

火力発電所排熱を活用した 街区群エネルギーシステムの低炭素性評価

戸川 卓哉¹・藤田 壮²・平野 勇二郎²・藤井 実²・大西 悟²

¹正会員 国立環境研究所 社会環境システム研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)
E-mail:togawa.takuya@nies.go.jp

²正会員 国立環境研究所 社会環境システム研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

本研究では、地域に賦存する未利用熱源の活用方法を検討するためのフレームワークについて検討した。特に火力発電所の排熱に着目し、周辺区域の土地利用計画・エネルギーシステム計画を含めた評価方法を構築することに主眼がある。そのため、排熱を活用した地域エネルギーシステム導入時のコスト・CO₂排出量のポテンシャルマップを導出し、既存システムと比較することで、導入効果を街区群レベルで評価した。それらの結果を、土地利用情報や災害リスク情報等と重ね合わせることで、地域の将来象に関する代替案を設計するプロセスを示し、導入効果を具体的に定量評価することで、提案フレームワークの有用性について検証した。

Key Words : land use planning, unused heat energy, regional energy system, CO₂ mitigation, GIS

1. はじめに

エネルギー制約や環境制約が顕在化する中、地域に賦存する未利用エネルギーを無駄なく利用することが求められている¹⁾。特に発電所等に賦存していることが指摘されている熱エネルギーは、総量が多い一方、熱導管の敷設が必要となったり、搬送ロスが発生するなど、利用可能となる範囲が空間的な制約を受けることから、都市計画的な手法（熱エネルギーを多く需要する施設を近隣に誘致する等）と連動した活用方法の検討が必要である。

また、東日本大震災以降、原子力発電所の稼働が制限されていることから、火力発電への依存が急激に高まっている。図-1に資源エネルギー庁により公表されている原動力別の発電実績のデータを時系列で整理した結果を示す。火力発電所の発電実績が2010年以降に急増していることが確認できる。このことは、電気料金の値上げや環境負荷の増加を引き起こしており、特にコスト抑制の観点から、石炭火力発電所を増設する動きが活発になっている。しかしながら、LNG火力発電所と比較して石炭火力発電所の発電効率が低いことから、低炭素性能の向上を実現する、さらなる工夫が求められている。火力発電所の低炭素化を実現する方法の一つに、排熱エネルギーの融通を通じた地域との連携が考えられる。図-2にそのイメージを示す。

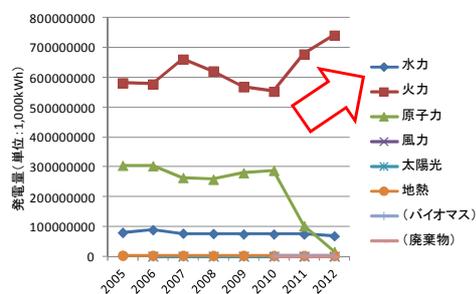


図-1 原動力別の発電実績

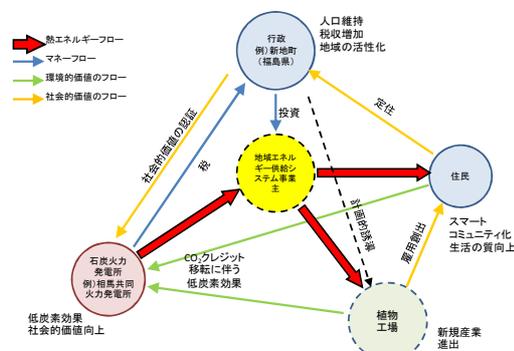


図-2 火力発電所と地域の連携

本研究では、石炭火力発電所の排熱を有効活用する方法を周辺地域の土地利用計画を含めて検討するためのフレームワークを検討する。さらに、そのためのシミュレーションモデルを構築し、実都市を対象としたケーススタディからその有効性について検証する。

