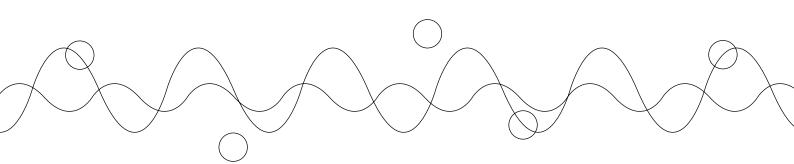
# 科学技術未来戦略ワークショップ

# 「豊かな持続性社会構築のためのエネルギーモデル」 報告書

平成 23 年 10 月 21 日 (金) 開催



# エグゼクティブサマリー

独立行政法人科学技術振興機構(JST)研究開発戦略センター(CRDS)では、JST の研究開発戦略を立案するとともに、今後我が国が取り組むべき重要な研究開発領域、研究課題、研究開発システム等について広く提言を行っている。CRDS の提言は、JST 基礎研究事業における研究開発領域の設定などに活用されるとともに、政府の各種施策にも反映されている。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ーは、我が国の喫緊の課題であり、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。

地球温暖化、資源枯渇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、中立の立場で科学的な根拠に基づきオープンに議論するプロセスが不可欠であり、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。また、エネルギー戦略はその時々の状況に応じて適宜見直されるべきものであり、常に情報を更新される必要がある。基礎研究を健全に推進するためにも、その基礎となる国家的なエネルギー戦略が必要であり、そのためにはその根拠となる科学に基づいた定量的な知見が必要である。このような議論の科学的根拠を供給するためのエネルギーモデルは、全ての基盤となる技術であり、その継続的な研究開発の進展が期待されている。

本ワークショップでは、中立の立場で、科学的な根拠に基づいたエネルギー国家戦略の 策定に貢献する研究開発戦略の提言に向けて、エネルギーモデル研究の現状と研究課題を 広く俯瞰し整理するとともに、国として研究を支援する場合の内容や方策について検討す ることを目的として開催された。事例紹介とその後の討論を通じ、エネルギーモデルの現 状や課題について活発な意見交換がなされ、以下のような共通認識を得た。

#### ■エネルギーモデルの研究課題

エネルギー技術と経済社会活動の相互作用をモデル化することが、工学モデルおよび経済モデル開発者に共通した課題である。技術の進展と経済社会構造の変化を歴史的に俯瞰し、そのメカニズム解明のための実験計画とそれに基づくデータベースによる検証、さらにシナリオ作りから国民の合意形成までをモデル化する必要がある。

#### ■長期的な視点での基礎研究への支援

政策当局からの緊急のニーズへ対応するだけでなく、ロングタームのスタンスでビジョンを持ってエネルギー問題を考えることが重要である。その基盤として、データを蓄積することも含めて息の長い体系的なエネルギーモデルの基礎研究が必要である。その際、新エネルギーや再生可能エネルギーは、需給バランス技術や賦存量の定量化の問題はもちろんのこと、社会システムの様々な問題と関連するので、経済学や人文科学も含めた幅広い分野を集約して考える必要がある。また、温暖化に関しては、エネルギー分析と地球温暖化と影響評価の横の協力が必要な時期に来ている。そのような活動の場を作る前提として、

ii

ポリシーメーカーと科学者とが、互いの行動規範を明らかにしつつ、役割を尊重し合った 健全な信頼関係を作ることが重要である。

#### ■人材育成

エネルギーモデル研究は、その労力と時間の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。長期的な視点で基礎研究を行うことができ、領域を超えた幅広い研究者が集うことのできる場を設けて支援することが必要である。公平・中立・オープンな場に、若手への人件費や交通費の支援、シンポジウム開催費等のサポートがあれば、次世代を支える人材の育成も進む。そのためにも、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が不足していることも大きな問題である。大学だけでなく、地方自治体や企業等を巻き込んで、若手のポストを作るための工夫が求められる。

# 目 次

# エグゼクティブサマリー

1.	ワー	- クショップ開催趣旨
	1.1	背景
	1.2	ワークショップの目的
	1.3	ワークショップの構成
2.	第1	セッション:背景およびニーズ
	2.1	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―
		黒田昌裕(JST CRDS / 東北公益文科大学)
	2.2	エネルギーモデル開発の経験から学ぶもの
		山地憲治(地球環境産業技術研究機構)
	2.3	エネルギーモデル活用の立場から一言
		田中一成(資源エネルギー庁)
	2.4	最近の温暖化問題と統合アプローチの重要性
		丸山康樹(電力中央研究所)
3.	第2	<b>セッション:</b> ボトムアップモデル
	3.1	ボトムアップモデルの現状と課題 - AIM/Enduse を中心として-
		明石 修(国立環境研究所)
	3.2	ボトムアップモデルの課題
		藤井康正(東京大学)
	3.3	ボトムアップモデル
		森 俊介(東京理科大学)
4.	第3	$oldsymbol{ au}$ セッション:経済モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
	4.1	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
		松橋隆治 (東京大学/JST 低炭素社会戦略センター)
	4.2	エネルギー・環境経済モデルで重要となる視点
		伴 金美 (大阪大学)
	4.3	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
		野村浩二 (慶應大学)
		セッション:総合討論
6.	まと	: Ø ······ 70
付錄	录⋯⋯	
付銀	录 1	ワークショップ開催概要、プログラム
什会	是 9	ワークショップ参加者リスト

# 1. ワークショップ開催趣旨

#### 1.1. 背景

(独) 科学技術振興機構(JST)研究開発戦略センター(CRDS)では、今後我が国が取り組むべき重要な研究開発領域や課題、研究開発システム等について広く提言を行っている。CRDS の提言は、JST の基礎研究事業等のファンディング領域の設定に活用され、また、政府の各種施策にも反映される。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持続可能な工ネルギーシステム、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ーは、我が国の喫緊の課題であり、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。

現在、先進国だけでなく途上国も含めて科学技術によるグリーンイノベーションが経済発展の牽引力になるという理解が浸透するとともに期待が高まっている。その一方で、現在の欧州経済危機の引き金になっている国家財政の逼迫という観点から、パブリックファンディングに対しては大変厳しい環境になっていることも事実であり、そのような状況の中で、いかにして地に足がついた研究開発を推進するかが問われている。地球温暖化、資源枯渇などの地球規模の課題解決にあたっては、安定供給、環境性、経済性といった多面的な評価が必要であり、国家的なコンセンサスをまとめて戦略構築を遂行するためには、科学的・客観的なエビデンスに基づき、中立の立場でオープンに議論するプロセスが不可欠である。また、国民にはその戦略の中身やモデルの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。さらには、エネルギー戦略はその時々の状況に応じて適宜見直されて然るべきものであり、常に最新の情報をもとに議論を更新していく必要がある。エネルギーモデルはこのような議論のベースとなる科学的な定量的知見を供給するためのものである。上記の課題解決のために不可欠であり、長期的な視点での本研究分野へのサポートが必要とされている。

# 1.2. ワークショップの目的

本ワークショップでは、中立の立場で、科学的な根拠に基づいたエネルギー国家戦略の 策定に貢献する研究開発戦略の提言に向けて、エネルギーモデル研究の現状と研究課題を 広く俯瞰し整理するとともに、国として研究を支援する場合の内容や方策について検討す ることを目的として開催された。

# 1.3. ワークショップの構成

本ワークショップでは、以下のような構成で議論を行った。

#### (1) 背景およびニーズ紹介

エネルギーモデルを開発および利用する立場から、専門家によるエネルギーモデルの重要性やニーズについて話題提供頂いた。

## (2) 工学モデル (ボトムアップモデル)

主として技術的な側面からエネルギー需給を考えるボトムアップモデルについて、その 現状や課題について紹介頂いた。

#### (3) 経済モデル (トップダウンモデル)

経済モデルとしてエネルギー部門を扱う場合について、その現状や課題について紹介頂いた。

#### (4) 総合討論

引き続く総合討論では、エネルギーモデルの学術的な研究課題、研究コミュニティーの 支援方策、人材育成等について議論を行った。

# 2. 第1セッション:背景およびニーズ

2.1. 自律的エネルギー経済モデル構築の設計・計画手法

一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-

黒田昌裕(JST CRDS / 東北公益文科大学)

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 Evidence-base にもとづき把握し、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

エネルギーは1国1セクターというマクロ経済モデルでは扱うことが本質的に難しく、多部門化が前提となる。産業を多部門化したときには、どのエネルギーがどのような形で中間財として供給されるかを考える必要があるが、その投入構造、エネルギー技術や様々な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。モデルはこのようなメカニズムを記述できる必要がある。また、転換部門において原子力、火力、再生可能エネルギー等のいずれを用いるかについても、経済性がそれらの選択肢に影響を与える。このほかにも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だと思われる。自然科学の要素技術を経済のターミノロジーに落としていくにはどのようなツールを経済学が用意しなければいけないかの議論をもっと深めなければ、技術の可能性と経済システムというのが結びつかない。

最近話題となっている分散型エネルギーという技術は、IT やソフトウェアも含めて考える必要がある。また、地域ごとの再生可能エネルギーのポテンシャルと技術選択を、分散型が成立する地域と、大都会のような大消費地との合理性を考えて、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。そうすると、多部門で多地域なモデルを構築しなければならなくなる。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。500 部門のセクターのところに本当の意味でのエネルギー技術が描写できるくらい細かい記述ができるかという問題がある。また、これはフローのバランスをある時間断面で見たワンショットの姿でしかない。どのくらい省エネ技術が入ってくるとか、転換部門の技術に何が選択されるとか、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、以下のようなものが考えられる。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)できる構造俯瞰図を構築することの基礎研究は、非常に重要である。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。上記の歴史的な技術と経済社会構造の変異に関する基礎研究にもとづき、その変化の構造を生成したメカニズムを明らかにするための実験計画をデザインする基礎研究である。第三に、実験計画に基づくデータベースの構築がある。上記の実験計画に基づくエネルギー技術情報の定量的把握と経済社会構造の変異を記述できるデータベースの構築にむけた基礎研究である。その上で、第四に、データにもとづく Evidence 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う。そして、最終的には技術と社会システムの構造変化を結びつけられるようなモデルを作り、いろいろなメニューを出して、その中から国民が合意形成するかということをきちんとモデル化していくことも必要である。

学術レベルの深化、学術コミュニティー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、Inter-Agency の議論ができないと意味がないが、そういう Inter-Agency 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いては、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科学的根拠を有するエネルギー戦略の立案を担う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議論をしながら、それぞれが研究者としての行動規範を持って、政権に対してサジェスチョンができるような、そういう研究者が集まって議論する場をつくるということが非常に重要である。

最後に、アメリカの場合は、ホワイトハウスにある OMB が予算を持っていますから、その予算をにぎった上で Inter-Agency のプロジェクトを起こし、そしてこの Inter-Agency のプロジェクトの中で、エネルギーに関しては DOE が中心になって研究戦略を体系的に作っている。鳥瞰図を見ると、非常に立派な戦略をアメリカの場合は考えている。同じようなものが日本にできない限りは、エネルギー政策というのは一歩進まないと思われる。

#### 科学技術振興機構:研究開発戦略センター

「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」

#### 「自律的エネルギー経済モデル構築の設計・計画手法」

一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一

CRDS 上席フェロー 黒田 昌裕

1. エネルギーモデル(技術モデル、経済モデル、環境 モデル、物質モデル)の高度化と、相互連携のために 必要となる**基礎研究課題 一** 経済学の観点から

造とどのように関わっているかを可能なかぎりEvidence-base 的にとらえることを目的に基礎研究の課題を整理する。

#### 経済モデルにおけるエネルギー技術の取り扱いについて

- 1. マクロ経済モデルでエネルギー技術をどのように取り扱いことが できるか?:エネルギーは、本源的生産要素(労働・資本)?
- 2. 多部門経済モデルでのエネルギー技術の取り扱い。
  - 産業部門における中間財としてのエネルギー 投入構造とエネルギー技術: エネルギー代替の記述。
  - エネルギー転換部門の技術構造と選択的技術の記述。
  - 産業部門の省エネルギーと省エネルギー技術の取り扱い。
  - ・ エネルギー技術(転換部門・使用部門)変化のモデルで扱い。
  - 産業、民生、業務部門でのエネルギー技術の取り扱い。
- 3. エネルギー転換・投入構造における要素技術・材料技術と物質循 環構造の自然科学分野での記述と経済モデルのモデルの自律度
- 4. 分散型エネルギー技術を記述できる経済モデル
- ・ 地域の再生エネルギー賦存の差異と技術選択

# 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

に把握すること、そして各時代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の構造を可能なかぎり自律

#### 最終需要(j=1, ....., 123 j エネルギー 間資 H 极 康 袋 転換部門 的 Ш 輪 投入構造 府消 エネルギー原料裁門 青 消費 費支 本 本 本形 増 要 Ħ $\chi_i = \chi^0_i + \chi^0_i$ 減 計 B エネルギー産出構 費 成 Σxi F<sub>2</sub> Fa Fa Fa ΣFij 加価値

産業連関表の構造と経済の一般的相互依存

(1) 産業連盟表

:産業連関表によるエネルギーフローの記述

#### 2. エネルギー需給構造の地域性と課題

(イ)例えば山形県のエネルギー消費を種別に見ると、石油製品 53% - 電力37% - 都市ガス9%で、これら3種で99%を占める。我 が国全体では、石油製品51% 電力24% 都市ガス9%の他、石炭 製品9%・熱4%・石炭3%となっており、石油製品と電力への依存 が高い。





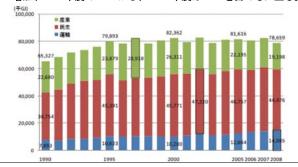
# ħ, エネルギー消費を部門別にみると、山形県では民生部門 57% - 産業部門24% - 運輸部門19%となっている。我が国全体 では、産業部門43%・民生部門34%、運輸部門24%となって おり、民生部門への依存が非常に高い。

78,659 ∓ GJ 【山形県の部門別比率】



【全国の部門別比率】

エネルギー消費量の経年変化を見ると、部門別には、産業部門は1997年度の35%をピークに以降は減少し、2008年度24%、。 民生部門は1993年度の58%にピークであるが、以降ほぼ同程度の構成比で推移し、2008年度は57%、運輸部門は経年的に増加、1990年度の12%から、2008年度は19%を占めるに至る。



#### 山形県地域別エネルギー需要種別構成 石炭製品 石油製品 都市ガス 動 슴計 軽質油製品 重質油製品 石油ガス 山影県 212,396 16.539 41.678.939 31.309.120 7.179.819 29.225,157 78,659,302 3,190,000 7,321,987 204.285 37,221,109 杣城 106,025 8,191 20,047,677 15,409,341 3,094,955 1,543,382 3,549,551 13,423,819 85,846 最上地域 12,842 1,122 2,777,374 2,116,954 461,018 199,403 431,388 1,550,317 7,403 4,780,446 置腦地域 40,040 2,937 8,122,584 5,978,712 1,493,157 650,715 1,540,481 1,313,773 69,996 17,149,810 庄内地域 53,489 4,290 10,731,303 7,804,113 2,130,689 798,501 1,800,567 6,877,248 41,040 19,507,936

(ハ)再生可能エネルギーのポテンシャルの特徴と課題 山形県内を4つの地域に区分して、再生可能エネルギーの期 待可採量を整理した結果は下表のとおりである。本事業の対象 地域である庄内地域は、風力エネルギー、中小水力エネル ギー、バイオマスエネルギーの期待可採量が大きい地域。

山形県地域別の新エネルギー・ポテンシャル

地域	風力 (MWh)	太陽光 (MWh)	中小水力 (MWh)	波力 (MWh)	木質/v <sup>*</sup> (オ (GJ)	温度差 (GJ)	雪氷熱 (GJ)
村山	1,030,051	2,072,144	630,454	0	1,295,833	1,730,301	3,140,816
最上	1,633,435	624,201	124,182	0	1,094,080	411,278	796,312
置賜	901,364	988,260	653,384	0	1,038,094	1,030,171	1,934,576
庄内	3,025,352	1,068,189	703,395	167,929	1,590,482	857,086	1,248,454
合計	6,590,202	4,752,794	2,111,415	167,929	5,018,489	4,028,836	7,120,158

(注:出典 山形県「緑の分権改革」報告書、1MWh = 3.6GJ)

期待可採量のうち、現実に利用されている再生可能エネルギーは各地域とも未利用資源が大きい。庄内地域は、山形県内で最も再生可能エネルギーの導入が進んだ地域であるが、利用率は3.2%であり、更なる導入の余地が非常に大きい。民生部門におけるエネルギー消費比率が非常に大きく、電力消費比率も大きいことを踏まえると、低炭素化のためには、民生部門における省エネの推進、再生可能エネルギーの導入拡大が不可欠。

			(GJ)
	クリーンエネル	クリーンエネ	クリーンエネ
	ギー期待可採量	ルギー導入量	ルギー導入率
1 村山地域	24,504,487	275,771	1.1%
2 最上地域	13,494,224	85,494	0.6%
3 置賜地域	15,613,954	190,512	1.2%
4 庄内地域	25,241,182	816,359	3.2%
合計	78,853,848	1,368,135	1.7%

				(XI) 山形県地域間産業連関表(競争輸入型)完成図								
	中間	需要地域間	取引 最上	88	庄内	最終需要 村山	地域間取引	雷線	需要合計	県外海外 移出輸出	県外海外 移入輸入	地域別産出額
	ши	刊出	被上	IIII. Rob	En	ħШ	数上	(III.Ree	DAT	沙山鴨山	伊人職人	建四银
庄内	<b>x</b> <sup>011</sup> #	X <sup>D12</sup> gl	X <sup>013</sup> #	X <sup>D14</sup> µ	X <sup>D11</sup> iF	x <sup>012</sup> ∉	X <sup>D13</sup> <sub>6</sub> F	X <sup>D14</sup> iF	X <sup>D1</sup> eF	Ε™,	- M <sup>80</sup> ,	X1,
	+ x <sup>RI</sup> #				+ x <sup>ft1</sup> gr				+ x <sup>81</sup> <sub>F</sub> + x <sup>81</sup> <sub>F</sub>			
村山	X <sup>021</sup> a	X <sup>D22</sup> ii	X <sup>DZ3</sup> a	X <sup>D24</sup> a	X <sup>D21</sup> ir	X <sup>022</sup> sr	X <sup>022</sup> ir	X <sup>DD4</sup> is	X <sup>D2</sup> ir	E <sup>as</sup> .	- M*2.	
ΗШ	X***#	+ x <sup>62</sup> a	X <sup>013</sup> g	X···· <sub>ii</sub>	X <sup>m</sup> ir	+ x <sup>R2</sup> ir	Xit	X	+ x <sup>82</sup> a	E-7	- M**;	X²,
		·				·			+ x <sup>R2</sup> <sub>F</sub>			
最上	<b>x</b> <sup>031</sup> a	X <sup>032</sup> ii	X <sup>033</sup> 2	X <sup>DM</sup> a	X <sup>D31</sup> ir	X <sup>D32</sup> sr	X <sup>033</sup> ir	X <sup>D34</sup> iF	X <sup>D3</sup> ar	E <sup>as</sup> .	- M*0.	X <sup>3</sup>
-	. ,	. ,	+ x <sup>83</sup> µ	. ,	. ,	. ,	+ x <sup>R3</sup> <sub>F</sub>	. ,	+ x <sup>83</sup> µ	- '	,	
									+ x <sup>R3</sup> <sub>g</sub>			
置賜	X <sup>D41</sup> ii	X <sup>D42</sup> ii	X <sup>043</sup> a	XD44	X <sup>041</sup> ir	X <sup>042</sup> ir	X <sup>D43</sup> ir	X <sup>044</sup> ir	X <sup>D4</sup> ar	E**.	- M <sup>RI</sup> ,	X4.
		,	. ,	+ x <sup>84</sup> µ		,		+ x <sup>84</sup> <sub>#</sub>	+ x <sup>84</sup> µ			
									+ x <sup>RN</sup> <sub>p</sub>			
サ加価値	V¹	V <sup>2</sup>	V <sup>3</sup>	V4								
地域別												
産出額	X¹.	X²,	X3,	X4;								

		Ĕ	重業.	連	関表	1=	よる	I,	ネルギ-	ーおよて	JCO2	排出分	析			
	(XI	() 山	形県地	域間	産業	連関	表(競	争輸	入型)完成	Ø						
		中	間需要	地域	間取	31				最終需	要地域間間	5引	需要	県外海外	県外海外	地域?
	Ē	内	Ħ	Щ	Ē	Ł	m)	賜	庄内	村山	最上	置賜	合計	移出輸出	移入輸入	産出物
庄内	x <sup>D1</sup>		x <sup>D</sup>		x <sup>D</sup>		×D		x <sup>D11</sup> <sub>iF</sub>	x <sup>D12</sup> <sub>ijF</sub>	x <sup>D13</sup> iiF	x <sup>D14</sup> iF	x <sup>D1</sup> ar	E <sup>1R</sup>	- M <sup>R1</sup> ;	x¹,
III P	+ x		Ŷ	j1	Ŷ	ğl	Ŷ	ij.	+ x <sup>R1</sup> iif	^ iF	^ ijF	^ ijF	+ x <sup>RI</sup>	- 1		Α;
		ľ							,				+ x <sup>RI</sup> iF			
村山	x <sup>D2</sup>		×D		x <sup>D</sup>		x <sup>□</sup>		x <sup>D21</sup> iF	x <sup>D22</sup> iF	x <sup>D23</sup> iiF	x <sup>D24</sup> ijF	x <sup>D2</sup> ar	E <sup>2R</sup>	- M <sup>R2</sup> .	X²,
ΗЩ		Г	+ >	il 2 il	X	ii)	*	id.	X iF	+ x <sup>R2</sup> iF	X ije	X ijr	+ x <sup>R2</sup>	- 1	- M ;	Α;
		П						Г					+ x <sup>R2</sup> iF			
	x <sup>DS</sup>	Г	x <sup>D</sup>		x <sup>D</sup>		0		D31	x <sup>D32</sup> iF	D33	x <sup>D34</sup>	03	E <sup>JR</sup>	- M <sup>R3</sup>	143
最上	X-	Ь	X-	il.	X -	iil 3	x <sup>D</sup>	ij.	x <sup>D31</sup> <sub>iF</sub>	X iF	x <sup>033</sup> + x <sup>R3</sup> =	X ijF	x <sup>03</sup> ar + x <sup>R3</sup> iil	E.	-м-;	X³,
						il							+ x <sup>R3</sup> iii			
	2	Г	x <sup>D</sup>						DII	Data	D42	DM.	Dr	_4D		- 4
置賜	x <sup>D4</sup>	Ь	x"	š1	χ <sup>D</sup>	ÿ1	x <sup>D</sup>	4	x <sup>D41</sup> iF	x <sup>D42</sup> <sub>iF</sub>	x <sup>D43</sup> ijF	x <sup>D44</sup> + x <sup>B4</sup>	x <sup>D4</sup> ar + x <sup>R4</sup> iii	E <sup>4R</sup> ;	- M <sup>R4</sup> ;	X <sup>4</sup> ;
		Г						i i				- ^ #	+ x <sup>R4</sup> iF			
		ı	m					Г					y		•	
付加価値	v		٧		١		١					用量=燃料	96 Dil 45-3	e el u		
											: 电刀ਦ	川重"滁村	悝別权人'	ヘントル		
地域別		Г							1		:事業用	電力および	自家発電	投入ベクト	ル	
e域別 筆出額	х	Г	x		×			Г	1		:事業用	電力および	自家発電	投入ベクト	ル	

