

「東アジア低炭素共同体」構想の具現化と 「政策工学」の創成にむけて

— R-GIRO 特定領域型プロジェクト「低炭素社会構築のための
基盤技術開発と戦略イノベーション」の総括と展望 —

周 瑋生・任 洪波・蘇 宣銘・錢 学鵬・山崎雅人・
伊庭野健造・孫 發明・加藤久明・芳賀普隆

I. はじめに

- II. 「低炭素社会構築のための基盤技術開発と戦略イノベーション」プロジェクトの概要
- III. 広域低炭素社会及び「東アジア低炭素共同体」構築のための経済社会システムの設計
 - 1. 都市農村連携によるローカル低炭素社会の構築
 - 2. 国際連携による広域低炭素社会—東アジア低炭素共同体の構築
- IV. 今後の展望—「政策工学」の創成

I. はじめに

低炭素社会の実現は、先進国と途上国が共通に目指すゴールである。しかし、日本はすでに世界最高の省エネ・高効率化を達成しており、CO₂を一層削減するにはコストが高く、劇的削減は不可能である。一方、CO₂排出大国である中国は、削減ポテンシャルが高く、費用対効果が大きいが自助努力に限界がある。しかも経済成長・公害克服と低炭素化のコベネフィットが明確になると、これは低炭素化政策への強力なインセンティブになろう。そこで、革新的な技術の開発、経済と社会システムの変革など戦略的イノベーションによる、国境を越えた広域低炭素社会の実現が重大な課題となる。この課題の解決は、立命館グローバルイノベーション研究機構（R-GIRO）が目指している自然共生型社会の形成にも合致するものとして、2008年8月より5年間特定領域型（環境）研究プロジェクト「低炭素社会構築のための基盤技術開発と戦略イノベーション」（2008年8月～2013年3月、代表：周 瑋生）がR-GIROに採択された。本稿は、同プロジェクトの概要と成果（一部）をまとめ、「東アジア低炭素共同体」構想の具現化と「政策工学」の創成に向けたフレームワークの提起を行う。

Ⅱ. 「低炭素社会構築のための基盤技術開発と戦略イノベーション」

プロジェクトの概要

国境を越えた広域低炭素社会の実現は、温暖化対策に加えて、経済、環境、社会の調和が取れた持続可能で活力のある社会を形成していくものである。

一方、低炭素社会に関する研究は、典型的な学際問題である。本プロジェクトは、理論的、実証的アプローチ、文理融合的研究手法、横断的組織構成と国際連携により研究を遂行した。具体的には、1) 学部・研究科を超えての学際的研究を推進し、若手重視の研究拠点として、低炭素社会学の研究、形成と普及を目指した。2) パイロットモデル事業による実証研究を通じて、広域低炭素社会を実現するための戦略的イノベーションを構想し提案した。3) 国際的連携を通じて、低炭素社会を創出する先導的国際拠点の形成を目指し、国際的にリーダーとなりうる研究人材の育成を図った。4) バックキャスティングの方法を用いた統合評価できるモデルを開発し、地域特色を加味した経済、環境と社会の調和がとれた広域低炭素社会「東アジア低炭素化共同体」構想を提案し、それを実現するための道筋を提示した。

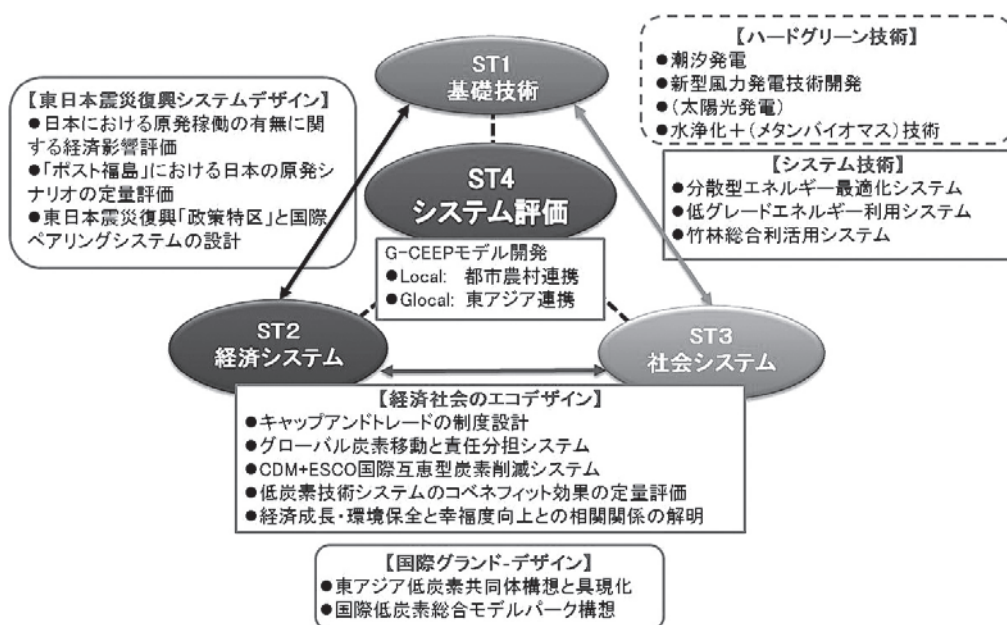


図1 プロジェクト研究内容構成

本プロジェクトは、「理工学系基盤技術」、「経済システム」および「社会システム」という3軸を基盤とした理論・実証的アプローチによって、国際協力を事例として国境を越えた「広域低炭素社会」の実現に向けた道筋を提示することを目的としていた（図1参照）。2008年8月から2013年3月まで5年間にわたって、立命館大学政策科学部、理工学部、産業社会学

「東アジア低炭素共同体」構想の具現化と「政策工学」の創成にむけて(周・任・蘇・銭・山崎・伊庭野・孫・加藤・芳賀)
部、立命館アジア太平洋大学の教員、博士研究員、大学院生延べ 25 名の研究者により、著書 24 冊、論文(査読あり 73 本、査読なし 20 本)、口頭発表(国内会議 109 回、国際会議 47 回)、博士研究員 9 名を輩出という成果が挙げられた。具体的に、以下の研究テーマが進められた。

- 1) ハード技術：クリーンエネルギー技術^{1) 2)}、マイクロ水力発電技術³⁾、新型風力発電技術開発、太陽光発電技術^{4) 5)}、水浄化技術^{6) 7) 8)}
 - 2) システム技術：大型建築物と工場の省エネシステムデザイン⁹⁾、住宅用太陽光最適化導入システムデザイン⁴⁶⁾、分散型エネルギー最適化システムデザイン^{10) 11) 12) 13) 14)}、低グレードエネルギー(太陽熱、海洋熱、地熱等)利用システムデザイン^{15) 16) 17)}、竹林総合利活用と CDM プロジェクト^{18) 19) 20)}
 - 3) 国際グランド・デザイン：都市農村連携型システム^{21) 22)}、国際低炭素総合モデルパーク構想、東アジア原発安全保障システム構築²³⁾、東アジア低炭素共同体構想と具現化^{22) 24) 41)}
 - 4) 経済社会のエコデザイン：キャップアンドトレードの制度設計、グローバルリサイクルシステムの構築²⁵⁾、グローバル炭素移動と責任分担システム²⁶⁾、CDM+ESCO 国際互惠型炭素削減システム²⁷⁾、低炭素技術システムのコベネフィット効果の定量評価²⁸⁾
 - 5) 東日本震災復興システムの設計と提案：日本における原発稼働の有無に関する経済影響評価^{29) 30)}、「ポスト福島」における日本の原発シナリオの定量評価³¹⁾、国際救援復興ペーリングシステムの構築³²⁾、日本震災復興「政策特区」の設計³³⁾
 - 6) 未来型エネルギー技術の経済評価：低出力核融合プラントの経済性評価
 - 7) 経済・エネルギー・環境統合評価モデル(Glocal Century Energy Environmental Planning, G-CEEP モデル)の開発と計量分析^{34) 35) 36) 41)}
- 以下は、上述の研究内容に関する成果の一部をまとめて紹介する。

