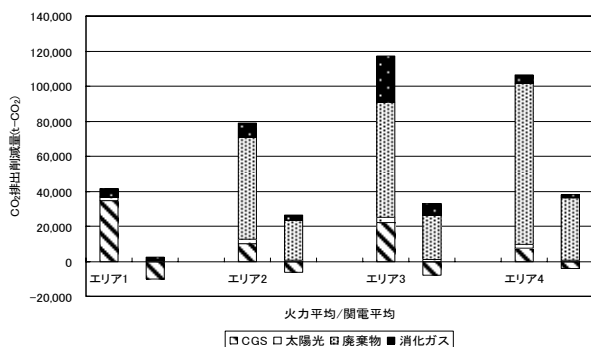


図-5 エリア別 各発電方式によるCO₂排出削減量(t-CO₂)

火力電源平均のCO₂排出量原単位を適用した場合は、いずれエリアにおいても大きな削減効果が見込めたが、

原子力発電シェアが比較的高い関西電力全電源平均のCO₂排出量原単位を適用した場合、CGSの導入がCO₂排出量の増加をもたらすこととなり、エリア1ではエリア全体のCO₂排出量が7,603(t-CO₂)増加する可能性を示した。

(4)マイクログリッド系統内の電力需要

エリア別のマイクログリッド系統内需要家別電力需要を表-5および図-6に示す。

エリア1では、病院や地下鉄路線の多さから、30,716(TOE)と電力需要量が4エリアの中では最大となり、大阪市全体のマイクログリッド系統内での電力需要の半分近くを占めることがわかった。

表-5 エリア別、マイクログリッド系統内需要家別の電力需要(TOE)

需要家	エリア1	エリア2	エリア3	エリア4	大阪市全体
病院	7,843	2,795	5,203	1,962	17,803
学校	2,086	2,538	3,148	2,243	10,016
地下鉄駅舎	9,204	3,714	3,391	1,776	18,084
地下鉄電車	11,584	4,674	4,268	2,235	22,761
合計	30,716	13,721	16,009	8,217	68,664

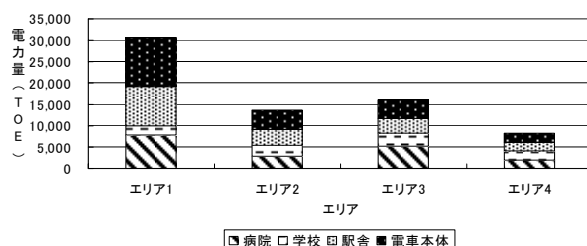


図-6 エリア別、マイクログリッド系統内需要家別の電力需要(TOE)

(5)マイクログリッドの導入に伴う民生業務部門エネルギー収支の変化

マイクログリッドの導入に伴う、エリア別民生業務部門のエネルギー収支の変化率を表-6に示す。

表-6 エリア別のマイクログリッドの導入に伴う民生業務部門エネルギー収支変化率(%)

エリア1	エリア2	エリア3	エリア4	大阪市全体
100.47	89.12	93.00	91.12	94.09

病院が多いことに加えてごみ焼却工場の無いエリア1では、CGSの導入によるエネルギー消費量の増加により、民生業務部門のエネルギー収支が0.5%の増加となったが、他のエリアではマイクログリッドの導入に伴う年間消費エネルギー削減効果が9.0%前後、大阪市全体では6.0%の削減が期待できることがわかった。

(6)マイクログリッドの導入に伴う民生業務部門CO₂排出の変化

マイクログリッドの導入に伴う民生業務部門CO₂排出変化率(現状に対する比率)を表-7に示す。

表-7 エリア別のマイクログリッドの導入に伴う

民生業務部門CO₂排出変化率(%)

	エリア1	エリア2	エリア3	エリア4	大阪市全体
火力平均	97.45	93.75	92.23	87.04	93.41
関電平均	100.47	98.38	98.34	95.82	98.62

火力電源平均のCO₂排出量原単位を適用した場合、全てのエリアにおいてマイクログリッドの導入に伴いCO₂排出削減効果が得られ、特にエリア4では13%削減と大きな削減効果が期待できる。しかし、関西電力全電源平均のCO₂排出量原単位を適用した場合は、CGSによる消費エネルギーの増加により、エリア1で0.5%のCO₂排出量増加となることがわかった。