#### 基礎研究課題

1.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)できる構造俯瞰図の構築: 科学技術情報、特にエネルギー技術情報が経済社会の構造にどのように内蔵されているかに関して、構造俯瞰図を作成すること。過去、現在、将来にわたるエネルギー技術の発展の系譜の中で経済社会構造の中で、それぞれの時代の科学技術の知見がエネルギー技術にどのように反映され、それが経済社会に導入される姿を俯瞰することによって、エネルギー科学技術と経済社会構造との構造的結びつきを実証的に明らかにする基礎研究。

2.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:上記の歴史的な技術と経済社会構造の変異に関する基礎研究にもとづき、その変化の構造を生成したメカニズムを明らかにするための実験計画をデザインする基礎研究。

## 基礎研究課題(続き)

3. 実験計画のデザインにもとづくデータ・ベースの構築:

上記の実験計画にもとづくエネルギー技術情報の定量的把握と経済社会構造の変異を記述できるデータ・ベースの構築にむけた基礎研究。エネルギー技術の投入、産出のフロー構造、その導入に関わる投資構造、資本ストックの構造、さらにはそのエネルギー技術実現の材料技術、要素技術の特性と他の技術への波及の構造を明示的把握できるデータ・ベースが必要。

4. データにもとづくEvidence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: 新しい技術の経済社会への導入、市場構造のシステムの構造変化のメカニズムの解明し、それを促進した政策的なツール、規制、法的措置等の関連を明らかにすることを目的とする。

#### 基礎研究課題(続き)

5.エネルギー技術と経済構造の変化を結びつけた自律的経済モデルの構築。:エネルギー転換・投入部門の要素技術/物質循環構造と経済循環構造の接合モデル 多部門/多地域間多部門/多国間多部門

- 6. エネルギー技術開発に向けたR&D投資による成果予測 とそのロードマップ創りにむけた基礎研究。
- 7. 将来技術予測にもとづく経済構造の変化、経済成長 の予測、エネルギー需給の予測、選択的政策変数に よるシミュレーション実験とその成果のシナリオ作成。 社会システムの構造変化の追跡
- 8. 政策選択のための合意形成モデルの作成。

- 2. 学術レベルの深化、学術コミュニティーの形成に 資する支援方策
- 基礎研究促進のための人文社会ならびに自然科学者、 工学技術者の学術コミュニテー形成への支援。
- それぞれの基礎研究の段階的発展のための基礎研究費の充実。
- ・ エネルギー政策担当省庁の再編によるInter-Agencyの エネルギー政策所管の公的シンクタンクの構築。そこが、自 律的な実験計画にもとづくデータ・ベース構築もになう。
- 国際的な情報発信ならびに交流の場の形成への支援。

- 3. 学術の継続的発展と科学的根拠を有するエネルギー戦略の立案を担う人材育成方策
  - 研究者の行動規範の徹底と科学者としての真摯 な議論の場の形成。
  - エネルギー関連の自然科学者、技術者、人文社会 学者の経常的な交流の場の形成と若手研究者の養成。
  - 「科学技術政策のための科学」の人材育成プログラムの中での国際的人材育成。
  - Inter-Agencyの行政人材の育成とコミュニケーションの場の形成。
  - Evidence-based Policyの構築による国民合意形成の場の構築。

「米国のOMBによる関係機関の連携による課題解決型の行政組織、エネルギー政策に関していえば、Interagency組織と連動したDOEによるエネルギー開発戦略の体系的な推進、その推進方策にもとづく大学、アカデミアへの支援とネットワーク構築の支援」といった国家的なエネルギー政策推進の組織体系の構築が急務である。行政、アカデミア、産業のすべての縦割り構造に徹底的な改革によるOpen Innovation 喚起の社会システムの構築が不可欠である。

エネルギー政策分野のみに関わることではないが、震災、原発事故を機に、社会経済基盤インフラ構築の長期 Vision構築とその実現戦略をたてて、国土建設をおこう よい機会であると考えている。

#### 2.2. エネルギーモデル開発の経験から学ぶもの

#### 山地憲治(地球環境産業技術研究機構)

ここでは、我々にとって価値がある、つまりお金を払ってもいいと思っているエネルギーを対象とする。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が、ここでいうエネルギーモデルである。タイプとしては、初期条件と境界条件からシステム構成を組み立てるいわゆるシミュレーション型と、ある評価基準のもとで最も望ましいシステムを導出する最適化型とに大きく分類できる。

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。当時としては大規模な線形計画モデルであった。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ういう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非常に盛んに行われた。この頃、IIASAのMESSAGEや、IEAのMARCALといった、現在のエネルギーモデルの原形となるものが出てきた。また、スタンフォード大学に、あるイシューを決めてそれを解析するモデルを幾つか集めてきて、できるだけ前提をそろえて結果を比較する場であるエナジーモデリングフォーラム(EMF)が設立された。エナジーエコノミングインタラクションズが当時の焦点であったため、経済モデルとリンクさせたMESSAGE-MACROやMARCAL-MACROが開発された。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。地球温暖化対策評価用モデルとしては、80年代の初めのエドモント・ライリーモデル、その後、MERGE、国立環境研のAIM、地球再生計画の検討を目的としたDNE21モデルなどが知られている。これらは、コンピュータの発達とともに大規模化が進んでいる。

モデルに期待することとして、まず、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、何を解くかという対象を設定するためにはその対象を理解しなければならない。また、対象を決めただけでは目的が明確になったとは言えない。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。そこから先は意見が分かれるところで、1つは、理想形を提示するというやり方。過去は理想形ではないので、理想形では過去を説明できないのは当たり前。自然科学的な立場から、過去を説明できないモデルにどんな価値があるのかと指摘されるが理想形はここに向かって進んでいく姿を見せることが目的だから、そこにいくステップを提示できれば良い。もう一つは、やはり現実をシミュレーションするという立場がある。ある理論のパラメータを過去のデータで推定して、それを未来に外装するという非常にオーソドックスなやり方。あるいは、主観的なものも含めて仮説を出してモデルを構築し、その後数量的な結果を得て仮説を検証するやり方。いずれも、結果をチェックして検証しなければならないが、それがきちんと行われていないケースがあるように思える。

また、コンピュータが非常に発達してきたので、最近のモデルは非常に詳細化している。 地域や部門、あるいは時間の刻みも非常に小さくとることができる。しかし、モデルの詳 細化やダウンスケーリングには功罪がある。モデルの構造は現実に近くなってもデータが 本当にとれるのかという問題と、ブラックボックス化してユーザーである政策決定者にそ の結果がなぜ出てきたのかという説得力のある説明が難しくなるという問題がある。 さらに、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、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、何をすべきかというと、やはりピュアレビューとなる。専門家の間で、研究水準や、論理的整合性等については検証できる。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、そのオプションの選択に役立つかどうかが重要で、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。中期目標検討のときに幾つかのモデルを使ってレビューしたというのは、一つの重要なステップであった。

今後の展開としては、こういう意思決定、本当の現実の政策問題との間のリンクをエネルギーモデルを開発する人との間できちんととつけて、そういう場で現実とのフィードバックをしていく。そして、それに耐え得るモデルを開発する。実験的なものも含めてエネルギーモデル開発の知識とテクニックを養成していく。それほど大きい組織でやる必要はないと思うが、一つだけでない複数のチームが必要と思う。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。

もう一つ、エネルギーとして使えるものだが、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。従って、現在 我々がエネルギー商品と思っているものと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。

#### 7-16:世界エネルギーモデル(「環境経済政策学の基礎知識」より)山地憲治担当

#### エネルギーシステムの数理モデル

エネルギーは資源の採掘・採取から始まり、資源の輸送、電力などへの変換、変換後のエネルギーの輸送・配送、エネルギーの利用、さらにこれらに伴う廃棄物の処理など多くのプロセスを経て利用される。これらエネルギーの流れで構成されるシステムをエネルギーシステムという、

世界のエネルギーシステムを数理モデルで表現して、環境制約を満たした上で経済的に最適なエネルギー構成やエネルギーの将来像を描くものが世界エネルギーモデルである。種々のタイプがあるが、手法で分けると、初期条件と境界条件から芋づる式にシステム構成を組み立てるシミュレーション型とシステム評価の基準を設定してもっとも望ましいシステムを導出する最適化型に大きく分類できる。

#### エネルギーモデル開発の背景と経過

エネルギーモデルは、多額の国家予算を 使用するエネルギー技術開発の評価や、国 民経済に大きな影響を与える石油価格の予 測、あるいは近年では地球温暖化問題の対 策評価などの政策研究の主要なツールとし て開発されている。

政策研究のための最初の本格的なエネルギーモデルは、1960年代後半に米国原子力委員会が高速増殖炉開発など長期間を要する技術開発の評価のために用いた線形計画モデルだと思われる。その後、第一次石油危機をきっかけに、石油需給や脱石油のためのエネルギー技術開発に関する政策の評価を目的とするエネルギーモデルが数多く

作成された。この時期には、エネルギー価格上昇が経済活動に与える影響、また逆に、経済変動がエネルギー需要に与える影響をモデルに組み込むことが主要な関心事となり、エネルギーと経済の相互作用を分析するモデルが数多く開発された。

エネルギー需要を外生変数としてエネルギーシステム内の対策評価に焦点を合わせたものとしては、国際応用システム分析研究所(IIASA)で開発された MESSAGE モデルや OECD/IEA の MARKAL モデルなどが知られている。これらのモデルもその後は経済とエネルギーシステムとの相互作用を取り組むために、経済モデルとリンクするよう拡張され、MESSAGE-MACRO やMARKAL-MACRO が開発されている。また、経済とエネルギーの相互作用を取り込んだ先駆的モデルとしては、スタンフォード大学の ETA-MACRO モデルやハーバード大学の Hudson-Jorgenson モデルが知られている。

そして、近年では、地球温暖化対策評価のように地球規模での超長期対策を解析評価するために、世界全体をカバーし、エネルギーシステムだけでなく、経済や環境システムも含む大規模モデルへと展開している。本格的な世界エネルギーモデルは近年ではもっぱら地球温暖化対策に関連して開発されている。

地球温暖化対策評価を主目的として開発 された世界エネルギーモデルとしては Edmonds-Reilly モデルが先鞭をつけた。 その後は、ETA-MACRO から展開した MERGE モデルなど数多くの世界モデルが開発されている。わが国でも国立環境研究所が開発した AIM モデルや、わが国政府が1990年に発表した「地球再生計画」の数量的検討を目的として開発されたDNE21モデルなどが知られている。

なお、エネルギーモデルには分類されないが、ローマクラブの「成長の限界」で活用された世界モデル(システムダイナミックス手法を適用したシミュレーションモデル)も世界規模問題を扱っているという点では、最近の世界エネルギーモデルとほぼ同様の役割を果たしている。

#### 世界エネルギーモデルが描く未来

世界エネルギーモデルは直感的には描けないエネルギーの未来を、条件を与える者に対して論理整合的に数量的に提示する。しかし、モデルの描く未来は設定条件に依存するので、これを未来予測というのは適切ではないと思われる。結果を予測として信じるか否かは、モデルに与えた条件の妥当性の判断に依存する。モデル解析の役割は、条件設定によって選択した未来の姿を数量的に具体的に示して、政策決定者を支援するところにある。

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)が 2000 年に取りまとめた「温室効果ガス排出シナリオに関する特別報告」には種々の世界エネルギーモデルによる 21 世紀シナリオが収集されている。ここに示す図は各モデルが描いたシナリオにおける世界の21 世紀のエネルギー需要の分布を示している。このように、モデルが描くシナリオには大きな幅がある。しかし、この大きな幅は未来が不確実であることを示すものではない。各シナリオはそれぞれに、論理的に実現可能な未来の姿を描いている。した

がって、シナリオ群が示す幅はわれわれが これから選べる未来の選択の範囲を示すも のと解釈できる。

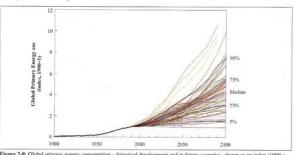


Figure 2-8: Global primary energy consumption – historical development and in future scenarios, shown as an index (1990-1). Data sources: Morita and Lee, 1998; Nakićenović et al., 1998a.

IPCC が収集した21世紀のエネルギーシナリオ

エネルギーシステムとして対象を捉え、 それをモデル化してシミュレーションする ことによって、個別の問題だけを考えてい たのでは理解できないシステム効果につい て考察することができる。

たとえば、水素は将来のエネルギーとして大きな期待がかけられているが、水素は他のエネルギーを用いて生産する二次エネルギーである。したがって、水素利用システムは、水素資源の選択から始まり、生産、輸送、貯蔵、利用の各段階で種々の技術選択がある複雑な構造を持つ。それぞれの技術経済特性に加えて各プロセスの地理的配置まで考慮して望ましい水素社会の将来像を描くには、エネルギーモデルが重要な役割を果たす。

#### 《参考文献》

山地憲治[1998] 『エネルギー・環境政策 におけるシミュレーションモデルの役 割』電気学会論文誌 C, Vol.118-C, No.10, pp.1399·1402

N.Nakicenovic et al. [2000] "Special Report on Emission Scenarios", IPCC, Cambridge University Press

2

(資料)『環境経済・政策学の基礎知識』(有斐閣ブックス、2006年7月発行)第7章 環境と資源・エネルギー

#### 2.3. エネルギーモデル活用の立場から一言

#### 田中一成(資源エネルギー庁)

エネルギーモデルの必要性については言うまでもなく、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、 $CO_2$ 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、もしくは現実性については、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。その場合に、分析の目的と構造と特徴はどういうものか、複数のモデルの中で、そのモデルを選んだ理由、そのモデルのメリット、デメリットといったことを明らかにして説明する必要がある。結果についても同様で、これまでの分析や様々な結果との相違点とその理由といったことに全て答えなければならない。特に、ある特定のモデルの分析結果を採用したときには、他のモデルの分析結果を採用したい、あるいは正しいと思っている人々に対して、選定の根拠を説得力を持って説明する努力が必要となり、こういうことを日々現場で感じている。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正確な結果というのが手に入ると思ってはいるが、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。従って、正確で精緻なモデルと、ある程度簡便でわかりやすいモデルの2つ用意して、わかりやすいモデルを使って説明するというようなことは、大変参考になる意見だと思う。

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します。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。例えば、TPPの議論においても、経済産業省と農林水産省の数字が違っているというような例。複数の数字が出てきた根拠の議論がなされずに、違うことだけをもって混乱しているととられてしまう。従って、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。ここらは政府当局として気をつけたいところだと考えている。

最後に、参考としてエネルギー基本計画の見直しのスケジュールですが、今まさにエネルギーのあり方の見直しを進めており、10月3日に審議会を始めたところで、年末にかけてベストミックスの考え方を議論し、来春を目途に選択肢案を提示したいと考えている。来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。まさに今、いろいろな技術モデル、経済モデルも含めたエネルギーモデルで、ベストミックスの選択肢ごとに数字を出していきたいと思っている。

省庁の縦割りという点については、ご指摘のとおり、いろいろな場で縦割り行政の弊害があると思っている。これまで、エネルギーについてはエネ庁が一元的にやってきたが、エネルギーというのは多面性があり、特に環境問題、CO<sub>2</sub>排出と不可分である。良い事例は、中期目標検討の際に内閣官房で一つの場をつくって検証した例がある。また、今エネルギー・環境会議の下にコスト等検証委員会というのを設けて、原子力の発電コスト、

再生可能エネルギーの発電コストがどうなるのかというのを国家戦略室と環境省、経済産業省、農水省一緒になっ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。

## エネルギーモデル活用の立場から一言

平成23年10月21日 資源エネルギー庁 需給政策室長 田中一成

#### 【必要性】

- エネルギー政策の土台となる定量的分析に必須 ~3E(Energy Security, Economy, Environment)の達成
- ▶エネルギー需要
- ▶電源構成
- ▶CO2排出量
- ▶成長率
- ▶雇用
- ▶家計への影響
- ▶限界削減コスト 等

#### 【説得性】

複雑なモデルの分析結果及びそれに基づく政策選択を如何に わかりやすく伝えるか。

- ▶モデルの目的・構造・特徴
- ▶分析の結果と実態
- ▶他モデルの分析結果との比較・違いの説明努力

#### 【危険性】

数字が一人歩きする危険性

- ▶わかりやすさと危険性
- ▶複数の数字による混乱
- ▶前提条件などの明示

(参考)エネルギー基本計画の見直しについて

10月3日 第1回総合資源エネルギー調査会基本問題委員会開催 年末目途 ベストミックス等の基本的考え方を議論 来春目途 ベストミックスの選択肢案を議論 来夏目途 新しいエネルギー基本計画案を議論

※エネルギー・環境会議とも十分連携しながら議論を進める。

#### 2.4. 最近の温暖化問題と統合アプローチの重要性

#### 丸山康樹(電力中央研究所)

エネルギーの問題は、経済、環境、エネルギー資源の問題の三つの軸で考える必要があるが、本発表では、環境の視点からエネルギーモデルをどう考えるかについて、環境側のユーザーとしての希望を紹介する。

2010年の  $CO_2$ 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。一生懸命削減の議論をしている日本の全排出量は  $CO_2$ だけで見ると約 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気候影響のダメージが増加し、経済成長に影響が出てくると考えられる。

2000 ~ 2010 年代は、移動平均した全球温度が高原状態(ほぼ一定)になったので、温暖化はもう止まったとか、あるいは温暖化そのものが嘘だとか、IPCC の一連の不祥事と関連して色々な温暖化懐疑論が盛んであった。しかし、2010 年は、WMO の報告によると、全球気温上昇は過去最大となった。

今後どうなるかということに関して、コペンハーゲンやカンクンでは、気温上昇を工業化以前に比べて 2<sup> $\mathbb{C}$ </sup>以内に抑制するという目標が依然として主張されている。各国が、それぞれの利害関係の中で 2020 年までの削減率を宣言したが、その宣言をオランダのEcofys とドイツの PIK が 2050 年まで外挿して予測したところ、3.5<sup> $\mathbb{C}$ </sup>ぐらいの温度上昇になるとの予測になり、温度上昇 2<sup> $\mathbb{C}$ </sup>抑制とは大きなギャップがある。温暖化が嘘でなければ、このギャップを何とかしないと将来大きな問題になると思う。

米国の EIA のアウトルックでは、2035 年までに石炭利用が 43%ぐらい急激に増加すると予測されている。国際機関 IEA も良く似た結果を発表している。両者の見通し(アウトルック)では、2℃抑制は不可能だろうと推察される。その解決策として、昨年出た国連の 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提案されている。つまり、2℃抑制の目標(看板)をおろすのではなく、マイナスの排出量という解決策が選択肢として提案され、これが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と思う。

等価 CO<sub>2</sub> という概念は重要である。例えば、Wigley は、気温上昇の抑制については、化石燃料の採掘段階、輸送段階での漏洩、排出される寒冷化物質の SO<sub>x</sub> 等の効果をトータルで考える必要があることを指摘している。この例のように、エネルギーモデルと環境のリンクで考えると、CO<sub>2</sub> だけではなくて、SO<sub>x</sub> 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(気温上昇)と排出量の関係を見ていく上で重要となるのが、累積排出量という考え方である。2160年ぐらいに排出をゼロにした場合、 $CO_2$ 大気中濃度が時間とともに徐々に下がっていくことが期待できる。一方、多くの人々(政策立案者、研究者、交渉担当者)が考えているのは、国連型の濃度安定化という概念で、ある時点で $CO_2$ 大気中濃度を一定にする、つまり大気中の濃度を安定化するという考え方である。ただし、 $CO_2$ 大気中濃度一定にするには、地球の吸収量に等しい量の排出をずっと続けることに

なるので、累積排出量は増加し続ける。結果として、気温が安定化せずに上昇を続け、平衡温度になるのに 1000 年ぐらいかかる。海面水位もずっとその間上昇し続ける。この概念に立脚するかぎり 2<sup> $\mathbb{C}$ </sup>抑制は難しい。

私達(電中研グループ)は、 $CO_2$  濃度が下がると、本当に気候が復元し、気温が下がるのかという科学的問題を検討するため、文科省共生プロジェクト(2005 年)で大規模な気候モデルを使って予測計算を実施した(IPCC AR4 に紹介されている)。地球シミュレータを用いた膨大な結果によれば、確かに  $CO_2$  濃度が下がると、気温は徐々に低下することが確認できた。つまり、気温の復元性が確認できた。しかし、永久凍土(パーマフロスト)やグリーンランドの氷床が溶けたりすると、これの復元は困難である。こういう現象は過去の氷河期のときに形成されたもので、気温が多少下がったからといって、永久凍土や氷床はもとに戻らない。では、何℃まで許容でき、気温が 2℃をオーバーシュートしても大丈夫なのかどうか、その限界(継続時間等)はどの程度なのかどうかはよく分からない。

