エネルギー・環境分野におけるシステム科学

山地憲治
地球環境産業技術研究機構(RITE)理事・研究所長

科学技術シンポジウム
「システム構築による重要課題の解決に向けて」
科学技術振興機構・研究開発戦略センター

２０１２年３月２日＠スクワール麹町

私の研究履歴（1）

東京大学原子力工学専攻（1972－77；原子炉工学・設計学講座（安、都甲、古橋、近藤））

東大炉「弥生」のパルス化：原子炉動特性計算・設計

核燃料サイクルモデル構築：システムダイナミックス

Pu燃料交換計画：核燃料燃焼計算、動的計画法

成長の限界（1972）
第一次石油危機（1973）
政策科学研究所（1974－77）
結婚（1975）

電力中央研究所（1977－94；経済研究所（梅津、小川、浅野、長野、永田、山本・・・））

電中研エネルギーモデル（線形計画法）による2000年ビジョン作成

CANDU炉導入問題
INFCE（1977－80）

EPRI派遣（1981－82；Energy Analysis Div.）
→電力負荷管理（DSM)の研究

最適化型核燃料サイクルモデルFCOM ⇒ 原子力政策

需要家のエネルギーモデル（プロセスモデル：線形計画法）作成（茅研究室と連携、浅野） ⇒ 分散エネルギー政策

IPCC（1988－）
茅の式（1989）

東京大学寄附講座派遣（1991－93；茅、小宮山、山田、石谷、松橋、藤井）

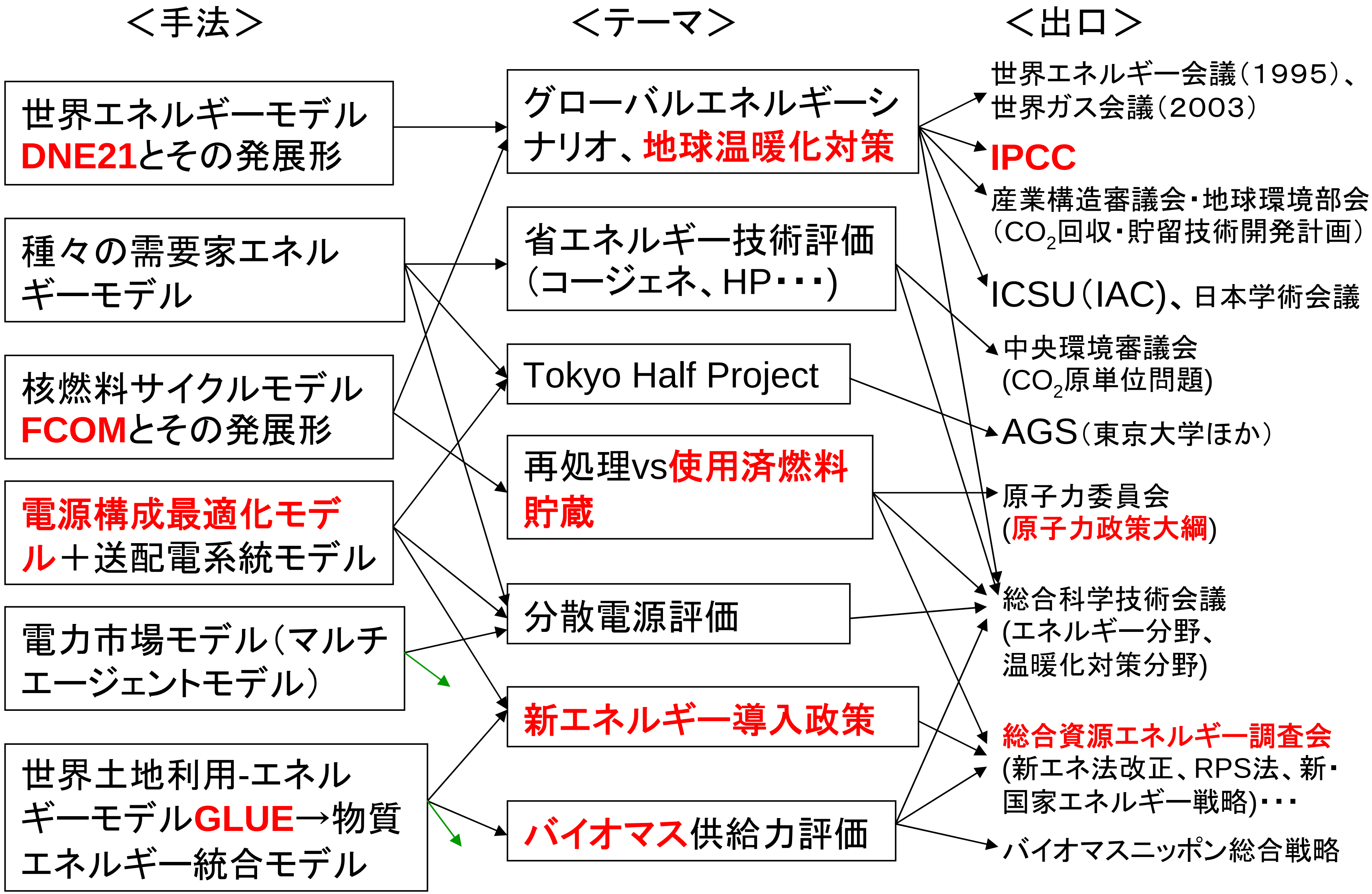
FORECAST21モデルによる炭素税の研究

