

戦略プログラム

エネルギー政策のための科学：
技術・経済モデルの研究開発

STRATEGIC PROGRAM

Science for Energy Policy:
R&D on Engineering-Economy Models



独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

研究開発戦略センターでは、国として重点的に推進すべき研究領域や課題を選び、以下3種類いずれかの戦略プロポーザルとして発行している。

戦略イニシアティブ

国として大々的に推進すべき研究で、社会ビジョンの実現に貢献し、科学技術の促進に寄与する

戦略プログラム

研究分野を設定し、各チームが協調、競争的に研究することによって、その分野を発展させる

戦略プロジェクト

共通目的を設定し、各チームがこれに向かって研究することによって、その分野を発展させると同時に共通の目的を達成する

エグゼクティブサマリー

「エネルギー政策のための技術・経済モデルの研究開発」とは、様々なエネルギー技術と経済社会活動の相互作用を定量化するモデルを高度化する研究開発領域である。最終的な目的は、その成果を様々なエネルギー政策立案や産業界におけるエネルギーマネジメントの科学的根拠として活用することであるが、本戦略プログラムでは、その基盤となるエネルギー技術・経済モデルに関する基礎研究を強化・支援することを提案する。エネルギー技術・経済モデルは、演繹的にミクロな視点から工学プロセスを積み上げてシステム全体を記述するボトムアップ型の技術モデルと、経済指標などのマクロな集計量の間で経験的に成立する関係式を帰納的に連立させたトップダウンの経済モデルに大きく分類されるが、現状では、技術と経済のリンクは十分とは言えず、両者を同時に扱えるようにすることが大きな研究課題である。またその実現のためには、中立、オープンで自立性の高い研究コミュニティの確立と、その支援が不可欠である。

地球温暖化や資源枯渇などの地球規模の課題を克服し、豊かな持続性社会を構築するためには、供給側だけでなく転換部門から需要側までを広く俯瞰した上で、地に足のついたエネルギー政策が不可欠である。膨大な量である化石エネルギー消費を、量的、経済的に代替できる単一のエネルギー源は現在のところ存在しない。従って最適なエネルギー・ベストミックスを、公平・中立・客観的な立場で幅広く検討する必要がある。一方で、研究開発資源は有限である。その有効な分配を実現するためにも、現実を見据えたロードマップの形成が不可欠である。エネルギー技術・経済モデルの基礎研究によって、このような議論や判断に資する根拠が、科学的かつ中立な立場から提供される。

技術モデルと経済モデルのそれぞれをより高度化すると同時に、エネルギー技術と経済活動の密接な関連性を踏まえて、両モデルの統合を達成することが極めて重要である。技術モデルにおいては、新技術の定式化、物質の保有するエネルギーの定量化、環境研究との連携等が求められる。経済モデルでは、一般均衡の概念や限定合理性等（与えられる前提や条件の下において保証される合理性）の経済学のプロンティアの追求、産業関連表データベースの整備等が必要である。両者の統合に向けては、技術と経済社会構造の変化の相互作用を明らかにし、そのメカニズムを解明し、データベースによる検証を行うため、組織的かつ開かれた研究推進が必要である。

上記課題は工学と経済学の境界領域に存在しているが、わが国の現状のエネルギー技術・経済モデル研究はそれぞれの分野に留まり、学術分野として未発達である。従って、特定のテーマについて研究者を広く募って推進するような推進方法では新たな科学の創成は困難であり、工学者と経済学者が連携し、中長期の視点からエネルギー技術・経済モデル研究を継続できる中立でオープンな研究環境の醸成が必要である。そのような場として、拠点の形成、あるいは学会等の場を借りることによって、学際的な研究を継続的に推進するための支援が求められる。その前提として、ポリシーメーカーと科学者が、互いの

行動規範を明らかにし、役割を尊重し合った形で、健全な信頼関係を作ることも必要である。こうした枠組みによって、様々な専門分野の研究者が集結した新しいマルチディシプリンの学術領域が形成されると共に、正当性あるエネルギー政策の立案が可能となることが期待される。

また、エネルギー技術・経済モデルに関する研究は、労力と時間を要する割に必ずしも高い評価が得られず、若手研究者が長期的に意欲を持って研究に取り組みにくい状況がある。上述の中立でオープンな場で活躍、交流する若手研究者への政策的な支援によって、次世代を支える人材育成も進めるべきである。そのためにも、新たな公的支援が必要である。一方、若手研究者のキャリアパスも大きな問題である。大学のポストに限らず、政府、地方自治体、産業界にも協力を呼びかけ、エネルギー政策立案やエネルギーマネージメントなどに、彼らの専門家としての能力を活用していくための工夫が必要である。

なお、エネルギー技術・経済モデルは、技術と経済の関連を定量化する学術であり、人類のあらゆる生産・消費活動に関わっている。本戦略プログラムによる研究の成果は、エネルギー政策立案に限らず、広く他分野にも有用な共通基盤的なものであり、育成される人材も含めて、その波及効果は極めて大きいと言える。



図1 エネルギー技術・経済モデルの位置づけ

Executive Summary

Engineering–economy model for energy policy is a methodology for quantifying the interaction between energy technologies and economic activities. The final aims of this model are to provide evidences based on science for energy policy and to give energy management strategies in industries. On the other hand, this report focuses on the importance of governmental support for the R&D on engineering–economy model as a basic research. Two major approaches exist for energy modeling, i.e. deductive bottom up approach and inductive top down approach. Integration of these two approaches will be the essential research target of this program. In addition, further supports for this scientific community are required.

In order to overcome global issues, e.g. resource exhaustion and global warming, and to achieve sustainable society, it is indispensable to possess a firm energy policy.

In addition, research and development of energy technologies should be in accordance with this strategy. Contribution to the total energy issues must be quantitatively evaluated, and technology roadmap based on scientific evidence must be developed. Engineering–economy model must be developed and improved to provide quantitative evidences for those discussions in an autonomous community.

The issues mentioned above lie at the boundary between engineering and economy, and the present engineering–economy model remains at an immature stage as an academic field because of a lack of interactions between the two disciplines. Thus, it would be difficult to promote it by competitive funding schemes. A neutral multidisciplinary and open research environment to conduct related basic research must be established. A possible pathway would be to fund and support continuously interdisciplinary research activity developed at a research base or an academic society. To do this, it is mandatory that both policy makers and scientists should respect their roles each other and define their codes of conduct in order to establish a healthy relationship. Only with these, it can be expected that a new multi-disciplinary academic field will be established and energy policy making can be justified.

It is essential to cultivate young scientists in this society. Thus, active support for human resources development is also a critical issue. In addition, more efforts to develop career passes for young scientists are also required. Not only academic posts, but employments in local governments and industries should be considered as new possibilities.

Research for engineering–economy modeling is an activity for quantifying the interactions between technologies and economic activities, and is related to all social

activities. Thus, the achievements of the present strategic program can be applied not only to energy policies but also to very wide fields. Its impacts on the industry and the society will be enormous.

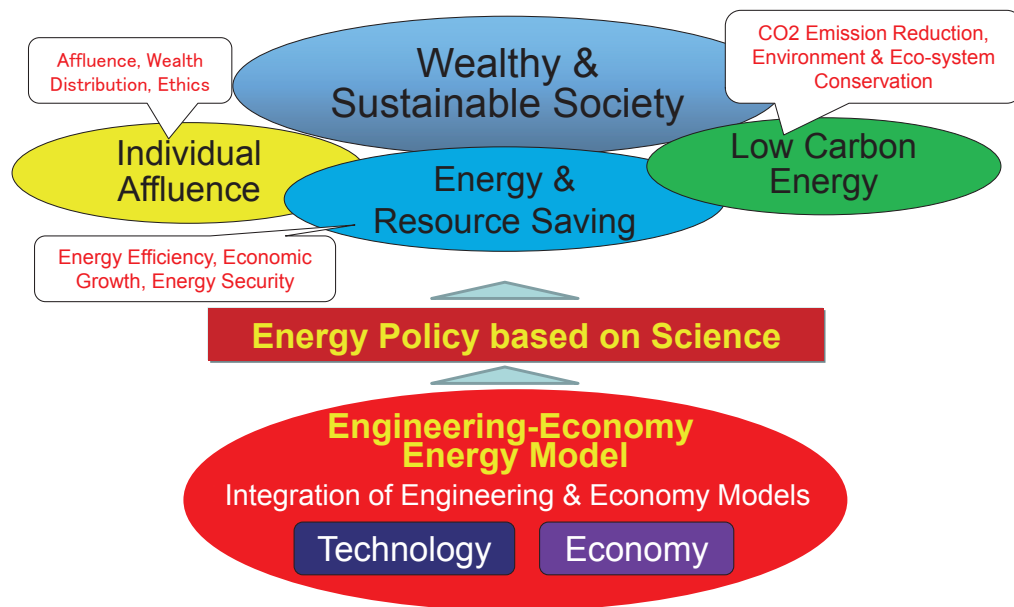


Fig. 1 Engineering–economy model as a key for science based energy policy.

目 次

エグゼクティブサマリー

Executive Summary

1. 提案の内容	1
2. 研究投資する意義	6
3. 具体的な研究開発課題	9
3.1 エネルギー技術・経済モデルの現状と課題	
3.2 具体的な研究テーマ	
4. 研究開発の推進方法	12
5. 科学技術上の効果	14
6. 社会・経済的効果	15
7. 時間軸に関する考察	16
8. 検討の経緯	18
9. ワークショップで紹介された研究開発課題例	21
9.1 自律的エネルギー経済モデル構築の設計・計画手法 －科学技術情報と経済社会構造解析の連携に向けての基礎研究－	
9.2 エネルギーモデル開発の経験から学ぶもの	
9.3 エネルギーモデル活用の立場から一言	
9.4 最近の温暖化問題と統合アプローチの重要性	
9.5 ボトムアップモデルの現状と課題　－AIM/Enduse を中心として－	
9.6 ボトムアップモデルの課題	
9.7 ボトムアップモデル	
9.8 東日本大震災後のエネルギー政策と低炭素化施策について	
9.9 エネルギー・環境経済モデルで重要となる視点	
9.10 地球温暖化対策評価への　経済学からの接近　－モデル、データ、方向性	
参考文献	31

1. 提案の内容

「エネルギー政策のための技術・経済モデルの研究開発」とは、様々なエネルギー技術と経済社会活動の相互作用を定量化するための研究開発領域である。その結果を科学的根拠としてエネルギー政策が立案されることがモデル開発の最終的な目的となるが、本戦略プログラムでは、その基盤となる「エネルギー技術・経済モデル」に関する基礎研究を強化・支援することを提案する。エネルギー技術・経済モデルの定式化には、演繹的にミクロな視点から工学プロセスを積み上げてシステム全体を記述するボトムアップ型の技術モデルと、経済指標などのマクロな集計量の間で経験的に成立する関係式を帰納的に連立させたトップダウンの経済モデルがある⁽¹⁻⁵⁾。現状では、技術と経済モデルのリンクは十分とは言えず、両者を同時に扱えるようにすることが大きな研究課題である。またその実現のためには、中立、オープンで自立性の高い研究コミュニティの確立と、その支援が不可欠である。

我が国は、未曾有の大災害や世界的な経済危機の中で、中長期的な資源問題、地球温暖化などの地球規模課題に対する国家戦略を構築する必要がある。そのためには、科学的な根拠に基づいたオープンな議論が不可欠であり、また国民にはその戦略の中身や結果の意味について分かりやすく説明がなされる必要がある。さらに、エネルギーに関わる基礎研究を健全に推進するためにも、そのベースとなるぶれのない確固たる国家的なエネルギー政策が不可欠である。エネルギー技術・経済モデルの基礎研究によって、このような議論や判断に資する根拠が、科学的かつ中立な立場から提供される。本戦略プログラムは、エネルギー技術・経済モデルを高度化することの意義、具体的課題、研究投資の効果についてまとめたものである。