その解決には、分野横断的な協力が必要である。環境側からエネルギーモデルを見たときに、ぜひ検討してもらいたいのは、排出量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。その場合、 $CO_2$ 以外のメタン、 $N_2O$ 等の他の温室効果ガスの排出を含めて考える必要があり、そうするとマイナス排出量は一層困難になるだろう。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。このようなテーマで、日本が国際的な研究を呼びかけたら良いと思う。

参考として、米国の中で省庁横断的なプログラムとして USGCRP というのがある。それが 2012 年から 2021 年(10 年間)の研究計画を提案している。削減の費用対効果、政策立案に役立つエネルギーモデル、炭素循環プロセスの解明、適応限界の把握に役立つ閾値(社会的、生態的)の明確化、といったことに関して 10 年間の研究計画を立てて、今、米国内でパブリックコメントを募集している。

また、人材育成については、一つの例だが、Maryland 大学と DOE の PNNL で Joint Global Change Research Institute という仕組み(組織)をつくっており、その中にエネルギーモデルがある。気候変化に役立つ技術戦略の問題、天然資源モデリングと評価、脆弱性と適応研究等について、ジョイント研究体制(組織)を構築している。こういう仕組みができれば、学生がモデルの内容を理解し、卒業後に新しく研究展開することで、人材育成と研究レベルの向上に繋がるのではないかと思う。

RCRIEF

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 第1セッション: 背景およびニーズ

最近の温暖化問題と統合アプローチの重要性

(1) エネルギーモデルの高度化に必要となる基礎研究課題の抽出
(2) 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の探索
(3) 本分野の将来を担う人材育成方法の探索

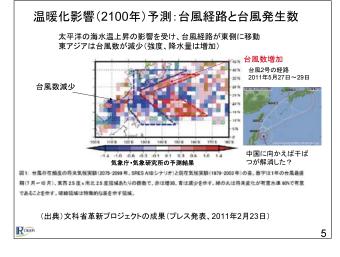
> (財)電力中央研究所 環境科学研究所 首席研究員 (東京大学客員教授) 丸山康樹

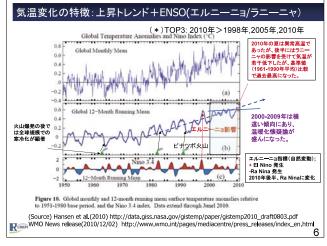
(問合せ)maru@criepi.denken.or.jp











#### 2010年の世界気候(WMO発表、NO.906, 2011年1月)

過去最高の高温年 △T=0.53°(1961-90年平均値との偏差)

- -12月の北極海の海氷面積は過去最少(9月は過去3番目)
- -2001-2010年の昇温 ΔT=0.46°C(")
- アフリカ、アジアの一部、極域では ΔT=1.2~1.4℃(")
- ・12月は記録的な低温と積雪(北部・西部ヨーロッパ、ロシア等)
- 異常気象の頻度が増加

※ロシアの熱波

※パキスタンの洪水

※豪州東部の洪水(クイーンズランド州、ブリスベーン) (エルニーニョ、ラニーニャの影響)

- -2011年になっても継続中
  - ★スリランカの洪水(80万人が被害)
  - ★フィリピンの洪水・土砂災害
  - ★ブラジル・山間部の鉄砲水(700名死亡)

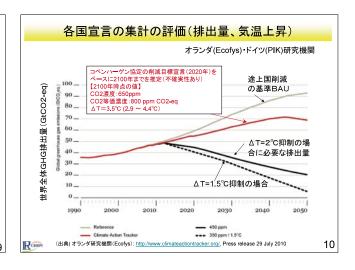
Remain 出典)WMO (http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press\_releases/index\_en.html )

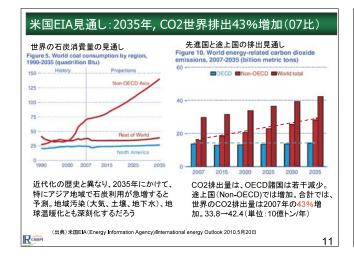
# 2. 温暖化防止国際交渉(COP15、16)の結果の整理 ※COP15 コペンハーゲン協定(デンマーク、2009年12/7~12/18) ・世界全体の気温上昇を2°C以下、衡平性、持続可能な開発 ・途上国の適応(Adaptation)計画作成への支援 - IPCC第4次評価書が示す2°C抑制に従い、世界全体で大幅削減 ・世界全体及び各国の排出量のピークアウトを可能な限り早期に実現 ・森林の減少及び劣化に由来する排出を削減:REDDプラス(注)の制度の 早期実現 (注) REDDプラス (Reduced Emissions from Deforestation and forest Degradation):途上国の森林減少・ 森林劣化に由来する排出削減(REDD)に、森林の保全、持続可能な森林管理及び森林の炭素ストックの向上 を加えた概念。

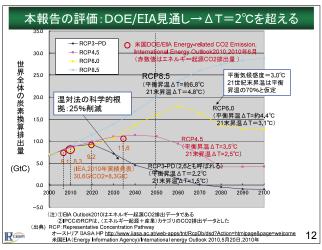
- ・コペンハーゲン協定の評価を2015年までに実施
- ·気温上昇を1.5°C(注)とすることも検討する

(出典) 経産省資料より抜粋

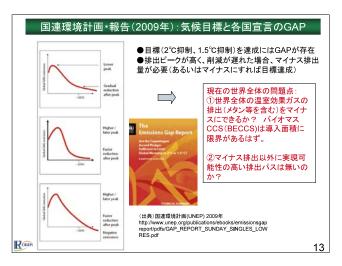
### COP16:メキシコ カンクン合意の概要 ※COP16 カンクン合意(メキシコ、2010年11/29~12/10) 1 先准国の緩和日標 文書を作成(法的拘束力無し)。削減目標を更に野心的にするよう要請。 国際的支援の場合は国際的な測定、報告及び検証(MRV)の対象。 工業化以前に比べ気温上昇を2℃以内に抑制、大幅削減の必要性を認識し、2050年までの世界規模の大幅排出削減及び早期のピークアウトに合意。 適応委員会の設立、最貧国向け等の「カンクン適応枠組み」の設立を決定。 COP17での新しい市場メカニズムの構築を検討することを決定。 6. 途上国における森林減少等の排出の削減等(REDD+)の合意 新たな基金(緑の気候基金)の設立及び同基金のデザインを検討する移行委員会 (Transitional Committee)の設立を決定。 技術メカニズム(技術執行委員会と気候技術センター)の設立を決定 (出典) COP16等の概要、平成22年12月10日 日本代表団より抜粋 9







18



#### (話題)他の温室効果ガスの重要性:天然ガスは石炭より悪い?

Climatic Change (2011) 108:601-608 DOI 10.1007/s10584-011-0217-3 Wigley(2011年) 論文の主旨

LETTER

Coal to gas: the influence of methane leakage

Tom M. L. Wigley

石炭火力⇒天然ガス火力に変換すると、一般に、 ・CO2原単位改善⇒CO2排出が石炭火力より減少

002原単位以告→002所出が石灰入力な

#### しかし、

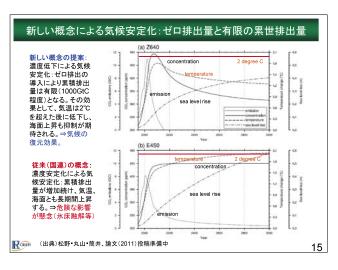
- ・採掘段階、輸送段階でメタンが漏洩
- ・SOx排出量が減少 ⇒ 寒冷化効果の減少 Crenii

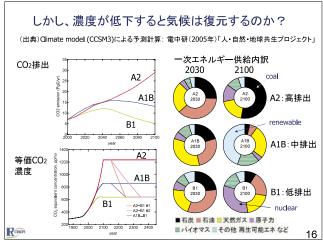
天然ガス火力に 転換すると温暖 化を加速する場 合がある(※)

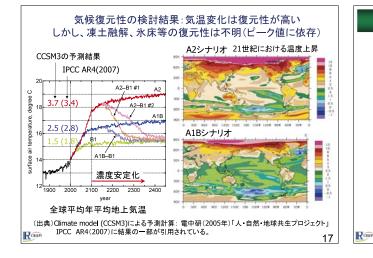
(※)CO2原単位(LCA)アプローチの盲点

RCHIEF

14







#### 今後の課題:統合アプローチの必要性(分野横断的協力)

○エネルギーモデル分野の研究者への問題提起

※温室効果ガスをマイナスにする方法は現実的か?

※他のガス(メタン、N2O等)はどう削減するのか?

※コストを考慮した実現性の高い排出パスはどうあるべきか?

○気候分野の研究者への問題提起:

※気候復元とヒステリシス効果の科学的解明

※CO2濃度低下時の海洋、陸上生態系(枯死)の吸収機能の解明 (炭素循環の解明)

#### 〇共通課題

※実現性の高い温室効果ガスの排出削減パスの研究

※国際的な研究の呼びかけ(日本主導の国際プロジェクトの提案)

#### (参考) 米国USGCRPの研究戦略(2012年~2021年) 現在: Public Commetsを募集中

Objective 2.2: Inform Mitigation Decisions エネルギーモデルの役割

Improve the deployment and accessibility of science to inform decisions on mitigation and the mitigation-adaptation interface.

Efforts to mitigate climate change focus on reducing emissions of atmospheric carbon dioxide and other greenhouse gases. Options include the capture and sequestration of greenhouse gas emissions, altered agricultural and foresty practices, more efficient use of energy, and a transition to low-carbon energy sources, such as wind, solar, and nuclear.

To make informed decisions about mitigation options at multiple spatial scales, decision makers should understand the effects of policy options on greenhouse gas emissions, the costs of reducing emissions, and the benefits of avoiding greenhouse gas emissions. Tools to inform mitigation decisions will be built on new research aimed at improving understanding of carbon storage in the Earth system, the development of scenarios of possible changes and impacts, and the identification of the social and ecological thresholds that help define limits to adaptation.

#### 政策立案者は温室効果ガス排出に関する政策において、以下を理解すべき

- 排出削減のコスト
- 排出削減による利益

- また、削減政策に役立つツール(道具)には、次の新しい研究が必要。 (1) 地球システムにおける炭素吸収(貯蔵)に関する理解促進 (2) 今後起こり得る気候変化と影響に関するシナリオの開発 (3) 適応限界の把握に役立つ閾値(社会的、生態的)の明確化 RCRIEF

19

#### (参考) 人材育成:大学の中に専門の研究機関を設置: 米国Maryland大学/Joint Global Change Research Institute)

The Joint Global Change Research Institute (JGCRI) houses an interdisciplinary team The Joint Global Change Research Institute (JGCRI) houses an interdisciplinary team dedicated to understanding the problems of global dimate change and their potential solutions. Joint Institute staff bring decades of experience and expertise to bear in science, technology, economics, and policy. One of the strengths of the Joint Institute is a network of domestic and international collaborators that encourages the development of global and equitable solutions to the climate change problem. Initiated in early 2001, JGCRI brings together the intersecting interests of Pacific Northwest National Laboratory and the University of Maryland. Staff at the Joint Institute are focused on developing new opportunities to train university students in these

interdisciplinary areas: (分野横断的研究領域) Integrated Assessment Modeling (統合評価モデリング) Technology Strategies to Address Climate Change (気候変化に役立つ技術戦略) Natural Resource Modeling and Assessment (天然資源モデリングと評価) Vulnerability and Adaptation Studies (脆弱性と適応研究)

Local and Global Environmental Mitigation Measures-Policy Development and Testing. In addition, the Joint Institute focuses on developing dialogues around global change issues, across disciplines and national boundaries, and among diverse socio-economic stakeholders.

RCRIEF 20

# 3. 第2セッション:ボトムアップモデル

3.1. ボトムアップモデルの現状と課題 - AIM/Enduse を中心として-明石 修 (国立環境研究所)

まず、Asia-Pacific Integrated Model (AIM) の概要を説明し、続いてボトムアップモデルに関する今後の課題について紹介する。

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。これまでに IPCC や国連環境計画の報告書等にも多く引用され、最近では、気候変動問題にとどまら ず、持続可能社会の実現を目指したモデルの拡張等を行っている。

その一つの特徴として、中国、インド、韓国、タイ、マレーシア、インドネシアといったアジア諸国や、あとオーストリアやアメリカの大学や研究機関と一緒に開発しているということがある。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 には、排出モデル、簡易気候モデル、影響モデルがあり、分析の対象や目的に応じてこれらを統合させたり、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。

技術選択モデルの役割は、温室効果ガスの排出量の削減について、技術導入をリアリティを持って記述することである。例えば、経済モデルでは技術進歩はアグリゲートされたエネルギー効率の改善やエネルギーの代替といった形で抽象的に表されるが、本モデルでは、技術導入による効率改善等を具体的技術の裏づけをもって説明することができる。AIM/Enduse モデルは、主にエネルギーを対象とした部分均衡型で、所得や経済活動に対して計算されるエネルギーサービス需要量を所与とし、費用最小化のもとで技術やエネルギー種が計算され、それをベースにしてエネルギー消費量に伴う  $CO_2$  の排出量が計算されるといったボトムアップ型のモデルとなっている。また、エネルギー起源以外の  $CO_2$  についても考慮できるという特徴がある。課題としては、想定する社会像がモデルの前提として外から与えられており、その前提そのものが変わるフィードバックについては現段階では考慮されていない点がある。

このモデルでは、技術はエネルギーを消費してエネルギーサービスを供給するものとして描かれている。推計のフローでは、まず、旅客輸送、貨物輸送、鉄鋼生産、セメント生産、冷暖房需要など、将来のエネルギーサービス需要量をモデルの外で推計して入力データとして与えている。モデルではそのサービス需要を満たすための技術の普及量をコスト最小化の枠組みで推計し、その結果としてエネルギー消費量、GHG排出量や対策コスト等を計算する。また、このモデルでは排出削減目標や炭素税といった政策についても考慮することができ、ある政策を打ったときの技術選択の変化や、その結果としての温室効果ガス排出量の変化等を分析できる。本モデルは、逐次最適型の線形計画モデルで、対象地域は目的に応じて世界、国、また国の中の地域に対応することができ、部門に関しても、特定の一つの部門から全体をカバーするといったようなこともできる。対象期間は10年

から50年程度までとなっている。

私はこの AIM/Enduse の世界版を担当しており、以下に世界版のについて少し詳しく説明する。

地域は 32 地域、推計年は 2005 年から 2050 年まで、ガスは  $CO_2$  を含めた京都 6 ガスをカバーしている。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で、エネルギーの採掘から最終利用までをカバーしている。また、非エネルギー部門、農業部門や廃棄物部門といったところもカバーし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。本モデルでは最終エネルギー消費や非エネルギー部門に関しても詳細に分析できるといった特徴がある。この分野の国際的な研究コミュニティでは、国際モデル比較プロジェクトが頻繁に行われており、このような活動にもこのモデルで参加している。

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。また、農業、廃棄物、またフロンガスに関しても、できるだけ詳細な技術を扱っている。

続いて、放射強制力を 2100 年に 2.6W/m² 以下とする目標を持ったときに、どのような技術シナリオがあり得るかについて検討した例を紹介する。動学最適化モデルである AIM/Impact[Policy] を用いた計算の結果、放射強制力を 2100 年までに 2.6W/m² 以下に抑制するためには、世界の温室効果ガス排出量を 2050 年に 90 年比で半減させる必要があるということが分かった。 Enduse モデルの役割は、このような大幅な削減が技術的に可能かどうかを分析することである。発電部門の分析の例では、気候政策がないベースラインシナリオでは、石炭や天然ガスが大きく増加するといった結果になる。一方で、2.6Wの気候制約のあるシナリオでは、石炭や天然ガスは 2020 年以降大きく削減され、CCS が導入されるという結果になる。また太陽光、風力、バイオマスといった再生可能エネルギーも大量に導入される。この分析では、バイオマス発電に CCS を導入することを想定しており、これが 40 年以降に導入されることによって、マイナスの排出量が実現されている。産業部門では、2.6W ケースではエネルギー消費量自体がベースラインに比べてやや減少し、石炭から天然ガスへのシフトが進むという結果になっている。

大幅削減するためには 2050 年で世界全体で GHG を 50Gt 削減する必要があるが、技術貢献の内訳は、バイオマス (CCS)、化石燃料 (CCS)、風力、太陽光、バイオマス、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、 $CO_2$  以外の技術で 10%という結果になる。

AIM/Enduse を含めたボトムアップモデルに関する今後の課題としては、今のところ 温暖化を対象にしているものを、他の環境問題やセキュリティー、土地利用、食糧との競合関係、レアメタル等の物質需給等も拡張していく必要があると思っている。

長期的将来の分析では経済社会、技術や資源量等に何らかの想定を置き、その上で分析することになるが、そうした想定には不確実性がともなうため、不確実性リスクを回避する戦略を分析する必要があると考えている。具体的には、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ところ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。また、本モデルは部分均衡モデルなので、経済活動を切り離している。したがって、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、モデルが現実世界をより適切に表現できるようにモデルの高度化を行うことも重要である。例えば、現在の最適化モデルでは、ある技術が少しでも安ければ100%そちらが選択されるという問題がある。しかし、実際の世の中では技術選択の結果は確率的に分布している。このような確率的選択についてもモデルに組み込んでいく必要がある。

また、将来の費用を重みづけする割引率というパラメータをどう設定するかということも考えていく必要がある。例えば、社会的な割引率は大体 4 ~ 5%ぐらいの値だが、実際に世の中で観測されているのは、人々はもっと初期投資を嫌い、将来のペイバックを小さく見積もる傾向がある。そういっ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、ある程度モデルの説得力を増すことができると考えている。

モデルコミュニティの発展に関しては、いろいろなモデルチームが個別にデータ整備を 行っている現状があるが、データを基礎的な部分で共有化できれば、コミュニティとして 作業を効率化できるのではないかと思う。また、世界では共通の課題を設定し、それに対 応したモデル計算を複数のモデルで行い、結果を比較する研究コミュニティがあるが、日 本でもそうした活動を研究レベルで行うことは重要であると考えている。

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

国立環境研究所 特別研究員 明石修 研究開発戦略センター 2011年10月21日

COS AIM

# 発表の内容

- AIM (Asia-Pacific Integrated Model)の概要
- 技術選択モデル<sup>1)</sup>(AIM/Enduse)の現状
  - AIM/Enduseの概要
  - AIM/Enduse[Global]を用いた分析
- ボトムアップモデルに関する今後の課題

1) 本研究で示している技術選択モデルは、環境省環境研究総合推進費A-1103において開発しているものである。

COS AIM

- AIM (Asia-Pacific Integrated Model)の概要
- 技術選択モデル(AIM/Enduse)の現状
  - ー AIM/Enduseの概要
  - AIM/Enduse[Global]を用いた分析
- ・ ボトムアップモデルに関する今後の課題

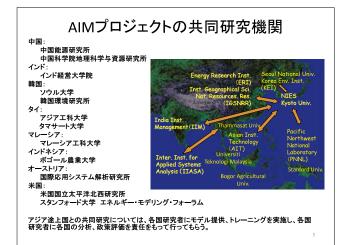
COS AIM

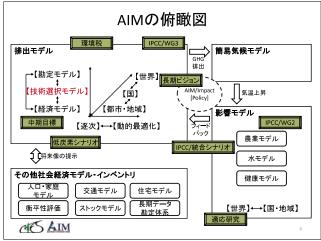
#### AIM (Asia-Pacific Integrated Model)とは?