4. マイクログリッドの総合評価

(1)マイクログリッドを評価する指標について

緊急時のエネルギーセキュリティの確保と環境負荷低減を目的としたマイクログリッドを対象エリア別に評価するために、以下の5つの指標を試算した。

a) エリア内電力供給率

エリア内電力供給率は、マイクログリッド系統内総発電電力量をマイクログリッド導入エリア内総電力消費量で除した値を百分率で示した値であり、マイクログリッドが導入エリアの総電力消費をどの程度供給することができるかを示す値である。

$$S_e = \frac{G_{mg}}{E_e} \times 100 \quad (1)$$

S_e : エリア内電力供給率(%)

G_{mg} : マイクログリッド系統内総発電電力量(TOE)

E_e : 導入エリア総消費電力量(TOE)

b) マイクログリッド系統内電力自給率

マイクログリッド系統内電力自給率は、系統内で発電された電力が、系統内の電力需要をどの程度自立供給できるかを百分率で示した値であり、マイクログリッド系統内の電力収支バランスを評価する指標である。

$$S_{mg} = \frac{G_{mg}}{E_{mg}} \times 100 \quad (2)$$

S_{mg} : マイクログリッド系統内電力自給率(%)

E_{mg} : マイクログリッド系統内総電力需要(TOE)

c) 面積あたり供給ポテンシャル

面積あたり供給ポテンシャルは、対象エリアがマイクログリッドにより面積あたりどの程度の発電電力量が期待できるのかを表した値であり、導入エリアがマイクログリッドによる電力供給にどの程度適しているかを評価する指標である。

$$SP = \frac{G_{mg}}{D} \quad (3)$$

SP : 面積あたり供給ポテンシャル(TOE/km²)

D : 導入エリア面積(km²)

d) 面積あたり消費ポテンシャル

面積あたり消費ポテンシャルは、マイクログリッド系統内の電力需要が導入エリアの面積あたりどの程度賦存するかを示す値であり、緊急時のエネルギーセキュリティを考慮して導入したマイクログリッドのエネルギーセキュリティの程度を評価する指標となる。

$$DP = \frac{E_{mg}}{D} \quad (4)$$

DP : 面積あたり消費ポテンシャル(TOE/km²)

e) 面積あたりCO₂排出削減ポテンシャル

面積あたりCO₂排出削減ポテンシャルは、マイクログリッド導入エリア面積あたりの、導入に伴うCO₂排出削減量を示す値であり、緊急時のエネルギーセキュリティを考慮して導入したマイクログリッドが温室効果ガス削減にどの程度寄与できるかを評価する指標である。

$$CP = \frac{Cco_2}{D} \quad (5)$$

CP : 面積あたりCO₂排出削減ポテンシャル(t-CO₂/km²)

Cco_2 : マイクログリッド導入に伴う総CO₂排出削減量(t-CO₂)

(2)マイクログリッド評価指標の算出結果

(1)で述べたマイクログリッド評価指標の算出結果をエリア別に表-8、図-7, 8, 9, 10に示す。

表-8 エリア別のマイクログリッド評価指標の算出結果

	エリア1	エリア2	エリア3	エリア4	大阪市全体	
面積(km ²)	44	72	69	36	221	
エリア内 電力供給率(%)	3.4	11.6	9.7	9.1	8.4	
マイクログリッド系統内 電力自給率(%)	39.3	169.8	133.1	158.3	116.1	
面積あたり 供給ポテンシャル(TOE/km ²)	281	584	546	640	521	
面積あたり 消費ポテンシャル(TOE/km ²)	696	190	233	228	311	
CO ₂ 排出削減 ポテンシャル (t-CO ₂ /km ²)	火力平均	941	1,095	1,706	2,959	1,558
	関電平均	-172	283	366	954	327