2. 既往研究と本研究の位置付け

(1) 都市計画における未利用エネルギー活用計画の位置付け

これまでの都市計画立案プロセスにおいて、未利用エネルギーや再生可能エネルギーの導入計画は主題として取り扱われることは少なく、他の計画に比べて後段で議論されることが多かった。つまり、例えば、快適性・利便性や安全性もしくは歴史性といった観点からプランが決定された後、その計画を所与としたエネルギー需給状況に基づき、未利用エネルギー・再生可能エネルギーの活用方法が検討されるというプロセスが都市計画立案の主流であった。

(2) 未利用エネルギー活用方法に関する既往研究

このような状況を反映して、既往研究^{2) 3) 4) 5) 7)}では、未利用エネルギー・再生可能エネルギーを活用した地域エネルギー供給方策の分析を実施しているが、現況の土地利用（需要パターン）を基準とした活用策の検討に主眼がある。例えば、下田ら⁶⁾では、清掃工場の排熱を地域と連携させることによる低炭素効果が検討されており、池上ら⁷⁾では、下水排熱の既存市街地での利用方法に関する検討が行われている。

これらの研究では、未利用エネルギーを既存の需要に充当することによる低炭素効果が検討されているが、エネルギー有効活用の観点から都市をどのように再構築すべきかという議論は行われていない。

しかしながら、長期的な観点からは、熱エネルギーの賦存状況に応じて周辺地区を適合する用途に変更することが可能であり、特に火力発電所のように大規模な熱源が賦存する地域においては、低炭素・低コスト等の観点から、そのような可能性についても検討されるべきである。

近年では、災害リスクや自然環境保全の観点と同様に、再生可能エネルギーの利用可能性を住宅地開発における適地選定に考慮することの重要性についての指摘⁸⁾や、バイオマス賦存量を評価することで、発電所適地の選定に関する検討⁹⁾が行われている。このような検討は、エネルギー供給特性に合わせて、土地利用を計画することの重要性に関する指摘であるが、多様な土地利用パターンを考慮した検討は十分に行われていない。

(3) 本研究のアプローチ

未利用エネルギーを有効活用するためには、小地区ごとの熱エネルギーの利用可能性を明らかにし、ポテンシャルの高い地区ではエネルギー集約型産業を誘致するなど、特性に適合した土地の活用方法を検討する必要がある。しかしながら、都市空間の構造を規定する要因はエネルギー以外にも多岐に渡るため、多面的な観点を考慮する必要がある。

したがって、エネルギー計画と都市計画を基幹的レベルにおいて連携させる必要がある。そのためには、地区ごとのエネルギーポテンシャルを積極的に評価し、他の計画（交通計画・施設計画等）との調整の下、用途を決定していくプロセスが必要である。これより、本研究では図3に示すようなアプローチを提案する。

1. 未利用エネルギー源を活用した地域エネルギー供給を実施した場合のCO₂排出量およびコストを小地区単位で解析し地図化することで、各土地のポテンシャルを視覚的に明らかにする。
2. ポテンシャルマップを現況の土地利用図等の関連情報とオーバーレイすることにより、各地区ごとの将来の利用方針に関するシナリオ設計を行う。
3. 最後に、シナリオに基づき、低炭素効果およびコスト等を定量評価する。この結果をフィードバックし検討を継続する。

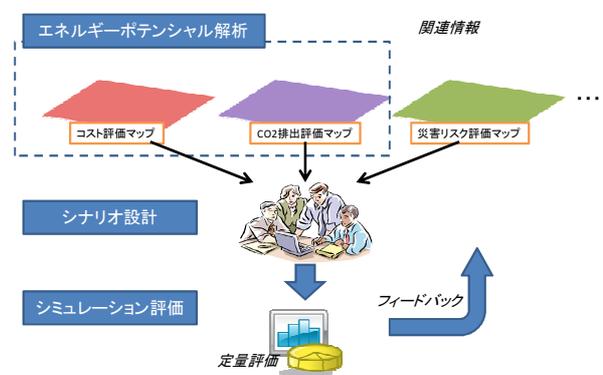


図3 未利用エネルギーの活用方法検討のフレームワーク

(4) 本研究の構成

以降、第3章で、火力発電所排熱を源とする未利用エネルギー導出に関するポテンシャルマップの導出方法について説明する。第4章では、実都市を対象にポテンシャルマップを作成し、それに基づくシナリオ設計・シミュレーションによる低炭素効果の試算を行うことで、ケーススタディを通じた提案手法の有効性の検証を行う。

