

# 新しい物質・エネルギー統合モデル への取り組み

第2回東大エネルギー・環境シンポジウム

「地球温暖化問題を考える」

2010年11月5日

東京大学 大学院工学系研究科

原子力国際専攻 教授

藤井康正

# はじめに

- 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。

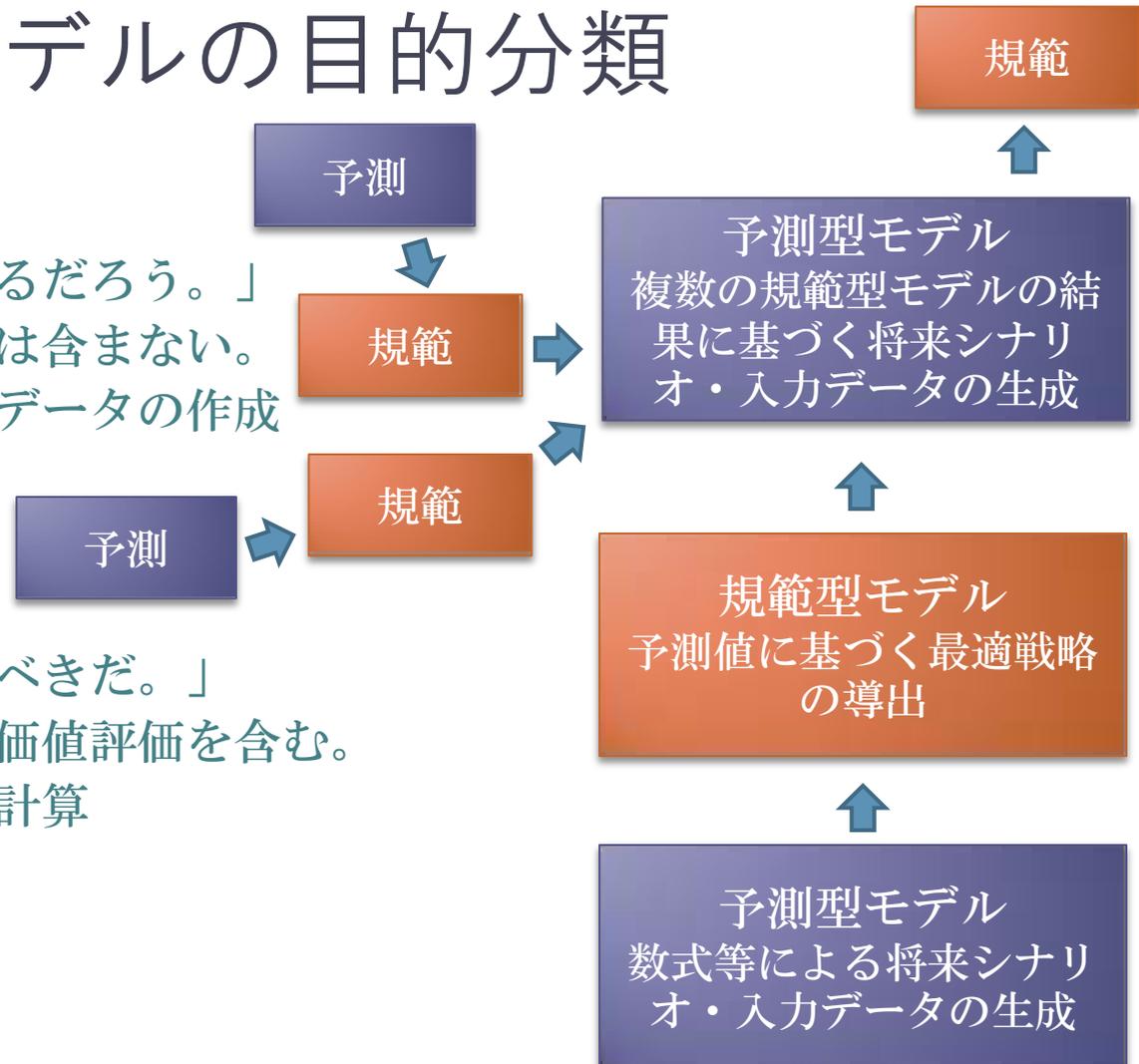
# エネルギーモデルの目的分類

- 予測型

- 将来は「・・・となるだろう。」
- 価値評価は明示的には含まない。
- 規範型モデルの入力データの作成
  - ・ シナリオの作成

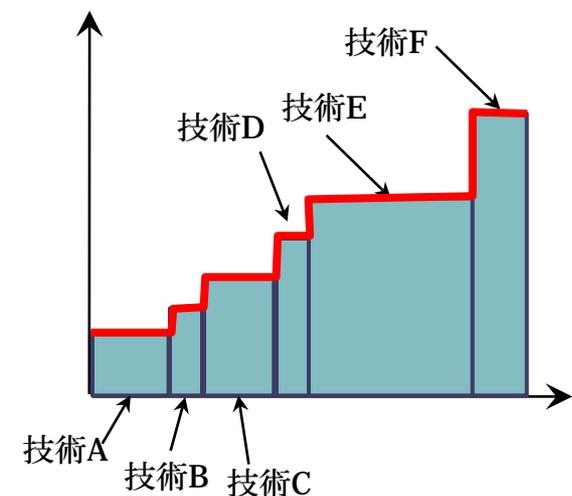
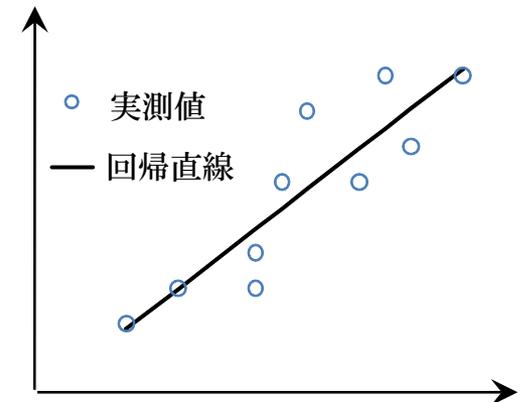
- 規範型

- 将来は「・・・とすべきだ。」
- コスト最小化などの価値評価を含む。
- 予測データに基づく計算
  - ・ 最適化計算



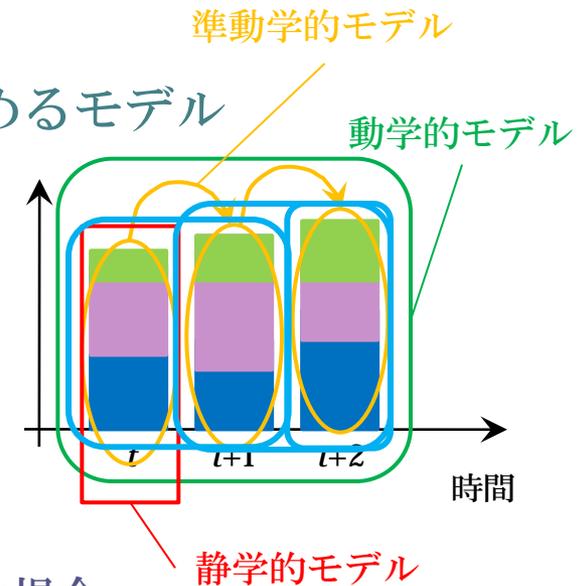
# エネルギーモデルの定式化手法の分類

- 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
    - 構築し易いが、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時間構造分類

