脱炭素地域計画支援システムの地域脱炭素シナリオへの利用

芦名　秀一 [1]

[1] 非会員　国立研究開発法人国立環境研究所社会システム領域脱炭素対策評価研究室
（〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2）
E-mail: ashina.shuichi@nies.go.jp

わが国が脱炭素社会に移行していくためには、国全体での取組と同様に地方自治体がそれぞれの地域特性を活かした地域脱炭素化のための計画を策定し、実施していくことが肝要である。本研究では，地域ごとの人口や産業構造，エネルギー需給の現状や見通しを踏まえ，さまざまな脱炭素対策の導入・実施水準を想定することで，対策・施策の効果や将来のエネルギー消費量・CO_2排出量の推移を定量的に評価できる機能を有する脱炭素計画支援システムをわが国の基礎自治体に適用し，対策実施に関する複数の想定を置いた分析を通じて，開発しているシステムの地域脱炭素に向けた検討への適用可能性を評価するとともに，地域ごとの対策の効果や脱炭素シナリオの違いについて検討を行った．

Key Words: *Regional Decarbonization, CO_2 reduction measures, Municipality, Planning Support*

1. はじめに

わが国が脱炭素社会に移行していくためには，エネルギー需要削減や高効率機器の導入，再生可能エネルギーの普及など，多様な対策が必要とされている [1]．これら取組には，系統電力での脱炭素電源の活用や革新的技術の開発のように国全体や広域での取組が重要となる対策もあれば，太陽光発電の導入や家庭部門でのネット・ゼロ・エネルギー・ハウス（ZEH）や高効率機器への転換，灯油ストーブ等からエアコンへの転換（電化）のように，地域が主体となり，それぞれの特性に合わせた取組を進めることが期待される対策もある．

地域が主体となった取組を進めるためには，脱炭素のための対策それぞれをその地域で実施した場合のエネルギー消費量や温室効果ガス排出量の削減効果の定量的検討も踏まえ，それぞれの地域の特性や特徴を活かした脱炭素化（地域脱炭素）のための計画を策定し，実行していくことが肝要である．

計画策定段階では，地方自治体だけではなく，住民をはじめとした地域の多様なステークホルダーの意見も勘案し，実施すべき対策・施策の内容や技術の普及率等の将来想定を見直し，それに基づく再評価を繰り返していくことが望まれる．また，策定後であっても，想定よりも進展が十分ではない場合のほか，脱炭素社会実現に関する新たな制度や政策の実施や，革新的な脱炭素技術の急速な普及，地域の産業構造の大きな転換など，当初見込んでいなかった状況変化があった際にも，その影響を評価し，必要に応じて計画を見直すことも必要な対応となりうる．

このためには，地方自治体に十分な人員や専門的知見を有する職員の配置が必要となるが，（一社）環境政策対話研究所が 2050 年二酸化炭素排出実質ゼロ表明（2050 ゼロカーボンシティ表明）を行った基礎自治体を対象に行った調査 [2]では，ゼロカーボンシティに向けた課題として予算・職員数の不足や専門的知識・専門的職員の不足が挙げられている．そのため，地域脱炭素に関する十分な人的・時間的なキャパシティを有していない自治体でも，地域特性を踏まえた対策・施策効果の評価やステークホルダーとの対話を含めた計画作りを可能とするような手法やツール作りが課題となっているところである．

本研究では，これまで開発してきた，地域のエネルギー需給や社会経済状況等の現状把握機能と，さまざまな対策の実施・導入水準を想定することで将来のエネルギー需給や CO_2 排出量の変化を推計する機能の 2 つを有する脱炭素地域計画支援システムを具体地域へ適用し，特に後者について，複数のケースを想定した分析結果を報告する．さらに，対象とした地域間での結果の比較を行って，地域ごとの人口・世帯数，産業構造，エネルギー需給や再生可能エネルギーポテンシャル等の違いが脱炭素対策の効果や将来シナリオ（地域脱炭素シナリオ）に