3. エネルギー供給ポテンシャル導出方法

(1) コスト・環境負荷の評価インベントリ

地域熱源（火力発電所）を活用して、各需要地点（各グリッド）における一単位のエネルギー需要を賄うために必要なコストと CO₂排出量の推計方法について述べる。

火力発電所排熱を用いたエネルギー供給にかかるコスト・CO₂排出量は発電所における蒸気抽出に伴う費用・CO₂排出量と、そのエネルギーを消費地まで搬送することに掛かる費用・CO₂排出量である。表-1に評価インベントリの概要をまとめる。ただし、蒸気による熱エネルギー搬送は距離減衰を伴うため、需要地点において一単位のエネルギーを供給するためには、供給端である発電所において、一単位以上のエネルギーを抽出する必要がある点に注意が必要である。

表-1 コスト・CO₂評価のインベントリ

		コスト Yen/MJ	環境負荷 kg-CO ₂ /MJ
供給端（発電所）	発電ロス	○C _{PP}	○E _{PP}
熱導管ネットワーク	搬送動力	○C _{PM}	○E _{PM}
	インフラ建設	○C _F	—

(2) 設定条件

a) 基本条件

本研究では、200°Cの蒸気を活用した地域熱供給システムについて分析を実施する。以降では、発電所より距離 l (m) の地点の任意の 500 メートル四方のグリッド i を対象に考察を行う。熱導管ネットワークは地理的な制約を考慮して、対象地域において建設予定の LNG パイプラインに沿って幹線が整備されるものとする（図-2 参照）。さらに、熱供給事業を実施する各需要地はグリッドごとに最も近い幹線上のポイントに支線を接続し熱の供給を受けるものとする。

b) 熱搬送に伴う損失の評価

熱の長距離搬送に伴う損失を評価する。既往研究⁹⁾に基づき、微小区間 dx での管内水温 T_s についての熱バランスは式(1)により表されるとし、これを管長 l に渡って積分することで、 Q_s (MJ/hour) を搬送する場合の熱損失 Q_{LS} (MJ/hour) を評価する式(2)を得ることが出来る。

$$cG_s \frac{dT}{dx} = \pi DK (T_{out} - T) \quad (1)$$

$$Q_{LS} = cG_s (T_s - T_{out}) \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{\pi DK l}{cG_s}\right)} \right\} \times 60^2 \quad (2)$$

ここで、 T_s は蒸気温度 (200°C)、 T_{out} は配管周囲の温度 (20°C)、 G_s は蒸気の流量 (kg/s)、 c は蒸気の比熱

(MJ/kg/K)、 K は熱通過率 (断熱材 0.040 W/m/K、厚さ 0.09 m) を表す。 v は流速 (m/s) を表し、管径 D が一定 (=0.6 m) になるように設計するものとする。

$$G_s = \frac{Q_s}{Q_{steam}} \times \frac{1}{60^2} \quad (3)$$

$$v = \frac{G_s}{\gamma \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (4)$$

ここで、 Q_{steam} は単位蒸気量あたりの熱量 (2.749 MJ/kg)、 γ は蒸気密度 (0.372 kg/m³) を表す。一単位のエネルギー Q_d を需要地点に到達させるために必要なエネルギー量は $Q_d + Q_{LS}$ (= Q_s) となり、熱源からの搬送距離 l が長くなるほど、供給端において必要となるエネルギー量が增加する。

c) 発電所における熱供給量の決定方法

需要端において必要な熱量 Q_d を賄うために必要な熱供給量 Q_s は、式(2)が非線形であるため解析的に求めることが困難である。このため、以下のアルゴリズムにより推定する。