- AIMとは、統合評価モデルの1つであり、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、1990年からプロジェクトを実施している。
- AIMは、IPCC<sup>1)</sup>のSRES<sup>2)</sup>シナリオやRCP<sup>3)</sup>の作成 に貢献し、AIMの結果はIPCC評価報告書や UNEP<sup>4)</sup>/GEO<sup>5)</sup>にも多く引用されている。
- 近年、気候変動問題にとどまらず、持続可能 社会の実現を目指したモデルの拡張を行っている。
- http://www-iam.nies.go.jp/aim/index\_ja.htm



1) IPCC: 気候変動に関する政府間パネル, 2) SRES: 排出シナリオにおける特別報告書 3) RCP: 代表的濃度パスシナリオ, 4) UNEP: 国連環境計画, 5) GEO: 地球環境概況





- AIM (Asia-Pacific Integrated Model)の概要
- ・ 技術選択モデル(AIM/Enduse)の現状
  - ー AIM/Enduseの概要
  - ー AIM/Enduse[Global]を用いた分析
- ・ ボトムアップモデルに関する今後の課題

COS AIM

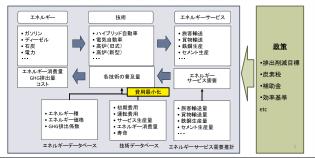
#### 技術選択モデル(AIM/Enduse)

- 温室効果ガス排出量の削減について、どのような技術をどれだけ導入する かをリアリティをもって記述することを目的に開発。
- これまでに、わが国の温暖化対策税の評価、中期目標の分析、中長期ロードマップの検討に用いられてきた。
- 主にエネルギーを対象とした部分均衡モデルであり、所得や経済活動に対して計算されるエネルギーサービス需要量を所与として、費用(初期投資費用+運転費用)最小化のもとでエネルギー消費技術やエネルギー種が計算され、エネルギー消費量に伴う二酸化炭素排出量が計算される。
- エネルギー起源の二酸化炭素排出量以外についての対策についてもあわせて導入可能となるように組み込まれている。
- ・ 課題:どのような社会像を想定するかは前提としてモデルの外から与えられる。施策の導入によっては前提そのものが変わる可能性があるが、こうしたフィードバックについては考慮していない(部分均衡故の課題)

COS AIM

#### 技術選択モデル(AIM/Enduse)の概要

- ・ 技術の積み上げによりエネルギー消費量・GHG排出量を推計
- 所与のエネルギーサービス需要を満たすための技術の組み合わせを総費用最小化により推計
- 逐次最適化型の線形計画モデル(タイムステップは1年)
- 対象地域:世界、国、地域 部門:1部門~全部門 推計期間:10年~50年



#### AIM/Enduse[Global]の概要

- 地域:世界32地域
- 推計年:2005年~2050年
- ・ ガス: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, PFC, SF<sub>6</sub>
- 部門:

最終エネルギー消費部門: 産業、家庭、業務、運輸、その他 エネルギー供給部門: 発電、熱供給、石油精製、エネルギー資源採掘 非エネルギー部門: 農業、廃棄物、Fガス

- 技術:約200種
- 特徴:最終エネルギー消費部門や非エネルギー部門の詳細な記述
- 国際モデル比較プロジェクト(EMF<sup>1</sup>), AME<sup>2</sup>) に参加 1) Energy Modeling Forum, 2) Asian Modeling Exercise

COS AIM

#### 技術オプション

Sector	Category	Technology options						
Power	Coal power plant	Pulverised coal combustion(PCC), Supercritical(SC) PCC, Ultrasupercritical(USC) PCC, Integrated gasification combined cycle(IGCC), SC PCC with Carbon capture and storage(CCS), USC PCC with CCS, IGCC with CCS						
generation	Gas power plant	Combined cycle, Advanced combined cycle(ACC), ACC with CCS						
	Renewables	Wind power, Photovoltaics, Biomass power plant, Biomass IGCC, Biomass IGCC with CCS						
Hydrogen p	roduction	Coal, Coal with CCS, Natural gas, Natural gas with CCS, Biomass, Biomass with CCS						
Industry	Steel	Large size code oven, Gole gas recovery, Automatic combustion, Code day type quenching. Coal wet adjustment. Cool latent heat recovery. Next ganeration code oven, Automatic igniter, Colle waste heat recovery. Mainly waste heat recovery, High efficiency igniter, Blast furnace gas recovery. Blast furnace gas recovery with COS. Wet top pressure recovery tubnic, Dy top pressure recovery unbine, Heat recovery of hot Blast stove, Cos injection, Dy top pressure gas recovery, LDG recovery, LDG latent heat recovery, Cortinuous assents and caster, Hot charge rolling, Hot direct rolling, High efficiency heating furnace, Heat furnace with regenerative barner. Continuous amenting lines, DC electric furnace, Scrap new heat						
	Cement	Ball mill, Tube mill, Vertical mill, Wet kiln, Semi wet/dry kiln, Dry long kiln, Vertical (Shaft) kiln, SP/NSP, Advanced kiln with CCS						
	Other industries	High-efficiency boiler (coal, oil, gas), boiler with combastion control (coal, oil, gas), cogeneration (coal, oil, gas), Regenerative gas boiler, High-efficiency industrial furnace (oil, gas), Motor with Inverter control, High efficiency motor						

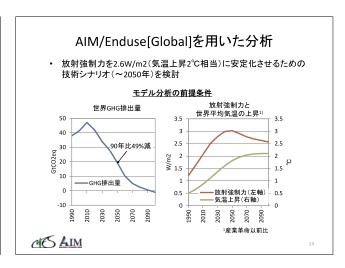
CHES AIM

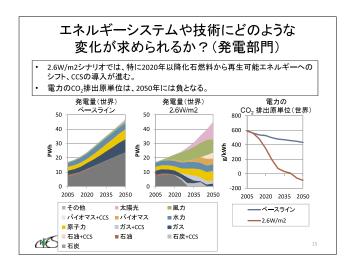
#### 技術オプション

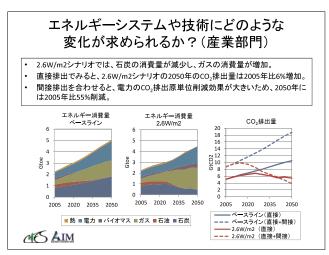
Sector	Category	Technology options							
	Cooling	High-efficiency Cooler (Sold average in developed countries in 2000, Top Runner, Highest performance)							
	Warming	High-efficiency kerosene stove, LPG Stove, Gas Stove, High-efficiency air conditioner (Sold average in developed countries in 2000, Top Runner, Highest performance), Wall insulation for detached house, Wal insulation, Double-glazed Glass with Lowe							
Residential &	Hot water	High-efficiency kerosene water heater, High-efficiency LPG water heater, Latent Heat Recover LPG Water Heater, Latent Heat Recover Gas Water Heater, CO2 Refrigerant water heater, Solar thermal water heater, Fuel cell							
	Cooking	High-efficiency Gas Cooking Stove(LPG, Natural gas)							
	Lighting	Fluorescent of incandescent type, Fluorescent with energy saving stabilizer, Inverter type fluorescent, H Inverter type fluorescent							
	Refrigerator	High-efficiency refrigerator(Sold average in developed countries in 2000, Top Runner, Highest performance)							
	TV	High-efficiency TV (Sold average in developed countries in 2000, Top Runner, Highest performance), TV (Liqui crystal display)							
	Passenger car	High-efficiency passenger car, Weight reduction, Engine friction reduction, Aerodynamic drag reduction, Rollin resistance reduction, Brake drag reduction, Continuously variable transmission, VVLT. & cylinder reactivation GDI Engine, Hybrid electric vehicle(HEV), Electric vehicle(EV), fuel cell (whicle(FVCV), Biofuel							
Transport	Truck	High-efficiency truck, Engine improvement, Weight reduction, Aerodynamic drag reduction, Rolling resistanc reduction, Natural gas vehicle, Hybrid vehicle, Fuel cell vehicle, Biofuel							
. rumsport	Passenger bus	High-efficiency bus, Rolling resistance reduction for bus, Hybrid engine, Biofuel							
	Ship	High-efficiency ship, Biofuel							
	Aircraft	High-efficiency aircraft, Biofuel							
	Rail	High-efficiency train, Regenerative braking system with VVVF							

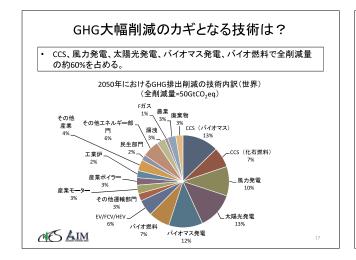
CO AIM

Sector	Category	Technology options
	Rice cultivation	Water management (Midseason drainage, Shallow flooding, Alternative flooding/Drainage), fertilis management (ammonium salfate), upland rice, Addition of Phosphogypsum, Direct Wet Seeding, Off-seas straw, Rice Straw (Kine Straw (Compost
Agriculture	Cropland	Reduce fertilization, Nitrogen inhibitor, Fertilizer Free Zone, Optimize distribution geometry, fertilizati management (Spreader maintenance, Split fertilization, Sub-optimal fertilizer application), Conv fertilizational tillage to no-till
	Mature management	Anaerobic Digestion (Centralized plant, Farmscale plant), Covered Digester, Covered lagoon, daily spread manure, Complete mix digester, Plug flow digester, slowing down anaerobic decomposition
	Livestock rumination	Administration of chemical substance (Propionate precursors, Pribiotics), feed management (High Fat Die Improved feed intake and genetics, Replace roughage with concentrates)
Waste	Municipal Solid Waste	Biological Treatment, Improved oxidation through improved capping and restoration, Direct Use of Land Gas, Electricity and Heat Generation from landfill gas, Flaring Landfill Gas, Upgrade Natural Gas, Anaero Disestion, Composting (vindeovo plant, tunnel plant, hall plant), Incineration, Paper recvcling
	By-product emissions	Thermal Oxidation
	Refrigerants	Alternative system (carbon dioxide, hydrocarbons, hydrocarbons & $NH_3$ ), Leakage reduction, Recover Decomposition
Fluorinated	Aerosols	Alternative aerosol (Hydrocarbon Aerosol Propellants, Not-in-kind Alternatives), 50% reduction (for Mediapplications, General Aerosol Propellants)
gases emission	Foam blowing agents	Recovery, Decomposition, Alternative System (Water-blown CO <sub>2</sub> Systems, Liquid CO <sub>2</sub> Foam Blowin Hydrocarbon Foam Blowing)
	Solvents	Alternative Solvents (NIK Aqueous, NIK Semi-Aqueous) , Retrofit Options, 50% reduction
	Manufacturing	Cleaning facility (NF <sub>3</sub> In Situ Clean, NF <sub>3</sub> Remote Clean), Recapture/Destroy, Plasma Abatement, Cataly Destruction, Thermal Oxidation, Retrofit (PFPB, SWPB, CWPB, VSS, HSS), SO, Replacement
	Electrical equipment	Leakage reduction, Device recycle









AIM(Asia-Pacific Integrated Model)の概要
技術選択モデル(AIM/Enduse)の現状

— AIM/Enduseの概要

— AIM/Enduse[Global]を用いた分析
ボトムアップモデルに関する今後の課題

#### モデルの高度化に関する課題

#### ≻ 温暖化以外の評価軸の導入

- 一 他の環境問題、エネルギーセキュリティ、土地利用・食料供給、物質需給
- ≻ 不確実性の取り扱い
  - 一 将来の社会経済、技術(性能・コスト・社会受容性等)、資源量等は不確実
  - 不確実条件下でのリスク回避的戦略の検討(シナリオアプローチ、確率論的アプローチ)
- **▶ サービス需要推計の高度化** 
  - ーサービス需要発生の記述、経済フィードバックの考慮
- ▶ 技術選択の検証・精緻化(特に記述的モデルの場合)
  - 一確率的技術選択、主観割引率に関する実証研究

#### モデルコミュニティの発展に関する課題

- - ー社会経済データ、エネルギーデータ、技術データ
- ▶ 学術的コミュニケーションの活性化
  - ーモデル比較や課題抽出を行う学術フォーラム

#### 3.2. ボトムアップモデルの課題

#### 藤井康正(東京大学)

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。 予測型は、規範型モデルの入力データになっているイメージを持っている。ただ、規範型のものを集めると、予測型になっているような階層構造というようなイメージもある。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自体が一つのモデルになる。構築しやすいが、結果の解釈が難しいところがあり、過去に実績がないものは基本的には取り扱えない。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というもの。これは、既知の技術を過大評価し、未知技術が欠落する傾向がある。

工学的な発想で考えると、エネルギーシステムは一つの製品である。例えば自動車と同じで、プリウスの設計とクラウンの設計どちらが正しいかと言われても、こう設計したとしか言えない。こういう車に乗ったら良いのではないかと同じように、将来の社会をこうしたら良いのではないかということを、いろいろな環境、境界条件を入れて設計図を示しているというのが工学的なモデル。

このような工学モデルですが、課題がいろいろある。経済モデルとの統合という面では、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。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、それを社会全体に拡大したものがボトムアップ型のエネルギーシステムモデルである。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、国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というのがよく分からない。多分違うということを最近確信するようになってきた。

一方、生産関数などを用いたマクロ経済モデルも、パラメータ推計の問題と技術選択を明示的に考慮できないので、技術選択のアドバイスができないという問題点がある。環境、社会経済システム、人間があり、土地・資源を使って財・サービスを供給し、廃棄物が出て、あとはお金が社会経済システムの中で回っているが、その一部としてエネルギーシステムがある。その流れの一部分が大きい、小さいと言ったところで何の意味があるのかという面がある。それから、マクロ的生産関数は実績からの推計精度が良くないのではないか。また、項目がふえていったときのバンドルの作り方に恣意的な部分も多いのではないか。さらに、生産関数の輸出入のところで質量保存則が満たされないので、物質循環のモデルをつくる際にはかなり不都合なところが出てくる。

省エネルギーが促進される一方で、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物質バランスも考慮しなければならない。鉄とかセメントとか基礎素材、あるいは鉄のリサイクルとか、鉄とプラスチックの代替とか、このようなも

のも明示的に考慮しないと、きちんとした絵が描けない。レアメタルとかも資源の利用可能な上限量も考える必要がある。バイオマスも量はそんなに多くなく、これも希少資源と言える。物質バランスを考慮しようとすると、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。

次に、工学モデルに関する課題の3番目として、重要性が高まった対策技術の本格的なモデル化が挙げられる。もちろん産業部門の技術もあるが、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新技術がある。不特定多数の消費者が扱う技術をどうモデル化するかが課題である。また、原発事故以来、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、化石燃料消費量大幅削減や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。

家庭でのモデルでは、1 軒ずつ取り出すと、非常に不規則でスパイク状の負荷が発生する。それを各家庭が多分自分の光熱費が最小になるようにコージェネレーション運転をして、それが何千万台も集まって日本国内の家庭用のエネルギー需要が出てくる。これをどのようにモデル化すべきかという課題がある。

東京電力管内で、真夏の最大負荷が 60GW のところに太陽電池 40GW を入れたらどうなるかというシミュレーションをしてみると、貯めるより捨てたほうがいいという結果も出てくる。このようなシミュレーションには、10分間隔のデータが要る。20分間隔では、導入されるバッテリー容量が異なる値となる。どこまで解像度を高めることが必要なのか、これは本質的に取り組まなければならない課題。複雑になるといって、これを1時間間隔とか2時間間隔のモデルでやったら、本質的な不安定性を考慮できない。

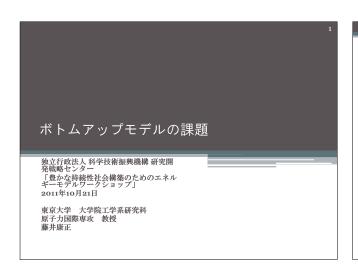
未確認のものも含めた資源量を比較すると、石炭は、石油やガスに比べて、けた違いの資源量である。ウランは軽水炉という今の原子力発電所の使い方で消費すると、在来型の石油資源と同程度の資源量しかない。地球温暖化を抑制するための手段として石炭を代替したいというニーズに対して、これだけの量では意味がない。つまり、原子力発電所をやれば地球温暖化は解決できるかというと、軽水炉ではできないというのが答えになる。ただ、プルトニウムまで利用する増殖炉になると、資源量が約 60 倍増えるので、石炭代替が可能になる。これだけの違いがあるので、再処理は慎重に判断しなければならない。ドイツ等は、ワンスルー利用をしながら  $CO_2$  を減らすと言っているが、こういうことは言ってもらいたくない。本当は非常に無駄な使い方をして迷惑なことのように思う。本当に脱原発と言うのであれば、直ちに止めて頂きたい。その分、ウラン資源を残しておいて、それを中国なりインドが将来、高速増殖炉で使うというのが地球全体の  $CO_2$  排出量削減には一番良い。

今、世界を80地域ぐらいに分け、いろいろな新技術、水素やCCS、核燃料サイクルモデル等を入れることに取り組んでいる。需要としては、IPCCの技術準拠でつくり、CO₂排出量は丸山先生のところの累積排出量が520GtになるZ520を使っている。例えば、2000年から2100年まで、ベースケースだと、化石燃料をかなり使う。排出抑制ケースだと、CCSが最後で入るので、化石燃料の使用がかなり残る。原子力に関しては、ベースケースだと石炭火力に経済性で負けるような形で一旦なくなり、後半になって、石炭の値段が上がってくると、また入ってくるという結果になる。

時間的解像度の一番簡単なモデルとして、電源の年平均値の稼働率を入れる、あるいは

負荷持続曲線を使うというやり方がある。しかし、実際の日本全体の負荷は、かなり複雑な動きをしている。太陽光とバッテリーの関係をきちんと評価しようと思ったら、10分間隔で行う必要がある。今そういう研究を行っている。

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。

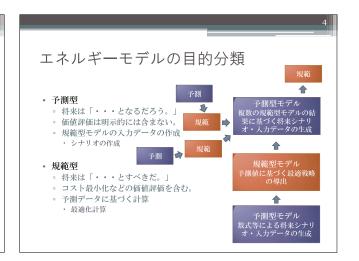


# 発表の概要

- エネルギーモデルの分類
- 工学モデルに関する課題
- 世界地域細分化エネルギーシステムモデル
- まとめ

#### エネルギーモデルとは

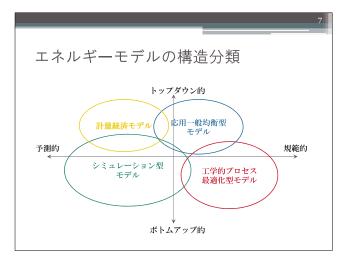
- エネルギーシステムの構成要素間の相互の関係を数式で抽象的に記述、コンピュータ上に一連のプログラムとして実現したもの
- 構築の目的(一般論)
- 。 複雑なシステムを大規模な連立方程式で記述し、定量的に評価できる。
- 対象システムに対するモデル作成者の理解を深める。
- 対象システムを理解するための共通の枠組みを提供できる。意識合わせ、 議論のたたき台の提供する。



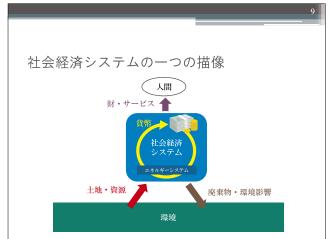
# エネルギーモデルの定式化手法の分類 トップダウン型 帰納的、経験的、マクロ的 対象要素が多い場合に有効 ・構築し場いが、結果の解釈は困難 ・過去に実績がないものは基本的には取り扱い不可 ボトムアップ型 演繹的、合理的、ミクロ的 対象要素が少ない場合に有効 ・大量のデータが必要だが、結果は明瞭 ・ 既知新技術の過大評価の傾向と未知技術の欠落

# エネルギーモデルの構造分類

- 工学的プロセス最適化型モデル
  - ・ 線形計画法などによる最適化
- 応用一般均衡型モデル
  - 。 家計や企業の最適化行動を想定した多部門需給均衡
- 計量経済モデル
  - マクロ経済の統計データのトレンド
- シミュレーション型モデル
  - 。 フィードバック系の時間順方向のシミュレーション

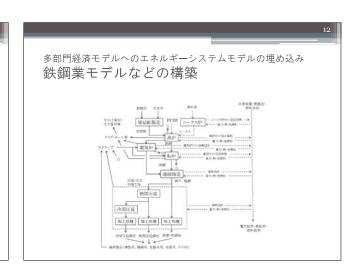


# 

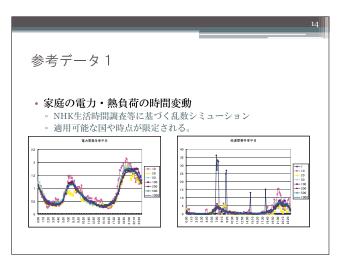


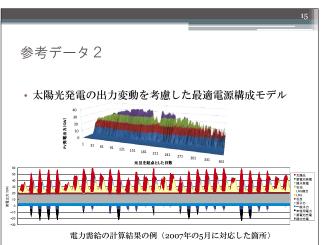
マクロ的生産関数に関する課題

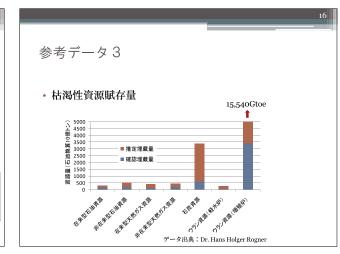
・以下のような資本Kと労働力Lのコブ=ダグラス型関数で生産量Qが定義されることが多い。  $Q_j = Q_{0j} \cdot (L_j^{\alpha} \cdot K_j^{-\alpha})$ ・バラメータ $Q_0$ や $\alpha$ の値は、過去の実績から推計するしかない。
・推計精度はあまり高くなく、その将来の値については仮定が必要。・技術選択を明示的に考慮できない。
・投入要素間の分離可能性などの恣意的な仮定が多い。
・質量保存則が保障されない場合がある。
・資本Kと労働力Lは過去の時点に決められ、生産量Qと同時決定ではないのではないか。



# 







工学モデルの限界克服に向けた取り組み

・多部門経済モデルへのエネルギーシステムモデルの埋め
込み (課題1、課題2)

・ボトムアップ型の多部門モデルの構築

・鉄鋼業モデルなどの構築

・製造業での各種新技術の考慮

・生産関数を用いない定式化手法の構築

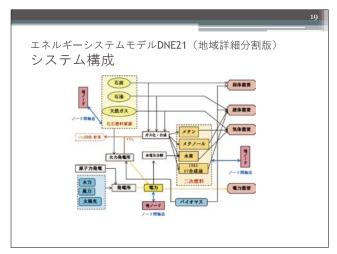
・エネルギーシステムモデルの改良(課題3)

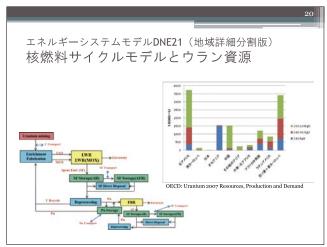
・地理的・時間的解像度の詳細化

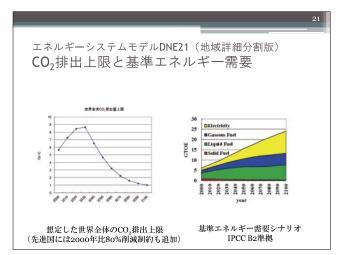
・出力が不規則な再生可能エネルギーへの対応

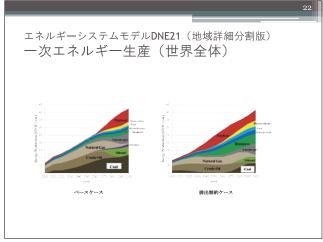
・核燃料サイクルの考慮

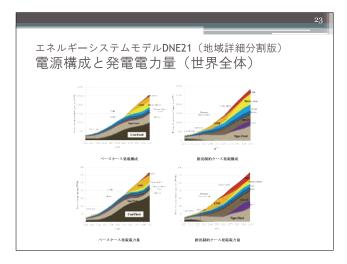


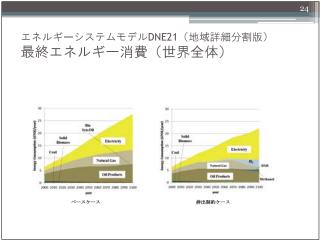


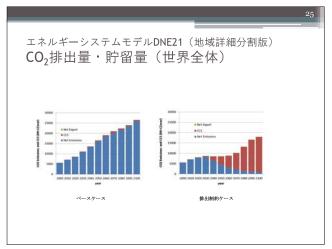


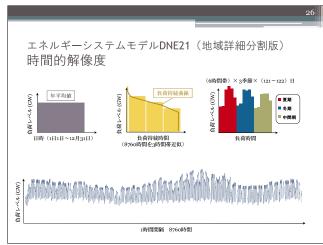


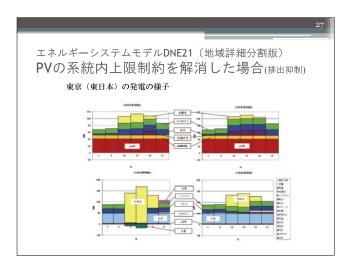












# ・多部門経済モデルへのエネルギーシステムモデルの埋め込み ・温暖化対策に関する「負担増加論」対「成長厳略論」についてのより詳細イメージの提供 ・国家財政赤字や国債の議論にも関係してくる。 ・数学的手法の構築から検討しなくてはならない。 ・研究室では試作モデルは構築中 ・エネルギーシステムモデルの改良について ・ 更なる地理的・時間的解像度の詳細化は必要 ・民生・運輸部門のモデル化(需要シナリオとも関連) ・エネルギー供給のオブションの増加