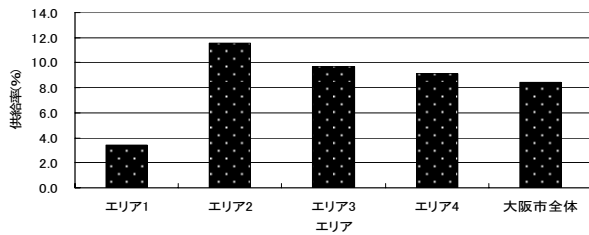


図-7 エリア別のエリア内電力供給率

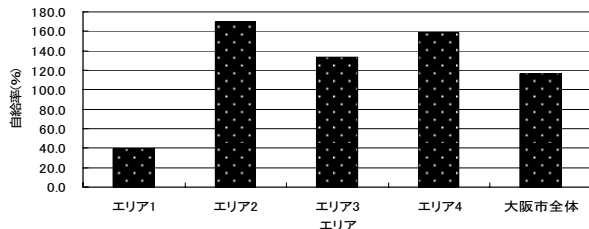


図-8 エリア別のマイクログリッド系統内電力自給率

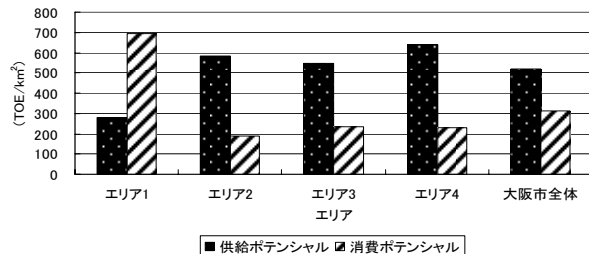


図-9 エリア別の面積あたり供給・消費ポテンシャル

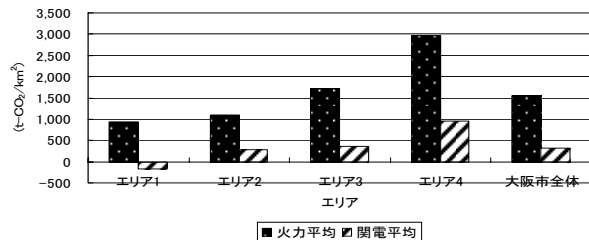


図-10 エリア別の面積あたりCO₂排出削減ポテンシャル

- a) 商業・業務中心のエリア1では、ごみ焼却工場や下水処理場などが無く、電力自立供給が見込める廃棄物発電や下水污泥消化ガス発電による電力供給を確保することができないことから、発電電力量が多くは得られず、供給率3.4%、自給率39.3%、供給ポテンシャル281(TOE/km²)といずれも低い値を示した。一方で、消費ポテンシャルは696(TOE/km²)と大きな値を示すことから、災害時や停電時に最もエネルギーセキュリティが問題となるエリアであることがわかった。エリア1のような地域では、自給率が100%を越える他の地域のマイクログリッドと連係を行うなどの対策をとる必要がある。CO₂排出削減ポテンシャルについては、火力電源平均のCO₂排出量原単位を用いた場合はCO₂排出量の削減効果が得られるが、関西電力全電源平均のCO₂排出量原単位を用いた

場合には、172(t-CO₂/km²)のCO₂排出量増加の可能性があった。

- b) 阪神工業地帯の一角を形成するエリア2では、供給率11.6%、自給率170%と、4つのエリアの中で最大の値を示した。ごみ焼却工場が4つのエリア中、最も多いことから供給ポテンシャルも584(TOE/km²)と大きい値を示した。一方で、消費ポテンシャルが190(TOE/km²)と比較的低い値を示すので、エネルギーセキュリティ的に最も安定していることから、余剰に発電された電力をエリア1のようなエネルギーセキュリティ的に不安定なエリアに供給するというマイクログリッドの運転方法が適している。
- c) 住宅地中心のエリア3では、いずれの評価指標も平均的な値を示した。自給率が133%となり、4つのエリアの中で最も100%に近い値を示すことから、需給バランスが良いということも言える。また、学校数が多く、消費ポテンシャルが233(TOE/km²)と比較的大きいので、エリア1に次いでエネルギーセキュリティ的な問題を孕むが、エリア内で電力自給が可能であることから、災害時に避難拠点となることにおいて適したエリアであると考えられることもできる。このような特徴を踏まえて、エリア3は、マイクログリッドの自立運転に非常に適しているエリアであることがわかった。
- d) 他のエリアと比較し、地域特性に大きな特徴の無いエリア4は、面積あたりの都市基盤となる施設の多さから、供給ポテンシャルが640(TOE/km²)と最大の値を示した。さらに、大阪市内で唯一、現在まで廃棄物発電を行っていないごみ焼却工場である森之宮工場に廃棄物発電を導入したことが大きく影響し、CO₂排出削減ポテンシャルは火力電源平均の原単位を適用した場合で2,959(t-CO₂/km²)、関西電力全電源平均の原単位を適用した場合でも954(t-CO₂/km²)と、2番目に高いCO₂排出削減ポテンシャルを示したエリア3の火力電源平均の原単位を適用した場合の2倍近く、関西電力全電源平均の原単位を適用した場合の3倍近くの値を示すことから、温室効果ガス削減を主たる目的としたマイクログリッドの導入に適したエリアであることがわかった。
- e) 4エリアのマイクログリッドを相互接続し、大都市圏である大阪市全体へのマイクログリッド導入を想定した場合、市内の総電力消費の8.4%を供給することがわかった。また、マイクログリッド系統内自給率は116%となり、需給バランスがうまくとれることに加えて、消費ポテンシャルも311(TOE/km²)と高い値を示すことから、大阪市全体としてもマイクログリッドの自立運転に適していることがわかった。また、CO₂排出削減ポテンシャルについては、火力電源平均の原単位を適用した場合で1,558(t-