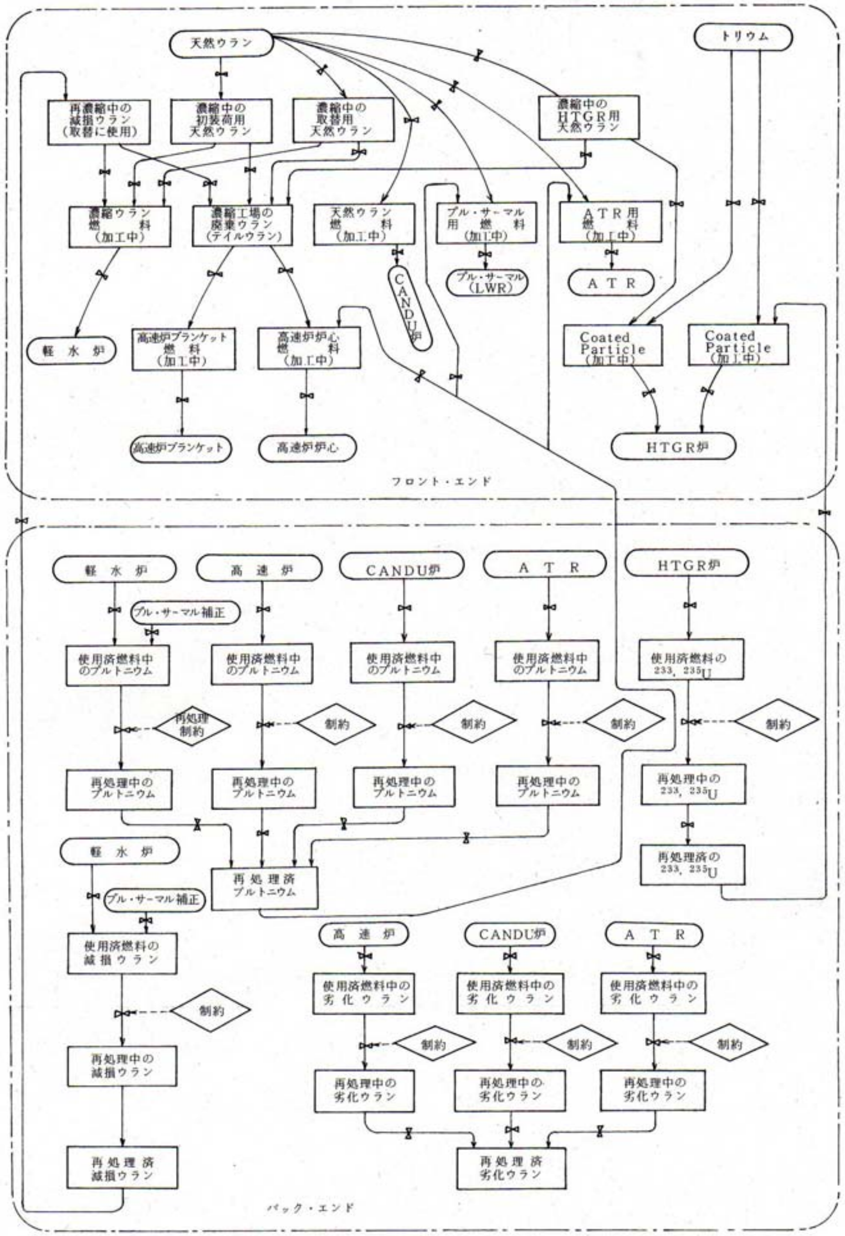
世界エネルギーモデルによるCO_2排出権市場の研究

→ 最適化型世界エネルギーモデルによる地球再生計画の定量表現 ⇒ 地球温暖化政策

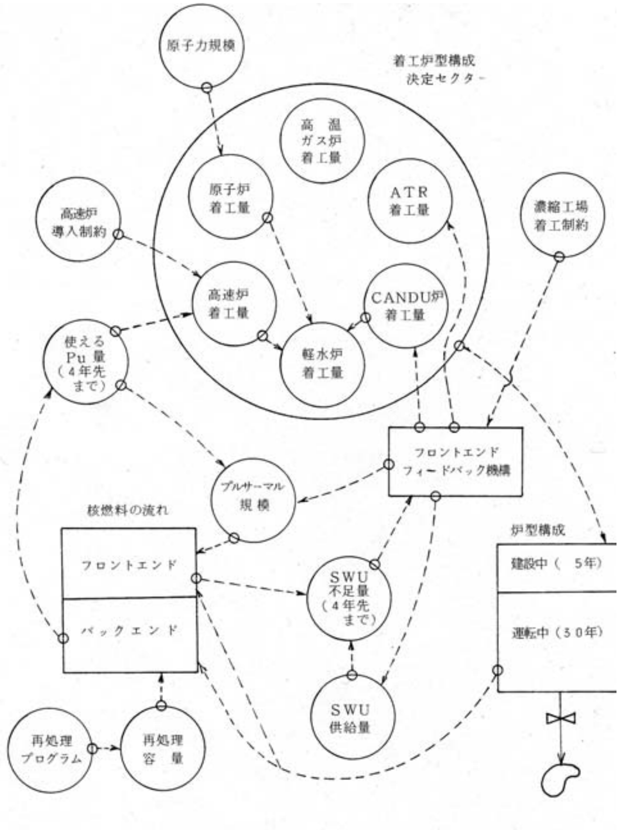
私の研究履歴（2）

東京大学電気（系）工学専攻（1994－2010；1999－2005：新領域・先端エネルギー工学専攻）





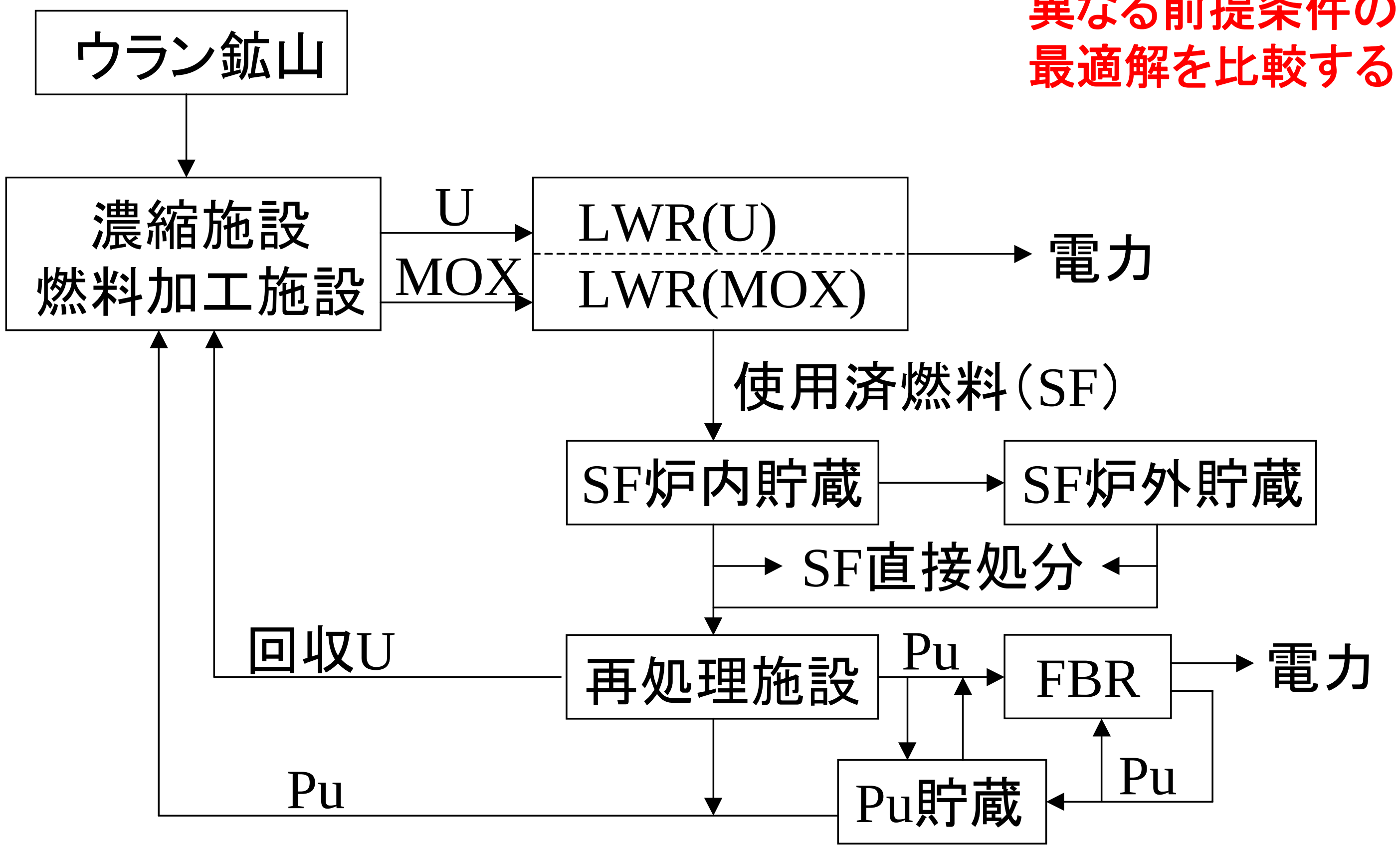
第12図　核燃料のフロー構造概略



第13図　レイトのサブ構造（フロー・コントロール）概略

核燃料サイクルSDモデル

異なる前提条件の下での
最適解を比較する



LWR：軽水炉（**Light Water Reactor**）
