

CO₂排出制約下における地域内自給型 エネルギーシステムの設計

岩川 貴志¹・内藤 正明²

¹正会員 工修 循環共生社会システム研究所 (606-8386 京都市左京区新丸太町 42)

²正会員 工博 循環共生社会システム研究所 (606-8386 京都市左京区新丸太町 42)

気候変動の抑制という観点から持続可能な社会の構築を試みた時、人間活動に由来する温室効果ガス排出量は先進国の場合 50～80%程度の大規模な削減が必要と考えられている。本研究は地域内資源による民生部門エネルギーの自給という限定した対象内で、社会活動に伴う化石資源由来 CO₂ 排出量の大幅削減を目指した時の技術システムの在り方を模索する為の基本的考察を行うものである。エネルギー需給に関して「充足度」という概念を組み込み、大幅な CO₂ 排出削減はどの程度のエネルギー消費水準下で達成可能か、またコストとの関係は如何なるものとなるか、等について考察を行う。

Key Words : self-sufficient energy, CO₂ emission, degree of sufficiency, cost evaluation

1. はじめに

今年(2005年)2月に「気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書」が発効され、温室効果ガス排出による人為的気候変動抑制への取り組みはようやく国際的に足並みを揃える段階に至った。しかし日本国内における温室効果ガス排出量は今日に至るまで増加の一途をたどっており、議定書の目標達成に向けての課題は依然として未解決のままである。また、最終的に人類の社会活動が気候変動に影響を及ぼさない、「持続可能な発展」を実現するに至るにはさらに大幅な温室効果ガスの削減が求められ、先進国においては一人あたり 50～80%程度の削減率を課すことが必要と考えられている。これを踏まえた上で最近では、京都議定書の発効を契機に、21世紀中盤以降を視野に入れた更なる気候変動防止策に対する議論が活発となりつつある。

それに伴い、現状の社会構造、産業構造における温室効果ガスの排出量を大幅に削減するためには、これまでの主流であった技術効率の改善や、低環境負荷型の新技術の開発、導入のみでは不十分とも考えられるようになり、我々のライフスタイルや社会システム自体の在り方なども含めた、「ハードウェア」と「ソフトウェア」の複合的なアプローチが必要とも言われている。

本研究はこれらの議論を踏まえ、社会システムを変革した上での環境調和型技術システムの在り方として、「地域内部に存在する資源・エネルギー源を地域内部で有効活用する、地産地消型のコンパクトサイズの技術・社会システム」を想定し、持続可能な環境負荷水準におけるシステムの具体像を描くための基本概念を提案する

ものである。

システム設計並びに評価の具体例として、本研究では民生部門におけるエネルギー消費に対象を限定し、地域内に存在する自然エネルギー、バイオマスエネルギーを積極的に活用した時の CO₂ 排出量削減の可能性、また大幅な CO₂ 排出量削減が制約として課せられたとき、地域内部のエネルギーシステム、そして我々のエネルギー消費水準はどのように改めることが必要か、コスト評価を含めながら考察を行う。

2. 地域内自給型エネルギーシステムの概要

(1) 概要

本研究で想定するシステムは、地域レベルでの民生部門のエネルギー消費について、地域内部の資源、エネルギー源を有効活用する技術を組み合わせることで化石資源由来の CO₂ 排出量の削減を目指すものである。

定量的評価の実施にあたり地域内部の各種、各用途のエネルギー需給関係を組み合わせることで全体を一つのシステムとして扱い、需要-供給のマッチング等のシステム成立要因を考慮した上で CO₂ 排出量の最小化、需要の最大化などの最適化計算を行うことによる適切なシステム設計を目的とする。

(2) システムの対象範囲

民生部門のエネルギー需要は、その用途から「暖房」「冷房」「調理」「給湯」「動力」に大別される。本研究でも需要はこれら5種に区別し、個々の要素技術と家庭や事業所における需要を関連づける。