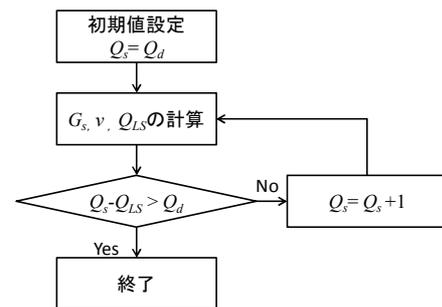


図-4 熱供給量決定のアルゴリズム

(3) 火力発電所（エネルギー供給端）モデル

地域エネルギー供給事業実施に伴う、火力発電所での、追加的に発生するコストと環境負荷を評価するために、その挙動をモデル化する。石炭火力発電所のシステムフローを図-5に示す。図に示すように、発電プロセスから熱エネルギーを取り出すためには3つの方法が考えられる。一つ目は、排熱として復水器を通じて海洋等に捨てられている低温の廃熱の活用が考えられる。この廃熱は熱量換算したエネルギー量としては膨大であるが、通常 35°C 程度の低温であるため活用可能性や搬送距離が制限される。二つ目はボイラーから発生し、煙突を通じて排出されている排気ガスが考えられる。こちらも最高で 130°C 程度の温度に留まり、さらに一部のエネルギーは排煙処理工程に利活用されていることから活用可能性には制限があることが考えられる。三つ目はタービンから蒸気を高温のまま取り出し、熱エネルギーとして活用することが考えられる。この場合、仕事の余力を残したある程度高温の熱をタービンから抜き出すため、発電量が

減少する。高温の排熱を取り出すことによる発電量への影響はエクセルギー率の観点から式(5)により近似的に評価できるものと仮定した。

$$x(T_s) = 1 - \frac{T_s \times \ln\left(\frac{T}{T_s}\right)}{T - T_s} \quad (5)$$

ここで、 T は蒸気ボイラーにより生成される蒸気の温度を、 T_s は取り出す蒸気の温度を表す。

通常 35°C ($T_0 = 35 + 273$ (K)) 程度で排熱されているが、地域熱供給を実施する場合は既存の事業実例より 200°C の蒸気を抽出するものと設定する ($T_s = 200 + 273$ (K))。また、発電所は一定の電力供給の義務を負っているものとする。したがって、需要地点における、一単位 (Q_d MJ) の熱エネルギーを発電プロセスから抽出することによる発電低下量は式(6)のようになる。

$$E_{LS} = \frac{x(T_0) - x(T_s)}{1 - x(T_s)} \times Q_s \quad (6)$$

よって、供給端において次式のように発電損失分を補償するために必要なコスト C_{pp} とそれに伴い発生する環境負荷 E_{pp} は以下の式により評価できる。

$$C_{pp} = c_{coal} \times E_{LS} \quad (7)$$

$$E_{pp} = e_{coal} \times E_{LS} \quad (8)$$

ここで、 c_{coal} は燃料である石炭火力発電所における発電コスト (Yen/MJ)、 e_{coal} は CO_2 排出原単位 ($\text{kg-CO}_2/\text{MJ}$) である。これらの値は、石炭の発熱量を 26.6 (MJ/kg) CO_2 排出量を 2.41 ($\text{kg-CO}_2/\text{kg}$)、石炭価格を 10 (Yen/kg) として計算した。