Ⅲ. 広域低炭素社会及び「東アジア低炭素共同体」構築のための 経済社会システム設計

1. 都市農村連携によるローカル低炭素社会の構築^{9) 10) 11) 37)}

(1) 都市農村連携型エネルギーシステムのイメージ

現在、エネルギー資源の枯渇化や地球環境問題への関心が高まるなか、省エネルギー、CO₂排出量の削減などの様々な観点からエネルギー利用のあり方が問われている。このような背景の下、エネルギーを必要とするその地域内で製造・供給するオンサイトシステムである小規模分散型電源が新しいシステム系として導入されつつある。具体的に、農村部では、林業・農業廃棄物、畜産排泄物などを収集してコジェネレーションシステム(CGS)の燃料とし熱併給発電を実施する。地域の自然条件によって、小型水力や風力発電も導入することができる。一方、都市部では、天然ガスを利用した CGS をベースに太陽電池やバイオマスを付加して複合

エネルギー供給を実現することができる。地域内で発生したバイオマスは、その地域内で利用することが適しているため、バイオマス資源を収集し、ガス化することにより、CGSの燃料として熱電併給を実施することが通常容易であると考えられる。また、住宅や商業施設の屋上でPVを導入することができる。農村部のエネルギー需要は都市部より小さいため、農村部で発生した電力と熱は地区内で消費するだけでなく、都市部へ余剰分の供給が可能である。このような都市と農村の相互補完をワークショップ等のもとに導きだし、さらに広域的な都市・農村エネルギーシステムを構築する（図2参照）^{9) 10) 11) 12) 14) 21)}。

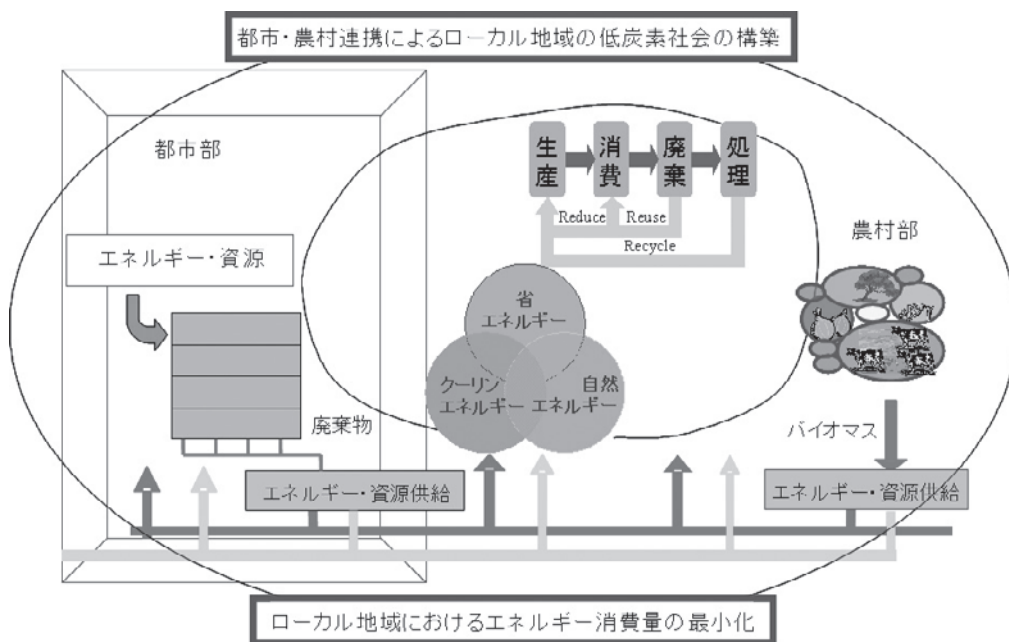


図2 都市・農村連携による地域エネルギーシステムのイメージ

本研究では、都市・農村連携型エネルギーシステムを研究するに当たって、異なる連携主体による影響を考察するため、連携なしのベースシナリオ以外に、3つの連携パターンを設定して検討を行う。

シナリオ⑩：非連携型（S0）。比較研究を行うため、ベースシナリオとして設定される。都市部と農村部の電力需要は全て商用電力（主に火力発電所からの発電）から供給される。熱需要について、都市部は石炭やLPGと都市ガスを燃料としたボイラーより満たす一方、農村部は主に従来型のバイオマスを利用している（図3参照）。

シナリオ⑪：都市主導型連携（S1）。都市部は地域エネルギーセンターと見られる。天然ガスを利用した発電・熱供給、また熱電併給は主な技術と設定する。また、都市部の建物に設置する屋根型太陽光発電と太陽熱温水器も考慮している。全電力負荷を地域の発電電力のみで処理できない場合には、不足分を商用系統から買電する。この連携型は既に都市化率が高い地域

「東アジア低炭素共同体」構想の具現化と「政策工学」の創成にむけて(周・任・蘇・銭・山崎・伊庭野・孫・加藤・芳賀)

に適用すると考え、全地域は都市型のエネルギーサービスを利用し、都市のライフスタイルへ変換するほうが容易である(図4参照)。

シナリオ②：農村主導型連携(S2)。農村部は地域の自然エネルギーを利用し、都市部も含める全地域のエネルギー需要を供給する。太陽エネルギー以外に、農村部のバイオマス資源は地域の主なエネルギー源として利用される。また、不足分は商用電力とヒートポンプより補足する。この連携型は農村部が大きい割合を占める地域に適用し、バイオマスエネルギーの利用を中心とするシステムである(図5参照)。

シナリオ③：都市・農村協働型連携(S3)。総合エネルギーシステムの中、都市部と農村部は協働的な役割を果たす。地域のバイオマスと太陽エネルギーなどの自然エネルギーは出来る限り利用すると期待される。また、エネルギー供給の安定性を確保するため、天然ガスの利用や商用電力との連携も必要とされている。この連携型は通用的また効率的なシステムであり、適用性が最も広いと考えられる(図6参照)。

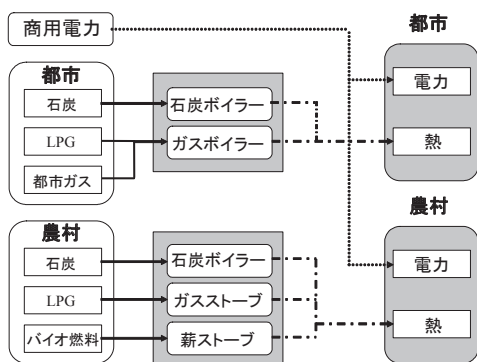


図3 シナリオ①のエネルギーフロー
(非連携型 S0)

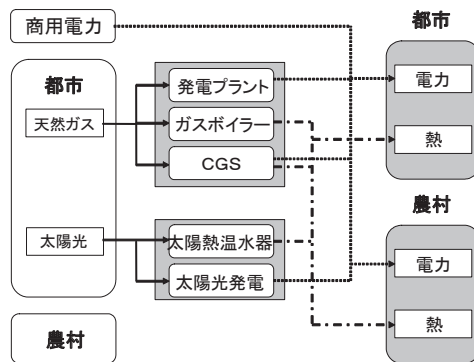


図4 シナリオ①のエネルギーフロー
(都市主導型連携 S1)

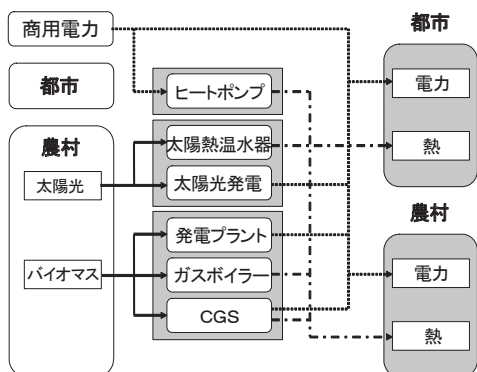


図5 シナリオ②のエネルギーフロー
(農村主導型連携 S2)