技術モデルと経済モデルのそれぞれをより高度化すると同時に、エネルギー技術と経済活動の密接な関連性を踏まえて、両モデルの統合を達成することが極めて重要である。技術モデルにおいては、新技術の定式化、物質の保有するエネルギーの定量化、環境研究との連携等が求められる。経済モデルでは、一般均衡の概念や限定合理性等の経済学のフロンティアの追求、産業関連表データベースの整備等が必要である。両者の統合に向けては、技術と経済社会構造の変化の相互作用を明らかにし、そのメカニズムを解明し、データベースによる検証を行う必要がある。

ここで、工学と経済学の研究者の連携が大きな課題である。政策当局の緊急ニーズに対応するのではなく、中立でオープンな環境（拠点や学会等）で、長期的なスタンスで基礎研究を遂行できる学術の場が必要である。海外では、例えばスタンフォード大の **Energy Modeling Forum** のように、中立な機関が特定のターゲットを与え、それを様々なモデルで解いて議論するという仕組みがある。また、冷戦時に各国政府が出資し、中立国であるオーストリアに設立された組織である **International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)** がある。東西の緊張緩和の機能も担っていた。日本にもこのような研究

交流の場が必要である。領域を超えた幅広い研究者の交流やデータベースの蓄積を含め、長期的で体系的な基礎研究への支援が求められる。その前提として、ポリシーメーカーと科学者が、互いの行動規範を明らかにし、役割を尊重し合った形で、健全な信頼関係を作ることが必要である。自立性の高い研究コミュニティが確立され、その中で現実の施策や効果が研究にフィードバックされることで、中立で信頼性の高いモデルが継続的に研究開発される。

モデルに関する研究は労力と時間がかかる割に評価が必ずしも高いとは言えず、若手が長期的な視野を持って研究に取り組みにくい状況がある。上述の中立でオープンな場に、若手への人件費や研究費、交流等のサポートがあれば、次世代を支える人材育成にもつながる。そのためにはファンディングによる仕掛けが必要である。一方、若手研究者の卒業後のポストも大きな問題である。大学のポストに限らず、地方自治体や企業にも参加を呼びかけ、就職先を広めていくための工夫が必要である。なお、具体的な技術課題例の詳細は、第3章および第9章を参照されたい。

以上、本戦略プログラム提案の要点を整理すると、以下のようになる。

- 技術モデルと経済モデルの高度化と統合

技術モデルと経済モデルのそれぞれをより完成度の高いモデルへ改善すると同時に、エネルギー技術と経済活動の密接な関連性を踏まえて、両モデルの統合を達成することが極めて重要である。技術モデルにおいては、新技術の定式化、物質の保有するエネルギーの定量化、環境研究との連携等が求められる。経済モデルでは、一般均衡の概念や限定合理性等の経済学のフロンティアの追求、産業関連表データベースの整備等が必要である。両者の統合に向けては、技術と経済社会構造の変化の相互作用を明らかにし、そのメカニズムを解明し、データベースによる検証を行うため、組織的かつ開かれた研究推進が必要である。

- 工学と経済学の連携の場への支援

モデル開発を基礎研究として推進できる場（拠点または学会等）を作り、息の長い組織的な支援によって、工学者と経済学者の連携を進める必要がある。結果として、様々な専門分野の研究者が集結した新しいマルチディシプリンの学術領域が形成されることが期待される。

- 人材育成への支援

若手が長期的な視点で基礎研究に取り組むことができ、領域を超えて幅広く集うことのできる場へのサポートが必要である。一方、大学のポストに限らず、政府、地方自治体、企業等への就職先を広めていくための工夫が必要である。

コラム 1 エネルギー技術・経済モデルとは

エネルギー技術・経済モデルは、経済活動の中のエネルギーのフローを、様々な技術の組み合わせを前提として、数量的に表す数理モデルである。エネルギー技術・経済モデルは、科学的関心から何かを解明したいという動機から追求するものではなく、課題は外生的に与えられ、どういった因果関係を表すかというモデル化の対象を設定するためには、その対象をよく理解する必要がある。エネルギーモデルに最小限必要なことは、論理の整合性が担保され、その整合性の下で数量的関係の整合性も保証されることである。自然科学の場合には実験データによりモデルの正しさが検証されるが、エネルギーモデルにおいては客観的な参照データが得られることは稀で、その作業は困難であることが多い。従って、専門家間のピアレビューにより、求められるモデルの精度や論理的整合性等について検証することが必要になる。最終的には、モデルが意思決定者の扱っている問題に即しているか、役立つかどうか重要であり、ユーザーが誰かということを考えて、そのユーザーとの相互の対等な対話を確保しておくことが不可欠である。

エネルギー技術・経済モデルの定式化上の分類

エネルギーモデルの定式化（変数の関係性や因果関係を数学的に表すこと）には、演繹的にミクロな視点から工学プロセスを積み上げてシステム全体を記述するボトムアップ型アプローチと、経済指標などのマクロな集計量の間で経験的に成立する関係式を帰納的に連立させたトップダウン型アプローチがある。前者は、大量のデータが必要だが結果は明瞭であり、既知の新技术の評価に適している。後者は、社会全体を対象とした環境・経済政策の評価などに適している。以下、それぞれのアプローチについて概説する。エネルギーモデルの中には、ボトムアップとトップダウンの両方のアプローチが混在しているものも少なくない。コンピュータの能力の向上に伴い、どちらかといえばボトムアップ型でモデル化できる範囲が拡大する傾向にある。

ボトムアップ型アプローチ

ボトムアップ型アプローチによる代表的なモデルは、IEA の MARKAL モデルなど、一次エネルギー供給から最終エネルギー消費に至る流れを、様々な技術選択の中から最小コストで実現する解を求める最適化型エネルギー供給モデルである。モデルのパラメータの多くは、エネルギー変換効率などの工学的データであり、明快な解が得られる。その一方、基本的にエネルギー需要は与条件として外部から与えられるため、あくまでもその条件下での最適解となること、未知の技術やその効果は考慮することができず既知新技术を過大評価し易い傾向があること、物理的工学的な原理に基づかない社会的事象の記述が難しいことなどの課題がある。図 2 に、一次エネルギー供給から最終消費までのエネルギーフローを示す。最適型エネルギー供給モデルを用いることで、このフローを最小コストで実現する技術の組み合わせが求められる。

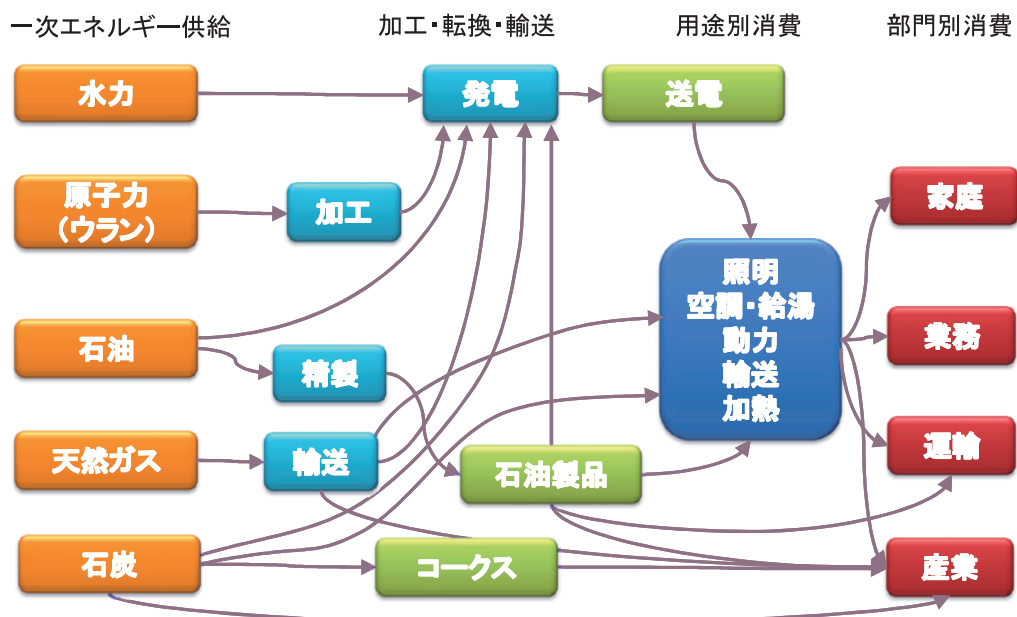


図2 最適化型エネルギー供給モデルに用いられるエネルギーフローを単純化した図（森[2007]を元に作成）

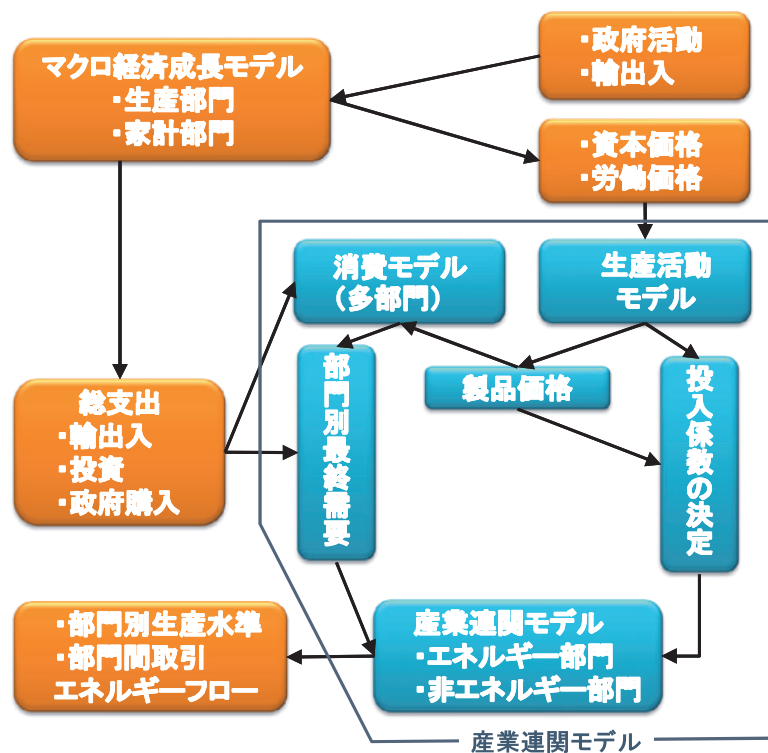


図3 応用一般均衡型経済モデルの構成（森[2007]を元に作成）

トップダウン型アプローチ

トップダウン型アプローチによる代表的なモデルは、世界貿易モデルとして知られるG T AP モデルなど、生産関数、家計効用関数、産業連関表などの経済学的ツールに基づく応用一般均衡モデルである。図3に、応用一般均衡型経済モデルの構成を示す。エネルギーを含む市場全体の価格と需給量を同時に決定することができ、経済活動とエネルギー需給を総合的かつ整合的に把握できる。一方で、過去の統計データに基づいた回帰分析やキャリブレーションにより導出されたパラメータに基づいてモデルが構成されているため、過去に実績がないものは基本的には取り扱えないことや、経済指標などの集計量を変数とするため、政策実施上で必要となる具体的な技術などには言及し難いことなどの課題がある。

技術モデルと経済モデルの統合のイメージ

大きく分けて3通りの統合方法が考えられる。一つは、エネルギー部門だけをボトムアップアプローチによる技術モデルとして、残りの部門はトップダウン的な経済モデルとして構築する方法である。この場合、両タイプのモデルが混在することになるが、一方のモデルの出力を他方の入力とするような閉ループを構成し、収束計算などを通して2つのモデルの連立解を求める。両モデルの解の整合性を確保する細分化レベル（部門、財、地域、時間の解像度）を高めるほど、当該モデルの分析能力は向上するが、一般的には両モデルの論理構成の一貫性を保つことは難しくなる。残り2つの方法は、それぞれのタイプのモデルから他方のタイプへと、トップダウンあるいはボトムアップというアプローチを追求して接近していく統合方法である。経済モデルにおいては個別技術の役割が見えてくるほどに部門や財などの解像度を高める方法であり、そして技術モデルにおいてはエネルギー部門以外への波及効果が把握できるほどに対象範囲を拡大する方法である。これらの3種の方法は、互いに独立ではなく、排他的とならざるを得ない局面もあれば、相互補完的に共存する場合もあると考えられる。いずれにしても、これまでにない広範で詳細な技術・経済関連データの整備と、技術と経済社会の相互作用のメカニズム解明、およびその数学的な定式化と大規模モデルの効率的な解法の確立が主な課題となる。