MOX：混合酸化物燃料（**Mixed-Oxide**）

SF:使用済燃料**(Spent Fuel)**
FBR:高速増殖炉**(Fast Breeder Reactor)**

核燃料サイクル最適化モデル（FCOM)の概略

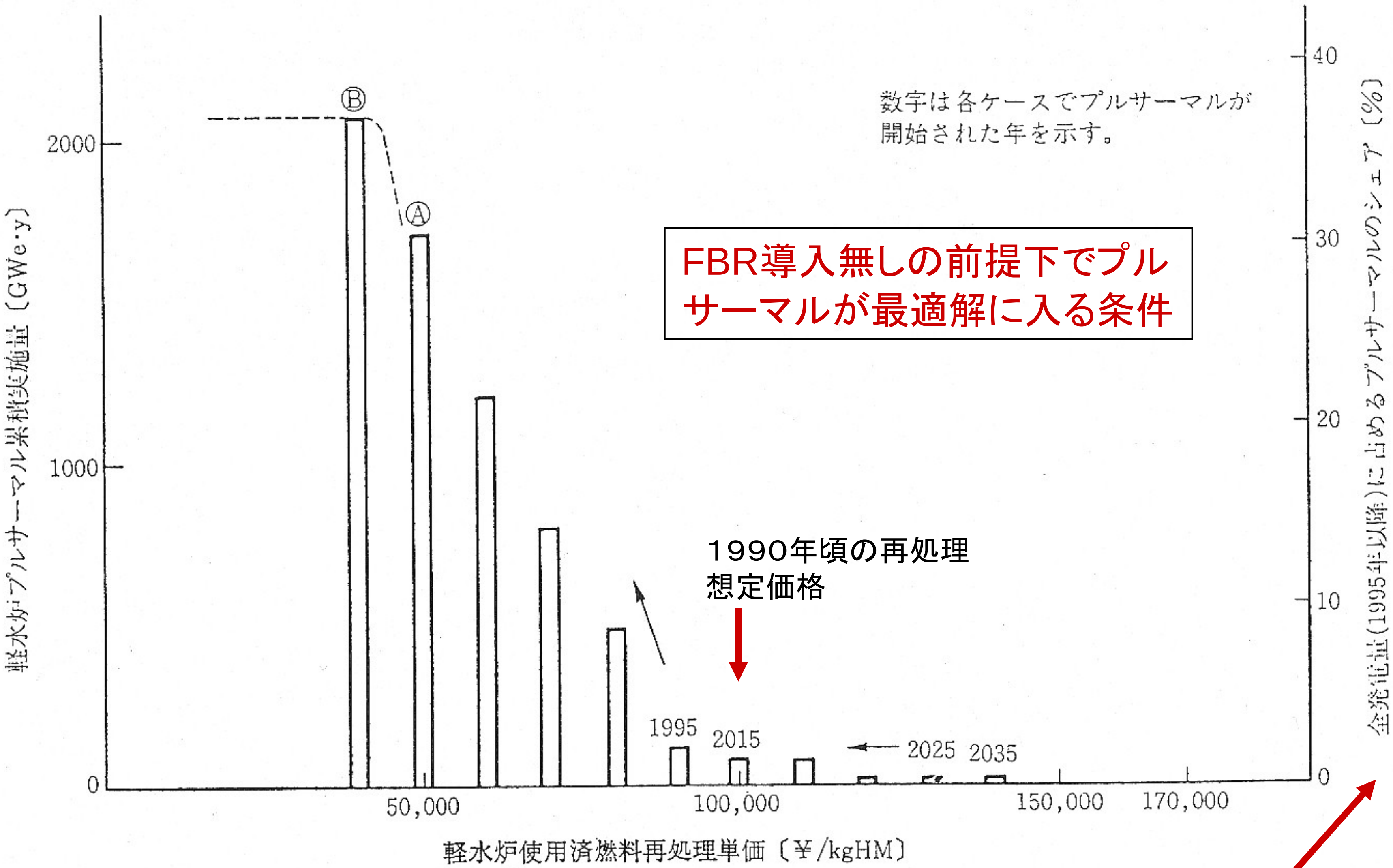


図 3-1　最適解の特性（1）
軽水炉プルサーマル導入条件

現在の再処理想定価格

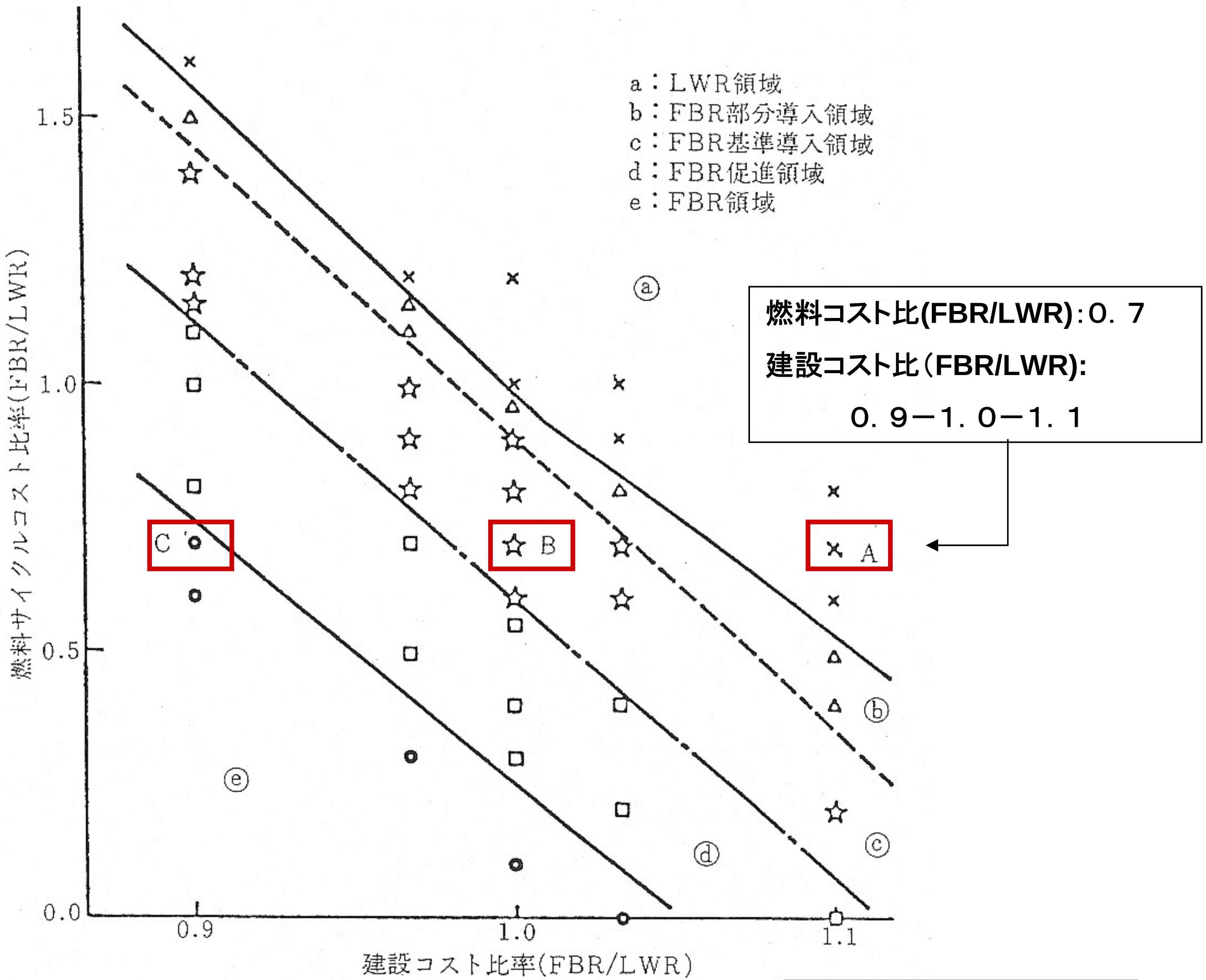


図 3-3　最適解の特性（2 b）
再処理計画の下での高速増殖炉導入条件

六ヶ所再処理が800t/yrで1995年から30年間行われることを前提とした最適化

茅方程式(Kaya Identity)