及ぼす影響について分析する．最後に，これら成果を踏まえて，開発したシステムを用いた地域脱炭素シナリオ検討支援の可能性について述べることとする．

2. 開発したシステムを用いた地域脱炭素化の可能性分析

(1) 分析ケースの設定と計算フローの概要

地域脱炭素の実現にはエネルギー需給両面での対策が求められているが，ここでは（a）産業・民生（家庭・業務）・運輸部門（需要部門）での対策のみを最大限に行うと想定した需要対策ケース，（b）再生可能エネルギー導入や系統電力での脱炭素電源の促進等の供給側での対策のみに限る供給対策ケースと，（c）エネルギー需給両面での対策を想定する需給対策ケースの3つをおき，自治体ごとに将来のエネルギー消費量やCO_2排出量の変化を分析した．なお，いずれの自治体でも将来の人口や産業活動に関する想定はケース間で同一としている．また，再生可能エネルギー導入対策では地産地消を想定し，系統電力への売電や余剰電力の他地域への融通は考慮していない．

開発したシステムは，人口・世帯数の変化や対策・施策の実施に関するさまざまな将来想定に対して即時にエネルギー需給やCO_2排出量の変化を示すことを目的としており，定量化においては最適化計算のロジックは組み込まず，**図-1** に示すように基準年のエネルギー需給データ（エネルギーバランス表）をもとに，なりゆきでのエネルギー需給を求め，断熱強化やZEB・ZEHの普及，EMS の導入などの需要削減対策，効率向上対策，燃料転換・再生可能エネルギー導入対策の効果を順に評価し，最後にエネルギー源別消費量に排出原単位を乗じてCO_2排出量を求める多段的な計算フローを採用している（各段階の計算ロジックについては，既報[3]を参照されたい）．そのため，本稿で示す結果も含めてシステムからの出力は，取り得る選択肢の中でもっとも費用が安価である等の何らかの尺度に照らして最小・最大となる結果を必ずしも示していないことには留意を要する．加えて，現在のシステムで想定している対策は，CO_2削減に関するものが主であり，森林吸収源の強化やCO_2回収・貯留付きバイオマスエネルギー（BECCS）の導入等のネガティブエミッション対策は含まれていないため，CO_2排出量はゼロ（ニュートラル）にはならないことにも注意が必要である．

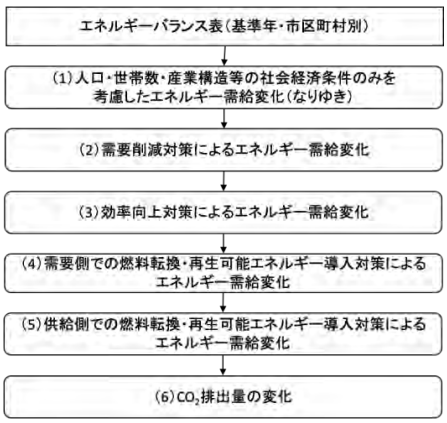


図-1 開発したシステムのエネルギー・CO_2計算フロー

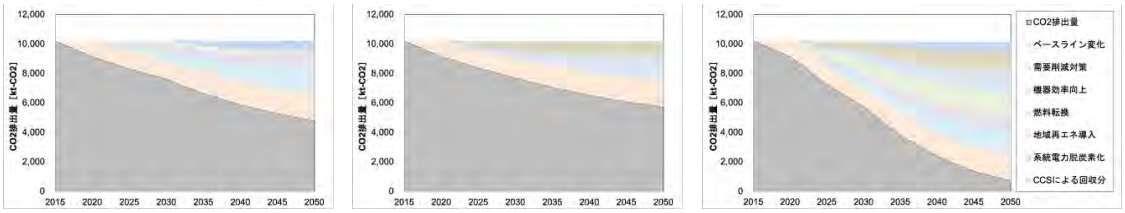
(2) 具体地域での分析結果例

本研究では，全基礎自治体（1,741 自治体）を対象に開発したシステムを適用し，将来想定に基づくエネルギー消費量やCO_2排出量の推計機能を実装したが，本稿では，基準年（2015年）の人口規模とCO_2排出量の部門別割合をもとに，人口規模が大きく，産業部門（製造業）の割合が高い兵庫県神戸市（人口 150 万人，CO_2排出量の製造業シェア48%）と民生部門（家庭・業務）が高い福岡県福岡市（人口 146 万人，CO_2排出量の民生部門シェア60%），部門ごとのCO_2排出量のシェアが概ね同程度（20～30%）で人口規模が中程度の栃木県宇都宮市（人口 51 万人）と比較的小規模の茨城県常陸太田市（人口 5.5 万人）の4都市のケース別のCO_2排出量の変化と対策の種類別効果に関する結果を**図-2～5** に示す．