2. 研究投資する意義

中長期的な資源問題、地球温暖化などの地球規模課題に対する国家戦略を構築するためには、科学的な根拠に基づいたオープンな議論が不可欠である。とりわけ、所期の目標に不確実性が伴う課題や目標達成までに長い期間を要する政策の形成プロセスにおいては、経済・社会等の状況、社会における課題、そしてその解決に必要な科学技術の現状と可能性を多面的な視点から把握・分析する必要がある。さらに、エネルギーに関わる研究開発や制度設計に関する政策形成も例外ではない。エネルギー技術は基礎研究から実用化まで長い時間が必要となることから、場当たりの投資は逆に健全な研究開発を阻害し、国家的な競争力に致命的な悪影響を残す可能性がある。また、究極的には化石資源に頼らない低炭素社会を実現する必要があるが、現時点で我が国だけが突出して理想状態へのハードランディングを目指しては、逆に国家破綻のリスクを高めてしまう。中長期的な視点で循環型社会へのソフトランディングを図る必要がある。また、エネルギー問題は特定の画期的なブレークスルー技術ですべてが解決するような性格のものではなく、様々な技術による総合戦略をもって解決すべきことはたびたび指摘されている。上記の総合戦略を研究開発に照らせば、省エネ・高効率化・再生可能エネルギー等あらゆる技術を俯瞰し、その貢献度や普及時期を見据えて研究開発投資の優先順位付けを行い、長期的なロードマップに基づいた研究開発投資が求められる。

様々な学術分野や産業分野で共通に用いられる我が国独自のエネルギー技術・経済モデルを持つことによって、上記の様々な問題に対応し、分野横断的な議論の活性化・効率化が期待できるとともに、政策判断などに対する国民のコンセンサスを得るためのツールとなる。さらに、あらゆる国際的な交渉の場における我が国からのエネルギー政策や温暖化対策の提案の論拠となり、国際会議などでの発言力を強化することができる。

東日本震災や原発事故後のエネルギー政策見直しといった政策当局の緊急ニーズに対応しているだけでは、モデルの予測精度を向上させるための基礎的かつ継続的な取り組みは困難である。一方、エネルギー技術・経済モデルは、工学および経済学の境界領域に存在し、必ずしも学術領域として確立されていない。このため、エネルギー政策への貢献という社会的期待の明確な目的研究の受け皿として十分機能しているとは言えない。

本提案により、エネルギー技術・経済モデルの基礎研究が進展することで、エネルギー政策立案に不可欠な中立的かつ科学的根拠が提供される。また、工学と経済学が融合した新たな学術領域が創生されるとともに、このような戦略の重要性を理解し構築できる優れた研究者を育成することにつながる。ここに、国が研究投資する意義がある。長期的な視点で着実に基礎・基盤研究を推進・育成することが重要である。このように、エネルギー技術・経済モデルは我が国が長期的な競争力を保ち、グリーン・イノベーションを実現するための必要条件である。

なお、エネルギー技術・経済モデルは本質的には技術と経済の関連を定量化する学術であることから、エネルギー利用に限らず、様々な社会経済活動に深く関わっている。自然科学系の研究者だけでなく、人文科学や社会科学も含めたマルチディシプリンの取り組みが不可欠である。本提案により、様々な専門を持つ基礎研究から応用研究までの研究者が、

エネルギーの全体最適を目的に結集し、密接に連携、協働するインセンティブを与えることができる。その知見は他分野にも広く転用できる共通基盤的なものであり、その波及効果は非常に広く及ぶものと期待される。

コラム 2 ポスト京都議定書中期目標検討におけるエネルギー技術・経済モデル

2005年に発効した京都議定書において、我が国は、2008年から2012年の5年間（第一約束期間）に温室効果ガスの排出量を1990年比で6%削減することに合意した。そして、京都議定書の第一約束期間が終了する2013年以降の地球温暖化対策の中期目標を検討するため、自民党政権下において「地球温暖化問題に関する懇談会」の下に「中期目標検討委員会」が設置された。中期目標検討委員会は、福井俊彦前日本銀行総裁を座長とし、2008年11月25日～2009年4月14日に計7回開催された。本委員会の下に、非公式に、内閣官房官僚と研究者が集中的に計算結果を議論するワーキンググループ（以下WG）が24回にわたり開催された⁽⁷⁾。そこで用いられたエネルギー技術・経済モデルは、地球環境産業技術研究機構（RITE）のDNE 21+モデル、国立環境研究所のAIM（Asia Pacific Integrated Model）Enduseモデル、日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット（EDMC）のIEEJモデル、日本経済研究センターのマクロモデル、国立環境研究所のAIM CGE（Computable General Equilibrium 応用一般均衡）モデル、慶応大学のKEOモデル（CGE）、日本経済研究センターのCGEモデルである。

その後、民主党政権になり、中期目標検討委員会での検討結果において、可処分所得減少と光熱費増加をダブルカウントしている点、マクロフレームの設定が不適切である点、新市場創出等の経済効果や技術革新の可能性の過小評価、環境税・固定価格買取・排出権取引のいわゆる3点セットの効果の考慮等について異論があり、内閣官房に植田和弘 京都大学教授を座長とする「地球温暖化問題に関する閣僚委員会タスクフォース会合」（以下TF）が、2009年10月23日～2009年11月19日に計5回開催された⁽⁸⁾。検討されたモデルは中期目標検討委員会ワーキンググループと同じである。

その後、2009年12月より、検討の場が環境省中央環境審議会地球環境部会に設置された地球温暖化対策に係る中長期ロードマップ検討会⁽⁹⁾に移り、2010年4月から地球環境部会中長期ロードマップ小委員会⁽¹⁰⁾で議論が継続された。環境省での検討では、国立環境研究所のAIM Enduseモデル、AIM CGEモデル、大阪大学伴教授CGEモデルが用いられた。

表1に、国内対策によって90年比25% CO₂削減をした場合の経済影響を試算した結果を示す⁽¹¹⁾。中期目標検討委員会のWGにおいては、徹底的に前提条件のすり合わせが実施されたために、構造が異なるモデルであっても予測結果の差は小さい。一方、事前の議論が行われなくなったTF後の検討結果は、GDPのプラス成長を予測するものも含めて予測結果のばらつきが大きい。一連の検討プロセスの結果、研究者が同一の場で議論を交わし、学術として高度化することの重要性があらためて顕在化された。

表 1 中期目標検討委員会ワーキンググループ(WG)、およびタスクフォース(TF)における各モデルの試算結果⁽¹¹⁾

国内対策90年比25%削減による経済的影響のモデル試算値の比較

		AIM-CGE (国立環境研究所)		JCER-CGE (日経センター)		JCER-マクロ (日経センター)	KEO モデル	RITE DEARS	伴教授モデル (RM)		
		(WG)	(TF)参考	(WG)	(TF)	(WG)	(WG) (TF)		なりゆき	促進	
[モデル特性]											
勤学		逐次勤学						勤学的最適化			
一国/世界		一国モデル						世界モデル	一国モデル		
雇用		完全雇用				不完全雇用		完全雇用			
パラメーター		キャリブレーション					実測	キャリブレーション			
[試算結果]											
GDP(実質)	%	▲ 6.0	▲ 3.2	▲ 3.2	▲ 3.1	▲ 6.6	▲ 5.6	▲ 6.7	▲ 0.4	0.4	
雇用者報酬(実質)	%	▲ 8.5	▲ 11.2	▲ 12.5	▲ 11.4	▲ 5.9	▲ 19.5	—	▲ 0.3	0.7	
可処分所得(実質)	%	▲ 9.1	▲ 3.4	▲ 4.5	▲ 4.5	▲ 5.6	▲ 15.9	—	▲ 0.4	▲ 0.1	
家計消費(実質)	%	▲ 5.3	▲ 4.0	▲ 4.5	▲ 4.4	▲ 3.9	▲ 11.2	▲ 8.3	▲ 0.1	▲ 0.1	
民間投資(実質)	%	▲ 11.9	▲ 0.4	▲ 0.4	▲ 0.7	▲ 12.5	6.6	▲ 0.4	▲ 1.0	1.6	
輸出(実質)	%	▲ 6.6	▲ 2.3	▲ 6.8	▲ 7.2	▲ 22.0	▲ 12.4	▲ 38.3	▲ 3.2	▲ 1.1	
輸入(実質)	%	▲ 5.8	▲ 4.0	▲ 3.8	▲ 4.9	16.6	▲ 14.2	▲ 44.3	▲ 3.3	▲ 1.2	
生産(製造業)	%	▲ 7.5	▲ 3.1	▲ 4.6	▲ 5.9	—	▲ 12.1	▲ 8.4	▲ 1.6	1.5	
生産(エネルギー消費産業)	%	▲ 8.7	▲ 8.0	▲ 7.7	▲ 8.4	—	▲ 22.3	▲ 11.9	▲ 3.2	0.9	
生産(資本財製造業)	%	▲ 8.9	0.5	▲ 3.1	▲ 4.9	—	6.5	▲ 0.4	▲ 0.9	1.4	
消費者物価(価格指数)	%	29.0	5.9	5.0	—	13.5	3.5	—	0.6	5.0	
電力価格(価格指数)	%	100.6	113.6	124.7	117.0	—	97.3	21.0	10.2	10.7	
光熱費(名目)	%	65.7	93.2	81.0	69.0	—	71.7	—	9.5	10.1	
ガソリン代(名目)	%	—	174.0	—	52.6	—	105.3	212.6	7.1	12.6	
最終エネルギー消費(J)	%	▲ 10.3	▲ 8.6	▲ 22.2	▲ 17.6	▲ 15.7	▲ 26.1	▲ 15.8	▲ 15.7	▲ 21.6	
民生家庭エネルギー消費(J)	%	▲ 22.1	▲ 16.3	▲ 17.6	▲ 15.9	—	▲ 11.9	▲ 8.3	▲ 5.8	▲ 6.8	
電力需要(kWh)	%	▲ 6.5	▲ 9.8	▲ 18.3	▲ 19.9	—	▲ 12.5	▲ 21.0	▲ 10.7	▲ 8.6	
雇用者数(人数)	%	—	—	—	—	▲ 3.5	▲ 4.4	—	▲ 0.1	0.4	
一人あたり労働時間	%	—	—	▲ 1.5	▲ 1.7	▲ 1.4	▲ 12.0	—	—	—	
失業率	%	—	—	—	—	1.3	1.9	—	—	—	
限界削減費用(実質)	万円	6.1	5.2	8.2	6.3	10.0	8.8	14.0	5.6	5.2	

3. 具体的な研究開発課題

3.1 エネルギー技術・経済モデルの現状と課題

エネルギーモデルは 1960 年代から開発が始まり、長い歴史がある。しかしながら、近年のグリーン・イノベーション、エネルギー資源のセキュリティや地球温暖化等の環境問題に有効な知見を与えるためには、更なる継続した改良が必要である。以下に、現状のエネルギー技術・経済モデルの課題を挙げる。ボトムアップ型技術評価モデルに関しては、今後重要性を増してくる再生可能エネルギーの時空間的不安定性の定量化が不十分である。現状では瞬時の需給バランス調整を、十分な精度で解像できているとは言えない。また、長期的なオプションとしての核燃料サイクルを含めた将来の原子力発電のモデル化も不十分である。さらには、例えば、鉄、アルミ、紙パルプ等はエネルギー商品とは言えないが、物質中に多量のエネルギーを蓄えて流通しているエネルギーキャリアである。将来的に新規設備やインフラの大規模な建設が伴うと、これらの物質バランスも同時に考慮する必要があるが、エネルギーと物質のフローの一体化を図ったモデルはない。また、地球温暖化問題の扱いでは、例えば現在の世界での交渉の理論的、科学的背景のベースになっている 2℃ 上昇以内に温暖化を抑制するという目標は、マイナスの排出量を前提としたものになってしまっている。エネルギーモデルは、このような選択肢の実現可能性について、十分な回答を発信しているとは言えない。また、採掘や輸送も含めた温室効果ガスの漏洩や、寒冷化物質である SO_x 等の扱いも十分には進んでいない。