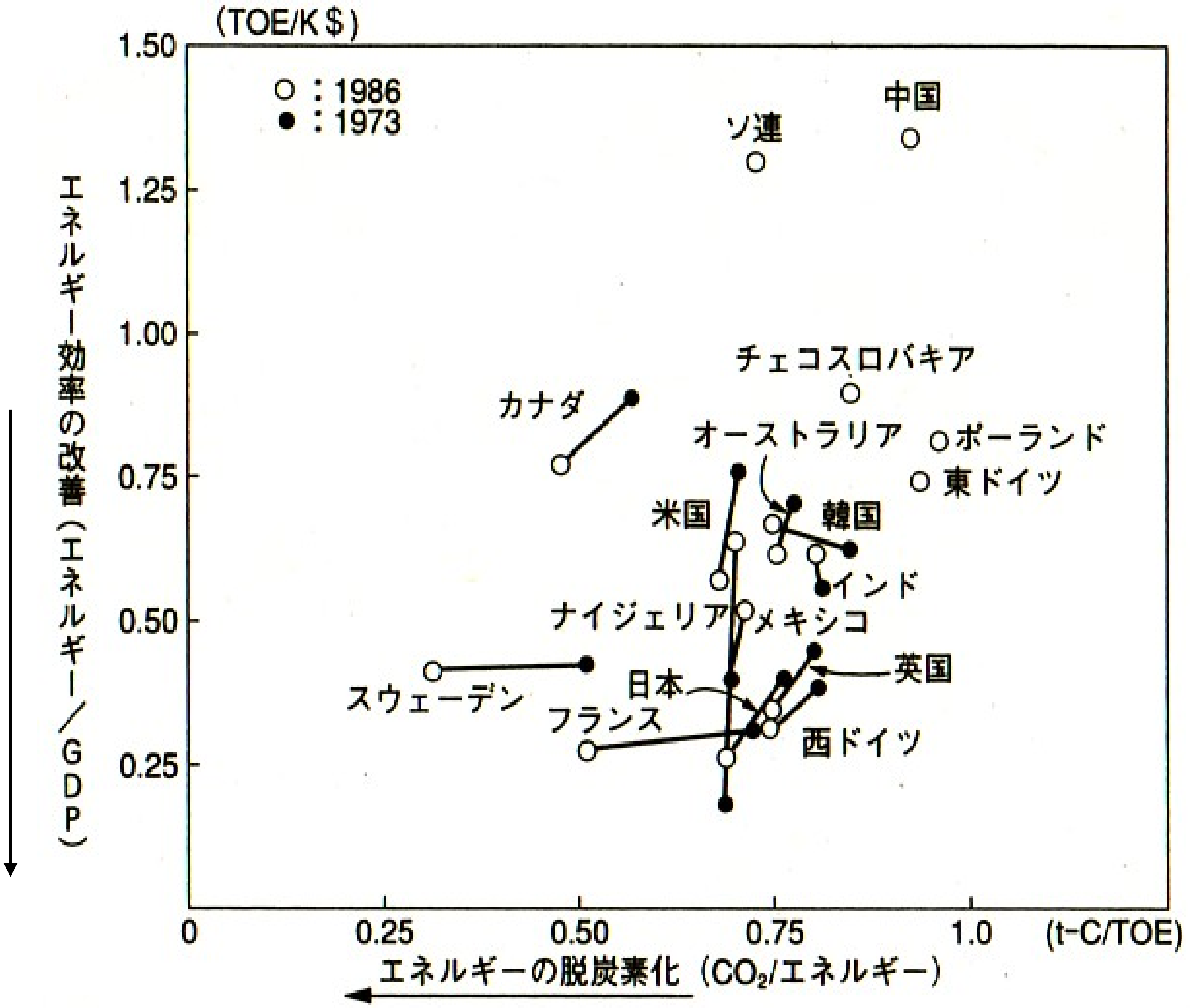
CO_2＝（CO_2 /Energy）×（Energy/GDP）×GDP
ここで、X＝（CO_2/Energy）とすると、Xはエネルギーの炭素強度、つまり、エネルギー源の選択によるCO2削減効果を表す。また、Y＝（Energy/GDP）とすると、YはGDPのエネルギー源単位、つまり、省エネルギーのマクロな指標を表す。ここで、上式の時間微分を行うと次の式が導かれる。

$$\frac{1}{CO_2}\frac{dCO_2}{dt}=\frac{1}{X}\frac{dX}{dt}+\frac{1}{Y}\frac{dY}{dt}+\frac{1}{GDP}\frac{dGDP}{dt}$$

つまり、CO2排出量の増加率は、X（エネルギーの炭素強度）とY（GDPのエネルギー源単位）およびGDPの増加率の和で表現される。

茅方程式の出典：Kaya,Y., K.Yamaji, R.Matsuhashi: Grand Strategy for Global Warming, Proceedings of the Government Symposium on Global Environment, Tokyo, September 1989