#### 3.3. ボトムアップモデル

#### 森 俊介(東京理科大学)

トップダウンモデルは、上位のマクロフレームが決まった後に下位の構成要素が逐次決まるというフローからそのように呼ばれているが、実際には総体価格を与えてシェアが決まって合成財価格が決まると、トータルの需要が決まって需要が決まるという、行ったり来たりする流れがある。CGE は、経済構造の変化とその影響を詳細に扱える。また長期的な予測は必ずしも得意ではないが、スナップショット的な分析には非常に強いものがある。

石油精製プラントや輸送スケジュールのようなボトムアップモデルの歴史は非常に長く、線形計画法とほとんど歴史が重なっているような状況である。ボトムアップモデルは、技術選択とか投資計画を表す静的なモデルから、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、最適化モデルというのはメリットが大きい。。転換・輸送ロス、副産物、環境制約などの線形計画、数理計画モデルは、簡単に制約を与えることができるし、産連表分析ではやや困難な副産物のフロー等の扱いも、最適化モデルでは容易にできる。そのかわり、基本モデルのフレームで需要を与えるので、ある範囲内で制約が変化する場合は良いが、余り極端な制約を与えてしまうと、そのような社会とはどのようなものだろうかという解釈が難しくなると面もある。

このボトムアップエネルギーモデルのパイオニアとして、ブルックへブンの BESOM がある。それからエネルギーの費用最小化ということで DESOM、PIES、MEFS、それから今は NEMS というようにモデル開発が続いている。MARKAL は、パッケージ型で誰でも容易に使えるように、ドイツの KFA で拡張されている。オリジナルは線形計画モデルだったものが、さらに MARKAL-MICRO とか MARKAL with uncertainties 等に拡張され、そこに1つのコミュニティーができ上がっている。これもユーザーを増やすという点では非常に重要な活動である。

ボトムアップエネルギー経済モデルを使って地球温暖化の統合評価を行う場合、長期的な問題を扱う必要があり、そのため技術開発の様々な要素を考慮しなければならない。そのために、経済活動と技術選択のシステム統合が進んできている。この背景には、計算機パワーが向上し、GAMS等のソフトウェアも充実し、データベースもインターネットのおかげで便利になり、いろいろなものが使いやすくなってきていることが挙げられる。

さらに、計算機パワーのおかげで、それまで解くために入れた仮定を緩めることができるようになってきている。その例は学習効果、量産効果で、Barettoの ERISS モデルなどでは、累積生産量と累積 R&D 投資を含む形で学習効果関数を導入するモデルが導入されるようになってきている。ただし、量産効果は経験則としては確かに成立するが、永久に続くのかという批判もある。それから、燃料電池等のコストの下限値をエンジニアリングとしてどこに設定するか研究する動きもある。ただ、ある時点である技術が急激に普及して急にとまるという傾向の答えを出しがちで、補助金の効果を過大評価する危険があるので慎重さが求められる。

次にシナリオ最適化の多段意思決定で不確実な将来を考える場合は、将来の決定を遅ら すことができるならば、それまでは中庸な策をとろうという考えはあり得る。普通は不確 実下の期待値で考えるが、将来がどうなるかわからない場合は、一度だけの繰り返しのない選択問題となり、期待効用最適化以外にも、マキシミニ基準だとか、ミニマクス基準などいろいろな基準がある。しかし、これをエネルギー経済モデルに取り入れていく際は別の問題が発生する。例えば、石油科学とか天然ガスの将来の価格分布の幅は非常に広く、しかも平均値に対して非対称で、ランダムウォークのような動きをする。このような分散を持たないところにマキシミニとかミニマクス等のリスクの手法をそのまま使うと破綻する。例えば、軽油や石油は期待値が安いが、価格上昇のリスクは高い。石炭は、平均値は高いが、分散は小さい。これを比較すると、期待値で見る限り、常に石油が選ばれることになる。後悔値でも期待値でやると、石油が選ばれる。また、後悔値の場合は、蓋然性は低いが最悪値で行動が決まるという不自然なことが起きる。私のところではギャップに後悔値の計算をして、その後悔値が大きくなる場合を回避するように計算したところ、次第に DME の選択の可能性が増えていく結果が出てきている。このように、一度きりの意思決定問題は少し慎重な扱いをする必要がある。

次に、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・多地域・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字的に最適化するので、投資計画とか資源制約は扱えるが、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。設備投資コストはエネルギー部門の付加価値部門に入っていて、その中にエネルギー技術選択のフローが入っている。さらに、労働も熟練労働者と非熟練労働者を分けて、特に情報産業が出てくれば、高学歴労働者に需要がふえるという構成を持っている。さらに価格に関しても、基本的には実質価格ベースだが、相対価格指数も計算できる構成になっている。

最適化モデルには評価関数があるが、意思決定者が複数いると、経路依存性が現れる問題が簡単に作れてしまう。例えば、10の需要家が CGS を導入して提携し合う場合に、提携が増えれば費用総額の節減可能性そのものは増していく。しかし、1人当たりの分け前は単調に増大するとは限らない。そうすると、後発組は参加しなくなる。最終的な組み合わせがいろいろ出てくる難しい問題になる。まして世界の排出権取引の提携問題になると、莫大な数の組み合わせが必要になってくる。

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である。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。これは重要な点と思う。

実際問題として、どこまで公開すべきかが難しい。DICE とかヨーロッパの EnerPlan などは、プログラムコードが公開されている。しかし、細かくやろうと思うと、著作権の問題が残る。

次の問題は利用者が関心のある話題に、エネルギーモデルはどれほど応えることができるかという点がある。例えば、Smart Grid とか地域分散エネルギーは今大変な関心が集まっているが、これ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。

重要な点として、不確実性と長期予測の意義について述べたい。モデル開発の目的は、 未来の必ずしも正確な的中ではない。例えば、前に川があり、このまま落ちると予測した ら落ちずに済んだ。川に落ちるのは正しくなく、ばかげた行動でしかない。将棋で相手の 手を読むというのは、相手の次の一手を当てることではない。相手のどの手に対しても、 自分が不利にならない手を捜すためにどこまで想定するかという問題であり、次の一手を 当て続けることが手を読むことの目的ではない。この辺が自然科学的予測との大きな違い と言える。もう一つの例として、泥棒がいつ家に入るかを科学的に予測可能か考えてみる。 いつ入るかを的中させるのではなく、あくまで可能性を想定して防犯対策をとることが科 学的な行動のはずである。泥棒がミサイルを撃ち込んでくる可能性を考えることが本質で あって、これはその人の住んでいる環境による。戦争状態なら、当然、ミサイルを撃ち込んでくる可能性がある。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。

最後に、私の座右箴言である「実物大の地図は役に立たない」という言葉を紹介したい。 地形図、住宅地図、路線図もどれも実物とは違うが、目的にかなうという意味で正しい。 何のために地図を持とうとしているのか、どのような世界観のもとにモデルを作ろうとし ているかが問題となる。

もう一つ、模型とおもちゃの違いをどのように意識するか。我々は、Modelをつくっているのであって、Toyを作っているつもりはない。「飛べ!フェニックス号」という映画がある。砂漠で遭難した飛行機の乗客一行が、飛行機のデザイナーというドイツ人に大破した飛行機の再生を託すが、彼は模型飛行機のデザイナーだった。皆がおもちゃの飛行機かと詰め寄ってくるが、このデザイナーは、「原理は同じだ。ドイツ人はライト兄弟よりも先に早く模型飛行機を飛ばしたのだ」と言って、ついにその飛行機を飛ばして皆を救ってしまうという話である。ここに Model と Toy の本質的な違いが示唆されている。対象についての知識と洞察がなければ、Model は Toy にしかならない。

本報告の最後に、私のところで開発しているグローバルモデルの 5 Sisters (MARIA、THERESIA、ELSA、GISELA、SOFIA) を紹介する。GISELA が食糧と土地利用のモデルを担当し、この食料、土地利用のポテンシャルデータを MARIA に渡し市場を分析する。SOFIA は、石油のオイルピークなど資源の短期的なマーケットを担当する。このように将来の問題に対して文脈の異なる複数のモデルで組み合わせのシミュレーションを行っている。

# ボトムアップモデル

東京理科大学理工学部経営工学科

独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター 豊かな持続性社会構築のためのエネルギーモデルチーム

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

2011年10月21日 研究開発戦略センター

#### ボトムアップモデル 対 トップダウンモデル モデルの計算フロー概要 経済活動 トップダウンモデル 労働需要 原材料需要 … エネルギー需要 電力需要 非電力需要 火力発電 非火力発電 固体燃料 流体燃料 石炭火力 石油火力 ガス火力 原子力 ・・・

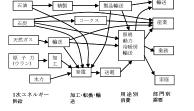
定式化の流れ (シミュレーション型モデルでは逐次的計算。CGEでは同時決定)

- 下位要素の相対価格が与えられる
- ・ 下位要素の相対価格から、要素間の相対投入シェアが決まる
- 下位要素の平均価格として、上位要素の合成財価格が決まる
- ト位要素の需要が決まる
- 下位要素の投入シェアと合わせ、下位要素の需要量が決まる
- (+) 経済構造の変化と影響を詳細に扱える
- (-) 設備投入計画、将来的資源制約など技術の動学的な選択には限界

#### ボトムアップモデル 対 トップダウンモデル モデルの計算フロー概要

ボトムアップモデル

歴史は古い。石油精製プ ラント、輸送スケジュールなど、業務の費用最小化 計画は、線形計画法の歴



定式化の流れ (最適化法による費用最小化モデルがよく用いられる)

- 最終的な部門別需要や各種投入要素の価格を設定する
- 一次エネルギーを加工・転換・輸送し、二次エネルギーとして最終需要へ供給するフロ 一を制約式で表す
- 一次エネルギー供給制約、変換関係式などの制約式の下で、最終需要を満たす費用 総額を最小化する
- (+) 技術選択、投資計画など静学的モデルから通時的モデルまで扱える
- (+) 原材料や制約式のシャドープライスを計算できる (+) 転換・輸送ロス、副産物、環境制約などの表現が容易
- 厳しい制約によって経済構造そのものが変化する場合の評価には限界あり

#### ボトムアップエネルギー経済モデルのエポック

BESOM:ボトムアップ型エネルギー経済モデル

米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)で開発 されたBESOM (Brookhaven Energy System Optimisation Model))で開発(1974)

その後、動学的拡張によるDESOM(Dynamic Energy System Model)、米国を地域分割しガス輸送とエネルギー需給を扱うPIES (Project Independence Evaluation System) における MEFS (Midterm Energy Forecasting System), EIA(エネルギー情報局)のIFFS (Intermediate Future Forecasting System) を経て、National Energy Modeling System (NEMS)に至る

MARKAL: 汎用性と柔軟性で広く用いられるボトムアップ型モデルの代表的存在

- IEAによってBNLおよびドイツ Kernforschunsanlage (KFA)によって拡張され、モデル開発に際しての汎用性と柔軟性を実現。各国の研究機関 に広く用いられるとともに多くの拡張を受け、今日に至る。現在も利用例は多い。

	解析手法	特徵
MARKAL	線形計画 モデル	標準モデル. 需要は外生的
MARKAL-MACRO	非線形計画モデル	マクロ経済モデルを導入. エネルギー需要は内生化
MARKAL-MICRO	非線形計画モデル	ミクロ経済モデルを導入. エネルギー需要は内生化 価格変化に敏感.
MARKAL-ED	線形計画 モデル	MARKAL-MACROと類似. 需 要関数の段階的な設定が可能 ・
MARKAL with multiple regions	非線形計画モデル	多地域間のエネルギー融通, 排出量取引を設定可能.
MARKAL with material flows	非線形計画 モデル	エネルギーフロー解析および マテリアルフロー、リサイク ルを解析可能.
MARKAL with uncertainties	確率的 計画法	確率的計算法を用いて解析 標準モデルを使用

#### ボトムアップエネルギー経済モデルの拡張

- 地球温暖化統合評価に、エネルギー経済モデルは拡張されたり新たに開発されるなど、政策評価ツールとして次第に広く利用されるようになっている。
- ボトムアップモデルとトップダウンモデルのシステム統合が進む。両者の差は減少し つつある。
- 計算機パワーの増大、ソフトウェアの充実(GAMSなど)、データベースの開発と利便 度の向上(Energy Balance Tables, GTAP, UN Statistics. 無料公開されているものも多い

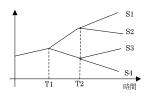
#### 逓減型限界費用の導入 - 非凸問題(ERISモデル他)

- 量産効果、学習効果による導入限界費用の逓減の最適化問題への導入→非凸問題の ため混合整数計画法が必要。
- Baretto らによるERIS(Energy Research and Investment Strategies) モデルでは、累積生産量+累積R&D投資額を含む2要素学習効果関数を導入。
- 時点t、技術 te の新規投資費用SCが累積生産量C、知識ストックKCにより以下と定式化

$$SC_{te,t} = a * C_{te,t}^{-b} * KS_{te,t}^{-c}$$

- 経験則として、累積導入量2倍→導入費用80%への低減を適用。どこまで延長可能か?原子力発電は価格が下げ止まっている。
  - ある時点から急速な拡大を示す傾向。補助金の効果を過大評価の危険性?

#### 将来の不確実性を反映する多段意思決定の導入 - GLOBAL 2100他



- 将来にS1、S2、S3、S4の4通りの可能性がある。
- 将来が完全予見可能なら、初期時点t=0で最適な計画を立てられる。
- 将来S1-S4のいずれとなるか不明な場合、一度だけの選択問題となる。期待値を最適化する期待効用最適化、マキシミニ基準(最悪状態での最善策)、ミニマクス 基準(最大後悔値最小化)などが古くから知られている。
- 将来の不確実性に対し、状況を見てT1、T2で計画を変更できるなら、より柔軟な
- S1ーS4 のいずれが出ても対応できるよう、T1まではすべて同じ戦略、T2までは (S1、S2)と(S3、S4)で同一戦略、というが付加される



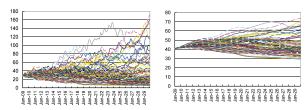
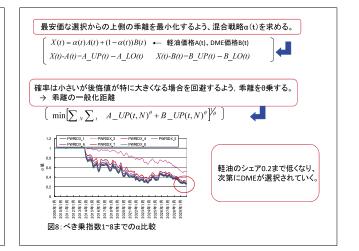


Figure 1 Future kerosine price profile in ¥/ktoe Figure 2 Future DME price profile in ¥/ktoe

- ・ディーゼル車に対する軽油とDMEの最適供給戦略: 期待値は石油起源が低いが、高値にふれる不確実性がある。石炭起源のDMEは高いが変動は小さい。
- ・期待値を基準とする限り、軽油が選択される。
- ・最大後悔値最小化法を適用するとシミュレーション時の最悪値のみで行動が決まる。そもそも対数正規分布には最大値が存在しない。
- ・分布の理論値は計算できない



研究例-2: THERESIA - 世界動学的多地域・多部門モデルの開発 THERESIA Model - Toward Holistic Economy, Resource and Energy Structure for Integrated Assessment

- GTAP(Ver5) とIEA=エネルギーバランス表がベース。
   世界15地域、12非エネルギー産業部門、7エネルギー産業 部門から構成される
- RITE=PHOENIXプロジェクトのDEARSモデル(本間、森他 2005、2006、2007)とルーツを等しくするが、別方向に発展した多地域・多部門・動学モデル。DEARSは技術を詳細化したが地域ごとに1マクロ生産関数しか持たない構成。
- 多地域・多部門・動学的モデルにボトムアップエネルギーフローを組み込んだ通時的最適化モデル
- 設備投資、貿易、エネルギー資源制約、相対価格などを部門別に扱える→計算量が大きいため、詳細化には限界



# 

シナリオ1(BAUケース)

#### Scenario-1 (BAU)

- 中国エネルギー価格の推移
- Market energy prices in CHN
   電力と流体燃料の価格が高水準で
- 推移
   Prices of petroleum products (liquid fuels) and electricity will go
- up.
- 中国 部門別生産量の推移 Sectoral production in CHN
- 対公共サービス需要の増加が続く。 これは一人当たりサービス需要下限 制約のため。
- Social service industry will keep high growth rate, because of lower bound of per-capita service demand.

#### モデル構築上の課題

- ・エネルギー経済モデルでは、システムダイナミクスシミュレーション型のモデルが退いた観 → 定量分析には、ある程度フォーマル化された定式化によるモデルが分かりやすい。
- ・しかし意思決定者が合理的行動をとらないとすると、エネルギー経済モデルで何が言えるか?不合理な行動の再現を追及するべきか?
- ・意思決定者(国、ステークホルダー)が複数存在して、相互認識する場合のモデリング(マルチエージェント、ゲーム理論のシミュレーション)。単一かつ大域的 最適解があるとは限らない。簡単な問題でも解の経路依存性が現れる。
- (例) 10需要家がCGSを導入して費用削減を目指す。協力し合いエネルギー を融通しあう需要家が増えるほど節約費用総額は増える。しかし一人当たりの 節減額は、参加者が増えると逆に減ることもある。では、10需要家はどのよう なグループを作るのか?
- ・エネルギー経済モデルを最適化モデルで構築する際、基本は「効率的な政策を見出す」にある。東日本大震災の後は「費用効率的、エネルギー効率的」 に加え、高頑健性への要求が望まれるが、どのように表現するべきか?

#### モデル利用上の課題

- ・ モデルがツールとして利用されるためには、開発者も利用者もモデルの意 義と限界について共通の理解をしておく必要がある。欧米のモデルコミュニティ には、産・官・学の参加がみられる。
- プログラムやデータはどこまで公開されるべきか?
- ・ DICE、EnerPLanなどはプログラムコードが公開されている。GTAPも古いバージョンは無料利用可能。
- ・しかしエネルギー経済データ(特にエネルギーデータ)の詳細には著作権の 問題が残る
- 利用者が関心のある話題に、エネルギー経済モデル開発者はどこまで応えられるのか?応えようとしているのか?

#### →例

- SmartGrid、地域分散エネルギーはエネルギー需要構造をどう変えるか?
- 高齢化・少子化はエネルギー需要構造に何をもたらすのか?
- 情報化の進展(情報化投資の増大と技術の進歩)はどれだけの需要構造の 変化をもたらすか?産業構造の変化も予想される。

モデル評価の問題-不確実性と長期予測の意義

#### モデル開発と予測の目的は、<u>必ずしも</u>未来の正確な 的中ではない。

- 「自転車に乗っていると、前に川があった。このまままっすぐ進むと川に落ちると予測した。 そこでハンドルを右に切ったので、落ちずにすんだ。」→予測の正しさとは、川に落ちることか?
- 将棋で「手を読む」のは相手の次の一手を当てるためではない。「相手のどの手に対しても、自分が有利を築ける、あるいは不利にならない手を捜す」ためである。

#### モデル評価のいくつかの問題-長期予測の意義(2)

- 泥棒がいつ家に入るかを「科学的に」予測可能か?
  - →「泥棒に入られる可能性」を想定して防犯対策 をとる
  - →「泥棒に入られる」ことを的中させる必要はない。 どこまでを想定するか (泥棒がミサイルを撃ち込 むかまで考えるかなど)」が本質。
- 未来は複数存在する。現段階でどのような行動を 取るかが意思決定のための長期予測の意義。

#### 座右の箴言

- ●「実物大の地図は役に立たない」
- 地形図、住宅地図、鉄道路線図などいずれも実物と違うという意味で「正確でない」が、「目的に適う」意味で「正しい」
- 何のための地図を持とうとしているのか?
- どのような世界観のもとにモデルを作ろうとしているのか?
- 模型(Model)と玩具(Toy)との違い

#### 「飛べ!フェニックス号」(1966年)

砂漠で遭難した飛行機の乗客一行は、飛行機のデザイナーという ドイツ人に大破した飛行機の再生を託す。しかし彼は模型飛行機 のデザイナーだった。おもちゃの飛行機か、と詰め寄る一行に

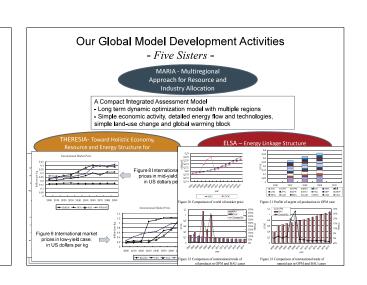
ドーフマン「模型も飛ぶ原理は同じだ。ドイツ人はライト兄弟よりも早く模型飛行機を飛ばしたのだ」

→ 模型は対象についての知識と洞察を必要とする

#### 不確実下の意思決定の方法論

- 危険性のレベル、確率等が知られている場合、既存の意思決定分析が適用できる。
- 知識に対する不確実性がある場合、意思決 定の枠組みでは不十分であり、専門的な判断が 中心となる。
- 第3に、単に我々が「知らない」場合がある。 これは「専門家の判断」ではなく「交渉」の問 題となる。

IPCC Guideline Paper, 2000



### 4. 第3セッション:経済モデル

# 4.1. 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 松橋隆治(東京大学/JST 低炭素社会戦略センター)

私の所属は、東京大学院工学系研究科と JST の低炭素社会戦略センターで、JST の低炭素センターは豊かな低炭素社会をつくるために何をすべきか見出すことをミッションとしている。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大事。今回の分析において重要視したのは、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というスタンスでいる。ここに、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ということが関わってくる。私自身は、この法案がそのままの形でもう一度国会に出てくることはないのではないかと考えているが、固定価格買取制度だけは、菅前総理の執念によって成立したので、その長所、欠点を考慮しながら、これをモデルの中で評価している。

原発に関しては、エネルギー・環境会議の中間整理に、「より安全性を高めて活用しながら、原子力への依存度を下げていく」という文言が入っているが、ここでは、とりあえず公平に客観的にシナリオの中で扱い、意思決定に活かしていくことが大事だと考えている。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を何とか表現したいと思っている。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。