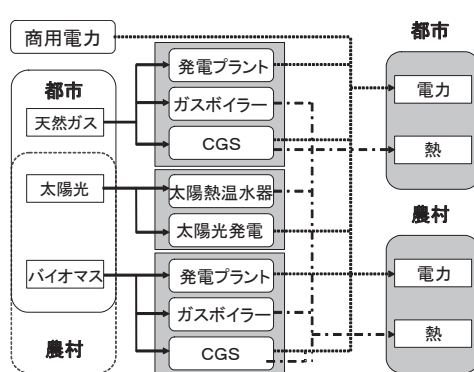


図6 シナリオ③のエネルギーフロー
(都市・農村協働型連携 S3)

(2) 地域エネルギーシステム最適化モデル

図7に示すように、地域における電気、ガスなどエネルギー供給料金システム、デマンドサイドの熱、電負荷、分散型エネルギー利用の技術情報を整備する。その上でモデルの最適化を行ない、最適な設備構成と容量を求める。最適化の目標として、設備コストと運用コストを含んだトータルコストを最小にすることとした。また、エネルギー資源の供給と需要のバランスを考慮して、設備容量、供給価格、供給内訳及びコストを解析して、複合要素から成り立つエネルギーシステムの運用特性を検討する。解析の対象期間は、計算時間刻みを1時間として、計1年間(8,760時間)としている。

$$\text{Min} \quad C_{Total} = C_{Elec} + C_{Fuel} + C_{Inv} + C_{OM} + C_{Ctax} - C_{Sal} \quad (1)$$

ここに、 C_{Total} = トータルコスト、 C_{Elec} = 商用電力からの買電費用、 C_{Fuel} = ガスなどの燃料

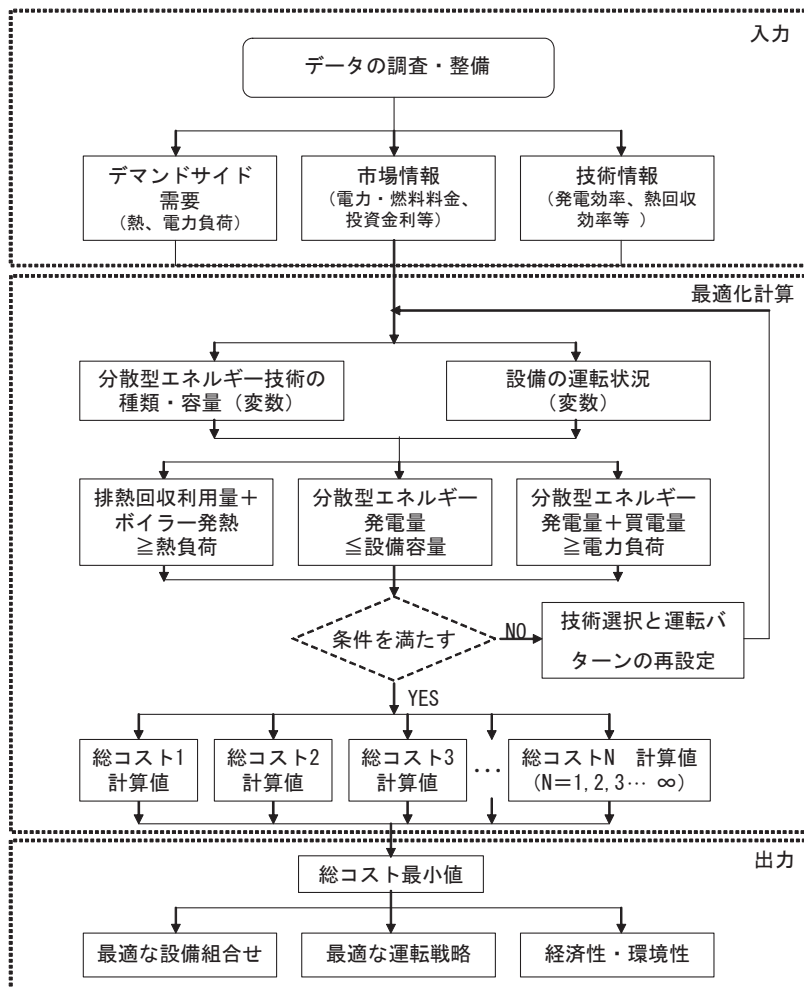


図7 最適化モデルの計算フロー

「東アジア低炭素共同体」構想の具現化と「政策工学」の創成にむけて(周・任・蘇・銭・山崎・伊庭野・孫・加藤・芳賀)

購入費用、 C_{Inv} = 分散型エネルギー技術の初期投資費用、 C_{OM} = システムの運転維持費用、 C_{Clax} = 炭素税費用、 C_{Clax} = 分散型エネルギーシステムの売電収入。

$$Cload_{m,d,h,u} = \sum_i EGen_{i,m,d,h,u} + PElec_{m,d,h,u} + \beta_u \cdot PFuel_{m,d,h,u} + \sum_i (\cdot RHeat_{i,m,d,h,u}) \quad \forall i, m, d, h, u \quad (2)$$

ここに、 $Cload_{m,d,h,u}$ = 月 (m)、時間帯 (日 d、時刻 h) 及び最終用途別 (u = 電力・冷房・暖房・給湯) のエネルギー消費量、 $EGen_{i,m,d,h,u}$ = 分散型エネルギー技術 (i) の月・時間帯・用途別の発電量の自家消費量、 $PElec_{m,d,h,u}$ = 月・時間帯・用途別の買電量、 $PFuel_{m,d,h,u}$ = 月・時間帯・用途別の燃料購入量、 $RHeat_{i,m,d,h,u}$ = 技術別・月・時間帯・用途別の熱回収量、 β_u = 購入された燃料から有効な利用熱量の割合、 $\gamma_{i,u}$ = 技術 (i) から回収された排熱の有効な利用熱量の割合。

$$\sum_i EGen_{i,m,d,h,u} + ESali_{m,d,h} \leq DERMaxp_i \quad \forall m, d, h, \quad (3)$$

ここに、 $ESali_{m,d,h}$ = 技術別・月・時間帯・用途別の分散型エネルギー技術の発電量の売電電力量、 $DERMaxp_i$ = 技術 (i) の定格発電容量。

モデルの構築には汎用最適化ツール LINGO を利用し、目標関数及び制約条件によって混合整数線形最適化を行う。

(3) 結果・考察

1) CO₂ 排出削減の実行可能性と経済性分析

一般に CO₂ 排出量の削減は、初期投資が高い新エネルギーや再生可能エネルギーを導入するため、総エネルギーコストが増加する場合が多く、エネルギーシステム革新の環境メリットを市場経済化する必要がある。そのため、CO₂ の排出削減に価格を付ける市場メカニズムを活用し、システムの経済性の変化についても考察する。

図 8 に示すように、各シナリオにおいて、システムの実行可能性及び経済性 (年間総コスト

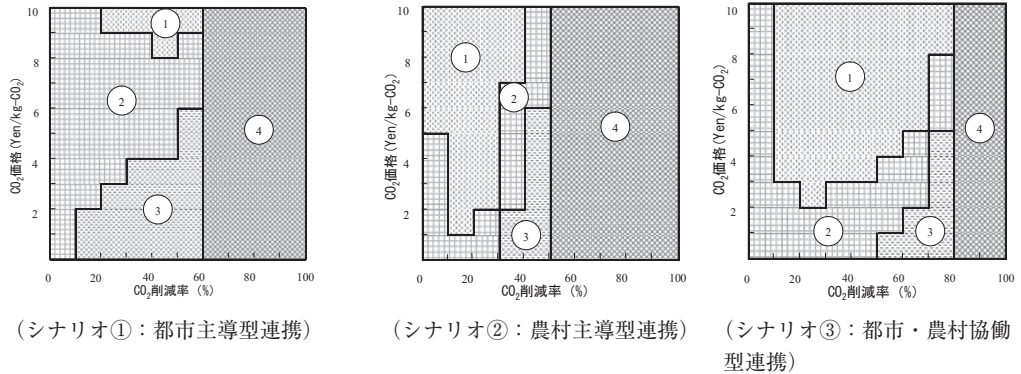


図 8 経済性と実行可能性分析

の削減率と示す)は①～④の4領域に分けられる。領域①ではシステムが優れた経済性を持っていることを示している。領域②では、システムの経済性が存在するものの、そのインパクトは大きなものではない。領域③の場合、CO₂の削減目標が達成できるが、経済利益がマイナスとなっている(総コストはベースシナリオと比べ高い)。領域④は実行不可能エリアであり、CO₂の削減目標が達成できないことを示す。