ケース別のCO_2排出量の変化を見ると，本稿で示したいずれの自治体でも，排出量の大きさは異なるものの，需要側での対策のみ，供給側での対策のみによる大幅削減は困難であることがわかる．この傾向は本稿で示した以外の自治体でも同様であり，地域スケールでの脱炭素化には，再生可能エネルギーを拡大すればよい，電気自動車を普及させればよい，といった一面的な対策のみでは十分ではなく，国全体と同じように需給両面での対策が重要であることが示唆されている．

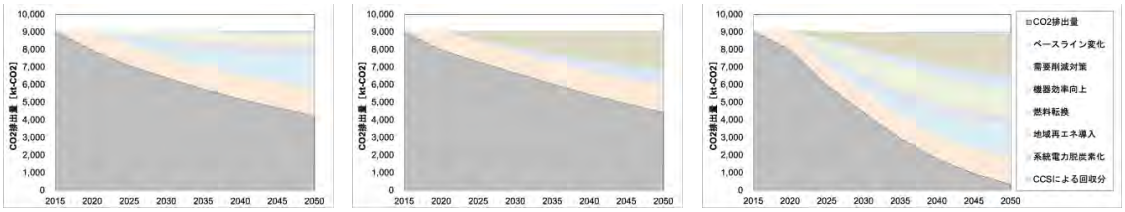
しかし，ケースごとの基準年（2015年）比で見た2050年のCO_2削減率に着目すると，自治体それぞれに違いが見られる．兵庫県神戸市（**図-2**）では，需要対策ケースでの2050年の基準年比でのCO_2削減率は53%，供給対策ケースで44%と，需要対策ケースでの削減量のほうが大きい．茨城県常陸太田市（**図-5**）も同様に需要対策ケースが49%と，供給対策ケースの40%よりも大きい．福岡県福岡市（**図-3**）では，需要対策ケースが53%，供給対策ケースが51%と，ほぼ同程度の削減率となっている．いっぽう．栃木県宇都宮市（**図-4**）では，需要対策ケースが37%，供給対策ケースが42%と，やや供給対策ケースでの削減量が大きい．