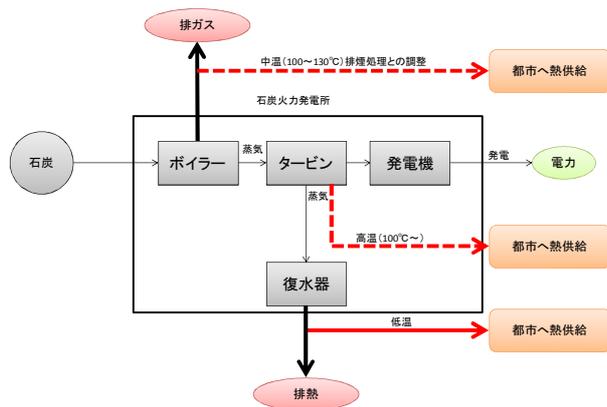


図5 火力発電所のシステムフロー

(4) 熱導管ネットワークモデル

熱搬送にかかるに搬送動力および配管コストの計算方法について述べる。

a) 搬送動力に必要なとなるコスト・ CO_2 の評価方法

蒸気搬送には必要なポンプのエネルギー消費量 P_{PM} (MJ/hour) は式(9)により評価する。

$$P_{PM} = \frac{g \times G_s \times H}{\eta_p} \times 1000^{-2} \times 60^2 \quad (9)$$

ここで、 g は重力加速度 (m/s^2)、 η_p はポンプ効率 (0.75)、 G_s は流量 (kg/s)、 H は揚程 (m) を表す。また、ポンプの揚程は以下の式により評価する。

$$H = (1+k) \times l \times R + \Delta h \quad (10)$$

ここで、 k は局部抵抗比 (0.4)、 R は配管の単位長さあたりの摩擦損失 (0.05 mAq/m)、 Δh は熱供給地点と需要地点の標高差 (m) を表す。

以上より、熱導管ネットワークによる搬送に掛かる電力は近接性より、前節で評価対象とした石炭火力発電所より供給されるものと考え、費用と環境負荷は次式のように表せる。

$$C_{PM} = c_{coal} \times P_{PM} \quad (11)$$

$$E_{PM} = e_{coal} \times P_{PM} \quad (12)$$

b) 熱導管コストの評価方法

インフラ建設費は、ディスカウントレート法に基づき熱導管ストックの年間レンタル費用 r_{IF} (Yen/year) を式(13)のように推計する。

$$r_{IF} = \frac{i}{1 - \left(\frac{1}{1+i}\right)^\tau} c_{pp} \times l \quad (13)$$

ここで、 l は導管の長さ c_{pp} は導管 1 単位長さあたりの建設コスト (519 千円/m)、 i は利子率 (0.05)、 τ は耐用年数 (17 年) を表す。なお、蒸気幹線部分については併走する LNG パイプラインとの共同溝となると考えられるため、 c_{pp} が半減すると設定した。

4. ケーススタディ

(1) 対象地域の概要

本研究で、ケーススタディエリアとして福島県・新地町を取り上げる。その概要を図-6 に示す。新地町は同県の北部・宮城県との県境に位置する、人口約 8,000 人の自治体である。2 機の 100 万 kW 級の発電機を持つ火力発電所が町内南部に位置する工業団地に立地している。さらに、LNG 基地の建設が計画されており、エネルギー拠点としてのポテンシャルを有している。

また、東日本大震災による被災地域であり、同町の死者数は 116 人、全壊住宅棟数は 548 であった。津波による浸水面積は 11km^2 であり、地域全体の 24% の土地が浸

水したことになる。なお、これらの被害は図-1 に示す沿岸部の津波浸水区域で集中的に発生している。復興においては、住宅移転の具体的な規模・位置や土地利用を含む計画の検討も進み、復旧段階から復興・再生段階に入りつつある。また、津波で被災を受けた土地の多くが農家であり、従来の耕作は難しいこととも関連し、復興計画の中では植物工場進出が具体的に検討されている。その一方で、津波被災地域の跡地利用が検討課題として残されている。