経済モデルに関しては、例えば一般均衡の概念自身に関する問題点や、限定合理性の問題等、経済学そのものの研究課題を取り入れて、モデルの改良する努力が求められる。貯蓄や投資を通じた異時点間の動学的な資源配分の問題や不確実性の扱いも今後の重要な課題となっている。また、これらのモデル解析の前提となっているのが産業連関表のデータベースである。しかしながら、現状の産業連関表のデータベースは部門解像度が粗すぎるとともに、再生可能エネルギーや需要サイドの新しい技術オプションを適切に評価できない。また、時系列データが不足していることから、データベースのエビデンスとしての信頼性が十分とは言えない。

コラム 1 で記述したように、ボトムアップ型の技術評価モデルでは、経済活動の一環であるエネルギー需要がアприオリに与えられる。一方、トップダウン型の経済モデルでは、様々なエネルギー技術が過去の経験的なフィッティングパラメータとして入力される。技術革新が経済活動に影響を及ぼし、かつ経済活動によって技術への投資が影響を受けることから明らかなように、本来、技術と経済は密接に結びついている。しかしながら、技術モデルと経済モデルの連携は現状では十分とは言えない。技術が社会にどのように受け入れられ普及するのか、そしてそれによって社会がどのように変化するのか、そのダイナミックなプロセスを支配するメカニズムが十分に明らかにされていないことが大きい。また、経済の扱う対象要素は非常に多いため、このパラメータ範囲の広さと技術を定量的に表現するための精度を両立させることが極めて困難なことも技術的な課題である。さらに、このようなモデルを駆使して、将来シナリオの社会的なコンセンサスを得るプロセス自体も非常に重要であるにもかかわらず、その有効な手順は明らかでない。

3.2 具体的な研究テーマ

技術モデルと経済モデルのそれぞれをより完成度の高いモデルへ改善すると同時に、エネルギー技術と経済活動の密接な関連性を踏まえて、両モデルの統合を達成することが極めて重要である。技術モデルにおいては、新技術の定式化、物質の保有するエネルギーの定量化、環境研究との連携等が求められる。経済モデルでは、一般均衡の概念や限定合理性等の経済学のフロンティアの追求、産業関連表データベースの整備等が必要である。両者の統合に向けては、技術と経済社会構造の変化の相互作用を明らかにし、そのメカニズムを解明し、データベースによる検証を行うため、組織的かつ開かれた研究推進が必要である。

エネルギー技術・経済モデルを推進する上での研究課題は、以下のように三つに大別できる。

分類 1：ボトムアップ型技術評価モデルの高度化

- 新規技術のモデル化
- エネルギー商品でない物質の保有するエネルギーの考慮
- 環境研究との連携

分類 2：トップダウン型経済モデルの高度化

- 一般均衡の概念自身に関する問題点など、経済学そのもののフロンティア研究
- 産業連関表の細分化、時系列データベースの整備

分類 3：ボトムアップ型技術評価モデルとトップダウン型経済モデルの統合

- 技術と経済社会の相互作用のメカニズム解明
- データベースに基づく検証

ただし、これらの課題の研究開発が相互に関係性を有しながら、統合的に推進されることが、そして学問領域を超えた連携と切磋琢磨が成されることが肝心である。

以下、さらに具体的な研究開発課題例を列举する。

■技術モデルにおける新技術の定式化

風力や太陽光などの再生可能エネルギーを利用した発電技術への関心が高まっているが、これらの再生可能エネルギーの発電出力は不安定なため、その導入可能性の評価等を実施する際には、電力貯蔵装置や火力発電所の出力調整運用などを考慮するために、時間解像度を非常に高める必要がある。さらに、化石燃料消費量の大幅削減や化石燃料枯渇後を考えると、再生可能エネルギーによって人類が必要とするエネルギーの 100% を経済合理的に賄える見通しが無い状況では、長期的なオプションとして核燃料サイクルを含めた将来の原子力発電もきちんとモデル化して評価する必要がある。

■物質の保有するエネルギーの定量化

例えば、鉄、アルミ、紙パルプ等はエネルギー商品とは言えないが、物質中に多量のエネルギーを蓄えて流通しているエネルギーキャリアである。また、将来的に新規設備やインフラの大規模な建設が必要となると、鉄鋼やセメント、石油化学製品などの基礎素材やレアメタル等の物質バランスも考慮しなければならない。新技術の導入普及が社会経済に及ぼす影響を考慮するためには、エネルギーと物質のフローを一体化した統合解析が必要である。

■環境研究との連携

2°C 上昇以内に温暖化を抑制するために、マイナスの排出量という選択肢が提起されており、これが世界全体の国連交渉の中の理論的、科学的背景のベースになってしまっている。このマイナス排出は、技術的には、バイオマス発電と CO₂ 回収貯留技術の組合せで実現できると考えられているが、追加的な費用とエネルギー損失を伴うため、その実現可能性についてはエネルギーモデルを用いたシステム分析が必要である。また、その評価の際は、等価 CO₂ という概念が重要である。例えば、採掘・輸送時の天然ガス（メタン）の漏洩、寒冷化物質の SO_x 等の効果をトータルで考える必要がある。温暖化 6 ガスだけに限らず、SO_x 等の寒冷化ガスも検討する。SO_x による寒冷化は局所的な現象と考えられるため、世界地域別の詳細な評価分析が必要とされる。

■経済学的フロンティアの開拓

例えば一般均衡の概念自身に関する問題点や、限定合理性の問題等、経済学そのもののフロンティアを追求し、そういう面からモデルの改良が必要である。貯蓄・投資を通じた異時点間の動学的な資源配分の問題も重要な課題である。

■データベースの高度化

現状の産業連関表のデータベースでは部門解像度が粗いため、一層の部門の細分化や部門内での技術オプション別の投入データの整備が必要である。さらにこれを時系列で蓄積したり、将来シナリオを作成する必要がある。データベースのエビデンスの成熟こそ、モデリングの発展の基盤となる。また、日本周辺のアジア諸国の関連データも整理すれば、アジア地域のエネルギー・環境政策の研究拠点となる。

■エネルギー技術と経済の相互作用のダイナミクス解明

ボトムアップに技術を積み上げる技術モデルと、トップダウンアプローチによりマクロな経済影響を扱う経済モデルを、多地域・多部門で、しかも動学的（ダイナミック）に結び付ける。経済全体の循環の中で、エネルギーシステムコストの増加や減少が社会経済に及ぼす影響を定量的に評価できる。そしてエネルギー技術の発展と経済社会の構造変化を歴史的に（過去、現在、未来）捉え、技術と経済社会構造の変化を生んだメカニズムを解明する。その上で、社会統計データにもとづくエビデンスの集積と、両者の変化のモデリングを行う。また、技術開発に投資した資金が、それぞれの基礎研究や応用の技術にどう反映したかを分析し、それに基づいてシナリオライティングを行い、国民の合意形成プロセスをモデル化する。

4. 研究開発の推進方法

本課題は、特定のテーマについて研究者を広く募って集中的に推進するような性格のものではない。人数としては少なくとも、優れた研究者が中立でオープンな研究環境で継続的に研究を進めることのできるスキームが必要である。政策当局の緊急ニーズへの対応ばかりではなく、長期的なスタンスでエネルギー技術・経済モデルの基礎研究を遂行できる自立性の高い場(拠点または学会等)を設置することが求められる。領域を超えた幅広い研究者の交流や、データベースの蓄積を含め、長期的で体系的な基礎研究を支援すべきである。その前提として、ポリシーメーカーと科学者が、互いの行動規範を明らかにし、役割を尊重し合った形で、健全な信頼関係を作ることが必要である。そのような活動を通じて、自立性の高い研究コミュニティが確立され、研究成果と現実の施策や効果とのフィードバックを行い、それに耐え得るモデルを中立の立場で継続的に開発する。

現在、我が国が進めている「科学技術イノベーション政策における『政策のための科学』」においては、経済・社会等の状況、社会における課題、その解決に必要な科学技術の現状と可能性などを多面的な視点から把握・分析したうえで、客観的根拠（エビデンス）に基づき、合理的なプロセスにより科学技術イノベーション政策を形成することを目指している。そして、多様な科学技術イノベーション政策の中で、エネルギー政策は主要な課題のひとつである。一方、国家の根幹にかかわるエネルギー政策は、環境問題、経済問題を含めた総合的な視点と科学的・客観的根拠に基づいて立案される必要がある。そのための情報収集や分析を支える有力かつ強力なツールとして、エネルギーモデルが大きな役割を果たすものと考えられる。従って、本課題の推進においては、『政策のための科学』プロジェクトとの連携協力を促し、『政策のための科学』に参画する研究者との意見交換を喚起して、政策形成に真に資するエネルギーモデルの研究開発を推進していくための方法が採られることが重要である。

また、地球温暖化に関しては、エネルギー研究と環境研究の横の協力が必要な時期に来ている。さらに、新エネルギーや再生可能エネルギー等は、技術や自然界のポテンシャルだけでなく社会システムの問題でもあるので、自然科学、人文科学、社会科学も含めて考える必要がある。現状は、経済学の専門家は工学的なアプローチの重要性をあまり認識していないし、工学も経済学で普通に扱われていることへの考慮が不足しているケースも見受けられる。ただし、最初から双方で議論すれば解決できる。このような幅広い専門分野の研究者が集う場を設置することは極めて重要である。また、このような場を維持するのは大変な手間と資金が必要なので、その支援も不可欠である。研究者が集まって直接議論することから学ぶことは多い。

我が国でもかつて科研費の重点領域やエネルギー特別研究でそのような活動があったが、その後短期的な成果が重視されるようになり、システム的な研究が下火になってしまったという反省がある。海外では、例えばスタンフォード大の **Energy Modeling Forum** のように、中立な機関が特定のターゲットを与え、それを様々なモデルで解いて議論するという仕組みがある。また、冷戦時に各国政府が出資し、中立国であるオーストリアに設立された組織である **IIASA** がある。東西の緊張緩和の機能も担っていた。日本の研究者も、

海外コミュニティへ活躍の場を求めた傾向がある。その結果、海外の若手は育成されているものの、国内メンバーは固定されてしまった。また、この分野においては、国内から海外に発信されている論文などの成果は限定的であり、海外の影響力の強い英文誌への論文掲載などは現状極めて少ない。国内の科学分野における競争力強化は喫緊の課題であるが、一方でこのようなモデリング分野の科学については、長期的なサポートにより大幅に強化をしていく必要がある。

また、モデルに関する研究の費用対効果を考えると、非常に労力がかかる割にそれに見合った評価が若干少ないことも問題である。性急な成果よりも、情報発信や長期的な視点でサポートが受けられる場が求められる。ワークショップ開催費、若手への交通費、あるいはポスドク人件費などの資金が、公平・中立な場に与えられれば、次の世代が成長する機会が増して、育成が進むと考えられる。最終的には人件費をどう確保するかが非常に大きな課題である。ある程度の金額が10年、15年続いたら、人材育成は十分可能である。

一方で、ポスドク終了後の就職先も大きな問題である。モデルに関する研究は労力と時間がかかる割に評価が必ずしも高いとは言えず、若手が長期的な視野を持って研究に取り組みにくい状況がある。大学のポストも限られているとしたら、政策やビジネスの戦略立案を担当している中央官庁、地方自治体や企業の企画部門等から担当者を巻き込んで議論することで、若手の就職につながる場づくりの工夫も必要ではないだろうか。IIASAのアジア版ができれば、若手研究者のすそ野を広げる効果がある。