このような違いは，部門別エネルギー消費量の違いが一因となって生じていると考えられる．基準年のエネル



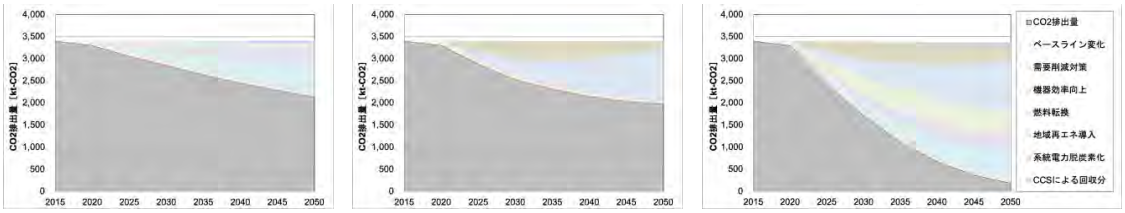
(a) 需要対策ケース　(b) 供給対策ケース　(c) 需給対策ケース

図-2 ケース別 CO_2 排出量及び対策の種類別削減効果の推移（兵庫県神戸市）



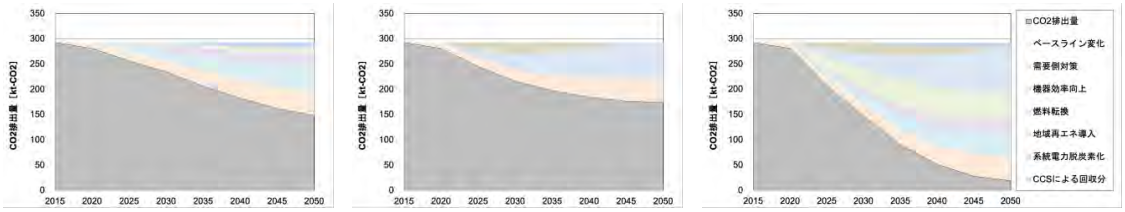
(a) 需要対策ケース　(b) 供給対策ケース　(c) 需給対策ケース

図-3 ケース別 CO_2 排出量及び対策の種類別削減効果の推移（福岡県福岡市）



(a) 需要対策ケース　(b) 供給対策ケース　(c) 需給対策ケース

図-4 ケース別 CO_2 排出量及び対策の種類別削減効果の推移（栃木県宇都宮市）

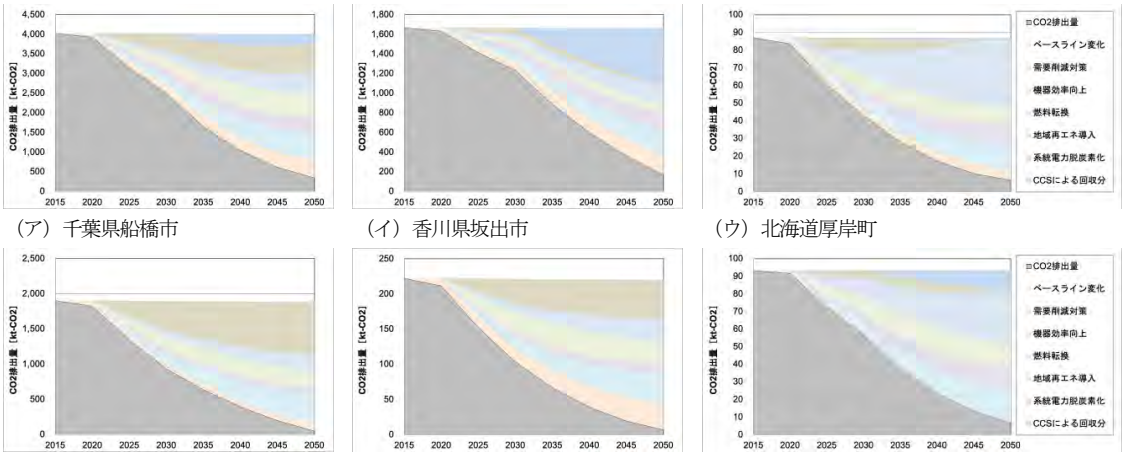


(a) 需要対策ケース　(b) 供給対策ケース　(c) 需給対策ケース

図-5 ケース別 CO_2 排出量及び対策の種類別削減効果の推移（茨城県常陸太田市）

ギー消費量を見ると，兵庫県神戸市では産業部門，特に鉄鋼･非鉄･金属製品製造業と石油石炭製品も含む化学工業の割合が大きく，茨城県常陸太田市では運輸部門（旅客・貨物）の割合が大きい．これら部門のエネルギー消費の大部分は石炭・石油等の化石燃料であり，需要側で化石燃料から電力への転換等を行わないままで系統電力の脱炭素化や再生可能エネルギーの導入を推進したために，その効果が限られてしまったものと考えられる．いっぽう，福岡県福岡市と栃木県宇都宮市は，エネルギー消費の半数程度以上が電力である民生部門（家庭・業務）の割合が高いため，供給側での対策のみでも一定程度の CO_2 削減効果が得られたものと考えられる．

需要側での対策と供給側での対策をともに実施すると想定した需給対策ケースでの 2050 年の CO_2 削減率を見ると，兵庫県神戸市は 96%，福岡県福岡市は 93%，栃木県宇都宮市は 94%，常陸太田市は 93%となった．分析では，人口・世帯数や財の生産量等の見通しはいずれのケースでも共通としており，その CO_2 削減量も全ケースで一律に計上されている（図中では「ベースライン変化」として示している）．そのため，共通するベースライン変化を除いて，需要対策ケース・供給対策ケースそれぞれの削減率と需給対策ケースの削減率を比較すると，いずれの自治体でも需要対策や供給対策を単独で実施するよりも，同時に実施することによる CO_2 削減率が大きいことがわかった．対策の種類別に見た CO_2 削減効果を比較すると，需要削減対策や機器効率向上対策の効果は需要対策ケースと需給対策ケースでほぼ同程度の CO_2 削減量となっていたが，燃料転換（電化）に関する削減効果が大きく異なっていることがわかった．これは，需要側での燃料転換対策には供給側での電力その他エネルギー