この結果から、次の3点が明らかとなった。第1に、シナリオ①においては、CO₂削減率の増加と共にシステムの経済性を示す限界CO₂価格も次第に増加する一方、CO₂価格を10円/kg-CO₂と設定する時に、CO₂の排出削減はより良い経済性を示している。つまり、CO₂価格の導入により、経済性と環境性とのWin-Winの関係を目指すことも期待できるということである。第2に、シナリオ②において領域①(優れた経済性)は大幅に増加したが、実行可能エリアは減少している。第3に、シナリオ③は最も大きな実行可能領域となり、地域のCO₂排出量が約80%まで削減できるという点である。

2) CO₂排出削減の費用対効果比較

削減コストは、CO₂排出量を大幅に削減する主な障害の一つである。図9に示すように、連携パターンの異なりにより、CO₂削減コストは大きな差を示している。削減率10～50%の領域での最適化結果を見てみると、都市主導型連携(シナリオ①)の削減コストは非連携型よりも高く、ほぼ全領域のコストが「プラス」となっている。都市・農村協働型(シナリオ③)の削減コストは総じて「マイナス」を示す一方、削減率25%までは農村主導型連携(シナリオ②)のほうのコストが最も安価となる。つまり、費用対効果の観点から、「削減率25%までは農村主導型連携」、「25%～50%までは都市農村協働型連携」が民生部分における最適化エネルギーシステムを構築するもっとも削減コストの低い連携パターンであると考えられる。

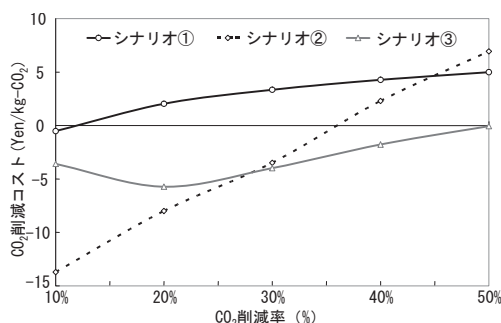


図9 CO₂削減率別の削減コスト

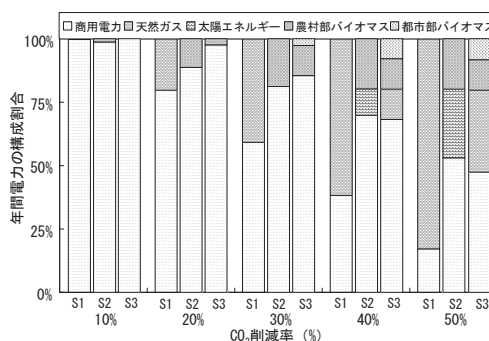


図10 CO₂削減率別の年間電力構成割合

また、従来研究より、都市部の資源はかなり限定的であるため、自然エネルギーを最大限に利用したとしても、CO₂削減のポテンシャルは大きいものではなく、削減コストは高い。そのため、図10に示すように、地域のCO₂排出量を半減するため、約5円/kg-CO₂(シナリオ

「東アジア低炭素共同体」構想の具現化と「政策工学」の創成にむけて(周・任・蘇・銭・山崎・伊庭野・孫・加藤・芳賀)

①) の削減コストが必要である。その一方で、農村部の自然エネルギーは豊富であり、農村主導型連携(シナリオ②)の場合、CO₂排出量を約35%まで削減したと仮定しても、エネルギーシステムの総コストはベースシナリオより小さくなる。つまり、CO₂削減は必ずしも費用が増加することを伴うということではなく、CO₂とコストを同時に削減できる組み合わせもありうるということである。しかし、CO₂排出量を半減する場合、シナリオ②の削減コストはシナリオ①が示すそれを越え、約7円/kg-CO₂となる。この理由としては、図9に示すように、CO₂削減率の増大により農村部のバイオマス資源が全て利用され、CO₂排出量を更に削減するには、限界削減コストの高い太陽光発電を利用しなければならないからである。一方、都市主導型連携(シナリオ①)の場合、地域のCO₂排出量を50%まで削減するには、全ての排出削減が天然ガスへの燃料転換により達成する。なお、都市・農村協働型システムでは、農村部バイオマス、都市部バイオマス、天然ガスと太陽エネルギーのような限界削減コストの低い順に、順次導入するようになる。

2. 国際連携による広域低炭素社会—東アジア低炭素共同体の構築^{34) 35) 36) 40) 41)}

(1) 「東アジア低炭素共同体」の提起

本研究では、「東アジア低炭素共同体」構想を提案している。国境を越えた広域低炭素社会の実現は、温暖化対策に加えて、経済、環境、社会の調和が取れた持続可能で活力のある国際社会を形成していくものである。このための要素課題及び意義としては、革新的低炭素技術の開発と既存技術の移転、低炭素化経済産業システムの創出とライフサイクルなど低炭素社会システムの変革、国際連携によるエネルギー・物質循環のエコデザイン、パイロットモデル事業を通じて、低炭素社会の実現可能性について先駆的に実証し、持続可能な低炭素社会への移行過程を具現化するロードマップの提示、アジア地域の低炭素社会建設を誘導する政策提言、日中戦略互惠関係を具現化するための協力モデルとしての実証研究、などが挙げられる。

この広域低炭素社会の構築は、図11に示すように重層的な構造を持っている。

第1軸は、「時間」要素である。「共通だが差異のある責任」原則に基づいて、気候変動枠組みにおけるアジェンダも、国・地域により3段階(自発的、自主的、強制的)にわけるべきであると考え。中国を事例とすると、～2012年は自発的段階、2013～2020年は自主的段階、2020年以降は強制的段階とわける。

第2軸は、「空間」要素である。都市農村連携によるローカル低炭素化、国境を越えた二国間連携と東アジア地域を対象とした多国間連携による広域低炭素化の実現が不可欠である。

第3軸は、「政策」要素である。個別問題から複雑な問題へ、ローカル問題からグローバル問題への一石多鳥型統合政策が求められる。特に、途上国の場合は、貧困、公害と地球規模に置かれている。

第4軸は、「結果」要素である。低炭素共同体のメリットを事例で挙げてみよう。2007年中国の年間火力発電量は27229.3億kWh、2005年における日本と中国の石炭火力発電の平均発電効率はそれぞれ43%と32%である。そこで、日本の技術導入によって中国の石炭火力発電

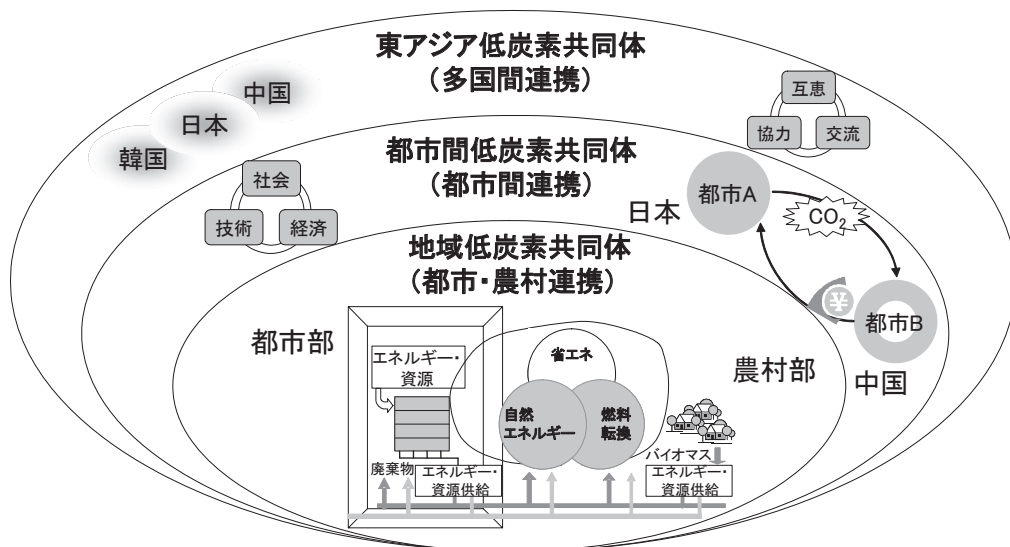


図 11 多重広域低炭素社会—東アジア低炭素共同体の構想図

効率を日本並みに向上できるとすれば、CO₂削減量は年間で7.1億トンとなる。ちなみに、日本のCO₂排出量は1990年度11.43億トン、2007年度13.7億トンである。すなわち、中国の火力発電の効率向上だけでの排出削減量は、日本のCO₂排出総量の半分に相当するものとなり、それに伴うビジネスチャンスと公害汚染物質の削減効果も膨大である。すなわち、「国際互惠補完関係」を目指す「結果」である。