地球温暖化対策税は、石油・石炭税の増税という形でこの秋から導入されることになっているが、キャップ&トレードの排出量取引は当面慎重に検討という文言でもって事実上 凍結された。政府として二国間クレジットと国内クレジットを支援していくというような 文言が盛り込まれた。このあたりを注目している。

私が行ったモデル分析では、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。また、エンドユース側では、省エネ機器が入ったりする影響を最終需要モデルという形で別途計算して、家計の消費に入れるという形をとっている。まだ結合にはいろいろ問題が残っているが、不完全ながらそういう結合を行っている。

一般均衡モデルでは、家計は効用の最大化、企業はコスト最小と収益の最大化という行動をとる中で、すべての財、生産要素が均衡する点を計算する。2005年の経済データを集めて、2005年で初期均衡をとって、それ以降の計算をしている。ここで、家計の消費財が19あり、特に省エネ技術が導入された場合の流れとして、例えば省エネ家電を購入することで電気代が減少して耐久財の購入が拡大したり、ハイブリッド車を購入するとガソリン代が減少して、そのかわり自動車等購入費が増加したり、省エネを進めると家計の消費の中にプラスマイナスが起きる。そういうものが今度は39部門の産業連関のデータを入れてある産業部門に波及する。それ以外にも、所得を年収200万以下の非常に所得の低い階層から1,500万円以上の年収の多い階層まで18階層に分けている。

今回、震災以降の計算ということで、4ケースを取り上げた。ケース1として温室効果

ガスを削減しない基準ケース、ケース 2 として福島第一の 6 基は停止するが他の原子力については 2030 年まで 14 基つくり、太陽光発電は、政府の公式目標である 2020 年までに 2,800 万 kW としたケース。ケース 3 の原発現状維持ケースは、福島第一の 6 基は停止して、その他の原子力については耐用年数 40 年を過ぎたものは順次廃炉するものの、廃炉した分だけ新規に建設できるという制約を設けて、現状規模を維持する場合。ケース 4 の原発縮小ケースは、福島第一・第二原発が稼働せず、さらにその他の既設の原発も運転開始から 40 年たった時点で廃炉として、新規建設はしないというケース。 2030 年も 2020 年と同様に計算したが、違うのは、太陽光は 2030 年は 5,300 万 kW ということで、現状の約 20 倍弱の値となっている。最終需要の省エネには非常に注目をしており、次世代省エネ住宅、トップランナー制度、石油化学工業を除く産業部門の石油製品の天然ガス転換、モーダルシフトの推進、産業界の省エネ原単位年 1%逓減、地球温暖化対策税を盛り込んでいる。

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も協力して改造したものを使っている。その結果、原子力縮小ケース、維持ケース、拡大ケースの電源構成が出てきます。そのとき、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般均衡とデータをやりとりして、収束をさせている。

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、コストについては低炭素センター内部で作成したものを入れている。それから、次世代省エネ基準住宅の普及に合わせて断熱性能がどう変わるかを想定し、これをエンドユースに入れている。エアコン、テレビ、冷蔵庫、自動車の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、そこで研究開発を評価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。

 $CO_2$  排出のシミュレーション結果として、最終需要の省エネの有無のそれぞれで、原発拡大ケース、維持ケース、縮小ケースにおける 1990 年比のエネルギー起源  $CO_2$  削減率を紹介すると、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とことがわかる。やはり 25%削減は非常に難しいと感じている。

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。豊かな低炭素社会をつくるというのが低炭素センターのミッションだが、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。

震災を受けてエネルギー政策と低炭素化政策そのものを抜本的に見直す必要があるし、 定量的には25%削減はとても無理と思われるが、長期的なエネルギー安定供給、低炭素 化というのは粛々と進めていく必要があり、その方向性で今後もモデルの改良を重ねてい こうと思っている。

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のもとで出発している。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が、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。

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

#### 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

東京大学大学院工学系研究科 科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター 松橋 隆治

#### 東日本大震災と福島第一原発の事故の影響

2011年3月11日、東日本大震災が起こり、日本の東北地方を中心とした地域が壊滅的な被害を被った。しかも、この地震と津波により、東京電力株式会社の福島第一原発の電源が非常用を含め、一時ストップし、危機的な状況に陥った。状況はまだ予断を許さず、一刻も早い収束と復興を祈るばかりである。日本の原子力発電史上でも最大の事故であり、今後のエネルギー政策および地球温暖化対策にも影響を及ぼすことは必至である。

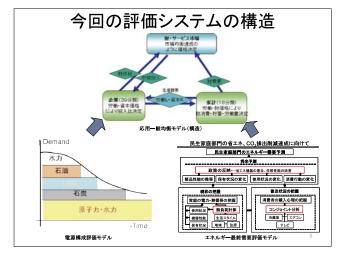
#### 地球温暖化対策基本法案要綱

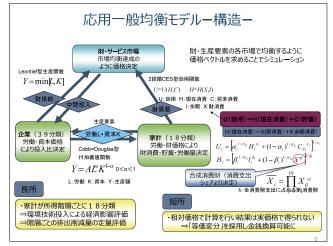
- 1. GHGの中長期的な削減目標 2020年→1990年比で25%超削減 2050年→1990年比で80%超削減
- 2. 地球温暖化対策税を2011年度実施に向け成案を得るよう検討 排出量取引制度を創設
- 3. 再生可能エネルギー比率 エネルギーの年間消費量に占める比率を2020年までに10%超程度
- 4. 固定価格買取制度 再生可能エネルギーからの電気の全量を一定期間、固定価格で電気 事業者が買い取る制度を創設

実際には、現在に至るまで二度の国会を経ても法案は継続審議中であり、成立するか否かは不確実である。更に、東日本大震災と原発事故により、エネルギー政策と低炭素化施策の具体素が大幅な見直しを迫られており、政府与党内部でも、法案の見直しを進めているところである。但し、4の再生可能エネルギーからの電気の全量固定価格買取制度は、今国会で成立した。なお、管前内閣は、エネルギー環境会議の中間整理の結果として、原子力発電に関して、「より安全性を高めて活用しながら、原子力への依存度を下げていく」としている。

地球温暖化対策に関する閣僚委員会 地球温暖化対策の主要3施策について(2011.12.28)

- ① 全ての主要国が参加する公平かつ実効性ある枠組みの構築及び意欲的な目標の合意を前提にして、2020年におけるGHG25%削減(90年比)。
- ② 国内的には、エネルギー基本計画を基に2030年にエネルギー起源のCO2 を30%程度もしくはそれ以上削減(90年比)。
- ③ 国内外の状況変化に応じた柔軟かつ戦略的な政策の再構築と環境・エネルギー技術の強化、グリーンイノベーションの加速。
- ④ 平成23年度より地球温暖化対策税を導入する。これは、石油・石炭税に CO2排出量に応じた税率を上乗せするもので、(最終的には)現行の石油 石炭税収を約1.5倍(約2400億円増税)する。
  - 5 再生可能エネルギーによる発電電力量は、全量買い取り(買い取りコストは電気料金に上乗せ)を実施すべく、今通常国会に関係法案を提出する。
  - 6 キャップ&トレードによる排出量取引に関しては当面慎重に検討する。
- ⑦ 政府は産業、農家、生活者、地域などの主体と連携しつつ、二国間クレジットや国内クレジットなどを通じて地球温暖化対策の取り組みを支援する。
- ⑧ 森林吸収源対策を含めた諸施策を推進すべく、財源を確保する。







#### 本分析で採用した2020年のケース設定

ケース1 GHG無削減ケース(基準ケース) 温室効果ガスの削減を全く行わない基準ケースである。 GDPの2005年から2020年まで年率1.3%成長を仮定。

GDP成長率はケース1と同じ。太陽光発電は2800万kW

福島第一原発の6基は停止するが、その他の原子力の新規建設は予定通りで、 既設原子力の稼働率は85%とする。

原発現状維持ケ

GDP成長率はケース1と同じ。太陽光発電は2800万kW 福島第一原発の6基は停止し、その他の原子力の新規建設は行わないが、既 設原子力は現状の規模を維持するものとし、その稼働率は85%とする。

7-44 原光網パソーへ GDP成長率はケース1と同じ。太陽光発電は2800万kW 2020年において、福島第一、第二原発は稼働せず、その他の既設の原発も運 転開始から40年たった時点で廃炉とする。更に原子力発電のこれ以降の新規 建設が不可能になったと想定する。これによる電力供給不足分は主に火力発 電の増加で対応。

#### 本分析で採用した2030年のケース設定

#### ケース1 GHG無削減ケース(基準ケース)

温室効果ガスの削減を全く行わない基準ケースである。 GDPは2005年から2020年まで1.3%/年、2020年から2030年までは0.5%/年 を仮定。

#### **ケース2 原発拡大ケース**

GDP成長率はケース1と同じ。太陽光発電は5300万kW

福島第一原発の6基は停止するが、その他の原子力の新規建設は予定通りで、 既設原子力の稼働率は85%とする。

原発現状維持ケ

GDP成長率はケース1と同じ。太陽光発電は5300万kW

福島第一原発の6基は停止し、その他の原子力の新規建設は行わないが、既 設原子力は現状の規模を維持するものとし、その稼働率は85%とする。 4 原発縮小ケー

GDP成長率はケース1と同じ。太陽光発電は5300万kW

2030年において、福島第一、第二原発は稼働せず、その他の既設の原発も運 転開始から40年たった時点で廃炉とする。更に原子力発電のこれ以降の新規 建設が不可能になったと想定する。これによる電力供給不足分は主に火力発 雷の増加で対応。

#### 応用一般均衡モデルに盛り込まれた 各ケースに共通の対策

- ① 次世代省エネ住宅(H11年基準)はストックの約22%(2020 年), 約48%(2030年)
- ② 次世代自動車はストックの4割(2020年), 5割(2030年)
- ③ 家電製品、自動車のトップランナー制度を継続
- ④ 石油化学工業を除く産業部門において2005年の 重油等石 油製品燃料利用の80%が天然ガスに転換
- ⑤ モーダルシフト推進:物流の産業連関分析をもとに輸送部 門のCO2排出量を最大44%削減
- ⑥ 省エネ法の努力目標に基づき、1年当たり1%の各産業部門 のエネルギー原単位改善を実現
- ⑦ 今秋からの導入が決定している地球温暖化対策税を、2020 年に1000円/t-CO2, 2030年に2000円/t-CO2とする。

# 最適雷源計画モデルの概要

- 多地域最適電源計画モデルをもとに構築
- 全国を電力会社別に10地域に分け、各地域を連 系線で結んで送電ネットワークを表現
- 約11万の変数に対して,約29万の制約条件を課す
- 2010年から2030年を解析期間とし、期間中の総発 電コストを最小化するよう線型計画法を用いて解く

$$CST(y) = \sum_{r,g} (c_{fix}(g)C(r,g,y)) + c_{var}(g)O(r,g,y))$$

#### 原子力縮小ケースの電源構成 発雷雷力量の推移 発雷雷力量の推移 8.0E+05 8.0E+05 6.0E+05 € 6.0E+05 5.0E+05 能 4.0E+05 家 5.0E+05 智 4.0E+05 報 3.0E+05 1.0E+05 1.0E+05 2015 2020 2025 2015 2020 2025

CRDS-FY2011-WR-11

9.0E+05 8.0E+05

7.0E+05

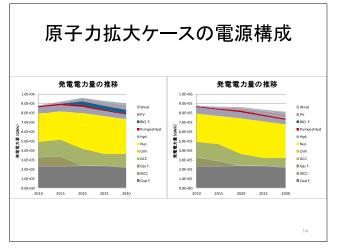
5.0E+05 解 4.0E+05 報

3.0F+05

2.0E+05

0.0E+0C

#### 原子力維持ケースの電源構成 発電電力量の推移 発電電力量の推移 8.0E+05 ■ PV ■ BIO. F ■ Pump ■ Hyd. ■ Nuc. 6.0E+05 ■ Hyd ■ Nuc 5.0E+05 ■ Oil F. ■ GCC 3.0E+05 2.0E+05 III Coal F 0.0E+0



# 最終エネルギー需要モデルの概要

- 18階層の各所得毎に家計等消費構造統計などのデータに基づき、各階層の家計 の標準となる電気、ガス、灯油、ガソリンなどのエネルギー需要を設定する。
- 住宅の断熱性能の2020年、2030年時点での普及率を設定し、これに基づき、各 階層毎の家庭の冷暖房需要を評価できるモデル構造とする。
- 太陽光発電、エコキュート、燃料電池等新技術の2020年、2030年時点での普及率 を設定し、これに基づき、各階層毎の家庭の冷暖房、温水、電気、ガス、灯油需要 を評価できるモデル構造とする。
- 家電製品の中で、消費電力の大きいエアコン、テレビ、冷蔵庫について、トップラ ンナー制度の継続による2020年、2030年時点での性能を推定し、これに基づく各 階層毎の家庭の電力需要を評価できるモデル構造とする。 自動車のトップランナー制度の継続と次世代自動車の普及による2020年、2030年
- 時点での性能を推定し、これに基づき、各階層毎の家庭のガソリン需要を評価で きるモデル構造とする。
- 上記の全ての最終需要製品の普及を総合して、2020年、2030年時点での各階層
- 毎の家庭の冷暖房需要、温水需要を評価し、電気、ガス、灯油需要を設定する。 なお、ここで設定された最終エネルギー需要は、標準状態での値であり、一般均 衡モデルの収束により、所得の初期均衡からの変化に伴い、増減が起こりうる点 に注意を要する。

#### 太陽電池のコストシナリオ

(円/w)

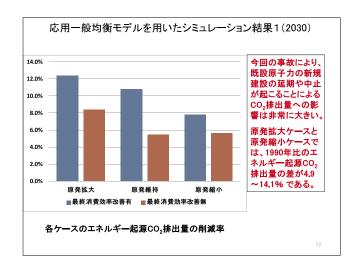
	2011年	2015年	2020年	2030年
工場プラントサイズ	1GW/年	1GW/年	5GW/年	1GW/年
モジュール	150	120	100	50
BOS	200	150	100	70
システム全体	350	270	200	120

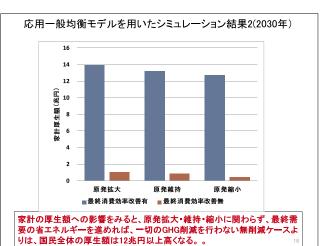
※現状の工場プラント辺りの生産量は1GW/年に到達しており、 工場規模の拡大によるスケールメリットの影響は少ない 今後のコスト削減は技術開発によるものが大きい。 ※各コスト低減の詳細については今後分析を進めていく。

#### (参考:設備導入量の想定シナリオ)

	2011年	2015年	2020年	2030年
累積導入量	4GW		28GW	53GW

低炭素社会戦略センター 山田興一 資料より





#### 東日本大震災以降の低炭素化政策について 一原子力発電の影響を考慮して一

- (1) 原子力発電の拡大/維持/縮小などが2020年及び2030年のCO<sub>2</sub>排出量に与える影響は非常に大きい。特に、原子力拡大ケースと化石燃料に依存する原子力縮小ケースでは、1990年比のエネルギー起源のCO<sub>2</sub>削減率に2.6~8.0%(2020年)、4.9~14.1%(2030年)の差が出た。
- (2) エネルギー政策と低炭素化政策が家計の効用に与える影響を評価した。 その結果、家計の効用を向上させる効果が高いのは、家電製品などエ ネルギーの最終需要関連製品の効率向上であり、こうした省エネ・創エ ネ製品の普及を加速するような施策を講じることが重要であることを示 した。この点は、原子力発電の進展に関わりなく成り立つ。
- (3) 東日本大震災及び福島第一原発の事故により、原子力を含むエネル ギー政策と低炭素化政策の見直しは必至である。しかし、エネルギーの 安定供給と低炭素化を目指す長期的な方向性はかわらないであろう。

豊かな持続性社会構築のためのエネルギーモデル ワークショップの主旨を考慮して

- (1) 本ワークショップでは、応用一般均衡モデルと電源構成モデルなどを組み合わせた分析に関する講演をおこなった。
- (2) 今回の分析の本質は、東日本大震災後のエネルギー政策、特に原子 力や省エネルギーの可能性をどう評価し、シナリオに取り入れていくか にあった。
- (3) すなわち、重要なことは現在の状況をどのように把握して、モデルにどのようなシナリオを導入するかにある。モデルそのものにより、本質的に重要な結果が得られるわけではない。
- (4) 他方モデルそのものにも重大な問題点はある。それは、一般均衡の概念に関する問題点から限定合理性に関するものまで数多くある。これらはモデルというよりは、経済学そのものにおける問題点である。
- (5) これらより、エネルギーモデル分析をおこなう際には、エネルギーシステムそのものに関する問題意識、あるいはモデルの理論的前提となっている経済学等の学問に関する考察が重要である。

20

#### 4.2. エネルギー・環境経済モデルで重要となる視点

伴金美(大阪大学)

私の専門である経済学から見た、エネルギー・環境経済モデルで重要となる視点の一つは技術選択で、これはボトムアップとトップダウンという 2 つの流れをいかにハイブリッド化するかが重要。技術進歩に関しても、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、ここで重要なのはプライス。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。相補問題として扱うのは、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だろうということ。特に、 $CO_2$  制約で二酸化炭素に価格がつく問題を扱うには、これを避けて通れない。三つ目は、貯蓄・投資を通し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、これが経済成長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。さらに、Sustainabilityを考慮して動学的な最適化問題を解こうとすれば、非常に強い制約をかけないとモデルが解けない。そこのところを無視して分析するととんでもない結果になる。

伝統的なボトムアップ型の技術モデルでは、経済構造、エネルギー価格、資源量といったものを入力として与え、出力としてエネルギー価格や供給量が出てくる。一方、トップダウン型の経済モデルでは、エネルギー価格や供給、あるいは排出制約、排出価格が入力になり、出力として経済の値が出てくる。これをフィードバックしてボトムアップ型に戻せば良いのだが、実はほとんどなされていない。ボトムアップで計算したものをトップダウンの入力に投げ込んで、そのまま計算している。例えばエネルギー基本計画を見ても、粗鋼生産はどのケースでも2030年で1億トンを下回らない。経済は大きく変わるはずなのに、粗鋼生産量が全く変わらないという形になっている。経済活動だけでなく、価格体系と貯蓄投資を経済モデルからフィードバックさせるべきである。

トップダウン型では、個々の技術に無頓着にエネルギーと資本をシームレスな関数形で表してしまう。それに対して、ボトムアップ型技術選択というのは、個々の技術が固有名詞を持っている。結局、トップダウンの滑らかな線は、ボトムアップの細かい技術が組み合わさった包絡線のようになっており、やはりもっとボトムアップ型の技術選択というのを入れていく必要がある。

私の使っているモデルは最適化モデルで、いわゆる Ramsey 型最適成長モデルというのがベースになっている。これはマクロだが、実は生産関数のところが技術、産業や財によって非常に細かく変わってくる形になっている。ここで生産されたものから食べ、残ったものが貯蓄され、それが投資されて資本となるが、もし今たくさん食べてしまえば、資本が少なくなり、次の期の生産が落ちる。逆に、今食べずに貯蓄に回してそれが資本に向かえば、次の期の所得を増やして、生活を豊かにすることができる。今、経済学の大学院のマクロ経済学でやっているのは、この問題を解くことにほとんど集中する形になっている。その上で、いろいろな技術、需要やマネタリーショックを入れたときに経済がどうなるかを分析しているのが、最近の傾向だと思います。

動学的なモデル構成は、ゼロ利潤条件、需給均衡条件、所得定義式の三つの方程式群の

体系から作られています。

二時点間の動学モデルでは、今日の消費と明日の消費を、資本収益率、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。例えば、資本収益率が上がれば、今 の貯蓄を減らして投資に回して次の期に消費をするというような行動が出てくるし、その 逆も出てくる。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 点間の消費の変化の大きさを表す。三つのパラメータのうち、割引率は外生的に与え、資 本収益率は内生的に決まる。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。

2005年の社会会計表によれば、付加価値と付加価値を使った最終需要は506兆円となるが、これが2005年でのGDPの大きさとなる。このとき90兆円の貯蓄があり、この90兆円に見合う投資が行われている。これは2005年のスナップショットだが、この2005年のスナップショットの90兆円というのが次の期の投資に加わり、それが日本経済の成長戦略を大きく握っている。

エネルギー部門が今日本を右往左往させていますが、実際には付加価値で見れば 2.8% ぐらいの比率しかない。ついでに言えば、TPP で問題になっている農業は 1.4%の比率でしかない。ただし、小さいから意味がないということではなくて、逆にこういう小さいところが日本経済を右往左往させているというのが現実であろう。これを入れ子型の関数を使いながらモデル化し、先ほどのような形で動学的な最適条件を入れながら相補問題として解いている。

それを使って 2020 年の  $CO_2$  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 2,000 円ぐらいになる。このときに、消費が減って、投資が増えて、GDP が増えていくというシナリオが出てくる。ただ、エネルギーの価格は 2.4 倍ぐらいに随分高くなる。消費者物価は 20%ぐらい上がる。ここで言いたいのは、 $CO_2$  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って、一つが異時点間の代替の弾力性。これが 0.5 とか 1 とか大きい数字の場合は、GDP にマイナスになるのですが、小さく場合はプラスになる。ブレイクポイントは 0.15。筑波大学の大久保正勝教授の最近の研究によれば、0.2 から 0.4 ぐらいという数字が出ている。私はもう少し低いのではないかと思っているが、そういう形で人々の将来に対する考え方というのが響いてくる。二つ目は、消費者が低炭素志向を強める場合。そういう方向に少し行ったら、やはり消費が減って、投資が増えるようなパスが描かれる。このようにプラスになることもあればマイナスになることもある。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、そのようなモデルではどのようなことが考慮されているかを理解して欲しいために説明している。

参考資料として、原発再稼働が遅れるケースを計算した結果を紹介する。財として 40、産業部門は 39、それから太陽光発電と風力発電がアクティビティレベルで別に存在し、固定係数型で考慮している。結局火力発電で代替することになるが、 $CO_2$  排出も増えるし、化石燃料の輸入が増えて 0.5%から 0.7%ぐらい GDP が下がる。太陽光とか風力は、全量買取制度や、先ほどの R&D も入れてあるが、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。