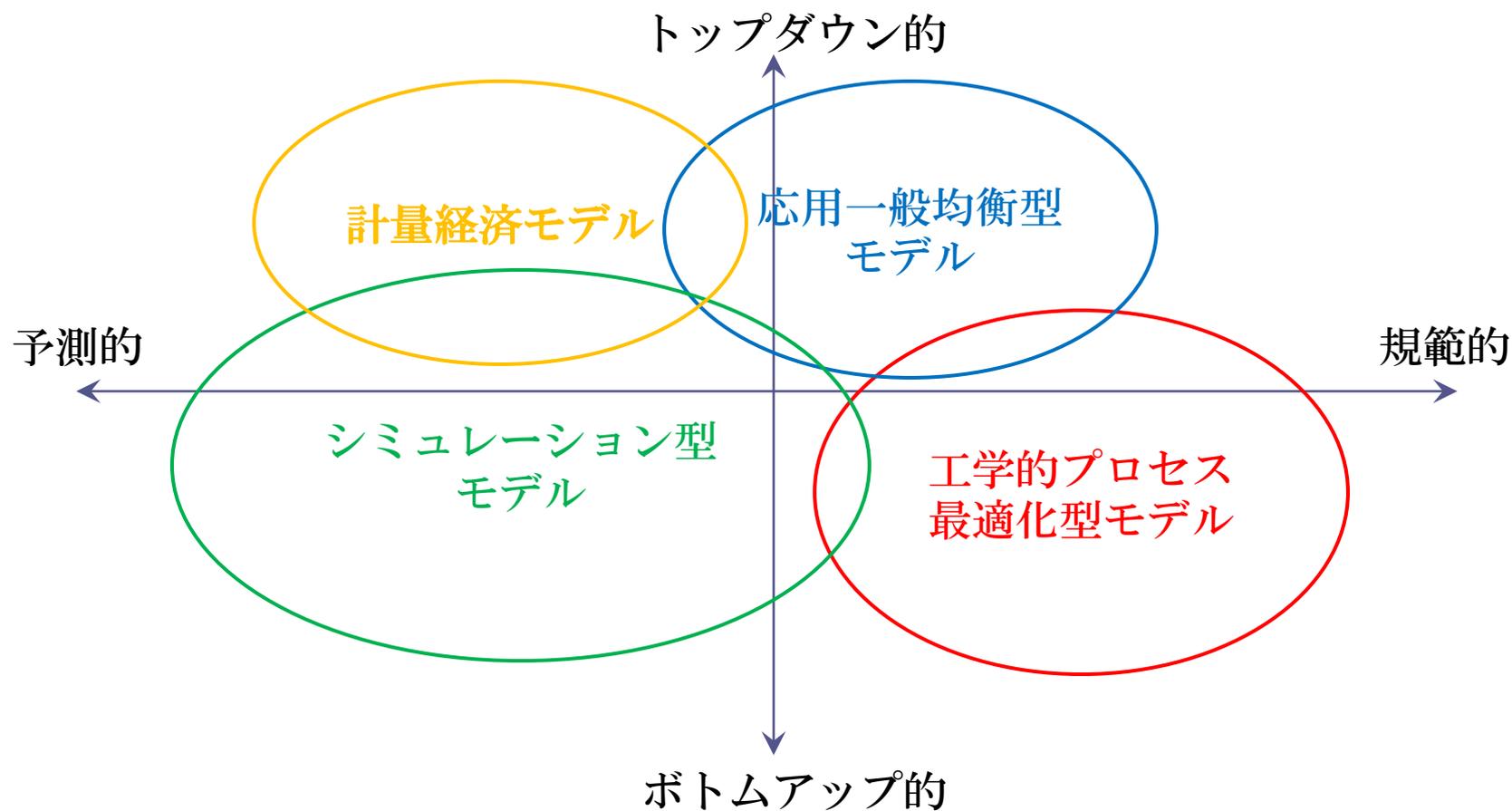
- 静学的モデル
  - 単一時点を対象にしたモデル
- 準動学的モデル
  - 期間中の複数の時点を時間順に逐次評価を進めるモデル
    - ・ 基本的には静学的モデルを逐次複数回
    - ・ 関連設備の寿命が比較的短い場合
    - ・ エネルギー需要モデルに多い
- 動学的モデル
  - 期間中の複数の時点を同時に評価するモデル
    - ・ エネルギー供給モデルに多い
    - ・ 関連設備が複数時点にまたがって存在するような場合
    - ・ バックカスティング



# 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

# エネルギーモデルの構造分類



## 従来のモデル 評価に関する課題 1

- 総コスト最小化（総効用最大化）パラダイムの限界
  - コストとは経済主体ごとに定義される。エネルギーシステム総コストを最小化することが、社会的に必ずしも最善であるとは限らない。
    - ・ エネルギーに関連する経済主体は経済全体の数%に過ぎない。
      - ・ 社会の部分的な最適化
    - ・ エネルギーシステムは単一の経済主体で構成されていない。
      - ・ 経済主体同士が、必ずしも互いには協調的でない場合もある。
    - ・ エネルギーシステムが支払ったコストは、誰かの収入となっている。
      - ・ エネルギーシステム総コストが増えても、お金をドブに捨てることにはならない。
  - 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 $Y$ が定義されることが多く、経済成長理論でもしばしば用いられる。

$$Y = A \cdot (K^\alpha \cdot L^{1-\alpha})$$

- ・ パラメータ $A$ 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。

## 従来のモデル 評価に関する課題 2

- 多部門一般均衡モデルの限界
  - 経済主体間の相互作用をモデル化できるが、生産関数（コブ=ダグラス型やCES型など）による生産プロセスや合成財のモデル化は、便利な方法ではある一方、様々な制約がある。
    - ・ 前述のマクロ的生産関数と同様にパラメータ推計の問題がある。
    - ・ 技術選択を明示的に考慮できない。
      - ・ 計算結果からは具体的な対策を読み取ることができない。
    - ・ 投入要素間の分離可能性などの不自然な仮定が多い。
      - ・ 投入要素間の交差項の削減が目的だが恣意的な場合もある。
    - ・ 質量保存則が保障されない。
      - ・ 物質やエネルギーのフローをモデル化する際に問題となる。
- 政府の役割のモデル化
  - 炭素税の使途
    - ・ 補助金の財源、国債の償還
  - 排出権市場の制度設計

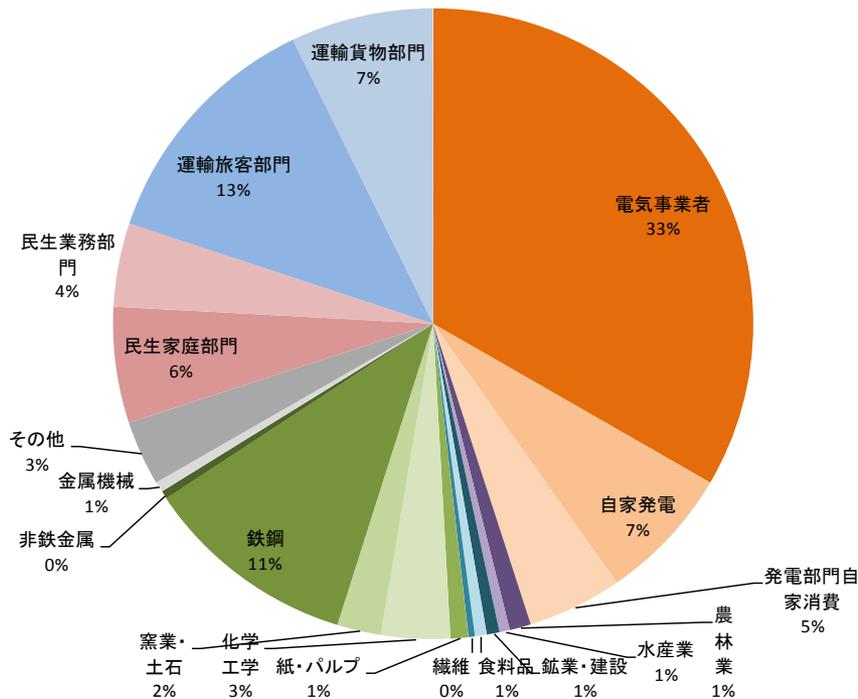
## 従来のモデル 評価に関する課題 3

- 物質バランスの考慮
  - 大幅な省エネルギーが促進される一方で、新規設備や新規インフラの大規模建設が想定される場合、具体的な物質バランスの整合性をチェックし、物理的な実現可能性を確認する必要がある。
    - ・ 基礎素材も燃料と同レベルでのモデル化すべき
      - ・ 鉄鋼、石油製品、紙・パルプ、セメント
    - ・ 各種リサイクル技術・材料間代替技術も選択肢として考慮すべき
      - ・ 高炉と電炉など、金属材料とFRPなど
  - レアメタルや貴金属などの希少資源を使用する新技術の大量普及が想定される場合は、その資源制約を考慮する必要がある。
    - ・ 太陽電池、蓄電池、燃料電池、永久磁石などの原材料
      - ・ シリコン、リチウム、白金、希土類金属
    - ・ 国内バイオマスも希少資源？
  - 物質バランスの考慮は、モデルの多部門化が必須となる。
    - ・ 物質ごとに生産業種や消費業種が異なる。