このように、広域低炭素社会の構築は、地球の持続可能性の達成及び先進国と途上国の持続可能な開発の実現に寄与するものと考えられる。そこで、革新的な技術の開発と適正技術の移転、経済社会システムの変革及び戦略的イノベーションによる、国境を越えた広域低炭素社会「東アジア低炭素共同体」の実現が重大な課題となる。

(2) 「東アジア低炭素共同体」の評価モデルの開発

日中韓協力シナリオの構築を目的とし、環境・エネルギー・経済統合評価モデル「Glocal Century Energy Environmental Planning モデル（以下 G-CEEP モデル）」を開発した（図12参照）。「G-CEEP モデル」は、詳細な技術データベースと人口、GDP、ストックとエネルギー消費量など現実のデータで推定したパラメータに基づき、「Two-level CES 型生産関数」や「技術学習効果」などモデリング方法によって、緻密に構築された大規模な非線形最適化評価モデルである。「トップダウン」と「ボトムアップ」手法の利点を統合したことで、技術に関する詳細な記述と評価が可能となり、また国際炭素取引市場やCO₂以外のSO₂とNO_xの同時削減効果（Co-Benefit 効果）など、環境政策の実施効果に関する評価にも優れている。「expert-based」限界削減曲線と「model-derived」限界削減曲線の利点を総合し、さらに「線形逆問題」（linear inverse problem）の解法を用いて各種技術の限界削減コストを計算し、シ

「東アジア低炭素共同体」構想の具現化と「政策工学」の創成にむけて(周・任・蘇・銭・山崎・伊庭野・孫・加藤・芳賀)

システム内部の相互影響のみならず、各種削減技術のコストの詳細をも反映できる。

本モデルを用い、BAU (business as usual) シナリオと COP15 シナリオ (COP15 で各国が公示した削減目標) における 2010-2050 年までの日中韓 3 国の CO₂ 排出削減シナリオを分析した。特に各国が単独で排出削減目標を達成した場合の GDP 損失を算出し、「低炭素共同体」実現により経済的に有利であることを明らかにした。また、日中韓排出量取引制度の導入によって、日中韓が単独に CO₂ 排出削減目標を達成する場合に比べて、削減コストを明らかに下げられることを定量的に示したことは、「東アジア低炭素共同体」構築の有力な根拠となる。

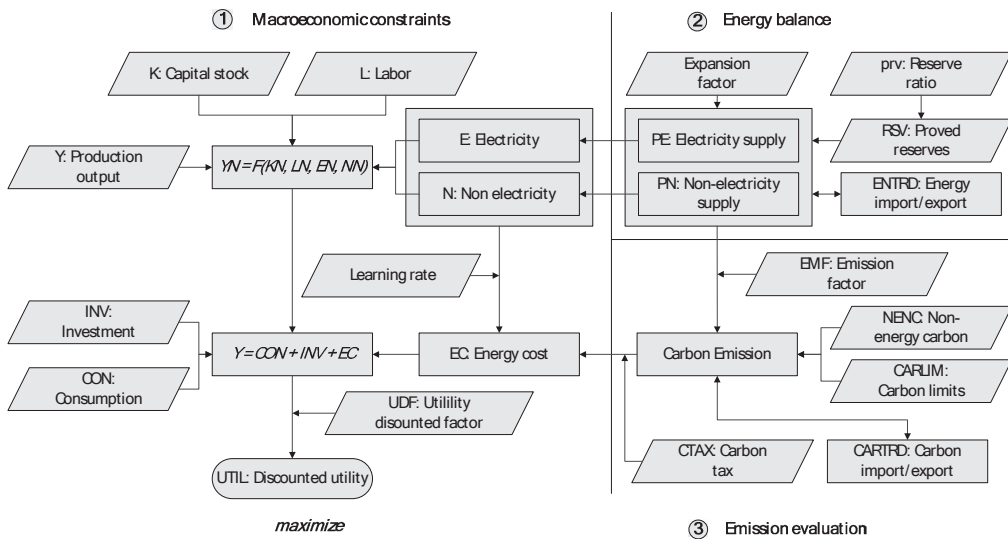


図 12 G-CEEP モデルフローチャート

(3) 結果と考察

① 限界削減費用

限界削減費用 (MAC) は、CO₂ の排出量を追加的に 1 トン削減するために必要な費用である。図 13、図 14 及び図 15 に示すように、本研究では、日中韓の炭素取引シナリオの限界削減費用曲線を推定する。

炭素取引で、省エネは、日本にとって最も重要な削減対策となる。省エネの限界削減費用は、BAU ケースと比較して、59.8 から 50.0 ドル (2000USD、トン当たり) に減少し、それが日本の総炭素削減量の 59.7% を貢献し、総削減費用は 9.8% を占めている。原子力は、大きな規模を想定した場合には、日本の総炭素削減量の 28.8% を貢献し、総削減費用は 71.7% を占めている。バイオマス、風力及び太陽光発電の導入が 2.9%、1.3% 及び 0.1% の日本の総炭素削減量を貢献し、その削減費用は、3.9%、3.2% 及び 0.3% を占めている。

中国では、省エネのために、限界削減費用は 8.2 から 30.3 ドルに増加する。省エネは、取引

なしのシナリオで総炭素削減量の78.0%を貢献しながら、取引のシナリオでは、総炭素削減量の63.5%を貢献している。これは、低限界削減費用で省エネが十分な炭素排出削減を達成できないことを示している。このように、省エネの限界削減費用レベルが上昇する。高炭素集約的な化石燃料から低炭素集約型までの転換は、炭素排出量を削減するための有効な対策である。この転換について、限界削減費用は71.3 から101.1 ドルに増加し、総炭素削減量の23.2%を貢献する。化石燃料のシフト、省エネ及びバイオマスの削減費用は、総削減費用の32.5%、

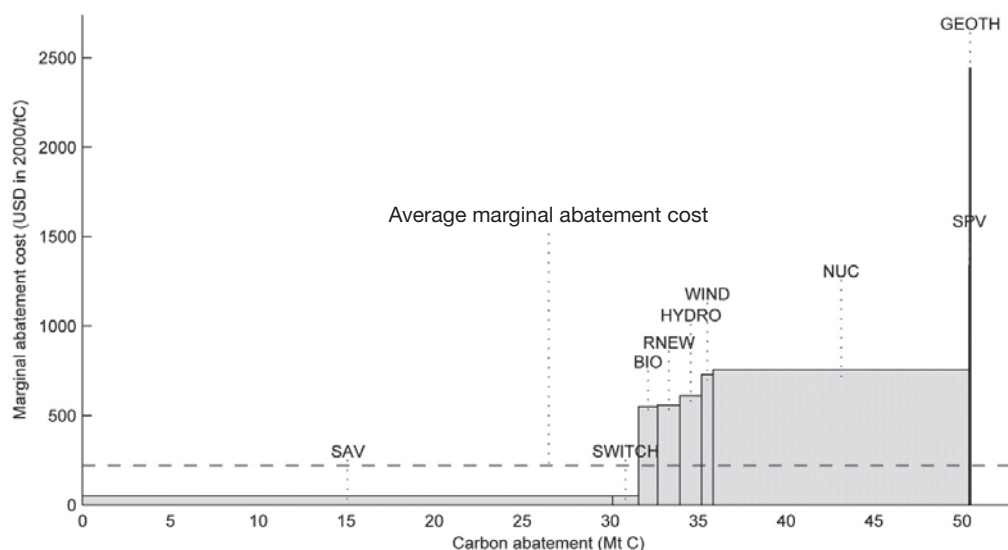


図 13 日本の限界削減費用 (2020 年)