今夏は電力料金が上がらなかったが、モデルで計算すると多分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。これが実際の電力料金には反映されていないが、結局、企業は自家発電をしたり、あるいは平準化するために土日操業して、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 年までで 25 兆 円ぐらい GDP が減る。これは地震とかの損失以外にさらに 25 兆円ぐらい経済で損失が起こるだろうということなっている。

もう一つは 2050 年まで計算していて、50 年までいくと原発を少なくしても何とかやってけるだろう。ただ、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 5,000 億 kWh ぐらい入るのであれば、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、それもせずに簡単に新エネをふやすというのは難しい。

結局、そういうエネルギーの問題で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。そういうようなシナリオの経済的影響を評価す るためにこういうモデルを使っている。

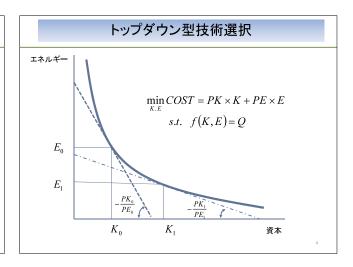
# エネルギー・環境経済モデルで 重要となる視点

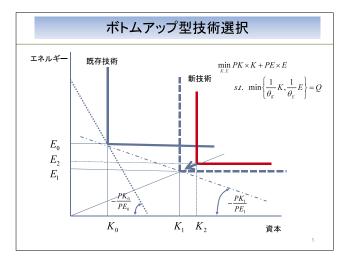
大阪大学 伴 金美 2011年10月21日 エネルギーモデルワークショップ 科学技術振興機構・研究開発戦略センター

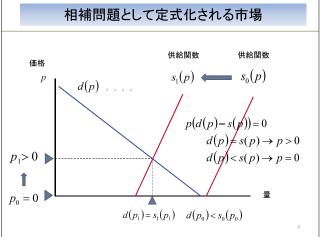
#### エネルギー・環境経済モデルで重要となる視点

- 1. 技術選択
  - ・ 技術情報に基づくボトムアップ型モデル
  - 価格と需要に依存するトップダウン型モデル
  - 両者のハイブリッド型モデル
  - 技術進歩モデル(LBD、R&D投資)
- 2. 市場モデル
  - 資源制約、技術制約、予算制約
  - ・ プライスメカニズム
  - 相補問題
- 3. 動学的資源配分
  - 貯蓄・投資を通した異時点間の資源配分
  - 持続可能性(Sustainability)の視点

# 伝統的なエネルギー・環境経済モデル ボトムアップ型技術モデル 入力 GDP、人口、世帯、エネルギー価格 活動量相鋼生産、貨物輸送量) 技術およびその価格 出力 エネルギー供給、エネルギー価格 トップダウン型経済モデル 入力 エネルギー供給、エネルギー価格 出力 GDP、消費、貯蓄・投資、輸出入 産業別生産量、雇用、価格





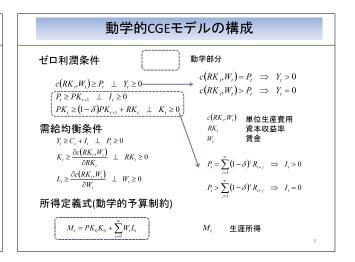


#### 動学的資源配分メカニズム

#### Ramsey型最適成長モデル

$$\max_{C_i} \sum_{t=0}^{\infty} \left( \frac{1}{1+\rho} \right)^t u(C_t) \qquad \qquad Y_t \quad \text{所得} \qquad C_t \quad \text{消費} \qquad I_t \\ Y_i = f(K_i, L_i) \qquad \qquad K_t \quad \text{資本} \qquad L_t \quad \text{労働} \\ I_i = Y_i - C_i \qquad \qquad \rho \qquad \text{割引率} \qquad \delta \quad \text{減耗率} \\ L_i = (1+n)^t L_0 \qquad \qquad n \qquad \text{労働增加率}$$

#### 動学的最適条件



#### 二時点間の動学的最適化CGEモデル

Intertemporal optimization (two periods)

$$\max_{C_1,C_2} u(C_1) + \frac{1}{1+\rho} u(C_2), \qquad s.t. \quad C_1 + \frac{1}{1+r} C_2 = Y_1 + \frac{1}{1+r} Y_2$$

$$\max_{C_1} u(C_1) + \frac{1}{1+\rho} u((1+r)(Y_1 - C_1) + Y_2)$$

$$\max_{C_1} u(C_2) + \frac{1}{1+\rho} u((1+r)(Y_1 - C_2) + Y_2)$$

$$\max_{C_1} u(C_1) + \frac{1}{1+\rho} u((1+r)(Y_1 - C_1) + Y_2)$$

Optimal condition (Euler equation)

利子率(資本収益率)

$$u'(C_1) - \frac{1+r}{1+\rho}u'(C_2) = 0$$

Constant intertemporal elasticity of substitution

$$u(C_t) = \frac{C_t^{1-\theta} - 1}{1-\theta} \implies C_1^{-\theta} - \frac{1+r}{1+\rho} C_2^{-\theta} = 0 \implies \frac{C_2}{C_1} = \left(\frac{1+r}{1+\rho}\right)^{\frac{1}{\theta}}$$

$$\frac{1}{\theta} = \sigma \quad \text{Intertemporal elasticity of substitution}$$

# $-u(C_2)$ 利子率(資本収益率)の上昇 $C_2$ 今期の消費を減らし、来期の消費を増やす 利子率(資本収益率)の低下 今期の消費を増やし、来期の消費を減らす 異時点間代替弾力性の低下 $(1+r)Y_1+Y_2$ 利子率(資本収益率)の変化に対する異時点 間の消費の変化を鈍くする。

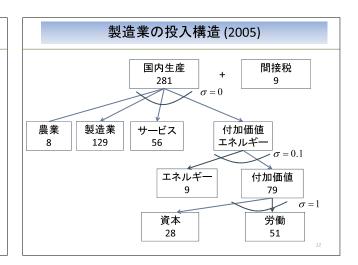
二時点間の動学的最適化CGEモデルの構成

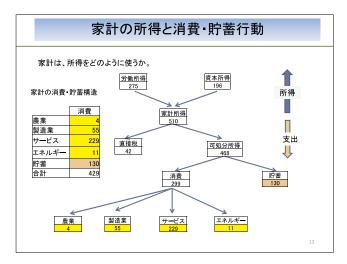
# 日本経済4部門社会会計表 (2005)

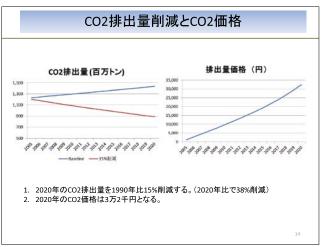
			生産	活動		4	上産要₹	長		最終	需要		
		農業	製造 業	サ <del>ー</del> ビ ス	エネル ギ <del>ー</del>	労働		間接 税	消費	投資	政府	外国	合計
	農業	2	8	1	0				4	0	0	0	1
生産	製造業	2	129	55	0				55	34	2	56	33:
土性	サービス	2	56	165	6				229	56	113	17	64
	エネルギー	0	9	15	15				11	0	0	1	5
付加	労働	1	51	220	3								27
価値	資本	5	28	158	5								19
叫吧	間接税	1	9	19	6								3
経済	家計					250	179						42
在/FI 主体	政府	0	3	0	1	25	17	35					8
土冲	外国	2	40	11	15								6
	貯蓄								130	-90	-34	-6	
	合計	15	333	644	51	275	196	35	429	0	81	68	

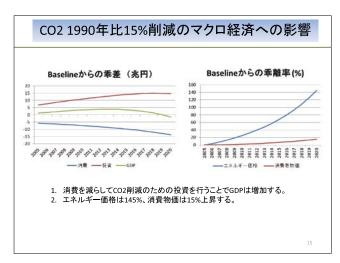
付加価値=最終需要(関税・輸入控除)=506 家計貯蓄(130)+政府貯蓄(-34)一貿易黒字(6) =貯蓄(90) =投資(90)

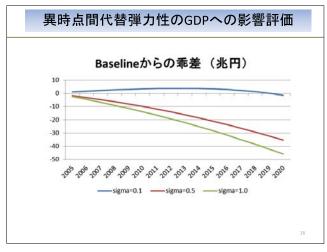
	単位 兆円
産業	付加価値ウェイト
農業	1.4
製造業	17.4
サービス	78.5
エネルギー	2.8

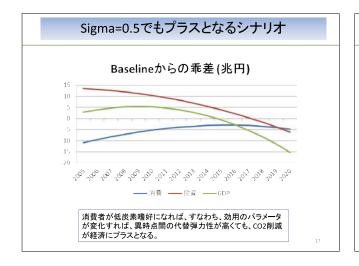












# まとめ 1. 低炭素化が経済に影響する要件として 2. 消費を減らしてまで削減投資するインセンティブが働くかどうかが重要。 3. そのためには、下記の二つを明示的に取り入れるForward Looking型最適成長型モデルが必要。重要なパラメータは異時点間の代替弾力性嗜好の変化(効用の変化) R&D投資の取り扱い 4. 異時点間の代替弾力性が小さければ、また、低炭素指向が高まれば、削減投資がペイすることで消費を減らしても投資が実施され、CO2削減が経済にブラスに影響する。 5. R&D投資は、CO2削減にともなうエネルギー価格の上昇で増加し、経済成長を高める効果がある。 6. 割引率はマイナスの影響を緩和するが、投資増加への効果は小さい。

# 参考資料 (1)

# 原子力発電再稼働遅れの影響 2010~2020

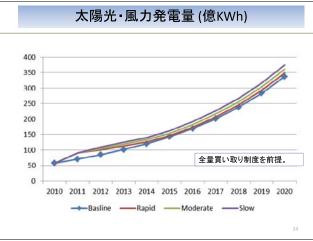
40財39部門動学CGEモデルによる分析

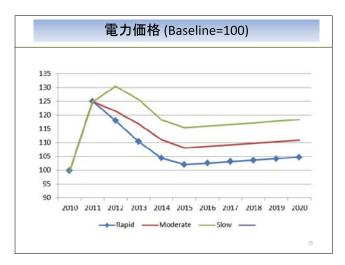


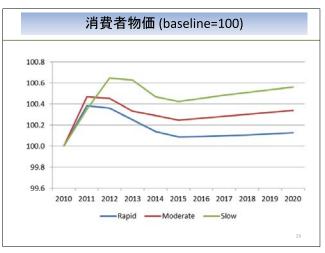














#### 分析のまとめ

□ 原子力発電の再稼働の遅れは、次のような影響を持つ

- ・ 大部分が火力発電で補われる。
- 燃料コスト増で、電気料金の引き上げが避けられない。
- 二酸化炭素排出量が大幅に増加する。
- 再稼働の遅れで、2011年から2020年までのGDP減少の 累積値は10兆円から25兆円に達する。

#### □ 太陽光·風力発電

- 全量買い取り制度導入にもかかわらず、原子力発電の 減少を補うことは難しい。
- ・ 二酸化炭素の減少は、300万トン程度にとどまる。
- ・ 太陽光・風力発電の増加で増える雇用は1万人程度。

20

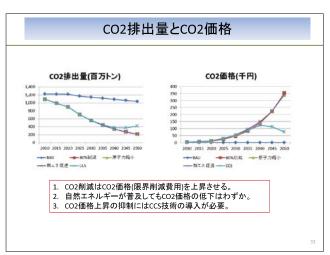
#### 参考資料 (2)

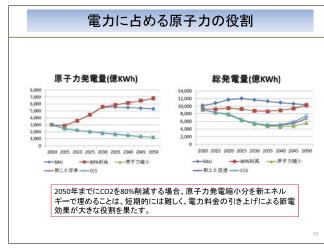
2050年CO2 80%削減と原子力縮 小は両立できるか 2010~2050 40財40部門動学CGEモデルによる分析

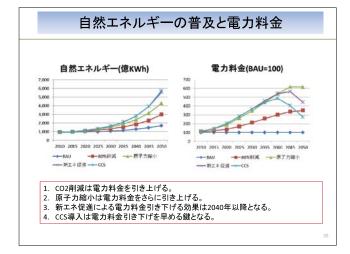


#### 比較シナリオ 原子力縮小 シナリオ 2050年80%削減 新エネ促進 ccs 2050年80%削減 0 原子力縮小 0 0 0 新エネ促進 0 0 ccs 0 0 0 0









#### 分析のまとめ

- 1. 2010年~2050年に、BAUシナリオでは、人口が減少することで就業者が2,100万人減少するものの、GDPは年率1.03%で成長し、CO2排出量は10億3千万トンに達する。 2050年の原子力発電量は5,192億KWhとなり、2050年の発電比は原子力50%・自然 エネルギー16%になる。
  - 2050年までにCO2排出量を80%削減すれば、CO2削減コストが高まり、経済成長率は
- 0.82%に低下する。2050年の原子力発電量は7,157億KWhとなり、2050年の発電比は原子力70%・自然エネルギー29%になる。原子力の比重を徐々に低下させ、2050年の発電量を1,105億KWhにすると、CO2削減コストが倍増し、経済成長率は0.79%に低下する。ただ、前半での成長率が大きく 低下するものの、後半では高コストに経済が順応する。2050年の発電比は原子力 20%・自然エネルギー77%と逆転する。
- 200°日 日 インルイ // ハースレビ もり ものの、より積極的な促進がな | ければ総発電量は大幅に低下する。
- 自然エネルギー発電を積極的に促進すれば、経済成長率は0.94%に回復できる。ただ、電力価格の高止まりは続く。2050年の発電比は原子力16%、自然エネルギー
- CCS技術が2035年以降登場することで、CO2削減コストが低下し、電力料金も低下す ることで経済成長率も1.03%とBAUシナリオに戻る。2050年の発電比は原子力15%、 自然エネルギー78%になる。

# 4.3. 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 野村浩二 (慶應大学)

中期目標のときに検討された経済モデル、AIM と日経センターと我々の KEO モデルでも構造的な違いがある。伴先生のモデルも動学的最適化を行っているが、KEO モデルは基本的には逐次動学のモデル。ただ、資本のユーザーコストにおける資産の将来価格や産業における将来の需要見通しに関する期待など、エクスペクテーションの様子がかなり入っており、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ほとんどの CGE では行われているが、産業研究所(KEO)では産業別あるいは世帯別の長期時系列データベースを構築しており、KEO モデルではそのデータベースに基づいて実測されたパラメータによって構築されている。

中期目標検討委員会ワーキンググループでは、モデルによるシミュレーション結果を親委員会に提示する前に、事前に内閣官房の下でいくども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、2020年において90年比マイナス25%ケースでは国環研の結果がむしろ一番厳しい数字で、日経センターはやや甘め、我々はその中間という感じだった。未来が1つではないということは承知しているが、まず、外生的条件などモデルにおける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、例えばエネルギー効率や $CO_2$ 排出削減量、あるいは生産や価格に対する影響というものを異なるモデル間で出し合って相互にチェックしながら議論する中で、ある程度の収束をみたということは重要なことであると思う。必ずしも異なるモデルの計算結果を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、非現実的な技術選択や恣意的な仮定などを排することができたし、結果としては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。そこには、議論の交通整理をおこなう官僚の調整機能が有効に働いていた。

ところが、ワーキンググループのときは 2020 年の GDP ロスがマイナス 6%という結果だった国環研が、タスクフォースのときにマイナス 3.2% という形で出てきて、非常に大きなギャップということで、タスクフォースの中でも議論となった。しかしながら、タスクフォースはワーキンググループのときのような事前の議論をする場が無かったので、いきなりオープンな場でモデルの詳細な議論をせざるを得なくなり、調整がほとんどできなくなってしまった。政権交代があったものの、モデルにおける前提条件は何も変わっていないことは強調されるべきである。GDP マイナス 3.2%で 25%削減が可能ということに関して、非常に様々な批判があり、納得のいく説明を与えることができずに結果として参考値にとどめるという落としどころとなった。モデル構造の違いによる結果の相違は当然というような単純な話ではなく、やはり一歩ずつ詰めていき、チェックするポイントがあるはずだと思っている。モデル試算が目標ありきの辻褄合わせであってはならない。

以下、慶應大学の産業研究所における温暖化対策のモデル評価について紹介する。産業研究所では、KEO モデルという名称で昔から開発しているが、モデルで扱う課題に対応するように環境分析表、屑・副産物を分離した時系列産業連関表 (SUT-IOT 表) などを作っている。経済モデルにおける環境分析といっても精粗さまざまであるが、経済データから接近したときに、一番細かい分類のデータである基本分類を使って環境分析を行っている。

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。

経済モデルで、 $CO_2$  排出量が削減される鍵となる構造とは何かと言えば、まず外生的なシナリオとしては、TFP(total factor productivity)と AEEI(Autonomous energy efficiency improvement)である。後者は多くの経済モデルでは恣意的に設定されがちなので、我々のモデルでは外生的に入れてはいないが、詳細なトップランナーデータを経済モデルと接合させ、耐久消費財のストックの効果として何%エネルギー消費量が減るか、などは実現可能性の高い政策として外生的に導入されている。本来、こういった政策においてもなんらかのコストがかかっているはずであるが、この部分だけはコストレスとして想定している。TFP も恣意的に設定されがちであるので注意すべきであるが、KEO モデルでは産業別 TFP を 1960 年代より推計しており、現在のトレンドに基づいて導入している。なおそれは産業別には大きく異なる。

内生的な変化として、 $CO_2$  削減の鍵は大きく3つ挙げられる。1つは、供給側のKとEと書いたが、資本とエネルギーの代替の効果で、これが非常に大きい。2番目が、需要側の効果。直接的にディマンドを下げていくような効果。3番目は、需給均衡の結果として生産縮小があり、エネルギー消費が減少するような効果。特に大きなのは1なので、産業側でどのくらい代替が起きているか、設備投資(K)なしにエネルギー消費量(E)が減少するようなことはあまり現実的ではないし、省エネ投資のコストが適切に評価されているのかをチェックする必要がある。またモデルによっては、むしろ労働を増やしてエネルギー消費量が減るようなことを描いているものもある。そういった技術選択は現実的ではないと思われるが、慎重に検討されるべきである。

KEO モデルは非常に特異な構造をしており、大きく3つ特性という形で挙げた。我々のモデルはケインズモデルであり、需要の不足などによっては経済の中に失業者が存在する形になっている。失業者の存在は、有効需要の創出によって経済のパイの拡大が可能であることを意味している。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結果になっている。モデルとしては47の経済活動あり、その中での電源部門と輸送部門とではさらに電源別あるいは輸送形態別に分離されている。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、日本経済における特徴を反映するように、労働供給の関数が細かく入ってい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うが、そういう一物多価の形を考慮している。

KEO モデルのもう一つの特徴は、工学的な情報をできるだけとり入れたいということである。経済学的な生産関数は基本的にすべてトランス・ログ関数として産業別に想定されているが、そういうものから工学的生産関数に置き換えている。既に電力部門では入っている。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、家計のエネルギー消費量を経済モデルで描くために少し特殊な消費関数の取り扱いをしている。トップランナーの詳細な部分に関しては、エネ研のデータベースとモデルの結果を接合する形で使っている。

最後に、過去のデータベースを使うことによって将来に適応できるかどうかという実証性については、経済モデルでは誘導系と構造的な方程式があって、誘導系の方程式のパラメータは不安定だが、構造的なパラメータでは相対的に安定性が高いということを期待し

ている。そういう意味で、時系列のデータベースによる検証可能性ということは非常に重視しており、そういうデータベース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。 日本の産業連関もいろいろな問題があり、そういうものを調整した上で時系列データを 作っている。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、土地試算も含めた資本投入量のデータベースが構築されている。

これと整合した形で、性、年齢、学歴、終業形態、産業という形で、約1万の属性に 労働を区分し、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、世帯別の構造をデータベース化しており、 これがマクロな労働供給や国民経済計算での家計消費と接合するように一国集計と整合す るように作っている。エネルギーに関しても、種別消費燃料投入量や排出係数表、用途別 の種別表等を経済データと整合するように構築している。

KEO Database における産業連関表は、commodity(商品)と industry(産業)が区分され、そこに scrap の input が入り、同時に scrap の output が一方で出ていく。この scrap の output は、中間投入の生産過程から出てくるようなものもあるし、資本ストックから出てくる scrap の output もあり得る。転炉ガスや高炉ガスのようなものが scrap の output と中間投入から出てきて、鉄くずも、中からでてくるものもあれば、外から、かつての資本ストックから出てくるものもあり、モデルとしては、過去からのストックが入っている構造になっている。

時系列のデータベースからの実測値をいくつか紹介したい。これは、農業、化学、窯業 土石、一次金属産業のエネルギー効率の推移の日米比較で、近年アメリカは少し増加して、日本はほとんど上がっていないような推移になっている。これ自身は、グロスアウトプット(粗生産量)をエネルギーインプット(消費量)で割ったエネルギー生産性であり、エネルギー効率の逆数である。それは先ほど紹介したように、TFP等の色々なパラメータの影響も受けるし、あるいはエネルギー価格、グロスアウトプットのプライス、賃金、資本のプライス等、色々な状況が変わったもとでの経済活動としての結果である。こうした実績値に対して、モデルとしては、価格の変化など外生的な条件をコントロールした上で、現実を説明できるような構造パラメータを推計するという発想で作っている。かつては効率改善があっても、それが産業によっては90年代以降など近年においてはほとんど大きな改善が見られないというような、実績値としての経験値がモデルの中に織り込まれている。

コンピュータ、通信機器、電気機械、自動車等、エネルギー効率が非常に高まっていくような産業は、アウトプットにおける質の向上のインフォメーションも反映している。財のクオリティーが上がるということは同じ質の単位で測ったときにアウトプットがふえるということなので、エネルギーに対する生産性が上がっていると経済学的に解釈される。95年以降だと、日米で大体同じような成長率になっていて、そういう意味で、むしろこうした組み立て型産業の中で顕著な生産性向上に伴って、エネルギー効率も高まっていく効果が織り込まれている。