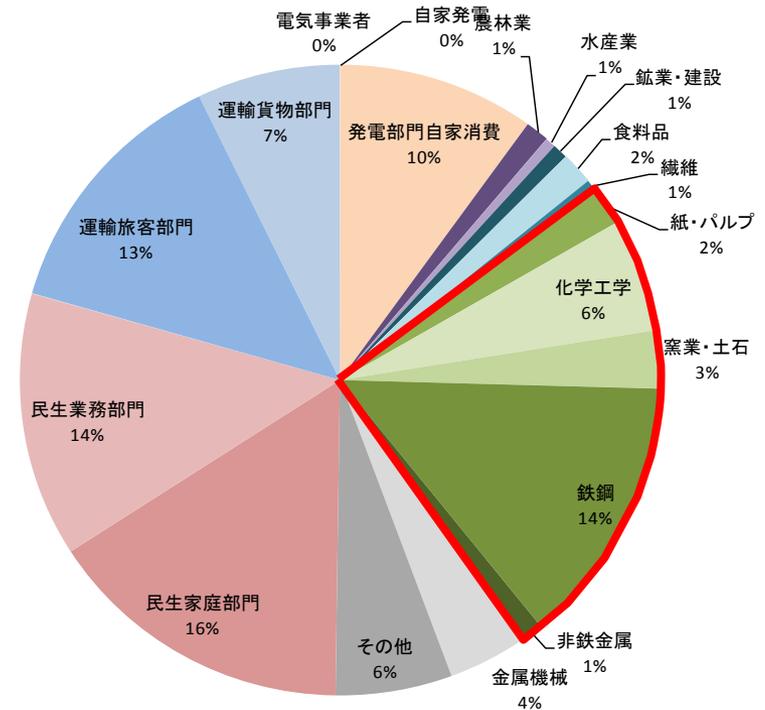
# 参考データ 1

- 日本の化石燃料起源CO<sub>2</sub>排出量（2007年）

## 化石燃料起源



## 化石燃料起源 + 電力按分

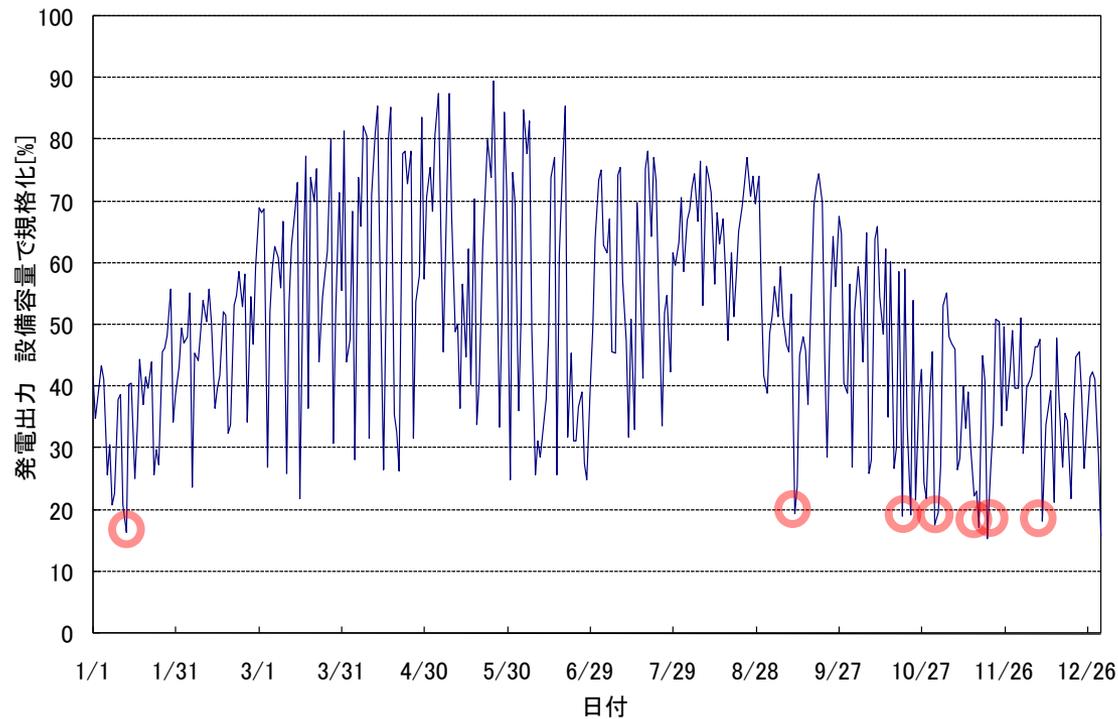


## 従来のモデル 評価に関する課題 4

- 重要性が高まった対策技術の本格的なモデル化
  - 革新的省エネルギー技術
    - ・ 産業プロセス
      - ・ 短期的な業種別の最適化
    - ・ 民生機器（CGS、HP）
      - ・ 短期的な世帯別の最適化、電力負荷曲線の形状の変化
    - ・ 電気自動車
      - ・ 液体燃料の消費量の削減と、電力負荷曲線の形状の変化
  - 太陽光発電のモデル化
    - ・ 出力の不安定性
      - ・ 悪天候時のバックアップ設備の確保
  - 核燃料サイクルのモデル化
    - ・ ウラン資源の上限、使用済み燃料の再処理、高速増殖炉の考慮
      - ・ 各種プロセスでの時間遅れ（保管期間等の考慮）
    - ・ 中長期的な原子力発電所拡大に関する工学的なボトルネックの同定
      - ・ 発電所建設、燃料供給、バックエンド