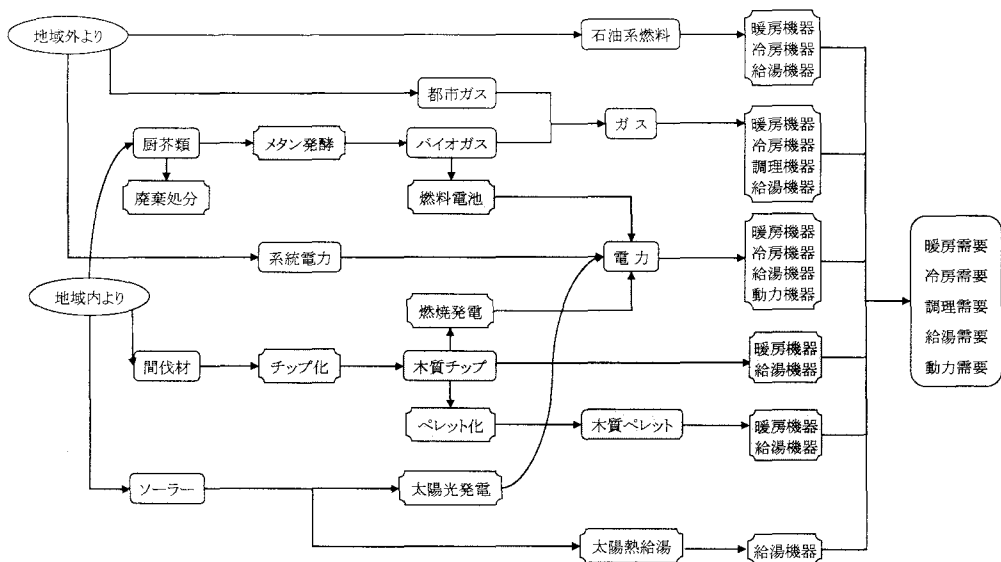


図-1 評価対象とするエネルギーシステムのフロー図

要素技術としては地域内に賦存するエネルギー源を活用するものとして、

- 厨芥類のバイオガス化による燃焼熱利用または燃料電池発電
- ソーラーエネルギーを用いた太陽光発電または太陽熱給湯
- 間伐材（大半は未間伐状態）のチップ化による燃焼発電または燃焼熱利用
- 上記間伐材チップのペレット化による燃焼熱利用

を対象とし、発生・採取から加工、エネルギー転換、需要に至るまでの各々のプロセスを図-1 のように一つのシステムとして連結させる。図-1 中のブローチ型の四角形は地域内部に組み込まれる各種技術プロセス、角丸四角形は各プロセスの間でやりとりされる資源・エネルギーを示している。また技術プロセスのうち白色のものは現段階で既に導入されているもの（規模は問わず）、灰色のものは評価に当たって新規導入を想定するものである。

(3) システムモデルについて

対象範囲内のエネルギー需給に伴う各プロセス i における CO_2 排出原単位を $\varepsilon_i(\text{t-C/unit})$ 、エネルギー（源）の投入または生産量を $x_i(\text{unit/yr})$ とすることで総 CO_2 排出量 $E(\text{t-C/yr})$ を、

$$E = \sum_i \varepsilon_i \cdot x_i$$

の式で表現する。また現状における対象範囲内の総 CO_2 排出量を $E_0(\text{t-C/yr})$ とすると、 CO_2 削減率 $R(\%)$ は、

$$R = \frac{E_0 - E}{E_0} \times 100$$

である。

エネルギー需給に伴うコスト、 $C(\text{yen/yr})$ については、スケールメリットを考慮してコスト係数 c_i 、スケール乗数 α_i を用いて、

$$C = \sum_i c_i \cdot x_i^{\alpha_i}$$

と表現できるようにパラメータを設定する。

また各プロセスにおける各種エネルギー・資源のインプット・アウトプットについても収支関係を数式化し、さらにシステムの成立要因として、

- ・厨芥、ソーラー、間伐材の利用量は発生・賦存量を超過しない（ポテンシャル制約）
- ・各プロセスを経て供給される用途別エネルギー量が需要を超過しない（需給マッチング）
- ・石油系燃料、都市ガス、系統電力の使用量は現状値を超過しない（化石資源の消費上限）