次にTFPの実績値を把握しておきたい。40年間にわたる日本の長期のTFP実績値では、

電子部品製造業とかコンピュータ製造業とか通信機器製造業が非常に高い成長率を示しているが、化学、紙パルプ、窯業土石、一次金属とかは大体 2 ~ 3%というような成長率になっている。これは 1960 年から 2000 年の年平均成長率なので、近年になると、ほとんどゼロに近いようなものになる。TFP は資本、労働、あるいは投入予算によって説明できない技術進歩、それを経済的に言ったときにピュアな技術進歩と解釈することができるが、KEO モデルでは安直に TFP の成長率を想定するのではなく、実績を反映してこの程度のものしかモデルの中には入っていない。

もう一つが米国のケースですが、米国においても年率 1%程度の成長の産業があり、構造が非常によく似ているが、推計してみた結果としての産業構造の跛行性というものは大体近似して出てきている。そういう意味で、技術進歩は産業に固有であり、モデルの中では産業別に想定をすることが望ましい。

一方で、一本一本の方程式がうまく近似するかに加えて、一般均衡モデル全体として過去を説明することができるかということをチェックしている。ほとんどの CGE モデルではデータの入手できる直近の一時点を基準にして将来について解くだけであるが、KEO モデルでは過去について 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。それはモデルが現実経済を描写するうえで多くの問題を与えるし、またそれがモデル構造に反映されている。その上での将来のシミュレーションをおこなっている。

温暖化対策の産業別影響については、マクロの GDP ロスでマイナス数%という影響でも、個別には極めて大きな影響を与える産業があり得るので、政策の影響を極めて慎重に見なければならない。20%とかそのくらいの影響を受けるような産業が本当に生じ得るということが、モデルの計算結果では出てくる。これは日本で特異な結果ではなく、米国における一般均衡モデルの計算結果でも、GDP が2%減のケースで、マイナス10%以上の大きく影響を受ける産業が4つぐらい出ている。

最後にモデルの役割や留保についてであるが、政策の評価のためには異なるモデルで将来を照らしてみることは有益だろう。モデルは、それ自体が整合的な体系であるからというのではなく、実証的な判断や将来技術に関する工学的な知識からみて反証される可能性を無視することは生産的ではない。モデルの結果のバラツキは、しっかりとした検討や議論の場があれば、かなりの程度詰めていくことが可能である。反復になるが、外生的な想定では、産業別 TFP の見通しや AEEI の設定に関する具体的な根拠をしっかりと議論していかないといけない。内生的シナリオでいえば、一番重要なのは経済学的な生産関数の中から得られた K-E の代替可能性に関して実現可能性を検証すること。そうした違いを反映して、 $CO_2$  削減のための限界削減費用が各モデルでほぼ同じでも、電力価格に与える影響が大きく違っていたりする。

また国際競争力の評価に関して慎重な検討が必要だ。将来には、企業の海外移転がさらに進むと途上国の品質向上も十分あり得るので、今まで我々が測定してきた弾力性、例えば輸入財と国内財の代替の弾力性等は、より高まっていく傾向にあるだろう。つまり、これまでは少し国内で価格上昇要因があろうとも輸出が減るようなことはおこりづらかったとしても、将来にはわずかな価格変化でも一気に輸入財へと流れてしまうことがおこりうるだろう。安直に成長戦略などとせず、国際競争力の評価が十分なのかということを、注意してみていく必要がある。

地球温暖化の評価に対する経済学からの接近として考えていくべき方向性は、細分化と いう形がやはり1つである。しかし一方で、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。我々の一つの 進歩としては、コモディティーフローと資本統計という資本のデータベースを新たに作っ ていて、こういった構造は公式統計に反映されつつある。日本の公式統計の資本ストック は、大体マクロで1200か1300兆円ぐらいの資本ストックが現状として存在するが、本 当は300-400兆円ぐらい過小に推計されていると思われる。これを修正するプロジェク トをここ 5、6年間内閣府で行われていて、ようやく今年の年末に基準改定の中で、資本 ストックが30%ぐらい増えてくるように改訂される。詳細なコモリティのフローと接合 した形で資本統計を構築しており、これによって詳細な設備投資と資本ストックが構築さ れ、エネルギーとの代替の現象に関して、詳細な資本財分類で耐用年数や利用期間を測定 したい。新たに195という資本財をピックアップして資産別償却率を調べている。これは、 経済学でのユーザーコストキャピタルの式、あるいは投資の回収年数の中で償却率が非常 に大きな影響を持つが、財によって大分ばらつきがある。サービス用の機器とか、あるい は半導体製造装置の一部の中では、実測してみると年率40~50%ぐらいのものもある。 それは、物理的な限界、物理的な耐用年数ではなくて、市場の競争状態を反映して1~2 年で売却したりあるいはテクノロジーの流出を避けるために破棄してしまうということが あって、そういう意味で非常にばらついた姿になっている。償却率が高いということは、 なかなか K-E の代替が進まない、省エネ投資が進まないということである。こういった 細分化によっては機器別に代替が進みやすいか、分析していくことができるし、例えば 200 とか 300 という資本財の中で、資本のビンテージが評価できる。そうすると、トッ プランナーが入ったときに、普及にはどのくらいの期間が必要なのかということが分析で きるようになる。

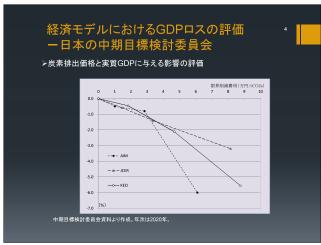
将来に向けて、やはり現状の産業連関表のデータベースでは全く粗過ぎる。細部は自分たちで作らざるを得ないという状況なので、拡張産業連関表という形でもう一度見つめ直さないといけない。一般の CGE モデルがそうであるが、例えば最新であるからとして2005 年表だけに依存するというのも非常に危険なことで、例えば 95 年表、2000 年表、2005 年表と時系列で見ていくと、産業連関表自身の誤りも結構ある。2005 年表におけるミスの一つの例では、昔は核燃料の製造アクティビティにおいてウランの投入係数が60%ぐらいあったのが、2005 年表だと突然に 15%ぐらいになっている。ウランを投入せずに核燃料ができるような投入構造であり、これは 2005 年表における明らかな誤りである。産業連関表(基本表)というのは改訂がなされない。ほとんどのモデルではデータの細部を見ないので、もともと誤りを織り込んでしまっている。そういった情報基盤については、モデル間で共有できるようなプラットフォームが必要だろう。

技術の経済学的評価をしていくために、データベースとしてのエビデンスのさらなる蓄積とモデリングの拡張がこれからも我々の課題であると思っている。





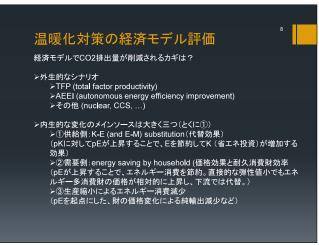




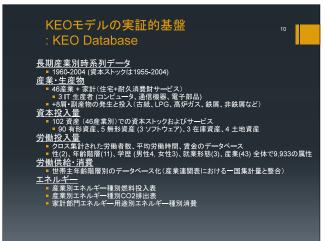


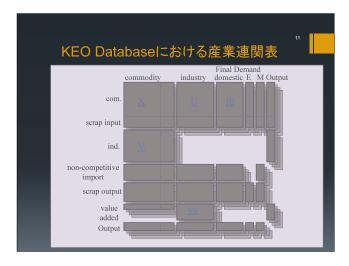


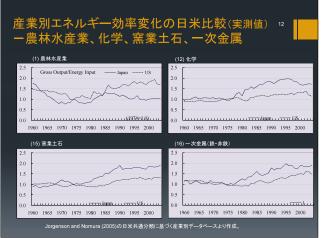


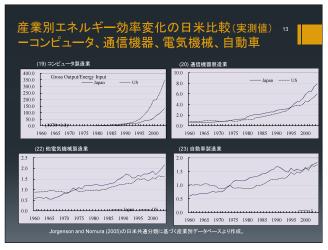


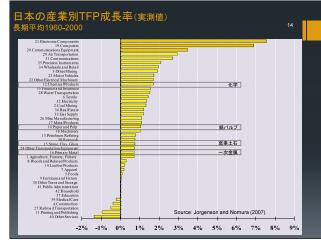


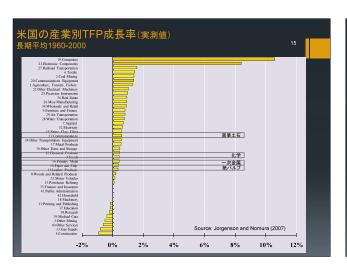




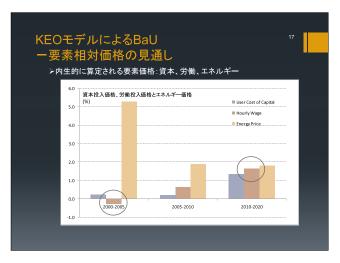


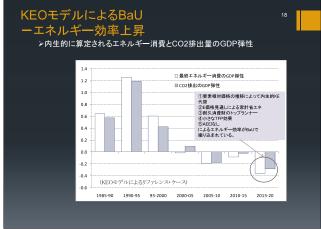




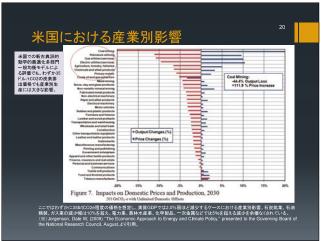












 経済モデルによる試算のfeasibility check
 つ跛行性の解消に向けて (1) 外生シナリオ

 >経済モデルが依存する外生シナリオのfeasibility check

 >産業別TFPの見通し。

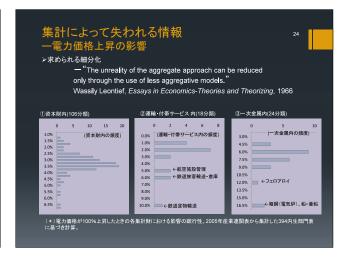
 >AEEIの設定。具体的な根拠。

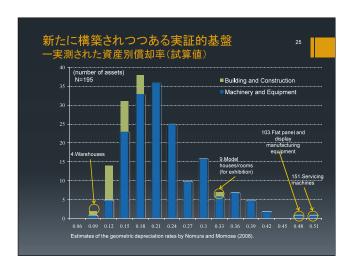
 >その他外生シナリオにおける実現可能性の検証。

 >太陽光発電などの導入コスト

 >国際的な一次エネルギー価格の見通し









# 5. 第4セッション:総合討論

各講師からの講演やその後の質疑応答を受けて、総合討論を行った。以下に、主な討論 内容をまとめる。

#### エネルギーモデルの研究課題:

エネルギー技術を扱う工学モデルと経済モデルの融合は、モデル開発者の共通した課題である。技術の進展と経済社会構造の変化を歴史的に俯瞰し、そのメカニズム解明のためのシミュレーションの実施とそれに基づくデータベースによる検証、さらにシナリオ作りから国民の合意形成までをモデル化する必要がある。

単純にコストだけが評価軸というのも問題である。例えば、中国のサンテックパワーも 政府からかなり補助金が入っているから安い面がある。安売りで日本のメーカーが全部つ ぶれてから、価格決定力を握られるのは、レアアースと同じように国家戦略上良くない。 新エネルギー、再生可能エネルギーは、技術やポテンシャリティだけでなく、発送配電等 の社会システムの問題でもある。経済学や人文科学も含めて考える必要がある。

#### 研究コミュニティーの活性化:

政策当局からの緊急のニーズへ対応するばかりではなく、データを蓄積することも含めて息の長い体系的な基礎研究が求められており、それを実践する場が必要である。例えば、温暖化に関しては、エネルギー分析と地球温暖化と影響評価の横の協力が必要な時期に来ている。その重要性を意思決定者とモデル開発者との間で一緒に議論し、ロングタームのスタンスでビジョンを決めてエネルギーの問題を考えることが重要となる。さらに、そういう場で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開発する。非常に重要なことなので、このような場を作る必要性をCRDSから戦略プロポーザルとして是非提案すべきである。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、その支援も需要である。今日のワークショップのように、集まって直接発表を聞くことから学ぶことは多い。

日本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。しかしながら、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。また、モデル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あると良い。

#### 人材育成:

海外では温暖化問題を受けてエネルギーモデリングフォーラム(EMF)等のコミュニティーが非常に活発である。日本の研究者も、海外コミュニティー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。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をなどの資金が、JSTや学会などの公平な場につけば、次の世代が成長する機会が増して、育成が進むのではないか。

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。

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。

#### 6. まとめ

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行われ、以下のような共通認識を得た。

#### ■エネルギーモデルの研究課題

エネルギー技術と経済社会活動の相互作用を明らかにすることが、モデル開発に関わる研究者の共通の課題である。技術の進展と経済社会構造の変化を歴史的に俯瞰し、そのメカニズム解明とデータベースによる検証、さらにシナリオ作りから国民の合意形成までをモデル化する必要がある。

温暖化に関しては、エネルギー分析と地球温暖化と影響評価の横の協力が必要な時期に来ている。また、新エネルギーや再生可能エネルギーは、技術や賦存量だけでなく社会システムの問題でもあるので、経済学や人文科学も含めて考える必要がある。

#### ■長期的な視点での基礎研究への支援

政策当局の緊急ニーズへの対応ばかりではなく、ロングタームのスタンスでビジョンを 持ってエネルギー問題を考えることのできる場が必要である。そして、データを蓄積する ことも含め、息の長い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。そのような活動を通じて、現実の施策と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開発すべきである。

#### ■人材育成

モデル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。長期的な視点で基礎研究に取り組むこと ができ、領域を超えた幅広い若手研究者が集うことのできる場が必要である。公平・中立・ オープンな場に、若手への人件費や交通費、シンポジウム等のサポートがあれば、次世代 を支える人材を育成できる。そのためにも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。

# 付録

#### 付録1 ワークショップ開催概要、プログラム

#### <開催概要>

■ 日時:平成23年10月21日(金)10:00~17:45

■ 場所: JST 研究開発戦略センター 2 階大会議室

■ 主催: JST 研究開発戦略センター 豊かな持続性社会構築のためのエネルギーモデル チーム

#### **くプログラム>**

10:00 ~ 10:20 【開会挨拶、趣旨・進行方法の説明】

「開会挨拶」 笠木伸英 (CRDS 上席フェロー)

「趣旨・進行方法の説明」 鹿園直毅 (CRDS 特任フェロー)

#### 【第1セッション:背景およびニーズ】

10:20~10:50 「自律的エネルギー経済モデル構築の設計・計画手法」

一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― 黒田昌裕(CRDS上席フェロー/東北公益文科大学 学長)

10:50 ~ 11:20 エネルギーモデル開発の経験から学ぶもの

山地憲治((財) 地球環境産業技術研究機構 理事·研究所長)

11:20~11:50 エネルギーモデル活用の立場から一言

田中一成(資源エネルギー庁総合政策課 需給政策室長)

11:50 ~ 12:20 最近の温暖化問題と統合アプローチの重要性

丸山康樹 ((財) 電力中央研究所 環境科学研究所 首席研究員)

#### 【第2セッション:ボトムアップモデル】

13:00 ~ 13:30 ボトムアップモデルの現状と課題 - AIM/Enduse を中心として-明石 修(国立環境研究所 特別研究員)

13:30~14:00 ボトムアップモデルの課題

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)

14:00 ~ 14:30 ボトムアップモデル

森 俊介(東京理科大学理工学部経営工学科 教授)

#### 【第3セッション:経済モデル】

14:30 ~ 15:00 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

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 教授(JST低炭素社会戦略センター 研究統括)

15:00~15:30 エネルギー・環境経済モデルで重要となる視点

伴 金美 (大阪大学大学院経済学研究科 教授)

15:30 ~ 16:00 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

野村浩二(慶應義塾大学産業研究所 准教授)

#### 【第4セッション 総合討論】

16:10~17:40 総合討論

モデレーター: 鹿園直毅 (CRDS 特任フェロー)

コメンテータ: 永田 豊((財)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)

甲斐沼美紀子(国立環境研究所社会環境システム研究センターフェロー)

17:40~17:45 【まとめ・閉会挨拶】

笠木伸英 (CRDS 上席フェロー)

#### 付録2 ワークショップ参加者リスト

(敬称略、所属・役職はWS開催時点)

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 九山 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 標井 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 教授/研究統括 環境システム学/ JST 低炭素社会戦略センター 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 室長 評価研究室 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 領域長 策領域 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/ 上席フェロー/ 東京大学大学院工学系研究科	氏	名	所 属	役 職
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 伊 金美 大阪大学大学院工学系研究科 電気系工学専攻 教授/研究統括 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 室長 評価研究室 永田 豊 電力中央研究所 社会経済研究所 エネルギーユニット/東京大学大学院工学系研究科 庭園 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 関根 秦 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 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/准教哲早組大学先進理工学部 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/准教哲早間大学先進理工学部		• •	***	
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 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 室長 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 室長 ※田 豊 電力中央研究所 社会経済研究所 エネルギー技術政 領域長 策領域 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   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   特任フェロー 教授 関根 秦 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 / 准教書   フェロー / 推教書   フェロー   変換   東京大学先進理工学部   カスア 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   フェロー 世内 順一 JST 研究開発戦略センター ジステム科学ユニット フェロー 関内 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 関内 順一 JST 研究開発戦略センター ライフサイエンス・臨床 フェロー				上席フェロー/ 学長
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   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   田立環境研究所   地球環境研究センター   温暖化対策   室長   評価研究室   永田   豊   電力中央研究所   社会経済研究所   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   上席フェロー/ 東京大学大学院工学系研究科   東京大学大学院工学系研究科   東領域   東京大学大学院工学系研究科   東京大学大学院工学系研究科   東京大学生産技術研究所   関根   東京大学生産技術研究所   環境・エネルギーユニット   特任フェロー/ 権教授   早稲田大学先進理工学部   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   世内   順一   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   世内   順一   大学に開発戦略センター   東京大学ユニット   フェロー   世内   順一   大学に開発戦略センター   東京大学ユニット   フェロー   世内   順一   大学に開発戦略センター   システム科学ユニット   フェロー   世内   恒丁   打工研究開発戦略センター   システム科学ユニット   フェロー   世内   打工研究開発戦略センター   ライフサイエンス・臨床   フェロー	山地	憲治	(財) 地球環境産業技術研究機構	理事・研究所長
明石 修 国立環境研究所 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 件 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 室長 評価研究室 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 領域長 策領域 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 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/ 特任フェロー/教授 関根 秦 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/准教授 コメンテータ 環境・エネルギーユニット/ フェロー/推教授 東京大学生産技術研究所 関根 秦 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/推教授 会称 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	田中	一成	資源エネルギー庁 総合政策課 需給政策室	室長
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 教授/研究統括 環境システム学/ JST 低炭素社会戦略センター	丸山	康樹	(財) 電力中央研究所 環境科学研究所	首席研究員
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         教授/研究統括           供         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)         世斐沼         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         室長           水田         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/ 特任フェロー/ 教授           庭園         直教         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/ 准教哲学品田大学先進理工学部         カテンニー         カテンニー         フェロー         世界         サイエンス・臨床         フェロー         サイエンス・臨床         フェロー         カテンニー         カテンニー </td <td>明石</td> <td>修</td> <td>国立環境研究所</td> <td>特別研究員</td>	明石	修	国立環境研究所	特別研究員
松橋 隆治         東京大学大学院工学系研究科         電気系工学専攻         教授/研究統括           環境システム学/JST 低炭素社会戦略センター         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)         国立環境研究所 地球環境研究センター 温暖化対策 室長評価研究室           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 領域長策領域           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           庭園         直毅 JST 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット/ 特任フェロー/東京大学生産技術研究所         教授           関根 秦 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         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         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 フェロー	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
環境システム学/JST 低炭素社会戦略センター         教授           野村 浩二 慶應義塾大学産業研究所         推教授           コメンテータ (五十音順)         (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 室長評価研究室         東面研究室           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         で本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         東京大学大学院工学系研究科           庭園 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/複数核型に対して、対策を関係を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対策を対して、対策を対策を対して、対策を対し、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対し、対策を対して、対策を対して、対策を対して、対策を対し	森	俊介	東京理科大学理工学部 経営工学科	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 室長 評価研究室	松橋	隆治		教授/研究統括
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 室長 評価研究室         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         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         庭園 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 秦 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       サンター 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       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 フェロー	伴	金美	大阪大学大学院経済学研究科	教授
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 室長評価研究室           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 領域長策領域           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           庭園 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 秦 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         サーク・サーク・サーク・サーク・サーク・サーク・サーク・サーク・サーク・サーク・	野村	浩二	慶應義塾大学産業研究所	准教授
評価研究室	コメンラ	テータ	(五十音順)	
<ul> <li>策領域</li> <li>エネルギーモデルチームメンバー</li> <li>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</li> <li>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/ 特任フェロー/ 東京大学生産技術研究所</li> <li>関根 秦 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/准教授 早稲田大学先進理工学部</li> <li>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 フェロー</li> </ul>	甲斐沼	美紀子		室長
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         秦 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/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 フェロー	永田	豊		領域長
東京大学大学院工学系研究科教授鹿園 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 秦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/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 フェロー	エネルコ	デーモデ	ルチームメンバー	
東京大学生産技術研究所 教授 関根 秦 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/准教授 早稲田大学先進理工学部 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 フェロー	笠木	伸英	7.7 - 7	'''
早稲田大学先進理工学部鈴木 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 フェロー	鹿園	直毅	7.7 - 7	特任フェロー/ 教授
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・臨床フェロー	関根	秦		フェロー/准教授
川口 哲 JST 研究開発戦略センター ライフサイエンス・臨床 フェロー	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		フェロー
JST 関係者	JST 関係	系者		
松村 郷史 研究領域総合運営部 第一研究領域担当 主査	松村	郷史	研究領域総合運営部 第一研究領域担当	主査

#### ■ワークショップ企画メンバー■

笠木	伸英直毅	上席フェロー 特任フェロー	(環境・エネルギーユニット) (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   川口	至 哲	フェロー フェロー	(環境・エネルギーユニット) (ライフサイエンスユニット)
7.1.	_	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-WR-11

#### 科学技術未来戦略ワークショップ

# 「豊かな持続性社会構築のためのエネルギーモデル」報告書

平成23年10月21日(金)開催

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5番町7番地 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.