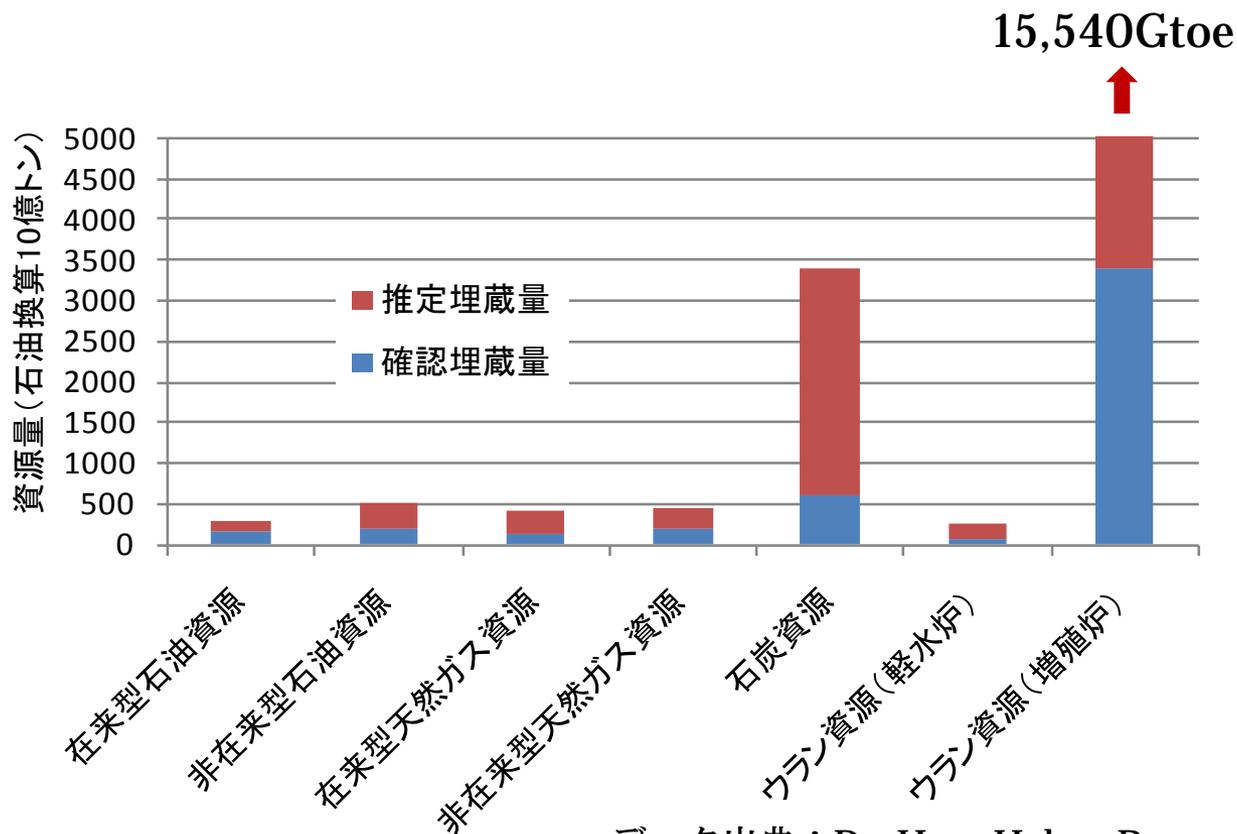
## 参考データ 2

- 太陽光発電の出力変動
  - 2000年の12時における日本全体の発電出力の日変化（アメダスデータに基づいて推定）



## 参考データ 3

- 枯渇性資源賦存量



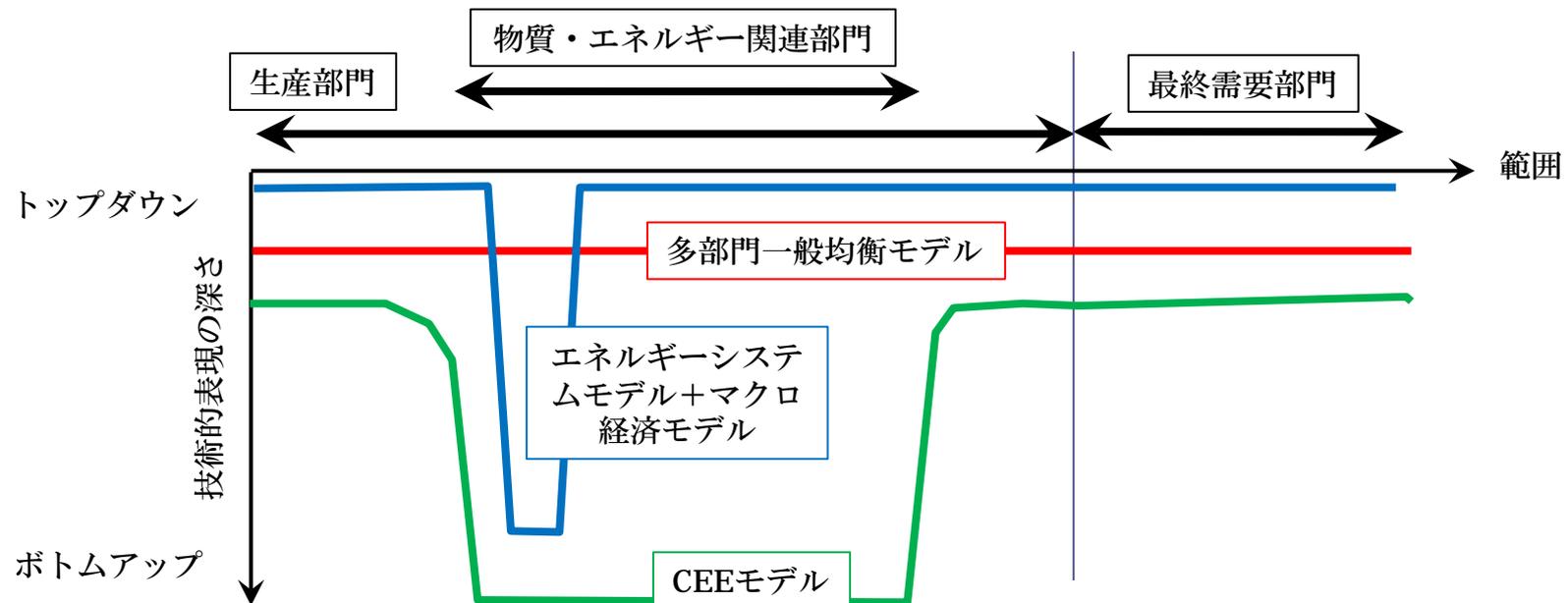
データ出典：Dr. Hans Holger Rogner

## CEE物質・エネルギー統合モデル 構築の目的

- CO<sub>2</sub>排出量の大幅削減に向けた戦略の提示と長期シナリオの作成
  - 対象者のニーズに合わせた情報提供
    - ・ 戦略は個々の事業者の利益追求を前提としたもの
    - ・ 長期シナリオは、想定した政府政策のもとで個々の事業者の利益追求行動を整合的に組み上げたもの
- 世界に向けた日本からの情報発信
  - モデル情報の透明化
    - ・ データ、数式の公開（注：データに関しては著作権上の許可範囲）
  - 計算結果の詳細をWebで閲覧
    - ・ 各種原材料の価格予測、国別地域別の需給予測、各種技術導入予測など
  - 遠隔操作によるモデル運用
    - ・ 雛型プログラムの提供
    - ・ インターネット経由での統合モデルシステムへの入出力操作  
（注：市販ソフトウェア利用部分はライセンス上の許可範囲）

# CEE物質・エネルギー統合モデル 目標

- 世界最先端の温暖化対策評価モデルの構築
  - 前述の従来モデルの課題を克服すべく、経済全体を対象とした多部門一般均衡モデルとし、物質・エネルギーと関連が深い経済部門に関しては、高解像度のボトムアップ方式で定式化



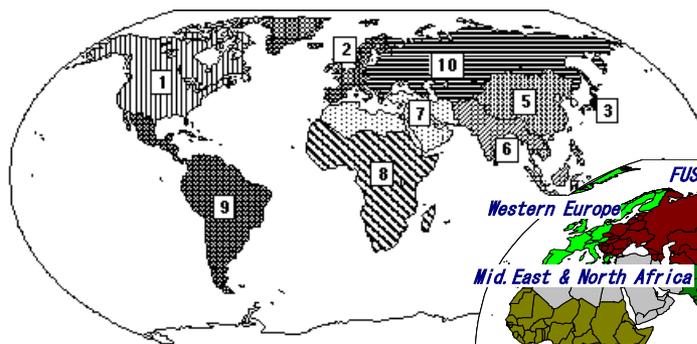
## CEE物質・エネルギー統合モデル 特徴

- 技術選択の詳細なモデル化
  - 収益性を考慮した対策技術の可能性評価
  - 有望技術の特定と具体的な対策の提示
- CO<sub>2</sub>排出削減対策が社会経済の多部門に与える影響を総合的に評価
  - 「負担増加論」対「成長戦略論」に関するより詳細イメージの提供
  - 政策の経済的波及効果に関するより包括的な評価
- 高解像度化
  - 地理的、時間的、部門的解像度
- マルチエージェントシステムとしてモデル化
  - 全体最適化ではなく、事業者別の部分最適化を前提
    - ・ 個々の事業者（経済主体）は規範型モデルとし、複数の経済主体の総体として社会がモデル化される。社会全体の最適化は意図しないため、本モデルは予測型モデルと言えるが、政府等の政策や排出削減目標に対応した将来社会のイメージ図を描く。

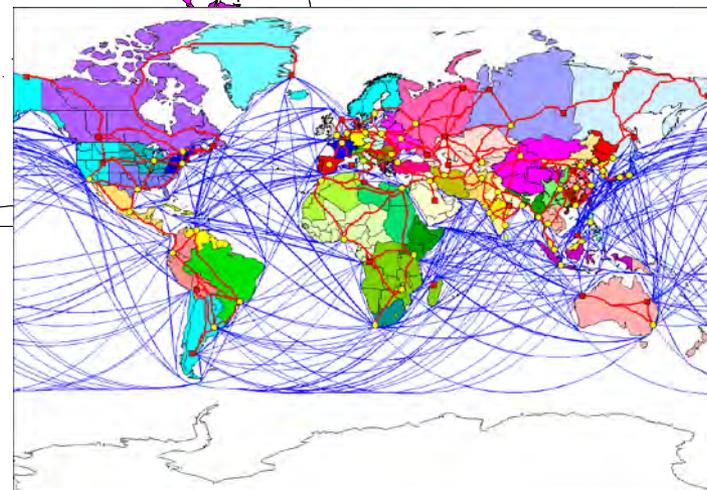
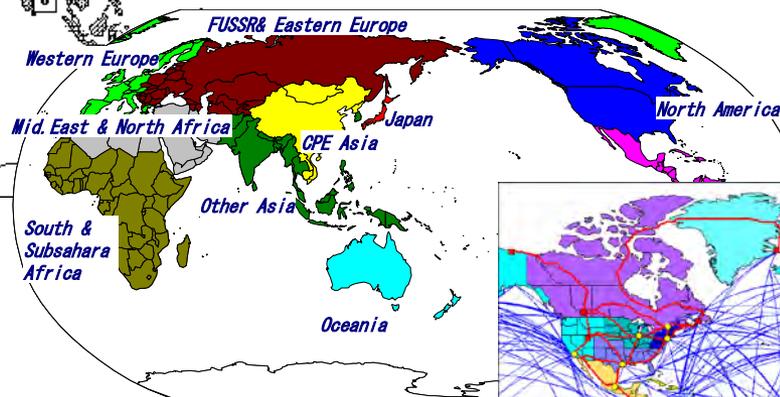
# エネルギーモデルの高解像度化

## 地理的解像度

1992年開発：1,500変数



1996年開発：10,000変数



2001年～ 1,000,000変数

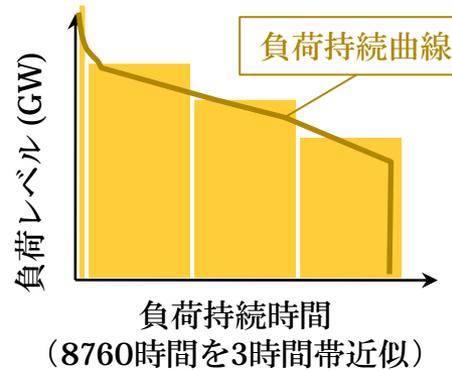
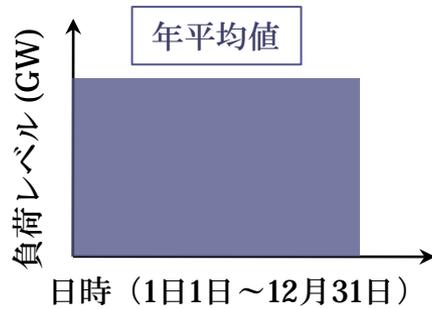
# GTAP 7 Data Base