5. 科学技術上の効果

エネルギーセキュリティや温室効果ガス排出削減は、我が国の喫緊の課題であり、技術がどのようにこれらの課題の解決に貢献できるかを明らかにするエネルギー技術・経済モデル研究は、目的基礎研究の典型的な例であると言える。現状のエネルギー技術・経済モデル研究は、工学と経済学の境界領域に存在しているが、本提案により様々な専門分野の研究者が集結した新しいマルチディシプリンの学術領域が形成されることが期待される。また、人々の主観や将来の不確実性を考慮するための新たな科学的アプローチが進むものと考えられる。本来、広範で長期的な社会経済的文脈で高度な科学技術的知見を以て判断されるべき一国のエネルギー環境政策に関する議論が、昨今やや混乱しているように見受けられる。これは、科学技術に携わる専門家が相互批判や真剣な討論を怠り、社会的な合意形成や研究者への信頼醸成に失敗していることに原因があるとも考えられる。エネルギー技術・経済モデルを構築することの主な目的は、政府等の政策決定者に技術評価やエネルギー環境政策判断のための科学的知見に裏付けられた合理的な分析フレームワークを提供することである。エネルギー技術・経済モデルの構築には、エネルギー問題に関わる様々な科学技術分野の知見を横断的に取り込まざるを得ないことから、エネルギー技術・経済モデルに期待される科学技術上の効果として、逆にこれを分野共通のプラットフォームとして利用して、分野を跨ぐ深い議論や相互批判を促進できる可能性が挙げられる。

一方、エネルギー技術・経済モデルは、家庭、地域、国家、世界と非常に幅広い空間スケールを対象とし、事業者、業界、グローバル市場と多岐な経済的部門にまたがり、再生可能エネルギーの瞬間的需給バランスから 100 年単位の長期的な時間スケールを扱う必要がある。このような幅広い時間的空間的スケールを扱うための高度な解析・シミュレーション技術が進展することが期待される。

以上のような不確実性を伴うマルチスケール現象を総合的に扱うことで、従来の学術ディシプリンの枠を超えた連携が促され、新たな学術として再構築される。その成果はエネルギー問題に限らず、企業や自治体等の経営戦略づくりにもつながり、そのサービスや競争力を向上させることが期待できる。

6. 社会・経済的效果

省エネルギーが進んだ我が国においても、一人当たり年間約 10 トンもの CO₂ を排出していることから明らかなように、人類が消費するエネルギーは極めて膨大である。このような膨大な量を扱うことが本質であるエネルギー問題に関しては、定量性の無い議論は価値が無いと言っても過言ではない。また、原子力には安全性と放射性廃棄物の問題、化石燃料には温暖化や価格高騰のリスク、再生可能エネルギーは不安定性や賦存量といった課題があり、何れかに過度に傾倒したエネルギーシステムは非常に脆弱なものとなる。現在、我が国ではエネルギー基本計画の見直しが進められているが、所謂エネルギーのベストミックスは、このようなトレードオフの中での非常に難しい最適化問題を定量的に解くことを意味する。今後、わが国のエネルギー需給を継続的に検討し、エネルギー計画を常に見直す努力が必要であるが、エネルギーモデルは必須の科学的方法として欠かせない。また、こうした方法をわが国が有することは、国際的な交渉の場において、我が国の主張に科学的な根拠を与えることにもつながり、我が国の発言力の強化にも帰する。すなわち、エネルギー資源の切迫する東アジア、そして世界のエネルギー計画や温暖化対策に積極的に貢献することを可能とすることになり、その社会的、経済的效果は極めて大きいと言える。

このように、エネルギー技術・経済モデルの価値は、国内外のエネルギー戦略策定の科学的かつ定量的な根拠を与えることにあり、現実を見据えた着実な議論を進める上で不可欠なツールである。これを欠いた検討や選択を行ってしまうと、大きな社会的・経済的な損失が発生するリスクがある。例えばコラム 2 で述べたように、ポスト京都議定書の中期目標の議論においても GDP が数%減少するといった大きな経済的な影響が示唆されている。エネルギー技術・経済モデルは、将来真に役立つ技術とそうでない技術を見分け、それらに対して数値目標を与え、貴重なリソースを何に投資していくべきかという判断に客観的な根拠を与えるものとなる。これによって、国の基盤とも言うべきエネルギー需給に関して、リスクを最小化し国益を最大化するといった、極めて大きな社会的、経済的なメリットを生み出すことが可能となる。

7. 時間軸に関する考察

本戦略プログラムで提言する「エネルギー技術・経済モデル」研究は、産業界あるいは既に何らかの公的セクターで着手されている個別技術研究開発とは対照的に、エネルギー技術の研究開発を進めることを目的とした科学的根拠を与えるための基礎・基盤研究である。図4に、社会経済活動を観察し、その状態を技術および経済モデルで記述し、その予測に基づいた対策と評価を行うというエネルギー技術・経済モデル研究の一連のプロセスを示す。ここで重要なのは、本プロセスは短期に完結する性格のものではなく、継続的な修正改良によって発展し、持続性社会実現に貢献するという点である。このように、エネルギー技術・経済モデルは中長期的に非常に重要な技術であり、継続した研究開発と財政的支援が重要である。

一例として、下記のコラムに2010年6月に閣議決定されたエネルギー基本計画第二次改定版を紹介するが、このような国の基本的な計画の改定は、国内外の技術の進展や普及、資源価格動向、国際関係などの様々な状況の変化に応じて一定期間ごとに見直されるべきものであり、その際にその時点での最良のモデルにより成される将来予測を科学的根拠のひとつとして組み入れて、戦略が策定されるべきである。研究開発の成果を基に常に改良と改善を重ね、社会的な合意に科学的根拠を役立てるといった、社会に還元・貢献する姿勢が重要である。

以上から、まず、モデル開発を基礎研究として推進することのできる場（拠点または学会等）を早急に設置すること、数年以内には活動を軌道に乗せて継続的な活動を行うことが必要である。そうした中で、新技術の定式化、経済活動ごとの物質収支等の定量化、環境研究との連携、経済データ拡充等の要素研究を行いつつ、技術・経済モデルの統合化を図る。さらに、ユーザーである政策決定者からのフィードバックを求め、その結果を研究に反映させるというループを早急に確立する必要がある。



図4 エネルギー技術・経済モデルの継続的研究と社会への貢献

コラム 3 エネルギー基本計画第二次改定 2010

2010年6月18日に閣議決定されたエネルギー基本計画第二次改定⁽¹²⁾では、2030年においてエネルギー自給率を開発権益下の化石燃料も含めて70%、発電電力量の70%をCO₂排出の無いゼロエミッション電源とすることが謳われている。しかしながら、いずれの目標値も原子力を大幅に増加させることを前提としており、東日本大震災を受けて大幅な見直しが必要となっている。2012年夏の第三次改定に向けて議論が継続して進められている。

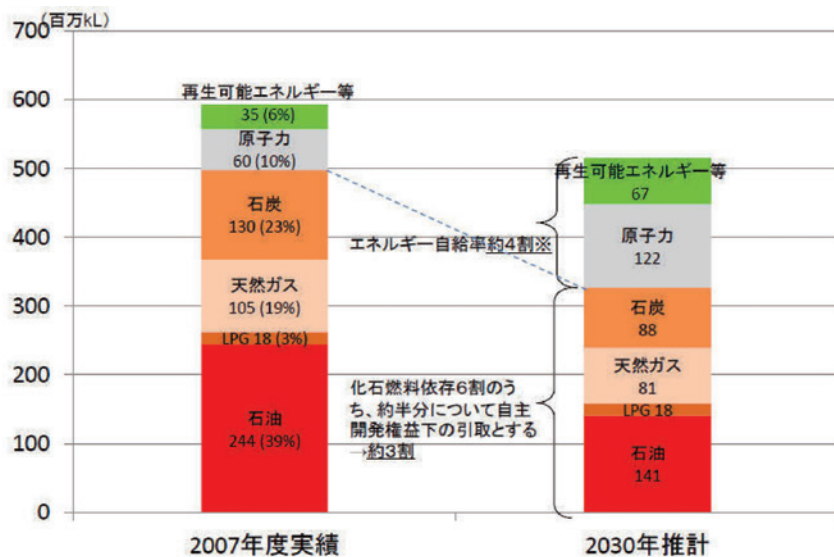


図5 一次エネルギー供給の見通し⁽¹²⁾

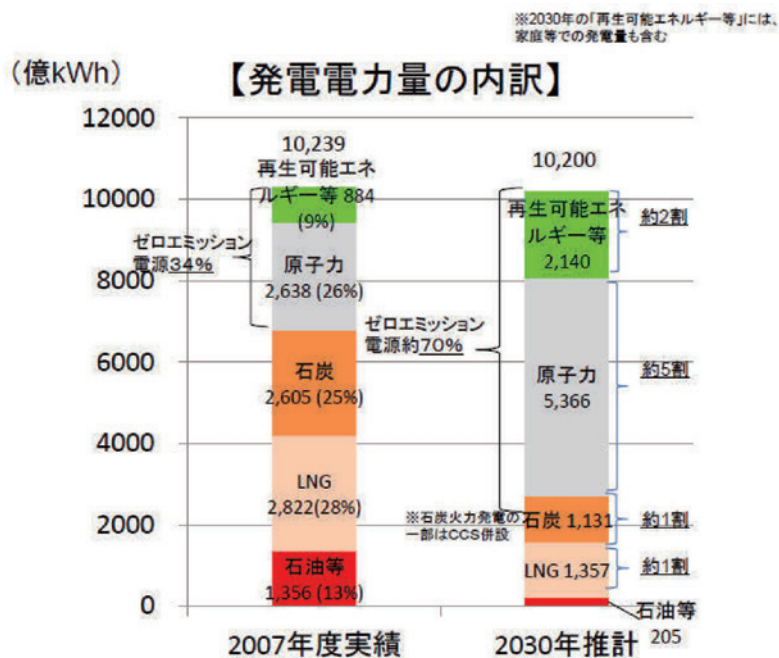


図6 電源構成の見通し⁽¹²⁾

8. 検討の経緯

研究開発戦略センター（CRDS）では、科学技術に対する社会の期待を、全体として「豊かな持続性社会の実現」と定義し、①健康、②生物多様性、③持続可能なエネルギーシステム、④持続可能な物質循環、⑤共通基盤事項（基礎・基盤科学、人材、グローバル化対応等）の5つを重要項目として掲げている。また、温室効果ガスの排出削減やエネルギーセキュリティは、我が国の最重要課題の一つであり、ブレークスルーをもたらすような研究成果が強く求められている点も重要視している。

CRDSは、政府が打ち出した「新成長戦略」あるいは「第4期科学技術基本計画」に盛り込まれたグリーン・イノベーションは、わが国がリスクを回避して世界に貢献するためには避けて通れない道であり、その道を辿る上で科学技術が重要な役割を果たすものと理解している。そして、環境（Environment）・エネルギー（Energy）・経済（Economy）の3Eを同時克服し、さらには生物多様性や人類の衡平性にも配慮する必要があると認識している。平成22年6月には、エネルギー政策基本法に基づくエネルギー基本計画⁽¹²⁾が3年ぶりに改訂された。同計画はエネルギー安定供給の確保、環境への適合、市場原理の活用を基本方針としているが、大震災と原発事故を受けて更なる改定の議論が行われている。CRDSでもこうした国の目標を達成するための目的基礎研究のあり方を議論してきた。

これまで、CRDSでは、資源的制約や海外展開を考慮した技術開発の重要性⁽¹³⁾、基礎・応用や学術ディシプリンの壁を乗り越えた研究開発の重要性⁽¹⁴⁾、エネルギーの不可逆損失を低減させるための基礎研究⁽¹⁵⁾、エネルギー関連研究の戦略性強化⁽¹⁶⁾等について発信してきた。さらに、上記のエネルギー分野の科学技術動向や各省庁の研究資金制度の現状を踏まえ、グリーン・イノベーションを推進する基本的姿勢を検討してきた。その結果、エネルギー環境問題の特質である量とコストを常に考慮しつつ、国際動向を俯瞰した上で、時空間的に見た全体最適戦略を狙うべきこと（特に、短期的な目標と長期的な目標を切り分けた議論が必要）、原理原則に基づいた技術目標を設定して研究を推進すること、研究拠点や研究グループ間が連携してネットワーク活動を推進することを推奨し、それによってこそ最終的にわが国の持続性と競争力に貢献できると認識するに至っている。なお、対象技術としては、新規エネルギー利用技術の開発と共に、既存技術においてもエネルギー利用の究極的な高効率化が必須であり、いずれも我が国は高い競争力を保有しているが、諸外国も急速にキャッチアップしてきていることを踏まえ、限られた研究リソースを戦略的に投資する必要があると理解している。