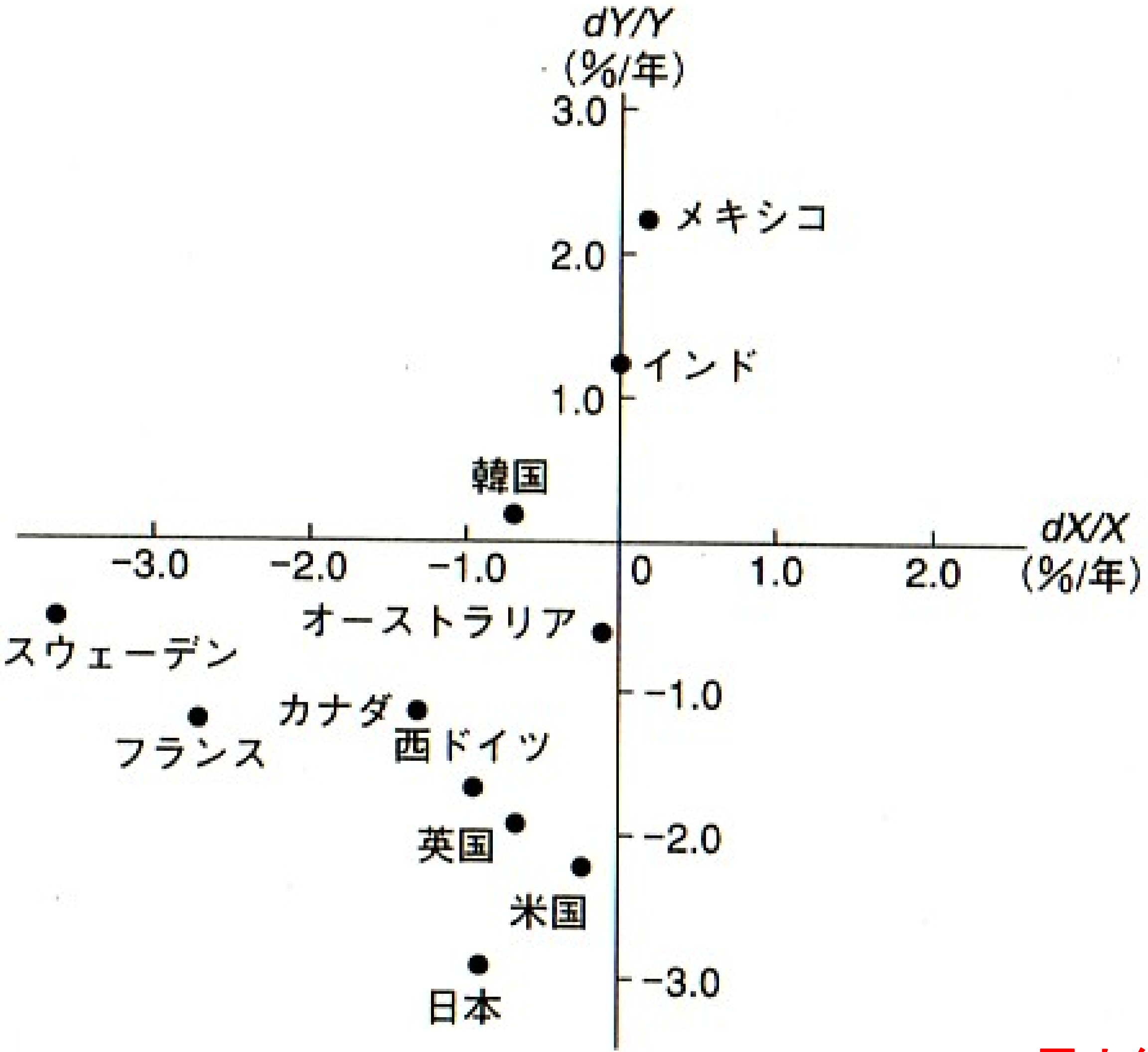
図２－９　CO_2排出削減の努力（1973～86年）



山地憲治　120302

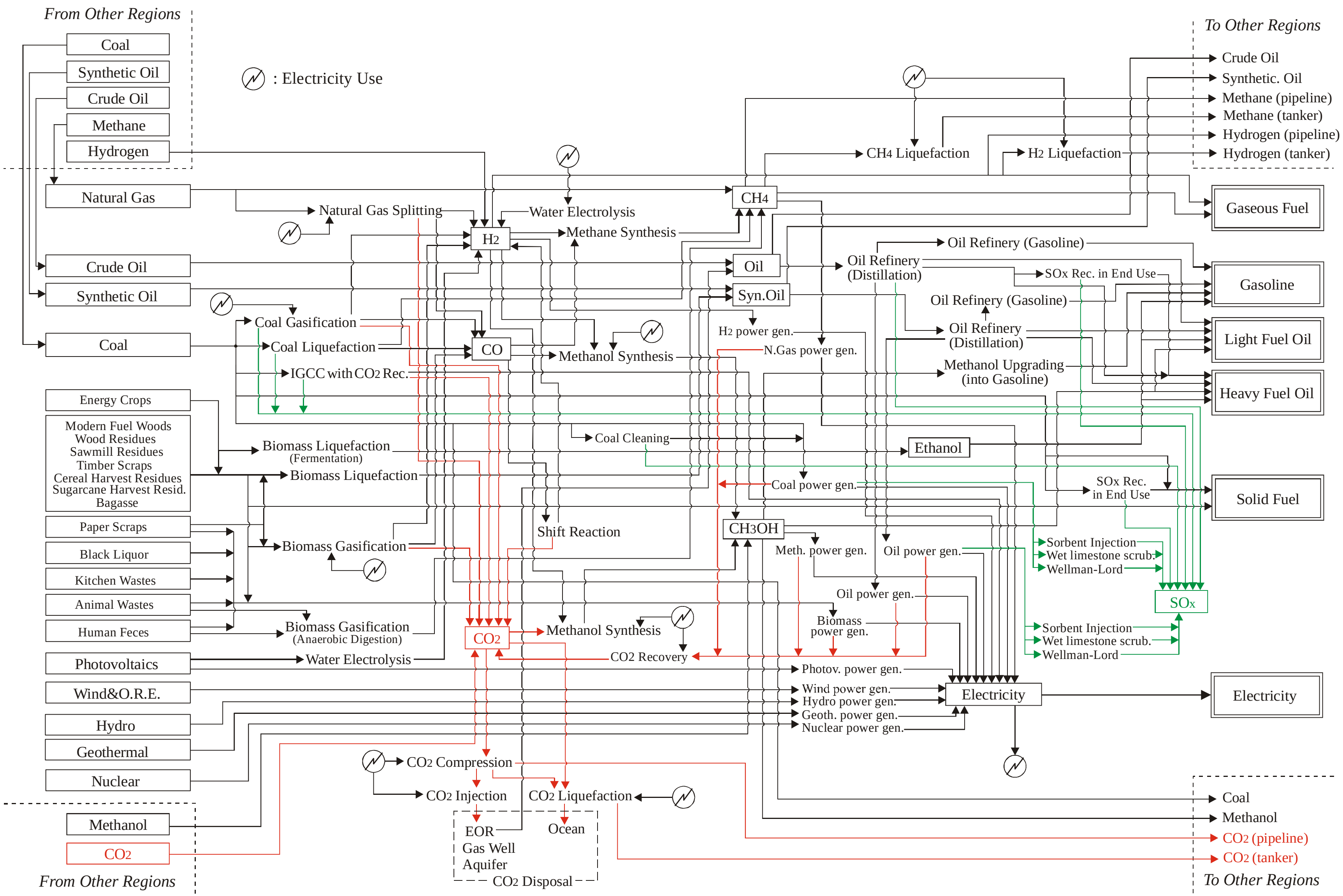
電力経済研究（1990）

図 2 - 10　CO_2排出削減の努力の比較（1973～86年）
$X = CO_2$/エネルギー，　Y = エネルギー/GDP



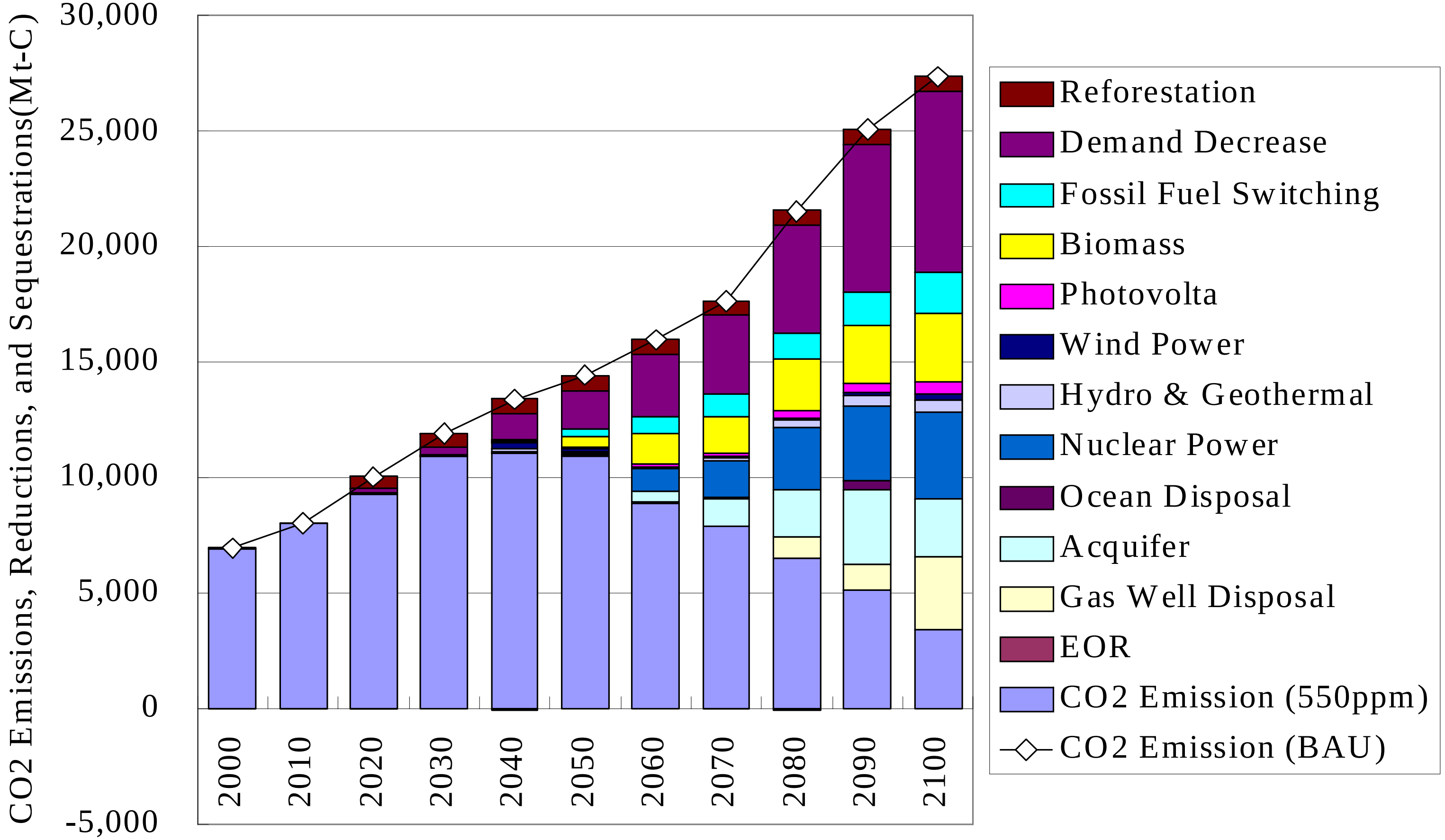
電力経済研究（1990）

DNE21モデルのエネルギーシステム構成



山地憲治　120302

Contributions of each technological option



最近の事例：RPSと固定価格買取制度の数理的双対性による考察

- 目的を費用最小で達成するという最適化問題を設定する：

 －制度を総発電コスト最小化の電源構成最適化問題として記述

 －RPSの場合は再生可能エネルギー導入義務量の下限を制約

 －固定価格買取の場合は、再生可能エネルギー買取固定価格を制御変数（下限制約付き）に加え、買取費用負担をコストに算入

- 炭素税と排出量取引の関係と基本構造は同じ：

 －炭素税が再生可能エネルギーの買取価格、排出量の割り当て総量がRPSの導入義務量に相当

- 主要な結論：

－固定価格買取制度の場合は、再生可能エネルギーの買取価格は一律（下限制約値）にすることが最適。

－再生可能エネルギー導入総量が等しい場合、固定価格買取制度における買取価格は、RPSにおける導入義務量制約のシャドープライスに一致する。

炭素税と CO_2 排出総量制約の双対性