## (1) 地域分割：113地域

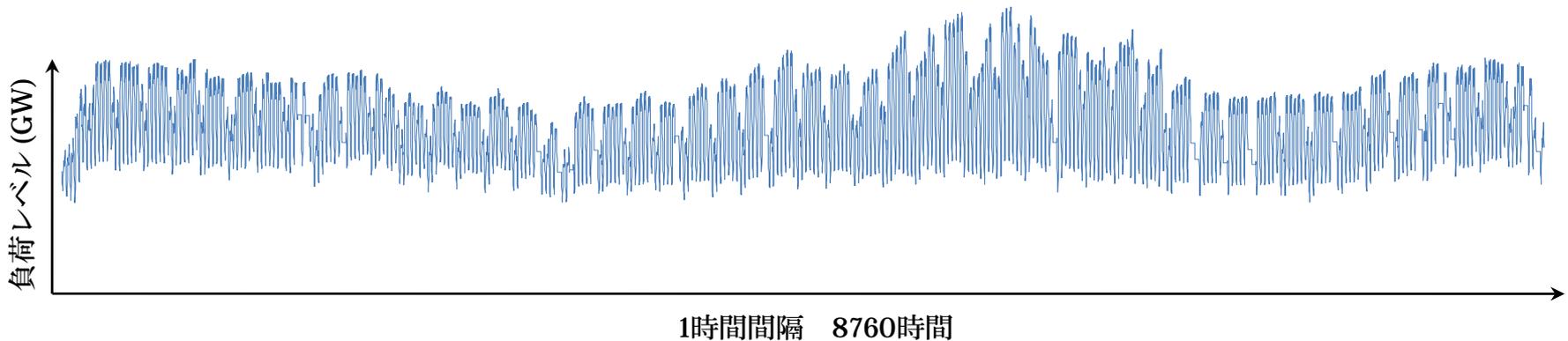
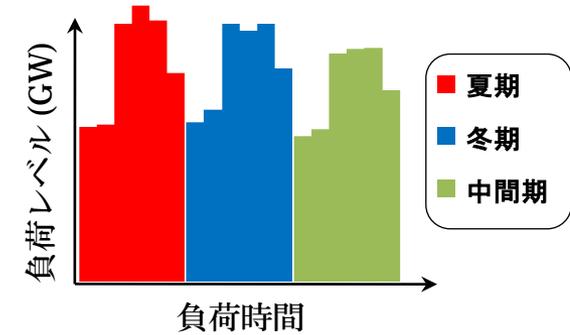
| No | Code | Description                      | No | Code | Description             | No  | Code | Description                         |
|----|------|----------------------------------|----|------|-------------------------|-----|------|-------------------------------------|
| 1  | AUS  | Australia                        | 39 | XSM  | Rest of South America   | 77  | HRV  | Croatia                             |
| 2  | NZL  | New Zealand                      | 40 | CRI  | Costa Rica              | 78  | ROU  | Romania                             |
| 3  | XOC  | Rest of Oceania                  | 41 | GTM  | Guatemala               | 79  | RUS  | Russian Federation                  |
| 4  | CHN  | China                            | 42 | NIC  | Nicaragua               | 80  | UKR  | Ukraine                             |
| 5  | HKG  | Hong Kong                        | 43 | PAN  | Panama                  | 81  | XEE  | Rest of Eastern Europe              |
| 6  | JPN  | Japan                            | 44 | XCA  | Rest of Central America | 82  | XER  | Rest of Europe                      |
| 7  | KOR  | Korea                            | 45 | XCB  | Caribbean               | 83  | KAZ  | Kazakhstan                          |
| 8  | TWN  | Taiwan                           | 46 | AUT  | Austria                 | 84  | KGZ  | Kyrgyzstan                          |
| 9  | XEA  | Rest of East Asia                | 47 | BEL  | Belgium                 | 85  | XSU  | Rest of Former Soviet Union         |
| 10 | KHM  | Cambodia                         | 48 | CYP  | Cyprus                  | 86  | ARM  | Armenia                             |
| 11 | IDN  | Indonesia                        | 49 | CZE  | Czech Republic          | 87  | AZE  | Azerbaijan                          |
| 12 | LAO  | Lao People's Democratic Republic | 50 | DNK  | Denmark                 | 88  | GEO  | Georgia                             |
| 13 | MMR  | Myanmar                          | 51 | EST  | Estonia                 | 89  | IRN  | Iran, Islamic Republic of           |
| 14 | MYS  | Malaysia                         | 52 | FIN  | Finland                 | 90  | TUR  | Turkey                              |
| 15 | PHL  | Philippines                      | 53 | FRA  | France                  | 91  | XWS  | Rest of Western Asia                |
| 16 | SGP  | Singapore                        | 54 | DEU  | Germany                 | 92  | EGY  | Egypt                               |
| 17 | THA  | Thailand                         | 55 | GRC  | Greece                  | 93  | MAR  | Morocco                             |
| 18 | VNM  | Vietnam                          | 56 | HUN  | Hungary                 | 94  | TUN  | Tunisia                             |
| 19 | XSE  | Rest of Southeast Asia           | 57 | IRL  | Ireland                 | 95  | XNF  | Rest of North Africa                |
| 20 | BGD  | Bangladesh                       | 58 | ITA  | Italy                   | 96  | NGA  | Nigeria                             |
| 21 | IND  | India                            | 59 | LVA  | Latvia                  | 97  | SEN  | Senegal                             |
| 22 | PAK  | Pakistan                         | 60 | LTU  | Lithuania               | 98  | XWF  | Rest of Western Africa              |
| 23 | LKA  | Sri Lanka                        | 61 | LUX  | Luxembourg              | 99  | XCF  | Rest of Central Africa              |
| 24 | XSA  | Rest of South Asia               | 62 | MLT  | Malta                   | 100 | XAC  | Rest of South Central Africa        |
| 25 | CAN  | Canada                           | 63 | NLD  | Netherlands             | 101 | ETH  | Ethiopia                            |
| 26 | USA  | United States of America         | 64 | POL  | Poland                  | 102 | MDG  | Madagascar                          |
| 27 | MEX  | Mexico                           | 65 | PRT  | Portugal                | 103 | MWI  | Malawi                              |
| 28 | XNA  | Rest of North America            | 66 | SVK  | Slovakia                | 104 | MUS  | Mauritius                           |
| 29 | ARG  | Argentina                        | 67 | SVN  | Slovenia                | 105 | MOZ  | Mozambique                          |
| 30 | BOL  | Bolivia                          | 68 | ESP  | Spain                   | 106 | TZA  | Tanzania                            |
| 31 | BRA  | Brazil                           | 69 | SWE  | Sweden                  | 107 | UGA  | Uganda                              |
| 32 | CHL  | Chile                            | 70 | GBR  | United Kingdom          | 108 | ZMB  | Zambia                              |
| 33 | COL  | Colombia                         | 71 | CHE  | Switzerland             | 109 | ZWE  | Zimbabwe                            |
| 34 | ECU  | Ecuador                          | 72 | NOR  | Norway                  | 110 | XEC  | Rest of Eastern Africa              |
| 35 | PRY  | Paraguay                         | 73 | XEF  | Rest of EFTA            | 111 | BWA  | Botswana                            |
| 36 | PER  | Peru                             | 74 | ALB  | Albania                 | 112 | ZAF  | South Africa                        |
| 37 | URY  | Uruguay                          | 75 | BGR  | Bulgaria                | 113 | XSC  | Rest of South African Customs Union |
| 38 | VEN  | Venezuela                        | 76 | BLR  | Belarus                 |     |      |                                     |