CO₂/km²), 関西電力全電力平均の原単位を適用した場合で327(t-CO₂/km²)という値を示すことから, 温室効果ガスの削減にも寄与できることがわかった。

表-9に地域特性別のマイクログリッド評価の総括を示す。

表-9 地域特性別のマイクログリッド評価の総括

総合評価	
地域特性	エリア1 (商業・業務 中心地域)
	①低い供給率と自給率 ②緊急時のエネルギーセキュリティが不安定 ③エネルギーセキュリティ面を考慮した導入必要性が高いが、他の地域からの供給が必要
	エリア2 (工業 中心地域)
	①高い供給率と自給率 ②緊急時のエネルギーセキュリティが安定 ③エネルギーセキュリティ面を考慮した導入必要性が低いが、他の地域への供給に最適
	エリア3 (住宅地 中心地域)
地域特性	①バランスの取れた自給率 ②緊急時のエネルギーセキュリティがやや不安定 ③マイクログリッドの自立運転に適する
	エリア4 (平均的特性 を持つ地域)
	①高いCO ₂ 排出削減効果 ②温室効果ガス削減目的での導入に適する
	大阪府全体 (大都市)
地域特性	①バランスの取れた自給率 ②緊急時のエネルギーセキュリティがやや不安定 ③マイクログリッドの自立運転に適する ④温室効果ガス削減目的での導入に適する

5. まとめ

本研究では, 多様な地域特性を持つ都市エリアを対象として, リスク分散による緊急時のエネルギーセキュリティの確保を目的とした分散型エネルギー供給システムであるマイクログリッドの導入に伴うマイクログリッド系統内の発電電力量や電力需要, さらにはCO₂排出削減量を推計した結果, 地域特性により発電電

力量, 電力需要, CO₂排出削減量の傾向が大きく異なることを確認した。また, マイクログリッドを総合的に評価する指標を試算することにより, 本研究で想定したマイクログリッドは, 地域特性に応じてエリア内電力需要の3.4~11.6%を供給できることを示し, 導入地域の緊急時におけるエネルギーセキュリティの程度や, 地域特性に応じたマイクログリッドの運転方法について考察することができた。

加えて, 様々な特性を持つ地域のマイクログリッド同士を相互接続した場合, すなわち, 大都市圏全域にマイクログリッドを導入したケースについても, マイクログリッド系統内の需給バランスが適切に確保できるとともに, 大規模集中型の系統電力システムへの依存度を減らした自立運転が可能であることも示した。

参考文献

- 1) 井熊均: 分散型エネルギー, 2004.
- 2) 第3回気候変動枠組条約締約国会議(COP3): 気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書, 1997.
- 3) SMART研究会: 地域分散エネルギー技術, 2004.
- 4) 今枝寿哉・柳美樹: 民生部門のエネルギー消費実態調査について, 2004.
- 5) 大阪市交通局電力課: 地下鉄 駅舎・電車 年間電力消費量, 2006.
- 6) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO): エネルギー源別CO₂排出量原単位
(<http://www.nedo.go.jp/nedata/12fy/13/h/0013h001.htm>).
- 7) 環境省: 参考資料 温室効果ガス排出係数(デフォルト値).
(<http://www.env.go.jp/earth/>).

COMPREHENSIVE EVALUATION OF DISTRIBUTED ENERGY SYSTEM DESIGNED FOR CONTINGENCY RESPONDENCE AND ENVIRONMENTAL LOAD REDUCTION

Hiroaki TAMARU and Koji AMANO

We estimated the balance of energy supply and demand and the reduction potential of greenhouse gases (GHGs) emission in the case of introduction of distributed energy supplying system (microgrids) into the urban areas with variable regional characteristics. Microgrids could be designed for energy security and GHGs reduction by utilizing co-generation, natural energy and recycled energy. Those estimations indicated reduction possibilities of primary energy consumption and GHGs emission by the business sector in many areas. Based on the experimental indicators to evaluate microgrids comprehensively, we confirmed that microgrids would be able to supply 8.4% of the total electric consumption in the whole urban region, also that distributed energy supplying system would be suitable in operating independently taking account of 116% as the electric self-supply ratio in microgrids.