この間、関連分野の専門家へのヒアリングなどを重ねつつ、今後国が取り組むべき目的基礎研究課題の抽出作業を継続してきた。その結果、重要課題のひとつとして、研究戦略策定のための基礎研究を推進するべきという基本認識を得た。すなわち、エネルギー技術がどのように経済活動に関わるかを定量的に捉え、3Eのトリレンマを克服するために真に必要な技術の研究開発を推進するための科学的根拠を与えることこそ、将来の我が国の、あるいは世界の持続的エネルギー利用に大きく貢献できると考えるに至った。エネルギー技術・経済モデル研究の発展によって、新技術だけでなく既存の基盤技術の優先順位が明らかとなり、それらの着実な社会普及と産業振興を達成する道が開かれるものと期

待される。

このような認識に基づき、平成 23 年 10 月 21 日にワークショップ「豊かな持続性社会構築のためのエネルギーモデル」を開催した⁽¹⁷⁾。表 1 に参加した専門識者リストを示す。事例紹介と討論を通じ、エネルギーモデルに関わる活発な意見交換が交わされ、我が国のエネルギー戦略に不可欠な科学的根拠を与えるエネルギーモデルの定量的予測が、健全なエネルギー研究開発のために極めて重要であるとの認識を再確認した。

また、自然科学、社会科学、人文科学の幅広い研究者が中立でオープンな場に集結して議論できる場の設置とそのような場で人材を長期的な視点で育成する重要性も指摘された。これらのワークショップの結論は、本戦略プログラムの基本的考え方や課題設定に反映されている。

表 1 ワークショップ参加者リスト

豊かな持続性社会構築のためのエネルギーモデルワークショップ 参加者リスト

敬称略		
氏名	所属	役職
講演者（講演順）		
黒田 昌裕	JST研究開発戦略センター／東北公益文科大学	上席フェロー／学長
山地 憲治	(財)地球環境産業技術研究機構	理事・研究所長
田中 一成	資源エネルギー庁 総合政策課 需給政策室	室長
丸山 康樹	(財)電力中央研究所 環境科学研究所	首席研究員
明石 修	国立環境研究所	特別研究員
藤井 康正	東京大学大学院工学系研究科 原子力国際専攻	教授
森 俊介	東京理科大学理工学部 経営工学科	教授
松橋 隆治	東京大学大学院工学系研究科 電気系工学専攻 環境システム学／JST低炭素社会戦略センター	教授／研究統括
伴 金美	大阪大学大学院経済学研究科	教授
野村 浩二	慶應義塾大学産業研究所	准教授
コメンテータ（五十音順）		
甲斐沼 美紀子	国立環境研究所 地球環境研究センター 温暖化対策評価研究室	室長
永田 豊	電力中央研究所 社会経済研究所 エネルギー技術政策領域	領域長
エネルギーモデルチームメンバー		
笠木 伸英	JST研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット ／東京大学大学院工学系研究科	上席フェロー／教授
鹿園 直毅	JST研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット ／東京大学生産技術研究所	特任フェロー／教授
関根 泰	JST研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット ／早稲田大学先進理工学部	フェロー／准教授
鈴木 至	JST研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット	フェロー
豊内 順一	JST研究開発戦略センター システム科学ユニット	フェロー
川口 哲	JST研究開発戦略センター ライフサイエンス・臨床医学ユニット	フェロー
JST関係者		
松村 郷史	研究領域総合運営部 第一研究領域担当	主査

9. ワークショップで紹介された研究開発課題例

第3章において、具体的な研究開発課題例を紹介した。本章では、現在のエネルギー技術・経済モデルへのニーズや課題の例として、平成23年10月にJST研究開発戦略センター(CRDS)で開催したワークショップ「豊かな持続性社会構築のためのエネルギーモデル」⁽¹⁷⁾で取り上げられた事例を紹介する。なお、エネルギーモデルに必要となる研究課題は下記の例だけに限られたものではなく、今後の進展に応じて様々な分野の研究への要請が生じるものと言える。

9.1 自律的エネルギー経済モデル構築の設計・計画手法 ー科学技術情報と経済社会構造解析の連携に向けての基礎研究ー

エネルギー技術が過去、現在、未来にわたって、経済社会の構造とどのように関わっているかを可能なかぎりエビデンスに基づいて把握し、そして、それぞれのエネルギー技術が、経済社会の構造に内蔵されていく社会システムとしての構造を、可能なかぎり自律的にとらえることが必要である。エネルギーモデルは本質的に多部門化が前提となるが、投入構造、技術や社会システムとの関係で、エネルギーキャリアの代替が生じる可能性が出てくる。省エネルギー技術等の自然科学の知見を、経済の枠組みの中で反映させるかについては更なる議論と整理が必要である。最近話題となっている分散型エネルギー技術は、分散型が成立する地域と、大都会のような大消費地との整合を考えると、日本全体として完結する需給システムを考える必要がある。産業連関表は中間投入構造として500強のセクターに分かれているが、残念ながら太陽光や風力といったところまでは投入ベクトルが分かれていない。また、ダイナミックに動いている経済では、産業連関表を時系列に見ていく必要がある。また、産業連関表は全国平均とは大きく異なる。このような地域性の問題も考える必要がある。

このような課題を解決するための研究課題として、第一に、エネルギー技術の発展と経済社会の構造変化を歴史的に（過去、現在、未来）俯瞰できる構造俯瞰図の構築が重要である。第二に、技術と経済社会構造の変化を生成したメカニズム解明のための実験計画の基礎的研究がある。第三に、実験計画に基づくデータベースの構築がある。その上で、第四に、データにもとづくエビデンスの集積と技術・経済社会構造リンク・モデルの構築のための基礎研究が必要である。第五に、多部門、かつ多地域でこれらを結びつけること、第六に、技術開発に投資した資金が、それぞれの基礎研究や応用の技術にどう反映したかという分析が必要である。第七に、それに基づいてシナリオライティングを行い、国民の合意形成プロセスをモデル化していくことも必要である。

学術レベルの深化、学術コミュニティの形成に資する支援方策としては、1つは、エネルギーの問題は、産業、民生、運輸の問題でもあるし、環境、国際競争力や円高の問題でもあるし、安全安心の問題にも絡んでくるので、省庁・組織間の議論ができないと意味がないが、そういう省庁・組織間の議論をする場が日本にはない。省庁が自分の利益だけを追求して議論しては、日本全体のエネルギー政策は絶対にできない。

学術の継続的発展と人材育成方策については 自然科学者と人文社会科学者が、それぞれ研究者としての行動規範を持って、政権に対して提言できるような議論の場をつくることが非常に重要である。

(東北公益文科大学 黒田昌裕 学長)

9.2 エネルギーモデル開発の経験から学ぶもの

エネルギーモデルとは、商品と代替できるエネルギーを数理モデルで数量的に扱うこと。最初の本格的なエネルギーモデルとして、1960年代の後半にアメリカの原子力委員会が高速増殖炉の開発に使ったモデルが挙げられる。その後、オイルショックを経て、石油価格の上昇が経済にどのようなインパクトを与えるのか、そういう分析が70年代後半から80年代前半ぐらいにかけて盛んに行われた。この頃、現在のエネルギーモデルの原形となるものが出てきた。その後、地球温暖化対策と絡めたエネルギーモデルへと展開してきた。

エネルギーモデルはサイエンスとは異なり、興味で何かを知りたいという動機で追求していくべきものではなく、課題は外から与えられるものである。ただし、何を解くかという対象を設定するためにはその対象をよく理解する必要がある。エネルギーモデルに最低限必要なことは、論理の整合性が担保され、その整合性のもとでの数量的関係も整合的に出せること。ただ、自然科学であれば実験結果でチェックすることで、モデルの正しさが分かるが、エネルギーモデルは客観的な参照データがないので、その作業ができない。従って、ピアレビューにより、専門家の間で、研究水準や論理的整合性等について検証する必要がある。ただ、最終的にはモデルが意思決定者の扱っている問題に即しているか、役立つかどうか重要で、そこからフィードバックが返ってきて、さらにモデルを調整するというようなインタラクションが必要である。エネルギーモデル開発者と政策決定者との間のリンクをきちんとつけ、そういう場で現実とのフィードバックを行った上で、それに耐え得るモデルを開発する。ユーザーが誰かということを考えて、そのユーザーとのインタラクションを確保しておくというのが重要である。技術的な課題としては、現在は商品になっていないもの、例えば、バイオマス、鉄、アルミ等、物質の中に蓄えられているエネルギーがある。エネルギー商品とこのような物質のフローを一体化したエネルギーの統合解析というのが大きな研究領域ではないかと思われる。

(地球環境総合技術研究機構 山地憲治 理事・研究所長)

9.3 エネルギーモデル活用の立場から一言

エネルギーは国民の生活に不可欠な、まさに根本なので、エネルギー政策の及ぼす影響を定量的に分析する上で、エネルギーモデルは必要不可欠である。エネルギー、環境、経済の3の指標を達成していくために、政策の及ぼすエネルギー需要、電源構成、CO₂排出等への影響を定量的に分析し、それを幾つかのシナリオごとに分析するといったことの必要性は論を俟たない。次に、説得性については、複雑なモデルの分析結果と選択肢、それに基づく政策の選択を、政府として国民に伝える責務がある。複雑なモデルの中身と特徴、例えば様々な外生条件、前提とする政策や補助金の前提等について説明すると同時に、そ

の結果とそれを採用した理由、さらに政策との関係を常に問われている。複雑なモデルになればなるほど精度は増すが、それをどう国民に伝えていくかというのは逆に難しくなり、これに常に悩まされている。続いて、危険性について敢えて述べると、数字が出るとそれが一人歩きする。例えば、GDP や家計の可処分所得の増減等は、大変わかりやすく、かつ政治的にもインパクトがある。分かりやすい数字だからこそ、そういった危険性も増すという関係にある。また、複数の数字による混乱もある。きちんと数字の前提や条件をセットで説明しないと、国民の選択、国会での政策選択に有用ではなく、逆に混乱を招くだけになる。このことは政府当局として気をつけたいところだと考えている。

参考として、今まさにエネルギー基本計画の見直しを進めており、2011 年 10 月 3 日に審議会を始めたところで、2012 年夏には新しいエネルギー基本計画案を出したいと思っている。

また、省庁の縦割りという点については、これまでエネルギーについては資源エネルギー庁が一元的に実施してきたが、現在エネルギー・環境会議の下で、国家戦略室、環境省、経済産業省、農林水産省と一緒にコスト等検証委員会を設けて検証を行っている。こういった省庁の壁を超えた作業というのは、縦割りや省庁の壁を超えた仕事の仕方のモデルになると考えている。（資源エネルギー庁総合政策課儒教調整室 田中一成 室長）

9.4 最近の温暖化問題と統合アプローチの重要性

2010 年の世界の CO₂ 排出量は過去最大で、2009 年からの 1 年間で約 16 億トン増加した。日本の CO₂ 排出量は約 12 億トンなので、それよりも大きな増加量である。中国も今のところ経済発展を最優先しているが、揚子江の渇水のようにいつかはダメージを介して経済成長に影響が出てくると考えられる。政治的な課題として、気温上昇を 2℃ 以内に抑制するという目標が依然として残っている。コペンハーゲン後に各国が 2020 年まで削減率を宣言したが、その宣言を 2050 年まで外装して予測したところ、3.5℃ ぐらいの温度上昇になるとの予測になり、目標である温度上昇 2℃ とは大きな乖離がある。IEA や米国の EIA のアウトルックでも、石炭利用が急激に増加すると予測されている。そうすると、2℃ 抑制というのは不可能だろうと思われる。その解として、昨年 の国連の UNEP の報告では、世界全体の温室効果ガス全体の排出量をマイナスにするというパスが出てきている。つまり、2℃ 抑制の看板をおろすのではなく、マイナスの排出量という形も選択肢として提起されており。これが世界全体の国連交渉の中の理論的、科学的背景のベースになってしまっている。このマイナス排出以外に実現可能性の高い排出パスというのは存在するか否か、こういう問題をエネルギーモデルの開発者に対して問題点として提出したい。

また、等価 CO₂ という概念も重要である。例えば、採掘・輸送時の漏洩、寒冷化物質の SO_x 等の効果をトータルで考える必要がある。環境を含めて考えると、CO₂ だけではなくて、SO_x や他のガスもきちんと検討することが必要であろう。