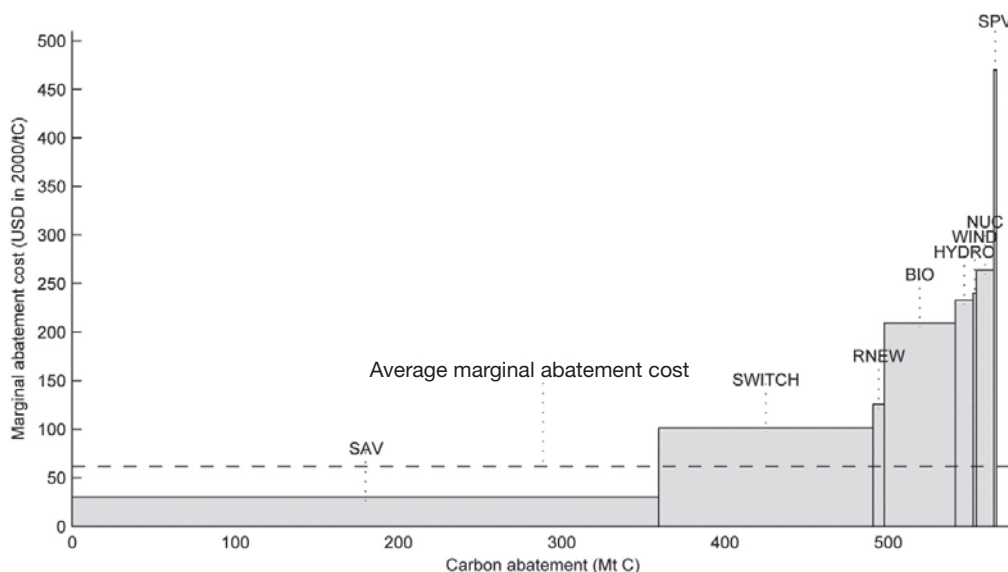


図 14 中国の限界削減費用 (2020 年)

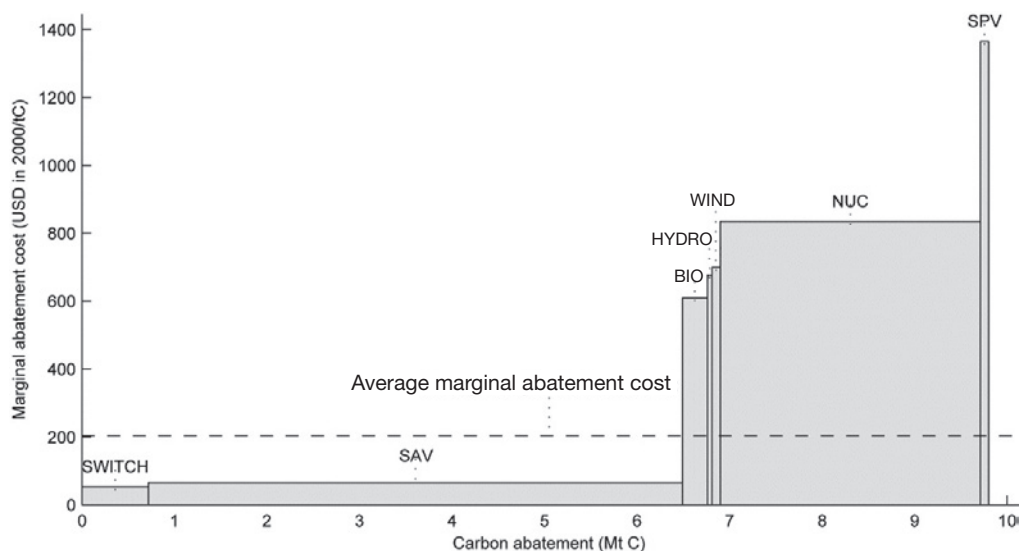


図 15 韓国の限界削減費用 (2020 年)

26.7%及び22.3%を占めている。低発電容量のため、原子力削減費用が占める割合は6.9%である。炭素取引は、中国の国内炭素価格が増加し、各削減対策の削減効率が改善されている、削減目標を達成することができる。

韓国は、省エネでも重要な削減手段だが、総削減量の58.8%貢献する。次のオプションは、原子力、化石燃料のシフト及びバイオマスである。原子力の削減費用は、74.6%を占めている。省エネ、バイオマス及び化石燃料のシフトの削減費用は11.9%、5.2%及び1.2%を占めている。限界削減費用は、取引なしのシナリオより、333.9ドルから204.1ドルまでになる。

② CO₂ 排出量取引

炭素取引は、炭素クレジットのバイヤー（本研究の日本と韓国）の国内の炭素排出削減量を低下させ、総削減費用を下げる。発展途上国のための（本研究の中国）、排出量取引からの収益を獲得し、国内の炭素排出削減レベルを向上させる。結果は、日本が排出量取引で90.4Mt炭素を削減し、韓国は炭素取引で52.6Mtを削減しながら、中国が143.0Mtを販売していることを示している。炭素取引により、削減費用が大幅にカットされる。日本も炭素取引がない場合は、1990年レベルより25%炭素排出量削減、484億ドル（2000USD）の費用が必要とする。炭素取引では、日本国内の削減コストは111億ドルに削減され、総削減費用は、依然として40.9%減少する。韓国の場合は、炭素総排出量の24.8%を削減することにより、総削減費用は20.7から12.2億ドルに減少する。同時に、中国は炭素クレジットを販売から277億ドル収益を得る。中国の総削減費用は、依然として11.5%減少する。一般的に言えば、既存の炭素強度においては、先進国の炭素排出量を削減することはコストがかかり、非効率的である。発展途上国は排出量取引から利益を得、総削減費用を下げるができる。炭素排出量取引は、相対

的な低削減費用で、気候変動を制御するために使用される市場ベースのアプローチである。この枠組みを利用することでCO₂排出量削減を先進国と発展途上国にウィンウィンの関係をもたらしながら実現できる。

この研究は、国際的な炭素価格と国内炭素価格を考慮している。国際炭素価格は、炭素排出量需給曲線から派生限界削減費用曲線を用いて決定され、国内の炭素価格は、国内の削減費用によって決定される。したがって、国際炭素価格は炭素換算トン当たり193.8ドルであると推定される。国内の炭素価格については、日本は343.8から219.8ドルに減少し、韓国は333.9から204.1ドルに減少する。同時に、中国の国内の炭素価格は19.4から61.4ドルに増加する。中国の増加の削減費用の一部が炭素クレジットを販売してからの収益によって補償され、炭素削減と同時にSO₂削減等公害負荷の低減によって環境が改善され、大きなコベネフィット効果がもたらされる。先進国と発展途上国は、排出量取引から利益を得ることができる。

Ⅳ. 今後の展望—「政策工学」の創成

本研究プロジェクトの中心である、サステナブルな広域低炭素社会の構築は、現代的な社会問題として、政治、行政、経済、経営、短期と長期、ローカルとグローバルなど複雑に絡みあって総合的な性格をもっている。それを解決するための政策も多面的で、複雑なシステム（系）となっており、「経験と勘」に頼る政策から「科学的・工学的手法」による政策へと転換が求められている。また、諸科学で得られた知見や技法をいかに現場にもたらし、現場の課題をいかに諸科学へフィードバックするかが問われる。そのためには、「実験政策学」「政策実験論」などの研究・教育分野の確立など、独自の研究方法の確立が重要であると考えられる。