# エネルギーモデルの高解像度化

## 時間的解像度

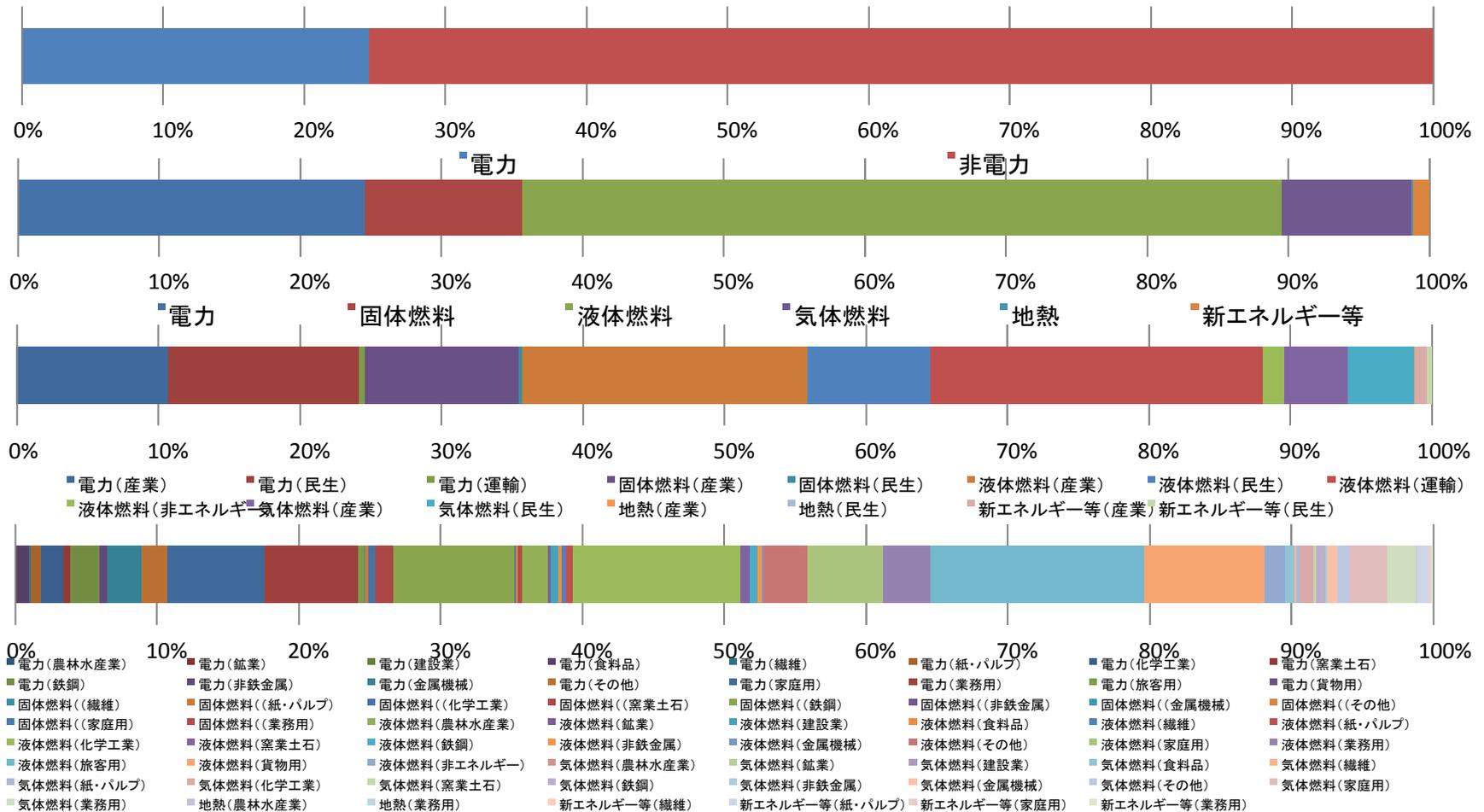


(6時間帯) × 3季節 × (121~122) 日



# エネルギーモデルの高解像度化

## 部門的解像度

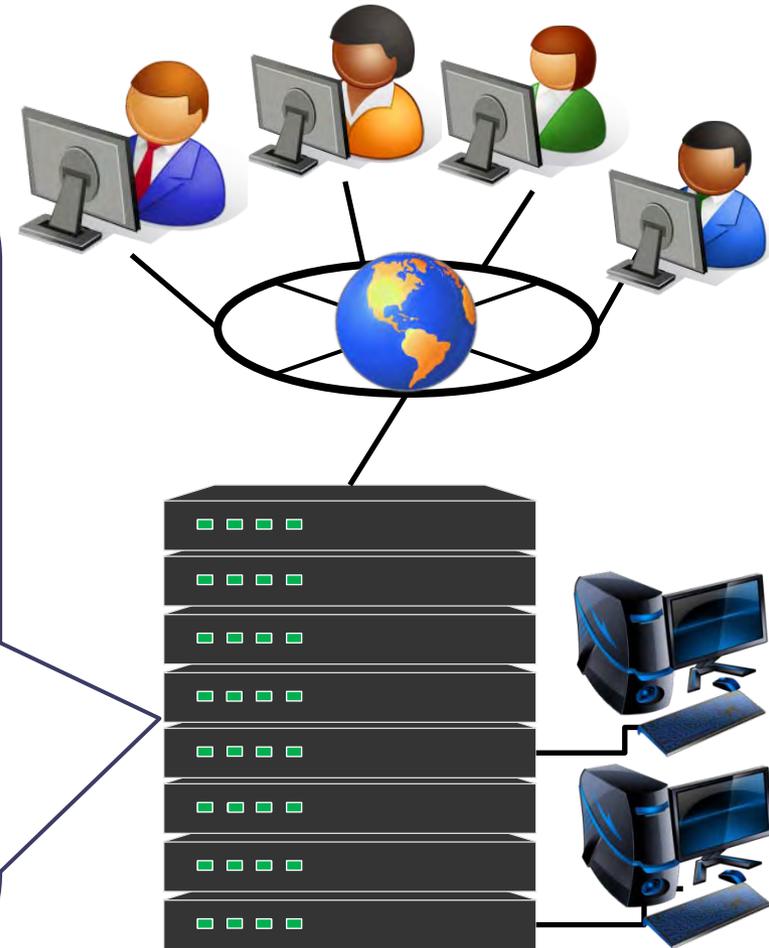
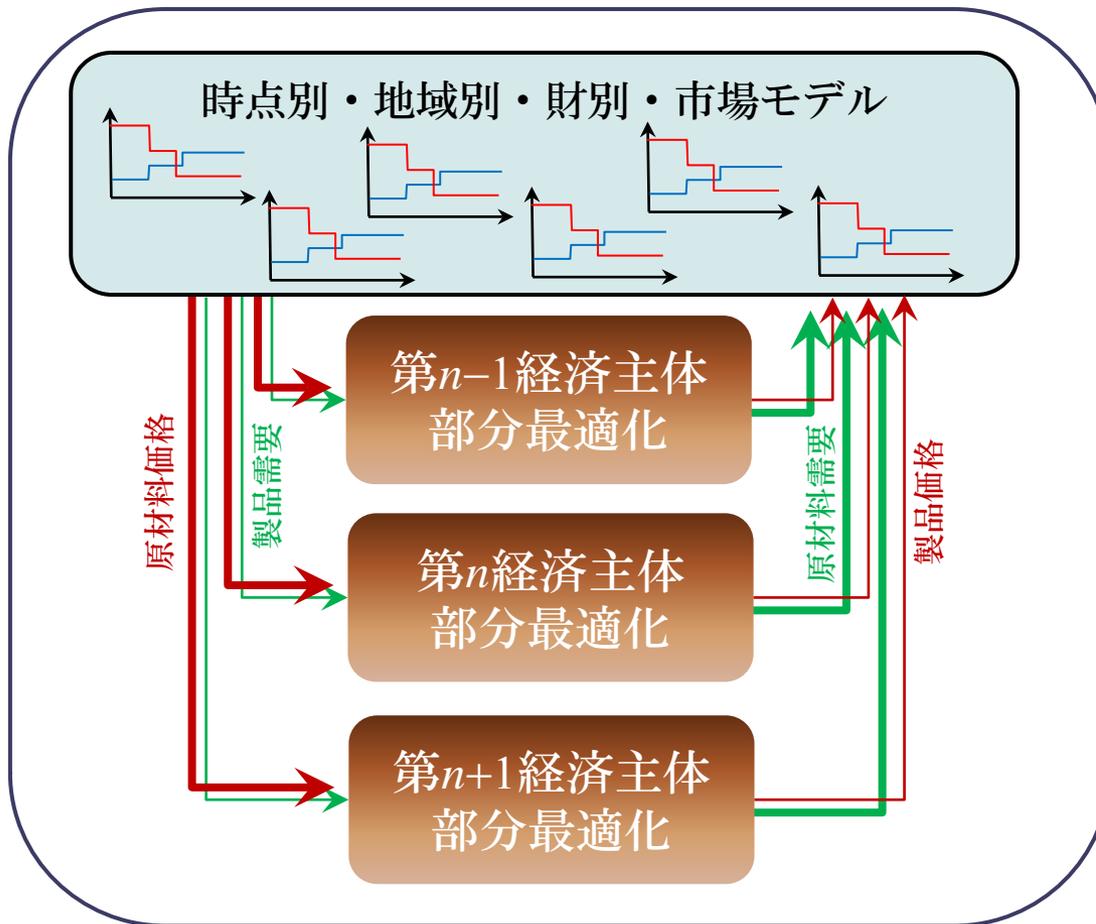