今後の気候変化と排出量の関係を見ていく上で重要となる一つのが、累積排出量という考え方である。将来的に排出をゼロにした場合、CO₂ 濃度は減少していく。国連型の濃度安定化という概念では、エミッションはずっと続くので、気温も海面水位も上昇し続ける。

地球シミュレータの結果によれば、CO₂濃度を下げると気温は徐々に下がり、気温は復元する。しかし、凍土や氷床が溶けたりすると、再生されない。何℃が気温のオーバーシュートの限界なのか、これはよく分かっていない。その解決には、分野横断的な協力が必要であろう。環境側からの希望は、温室効果ガスをマイナスにする方法というのは本当に現実的なのかということ。そのときはCO₂以外のメタン、N₂O等も含めて考える必要がある。コストを考慮した上で、実現性の高い排出パスというのは一体どうあるべきか。実現性の高い温室効果ガスの排出削減パスをぜひエネルギーモデルで検討していただきたい。

(電力中央研究所環境科学研究所 丸山康樹 主席研究員)

9.5 ボトムアップモデルの現状と課題 – AIM/Enduse を中心として –

Asia-Pacific Integrated Model (AIM)とは、統合評価モデルの一つで、温室効果ガス排出量の削減と気候変動の影響を回避する施策を評価することを目的として開発されているモデルである。AIMは、一つの統合された巨大なモデルではなく、実際には排出モデル、簡易気候モデル、影響モデルがあり、これらを必要に応じて統合させたり、個別に使ったりしている。排出モデルの中には、技術選択型の AIM/Enduse モデルのほかに、経済モデルや勘定モデル等があり、それぞれのモデルがそれぞれの役割を持った構造になっている。AIMの特徴として、中国、インド、韓国といったアジア諸国や、欧米の大学や研究機関と一緒に開発していることがある。特に、アジアの途上国との共同研究については、各国の研究者にモデルを提供してトレーニングを実施したり、各国の研究者にそれぞれの国の分析を行ってもらったりしている。

AIM/Enduse の世界版では、32 地域、推計年は 2005 年から 2050 年まで、ガスは CO₂ を含めた京都 6 ガスを、部門は、産業、民生、運輸の最終エネルギー消費部門や、転換や資源採掘といったエネルギー供給部門をカバーしている。また、非エネルギー部門、農業部門や廃棄物部門も扱っていることが特徴である。技術は、各地域で約 200 種類扱っている。技術のオプションに関しては、例えば、石炭火力発電では SC、USC、IGCC に CCS がついたもの等の具体的な設定をしており、また、民生部門では、冷房、暖房、給湯といった、そういったエネルギーサービス別に具体的な技術を設定している。例えば、放射強制力を 2100 年までに 2.6 W とする目標を持ったときに、世界の温室効果ガス排出量は 2100 年ぐらいにマイナスになり、2050 年では、90 年比 49% ぐらい削減する必要があるといった結果になる。技術貢献の内訳は、バイオマス (CCS)、化石燃料 (CCS)、風力、太陽光、バイオ燃料、で全体の約 6 割を担当するという結果になる。その他の 100 以上の技術を合わせたものが残りの 30% を占め、CO₂ 以外の技術で 10% という結果になる。不確実性の取り扱いについては、シナリオアプローチのほかに、例えば、期待費用を最小にするとか、ミニマックス戦略等の確率論的なアプローチを考えていく必要があると考えている。また、サービス需要推計の高度化も重要で、今までのボトムアップモデルでは、サービス需要に関して GDP とか人口等の変数を使った簡易的な推計を使っている。例えば、鉄の生産量で考えると、鉄の世の中のストック量や、ビルとか自動車等の需要量ということまで掘り下げてサービス需要の推計を行っていく必要があると考えている。本モデルは部分均衡モデルなので、経済フィードバックも考慮していく必要があると考えている。

また、人々の主観的なマインドセットをできるだけ観測し、モデルに入れていくことで、モデルの説得力を増すことができると考えている。

いろいろなチームが同じような開発をしているにもかかわらず、それぞれがデータ整備を行っているということで、それをある程度基礎的な部分で共有化できれば、かなり効率化できるのではないかと思う。また、世界ではモデル比較を行いながら共通的な課題を抽出するような学術コミュニティがあるが、日本でもそうした活動があると良い。

(国立環境研究所 明石修 特別研究員)

9.6 ボトムアップモデルの課題

エネルギーモデルの目的として、一つは数式で表現して定量的に評価できるということ、二つ目は、対象システムに対するモデル作成者の理解を深めるということ、三つ目は、対象システムを理解するための共通の枠組みを提供することで議論のたたき台を提供できるということが挙げられる。分類としては、将来こうなるだろうという予測型と、こうすべきだという規範型がある。トップダウン型とボトムアップ型については、まずトップダウン型というのは、帰納的、経験的、マクロ的で、 X と Y の過去のデータに回帰直線を引いたものの自体が一つのモデルになる。一方、ボトムアップ型は、演繹的、合理的、ミクロ的で、技術を次々と積み上げて、 CO_2 排出削減量やコストとの関係をつくるものである。

ボトムアップ型の工学モデルは、もともとの出自が電源計画問題、石油の精製計画モデル等から発展してきたモデルなので、エネルギーシステム総コストを最小化するという定式化が多い。ただ、社会全体として考えたときは、支払ったコストはだれか必ず受け取っており、そう考えると、全体のコストというのはよくわからない。供給サイドでコスト最小を一生懸命計算しても、それが本当に日本にとって、あるいは世界にとって良いのか明らかではない。また、将来的に新規設備やインフラの大規模な建設が必要となると、ボトムアップモデルにおいて基礎素材やレアメタル等の物質バランスも考慮しなければならない。物質バランスを考慮しようとする、結局多部門化が必要となり、多部門の経済モデルを何らかの形で工学モデルの中に組み込むニーズが出てくる。さらに、民生、運輸におけるコージェネレーション、ヒートポンプ、LED、電気自動車といった不特定多数の消費者が扱う新技術の本格的なモデル化が課題である。また、風力や太陽光への関心が高まっているが、出力が不安定なので時間解像度を非常に高める必要がある。さらに、化石燃料枯渇後を考えると、核燃料サイクルのオプションもきちんとモデル化しなければならない。

温暖化対策に関する「負荷増加論」対「成長戦略論」についての詳細なイメージを提供するためには、エネルギーセクターだけではなく、お金の流れを扱えるモデルにしなければならない。これをやると、国債の議論にも関係してきて、炭素税を国債償還に使ったときの影響を評価するような分野にも立ち入る必要がある。(東京大学 藤井康正 教授)

9.7 ボトムアップモデル

ボトムアップモデルは、技術選択とか投資計画を表すモデルから、それをダイナミック

に拡張するような定式化が簡単にできる。また、原材料や制約式のシャドープライスを計算でき、均衡価格の評価ができるなどのメリットがある。産業連関表分析ではやや困難な副産物のフロー等の扱いも容易である。そのかわり、基本として需要を与えるので、ある範囲内で制約が変化する場合が良いが、極端な場合は実際の社会との関連を解釈するのが難しくなる面がある。

最近の計算機パワーの発達やソフトウェア・データベースの充実により、経済活動と技術選択のシステム統合が進んできている。また、学習効果や量産効果といった従来は解くために入れていた仮定を緩めることができるようになってきている。ボトムアップとトップダウンの統合化については、動学的で多地域で多部門でエネルギー経済を統合化するTHERESIAというモデルを作っている。これは15地域、12産業部門、7エネルギー産業部門から成るモデルで、各産業部門が生産関数を持つ構成になっており、かつエネルギーフローにはボトムアップモデルを導入している。動学的な計算モデルで数値的に最適化するので、かなり計算量が大きくなり、詳細化には限界が出てくるというトレードオフがある。

利用上の問題として、ツールとして利用されるためには、開発側と利用側の共通理解が必要。欧米のモデルコミュニティには、例えば学会に行くと、産・官・学の参加もみられるし、若い世代の研究者も多い。それから、例えば、スマートグリッドとか地域分散エネルギーがエネルギー需要構造をどう変えるか、今のままのエネルギーモデルでは答えることが難しい。また、少子高齢化、情報化、これらがエネルギー需要構造に与える変化も、まだ十分に応えているとは思われない。特に人口が減ってくる場合の最適化は難しい問題となる。

そして、モデル開発の目的は、未来の必ずしも正確な中ではない。将来、自分が不利にならない対策をとるためにどこまで想定するかという問題であり、この辺が自然科学の予測との大きな違いと言える。あくまで未来は複数存在するというのが長期予測の基本原則である。

(東京理科大学 森俊介 教授)

9.8 東日本大震災後のエネルギー政策と低炭素化施策について

モデルは、結局、今自分が何をやろうとしているのか、その目的にかなうように使うことが重要である。今回の分析では、東日本大震災で、特に福島第一原発の事故後のエネルギー政策、地球温暖化対策というものを抜本的に見直すために、エネルギーモデル、経済モデルを使った。震災前に民主党政権が出した地球温暖化対策基本法案の要綱にある地球温暖化対策税、再生可能エネルギー比率、固定価格買取制度、温室効果ガス25%超削減をどう解釈するか、その長所、欠点をモデルで評価している。それから、第4期科学技術基本計画のグリーンイノベーション、具体的には、環境と経済の両立をどうやってエネルギーと経済のシステムの中で実現するのかということが一つの論点だと考えている。

本モデル分析では、応用一般均衡モデルを中心に、電源構成モデルを別個動かし、その結果を一般均衡モデルに入れるという形をとっている。電源計画モデルは、国立環境研のものをベースに森先生と協力して改造したものを使っている。原子力縮小ケース、維持ケース、拡大ケースにおいて、最終需要の省エネの有無で、電源構成がどう変わるかというの

を一応一般均衡とデータをやりとりして、収束させている。最終需要モデルについても、太陽光発電、エコキュート、燃料電池等の新技術の普及率を設定し、コストについては JST 低炭素センターで作成したものを入れている。次世代省エネ基準住宅の普及による断熱性能の変化や、トップランナーの継続の効果、次世代自動車の普及による効果等を評価している。太陽電池、燃料電池、蓄電池のコストシナリオは、低炭素センターの技術グループと協力して、そこで研究開発した値を入れている。特に太陽光では、固定買取料金を別個に計算しており、それによって太陽光を入れた家庭のメリットと、電気料金が上がって負担を被る家庭のデメリットを合わせて評価できる。それ以外にも、所得を年収 200 万円以下の非常に所得の低い階層から 1500 万円以上の年収の多い階層まで 18 階層に分けている。CO₂ 排出のシミュレーション結果として、やはり原発の影響は非常に大きい。また、エンドユースの省エネの効果も非常に大きいことがわかる。一方、家計厚生への原発の影響は小さく、とにかく最終需要の省エネの有無によって結果が大きく変わる。日々の暮らしの省エネを普及させていくことが如何に重要かを示唆している。

今回は、応用一般均衡モデルと、電源構成モデルというボトムアップモデルを組み合わせた分析の結果を紹介したが、この分析に関しては、東日本大震災後のエネルギー政策をどうすべきかに重点を置いてモデルをアレンジしていくことが一番大事だと思っている。何もかも表現することはできないので、モデルのためのモデルではなく、今やるべきことは何かという状況認識から出発している。別の目的から出発すれば、モデルを全く別の形でアレンジする必要も当然出てくる。

他方、モデルそのものに関しては、例えば一般均衡の概念自身に関する問題点や、限定合理性の問題等で追求していくべきことは多々あると思われる。それはモデルというよりは、経済学そのもののフロンティアのところかもしれない。そういう面から改良していくべき課題は大いに残されていると思われる。

(東京大学 松橋隆治 教授)