（ア）千葉県船橋市　（イ）香川県坂出市　（ウ）北海道厚岸町

（エ）東京都杉並区　（オ）東京都福生市　（カ）青森県六戸町

図-6　CO_2排出量及び対策の種類別削減効果の推移（需給対策ケース）

供給の脱炭素化対策を組み合わせることが不可欠であることを示唆している．

つぎに，需給対策ケースについて 2050 年の対策別削減効果の違いを見ると，兵庫県神戸市ではいずれの対策も概ね同程度の削減効果があるが，福岡県福岡市では，系統電力脱炭素化による効果が削減量全体の 26%と最も大きく，ついで需要削減対策とベースライン変化による CO_2 排出量変化がいずれも 20%程度と続く．栃木県宇都宮市と茨城県常陸太田市では，他の 2 自治体と比較してエネルギー消費量に対する再生可能エネルギーポテンシャル量が大きいため，再生可能エネルギー導入の効果がそれぞれ削減量全体の 37%，34%を占めている．

地域ごとの再生可能エネルギーポテンシャル量の違いは，2050 年までの経路上での対策別削減効果にも影響を及ぼす．開発したシステムでは，再生可能エネルギーの導入量は，2050 年の目標値に向けて直線的に増加すると想定している．そのため，再生可能エネルギーが十分に確保できる自治体では，**図-4** や**図-5** に示すように，2030 年～2040 年にかけて系統電力の脱炭素化に関する対策の効果が増加し，以降再生可能エネルギー導入の効果に置き換わっていく．いっぽう，兵庫県神戸市や福岡県福岡市のようにエネルギー消費量と比較した再生可能エネルギーポテンシャルが小さい場合には，系統電力脱炭素化対策の効果は 2050 年まで拡大する経路をたどる．

前述のように，開発したシステムでは再生可能エネルギーは地産地消を想定しているが，ポテンシャル量の余剰を系統電力や他地域への売電に振り向ける場合には，再生可能エネルギー導入が前倒しされ，系統電力脱炭素化対策からの置き換えも早まることが推察される．しかし，特に 2030 年～2035 年頃の短期に CO_2 排出量削減を着実に進めるためには系統電力での脱炭素化対策は不可欠であり，少なくともこれから 10 年程度の期間では，再生可能エネルギー普及と系統電力脱炭素化を同時に進めていくことが肝要であることを示唆している．

3. 脱炭素対策の効果やシナリオの地域間比較

本章では，前章の対象自治体に，基準年の CO_2 排出量における産業部門の割合が高く，人口が中程度の千葉県船橋市（人口 61 万人，CO_2 排出量の製造業シェア 47%），比較的小規模の香川県坂出市（人口 5.5 万人，製造業シェア 56%），小規模の北海道厚岸町（人口 1 万人，製造業シェア 42%），民生部門の割合が高く，人口規模が中程度の東京都杉並区（人口 54 万人，民生部門シェア 80%），比較的小規模の東京都福生市（人口 5.6 万人，民生部門シェア 63%），部門ごとの CO_2 排出量のシェアが概ね同程度で人口規模が小さい青森県六戸町（人口 1.1 万人）の 6 自治体を加えて，需給対策ケースに絞って脱炭素対策の効果や将来シナリオの地域間比較を試みる．

図-6 に，新たに追加した自治体の CO_2 排出量と対策別削減効果の推移をまとめて示す．前章の結果と同様に，人口やエネルギー需給，再生可能エネルギーポテンシャル量など地域それぞれの状況によって，脱炭素に向けた対策の効果や 2050 年までの推移は大きく異なることがわかる．

エネルギー消費に占める産業部門（製造業）の割合が大きな自治体では，エネルギー供給に関する対策よりも需要側での需要削減対策や燃料転換対策の効果が大きい傾向があり，需要対策を中心としたシナリオに基づいて対策を進めることが有効となりうる．しかし，必ずしも共通した傾向ではなく，業種や規模によって効果的な対策は異なっている．例えば香川県坂出市は，製造業の中でも石油製品・石炭製品の割合が高いため，これら産業