# GTAP 7 Data Base

## (2) 部門分割：57部門

| No | Code | Description                            | No | Code | Description                        | No | Code | Description                                       |
|----|------|--|----|------|------------------------------------|----|------|---|
| 1  | PDR  | Paddy rice                             | 20 | OMT  | Meat products nec                  | 39 | OTN  | Transport equipment nec                           |
| 2  | WHT  | Wheat                                  | 21 | VOL  | Vegetable oils and fats            | 40 | ELE  | Electronic equipment                              |
| 3  | GRO  | Cereal grains nec                      | 22 | MIL  | Dairy products                     | 41 | OME  | Machinery and equipment nec                       |
| 4  | V_F  | Vegetables, fruit, nuts                | 23 | PCR  | Processed rice                     | 42 | OMF  | Manufactures nec                                  |
| 5  | OSD  | Oil seeds                              | 24 | SGR  | Sugar                              | 43 | ELY  | Electricity                                       |
| 6  | C_B  | Sugar cane, sugar beet                 | 25 | OFD  | Food products nec                  | 44 | GDT  | Gas manufacture, distribution                     |
| 7  | PFB  | Plant-based fibers                     | 26 | B_T  | Beverages and tobacco products     | 45 | WTR  | Water   |
| 8  | OCR  | Crops nec                              | 27 | TEX  | Textiles                           | 46 | CNS  | Construction                                      |
| 9  | CTL  | Bovine cattle, sheep and goats, horses | 28 | WAP  | Wearing apparel                    | 47 | TRD  | Trade   |
| 10 | OAP  | Animal products nec                    | 29 | LEA  | Leather products                   | 48 | OTP  | Transport nec                                     |
| 11 | RMK  | Raw milk                               | 30 | LUM  | Wood products                      | 49 | WTP  | Water transport                                   |
| 12 | WOL  | Wool, silk-worm cocoons                | 31 | PPP  | Paper products, publishing         | 50 | ATP  | Air transport                                     |
| 13 | FRS  | Forestry                               | 32 | P_C  | Petroleum, coal products           | 51 | CMN  | Communication                                     |
| 14 | FSH  | Fishing                                | 33 | CRP  | Chemical, rubber, plastic products | 52 | OFI  | Financial services nec                            |
| 15 | COA  | Coal                                   | 34 | NMM  | Mineral products nec               | 53 | ISR  | Insurance   |
| 16 | OIL  | Oil                                    | 35 | I_S  | Ferrous metals                     | 54 | OBS  | Business services nec                             |
| 17 | GAS  | Gas                                    | 36 | NFM  | Metals nec                         | 55 | ROS  | Recreational and other services                   |
| 18 | OMN  | Minerals nec                           | 37 | FMP  | Metal products                     | 56 | OSG  | Public Administration, Defense, Education, Health |
| 19 | CMT  | Bovine meat products                   | 38 | MVH  | Motor vehicles and parts           | 57 | DWE  | Dwellings   |

# CEE物質・エネルギー統合モデル イメージ図

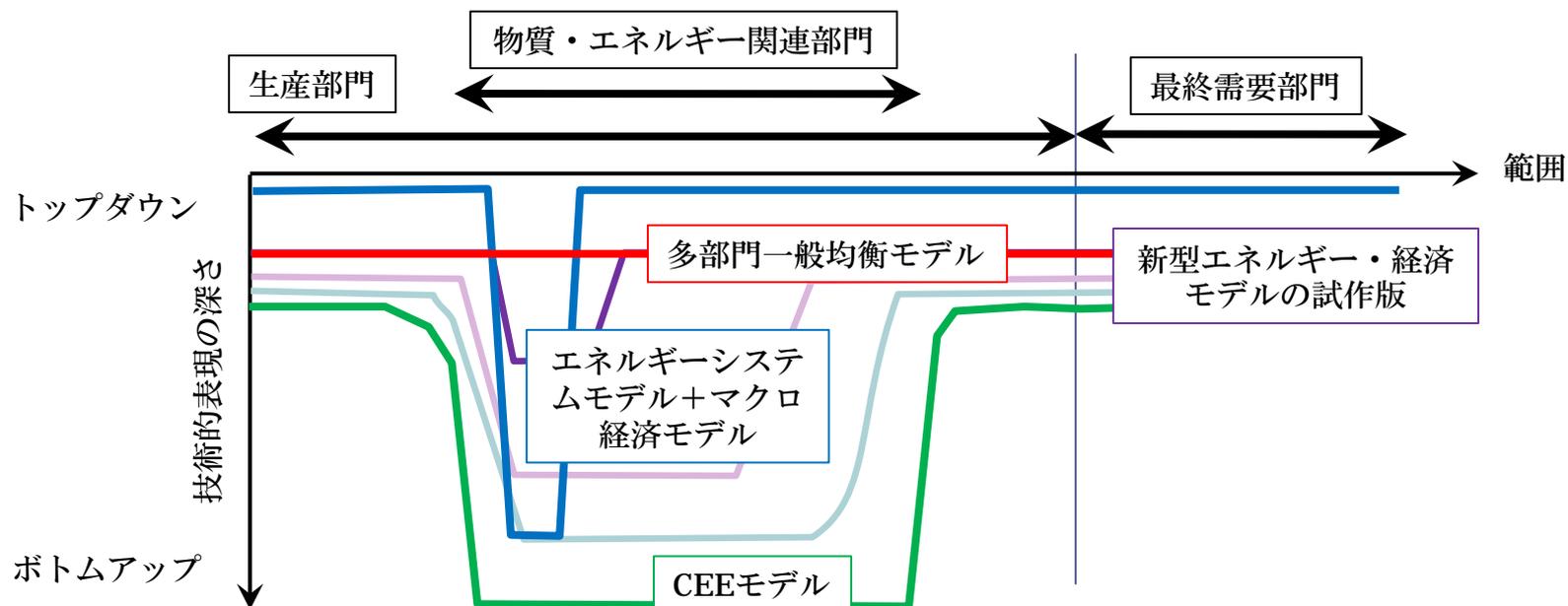


## CEE物質・エネルギー統合モデル 課題

- 考慮すべき物質や技術オプションの選択と適切なモデル化
  - 例えば、鉄鋼製品でも様々
  - 必要なデータは膨大
  - ライフサイクル産業連関分析の関連研究を参考
- 複数の経済主体が競合する均衡状態のシミュレーション方法
  - 単純な最適化問題としては定式化できない
  - パラメータの較正方法
  - マルチエージェントシステムの関連研究を参考
  - 非協力ゲームとしての定式化

# CEE物質・エネルギー統合モデル 課題

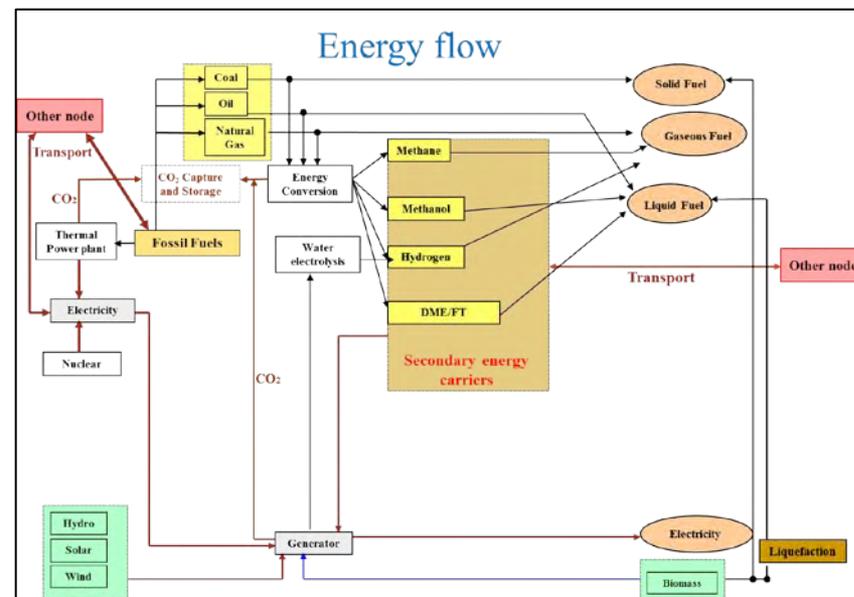
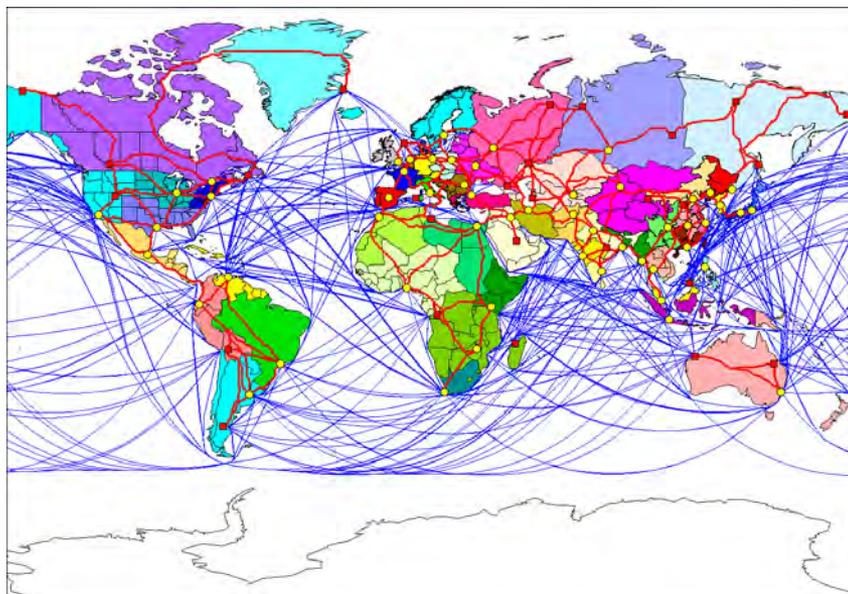
- どのように構築していくか？
  - 既存の最適化型世界エネルギーモデルをベースに、関連箇所の切り出しと追加修正で漸進的に改造
  - 日本を対象にした部分モデルを先行して構築