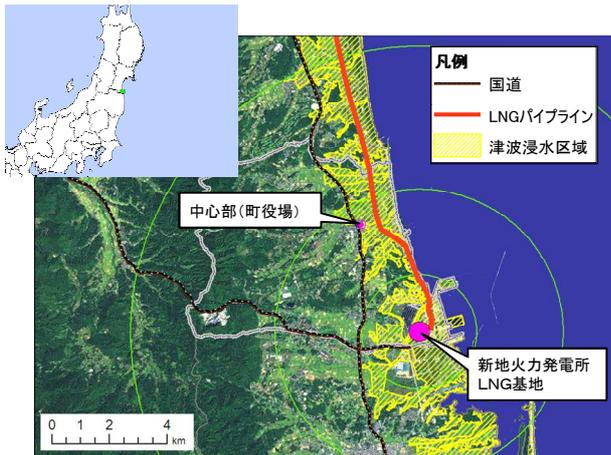


図-6 福島県・新地町の概要

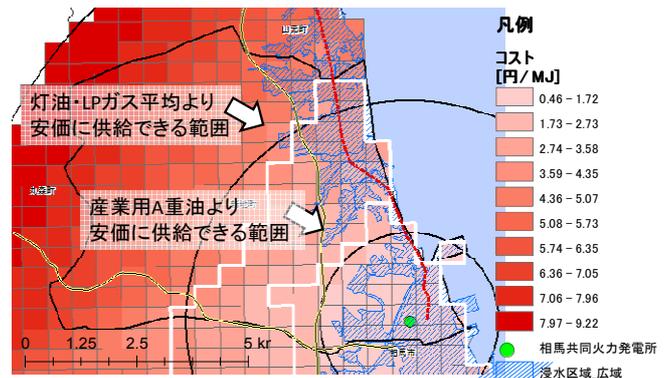


図-7 コストポテンシャルの推計結果 (Yen/MJ)

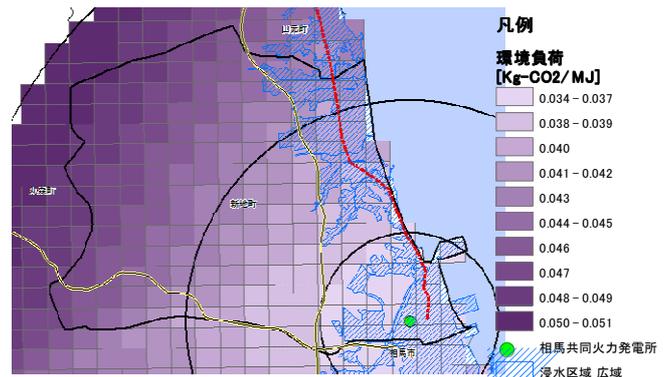


図-8 CO₂排出ポテンシャルの推計結果 (kg-CO₂/MJ)

(2) ポテンシャルマップの推計結果

第3章の方法に基づき、火力発電所からの単位エネルギー量あたりの供給コストおよびCO₂排出量の空間分布を推計した結果をそれぞれ図-7・図-8に示す。ここでは、標準値として500 (MJ/hour) の熱エネルギーを搬送する場合について示す。(その上で、1MJあたりの原単位として整備した結果を示している。) コストポテンシャルに関しては、インフラ建設コストが発電ロス・搬送動力に起因する部分と比較して、大きく寄与するため距離に対して増加していく傾向がある。一方、CO₂排出ポテンシャルに関しては、発電ロスに起因する部分が大きいため、コストと比較して、距離に依存せず一定の値を維持する傾向を示す。その結果、コストポテンシャル分布からは、重油・灯油・ガス等の代替的なエネルギー源よりも低い価格で供給できる範囲が特定できる。一方、CO₂排出ポテンシャル分布については一様に0.04 (kg-CO₂/MJ)程度と推計されており、重油・灯油・ガス等の代替エネルギー源のCO₂排出原単位が0.06~0.07 (kg-CO₂/MJ)程度であることから、概ね火力発電所より10km圏内に収まる本研究のケーススタディエリア内においては全域で地域エネルギー供給システム導入時にCO₂排出削減効果が期待できることになる。