での二酸化炭素回収・貯留（CCS）設備の設置によるCO_2排出量抑制が有効な対策の一つとなりうる結果となっている．また，北海道厚岸町は，CO_2排出量では製造業の割合が高く，家庭部門は20%と約半分程度であるが，エネルギー消費では家庭部門が農林水産業も含めた産業部門を超えており，結果として再生可能エネルギー導入や系統電力の脱炭素化など電力に関する脱炭素対策の効果が大きい．これは，CO_2排出量の大きな部門や業種に対策を集中してシナリオを描き，実行していくことが，必ずしも地域全体の脱炭素化につながらない可能性があることを示唆している．

いっぽう，民生部門の割合が高い自治体（福岡県福岡市，東京都杉並区・福生市）は，共通して燃料転換対策（電化）と地域で利用する電力の脱炭素化（再生可能エネルギー導入と系統電力脱炭素化）によるCO_2削減効果が大きく，ベースライン変化を除いた削減量のうち65%を超える割合がこれら対策による．そのため，特に民生部門からのCO_2排出量が大きな自治体では，各家庭や事業所における電化と再生可能エネルギー導入の推進を並行させるようなシナリオを描いていくことが，効果的なCO_2排出量の削減につながり得ることを示しているものと考えられる．

部門ごとのCO_2排出量のシェアが概ね同程度の場合には，地域に立地する産業部門（製造業）により対策それぞれの効果は異なり，適したシナリオも変わりうる．これまでの分析では，素材産業が多い場合には需要部門での対策の効果が大きい傾向があり，加工産業ではエネルギー供給に関する脱炭素化対策と燃料転換対策の効果が大きい傾向があることが示されている．また，産業部門の割合が相対的に低い場合には，民生部門主体の地域と同様の対策を中心としたシナリオが有効となり得る．しかし，産業部門の割合が高い自治体と同様に共通した傾向ではなく，自治体の特性を踏まえて効果的な対策を同定し，シナリオを構成していくことが求められる．

なお，基準年のCO_2排出量の部門別割合に基づくと，運輸部門（特に貨物輸送）の割合が他の部門と比較して高い地域に関する分類も設定可能であるが，香川県の小豆島や鹿児島県の徳之島など島しょ部が中心であり，また分類される自治体数も38と多くないため，本稿の分析では除いた．

以上に加えて，地域に適した対策の検討やシナリオ策定においては，人口・世帯数や産業のあり方，テレワークも含めたライフスタイル・ワークスタイルの変化など，社会経済条件に関する見通しも重要な要素となる．本研究では，例えば人口・世帯数は国立社会保障・人口問題研究所の将来推計に基づき設定しているが，これらの変化（分析ではベースライン変化として定量化）は，地域によっては無視できないぐらいに大きい．一例として，本稿で対象とした地方自治体のうち，栃木県宇都宮市や北海道厚岸町，東京都杉並区は基準年比でみた2050年のCO_2削減量のうちベースライン変化は3〜6%程度であるが，兵庫県神戸市や福岡県福岡市，茨城県常陸太田市，東京都福生市は20%近くがベースライン変化の寄与となっている．これら見通しは，移住人口を増加させる，新たな産業・施設を誘致するなどの将来の地域づくりに密接に関わる要素であり，本研究で開発しているシステムを用いるなどで脱炭素化の着実な推進も制約の一つとしつつ，地方自治体だけではなく，市民や事業者，金融機関，NGO・NPOなどさまざまな地域のステークホルダーとの対話や議論が望まれるものである．

5. 結論

本稿では，地域ごとの人口や産業構造，エネルギー需給の現状や見通しを踏まえ，需要削減や機器効率向上，電化や再生可能エネルギーの普及などの脱炭素対策の導入・実施水準を想定することで将来のエネルギー消費量やCO_2排出量の変化，また対策ごとのCO_2削減量への寄与を定量的に評価できる機能を有する脱炭素地域計画システムをわが国の基礎自治体へ適用し，需要部門での対策のみを実施するケース，エネルギー供給に関する対策のみを実施するケース，需給両面での対策を実施するケースの3つを想定した分析を行って，地域スケールでの脱炭素化の実現可能性や，地域ごとに有効な対策の違いについての結果を報告してきた．

本研究の分析を通じて，地域スケールで脱炭素化を推進する（地域脱炭素）ためには，再生可能エネルギー導入のみを進める，移動の電動化のみを進めるといった単一の取組では不十分であり，国スケールで検討されている脱炭素シナリオと同様に，エネルギー需給両面での対策が不可欠であることが確認できた．