などについても同様に制約条件式を設定する。

(4) 「充足度」の定義

システム中におけるエネルギーの需給状況を示す指標として、ここでは「充足度」を定義する。

充足度 S は、

$$S = \frac{1}{5} \left(\frac{s_1}{D_1} + \frac{s_2}{D_2} + \frac{s_3}{D_3} + \frac{s_4}{D_4} + \frac{s_5}{D_5} \right)$$

s_5 : 動力エネルギー供給量 (Gcal/yr)

D_1 : 現状における暖房エネルギー需要 (Gcal/yr)

D_2 : 現状における冷房エネルギー需要 (Gcal/yr)

D_3 : 現状における調理エネルギー需要 (Gcal/yr)

D_4 : 現状における給湯エネルギー需要 (Gcal/yr)

D_5 : 現状における動力エネルギー需要 (Gcal/yr)

と定義し、各種用途のエネルギー需要が不足なく満たされた時、最大値 $S = 1.0$ となる。

3. 地域データを用いたシステム評価の概要

(1) 対象地域について

今回は試算にあたって、人口 5 万人弱の小規模都市である T 市を対象としデータ収集ならびにエネルギー需給に関連するパラメータの設定を行った。表-1 に T 市に関する主な統計値を記す。

表-1 計算に用いた T 市の主な諸元

項目	数値	参照元
人口 (人)	46,651	T 市統計資料 ¹⁾
世帯数 (世帯)	15,866	同上
事業所床面積 (m ²)	533,382	同上より推算
森林面積 (ha)	10,886	2000 年世界農林業センサス

(2) 対象地域における現況の把握

a) エネルギー需要

民生部門総エネルギー需要のうち家庭部門は世帯あたり、業務部門は床面積あたりの用途別・リソース別エネルギー消費量 ((財) 日本エネルギー経済研究所による 2000 年度の値²⁾) を基に、表-1 の世帯数・事業所床面積を乗じ、かつ需要端におけるエネルギー機器のエネルギー効率を想定し乗することで正味のエネルギー需要とした。表-2 に T 市における用途別エネルギー需要の推定値を記す。

表-2 対象地域における民生部門用途別エネルギー需要

用途	需要量 (Gcal/yr)
暖房	95,535
冷房	60,342
調理	10,966
給湯	65,135
動力	124,942
合計	356,919

b) エネルギー源の発生・賦存量

今回の試算対象とするエネルギー源、厨芥、ソーラー、間伐材の地域内での発生・賦存量に関しては表-1 の値を元に、各々表-3 のようにして年間量を推定した。T 市における各種エネルギー源の発生賦存量を表-4 に示す。

表-3 対象地域におけるエネルギー源発生・賦損量の算出方法

エネルギー源	推定方法
厨芥発生量	人口より推定 (家庭系・事業系厨芥共に)
ソーラーエネルギー可採量	家庭部門：世帯数より推定 (戸建住宅のみ対象とする) 業務部門：事業所床面積より推定
間伐材賦存量	森林面積より推定

表-4 対象地域におけるエネルギー源発生・賦損量

エネルギー源	数値
厨芥発生量 (t/yr)	11,769
ソーラー可採量 (Gcal/yr)	464,048
間伐材賦存量 (t/yr)	17,466

c) CO₂ 排出量

家庭部門・業務部門それぞれについて求められた現状の用途別・リソース別エネルギー消費量より、各エネルギー源に応じた CO₂ 排出原単位 (太陽熱利用については割愛) を掛け合わせることでシステム由来の現状の CO₂ 排出量を推定する。T 市における民生部門エネルギー消費由来の CO₂ 排出量を表-5 に記す。

表-5 対象地域における現状の CO₂ 排出量

	CO ₂ 原単位 (t-C/Gcal)	消費量 (Gcal/yr)	CO ₂ 排出量 (t-C/yr)
石油系燃料	0.0775	91,681	7,062
都市ガス	0.0721	80,441	5,795
系統電力	0.150	146,866	22,030
太陽熱	0.0	4,767	0
合計		323,755	34,887