「政策工学」(Policy Engineering)とは、政策ライフサイクルの効率性、有効性、公平性を時間軸、空間軸、対策軸から分析、立案、実施、評価（検証）を行う学問とする。簡単に言えば、政策を工学的手法で最適化し、効用の最大化とコスト（リスク）の最小化を求める学問である。「政策工学」は、自然科学から社会科学まで学問領域を横断し、客観的なデータとモデル分析により社会の諸問題に対して最適解を導き出すアプローチである。このアプローチは、広く浅く諸問題を鳥瞰し解決法を議論するのではなく、各問題の根底に存在する共通構造を抽出し、その共通構造のもとに諸問題を体系的に位置付け、システムティックに解決するための政策展開シナリオを明らかにする。

「政策工学」は、総合性（一つの課題に複数の政策（施策）、または一つの政策が複数の課題に対処する）、計量性（社会の複雑化に伴い、その政策の費用対効果の数量的把握が不可欠になってきている）、最適化性（社会効用の最大化とコスト（リスク）の最小化）並びに理論と実践の結合性のような特色を持つ学問として位置づける。言わば、多様なアプローチから統合して、最も適切な方法で複雑な社会問題を解決する最適化な解（政策）を求める超学際的(Transdisciplinarity)学問である。

日本では、「政策 (Policy)」の名前を冠した大学・大学院の学部や学科等が多数創設され

「東アジア低炭素共同体」構想の具現化と「政策工学」の創成にむけて(周・任・蘇・銭・山崎・伊庭野・孫・加藤・芳賀)

た。例えば環境問題は「文理融合」のもと、取り組むべき問題の顕著な例であるが、異分野の研究者が結集しただけでは問題は解決されない。真の「文理融合」は問題対象だけでなく方法論においても異分野融合が必要なのである。「政策工学」では、自然科学や工学分野で用いられる定量的シミュレーション分析にならい、定量的で客観的な政策評価を行う。さらには多様な価値観を考慮した統合評価指標開発を行い、政策決定過程を円滑化する研究に取り組む。これにより、問題対象の分析から政策提言までの一連のプロセスを、従来の「経験と勘」から「科学的・工学的手法」に基づくものへ転換させる。

「政策工学」は学問のための学問ではなく、常に実践即ち学問を現実の世界に適用し実施・実現し、現実の世界を改善することを目指すものである。例えば、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の一連の評価報告書においても、社会経済政策の有効性を検証するため、自然科学的知見と社会科学的知見を備えた統合評価モデルの分析結果が多数引用されている。IPCCの評価報告書は政策決定のあり方までは踏み込んでいないが、これからの政策提言は、定量評価シミュレーション分析に基づいた戦略的かつ体系的、定量的かつ具体的なものでなければ、社会実装に耐えることはできない。

本研究の今後の展開として、「政策工学」という自然科学から社会科学まで学問領域を横断し、客観的なデータとモデル分析により最適な政策を導き出す学術手法を確立し、社会に発信することである。これにより、異分野横断的な学問領域を創生するのみならず、社会の政策形成プロセスを、客観的に検証可能なエビデンスベースのものに変える手法を広く社会の政策決定者に向け発信する。

謝辞

本研究は、2008年度立命館グローバル・イノベーション研究機構(R-GIRO)研究プログラム及び環境省地球環境研究総合推進費地球環境問題対応型研究課題「都市・農村の地域連携を基礎とした低炭素社会のエコデザイン」(FY2008-FY2010)の助成を受けたものである。

また、本研究を遂行するにあたり、仲上健一教授より大所高所から暖かいご指導を賜りました。ここに記して厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) T. Takeshita. "A Strategy for Introducing Modern Bioenergy into Developing Asia to Avoid Dangerous Climate Change." Applied Energy, Vol.86, Supplement 1, pp. S222-S232 (2009).
- 2) 任洪波、周瑋生、仲上健一. "中国における建築省エネルギークリーン開発メカニズム(CDM)事業の導入可能性に関する研究：浙江省湖州市を事例として", 国際地域研究, Vol.30, pp.63-80, 2009年12月.
- 3) Benning LIAN, Yohei KAWAI, Tatsuo SAKAI, Akira UENO, Neitetsu SHIRAKAWA, Kenji KONISHI, Hirohisa KAWAKITA, Hidehiko NOGAMI and Kenji OKADA, "Modeling and Some Experimental Results of Micro-hydropower System Using Tidal Energy". Proceedings of EcoDesign 2010. CD (4pages), 2010.

- 4) T. Minemoto, H. Takahashi, Y. Nakada, H. Takakura. "Uniqueness verification of solar spectral index of average photon energy for evaluating outdoor performance of photovoltaic modules". *Solar Energy*, Vol. 83, pp.1294-1299, 2009.
- 5) K. Ichida, S. Fukushige, A. Nakajima, T. Minemoto, H. Takakura, "Impact of environment factors on solar cell parameters of a-Si/mc-Si photovoltaic modules", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2009.
- 6) Md. Mahmudul Hasan, Md. Shafiquzzaman, Md. Shafiul Azam, Jun Nakajima, "Application of a simple ceramic filter to membrane bioreactor", *Desalination*, Vol. 276, Issues 1-3, pp 272-277, 2011.
- 7) Tuyet T. Tran, Md Shafiquzzaman, Jun Nakajima. "Control of membrane fouling by coagulant and its aid addition in membrane bioreactor systems", *J. Water and Environment Technology*, Vol.8, No.3, pp.203-213, 2010.
- 8) Zoynab Banu, Shariful Alam Chowdhury, Md. Delwar Hossain, Nakagami Ken'ichi, "Contamination and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal in the Sediment of Turag River, Bangladesh: An Index Analysis Approach", *ASCE*, 2012, 6.
- 9) Hongbo REN, Weisheng ZHOU and Weijun GAO, "Optimal Option of Distributed Energy Systems for Building Complexes in Different Climate Zones in China", *Applied Energy*, Vol.91, No. 1, pp 156-165, 2012-3.
- 10) Hongbo REN, Weisheng ZHOU and Ken'ichi NAKAGAMI. "Transition to a Low-Carbon Energy System through the Adoption of Distributed Energy Resources: Case study in a Chinese Urban Area". *Journal of Policy Science*, Vol.4, pp.99-114, 2009.
- 11) Hongbo REN, Weisheng ZHOU, Ken'ichi NAKAGAMI and Weijun GAO. "Integrated design and evaluation of biomass energy system taking into consideration demand side characteristics", *Energy*, Vol.35, No.5, pp 2210-2222, May, 2010.
- 12) Hongbo REN, Weisheng ZHOU, Ken'ichi NAKAGAMI, Weijun GAO and Qiong Wu, "Feasibility Assessment of Introducing Distributed Energy Resources in Urban Areas of China", *Applied Thermal Engineering*, Vol.30, Issue 16, pp.2584-2593, Nov. 2010.
- 13) Hongbo REN, Weisheng ZHOU, Ken'ichi NAKAGAMI, Weijun GAO and Qiong Wu, "Multi-objective Optimization for the Operation of Distributed Energy Systems Considering Economic and Environmental Aspects", *Applied Energy*, Vol.87, Issue 12, pp.3642-3651, Dec. 2010.
- 14) 任洪波・周璋生・仲上健一. "中国都市部における民生部門用分散型エネルギーシステムの最適化". *エネルギー・資源 (エネルギー・資源学会)*, Vol.31, No.1, pp.29-37, 2010 年 1 月.
- 15) Faming Sun, Yasuyuki Ikegami, Hirofumi Arima, Weisheng Zhou, "Performance Analysis of the Low Temperature Solar-boosted Power Generation System: Part I. Comparison between Kalina Solar System and Rankine Solar System", *"Journal of Solar Energy Engineering (ASME)"*, Vol.135 No. 011015, 2013.
- 16) Faming Sun, Yasuyuki Ikegami, Hirofumi Arima, Weisheng Zhou, "Performance Analysis of the Low Temperature Solar-boosted Power Generation System: Part II. Thermodynamic Characteristics of the Kalina Solar System", *"Journal of Solar Energy Engineering (ASME)"*, Vol.135 no. 011006, 2013.
- 17) Faming Sun, Weisheng Zhou, NAKAGAMI Ken'ichi, Xuanming Su, "Energy-Economic Analysis and Configuration Design of the Kalina Solar-OTEC System", *"International Journal of Computer and Electrical Engineering"*, Vol. 5, No. 2, pp.187-191, 2013.