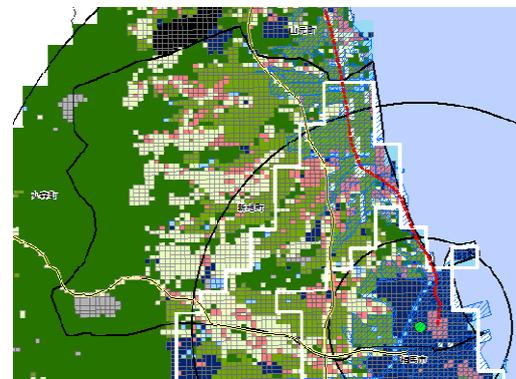


図-9 土地利用図とのオーバーレイの結果

(3) 分析シナリオのデザイン

ポテンシャルマップと地域空間情報に基づき、地域の将来計画についての代替案を設計する。以降では、地域エネルギー事業の成立可能性を考慮して、既存システム(重油等による熱エネルギー供給)と比べて低コストとなる区域に限って検討対象とする。

図-7・図-8では、エネルギー供給コストおよびCO₂排出量ポテンシャルと同時に東日本大震災における津波浸水区域とのオーバーレイの結果を示している。この結果より、産業部門で利用されている産業用A重油よりも安価に熱エネルギー供給できる区域の多くが、津波浸水地区であることが分かる。一方、住宅・オフィス等で利

表-2 分析シナリオの設計例

地域区分		BAU	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
コスト基準	安全性基準					
重油 1/2 以下 (~1km)	浸水区域	産業	産業	産業	産業	産業
	非浸水区域	産業	産業	産業	産業	産業
重油 1/1 以下 (~2km)	浸水区域	-	-	植物工場	-	-
	非浸水区域	農地	植物工場	植物工場	植物工場	産業
灯油・LP ガス 1/2 以下 (~3.5km)	浸水区域	-	-	-	-	-
	非浸水区域	住宅・農地	住宅	住宅	住宅	住宅
灯油・LP ガス 1/1 以下 (~5km)	浸水区域	-	-	-	-	-
	非浸水区域	農地	住宅	住宅	住宅	住宅

※注1)網掛は地域熱供給の対象外。注2)括弧内の距離帯は概算値。注3)"-"は公園等の人が常駐しない利用方法

用されている灯油・LP ガス平均より安価に熱エネルギー供給できる区域には、ある程度の非津波浸水区域が含まれている。

土地利用図とのオーバーレイの結果を図-9に示す。熱エネルギーを低コストで供給可能な区域の多くが農地として利用されていることが分かる。現況で町の主要な機能が集積しており、復興住宅の建設が予定されている町役場の周辺地区においても、地域熱供給システムの導入により低コスト・低炭素となることがわかる。以上より、表-2に示すシナリオを設定する。

- ・ ケース1：植物工場がエネルギーポテンシャルが高く、災害危険性の低い区域に進出するケース。
- ・ ケース2：ケース1の状況より進んで、植物工場が浸水区域まで進出するケース。
- ・ ケース3：地域熱エネルギーシステムの供給範囲が住宅地まで拡大するケース。
- ・ ケース4：植物工場の代わりに、工場の進出を想定するケース。業種は当該地域の特色を考慮して化学工業とした。

(4) シミュレーション結果

分析シナリオに基づき、CO₂排出削減量を評価した結果を図-10に示す。産業進出（化学工業）を想定するケース4が最も大きな削減効果を示した。これは、化学工業のエネルギー消費原単位が植物工場や住宅と比較して大きいためである。

図-11にエネルギーコストの削減効果を示す。CO₂排出削減量と比較すると、熱供給システムを住宅地まで拡大するケース3のコスト削減効果が大きい。これは、エネルギー需要削減量の総量自体はケース4の最も大きいと考えられるが、民生部門の既存システムにおけるエネルギーコスト原単位が、産業部門と比較して大きいため、地域エネルギーシステムを導入することによるコスト削減効果が大きくなるためである。