※各種 CO₂ 原単位について、

石油系燃料：灯油で代表、エネルギー経済研究所による

都市ガス：エネルギー経済研究所による

系統電力：土木学会 LCA 研究小委員会推奨値より換算

4. 試算の結果

(1) 現状レベルのエネルギー需要における CO₂ 排出量の最小化

図-1 に示すシステムにおいて、現状のエネルギー需要を満たしつつ CO₂ 排出量の最小化を図ったときの削減率ならびにシステム構成を求める。

即ち、システム成立のための各種条件式に加え、

制約条件： $S = 1.0$

目的関数： $R \rightarrow$ 最大化

を求める最適化問題を解くことにより、

$$R_{max} = 32 \text{ (\%)}$$

と求められた。即ち、今回想定したシステム下では、現状と同レベルのエネルギー需要を維持した場合 CO_2 排出量は 32% まで削減可能となる。

CO_2 削減量最大時の詳細結果の例として、表-6 に化石資源エネルギーの消費量の変化とその内訳、表-7 に用途別エネルギー需要の内訳、表-8 に地域内のエネルギー源利用状況とその利用内訳を記す。

表-6 $S = 1.0$ かつ CO_2 排出量最小時の従来型エネルギー消費構成

	現状 (Gcal/yr)	CO_2 最小時 (Gcal/yr)	
石油系燃料	91,158	76,629	(84%)
都市ガス	80,372	12,171	(15%)
系統電力	146,865	109,164	(74%)

※ 括弧内は現状比

表-7 $S = 1.0$ かつ CO_2 排出量最小時のエネルギー需要構成

	現状 (Gcal/yr)	CO_2 最小時 (Gcal/yr)
暖房需要	95,535	95,535
うち石油	53,040	0
うちガス	13,818	0
うち電気	28,676	95,535
うちチップ	0	0
うちペレット	0	0
冷房需要	60,342	60,432
うち石油	1,707	0
うちガス	2,934	0
うち電気	55,701	60,432
給湯需要	65,135	65,135
うち石油	25,939	65,135
うちガス	33,718	0
うち電気	2,856	0
うち太陽熱	2,622	0
うちチップ	0	0
うちペレット	0	0

CO_2 削減率最大時のシステムに係る総コストとその内訳を表-9 に記す。システム全体に係る総コストは現状と比較して 46% 増加しており、冷暖房に係るエネルギー供給が全面的に電力にシフトした (表-7 参照) ため、単位エネルギー量あたりの生産コストが高い太陽光発電を極力活用していることが大きな要因と考えられる。

表-8 $S = 1.0$ かつ CO_2 排出量最小時の地域内エネルギー源の利用内訳

厨芥発生量 (t/yr)	11,769
うちバイオガス化	11,769
バイオガス生産量 (Gcal/yr)	7,768
うち燃焼熱利用	7,768
うち燃料電池投入	0
間伐材賦存量 (t/yr)	17,466
うちチップ化	17,466
チップ生産量 (t/yr)	10,916
うち燃焼発電	10,916
うち燃焼熱利用	0
うちペレット化	0
ソーラー可採量 (Gcal/yr)	464,048
うち太陽光発電	464,048
うち太陽熱給湯	0

表-9 $S = 1.0$ かつ CO_2 排出量最小時の総コスト内訳

	現状 (10^6 yen/yr)	CO_2 最小時 (10^6 yen/yr)
石油系燃料	512	431
都市ガス	1,045	158
系統電力	3,928	2,919
厨芥廃棄	235	0
太陽熱給湯	49	0
太陽光発電		3,499
バイオガス		681
燃料電池		0
間伐材チップ化		578
燃焼発電		131
ペレット化		0
総コスト (現状比)	5,769	8,396 (+46%)