9.9 エネルギー・環境経済モデルで重要となる視点

経済学から見たエネルギー・環境経済モデルで重要となる視点は、一つは技術選択で、これはまさにボトムアップとトップダウンという 2 つをいかにハイブリッド化するかが重要。技術進歩の Learning by Doing と R&D 投資の役割をどういう形でモデルの中に取り込むかが重要な視点になる。二つ目は市場モデルである。プライスは、エネルギー、労働、資本等の資源制約、技術的制約、予算的制約といった中でプライスメカニズムが発揮されており、需要が供給を下回るケースの場合は価格がゼロになる。相補問題というのは、価格が何故プラスになるか、何故ゼロになるかという、その区分けをモデルの中でシームレスに扱う必要があるということで、CO₂ 制約で二酸化炭素に価格がつく問題を扱うには、これは避けて通れない。三つ目は、貯蓄・投資を通じた異時点間の動学的な資源配分の問題。今日食べずに明日食べる、これが経済に非常に大きな役割を持っており、これをどういう形で入れるかが重要である。

動学的なモデル構成については、ゼロ利潤条件、需給均衡条件、所得定義式の三つのモデル方程式の体系としている。二時点間の動学モデルでは、今日の消費と明日の消費を、レート・オブ・リターン（利子率）、割引率に加え、異時点間代替弾力性というパラメー

タで決めている。異時点間代替弾力性というのは、いわゆる資本収益率の変化に対する異時点間の消費の変化を表す。三つのパラメータのうち、割引率は外生的に与え、資本収益率は内省的に決まる。異時点間代替弾力値については外生的にいろいろと与えることでシミュレーションをしている。

2020年のCO₂排出を90年比15%削減の条件で計算してみると、排出量価格は3万2000円ぐらいになる。このときに、消費が減り、投資が増えて、GDPが増えるというシナリオが出てくる。ただし、エネルギーの価格は2.4倍ぐらい、消費者物価は20%ぐらい上がる。ここで言いたいのは、CO₂を削減すると、経済に対して必ずネガティブになるということではないということ。ならない理由が二つあり、一つが異時点間の代替の弾力性で、0.15以下の小さい値の場合はプラスになる。二つ目は、消費者が低炭素志向を強める場合で、やはり消費が減り投資が増えるようなパスが描かれる。言いたいのは、プラスになるということではなくて、プラスになるシナリオもあるということで、そのようなモデルにはどのようなことが考慮されているかということを理解してもらうために説明している。

参考として、原発再稼働が遅れるケースを計算した結果を紹介する。結局、火力発電で代替することになるが、CO₂排出も増えるし、化石燃料の輸入が増えて0.5~0.7%ぐらいGDPが下がる。太陽光とか風力は、良くて2020年までに10年比の6倍ぐらい。原発が止まったからといって、再生可能エネルギーが瞬時に増えるというのはとても考えられず、やはり電力という点では大きな問題となるだろう。モデルで計算すると電力料金は多分25%ぐらい上がったはず。それが来年では恐らく30%ぐらいまでいくだろう。実際の電力料金には反映されていないが、結局、企業は自家発電したり、あるいは平準化するために土日操業したりして、余分なコストを払っている。ただ、消費者物価は余り上がらない。問題は、GDPの損失というのが結構大きくて、最悪のケースでは2020年までに25兆円ぐらいGDPが減る。2050年までいくと、原発を少なくしても何とかやっていけるだろう。ただし、結局のところは電力価格を上げるしかない。新エネルギーの話がよく出るが、2050年に5000億kWhぐらい入るが、電力料金は5倍とか6倍にはね上がる。そういう意味で、お金をかければ安心、安全ということは担保できるが、それも含めて簡単に新エネルギーを増やすというのは難しい。一番大きく価格体系を下げる可能性は何かといえば、やはりCCS等の技術進歩。2020年までで考えると、新エネルギーでカバーするのはとても無理だと思われるが、2050年まで考えれば、原発をゼロとまでは言わないが、少なくすることはできるのではないだろうか。

(大阪大学 伴金美 教授)

9.10 エネルギー・環境経済モデルで重要となる視点

我々のKEOモデルは基本的には逐次動学のモデルであるが、資本のユーザーコストとか将来需要とかエクスペクテーションの様子がかかり入っており、動学的特性を含んだ逐次最適化動学モデルである。パラメータに関しては、例えば2005年表とか産業連関表を使ってキャリブレーションをするというのが通常の応用一般均衡モデルでは多いが、我々は商圏の時系列データベースに基づいている。

中期目標検討委員会ワーキンググループでは、事前に内閣官房の地下で非常に激しい議

論と調整過程があった。3つの一般均衡モデルでも、90年比マイナス25%ケースでは国立環境研究所の結果がむしろ一番厳しい数字で、日本経済研究センターはやや甘め、我々はその中間であった。未来が1つではないということは承知しているが、まず、外生的条件とかインプットをはっきりさせ、途中の過程でも産業別のインパクト、例えばCO₂の排出量に対する影響や、生産に対する影響というものを出し合って相互にチェックする中で、ある程度の収束をみた。必ずしも収束させることが目的ではないとしても、オープンなディスカッションを通じてある程度近い数字に落ち着いたということで、モデル構造は全く違うが、それなりの成果があった。しかしながら、その後のタスクフォースでは、ワーキンググループのときのような議論をする場が無かったので、調整がほとんどできなくなってしまった。GDP マイナス3.2%で25%削減が可能という予測も出て、非常に様々な意見があった。モデル構造の違いによる結果の相違は当然という話ではなくて、やはり一步步詰めていき、チェックするポイントがあるはずだと思っている。

慶應大学産業研究所では、KEOモデルを昔から開発しているが、課題の細分化に伴い環境分析表、産業連関表を作っている。一方で、超長期のモデルである新古典派動学的最適化一般均衡モデルというのを90年代初頭から作っている。また、他国間の拡張も行っている。KEOモデルは非常に特異な構造をしており、大きく3つが特性という形で挙げられる。モデル構造として、我々のモデルはケインズモデルで、失業者が存在する形になっており、その意味で3,000円程度の炭素税導入によっては、GDPが少しプラスになり得る解も存在し得るという形になっている。モデルとしては47の経済活動の中に電源部門とか輸送部門が分離されて入っていて、別途、屑・副産物の取り扱いも産業連関の中で体系的に入っている。また、労働供給の関数が日本経済の分析の結果として入ってくるフォーミュレーションになっている。例えば、炭素税を導入すると、一つの財のプライスが産業とか家計で全部違ってしまいが、そういう一物多価の形を考慮している。もう一つの特徴は、工学的な情報を取り入れるために、経済学的な生産関数を工学的な関数に置き換えている。消費関数も、トップランナーの詳細なデータを家計の機器別や用途別という形で、特殊な消費関数が入っている。さらに、時系列のデータベースによる検証可能性ということとは非常に重視しており、それに基づいて推計している。

データベースの構造は、時系列に1960年から2004年までの長期時系列を作成している。産業連関の体系には資本のストックというのは基本的には出ていないので、そういうものは別途推計をしている。この産業別データと生産体系を整合して作るという形で、土地資算も含めた資本投入量のデータベースが入っている。労働も、性、年齢、学歴、就業形態、産業という形で、約1万の属性に区分し、それを時系列的に産業の生産の中のデータベースとして入れている。このことで、例えば賃金が違う中で、どのような種類の雇用を誘発するのかというようなことが分析可能になる。労働供給や消費に関しても、世帯の家族数をデータベース化しており、これがマクロなデータベースと接合するように一国集計と整合して作っている。エネルギーに関しても、種別消費燃料投入量とか排出係数表、用途別の種別表等を作っている。

一方で、モデルが過去を説明することは意味があるのかということに対して、1985年から2005年まで解いたときにどうなるかというトータルテストも行っている。

経済学側から考えるべきこととして、細分化がある。一方で、細分化は、精度を犠牲に

している部分がある。そういう意味で、モデルの細分化と、測定の精度のバランスが重要になる。将来に向けて、現状の産業連関表のデータベースでは全く粗過ぎる。拡張産業連関表という形でもう一度見つめ直さないといけない。例えば、2005年表だけに依存するというのも非常に危険なことで、例えば1995年表、2000年表、2005年表と時系列で見ていくと、産業連関表自体の誤りも結構ある。技術の経済学的評価という形で、データベースのエビデンスの成熟とモデリングの拡張が我々のテーマと考えている。

(慶應大学 野村浩二 准教授)

参考文献

- (1) Global Trade Analysis: Modeling and Applications, T.W. Hertel (ed.), Cambridge University Press. 1997
- (2) Samouilidis J. and Mitropoulos, C., Energy-economy modes: A survey, Energy, European J. Operational Research, 11 (3), pp. 222-232, 1982.
- (3) 大山達雄、エネルギー問題のモデル分析、シミュレーション、2(2)、pp.77-87、1983.
- (4) Capros, P. and Samouilidis E, Energy policy analysis, Energy Policy, February, pp. 36-48, 1988.
- (5) Cofala, J., Kuczmowski, T. and Weyant, P., Energy economy modeling: A survey, Energy, 15 (3-4), pp. 387-394, 1990.
- (6) 森俊介、世界エネルギー経済モデル、電気学会複合エネルギー需給システム技術調査専門委員会技術報告 1092 号 エネルギー分野におけるシステムモデル分析の現状と将来、pp. 58-66 (2007).
- (7) 首相官邸、地球温暖化問題に関する総理の懇談会、中期目標検討委員会、<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/tikyuu/kaisai/index.html>、2010.
- (8) 首相官邸、地球温暖化問題に関する閣僚委員会タスクフォース会合、<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/t-ondanka/>、2010.
- (9) 環境省中央環境審議会地球環境部会、地球温暖化対策に係る中長期ロードマップ検討会、http://www.env.go.jp/earth/ondanka/mlt_roadmap/comm.html、2010.
- (10) 環境省中央環境審議会地球環境部会、地球環境部会中長期ロードマップ小委員会、http://www.env.go.jp/council/06_earth/yoshi_06-11.html、2010.
- (11) 野村浩二、ポスト京都の経済インパクト、<http://eco.nikkeibp.co.jp/em/column/nomura/index.shtml>、2010.
- (12) エネルギー基本計画、経済産業省、<http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004657/energy.html>. 2010.
- (13) 戦略提言、二酸化炭素排出抑制技術によって科学技術立国を実現するための2つの戦略的機関設置の提言、CRDS-FY 2008-SP-11、2009.
- (14) 戦略提言、温室効果ガス排出削減に向けた研究開発の推進について、CRDS-FY 2009-SP-04、2009.
- (15) 戦略プログラム、エネルギー高効率利用社会を支える相界面の科学、CRDS-FY 2010-SP-05、2011.
- (16) 戦略提言、エネルギー分野研究開発の戦略性強化、CRDS-FY 2011-SP-03、2011.
- (17) 科学技術未来戦略ワークショップ報告書、豊かな持続性社会構築のためのエネルギーモデル、CRDS、2012.

■作成メンバー■

笠木 伸英	上席フェロー	(環境・エネルギーユニット)
鹿園 直毅	特任フェロー	(環境・エネルギーユニット)
藤井 康正	特任フェロー	(環境・エネルギーユニット)
関根 泰	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
鈴木 至	フェロー	(環境・エネルギーユニット)
川口 哲	フェロー	(ライフサイエンス・臨床医学ユニット)
本間 弘一	特任フェロー	(システム科学ユニット)
豊内 順一	フェロー	(システム科学ユニット)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2011-SP-07

戦略プログラム

エネルギー政策のための科学： 技術・経済モデルの研究開発

STRATEGIC PROGRAM

Science for Energy Policy: R&D on Engineering-Economy Models

平成 24 年 3 月 March 2012

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット

Environment and Energy Unit, Center for Research and Development Strategy
Japan Science and Technology Agency

〒 102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's五番町

電 話 03-5214-7481 (代表)

ファックス 03-5214-7385

<http://crds.jst.go.jp/>

© 2012 JST/CRDS

許可無く複写／複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.

Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ATTAATC A AAGA C CTAAC TCTAGACC
CT CTCGCC AATTAATA
TAA TAATC
TTGCAATTGGA CCCC
AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC
ATAAGA CTCTAACT CTCGCC
AA TAATC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT
CTCGCC AATTAATA
ATTAATC A AAGA C CTAAC TCTAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA C CTAAC TCTAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
ATTAATC A AAGA CCT
GA C CTAAC TCTAGACC
0011 1110 000
00 11 001010 1
0011 1110 000
0100 11100 11100 101010000111
001100 110010
0001 0011 11110 000101