以上より、実現性の比較的高い植物工場の展開シナリオにおいても、一定の低炭素効果・費用削減効果があることが分かった。

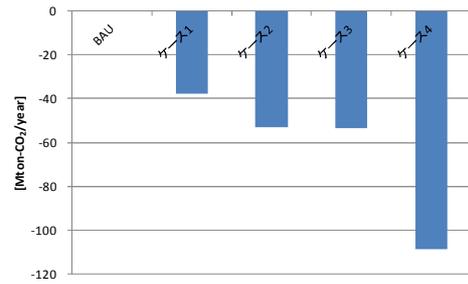


図-10 CO₂排出量の削減効果

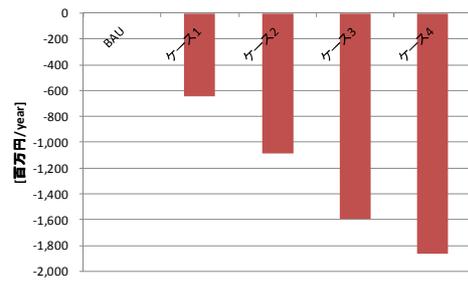


図-11 エネルギーコストの削減効果

5. まとめ

本研究では、地域に賦存する未利用熱源の活用方法を検討するためのフレームワークについて検討した。特に火力発電所の排熱に着目し、周辺区域の土地利用計画・エネルギーシステム計画を含めた評価方法を構築することに主眼がある。

まず、地域エネルギーシステム導入時のコスト・CO₂排出量のポテンシャルマップを導出し、既存システムと比較することで、導入効果を街区群レベルで評価した。その結果、ケーススタディエリア内においては全域で地域エネルギー供給システム導入時にCO₂排出削減効果が期待できる一方、コストに関しては、削減効果が得られる区域は限定的であることが分かった。

さらに、それらの結果を、土地利用情報や災害リスク情報等と重ね合わせることで、地域の将来象を計画する

プロセスを示し、低炭素効果等を定量評価することで、提案フレームワークの利用性について検証した。

謝辞：本研究は、環境省・環境研究総合推進費（E-1105）の支援により実施された。また、新地町役場の皆様には本研究を進める上での有益なご助言やデータ提供など、多くの面でご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁: 未利用エネルギー面的活用熱供給導入促進ガイド, (2007)
- 2) Yue C. D., Wang S. S.: GIS-based evaluation of multifarious local renewable energy sources: a case study of the Chigu area of southwestern Taiwan, 34, 6, 730-742 (2006)
- 3) Byrne J., Zhou A. M., Shen B., Hughes K.: Evaluating the potential of small-scale renewable energy options to meet rural livelihoods needs: A GIS- and lifecycle cost-based assessment of Western China's options, 35, 8, 4391-4401 (2007)
- 4) Underwood C. P., Ramachandran J., Giddings R. D., Alwan Z.: Renewable-

energy clusters for remote communities, 84, 6, 579-598 (2007)

- 5) Gornally A. M., Whyatt J. D., Timmis R. J., Pooley C. G.: A regional-scale assessment of local renewable energy resources in Cumbria, UK, (2012)
- 6) 下田 吉之, 柳 邦治, 水野 稔: 熱需要の変動を考慮した清掃工場廃熱活用熱電併給システムに関する研究, 80, 27-35 (2001)
- 7) 池上 貴志, 荒巻 俊也, 花木 啓祐: ライフサイクルインベントリ分析による下水熱利用地域冷暖房システム導入効果の解析, 64, 2, 107-122 (2008)
- 8) Vettorato D., Geneletti D., Zambelli P.: Spatial comparison of renewable energy supply and energy demand for low-carbon settlements, 28, 6, 557-566 (2011)
- 9) Amette Andrew N., Zobel Christopher W.: Spatial analysis of renewable energy potential in the greater southern Appalachian mountains, 36, 11, 2785-2798 (2011)

(2013. 5. 7 受付)

A Low-carbon Performance Evaluation of Power Plant Waste Heat based Regional Energy System

Takuya TOGAWA, Tsuyoshi FUJITA, Yujiro HIRANO Minoru FUJII and Satoshi OHNISHI