地球温暖化対策として，炭素税や CO_2 排出権取引が提案されている．炭素税は CO_2 排出量に応じて税金を課して排出を抑制するものである．また，CO_2 排出権取引は，全体としての排出総量を決めて，それを各企業などに排出権 (排出枠) として割り当て，個々の排出削減の難しさの程度に応じて排出権を取り引きするというシステムである．CO_2 排出権取引と炭素税とは一見全く異なる方法に見えるが，最適化の数学理論から見れば排出税と排出権取引は双対な関係にあり，排出権取引における売買の均衡価格が同じ排出総量に抑制する効果を持つ炭素税の税率に対応する．これを簡単に解説しておく．

(a) まず，CO_2 排出量制約の下でのエネルギーシステムのコスト最小化を線形計画の主問題として次のように定式化する．

- エネルギーシステムコスト：$z = \boldsymbol{c}\boldsymbol{x} \ \rightarrow$ 最小化
  ここで，$\boldsymbol{x}$：各種エネルギーフロー (n 次元列ベクトル，非負)，$\boldsymbol{c}$：コスト係数 (n 次元行ベクトル)．
- 需給均衡や資源量制約などエネルギーシステムの特性を表す制約式：$A\boldsymbol{x} \geq \boldsymbol{b}$
  ここで，$\boldsymbol{b}$：制約量 (m 次元列ベクトル)，A：制約式の係数行列 ($m \times n$)．
- CO_2 排出量制約：$\boldsymbol{e}\boldsymbol{x} \leq M$，対称双対性の形式に合わせて，$-\boldsymbol{e}\boldsymbol{x} \geq -M$
  ここで，$\boldsymbol{e}$：各種エネルギーの CO_2 排出係数 (n 次元行ベクトル)，M：排出量上限．