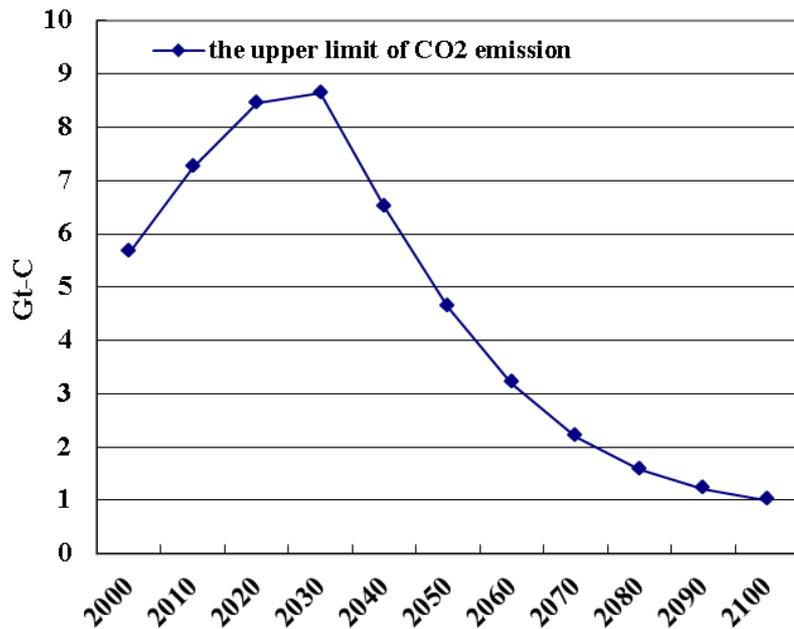
## おわりに

- 温暖化対策評価だけか？
  - 複数主体間の競合関係を考慮できるのが特徴
    - ・ エネルギー安全保障政策の評価へ
- CEEだけでモデルを構築できるのか？
  - 研究所、他大学、企業からの御協力・御支援を賜れば有難い。
    - ・ 関連データ
    - ・ 定式化手法、プログラミング手法
    - ・ 各種リソース

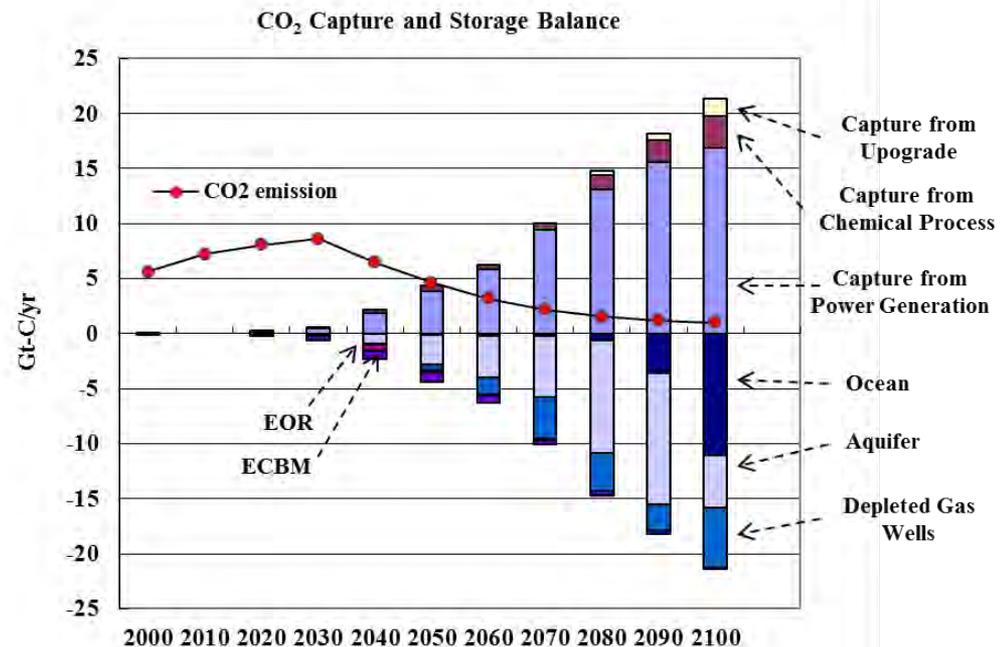
# 参考資料：最適化型世界エネルギーモデル 地域分割とシステム構成



# 参考資料：最適化型世界エネルギーモデル 試算例（1）

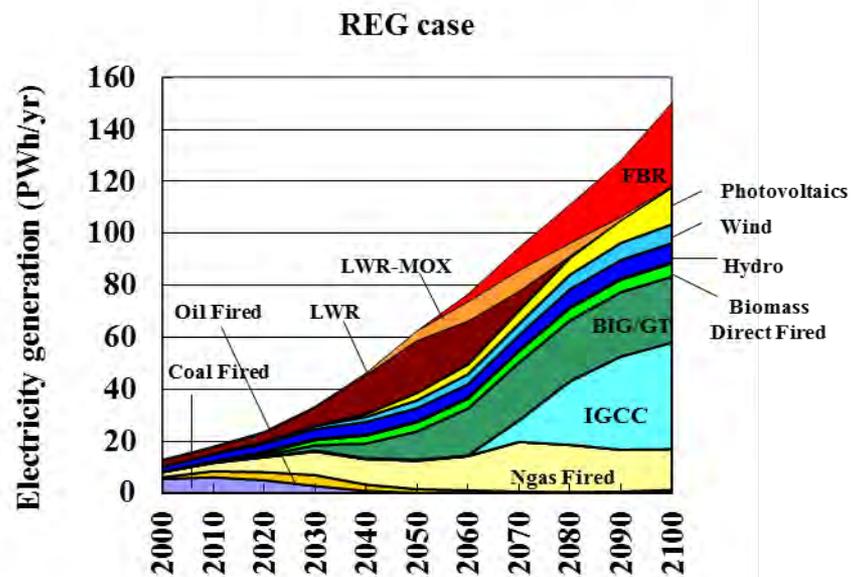
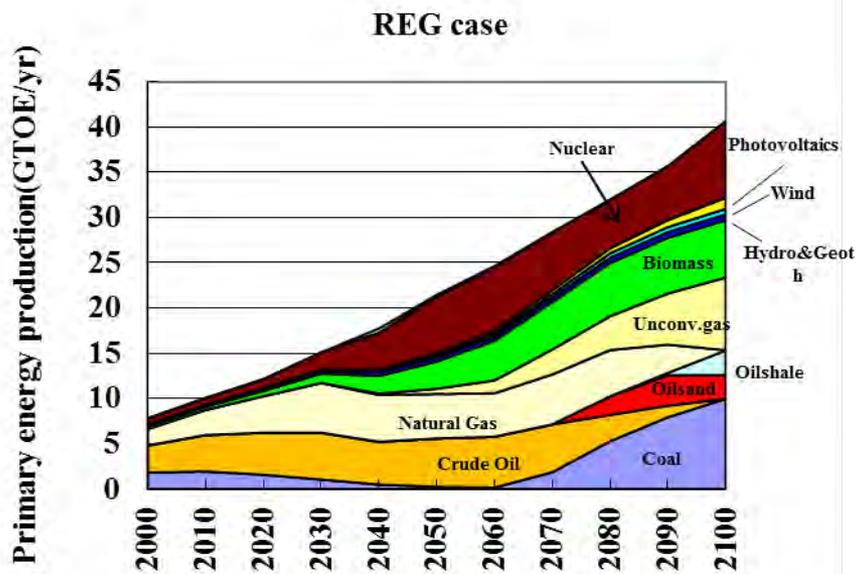


想定したCO<sub>2</sub>排出上限



CO<sub>2</sub>回収貯留の推移

# 参考資料：最適化型世界エネルギーモデル 試算例（2）



一次エネルギー生産量の推移（世界）

発電電力量の推移（世界）

# 参考資料：最適化型世界エネルギーモデル 試算例（3） 主要地域の発電電力量の推移