(2) CO_2 排出量を制約条件とした充足度の最大化

前節の結果より、本研究で想定したシステム下では CO_2 排出量を持続可能な水準まで削減するためには、技術的なアプローチのみでは不十分である可能性が高い。より大幅な CO_2 削減の為に、他の低環境負荷型エネルギー生産技術を組み込む、新たなエネルギー源の確保などを図る、等の対策が考えられるが、現状のエネルギー消費水準が高いために様々な技術的対策を講じても十分な効果が得られないことも予想される。そこで本研究では、地域内のエネルギー需要を根本的に減少させることによる削減効果を視野に入れたシステム設計を実施する。

前節における制約条件と目的関数の関係を置き換え、 CO_2 削減率を $X\%$ とし、

制約条件： $R = X$

目的関数： $S \rightarrow$ 最大化

という最適化問題を解くことで、特定の CO_2 削減制約

下における、最も効率的なエネルギー供給システムを求める。図-2に、CO₂削減率 X を変動させたときの充足度最大値と、そのときの総コストをグラフにて示す。なお、 $X < 32(\%)$ の範囲内では充足度 1.0 を満たすシステム構成が一意ではないため、

制約条件： $S = 1.0$

$R = X$

目的関数： $C \rightarrow$ 最小化

により求められるコスト最小値を示した。また参考として表-10に、CO₂削減率 $X = 50(\%)$ と $X = 80(\%)$ のときの充足度最大値と総コストを記す。全般的に充足度最大値は、CO₂削減制約が厳しくなるにつれ著しく低下する傾向にあり、総コストは充足度 = 1.0 かつ CO₂削減率最大の 32% をピークに、充足度減少（即ちシステムのスケール自体が縮小する）に伴って 90% 程度まで緩やかな減少を示しており、削減率 80% 程度の時点で総コストは現状とほぼ同額となる。

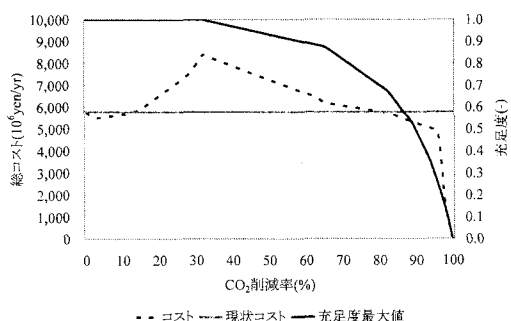


図-2 CO₂削減率と充足率、コストの関係

表-10 CO₂削減制約下の充足度最大値と総コスト

CO ₂ 削減率	充足度最大値	総コスト (10 ⁶ yen/yr)
50%	0.93	7,280 (+26.2%)
80%	0.70	5,803 (+0.6%)

※ 括弧内は現状比

(3) CO₂排出制約下における充足度とコストの関係

図-2に示した結果は、設定した CO₂削減率の下で最も効率的にエネルギー供給可能なシステムを求めたものであり、結果的に最も高コストなシステムを選択したのとなっている。実際には一定の CO₂削減率を達成する上では、より環境負荷の低い技術を積極的に導入するか、あるいは根本的な需要低減によりシステムスケール自体を縮小するか、それぞれの度合いに応じた選択の

幅が生じるため、充足度とコストは CO₂削減率から一意に定まるものではない。

図-3に、「CO₂削減率 30%」「CO₂削減率 50%」「CO₂削減率 80%」という制約条件下における充足度とコストの関係を示す。各々の線はシステム成立のための各種条件式に対し、

制約条件： $R = X$

$C = Y$

目的関数： $S \rightarrow$ 最大化

という最適化問題を一定の CO₂削減率 $X(\%)$ の下で総コスト $Y(\text{yen/yr})$ を変動させることで求めたものである。ここで各々の線の最上端に位置する点が、図-2の値と一致しており、実際には同一の CO₂制約条件下において、多くのエネルギーを得るために多くのコストを投入するか、あるいはコスト負担を軽減するために需要を低減させるための対策を優先するかをコストー充足度の関係より判断することになるであろう。