- 「東アジア低炭素共同体」構想の具現化と「政策工学」の創成にむけて(周・任・蘇・銭・山崎・伊庭野・孫・加藤・芳賀)
- 18) 大西学. “竹林の CDM 化にむけての制度設計”. 第 2 回調和社会構築に関する日中シンポジウム. 立命館大学、2009 年 2 月.
 - 19) Xuepeng Qian, Ken Arii, “Study on Bamboo Forest and Industry in Japan as One Possible Solution for Low-carbon Society”, 2nd Annual Conference of International Association for Asia Pacific Studies, 2011.11.27.
 - 20) QIAN Xuepeng, ARII Ken, ZHOU Weisheng, “Eco-industrial Development for Bamboo Industries: Some Discussions based on Systems Approach”, 日本地域学会年会、2012.10.
 - 21) 周瑋生、任洪波、仲上健一. “広域低炭素社会に向けた都市と農村連携による国際互惠型エネルギーシステムに関する研究：その 1 湖州市における分散型エネルギーの導入可能性に関する評価及び導入促進策の解析”. 政策科学 (立命館大学政策科学会), Vol.16, No.2, pp.17-27, 2009.
 - 22) 周瑋生・仲上健一、地球環境研究総合推進費報告書：E-0804 都市・農村の地域連携を基礎とした低炭素社会のエコデザイン (4) 広域低炭素化社会実現のためのエネルギー・資源システムの改変と政策的実証研究、2009.
 - 23) 許士超、周瑋生、仲上健一、伊庭野健造 (立命館大学)、日中韓原発安全保障システムの構築—世界の原発事故原因の分析から、第 29 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス、東京砂防会館、2013 年 1 月.
 - 24) 周瑋生. “広域低炭素社会実現を目指して：「低炭素共同体」構想の提起”. 環境技術 (環境技術学会). Vol.37, No.9, pp.642-646, 2008.
 - 25) 小泉國茂. “国際資源循環健全化の課題と解決策に関する考察”. 工業経営研究. Vol.24, pp.10-19, 2010 年 8 月.
 - 26) 山崎雅人、蘇宜銘、孫發明、周瑋生、産業連関モデルを用いた炭素の国際間移動の推計—生産ベース推計と消費ベース推計の比較、環境経済・政策学会 2012 年大会、東北大学 (川内北キャンパス)、2012 年 9 月 15-16 日.
 - 27) Hongbo Ren, Weisheng Zhou, Weijun Gao and Qiong Wu, Promotion of Energy Conservation in Developing Countries through the Combination of ESCO and CDM: A Case Study of Introducing Distributed Energy Resources into Chinese Urban Areas, Energy Policy, Vol.39, No.12, pp 8125-8136, 2011.12.
 - 28) Takanobu Kosugi. “Assessments of 'Greenhouse Insurance: A Methodological Review”, Asia-Pacific Financial Markets, Volume 17, Number 4, pp. 345-363, 2010.12.
 - 29) 山崎雅人、「原発全基停止の経済・環境影響—多地域応用一般均衡モデルによる定量評価—」、第二回防災経済分析研究会 京都大学防災研究所 2012 年 3 月.
 - 30) 山崎雅人、2012 年原発全基停止の経済影響—多地域応用一般均衡モデルによる定量評価、H24 年度立命館大・RITE・東大合同研究発表会、京都府木津川市地球環境産業技術研究機構、2012 年 6 月.
 - 31) Xuanming Su, Weisheng Zhou, Masato Yamazaki and Faming Sun, Measurement of Post-Fukushima Climate Change Mitigation Options for Japan, China and Korea by Using Glocal Century Energy Environment Planning (G-CEEP) Model, 31st USAEE/IAEE North American Conference, Nov. 4 - 7, Austin, TX, USA. 2012.
 - 32) Xuepeng Qian, Weisheng Zhou, Koichiro Yamada and Qian Wang. “Pairing Aid System in Disaster Relief and Recovery Management: Lessons from Wenchuan Earthquake in China”, Proceedings of International Conference on Disaster Management 2012, ISBN 978-4-9906434-1-6, pp.67-74, 2012.7.
 - 33) 周瑋生、「複合型災害の救援復興のための「政策特区構想」」、複合型災害の救援復興日中シンポジウ

- ム、四川大学災害復興と管理学院・立命館大学政策科学部共催、四川大学、成都、2011.11.08.
- 34) 蘇宣銘、周瑋生、穆海林、仲上健一、「東アジア低炭素共同体」実現のための将来シナリオ構築に関する研究：その1 エネルギー・経済統合評価モデル（G-CEEP）の開発とケーススタディ」、政策科学、Vol.17 No.2, pp85-96, 2010年2月.
- 35) Xuanming Su, Weisheng Zhou, Ken'ichi Nakagami, Hongbo Ren, Hailin Mu, "Capital Stock-Labor-Energy Substitution and Production Efficiency Study for China", Energy Economics Vol.34, Issue 4, pp.1208-1213, July 2012.
- 36) Xuanming Su, Weisheng Zhou, Hongbo Ren, Ken'ichi Nakagami, 「Co-benefit Analysis of Carbon Emission Reduction Measures for China, Japan and Korea」、政策科学、Vol.19, No.2, pp.99-112, 2012-2.
- 37) 任洪波、小泉國茂、周瑋生、仲上健一、加藤久明. "都市農村連携による分散型エネルギーシステムと国際資源循環". 環境技術（環境技術学会）. Vol.39, No.9, pp.543-548, 2010年9月.
- 38) 任洪波・周瑋生・仲上健一. "中国都市部における民生部門用分散型エネルギーシステムの最適化". エネルギー・資源（エネルギー・資源学会）. Vol.31, No.1, pp.29-37, 2010年1月.
- 39) W. Zhou, K. Koizumi, "Propriety of the trans-boundary trade of recyclable waste and contribution to realize the Low-carbon society - Study on the Construction of win-win Global Recycling System between Japan and China -", IR3S-UNU Book Series Sustainability Science Vol.3, Establishing a Resource-Circulating Society in Asia Challenges and Opportunities, United Nations University Press, 2011.
- 40) 周瑋生、仲上健一、蘇宣銘、任洪波. 「東アジア低炭素共同体」構想の政策フレームと評価モデルの開発". 環境技術（環境技術学会）. Vol.39, No.9, pp.536-542, 2010年9月.
- 41) 蘇宣銘、立命館大学博士（政策科学）学位論文：Modeling of a "Glocal Low-Carbon Community" and Policy Perspectives for Japan, China and Korea, 2012.3.
- 42) 任洪波、周瑋生、仲上健一、高偉俊、呉瓊、ESCOとCDMのリンクによる国際互惠型エネルギーシステムの構築に関する研究—中国における民生部門用分散型エネルギー導入を例として—、第19回日本エネルギー学会大会、2010年8月.
- 43) Hongbo REN, Weisheng ZHOU and Ken'ichi NAKAGAMI, Feasibility Assessment of Distributed Energy Adoption in China and Analysis of the Promotion Policies, 6th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Japan, Dec. 2009.
- 44) Hongbo REN, Weisheng ZHOU and Ken'ichi NAKAGAMI, Transition to a Low-carbon Energy System through Cooperation between Urban and Rural Areas: Case Study of a Model Area in China, The 2010 International Conference on Electrical and Energy Systems (ICEES 2010), pp55-58, Singapore, Feb. 2010.
- 45) Hongbo REN, Weisheng ZHOU, Weijun Gao and Qiong Wu, Multi-objective Optimization of Biomass-based Integrated Renewable Energy System Considering Economics and CO₂ Emissions, 2010 Systemics and Informatics World Network (SIWN 2010) Joint with The 3rd International Conference on Industrial Informatics and Systems Engineering (IISE 2010), China, Jul. 2010.
- 46) LI Fan, QIAN Xuepeng and ZHOU Weisheng, Potential Assessment of Residential Solar Power System Utilization in Japanese Regional Central Cities, The 48th Japan Section of the Regional Science Association Conference, 8-10 October 2011.