これを主問題とする．

(b) この主問題の双対問題は定義により次のようになる．

最大化　$y = \boldsymbol{w}\boldsymbol{b} - w_e M$

条　件　$\boldsymbol{w}A - w_e \boldsymbol{e} \leq \boldsymbol{c}$

ここで，$\boldsymbol{w}$：システムの特性を表す制約式に対応する双対変数 (m 次元行ベクトル，非負)，w_e：CO_2 排出量制約に対応する双対変数 (非負)．

線形計画問題において，主問題と双対問題は 1 対 1 に対応し z の最小値と y の最大値は一致する．また，双対問題の最適解において，双対変数はそれに対応する制約式を通して主問題の最適解 (非負の基底変数で構成) のシンプレックス乗数 (シャドープライス) になっている．ここで，シャドープライスは制約量の変化が最適値に与える影響の大きさの指標である．w_e は CO_2 排出量制約に対応するシャドープライスである．排出権取引の場合，w_e が排出権の理論価格になる (排出権の理論価格はさらに 1 単位の CO_2 削減を行うのに必要な**限界費用**である)．また，w_e はここで与えた CO_2 排出制約 (M) を実現するため理論的に必要な炭素税の水準を表している．次にこれを示す．

出所：山地憲治「システム数理工学」、数理工学社 (2007)

(c) CO_2 排出量を直接には制約しないが，w_e を**炭素税**として課し，この税金支払いもエネルギーシステムコストに加えて最小化する問題を考える．これは，次のように定式化される．

$$\begin{array}{ll} \text{最小化} & z = \boldsymbol{cx} + w_e \boldsymbol{ex} \\ \text{条　件} & A\boldsymbol{x} \geq \boldsymbol{b} \end{array}$$

ここで，$w_e \boldsymbol{ex}$ は炭素税の支払いを意味している．この問題の双対問題を考えると，次のようになる．

$$\begin{array}{ll} \text{最大化} & y = \boldsymbol{wb} \\ \text{条　件} & \boldsymbol{w}A \leq \boldsymbol{c} + w_e \boldsymbol{e} \end{array}$$

なお，ここでは，w_e は双対変数ではなく炭素税率を表すパラメータである．したがって，最大化する y は次のように書き換えてもこの問題の解は変わらない．

$$y = \boldsymbol{wb} - w_e M$$

これは，(b) で考察した双対問題と全く同じ定式になっている．主問題と双対問題は 1 対 1 に対応するので，双対問題が一致するということは主問題同士も一致する．

つまり，最適化理論から見れば，炭素税と総量制約の下の**排出権取引**とは双対な関係にあり，排出権取引における売買の均衡価格が同じ排出総量に抑制する効果を持つ炭素税の税率に対応する．

出所：山地憲治「システム数理工学」、数理工学社 (2007)

IIASA（国際応用システム分析研究所）の活動（1972－）

http://www.iiasa.ac.at/

最新の研究ビジョンと計画: Strategic Plan 2011-2020 Research Plan 2011-2015

研究領域: Energy & Climate Change、Food & Water、Poverty & Equity

現在の研究プログラム: Advanced Systems Analysis、Air Pollution & Climate、Ecosystems、Energy、Evolution & Ecology、New Technologies、Policy & Governance、Risk & Vulnerability、World Population、Extreme Event (Exploratory Projects)

過去の研究プログラム:Greenhouse Gas Initiative; Health and Global Change、Processes of International Negotiation; Population and Climate Change (PCC); Environmentally Compatible Energy Strategies(succeeded by a new energy program); Risk, Modeling and Society; Sustainable Rural Development; Radiation Safety of the Biosphere; Sustainable Consumption; Economic Transition and Integration; European Rural Development; Social Security Reform; Natural Catastrophes and Developing Countries; Decision Analysis and Support; Implementation and Effectiveness of International Environmental Commitments; Regional Material Balance Approaches to Long-Term Environmental Policy Planning; Methodology of Decision Analysis; Optimization under Uncertainty; Risk, Policy and Complexity; Systems Analysis of Technological and Economic Dynamics; Water Resources

経験を通しての雑感

- 科学は専門領域に分断される傾向を持つが、システム科学は諸科学を横断的に理解するメタ認識の枠組みを提供する。しかし、そのような総合化の結果が真実であることを検証する手段はない。また、何の役に立つのか? システム科学の専門家になりたいとは思わなかった。

- 数理モデルは、意思決定構造の概念モデルを定量的に表現できる。これにより、問題を限定すれば現実との比較が可能になり、意思決定の効果を評価できる。これは使えると思った。

- 最適化理論は、設定した境界条件の下での理想形(限界)を示すことが出来る。また、数理的に同型の問題に対する洞察・応用展開も可能になる。これが私の研究の中心。

- 自己組織化(人工生命、人工社会等)モデルは面白いが、応用の出口が見えない(外生パラメータの多いシミュレーションより最適化が好きな理由?)。

- 現実問題への応用からのフィードバックは、数理モデルの複雑化を招く傾向がある。入力パラメータ数が増大し、その設定値に恣意性が増す。モデル構造は合意が得られる範囲で簡単にすべき。現実問題への適用には、結果の解釈で対応すべきだが、それには現実問題の深い理解が必要になる。

- 科学としての正当性には常に悩む。論理が整合するシステム構造は無数に存在し、パラメータ値の設定にも悩む。結果としてモデルと現実との整合性は保証されない(たとえ偶々数値が一致しても)。システム科学の結果が応用を通して現実を変更するという側面もある。現実問題の理解の下で解釈可能な結果を精査する必要がある。