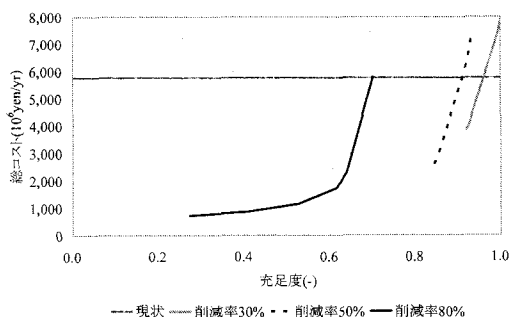


図-3 CO₂削減率と充足率、コストの関係

5. まとめ・今後の展開

(1) まとめ

本研究では民生部門に係る地域内自給型のエネルギー利用について、対象地域内でのエネルギー需給体系をひとつのシステムとして捉えることにより、持続可能な社会を実現させるための地域レベルでの取り組みの在り方についての考察を行った。

システム評価事例として、T市におけるデータを基に CO₂削減率、充足度、コストを定量化した上で相互の関係を把握した。結果として、地域内に存在するエネルギー源を積極的に利用するだけでは、現状を大きく上回るコストを投入しても持続可能な水準まで CO₂排出を削減できない可能性が高いことが示された。従って大幅な CO₂削減目標を達成させる為には、地域社会自体が現状より低いエネルギー消費水準で活動可能な形に改め

ていくことが必要であると考えられる。具体的には、住民の日常生活に関する居住形態やライフスタイルなどの見直し、省エネルギーを前提とした街作りなど、技術的側面だけではなくソフト面のアプローチを積極的に組み込んでいくことが求められるであろう。

また一定の CO₂ 削減目標下において地域社会が取りうる対策には、コストをかけつつより多くのエネルギー需要を満たすか、あるいは需要を低減することでコスト負担を低く抑えるか、という選択の幅が生じる。従って実際にこのようなシステムを検討する場合には、地域全体としてどこまでのコスト負担が可能か、また地域住民の協力によりどこまでエネルギー需要を減少させることが出来るかを見極めながら、個々の地域に応じたシステム設計を行うことになるであろう。

(2) 今後の展開

今回の試算は、T 市という対象地域の中の民生部門のエネルギー消費という、社会活動全体のうち一部分の要素に対して厨芥、間伐材という地域内に存在する主立った資源を可能な限り利用するという想定下で求められたものであり、CO₂ 排出のより大きなウエイトを占める産業部門や、厨芥のコンポスト利用や間伐材の建材利用などに代表されるエネルギー用途以外へのバイオマス

の活用性などを考慮した上で再評価を行うと、CO₂ 排出量の制約下で維持可能な充足度はさらに低下することが予想される。また今回の試算では厨芥の分別回収の不徹底や間伐材の伐出時の労力不足、あるいは新規施設用地の立地条件など、主に社会的側面から生じる地域固有の条件などを一切考慮していない点なども今後の課題として挙げられる。

これらの課題を組み込んだ上で、今後はエネルギー需給に限定されない CO₂ 大幅削減社会を構築するための循環型・自立型の地域システムを統合的に構築するシステムへと高めていくことが必要である。

謝辞： 本稿における研究は、財団法人地球環境戦略研究機関「産業と持続可能社会プロジェクト」の一部として実施したものであり、この場を借りプロジェクト関係者各位への謝意を表させていただきます。

参考文献

- 1) T 市統計書 (平成 15 年版), 2004.
- 2) 日本エネルギー経済研究所計量分析部編：エネルギー・経済統計要覧 (2005 年版). 財団法人省エネルギーセンター, 2005.

DESIGN OF SELF-SUFFICIENT ENERGY SYSTEMS IN REGIONAL TOWNS AND CITIES

Takashi IWAKAWA, Masaaki NAITO

Attempting to achieve the "Sustainable Society" in the view of climate change mitigation, developed countries should reduce their GHG (greenhouse gas) emissions less than 50% of current level. This study makes basic considerations how locally-owned technology systems should be to reduce a significant amount of CO₂ emission from fossil fuels in the limited aspect, self-sufficient energy system in civilian sector. It is focused how energy consumption level should be decreased to make a drastic CO₂ reduction possible and how the systems have effects on cost increasing and decreasing, defining "degree of sufficiency" as an indicator of energy consumption level.