本研究で開発しているシステムでは，予め設定されている対策の導入・実施水準の選択肢（レベル）から利用者の考えや将来に関する見通しにもっとも近いものを選択・設定するだけで，それぞれの地域のエネルギー需給の現状等も踏まえてエネルギー消費量やCO_2排出量の変化が自動的に計算でき，本稿の**図-2〜6**に示したような結果を得ることができる．利用の簡易さを維持するために，技術個々に効率や普及率の想定ができない，多数の選択肢の組み合わせの中からコスト最小となるセットを求めることができない（最適化計算ができない）といった点は短所であるものの，地域脱炭素に向けた対策・施策の評価や計画作りに有用な情報を提供できるものと考えられる．

今後は，分析の基礎となる地方自治体別のエネルギー需給情報の高度化や，地域特性を考慮した技術・対策評

価の改良などのシステム・データの開発改良を進めるとともに，地方自治体担当者等の試行的利用の機会を設けるなど，本システムを用いた対策評価や計画作りに関する利用者の視点での改善・改良の取組を進めていく予定である．

謝辞：本研究は，文部科学省の「大学の力を結集した，地域の脱炭素化加速のための基盤研究開発」，国立環境研究所の持続可能地域共創研究プログラム，（独）環境再生保全機構・環境省の環境研究総合推進費（1-2003・1-2305）により実施された．関係各位に感謝申し上げる．

REFERENCES

1) 国立環境研究所 AIM プロジェクトチーム：2050 年脱炭素社会実現に向けた排出経路分析, https://www-iam.nies.go.jp/aim/projects_activities/prov/2023_2050ep/230428_2050 年脱炭素社会実現に向けた排出経路分析 rev230627.pdf, 2023. [Asia-Pacific Integrated Model project team of National Institute for Environmental Studies: *An analysis of pathways toward decarbonization society in Japan by 2050*, https://www-iam.nies.go.jp/aim/projects_activities/prov/2023_2050ep/230428_2050 年脱炭素社会実現に向けた排出経路分析 rev230627.pdf, 2023.]

2) 一般社団法人環境政策対話研究所：ゼロカーボンシティと市民参画に関するアンケート報告書, https://cdn.goope.jp/61503/210126145523-600faecbdc1ec.pdf, 2021. [Institute for Dialogue of Environmental Policy: *Report of questionnaire survey about zero carbon city and citizen's participation*, https://cdn.goope.jp/61503/210126145523-600faecbdc1ec.pdf, 2021.]

3) 芦名秀一：脱炭素地域計画支援システムの開発，第 50 回環境システム研究論文発表会講演集，pp. 1-6, 2022. [Ashina, S.: Development of a planning support system for decarbonization of municipalities, *Proceedings of 50th Annual Meeting of Environmental Systems Research 2022*, pp. 1-6, 2022]

(Received June 19, 2023)
(Accepted August 21, 2023)

APPLICATION OF REGIONAL DECARBONIZATION PLANNING SYSTEM FOR DESIGNING SCENARIOS OF MUNICIPALITIES IN JAPAN

Shuichi ASHINA

In order to accelerate transition to a decarbonized society, it is essential to make and implement decarbonzation plans for a nation as well as for municipalities while considering regional characteristics such as potentials of renewable energies, climate, industrial structure and life/work styles. In this study, we applied developed regional decarbonization planning system to municipalities in Japan and evaluated applicability and usability of the system for making regional decarbonization plan. The system assesses impacts of various types of decarbonization measures and policies on energy consumptions and CO_2 emissions based on current status and future prospects of population, industrial structure, energy demand-supply balance and so on.

In the analysis, we examined changes in effects of decarbonzation measures and policies in different municipalities by assuming that measures will be taken only in demand-side, only in suppy-side and both demand and supply side. The results show that municipalities could not reach decarbonized society only relying a measure such as introducing renewable energy or electrifying cars. Through the analysis, it is thought that, although the system has no functions to set future efficiency change and penetration rate for individual technologies as well as to find set of options while minimizing costs, developed regional decarbonzation planning system may provide useful information for planning measures and policies to decarbonize municipalities.